

## 第 II 部 各機関の成果

### 第 2 章

#### 大課題 2 海洋生態系変動メカニズムの解明

#### 東京大学大気海洋研究

第 II 部第 2 章 1～6 節のとりまとめ担当者

各項の執筆者については 7 節「執筆者一覧」を参照のこと。

1. 「はじめに（本課題の概要）」 永田 俊
2. 「海洋広域連続モニタリングシステムと海洋分析セクションの構築」 津田 敦
3. 「地震・津波による生態系攪乱とその後の回復過程に関する研究」 河村知彦
4. 「震災に伴う沿岸域の物質循環プロセスの変化に関する研究」 福田秀樹
5. 「陸域由来の環境汚染物質の流入実態」 小川浩史
6. 「物理過程と生態系の統合モデル」 田中潔

# 目次

1 はじめに（本課題の概要） .....	8
1-1 重点海域における環境・生態系モニタリング .....	9
1-1-1 大槌湾における調査・研究の概要 .....	9
1-1-2 「新青丸」等を用いた三陸沖海域の調査・研究の概要.....	11
1-2 漁業関係者・市民への情報発信 .....	14
2 海洋広域連続モニタリングシステムと海洋分析セクションの構築 .....	18
2-3 研究の概要と成果 .....	18
2-3-1 プレサーベイ .....	18
2-3-2 大槌湾におけるセンサーモニタリング .....	20
2-4 大槌湾における動植物プランクトンの動態.....	27
2-5 大槌湾以外でのモニタリング・観測.....	35
2-6 復興への貢献 .....	39
2-7 引用文献.....	41
3 地震・津波による生態系攪乱とその後の回復過程に関する研究 .....	43
3-1 研究の背景と目的 .....	43
3-2 観測・研究の概要および結果.....	43
3-2-1 グループ1（岩礁藻場の生物群集とエゾアワビの個体群構造） .....	43
(1) 牡鹿半島東岸および大槌湾・船越湾の岩礁藻場における生物群集の変化 .....	44
(2) エゾアワビの行動範囲および産卵期における蝸集行動 .....	45
(3) エゾアワビに対するウミネコの捕食行動 .....	46
(4) 大槌湾の岩礁藻場における生物群集の動態 .....	47
(5) 引用文献 .....	47
3-2-2 グループ2（アユの個体群構造） .....	48
3-2-3 グループ3（大槌湾に回帰するサケ親魚ならびに稚魚の動態） .....	50
(1) サケ親魚の回帰に対する震災の影響 .....	50
• 回帰親魚の長期モニタリング .....	51
• 回帰親魚の生理状態と行動 .....	52
• 岩手県沿岸河川に遡上するサケの遺伝特性分析.....	54
(2) サケ稚魚に関する研究：サケ資源の回復を目指して .....	55
• 三陸河川におけるサケの自然産卵 .....	56
• 大槌湾流入河川におけるサケ稚魚の降海生態 .....	57
(3) 大槌湾内におけるサケ稚魚の分布生態：採集調査から .....	58
• 大槌湾内におけるサケ稚魚の分布生態：環境 DNA 分析から .....	59
• 野田湾におけるサケ稚魚の分布生態 .....	61

(4) 鳥類によるサケの人工孵化放流魚の捕食 .....	62
(5) 北日本に繁殖するウトウによるサケ幼魚捕食量と海鳥をサンプラーにしたサケ研究 .....	63
(6) 温度耐性と海水適応能 .....	64
(7) アウトリーチ活動 .....	65
(8) 引用文献 .....	66
3-2-4 グループ 4 (干潟の巻貝類の遺伝的多様性と集団構造、沿岸性大形底生生物群集、三陸沖大陸棚・大陸斜面の底生生物群集) .....	67
(1) 干潟の巻貝類の遺伝的多様性と集団構造の変化 .....	67
(2) 沿岸性表在大形底生生物群集への津波の影響と回復過程 .....	68
• 沿岸性大形底生生物群集の個体群動態 .....	68
• 三陸海岸におけるタケフシゴカイ科 2 種の個体群構造 .....	69
(3) 巨大地震による三陸沖大陸棚および大陸斜面における底生生物群集の変化 .....	70
• 深海性小型底生生物群集 .....	70
• 三陸沖底生生物の種多様性 .....	70
• 三陸沖に分布する深海性底魚アオビクニン集団の遺伝的構造 .....	71
• 三陸産底魚類の耳石に残された震災シグナルの探索 .....	71
(4) 引用文献 .....	71
3-2-5 グループ 5 (藻場の分布と生物群集) .....	72
(1) 岩手県大槌湾・船越湾の藻場分布・海底地形・ガレキ分布調査 .....	73
(2) 岩手県船越湾におけるアマモ類再生モニタリング .....	74
(3) 藻場生息魚類の行動変化 .....	74
(4) 衛星リモートセンシングによる三陸沿岸の藻場分布モニタリング .....	75
(5) 引用文献 .....	76
3-2-6 グループ 6 (スナメリの分布と個体群構造) .....	77
(1) スナメリの分布と個体数 .....	78
(2) スナメリ出生率の推定 .....	79
(3) スナメリの出産期の評価 .....	79
(4) スナメリ餌生物量の震災前後の変化 .....	80
(5) 引用文献 .....	80
3-2-7 グループ 7 (高次捕食者の行動生態) .....	80
(1) オオミズナギドリの行動生態 .....	81
(2) ウミガメ類の行動生態 .....	83
(3) 魚類の行動生態 .....	84
(4) 引用文献 .....	85
3-2-8 グループ 8 (岩手県沿岸の魚類資源動態) .....	87

(1) 魚類群集の動態 .....	88
(2) 底生生物相の動態.....	89
(3) ヒラメ・マコガレイ稚魚の加入水準評価 .....	90
(4) 引用文献 .....	91
3-2-9 グループ 9 (気仙沼舞根湾および舞根新生塩性湿地の生物群集) .....	92
(1) 気仙沼舞根湾潜水調査 .....	92
(2) 舞根塩性湿地調査.....	93
(3) スズキ稚魚調査 .....	93
(4) 引用文献.....	94
3-2-10 グループ 10 (海草藻場の生物群集) .....	94
(1) 東日本大震災前後のアマモ場の種多様性と生物量.....	95
(2) 震災後のアマモ場の回復過程 .....	96
(3) タイにおける津波の被害を受けた海草藻場の長期変動 .....	96
(4) アマモ場の海草類の遺伝的多様性の変化.....	97
(5) 宮城県気仙沼湾におけるアマモ場の分布状況と種多様性および遺伝的多様性.....	97
(6) 三陸沿岸海草種の遺伝的構造解析への MIG-seq 法の適用検討.....	98
(7) 引用文献.....	99
3-2-11 グループ 11 (岩礁海岸の底生動物群集) .....	99
(1) 岩礁潮間帯生物群集の変化とその後の回復過程 .....	99
(2) 固着生物の個体群動態の変化 .....	100
(3) 地震後の小規模攪乱後からの回復過程の変化.....	100
(4) 引用文献.....	101
3-2-12 グループ 12 (アマモ場の魚類群集) .....	102
(1) 大槌湾根浜.....	102
(2) 船越湾吉里吉里 .....	103
(3) 万石浦西岸.....	104
(4) 引用文献.....	105
3-2-13 グループ 13 (石巻沿岸の藻場・干潟の環境・生物群集) .....	105
(1) 牡鹿半島東岸の岩礁性藻場 (アラメ場) .....	105
(2) 牡鹿半島東岸にあるアマモ類藻場.....	106
(3) 松島湾東部海域にある干潟.....	107
(4) 引用文献.....	108
3-2-14 グループ 14 (干潟域の二枚貝および外来巻貝の個体群動態) .....	109
(1) 宮城県万石浦 (大浜旧潮干狩り場駐車場地先および人工干潟) .....	109
(2) 宮城県松島湾.....	111
(3) 福島県松川浦.....	112

(4) まとめ.....	113
(5) 引用文献.....	114
3-2-15 グループ 15 (大槌湾・越喜来湾・松島湾の底生生物相と付着生物群集) ...	115
(1) 岩手県沿岸域の底生無脊椎動物の多様性と種組成.....	116
(2) 海底岩礁域に生息する固着性動物の成長履歴解析.....	117
(3) 水中垂下物上にみられる固着性動物とそこに棲み込む小型甲殻類の種組成変動 .....	117
(4) 引用文献.....	118
3-2-16 グループ 16 (岩手県南部沿岸域の環境および生物群集) .....	119
(1) 越喜来湾のアマモ場および砕波帯 (波打ちぎわ) に出現する仔稚魚 .....	119
(2) 広田湾小友浦干拓地における生物相 .....	120
(3) 越喜来湾浦浜海岸の潮間帯植物群落調査.....	121
(4) 大船渡、唐丹、越喜来湾沿岸におけるクラゲ類の出現動態と環境に与える影響 .....	122
(5) ヒラメ着底稚魚の出現動態および餌料環境 .....	124
• ヒラメ稚魚の出現時期と密度.....	124
• アミ類の出現時期と密度 .....	125
• ヒラメの摂餌と成長 .....	125
• 安定同位体分析.....	125
• 湾口防波堤再建後の大船渡湾の水質環境の変化.....	126
• 引用文献.....	127
3-2-17 グループ 17 (沿岸水産資源生物の動態) .....	128
(1) 宮古湾内湾 (海草藻場・砂泥域) .....	128
(2) 宮古湾外海 (海藻藻場・岩礁域) .....	129
(3) 仙台湾ヒラメ成育場機能の評価および震災後の変化.....	130
(4) 引用文献.....	130
4 震災に伴う沿岸域の物質循環プロセスの変化に関する研究 .....	132
4-1 研究の概要と成果.....	134
4-1-1 大槌湾の栄養塩類動態の遷移過程 .....	134
4-1-2 大型海藻の放射性炭素同位体比を用いた大槌湾内の水塊履歴の復元.....	139
4-1-3 放射性炭素同位体比を用いた大槌湾底棲生態系における炭素動態の解析 .....	141
4-1-4 環境 DNA を用いた大槌湾魚類相の把握.....	143
4-1-5 三陸沖に分布する水塊の起源および栄養塩類・微生物群集の組成の解析 .....	147
4-1-6 放射性炭素同位体比を用いた三陸沖底棲生態系の餌資源の起源解析.....	151
4-2 復興への貢献 .....	152
4-3 引用文献.....	157

5 陸域由来の環境汚染物質の流入実態.....	160
5-4 研究の概要と成果.....	160
5-4-1 人為起源有機汚染物質.....	160
(1) 大槌湾から沖合における海底堆積物の人為起源有機汚染メカニズムの解明 .....	161
(2) 二枚貝を用いた震災由来人為起源有機汚染物質の空間分布と経時変化.....	166
5-4-2 大槌湾における重金属元素の堆積状況.....	169
(1) 粗大粒子および微小粒子の堆積.....	170
(2) 湾内における粘土鉱物起源金属元素の水平分布 (Al、Ti など) .....	170
(3) 湾内における重金属元素の分布.....	171
(4) 湾内における重金属元素の経年変化 .....	172
5-4-3 二枚貝殻分析による汚染履歴の復元.....	173
(1) イガイ貝殻中の重金属 .....	173
(2) イガイ軟体部中の重金属.....	175
5-4-4 海水中の人為起源微量金属元素 .....	176
(1) 海水中の人為起源微量金属元素の分布と動態.....	176
(2) 海水中の微量金属元素の存在状態 .....	179
5-4-5 陸起源天然有機物の流入実態.....	180
(1) 大槌湾内の堆積有機物中の炭素・窒素安定同位体比等の時系列変化 .....	181
(2) 大槌湾内における柱状堆積物試料中の炭素・窒素安定同位体比等の鉛直分布...184	184
(3) 大槌湾湾口～沖合にかけての炭素・窒素安定同位体比等の分布.....	185
5-5 復興への貢献 .....	187
5-6 引用文献.....	188
6 物理過程と生態系の統合モデル .....	191
6-7 研究の背景と目的.....	191
6-8 研究の概要および結果.....	191
6-8-1 大槌湾における気候値的な物理場解明に資するネスティング手法を用いた数値モデリングと低次生産過程の組み込み.....	191
(1) はじめに .....	191
(2) 手法 .....	193
(3) モデル.....	193
(4) 低次生産過程.....	197
(5) 結果 .....	199
• 冬季の循環 (1月) .....	199
• 春季の循環 (4月) .....	200
• 夏季の循環 (9月) .....	201
• 植物プランクトンの変動と春季ブルーム時の分布 .....	202

(6) 議論 .....	204
(7) 課題と今後の展望.....	204
(8) 参考文献.....	205
6-8-2 海面加熱下の浅海域に見られる潮流海底境界層のスケーリング .....	207
(1) はじめに .....	207
(2) スケーリング .....	208
(3) DNS 実験 .....	209
(4) 実験結果 .....	211
(5) 結語 .....	213
(6) 参考文献.....	213
6-8-3 大槌湾の波浪 .....	215
(1) はじめに .....	215
(2) 風と波浪の同時連続観測・リアルタイムデータ配信システムの構築 .....	216
(3) 湾内の波浪におけるうねりと風波の寄与率の実態解明 .....	218
(4) うねりが風波の発達に及ぼす影響の実態解明.....	220
(5) 湾内を対象とした波浪予測モデルの構築とうねりの起源推定 .....	221
(6) 結論 .....	227
(7) 参考文献.....	227
6-9 研究の意義.....	228
6-10 成果の公表.....	228
(1) 論文 .....	228
(2) 報告文等 .....	229
(3) 漁業復興への貢献、アウトリーチ活動およびその他の関連活動.....	231
7 執筆者一覧.....	232

## 1 はじめに（本課題の概要）

東京大学大気海洋研究所が副代表機関として担当した大課題2「海洋生態系変動メカニズムの解明」では、オールジャパン体制のもとに学際的な研究組織を編成し、被災地の環境や生態系の変動と回復過程を基礎科学的な観点から総合的に明らかにするとともに、得られた成果を地元の漁業関係者、一般市民、科学者コミュニティーに広く発信することを通じて、漁業復興や持続的な漁業の確立にむけての様々な取り組みに貢献することを目的とした。この目的を達成するために、以下の6中課題を設け、それらが密接に連携しながら事業を推進した（カッコ内は中課題班長の担当年度）。

中課題1 連続モニタリングシステムと海洋分析セクションの構築

班長 津田敦（2011-2020）

中課題2 地震・津波による生態系攪乱とその後の回復過程

班長 河村知彦（2011-2020）

中課題3 震災に伴う沿岸域の物質循環プロセスの変化

班長 永田俊（2011-2015）、福田秀樹（2016-2020）

中課題4 陸域由来の環境汚染物質の流入実態

班長 小川浩史（2011-2020）

中課題5 物理過程と生態系の統合モデル

班長 田中潔（2011-2020）

中課題6 海洋生態系の調査研究に関する研究総括

副代表機関（大課題2）代表者 兼 中課題6 班長

木暮一啓（2011-2017）、永田俊（2018-2020）

2011年度から2015年度にかけては岩手大学（課題名：集水域・河川・河口域・沿岸域における化学物質動態の解析）が、また2011年度から2014年度にかけては東京海洋大学（課題名：河口・汽水域および沿岸域における河川水の混合拡散のモニタリングとそのモデル化）が、それぞれ委託研究機関として大課題2に参画した。以上のほかに、国公立大学（北海道大、静岡大、京都大、長崎大、東京農工大、金沢大、愛媛大ほか）、私立大学（石巻専修大、新潟薬科大、東邦大、東洋大、北里大、東海大ほか）、国や自治体の研究機関（岩手県水産技術センター、国立環境研究所、水産研究・教育機構、北海道区水産研究所、産業技術総合研究所、東北区水産研究所、国立科学博物館、海洋研究開発機構、気象庁気象研究所ほか）など20以上の研究機関から120名以上の研究者が本大課題に参画し、研究を推進した。ここでは、中課題6（総括）の観点から、本大課題全体としての取り組みの概要を報告したい。



## 1-1 重点海域における環境・生態系モニタリング

三陸沿岸はリアス海岸として知られる複雑な地形を有し、また、親潮、黒潮、津軽暖水という異なる海流が季節的にその勢力を大きく変化させながら流入・混合するといった顕著な特徴を有する。つまり、地理的・海洋学的にきわめて複雑性に富んだ地域・海域である。この複雑性ゆえに、大地震と大津波が生態系に及ぼした影響の規模や態様、あるいはその回復過程は、それぞれの湾や海岸線の立地（後背地の地質・水文・土地利用等）や海洋・気象条件によって大きく異なることが当初から予想された。そこで、その全貌をできるだけ効果的・効率的に把握するために、重点海域を設定し、そこで総合的なモニタリングを実施する一方で、全国の研究者の協力のもとに、様々な生態系での多面的なモニタリングを合わせて行うという、両面作戦で研究を推進した。ここでは、大課題全体として取り組んだ重点海域である大槌湾と三陸沖合定点における調査概要を報告する。それ以外の個別の湾や海域における研究成果は、各中課題（1～5）の成果報告を参照いただきたい。

### 1-1-1 大槌湾における調査・研究の概要

沿岸（湾）の重点海域として大槌湾を設定した。それは、この湾に隣接する岩手県上閉伊郡大槌町に、東京大学大気海洋研究所附属国際沿岸海洋研究センター（以下、沿岸センター）が設置されており、フィールド研究の足場として利用することができたという理由からである。それに加えて、歴史的な背景もあった。すなわち、沿岸センターの前身である大槌臨海研究センターが1973年に当地に設置されて以来、40年近くの長きに渡り全国の研究者が、様々な側面から大槌湾の研究を行ってきたのである。この背景ゆえに、震災前の大槌湾に関する科学的なデータが蓄積されていたこと、また、長い年月をかけて培ってきた地元とのつながりがあったことは、本事業の推進にとって大変に有利な条件であったといえよう。

しかし残念なことに、沿岸センターは、2011年3月の大津波で壊滅的な被害を受けた（図1-1）。沿岸センターに3隻あった研究用の船艇はすべて流失した。また3階建ての研究棟の1階、2階部分は完全に浸水した。研究スペースとしては、浸水を辛くも免れた3階の一部がなんとか利用できるという状態であった。2011年5月には、震災後初めての大槌湾の調査を実施したが、これは、厳しい状況下にあった地元の漁業者のご厚意のもとに、津波による破壊を免れた漁船を使わせていただくことで、初めて実現したのである。それ以来、本大課題は、自らの研究インフラを復旧・整備しつつ、復興にむけて国、県、町といった各レベルで実施される様々な取り組みと協調・連携しながら、事業を推進した。2018年3月には、沿岸センターの新研究棟が高台の

造成地によろやく再建され、同年7月からは、新たな宿泊棟とともに共同利用に供されることになった（図 1-2）。震災から実に7年以上が経過してからのことであった。



図 1-1 2011年3月11日の大津波により壊滅的な被害を受けた沿岸センター。辛うじて被害を免れた3階の一部をリフォームし、2018年に新研究棟が高台に建設されるまでの間、本大課題の調査研究の足場として利用した。



図 1-2 2018年に再建された沿岸センターの実験棟と宿泊棟。（撮影 菊地 眞悟）

大槌湾においては、主に小型船艇等を用いた調査と、各種測定機器を用いた環境計測を総合的に実施した。その概要は表 1-1 にまとめたとおりである。これらの取り組みによって集められた情報は、震災後の湾内の生態系や環境の状態とその回復過程を正確に把握するうえで重要な基礎となるものであり、また、漁業復興や持続的な漁業の確立に向けての様々な取り組みにとって不可欠な、科学的根拠を与えるものとなった。

表 1-1 重点海域である大槌湾における主な研究項目

研究項目	主に担当した中 課題
浮遊生物群集動態	1
自動計測装置を用いた環境パラメータの時系列観測	1, 5
付着性底生生物組成	2
底生生物の動態	2
環境 DNA によるサケ稚魚の分布動態	2
大槌湾に来遊したサケ親魚の行動解析	2
同位体を用いたサケの回遊履歴解析	2, 3
アマモ場の再生過程	2, 3
海鳥によるサケ稚魚食害調査	2
栄養塩類の動態	3
細菌、ウイルス数の変動	3
炭素 14 をトレーサーとしたワカメの生育環境調査	3
陸起源有機物の動態	4
微量金属の分布	4
貝殻を用いた汚染履歴の復元	4
水温モニタリングとデータ配信	5
湾内の海水循環のメカニズム	5
大槌湾の物理モデルの構築	5
大槌湾の生態系モデルの構築	5
湾口域における物理過程の解明	5

### 1-1-2 「新青丸」等を用いた三陸沖海域の調査・研究の概要

三陸沿岸の沖合部において地震と津波の影響を調べるためには、研究船を用いた調査が不可欠である。本大課題では、大槌湾と女川湾の沖に設定した2つの調査線を中心に、湾内（大槌湾、釜石湾、女川湾）と湾外に定点を設置し（図 1-3）、2012年4月～5月にかけての学術研究船「淡青丸」の研究航海を皮切りに定点調査を開始した。「淡青丸」は学術研究船として1982年に竣工し、2012年の時点では、建造から30年に達していた。これは一般的な海洋調査・研究船の耐用年数とされる約20年を大きく超えており、代船についての検討が進められているところだった。そのような中で、東日本大震災に

よる被害への対応と中・長期的復興のための大規模予算編成措置がとられ、平成 23 年度第三次補正予算の中で「東北海洋生態系調査研究船」の建造が認められることになった。この船は、震災域の海洋生態系調査を当面の主要なミッションとするものの、「淡青丸」の後継船の性格も有するものとして位置付けられた。すなわち、「淡青丸」と同様に、学術研究船として共同利用・共同研究の枠組みで運行していくこととされたのである。そのミッションにふさわしい新たな船名として「新青丸」と命名された船は、大槌港を船籍港とし、2013 年の竣工以来、本大課題の調査研究のプラットフォームとして大いに活躍することになった(図 1-4)。「淡青丸」、「第三開洋丸」(「淡青丸」の退役から「新青丸」の就航までの空白を埋めるために用いた備船)、「新青丸」を用いて、本大課題が中心となって実施した研究航海は 26 航海に達した(表 2-2)。

これらの研究航海では、三陸沿岸域の水産資源の変動に大きな影響を及ぼす環境や生態系の特性(水温、塩分、栄養塩濃度、浮遊生物、底生生物等)を明らかにした。これらを通して、これまで情報の乏しかった、三陸沖合域の生物生産維持に関わる諸要因(一次生産、栄養塩濃度、水温変動)についてのデータが大幅に整備・拡充されるとともに、黒潮、親潮、津軽暖水という 3 海流が複雑に混ざり合う当該海域における生態系の維持・変動機構の理解を深化させることができた。得られたデータや知見は、同海域の生態系モデルや水産資源変動予測モデルの高度化のうえで不可欠な基礎情報であることから、事業終了後も、広く活用されることが期待される。

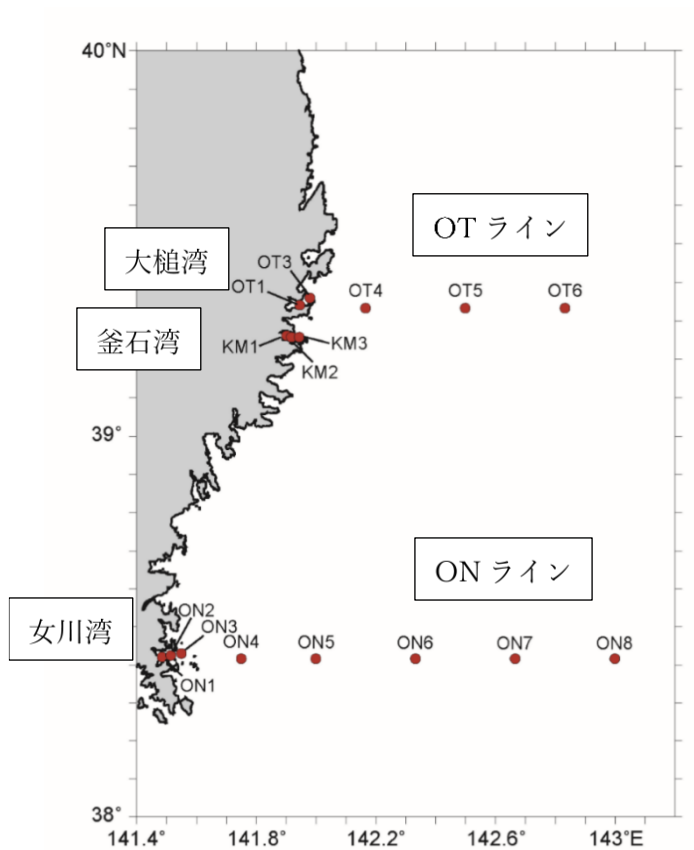


図 1-3 本大課題において環境・生態系モニタリング調査を実施した定点。大槌湾と女川湾の沖に設定した2つの調査線 (OTラインとONライン) に加え、大槌湾、釜石湾、女川湾の各湾内に定点を設置した。


 東北海洋生態系調査研究船 (学術研究船) 新青丸  
1,600トン、2013.12竣工、所属：海洋研究開発機構



図 1-4 東北海洋生態系調査研究船 (学術研究船) 新青丸

表 1-2 本大課題が中心となって実施した三陸海域の主な研究航海（基本観測項目は、CTD 採水、栄養塩類、各態有機物等。これに加えて浮遊生物、微生物、底生生物の採集を実施した）。

実施期間	研究船名	航海コード
2012/4/28-5/3	淡青丸	KT-12-8
2012/8/7-8/12	淡青丸	KT-12-20
2012/10/15-10/22	淡青丸	KT-12-27
2013/1/19-1/25	淡青丸	KT-13-02
2013/6/24-7/5	第三開洋丸	KK-13-01
2013/9/14-9/21	第三開洋丸	KK-13-06
2013/12/8-12/16	新青丸	KS-13-01
2014/3/12-3/19	新青丸	KS-14-02
2014/4/14-4/21	新青丸	KS-14-04
2014/8/9-8/15	新青丸	KS-14-14
2014/10/9-10/15	新青丸	KS-14-19
2015/3/5-3/10	新青丸	KS-15-01
2015/8/2-8/9	新青丸	KS-15-10
2015/9/29-10/4	新青丸	KS-15-12
2016/3/16-3/22	新青丸	KS-16-01
2016/11/10-11/17	新青丸	KS-16-18
2017/3/3-3/10	新青丸	KS-17-01
2017/4/9-4/16	新青丸	KS-17-03
2017/7/30-8/6	新青丸	KS-17-06
2017/10/2-10/9	新青丸	KS-17-12
2018/3/3-3/8	新青丸	KS-18-02
2018/7/22-7/30	新青丸	KS-18-08
2019/3/16-3/26	新青丸	KS-19-04
2019/5/1-5/10	新青丸	KS-19-07
2019/10/8-10/16	新青丸	KS-19-20

## 1-2 漁業関係者・市民への情報発信

本大課題が実施した調査・研究によって得られた科学的情報を、漁業関係者に役立ててもらうために、さまざまな取り組みを行った。ここには主な例のみを紹介する（詳細

については中課題1～5の報告を参照のこと)。

まず中課題5を中心に、大槌湾の湾内に設置した得られた深度別の海水温データ等を、漁業者が出漁や養殖漁業の参考にできるように、リアルタイムで、インターネットを通じて公開するシステムを構築し運用した。また、漁業者の要請に基づいて海流の調査を行い、その結果をわかりやすく解説するといった活動も行った。

一方、中課題3を中心に、新おおつち漁協の組合員が大槌川・小槌川の河口部周辺に設置している養殖いかだ周辺での調査を月に一度の頻度で実施し、その結果にこれまでの知見を基にした解説を加えた「大槌湾漁場海況速報」を組合員に毎月配布する取り組みを実施した。

中課題2では、漁業者が海鳥によるサケ稚魚の食害について懸念していたことから、海鳥によって捕食されているサケ稚魚尾数を推定し、食害に関する詳細なデータを提供した。意見交換をとおして、科学的根拠に基づいて食害の程度を説明するとともに、食害が起きる環境条件を明らかにし、今後の具体的な対策案を立てることができた。

さらに、岩手県の主要水産物のひとつであるサケの孵化放流事業に関わる漁業者と、研究者や自治体関係者の間での情報交換を促進するフォーラムとして「サーモンカフェ」を開催した(図1-5)。このイベントは2012年より毎年開催され、本大課題の研究者によって行われたサケ研究の最新の成果を、漁業者に直接伝えるとともに、漁業者のニーズを把握する場として大変有効に機能した。

市民公開講座  
三陸サケの復興を願って

# サーモン・カフェ2017

6<sup>th</sup> Salmon Café

と き：2017年6月14日(水) 13時30分～6月15日(木) 11時  
ばしょ：エスポワールいわて  
〒020-0021 岩手県盛岡市中央通1丁目1-38  
<http://espoir-iwate.com/>

6月14日 13時30分～17時

### とびつく・せつしよん(仮題)

- 浦和 茂彦 (北水研) 「北太平洋におけるサケマス類の資源状況と国際サーモン年紹介」
- 宮腰 晴之 (道総研さけます内水試) 「最近の北海道のサケの資源動向」
- 松谷 紀明 (青森県内水面研究所) 「青森県におけるサケの来遊状況と閉鎖循環型サケ卵管理システムの可能性」
- 太田 克彦 (岩手水技セ) 「岩手県におけるサケ資源の動向とサケ稚魚顔科比較試験について」
- 白石 一成 (宮城県) 「宮城県におけるサケの回帰状況」
- 塚越 英晴 (岩手大) 「三陸岩手のサケマスの遺伝特性」
- 清水 幾太郎 (北水研) 「サケマス類の国際市場価値と日本産サケの商品戦略」
- 青山 潤 (東大太気海洋研) 「南限のサケ研究」
- 柳山 雅秀 (北大) 「2016年のサケ来遊を振り返って」

6月15日 9時～11時

### 何でも「ムナスペー」

- Dr. さーもん 問答集かい?—あなたが主役  
田老町漁協技術紹介、鳥による捕食、食とサケ、サケと文化……  
(コーディネイター：青山潤・柳山雅秀)

主催：「サーモン・カフェ」実行委員会  
後援：(一社)岩手県さけ・ます増殖協会

※この催しは「東北マリンサイエンス拠点形成事業」により開催しています。

図 1-5 サーモン・カフェのポスター

以上に加えて、漁業者や一般の人々への情報発信のために、さまざまなイベントやアウトリーチの取り組みを行った。

2014年からの発行された「メーユ通信」は、本事業の成果を伝える媒体として重要な役割を果たした。この冊子は、事業の期間を通じて全部で15号を発行し、大槌町・釜石市・山田町・宮古市の小中高等学校や漁協、さらに盛岡市や首都圏、全国も含む学校や研究機関に送付したほか、本事業のイベントの際に配布した。「メーユ」と名付けたマスコットを使い、時にはインタビュー形式で、また時にはレポーター形式で、本事業の取り組みや成果を分かりやすく伝えた（図 1-6）。



図 1-6 メーユ通信のひとコマ。「新青丸」研究航海の様子をレポートするメーユ。

平成 30 年度からは、東京大学教育研究プロジェクトとして、大気海洋研究所と、東京大学社会科学研究所が共同で、「海と希望の学校 in 三陸」（以下、「海と希望の学校」という事業を開始した。これは、三陸の海や風土、文化について調べるとともに、その成果を地域の住民や生徒たちに伝えることで、地域に「希望」を育む人材を育成することを目的とした文理融合型の事業であった。本大課題により得られた科学的な成果を、



「海と希望の学校」の取り組みの中で活用することを通じて、漁業復興にも貢献する大きな相乗効果が期待されたことから、それぞれの事業の目的や切り口の違いを整理したうえで、被災地での成果発信において密接な連携をした（図 1-7）。



図 1-7 「海と希望の学校 in 三陸」の取り組みを紹介するメニュー通信

## 2 海洋広域連続モニタリングシステムと海洋分析セクションの構築

### 2-3 研究の概要と成果

#### 2-3-1 プレサーベイ

日本大震災によってもたらされた海洋生態系への影響は、津波による直接的・物理的攪乱、陸上からの瓦礫や化学物質の流出、震源域近傍における深海底の擾乱など、極めて広範囲に渡っており、海洋生物の生息環境そのものが脅かされていることが危惧された。さらに、津波の直接的な生態系影響に引き続き、陸上の施設（下水処理施設、工場群、生活排水、防潮堤など）の改変に伴う影響、人口分布や人間活動の変化に伴う影響など、時間スケールや空間スケールの異なる攪乱が沿岸海洋生態系に影響し続け、震災から9年が経過した現在も継続していると考えられる。津波の被害は特に太平洋に面した東北4県（青森県、岩手県、宮城県、福島県）および茨城県において甚大であった。これら5県の海岸線の総延長は1,862kmにも達し（青森県は太平洋岸以外も含む）、そこで育まれていた豊かな沿岸海洋生態系における津波被害の実態・全容は未だ明らかにはなっていない。また、津波による被害は東北4県で均一ではなく、湾による差、湾の向きや、地形、基質の差などによって、大きく被害の差があると想定された。さらに回復の過程も一方方向ではなく、複雑な過程を経る可能性があった。

沿岸域の総合的理解は、流況、水温、塩分、酸素濃度、栄養塩、プランクトンなどの諸パラメータを平面的あるいは三次元的に連続的に取得すると同時に、生物、化学的プロセスを明らかにし、それらを統合してモデル化していくことにより得られる。今回の津波被害は、北部三陸から常磐沖にかけての広い範囲に及ぶ上、湾の特性によって湾ごと、さらには湾内でも位置によって被害の程度や性質が大きく異なることが予想された。

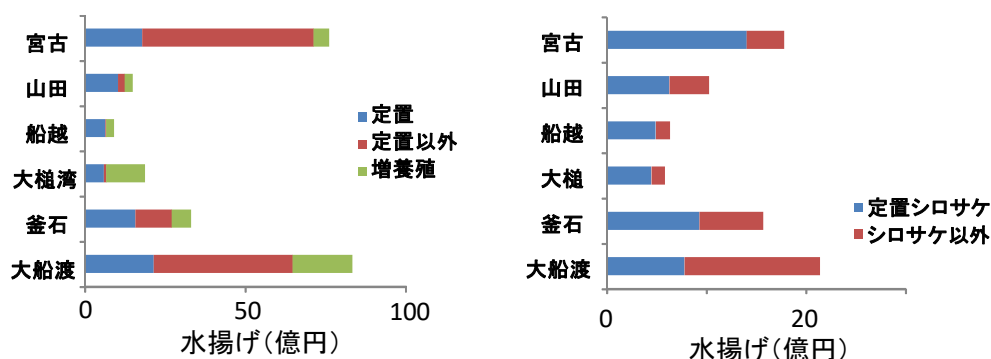


図 2-1 三陸各湾における漁業形態別水揚げ (左) および定置網漁業におけるサケの割合 (右) (岩手大漁ネットより集計、平成 22 年度)

したがって、津波による生態系および物質循環への擾乱の影響とそこからの回復変化過程を解明し、適切な施策につなげるためには、沿岸海洋に特徴的な時空間スケール（外洋に比べてはるかに小さい）での観測・モニタリングでかつ、広範囲で多くの環境下でのモニタリングが必要である。そのため、研究船による沿岸域および沖合域での継続的な観測と同時に、船舶では観測できない浅海域における短い時間・空間スケールの変動を観測する必要がある。

また、これらモニタリングと並行して、過去蓄積データとの比較、生態系構成生物の基盤的生理生態研究を進めることによって、復興に結びつける成果を取りまとめることを本稿では意識した。

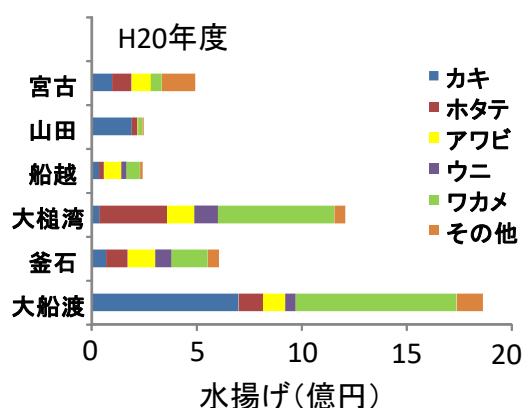


図 2-2 三陸各湾における海面養殖による水揚げ  
(岩手大漁ネットより集計)

三陸沿岸は、一般的にリアス海岸と呼ばれ、小規模な湾が南北に多く並んでいる。接する外洋は、共通して津軽暖流域であり、季節的には親潮、沿岸親潮の影響下にある。漁船漁業、海面養殖ともに盛んな地域であり、水産業は三陸沿岸の経済を支える重要な産業である。しかし、各湾の地理的な特徴などから、漁業形態は各湾で大きく異なる。各湾の震災前の水揚げを見

てみると定置網が大きな比率を占め、その中でもサケの売り上げに占める割合が高いのが見て取れる (図 2-1)。また、定置網以外では、サンマなどの沖合漁業が占める割合が高く、これらの比率が高いのは宮古湾、大船渡湾であり、生態系というよりは、流通における利便性やインフラに依存していると考えられる。一方、海面養殖業では、ワカメ、カキ、ホタテといった無給時養殖が盛んであるのが三陸沿岸の特徴であり、これらも湾によって特徴的であり、大槌湾ではワカメが海面養殖の主力であるが、山田湾ではカキが主な対象生物となっている (図 2-2)。これら水産重要生物の生産性は例えば、ワカメであれば水温、塩分、栄養塩、ホタテ・カキであれば水温、塩分に加え、餌となる植物プランクトンの海洋環境によって大きく作用されると考えられる。一方、漁獲生物の重要種であるサンマ、スルメイカは三陸沿岸の生産性というよりは、沖合海域の水塊分布、海盆スケールでの生産性、産卵域・生育域での海洋環境が重要であろう。さらに、定置網漁業の重要種であるサケに関しては、上記沖合域での生産性に加えて、沿岸滞留期における餌環境や捕食者環境が初期生残に大きな影響を及ぼすと考えられる。代表的な湾の漁業特性と重要な環境要因を整理すると表 2-1 のようになる。

表 2-1 三陸における漁業と環境要因の関係

重要漁業	特徴的な湾	重要環境要因
定置網	共通	サケの重要性 気候、河川環境、孵化放流
定置以外の漁業	大船渡、宮古	インフラ、市場原理、外洋環境
カキ・ホタテ	山田、大船渡	粒子(植物プランクトン供給)環境
ワカメ	大槌、大船渡	栄養塩環境(外洋水、都市部からの供給)

以上のような背景から、三陸の漁業の復興にとって重要な環境要因は、水温・塩分など物理パラメータに加え、栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトンが重要であると考えられた。本チームでは、これら重要パラメータの、大槌湾および三陸沿岸のいくつかの湾で行ったモニタリングや研究調査の概要についてまとめたものである。

### 2-3-2 大槌湾におけるセンサーモニタリング

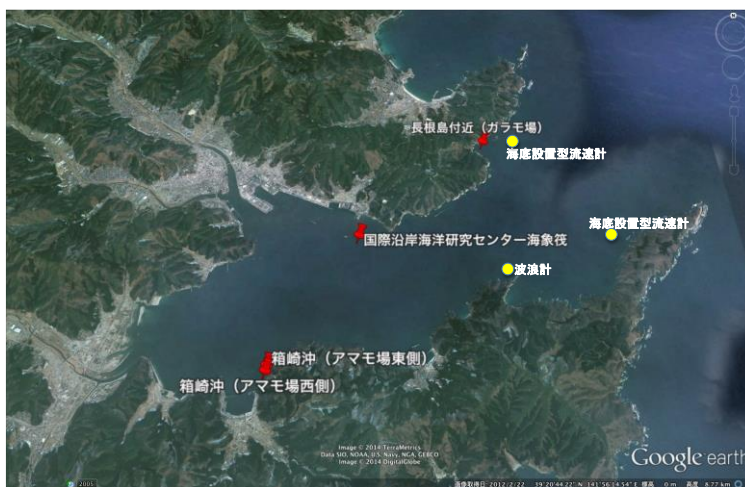


図 2-3 大槌湾におけるセンサー観測点配置

2012 年秋季より、センサー群の係留による環境モニタリングを実施した。系統別では、水温・塩分、クロロフィル蛍光、栄養塩(リン酸塩)、流速・流向を測定する多項目センサーをセンター筏、南岸アマモ場(2点)、北岸ガラ藻場に設置し、箱崎沖に波浪ブイ、湾口部に改定設置型流速系を配置した(図 2-3)。センター筏におけるモニタリングは最も長く欠測も少なく継続されており、水温データは漁業者に配信されるようになっている(図 2-4)。

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
センター筏 (水温)								
センター筏 (多項目センサー)								
波浪ブイ								
アマモ場西 (多項目センサー)								
アマモ場東 (多項目センサー)								
ガウ藻場 (多項目センサー)								
箱崎沖 (多項目センサー)								
湾口流速計								

図 2-4 各センサー観測の継続状況 (有色部は観測)

多項目センサーに組み込まれた栄養塩センサーの観測値はクオリティコントロールが終了していないが、2012 年から 2017 年までの約 5 年間の継続観測が実施され、リン酸塩は夏場に低く、冬場には鉛直混合のため上昇する様子および春季に親潮の流入により高い値が観測され、春季の珪藻ブルームによって消費される様子が観測された。また、当初湾南岸では河川水による栄養塩供給があり北岸に比べ高くなる予想があったが、ほぼ南北は同期的に季節変動し、値的にも優位な差はないことが明らかとなった。さらに、夏場においては淡水の流入に同期して、値が高くなることが確認されている (図 2-5、図 2-6、図 2-7、図 2-8)。また、クロロフィルセンサーは初期の段階では観測が 1 か月を超すと異常値を観測したが、これはセンサー前面に海藻類が付着・繁茂するためと考え、光路を銅製の網で囲う処置を施したところ (図 2-9)、明らかな異常値は観測されなくなり、冬季から春季にかけて 2 回のピークが観測され (図 2-10)、現場観測とも一致している。このようなセンサー観測は隔月の船舶調査では把握できない短い時間スケールでの現象を明らかにすることが出来た。センター筏の水温観測値は 2012 年度からウェブ上でリアルタイム配信されている。

湾口で 2012 年度から継続している流況と水温・塩分の係留観測からは、大槌湾の循環の季節変動、津軽暖流や親潮の影響、潮流鉛直構造の特性等が明らかとなった。また、観測データは、モデル班が構築した大槌湾内外の循環を再現する数値モデルの高精度化にも寄与した。また、大槌湾の波浪は、2012 年 10 月の波浪計設置以来 4 年半の連続観測を通して、年と季節を問わず、観測される波浪の全エネルギーの 7 割程度が沖合から南西方向に向けで伝播して来るうねりの成分でありさらに、湾内の波浪に強く影響を与える海域は、リアス湾に特徴的な湾口部の地形的な遮蔽効果が直接及ばない、湾口が開いた方向の沖合海域であることが定量的に示された。さらに、2018 年 7 月に赤浜沖に GPS 波浪ブイ (図 2-3) を設置し、波浪観測を実施した。この観測では、2012 年 10 月から 2017 年 6 月まで実施した長崎沖での観測結果と比較して、湾内での波浪の変調・変形過程の実態を把握することを目的とした。その結果、湾口に近い長崎沖での観測値との大きな違いが波向に現れた。長崎沖では、有義波の平均波向が季節に関わらず 240 度だったのに対して、今回観測した赤浜沖では 270 度と 30 度異なり、真西に伝播して行く成分が支配的であることが分かった。湾口部で 240 度の方向に伝播して来たうねりが、赤浜沖では 270 度の方向に伝播しており、その要因として、浅海効果により、うね

りが屈折し、その波向が変化している可能性が考えられた。屈折過程の詳細については、波浪ブイから得られた波浪エネルギーの2次元スペクトルを現在解析中である。

また、長崎沖における栄養塩計（硝酸塩計）の係留観測では、硝酸塩濃度の変動は、季節変動を除くと、表層、底層ともに10日周期以下の短周期変動が卓越しており、その変動の要因として、通常は湾内への津軽暖流水の流入が支配的であることが、水塊解析により明らかになった。さらに、湾内の硝酸塩濃度は、湾内表層水に対して硝酸塩濃度が比較的高い津軽暖流水の貫入の程度に依存することも分かった。ただし、冬季の底層では、低温・低塩分の親潮系水の貫入の影響が強いことも明らかになった（図 2-11）。

また、冬季から春季において観測される親潮の流入は、年による変動が激しいことが長期観測により明らかとなった。例えば、2017年冬季の水温は約8°Cまでしか低下せず、塩分の低下も顕著ではなかったことから、2016年と同様に、湾内への明確な親潮の流入はなかったと判断された。一方、クロロフィルa濃度は例年と同様に3~4月に顕著な増加が見られ、植物プランクトンの春季ブルームが認められた。このことから、親潮の湾内への流入は、大槌湾での春季ブルームの形成に必要な絶対条件ではないことが推測された（図 2-8）。今後、各年の春季ブルームの規模（クロロフィルa濃度の高低）と親潮流入との関係性について、これまでのデータを整理して検討する必要がある。一方、2019年2月に沿岸親潮の接岸によって湾内の水温が一晩の間に約5°C低下する現象が観測された。これらのモニタリング・観測は、大槌湾における流動場の解明（Ishizu et al. 2017, Tanaka et al. 2017, 田中ら 2017）や数値モデリング（Sakamoto et al. 2017）に生かされた。

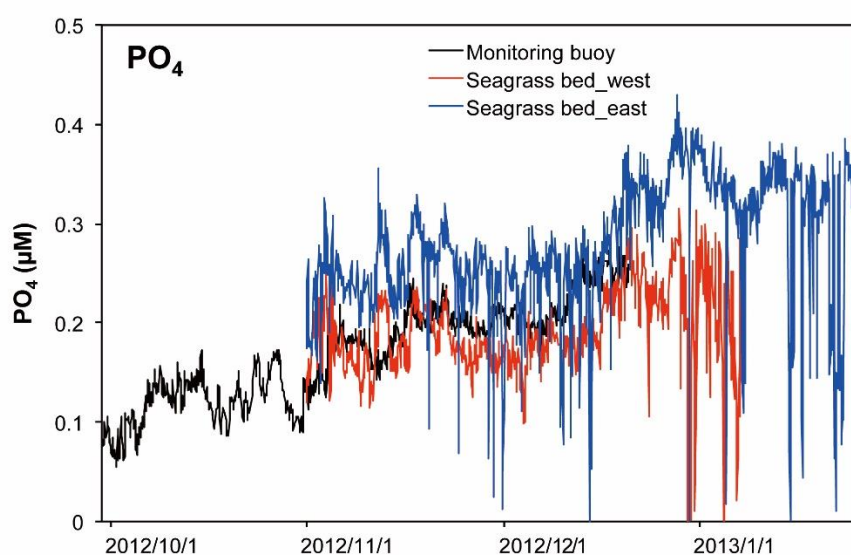


図 2-5 センター筏（黒）および大槌湾南岸アマモ場2点における2012年10月から2013年1月までのリン酸濃度季節変化

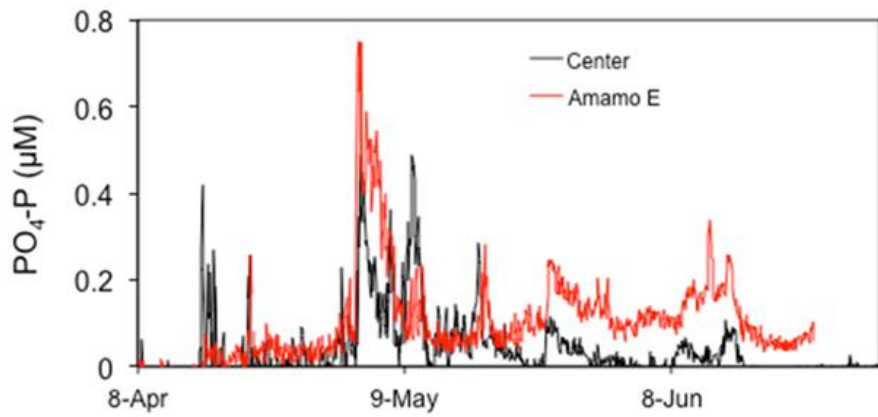


図 2-6 センター筏および南岸アマモ場におけるリン酸塩濃度季節変化 (2013年4月から7月)

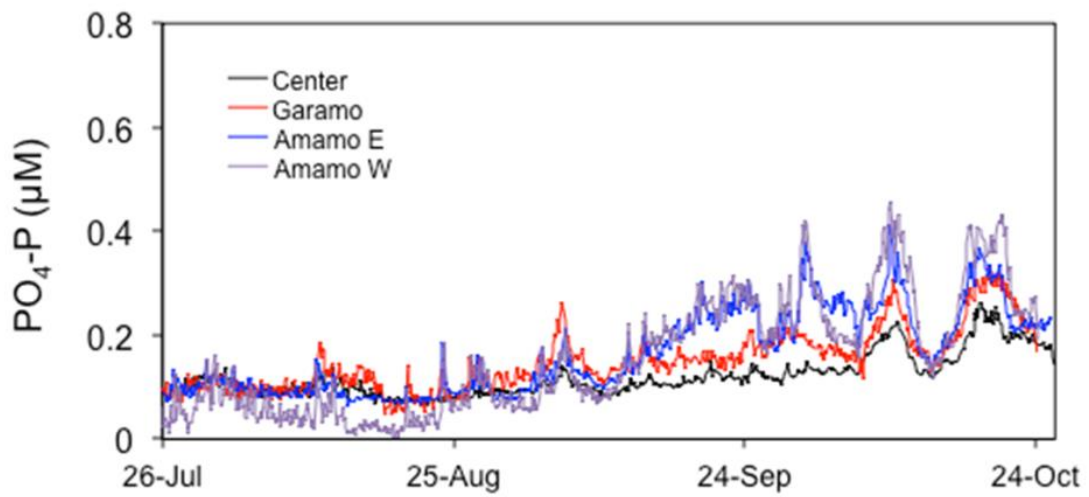


図 2-7 センター筏および南岸アマモ場 2 点および北岸ガラ藻場におけるリン酸塩濃度季節変化 (2013年7月から10月)

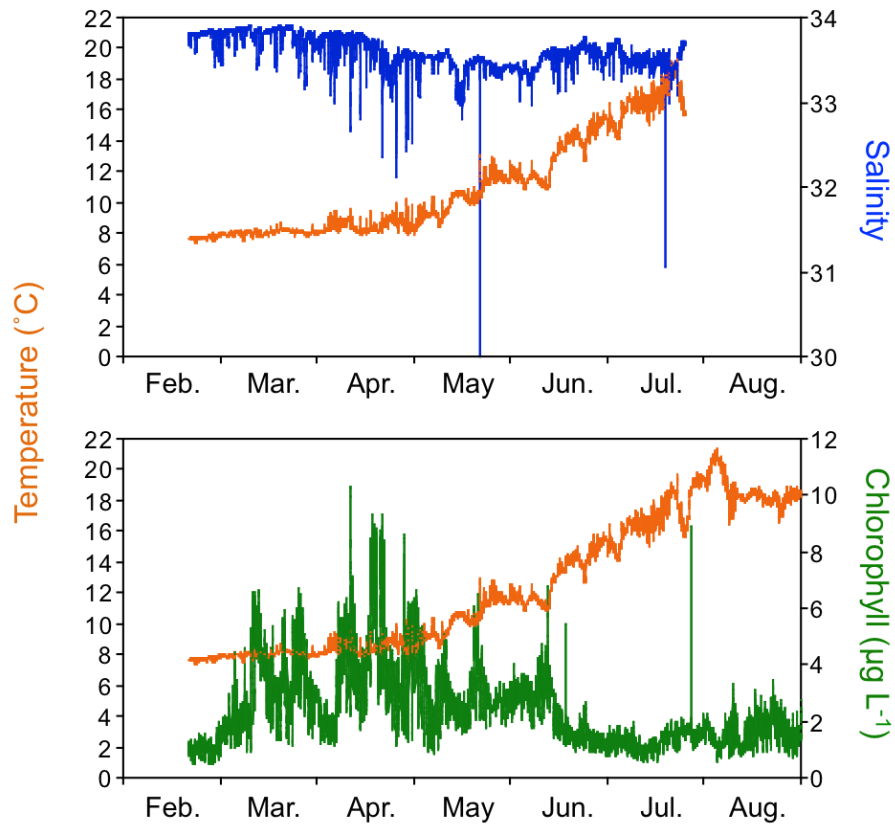


図 2-8 大槌湾湾央(深度 2 m)における 2017 年 2 月から 8 月までの水温、塩分およびクロロフィル *a* 濃度の変動

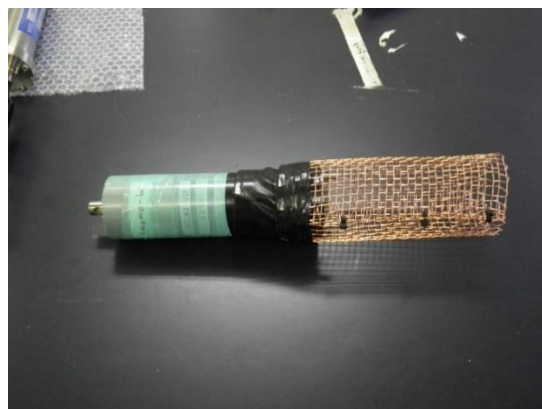


図 2-9 光路を銅製網で囲ったクロロフィルセンサー



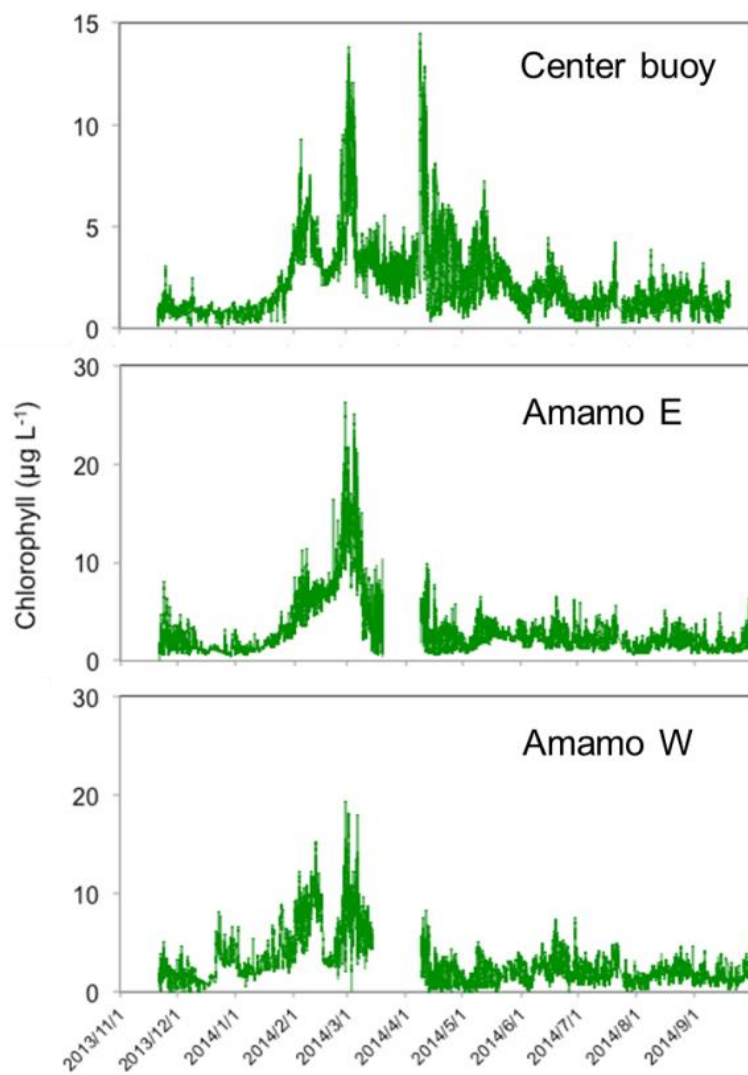


図 2-10 センター筏および南岸アマモ場 2 点におけるクロロフィル濃度季節変化（深度 2 m、2013 年 11 月から 2014 年 9 月）

箱崎沖(大槌湾 湾奥)

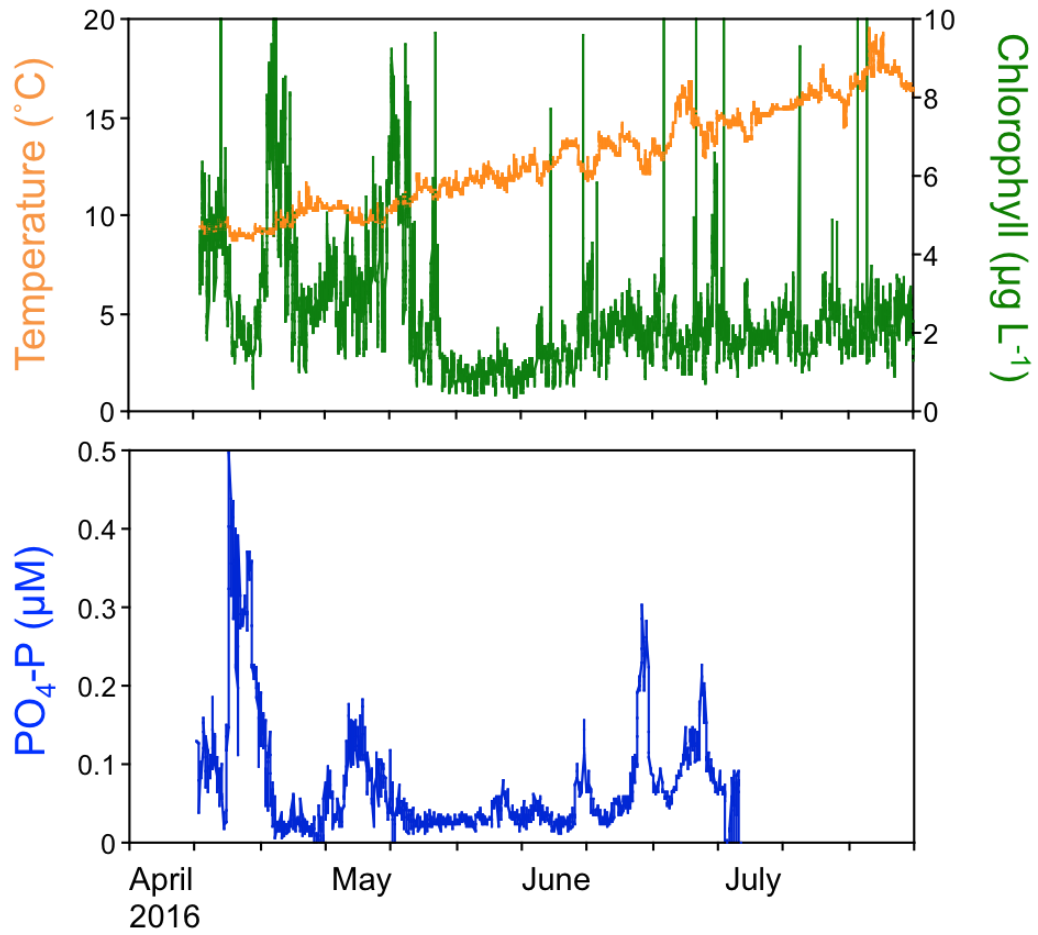


図 2-11 大槌湾の湾奥部表層（箱崎沖）における水温、クロロフィル濃度およびリン酸塩濃度の季節変化（深度 2 m、2016 年 4 月～7 月）

## 2-4 大槌湾における動植物プランクトンの動態



図 2-12 大槌湾における船舶観測点

2011年5月より、物質循環班と共同で(Fukuda et al. 2016, 福田ら 2017)、奇数月に船舶による観測を開始し、現在も継続中である。動植物プランクトンの採集は、湾内観測線の中央部4点で行った(図 2-12)。採水はニスキン型採水器を用いて行いホルマリンで固定し、動物プランクトン採集はノルパックネット(口径45 cm、目合い100  $\mu\text{m}$ )を海底直上より曳網し、ろ水量は開口部に装着したフローメーター(離合社)によって計測した。試料は直ちに、ホルマリン、またはエタノールで固定した。種同定、計数は植物プランクトンが倒立顕微鏡下、動物プランクトンは実体顕微鏡下で行った。さらに、一部の試料はDNAバーコーディング(Bucklin et al. 2011)によるカイアシ類の集団遺伝構造の解析に用いた。

定期調査時に採水された試料の植物プランクトンの検鏡結果では、3~5月に三陸沿岸や親潮域で優占する珪藻類(*Thalassiosira nordenskioeldii*, *Chaetoceros radicans*など)が優占し(図 2-13)、渦鞭毛藻は*Prorocentrum triestinum*などが秋に増加した(図 2-14)。植物群集組成の季節変化は基本的に湾内の水塊構造変化に依存していたが、後述する動物プランクトンとは若干タイミングの差があった。これは、動物プランクトンに比べ、植物プランクトンの湾内における増殖速度が速いためと考えられた(Tachibana et al. 2017)。津波の後に有毒藻類が増加することが過去に報告されており、また漁業者からは復興に伴う他湾への砂利の輸送とそれに伴うバラスト水の放出によって有毒藻類が大槌湾に持ち込まれ増殖しているとの危惧があった。しかし、初期調査および岩手県漁連が行っている赤潮モニタリングの結果をまとめてみた結果、大槌湾

では主に冬季に麻痺性貝毒原因種 *Alexandrium catenella* が発生しているが、震災を挟んで、出現に大きな変化はなく、移入が危惧された *Alexandrium tamarense* の大規模発生も見られていない (図 2-15)。大槌湾では下痢性貝毒種 *Prorocentrum minimum* や *Dinophysis* 属数種が出現したが、その密度は 2012 年度は 2 cells/ml 以下で、問題となる濃度ではなかった。一方、2013 年度は大槌湾では下痢性貝毒により養殖貝類の出荷が 5 月から停止し (図 2-16)、この時期に、原因藻類である *Dinophysis* 属渦鞭毛藻類が増加していることが検鏡から明らかになった (図 2-17)。しかし、*Dinophysis* 属渦鞭毛藻類は暖海性であり、三陸には津軽暖水で運ばれてくると考えられ、2013 年度の高密度分布が震災の影響とは考えられない。

動物プランクトンについては、2011 年 5 月から 2018 年 5 月までのデータを整理し、津波後 7 年間の変化をまとめた。その結果、終生プランクトンの主要分類群であるカイアシ類、尾虫類および枝角類の季節的消長は 7 年間で概ね共通しており、既往文献の部分的記載 (Terazaki 1980, Tsuda et al. 1994, Yamada et al. 2012 など) とも一致し、津波発生年に特別な変化 (個体数密度の極端な増加・減少など) は見られなかった (図 2-18)。カイアシ類の種組成は湾内の水塊構造と対応した周期的な季節変化を示し、津波発生年の優占種はそれ以降の 6 年間とほぼ同様であった (図 2-19)。また、湾奥に分布するカイアシ類 *Acartia hudsonica* は毎年 5 月に個体数密度が高くなるが、津波直後の 2011 年 5 月における値は、それ以降の同月の値の範囲内であった。*Acartia hudsonica* は河口域など淡水影響のあるごく岸近くに分布し、休眠卵で不適な季節を過ごすカイアシ類であり (Ueda 1987)、津波によって大きく攪乱されたと想定されるが、モニタリングを開始した 2011 年 5 月までの 2 か月の間に本来の生息域に戻っていたことが明らかである。これらの結果は、終生プランクトンへの津波の影響は軽微であったか、極めて短期的 (調査開始までの期間に回復) であったという既報 (Nishibe et al. 2016; 西部ほか 2017) での推測を裏付けるものである。

動物プランクトンで見られた津波攪乱後の急速な個体群回復のメカニズムを理解するために、優占種である *A. hudsonica* の生活史解析を目的とした調査を、大槌湾湾奥部において 2016 年 2 月～2018 年 3 月にかけて毎月実施した。調査の結果、大槌湾では、*A. hudsonica* の卵生産速度は 3 月に高く、津波の発生した時期は本種のプランクトン個体群の増大期に当たることが分かった。海底堆積物中の急発卵および休眠卵の分布密度から判断すると、津波が発生した時期には休眠卵は少ないことが分かった (図 2-20)。そのため、津波攪乱が海底堆積物中の休眠卵に与えた影響は小さかったと推測された。*A. hudsonica* は大槌湾の湾央部や湾口部にはほとんど出現しないため、湾外からの移入によって個体群を再形成したとは考えにくい。そのため、本種の津波後の急速な個体群の回復は、湾奥に残存したプランクトン個体による活発な再生産の結果と考えられた。

さらに *A. hudsonica* については、mRNA 及び rRNA の部分配列を日本各地で得られた同種と比較した結果、隠蔽種は見られず同種は広い分布範囲を持つことが明らかになる

とともに、湾ごとに特有のハプロタイプが観察されることから、津波による攪乱にもかかわらず、湾ごとの個体群が維持されていることが示唆された (図 2-21)。

一方、一時性プランクトンである底生無脊椎動物の浮遊幼生では、津波発生年とそれ以降で個体数密度や季節的消長が大きく異なっていた。湾中央では、二枚貝類やホヤ類の浮遊幼生は、2011年から2012年にかけて低い個体数密度で推移したが、2013年以降には5月から9月を中心に顕著な増加が見られた (図 2-23)。湾奥では、こうした経年的な増加傾向は明瞭ではなかったが、津波直後の2011年5月の個体数密度がそれ以降の同月と比べて極端に低いことが分かった。これらの結果は、津波による底生個体への影響は、数ヶ月から数年に渡って続いたことを示唆している。また、湾中央で見られた2013年以降の浮遊幼生の増加は、養殖筏や堤防などの人工構造物の復旧によって生息環境が広がり、底生個体が増加して再生産規模が大きくなったことを反映していると考えられた。クラゲ類についても、2013年以降増加傾向にあり、底生無脊椎動物の浮遊幼生と同様に幼生の付着基質となる人工構造物の復旧が要因と考えられる (図 2-22)。

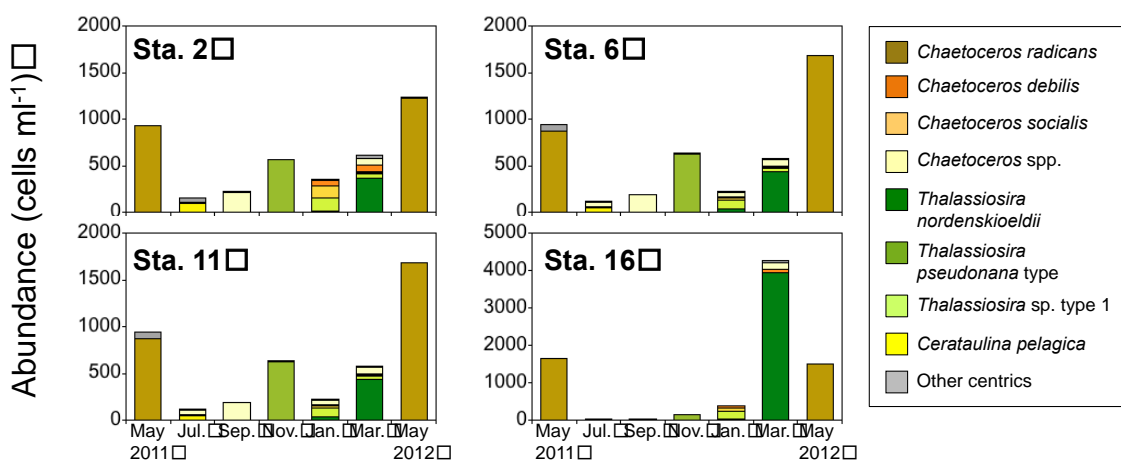


図 2-13 大槌湾湾央 (Sta. 2) から湾奥 (Sta. 16) における中心目珪藻類の季節変化

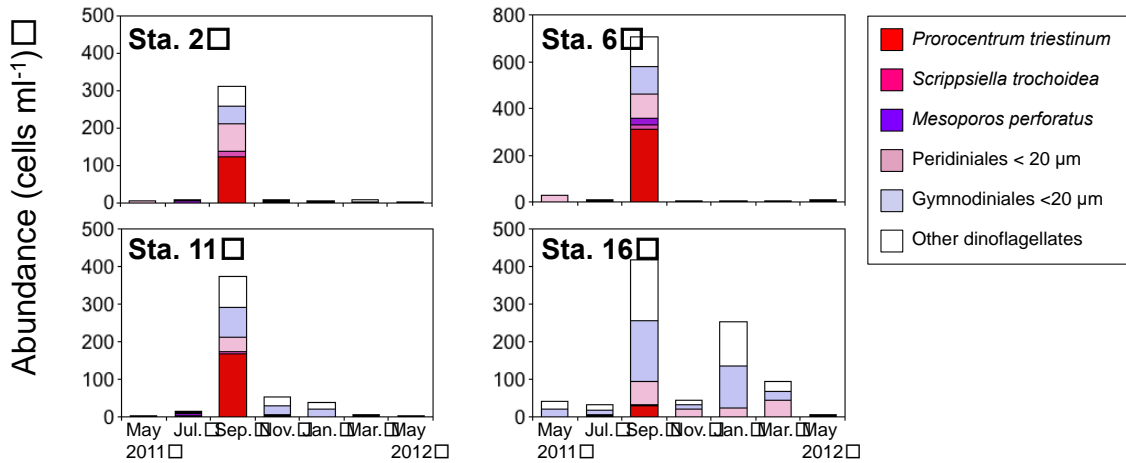


図 2-14 大槌湾湾央 (Sta. 2) から湾奥 (Sta. 16) における渦鞭毛藻類の季節変化

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
大槌	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	20
	2009	22	24	25	21	21	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	30	30
	2007	21	24	23	24	-	-	-	-	-	-	-	21	21
	2006	26	21	25	-	-	-	-	-	-	-	-	30	25
	2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	31
野田	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	
珊瑚島 (大船渡)	2013	20	28	23	41	42	149	168	170	170	160	160	160	160
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	31	34	-	-	-	-	-	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2009	-	24	33	24	41	26	22	28	-	21	-	-	-
	2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2007	-	-	-	-	-	-	30	23	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	21	-	-	28	31	28	33	30	24	-
	2005	-	-	-	-	-	-	21	23	-	-	-	-	-
広田	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2009	-	-	-	-	-	-	ND	ND	ND	-	-	-	
	2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	

図 2-15 岩手県漁連によるホタテ貝麻痺性貝毒検査結果 (色付き部分が出荷停止期間)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
大槌	2013					0.05 0.05	0.05 0.05	0.05 0.05	ND	0.05 0.05	ND	ND	ND
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008	-	-	-	-	0.05 0.05	-	-	-	-	-	-	-
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
野田	2013	-	-	-	-	0.05 0.05	0.05 0.05	-	0.1 0.05	-	-	-	-
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	-	0.05 0	0.05 0	0	0	0.05 0.05	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008	-	-	-	-	0.05 0.05	0	-	-	-	-	-	-
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
珊瑚島 (大船渡)	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
広田	2013	-	-	-	-	0.05 0.05	ND	ND	ND	ND	ND	-	-
	2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2008	-	-	-	-	0.05 0.05	-	-	0.05 0.05	ND	ND	ND	ND
	2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

図 2-16 岩手県漁連によるホタテ貝下痢性貝毒検査結果（色付き部分が出荷停止期間）

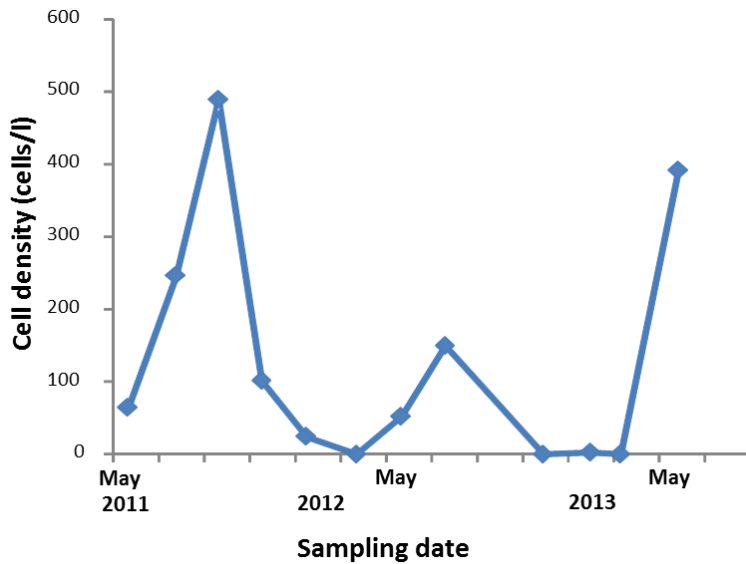


図 2-17 大槌湾における下痢性貝毒原因種 *Dinophysis* 属渦鞭毛藻類の細胞数変動（4 調査点の平均値）

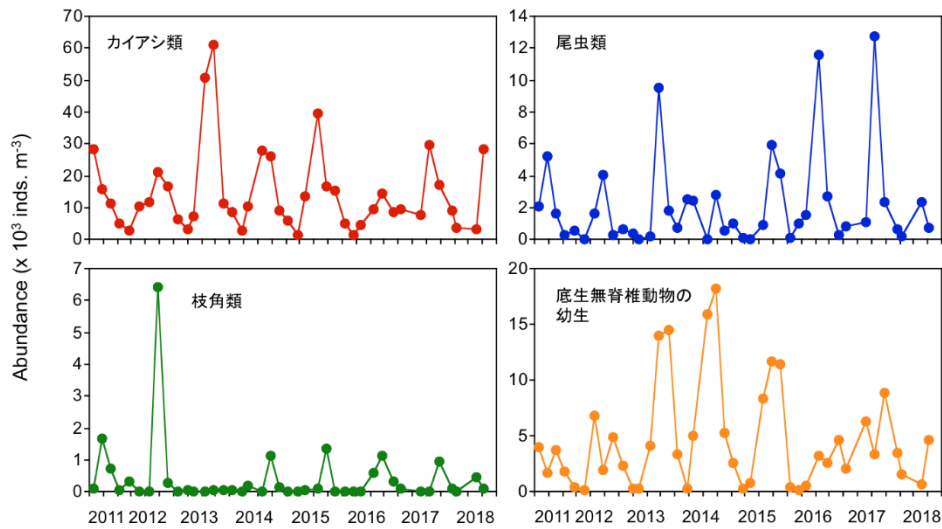


図 2-18 大槌湾湾央 (Sta. 2) における 2011 年 5 月～2018 年 5 月までの優占動物プランクトンの変化

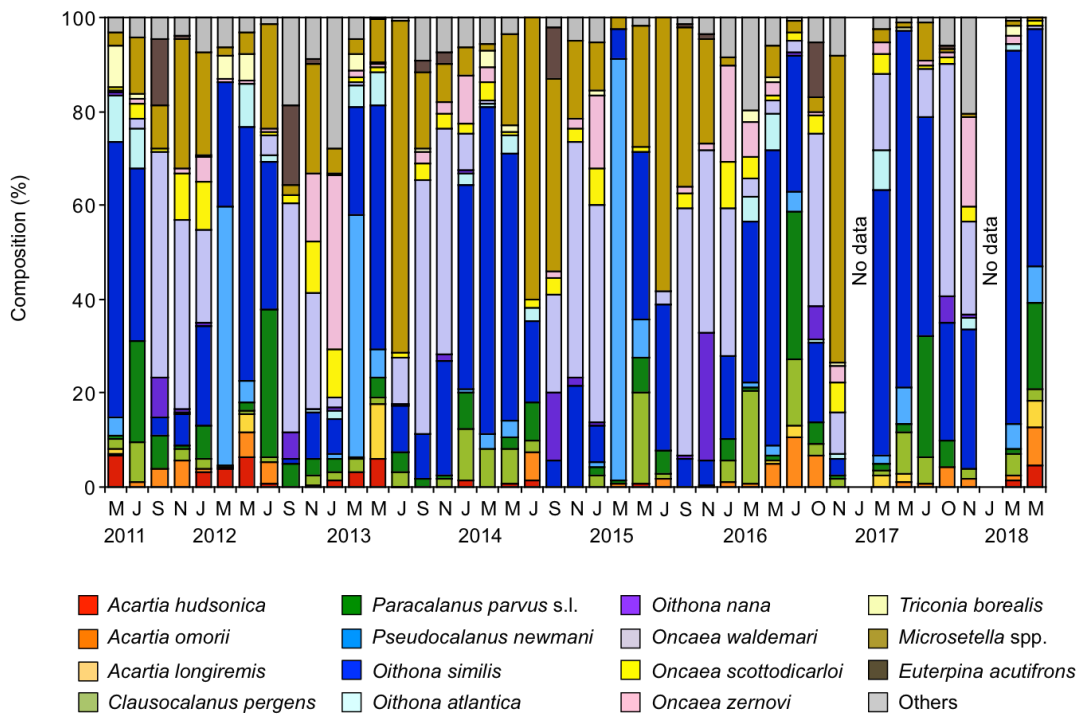


図 2-19 大槌湾湾央 (Sta. 2) における 2011 年 5 月～2018 年 5 月までのカイアシ類種組成の変化



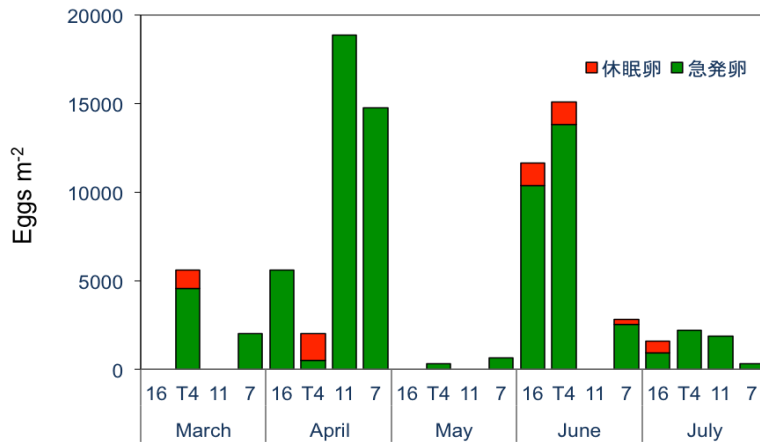


図 2-20 大槌湾湾奥の海底堆積物中におけるカイアシ類 *Acartia hudsonica* の休眠卵の分布密度 (2016 年 3 月~7 月)

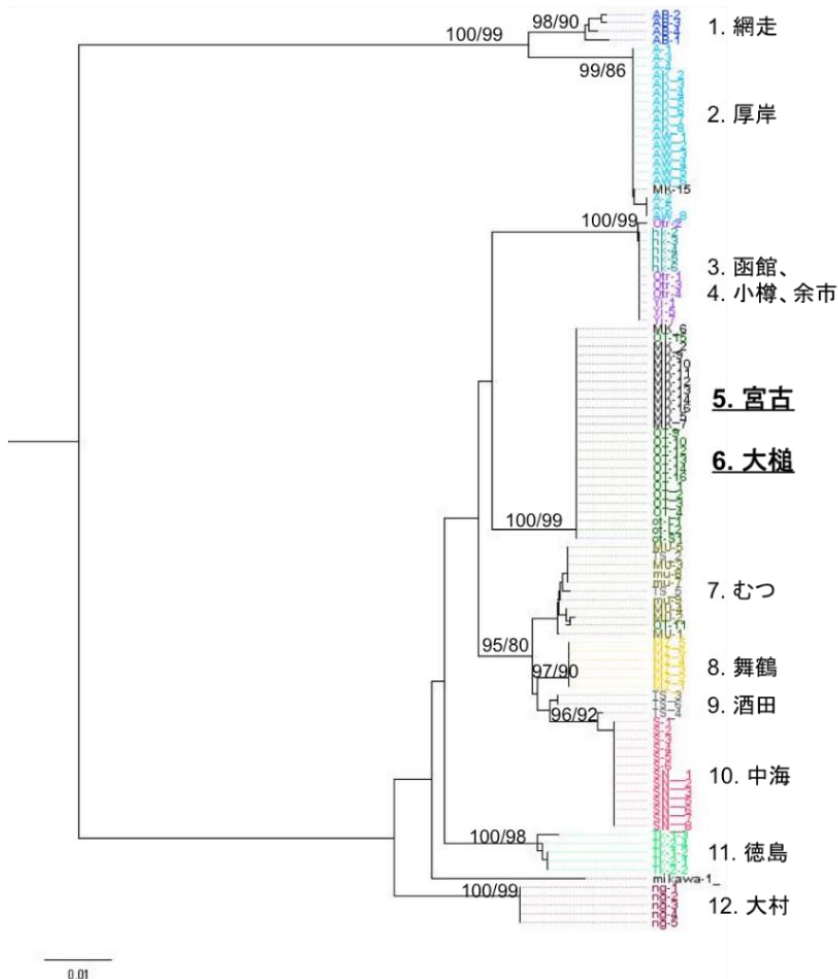


図 2-21 *Acartia hudsonica* の核 DNA28S 領域の塩基配列に基づく系統樹. 系統樹内の数値は近隣結合法 (NJ) /最尤法 (ML) のブートストラップ値(>80)を示す

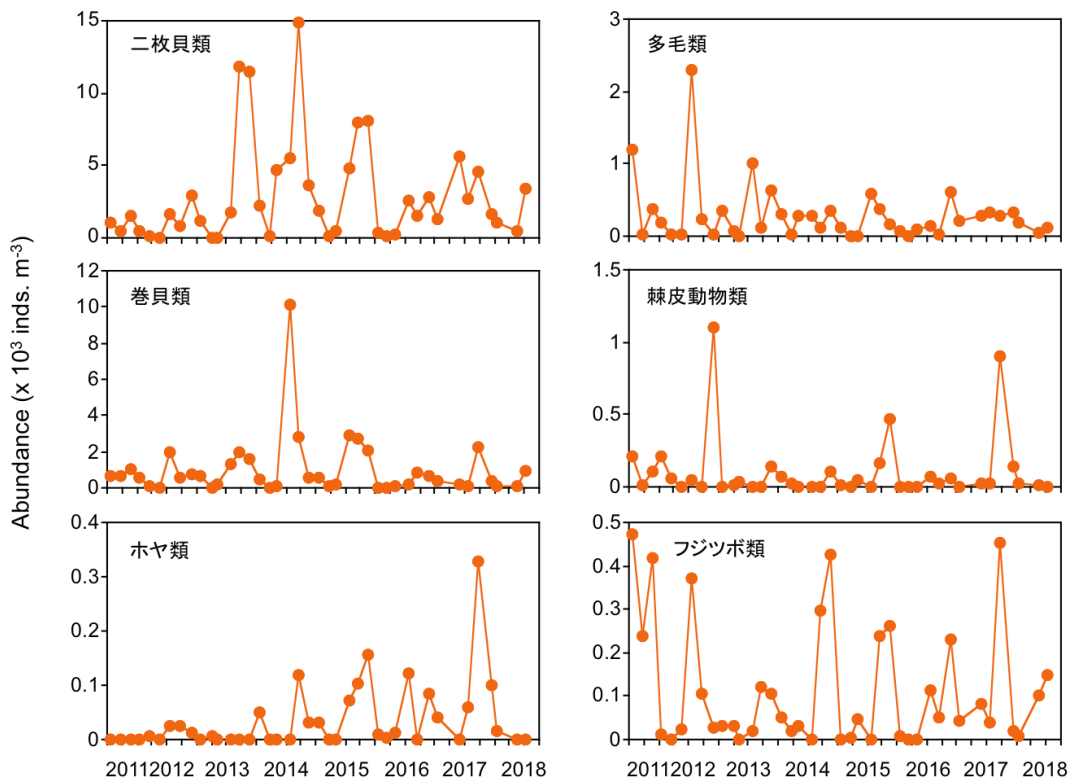


図 2-23 大槌湾湾央 (Sta. 2) における 2011 年 5 月～2018 年 5 月までの底生無脊椎動物浮遊幼生の変化

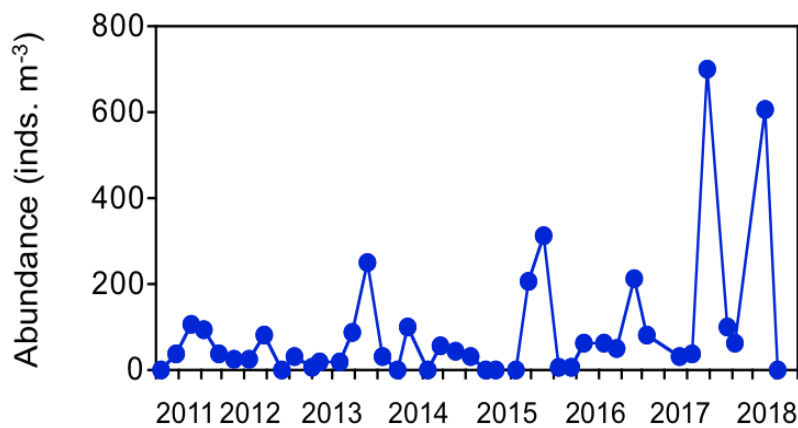


図 2-22 大槌湾湾央 (Sta. 2) における 2011 年 5 月～2018 年 5 月までのクラゲ類の変化

## 2-5 大槌湾以外でのモニタリング・観測

大槌湾以外では、両石湾、釜石湾、広田湾において、センサーモニタリングや船舶による定期的な観測を行った(図 2-24)。両石湾においては、センサーモニタリングを 2015 年 10~12 月、船舶観測を 2015 年 10 月に行った。釜石湾においては、センサー観測を 2017 年 12 月~2018 年 9 月、船舶観測は 2011 年より年 3~4 回行っている。広田湾においては、2015~2016 年にかけてセンサーモニタリングを行い、船舶観測は 2015~2015 年に年 2 回行った。これらのモニタリングや観測は、主に漁協からの協力要請に基づいて行われたものである。以下に観測頻度の高かった釜石湾、広田湾に関して概説する。

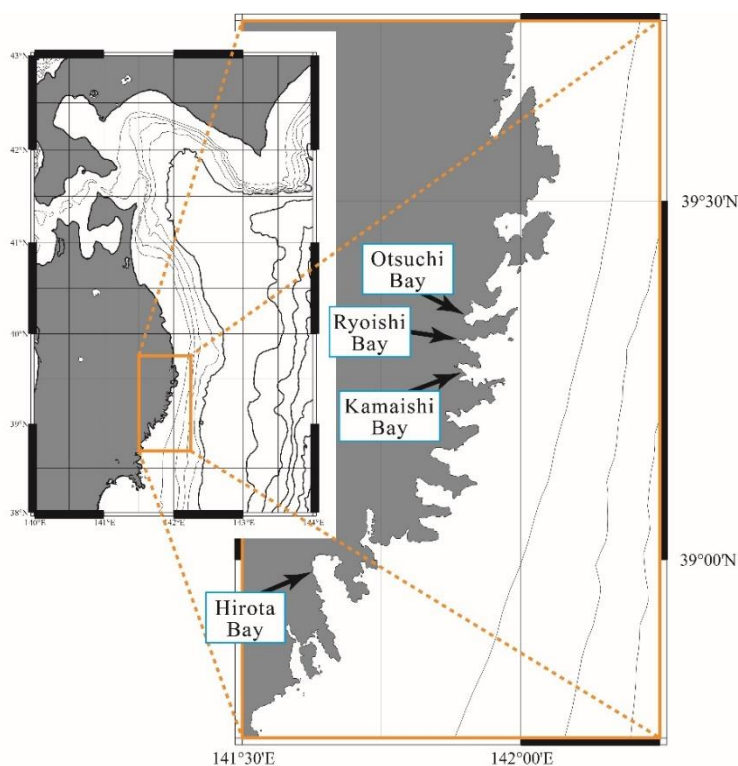


図 2-24 大槌湾以外でモニタリングを実施した両石湾、釜石湾、広田湾の位置

### 【釜石湾】

季節変化を把握するため、2、3 か月に 1 度、釜石湾において、CTD (水温、塩分、溶解酸素、クロロフィル等)、可搬式 ADCP (流速)、漂流ブイによる調査を実施した。東京大学大気海洋研究所を中核とし、岩手県水産技術センター、釜石湾漁業協同組合と連携して実施した。また上記に加えて、海水中の栄養塩、重金属のモニタリングを東京大学他部局の研究者と共同で実施し、津波による沿岸域の環境への影響についても検討し、結果の一部は山本ら (2015) にまとめられている。

震災直後の観測では以下の2点が明らかになり、津波による湾口防波堤の破壊が湾内の海洋環境に大きな影響を及ぼしていることが実測値として確認された。

- ・湾内の、成層期における中・下層の溶存酸素量が増加
- ・湾内の中・下層の平均塩分値について、津波前は季節変化がほとんど見られなかったものが、津波後は湾外の塩分に連動して大きく変化した。

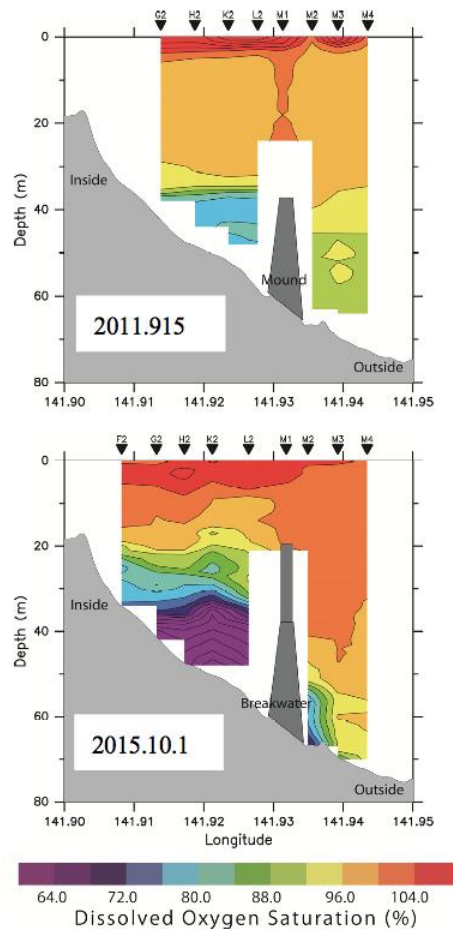


図 2-25 釜石湾防波堤開口部を東西に横切る鉛直断面上での溶存酸素飽和度 (%) . (上) 2011年9月15日、(下) 2015年10月1日

2011年から2017年までの6年間の溶存酸素濃度のデータを整理したところ、湾口防波堤の再建によって秋季の防波堤内側底層では酸素飽和度が減少し、低酸素層の厚さも増加していること、防波堤内外の溶存酸素の濃度差は夏季から秋季に大きく、経年的に増加傾向にあることが明らかになった。こうした環境変化は、防波堤再建によって徐々に海水交換の抑制効果が増加していることによると推測される(図 2-25、図 2-26)。さらに、甲子川から湾内への流入水が、塩分濃度の分布に及ぼす影響を調べたところ、低塩な河川系水は海面から深度3m付近までのごく薄い層内に見られること、河川系水はコリオリ力の作用によって岸を右に見ながら岸沿いを流れる傾向にあるが、降水の影響

時には岸から少し離れた海域を流れる傾向があることが分かった。これは、降水時には、河口からの河川水流出の勢い（慣性）が強くなった効果が現れたのだと推測される（図 2-27）。

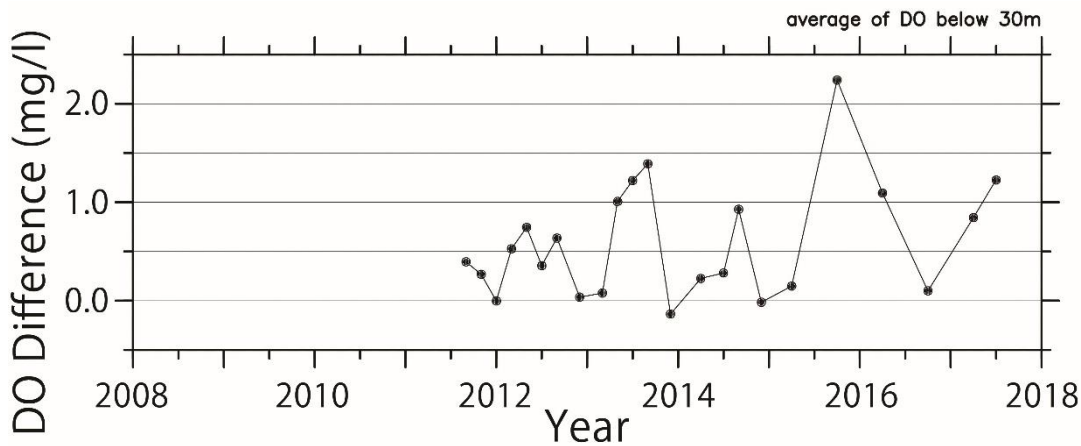


図 2-26 釜石湾防波堤外側と内側の溶存酸素の濃度差（開口部近傍、水深 30 m 以深の平均値）

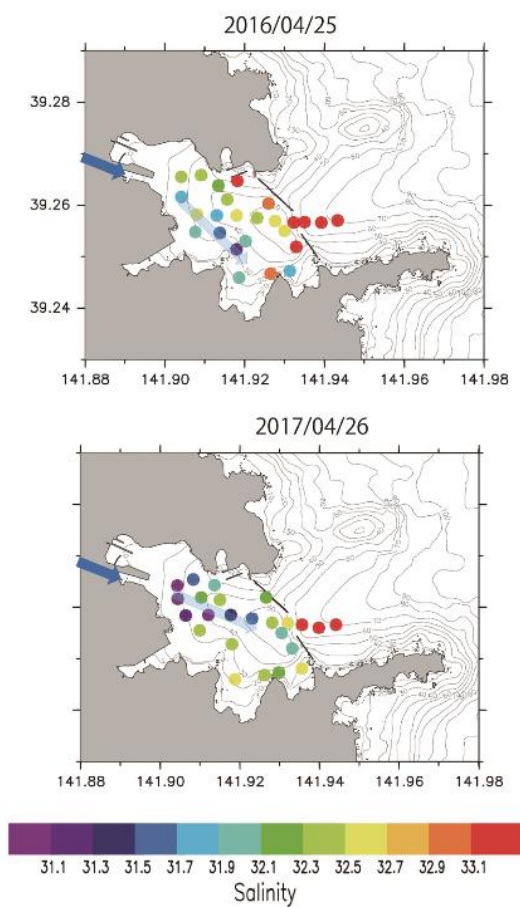


図 2-27 釜石湾表層の塩分分布. 河川系水の推定される流軸を表す. (上) 2016 年 4 月 25

日、(下) 2017 年 4 月 26 日

【広田湾】

i) 目的

震災前から貝類養殖生産が減少傾向にあり、震災後の漁場永続利用のための流況調査が期待され、特に漁協から 1) 貝類の餌環境の競合から気仙川の流れの変化、2) 貝類(イシカゲ・ホヤ・ホタテ・カキ)の採苗器投入場所、3) 筏の向きの設定など具体的要望があるため、これに応えるデータ(流速・流向)を取得することを目的とした。

湾奥の気仙川河口から脇ノ沢・小友町へかけての海域に焦点をあてて、可搬式 ADCP(超音波ドップラー多層流速計)、CTD(水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル等)観測を実施した。東京大学大気海洋研究所を中核とし、広田湾漁業協同組合、岩手県沿岸広域振興局水産部、岩手県水産技術センター、陸前高田市水産課と連携して実施した。

これまでに明らかになった特筆すべき流況の特徴として、以下の諸点が挙げられる。

- ・ 水平スケール数 100m の規模で、流れに顕著な変動が見られる(図 2-28)
- ・ 水深 6m くらいを境に、上層と下層で流れが逆向きとなっている

これらのメカニズムについては、現在解析中である。

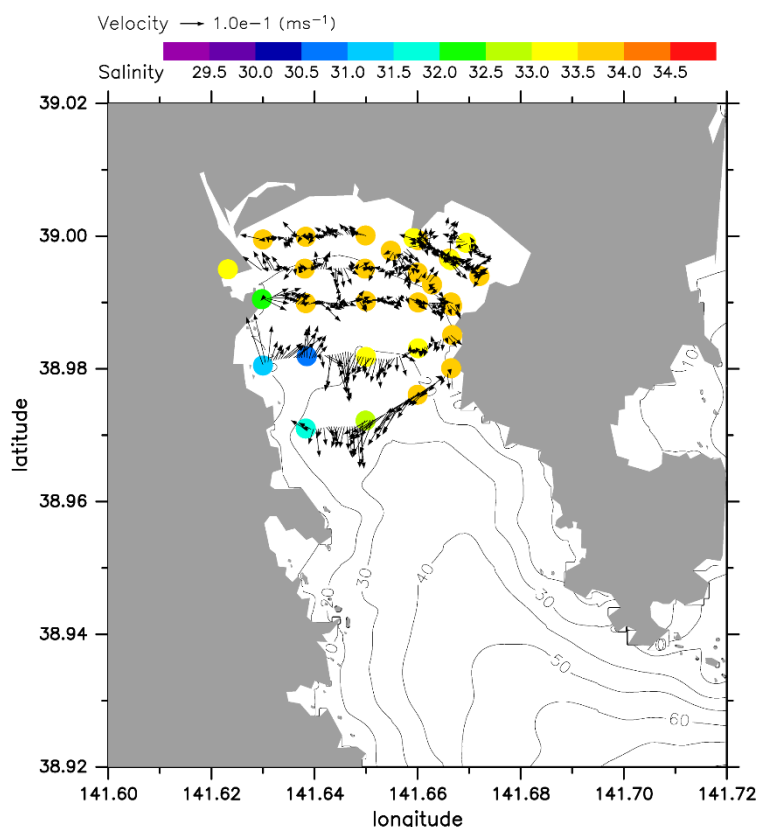


図 2-28 広田湾表層(2m)における塩分と流向・流速の分布. 2014年10月22~23日の下げ潮時

## 2-6 復興への貢献

水温、塩分、栄養塩、プランクトンは、全ての漁業活動を支える海洋生態系の基盤である。今年度までのモニタリング調査から明らかになった大槌湾の物理・化学的環境や低次生物生産の特性は、今後、三陸沿岸域での持続的かつ効率的な養殖漁業、漁獲漁業のあり方を議論する上で重要な基礎的知見となった。

大槌湾で展開されているモニタリング機器の一部（センター海象ブイの水温計、波浪計）のデータは、ホームページ上でのリアルタイム配信を行った。ホームページの閲覧状況を調査した結果、1日当たり平均すると10～20件程度のアクセスがあった（図2-29）。また2019年2月に発生した沿岸親潮による異常低水温をいち早く検知し、地先の漁業者を含め広く情報を配信することができたことは、本事業による地域漁業への貢献の好例と考えている。これらの配信は地域の漁業者の評判が良く、データの利活用が進んだことは、当該事業の主要な目的の一つである震災地域漁業の早期復興に貢献でき

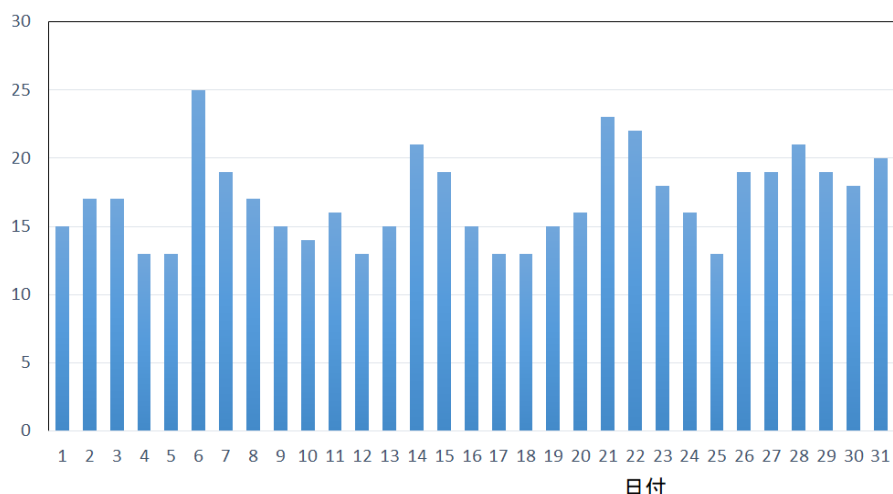


図 2-29 2017年5月の大槌湾環境モニタリングのホームページへの日別アクセス数

たと考えている。

また、広田湾での観測は、漁業者からの要請を水産技術センターが受け、センターからの要請で本チームが実行したものである。

成果は、学术论文として公表するだけでなく、自治体の研究者が多く集まる学会やシンポジウム、東北マリンサイエンス全体会議などで報告すると共に、新聞や地元住民へ配布する広報誌等にも掲載されており、間接的ではあるが漁業関係者や地域住民への周知ができたと考えている。

10年余りにわたるモニタリングと調査の結果、他班の成果も含め、大槌湾における

流動、栄養塩動態、動植物プランクトン動態、重要種の生理的特性が解明された。また過去の調査記録との比較によって漂流生態系の地震や津波の攪乱は少なく時間的にも短時間に回復したことが示された。しかし最も大きな成果は、大槌で生活する市民、漁業者の方々と意思疎通をし、彼らの要望に耳を傾け、一方では、我々の成果に耳を傾けてもらえる土壌が醸成できたことが挙げられる。震災後、観測やモニタリングを始めるにあたっては、調査に使う船舶もなく、数少ない漁船を融通していただき観測を始めることができた。また、係留を伴うモニタリングでは、設置した装置が悪天候などによって漂流し漁具に絡まるといったトラブルも散見され、そのたびにお叱りを受け、漁業者のために最も良いことは何もしないことなのではないかと自問した時期もあった。しかし、大槌を拠点とする研究者の多くの努力もあって次第に両者の距離は縮まり、両者がタッグを組んで沿岸生態系の解明やよい良い漁業や町の在り方を議論できるようになった。その一つの成果が、「海と希望の学校 in 三陸」の立ち上げである。「海と希望の学校 in 三陸」は、釜石で活動を続けてきた東京大学社会科学研究所の方々と情報交換をした結果、一緒にやってみましょうとなった活動である。岩手県沿岸部は海とのかかわりが強く、生活習慣、風習、信仰に海が強く関係している。また、三陸はその地形的特徴から湾ごとの個性が強い風土である。大気海洋研究所はその調査能力によって、その海洋学的な特徴を解明し、社会科学研究所は「希望学」、「危機対応学」で培った対話やオーラルヒストリーの手法で、住民のローカルアイデンティティの再構築につなげる試みが開始された。

TEAMS の活動の中では、大槌湾以外の観測も釜石湾や広田湾で行われ、東北マリンサイエンス拠点形成事業全体像の中では、東北大学の女川湾や宮城県のいくつかの沿岸地域、JAMSTEC や新青丸航海で得られた沖合域での知見が集積されたが、まだ多くの特徴ある内湾地域が未調査である。一方、東北マリンサイエンス拠点形成事業期間中、センサーによるモニタリング技術、環境 DNA を用いた生物消長の把握技術、沿岸域の数値モデリング技術が飛躍的に進歩し、今後はこれらの技術を展開することによって、より効率的な観測やモニタリングを各湾で展開することが大きな目標となる。さらに、本事業で大槌湾での海洋環境変動の要因分析や沿岸環境の指標種としてアカルチア属カイアシ類が特定されたことも、各湾を比較していくうえで非常に重要な要素となる。東北区水産研究所の協力もあり、プランクトンの出現や分布パターンが、淡水流入量が大きく、湾内に湧水がある大槌湾と宮古湾で似ていることが明らかとなった。一方で、淡水流入量が少ない越喜来湾は、大槌湾と異なる可能性が示唆されている。今後は、これらの湾も含め、閉鎖性、淡水流入、地形に注目し、観測調査を展開すべきである。

また、地震や津波の影響は、漂流生態系では、ほぼ感知できなくなっているが、陸上では防潮堤が各湾でほぼ工事が終了しつつある。さらに平地部分での都市整備計画は今後も変化が予想される。さらに、大槌湾においては海草群落などの砂浜域生態系は、回復途中にあるし、地震による地盤沈下は回復していないので、海岸線における基質分布、



それに基づく生態系は変化の途中にあると考えられる。これらの変化は、底生—漂流連環によりつながっており、安定的な定常状態に至るまでにはまだ 10 年単位の時間を要するものと考えられる。したがって、今まで行われてきたような高密度なモニタリング・観測を続ける必要はないが、長期的なモニタリングは今後も継続することが重要である。

## 2-7 引用文献

- Bucklin, A., D. Steinke, and L. Blanco-Bercial (2011) DNA barcoding of marine metazoa. *Annu. Rev. of Mar. Sci.* 3: 471-508
- Fukuda, H. R. Katayama, Y. Yang, H. Takasu, Y. Nishibe, A. Tsuda and T. Nagata (2016) Nutrient status of Otsuchi Bay (northeastern Japan) following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *J. Oceanogr.* 72: 39-52.
- 福田秀樹, 楊燕輝, 高巢裕之, 西部裕一郎, 立花愛子, 津田敦, 永田俊 (2017) 2011 年東北地方太平洋沖地震以降 5 年間の三陸沿岸大槌湾における栄養塩環境の変化. *沿岸海洋研究*, 54: 105-116
- Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka and K. Komatsu (2017) Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan, *J. Oceanogr.* 73: 115-131
- 岩手県水産技術センター「いわて大漁ナビ」<https://www.suigi.pref.iwate.jp/>
- Nishibe, Y. H. Isami, H. Fukuda, S. Nishida, T. Nagata, A. Tachibana and A. Tsuda (2016). Impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on zooplankton community in Otsuchi Bay, northeastern Japan. *J. Oceanogr.* 72: 77-90
- 西部裕一郎, 福田秀樹, 津田敦 (2017) 東北地方太平洋沖地震に伴う津波が大槌湾のプランクトン群集に及ぼした影響. *日本水産学会誌*, 83: 656-658
- Sakamoto, T. T., L. S. Urakawa, H. Hasumi, M. Ishizu, S. Itoh T. Komatsu and K. Tanaka (2017) Numerical simulation of Pacific water intrusions into Otsuchi Bay, northeast of Japan, with a nested-grid OGCM, *J. Oceanogr.* 73: 39-54
- Tachibana, A., Y. Nishibe, H. Fukuda, K. Kawanobe and A. Tsuda (2017) Phytoplankton community structure in Otsuchi Bay, northern Japan after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and tsunami. *J. Oceanogr.* 73: 55-65
- Tanaka, K., K. Komatsu, S. Itoh, D. Yanagimoto, M. Ishizu, H. Hasumi, T. T. Sakamoto, S. Urakawa and Y. Michida (2017) Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan, *J. Oceanogr.*, 73: 25-38
- 田中潔, 羽角博康, 小松幸生, 伊藤幸彦, 柳本大吾, 坂本天, 石津美穂, 浦川昇吾, 道田豊 (2017) 三陸沿岸の流況. *沿岸海洋研究* 54: 97-104
- Terazaki, M. Zooplankton in Otsuchi Bay. *Otsuchi Mar. Res. Cent. Rep.* 6: 1-5, 1980

- Tsuda, A., H. Sugisaki, K. Takahashi and K. Furuya (1994) Succession of pelagic organisms in the size range 0.5-200  $\mu\text{m}$  during a diatom bloom in Otsuchi Bay, Japan. Est. Coast. Shelf Sci. 39: 173-184
- Ueda H (1987) Temporal and spatial distribution of the two closely related *Acartia* species *A. omorii* and *A. hudsonica* (Copepoda, Calanoida) in a small inlet water of Japan. Est. Coast Shelf Sci. 24: 691-700
- Yamada Y, A. Kobiyama, and T. Ogata (2012) Seasonal succession of four *Acartia* copepods (Copepoda, Calanoida) in Okkirai Bay, Sanriku, northern Japan. Plankton Benthos Res. 7: 188-194
- 山本光夫, 加藤孝義, 多部田茂, 北澤大輔, 藤野正俊, 小豆川勝見, 松尾基之, 田中潔, 道田豊 (2015) 東日本大震災後の釜石湾における海域環境変化. 日本水産学会誌 81: 243-255

### 3 地震・津波による生態系攪乱とその後の回復過程に関する研究

#### 3-1 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した大地震と大津波は、三陸・常磐沿岸の生態系に大きな影響を及ぼし、それは沿岸域を生息場とする各種の水産有用生物に直接的・間接的影響を及ぼしたと考えられた。被災地における沿岸漁業を復興させるとともに、さらに効率的・持続的な漁業を発展させていくためには、沿岸生態系が地震・津波により受けた影響を具体的に明らかにするとともに、その後の生態系の構造や機能の変化を継続的に追跡する必要がある。

本中課題では、大槌湾を中心とした三陸沿岸の各種生態系（岩礁藻場生態系、海草藻場生態系、河口干潟生態系、外海砂浜生態系、大陸棚海底生態系など）やそこに生息する各種の生物が地震・津波で受けた様々な影響を具体的に明らかにし、攪乱後の二次遷移過程（大規模な攪乱からの回復・新たな変化）とその機構を解明することにより、生態系の構造と機能、および各種水産資源を育む環境収容力等の将来予測を行うことを目的とした。

本中課題は、対象とする生態系や生物群集の異なる17の研究グループにより構成される。このうち5グループ（グループ2、5、6、9、12）については、担当者の退職や異動などの理由により研究期間の途中で研究を終了した。また、2グループ（グループ16、17）については、研究期間の途中から参加した。さまざまな視点・観点から検討を行うことによって、沿岸の生態系や生物群集、各種の生物個体群の受けた影響とその後の変化を総合的かつ具体的に明らかにし、漁業の復興・発展に必要な基礎的情報を集積するとともに、沿岸生態系に属する各種水産生物の将来にわたる資源管理方策、養殖場としての沿岸生態系の利用方策等を確立するために不可欠な情報を整備することを目指した。

#### 3-2 観測・研究の概要および結果

##### 3-2-1 グループ1（岩礁藻場の生物群集とエゾアワビの個体群構造）

牡鹿半島東岸において2011年6月から、岩手県大槌湾の湾口部北岸において2011年7月から、3~4ヶ月に1回の頻度でスキューバ潜水による底生生物群集の調査を実施し、地震と津波が岩礁藻場生態系に与えた影響とその後の変化を継続的に調べた。これら2ヶ所の調査地点では、震災の5年以上前から年に4回程度の定期的調査が行われ、

とりわけ牡鹿半島東岸では 20 年以上前から底生生物群集や海藻群落の定量調査が断続的に行われてきた。また、大槌湾の南岸および西岸においては、震災以前から釜石東部漁協と（有）福田海洋企画により、毎年 10 月にライントランセクト法によりエゾアワビ（9 調査点）とキタムラサキウニ（6 調査点）の主に成体の生息密度と殻長（殻径）組成の調査が行われた。震災後には、東京大学大気海洋研究所が主体となってこの調査を継続し、地震と津波の影響解析を実施した。2015 年以降には、大槌湾北岸および船越湾において、新おおつち漁協と共同で同様の調査を毎年 10 月に実施し、設定された 7 調査点においてエゾアワビおよびキタムラサキウニの生息密度、海藻植生を継続的に調査した。

### (1) 牡鹿半島東岸および大槌湾・船越湾の岩礁藻場における生物群集の変化

牡鹿半島東岸と大槌湾口北岸の 2 調査地点においては、岩礁藻場生態系や生物群集、特に、海藻群落およびエゾアワビ個体群とキタムラサキウニ個体群が地震・津波によって受けた攪乱の実態やその後の遷移過程が具体的に明らかになった（Takami et al. 2013, 高見・河村 2014, Kawamura et al. 2014, Muraoka et al. 2017, Takami et al. 2017, 河村ほか 2017）。大槌湾口北岸の岩礁藻場における津波の影響は牡鹿半島東岸に比べて軽微であり、エゾアワビ成貝については顕著な密度の減少は認められなかった。しかし、殻長 4 cm 以下程度の稚貝の密度は大槌湾口北岸の調査地点においても大幅に減少したと考えられた。牡鹿半島東岸では、2007 年からエゾアワビ当歳貝の発生密度が毎年調査された。その結果、震災前に発生した 2007～2010 年級群の発生密度（潜水調査によるダイバー 1 人 1 時間当たりの発見個体数）は 25～40 であったのに対し、その後の 2011～2012 年級群では 4～19 となり、震災以降、発生密度が継続して低下したことが明らかとなった。この原因として、エゾアワビ浮遊幼生の着底場および稚貝の生息場となる無節サンゴモ域の環境の悪化や規模の縮小が考えられた。地震・津波の攪乱によってサンゴモ表面上に砂泥の堆積が目立つようになり、これはサンゴモ域が有するエゾアワビ着底・成育場機能の劣化をもたらした。また、津波によりサンゴモ域の主要な植食動物であるキタムラサキウニの生息密度が大幅に低下したため、サンゴモ上に大型海藻が繁茂し、成育場面積の減少につながった。

大槌湾の南岸および西岸におけるライントランセクト調査の結果から、大槌湾内においても場所によってエゾアワビ個体群（主に成貝や比較的大きな稚貝）に対する津波の影響は大きく異なったことが明らかになった。湾口部や湾央部の沿岸では震災後にエゾアワビ密度の大幅な減少は認められなかったが、湾奥部では震災後の密度が震災以前に比べて大きく減少した。湾奥部の調査点における生息密度は現在でも回復しておらず、低密度な状況が継続している（Hayakawa et al. 2017）。

2014 年と 2015 年のエゾアワビの漁獲量は、三陸沿岸南部の多くの場所でそれ以前よ

りも低下したことが報告され、津波による稚貝減耗の影響が漁獲対象サイズの密度に影響したものと考えられる。エゾアワビの稚貝発生量の多寡は冬季水温に大きな影響を受け、特に低水温の親潮が長期間にわたって接岸した冬には秋に生まれた当歳貝の生残率が著しく低くなることが知られている (Takami et al. 2008)。震災後の5年間で3回の冬季に親潮が比較的長期にわたって接岸したことがわかっており、これらの3冬季における当歳貝(夏～秋生まれ)の生残率は低かったと考えられる。津波による稚貝の減耗とその後の稚貝生残率の推移を考えると、漁獲対象となるエゾアワビ成貝の資源量は、三陸沿岸の多くの海域で少なくとも数年にわたって減少する可能性が高いと考えられた。実際に、2017年10月に実施した大槌湾北岸および船越湾での調査では、前年と比較してエゾアワビ生息密度が大きく減少した調査ラインが多く、実際に2017年～2018年の漁期には大槌漁協のエゾアワビ漁は不漁であったとされる。震災時の攪乱による殻長4 cm以下程度の稚貝の急減、および親潮による低水温の影響がその後の数年間連続したことが、漁獲サイズに達した年級群において顕在化してきた可能性があり、今後も継続的に生息密度調査を実施する必要がある。

一方、キタムラサキウニについては、牡鹿半島東岸と大槌湾口北岸の調査地点において、震災直後にはともに大幅に密度が低下したが、牡鹿半島の調査地点ではその後も低密度な状態が2年程度続いたのに対して、大槌湾の調査地点では1年以内に密度が急速に回復した (Takami et al. 2013, Kawamura et al. 2014)。これは主として、深場に流された個体が藻場に戻ってきたためと考えられ、戻ってきた個体の多くが大型の個体であったため、震災前とはサイズ組成の異なる個体群となった。大槌湾の南岸と西岸における2014年のライントランセクト調査結果では、いずれの調査点でも震災前に比べてキタムラサキウニの生息密度は明らかに高く、特に殻径4 cm未満の小型個体の占める割合が明瞭に高くなった。津波によって沿岸岩礁域から流出した大型個体が震災後数ヶ月で浅海域に戻るとともに、震災後の大槌湾内における稚ウニの加入水準が高い状態にあったものと考えられる。このようなキタムラサキウニ生息密度の増加は、三陸沿岸の多くの場所で確認され、場所によっては、藻場の動植物の分布や組成に大きな影響を及ぼしたことが報告されている。

## (2) エゾアワビの行動範囲および産卵期における蠕集行動

エゾアワビでは、多くの場合には長距離は移動しない、すなわち漁場での移出・移入が無いことを前提として資源量推定が行われているが、実際にどの程度移動するかは分かっていない。そこで、超音波テレメトリーによる移動の追跡と、ドローンによる調査区の景観情報の収集を実施し、本種の移動生態の基本情報を収集した。大槌湾口北岸において、2015年12月からエゾアワビ成貝にVemco社製の超音波発信機(V9-2H)を装着して、漁場に放流した。2016年5月から12月にかけて、連続してデータが記録でき

た4個体に関して、1日毎に個体の位置（緯度経度の平均値）を算出した。また、調査区の景観情報を得るために、ドローンによる空撮と潜水調査を実施した。空撮画像はGISに取り込み、潜水時に記録した景観情報を教師データとして、調査区を岩礁帯と磯焼け帯、深所帯（水深10 m以深）に分類した。得られたデータを解析した結果、岩礁の上部と岩礁周辺の深所を行き来する個体や、1日で数十メートル匍匐し、岩礁帯から漁場として利用されにくい転石帯に移動する個体が観察された。岩手県内の多くの漁場では船上から箱メガネでアワビを見つけ、5 m程度の竿先に付けた鉤で1つずつ漁獲するため、鉤が届く場所は限られる。今後、測位や画像分類の精度を検討する必要があるが、本研究の結果から、資源量推定においては本種が移動することを考慮する必要が示唆された。

津波によってエゾアワビの個体群密度が減少した場所では、特に成員の分布密度が減少した場合には、今後の繁殖にも影響が及ぶ恐れがある。それにはまた、雌雄が産卵期に蛸集するかどうか重要な影響を及ぼすが、エゾアワビが産卵期に蛸集するかどうかは明らかにされていない。そこで、エゾアワビの産卵に伴う蛸集の有無を明らかにするため、2016年以降に大槌湾長根において、漁礁上に位置するエゾアワビ成員の個体数を調査した。周辺の海底でのエゾアワビ成員の個体数密度には季節的な変動は認められなかった一方、漁礁上の個体数密度には数十倍程度の大きな変動が認められた。漁礁上のエゾアワビ個体数密度は、大型褐藻類の被度の変化に強く影響を受け、産卵期（9～11月）の付着密度の増加については調査年による差異が認められた。漁礁上での付着密度が高まると、各個体の隣接個体数が増加する傾向が認められ、エゾアワビは産卵期において漁礁の様な海底面から隆起した場所に蛸集することで、放卵・放精時の受精率を高めている可能性が考えられた。

### (3) エゾアワビに対するウミネコの捕食行動

大槌湾赤浜に位置する堤防上に、軟体部の一部が残存したエゾアワビの貝殻など、底生無脊椎動物の被食残骸がしばしば発見されたことから、これらの出現頻度や捕食者を明らかにするため、継続的な捕食残骸の回収と観察を継続的に行った結果、ウミネコやオオセグロカモメなどのカモメ類による底生動物への活発な捕食行動が示された。堤防上に出現した無脊椎動物の全被食残骸の約60%をエゾアワビが占めており、堤防壁面および周辺の岩礁域においてカモメ類が活発にエゾアワビを捕食することが初めて明らかとなった（Hayakawa et al. 2019）。カモメ類によるエゾアワビ捕食の頻度には明瞭な季節変動が認められ、夏季にはほとんどエゾアワビを捕食しない一方、冬季から初夏にかけては活発に捕食していた。一方で、2018年冬季のエゾアワビに対する捕食頻度は2016年および2017年の冬季に比較して低く、カモメ類によるエゾアワビを含めた底生動物への捕食は経年的にも大きく変動することが明らかになった。

#### (4) 大槌湾の岩礁藻場における生物群集の動態

エゾアワビやキタムラサキウニ等の水産上重要な生物だけでなく、岩礁生態系において重要な役割を果たすと考えられるヨコエビ類等の小型甲殻類や、フジツボ類等の付着動物、それらを捕食する魚類相についても、大槌湾内の複数の調査点において継続的な調査を実施した。また、大槌湾内の複数の調査点において、海藻植生の季節的、経年的な変動を明らかにするためにライントランセクト調査を継続的に実施している。これらの調査によって、海藻群落の消長に伴う葉上動物群集の季節的な変化や、優占種の変化を含めた付着動物群集の挙動が明らかになった (Kodama and Kawamura 2019, Kodama et al. 2017, 2020, Ohtsuchi and Kawamura 2019, Umetsu et al. 2017)。

#### (5) 引用文献

- Hayakawa, J. T. Kawamura, K. Fukuda, M. Fukuda and S. Sasaki (2017) Studies on temporal changes by the massive tsunami in abalone and sea urchin populations in the Otsuchi Bay by long-term monitoring survey. *Coastal Marine Science*, 40: 44-54.
- Hayakawa, J., M. Ito and T. Kawamura (2019) Predation by the gull *Larus crassirostris* on benthic invertebrates: first report of avian predation on the abalone *Haliotis discus hannai*. *Marine Ecology*, 39, Doi:10.1111/maec.12529.
- Kawamura, T., H. Takami, J. Hayakawa, N.-I. Won, D. Muraoka and Y. Kurita (2014) Changes in abalone and sea urchin populations in rocky reef ecosystems on Sanriku Coast damaged by the massive tsunami and other environmental changes associated with the Great East Japan Earthquake in 2011. *Global Environmental Research*, 18: 47-56.
- 河村知彦・高見秀輝・早川 淳・村岡大祐・玉置 仁 (2017) 大槌湾周辺における東北地方太平洋沖地震後の海洋生態系の変化：東北マリン拠点形成事業（プロジェクトメニュー）による取り組みとその成果。三陸沿岸の岩礁藻場における地震と津波の影響およびその後の変化。 *Nippon Suisan Gakkaishi*, 83: 672-676.
- Kodama, M. and T. Kawamura (2019) First record of genus *Ventojassa* Barnard, 1970 (Amphipoda, Ischyrocweidae) from Japan. *Crustaceana*, 92: 1007-1013.
- Kodama, M, T. Kawamura, K. Nakamoto, N. Ohtsuchi, J. Hayakawa, T. Kitagawa and Y. Watanabe (2017) A comparison of amphipod assemblages between canopy and understory strata in seaweed and seagrass beds off the coast of Otsuchi Bay, Japan. *Biodiversity Journal*, 8, 471-473.
- Kodama, M., T. Kawamura, K. Nakamoto, N. Ohtsuchi, J. Hayakawa, T. Kanki, T. Kitagawa

- and Y. Watanabe (2020) Dynamics of gammarid assemblages associated with a *Sargassum yezoense* bed: comparisons between canopy and understory strata. *Marine Ecology Progress Series*, 634: 63-76.
- Muraoka, D., H. Tamaki, H. Takami, Y. Kurita and T. Kawamura (2017) Effects of the 2011 Great East Japan Earthquake and tsunami on two kelp bed communities on the Sanriku coast. *Fisheries Oceanography*, 26: 128-140.
- Ohtsuchi, N. and T. Kawamura (2019) Redescriptions of *Pugettia quadridens* (De Haan, 1837) and *P. intermedia* Sakai, 1938 (Crustacea: Brachyura: Epialtidae) with description of a new species. *Zootaxa*, 4672: 1-68.
- 高見秀輝・河村知彦 (2014) 宮城県牡鹿半島沿岸のエゾアワビ・キタムラサキウニ個体群が受けた東日本大震災の影響. *月刊地球*, 412: 47-52.
- Takami, H., T. Saido, T. Endo, T. Noro, T. Musashi, and T. Kawamura, T. (2008) Overwinter mortality of young-of-the-year Ezo abalone (*Haliotis discus hannai*) in relation to sweater temperature on the Northern Pacific coast of Japan. *Marine Ecology Progress Series*, 367: 203-212.
- Takami, H., N.-I. Won, and T. Kawamura (2013) Impacts of the 2011 mega-earthquake and tsunami on abalone *Haliotis discus hannai* and sea urchin *Strongylocentrotus nudus* populations at Oshika Peninsula, Miyagi, Japan. *Fisheries Oceanography*, 22: 113-120.
- Takami, H., T. Kawamura, N.-I. Won, D. Muraoka, J. Hayakawa and T. Onitsuka (2017) Effects of macro algal expansion triggered by the 2011 earthquake and tsunami on recruitment density of juvenile abalone *Haliotis discus hannai* at Oshika Peninsula, northeastern Japan. *Fisheries Oceanography*, 26: 141-154.
- Umezumi, Y., T. Onitsuka, T. Kawamura and Y. Watanabe (2017) Feeding of the short-spined sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* on macroalgae and benthic animals. *Fisheries Science*, 83: 221-233.

### 3-2-2 グループ 2 (アユの個体群構造)

津波による沿岸環境の攪乱が、両側回遊魚であるアユの生態および資源量に及ぼした影響を明らかにするため、アユの個体群特性を経年的に調べた。まず 2011 年 6 月に、岩手県釜石市の鶴住居川と大船渡市の盛川でアユを採集し、野生魚の耳石を用いて Sr:Ca 比の分析および日周輪解析をおこない、孵化日、遡上日、遡上時の体サイズを調べた。得られた結果を震災前 (2008~2009 年) のものと比較した。これらアユは、2010 年に生まれ、沿岸に生息している稚魚期に、津波による攪乱を経験した世代である。その結果、両河川とも、2011 年に採集されたアユは、前年の 10~11 月に生まれた個体のみで構成されており、震災前に主な遡上群だった 9~10 月生まれの個体がほとんど遡上



していなかったことがわかった。この孵化日組成を前年の流下仔魚数の時間的変化と比較したところ、9月に生まれた早生まれ群に相当する個体が検出されなかったことがわかった。アユは早生まれ個体ほど生息地間を早い時期に移動するため、この不一致は、津波が発生した3月に河口域に生息していた遡上直前の早生まれ稚魚が、攪乱の強い影響を受け、選択的に減耗した結果だと考えられた (Hata et al. 2016)。また、2011年に遡上したアユは、遡上時期は変わらないものの、震災以前より海での成長期間が短く、小型で遡上していたことがわかった (Hata et al. 2016)。このような成長パターンの変化は、その後の世代において、産卵期等の生活史スケジュールの変化を引き起こす可能性があると考えられた。

震災後にアユの個体群特性が変化していく過程を明らかにするため、鶴住居川において、同様の調査を2012～2014年におこない、孵化日、遡上日、遡上日齢、遡上体長、海での成長率の経年的変化を調べた。加えて、各年9～12月に流下仔魚を採集し、産卵期と流下尾数の時間的変化を調べた。

遡上アユの孵化日組成は、2012年では9月24日～11月24日(平均:10月24日)であり、10月中旬以降に生まれた個体が85%を占めた。この組成は、2011年遡上群とは差がなかったものの、2010年遡上群と有意差がみとめられた (Steel-Dwass test,  $p < 0.05$ )。しかし、2013年と2014年では、平均孵化日はそれぞれ9月29日、9月26日となり、2010年遡上群と有意差はなかった。流下時期も同様に、2012年では例年よりも約2週間遅い10月下旬にピークがみとめられたものの、2013年、2014年では10月上旬にピークがあり、震災前と同様の組成に変化した。以上のことは、津波によって変化した個体群特性が、世代を経ることで攪乱前の状態に復元されていることを示している (Kawakami et al. 2016, 北川ほか2017)。一方、遡上時の日齢と体サイズは、震災前と2012～2014年との間で有意な差が認められ (Steel-Dwass test,  $p < 0.05$ )、震災後にアユが若齢かつ小型で遡上するようになったことがわかった。遡上日は2014年を除き震災前後で同様だったことから、この変化は、産卵期の遅れによる海洋生活期間の短縮、および年間で有意差が認められた海での成長率の低下が要因として考えられた。

この個体群特性の変化には、海での成長および生残が影響している可能性が考えられた。そこで、2012～2014年で、仔魚の流下時期から推定した孵化日の頻度分布と、遡上魚の孵化日組成とを比較した。その結果、仔魚は各年で9～12月まで流下しているにも関わらず、遡上アユには11月以降に孵化した遅生まれ個体が出現せず、両者に不一致がみとめられることがわかった。このことから、孵化日依存の選択的な減耗が海洋生活期に生じていると考えられた。これら遡上アユの海における成長パターンを、耳石を用いて解析したところ、アユ稚魚の成長は、海水温が成長適水温(14～19℃)を下回った11月中旬頃から、海水温が上昇し始める4月上旬まで停滞していたことがわかった。また、早生まれ個体よりも遅生まれ個体のほうが、より小さい体サイズで成長停滞期を経験すると推測された。よって、アユ稚魚は海洋生活期の低水温により、長期にわたる

低成長を経験しており、これが孵化時期に依存した生残の差を引き起こすと考えられた。以上、震災後の継続的な調査により、岩手のアユでは孵化日に依存した成長・生残の差があることがわかり、このような生態的特徴をもつことが震災後の個体群特性の復元に作用したと考えられた。これらの結果は、産卵期や遡上期など、アユの生態に地理的な変異が生じる要因を具体的に説明する基礎となるとともに、水産上重要種を多く含む通し回遊魚の資源変動メカニズムや、環境への適応様式の解明にも大きく貢献することが期待される。

#### 引用文献

- Hata, M, T. Kawakami and T. Otake T (2016) Immediate impact of the tsunami associated with the 2011 Great East Japan Earthquake on the *Plecoglossus altivelis altivelis* population from the Sanriku coast of northern Japan. *Environmental Biology of Fishes*. 99: 527–538
- Kawakami, T., M. Hata and T. Otake, T (2016) The immediate impact of the tsunami on ayu *Plecoglossus altivelis altivelis* population in Sanriku region. In *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011 –Our knowledge acquired by TEAMS–*, edited by Kogure, K., Hirose, M., Kitazato, H., and Kijima, A., Tokai University Press, Kanagawa, 83–84.
- 北川貴士・川上達也・野畑重教・峰岸有紀・伊藤元裕・大竹二雄・青山潤・兵藤晋 (2017) 通し回遊魚に対する震災の影響. *日本水産学会誌*. 83(4):681–684.

### 3-2-3 グループ 3 (大槌湾に回帰するサケ親魚ならびに稚魚の動態)

サケは東北地方にとって基幹となる水産資源であり、岩手県では 1980 年代以降、年間 4 億尾を上回る種苗を生産・放流してきた。東日本大震災が発生した 3 月 11 日はサケ稚魚の放流が開始された時期と重なり、放流前の多数の稚魚が孵化場で飼育されていた。また河川内でも多くの稚魚が河床に滞留していたと推察される。津波は沿岸の多くの孵化場を破壊し、河床を掘り返した。孵化場や河川、さらには湾内に生息していたサケ稚魚の多くが海に流されたり打ち上げられたりしたと考えられる。震災前からサケの回帰率は低下する傾向にあり、震災によるさらなる影響が懸念された。そこで、震災がシロサケ個体群に及ぼした影響を生理・行動・生態・資源など様々な観点から評価するとともに、長期的な変動予測や持続的なサケ資源の維持管理、提言に貢献することを目的として研究を進めた。

#### (1) サケ親魚の回帰に対する震災の影響

日本産のサケは、湾内あるいは沿岸での数ヶ月間の成長期を経て北上し、夏秋季はオホーツク海で成長し、その後西部亜寒帯環流域に移動して海洋生活期最初の越冬を行う。翌春以降ベーリング海へと移動し、ベーリング海とアラスカ湾で2-4年程度の摂餌回遊と越冬を繰り返した後、母川へと回帰する。したがって、サケ回帰親魚の影響はすぐに現れるのではなく、震災年に孵化したサケ（2010年級）が回帰する数年後に顕在化することが予想された。一方で、川底に存在するバイオフィームなどにより作られる川の匂いを記憶して、遡上する母川を識別すると考えられている。津波や震災後の人間活動により河川の環境の攪乱がサケの回帰に影響を与える可能性も考えられた。そこで、回帰親魚の長期的なモニタリングを行うとともに、湾内での回帰行動をバイオロギングの手法を用いて調べた。

#### ● 回帰親魚の長期モニタリング

2012年の9月から新おおつち漁協がサケ定置網漁を再開したため、2012年から2017年までの6年間、10月から1月までの毎月定置網漁に同行し、各月雌雄10尾ずつを捕獲して船上で採血し、国際沿岸研究センターで組織を採取した。また、大槌湾に注ぐ河川（大槌川、鶉住居川）ならびに周辺河川（甲子川）で捕獲された回帰親魚についても調べた。

調査を開始した2012年は4歳魚（2008年級）が半数以上を占め、3歳および5歳魚がそれに続くという、三陸沿岸におけるサケ回帰親魚の典型的な年齢構成であった。しかし、2010年級が3歳魚として回帰する2013年には3歳魚の占める割合が大きく減少し、2014年には本来主群になるはずの4歳魚（2010年級）の割合が約2割まで落ち込んだ（Kusakabe et al. 2019）。同様の現象は、大槌川および鶉住居川で捕獲されたサケ親魚でもみられた。一方で、孵化場が大きな被災を免れ、震災年も孵化放流が行われた甲子川では、2010年級が約半数を占めて主群として回帰した（北川ら、2017）。このような河川による違いは、岩手県水産技術センターや東北区水産研究所による調査でも報告された。回帰親魚の年齢構成には上記の通り震災による大きな影響が認められたが、大槌湾で捕獲された回帰親魚数には2014年まで大きな影響は見られなかった。2014年は主群となるべき4歳魚が少なかったものの、5歳魚が多数戻ってきたため全体としては例年通りの回帰数であった。ただし、2014年には3歳魚である2011年級群も少なく、次年度への影響が懸念された。

2015年になると、大槌湾に回帰したサケ親魚の年齢構成は、2012年のような震災前の典型的なパターンに戻り、2016年以降も同様だったことから、震災による影響から回復したことを示した。しかし一方で、岩手県におけるサケ親魚の漁獲量は、2015年には2014年の6割程度の310万尾に激減した。2016年に岩手県に回帰したサケの来遊数も約300万尾と少なく、2017年度は約240万尾とさらに少なくなった。2018年には約

350万尾と若干増加したものの、2019年の回帰数は約75万尾へと減少し、1970年代はじめの資源水準にまで低下した。津軽石川サケ4歳魚の鱗バックカリキュレーション分析の結果、1997年回帰（1993年級群）以降、回帰率は幼魚の沿岸離岸時および海洋1年目の成長量との間に正の相関が見られた。2016年4月から6月の三陸沿岸表面水温は高く、サケ稚魚の沿岸滞在日数は極めて短かったことから、2016年春期の短い沿岸滞在日数が幼魚の低成長と低生残率をもたらし、結果として2019年親魚の低い回帰率となったと考えられる。

以上の結果から、津波により2010年級が多数死亡し、2013年と2014年における2010年級群の減少と年齢構成の変化につながったと考えられる。津波による大きな被害を免れた甲子川での結果からは、近年回帰数の減少が顕著である中でも、人工孵化放流事業がサケの水揚げに大きく寄与していること、ならびに河川生活期が短い三陸のサケにおいても強い母川回帰性があるという、水産学および生物学的に重要な事実が明らかにされた。一方で、サケの生残・回帰率には幼魚の沿岸離岸時と海洋1年目の成長量、すなわち降海直後の沿岸生活期と越冬期までの成長率が大きく影響し、このことが近年のサケ資源量の減少の主要な要因だと考えられる。近年では、ロシアやアラスカなどの高緯度地域のサケ資源が増加する一方で、日本やカナダのサケ資源量は大きく減少しており、温暖化の影響を避けては通れない。また、2014年は本来主群となる4歳魚の代わりに5歳魚の回帰数が多く、その結果としてサケの水揚げ量が前年を上回ったという事実から、他国由来のサケと競合する中での海洋収容力の影響も考慮すべきなのかもしれない。

#### ● 回帰親魚の生理状態と行動

母川に回帰する親魚は繁殖が目的であることから、適切なタイミングで成熟が進行する必要がある。加えて、繁殖は河川内で行われるため、海水型から淡水型へと適切なタイミングで体を作り替えることも必要となる。過去の研究から、大槌湾に回帰する後期群のサケでは、河川に入る前にアンドロゲンやエストロゲンが低下し、最終成熟に関わる17 $\alpha$ ,20 $\beta$ -ジヒドロキシ-4-プレグネン-3-オン(DHP)が上昇することが知られている。三陸サケの主群である後期群に関して、河口近くで捕獲した個体を調べたところ、過去の知見と一致して、湾内で成熟を完了させた後に遡上を開始していることが確認された。また、1-1で述べた湾口の定置網で捕獲したサケの血中ホルモン濃度を測定したところ、2012年と2015年では、12月までは成熟は完了していない個体が湾口に生息しているのに対し、1月では湾口でも成熟を完了している個体が多くなることがわかった。一方で、震災の影響で年齢構成に変化が現れた2013年と2014年には、12月の湾口でも成熟を完了させた個体が急増し、これは5歳魚や6歳魚の比率が増えたことによると考えられた(Kusakabe et al. 2019)。ただし、年齢構成による影響以外には、震災によるサケの繁殖生理に対する影響は見られなかった。また、塩分適応に重要な鰓

の塩類細胞の活性についても、ナトリウムポンプの遺伝子発現量が湾内で上昇し、あるレベルまで上昇すると遡上を開始することもわかった。この遺伝子発現が上昇するメカニズムは不明であるが、環境塩分濃度の変化とは直接関係していないため、性成熟の進行と関係することなどが示唆される。性成熟の進行と河川への遡上との関係については別項であらためて述べる。

回帰親魚の湾内での行動については、超音波発信器 (V16-5H, Vemco) を定置網で捕獲したサケに装着して放流し、大槌湾内の広範囲をカバーできるよう最大 20 ヶ所に受信機 (VR2Tx および VR2W, Vemco) を設置し、その受信記録を元に Vemco Positioning System により移動経路を推定した。一部の個体には深度・温度・塩分ロガー (DSTCTD, Star-Oddi) も装着した。2013 年から 2018 年までの 5 年間で 400 個体を放流し、死亡等でデータの取れなかった個体を除く 384 個体からデータを得ることができた。そのうち半数以上の 224 尾が大槌湾に注ぐ河川 (大槌川、小槌川、鶴住居川) には入らず湾口へと向かった。湾口へ向かった個体の多くが他の河川や湾外の定置網で再捕獲されており、三陸沿岸に回帰したサケは沿岸を南北に移動しながら遡上河川を探索することを強く示唆している。近年、河川に遡上するサケの減少により孵化放流事業に用いる親魚の数が不足し、湾内の定置網で捕獲した親魚を淡水飼育して、成熟完了後に用いられることが増えてきている。しかしながら上記の結果をもとに考えると、その多くが異なる母川や遺伝・生理・生態学的バックグラウンドを持つサケである可能性があり、長期的視点から検討する必要があるかもしれない。

一方、160 尾は大槌湾にそそぐ河川に遡上したが、遡上開始までの湾内での滞留時間や移動経路には個体差が認められた。そのパターンを解析すると、いずれの河川に向かう個体でも、大槌湾の南岸から移動し接近する傾向が見られた。大槌湾の南西岸にそそぐ鶴住居川 (59/91 尾、65%) は当然として、北西岸にそそぐ大槌川/小槌川に遡上した 69 個体でも約半数の 34 尾が南岸から北へと移動して遡上することがわかった (Nobata et al. 2019)。大槌湾では、コリオリ力により湾内の表層水が反時計回りに流れることが知られており、大槌川/小槌川ならびに鶴住居川から流入した河川水は表層を南岸方向に流れる。すなわち、サケは湾の南岸の表層に拡散する河川水を頼りに母川を探すため、南岸から表層水の流れに向かうように母川に接近すると考えられた。河川水の影響がない湾口エリアではサケは鉛直移動をしながら表層から深層までを泳ぐのに対して、湾奥では表層を中心に遊泳することも明らかになり (Nobata et al. 2019)、湾の南岸を流れる河川水を探索していることが支持された。大槌川/小槌川に遡上する個体は、降水量が多い年ほど北側からの経路を選択する個体が増える傾向も見られ、河川水量の増加により北岸に張り出す河川水量が増したためだと考えられる。震災前に行われた調査においても、低気圧通過に伴う湾内の水塊構造の変化に伴って、低温の河川水が多量に流入する湾奥にサケが移動することが示されており、この行動はこの地域で言われる「大雨で大漁」(大雨になると本種が定置網に入網する) という俗言を科学的に裏付け

るものである (Kitagawa et al. 2016)。復興工事の一部には、河川水の流量や流れに影響するものもある。工事の重要性は十分に理解しつつ、河川水の流れが仮に変わった場合には、サケの回帰行動、適切な捕獲を可能にする定置網の位置など、様々な影響が出ることも十分に考えられ、本研究の成果は今後の復興工事にも生かされなければならない。また、サケの不漁が続く魚卵の確保が困難になる中で、同じ湾にそそぐ河川であっても、サケの行動や河川への入りやすさという観点から孵化放流事業に適した河川とそうでない河川という考え方もでき、今後の孵化放流事業を考える一助になる知見であると考えられる。

384 個体の行動データを得ることができ、サケの回帰行動を理解する上で、今後さらにさまざまな知見が得られると期待される。放流時の DHP 濃度と河川への遡上開始までの時間には相関関係があり、DHP 濃度の高い個体は放流後短時間で川に入るのに対して、DHP の低い個体は長く湾内に留まる傾向があった。同様に大槌湾を出て他の湾の河川に入った個体でも、DHP 濃度と河川で再捕獲されるまでの時間の間には相関関係があった。このように三陸に回帰する後期群のサケは、最終成熟するまで湾内にとどまり産卵準備を整えた後に河川への遡上を開始する。また、鰓の塩類細胞に発現する淡水型ナトリウムポンプ遺伝子の発現が高い個体で、河川への遡上が早いこともわかった。さらに気象データとの関連を解析すると、サケの移動は風速の東西成分と強い関連を示すことがわかった。特に西寄りの風は大槌湾内の河川水の張り出しに影響するため、遡上個体の移動経路に大きく影響したものと考えられる。この結果は、周期的に吹く西寄りの強風により漁獲量が増加するという三陸沿岸での経験則とも一致する。

#### ● 岩手県沿岸河川に遡上するサケの遺伝特性分析

サケの資源管理や保全を考える上で、岩手県のサケがどのような遺伝的背景を持つ集団なのかを理解することが必要不可欠である。岩手県の河川に遡上するサケは前期群 (9 月上旬から 10 月下旬) と後期群 (11 月上旬以降) があり、河川によって遡上時期や遡上尾数が異なるほか、卵の移植や海で捕獲した親魚を用いて資源造成が行われてきたこともあり、河川ごとの遺伝的特性を明らかにする必要がある。

遡上尾数が多く、過去の卵移植の影響が少ない津軽石川をモデル河川とし、高多型性マイクロサテライト DNA マーカー 14 座 (10 座 : Tsukagoshi et al. 2015、4 座 : 未発表) を用いて、アليل数、アليل多様度、ヘテロ接合度期待値、ヘテロ接合度観察値などを指標に、ペアワイズ  $F_{ST}$ 、分子系統樹の構築、主座標分析、STRUCTURE 分析などから推定した。津軽石川個体については 2015 年から 4 年分のサンプルを解析した。まず年ごとの遺伝的多様性を比較した結果、アليل多様度は 2015 年と 2017 年で前期群が後期群より高く、ヘテロ接合度期待値は 2015 年のみで前期群が後期群より高かった (Mann-Whitney 検定  $P < 0.05$ )。年度内および年度間でみると、前期群と後期群のほぼ全ての組

合せて分化が見られた。また、年度ごとの遡上全期の分子系統解析から、全ての年度で前期群と後期群の間の分岐の確からしきは99%以上となり、隣接する旬で近縁となった。前期群内および後期群内では、ほぼ分化がみられなかったほか、年度によっては後期群の系統樹の分岐の確からしきが40%未満と低い値を示したことから、群内での遺伝子流動の可能性が考えられた。4年間の結果を比較すると、年ごとの違いはほとんど見られなかった。

三陸全体の特性を理解するため、後期群が中心である大槌川(2016、2017年度)ならびに前期群が中心の安家川(2018年度)についても比較解析を行った。津軽石川後期群と大槌川後期群の遺伝的多様性には違いはなかった(Mann-Whitney 検定  $P > 0.05$ )。津軽石川の前期群と大槌川後期群の間では遺伝的な分化がみられたが、津軽石川と大槌川の後期群間の分化はみられなかったことから、二河川の後期群の間に遺伝子流動の可能性が考えられた。一方で、安家川はふ化放流事業によってサケが遡上するようになった河川であり、前期群と後期群のほぼ全ての組み合わせで遺伝的分化がみられた。前期群と後期群の間の分岐の確からしきは100%であり、隣接する旬で近縁な関係にあった。安家川では、前期群内ならびに後期群内においても一部の組合せで分化がみられた。2018年の津軽石川と安家川について主座標分析を行った結果、津軽石川と安家川の後期群の一部で一つにまとまった。これは二河川間の後期群の一部に遺伝子流動の可能性があり、過去の卵移植を反映している可能性が考えられた。

河川遡上集団を対象とした解析から、岩手県の河川に遡上するサケには沿岸河川前期群、沿岸河川後期群、北上川水系という3つの遺伝的集団があることがわかってきた。これらが沿岸海域においてどのように集団形成しているのかを明らかにするため、2014年度に岩手県沿岸4海域(久慈沿岸、宮古沿岸、釜石湾、大船渡湾)において漁獲された時期の異なる7つの集団標本を用いて、msDNA マーカー16座により遺伝特性分析を行った結果、前期ならびに後期といった漁獲時期ごとのまとまりがみられた。沿岸海域前期集団は沿岸河川前期群に、沿岸海域後期集団は沿岸河川後期群にそれぞれ内包され、沿岸海域集団の漁獲時期と河川集団の遡上時期が一致した。このことから、三陸沿岸海域で漁獲されている集団は、まもなく河川を遡上する個体で構成されることがわかった。一方で、沿岸海域前期・後期内の集団間では遺伝的に分化していない組み合わせも一部でみられた。沿岸河川前期群内の集団間では、ほぼ全ての組み合わせで遺伝的に分化しているのに対して、沿岸海域前期集団間では分化がみられないことが多かった。沿岸海域集団は、同時期、もしくは、比較的近い時期に河川に遡上する個体で構成されているものの、複数河川に由来する集団が混在していることも示唆された。

## (2) サケ稚魚に関する研究：サケ資源の回復を目指して

サケ親魚に関する研究から、震災による孵化放流事業への被害がサケ親魚の回帰に対

して一時的に大きな影響を与えたものの、その影響は震災年に孵化した 2010 年級群を中心としたものであり、その回帰が終了する 2016 年以降に影響が継続することはなかった。一方で、回帰親魚の資源量は震災前から減少傾向にあり、震災による回帰親魚の年齢構成変化がみられた 2013 年あるいは 2014 年において、回帰親魚数の顕著な減少は見られなかった。その一方で、2015 年以降は回帰親魚数が大きく減少し、2019 年度はきわめて深刻な状況となっている。このような減少に対して震災の影響は考えられず、サケ稚魚の降海直後の沿岸生活期と越冬期の成長率が大きな影響を及ぼしていると考えられる（前述）。そのため、本拠点事業においても、後半の 5 年間は震災の影響を考えつつも、サケ稚魚の生態・生理学的特性に注目した研究を進めることで、サケ資源の回復、三陸水産業の復興に貢献することを目指してきた。

現在のサケ資源は孵化放流事業によって支えられている。このことは、震災の影響からも再確認されたことである一方で、その地域・河川の特性に根差した天然資源の重要性も示唆されている。そこで三陸の河川におけるサケの自然産卵の実態を明らかにする研究、孵化後の降海生態に関する研究、降海後の沿岸（湾内）生活期の分布生態の研究、鳥類によるサケ稚魚捕食の実態、温度耐性に関する研究などを進めてきた。

#### ● 三陸河川におけるサケの自然産卵

親魚の行動生態研究でも言及したとおり、大槌川と小槌川は大槌湾の北西岸にそそぐ河川であり、両河川は河口を共有している。大槌川では震災後も孵化放流が行われているのに対して、小槌川は震災後に孵化放流が行われなくなったという特徴があり、自然産卵の比較研究を行うモデル河川として適している。

2014 年 9 月から翌年 1 月まで、大槌川の大槌大橋下流端から征内橋上流の堰堤までの約 4 km の区間において踏査を実施したところ、12 月をピークに計 160 床の産卵床を観察した。そのうちの 9 割は大槌橋から大ヶ口の堰堤までの約 1 km の区間に集中していた。孵化放流事業を実施している典型的な三陸河川である大槌川においても、野生魚および自然産卵が継続していることが、孵化放流事業が大規模化して以降初めて明らかになった（Aoyama 2017）。

2017 年からは大槌川と小槌川の両河川において、毎年 9 月からサケ親魚の遡上および産卵が終わる翌年 2 月もしくは 3 月までの約半年にわたって、目視による遡上親魚数の計数、産卵床数と場所の記録、産卵後のサケの死骸（ホッチャレ）の計数と計測、鱗による年齢査定、DNA 分析を実施してきた。大槌川では 2017 年 11 月から 2018 年 1 月までの間に 106 床を記録した。産卵床数は 12 月上旬にピークを迎え、孵化場が採卵用親魚を捕獲するための川止めを撤去した 1 月上旬以降も、少ないながらも 1 月 30 日まで新規産卵床を見出した。既往研究の結果とも合わせると、河川・河口の環境変化や年変動はあるものの、大槌川では毎年 100 床程度の産卵床からなる自然産卵を維持してい



ることが明らかになった。一方、小鍬川では、毎年9月下旬から翌年2月半ばまでサケ親魚が遡上し、11月下旬から急増すること、12月半ばにピークを迎えて1月に入ると急減するパターンを示すことがわかった。産卵床は10月上旬から翌年2月初めまでの間に、調査区間全体で少なくとも300床程度が記録され、その分布は河口から1.5 kmから2 km上流の約500 mの区間と、河口から3 km程度の地点から上流の約1 kmの区間に集中することがわかった。小鍬川には、2017年および2018年シーズンはそれぞれ約1800個体、2019年シーズンは896個体（2020年2月20日現在）の親魚が遡上し、その平均尾叉長は64.9-67.5 cmであった。孵化放流を実施している大槌川で採卵用に採捕された親魚尾数をもとに考えると、小鍬川に遡上する親魚数は大槌川の親魚数の5割から6割程度に相当し、かなりの数のサケ資源が小鍬川の自然産卵で維持されていると考えられた。2019年シーズンは岩手県全域でサケ親魚の回帰が著しく少なく、定置網による捕獲尾数は前年の20.2%、孵化場による捕獲尾数（河川遡上）は前年の26.2%（2020年1月31日現在；岩手県農林水産部水産振興課）と、孵化放流事業が大規模化する以前の水準と同程度に止まった。遡上親魚の減少は小鍬川も例外ではなく、野生魚集団も海洋環境の影響を大きく受けることが推察された（峰岸・青山 2019）。

自然産卵するサケの産卵環境を調べたところ、産卵床内は表流水よりも有意に電気伝導率が高く溶存酸素濃度が低く、産卵床内は地下水の水質に影響される環境であることがわかった。一方、非産卵場所の河床内は、産卵床内よりも有意に電気伝導率が高く、溶存酸素濃度が低かった。河床材料は、産卵床では粗い中礫が優占したが、非産卵場所では砂の割合が高かった。産卵床内ではサケが河床を掘ることにより通水性が高まり、表流水の影響が強まった可能性が考えられた。また、小鍬川では局所的な地下水の湧出に対する選好性が弱いことも示唆された。

現在、鱗を用いた年齢査定を行っており、小鍬川の遡上個体群の年齢構成を明らかにするとともに、DNA ジェノタイピングによる親魚の家系分析を行う。2019年に回帰した親魚のうち2歳魚は2017年に採集したホッチャレの子供世代であるため、親子関係の数やジェノタイプの組成等を明らかにする。産卵環境については、卵・稚魚期の生残に対する影響を調べるとともに、環境の異なる他の流入河川でも同様の調査を行い、河川間で比較することで、三陸の河川におけるサケの自然産卵の実態を明らかにする。

#### ● 大槌湾流入河川におけるサケ稚魚の降海生態

孵化放流を行っていない小鍬川だけでなく、大槌川でも相当数の自然産卵が行われていることがわかった。そこで次に、サケ稚魚の降海時期および降海時の体サイズ組成を調べた。2015年4月に小鍬川と大槌川において稚魚を採集したところ、小鍬川の稚魚の降海サイズは比較的均一で、平均尾叉長45 mm、平均体重0.6 gだったのに対し、大槌川では明瞭な二峰型が認められた。小鍬川と同じモードを持つ個体群の他に、平均尾

又長 65 mm、平均体重 1.9 g という大型の群れが含まれており、放流稚魚のサイズに相当した。すなわち前者は野生魚、後者は孵化放流魚であり、河川から河口域ではサイズおよび体型、体色により両者を明瞭に区別できることがわかった。

さらに、耳石の炭素・酸素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) および筋肉の炭素・窒素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) を用いて、人工孵化放流魚と野生魚が判別できるかどうかを検討した。このことが可能になれば、海洋生活初期や、回帰親魚においても放流魚と野生魚の判別ができると考えたからである。その結果、筋肉の  $\delta^{13}\text{C}$  と  $\delta^{15}\text{N}$  を用いることで野生魚と孵化放流魚を判別できることが示されたが、一部で値の重複が認められた。体組織の安定同位体比に基づくサケ稚魚の由来判別は可能であるが、フィールド調査への適用にはさらに詳細な検討が不可欠と判断された。

2017 年から 2019 年には、各河川における降海稚魚数の時間的変化を調べた。2019 年には鶴住居川も調査対象に含めた。小槌川では 2017 年 1 月 25 日から 5 月 17 日にわたって稚魚が採集され、降海のピークは 4 月上旬の 1 回のみだった。2019 年は 2 月中旬から 5 月下旬に稚魚が採集され、ピークは 3 月下旬と 2017 年と比べてやや早かったものの、2017 年と同様の結果が得られた。稚魚の尾又長は 2017 年、2019 年ともに  $41 \pm 3$  mm (平均±標準偏差) だった。一方大槌川では、2017 年 2 月 6 日から 5 月 2 日までの間に稚魚が採集され、その間、複数回のピークが認められた。このうち前半のピークは大槌川孵化場からの稚魚放流のタイミングと同期していた。2019 年は放流が始まる前の 1 月中旬から 4 月上旬まで採集され、2017 年と同様に複数回のピークが認められた。稚魚のサイズは小槌川よりも大きく、2017 年が尾又長  $54 \pm 7$  mm、2019 年が  $47 \pm 6$  mm だった。鶴住居川ではこれら 2 河川と比べて稚魚の出現が早く、1 月上旬から 6 月上旬まで採集され、大槌川と同様に複数のピークが認められた。稚魚の放流が始まる前の 1 月に採集された個体は、野生魚に相当する小型の稚魚のみで構成されていたものの、2 月下旬以降は放流魚とみられる 50 mm を超える大型稚魚も採集されるようになった。このように、同じ大槌川にそそぐ河川でもサケ稚魚が降海するタイミングと体サイズは異なり、大槌川と鶴住居川では孵化場からの放流のタイミングと量に大きく影響されるのに対し、自然産卵にのみ由来する小槌川の稚魚は、サケが本来持つ生理・生態学的特性に基づく独自のスケジュールで海に降るためだと考えられた。

### (3) 大槌湾内におけるサケ稚魚の分布生態：採集調査から

2016 年から 2019 年に、湾内の沿岸域で海洋生活期の稚魚を採集し、体長組成を比較した。2016 年には 3 月 17 日から 5 月 20 日に採集調査を実施し、3 月には 344 尾、4 月には 3221 尾、5 月には 956 尾のサケ稚魚を採集した。砕波帯ネットで採集された稚魚の尾又長平均は 39~46 mm であり、降海直後の稚魚が砕波帯に分布していたと考えられた。4 月 26 日から 27 日のほぼ同時期に地曳網と砕波帯ネットによる採集を実施できた

室浜と箱崎の2地点において、いずれも地曳網により捕獲されたサケ稚魚のほうが砕波帯ネットよりも大型であった（室浜、地曳 45±4 mm、砕波帯ネット 44±4 mm；箱崎、地曳 46±5 mm、砕波帯ネット 41±4 mm）。また、同時期に近傍の安渡と根浜において二艘曳き網により採集された個体は、さらに大きい傾向があった（安渡、50±4 mm；根浜、47±3 mm）。それぞれの漁法で採集された稚魚の体サイズは、採集年の間でほぼ同じであった。また、沖合の地点ほど採集された稚魚が大型化する傾向は、2017年と2018年の調査でも確認された。2019年には砕波帯に着目して2月から6月に調査を行ったところ、降海稚魚の出現時期に相当する2月上旬から5月中旬頃まで採集され、その体サイズは37~48mmであった。降海直後と考えられる稚魚が多数採集され、採集期間を通じて体長組成に変化はほとんどなかった。以上のことから、サケ稚魚の群れは砕波帯に留まるのではなく一時的な生育場として利用していること、成長に伴い沖合へ移動すること、沖合に滞在して成長することが示唆された。

2017年には稚魚の耳石 Sr:Ca 比を測定し (n=22)、降海後の耳石成長量を最終地点間で比較した。その結果、砕波帯で採集された稚魚は海での成長量がわずかであり、降海直後だと考えられた。これに対して地曳網と二艘曳き網で採集された稚魚は成長量が大きく、より長い期間を海で過ごした個体だと考えられた。このことから、サケ稚魚が砕波帯を含む渚帯を降海直後の生息場として利用し、その後沖へと泳ぎ出す移動パターンが示唆された。

#### ● 大槌湾内におけるサケ稚魚の分布生態：環境 DNA 分析から

稚魚を実際に採集することにより、その成長を分布とともに記録することができる。一方で、採集を大槌湾全域で高頻度に行うことは非現実的である。そこで、環境 DNA 分析を新たに取り入れることで、大槌湾全域におけるサケ稚魚の分布の時空間的変動、さらには餌生物である動物プランクトンとの関連を明らかにしようと考えた。まず、サケの環境 DNA を特異的かつ定量的に検出する手法を開発した。実験室で飼育中のサケ稚魚を用いて、水槽実験により特異性と定量性の検証を行った結果、サケ稚魚の環境 DNA の主な起源は排泄物以外であること、サケ稚魚の環境 DNA の放出と崩壊は時間と水温によって大きく異なること、環境 DNA の崩壊には水中の微生物が大きく関与すること、低温であっても数日以内にほぼ検出できなくなること、サケ稚魚の個体数と環境 DNA 量の間には正の相関があることなどを明らかにした。

しかしこの方法を大槌湾の海水サンプルに適用したところ、同時に実施したネット調査ではサケ稚魚が採集されたにも関わらず、サケの環境 DNA が検出されなかった。この原因を探ったところ、大槌湾の水には PCR 阻害物質が含まれることが明らかになった。そのため、さまざまなトラブルシュートを試みた結果、(1) 抽出した DNA を精製するステップを新たに追加し、その上で (2) 環境サンプルに特化した定量 PCR 分析試薬を用

いることで、PCR 阻害を解消することができた (Minegishi et al. 2019)。

2017 年から 2019 年の 3 シーズンにかけて、サケ稚魚が降河を始める時期から離脱する約半年にわたって定点定期採水を実施し、環境 DNA 分析を行った。毎年 1 月下旬から 6 月下旬までの約 5 ヶ月の間、大槌湾全域をカバーする計 13 測点（沿岸 5 地点、湾内 5 測点、湾口 3 測点）で毎週 1 回、表層もしくは 1 m 層から採水してサケの環境 DNA 分析を行った。その結果、稚魚が湾内に分布する時期の全期にわたって、初めて詳細な時空間的分布を明らかにすることに成功した。1 月末から 2 月にはサケ稚魚の DNA は湾奥部の沿岸で多く検出された。孵化場からの稚魚の放流が本格化する 3 月には、湾奥部でサケ稚魚の DNA が多く検出されるだけでなく、湾央や湾口部でも DNA が検出され、サケ稚魚はこの時期に徐々に湾から出て行くことが示唆された。ところが 4 月になると、湾奥部では継続して多くのサケ稚魚の DNA が検出されるにも関わらず、湾口では検出されなくなり、5 月に再び検出されるようになった。湾奥部で多く検出されていたサケの DNA は 5 月後半から徐々に少なくなり、6 月半ばにはサケ稚魚の DNA は湾内で検出されなくなった。以上の結果から、降海直後のサケ稚魚は主に湾奥部の沿岸に生息することがわかり、このことは砕波帯ネットによる採集の結果ともよく一致した。また、沿岸・湾内・湾口の 3 グループに分けて時系列変化を解析すると、沿岸から湾口にかけてサケ稚魚が移動していき、その移動は 3 月から 4 月上旬と、5 月以降という 2 回存在することが示唆された。沿岸から湾口への移動は、成長に伴い沖合に移動するという採集調査の結果ともよく一致した。また既往研究においては、三陸沿岸のサケ稚魚は、親潮水の接岸と離岸に関して、2 回のピークを持って北方への移動を開始すると考えられており、今回の結果は初めて湾内でその移動を検出できたものと考えられる (Minegishi et al. 2019)。

既報のサケ稚魚の胃内容物調査の結果に基づいて、サケ稚魚の餌となり得る動物プランクトン 3 種 (*Pseudocalanus newmani*, *Eucalanus bungii*, *Themisto japonica*) を選定し、定量 PCR による検出系を新規に立ち上げた。*P. newmani* の DNA は、採水した全期にわたって湾内で広く検出された。2019 年には、親潮が大槌湾に流入した 2 月下旬から豊富に検出され、6 月からはやや少なくなる傾向が認められた。冷水性の本種は親潮の流入に伴って湾内に分布すると予想され、調べた全期にわたって検出されたことから、湾内で再生産を行っていることが確認された。これに対して、他の 2 種 *E. bungii* および *T. japonica* は、*P. newmani* と比較すると量的には少ないものの、3 月後半から 5 月初めに限定して湾内で広く検出されたことから、親潮に輸送された個体が湾内に一時的に分布し、その後は湾内で再生産することなく死滅すると考えられた。また、沿岸で採集したサケ稚魚の胃内 DNA を調べた結果、小型の稚魚では *P. newmani* の、比較的大型の稚魚では *T. japonica* の DNA がそれぞれ多く検出された。このことから、成長したサケ稚魚は、分布および量が限られる *T. japonica* を選択的に摂餌する可能性が考えられた。再生産の有無は種によって異なるものの、いずれの動物プランクトンもサケ稚

魚が湾内に最も多く分布する3月から5月にかけてもっとも多く生息することから、これらがサケ稚魚の初期の餌生物として重要であることが強く示唆された。今後解析対象種を増やすことで、サケ稚魚の初期の成長・生残向上のための重要な基礎的知見が得られると考えている。

環境DNA分析がサケ稚魚の時空間的分布の推定に有効であることから、これまでの湾内での動態に加え、大槌湾から離脱した後の三陸沿岸からオホーツク海へ向かう北上回遊ルート of 解明にも応用できると考え、湾外での調査も開始した。新青丸KS-19-7次航海において、三陸沖北緯39°N線上の沿岸から沖合約100kmまでの複数の測点において表層および層別採水(水深20, 50, 100m)を行った。現在、これらの環境DNA分析を実施している最中であり、本種稚魚の三陸沖合域における北上回遊経路などを明らかにしていく。

#### ● 野田湾におけるサケ稚魚の分布生態

大槌湾をはじめとする岩手県南部の内湾域では、前述の通り、降海後しばらくの間、湾内で成長した後に沖合域に移出する(Minegishi et al. 2019)。一方で岩手県北部は遠浅の海域が続き、外洋に直接面した開放型の湾が多く連なる。このような、海洋条件の異なる外洋に面した開放的な海域を対象としたサケ稚魚の動態は全く把握されていない。岩手県北部に位置する野田湾は、外洋に直接開く開放性の湾で、岩手県沿岸河川におけるサケ稚魚放流数の1割を占める安家川がそそぐほか、他の小河川でも小規模ながらサケ稚魚放流が行われている。

野田湾を取り囲む4漁港(野田, 玉川, 下安家, 堀内)内で、3月14日~6月20にかけて合計6回のサケ稚魚採集調査を行った。3月14日以降採集数は減少し、6月20日には採集されなくなった。CPUEは3月14日が7.3-101.7尾(尾叉長16.8-78.8mm)、3月29日が7.3-80.0尾(尾叉長31.8-86.1mm)、4月16日が4.3-27尾(尾叉長37.2-70.4mm)、5月13日が3.3-1.83尾(尾叉長36.1-62.2mm)、5月27日が1.0-45.0尾(尾叉長37.1-64.6mm)で、水温の上昇に伴い低下した。尾叉長と肥満度は4月から5月にかけて低下した。海洋生活日数は、期間を通して概ね20日程度で推移していた。降海時の体サイズは、後半になるほど大きくなった。さらに、降海後の日間平均成長速度は3月から4月にかけて有意に低下していた。岩手県中南部の沿岸内湾域では、4月頃は餌となる動物プランクトン量の増加が報告されている(岩手県水産技術センター, 2019)。今後、野田湾での餌環境を把握するとともに、大槌湾での結果と比較することにより、開放式の湾とリアス式の湾という、岩手県の南北による違いが明らかになると考えられる。

#### (4) 鳥類によるサケの人工孵化放流魚の捕食

サケの母川への回帰率低下の一因として、鳥類などによる食害が問題視されていた。2016年と2017年には、サケ稚魚を捕食する鳥種、ならびに捕食スポットの特定を試みた。カモメ科とサギ科、ウ科、アイサ類を含む21種の鳥種においてサケ稚魚捕食が確認され、サケ稚魚の捕食は大槌川において頻繁に観察され、孵化場から700m下流に位置する浅瀬に集中していた。この結果をもとに、2018年には大槌川の浅瀬を捕食のホットスポットとして、捕食量推定を実施した。定点カメラを設置し、飛来する鳥種とその羽数を連続記録したところ、稚魚が放流される2月下旬から5月上旬にかけて累計14,455羽の鳥が浅瀬に飛来し、特にカモメ科が多い(全体の80.9%)ことが明らかとなった。カモメ科の飛来数増減は、孵化場からのサケ稚魚放流と連動しており、放流日～翌三日にかけて増加した。この飛来数に対して、目視観察をもとに算出したカモメ科の平均採餌速度(3.0尾羽<sup>-1</sup>時間<sup>-1</sup>)を乗じることで捕食量を推定した。その結果、時季を通して約35,000尾、放流尾数に対して0.28%のサケ稚魚がカモメ科に捕食されていると推定された。2019年には大槌川孵化場協力のもと、浅瀬に防鳥テグスを設置し、その効果を検証した。浅瀬への飛来数は、2018年と比べて累計8,252羽までに減少し、特にカモメ科の飛来数が激減した。一方、サギ科とウ科の飛来数は2018年と比べて増加していた。防鳥テグスは、飛翔しながらサケ稚魚をついばんでいくカモメ科に対しては効果があるが、脚を着水させて捕食するサギ科や水中を潜行しながら捕食していくウ科には効果がないことが示唆された。また、カモメ科が優先していたことでサケ稚魚の捕食に参加していなかったサギ科とウ科が、カモメ科の飛来数減少に伴って積極的にサケ稚魚の捕食に参加するようになる可能性が示された。サギ科とウ科は、カモメ科に比べて採餌速度が速いため、時季を通じた捕食量推定値は2018年よりも多くなる結果となった。特定の種を対象とした被害防除は、かえって被害を助長することが示唆された。

直接観察が困難な大槌湾全域～三陸沿岸域については、鳥類によるサケ稚魚の捕食を調査するにあたり、主たる捕食者であるカモメ科ウミネコを対象とした糞と血液の窒素炭素安定同位体比分析、ならびに動物装着型GPSによる行動追跡、胃内容物分析を2018年から行った。糞と血液の窒素炭素安定同位体比をもとに、SIARモデルによってウミネコの餌におけるサケ稚魚の寄与率を推定すると、割合はほぼ0であり、代わりにカタクチイワシやマイワシといった浮魚の割合が高くなった。2018年と2019年にGPSを装着したウミネコ14個体の2～6月の移動軌跡から、河川や湾内に長く留まるのではなく、外洋域まで頻繁に移動することが明らかになった。胃内容物からもサケ稚魚は観察されず、イカなどの頭足類や浮魚、ハダカイワシ類が観察された。これらの結果から、大槌における鳥類によるサケの人工孵化放流魚の捕食の程度は低く、サケの母川への回帰率低下の一因とは考えづらいことが示唆された。

鳥類によるサケの人工孵化放流稚魚への捕食圧を科学的に見積もることに対する要望は強く、定点カメラによる連続観察をベースに得られた捕食に関するデータは今後のサケ稚魚放流のタイミングの決定などにも大きく貢献すると考えられる。鳥類によるサケ稚魚食害は、大槌町のみで指摘されるローカルな現象ではなく、国内外問わず他の地域でも問題視されている。大槌町で実施したものと同様の調査は他の地域からのニーズがあり、2019年からは同様に鳥類によるサケ稚魚食害が問題視されていた北海道渡島管内の複数河川においても調査と技術指導を実施している。この調査方法は比較的簡便であるため、今後、食害推定の一手法として広く普及していくことが期待される。

#### (5) 北日本に繁殖するウトウによるサケ幼魚捕食量と海鳥をサンプラーにしたサケ研究

降海後オホーツク海に入るまでの、当歳魚のサケ幼魚の回遊や成長、高次捕食者による捕食などを明らかにするため、回遊経路にあたる青森県弁天島、鯛島と北海道日本海側の松前小島、天売島、礼文とど島、岩手県産のサケ幼魚の多くが通過すると予測される北海道太平洋側の大黒島において、魚類を主に餌とする潜水性海鳥であるウトウの餌を収集し、サケ幼魚の調査を行った。

日本海側の3島からは、北海道の日本海側沿岸の河川由来のサケ幼魚のみが見つかった。一方で、太平洋側の大黒島では、主に北海道太平洋側沿岸の河川から放流されたサケ幼魚が見つかった。青森県の津軽海峡に位置する弁天島と鯛島のウトウの餌からはサケはみつからなかった。2014年から2019年までの全サンプル（約500サンプル）について耳石を調べたが、どの島からも岩手県三陸地域由来と考えられるサケ幼魚はみつからなかった。この結果の妥当性を検証するため、2014年から2018年までの間に北海道太平洋側で得られた全てのサケ幼魚の筋肉からDNAを抽出し、北海道系群、三陸系群、北上系群を識別したところ、すべての個体は北海道系群である可能性が高く、耳石の結果を支持した。したがって、北海道太平洋側の河川由来の個体は、これまでの想定通り、太平洋をオホーツク海に向かって北上するが、7月～8月の北海道太平洋沿岸には、岩手県由来の個体はほとんど存在しないことが示唆された。

各島でのウトウの採餌域を、GPSを取り付けて調べたところ、ほぼ全ての個体が岸から数km～数十kmという、200m以浅の大陸棚域で採餌していることが確認された。また、利用している水温帯は表面水温10～13℃であることが多かった。この海域は、これまでのサケ幼魚が回遊しているとされる海域であり、北海道系群を対象としたサンプラーとしてウトウは利用できるものの、岩手県をはじめとする本州太平洋岸由来の個体群には利用できない可能性が高い。粒子シミュレーションによる既存の研究では、岩手から北東方向の外洋を通って北海道東部に入っていくルートが示唆されているが、これまで想定されていたものとは異なる回遊ルートの存在を検討する必要があると考えられた。

ウトウによるサケ幼魚の捕食圧を、ウトウの餌に含まれるサケ幼魚の割合とウトウの

繁殖数から推定した。今回解析した6島におけるウトウの繁殖数は、日本に繁殖する本種の繁殖数の95%以上をカバーしている。その結果、多く見積もってもウトウによるサケ幼魚の捕食量は全サケ幼魚の資源量の8%に満たないという事が明らかになった。また、この推定捕食量は、ウトウが雛に与える餌と親自身が摂取するもの全てに対応すると仮定した時の値であり、親鳥と雛の餌をそれぞれ調べた年の結果によれば、捕食量はさらに少なく見積もられる。北海道太平洋側の大黒島でウトウが捕食するサケ幼魚には岩手県由来の個体がほとんど含まれていない可能性が高いことから、系群ごとに鳥類による捕食圧が異なることも示唆された。なお、この捕食量推定を行うため大黒島においては、ウトウの繁殖数調査も行い、64,000-122,000個体が繁殖していることが明らかとなった(大門ら、2019)。

## (6) 温度耐性と海水適応能

サケの成長、生残、回帰には、親潮の接岸を含む稚魚期の水温環境、降海時の海水適応能、暖水塊など回帰時の水温環境など、さまざまな環境要因が影響すると考えられている。ロシアやアラスカなどの高緯度域でサケ資源が増加している近年、温度耐性や海水適応能が高い集団が得られれば、将来の三陸のサケ資源回復に向けての大きな貢献となる可能性がある。

岩手県の多くの河川では前期群と後期群という、異なる水温環境で回帰する群が存在する。また、北上水系のサケは河川が長いこと、周囲の河川と比べて水温の高い時期に回帰してくることが知られており、三陸沿岸集団に比べてより広い温度範囲で高い遊泳能力が維持されるなど、適水温が異なることも明らかになった(Abe et al. 2019)。現在は唐丹湾に注ぐ熊野川で人工孵化させた稚魚でも同様の計測を行っている。前期群と後期群、北上水系のサケが、それぞれ遺伝的に分化していることも本研究で塚越らにより明らかにされており(塚越・後藤、2018)、異なる適水温に関わる遺伝子やエピジェネティックな要因が明らかになることが期待される。まだ予備的な段階ではあるが、稚魚を用いた温度耐性実験を実施した結果、温度耐性に違いがある集団の存在、さらには温度耐性が高い集団においてヒートショックタンパク質(HSP47)の発現が高いことがわかってきた。HSP47と相互作用するタンパク質の絞り込みも進んでいる。

サクラマスでは孵化から1-2年後の3月から5月にスモルト化が起こり、海水適応能を獲得して降海するが、サケでは浮上後すぐに降海するため、海水適応能の獲得についてはよくわかっていなかった。これまででも体サイズにより海水適応能が異なるという結果はあったが、稚魚期に詳細に調べた結果、浮上から1週間後、卵黄吸収が終わり摂餌を開始するタイミングでスモルト化が起こることがわかった(Wong et al. 2019)。スモルト化により発現が変動する遺伝子も明らかにされつつあり、今後放流魚でも調べることで、放流のタイミングにも新たな示唆を与える可能性がある。



稚魚だけでなく、回帰親魚でも塩分適応能と最終成熟の関係を調べてきた。後期群の場合、最終成熟をすましてから河川を遡上するため、淡水適応（海水適応能の喪失）と最終成熟がほぼ同時に起こる。一方で、前期群や北上水系群では、河川を遡上してから最終成熟が起こるため、淡水適応と最終成熟は異なるタイミングで起こることが確認された。海水適応能の喪失と関連して、鰹塩類細胞で発現する複数のナトリウムポンプ遺伝子の発現プロファイルが明らかになりつつあり、後期群では発現上昇と遡上行動の間に相関が認められている。通常、ナトリウムポンプは海水や淡水への適応と関係すると考えられるが、前期群や北上水系群での解析からは成熟・産卵との相関が認められており、淡水適応と最終成熟を制御する要因の解明に繋がる可能性がある。

## (7) アウトリーチ活動

本事業においては、三陸沿岸のサケ産業の復興と持続可能な展開を目的として、さまざまなアウトリーチ活動を行ってきた。その中でも顕著なものとして、地元への研究成果の普及を図るため、双方向のコミュニケーションを充実させる「さーもん・かふえ」を2013年から毎年開催してきた。研究者と行政・漁業者等のステークホルダーが一体となって開催し、三陸サケの利用と保全のための持続可能な資源管理技術を確立、サケづくりに励む現場の「問題点」を共有して解決していく「場」の提供、最新の研究成果をはじめとするサケを取り巻く情報（地球環境変動、社会情勢）の発信、ふるさとのサケに関する憩いの「場」、相談の「場」とすることを目指してきた。2017年からは、サケ漁業復興支援のさらなる展開のため、漁業関係者のみならず広く一般市民を含む、より広範な普及啓発活動を継続的に行うため、これまでの「実行委員会」を発展的に解散し、東京大学大気海洋研究所、北海道大学、および岩手県水産技術センターからなる「三陸サケ資源協議会」を新設した。本協議会は、これまでのように孵化場や漁業関係者を対象としたセミナーに加え、長期的な地域振興に資するサケ情報の発信を目指して活動しており、本事業が目指す「拠点形成」の一環である。

また、大気海洋研究所では、三陸沿岸地域の復興を目指して「海と希望の学校 in 三陸」を2018年より展開している。ここでは、科学的な調査研究に加え、地域の海洋学的・人文社会科学的特徴を明確にし、住民や生徒との対話型授業を実施する中から、復興・振興において海の持つ可能性とそれを生かしたローカルアイデンティティの確立、人材の育成を目指している。青山・北川・峰岸をはじめとする本グループの多くのメンバーがこの事業に関わり、グループ2の成果を発信している。本事業が目指す「長期的・継続的な拠点」として、今後のサケ漁業・資源・文化の回復に向けて中心的な役割を担う場となると確信している。

## (8) 引用文献

- Abe, T.K., T. Kitagawa, Y. Makiguchi and K. Sato (2019) Chum salmon migrating upriver accommodate to environmental temperatures through metabolic compensation. *Journal of Experimental Biology*, 222: jeb186189
- Aoyama, J. (2017) Natural spawning of chum salmon *Oncorhynchus keta* within a hatchery stock enhancement program: a case in the Otsuchi River at the Sanriku coast. *Coastal Marine Science*, 40: 1-6.
- 大門純平・伊藤元裕・綿貫豊 (2019) 北海道大黒島における海鳥の現状. *山階鳥学誌*, 51: 5-104.
- Kaeriyama, M. (2019) Sustainable conservation and use of chum salmon under warming climate and changing ocean conditions. *NPAFC Technical Reports*, 15: 109-112.
- 北川貴士・川上達也・野畑重教・峰岸有紀・伊藤元裕・大竹二雄・青山潤・兵藤晋 (2017) 通し回遊魚に対する震災の影響. *日本水産学会誌*, 83: 681-684.
- Kitagawa, T., S. Hyodo and K. Sato (2016) Atmospheric depression-mediated water temperature changes affect the vertical movement of chum salmon *Oncorhynchus keta*. *Marine Environmental Research*, 119: 72-78.
- Kusakabe, M., S. Nobata, K. Saito, K. Ikeba, S. Ogasawara, K. Tanaka, Y. Takei and S. Hyodo (2019) Body condition and reproductive status of chum salmon during homing migration in Otsuchi Bay, Japan, after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. *Fisheries Science*, 85: 43-51.
- Minegishi, Y., M.K.S. Wong, T. Kanbe, H. Araki, T. Kashiwabara, M. Ijichi, K. Kogure and S. Hyodo (2019) Spatiotemporal distribution of juvenile chum salmon in Otsuchi Bay, Iwate, Japan, inferred from environmental DNA. *PLoS ONE*, 14: e0222052.
- 峰岸有紀・青山潤 (2019) 三陸におけるサケ資源像の再構築. *日本生態学会誌*, 69: 201-207.
- Nobata, S., T. Kitagawa, K. Tanaka, K. Komatsu, Y. Aoki, K. Sato, Y. Takei and S. Hyodo (2019) Spreading of river water guides migratory behavior of homing chum salmon *Oncorhynchus keta* in Otsuchi Bay, a narrow inlet with multiple river flows. *Zoological Science*, 36: 449-457.
- Tsukagoshi, H., S. Terui and S. Abe (2015) Characterization of sixteen polymorphic microsatellite DNA loci in the chum salmon (*Oncorhynchus keta*) isolated by next-generation sequencing. *Conservation genetics resources*, 7: 173-175.
- 塚越英晴・後藤友明 (2018) 三陸岩手サケの遺伝構造と個体群特性. *月刊海洋*, 40: 435-440.
- Wong, M.K.S, S. Nobata and S. Hyodo (2019) Enhanced osmoregulatory ability marks the smoltification period in developing chum salmon (*Oncorhynchus keta*). *Comparative*

### 3-2-4 グループ 4 (干潟の巻貝類の遺伝的多様性と集団構造、沿岸性大形底生生物群集、三陸沖大陸棚・大陸斜面の底生生物群集)

#### (1) 干潟の巻貝類の遺伝的多様性と集団構造の変化

東日本大震災によって三陸沿岸の干潟域に生息する底生生物が受けた影響を遺伝子解析から明らかにするため、直達発生をおこなうため小さい時空間スケールで遺伝的变化が生じやすい優占種ホソウミニナをモデル種として研究を続けている(小島ほか 2020)。震災前の三陸海岸には本種の津軽暖流集団と黒潮集団が共存し、高い遺伝的多様性を有している事が知られていた(Kojima et al. 2004)。平成 24 年 5 月に宮古湾から松島湾までの 8ヶ所で採集した本種個体群の遺伝的構造をミトコンドリア DNA の塩基配列に基づき震災前(平成 18-19 年)と比較したところ、3ヶ所で遺伝的多様性の減少が見られた。特に生息地が壊滅的な被害を受けた雄勝川河口ではハプロタイプ多様性が 30%に、塩基多様性が 4%に減少し、震災前に低頻度で分布していた津軽暖流型個体が採集されなかった。また松島湾櫃ヶ浦では、多様性は維持されていたが、優占する塩基配列の交代が認められ、一時的な個体群の縮小が示唆された(Itoh and Kojima 2016)。より詳細な解析をおこなうため、次世代シーケンサーを用いてマイクロサテライトマーカを開発し、震災前後の三陸海岸のホソウミニナ個体群の遺伝的多様性の変化を検証した(Itoh et al. 2013)。震災前の集団構造を解析した結果はミトコンドリア DNA とは異なり、三陸沿岸に第 3 の系統群が分布するというものであった。これは母系遺伝するミトコンドリア DNA に対して、マイクロサテライトは両親に由来する異なる染色体上にコードされているため、黒潮で分化した集団と対馬暖流域で分化した集団が二次的に接触、混合した結果と考えられる。多くの地域集団間に、ミトコンドリア DNA で検出できなかった有意な遺伝的差異が見出され、マーカとしての優越性が示された。また、岩手県宮古湾と宮城県万石浦の間には遺伝的分化が見られず、人為的移入が続いている事が示された。最も時空間的に密なデータが得られている松島湾周辺の 8 地域について、震災を挟む 10 年間に渡る遺伝的多様性と個体密度の変化を最新の集団遺伝学的手法で解析したところ、多くの地域個体群で震災津波による個体数の大幅な減少が見られたものの、遺伝的多様性が震災後も維持されており、大規模攪乱に対して強い頑健性を持つことが示唆された(Miura et al. 2017)。

埋め立て地の水没等により震災後に出現した個体群が岩手県広田湾の小友浦と宮城県仙台湾の井土浦で確認されている。ミトコンドリア DNA とマイクロサテライトを用いた遺伝子解析の結果より、小友浦の個体群は広田湾の複数の個体群から震災後に移入してきた、もしくは津波によって運ばれてきて定着した個体に由来することが示唆された

(松政ほか 2015)。また、この個体群では 2014 年から 2015 年の間に遺伝的特性が変化しており、少数個体の移入初期に創始者効果による遺伝的浮動が起きた可能性が考えられた。井土浦個体群については、他県産移入個体と東北在来個体の交雑に由来する個体群であると考えられた。他県産アサリ種苗の導入に紛れたホソウミニナの国内移入は、関東から東北にかけて報告があるが、井土浦ではアサリを導入した記録はなく、復興事業等に伴う人為的移入の可能性が疑われる。

ミトコンドリア DNA と核 DNA の遺伝子マーカーを併用することで、湾毎に個体群の変動をモニターできるホソウミニナは、自然現象としての回復過程と非意図的な人為の影響の相互作用を追跡調査する絶好の対象である。今後、更に長期的かつ広域的な調査を継続することで、変動する自然環境下において、生態系の安定性に人間活動がどの様に影響するのかを明らかにしていく予定である。

## (2) 沿岸性表在大形底生生物群集への津波の影響と回復過程

### ● 沿岸性大形底生生物群集の個体群動態

東日本大震災の際に発生した大津波は、三陸沿岸域における浅海砂泥底の生態系に大きな影響を及ぼしたと考えられている。岩手県の大槌湾と船越湾各 5 地点で震災前の平成 22 年 9 月と震災後の 23 年 9 月におこなった潜水調査結果から、巨大津波により海底地形が大きく変化し、海底の堆積物が粗粒化している事が明らかになった。津波前に多く見られた大型底生生物が、津波後の調査ではほとんど見られなくなっていた。平成 24 年 9 月に同じ場所で潜水調査を行い、海底の水深や堆積物粒度組成がほぼ津波前の状況に戻り、数種の大型底生生物が再定着しているのを確認した (Seike et al. 2013, Seike 2016)。

大型底生生物は海底の堆積物を攪拌させることにより、海底生態系を大きく改変する。津波による大型底生生物の消滅の結果、生物による堆積物攪拌作用も一時的に消滅したはずである。その過程が海底堆積物の構造に残されている事が期待されるが、そうした研究例はまだ無かった。震災 3 年後の 2014 年の海底堆積物がどの程度、大型底生生物により攪拌されているかを、岩手県船越湾および宮城県女川湾において採取した堆積物コア試料を用いて解析した。また、女川湾において 2012 年、2013 年、2014 年に継続的に採集したコアサンプル中の堆積物の性状の変化を観察した。その結果、大型底生生物の堆積物攪拌作用が 2013 年までは停止していたが、2014 年に回復した事が明らかになった。海底から採取した堆積物コアを X 線 CT により観察した結果、船越湾では海底面から深さ 20 cm までの範囲にオカメブククの活動の痕跡 (這い痕) を確認された。一方で、それより深い箇所ではオカメブククの生痕は存在しなかった。したがって、船越湾においてオカメブククは海底下 20 cm の深さまで堆積物を攪拌していることが判明した。

2016 年 3~6 月に三陸沿岸の 5 つの湾 (宮城県女川湾、宮城県鮫浦湾、岩手県釜石湾、

岩手県大槌湾、岩手県船越湾)において堆積物コア試料を採取し、堆積構造を X 線 CT スキャナーにより観察した。全ての湾において 2011 年津波堆積物を確認できたが、2011 年の津波堆積物の上部が生物攪拌によって破壊されていた。大型動物による攪拌作用によって、近い将来には 2011 年津波堆積物は消滅すると予想される。事実、女川湾で採取したグラビティコア試料に含まれる過去の津波堆積物は生物攪拌作用によって乱されており、平行葉理などの物理的堆積構造を含んでいなかった。これらのことから、津波堆積物が形成時のままの状態では地質記録として保存されない事が明らかになった。この知見は海底堆積物の解析から過去の地震履歴を解析する研究に重要な示唆を与えるものである (Seike et al. 2017)。一方で、オカメブンプクが活動できる底質の深さは、津波により堆積した粗粒砂層により制限されていることから、津波堆積物が、海底生態系の異質性をもたらし、その影響は数年～十数年スケールで持続することが示された (Seike et al. 2018)。

2011 年の地震発生時に生じた海底液状化が、どの様に海底生態系に影響したかを、底生生物の体密度を測定することで検討したところ、海底液状化が生じた際の底生生物の挙動が、各個体の体密度によって異なることが示された (Seike et al. 2019)。

#### ● 三陸海岸におけるタケフシゴカイ科 2 種の個体群構造

巨大な地震や津波によって大規模な攪乱を受けた生態系が回復する過程で、生残個体の繁殖とともに重要となるのが、他所からの個体の移入、特に成体の移動能力が低い無脊椎動物では浮遊幼生の加入である。女川湾の水深 20m の海底では、震災 2 年後に震災前には見られなかったエリタケフシゴカイが大発生し、以後の遷移過程を決定づけたと考えられている。一方、同じタケフシゴカイ科のナガオタケフシゴカイは震災前後を通じて、ほぼ同じ密度の個体群が維持されていた。これら 2 種を対象に、ミトコンドリア DNA (COI 遺伝子の塩基配列) と核 DNA (MIG-seq 法で検出した SNPs) を用いた系統地理学的解析をおこなった。その結果、ナガオタケフシゴカイでは、これまでに知られている多くの低分散能力種と共通する 2 つの遺伝的に分化したグループの存在が示された。一方、エリタケフシゴカイの三陸集団は単一のグループから成り、遺伝的多様性が極端に低いというこれまでに報告のない特徴が明らかになった。これは本種が黒潮と対馬暖流が分岐する九州沿岸や日本海に分布していないこと、および過去の黒潮や暖水塊の北上により三陸沿岸に進出した祖先集団が、隔離と遺伝的浮動により遺伝的多様性を失ったことに起因すると考えられた。この仮説を検証するため、同様な地理分布をするヤマトオサガニとコムツキガニについて解析をおこなっている。

MIG-seq 法を用いて、エリタケフシゴカイの山田湾、大槌湾、釜石湾、女川湾の個体群間の遺伝的分化と最近の個体移動を解析した。その結果、4 つの湾の個体群間に有意な遺伝的分化が見られない事、大槌湾から他の湾への個体移動が卓越していることが示された。この結果から 2013 年の女川湾におけるエリタケフシゴカイの大発生が大槌湾

から供給された浮遊幼生が、津波により本種の生存に適した底質になった女川湾の海底に大量に着底したためであったと推察された。

### (3) 巨大地震による三陸沖大陸棚および大陸斜面における底生生物群集の変化

#### ● 深海性小型底生生物群集

2011年以降、三陸沖深海底の小型底生生物（メイオベントス）の定量採集を継続し、生物量や生物多様性、群集構造の変化を研究している。震災半年後のメイオベントスの密度は震災前と変わらなかったが、堆積物中の垂直分布様式に変化が起きていた。震災1.5年後には、垂直分布様式が震災前の状態に戻っていた。また、震災半年後から1.5年後の間に高次分類群の組性変化が起きている例がみられた(Kitahashi et al. 2014)。そうした変化の大きさは震源からの距離より、局地的な揺れの大きさや近くの変異量の差により説明された。

三陸沖深海底の6点（水深100～6000m）で東日本大震災の4.5ヶ月後と1.5年後に採集したソコムジンコ類の生物多様性や群集構造を、震災の影響が軽微であると考えられる千島海溝の同じ水深帯の群集と比較したところ、両海域の群集間に有意な差異は検出されなかった。このことは、三陸沖日本海溝陸側斜面の深海性ソコムジンコ群集が、2011年の巨大地震にほとんど影響を受けなかったか、4.5カ月以内に回復したことを示している。歴史的に大規模環境攪乱が繰り返し起きてきた日本海溝陸側斜面のソコムジンコ類は、攪乱に対して高いレジリエンス（復元力）を持つと考えられる(Kitahashi et al. 2018)。水産有用種のうち底生魚類の主要な餌となっている小型底生生物の動態を解明する事で、水産資源管理上、有益な情報を提供する事が期待される。

#### ● 三陸沖底生生物の種多様性

平成28～令和1年度の新青丸航海で三陸沖大陸棚・大陸斜面で底生生物を採集し、比較的小さい空間スケールでの遺伝的分化や種分化が予想される分類群について、分子系統解析をおこなった。チヂワバイ属巻貝類はこれまで1種2亜種と考えられていたが、本研究により7種とするのが妥当であり、そのうち4種が三陸沖に分布することが示された。また、それぞれの種の分布水深は比較的狭い範囲に限定されているが、種間の系統関係から本属の種分化には海域間の隔離が重要であることが示された。一方、より分散能力の高いヒカリシダタミ科巻貝類では、水深勾配に対応した種分化が起きていることが明らかになり、深海生物の進化における水平距離と水深差の総合的な重要性は、分散能力で決まることが示唆された。浮遊幼生期を持たないミズムシ亜目等脚類の分子系統と形態解析による分類学的検討から、三陸沖に多くの未記載種が分布している事が

明らかになり、巻貝類と比べて等脚類で、より小さい空間スケールで種分化が起きる傾向が認められた。

#### ● 三陸沖に分布する深海性底魚アオビクニン集団の遺伝的構造

北西太平洋に分布するクサウオ科の深海性底魚のうちサケビクニンと形態による判別が困難な種をまとめてサケビクニン複合種群と呼び、三陸沖にはその内のアオビクニンのみが分布するとされてきた。震災後に三陸沖で採集されたアオビクニン個体からオホーツク海固有種サケビクニン型のミトコンドリア DNA が得られた事から、核 DNA にコードされている S7 タンパク質遺伝子のイントロン領域の塩基配列とマイクロサテライトによる解析をおこなったところ、サケビクニン型のミトコンドリア DNA を持つ個体の分布が宮城県沖海域にほぼ限定されている事が明らかになった。オホーツク海と太平洋の間の非対称な深層流により太平洋に進出したサケビクニンが、三陸沖で最も安定的に低温水海が維持されている宮城県沖海域で生残し、アオビクニンとの間に種間交雑が生じたものと考えられる。今後、この現象に 2011 年の巨大地震が関係しているかどうかの検討をおこなう予定である。

#### ● 三陸産底魚類の耳石に残された震災シグナルの探索

平成 24 年 7 月の淡青丸航海において三陸沖で採集した 7 種の深海底性魚類（サガミソコダラ、テナガダラ、イバラヒゲ、マダラ、ノロゲンゲ、ニュードウカジカ、コブシカジカ）の耳石を使用して、EPMA（電子プローブマイクロアナライザ）を用いた Sr/Ca 比の分析を行った。耳石輪紋に基づいて年齢を査定し、震災の前後で Sr/Ca 比の値を比較した結果、いずれの魚種についても震災前、震災後で値に有意な差が認められず、津波および地震発生時の乱流に伴う海底環境の変化の証拠を見出すことはできなかった。以上の結果から、深海底において震災の影響が卓越しなかったことが示唆された。

#### (4) 引用文献

Itoh, H. and S. Kojima (2016) The genetic disturbance caused by the mega-tsunami on a coastal species. In Kogure et al. (eds), Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011, 79-80.

Itoh, H., S. Kamimura, H. Takeshima and S. Kojima (2013) Isolation and characterization of microsatellite loci in the Asian horn snail *Batillaria attramentaria* (Mollusca, Gastropod). Molecular Ecology Recourses, <http://tomato.bio.trinity.edu/manuscripts/13-4/mer-13-0029.pdf>

- Kitahashi, T., R. G. Jenkins, H. Nomaki, M. Shimanaga, K. Fujikura and S. Kojima (2014) Effect of the 2011 Tohoku Earthquake on deep-sea meiofaunal assemblages inhabiting the landward slope of the Japan Trench. *Marine Geology*, 358: 128-137.
- Kitahashi, T., R. Jenkins, S. Kojima and M. Shimanaga (2018) High resilience of harpacticoid copepods in the landward slope of the Japan Trench against disturbance of the 2011 Tohoku Earthquake. *Limnology and Oceanography*, 63: 2751-2761.
- Kojima, S., I. Hayashi, D. Kim, A. Iijima and T. Furota (2004) Phylogeography of an intertidal direct-developing gastropod, *Batillaria cumingi*, around the Japanese Islands. *Marine Ecology Progress Series*. 276: 161-172.
- 小島茂明・伊藤 萌・松政正俊 (2020) 三陸海岸における巨大津波に伴うホソウミニナ個体群の変化. *国際沿岸研究センター報告*, 36: 138-142.
- 松政正俊・木下今日子・伊藤 萌・小島茂明：三陸の渚 (2015) その大規模攪乱に対する脆弱性と頑強性. *DNA多型*, 23(1): 9-16.
- Miura, O., G. Kanaya, S. Nakai, H. Itoh, S. Chiba, W. Makino, T. Nishimura, S. Kojima and J. Urabe (2017) Ecological and genetic impact of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on intertidal mud snails. *Scientific Reports*, 7: 44375.
- Seike, K. (2016) Succession of benthic animals and bioturbation after the tsunami disturbance. In Kogure et al. (eds), *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011*, 89-90.
- Seike, K., K. Shirai and Y. Kogure (2013) Disturbance of shallow marine soft-bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *PLOS ONE*, 8: e65417.
- Seike, K., G. Kobayashi and K. Kogure (2017) Post-depositional alteration of shallow-marine tsunami-induced sand layers: A comparison of recent and ancient tsunami deposits, Onagawa Bay, northeastern Japan. *Island Arc*, 26, e12174.
- Seike, K., K. Shirai and K. Kubota (2018) Lasting impact of a tsunami event on sediment-organism interactions in the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 1376-1392.
- Seike, K., K. Shirai and K. Kubota (2019) Fate of benthic invertebrates during seabed liquefaction: quantitative comparison of living organism body density with liquefied substrate density. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 223: 1-5.

### 3-2-5 グループ5 (藻場の分布と生物群集)

2011年3月11日に発生した大津波は、沿岸生態系を構成する重要な生息地である藻場にも影響を及ぼすと考えられる。今回のような大津波が生じた場合に、藻場や藻場に



生息する生物にどのような影響を及ぼし、どのように遷移していくか、また、遷移過程に人間活動がどのような影響を及ぼす可能性があるかについての知見はなかった。水産重要生物の産卵場、生育場、摂餌場として、藻場は、沿岸漁業を支えるブルーインフラストラクチャーである(小松ら, 2017)ことから、繰り返し大津波が襲来する三陸において、藻場と藻場を利用する生物に及ぼした大津波の影響と津波後の回復過程を観察し記述することは、沿岸漁業を再興する上で重要である。そこで、大津波後の三陸沿岸の藻場の遷移過程を明らかにするため、1. 岩手県大槌湾・船越湾の藻場分布・海底地形・ガレキ分布調査、2. 岩手県船越湾におけるアマモ類再生モニタリング、3. 藻場生息魚類の行動変化、4. 衛星リモートセンシングによる三陸沿岸の藻場分布モニタリング、を実施した。

### (1) 岩手県大槌湾・船越湾の藻場分布・海底地形・ガレキ分布調査

藻場の分布状況と海底地形を調べるために、水中テレビカメラ、超音波により空中写真のようなイメージで海底表面の音響的な強度分布を捉えることができるサイドスキャンソナーを用いて調べることにし、大槌湾と船越湾を対象として調査に必要な漁船が利用できるようになった 2011 年 6 月から 12 月までほぼ毎月、1 週間の調査を行なった。なお、このサイドスキャンソナーは、海底の音響強度分布と同時に、インターフェロメトリック処理により底深が把握できる。

大槌湾では岩礁性の藻場はおもに湾口から湾中央部に分布し、多くの海藻類は春に小さく夏に大きくなる。2011 年 6 月に水中カメラで観察したところ、コンブ、ワカメ、アカモクの成熟した個体が繁茂し、アカモクは海底から海面まで 7m 近くの草丈があった。このように岩礁性藻場では大津波の影響は小さいことが明らかになった(Komatsu et al., 2015)。

2011 年 6-7 月大槌湾、同年 7 月に船越湾において、震災前に確認されていたアマモ類分布域をサイドスキャンソナーで調べたが、花株の分布は発見できなかった。2011 年 6-7 月に水中カメラ、2011 年 10 月に潜水により調べると密度は少ないが、海底の砂に埋れていた種子から発芽した栄養株が両湾で見られた。底深の浅い湾奥部では津波の波高が高くなり、海底の砂を動かして花株を砂ごと移動させ消滅したものと考えられる(Komatsu et al., 2015)。しかし、アマモ類の自己再生の力は強く、埋土種子をもとに復活の歩みを始めていた。アマモ類の絶滅危惧種であるスゲアマモの大槌湾湾奥北側の藻場は、地形的に津波の被害を逃れ、花株が残っていた(Komatsu et al., 2015)。

以上、三陸では藻場は大津波の影響を自力で回復できることが明らかになった。

ガレキは養殖筏や定置網の設置の妨げとなるため、漁業者の心配の種である。そこで、大槌湾と船越湾の海底の状況を調べた。サイドスキャンソナーでガレキと判定されたところに水中カメラを入れると、車や家の一部などが分布していた。しかし、ガレキは大量に分布しておらず、湾の谷に点在する程度であった。これらの調査結果を利用すれば、

筏や定置網の設置をスムーズに行えるので、大槌漁業協同組合、大槌町、岩手県に 2011 年 12 月にデータを提供した。

## (2) 岩手県船越湾におけるアマモ類再生モニタリング

津波による藻場の減少後の回復過程や、それに影響を及ぼす要因等を検討することを目的に調査を行った。船越湾では、2011 年 3 月の大津波以前にはタチアマモやオオアマモなどのアマモ類が広く分布していたが、津波により花株はすべて流失し、2011 年 6 月には未成熟株が種子から再生していた(小松ら, 2014)。再生した未成熟株からの回復過程を追跡するため、2012 年 2 月にタチアマモとオオアマモの生育が確認された分布域に永久方形枠を設置し、モニターした(小松ら, 2017)。2012 年の夏季には花株および地下茎が伸長し、その後も、順調に生長した。船越湾では、津波の引き波で運ばれた、護岸に使われていた大きな波消しブロックが藻場にガレキとして散在していたが、藻場全体の面積に比べるとはるかに少なかった。一方、比較的波当たりの弱い場所では、海底に養殖用のカゴや車のタイヤなどのゴミが藻場に堆積して、海底を覆っていた。これらのゴミがアマモ類の再生する場所を奪うことや、波や流れで移動することで、アマモにダメージを与える可能性がある(Komatsu et al., 2015)。また、2015 年の 2 月以降に、タチアマモと永久方形枠が消失した場所は底質が砂から粗い砂に変化したところであった。2015 年および 2016 年に三陸地方を襲った台風や爆弾低気圧などの攪乱も消失の原因と考えられる。

## (3) 藻場生息魚類の行動変化

大津波によりアマモ類の藻場は消滅した。震災後にこれらの藻場に生息していた生物の行動変化を調べることは水産業の復興のための基本的情報として重要である。そこで、藻場に生息する魚類の個体を追跡するバイオテレメトリー手法を用いて藻場利用の状況を調べた。

2012 年および 2013 年に、藻場で繁殖・成育するウミタナゴを用いて調査を行った。ウミタナゴの繁殖期であり、最も接岸するとされる 7 月に岩手県船越湾で調査を行った。2012 年の調査では、ウミタナゴがガラモ場のみでなく、藻場が分布しない場所にも出現した。2013 年には、船越湾の沿岸に沿って、ウミタナゴ漁が行われ、実際にウミタナゴが捕獲されていたガラモ場 2 か所、震災前にウミタナゴが多く生息していたアマモ場 2 か所、湾の中心の砂地 1 か所に受信機を設置した。ガラモ場でウミタナゴを捕獲して腹腔内に小型発信器を挿入し、放流後の移動経路を調べた。その結果、藻場以外の場所にも移動していた。ガラモ場は、重要な生息場であるが、常にガラモ場にいるのではなく、沿岸の藻場以外の場所に移動することが初めて明らかになった。

2014 年 7 月にガラモ場が繁茂していた船越湾野島周辺で巻き網およびカゴ漁具によ

り供試魚の捕獲を行い、クロソイ 2 個体、アナゴ 1 個体などを捕獲し、実験に使用した。両種とも放流場所である野島周辺藻場で信号を受信したが、その時間や受信機に差異がでており、魚種により藻場の時空間的な利用が異なっており、一種のすみわけの可能性が示唆された。

クロソイ、アナゴ、ウミタナゴは、どれも重要な漁業資源である。これらの魚種の行動や生態は、持続的かつ効率的な漁業を続けるうえで重要な知見となる。加えて、供試魚はすべて藻場に強く関連する行動が確認された。これらの調査で先行研究では明らかにされていなかった魚種ごとの行動の差異を把握することができた。2014 年から岩礁性藻場のウニによる磯焼けが各所で進行している。藻場の衰退による藻場性魚類への影響を明らかにする必要があるだろう。

#### (4) 衛星リモートセンシングによる三陸沿岸の藻場分布モニタリング

気仙沼湾西部、広田湾奥部、志津川湾の衛星画像解析による藻場のマッピングを行った。気仙沼湾西部・広田湾奥部の調査では、2015 年 4 月 30 日に撮影された可視光マルチバンド衛星 (Pleiades 衛星、Spot Image 社) の画像データを用いた。気仙沼湾では 2015 年 7 月 2 日から 3 日に、広田湾では同年 9 月 29 日に、水中テレビカメラ (FM-4100、Q.I 社) による海底の撮影による現場調査を行い、グランドトゥルースデータを取得した。グランドトゥルースにより底質の判明している各地点の放射輝度値を教師データとし、最尤法による教師付自動分類を行った。志津川湾奥部の解析には、Google Earth の提供する衛星画像を用いた。画像解析には、Photoshop CS2 (Adobe) を使い、現場調査および環境省の震災後報告書の藻場分布場所に対応する画像ピクセル値をもとに、類似するピクセルを抽出して藻場を推定した。

2015 年の気仙沼湾西部では、海岸線に近い浅場の砂泥底にアマモの濃密な広域藻場が、漁港内にパッチ状のアマモ場が分布していた。さらに底深がやや深い場所ではタチアマモの群落も分布していた。岩井崎周辺の波当たりの強い岩礁帯にはアカモク等からなるガラモ場が広がり、アラメ等のコンブ目藻類も出現した。震災前の報告(環境庁第 5 回海域自然環境保全基礎調査, 1998)中の藻場面積は過小評価されていた可能性はあるが、それと比較すると 2015 年 4 月時点の推定藻場面積は全体的に増加しており、気仙沼湾西部の藻場は相当程度回復していた。

広田湾奥部では、最奥部の底深 1 m から 2 m 程度の浅場にアマモの濃密かつ広大な藻場が分布していた。およそ 3m 以深の海底には、パッチ状のタチアマモ群落も分布していた。このアマモとタチアマモの分布の底深による境界は、震災前(第 7 回自然環境保全基礎調査, 2013)と一致した。また、東側の海岸線近くには、アマモ群落に混じり準絶滅危惧種に指定されているスゲアマモの群落が初めて確認された。本海域は、震災前は三陸地域で最大規模の面積の海草藻場が分布すると報告されていたが、本結果から推定された藻場面積を震災前の第 5 回自然環境保全基礎調査と比較すると海草藻場の面

積は著しく減少していた。特に底深 3 m 以深に震災前に存在した濃密なタチアマモの藻場が 2011 年の津波により大幅に縮小し、2015 年にようやくパッチ状の小規模群落にまで回復したと考えられる。震災前の広田湾奥部では、カキ等の養殖筏から落下する有機物に加え、夏季から秋季に枯死したタチアマモが海底に堆積し、貧酸素化が生じていたが、震災後には津波による底質の攪拌とタチアマモの減少により底質環境は改善していた。

志津川湾奥北西部においては、震災以前の 2010 年 6 月 25 日には、八幡川と新井田川の河口および志津川港内にアマモが分布し(Sasa et al., 2012)、西岸に沿って岩礁性藻場が分布していた。2012 年 3 月 19 日にはアマモは消失し、岩礁性藻場が新井田川の河口に分布した。この新井田川河口の岩礁性藻場は、津波により海底上に散乱したコンクリートのガレキや海底の砂泥が取り除かれ露出した岩礁の上に海藻が生育したものと推定される(Sakamoto et al., 2012)。その後、海底からのガレキ撤去により減少し、新井田川河口の岩礁性藻場は、その後 2015 年 11 月 13 日に消失した(Komatsu et al., 2018)。2014 年頃からアマモは河口近くにごくわずかに分布することが確認された。アマモの回復が遅かった原因は、陸上で行われていた嵩上げ工事に伴う土砂が河川を通じて濁水として河口域に広がったことが原因と考えられる(Komatsu et al., 2018)。

志津川湾奥の西部海岸にはアラメが分布していたが、津波による被害は少なく、震災後にもアラメ場は残っていた。しかし、2014 年になって、キタムラサキウニの大発生が目視できるようになってから、アラメ場は明瞭に減少し始め、2015 年 11 月になると、ごく一部の浅場のアラメ場以外は消滅した。これは、震災後ウニ漁業がおこなわれず、2011 年夏に産卵されたキタムラサキウニが大量に加入し、大型海藻を食害したためである(Komatsu et al., 2019)。キタムラサキウニの寿命は 14~15 年と言われている。磯焼けしたアラメ場のウニの生殖腺は未発達となり、商品価値がなく、漁業者も採取しないため、磯焼けが長期化する。藻場再生には、商品価値のないウニも積極的に除去する必要がある。ウニを間引く行為であるウニ漁業は、人間が自然に働きかけることにより海洋生物の生産性と多様性を高める里海活動ということが出来る(小松ら, 2018; Komatsu et al., 2019)。

## (5) 引用文献

- 小松輝久, 大瀧敬由, 佐々修司, 澤山周平, 阪本真吾, 浅田みなみ, 濱名正泰, 村田裕樹, 田中 潔, 辻本 良, 寺内元基 (2017) 三陸の沿岸漁業を支えるブルーインフラの大津波後の復興過程. 沿岸海洋研究, 54(2), 117-127.
- Komatsu, T., T. Ohtaki, T., S. Sakamoto, S. Sawayama, Y. Hamana, M. Shibata, K. Shibata and S. Sasa (2015) Impact of the 2011 Tsunami on seagrass and seaweed beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan. *In* Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-

- Ecosystems (pp. 43-53). Springer, Cham.
- Komatsu, T., S. Sasa, M. Hamana, S. Sakamoto, M. Asada, G. Terauchi, R. Tsujimoto., ... and T. Yanagi (2018) Temporal and spatial changes in a coastal ecotone in Shizugawa Bay, Sanriku Coast due to the impacts of the tsunami on 11 March 2011 and the following artificial impacts. *In* The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration (pp. 265-278). Springer, Cham.
- 小松輝久, 佐々修司, 門谷 茂, 吉村千洋, 藤井 学, 夏池真史, 西村 修, 坂巻隆史, 柳 哲雄. (2018). 開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究: 南三陸志津川湾の例. 沿岸海洋研究, 56(1), 21-29.
- Komatsu, T., S. Sasa, H. Murata, S. Sawayama, M. Hamana, M. Asada, R. Tsujimoto, G. Terauchi and T. Yanagi (2019) Trophic cascade in seaweed beds in Sanriku Coast hit by the huge tsunami on 11 March 2011: Sea urchin fishery as a Satoumi activity serving for increase in marine productivity and biodiversity. *In* Oceanography Challenges to Future Earth (pp. 95-104). Springer, Cham
- Sakamoto, S. X., S. Sasa, S. Sawayama, R. Tsujimoto, G. Terauchi, H. Yagi, and T. Komatsu (2012) Impact of huge tsunami in March 2011 on seaweed bed distributions in Shizugawa Bay, Sanriku Coast, revealed by remote sensing. *In* Remote Sensing of the Marine Environment II (Vol. 8525, p. 85251B). International Society for Optics and Photonics.
- Sasa, S., S. Sawayama, S. Sakamoto, R. Tsujimoto, G. Terauchi, H. Yagi and T. Komatsu (2012) Did huge tsunami on 11 March 2011 impact seagrass bed distributions in Shizugawa Bay, Sanriku Coast, Japan?. *In* Remote Sensing of the Marine Environment II (Vol. 8525, p. 85250X). International Society for Optics and Photonics.
- 小松輝久, 寺内元基, 太齋彰浩, 青木優和, 名倉良雄, 佐々木久雄, 辻本 良, 佐々修司, 阪本真吾, 柳哲雄 (2014) 東日本大震災からの沿岸漁業復興を目指す志津川湾藻場再生への取り組み. 沿岸海洋研究, 52(1), 103-110.

### 3-2-6 グループ 6 (スナメリの分布と個体群構造)

スナメリは沿岸域の小型鯨類であり、小型浮魚類、イカ・タコ類、底生生物などを捕食する。その存在は、沿岸生態系ひいては漁業生産の健全性の指標となる。震災前の2000年に、東日本太平洋側沿岸域（仙台湾から房総まで）において4人乗りセスナ機を用いた目視調査が行われているため、同海域におけるスナメリ分布と個体数の震災前後での変化を明らかにすることにより、スナメリを通じて地震・津波の沿岸生態系への影響を探ることを最終的な目的とした。

## (1) スナメリの分布と個体数

既往知見 (Shirakihara et al. 1992) からスナメリの分布域を水深 50 m 以浅とみなし、4 人乗りセスナを用いて仙台湾から房総における水深 50 m 以浅の沿岸域をカバーする目視観察を行った。

調査は、2012 年 8~9 月、2013 年の 8 月~10 月、2014 年 4~5 月に実施した。2012 年には、密度勾配と垂直になるように東西方向に設置した 35 本の調査ライン (総調査距離 706 km) 上で 25 群 36 頭のスナメリを発見したが、発見位置は仙台湾、鹿島灘~九十九里浜沖に限定された。福島県沖に設置した 10 本の調査ライン (南北長 111 km、調査距離 140 km) での発見は皆無であり、分布にギャップが認められた。スナメリの発見は、2000 年の既往調査と同様に水深 40 m 以浅に限定され、40 m 等深線が沖合に延長した遠浅域での発見が多い傾向があった。震災後に沖合域へ分布がシフトする傾向は認められなかった。調査海域全域の個体数は 1,055 頭、推定精度は変動係数で 34.7%であった。2000 年の推定値は 3,387 頭、変動係数 32.7%であり、この 12 年間で有意な個体数の減少が認められた (Shirakihara et al. 2019)。遺伝分析などの既往研究を踏まえると、東日本太平洋側沿岸域には仙台湾個体群 (系群) と鹿島灘~九十九里浜沖個体群の 2 つが存在すると考えられた。2013 年には、2012 年に十分な調査が行えなかった仙台湾個体群の個体数と分布を把握することを目的として、40 本の調査ライン (調査距離 954 km) を設定した結果、12 群 82 頭のスナメリが発見された。その全てが 50 m 以浅域に限定され、50 m 等深線が沖合に延長した仙台湾内で発見が多かった。また、福島第一原発沖でも発見された。仙台湾個体群の個体数は 284 頭と推定され、これは国内で最少と考えられている長崎県大村湾個体群のレベルであった。しかしながら、個体数の推定精度は変動係数で 49%と低く (30%以下が望ましい)、この原因は通常 1~3 頭の小群を作るスナメリが調査時期に大群を形成していたためと考えられた。8 月に仙台湾中南部の旦理沖で 57 頭の大群に遭遇するなど、平均群れサイズは 6.8 頭と前年度の 1.8 頭よりも増大した。個体数推定の精度を低下させる群れサイズのばらつきは変動係数で 67%であり、前年度の 11%よりも極端に大きくなった。そこで 2014 年には、2013 年に大群が出現した 8 月を避けて 4~5 月に再び仙台湾個体群を対象として調査を行った結果、40 本の調査ライン上 (調査距離 915 km) で 24 群 39 頭のスナメリが発見された。この調査中に大群は出現せず、平均群れサイズは 1.6 頭であった。発見は 50 m 等深線が沖合に延長した遠浅域である仙台湾のみであり、229 km を飛行した福島県沿岸海域での発見は皆無であった。仙台湾個体群の個体数は 425 頭と推定され、これは長崎県大村湾個体群とともに国内で最少の個体群と考えられた。個体数の推定精度は変動係数で 39%であった。調査努力の割に推定精度が高くなかったのは、分布の集中が見られたためであり、特定の海域に集合しやすいこと、しかもその海域は様々な時期で同一とは限

らないことが仙台湾個体群の特徴かもしれない。

2013年の8月に、銚子沖で150頭を超える大群に遭遇した。遭遇した大群のビデオカメラ画像を分析した結果、大群内では多数の個体間で社会的交渉がみられ、潜水・浮上やporpoising（体を水面から飛び出して速く泳ぐ）などの行動を多くの個体が同調させる様子もみられた。また、大群内では数頭のサブグループを形成しつつも、数十分にわたって散会することなく、遊泳の方向性は大群全体でまとまっていた。一方で、特定の方向への移動は見られなかった。

## (2) スナメリ出生率の推定

震災前後における個体数の減少が著しかった仙台湾個体群（個体数推定値：425頭）について、この個体群の出生率を推定し、個体数回復に十分かどうかの評価を試みた。

スナメリの出産盛期から末期にかけての個体群中の新生児（0歳子）の割合は出生率とみなせる。2015年、2016年、2017年に仙台湾中南部におけるセスナによる目視観察から母親と新生児の親子連れの確認を行い、発見個体数に対する新生児個体数の割合を調べた。調査海域を2012～2014年のセスナ調査で発見が多かった仙台湾南部とし、岸にはほぼ平行で離岸距離1、3、5、10、15、20kmのライン上を飛行した。仙台湾個体群の出産期を既往知見から春と想定したが、同個体群の出産期の長さなどの詳細情報が不明なことを考慮して4月～8月に2～3回のセスナ調査を行った。

発見された総個体数に占める新生児の割合から求めた出生率の推定値（新生児割合の最大値）は2015年には17.5%、2016年には13.6%、2017年には6.1%であった。これらの推定値を、スナメリの個体群存続可能性分析（Hashimoto et al. 2013）から得た自然状態の出生率と比較した結果、仙台湾個体群は出生の面で十分に高い増加能力を有していると考えられた。自然死亡率と漁網への混獲などの人為死亡率が高くない限り、個体数は回復する可能性があると考えられる。

## (3) スナメリの出産期の評価

2015～2017年の調査結果を総合すると、新生児割合は4月から上昇し、5～6月に最大となり、8月に低下した。他の知見も考慮すると、出産期は4月から始まり、6月は出産盛期に相当する可能性がある。8月の新生児割合の低下は出生個体数の減少のみならず、親から離れるようになった新生児を観察者が親子連れと認識せずに見落としたために生じた可能性がある。2011年3月の東日本大震災はその年の出産期の前であり、津波による新生児の死亡はほぼ生じていなかったと考えられる。また、スナメリは、水深30～40mに出現した大群を除けば、ほとんどの個体が30m以浅の海域を利用して

いたが、新生児を連れた親の出現水深は比較的深い傾向が見られた。4月から8月にかけて季節が進むにつれて、親子連れは次第により沖合の深い所を利用するようになると考えられる。

#### (4) スナメリ餌生物量の震災前後の変化

スナメリの餌生物量の震災後の減少の有無を検証することを目的として、宮城県沿岸海域における水産動物の資源密度の東日本大震災前後の変化を石巻、女川、亶理魚市場に水揚げされる4つの大型あるいは小型定置網の漁獲統計（2008～2015年）を用いて調べた。宮城県の定置網では多様な種が漁獲されるが、震災の影響を受けやすかったと想定される沿岸海域に生息する種、あるいは底魚類39種を解析の対象とした。定置網周辺の平均資源密度が震災後に減少したのは、エゾイソアイナメ、イカナゴ、メバル、クロウシノタ、増加したのはマダラ、スケトウダラ、マトウダイ、マダイ、イシガキダイ、クロソイ、カナガシラ、ヒラメ、ババガレイ、ガザミ、ミズダコであった（白木原ほか2018）。

#### (5) 引用文献

- Hashimoto, M., K. Shirakihara, M. Shirakihara and K. Hiramatsu (2013) Estimating the rate of increase for the finless porpoise with special attention to predictions for the Inland Sea population in Japan. *Population Ecology*, 55:441-449.
- Shirakihara, K., F. Nakahara, M. Shinohara, M. Shirakihara, K. Hiramatsu and K. Irie (2019) Abundance decline in the narrow-ridged finless porpoise population off the Pacific coast of eastern Japan. *Population Ecology*, 61:325-332.
- Shirakihara, K., H. Yoshida, M., Shirakihara and A. Takemura, A. (1992). A questionnaire survey on the distribution of the finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in Japanese waters. *Marine Mammal Science*, 8: 160-164.
- 白木原国雄・雁部総明・佐伯光広・稲田真一（2018）宮城県沿岸海域における水産動物資源密度の東日本大震災前後の変化—定置網漁獲統計からの評価—。国際沿岸海洋研究センター研究報告, 36: 131-137.

#### 3-2-7 グループ7（高次捕食者の行動生態）

小型の計測器を動物に搭載してデータを取るバイオロギングを主な手法として、震災



前から進めてきた魚類（マンボウ、サケ）・爬虫類（アカウミガメ、アオウミガメ）・鳥類（オオミズナギドリ）といった海洋高次捕食者の行動生態研究を継続して行った。津波後8年が経過し、津波による直接的な環境改変に対しては高次捕食者はそれぞれ柔軟に対応しながら、引き続き東北沿岸から沖合にかけての海域を利用している様子が明らかになってきた。

## (1) オオミズナギドリの行動生態

オオミズナギドリを対象とした調査は、2004年から継続してきた。毎年、8月後半から9月前半にかけての育雛期に、岩手県山田町船越大島でキャンプをしながら繁殖中の親鳥を対象にGPS、ビデオカメラ、ジオロケータの装着や回収を行った。オオミズナギドリは普段は繁殖地周辺海域で採餌して雛に給餌するために毎日巣へ戻っているが、時々北海道東岸沖まで1週間ほどの長期採餌旅行に出かけていた(Ochi et al. 2016)。小型ビデオカメラの改良を重ね、体重500gのオオミズナギドリにも搭載可能で3時間の動画撮影が可能な装置を開発することができた。水面直下でカタクチイワシの群れに遭遇し、飛翔による追尾の後、飛び込み潜水でイワシを捕獲するシーンを撮影できた。それ以外にも、海上に浮かぶプラスチックゴミをつつく映像、一見ウナギ目魚類にも見える細長い魚、イルカが水面近くに追い上げた餌をオオミズナギドリが捕獲する様子といった興味深い映像が得られた。得られた画像データはTEAMS 動画ギャラリーに提供し、一般に公開されている (<http://www.i-teams.jp/gallery/j/index.html>)。

北海道を除く日本列島の沖縄から東北に至る複数箇所にオオミズナギドリの繁殖地が存在しているが、それぞれの繁殖地の親鳥サイズには北に行くほど大型となるベルクマンの法則が成り立っていた(Yamamoto et al. 2016)。複数箇所で繁殖するオオミズナギドリから採取した尾腺ワックスを分析し、PCB/DDT/HCHという3種類の残留性有機汚染物質濃度を測定したところ、育雛期間中に三陸から北海道東岸海域で採餌する三陸の個体の値は、他の地域（日本海、沖縄、瀬戸内海）で採餌している繁殖個体に比べていずれも低い値を示した(Ito et al. 2013)。さらに、残留性有機汚染物質(POP)の濃度差に性差はみられなかったため、基本的には雌雄は同じ海域で採餌しているものと考えられる(Yamashita et al. 2018)。

照度記録から位置情報を最大2年間にわたって記録できるジオロケータを足輪に取り付けて繁殖個体の越冬海域を調べたところ、三陸沿岸で繁殖する個体は、アラフラ海・南シナ海・ニューギニア北方海域の3箇所で越冬し、個体毎に特定の海域を連続して利用していることが判明した(Yamamoto et al. 2014)。ジオロケータによって、繁殖期間のオスとメスがどのようなタイミングで巣に戻り、どのあたりで採餌を行っているかをモニタリングすることができる。行動データと合わせて、オスメスペアと雛の遺伝子情報を解析することにより、どれくらいの割合で婚外受精が生じているのか、その実

態が判明した。3年間の婚外受精割合は、10～20%の間で変動したが、これは海鳥の中では非常に高い割合である。他の繁殖地におけるオオミズナギドリの婚外受精割合よりも高い割合であったことから、巣穴密度が高い繁殖地において起こりがちな現象であると推察された。また、婚外受精が生じたペアと生じなかったペアで体サイズを比較したところ、婚外受精が生じたペアのオスが有意に小型であることが判明した(Sakao et al. 2019)。繁殖を行うための必須条件として、メスは巣穴を持つオスとペアになる必要があるが、組んだ相手が小型のオスである場合、婚外受精を行うことで雛により良い遺伝子を提供しようとするメスの戦略であると考えられる。状況によって婚外受精を行おうとするメスに対し、ペアとなったオス、特に小型のオスはおそらく婚外受精を阻止するために頻繁に巣穴に戻る行動パターンを取っていることが分かった。交尾期間中、最適の餌場は日帰り採餌旅行の圏外にある場合、婚外受精を防止したいオスは、餌条件の良くない近場で採餌旅行を行っていた。しかし、海洋環境により好適な餌場までの距離は年によって異なる。好適な餌場が繁殖地近くにある年は、オスとメスの行動パターンには違いが見られなかった。浮気をするメスと、されるオスの攻防が、年による環境条件によって柔軟に変化する傾向が見て取れた。

オオミズナギドリの行動生態を明らかにする目的で各種調査を実施してきたが、得られたデータが海洋環境把握に役立つといった、想定外の成果も得られた。鳥に搭載したGPSによって測定された位置データから、鳥の移動速度を計算することができる。ヒストグラムを描くと時速10kmを谷とする二峰型の分布を示した。ごくゆっくりとした移動は、鳥が海面に舞い降りて漂流していることを示しており、その速度が現場の表面海流を良く表していることがわかった。十数羽のデータを2週間分統合することにより、三陸から北海道に至る海域の表面流況分布図を描くことができた(Yoda et al. 2014)。オオミズナギドリは暖水渦周辺部で採餌を行っていることがわかり、暖水渦の位置は2年間で異なり、表面流況の違いに伴い鳥の採餌海域は大きく異なっていた。さらに、鳥を使って得られる流況現場測定データを、大型計算機内の物理モデルに取り込んで再計算すると、計算結果がより実態に即したものに改善されるという結果が得られた(Miyazawa et al. 2015)。他にも、鳥が飛翔している間の速度ベクトルから、現場の風向・風速を推定することができ、その推定値は人工衛星による海上風データに良く一致することがわかった(Yonehara et al. 2016, Goto et al. 2017)。推定した風と鳥の頭の向きを見ると、目的地に向かって右から横風を受ける際は頭の向きを右側に、左から横風を受ける際は頭の向きを左側に向け、横風を相殺しながら目的地に向かって真っ直ぐ飛翔していることが判明した(Goto et al. 2017)。オオミズナギドリは、ランドマークなどの目印がない海上でも、目的地の方角を何らかの方法で把握できていることになる。さらに、鳥のナビゲーション能力を調べる目的で、観測船(新青丸)で沖合い100kmまで移送したオオミズナギドリに、GPSを付けて放鳥する実験を行った。全ての鳥は繁殖している島に戻り、装置を回収してデータを得ることができた。鳥は日中は

目的地に向かって移動していたが、日が沈むと移動を停止する、あるいは日が沈む前にとりあえず海岸線近くに戻るように経路を変えていることがわかった(Shiomi et al. 2019)。

## (2) ウミガメ類の行動生態

ウミガメ類野外調査は 2005 年から継続して行ってきた。宮古市から釜石市に到る海域の定置網で混獲されたウミガメを漁業者から提供してもらい、国際沿岸海洋研究センターの屋外水槽にて数日から数週間飼育したのち、標識や各種記録計を取り付けて放流した。定置網が稼働しなかった 2011 年は調査は中断したが、2012 年から再開し、2019 年まで継続して実施した。ウミガメ類の産卵場北限から 500km 以上北に位置する三陸海域に、アカウミガメとアオウミガメが毎年数十から 100 頭以上捕獲されることが明らかとなり、個体の体サイズには津波前後で違いが見られなかった(Narazaki et al. 2015, Fukuoka et al. 2015)。組織片を用いてミトコンドリア DNA 分析を行い、日本各地に点在する産卵場に上陸してくる雌成体の分析結果と比較したところ、アカウミガメは鹿児島県の屋久島産、アオウミガメは小笠原産の個体が主に来遊しているということが判明した(Nishizawa et al. 2014ab)。屋久島で生まれた孵化幼体が 10 年後に甲長 60cm の亜成体となって三陸沿岸に来遊するという世界初の記録が得られた(Fukuoka et al. 2019a)。また、ヒメウミガメが生きた状態で捕獲され、最北来遊記録が更新された(Fukuoka et al. 2019b)。

アカウミガメは従来海底に生息する甲殻類や軟体動物を捕食していると考えられていたが、甲羅に搭載したビデオカメラや行動記録計より、津波前のアカウミガメが中層で頻繁にクラゲ類を捕食していたことが判明し(Narazaki et al. 2013)、津波後も変わらず主にクラゲ類を捕食していることが確認された。アオウミガメは従来、亜熱帯から熱帯にかけての温かい海域に生息し、半径数キロメートル以内の狭い範囲内で採餌や休息を行う動物であると考えられていた。三陸に回遊するアオウミガメ亜成体は、藻場などの狭い範囲内に数日滞在して餌を捕った後、数十キロメートル以上も移動しその間時々遭遇するクラゲ類を捕食していた。血液の安定同位体比分析によると、クラゲを捕食していると思われる値を示したが、放流後の行動データや画像データを見る限り海藻類を主に食べていたことから、外洋でプランクトン食であった亜成体が、沿岸の植物食に切り替わるのが三陸沿岸海域であろうと解釈できる(Fukuoka et al. 2019c)。アカウミガメ・アオウミガメ共にプラスチックゴミに遭遇するシーンが見られ、アカウミガメは 12 回中 2 回噛みついたのに対し、アオウミガメは 19 回中 12 回噛みつくといった種による反応の違いが見られた(Fukuoka et al. 2016)。これまでウミガメにカメラを取り付けて得られた画像データは TEAMS 動画ギャラリーに提供し、公開されている(<http://www.i-teams.jp/gallery/j/index.html>)。

アカウミガメに人工衛星対応型発信器をとりつけて、最大1年間の回遊経路、潜水行動、経験水温を記録した。地中海のアカウミガメは、冬季に経験水温が15°C前後に低下すると、潜水時間が最大6時間にまで延び、極めて不活発な冬眠のような状態に陥ることが知られている。しかし、北西部太平洋を広く回遊する三陸発のアカウミガメ亜成体は、冬季に経験水温が15°C前後に低下しても、70分前後の比較的活発な潜水行動を継続して行っていた(Narazaki et al. 2015)。この違いをもたらす生理学的基盤を明らかにするため、三陸沿岸域で混獲されたアカウミガメの酸素消費速度を測定したところ、地中海の個体に比べて数倍もの高い休止代謝速度を持ち、活動性が水温の影響を受け難いことが判明した(Kinoshita et al. 2018)。飼育水槽内でアカウミガメ亜成体の心拍数を測定したところ、水面を泳いでいる間の値が16回/分前後であったが、潜水して不活発な状態である間は6回/分前後に低下した(Williams et al. 2019)。野外で潜水して泳いでいる間の値を測定するための測器開発に成功したので、来年度以降野外環境下における心拍数測定を実施する。

アカウミガメが潜水している間に水温鉛直プロファイルを得る事が出来る。人工衛星経由でほぼ毎日得られるこのデータを JAMSTEC の大型計算機内の物理モデルを使った数値実験を行う研究者に提供し、ウミガメ由来のデータを同化する実験を行ってもらった。ウミガメ由来の水温データはアルゴフロートなどの既存の装置で得られたデータと良く一致し、親潮黒潮混合水域の暖水塊・冷水塊の張り出し具合などの計算結果が修正された(Miyazawa et al. 2019)。海鳥に加えて、ウミガメ類から得られる現場測定値が、大型計算機内の物理モデルの精度向上に貢献するという想定外の結果が得られた。また、これまで測定が困難であった熱帯低気圧や爆弾低気圧の直下を観測する新たな手法として認識されており(Domingues et al. 2019)、三陸海域を含む日本近海の海洋構造モニタリングへの貢献が期待される。

### (3) 魚類の行動生態

定置網で捕獲されるマンボウを船上で譲り受け、3次元行動記録計と光源付き静止画像記録計を搭載して放流する実験を行ったところ、深度100-200メートルでクダクラゲ類を捕食していることが分かった。さらに組織片の安定同位体比分析結果より、小型個体は海底付近で甲殻類を捕食し、大型個体は中層でクラゲ類を捕食していることが判明した(Nakamura and Sato, 2014)。行動データに加えて、体温データも取得して解析したところ、マンボウが百数十メートルに到る鉛直移動を繰り返すのは、深くて冷たい深度帯で餌を捕らえ、冷えた体を温めるために表層に戻ってくるためで、餌を捕らえる深度帯の滞在時間を最大化する様に時間配分していることが判明した(Nakamura et al. 2015)。

三陸の河川に産卵遡上してくるサケには、早い時期に産卵遡上する系群(秋サケ)と

後期に産卵する系群（冬サケ）がいる。三陸では沿岸や河川の水温環境が秋から冬にかけて大きく変化するため、前期のサケと後期のサケでは異なる水温を経験することになる。そこで、前期群と後期群のサケを用いて、温度条件を変えながら酸素消費速度を測定し、それぞれの系群がどのような温度特性を持っているのかを調べた。最大有酸素代謝速度と休止代謝速度の差である有酸素代謝余地を求めたところ、前期のサケは後期のサケに比べて高水温でピークとなる有酸素代謝余地を有し、高い水温帯で高いパフォーマンスを発揮できることが示唆された。前期のサケと後期のサケは、水温と代謝速度の関係をシフトさせる代謝速度の補償的応答（温度補償）によって適水温を変えていることが示唆された（Abe et al. 2019）。

#### (4) 引用文献

- Abe, T. K., T. Kitagawa, Y. Makiguchi, and K. Sato (2019) Chum salmon migrating upriver accommodate to environmental temperatures through metabolic compensation. *Journal of Experimental Biology*, 222: jeb186189.
- Domingues, R., A. Kuwano-Yoshida, P. Chardon-Maldonado, R. E. Todd, G. Halliwell, H.-S. Kim, I.-I. Lin, K. Sato, T. Narazaki, L. K. Shay, T. Miles, S. Glenn, J. A. Zhang, S. R. Jayne, L. Centurioni, M. Le Hénaff, G. R. Foltz, F. Bringas, M. M. Ali, S. F. DiMarco, S. Hosoda, T. Fukuoka, B. LaCour, A. Mehra, E. R. Sanabia, J. R. Gyakun, J. Dong, J. A. Knaff and G. Goni (2019) Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. *Frontiers in Marine Science*, 6: 446.
- Fukuoka, T., T. Narazaki and K. Sato (2015) Summer-restricted migration of green turtles (*Chelonia mydas*) to a temperate habitat of the northwest Pacific Ocean. *Endangered Species Research*, 28: 1-10.
- Fukuoka, T., M.i Yamane, C. Kinoshita, T. Narazaki, G. J. Marshall, K. J. Abernathy, N. Miyazaki and K. Sato (2016) The feeding habit of sea turtles influences their reaction to artificial marine debris. *Scientific Reports*, 6: 28015.
- Fukuoka, T., K. Omuta, T. Hidaka and K. Sato (2019a) First record of a known-age juvenile loggerhead turtle (*Caretta caretta*) at the Sanriku Coast in the Northwest Pacific Ocean. *Coastal Marine Science*, 42: 8-11.
- Fukuoka, T., C. Kinoshita and K. Sato (2019b) Northernmost bycatch record of an olive ridley turtle (*Lepidochelys olivacea*) in the Pacific coast of Japan. *Marine Turtle Newsletter*, 159: 17-22.
- Fukuoka, T., T. Narazaki, C. Kinoshita and K. Sato (2019c) Diverse foraging habits of juvenile

- green turtles (*Chelonia mydas*) in a summer-restricted foraging habitat in the northwest Pacific Ocean. *Marine Biology*, 166: 25
- Goto, Y., K. Yoda and K. Sato (2017) Asymmetry hidden in birds' tracks reveals wind, heading, and orientation ability over the ocean. *Science Advances*, 3: e1700097.
- Ito, A., R. Yamashita, H. Takada, T. Yamamoto, K. Shiomi, C. Zavalaga, T. Abe, S. Watanabe, M. Yamamoto, K. Sato, H. Kohno, T. Iida, K. Yoda and Y. Watanuki (2013) Contaminants in tracked seabirds show regional patterns of marine pollution. *Environmental Science & Technology*, 47: 7862-7867.
- Kinoshita, C., T. Fukuoka, Y. Niizuma, T. Narazaki and K. Sato (2018) High resting metabolic rates with low thermal dependence induce active dives in overwintering Pacific juvenile loggerhead turtles. *Journal of Experimental Biology*, 221: jeb.175836.
- Miyazawa, Y., X. Guo, S. M. Varlamov, T. Miyama, K. Yoda, K. Sato and K. Sato (2015) Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system. *Scientific Reports*, 5: 17672.
- Miyazawa, Y., A. Kuwano-Yoshida, T. Doi, H. Nishikawa, T. Narazaki, T. Fukuoka, K. Sato (2019) Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio confluence region. *Ocean Dynamics*, 69: 267-282.
- Nakamura, I. and K. Sato (2014) Ontogenetic shift in foraging habit of ocean sunfish *Mola mola* from dietary and behavioral studies. *Marine Biology*, 161: 1263-1273.
- Nakamura, I., Y. Goto, and K. Sato (2015) Ocean sunfish rewarm at the surface after deep excursions to forage for siphonophores. *Journal of Animal Ecology*, 84: 590-603.
- Narazaki, T., K. Sato, K. J. Abernathy, G. J. Marshall and N. Miyazaki (2013) Loggerhead turtles (*Caretta caretta*) use vision to forage on gelatinous prey in mid-water. *PLoS ONE*, 8: e66043.
- Narazaki, T., K. Sato and N. Miyazaki (2015) Summer migration to temperate foraging habitats and active winter diving of juvenile loggerhead turtles *Caretta caretta* in the western North Pacific. *Marine Biology*, 162: 1251-1263.
- Nishizawa, H., T. Narazaki, T. Fukuoka, K. Sato, T. Hamabata, M. Kinoshita and N. Arai (2014a) Genetic composition of loggerhead turtle feeding aggregations: migration patterns in the North Pacific. *Endangered Species Research*, 24: 85-93.
- Nishizawa, H., T. Narazaki, T. Fukuoka, K. Sato, M. Kinoshita and N. Arai (2014b) Juvenile green turtles in the northern edge: mtDNA evidence of long-distance westward dispersals in the Northern Pacific Ocean. *Endangered Species Research*, 24: 171-179.

- Ochi, D., K. Matsumoto, N. Oka, T. Deguchi, K. Sato, T. P. Satoh, F. Muto and Y. Watanuki (2016) Dual foraging strategy and chick growth of streaked shearwater *Calonectris leucomelas* at the two colonies of different oceanographic environment. *Ornithological Science*, 15: 213-225.
- Sakao, M., H. Takeshima, K. Inoue, K. Sato (2019) Extra-pair paternity in socially monogamous Streaked Shearwater: forced copulation or female solicitation? *Journal of Ornithology*, 160: 137-144.
- Shiomi, K., K. Sato, N. Katsumata and K. Yoda (2019) Temporal and spatial determinants of route selection in homing seabirds. *Behaviour*, 156: 1165-1183.
- Williams, K. L., K. Sato and P. J. Ponganis (2019) Activity not submergence explains diving heart rates of captive loggerhead turtles. *Journal of Experimental Biology*, 222: jeb200824.
- Yamamoto, T., A. Takahashi, K. Sato, N. Oka, M. Yamamoto and P. N. Trathan (2014) Individual consistency in migratory behaviour of a pelagic seabird. *Behaviour*, 151: 683-701.
- Yamamoto, T., H. Kohno, A. Mizutani, K. Yoda, S. Matsumoto, R. Kawabe, S. Watanabe, N. Oka, K. Sato, M. Yamamoto, H. Sugawa, K. Karino, K. Shiomi, Y. Yonehara and A. Takahashi (2016) Geographical variation in body size of a pelagic seabird, the streaked shearwater *Calonectris leucomelas*. *Journal of Biogeography*, 43: 801-808.
- Yamashita, R., H. Takada, A. Nakazawa, A. Takahashi, M. Ito, T. Yamamoto, Y. Watanabe, N. Kokubun, K. Sato, S. Wanless, F. Daunt, D. Hyrenbach, M. Hester, T. Deguchi, B. Nishizawa, A. Shoji and Y. Watanuki (2018) Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) using seabird preen gland oil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 75: 545-556.
- Yoda, K., K. Shiomi and K. Sato (2014) Foraging spots of streaked shearwaters in relation to ocean surface currents as identified using their drift movements. *Progress in Oceanography*, 122: 54-64.
- Yonehara, Y., Y. Goto, K. Yoda, Y. Watanuki, L. C. Young, H. Weimerskirch, C.-A. Bost, K. Sato (2016) Flight paths of seabirds soaring over the ocean surface enable measurement of fine-scale wind speed and direction. *PNAS*, 113: 9039-9044.

### 3-2-8 グループ 8 (岩手県沿岸の魚類資源動態)

岩手県沿岸は、複雑で変化に富む海洋環境を呈する親潮黒潮混合域に位置する複数の連続する湾から構成され、多様な魚類資源の生息域となっている。震災後の調査から、

多くの沿岸水産資源では、2011年の大津波による直接的な影響は小さかったことが示唆されている。しかし、直接攪乱を受けた湾内の浅海砂浜域では、津波による直接的な攪乱のみならず、復興事業による海岸線の改変などの影響も大きいと考えられ、生活史の初期にここを利用する資源では長期的な影響が考えられる。また、その影響は対象生物に対する直接的なものだけでなく、餌環境など生態系を通じた間接的な形で表れる場合も多いことから、攪乱からの遷移は必ずしも平衡状態に向かうわけではなく、海洋環境の影響も加わって刻々と変化していくと考えられる。さらに、岩手県における沿岸漁業は、震災以降比較的早期に再建が進められてきたが、復旧の程度は漁業種類や地域で大きく異なっており（後藤，2013）、資源に対するインパクトも震災から時間が経過するに伴い変化していると考えられる。本グループでは、湾奥の砂浜域で着底して初期生活史をおくるヒラメなど主要な沿岸水産資源の資源変動を明らかにするため、岩手県北部の開放性湾である野田湾と中部の半閉鎖性湾である大槌湾で魚類の採集調査を震災前から継続して実施してきた。また、この調査を活用し、湾奥砂浜域における魚類群集に対する津波攪乱の影響とその後の動向を明らかにした。

## (1) 魚類群集の動態

鵜住居川河口南側に砂浜域を有する大槌湾奥の根浜地区は、2011年の東北太平洋沖地震津波により河口の砂州が消失し（Okayasu et al., 2013）、周辺ではアマモ場の消失（Komatsu et al., 2015）や底生生物相の変化（Seike et al., 2013）が報告されている。本研究は、この海域を対象として、震災前後での魚類相の時系列変動に基づいて、沿岸砂浜域における魚類群集の変化を明らかにしてきた。

2009年以降、夏季から秋季にかけて、岩手県中部の半閉鎖的湾である大槌湾奥の根浜地区砂浜域を対象とし、調査船グランメユを用いた採集調査を毎月1回行った。調査は、水深5~10 mで水工研Ⅱ型ソリネット（網口幅2 m）を用い、5、7、10 mを基準水深帯として50~100 mの曳網を各水深帯2~3回行って魚類を採集した。これまで得られた結果は次の通り。

採集時期別魚種組成と分布密度に基づいて、2009年から2015年までの魚類群集の特徴を明らかにした（Goto et al., 2017）。全種をあわせた分布密度、出現、種数多様度は、季節的な変動が見られたものの、共通した変動特性は見いだせず、震災による影響は見られなかった。そこで、魚種別密度に基づいてクラスター解析を行ったところ、この海域の魚類群集は、夏と秋のグループに区分され、夏では震災前と震災後で明瞭に区分できたが、秋では震災前後で区分することができなかった。秋のグループは、ネズヅポ類、アラメガレイ、ヒメジなどで特徴づけられ、震災前後の夏のグループは、クサウオ、ギンポ、タケギンポ、サブロウなど、ヒラメ当歳魚、マコガレイ、ホウボウ、ヒメジ、アサヒアナハゼなどによりそれぞれ特徴づけられていた。そこで、この群集に対する物理環



境と震災津波の影響を明らかにするため、水温、季節、震災前後を指標として正準コレスポネンス分析を行ったところ、震災前後と季節が有意な指標として採択され、震災前と後の夏、震災前と後の秋に区分することができた。この分析によって、震災前はコモンカスベ、ヨウジウオ、ハオコゼ、クサウオ、ギンポによって特徴づけられ、震災後は複数のネズッポ類と異体類、マアナゴ、マダイ、カナガシラ、ホウボウ、サンゴタツによって特徴づけられることが示された。これらのことから、大槌湾奥砂浜域の魚類群集は、基質依存性魚類と砂泥底魚類が混在しており、夏と秋で魚種が入れ替わることによって形成されているが、東北太平洋沖地震津波の攪乱により、基本的な季節性には変化がないものの、基質依存性魚種の占める割合が減少した一方、これまで見られなかった水産重要種であるムシガレイやソウハチなどの異体類やネズッポ類といった砂泥底に依存する魚種が増加したことが示された。

2015年以降の調査を加えて同様な解析を行った結果、本海域の魚類群集は、これまでの結果と同様夏と秋のグループに大別することができた。しかし、明瞭に震災前後の区分にはならず、夏では震災前の2009～2010年に2018年を加えたグループ、2012～2015年のグループ、および2016年のグループに細分されたが、秋では年代ごとの明瞭な区分は認められなかった。水温、季節、震災前後を指標として正準コレスポネンス分析を行ったところ、震災前後と季節に加え、水温の影響が採択された。これにより、夏のグループにより類似年として評価された震災前の2009～2010年と2018年は、クサウオ、ギンポ、タケギンポがキースト種としてまとめられた。また、2018年の調査では、震災後のみ出現しているヌマガレイ、イシガレイおよびムシガレイが出現した一方、震災以降出現していなかったアイナメとヨウジウオの出現とオオクチイシナギの初出現が認められた。この結果から、震災以降アマモ場周辺の基質依存性魚種から砂泥底を主生息域とする魚種へと魚種組成の変化がみられていたが、2018年調査では基質依存性魚種の増加がみられ、一部でアマモ場の回復に伴う魚類相の変化が示唆された。

## (2) 底生生物相の動態

2017年と2018年に、大槌湾奥砂浜域の魚類調査の範囲内となる5～7m深において、広田式ソリネット（網口幅60cm）によるベントス採集調査を行った。調査は5m深と7m深で各水深帯30m程度の曳網を2回ずつ行った。採集されたベントス素エイに基づいて主要な分類群別の分布密度を求め、群集構造の特徴を明らかにした。古山ほか（2018）によりまとめられている2017年の調査結果に2018年の調査結果を加え、両年で比較した。本海域におけるベントス群集は、概ねエゾハマアミを中心とするアミ類と、端脚類が優占する群集構造を呈しているが、季節・年による差が認められた。2017年は、季節によって種組成が大きく変化し、優占種は7～8月が端脚類、9～10月がアミ類であった。分布密度は、端脚類の密度が著しく高いために7月が極めて高かったが、

8月以降種組成が変化しながらアミ類の増加に伴って徐々に増加傾向を呈した。一方、2018年は、期間を通してアミ類が優占し、季節間で種組成に大きな変化は見られなかった。全ての分類群をまとめた分布密度は、アミ類の密度変動に呼応して7月以降低下傾向を呈した。また、2017年は地点間で多様度や密度に大きな差が見られていたのに対し、2018年は地点間のバラツキは小さかった。これらのことから、2017年は、調査地点内における種組成や分布密度のバラツキが大きいほか、埋在性の種が見られており、複合的で変化に富む底質環境を反映した群集構造をなしていたと考えられる。一方、2018年は、エゾハマアミを主体とするアミ類が夏季から秋季にかけて減少し、それに呼応して夏から秋の群集に移り変わったと考えられ、アミ類の優占する表在性種主体の群集へと変化したと推察される。

### (3) ヒラメ・マコガレイ稚魚の加入水準評価

本調査が行われる夏季から秋季にかけての野田湾と大槌湾奥砂浜域は、ヒラメ0歳魚の着底域となっており、多くの年で分布密度は8月上旬頃に最大となる(後藤, 2013)。密度の最大値をヒラメ稚魚の分布量として比較すると、野田湾では、震災前は2007年を除いて低い値で推移していたが、震災直後に増加して2012~2014年に最も高い密度となっていた(図6-5)。一方、大槌湾では、周期的に増減を繰り返しており、2005年の他、2015年にピークとなるが、いずれもピークの前後に低密度年が認められた(図6-5)。震災後の動向は、野田湾では、3年間高水準を維持してきたが、2015年から減少して2016年以降低い水準となっている。一方、大槌湾では、2012年から2015年にかけて高水準で、その後大きな変動を呈している。

大槌湾奥では、ヒラメと同様にマコガレイ稚魚の着底域となっており、優占種の一つとなっている。大槌湾奥砂浜域では、ヒラメ同様8月に分布密度が最大と年が多い(後藤ほか, 2015)。密度の最大値を分布量として比較すると、マコガレイ稚魚の分布量は数年に一度大きな増加が繰り返し生じており、2010年に僅かな増加があった後、2013年と2017年に急激な増加が認められた(図6-6)。特に2017年は著しい増加となり、2008年以降最大値となった。

2010年から2014年までと2017年から2018年に大槌湾奥砂浜域で採集されたマコガレイ稚魚を対象として、耳石を用いた着底時期と成長特性評価を行った。2010年から2013年で比較した所、マコガレイの着底時期や着底後の成長に震災前後で差は認められず、着底量の多い2013年で着底直後の成長速度の低下が認められた。推定された着底時期は、震災前後で共通して5~7月にみられていたが、最も分布密度の多い2017年のみ特異的に2~4月の着底が主体となっていた。2017年の大槌湾内の水温(<http://teams.aori.u-tokyo.ac.jp>)は沖合からの暖水波の影響により冬春季の水温が著しく高く、仔魚期の生残に好適な条件であったと考えられる。

これまで、沿岸漁業資源に対する東日本大震災津波の影響は、主に漁獲努力量の変化がおよぼす影響を中心として議論がなされており、津波による直接的な資源に対する影響は小さいと見られてきた。しかし、これまで行ってきた大槌湾での調査により、東日本大震災津波による沿岸域のハビタット変化が沿岸性魚類の組成変化をもたらしていることがわかってきた。さらに、震災から8年が経過した時点でアマモ場の回復に伴う魚類相の変化みられていることも示唆された。このような魚類相の変化にともない、マコガレイやヒラメなどでは稚魚の分布密度増加が認められているほか、ムシガレイやソウハチなど震災前にはみられなかった異体類の出現が確認されている。また、底質環境の変化に伴ってこれらの餌生物となるベントス群集も変化しており、特にアミ類では大きく分布特性が変化している。アミ類に強く依存するヒラメなどでは加入変動が餌生物環境に影響を受けている可能性があり、稚魚の分布量変動のみならず、これらの資源変動特性の解明には餌料環境との関連性も明らかにする必要がある。

また、本砂浜域は、平成30年度から岩手県による人工的な砂の導入による養浜が開始されている。今後は、津波による攪乱からの回復途上にある本海域の魚類相と主要魚種資源変動のモニタリングを継続し、養浜事業による影響をあわせて評価する。

#### (4) 引用文献

- 古山 遥・後藤友明・高梨愛梨 (2018) 震災から6年を経過した大槌湾の底生魚類相と摂餌選択性. 東北底魚研究, 38, 11-20.
- 後藤友明 (2013) 漁獲統計データから見た岩手県の漁業における東日本大震災からの復旧・復興の現状と課題. 水産海洋研究, 77: 241-251.
- 後藤友明 (2013) 仔稚魚調査結果から推定されたヒラメ 2012 年級群の加入水準. 東北底魚研究, 33: 33-39.
- 後藤友明・太田 悟・下地翔太・林崎健一 (2015) 東日本大震災後の大槌湾に加入したマコガレイ稚魚の分布と成長. 東北底魚研究 35, 17-22.
- 後藤友明・高梨愛梨・玉田 悟・林崎健一 (2017) 大槌湾奥砂浜域の魚類相にみられた東日本大震災後の変遷. 東北底魚研究, 37: 113-119.
- Goto, T., A. Takanashi, S. Tamada and K.-I., Hayashizaki (2017) Temporal changes in the surf zone fish assemblage in Otsuchi Bay, Pacific coast of northeastern Japan, with comments on influences of the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. Coastal Marine Science, 40: 55-65.
- Komatsu, T., T. Ohtaki, S. Sakamoto, S. Sawayama, Y. Hamana, M. Shibata, K. Shibata and S. Sasa (2015) Impact of the 2011 tsunami on seagrass and seaweed beds in Otsuchi Bay, Sanriku coast, Japan. In Coccaldi et al. (eds), Marine Productivity: perturbations and

Resilience of Socio-ecosystems, 43–53.

Okayasu, A., T. Shimozone, H. Yamazaki, T. Ngai and S. Sato (2013) Severe erosion of sandbar at Unosumai River mouth, Iwate, due to 2011 Tohoku tsunami. *Coastal Dynamics*, 2013: 1311–1320.

Seike, K. K. Shirai and Y. Kogure (2013) Disturbance of shallow marine soft-bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake. *PloS ONE*, 8: e65417.

### 3-2-9 グループ 9 (気仙沼舞根湾および舞根新生塩性湿地の生物群集)

気仙沼市舞根地区では、東日本大地震による地盤沈下と津波によって、舞根湾奥部の休耕田と倒壊した宅地の跡に塩性湿地が形成された。2011年3月11日に新生した塩性湿地およびそれに続く舞根湾の環境と生物群集の変化を詳細に調べ、震災の影響を強く受けた湾奥・河口域生態系の遷移・再生過程を明らかにする。同様に、震災によって環境が大きく変化した仙台湾に注ぐ河川の河口域において、スズキ稚魚による成育場の利用様式を調べる。

#### (1) 気仙沼舞根湾潜水調査

2011年5月から2017年3月まで、舞根湾内外の4定点における潜水観察調査を2ヶ月に1回の頻度で合計36回行った。定点は、津波の影響が最も大きかった湾奥、湾内のガラモ場、急深で潮通しの良い湾口、およびやや外洋に面した湾外(気仙沼湾内)である。調査はトランゼクトによる目視観察とし、50mの距離の両側1m、すなわち100m<sup>2</sup>の観察を各定点について10反復ずつとした。観察に際しては、魚類および大型無脊椎動物の種類・体長・個体数を記録した。

観察された魚類の個体数、種類数とも震災直後は非常に低い値であったが、個体数はその年のうちに回復し、2012年以後はほぼ安定した季節変化を繰り返した。種数は1年目よりも2年目が多く、以後大きな変化は無かった。震災から最初の2年はキヌバリやリュウグウハゼ等の寿命の短い魚類が多く、3年目以降、シロメバル、オキタナゴ、アイナメ等の長寿の魚が増えた。また、アナジャコなどの巣穴を利用するニクハゼやスジハゼは、アナジャコが巣を形成した2年目以降に数が増えた。目視個体数と目視体長から推定した魚類の総重量は、比較的長寿の魚種の数と体長の増加により年々増加傾向にあった。しかし、漁業が本格的に再開された5年目から、漁業対象種の体長の増加は頭打ちになった。無脊椎動物の個体数の変化は、魚類より明瞭であった。約半年で成熟するミズクラゲが津波直後に数を増やしたが、ブルームが見られたのは2年目までであ

り、その後はほとんど観察されなかった。一方、成熟に 2、3 年を要するマナマコは 3 年目から、エゾアワビは 5 年目から資源の回復が認められた (Masuda et al. 2016)。

## (2) 舞根塩性湿地調査

900 m<sup>2</sup>の湿地（舞根塩性湿地）に 34 個所の調査定点を設け、2012 年 5 月から 2014 年 3 月まで 2 ヶ月に 1 回の環境調査、採泥器とたも網によるベントス採集調査を行った。2014 年 5 月から 2015 年 3 月まで、湿地内の干出部を除く 20 定点において、2 ヶ月に 1 回 20×20 cm の被せ網型採集器を使用して小型甲殻類を定量採集するとともに、50×50 cm コドラートによる海藻(草)被度調査を行った。

全有機炭素量(TOC)、硫化物態硫黄量(AVS)は 2012 年以降継続して減少傾向にあり、湿地内の環境が徐々に改善していることがわかった。環境改善にともない、底生動物の高密度分布域が湿地中央部から全体に広がり、高生物量の水域も流速の早い排水管周辺から湾奥部へ広がった。初期に優占したユスリカ幼虫やトンガリドロクダムシなどの小型種の密度が経過年数とともに減少し、ヒメシラトリガイ、ホソウミニナなどの大型動物が増加する傾向が認められ、湿地全体の平均密度は減少傾向を示したが生物量に明瞭な変化はみられなかった (Kumagai et al. 2017)。湿地内では、海藻のオゴノリと、ゴノメグサ、海草のコアマモが群落を形成した。海藻・海草の生物量と小型甲殻類の生物量は類似した季節変化を示した。海藻・海草各種の生物量と主要小型甲殻類各種の生物量の関係を検討し、オゴノリとニホンドロソコエビやトンガリドロクダムシなど 5 種との間、ゴノメグサとシミズメリタヨコエビなど 4 種との間にそれぞれ有意な正の相関が認められた。一方、コアマモと相関を示す甲殻類は見られなかった。安定同位体比分析の結果、海藻と相関が見られた小型甲殻類 6 種はオゴノリまたはゴノメグサを餌とせず、底生微細藻類や沿岸プランクトンを摂餌している可能性が示された。また、トンガリドロクダムシがオゴノリ上に棲管を作ることを確認した。このことから、海藻はこれら甲殻類に三次元的な生息場を提供し、小型甲殻類はプランクトンや懸濁した底生微細藻類を藻体上で摂餌していると考えられた。安定同位体比分析と消化管内容物分析の結果、湿地内の魚類はトンガリドロクダムシ、ヒゲナガヨコエビ属などを摂餌し、マゴチがこれらの小型魚類を捕食していた。以上より、本湿地では、湿地内に着生した海藻群落を基盤とした動物群集と食物構造が確認された (三簾ほか, 2018)。

## (3) スズキ稚魚調査

スズキは日本の代表的な沿岸性水産重要魚類である。本種は河口域を主要な成育場としており、スズキ稚魚の分布と生態特性を指標に、河口域生態系の攪乱からの回復過程

について分析した。仙台湾では2013年から2016年の5-6月に、松島湾の5定点と名取川下流域の5定点において、スズキ稚魚の採集調査を行った。稚魚の耳石を摘出してふ化日と成長履歴を解析し、採集されたスズキが経験した環境を推定するため、水温、流動環境、塩分、河川流量、風などの環境データを収集した。

2011年から継続している気仙沼舞根湾における魚類稚魚調査では、スズキ稚魚は6年間で1個体しか採集されず、仙台湾がスズキ稚魚の主要な分布域のほぼ北限であることが確かめられた。仙台湾で採集された稚魚個体数は、2013年967個体、2014年47個体、2015年9個体、2016年113個体であった。これまでの採集結果を総合すると、2013年のみ数十～数百個体/曳網であり、その他の年の数個体/曳網に比べて圧倒的に稚魚密度が高かった。この結果と海洋環境を比較したところ、黒潮系暖水が仙台湾まで北上している年はスズキ稚魚が多く採集され、親潮系冷水が接近している年は稚魚が少なかった。このことから、スズキの分布北限に位置する仙台湾では、南方からの仔稚魚の輸送によってその資源量が大きく変動することが示唆された。仙台湾のスズキ個体群においては2013年級群が卓越していた。これは、着底稚魚の調査結果と一致しており、稚魚期までの加入量の変動によって資源量変動が生じているといえる。一方、昨年度までの調査結果で、丹後海では稚魚の加入量は仙台湾ほど大きな年変動はなく、また卓越年級群が存在するという情報もない。黒潮系暖水の波及により常磐沖から仙台湾へ卵稚仔が輸送され加入量が増加すると考えられることから、卵稚仔輸送・生残過程が資源量にまで影響している可能性が高い。これはスズキ生息域の北限に近い仙台湾の特徴といえるだろう。

#### (4) 引用文献

- Masuda, R. M. Hatakeyama, K. Yokoyama, M. Tanaka (2016) Recovery of coastal fauna after the 2011 tsunami in Japan as determined by bimonthly underwater visual censuses conducted over five years. PLoS ONE, 11(12): e0168261. pone.0168261.
- 三簾仁志・横山 寿・山下 洋 (2018) 地盤沈下と津波により誕生した塩性湿地における海藻・海草上の小型甲殻類群集. 国際沿岸海洋研究センター研究報告, 36: 152-162.
- Kumagai, Y. H. Yokoyama, Y. Yamashita (2017) Physico-chemical and macrobenthic characteristics of a salt marsh created in the aftermath of the Great East Japan Earthquake. Coastal Marine Science, 40: 86-94.

#### 3-2-10 グループ 10 (海草藻場の生物群集)

東北地方太平洋沖地震および津波に伴うアマモ場の種多様性と遺伝的多様性の変化、

およびその後の回復過程を明らかにすることを目的とする。そのために地震前に生物調査が行われた複数海域のアマモ場の同一地点において、同じ方法でアマモ類の生物量および種多様性を測定した。また、アマモ類を採集し、遺伝的多様性の解析を行った。得られたデータを震災前データと比較し、津波によるアマモ場の分布、生物多様性および生態系機能の改変を検討した。また遺伝子データからは今後のアマモ場の回復過程にかかる分散プロセス(メタ個体群動態)の解明を試みた。遺伝的多様性の解析については、これまで有効なマーカーが無かったスゲアマモ、タチアマモ、オオアマモについて、新たな解析手法として多様な生物種について利用が進んでいる MIG-seq 法の本調査への適用の有効性を検討した。

### (1) 東日本大震災前後のアマモ場の種多様性と生物量

宮古湾、山田湾、船越湾、大槌湾、広田湾、気仙沼湾、松島湾において、野外調査を実施した。また、志津川湾、万石浦においては既存研究で得られたデータや資料を利用して解析を行った。海草類(アマモ、コアマモ、タチアマモ、スゲアマモ、オオアマモ)の種多様性を震災前後で比較すると、志津川湾におけるコアマモの消失、気仙沼湾におけるオオアマモの出現が確認されたものの、ほとんどの湾および種において、震災前後で変化はなかった(仲岡ほか, 2017)。宮古湾のコアマモは震災後に新たに加入したのではなく、震災前にも分布していたが記録されていなかったと推察される。

アマモ場の生物量の変化については、北海道から関東の海域で、これまでに本事業および他事業にて発表された計 11 サイトのデータを比較解析し、サイト間での一般的傾向の有無、またサイトによる特異的な応答の有無について検討した。同じサイトにおける震災の影響を示す変数として、Response ratio:  $R$  (%)を下記の式で表して比較を試みた。

$$R = \frac{M_{after}}{M_{before}} * 100$$

ただし、 $M_{after}$  は震災後(2011 あるいは 2012)のアマモ類の被度または生物量、 $M_{before}$  は震災前のアマモ類の被度または生物量を示す。複数のデータがある場合は、その平均値を採用した。

その結果、広域の比較では、津波の高さが高かった湾ほど、アマモ場の Response ratio、すなわち消失率が高い傾向があることが判明した(仲岡ほか, 2017)。しかし、津波高が低いものの  $R$  が高い例外的な海域も 2 サイト(万石浦、松島湾)あった。この 2 サイトは非常に閉鎖的な海域であり、津波による攪乱は弱かったものの、地震に伴う地盤沈下により水深が 1m 程度深くなった。震災前においても透明度が悪くアマモ類の生育水深が浅かった場所であり、そのため、水深の増加に伴い、光環境が悪くなり、アマモが

生育しなくなった可能性が示唆された。

このように震災のアマモ場への影響は、津波と地盤沈下、水質の悪化など複数の至近要因が複合的に作用していることが明らかになった。

## (2) 震災後のアマモ場の回復過程

アマモ場の回復過程の長期観測は、大槌湾と船越湾で行った。一般にアマモ場の浅い部分では、アマモの被度の順調な回復が見られた。特に、大槌湾根浜沖および船越湾吉里吉里沖のアマモ場のもっとも浅い縁辺部では、2015年夏までにアマモの被度が震災前と同じレベルまで回復した。一方、アマモ場の深い部分では、いずれの湾においても、アマモ、タチアマモ、スゲアマモ等がパッチ状に生残しているものの、震災後7年たった2018年になっても被度は5%以下にとどまっており、震災前の被度(20~40%程度)には程遠い状況であった(環境省自然環境局生物多様性センター, 2019)。このように、アマモ場の浅い部分と深い部分で震災後の回復速度が違う要因の1つとして、水深の浅い部分は種子生産量が多いアマモが優占するのに対し、水深の深い部分はタチアマモやオオアマモなどの種子生産量がアマモに比べて少ない種が優占するため、種子発芽および実生定着による回復に差が生じている可能性が考えられる。また、土砂の流入や復興事業に伴う海岸線部分で護岸工事等に伴う人為的攪乱により透明度が低下し、水深の深い部分において海草類の生育に必要な光が十分に得られていないことも要因として考えられるため、今後の沿岸域の水質、およびそれに影響を与える要因を含めて監視を続けていく必要がある。

なお、山田湾においては、震災後の2012年には震災前と同程度の被度のアマモ場が確認されたが、2013年~2015年にかけて、棘皮動物(キタムラサキウニ、エゾバフンウニ、マヒトデ、イトマキヒトデ等)の増加に伴うアマモ場の著しい減少が見られた。特に、湾の北部および中央の点では、アマモ類(アマモおよびスゲアマモ)が局所的に消滅するに至っている。一方、湾西部の織笠川河口周辺では、このような変化は見られていない。その理由として、河川からの淡水流入により汽水環境に生息できない棘皮動物による捕食圧が低いことが考えられる。このようにアマモ場の一次生産量がトップダウンコントロールを受ける可能性が示唆された。

## (3) タイにおける津波の被害を受けた海草藻場の長期変動

東日本大震災に伴う津波が三陸地方のアマモ場に与える影響の一般性、特異性を理解する上で、2004年に発生したスマトラ島沖地震に伴う海草藻場の変動の情報が、よい比較対象となる(Whanpetch et al, 2010)。そこで、2004年の津波によって一部の海草



藻場が消失したタイのパンガ県クラブリ川の河口において、以前と同じ調査方法で2015年2月に調査を行い、10年間の回復過程を解析した。

その結果、津波の著しい攪乱を受けたサイトの海草類の分布域および生物量は2010年以降も順調に回復しているものの、依然として津波前の水準には達していないことが明らかになった。このことから、津波後の海草藻場の回復過程の評価には、最低でも10年以上の長期スケールでのモニタリングが必要であることが明らかになった。

#### (4) アマモ場の海草類の遺伝的多様性の変化

震災前後の三陸地方のアマモ類の集団遺伝的構造の変動を明らかにするために、三陸地方を中心に日本全国のアマモおよびスゲアマモ集団の遺伝的解析を行った。震災後にアマモが採集された宮古湾、山田湾、船越湾、大槌湾、広田湾、気仙沼湾、および松島湾のアマモ11サイトについて、震災前と同じ方法でマイクロサテライト多型を検出した。得られた多型をもとに、震災前および震災後の各サイト間の遺伝的分化指数  $F_{st}$  (Weir and Cockerham 1984) を算出し、NJ法で樹状図を作成して各サイトの震災前後での遺伝的組成を示した。さらに、各サイトの遺伝的多様性について、クローン多様性、アレリックリッチネス、平均ヘテロ接合度期待値を算出して比較を行った。

遺伝的組成については、 $F_{st}$  樹状図から、アマモ各サイトの震災前と震災後で大きな変化がないことが明らかになった(仲岡ほか, 2017)。アマモの種子は非浮遊性であるが、花序を包む苞葉ごと水面に浮遊して海流などで移動し、集団間の遺伝子交流を促すことが明らかにされている。しかし今回の結果では、震災後のアマモ集団は主に、震災前から残存した個体そのもの、あるいは残存した個体から回復再生したものであるか、または震災前に各集団内または近隣の集団で生産された種子群から発芽した実生個体に由来することが示唆された。

また、気仙沼湾以外では、遺伝子/遺伝子型多様性にも明確な低下はほとんど見られなかった。ただし、アマモの集団形成には、種子繁殖だけでなく根茎の伸長による栄養繁殖も大きく寄与する。そのため、遺伝的多様性の明らかな減少が確認されなかった地点においても、アマモの残存率が低かったサイトにおいては今後の集団再生の過程次第では、遺伝的多様性が低下する可能性が懸念される。

#### (5) 宮城県気仙沼湾におけるアマモ場の分布状況と種多様性および遺伝的多様性

震災直後にアマモの遺伝的多様性の著しい減少が示唆されていた気仙沼湾を対象に、より詳細な調査を実施した。その結果、気仙沼湾東部の舞根湾、九九鳴き浜、および湾西部の波路上から松崎にかけての海域にアマモ場が点在しており、アマモ、スゲアマモ、

タチアマモの3種の生息が確認された。九九鳴き浜を除くアマモ場はパッチ状で、シート密度も低く、さまざまなかく乱や負荷を受けている可能性が示唆された。気仙沼湾東部において採集されたアマモについて、遺伝的多様性（アレル多様性）の解析を行ったところ、舞根湾は震災以降、アレル多様性が低いままである一方、九九鳴き浜の値は2004年に気仙沼湾西部で採集された集団の値と近く、多様性が高いことが判明した。これより、これまで示唆されてきた気仙沼湾における震災前後の遺伝的多様性の変化は、個体群の空間的な差異を反映したものであり、震災そのものの影響ではないと考えられた。

### (6) 三陸沿岸海草種の遺伝的構造解析への MIG-seq 法の適用検討

解析条件の検討を行うため、三陸沿岸に分布するアマモ属のうち、アマモ 10 地点 128 サンプル、スゲアマモ 9 地点 11 サンプル、タチアマモ 7 地点 8 サンプル、オオアマモ 7 地点 7 サンプルを用いた。

MIG-seq 法で得た各ローカスの中で、最初に出る SNP をデータとして用いた。シーケンスカバレッジ値、増幅断片長の均一化の有無と検出ローカス数の関係を確認したところ、各ローカスの増幅断片長を最短の増幅断片に合わせることでシーケンスカバレッジ値を下げることで、解析に有効なローカス数を増加させることに有効であることがわかった。さらに、実際の解析への影響を確認するために、スゲアマモ、タチアマモ、オオアマモについて予備的に STRUCTURE 解析を行ったところ、最大尤度を示す K 値も増加し、より詳細な解析が可能になることが示唆された。

集団レベルで解析を行ったアマモに関しては、津波前後の三陸のアマモ集団の遺伝的多様性 ( $H_e$ ) と集団間の遺伝的類似度 ( $F_{ST}$ ) を算出した。その結果、同地点の津波前後における明確な差異は検出されないというマイクロサテライトによる解析と同様な結果が得られた。

STRUCTURE 解析の結果から、海草 3 種の地理的な分化を予察的に考察した。現時点では、3 種いずれもサンプル数が少ないため、正確な議論は今後の解析後に行いたい。地理的距離よりも海流や海域などの地理的要素と遺伝的構造の間に関係性を見いだすことができた。スゲアマモでは、大槌湾箱崎および若狭湾舞鶴で集団の独自性が見られる一方で、種内の大スケールの分布では、日本海から津軽海峡、三陸、北海道南部までの遺伝的グループの存在が示唆された。タチアマモでは、日本海から津軽海峡、三陸、三陸の一部～東京湾で、遺伝的グループが存在する可能性が示された。オオアマモでは、北海道日本海側から陸奥湾、津軽海峡から三陸、北海道の南部～東部、という構造が示唆された。

今後、ここで得られた解析条件を用いて、震災前後も含め、サンプル数を増やした解析を行うことで、各種の国内での遺伝的構造が明らかになるとともに、震災における遺

伝的構造への影響も明らかになることが期待できる。

## (7) 引用文献

- 環境省自然環境局生物多様性センター (2019) 平成 30 年度モニタリングサイト 1000 アマモ場・藻場調査報告書, 環境省自然環境局生物多様性センター
- 仲岡雅裕・玉置仁・村岡大祐・徳岡誠人・小松輝久・田中法生 (2017) 三陸沿岸域におけるアマモ場の東日本大震災前後の変化. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 83: 659-663.
- Whanpetch, N., Nakaoka, M., Mukai, H., Suzuki, T., Nojima, S., Kawai, T. and Aryuthaka, C. (2010) Temporal changes in benthic communities of seagrass beds impacted by a tsunami in the Andaman Sea, Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87: 246-252.

### 3-2-11 グループ 11 (岩礁海岸の底生動物群集)

地震直前の 9 年間に群集動態、遷移過程および幼生加入量が継続調査された複数の岩礁海岸において、地震後に同一地点で同一の調査を行い、得られた地震前後のデータを解析することで、1. 地震による岩礁潮間帯生物群集の変化とその後の回復過程、2. 地震による個体群動態の変化、3. 地震後の小規模攪乱後からの回復過程の変化を明らかにした。

#### (1) 岩礁潮間帯生物群集の変化とその後の回復過程

津波のインパクトの定量評価: 「自然災害の物理的強度」と「自然災害による個体群減少率」をともに再起時間に変換し、自然災害の生物個体群へのインパクトの大きさがどのように決定されているかを包括的に評価する新手法を提案し、東日本大震災の際の津波が岩礁生物の個体群に及ぼした被害の大きさを、様々な生物における気象災害(嵐, 低温, 干ばつ)の大きさと比較した (Iwasaki et al. 2016, Iwasaki and Noda 2018)。その結果、災害の種類と関係なく災害の強度が強くなるほど生物がこうむる被害は大きくなり、被害のばらつきも大きくなることが明らかになった。また、爆, 気圧などの気象災害と比べて津波の強度は極めて大きいにも関わらず、これらの気象災害と比べて岩礁の生物における津波の被害は小さかったことが明らかになった。

地震後の固着生物の帯状分布の長期変化: 8 種の固着生物を対象に潮間帯全域での帯状分布の地震後の変化を記述した (Noda et al. 2016a, b, 野田・岩崎 2017, Kanamori

et al. 2020)。さらにその種差の原因と帰結を明らかにするために、それぞれの種において帯状分布とその回復度（地震前の推定される帯状分布との一致度）の経年変化、遷移ニッチの違いが帯状分布の回復度に及ぼす影響、固着動物と海藻の間で帯状分布の回復度の違い、を評価した。その結果、固着生物8種の地震後の帯状分布の変化の仕方は種によってさまざまであり、帯状分布の回復度は、遷移前期種ほど早い傾向があることが認められた。また、いずれの年においても固着動物と海藻の間で帯状分布の回復度の平均値には有意な違いは認められなかったものの、固着動物では種間で帯状分布の回復度が大きくばらつき、2019年の時点でもムラサキインコガイではそのアバンダンスは地震前より顕著に少なく、マガキではその逆だった。以上の結果は、潮間帯全域で見した場合、地震後8年間経っても岩礁潮間帯の固着生物群集は未だ回復しておらず、それが元にもどるにはさらに長い時間を要することが示唆された。

## (2) 固着生物の個体群動態の変化

岩礁潮間帯固着生物の最優占種であるイワフジツボを対象に（1）幼生加入の空間パターン（2）湾単位及び三湾全域における加入量と底生個体群サイズ（3）岩礁間の個体群成長率の違いの決定要因としての幼生加入の重要性、について地震前後の変化を検討した（Noda et al. 2016c, Noda et al. 2017, 野田・岩崎 2017）。その結果、幼生の加入パターンには地震前と比べて顕著な変化は見られなかったが、湾単位及び三湾全域での加入量は地震後（特に2012年）に増加し、その変化は底生個体群サイズの増大に伴って生じていたことが明らかになった。また岩礁単位での個体群成長率は、地震前には加入量に依存していなかったのに対し、地震後（特に2012年）には強く依存するように変化したことが判明した。

## (3) 地震後の小規模攪乱後からの回復過程の変化

生物群集の動態は、生起頻度や空間範囲が異なる様々な攪乱に複合的に影響されている。岩礁潮間帯では波浪によって生じた小規模な裸地（攪乱パッチ）における遷移が種多様性の維持に重要な役割を果たすが、この遷移はより広範囲で作用する巨大地震によって変化するかもしれない。第一に、メタ群集スケールで多くの種が減少すると考えられることから、攪乱パッチ内でも群集の種組成は地震前後で変化し（予測①）、 $\alpha$ 多様性は地震前より低くなるだろう（予測②）。第二に、地震直後はメタ群集スケールで遷移初期種の割合が上昇すると考えられるため、攪乱パッチでも遷移初期種の割合が増加し（予測③）、遷移の速度（種組成の時間変化量）は遅くなるだろう（予測④）。第三に、地震によって無機環境や種プールの組成の空間変異性も増大すると考えられることか

ら、攪乱パッチでも種組成の空間変異性が大きくなるだろう（予測⑤）。そこで三陸沿岸で東北地方太平洋沖地震前後に攪乱パッチを模倣した人工裸地を作成し、以上の予測を検証した。人工裸地の種組成は地震前後で有意に異なり、地震後には $\alpha$ 多様性は上昇した。また群集構造の空間変異性は地震後に大きくなった。これらの結果は上述の予測①と⑤と一致する。一方、予測②とは異なり、 $\alpha$ 多様性は地震後に上昇したが、これは地震によりメタ群集スケールで大きく個体群サイズが縮小したのはごく一部の種に限られていたことで説明できるかもしれない。また、予測③と④に反して、初期種の割合が増加せず遷移の速度も遅くならなかった。以上の結果は東北地方太平洋沖地震は固着生物のメタ群集の組成とその空間変異性を変化させることで、局所攪乱後の遷移における種組成、 $\alpha$ 及び $\beta$ 多様性を変化させたことを示唆している。

#### (4) 引用文献

- Noda, T., A. Iwasaki and K. Fukaya (2016a) Recovery of rocky intertidal zonation: two years after the 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of the Marine Biological Association of UK*, 96: 1549-1555.
- Noda, T., A. Iwasaki and K. Fukaya (2016b) Rocky intertidal zonation: impacts and recovery from the megaquake. In Nakashizuka, T. and J. Urabe (eds) *Ecological impacts of tsunamis on coastal ecosystems: lessons from the Great East Japan Earthquake*, Ecological research monographs, pp.25-34. Springer, Tokyo
- Noda, T., M. Sakaguchi, A. Iwasaki and K. Fukaya (2016c) Rocky intertidal barnacle population dynamics: impacts and recovery from the 2011 Tohoku Megaquake. In Nakashizuka, T. and J. Urabe (eds), *Ecological impacts of tsunamis on coastal ecosystems: lessons from the Great East Japan Earthquake*, Ecological research monographs, pp.47-58. Springer, Tokyo
- Iwasaki, A., K. Fukaya and T. Noda (2016) Quantitative evaluation of impact of tsunami on natural community: a case study of rocky intertidal community for the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami. In Nakashizuka, T. and J. Urabe (eds) *Ecological impacts of tsunamis on coastal ecosystems: lessons from the Great East Japan Earthquake*, Ecological research monographs, pp. 35-46. Springer, Tokyo
- 野田隆史・岩崎藍子 (2017) 岩礁潮間帯のベントスに対する地震と津波の影響. *日本水産学会誌*, 83: 677-680.
- Noda, T., M. Sakaguchi, A. Iwasaki and K. Fukaya (2017) Influence of the 2011 Tohoku Earthquake on population dynamics of a rocky intertidal barnacle: cause and consequence of alternation in larval recruitment. *Coastal Marine Science*, 40: 35-43.

Iwasaki, A. and T. Noda (2018) A framework for quantifying the relationship between intensity and severity of impact of disturbance across types of events and species. *Scientific Reports*, 8: e795.

Kanamori, Y., A. Iwasaki, S. Oda and T. Noda (2020) Interspecific difference in the recovery of rocky intertidal zonation after the 2011 Great East Japan Earthquake. *Ecological Research*, 35: 95–105.

### 3-2-12 グループ 12 (アマモ場の魚類群集)

東北太平洋沿岸域のアマモ場において 2009 年以降継続している魚類群集調査により、大槌湾周辺のアマモ場における単位面積あたりの魚類の種多様性と現存量は、全国 26 ヶ所のアマモ場のなかでトップレベルであることが明らかとなっている。しかしながら、2011 年 3 月の津波により、東北太平洋沿岸域は大きな影響を受けた。浅海域に生息する魚類は大きな環境変動にさらされたと想定される。そこで、岩手県の大槌湾根浜、船越湾吉里吉里、および宮城県の万石浦において、津波による被災以前から実施している物理・生物調査を同じ手法で継続することにより、津波によるアマモ場の植生、生物群集への影響および攪乱を受けた後の遷移過程を明らかにした。各調査地点におけるアマモの繁茂期に、物理環境の測定（水温、塩分）、アマモ繁茂状況調査（株密度、葉長）、プランクトン、ベントス（表在性動物・埋在性動物）および魚類の定量採集を実施した。魚類の定量調査は、10 m 四方（面積 100 m<sup>2</sup>）のエリア内の魚類を巻網（目合い 5 mm）を用いて採集することにより実施し（4 試行）、採集された魚類は氷蔵して実験室に持ち帰ったのちに、全長と湿重量を測定した。さらに、東北太平洋沿岸において、津波による影響の程度が異なった複数のサイト（岩手県、宮城県、福島県）と、津波による攪乱の影響が異なった国内他地域のサイト（オホーツク海側、日本海側、瀬戸内海沿岸等）からもデータや情報を収集し、アマモ場の植生および魚類群集の時間変化の解析と併せて、津波による攪乱の程度が異なる藻場の間での空間比較を実施した。

#### (1) 大槌湾根浜

大槌湾根浜において 2010 年～2018 年のアマモ繁茂期（7～8 月）に毎年 1 回実施された調査で得られた 9 年分のデータを解析し、津波以降の魚種構成の時間変化の把握と、それに影響を及ぼした要因の考察を行った。なお本調査地点での津波による攪乱の影響は、これまでに調査対象としてきた東北太平洋岸の岩手（宮古湾、船越湾、大槌湾）、宮城（万石浦）、福島（松川浦）のサイトのなかでは中程度であり、近年アマモの繁茂が比較的良好に進行している場所として位置づけられる。

調査地点で観測された 2018 年の水温は 20.2°C、塩分は 31.0 であった。アマモの平均（±標準偏差）株密度は 45.0（±30.0）株/m<sup>2</sup>、葉長は 1041.0（±300.1）mm であった。アマモの株密度は津波後の 2011～2016 年の間は、2013 年（22.0 株/m<sup>2</sup>）を除けば 1.0～10.0 株/m<sup>2</sup> であったが、2017 年（34.0 株/m<sup>2</sup>）と 2018 年（45.0 株/m<sup>2</sup>）には 2 年連続して高い水準となり、津波前（2010 年）の株密度（35.0/m<sup>2</sup>）に匹敵するものとなった。

魚類採集により、合計 164 個体（15 種）が得られた。魚類全体の単位面積あたり個体数は 41.0 尾（±22.6）/100 m<sup>2</sup>、単位面積当たり湿重量は 112.4 g（±21.4）/100 m<sup>2</sup> であった。魚類の種数、多様度指数（Shannon - Wiener の多様度指数 H'）はともにここ数年増大傾向にあり、アマモ場の植生の回復がそこに生息する魚類群集にも影響を与えている可能性が高い。各年に採集された魚類の個体数をもとに、各年の魚類群集を非計量多次元尺度法（Non-metric Multidimensional Scaling: nMDS）により解析した結果、2017 年および 2018 年の魚類群集は津波直後の 2011 年よりも津波前の 2010 年より近い群集構成であったことが示された。

以上の結果から、2011 年に発生した津波による海底の攪乱と堆積によって大槌湾根浜のアマモ場の植生が大きく変化したことを受け、2011 年とその直後には魚類群集構造にも大きな変化が生じていたが、2017 年および 2018 年には連続してアマモ場の株密度に回復傾向が認められ、魚類群集の種数、種の多様度を増大させつつあるとともに、津波による攪乱から 6～7 年が経過した 2017 年および 2018 年夏期においては、魚類群集の構成が津波前のものに近づいた可能性が高いと考えられた。

## (2) 船越湾吉里吉里

船越湾吉里吉里において 2009～2017 年のアマモ繁茂期（7～8 月）に毎年 1 回行われた調査で得られた 9 年分のデータを解析し、津波以降の優占魚種の種構成の遷移過程の把握と、それに影響を及ぼした要因の考察を行った。なお、本調査地点での津波による攪乱の影響は、これまでに調査対象としてきた東北太平洋岸の岩手（宮古湾、船越湾、大槌湾）、宮城（万石浦）、福島（松川浦）のサイトのなかでは比較的大きかった場所として位置づけられる。

調査地点のアマモ場における 2017 年の水温は 21.8°C、塩分は 31.1 であった。アマモの平均（±標準偏差）株密度は 29.0（±21.8）/m<sup>2</sup>、葉長は 583.8（±96.0）mm であった。アマモの株密度は、津波後の 2011～2016 年（平均株密度 0～2.8/m<sup>2</sup>）に比べて 2017 年には増加し、津波前（2009～2010 年）の株密度（41.0～49.0/m<sup>2</sup>）のレベルに近づいた。魚類採集により、合計 474 個体（26 種）が得られた。魚類全体の単位面積あたり個体数は 119.0 尾（±153.7）/100 m<sup>2</sup>、単位面積当たり湿重量は 327.2 g（±373.2）/100 m<sup>2</sup> であった。単位面積あたり個体数、単位面積当たり湿重量はともにここ数年増

加傾向にあり、アマモ場の植生の回復がそこに生息する魚類にも影響を与えている可能性が強い。

以上の結果から、2011年に発生した津波による海底の攪乱と堆積によって船越湾吉里吉里のアマモ場の植生が大きく変化したことを受けて、2011年とその直後には魚類群集構造にも大きな変化が生じていたが、2017年にはこの傾向がさらに弱まり、アマモ場を利用する魚類が増加し始めている可能性が高いと考えられる。

### (3) 万石浦西岸

万石浦西岸において2009年～2015年のアマモ繁茂期(6～8月)に毎年1回実施された調査で得られた7年分のデータを解析し、津波以降の優占魚種の種構成の遷移過程の把握と、それに影響を及ぼした要因の考察を行った。なお、本調査地点は、津波による攪乱の影響がこれまでに調査対象としてきた東北太平洋岸の岩手(宮古湾、船越湾、大槌湾)、宮城(万石浦)、福島(松川浦)のサイトのなかでは比較的小さかった場所として位置づけられている(Shoji & Morimoto 2016)。

調査地点のアマモ場における平均(±標準偏差)株密度は52.0(±36.8)/m<sup>2</sup>、アマモ葉長は959.7(±128.4)mmであった。株密度は2012年以降増加傾向、葉長は2011年以降最長となった。アマモ葉長には年によるばらつきが大きかったものの、株密度は近年回復傾向にあると考えられる。

魚類採集により、合計293個体(8科10種)が得られた。魚類全体の単位面積あたり個体数は73.2尾/100m<sup>2</sup>、単位面積当たり湿重量は112.5g/100m<sup>2</sup>であった。単位面積あたり個体数は2012年以降増加傾向、単位面積当たり湿重量は2014年(299.9g/100m<sup>2</sup>)に比べて低下し、2010～2012年(95.3～136.1g/100m<sup>2</sup>)と同水準となった。

採集された魚類のうち、個体数ではビリンゴ、アサヒアナハゼ、オキタナゴ、クロダイ、ヨウジウオの順に多く、これら上位3種で全体の94.0%、上位5種で全体の96.4%を占めた。湿重量ではオキタナゴ、アサヒアナハゼ、ビリンゴ、マハゼ、ギンポの順に多く、これら上位3種で全体の77.8%、上位5種で全体の94.7%を占めた。前年度(2014年度)の調査時には1魚種(マハゼ)が湿重量において全体の60%以上を占めたが、今年度は単一種による極端な優占傾向が解消され、上位種による累積優占比率は2013年度以前に近い状況となった。

以上の結果から、2011年に発生した津波による海底の攪乱と堆積によってアマモ場の植生が大きく変化したことを受けて、2011～2014年には魚類群集構造にも大きな変化が生じていたが、2015年にはこの傾向が弱まり、津波の影響を受ける以前の魚類群集に近づいたと考えられる。



#### (4) 引用文献

Shoji, J. and M. Morimoto (2016) Changes in fish community in seagrass beds in Mangokura Bay from 2009 to 2014, the period before and after the tsunami following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku. *Journal of Oceanography*, 72: 91-98.

#### 3-2-13 グループ 13 (石巻沿岸の藻場・干潟の環境・生物群集)

2011年3月11日の東北地方太平洋沖を震源とする大地震と津波により攪乱を受けた宮城県石巻地域の藻場と干潟生態系のその後の変化を明らかにすることを目的として、調査・研究を行った。

調査地点として、地震と津波の来襲を受けた石巻地域沿岸の藻場と干潟を対象とし、牡鹿半島東岸の2地点(岩礁性藻場、アマモ類藻場)と松島湾東部海域の1地点(自然干潟)を選定した。なお松島湾東部海域に関しては、震災により低下した地盤高の復旧のため、2018年3月に人工干潟が造成されたが、工事後にはその後背に位置する本研究対象となる自然干潟において地形の変化が観察された。そこでこれらの環境変化が後背にある自然干潟のアサリの生育に及ぼした影響についても考察を加えた。本報では、震災前後における岩礁性藻場(アラメ場)、アマモ類藻場、干潟生態系の変化、ならびに震災復旧のために行われた沿岸工事(堤防建設や干潟造成)後の自然干潟で観察されたアサリの生育状況の差異と震災後に増加が見られた泥分の起源に関する検討結果を報告する。またこれら調査データの一部については、水産庁事業などの一環として実施されたことを追記する。

##### (1) 牡鹿半島東岸の岩礁性藻場(アラメ場)

本地先では震災により地盤高が低下し、また底質直上の水中光量の減少が確認された(Tamaki and Muraoka 2017)。震災直後(2011年7月)においては、アラメ成体の分布域に大きなダメージは認められなかったが、キタムラサキウニなどのウニ類の密度については大幅に減少しており、津波によるウニ類の流出が推定された(玉置・村岡 2011, 河村ら 2017, Muraoka et al. 2017)。またウニ類の減少(摂食圧の軽減)により、これまでアラメの生育が見られなかった沖側の深所(無節サンゴモ帯)においても、多くのアラメ幼体の出現が観測された。震災から2年10ヵ月後(2014年1月)には、これらの幼体が成長・生残し、震災前に見られた岸側の群落に加えて、沖側でも濃密なアラメの海中林が形成された(Muraoka et al. 2017, Tamaki and Muraoka 2017)。このこ

とから、震災後には底質直上の水中光量の低下が見られたが、これらがアラメに及ぼした影響に関しては小さいことが推定された。しかし、震災から4年後（2015年）を境にして、津波により減少していたウニ類（殻径 > 10mm）が増加傾向へと転じ、その摂食により、沖側のアラメ場が消失し、また岸側の群落も減少し始めた（Tamaki and Muraoka 2017）。2018年11月時点の群落中央を通る測線では、群落が最も繁茂していた2014年1月時に比べて、50m程度（水深差で約3m）のアラメ場の後退が認められた。また2019年時の調査では、藻場内部へのウニ類の侵入とアラメ群落のさらなる縮小が観測された。

これまでの結果を整理すると、地震と津波直後のアラメ群落へのダメージに関しては限定的となるが、震災から4年後には津波により流出していたウニ類が増加傾向へと転じ、それ以降、震災によるアラメ場に対するネガティブな影響が顕在化し始めたことが明らかとなった（玉置・村岡 2020）。今後もモニタリングによる生態系監視を継続してアラメ群落の消長を明らかにするとともに、震災前の岸側ではあまり見られなかったウニ類の密度増加がなぜ起こったのかについても検討を進めたいと考えている。

## (2) 牡鹿半島東岸にあるアマモ類藻場

地震とそれに伴い発生した津波により草体が流出し、湾内のアマモとタチアマモ群落が大幅に減少していた（玉置・村岡 2013, 仲岡ら 2017）。震災前と震災後（2012年7月）とのアマモ類の分布域を比較したところ、地震と津波によりその面積が9割以上減少したことが明らかとなった。次に震災前（2004年6月）から2018年11月にかけて、400mの2測線（ML1 & ML2）上に出現したアマモとタチアマモの株密度のデータを用いて、2 way ANOVA の解析をしたところ、両ラインともに海草種ごとに時間に対する密度変化が有意に異なり（ $p < 0.1$ ）、つまりは震災後のアマモとタチアマモの回復状況に違いが見られたことが分かった。そこで Dunnett による多重比較を行ったところ、ML1においては2017年8月に、ML2では2015年8月以降において、タチアマモの株密度が増加して震災前と同程度になったことが示された（ $p > 0.1$ ）。一方、アマモに関しては、全ての時期において震災前に比べて有意に減少した状態であった（ $p < 0.1$ ）。以上のことから、ML1では震災から約6.5年、ML2では4.5年程度の経過で、複数年にわたりタチアマモの密度分布が震災前の水準まで回復したことが明らかとなった。

そこでなぜ震災後のアマモとタチアマモの株密度の増加傾向に差異が見られたのかを考えるにあたり、両海草種の回復状況が異なる代表的な場所としてML2-80m地点を選定し、その原因を検討した。本地点については過去にアマモが繁茂していたが、震災後にはタチアマモの優占した場所となる。震災後には地盤高の低下等の理由によって水中光量が減っており、光補償点から見積もられたアマモの生育に必要な日積算光量を下回る頻度が、震災前に比べて3倍程度増加したことが明らかとなった。以上のことから、本地点の残存したアマモが増加しきれない原因として、震災後の水中光量減少の影響が

推定された（玉置・村岡 2016）。次にタチアマモに関して検討を進めたところ、その生育下限水深付近で計測された日積算光量が震災後の ML2-80m 地点の光量に比べて有意に低いことが分かった ( $p < 0.05$ )。このことからタチアマモについては、低光量下でも生育しうることが示唆され、震災後の水中光量減少下においても、アマモに比べてその後の回復が有利となったことが推察された。

これまでの調査により、複数年にわたりタチアマモの密度が震災前の水準を維持したことから、今後、アマモ類藻場の分布域を推定し、震災前に比べてどの程度、面積的に回復したのかを明らかにしたい。

### (3) 松島湾東部海域にある干潟

2012 年 8 月には底質中のシルト分と強熱減量が減少しており、震災前には泥場であった干潟（湾奥部）が砂泥質の様子を呈していた。しかし周囲で始まった堤防建設の翌々年にあたる 2014 年 8 月以降には、底質中のシルト分と強熱減量が再び増加し、それに伴って底質の還元化と震災後に一旦減少していた硫化物濃度の上昇が認められるようになった。隣接する自然干潟と併せて検討したところ、2014 年以降に観測されたこれら底質の泥化と還元化が、アサリ浮遊幼生の着底阻害、ならびに着底後の翌年、もしくはそれ以降のアサリの生残を制限していることが推定された。なおアサリを含む他のベントス相の個体密度に関しても、震災後から 2013 年 8 月時までは微増となるが、2014 年以降については減少傾向を示した。

湾中央部の自然干潟では、その沖合で 2018 年の冬季に砂質干潟が造成された後、人工干潟からの土砂が流入したせいか、0.1m 程度の地盤高の上昇といった地形の変化が観察された。そこで当該地点において 2017 年 6 月から実験をしている移植アサリを用いて、その生育に関する年次比較を行ったところ、造成後に自然干潟に移植したアサリのへい死率の低下や成長速度の増加が確認され、沖合で行われた工事前に比べてアサリの生育状況に改善が見られた。沿岸工事後にその後背に位置する本地点では、底質中のシルト分と硫化物濃度が低下し、また間隙水中の溶存酸素濃度については増加していた。沖合の工事により造成された砂質干潟から流出した土砂由来と考えられる地盤高の増加がみられたことから、これらの覆砂によるシルト分低下の可能性が考えられた。以上のことから、このシルト分の低下に伴う硫化物の減少と間隙水中の溶存酸素濃度の増加により、アサリの生育が良好になったものと推察された。ただし 2019 年 2 月時には、人工干潟から伸びた砂嘴により、湾口部との海水流動が遮断され始めたせいか、自然干潟のシルト分が再び 2017 年時の水準、もしくはそれ以上に増加し始めたことを追記する。

このように底質中のシルト分増減を起因とした環境変動がアサリの生育を制限、もしくは促進したことから、このシルト分の由来を明らかにするために、2015 年から 2017

年にかけて採取された試料を用いて、金属組成比分析とクラスター分析による底質の起源解析を行った(鈴木ら 2019)。2015年には、堤防建設の際に設置された湾奥部の排水口周辺、ならびに湾北西に位置する堤防工事完了後の現場底質から採取されたシルト分の金属組成比が、湾奥にある本干潟の複数の場所の泥分と類似していた。このことから、岸側で行われていた堤防建設に伴う微細な土砂の干潟への一部流入が推察された。一方2017年については、干潟と湾口部潮下帯に設置したセジメントトラップから採取された沈降物(シルト分)と似た底質が、湾中央に位置する干潟の南西側に多く認められ、これらの場所の泥分に関しては湾口・外から流入してきた沈降物による影響が示唆された。さらに湾口部で行われている堤防工事の現場から採取された底質とも類似していたことから、工事現場からの微細な土砂も混じって干潟に流入している可能性が考えられた。今後、未計測分の試料の分析を進めるとともに、2018年に沖合に造成された人工干潟の影響についても検討していきたい。

#### (4) 引用文献

- 河村知彦・高見秀輝・早川淳・村岡大祐・玉置仁(2017) 三陸沿岸の岩礁藻場における地震と津波の影響およびその後の変化. 日本水産学会誌, 83: 672-676.
- 鈴木まゆみ・小瀬知洋・大野正貴・玉置仁・川田邦明(2019) 東北沖津波によるかく乱を受けた干潟の回復過程に及ぼす防潮堤工事の影響. 水環境学会誌, 42: 163-169.
- 玉置仁・村岡大祐(2011) 地震とそれにともない発生した津波が藻場・干潟生態系に及ぼした影響. 水環境学会誌, 34: 400-404.
- 玉置仁・村岡大祐(2013) 東日本大震災による藻場・干潟生態系の攪乱とその後の回復過程. 環境技術, 42: 558-563.
- 玉置仁・村岡大祐(2016) 「被災地からの発信」東日本大震災による藻場・干潟生態系の攪乱とその後の回復過程. 土木学会誌, 101: 54-57.
- 玉置仁・村岡大祐(2020) 東日本大震災による攪乱を受けた岩礁性藻場生態系(アラメ場)のその後の変化. 用水と廃水, 62: 64-68.
- 仲岡雅裕・玉置仁・村岡大祐・徳岡誠人・小松輝久・田中法生(2017) 三陸沿岸域におけるアマモ場の東日本大震災前後の変化. 日本水産学会誌, 83: 659-663.
- Muraoka, D., H. Tamaki, H. Takami, Y. Kurita and T. Kawamura (2017) Effects of the 2011 Great East Japan Earthquake and tsunami on two kelp bed communities on the Sanriku coast. Fisheries Oceanography, 26: 128-140.
- Tamaki, H. and D. Muraoka (2017) Impact of the Great East Japan Earthquake on the Seaweed (*Eisenia bicyclis*) Habitat at Oshika Peninsula, Miyagi, Japan. In V.Santiago-Fandiño et al. (eds), The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and

Restoration, 249-264, Springer.

### 3-2-14 グループ 14 (干潟域の二枚貝および外来巻貝の個体群動態)

東北地方太平洋沖地震・津波によって浅海に生息する生物は大きな攪乱を受けた(大越, 2012, Okoshi, 2015)。本研究では、干潟域に生息している生物(特に貝類)の地震後の生息状況や個体群動態の把握を行うとともに、宮城・福島のアサリ生産に多大なダメージを与え続けてきた外来生物の巻貝サキグロタマツメタ(大越, 2004, 2011, Ohtsuki et. al., 2016, Suzuki and Okoshi, 2018)の地震後の生息状況やアサリ他貝類の捕食の現状、再生産の有無等について明らかにすることを目的とした。

2011年5月～2019年11月まで一部の年は冬季を除き、月1回計8回から12回、宮城県と福島県あわせて3か所で定期調査を行った。コドラートを用いた定量採集と徒手採集などによる定性採集を合わせて行い、有用水産資源であるアサリやアサリを捕食する外来生物のサキグロタマツメタ(Suzuki and Okoshi, 2018)、レッドデータブックに掲載されている貝類などの個体群動態を把握した(Kanaya et. al., 2017, 大越, 2012)。場所別に約10種類の貝類の個体群変動のデータが得られた(大越, 2012, 2013, 大越他, 2014, 大越・鈴木, 2014)。また、データロガー設置による水温、塩分、DO等の環境データ、底質の粒度組成や一部の化学物質(Onozato et. al., 2016, 2018)のデータも取得した。データは宮城県石巻市万石浦、宮城県松島町双観山、福島県相馬市松川浦の調査場所ごとにまとめるとともに、東北地方太平洋沖地震の影響を時系列に、(1)地震と液状化、(2)津波、(3)地盤沈下と地盤隆起の3つに分けて検討し、さらに地震後の復興プロセスで造られた人工干潟や防潮堤などの(4)人工構造物の沿岸に生息する生物への影響についても検討した(Okoshi, 2016, 大越, 2019, Okoshi, 2020)。

(4)ではとくに宮城県石巻市万石浦に2013年から2016年にかけて山砂を客土して造成された人工潮間帯(人工干潟)におけるアサリの個体群動態を検討し、JF宮城石巻湾支所と共同で環境管理と資源管理をすすめた。その結果、地震後初となる組合員によるアサリ漁を2017年に実現し、2018年と2019年を含め、人為的管理を進めながら3年連続でアサリの採捕を実現した(大越, 2018)。

以下、液状化や津波、地盤変化などのイベントを含め場所別に結果を示す。

#### (1) 宮城県万石浦(大浜旧潮干狩り場駐車場地先および人工干潟)

万石浦大浜では、2011年5月-2019年11月までに計46種の貝類が確認された。万石浦は地震後約80cm地盤が沈下しほとんどの場所で干潮時にも干出することがなくなった。その後は年間数cmずつ隆起が進み、2019年2月までには約50cm隆起した。

地盤沈下後 8 年間で、地震直後には一気に陸から潮間帯になった場所は徐々に陸化が進み、潮下帯の一部は潮間帯にもどり、調査場所の大浜旧潮干狩り場駐車場地先では、最大干潮時は干潟が出現するようになった。調査地の大浜では地震後繁殖したアマモ *Zostera marina* 群落が増大し、地震前は干出していた場所の大部分を覆い、その周辺ではホトトギスガイ *Musculista senhousia* が定期的に増加するサイクルができていたが、2018 年秋には増大していたアマモ群落が大きく減少した。大浜の旧潮干狩り場の第一駐車場地先では、2012 年 4 月、2015 年 4 月に続き、2017 年 4 月にはホトトギスガイが爆発的に増加したが、2018 年、2019 年には増加はみられなかった。ホトトギスガイの増加に伴い 2015 年 4 月を境に優占種であるアサリ *Ruditapes philippinarum* が急激に減少し、その後も顕著な個体数の増加がみられることはなかったが、2018 年 3 月から 4 月には、アサリの稚貝が確認され、2 年ぶりに個体数が 1 平方メートルあたり 10 個体を越えた。しかし、翌月の 6 月には調査を行って以来初めて、コドラート調査区からはアサリを確認することができなかった。

アサリを含め、多くの種がホトトギスガイの増加後に減少している中、2013 年から増加が見られたヒメシラトリ *Macoma incongrua* は、ホトトギスガイの増減に関わらず毎年個体数を増加させ、2017 年にはホトトギスガイが増加したのと同時期に個体数密度が過去最高となったが、2018 年には減少に転じた。ヒメシラトリは、富栄養から過栄養の水域、貧酸素環境の指標種であり、ホトトギスガイとともに生息する。第一駐車場地先に設置したデータロガーのデータ解析から、夏期に溶存酸素量が 2 mg/l を下回るのが確認されている。ヒメシラトリでは、2013 年 8 月から毎年大量の稚貝の新規加入が確認されており、個体数密度が増加していることから、貧酸素化が度々起こる環境でも優占種となっていた。前年増加していたオキシジミ *Cyclina sinensis* も個体数の減少がみられ、主要な砂潜性の二枚貝類は前年より減少した。一方、2018 年に見られた特徴のひとつに、コメツブガイ科複数種 *Retusa insignis* spp. とカミスジカイコガイ *Cylichnatys angusta* の急激な増加があった。両種はほぼ同じサイクルで増加と減少を繰り返しており、底質環境の変化がその一因であると推定された。2019 年にもこの傾向は継続した。カワアイ *Cerithidea djadjariensis* は分布域を徐々に広げており増加傾向にある。万石浦のカワアイは外来個体を起源としておりと考えられており、地震前の 2004 年ごろから大浜で少数生息が確認されていたがその後分布域を広げ、個体数も増加している。サキグロタマツメタはアマモの周辺や岸側の干潮時干出域で少数匍匐しているのが確認できる程度に個体数を減じている。

貝類群集の遷移を把握し、各調査地点間の群集の特徴を比較するために、定量調査で得られた各月の個体数データから Bray - Curtis 類似度指数を求め、クラスター解析を行った。また、非計量的多次元尺度法 (nMDS) によって各月の群集の類似度を点間の距離で表した。その結果、万石浦大浜では地震後から群集構造のグループの推移が他の地点よりも激しく、2017 年から 2018 年にかけてもグループが変化していたことから、地

盤沈下やその後継続する隆起による環境変化の個体群動態に対する影響は津波の一時的な影響よりも大きく複雑で、長期に渡ることが推察された。

一方、2013年から新たに造成した人工干潟では造成した年に加入したアサリは個体数が多く1平方メートルあたり数千個体に及ぶ場所もあった。それらは2015年までは順調に成長していたが、2016年以降成長が鈍り、2014年および2015年の稚貝の加入も少なかった。そこで、出荷サイズである殻長30 mm以上個体の生息量を算出し、そのデータをもとに2017年に漁協組合員による約10トンの採捕と出荷が地震後はじめて行われた。さらに2018年には25トンの採捕と出荷が行われた(大越, 2018)。2017年と2018年に開口した2013年造成区のアサリ資源量は減少し、一方、2015年および2016年造成区へのアサリの新規加入は2018年まで継続して少ない。また、2019年は貝毒が発生して予定していたアサリの開口がわずか1日となり、約2トンの漁獲量に留まった。また、秋の台風の影響で干潟表層にはシルト層が被覆した。今後のアサリ漁継続には、人工干潟の環境管理と資源管理が重要である。人工干潟には造成の次の年からサキグロタマツメタの生息が確認され、漁協組合員と東邦大グループによる成貝と卵塊の駆除が継続的に行われた。

## (2) 宮城県松島湾

調査地の双観山では、2011年5月から2019年11月までに計46種の貝類が確認された。その中で出現率80%以上の種は、アサリ、アラムシロ *Nassarius festivus*、イソシジミ *Nuttallia japonica*、カガミガイ *Phacosoma japonicum*、ヒメシラトリ、ホトトギスガイ、マテガイ *Solen strictus*、ユウシオガイ *Moerella rutila*、の8種であった。双観山では、地震以降優占種であるアサリの減少が進んだ。この要因の一つとして、潮干狩りによる人為的影響が考えられた。宮城県内の潮干狩り場が地震後全て閉鎖になった影響で、岸からエントリーしやすい双観山は地震直後でも春先から潮干狩り客が訪れるようになった。それにより、大きなアサリが減少し、新規加入の個体数も減ったものと考えられた。5年目以降は再びアサリの増加が見られ、砂質底を好むマテガイや、宮城県で準絶滅危惧種に指定されており、水質汚濁に弱いユウシオガイの増加も見られたことから、底質環境が良くなっていることが示唆された。しかし、6年目の2017年にはほとんどの種の個体数が減少した。この原因として、6年目の5月と8月にホトトギスガイの増加が見られ、少なくとも4か月間はマットもみられたことが考えられた。これらのことから、2017年の11月には出現頻度の高かったユウシオガイなどが見られなくなり、群集構造が変化した。クラスター解析の結果から、グループの多くが、アサリが優占していたグループであったのに対して、近年はイソシジミが優占するグループへの群集構造の変化がみられるようになってきた。双観山ではアサリもそれを捕食するサキグロタマツメタもほとんど見られなくなった。地震・津波後の生物の激減から「回復」

してきている場所が多い中で、特異な場所となっている。地盤沈下は軽微であり、その後毎年の隆起により 2019 年には地盤が地震前とほとんど変わりが無いところまでもどってきている。干潮時には干潟も広がっているが、地震前から地震後 2 年間のアサリが優占する群集とは異なった群集構造に変化している。

### (3) 福島県松川浦

松川浦宇多川河口では、2011 年 5 月 - 2019 年 11 月までに計 51 種の貝類が確認された。松川浦は、周囲に 4 本の流入河川が存在し、海水と淡水が入り混じる汽水性塩湖である。人工干潟を除く万石浦と双観山のアサリの個体数密度が激減しているのに対して、宇多川河口では安定して 1 平方メートルあたり数 100 個体を最大に増減を繰り返していた。例年、冬になると個体数が減少する傾向にあったが、2018 年には 11 月に個体数が最大となった。東北のアサリの産卵期は年 1 回の場合と春と秋の 2 回の場合があり、2018 年は春に新規加入した個体が減少することなく秋の新規加入が起こったため、安定した個体数の維持がみられたと考えられる。一方、河口域であることから、流入河川のほとんどない万石浦や双観山と異なり、数年ごとの洪水の影響が生息する生物に大きな影響をもたらしていた。2015 年の関東・東北豪雨により、宇多川で約 3 m 水位が上昇し、大量の貝が流された。2011 年の地震直後の液状化と津波により底質表面に掘り出された 100 mm 以上にもなるオオノガイ *Mya arenaria oonogai* の多くが死滅したあとに生まれて、65 mm 前後に成長していた個体が濁流に流され河口干潟の表面に打ち上げられたのが確認された。しかし、個体数でみると、2016 年には多くの種の個体数が減少していたが、7 年目の 2017 年にはほとんどの種の個体数が回復した。川の増水の影響を頻繁に受ける宇多川河口では、河口の位置や流路、砂州の堆積状況が 2018 年も変化し、さらに 2019 年 10 月の台風 19 号の大雨で宇多川が決壊し河口域には大量の土砂が堆積した。

宇多川河口ではアサリの個体数を超えるほどの爆発的なホトトギスガイの増加は 2018 年も起こらなかった。高い出現率をもつカワザンショウ科複数種 *Assimineidae* spp. は、2017 年以降急激な個体数の増加をみせ、2018 年 7 月には 1 平方メートルあたりの密度が過去最多の約 1 万個体となった。地震発生前の 2009 年の優占種がホソウミニナと上記のカワザンショウ科であった（モニタリングサイト 1000 2009）ことから地震後 7 年目から 8 年目にかけて急激に回復したと考えられる。2015 年までは個体数密度が 50 個/m<sup>2</sup>以下であったホソウミニナも、2016 年には増加が見られ、2017 年 6 月には 250 個/m<sup>2</sup>まで増加した。2018 年も個体数の増加がみられた。しかし、上記の台風 19 号の洪水でカワザンショウ科は再び激減したと考えられる。このように、河口域という変化しやすい環境では数 100 年に一度の巨大地震の影響はもちろん大きいですが、数年おきの出水も非常に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。一方、地震前や地震直後には成貝



が発見されていたサビシラトリ *Macoma contabulata* の稚貝は9年目も発見されず、地震後の再生産が未だに確認されていない。

サキグロタマツメタは調査時にほぼ毎回確認され、秋には卵塊も確認され、再生産が継続していることが確認された。地盤沈下が著しい万石浦や、アサリを含め貝類が著しく減少した双観山とは状況が異なっている。2019年になっても、アサリ漁業が地元消費程度しか行われていないため、捕食可能なアサリが多数生息していることや大がかりなサキグロタマツメタの駆除が行われていないことが個体数維持の原因と考えられる。松川浦の護岸や周辺道路の工事はまだ継続しているが、宇多川河口周辺では2017年までにほぼ終了した。アサリ漁業の本格的な再開や潮干狩り開業の目途はたっていないが、今後も継続してアサリの個体群動態の検討とサキグロタマツメタの駆除を行っていく必要がある。

#### (4) まとめ

地震発生から9年目でも貝類の生息状況や底質環境には変化が見られた。その変化は台風の影響による洪水のように毎年起こる環境イベントの影響によるものが主流になりつつある。しかし、地震の直接的な影響は未だに続いている。地盤沈下の影響が大きかった万石浦では、徐々に隆起が進行し、固着性のマガキ *Crassostrea gigas* は生息域の上部から中部にかけて死亡個体が大浜全域で確認されている（大越，2016，Okoshi，2016）。地盤沈下後は潮間帯になっていた場所も毎年の隆起によって陸化しており、タマキビ *Littorina brevicula* などの移動性の巻貝は再び海側へ移動した。今後も地盤高の変化に伴って群集構造が変化していくことが考えられ、地震の影響は継続する（Okoshi，2020）。しかし、2018年までに、それぞれ約35 cmと約25 cmの隆起が観測されている松島湾や松川浦では、地震直後の地盤沈下が少なかったこともあり、地盤沈下と隆起の影響はほとんどなくなっている。今回の地震の長期的影響である地盤沈下と隆起の生物への影響は宮城県の牡鹿半島沿岸や岩手県沿岸では変化しながら継続しているが宮城県中部から福島県沿岸ではほとんどなくなっていると考えられる。群集構造の変化が確実に地震の影響によるものであるという事例は少なくなっており、また、そこに季節変化や年変動が加わることにより、地震の影響はさらに見えにくくなっている。万石浦では地盤沈下、松島湾の双観山では潮干狩り、松川浦の宇多川河口では風評被害というそれぞれ違った要因でアサリが減少あるいは漁獲・出荷ができなくなっている。万石浦では人工干潟の造成によりアサリの漁獲量の増加を見込んでいるが、貝毒の発生等も加わり安定化していない。それぞれ個別の事例に対応したアサリ生産の再開と継続のプログラムが必要である。

地震・津波後8年が経過したが、地盤沈下から隆起に転じた場所では未だに貝類群集は安定せず、変化を続けている。その他の場所でも地震前の状況にはもどらず、別の変

化が進んでいる。今後も継続して、さらにデータの蓄積をはかり場所別・種別の動態を把握し、群集構造の変化を追跡したい。また、本研究で得られたデータを漁業者に提供して活用してもらい、資源管理をすすめていきたい。

## (5) 引用文献

- Kanaya, G., T. Suzuki, K. Kinoshita, M. Matsumasa, K. Yamada, K. Seike, K. Okoshi, O. Miura, S. Nakai, W. Sato-Okoshi, and E. Kikuchi (2017) Disaster-induced changes in coastal wetlands and soft-bottom habitats in eastern Japan— an overview on 2011 Great East Japan Earthquake. *Biology International SI36*: 62–80.
- Ohtsuki, H., T. Suzuki, K. Kinoshita, G. Kanaya, T. HIRAMA, S. Sato, K. Shibata, K. Okoshi and J. Urabe (2016) Genetic structures of *Laguncula pulchella* metapopulations along the northeast coast of Japan after the tsunamis caused by the Great East Japan Earthquake. In: Jotaro Urabe & Tohru Nakashizuka (Eds). *Ecological impacts of tsunamis on coastal ecosystems: Lessons from the Great East Japan Earthquake*. Springer pp.209-221. DOI 10.1007/978-4-431-56448-5, ISBN 978-4-431-56446-1, ISBN 978-4-431-56448-5 (eBook)
- 大越健嗣 (2004) 輸入アサリに混入して移入する生物—食害生物サキグロタマツメタと非意図的移入種. *日本ベントス学会誌* 59: 74-82.
- 大越健嗣 (2011) 海のブラックバス サキグロタマツメタ 外来生物の生物学と水産学 大越健嗣・大越和加編著 恒星社厚生閣 225pp.
- 大越健嗣 (2012) 地震・津波が沿岸に生息する生物に与える影響 「災害と生物多様性 災害から学ぶ、私たちの社会と未来」(岩槻邦男・堂本暁子監修) 生物多様性 JAPAN (JRC) pp.20-25.
- 大越健嗣 (2012) 東北地方太平洋沖地震が沿岸に生息する生物に与えた影響 *日本ベントス学会誌* 66: 117-119.
- 大越健嗣 (2013) 東北地方太平洋沖地震の二枚貝への影響—震災から1年半後の現状と今後の展望 — *水環境学会誌* 36: 44-48.
- 大越健嗣・鈴木聖宏・丸山雄也・篠原航 (2014) 貝殻に刻まれた地震・津波の痕跡 *月刊地球* 36(1): 42-46.
- 大越健嗣・鈴木聖宏 (2014) アサリと食害外来巻貝の地震後の生息状況—外来生物は絶滅したのか? *月刊海洋* 46(12): 56-61
- Okoshi K. (2015) Impact of repeating massive earthquakes on intertidal mollusk community in Japan. In: Ceccaldi H-J, Hénocque Y, Koike Y, Komatsu T, Stora G, Tusseau-Vuillemin M-H (Eds). *Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems*.

Springer, pp 55–62. ISBN 978-3-319-13877-0, ISBN 978-3-319-13878-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-319-13878-7\_6

大越健嗣 (2016) カキから考える海洋生物にとっての地震・津波の意味 「生態学からみた東日本大震災—自然が語る震災の意味—」(日本生態学会東北地区会編) 文一総合出版 pp.58-64.

Okoshi, K. (2016) The effects of liquefaction, tsunami, and land subsidence on intertidal mollusks following the Great East Japan Earthquake. In: Jotaro Urabe & Tohru Nakashizuka (Eds). Ecological impacts of tsunamis on coastal ecosystems: Lessons from the Great East Japan Earthquake. Springer pp.165-178.

DOI 10.1007/978-4-431-56448-5, ISBN 978-4-431-56446-1, ISBN 978-4-431-56448-5 (eBook)

大越健嗣 (2018) 東京オリンピックまでにアサリ漁業復活を目指す！震災後宮城県万石浦に造成された人工干潟でのアサリ初出荷までの道のりと今後 豊かな海 46 :21-27.

大越健嗣 (2019) 干潟の生物多様性研究の現状と動向 月刊海洋 51(4): 185-189.

Okoshi, K. (2020) The effects of ground uplift, construction of artificial tidal flat and tsunami seawall on marine life and residents following the 2011 Great East Japan Earthquake. In: Hubert-Jean Ceccaldi, Yves Hénocque, Teruhisa Komatsu Patrick Prouzet, Benoit Sautour and Jiro Yoshida (Eds). Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Climate Change. Springer (in press)

Onozato, M., A. Nishigaki and K. Okoshi (2016) Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and bivalves on the Pacific coast of Japan: influence of tsunami and fire PLoS ONE 11(5): e0156447. doi:10.1371/journal.pone.0156447

Onozato, M., A. Nishigaki and K. Okoshi (2018) Impact of the Great East Japan Earthquake on polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments on the coast of Matsushima Bay.

Polycyclic Aromatic Compounds. <https://doi.org/10.1080/10406638.2018.1540998>

Suzuki, M. and K. Okoshi (2018) The “tsunami break:” impact of the Great East Japan Earthquake and the accompanying tsunamis on the shell growth of the invasive clam-eating snail *Laguncula pulchella*. Fisheries Science, 84: 485–494. (<https://doi.org/10.1007/s12562-018-1197-2>)

### 3-2-15 グループ 15 (大槌湾・越喜来湾・松島湾の底生生物相と付着生物群集)

三陸沿岸域の生物群集は、震災のみならず、震災後の復興過程においてもその構造は大きく変化してきたと考えられる。また、三陸沿岸の内湾域では、マガキやホタテなど海水中の動植物プランクトンを餌とする濾過食者が重要な水産資源となっており、同じ懸濁物食者である天然の固着性動物の動態が、養殖生産の効率に影響を及ぼすとも考え

られる。そのため、震災からの復興過程における生物相や水産資源の餌料環境の変化を推定する上でも、これら付着生物や底生無脊椎動物相の継続的な調査が求められる。

本グループでは、岩手県大槌湾、越喜来湾、および宮城県松島湾において、海底岩礁域に生息する底生無脊椎動物および養殖施設などの水中垂下物上に生息する付着生物について、その多様性や種組成、季節消長、生息環境特性、成長履歴について調査してきた。

### (1) 岩手県沿岸域の底生無脊椎動物の多様性と種組成

大槌湾赤浜に位置する蓬莱島防波堤は、2011年の津波により倒壊し、2014年に再建された。この防波堤の再建前の2013年および再建後の2015年～2017年に、防波堤の湾奥側および湾口側においてSCUBAによる採り調査を実施し、海藻群落および転石帯に生息する底生無脊椎動物の個体数と種組成の変化を記録した。その結果、海藻群落では種数が多い年で5動物門80種、転石帯では多い年で6動物門32種の無脊椎動物が確認された。いずれの年においても、これら防波堤の両側において動物の個体数には違いがみられたが、種組成には大きな違いはみられなかった。一方、これら無脊椎動物の個体数や種組成は調査年によって大きく異なった。個体数の年による変化に関しては、親潮の接岸の有無および海藻の現存量の変化が要因として考えられた。また、種組成の変化に関しては前述の要因のほかに、2015年以降に優占した海藻の種の違いも影響していると考えられる。さらに、2015年以降の転石帯における種組成の変化に関しては、2015年でのみ付着性の動物が少なかったことから、防波堤再建に伴う攪乱からの回復過程の種による違いも影響している可能性が示唆された。

一方、大槌湾の湾口部から沖合においては、1980年代の報告以降、その底生生物相についてはほとんど調査されてこなかった。本グループでは、2014年～2018年に大槌湾内および湾口部から沖合の水深約30～130mの計12地点においてドレッジとROVを用いた底生無脊椎動物の採集調査を実施した。加えて、2019年には越喜来湾においても6地点でドレッジ調査を実施した。その結果、これらの調査で総数約1200個体、11動物門300種以上の無脊椎動物が得られた。このうち2015年の大槌湾赤浜沖におけるROV調査では、1986年に同地点で報告されたサガミユビヤワコケムシが震災をまたいで生息していることを確認した(Hirose & Kawamura, 2016)。これらの調査で得られた底生生物の中には未記載種や未報告種が多数含まれていると考えられるため、今後、より詳しい観察と分類学的検討を行い、記載論文として公表する予定である。また、大型の起立性コケムシ(*Celleporina attenuata*)2群体およびキノエダカイメン1個体に棲み込む小型の底生生物をROVのスラップガンを用いて採集したところ、合わせて8動物門42種の無脊椎動物が得られた。この結果から、これらの固着性動物が多様な底生生物に生息場として利用されていることも明らかとなった。

## (2) 海底岩礁域に生息する固着性動物の成長履歴解析

岩手県沿岸域の水深数十メートルの深度帯では、SCUBA や大型調査船を用いた調査が困難であるため、震災前後にわたって底生生物と環境変化との関係についてはほとんど調査されてこなかった。一方、大槌湾湾口部の水深約 70 m の海底岩礁域にはサンゴ状の群体を形成するコブコケムシの一種 (*Celleporina attenuata*) が生息しており、その枝の内部には年輪状構造がみられる。本グループでは、過去に遡ってコケムシ群体の成長量を明らかとすることにより、過去の環境変化や震災によって同水深帯の生物がどのような影響を受けたのかを推定することを目的として、コケムシ群体内の年輪状構造が年輪と同等の成長線であるのかを、酸素同位体比を用いて調査した。また、最新のマイクロフォーカス X 線 CT を用いて、非破壊的にコケムシ群体内部の複数の枝の年輪状構造を解析した。その結果、これらの成長線は酸素同位体比の低い時期と概ね一致していたことから、夏季に形成される成長線であることが明らかとなった (Hirose et al., 2020b)。また、その成長線の間隔を計測して比較したところ、震災前後では成長量に大きな違いはみられないことも明らかとなった。

## (3) 水中垂下物上にみられる固着性動物とそこに棲み込む小型甲殻類の種組成変動

三陸沿岸域の養殖施設では、固着性の動物による汚損被害や餌量の競合による成長阻害が大きな問題として挙げられる。しかし、これら人工の水中垂下物上にみられる懸濁物食者の分布や季節消長に関する知見は少ない。本グループでは、岩手県大槌湾 (2013 年～)、岩手県越喜来湾 (2017 年～)、および宮城県松島湾 (2014 年～) において、水中に塩化ビニル製の付着板を垂下し、2～3 ヶ月間隔で付着板を交換して観察することで、付着生物の種組成および季節消長を複数年にわたり調査してきた。大槌湾の湾内 6 地点で調査した結果、湾奥南岸と湾央・湾口部との間で付着生物の種組成に大きな違いがみられた (Hirose & Kawamura, 2017)。これは、湾奥南岸の地点が河川水の影響を受ける環境であるためと考えられる。一方、越喜来湾の湾口部では、大槌湾の湾口部と類似した種組成が確認された。これら岩手県沿岸域においては、総じて春先および冬季に異なるヒドロ虫類が優占し、夏から秋にヨコエビ類の棲管とフジツボ類が多くみられた。また、秋の水溫低下とともにコブコケムシの付着が多くなる傾向も、調査した両湾で共通していた。一方で、固着性動物の種数が多い夏から秋にかけては、同時期においても湾によって種組成が異なる傾向がみられた。これは、各湾内の流入河川や流向といった環境による違いと考えられる。また、付着生物の種組成や優占種は年によっても大きく異なり、海洋環境を合わせた検討の結果、その要因の一つとして親潮の接岸の有無および夏季の高水溫の影響が示唆された。

松島湾においては、湾奥と湾央の2地点のカキ養殖施設において調査を実施した。その結果、松島湾では起立性の固着性動物が優占し、毎年春先にオベリア属のヒドロ虫、初夏にツブナリコケムシ、夏から秋にフサコケムシ、冬季にホソフサコケムシが優占する傾向が明らかとなった。このうちツブナリコケムシについては未記載種であることが判明し、新種として記載した (Hirose et al., 2020a)。また、初夏の低水温期間が短かった 2017 年には、温暖な海域に生息するホンダワラコケムシの付着が初めて確認された。海洋環境についても観測を実施した結果、松島湾における固着性動物の動態は水温の変化によって大きく左右されることが明らかとなった。また、調査地点2地点における流速および藻類細胞数の観察結果から、湾奥の地点でコケムシ類が多い要因は、穏やかな流速と豊富な餌料の存在である可能性が示唆された。

2017 年からは、これら付着板上の付着生物の隙間に棲み込む小型甲殻類の種組成と季節消長についても調査し、人工的な水中垂下物の存在が三陸沿岸域の生物生産にどれほど影響しているのかを推定した。その結果、岩手県沿岸域の2つの湾では、夏期にフトヒゲカマキリヨコエビが優占し、秋から冬にかけてワレカラ類が優占する傾向がみられた。また、これらの深度分布や季節消長を海洋環境と合わせて検討した結果、これら小型甲殻類の動態は水温による影響が大きいと考えられた。一方で、越喜来湾ではフトヒゲカマキリヨコエビが優占するのに対して、大槌湾では同時期にワレカラ類が優占するなど、湾による違いも明らかとなった。また、松島湾においては、これら棲み込みを行う小型甲殻類の種の多様性が他の2湾に比べて高いことが明らかとなった。これは、大槌湾や越喜来湾では単一種が年間通して繁殖・優占しているのに対して、松島湾では季節により優占する種がまったく異なるためであると考えられる。最後に、越喜来漁協が管理する越喜来湾内の養殖施設にどれほどの小型甲殻類が棲み込んでいるのかを、小型甲殻類が最も多かった9~11月の調査結果に基づいて推定したところ、その湿重量は数百から数千トンと試算された。これらの小型甲殻類は魚類の餌料にもなっていることが知られており、養殖施設上の付着生物に棲み込む小型甲殻類が三陸沿岸域の水産資源の生産に寄与している可能性が示唆された。

#### (4) 引用文献

- Hirose M., Gordon D.P. and d'Hondt J-L. (2020a) New seriated *Amathia* species in Japan, with a redescription of *A. acervata* Lamouroux, 1824 (Bryozoa: Ctenostomata). *Zootaxa*, 4742(2): 311–331.
- Hirose M., Ide A. and Shirai K. (2020b) The growth of *Celleporina attenuata* estimated based on the oxygen isotopic compositions and microfocus X-ray CT imaging analysis. In: K. Zagorsek and P.W. Jackson (eds) *Bryozoan Studies 2019*, 69–82.

- Hirose M., and Kawamura T. (2016) Sessile organisms in Otsuchi Bay and Matsushima Bay after the Great East Japan Earthquake and Tsunami. In: Kogure K., Hirose M., Kitazato H., and Kijima A. (Eds), Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011. Our knowledge acquired by TEAMS. pp. 71–72. Tokai University Press, Kanagawa.
- Hirose M. and Kawamura T. (2017) Distribution and seasonality of sessile organisms on settlement panels submerged in Otsuchi Bay. Coastal Marine Science, 40 (2): 66–81.

### 3-2-16 グループ 16 (岩手県南部沿岸域の環境および生物群集)

#### (1) 越喜来湾のアマモ場および碎波帯 (波打ちぎわ) に出現する仔稚魚

砂浜海岸やアマモ場に代表される浅海域は、魚類の産卵場や成育場として重要である。岩手県越喜来湾でも東日本大震災により環境が大きく変化したと考えられるが、我々は湾内の 2 海岸に注目して震災後の環境変化や仔稚魚相とその食性などについて調査を行った。仔稚魚の採集にはサーフゾーンネットとアマモ場用ネット (共に 1m×4m 目合い 1 mm)、および 1/2 スケールの水工研Ⅱ型ソリネットを用い、餌生物の採集には北原式定量プランクトンネットと広田式ソリネットを用いた。また、アマモ場やコンブ藻場の面積は、ドローンによる空撮画像を解析することにより算出した。

津波によってほぼ消失した浪板海岸アマモ場の面積は 2015 年まで増加を続けていたが (2012 年 680 m<sup>2</sup>; 2013 年 1200 m<sup>2</sup>; 2014 年 3300 m<sup>2</sup>; 2015 年 3400 m<sup>2</sup>)、2016 年は縮小 (1500 m<sup>2</sup>) に転じた。これは、地盤沈下によって適正水深帯が増加し岸側に拡大してきたアマモ場の内、水深の大きな場所にあるアマモの衰退やウニの食害、台風による時化等が原因と考えられる。アマモ場に出現する魚類 (主に仔稚魚) は、2016 年以降 23 科 40 種前後で推移している。アマモ場依存種もアマモ場が回復以降増加傾向を示し、アマモ場における魚類の種組成は震災以前と同様のものにほぼ回復したものと考えられる。一方、震災復興事業により回復が妨げられた例も明らかとなった。アマモ場の優占種であるクダヤガラは震災により一旦数を減らしたが、経年的に増加していた。しかし、防波堤復旧工事の開始後再び減少に転じた。その原因は産卵基質であるマボヤが岸壁工事によって減少したためであることが明らかとなった (Katayose and Asahida, 2018)。またそれとは反対に、研究により得られた情報を基にアマモの回復を妨げない工事を行うこともできた。各種復旧工事にあたっては、植生を含めた環境や生息種ごとの生態に配慮した工法の選定が必要であろう。

同海岸の碎波帯では、2016 年以降 17 科 20 種前後の仔稚魚が確認されている。三陸地方は親潮と津軽暖流の影響を受ける海域であり、これらの接岸の有無や強弱が魚類の出現を左右するが、定住種を中心とした仔稚魚の出現動態から本地点における魚類相への震災の影響はほぼ解消したものと考えられる。また本地点では震災後、マコガレイの

稚魚がごく浅い場所で多く見られるようになったが、ほぼ全ての出現個体が当歳魚(0+)であり、標準体長 80-100 mm になるまで本海岸の浅所を利用していることが明らかとなった。出現個体数には年変化が見られたが、水系分析の結果、産卵期(1-6月)の親潮勢力によって加入量が増加することが示唆された。また、体長 30 mm 前後までの個体はハルパクチクス類やヨコエビ類を、70 mm 前後までは食性を多様化させつつタナイス類などの潜砂性小型甲殻類を、80 mm 以上の個体では多毛類を主に摂餌していることが胃内容物分析と炭素・窒素安定同位体分析の結果から明らかとなり、成長に伴い食性が変化することが示された。これらの結果は、地盤沈下による海岸線の前進により新たに創出されたごく浅い場所が重要な成育場として機能していることを示している。

越喜来湾奥部に位置する浦浜海岸は、震災によって砂浜海岸が消失し新たに浸水域となった場所に砂浜等が形成された場所である。本地点では住民要望により新防潮堤(2017年竣工)がセットバックされ、砂浜等が保全された。現在、海岸の潮間帯から潮下帯にはコンクリート片(旧防潮堤のがれき等)を含む転石が目立つが、これらの転石を付着基質としてマコンブ等を主とする藻場が形成されていることが植生調査によって明らかとなり、その総面積は2017年の約1400 m<sup>2</sup>から2018年の約3600 m<sup>2</sup>へと経年的に増加したことが明らかとなった。

また、震災後の同海岸と浪板海岸の浅所(水深:1-2 m)では希少種であるホシガレイ稚魚(TL:17-137 mm)とマツカワ稚魚(TL:115-146 mm)の出現が確認できた。ホシガレイやマツカワは初期生活史において極めて浅い水域を利用することが知られており、『震災後に新たに形成された浦浜海岸』や『震災後も残存した浪板海岸』の浅所が成育場として利用されていることが示唆された。

## (2) 広田湾小友浦干拓地における生物相

津波により干拓堤防が破壊されるなどして半分近くが浸水域となった小友浦干拓地では、7目21科36種以上の魚類、8門12綱26目50科59種以上の底生動物、3綱9目14科23種以上の海藻・海草類が確認された。これらの水生生物の中には、水産有用種の稚魚やマガキ、アサリ、スサビノリ、アナジャコのような干拓以前に水産物や釣り餌として利用されていたものが含まれていた。また、海藻・海草類を含めた水生生物は、鳥類の餌となっていることも確認された。

干拓以前に多く利用されていたアサリは、2016年の時点で0歳から5歳の個体が確認され、震災年から毎年アサリが着底して成長していることが明らかとなった。また、アサリの生息密度と底質の関係を調べたところ、中粒砂や粗粒砂の割合が高い場所で生息密度が高いことが明らかとなった。小友浦干拓地は震災前公共工事の残土置き場となっていたことから碎石等の礫が多く、アサリの生息に適した底質は一部である。陸前高田市は干拓地の1/3を干潟に再生する計画を立てているが、再生後に潮干狩り場として



の利用を考えるのであれば、ある程度の底質改良が必要であろう。本地点のアサリは東京湾や厚岸湾に比べて成長が悪いことが示唆されたが、着底から1年目の集団を用いて年ごとの成長量を比較した結果、2014年に最も成長が悪かったことが明らかとなった。浸水域（仮堤防から海側）周辺における工事が減少した2015年以降は2011年から2014年までのいずれの年よりも成長が良かったことから、2014年に浸水域で頻発した濁水の影響が示唆された。小友浦では、消失した干拓堤防の位置に復興工事による濁水が広田湾に広がるのを防ぐシルトフェンスが張られており、フェンス内の濁度が高い傾向が見られる。また、広田湾小友浦浸水域（シルトフェンス内）、広田湾矢の浦（シルトフェンス外）、越喜来湾浦浜海岸（他湾の浸水域に形成された海岸）の各地点で採集されたアサリについて各種解析結果を比較したところ、浦浜海岸産アサリの方が各年の平均成長量が良かったことが明らかとなった。しかし、小友浦浸水域に隣接する矢の浦産アサリは最も肥満度が高く（Steel-Dwass,  $P < 0.01$ ）、成長量にも浦浜海岸との差は認められないことから、シルトフェンス撤去後には小友浦産アサリにも他地点産と同様の成長が見込めるものと考えられる。

### (3) 越喜来湾浦浜海岸の潮間帯植物群落調査

岩手県南部に位置する越喜来湾湾奥の越喜来地区では、2011年3月に発生した東日本大震災の津波により海岸防潮堤が倒壊・流失して、市街地が甚大な被害を受けたことから、震災後2013年3月～2017年9月にかけて防潮堤復旧工事が実施された。また、この工事は、同湾への小流入河川（浦浜川）河口右岸に発生した海岸を生かすため、当該区間（約200m）の防潮堤法線を陸側に下げて施工された。その結果、この区間の防潮堤前には、転石を底質として瓦礫が点在する震災前にはなかった浦浜海岸が出現した。また、岩手県南部沿岸域では、冬季の親潮接岸がコンブ類群落の繁茂に大きな影響を与えることが分かっている。そして、震災前から海藻群落調査を継続している越喜来湾に近接する吉浜湾舟作海岸（天然海岸）では、親潮の顕著な接岸がなかった2016～2018年にかけてコンブ類群落が著しく減少したが、越喜来湾の浦浜海岸では、この3年間継続的なマコンブ群落の形成が観察された。そこで本研究は、同海岸に形成されたマコンブ群落の特徴を明らかにすることを目的とした。

2016～2018年に越喜来湾の浦浜海岸に出現した海藻・海草類と、マコンブの生育状況を調査した。2018年7月のマコンブ繁茂期には、同海岸を3地区（浦浜川に隣接した河川区、中央区、河川と反対に位置する護岸区）に分け、ライントランセクト法を用いてマコンブ群落の水平・垂直分布、構成藻体の密度と藻長を記録し、ドローンにより撮影した航空写真から群落面積を算出した。そして、マコンブの付着基質の大きさを把握するため、同海岸に打ち上げられ、マコンブ藻体が付着したすべての転石と瓦礫の長径と付着藻体数を記録した（難波ら、2019）。

2016～2018年にかけて、緑藻3種、褐藻3種、紅藻12種、海草1種が確認され、すべての年で転石や瓦礫を付着基質としたマコンブ群落が発達していた。2018年7月の調査では、河川・中央・護岸区において、潮間帯下部から潮下帯上部（平均水面下87～149 cm（水深62 cm）、90～125 cm（水深35 cm）、90～120 cm（水深30 cm））の、浜から沖へ22 m、14 m、15 mの浅海域で、面積1450 m<sup>2</sup>、340 m<sup>2</sup>、440 m<sup>2</sup>（総面積2230 m<sup>2</sup>）の連続したマコンブ群落が発達していた。そして、群落構成藻体の密度と藻長は、河川・中央・護岸区において、それぞれ平均59、18、43 藻体/mと、184、81、126 cmであった。また、打ち上げられた転石と瓦礫の長径とマコンブの付着藻体数は、平均22 cm（7～59 cm）と、9本（1～78本）であった。これらの結果から、転石と瓦礫を底質とし、小河川の河口に隣接する浦浜海岸の浅海域に、大型のマコンブ藻体が密生した群落が発達していること、そして、河川近くで最も繁茂していることが明らかになった（難波ら、2019）。今後は、他の海域とは異なり、親潮接岸の影響を受けない同海岸のマコンブ群落形成要因解明が望まれる。

#### (4) 大船渡、唐丹、越喜来湾沿岸におけるクラゲ類の出現動態と環境に与える影響

クラゲ類は、魚類の餌である動物プランクトンを捕食し、さらには仔稚魚をも捕食する。そのため、クラゲ類の種組成や出現の仕方によっては、その生息域の生態系構造を変えてしまい、漁業をはじめとする沿岸経済活動に大きな影響をあたえる。このクラゲの出現の有無を決定づけるのは、クラゲ類の一生のうち付着生活して無性生殖を行うポリプの世代の存在が大きい。我々は、東日本大震災以前の2008年から越喜来湾において定量的なクラゲ類の個体群動態、大船渡湾にて定性的なクラゲ類の出現状況を観測してきた。2011年の東日本大震災による津波と地盤沈下などにより、海底が攪乱され、さらには復興港湾工事などでクラゲ類の付着世代であるポリプの生息場所も大きく影響を受けたと考えられる。そこで、本研究では、越喜来湾、大船渡湾および唐丹湾において、クラゲ類の出現状況を調査し、震災後の復興に関わる環境変動の影響について考えることを目的とした。

岩手県大船渡湾の細浦および大船渡漁港、唐丹湾の小白浜漁港、越喜来湾の崎浜漁港、浦浜漁港、鬼沢漁港、砂子浜漁港の7定点で月に1回調査を行った。各調査地点にて目視でのクラゲ類の観察を行い、北原式プランクトンネットを岸壁から投入し、鉛直・水平曳きを行った。採集したサンプルは終濃度3%になるように中性ホルマリン原液をいれて固定した。また、水質マルチチェッカ（HORIBA社製）を用い、水深1 mごとの水温、pH、D<sub>0</sub>、塩分等を測定した。さらに、港湾工事などによる環境の大きな変化があったときには写真を撮影し、記録した。

また、サルシアクラゲは毎年早春から初夏にかけて高密度化し、動物プランクトンへの大きな捕食圧が予想される。高密度化したクラゲ類の摂餌速度の高さは著しく、同時的、

同所的に存在するサケを始めとした仔稚魚との競合が予想される。そこでサルシアクラゲの動物プランクトンへの捕食圧も調べた。1L 容器にアルテミアを既知の個体数（50～700 個体）を入れ、そこにサルシアクラゲを1 個体導入し摂餌させた。1 時間静置し、残ったアルテミアの個体数を計数して摂餌数をカウントし、摂餌速度を算出した。

震災直後の 2012 年の春から夏にかけては、アカクラゲは全く見られず、その他のクラゲ類については 2011 年の震災前までの状況とほぼ変わらないクラゲ類の出現状況であった。また、越喜来湾では、2012 年以降エダクダクラゲが見られず、その他のクラゲ類の出現状況は 2011 年の震災前までの状況とほぼ変わらなかった。しかし、港湾工事、浚渫工事などの工事が行われるようになってから、出現傾向が変化してきた。大船渡湾ではシロクラゲ、カミクロメクラゲが見られなくなり、越喜来湾ではエダクダクラゲ、ドフラインクラゲが見られなくなり、2014 年には、エダアシクラゲが大量発生した。この大発生は 2015 年以降起こらなかった。これは調査地点の港における岸壁などの工事が一通り終了し、そこに様々な付着生物が生息し始めることにより、多様性が増したことによるものと考えられた。2016 年には、越喜来湾にドフラインクラゲが見られるようになり、2017 年 1 月以降、大船渡湾においてサルシアクラゲ、キタヒラクラゲなどが震災前と同様に出現するようになり、シロクラゲも見られた。越喜来湾においては、エダクダクラゲが見られるようになった。2018 年には、2012 年以来はじめて、カミクロメクラゲが出現し、オワンクラゲにヤドリイソギンチャクの寄生が見られた。しかし、全体的に出現量は少なかった。大船渡湾においては、湾奥で、7 月以降クラゲ類がほとんど見られなくなり、特にこれまで出現が多く見られたエダクダクラゲの出現が通年みられなかった。エダクダクラゲはエラコのポリプは棲管にのみ付着するため、大船渡湾内のエラコの生息環境に何らかの変化があった可能性がある。さらに、湾奥において、外洋性のツリガネクラゲは見られなかった。完成した湾口防波堤が機能することによる海水循環に関する影響調査などが必要であると思われる。

以上のクラゲ類の出現の変化は、ポリプからクラゲの遊離する時期、クラゲからプラヌラが出る時期、他生物との競争が少ない時期と復興工事の行われる時期や終了する時期が重なることによって大きく影響することが考えられた (Miyake et al, 2019, 三宅, 2019)。

現在、沿岸開発などの影響から、世界中でクラゲ類の大量発生や刺傷被害などの問題がおこっている。東北マリンサイエンス拠点形成事業事業で得られたこれらの成果は、今後の沿岸開発や復興事業を行う際に大きく役立つと思われる。

一方、サルシアクラゲの捕食圧については、傘高 4mm 未満の個体は、餌密度が 525 inds/L の時に最大摂餌速度の 340 inds/Jellyfish/d に達し、傘高 4.0～7.5mm の個体は、餌密度が 800 inds/L の時に最大摂餌速度の 850 inds/Jellyfish/d に達した。2014～2016 年までのサルシアクラゲが出現した月の動物プランクトン密度とサルシアクラゲ個体群の摂餌速度を求めた。出現密度が小さく、小型個体が多い 2、3 月の摂餌速度

は低く、動物プランクトン量は十分に本種の摂餌量を賄えるものだった。しかし大型の個体が高密度化する4~7月では、本種の個体群の摂餌速度は高く、捕食圧も著しく高いと見積もられた。また、2014年6月や2015年4月には動物プランクトン現存量を上回る摂餌圧であった。クラゲ類は仔稚魚とは餌を巡る競合関係にあり、本種の摂餌速度を考えると仔稚魚への影響は大きいものと予想された。また本種が出現する時期には、シミコクラゲやエダクダクラゲ等の他のクラゲ類も多量に出現する。これらの種も同様に動物プランクトンを摂餌するため、仔稚魚への影響はさらに大きくなる。これらのクラゲ類が与える影響の規模によっては、サケ等の仔稚魚の初期生残率を低下させている時期も存在する可能性が示唆された。

#### (5) ヒラメ着底稚魚の出現動態および餌料環境

岩手県においてヒラメは価値の高い重要な魚類資源である。岩手県沿岸においては、震災前からヒラメ着底稚魚と餌生物の調査が行われている湾もある(木熊ほか, 2006)。そのため、本研究で得られた震災後の結果と、過去に得られた震災前の結果とを比較することによって、岩手県沿岸に出現したヒラメ着底稚魚の詳細な情報から震災の影響等の評価でき、今後の増殖事業の復興方策立案に資することが出来るものと考えられる。

野田湾において、2016~2019年の7月から9月にかけて各年3回採集調査を行った。ヒラメの採集には水工研Ⅱ型ソリネットを、餌生物の採集には広田式ソリネットを用いて5~10 m水深において行った。また、2017~2019年には、県南部の越喜来湾奥の浪板海岸の海草藻場においても一部調査を行った。採集されたヒラメ及び餌生物を材料として、ヒラメの胃内容物を調べるとともに、環境中の餌生物に関する調査を行った。ヒラメの胃内容物重量は相対胃充満度(RSF)により評価した。さらに、ヒラメ着底稚魚と、その餌であるアミ類とカタクチイワシ仔稚魚の安定同位体比を測定し、それらの関係性からヒラメの摂餌状況を推察した。また、耳石の微細輪紋から日齢を推定するとともに、バイオロジカルインターセプト法によりバックカリキュレーションを行い、輪紋形成時の体長を推定した。なお、これらの解析には一部過去に得られたデータを加えて行った。

#### ● ヒラメ稚魚の出現時期と密度

野田湾における各年の調査日ごとのヒラメ最大着底密度を年度間で比較すると、2019年で最大の9.74個体/1000 m<sup>2</sup>、2018年で最少の2.58個体/1000 m<sup>2</sup>であった。最近4年は、ヒラメ稚魚の着底密度は低い水準で推移した。過去には、ヒラメの着底密度は8月下旬に最大となり、9月下旬には極めて低くなる傾向があったが、最近2ケ年は9月下

旬の着底密度が相対的に高くやや異なる傾向を示した。過去の知見と合わせると7月下旬には全長 50 mm 以下の小型個体が多く、8月下旬には小型個体から 100 mm 超まで、様々なサイズの個体が出現することから、この海域の着底時期は7-8月と推察された。9月下旬には成長に伴い多くの着底稚魚が深場（10 m 以深）に移動するものと推察された。

#### • アミ類の出現時期と密度

野田湾において 2017 年から 2019 年における曳網ごとのアミ類密度の範囲は、0.1～967.8 個体/ m<sup>2</sup> で、調査日ごと水深をこみにしたアミ類密度の平均は 8.8～278.6 個体/ m<sup>2</sup> であった。これらの年度では過去に見られた7月下旬～8月上旬にはアミ類密度が低く9月下旬に最大となるといった傾向は見られなかった。野田湾におけるアミ類のほとんどはミツクリハマアミであった。一方、県南の越喜来湾浪板海岸ではコクボフクロアミが卓越した。

#### • ヒラメの摂餌と成長

野田湾においては、ヒラメの成長に伴い TL50 mm 前後から胃内容物中に魚類（主にカタクチイワシのシラス）が占めるようになるのが一般的な傾向であった。ヒラメは個体間で胃充満度に大きなばらつきがあった。2017 年から 2019 年の摂餌状況の経時的変化を RSF で比較すると、8月上下旬においては、アミ類により胃の 19.1～31.7%を満たしていたが、9月下旬に向かって胃の 25.0～53.2%を満たす程度まで魚類（ほとんどがカタクチイワシ仔魚）を捕食していた。

ヒラメの摂餌状態と成長との関係を明らかにするため、胃充満度(RSF)と採捕5日前の成長(RGR)とを、ヒラメの着底密度が最大になる8月下旬の標本で、魚食移行前後(閾値 TL 50 mm)に分けて年度間(2012-2017年)で比較した。TL 50mm未満のヒラメでは、アミ類によるRSFは空胃の個体も多かったが平均は30-40%であった。一方、TL 50 mm以上では2012, 2013年のように魚類によるRSFが78%超と高い年と0-3%と低い年に分かれた。魚類によるRSFが高い年にはアミ類によるRSFは極めて低く、魚類によるRSFが低い場合にはアミ類によるRSFが高まり、全餌のRSFは低くても30%程度であった。RGRは0.49-2.58 mm/dayと年変動が見られたが、最近の2016-2017年は0.49-0.64 mm/dayと特に低かった。

#### • 安定同位体分析

沖合で採集されたヒラメ浮遊期仔魚 ( $n = 8$ , TL = 3.8 - 10.6 mm) の窒素安定同位体比を測定したところ、 $8.52 \pm 0.99\text{‰}$ であった。また、最小サイズの着底稚魚 (TL = 15.4 mm) の窒素安定同位体比は  $9.1\text{‰}$ であった。野田湾の着底稚魚全長とその窒素安定同位体比には強い正の相関があった ( $n = 34$ ,  $r = 0.69$ ,  $P < 0.01$ ) ことから、本海域のヒラメは着底後、小型動物プランクトンよりやや高い窒素安定同位体比を持つアミ類を摂餌し、成長とともにより魚類等のより大型の餌を摂餌し、体成長と共に窒素安定同位体比を高めるものと推察された。さらに、ヒラメの窒素安定同位体比が上昇するとその炭素安定同位体比の変動幅は小さくなった。これは、餌であるアミ類が7月から9月にかけて炭素安定同位体比のみを高めるため、アミ食ヒラメの炭素安定同位体比の変動は大きい、魚食へ移行し窒素安定同位体比が高まるとともに炭素安定同位体比は一定の値に収束する為に起こると考えられた。

近年、東北海区のカタクチイワシが減少しているとの報告 (林, 2016) があり、ヒラメの初期生残とカタクチイワシ資源量との関連性を検討する必要がある。さらに、本海域は着底期においてアミ類密度が他海域よりも低い (玉田ほか, 2015)。摂餌成功率が異なる個体が存在しているために胃充満度にばらつきが生じたと推察された。ヒラメ稚魚の摂餌行動とも関連し、本海域における摂餌特性をさらに検討する必要がある。特に、最近では当該調査海域において着底期の成長が極めて悪い年級が出現した可能性があり、加入への影響を詳細に検討する必要がある。

#### ● 湾口防波堤再建後の大船渡湾の水質環境の変化

大船渡湾は震災前には湾口防波堤の存在により湾内の海水が滞留し、富栄養・貧酸素の状態であったが、東日本大震災の巨大津波により湾口防波堤が全壊したことで、湾内外の海水交換が活発になった。さらに二枚貝養殖の規模が震災前と比べて縮小したことにより二枚貝由来の排泄物が減少し、二枚貝の植物プランクトンに対する摂食圧が減少した。その結果、湾内の富栄養化および貧酸素状態が緩和され、クロロフィル a 濃度の増加が確認された。これらのことから、湾内の水質環境は震災前と比べて良好になったと考えられた (Yamada et al. 2017)。その後 2013 年に湾口防波堤の再建工事が開始され、2017 年 3 月に新しい防波堤が竣工した。この工事期間中、底層における水温および溶存酸素の湾内外の差は工事開始前と比べて拡大し、さらに湾中央部の深層においてリン酸態リン濃度が増加したことから、工事期間中に湾内水の滞留化・成層化が起こったことが考えられた。湾口防波堤の竣工後は湾内の水質環境はどのように変化するのか、本研究は、これまで大船渡湾で行われてきた調査を継続し、得られたデータをこれまで蓄積された調査結果と比較することで、新しい防波堤が湾内の水質環境に与える影響について適切に評価し、さらには安定的・持続的な水産養殖業の実現に寄与することを目的として行った。

2016年9月から2019年12月までのほぼ毎月1回、大船渡湾の湾外（湾口防波堤のすぐ外側）から湾奥（盛川河口付近）にかけての4点において観測を行った。水温、塩分および溶存酸素の鉛直プロファイルは多項目水質計を用いて測定した。各点において表層から海底直上まで5m毎にバンドーン採水器およびニスキン採水器を用いて海水を採集し、クロロフィルa濃度測定（蛍光法）、栄養塩（硝酸態+亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リンおよびケイ酸）濃度測定（自動分析機）に供した。

調査期間中の底層水温の湾内外の差は9月に最大となり、湾口防波堤再建工事開始前は-1.2℃から-1.5℃、再建工事中は-2.5℃程度であった（湾内の方が低水温）が、防波堤竣工後は水温差が大きくなり、2019年には-3.3℃まで拡大した。湾内における溶存酸素濃度は工事開始前は水平的、鉛直的にほぼ一定であったが、工事開始とともに湾内の底層における値が低下し、2019年の9月には0.96 mg/Lとなり深刻な貧酸素状態にあることが確認された。各栄養塩濃度は工事開始前から工事期間中と比較して特に夏季～秋季の湾中央部の底層付近においてアンモニア態窒素およびリン酸リン濃度が上昇した（2019年9月にはそれぞれ10.4および1.8 μM）。防波堤竣工後のクロロフィルa濃度は若干増加傾向にあった（9月の10 m層付近で1.7～3.1 μg/L）。

## • 引用文献

林晃（2016）親潮系冷水域におけるカタクチイワシの初期生態に関する研究．博士学位論文，東京大学．

Katayose, G. and T. Asahida (2018) "Effect of environmental change after the 2011 tsunami on the population dynamics of Japanese tubenout *Aulichthys japonicus* (Gasterosteiformes)". *Cybium*, 42(4), pp.321-326.

木熊慶吾、海東和宏、後藤友明、林崎健一、井田斉（2006）岩手県におけるヒラメ着底稚魚の食性と成長 東北底魚研究, 26: 2-4

Miyake H, T. Sano, Y. Sakuma, K. Onochi, N. Nishikawa, K. Sugimoto, F. Motoishi, S. Honda, T. Saito, H. Yokoba and Y. Hamatsu (2019) Change in jellyfish fauna after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami in the southern part of Sanriku coast, Iwate, Japan. The 9th Workshop of the Hydrozoan Society. 2019年6月24日

三宅裕志（2019）岩手県南部における東日本大震災前後のクラゲ類の出現変化. 2019年度日本付着生物学会シンポジウム「三陸における付着生物研究」2019年10月18日.

難波信由・片寄剛・朝日田卓（2019）岩手県南部に位置する越喜来地区防潮堤前浜のマコンブ群落. 2019年度日本付着生物学会シンポジウム「三陸における付着生物研究」2019年10月18日.

玉田悟、林崎健一、後藤友明（2015）. 岩手県沿岸におけるヒラメ着底稚魚期の餌料環境. 東

北底魚研究 35: 26-33.

Yamada Y, Kaga S, Kaga Y, Naiki K, Watanabe S (2017) Changes of seawater quality in Ofunato Bay, Iwate, after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. J Oceanogr 73: 11-24.

### 3-2-17 グループ 17 (沿岸水産資源生物の動態)

本グループでは、主に宮古湾および仙台湾において、東日本大震災による生息環境の攪乱およびその後の変化の過程が沿岸の水産資源生物の動態に及ぼす影響に注目して研究を実施した。両水域とも多くの資源生物の生息場や生活史初期の成育場として利用されているが、東日本大震災による地震・津波によってこれらの場は壊滅的な被害を受け、資源生物に直接的・間接的に大きな影響を与えたと考えられる。震災後の資源生物やそれらが利用する環境の動態を解明し、漁業管理や場の保全に資する知見の収集を目的として研究を実施した。

#### (1) 宮古湾内湾 (海草藻場・砂泥域)

宮古湾では震災前からアマモ場に関する調査が行われ、多くの魚介類がアマモ場を産卵場や成育場として利用していることが報告されている。そのアマモ場が震災による津波によって壊滅的な被害を受けたことから、震災直後の 2011 年 9 月からモニタリング調査を開始し、アマモ場の回復過程を調べている。アマモ場の面積は震災前には 50~60 ha であったが、震災直後は 8.4 ha に減少した。その後、面積は徐々に拡大し、2017 年 8 月には 49.4 ha と震災前とほぼ同じ面積まで回復したことがわかった。震災直後は、アマモの激減とともに出現する魚類は減少したが、2014 年にはアマモ場の回復に伴って出現する魚類数が増加した。しかし、株密度が 50 株/m<sup>2</sup> を超え濃密な群落になると、魚類の現存量および個体数は減少に転じた。産業上有用なウミタナゴ類、クロソイや多くの魚類の餌となるニクハゼ等の出現は株密度の増加に伴い減少した。以上の結果から、魚種毎に成育場として利用しやすいアマモの密度が存在し、成育場としての生産力を最大にするために、人為的にアマモを間引くなどの操作が有効であることが示唆された(Noda et al. 2017)。

宮古湾では例年 1~3 月に成熟卵を持つニシンが来遊するが、本種が産卵場や仔稚魚期の成育場として湾内をどのように利用しているかは不明であった。そこで、2012 年から毎年 4~8 月に産卵場・成育場調査を実施している。その結果、ニシンは湾奥のアマモ場で産卵すること、仔魚および稚魚(全長 100 mm 前後)は同じ湾奥の砂泥域を成育場として利用していることがわかった。本研究の成果は、ニシン資源の場の管理に関



する指針を提供するものであり、今後は、産卵場や成育場の形成要因の解明に取り組む必要がある(白藤・渡邊 2018, Shirafuji et al. 2018, Murase et al. 2019, Yamane et al. 2019)。

ヒラメおよびマコガレイは宮古周辺海域における主要な漁獲対象異体類である。両種稚魚の分布、摂餌生態の解明を目的に、宮古湾内の砂浜海岸(水深1 m以浅)において、2016、2017年の7~10月に成育場調査を行った。その結果、ヒラメ稚魚は9月上旬~下旬に主に宮古湾の湾奥部で出現し、胃からは小型甲殻類であるアミ類が主に出現した。マコガレイ稚魚は8月上旬~9月下旬に湾中央部で多く出現し、胃からはヨコエビ類、多毛類および二枚貝水管が多く出現した。このように、ヒラメとマコガレイはほぼ同時期に宮古湾内を稚魚期の成育場として利用するが両種の成育場は湾奥と中央部で異なること、摂餌選択性にも違いがあることが明らかになった。

宮古湾では震災以降、外来性巻貝サキグロタマツメタが大幅に増加し、アサリやウバガイ等の食害が顕在化しており、2012年から漁業者を中心にサキグロタマツメタの駆除が行われている。本研究では、有効なサキグロタマツメタの駆除方法を検討するため、実施されている駆除作業の実態を把握するとともに、生息個体数の推定を行い駆除作業の効果を調べている。駆除作業は2012~2017年度に1~3回/年、冬季(11-3月)の大潮最干潮時に徒手で行われ、年間259~6,437個体が採集・駆除された。駆除作業により採集された620個体に、金属ヤスリで殻に傷を付けて標識し、2015年1月15日に放流、2月5日に再捕調査を行い、Petersen法により生息個体数を推定した(1回放流1回再捕)。標識再捕調査では74個体が再捕され、隣接する漁場への移動は確認されなかった。標識放流調査を行った漁場の生息個体数[95%信頼区間]は9,216[7,188,11,244]個体、宮古湾奥部全体では14,611個体が生息していると推定された。CPUEが相対的な生息量を示していると仮定し、2015年度の生息個体数とCUPEから推定した各年度の生息個体数は1.1万~2.4万個体であった。現在のところ駆除作業の効果は認められず、駆除努力を強化する必要があると考えられた。

## (2) 宮古湾外海(海藻藻場・岩礁域)

三陸沿岸の主要磯根資源であるエゾアワビやウニ類は、一次生産者である大形褐藻類のマコンブによって支えられているため、マコンブ現存量の変動は磯根資源に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、宮古湾外海の岩礁域において、マコンブの生育状況の調査と主要な植食動物であるキタムラサキウニの密度や身入りについて調査した。2015年3月より毎月1回、水深6、9、12 m地点において、海藻類の粹取りおよび漁獲サイズのキタムラサキウニを採集する調査を継続した。調査を開始した2015年度は、マコンブの濃密な群落が形成されたが、2016、2017年は冬から春にかけて親潮が調査地に到達せず最低水温は約8℃であり、マコンブの生育がほとんど見られなかった。

他の藻類については、2016年はワカメ、アカモクが部分的に生育したものの、2017年はこれらのごく少なくなった。2015年のキタムラサキウニの身入り（生殖腺重量/個体重量）は漁期には20%以上となっていた。しかし、その後の2016、17、18年はキタムラサキウニの身入りが年々減少した。

以上のようにマコンブの生育に厳しい環境条件下でも大形褐藻類を生育させる対策が必要と考え、以下のように取り組んだ。海底に生息するウニなどの植食動物の摂食圧を低減させるために、小形のフロートを海底から水中に立ち上げ、このフロートやロープに天然の海藻類を着生させた。設置から約1年後には、海底には大形海藻が皆無であったが、フロート上にはマコンブやワカメ等が着生し、フロート1個当たり最大で16kg（湿重）の現存量となった。しかしながら、実験区の海底のキタムラサキウニの身入りは、対照区と有意に異ならなかった。結論として、マコンブの生育に厳しい環境条件下でも大形褐藻類の生育を促進することは可能であったが、それらがウニやアワビ等の漁業資源の増加に寄与するには至らなかった（Yatsuya et al. 2017, 2020）。

### (3) 仙台湾ヒラメ成育場機能の評価および震災後の変化

仙台湾では、2002年より東北水研で実施しているヒラメ稚魚成育場調査を、調査項目を追加して継続的に行うとともに、沖合の生物・環境情報を追加し、ヒラメ当歳魚の成育場利用様式および成育場環境の長期的な変化を明らかにすることを目的に調査を実施した。仙台湾におけるヒラメ成育場の利用様式は、他海域と比較して、着底した稚魚が長期的に成育場を利用すること、大型個体も生息可能であることが特異的であった。このことは、稚魚の主要な餌であるアミ類の現存量が長期的に多いこと、水温が稚魚成長適水温の上限値である約25℃を超えないことが関係していると考えられた。ヒラメ稚魚の成育場における生息密度が高い年と代謝生物量（ $\Sigma$ （体重）0.8）が高い年は必ずしも一致しなかった。ヒラメの生息密度が高いが代謝生物量が高くない年は、小型（全長5cm程度）の稚魚は多く採集されたが、その後大型（15cm程度）の稚魚がほとんど採集されなかった。すなわち、大型の稚魚は沖合に移出したものと推察された。一方、代謝生物量が高かった2011～2014年は大型稚魚も浅海域に一定数生息していた。2011～2014年はアミ類密度が非常に高かった年と一致しており、浅海域のヒラメ稚魚の主要な餌であるアミ類の生物量が、浅海域に滞在出来る稚魚の生物量の上限に影響を及ぼしている可能性が示唆された。以上の結果より、ヒラメ稚魚成育場の餌料生物量が顕著な年々変動を示すことが明らかになった。また、餌料生物量がヒラメ稚魚の生物量の上限に影響する可能性があることが示唆された（Kurita et al. 2017, 2018）。

### (4) 引用文献

- Kurita, Y., S. Uehara, Y. Okazaki, T. Sakami, R. Nambu, and T. Tomiyama (2017) Impact of the great tsunami in 2011 on the quality of nursery grounds for juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in Sendai Bay, Japan. *Fisheries Oceanography*, 26: 165–180.
- Kurita, Y., Y. Okazaki, and Y. Yamashita (2018) Ontogenetic habitat shift of age-0 Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* on the Pacific coast of northeastern Japan: differences in timing of the shift among areas and potential effects on recruitment success. *Fisheries Science*, 84: 173–187.
- Murase, I., N. Shirafuji, K. Yamane, T. Kitagawa, K. Sasaki, Y. Matsumoto and Y., Watanabe (2019) Migration of adult Pacific herring, *Clupea pallasii*, around spawning ground revealed by an automated ultrasonic telemetry system. *Coastal Marine Science*, 42: 1-7.
- Noda, T., M. Hamaguchi, Y. Fujinami, D. Shimizu, H. Aono, Y. Nagakura, A. Fukuta, H. Nakano, Y. Kamimura and J. Shoji (2017) Impact of the tsunami caused by the Great East Japan Earthquake on seagrass beds and fish communities in Miyako Bay, Japan. *Coastal Ecosystems*, 4: 12-25.
- 白藤 徳夫・渡邊良朗 (2018) ニシンの産卵場・仔稚魚期成育場としての沿岸域の利用様式. *水産海洋研究*, 82: 151-153.
- Shirafuji, N., T. Nakagawa, N. Murakami, S. Itoh, T. Onitsuka, T. Morioka and Y. Watanabe (2018) Successive use of different habitats during the early life stages of Pacific herring *Clupea pallasii* in Akkeshi waters on the east coast of Hokkaido. *Fisheries Science*, 84: 227-236.
- Yamane, K., I. Murase, N. Shirafuji, A. Hayashi, Y. Nagakura and Y. Watanabe (2019) Nursery habitat use for larval and juvenile Pacific herring *Clupea pallasii* in Miyako Bay on the Pacific coast of northern Japan. *Fisheries Science*, 85: 407-416.
- Yatsuya, K., Y. Matsumoto, K. Sasaki, N. Shirafuji and D. Muraoka (2017) Phenology of the kelp *Saccharina japonica* and its effect on the gonad index of the sea urchin *Mesocentrotus nudus* across a depth gradient on the Sanriku coast, northeastern Japan. *Fisheries Science*, 83: 939-946.
- Yatsuya, K., Y. Matsumoto, K. Sasaki, N. Shirafuji and D. Muraoka (2020) Reduced biomass of the kelp *Saccharina japonica* cumulatively affects gonad production of sea urchins over ensuing years off northeastern Japan. *Journal of Applied Phycology*, DOI: 10.1007/s10811-019-02030-1.

## 4 震災に伴う沿岸域の物質循環プロセスの変化に関する研究

三陸沿岸部の内湾域においては、定置網によるサケの漁獲を中心とした漁船漁業のほか、湾内の生物生産力や生態系特性に大きく依存する無給餌養殖業や採介藻漁業が盛んに行われている。この地域の漁業経営体の大半を占める複合的な個人経営体（養殖業を中心として生計を営みつつ、ウニ、アワビといった採介藻漁業に従事する形態の漁業を行う経営体）にとって、無給餌養殖業は、安定した収入を確保するために最も重要な漁業種類の一つという側面も持っている。これら無給餌養殖業・採介藻漁業を支える生物生産にとって不足しがちな成分は一般に栄養塩類と呼ばれるが、植物の生産量（収量）はその生物が必要とする栄養塩類の中で、供給量の最も少ない成分によって制限されることから、内湾域の生産の規模は栄養塩類の動態によって規定されていると言える。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴う大津波により、三陸沿岸域の海岸、河口、砂浜、干潟の構造は物理的に損壊したほか、地盤の沈降に加え、津波による浸食や堆積物の移動、陸域からの土砂の流入などによる海底地形の変化など、内湾域における淡水および海水の流動パターンは大きく変化した。さらに沿岸の市街地が壊滅的な打撃を受けたほか、続く復旧・復興過程において産業基盤や土地利用が大きく変容し、陸域から沿岸に流入する各種有機物や微量元素、また、栄養塩類の質や量が震災前とは大きく変化したと考えられる。また、震災に伴う、こうした物質の流入量や流入経路、また流入後の湾内ないしは周辺海域における循環パターンの変化は、岩礁、藻場、湾内、沿岸域での基礎生産や有機物の微生物分解プロセスに影響を与え、ひいては沿岸域の生態系や漁場・養殖環境の変容に繋がると考えられる。したがって震災後の物質循環過程の変化を把握し、湾内の生物生産力の規模や環境容量を査定することは、沿岸漁業の復興を科学的な見地から支援するという意味で重要である。また湾内の水産生物の生産を支える、基盤的な食物網の構造や機構を解明することは、水産資源の持続的・効率的な利用を進める上の課題でもある。そこで本研究では、震災による陸域と沿岸海域のつながりの変化に着目しつつ、物質循環の観点から生態系や水産資源の維持・再生機構の把握を行うことで、水産業の復興に資する基盤情報を整備すると共に、持続的な沿岸漁業のあり方を考える上で基盤となる沿岸食物網の包括的な理解を深化させることを目的とした。

調査対象として東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センターが立地する大槌湾を選定した。大槌湾は東北地方の三陸リアス海岸にある長さ7 km、幅2-4 kmの大きさを持つ内湾の一つであり、湾の面積、閉鎖度など、岩手県の閉鎖性海域の中では平均的な規模および形状となっている（表 4-1）。湾内には鶴住居川、小鎚川、大槌川の三つの河川が流入する一方で、その湾口は北太平洋とつながっており、外洋水との入れ替わりにより短期間で水質変化の大きい湾とされている（Fukuda et al., 2016）。大槌湾では2011年3月11日に襲来した大津波により、多くの瓦礫を含む人工物が海底へと引

き込まれていったほか、湾奥部での海底地形の変化や、鵜住居川河口部の浸食と砂州の消失が起き、大槌川の堤防や蓬莱島と岸をつないでいた突堤の崩壊など、湾内へ流入する河川水の循環に影響を及ぼし得る構造物の大規模な変化が起きた。さらに、河口部にあった下水処理場の損壊もあり、湾内の栄養塩循環を取り巻く環境が大きく変化した可能性が考えられた。これらの地形的特性・被害状況に加え、大槌湾には大槌臨海研究センターの設置以来、蓄積されてきた震災前の大槌湾に関する知見が利用可能であったほか、本事業の開始以前の2011年5月から観測が開始されており、それらの結果と連続性をもった観測が行えるというメリットもあった。このような経緯で岩手県の代表的な内湾域として大槌湾を設定したが、さらに大槌湾と湾口部を通じて溶存態・懸濁態物質を交換することになる三陸沖についても検討すべく、大槌湾および女川湾のそれぞれの沖合に観測線を設定した。三陸沖は亜寒帯を起源とする親潮系水、亜熱帯を起源とする黒潮系水および津軽暖水、さらにこれらや河川水が混合した表層系水などが季節的に勢力を変えながら流入していることから、これらにより運ばれてくる栄養塩類や有機物、そして微生物群集の特性について検討を行った。

表 4-1 岩手県の閉鎖性湾の諸元。湾口幅、面積、湾内最大水深、湾口最大水深、閉鎖度指標は閉鎖性海域ネット ([https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa\\_net/index.html](https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/index.html)) より引用。

名称	湾口幅 [L: km]	面積 [S <sub>B</sub> : km <sup>2</sup> ]	湾内最大水深 [D1: m]	湾口最大水深 [D2: m]	閉鎖度指標 $\frac{S_B \cdot 0.5 \times D2}{L \times D1}$	主な河川 <sup>b</sup>	分水界面積 [S <sub>W</sub> : km <sup>2</sup> ]	分水界面積/面積 S <sub>W</sub> /S <sub>B</sub>
宮古湾	4.8	24.1	76	76	1.02	閉伊川・津軽石川	1093	45.4
山田湾	3.94	31.96	90	90	1.43	関口川・大沢川・織笠川	145	4.5
船越湾	3.1	9.4	55	55	0.99	-	32	3.4
大槌湾	4.1	20.2	77	77	1.1	大槌川・小槌川・鵜住居川	342	16.9
釜石湾	2.3(0.4) <sup>a</sup>	8.7	49	49	1.28(7.37) <sup>a</sup>	甲子川	149	17.1
越喜来湾	2.2	18.8	93	93	1.97	甫嶺川	65	3.5
大船渡湾	0.67(0.2) <sup>a</sup>	7.89	38	38	4.19(14.04) <sup>a</sup>	盛川・須崎川	171	21.7
広田湾	4.75	37.13	56	56	1.28	浜田川・気仙川・長部川	581	15.6
平均	3.2±1.4 <sup>e</sup>	20±11	67±20	67±20	1.66±1.07 <sup>e</sup>		322±358	16±14

a : カッコ内は湾口防波堤を考慮した場合、b : 二級河川以上で流路延長 2 km 以上、c : 湾口防波堤による閉塞を除いた平均。

## 4-1 研究の概要と成果

### 4-1-1 大槌湾の栄養塩類動態の遷移過程

大槌湾ならびに同湾に流入する三つの河川を対象に陸域を含む湾外からの栄養塩類の流入量の変動および湾内での循環パターンを明らかにするためのモニタリング調査を行った(図 4-1)。大槌湾の湾口付近の (Ex. 1) から鶴住居川河口に設けた測点 16 までの観測線上に設けた 5 つの観測点 (測点 Ex. 1、2、6、11、16) および大槌湾に流入する三つの河川にそれぞれ一つずつ設けた観測点において、大槌湾では 2011 年 5 月より、流入河川では 2011 年 11 月より隔月の頻度で水質調査を実施したが、測点 6 については測点 2 との差異が小さいことから 2015 年 1 月以降の観測は縮小した。採水はニスキン採水器で行い、1 m、5 m、10 m、20 m (水深が深い Ex. 1 では 40 m) および海底直上の海水をそれぞれ採水し、これと同時に、CTD を用いて水温、塩分、クロロフィル濃度、濁度のデータを 0.1 m 間隔で観測した。無機栄養塩 ( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) 濃度は比色測定法を用いた自動分析機 (BRAN+LUEBEE、AACS II・AACS III) により行った。クロロフィル a 濃度はガラス繊維濾紙 (GF/F) 上に浮遊藻類を捕集した後に色素をジメチルホルムアルデヒドにて抽出し、蛍光光度計 (Fluorometer 10-AU, Turner Designs) を用いて測定した。本節では栄養塩類・クロロフィル a の各濃度の結果について紹介するが、本モニタリング調査と並行して行われた、白金 (Suzuki Mashio et al., 2016; Suzuki Mashio et al., 2019)、銅 (Wong et al., 2018)、陸起源有機物 (Lu et al., 2016a, b)、動物プランクトン (Nishibe et al., 2016; 西部ほか, 2017)、植物プランクトン (Tachibana et al., 2017)、原核生物・ウイルス (Yang et al., 2016) の各結果について参考文献を参照していただきたい。

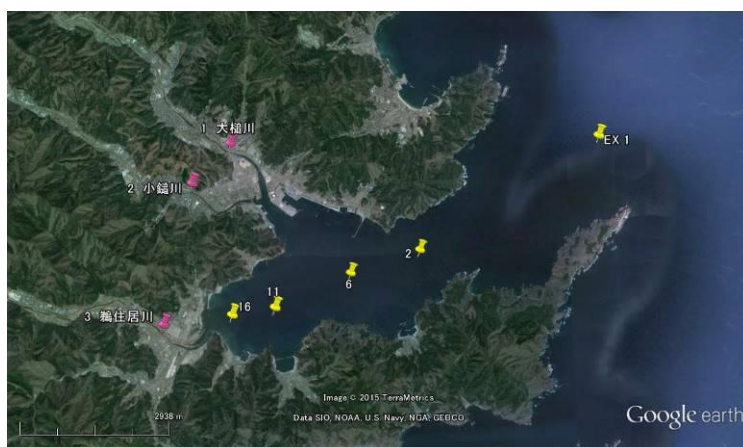


図 4-1 大槌湾および流入河川に設けた観測点

図 4-2 に測点 11 における塩分、水温、密度 ( $\sigma T$ ) の鉛直プロファイルの 2018 年度までの経時変化を示す。大槌湾は Hanawa and Mitsudera (1987) の三陸沖の水塊区分に従えば、5 月～10 月の夏季から秋季にかけては上層に表水系が流入する一方で、時として下層には津軽暖水の流入が見られるが、鉛直混合が盛んになる 11 月～1 月には湾内は津軽暖水により満たされ、2 月～4 月には親潮の流入も見られる。11 月～1 月の混合期の水塊は Hanawa and Mitsudera (1987) の分類に従えば津軽暖水に分類されるが、Tachibana et al. (2017) によれば、この時期の植物プランクトンの群集組成は続く親潮流入期のそれに近いものとなっており、また後述する三陸沖での溶存態無機炭素の  $\Delta^{14}C$  や栄養塩類の組成比からも、親潮系水の混合の痕跡が見られている (E. 三陸沖に分布する水塊の起源および栄養塩類・微生物群集の組成の解析を参照)。2～4 月は親潮が流入する時期ではあるものの、2016 年、2017 年の各春季には親潮の流入が見られず、水温は高い水準となっていた。湾内の溶存態・懸濁態物質については、震災二か月後から一年後までの期間に以下の顕著な現象が見られた (図 4-3、図 4-4)。(1) 2011 年 5 月～9 月：顕著な亜硝酸塩 ( $NO_2^-$ ) とケイ酸 ( $Si(OH)_4$ ) の顕著な蓄積と高濁度、(2) 2011 年 11 月～2012 年 3 月：顕著なリン酸塩 ( $PO_4^{3-}$ ) の蓄積と溶存態無機窒素の総和 (TIN) と  $PO_4^{3-}$  の比 (TIN/P=約 6) の低下 (詳しくは Fukuda et al., 2016; 福田ほか, 2017; 福田・永田 2017 を参照のこと)。亜硝酸塩の蓄積については、下水処理場の損壊や陸上または湾内での有機物分解に伴う低酸素環境の出現が考えられるが、同時期、陸上で水産加工施設などから流出した水産物の腐敗が進行しており、嫌気的環境で溶存化するマンガンのムラサキイガイへの蓄積が報告されている (Murakami-Sugihara et al., 2019)。ケイ酸の蓄積については、発生機構が不明であるが、濁度の上昇と合わせ、陸上から土砂の流入などが考えられる。秋季から冬季にかけての  $PO_4^{3-}$  の上昇については、濃度の上昇が秋季の海底より始まったことから、蓄積した有機物の分解に伴うものであると推測されるが、TIN/P の低さから、嫌気的環境における脱窒過程も進行したことが考えられる。2012 年度以降については、混合期 (10 月～1 月) および親潮流入期 (2 月～4 月) に震災前 TIN/P 比 (約 13) を越える値が見られるようになっていた (図 2.4.1-A4 詳しくは Fukuda et al., 2016; 福田ほか, 2017; 福田・永田 2017 を参照のこと)。この傾向は 2018 年度では顕著でなくなった (図 4-4)。各年代における TIN と  $PO_4^{3-}$  の関係の偏差を検討するために、三陸の沖合における TIN と  $PO_4^{3-}$  の関係 ( $TIN = 14.0 \times PO_4^{3-} - 0.941$ ,  $R^2 = 0.993$ ,  $n = 458$ ,  $p < 0.0001$ ; 福田ほか, 2017) を利用し、大槌湾で得られた  $PO_4^{3-}$  濃度の測値と上記の関係より求めた TIN の標準値 (TIN\*) と、大槌湾で得られた TIN の観測値の差 (TIN-TIN\*) を Excess TIN として震災前と震災後の各年代の間で比較を行った (図 4-5)。その結果、混合期については 2014 年度、2018 年度を除く各年度において、親潮流入期は 2012 年度と 2017 年度に有意高なった (Kruskal-Wallis test with Dunn's method  $p < 0.05$ )。混合期、親潮流入期はいずれも鉛直混合が盛んな時期であり、河川起源および海底起源の栄養塩類が水柱全体に広がる

る時期でもある。そこで震災以降の大槌湾の流入河川の栄養塩類の組成との比較を行った。大槌湾に流入する河川の栄養塩類の濃度については、大槌川・小槌川では震災以降、硝酸塩と亜硝酸塩の合計値 ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$  : 本報告書では比較を行っていないが、震災以前の文献値との比較の関係で河川については硝酸塩と亜硝酸塩は別個に解析せず、合計値を比較に用いた) では、それぞれ平均して年間で $-1.4 \mu\text{M}/\text{y}$ 、 $-1.6 \mu\text{M}/\text{y}$ の減少傾向が見られた一方で、鵜住居川では $1.4 \mu\text{M}/\text{y}$ の増加傾向が見られている(図 4-6)。またリン酸塩 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) については小槌川で $-0.02 \mu\text{M}/\text{y}$ と、わずかではあるが減少傾向がみられた一方で、鵜住居川では平均年間 $0.46 \mu\text{M}/\text{y}$ の増加傾向が見られた。大槌町では近年、その減少傾向は鈍ったものの、震災以降、人口の減少が見られており、また下水道の整備に伴う污水处理人口普及率も増加していることから、居住地域からの流入負荷の減少に伴って、河川水中の栄養塩類が減少したものと思われる。鵜住居川流域については、同地域の人口、污水处理人口普及率の統計が得られていないため、比較を行っていないが、栄養塩類の濃度の上昇は水産加工会社の上流域への進出などによるものと思われる。いずれの河川でも、見られた河川水中の栄養塩類の濃度の変化は TIN/P 比を 13 より低下させるものであり、湾内の Excess TIN の変化とは異なる傾向となっていることから、湾内で見られた相対的に窒素濃度が増加する傾向については湾内の堆積物から放出される栄養塩類の変化を反映している可能性が考えられる。2018 年度は混合期、親潮流入期共に Excess TIN の平均値が前年度よりも低くなっているが、震災以降見られていた傾向が解消されるのか、引き続き監視を行う必要がある。

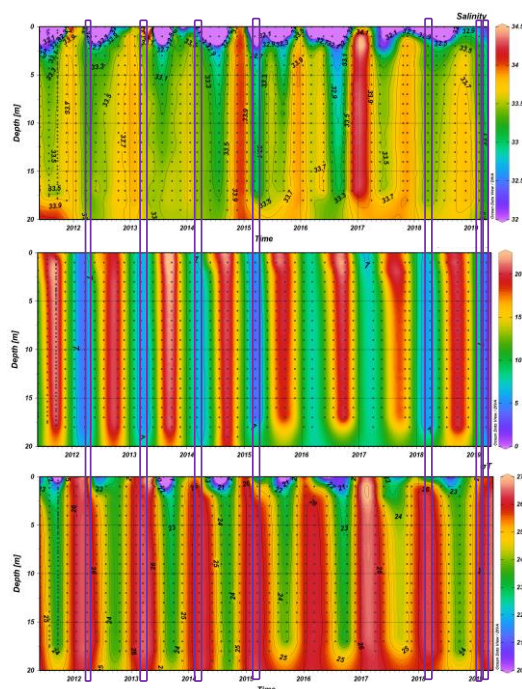


図 4-2 大槌湾の測点 11 における (上) 塩分、(中) 水温および (下) 密度 ( $\sigma T$ ) の



2011年5月から2018年3月までの経時変化。X軸の各年の表示は表記のある年の1月1日に相当する。Hanawa and Mitsudera (1987)の水塊区分で親潮系水に区分された期間を紫色の四角で示している。

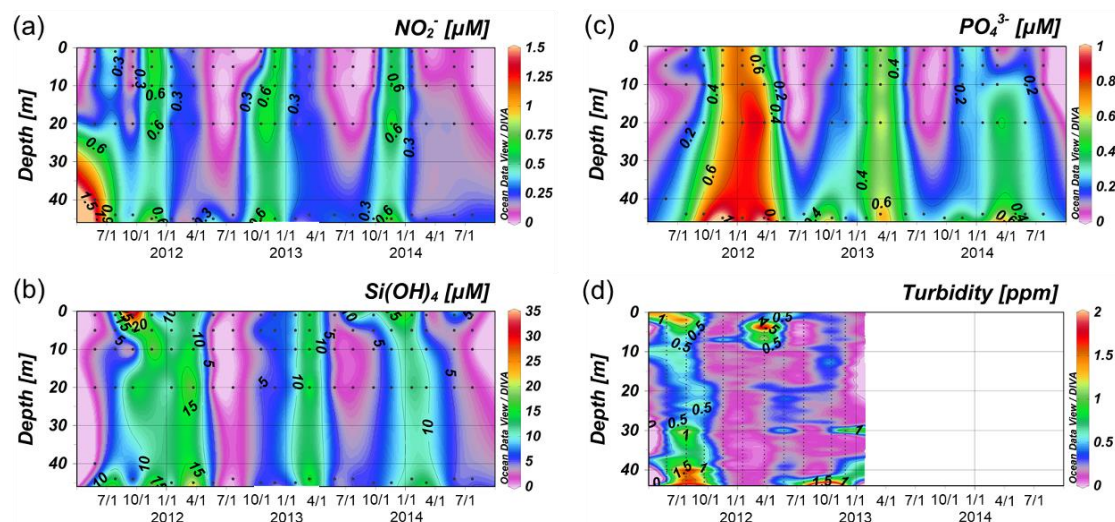


図 4-3 大槌湾の測点 2 における (a) 亜硝酸塩、(b) ケイ酸、(c) リン酸塩、(d) 濁度の鉛直プロファイルの経時変化 (2011 年 5 月～2017 年 7 月、濁度については 2011 年 11 月まで)。

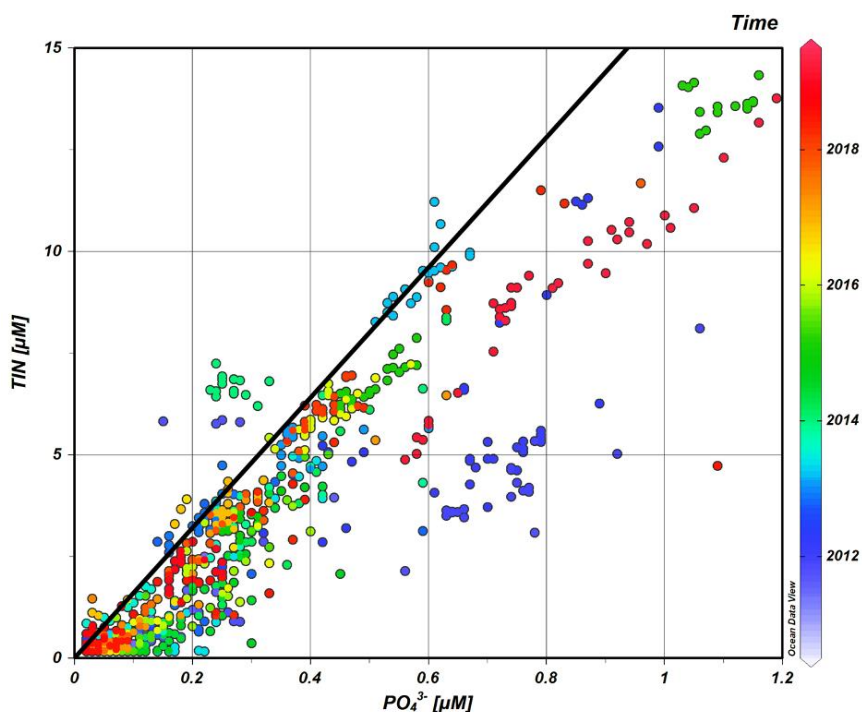


図 4-4 大槌湾における全無機態窒素 (TIN) とリン酸塩の関係。実線はレッドフィールド比を示している。

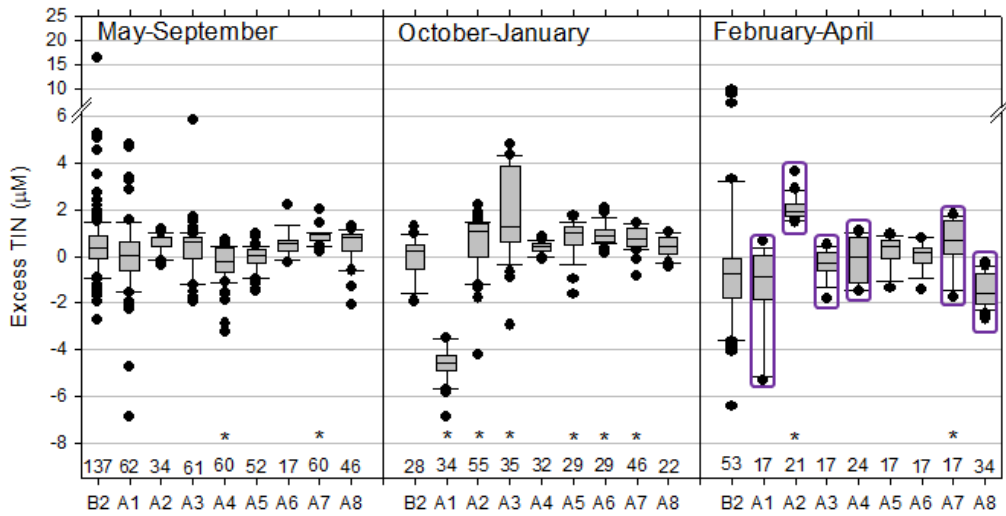


図 4-5 大槌湾の各時期（成層期：5月～10月、混合期：11月～1月、親潮流入期：2～4月）の各年代（B2: 1996–2008、A1: 2011年度、A2: 2012年度、A3: 2013年度、A4: 2014年度、A5: 2015年度、A6: 2016年度、A7: 2017年度、A8: 2018年度）における TIN の偏差の箱ひげ図。各箱の下の数字は試料数。震災前の B2 年代との間に有意差（Kruskal-Wallis test with Dunn's method  $p < 0.05$ ）が見られたものを★で示している。Hanawa and Mitsudera (1987)の水塊区分で親潮系水に区分された期間を紫色の四角で示している。

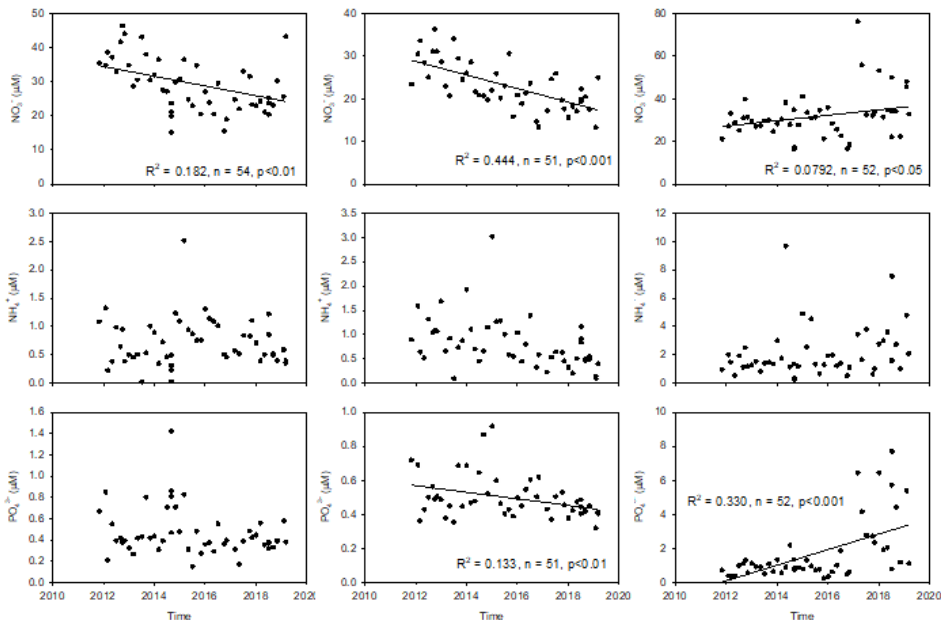


図 4-6（左列）大槌川、（中央）小槌川、（右列）鶴住居川における 2011 年度から 2018 年度までの（上）硝酸塩と亜硝酸塩の合計値 ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ )、（中）アンモニウム塩 ( $\text{NH}_4^+$ )、（下）リン酸塩 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 経時変化

#### 4-1-2 大型海藻の放射性炭素同位体比を用いた大槌湾内の水塊履歴の復元

炭素の同位体の一つである  $^{14}\text{C}$  は自然界に存在する放射性の核種であるが、大気中の窒素 ( $^{14}\text{N}$ ) と宇宙線が衝突することで生成する一方で、半減期 5730 年で放射壊変し、再び  $^{14}\text{N}$  となる。大気中に含まれる全炭素における  $^{14}\text{C}$  の割合はわずか一兆分の一程度に過ぎないが、5730 年という半減期が 2000 年程度の海洋の深層大循環の時間スケールに近いことから、地球規模での炭素循環を考える上で重要なトレーサーとなっている。大気中の  $^{14}\text{C}$  の存在比は上記の宇宙線による生成と放射壊変により一定の値に保たれているが、藻類を含む植物の光合成により有機物に取り込まれた後は、放射壊変によりその存在比が減少していく。 $^{14}\text{C}$  の存在比は標準物質と試料中の  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  の比から算出される  $\delta^{14}\text{C}$  値を  $\delta^{13}\text{C}$  値から算出される同位体分別の程度で補正した  $\Delta^{14}\text{C}$  値で表現され、大気中の二酸化炭素のプールから切り離されてからの年代の指標となっている。本研究では深層大循環を経た水塊が再び表層部に戻る亜寒帯北太平洋に起源をもつ親潮系水に含まれる溶存態無機炭素 (Dissolved inorganic carbon: DIC) の  $\Delta^{14}\text{C}$  値が、亜熱帯北太平洋の表層水を起源とする黒潮系水の DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値よりも相対的に低くなる性質を用い、三陸沿岸部の主要な養殖漁業の産物であるワカメ (*Undaria pinnatifida*) の藻体を構成する有機炭素の  $\Delta^{14}\text{C}$  値から、藻体の成長に対する親潮系水の寄与を検討することとした。本研究の詳細は Satoh et al. (2019) を参照して欲しい。

実験に使用した *U. pinnatifida* の種苗として全長 2 cm 以上に成長した個体がロープに付着したものを大槌町の漁業者より購入した。種苗が付着したロープは 2013 年 11 月 21 日より大槌湾の 3 か所 (国際沿岸海洋研究センターの海象筏、大槌川河口部、白浜漁港内) の水深 1~3 m に係留し、2013 年 4 月 8 日まで栽培した。栽培時には塩分・水温ロガー (Infinity-CTW; JFE Advantech Co, Ltd., Japan) も同時に係留し、10 分間隔で観測値を記録した。栽培中の 2014 年 3 月 3 日に藻体の成長点付近にパンチで穴 (直径 5 mm) を開け、成長速度を調べるための標識とした (図 4-7)。大槌湾に流入する水塊中の DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値を得るための試料を栽培を行った地点 (2014 年 1 月 21 日、3 月 3 日、4 月 8 日) および大槌湾に流入する河川 (2014 年 1 月 22 日、3 月 3 日、4 月 12 日) において採取したほか、2014 年 3 月 16、17 日には三陸沖の新青丸航海にて大槌湾沖および女川湾沖においても表層~水深 200 m までの試料の採取を行った。藻体および DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の測定は東京大学大気海洋研究所の Single-stage accelerator mass spectrometer (SSAMS, National Electrostatics Corporation, USA) にて行った。

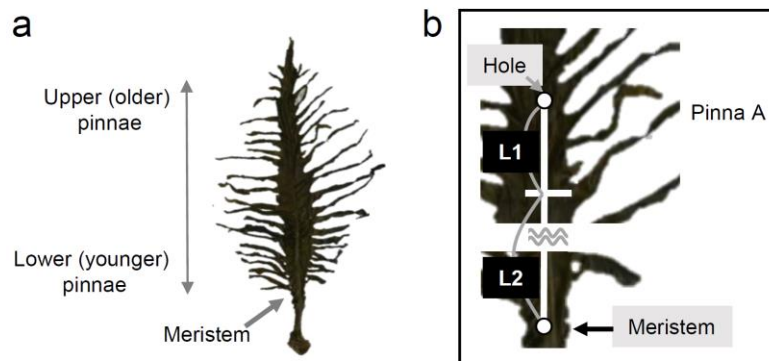


図 4-7 (a) *U. pinnatifida* の胞子体。新たな側葉 (pinnae) は分裂組織 (meristem) で生じる。(b) 実験に用いた個体間で側葉の位置を比較する際には、3月3日に開けた穴と分裂組織に対する位置関係を用いて標準化した。

大槌湾では例年ワカメの栽培を開始した 11 月から親潮の流入がある 2~4 月までの期間は湾全体で津軽暖水の占める寄与が高くなるが (Fukuda et al., 2016)、本研究の期間も 11 月 22 日から 3 月 5 日までのワカメの栽培地点での塩分の平均値は  $33.5 \pm 0.13$  であったが、3 月 6 日以降、親潮の流入を示唆する塩分の低下が見られた。それに対応するように栽培地点における DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は 1 月 21 日では  $17.5\text{‰} \pm 6.1\text{‰}$ 、3 月 3 日には  $15.7\text{‰} \pm 8.6\text{‰}$  であった一方で、4 月 8 日には  $-57.1\text{‰} \pm 20.7\text{‰}$  へと低下した。DIC の濃度や栽培地点での塩分などの検討から、これらの変化に対して河川水の寄与は僅かであることが明らかとなった。一方で 3 つの地点より得られた *U. pinnatifida* の個体 (計 8 個体) の収穫時における側葉の  $\Delta^{14}\text{C}$  の平均値については、上部 (古い) で  $3.0 \pm 5.4\text{‰}$ 、下部 (新しい)  $-23.6 \pm 7.5\text{‰}$  となり、両者の間には有意な差が見られた ( $p < 0.0001$ , Student's *t* test) (図 4-8)。側葉の  $\Delta^{14}\text{C}$  値に対する側葉間の物質の転流および側葉形成後の新陳代謝などの影響が考えられるが、本研究で見られた側葉の位置と  $\Delta^{14}\text{C}$  値の関係は、藻類の成長時期における藻体周辺の水塊の起源に関する情報を復元するツールとして用いることが出来る可能性を示している。これらの知見は、各地に保管されている海藻類の  $\Delta^{14}\text{C}$  値を調べることで海藻類の成長に影響を与えた当時の水塊の起源に関する情報を復元することに応用出来るほか、海藻のような一次生産者のみならず、その消費者を含む三陸地域の生物群集の成長に対する津軽暖水・親潮系水といった各水塊の寄与の定量的な解明に用いることが出来るものと期待できる。

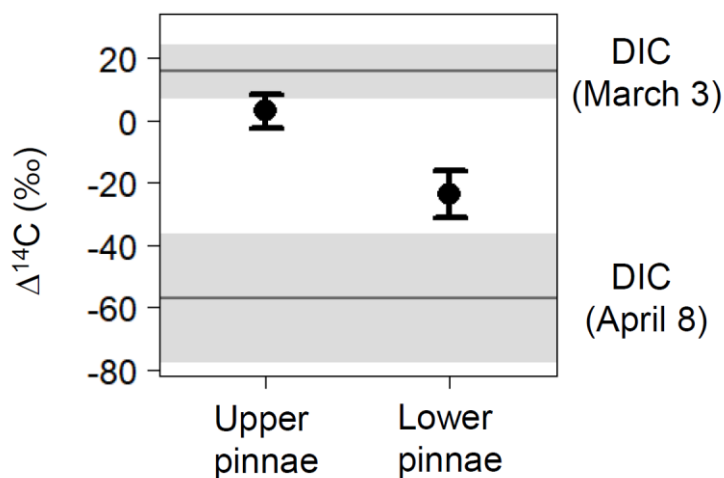


図 4-8 *U. pinnatifida* の側葉の上部（パンチ穴側）と下部（成長組織側）の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の平均値および標準偏差（全 8 個体）。灰色の直線および影は 3 月 3 日（パンチ穴を開けた日）および 4 月 8 日（収穫した日）の DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の平均値および標準偏差。

#### 4-1-3 放射性炭素同位体比を用いた大槌湾底棲生態系における炭素動態の解析

東日本大震災の被災地では、被災した護岸・防潮堤の復旧、新たな防潮堤・水門の建設、市街地のかさ上げといった、復旧・復興に向けた大規模な土木作業が行われている。この過程で生じる大規模な土砂の移動は、工事が行われている沿岸部に限らず、土砂の採掘などが行われる内陸部も含めた広大な地域の間で行われているほか、採掘された土砂の中には堆積されてから月日を経た年代の古い有機物が含まれているものと考えられる。大槌湾には大槌川・小槌川・鵜住居川の三つの河川が流入しているが、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う大津波により、鵜住居川の河口付近では大規模な浸食を受け、海岸線と海底地形が大きな変化しただけでなく、大量の陸起源有機物が湾内に流入したとされている。そこで本研究では、これらの年代の古い有機物が底棲無脊椎動物群集に取り込まれているとの仮説を立て、大槌湾の底棲無脊椎動物群集、堆積有機物（SOM）および懸濁態有機物（POM）の  $\delta^{13}\text{C}$  値、 $\delta^{15}\text{N}$  値および  $\Delta^{14}\text{C}$  値を測定することで、彼らを支える有機物の起源と年代を検討することとした。

2016 年 5 月から 2017 年 3 月の期間に大槌湾に設けた 20 の観測点（図 4-9）より、底棲無脊椎動物、SOM、POM および湾内の海水中の溶存態無機炭素（DIC）の同位体比を測定するための試料を採取した。SOM および無脊椎動物については水深 5~40 m の海底よりスミス・マッキンタイヤー採泥器を用いて採取した。無脊椎動物は目合い 1 mm の篩上に捕集し、海水中で一晩飼育し、消化管内の内容物を排出させた後、Milli-Q 水で洗浄し、 $-20^{\circ}\text{C}$  で凍結保管した。POM および DIC 分析用の試料は水深 1-79 m より 12-L ニ

スキン採水器を用いて採取した。POM は焼成した GF/F フィルター ( $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$  の各値分析用) または QMA クオーツフィルター ( $\Delta^{14}\text{C}$  値分析用) に採取した。無脊椎動物の試料は  $\Delta^{14}\text{C}$  値の測定に先立って凍結乾燥し、筋組織のみを用いた *Mercenaria stimpsoni* を除き、個体の全てを粉碎し粉末とした。体サイズの小さなものについて複数の個体を集め、一つの試料とした。SOM、POM、DIC および無脊椎動物の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は大槌湾でのワカメ場合と同じように  $\Delta^{14}\text{C}$  値を測定したほか (Satoh et al., 2019 参照)、 $\delta^{13}\text{C}$  値、 $\delta^{15}\text{N}$  値は大気海洋研究所の元素分析/質量分析システム (FLASH EA/Conflo IV/DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific) にて炭素・窒素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) を測定した。

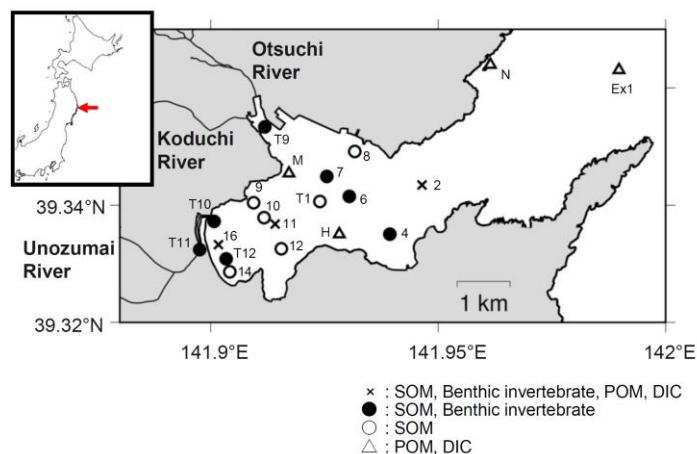


図 4-9 大槌湾の無脊椎動物、堆積有機物 (SOM)、懸濁態有機物 (POM) および溶存態無機炭素 (DIC) の採取地点。

SOM の  $\Delta^{14}\text{C}$  値および  $\delta^{13}\text{C}$  値はそれぞれ  $-321.1 \sim 30.1\text{‰}$  (慣用  $^{14}\text{C}$  年代は現代から 3046 yr BP) および  $-28.4 \sim -18.4\text{‰}$  であった。  $\Delta^{14}\text{C}$  値として最も変動が大きかったのは鵜住居川の河口付近であり、慣用  $^{14}\text{C}$  年代として 1000 yr BP より古い値が見られたのはこの付近のみであった。一方で大槌川・小槌川が合流する河口部付近では変動は小さく年代も鵜住居川の河口域に比べて近代に近い傾向が合った。SOM の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は  $\delta^{13}\text{C}$  値と負の相関がある一方で、TOC 含量、C/N 比と正の相関がみられた ( $p < 0.05$ )。通常  $\delta^{13}\text{C}$  値と C/N 比のみでは有機物の起源の解析は限られたものとなるが、これらと  $\Delta^{14}\text{C}$  値の直線的な正の相関から、大槌湾では SOM は年代・起源の異なる二つの有機物群の混合物であると示唆される。一方は近代 (高  $\Delta^{14}\text{C}$  値: 約  $0 \sim 50\text{‰}$ ) に  $\text{C}_3$  陸上植物により生産され (高  $\delta^{13}\text{C}$  値: 約  $-28\text{‰}$ 、高 C/N 比:  $18 \sim 20$ ) の寄与が高く、かつ高い有機物含量 (高 log TOC: 約 1.0) の有機物群である。これらの有機物群の寄与は大槌川・小槌川の河口部で特に高く、これらが河川により運ばれてきた陸起源物質であることを示唆している。も

う一方は、年代が古く（低 $\Delta^{14}\text{C}$  値： $<-100\text{‰}$ ）、海洋の植物プランクトンに生産され（低 $\delta^{13}\text{C}$ ：約 $-20\text{‰}$ 、低C/N比：6~8）、かつ低い有機物含量（低log TOC：約 $-1.0$ ）の有機物群である。大槌湾には亜寒帯起源でDICの $\Delta^{14}\text{C}$  値が低い親潮系水（約 $-78.0\text{‰}$ 、下記参照）の流入も見られるが、SOMで最も $\Delta^{14}\text{C}$  値が低いものは $-300\text{‰}$ と、親潮系水で生産された有機物よりも古いものとなっており、これら年代の古いSOMは堆積岩由来である可能性も考えられる。POMの $\Delta^{14}\text{C}$  値および $\delta^{13}\text{C}$  値はそれぞれ $-150.0\sim-4.0\text{‰}$ （慣用 $^{14}\text{C}$  年代は現代から1240 yr BP）および $-25.0\sim-19.8\text{‰}$ であった。またPOMの $\Delta^{14}\text{C}$  値はPOCの濃度と正の相関があったが、SOMの場合とは異なり、 $\delta^{13}\text{C}$  値と正の相関、C/N比とは負の相関が見られた（ $p<0.05$ ）。POMで見られた $-150.0$ という低い $\Delta^{14}\text{C}$  値は、採水時のDICの $\Delta^{14}\text{C}$  値（ $3.2\sim34.8\text{‰}$ ）よりも低く、DICを取り込んで生産された有機物に年代の古い有機物が混合していたものと思われる。POMで低い $\Delta^{14}\text{C}$  値と低い $\delta^{13}\text{C}$  値を示したものは、SOMの分布と重なっており、これらの古いPOMはSOMが再懸濁したものである可能性が考えられる。近代に生産されたPOMはその $\delta^{13}\text{C}$  値から、SOMとは異なり、海洋の植物プランクトンにより生産されたものが主であると考えられる。無脊椎動物の $\Delta^{14}\text{C}$  値は全体として $-10\sim40\text{‰}$ で変動しており、分類群間では有意な差が見られなかった（ $p>0.05$ ）。一方で無脊椎動物の $\delta^{13}\text{C}$  値は全体として $-23.5\sim-15.9\text{‰}$ で変動しており、 $\Delta^{14}\text{C}$  値との間に負の相関がみられた（ $\Delta^{14}\text{C}=-32.6+2.7\times\delta^{13}\text{C}$ ,  $n=45$ ,  $r^2=0.273$ ,  $p<0.001$ ）。彼らの $\Delta^{14}\text{C}$  値はSOMやPOMより高く、変動幅は狭い傾向にあり、DICの変動範囲内であった。 $\delta^{13}\text{C}$  値の変動は各分類群で陸起源有機物と海洋起源有機物の依存の仕方違いがあることを示しているが、 $\Delta^{14}\text{C}$  値での結果は、大槌湾の底棲無脊椎動物が近代に生産された有機物のみ選択的に消費していることを強く示している。他の環境では微生物群集による年代の古い有機物の代謝と、これらの微生物群集の捕食者を介した上位の栄養段階への取り込みが報告されているが、本研究では大槌湾の底棲無脊椎動物はその痕跡が見られていないことから、今後、有機物の化学的性状や微生物群集の応答などについても検討が必要である。

#### 4-1-4 環境 DNA を用いた大槌湾魚類相の把握

大槌湾にて実施した環境モニタリングの際に採取した堆積物に含まれる生物由来のDNA（環境DNA）を用い、魚類相の変遷を明らかにすることを試みた。堆積物中の汚染物質を含む諸成分の経時変化については、5節「陸域由来の環境汚染物質の流入実態」を参照して欲しい。

近年、環境中に存在する生物種を簡便かつ網羅的に把握できる技術として、水や土壌中に存在する生物由来のDNA（環境DNA）を用いたメタバーコーディング（多種同時検出）解析が注目されており、これまでに河川水や海水などの水試料を対象として、魚類相の把握にも数多く適用されている。水試料に含まれる環境DNAは比較的速やかに分

解されるため、採水時の魚類相を反映すると考えられる一方で、土壌や堆積物試料には、環境 DNA が数ヶ月以上残存することが知られているため、海洋堆積物には過去の魚類相の履歴を保存されている可能性がある。そこで本研究では、環境 DNA を用いた魚類相のメタバーコーディング解析を行うことで、津波被害からの回復過程における魚類相経時変化を明らかにすることを試みた。

大槌湾中央部の測点 2、釜石市箱崎町港外の測点 6、湾奥部の測点 11 の三か所より、2011 年 9 月、2012 年 9 月、2017 年 10 月にスミス・マッキンタイヤー型採泥器を用いて堆積物を採取した (図 4-10)。堆積物サンプルは、60 ml 容の DNA/RNA フリーの滅菌容器 (VSC-10, ASONE) に入れ、 $-75^{\circ}\text{C}$  で冷凍保存した。堆積物試料の DNA 抽出には、土壌や堆積物試料から DNA を抽出する際に用いられる PowerSoil<sup>®</sup>DNA Isolation Kit (MOBIO) および DNeasy<sup>®</sup> PowerSoil<sup>®</sup> Kit (QIAGEN) を用いた。DNA 抽出はキットの標準プロトコルに従い行った。魚類 DNA を選択的に増幅するために、PCR には環境 DNA メタバーコーディング用のユニバーサルプライマーである Mifish プライマーを用いた (フォワードプライマー :  $5' -\text{ACACTCTTTCCTACACGACGCTCTCCGATCT-NNNNN-GTCG GTAAACTCGTGCCAGC-3}'$  )、リバースプライマー :  $5' -\text{GTGACTGGAGTTCAGACGTGTGCTCTCC GATCT-NNNNN-CATAGTGGGTATCTAATCCCAGTTG-3}'$  )。ポジティブコントロールとして、大西洋サケの DNA を用いた。次世代シーケンシングにおいては、PCR の際に付加したサンプル固有のインデックス配列を読み取ることで、どのサンプル由来の DNA 配列であるかをコンピュータ上で判別できることから、PCR により増幅した DNA をテンプレート DNA として、サンプル識別のためのインデックス配列を付加した Mifish プライマーを用いた 2nd PCR を行った。なお、PCR 結果の偽陰性を避けるため、PCR を 2 回行い、それを混合したものを 2nd PCR のテンプレート DNA とした。これらを次世代シーケンサー Miseq (Illumina) を用いてシーケンシングを行い、得られた遺伝子情報 (リード) は、USEARCH ソフトウェアを用いて分類して OTU (Operational Taxonomic Unit) 解析を行った。その後、魚類の遺伝子配列が大量に登録されているデータベース BLAST (Basic Local Alignment Search Tool, National Center for Biotechnology Information) によって、得られたリードを照合し、魚種の判定を行った。なお、本実験ではポジティブコントロールに由来すると見られるコンタミネーションにより、大西洋サケの遺伝子配列が頻繁に検出されたが、本種は国内には生息しないため、当該遺伝子が検出された場合は結果から除外した。

遺伝子データベース BLAST によって照合し、魚種の判定を行った結果、今回の調査全体では、ヒメジ (*Upeneus japonicus*)、コモチジャコ (*Amblychaeturichthys sciiistius*)、モヨウハゼ (*Acentrogobius pflaumi*)、ヒラメ (*Paralichthys olivaceus*)、イカナゴ (*Ammodytes personatus*)、マガレイ (*Pseudopleuronectes herzensteini*)、リュウグウハゼ (*Pterogobius zacalles*)、マイワシ (*Sardinops melanostictus*)、カタクチイワシ (*Engraulis japonicus*)、マサバ (*Scomber*



*japonicus*)、サンマ (*Cololabis saira*)、サケ (*Oncorhynchus keta*)、マダラ (*Gadus macrocephalus*)、クロダイ (*Acanthopagrus schlegelii*)、ヒラマサ (*Seriola dumerili*)、ブリ (*Seriola quinqueradiata*)、ニジマス (*Oncorhynchus mykiss*) の 17 種が検出された。検出種数が多い地点は測点 2(3-6 種)で、少ない地点は測点 4 であった (1-2 種)。4 か年で検出種の変化が見られ、2011 年と 2012 年では、マサバ、サンマ、サケ、ヒラマサの回遊性魚類 4 種が共通して検出されたが、2017 年では、マイワシ、カタクチイワシ、サンマ、ブリの回遊性魚類のほかに、底生魚種であるマガレイが初めて検出された。そして、2019 年では、マイワシ、カタクチイワシ、サンマの回遊性魚類のほかに、2011、2012、2017 年には検出されなかったヒメジ、コモチジャコ、モヨウハゼ、ヒラメ、イカナゴ、リュウグウハゼを含む 7 種の砂泥地を生息地とする魚種が検出された (図 4-11)。また、調査年が経つにつれて、回遊性魚類よりも底生魚種のリードが多く検出されるようになった。この結果は、三陸沿岸域で行われた他の目視あるいは曳網による観測結果と整合的であり、堆積物に含まれる魚類の環境 DNA の組成が、震災後の魚類相の変遷過程を表している可能性が示唆された。本研究の結果より、環境 DNA を用いた魚類相のメタバーコーディング解析を海洋堆積物試料に適用できる可能性が示された。しかし、魚類 DNA の増幅が未確認のサンプルが存在するなど、手法上の課題も依然として残っており、より正確な魚類相の変遷過程を把握するためには、魚類 DNA を選択的に増幅し、より多くのリード数を得ることができる PCR 条件を検討する必要がある。

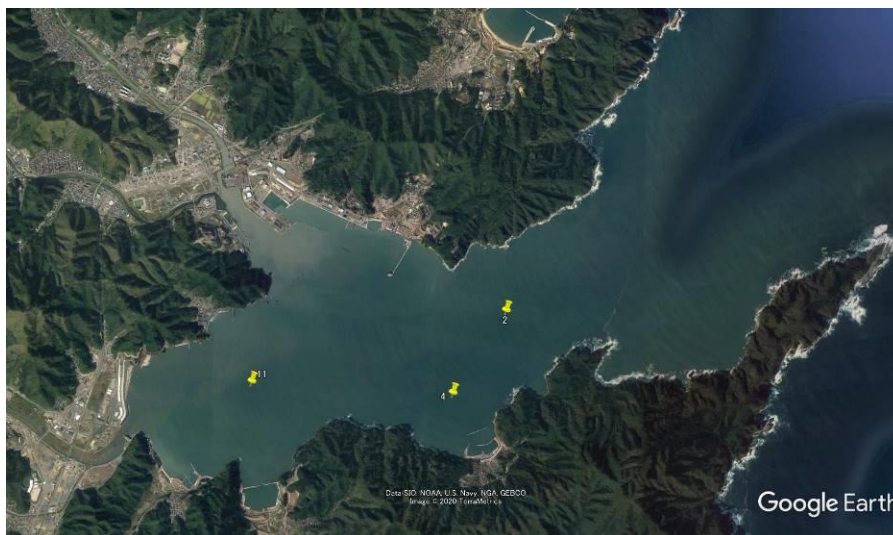


図 4-10 大槌湾における環境 DNA 抽出用堆積物の採取地点

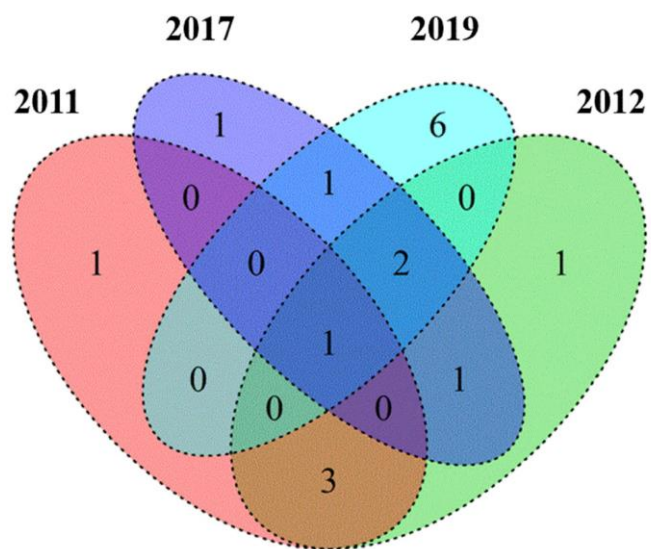


図 4-11 解析を行った四ヶ年の検出種の関係

#### 4-1-5 三陸沖に分布する水塊の起源および栄養塩類・微生物群集の組成の解析

三陸沖の表層部には、北東部から亜寒帯北太平洋を起源とする親潮系水が流入する一方で、東部や南部から亜熱帯北太平洋を起源とする黒潮から派生した黒潮系水から成る水塊や暖水渦、そして北部からは津軽海峡を通過してきた黒潮を起源とする津軽暖水が流入している。三陸沿岸部の内湾域にはこれらが流入するほか、河川を通じて淡水も流入しており、湾内の溶存態・懸濁態物質および生物群集は多様な起源を群集の集合であり、その動態は複雑な機構により制御されている。Hanawa and Mitsudera (1987)は塩分、水温、密度を用いて水塊の区分を試みているが、密度の軽い水塊の総称となっている表層系水は、大槌湾の様な内湾域では季節的に優占することもある重要な水塊であるにもかかわらず、その起源が明確ではない。また大槌湾では Hanawa and Mitsudera (1987)による水塊区分では亜熱帯起源の津軽暖水とされる水塊から亜寒帯に特徴的な浮遊生物が観察されており (A. 大槌湾の栄養塩類動態の遷移過程を参照)、三陸沖に分布する水塊の起源および水塊と共に移動する栄養塩類を含む溶存態・懸濁態物質および微生物群集に対してより詳細な解析を行う必要性が生じた。また震災後の内湾域に栄養塩類の組成に生じた変化の原因を検討するために内湾域に流入する水塊の基礎情報を取得する必要も生じた。本研究では三陸沖における栄養塩類の濃度・組成の基礎情報を蓄積すると共に、塩分・水温に代わる水塊の起源のトレーサーとして栄養塩類の組成および溶存態無機炭素 (DIC) の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の有効性を検討したほか、それらを利用して微生物群集の群集組成の変動機構の解明を試みた。

調査航海は 2012 年度から開始し、2019 年度末までの段階で、調査船淡青丸 (KT-12-08、KT-12-20、KT-12-27、KT-13-02)、第三開洋丸 (KK-13-01、KK-13-06)、新青丸 (KS-13-01、KS-14-02、KS-14-04、KS-14-14、KS-14-19、KS-15-01、KS-15-10、KS-15-12、KS-16-01、KS-16-18、KS-17-01、KS-17-03、KS-17-06、KS-17-12、KS-18-02、KS-18-08、KS-19-04、KS-19-07、KS-19-20) の計 25 航海を実施している。大槌湾および女川湾のそれぞれの湾内から沖合にかけて設定された観測線および釜石湾内に設けられた観測地点 (図 4-12) において、CTD を用いた水温、塩分の測定ならびにニスキン採水器を用いて各層より海水を採取した。栄養塩類は連続流れ式自動分析機 (AACSI III または AACSI II、BL テック) を用いた比色法で定量した。また水塊の起源を特定するために硝酸塩 ( $\text{NO}_3^-$ ) とリン酸塩 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) の相対的な関係を示す  $\text{N}^*$  (Gruber and Sarmiento, 1997) を用いた。

この  $\text{N}^*$  は深層大循環を経て大気から切り離されてからの年代の古い海水では、脱窒により相対的に窒素が低くなっていることが報告されており、亜寒帯起源の親潮系水では低くなることが予想された。一方で窒素固定が盛んな西部北太平洋亜熱帯域を起源とする黒潮系水・津軽暖水での同値は高くなることが予想される。本研究では海洋表層部での解析を行ったことから、 $\text{NO}_3^-$  の代わりに全溶存態無機窒素 (TIN) を用いた。また、KS-

14-02 次航海以降では、N\*と同様に大気から切り離されてからの年代が古くなると低い値をとる溶存態無機炭素 (DIC) の  $\Delta^{14}\text{C}$  値も利用することとした。DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の分析については大槌湾での研究 (B. 大型海藻の放射性炭素同位体比を用いた大槌湾内の水塊履歴の復元) と同様に行った。また KS-17-03 次航海以降では、水深 10 m および 50 m より採取した海水 5 L をガラス繊維ろ紙 (GF/F) でろ過し、ろ紙に捕集された画分に含まれる DNA の 18S rRNA の V9 領域を PCR で増幅しライブラリーを作成した。得られた配列より解析に耐える OTU を選別したのちに BLAST 解析をかけ核酸配列データベース (INSDC) との比較を行った。

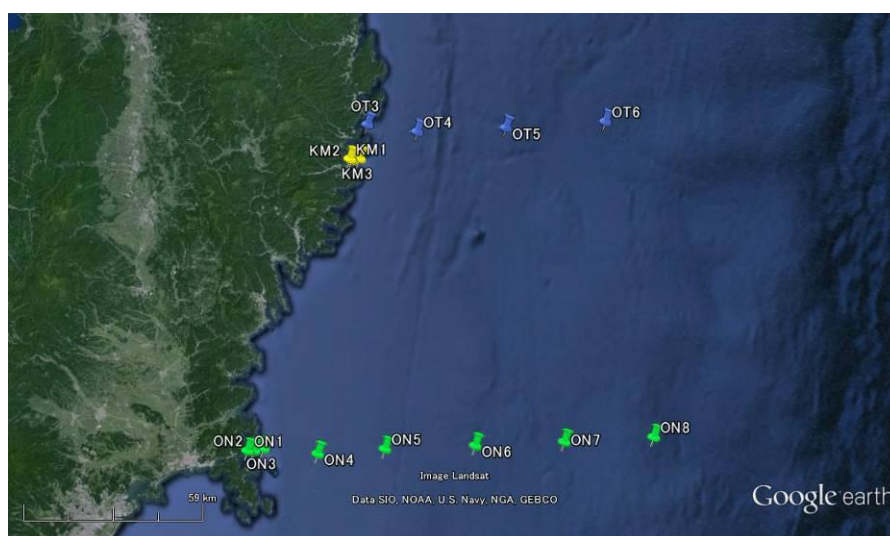


図 4-12 大槌湾・女川湾およびその沖合、さらに釜石湾の観測点

N\*が水塊の地理的な起源を保存するためには、TIN ならびに  $\text{PO}_4^{3-}$  に対する生物群集による取り込み・放出がレッドフィールド比 (N:P=16:1) に従う必要があるため、その解釈には注意が必要である。一方で DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は同位体分別の影響を取り除いた値が得られるため、水塊の起源を保存しているものと考えられるが、試料の処理・測定に費用と時間を要するという難点がある。そこで N\*および DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の間の関係を比較したところ、両者の間には有意な正の相関がみられたことから (図 4-13)、三陸沖における混合過程では、生物群集による取り込み・放出がレッドフィールド比に従うものと仮定し、N\*は水塊の起源の判定に有効であることが明らかとなった。N\*と水温・塩分の関係を比較すると Shimizu et al. (2001) の報告にあるように、津軽暖水と親潮系水の境界部のほぼ等密度線上で両者の混合が起きてことが明らかとなった (図 2.4.1-E3)。大槌湾では湾内が津軽暖水で満たされる冬季に亜寒帯系の植物プランクトンが見られることが報告されているが (Tachibana et al., 2017)、図 2.4.1-E3 が示すように、水温  $10^\circ\text{C}$  未満の津軽暖水では親潮系水との混合が起きており、矛盾しない結果となった。また表層系水と分類されるものの中でも水温  $7^\circ\text{C}$  未満の水塊は主に亜寒帯に由来し、水温

12°C以上の水塊では黒潮系の寄与が高いことが明らかとなった（図 4-14）。KS-17-03、06、12 次航海および KS-18-02 次航海の計 4 航海にて回収した DNA より、18S rRNA の V9 領域を PCR で増幅することで得られたライブラリーから、解析に耐えうる 59895 の OTU を得た。そのうち INSDC のデータベースとの比較より、種名まで判明したものは 2407 であった。この種名まで判別できたものの中に水産上重要なシガテラ毒の原因となる、*Gambierdiscus australes*、*Prorocentrum emarginatum*が含まれていたものの、マヒ性貝毒、下痢性貝毒の原因となるプランクトンは含まれていなかった。出現数の多かった *Thalassiosira* 属の 2 種についてそれぞれの OTU の出現頻度（試料内の全 OTU に対する各種の OTU の出現数の割合）と水温、塩分、 $N^*$ との比較を行った（図 4-15）。熱帯から亜熱帯で出現するとされている *Thalassiosira minima* は  $N^*$ で-3~2 の広い範囲で出現しており、亜寒帯を起源とする水塊からも検出されたが、水温が 10°C未満の条件で特に出現頻度が高まること明らかとなった。また温帯から亜寒帯に出現するとされている *Thalassiosira concaviuscula*については、Hanawa and Mitsudera (1987)の水塊区分では表層水系とされる水塊で出現頻度が高ったが、これらの水塊では  $N^*$ は>1 となっており、主に亜熱帯を起源で出現することが本研究により明らかとなった。今後も採取した試料に対し、貝毒プランクトンの塩基配列の収集など行いながら解析を継続していく。

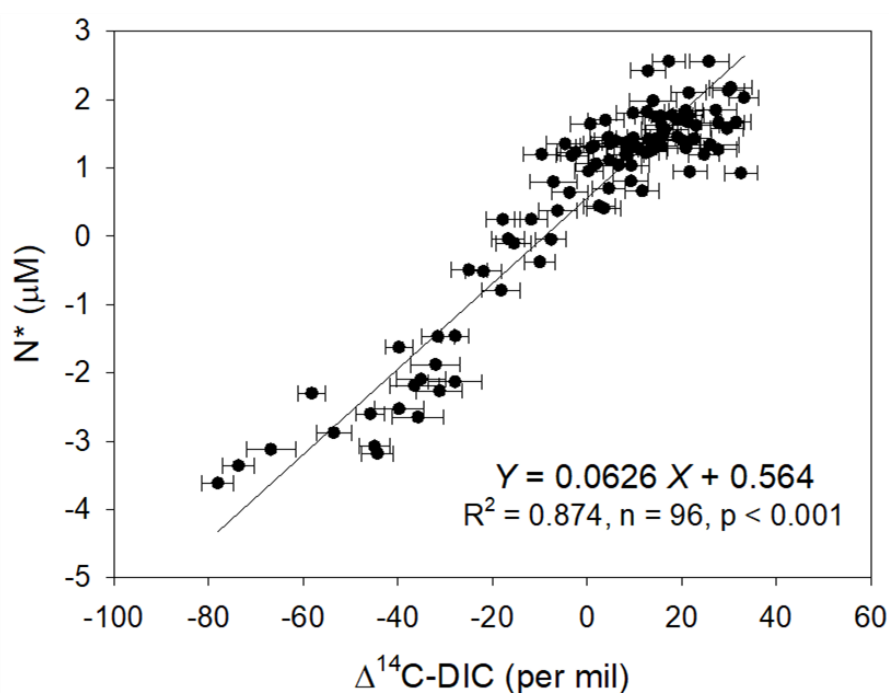


図 4-13 大槌湾沖、女川湾沖における  $N^*$  (Gruber and Sarmiento, 1997) と溶存態無機炭素 (DIC) の  $\Delta^{14}C$  値の関係。水平方向のエラーバーは分析時の標準偏差。

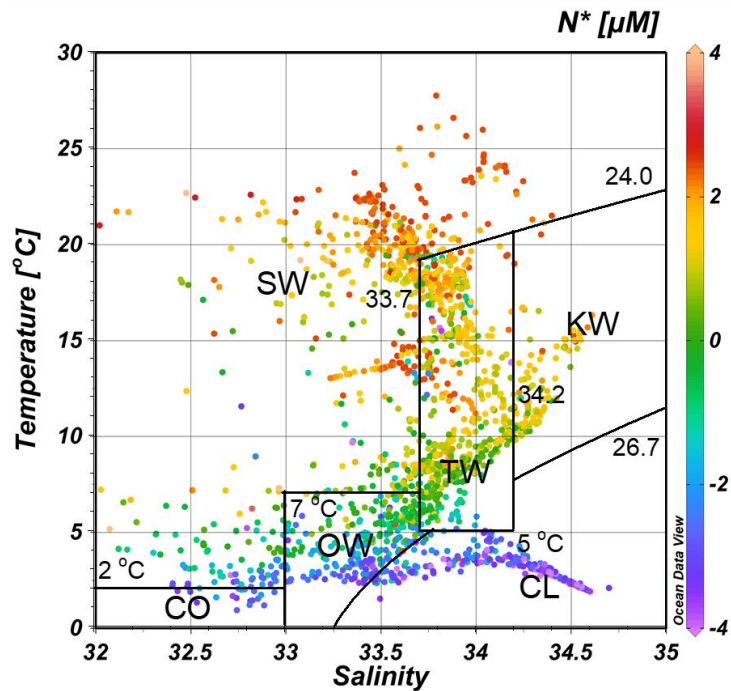


図 4-14 大槌湾沖、女川湾沖における水温・塩分と  $N^*$  の関係。図中の水塊区分は Hanawa and Mitsudera (1987) に従った。SW：表層系水、CO：沿岸親潮系水、OW：親潮系水、TW：津軽暖水、KW：黒潮系水、CL：低温低層水。

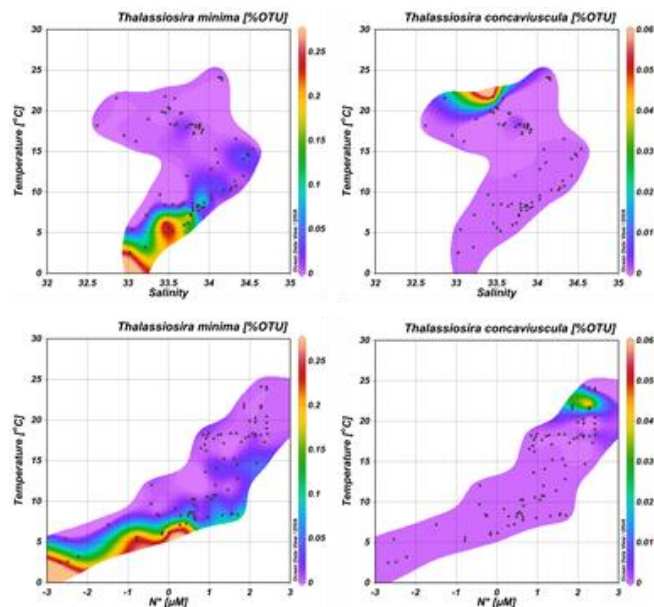


図 4-15 三陸沖の水深 10 m および 50 m における試料内の全 OTU に対する、*Thalassiosira minima*、*Thalassiosira concaviuscula* の各 OTU の出現数の割合と (上段) 水温・塩分および (下段) 水温  $N^*$  の間の関係。

#### 4-1-6 放射性炭素同位体比を用いた三陸沖底棲生態系の餌資源の起源解析

高深度に生息する底生生成物群集は、熱水噴出孔の周辺などを除いて、餌の供給源として海洋表層における一次生産に依存している。海洋表層部において植物プランクトンなどに生産された有機物の一部は、植物プランクトンの凝集物や、生物群集の糞粒、殻、死骸、そしてマリンスノーなどの沈降物として深海底に運ばれるが、この過程は結果的に大気中の二酸化炭素を深海底に貯留することになることから「生物ポンプ」とも呼ばれている。しかしながら有光層以深に沈降した有機物の多くは水柱内で消費され、深海底に到達するのは一次生産物の1%程度の極少量にすぎないことから、底生生物群集は餌資源の乏しい極限環境に生息していると考えられている。三陸沖は亜寒帯起源の親潮系水と亜熱帯起源の黒潮系水・津軽暖水が流入する複雑な構造をもつ海域であるが、冬季から春季では親潮系水の流入と共に栄養塩類の濃度と植物プランクトンのバイオマスがともに増加する一方で、亜熱帯起源の暖水が卓越する夏季から秋季にかけてはこれらが低い水準となる傾向にあり、表層部の生物生産の規模が流入する水塊により支配される海域となっている (Shiozaki et al., 2014)。三陸沖は世界三大漁場であり、底生魚類は主要な漁獲物の一つであるが、底棲生態系と海洋表層の水塊構造との関係を検討した例はこれまでにない。本研究は大槌湾と女川湾の沖合を対象として、三陸沖の底棲無脊椎大型動物の炭素・窒素の安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) を測定すると共に、放射性炭素の存在比 ( $\Delta^{14}\text{C}$  値) を測定することで、その食性と三陸表層に流入する亜熱帯起源および亜寒帯起源の各水塊の生産物に対する依存性を検討した。

解析に用いた底棲無脊椎動物は2016年11月に実施された新青丸KS-16-18次航海にて、大槌湾沖および女川湾沖の水深871~2988 mよりビームトロールを用いて採取した。採取した試料は解析までの間、 $-20^{\circ}\text{C}$ で凍結保管した。本研究では三種の摂餌形式をもつ7類を対象とした。沈積物食者：*Scotoplanes* sp. (Holothuroidea)、*Bathyploetes* sp. (Holothuroidea)、*Parastichopus* sp. (Holothuroidea)、懸濁物食者：*Limopsis belcheri* (Bivalvia)、肉食者：*Neptunea* spp. (Gastropoda)、*Pterasteridae* sp. (Asteroidea)、*Solasteridae* spp. (Asteroidea)。これらは各分類群毎に3~6個体をランダムに選び、同位体比の解析に供した。*Bathyploetes* sp.、*Parastichopus* sp.、*L. belcheri* および *Neptunea* spp. については筋組織を、*Scotoplanes* sp. は筋組織およびポーリ囊を、*Pterasteridae* sp. および *Solasteridae* spp. については生殖腺を凍結乾燥した後に塩酸の上記にて無機態炭素を除去した。試料は前出の大槌湾でのワカメ場合と同じように  $\Delta^{14}\text{C}$  値を測定したほか、大気海洋研究所の元素分析/質量分析システム (FLASH EA/Conflo IV/DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific) にて炭素・窒素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ) を測定した。

各分類群の  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  の平均値は大きく変動し、7つの分類群間に有意な差が見ら

れた (ANOVA with Bonferroni correction)。また  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  の間には有意な相関がみられた ( $\delta^{15}\text{N}=0.84 \times \delta^{13}\text{C}+26.4$ ,  $n=29$ ,  $r^2=0.43$ ,  $p<0.001$ )。これらの結果は各分類群が同じ摂餌形式であっても餌資源が極端に乏しい海底環境で異なるニッチを占めているを示唆しており、また一部の種では同種内でもニッチが異なることを示唆している。また各分類群の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は-58.2 から-9.3‰の間で変動しており、同じ観測ライン上であっても分類群間で異なる値となっていた。大槌湾沖では *Solasteidae* の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は *Bathyploetes* sp. および *Scotoplanes* sp. のそれらよりも有意に高かった (ANOVA with Bonferroni correction,  $p<0.05$ )。一方で女川湾沖では *L. belcheri* の  $\Delta^{14}\text{C}$  値は他の三つの分類群 (*Bathyploetes* sp.、*Parastichopus* sp.、*Neptunea* sp.) よりも有意に低かった ( $p<0.05$ , ANOVA with Bonferroni correction)。しかしながら摂餌形式との間には明確な関係が見られなかった。親潮系水および黒潮系水の DIC の  $\Delta^{14}\text{C}$  値の平均値をエンドメンバーとして、それらの二者混合系と仮定して親潮系水の炭素の寄与率を見積もった。親潮系水の炭素の寄与率 *L. belcheri* で最も高く (中央値: 91%, 95%信頼区間: 83-99%)、*Solasteridae* spp. で最も低くなった (中央値: 42%, 95%信頼区間: 38-48%)。他の分類群は中間的な値をとっていたが、大槌湾沖では約 80%、女川湾沖では約 60%であった。これらの地域に親潮系水が流入する期間は年間で一〜二か月程度であるものの、底棲無脊椎動物群集の主要な炭素源となっていることが本研究で明らかとなった。これらは親潮系水での高い生物生産と深海底への高い輸送効率によるものと思われるが、本研究で見られた底棲無脊椎動物群集の親潮系水の生産力への強い依存は、地球温暖化に伴う親潮南限域の北上に対し、底生生態系の生産力が影響を受ける可能性を示している。底生生態系の生産力に対する海洋表層部の流況の役割を検討するために、長期的なモニタリングと時空間的により詳細な知見の蓄積が求められる。

#### 4-2 復興への貢献

カキ・ホタテ・ホヤ・ワカメ・コンブの無給餌養殖は、三陸地域の内湾域における主要な漁業活動であるが、これらの生物の生育は湾口外に広がる太平洋との海水交換ならびに河川や湧水などにより供給される栄養塩類により直接的、間接的に支えられており、栄養塩類の状況の把握は無給餌養殖の再開に不可欠である。被災地では震災以前から無給餌養殖の従事者を含む、漁業者の高齢化が進んでいたことから、震災を機に廃業を考える声が漁業者の間から上がっており、被災地の産業衰退・人口減少を防ぐ観点からも、被災地の漁業者の方々に栄養塩類の現況の周知は急務であった。そこで本研究の結果により明らかになった大槌湾の栄養塩類環境の現状については、シンポジウムや報告会などを通して漁業者・行政関係者を含む一般の方々に積極的に報告することを心がけた。大槌湾の栄養塩類の状況に関しては、本事業の開始直前 2011 年 12 月に東京大学大気海洋研究所と大槌町により、同町中央公民館にて開催された「三陸沿岸生態系に対する大



津波の影響と回復過程に関する研究報告会」を皮切りに、表 4-2 に示したシンポジウムや報公会にて紹介した。また、被災地の子供たちに対しても依頼を受けた出前授業など機会に海の当時の様子を紹介してきた(表 4-3)。震災から僅か九か月ほどの 2012 年 11 月 13 日に大槌町立大槌・安渡・赤浜・大槌北合同小学校(現、大槌学園)の六年生に対して「海のいろの話」と題した授業を行った際の出来事であるが、「海はもう立ち直れないほど汚れてしまったのだから、大槌はもうおしまいだ。」という生徒さんの言葉が印象的だった。その生徒さんに話を詳しく聞いてみると、マスコミ、特にテレビなどで報道される、一部の地域で見られた海底への汚泥や重油の蓄積や、瓦礫の山といった事例が、三陸沿岸部の普遍的な状況として受け取られているようであった。その場は本事業の他のグループによる海中の瓦礫の分布調査の結果なども紹介し、深刻な汚染などは見られていないことを伝えたが、被災地への多くの誤解の蔓延と、調査結果の発信の必要性を強く感じた。

また、大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センターの職員らと共に大槌町の広報誌「広報大槌」にて、「おおつち海の勉強室」と題した連載を行い被災海域の現況のみならず、漁業に直接結びつく海洋学の普及にも努めた(表 4-4)。この広報誌での連載は、岩手日報での連載記事「さんりく海の勉強室」に引き継がれ、2020 年 3 月の段階でも継続している。

2015 年 5 月には、大槌でのホタテの無給餌養殖を営む漁業者より、「大槌湾の海底付近の溶存酸素の分布状況に不安を感じている。」との声を受けたことから、それまでの 4 年間で得られた水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル濃度の調査結果を配布し、秋季の鉛直混合が盛んになる一時期を除いて、溶存酸素は水産一級の基準を下回ることはなかったことを説明した。この結果の配布を契機に、震災を機に新たにホタテの無給餌養殖に算入された漁業者の訪問を受けることとなった。大槌湾内部の循環の特性について紹介したが、漁業者側からも経験的にホタテが良く育つ地点・水深の情報が寄せられ、その周辺での藻類の分布状況に対する調査を実施することとなった。当初は漁業者に水圧・水温・塩分・クロロフィル濃度・溶存酸素のセンサーを装備した観測機器を貸し出し、漁業者と研究者での共同調査を行うことを計画したが、機器の操作への漁業者の不安、多忙などの理由から、観測は国際海洋研究センター側で行うこととなった。調査は新おおつち漁協の組合員が大槌川・小槌川の河口部周辺に設置している養殖いかだ周辺にて、月に一度の頻度で実施し、その結果にこれまでの知見を基にした解説を加えた上で「大槌湾漁場海況速報」として、配布した。2015 年 9 月より開始した本観測は、2020 年 3 月の段階で継続中である。

本事業で行った大槌湾での環境モニタリング結果(A. 大槌湾の栄養塩類動態の遷移過程を参照)は、大槌町のホタテのブランド化に向けた事業や、三陸地域の公共事業を実施する際の検討材料としても用いられた(表 4-5)。岩手県の北部に位置する久慈湾では湾港防波堤の建設を中心とした漁業復興が進められていたが、岩手県より湾内の環

境に対する湾口防波堤の影響の検討を委託されていた「いであ株式会社」の担当者より、湾口防波堤の無い大槌湾での調査結果を利用したいとの依頼があったことから、必要な調査項目の聞き取りを行い、データ案内所「リアス」で公開されていない調査項目も含め、提供可能なデータを送付した。また、大槌湾根浜地区の砂浜再生事業の実施を検討していた岩手県および野外調査を請け負っていたに国際航業株式会社に対しても、大槌湾根浜地区のアマモ場周辺の栄養塩類などの環境データを提供した。特に震災前後の比較を行いたいとの要望があり、震災前に大気海洋研究所のグループが別課題にて、実施した観測結果も合わせて送付した。

表 4-2 シンポジウム・報告会

イベント名	主催	演題	開催地	開催日
大槌の復興から世界へひろがる海洋研究―「東北マリンサイエンス拠点」づくりに向けて―	東京大学大気海洋研究所 共催：岩手県、大槌町、いわて海洋研究コンソーシアム、岩手県教育委員会、大槌町教育委員会、新おおつち漁業協同組合、大槌商工会	海の“肥やし”とは	岩手県閉伊郡大槌町	2012年7月16日
元気です岩手の海展	いわて海洋研究コンソーシアム、岩手県立水産科学館、岩手県水産技術センター（担当）、北里大学海洋生命科学部、(独)水産総合研究センター東北区水産研究所（資源生産部資源増殖グループ）、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター、国立大学法人岩手大学、岩手県立水産科学館	海の肥料 東京大学大気海洋研究所による大槌湾の栄養塩類調査の概要	岩手県宮古市	2012年9月21日～10月21日
大気海洋研究所公開講座「大槌の海は今!？」	東京大学大気海洋研究所	海の汚染や環境について	岩手県閉伊郡大槌町	2013年10月12日
公開シンポジウム「大震災津波のメカニズムと	いわて海洋研究コンソーシアム、岩手県、独立行政法人海洋研究開発機構	大槌湾の環境変化とその回復過程	岩手県盛岡市	2014年3月9日

三陸の海の 現在」				
--------------	--	--	--	--

表 4-3 出前授業

授業名	対象	開催日
海のいろの話	大槌町立大槌・安渡・赤浜・大槌北 合同小学校 6年生	2012年11月13日
海の肥料について	岩手県立釜石高校および近隣の小 中学校の学生およびその父兄	2013年10月5日
海の肥料について	岩手県立釜石高校および近隣の小 中学校の学生およびその父兄	2014年10月4日
海の肥料について	岩手県立釜石高校および近隣の小 中学校の学生およびその父兄	2015年10月3日
海の教室——海の肥料、 栄養塩	大槌町に在住される方を中心とし た希望者	2016年9月30日
国際沿岸海洋研究セン ターと大槌湾の被災状 況	私立盛岡中央高校	20018年7月2日
国際沿岸海洋研究セン ターと大槌湾の被災状 況	岩手県立水沢高校	2019年2月18日
海の色と海の植物	大槌学園 4年生	2019年8月29日

表 4-4 マスコミで取り上げられた事例

媒体	表題	公開日
広報大槌	海の肥料. おおつち海の勉強室	2014年12月5日
広報大槌	海の日当たりのいい場所. おおつち海 の勉強室	2015年10月5日
NHK 岩手放送局 「おぼんですいわ て」	これからも大槌で 赤浜の東大	2017年6月29日

NHK 仙台放送局「おはよう日本（東北6県版）」	これからも大槌で 赤浜の東大	2017年7月4日
岩手日報こども新聞	海水に溶けこんでいる元素. さんりく海の勉強室	2017年7月19日
岩手日報こども新聞	水深5千メートルにいる原核生物. さんりく海の勉強室	2018年4月17日
岩手日報こども新聞	海中の日当たりのよさ. さんりく海の勉強室	2019年7月23日

表 4-5 成果の利活用事例

提供先	提供内容	活用事例	提供時期
新おおつち漁協 ホタテ養殖業者	大槌湾ホタテ養殖いかだ周辺域での観測データおよびその解説	ホタテ養殖いかだ周辺での藻類の分布状況の把握	2015年9月より毎月（2020年3月の段階で継続中）
大槌町復興推進隊	大槌湾定期モニタリング調査の観測データ	ホタテの地域ブランドの確立に向けた水質の検討	2016年12月
いであ株式会社 （国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所）	大槌湾定期モニタリング調査の観測データ	「久慈港閉鎖性海域における環境保全方策検討業務」における久慈湾と大槌湾の湾内環境の比較	2016年12月
国際航業株式会社 （岩手県沿岸広域振興局土木部）	大槌湾根浜地区の流況および環境・生物データの提供	釜石市根浜地区の砂浜再生事業の可否判断の検討材料	2017年8月

#### 4-3 引用文献

Shiozaki, T., Itoh, S., Takahashi, K., Saito, H., Nagata, T., and Furuya, K. (2014) Regional variability of factors controlling the onset timing and magnitude of spring algal blooms

- in the northwestern North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: doi: 10.1002/2013JC009187.
- Fukuda H., Katayama, R. Yang, Y. -H., Takasu, H., Nishibe, Y., Tsuda, A., Nagata, T. (2016) Nutrient status of Otsuchi Bay (northeastern Japan) following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Journal of Oceanography*, 72: 39-52.
- Nishibe, Y., Isami, H., Fukuda, H., Nishida, S., Nagata, T., Tachibana, A., Tsuda A. (2016) Impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami on zooplankton community in Otsuchi Bay, northeastern Japan. *Journal of Oceanography*, 72: 77-90.
- Lu, C. -J., Benner, R., Fichot, C. G., Fukuda, H., Yamashita, Y., Ogawa H. (2016a) The fate of terrigenous dissolved organic matter in Otsuchi Bay, Japan: The implication from a decomposition experiment. In *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011 –Our knowledge acquired by TEAMS–* Edited by K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima Tokai University Press, Kanagawa, pp.49-50.
- Suzuki Mashio, A., Obata, H., Fukuda, H., Ogawa H. (2016) Distributions and biogeochemical cycles of platinum in Otsuchi Bay after the tsunami in 2011, In *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011 –Our knowledge acquired by TEAMS–* Edited by K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima Tokai University Press, Kanagawa, pp.51-52.
- Fukuda, H., Katayama, R., Yang, Y. -H., Takasu, H., Nishibe, Y., Tsuda, A., Nagata T. (2016) Nutrient status of Otsuchi Bay (northeastern Japan) after Great East Japan Earthquake. In *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011 –Our knowledge acquired by TEAMS–* Edited by K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima Tokai University Press, Kanagawa, pp.63-64.
- Yang, Y. -H., Fukuda, H., Nagata T. (2016) Possible transient impacts of the 2011 Earthquake on the microbial system in Otsuchi Bay. In *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011 –Our knowledge acquired by TEAMS–* Edited by K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima Tokai University Press, Kanagawa, pp.105-105.
- Lu, C. -J., Ronald Benner, Cédric G. Fichot, Hideki Fukuda, Youhei Yamashita Hiroshi Ogawa (2016b) Sources and transformations of dissolved lignin phenols and chromophoric dissolve organic matter in Otsuchi Bay, Japan. *Frontiers in Marine Science*, 3: 85, doi: 10.3389/fmars.2016.00085.
- Tachibana, A., Nishibe, Y., Fukuda, H., Kawanobe, K., Tsuda A. (2017) Phytoplankton community structure in Otsuchi Bay, northeastern Japan, after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and tsunami. *Journal of Oceanography*, 73: 55–65.
- 福田秀樹・楊燕輝・高巢裕之・西部裕一郎・立花愛子・津田敦・永田俊 (2017) 2011年東北地方太平洋沖地震以降5年間の三陸沿岸大槌湾における栄養塩環境の変化. 沿岸

海洋研究 54 : 105–116.

- 福田秀樹, 永田 俊 (2017) 東日本大震災から 5 年間の大槌湾の栄養塩環境. 日本水産学会誌, 83: 652-655.
- 西部裕一郎, 福田秀樹, 津田 敦 (2017) 東北地方太平洋沖地震に伴う津波が大槌湾のプランクトン群集に及ぼした影響. 日本水産学会誌, 83: 656-658.
- Endo H., Fukuda H., Takahashi D., Okumura Y., Inomata E., Ito K., Yoshimizu C., Tayasu I., Nagata T. (2018) Influence of isotope fractionation on the nitrogen isotope composition of the brown macroalga *Undaria pinnatifida*. Phycological Research, 66: 262–268.
- Wong K. H., Obata H., Kima T., Suzuki-Mashi A., Fukuda H., Ogawa H. (2018) Organic complexation of copper in estuarine waters: An assessment of the multi-detection window approach. Marine Chemistry, 204: 144-151.
- Takano T., Ijichi M., Itoh H., Fukuda H., Yoshizawa S. (2019) Complete mitochondrial genome sequences of a deep-sea holothurian species of the genus *Scotoplanes* (*Elasipodida: Elpidiidae*). Mitochondrial DNA Part B, 4: 112-113.
- Satoh N., Fukuda H., Miyairi Y., Yokoyama Y., Nagata T. (2019) Position - dependent radiocarbon content of the macroalgae *Undaria pinnatifida* as an indicator of oceanographic conditions during algal growth. Journal of Oceanography, 75: 349–358.
- Naoko Murakami-Sugihara, Kotaro Shirai, Masako Hori, Yosuke Amano, Hideki Fukuda, Hajime Obata, Kiyoshi Tanaka, Kaoruko Mizukawa, Yuji Sano, Hideshige Takada (2019) Mussel Shell Geochemical Analyses Reflect Coastal Environmental Changes Following the 2011 Tohoku Tsunami. ACS Earth and Space Chemistry 3: 1346-1352.
- Ota, K., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Hayakawa, J., Satoh, N., Fukuda, H., Tanaka K. (2019) Northeast Pacific seawater radiocarbon recorded in abalone shells obtained from Otsuchi Bay, Japan. Radiocarbon, DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2019.95>
- Suzuki Mashio, A., Obata, H., Shimazaki, T., Fukuda, H., Ogawa H. (2019) Spatiotemporal variations of platinum in seawater in Otsuchi Bay, Japan after the 2011 tsunami. Science of the Total Environment, 708: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134659>.

## 5 陸域由来の環境汚染物質の流入実態

未曾有の大津波に襲われた三陸沿岸では、陸域に存在した多量の人工構造物、人工物質が海域へと流入した。また、過去長期にわたり、様々な人為起源物質が堆積、蓄積されてきた沿岸堆積物は、同様に大津波により大攪乱を起こし、一部は陸上に打ち上げられる一方、一部は沖合まで再輸送された可能性も考えられる。その結果、これらが海底に埋没後、有機汚染化合物や有害重金属が海水中に溶出し、食物連鎖を通じて生態系内に濃縮されていく事が懸念されてきた。本課題は、主として大槌湾をモデルに、有機汚染化合物や有害重金属元素の分布を沿岸から沖合にかけて広域に調査し、その汚染の広がりの実態把握を目的として実施された。さらに、それらの化合物の種類や組成などの化学的な情報を用いて、環境汚染物質の起源や動態について解析することも併せて実施した。

本プロジェクトを実施するにあたり、まずは汚染物質や陸起源物質指標を高感度、高精度で測定するための先端分析システムを確立し、それらをフルに活用し、大槌湾の堆積物試料および二枚貝試料、および海水試料を中心に環境汚染物質の分布の測定、解析を進めてきた。具体的な陸域由来の環境汚染物質として、次の5項目（成分）に着目し、それぞれについて、最先端の分析技術を有する専門家が分析および解析を担当した。

- (1) 堆積物中および二枚貝中の有機汚染物質（農工大・高田、水川）
- (2) 堆積物中の重金属元素（東海大・南）
- (3) 二枚貝中の重金属元素（東大大気海洋研・白井、杉原、佐野）
- (4) 海水中の微量金属元素（東大大気海洋研・小畑、黄、金沢大・真塩）
- (5) 陸起源天然有機物（東大大気海洋研・小川、呂）

### 5-4 研究の概要と成果

#### 5-4-1 人為起源有機汚染物質

##### <研究の背景と目的>

震災に伴う津波により、三陸沿岸域の海底は大きくかく乱が生じた。沿岸海域は、人間活動による様々な人為起源物質が流入している場所である。とりわけ、疎水性の高い有機化合物は、懸濁物質に吸着し沈降しやすいため、沿岸域の堆積物中に残留する。そのため、過去に使用された人為起源有機汚染物質の貯蔵場所となっていた。津波による沿岸域の海底のかく乱により、過去に使用された汚染物質を吸着した堆積物は再び海水へと再懸濁されたと考えられる。また、津波は陸に存在していた多くの人為起源物質も海洋へと流出させた。それは本



来陸上での使用・処理されていたもので、平常時であれば海洋への流入は決して多くないと予想される。このような物質が海洋に流入した場合の環境中における挙動や経年的な変化についての知見は限られている。

このような背景から、人間活動に由来した有機汚染物質の三陸沿岸域への流入を調べるために、以下の4種の人為起源有機汚染物質に着目した。Polychlorinated Biphenyls (PCBs)は工業油としてトランス、コンデンサーといった絶縁油等に使用された物質であり、世界中で1970年代に生産・使用が禁止されている。しかし、過去に環境中に放出されたものが現在もなお堆積物に多く残留している。また、過去に使用されたPCBs含有製品は、適切な処理をするために未だに陸上で厳正に管理されていたが、一部の製品は津波により流出している(MOE 2012)。Linear Alkylbenzenes (LABs)はLASと呼ばれる陰イオン系界面活性剤の原料であり、生成時の未反応物がわずかな割合で製品に含有されている。そのため、生活排水メーカーとして用いられている。さらに、LABsの異性体比からは微生物分解を受けたかどうかを判別することが可能であるため(Takada and Ishiwatari 1990)、下水処理場の損壊等による未処理下水の海洋への流入を追うことができると考えられる。Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)は有機物燃焼による生成される一方で、石油そのものに含有される。震災により陸域では大規模な火災や油の流出が生じたため、その影響を強く受けると予想される。また、その成分の構成比からは燃焼起源か石油起源を推定することも可能である(Saha, Takada et al. 2012)。Hopanesは重油中に存在する天然起源の物質であり、重油による汚染を把握するための分子指標物質である。原油の産地によって含まれている成分比が異なるため、質の異なる原油の流入があった場合に有用な指標となることが期待される。また、1. 大槌湾から沖合における海底堆積物の汚染のメカニズムの解明、の一部試料においては、陸域の維管束植物に特異的な成分であり沿岸堆積物の主要構成成分であるLPs (Lignin phenols)を陸域起源物質の指標として活用することとした。

これらの物質を用いて、本課題では1.大槌湾から沖合における海底堆積物の人為起源有機汚染のメカニズムの解明、2.二枚貝を用いたモニタリングによる空間分布と経時変化の把握、を行うことを目的とした。

<調査概要>

## (1) 大槌湾から沖合における海底堆積物の人為起源有機汚染メカニズムの解明

### 【目的】

人為起源有機化合物の大槌湾表層堆積物における分布とその経時変化および沖合への汚染物質の輸送プロセスを調べることを目的とした。初期は湾内の経時的な挙動の観測、中期は沿岸域への輸送、後期は沖合への輸送について重点的に調査を行った。

### 【試料と方法】

大槌湾内の平面分布の把握のために2012年5月に採取した12地点を分析した。経時変

化の把握には、2011年5月～2014年5月の3年2ヶ月の間に2ヶ月おきに採取した St.2, St.4, St.6, St.8 の4地点の堆積物を用いた。また、湾内における攪乱状況を把握すべく2013年7月に大槌湾 St.7にて柱状堆積物を採取した。沿岸域から沖合にかけての試料は、KT12-8にて大槌湾 St.3-6, KS14-19にて St.3-4の間の5地点、KS15-12にて St.3-4の周辺を面的に13地点から、それぞれ柱状堆積物を採取した。さらに沖合への輸送を調べるために、釜石沖海底谷試料として JAMSTEC より提供いただいた KY15-08 の#1814 および KS18-8 leg.2にて採取した6地点について分析を行った。

人為起源有機化合物の分析は、凍結乾燥した堆積物を加圧溶媒抽出後、活性銅処理と2段階のシリカゲルカラムクロマトグラフィーを行い精製・分画した。PCBs17種を GC-ECD、LABs25種、PAHs28種、Hopanes18種を GC-MS で同定・定量した。LPs は堆積物をアルカリ CuO 酸化分解後、生成したフェノール化合物を固相抽出で精製し、TMS 誘導体化を行って GC-MS で8種を同定・定量した。

### 【結果概要】

大槌湾内の各有機汚染物質の濃度の平面分布を図5-1に示した。造船所付近の St.0 から PCBs と hopanes が最も高濃度で検出された。LABs は大槌川・小槌川河口の St.8、PAHs は湾奥に近い St.10 で最も高濃度となった。St.8 から St.4 にかけては、河口からの輸送される懸濁粒子に伴って吸着した汚染物質も輸送されていると考えられた。そこで、St.2,4,6,8 において、経時的な変化を調べた。震災から4か月経過した2011

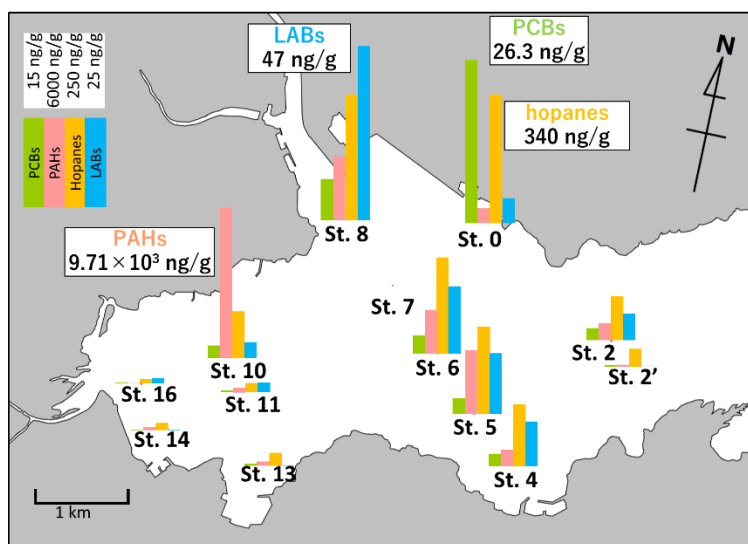


図5-1 大槌湾表層堆積物中の汚染物質濃度および各成分の最高濃度(2012年5月, ng/g-dry)

年7月の試料では、LABs が St.2(138 ng/g-dry)および St.8(107 ng/g-dry)にて高濃度で検出された。St.8 はその後2011年9月においても99 ng/g-dry と比較的高い濃度だったが、以降は1.6-59 ng/g-dry の間で変動をした。2011年9月以降の St.2 の LABs 濃度範囲は2.7-28 ng/g-dry であった。このことから、震災直後は未処理下水による汚染が生じていたと予想された。LABs は微生物分解を受けやすい異性体と受けにくい異性体があり、その比率から未処理の下水の寄与を推定することができる。この比を I/E ratio と呼び、未処理の下水で0.7~0.75、二次処理水で3.0~7.3をとる(Takada and Ishiwatari 1990)。2011年7月の St.8, St.2 および9月の St.8 の I/E ratio はそれぞれ0.9,

0.7, 1.0と未処理下水に近い値を示した。このことから、震災後の2011年7月までに大槌湾内へ未処理の下水が流入したことが示された。

また、PAHsの濃度は震災直後よりも2011年9、11月の方が高濃度となったがその組成比は異なる結果を示した。PAHsはMethyl phenanthrenesとPhenanthreneの比(MP/P比)で起源を推定可能であり、燃焼起源は0.5以下、石油起源は3.5以上となる(Saha, Takada et al. 2012)。St.4,6,8において、2011年7月のMP/P比はそれ以降と比較して高く、2011年7月までの間に湾内へ石油起源PAHsの一時的な流入があったと考えられた。また観測3年間で、河口域St.8では濃度の減少傾向にあるが、St.2、4、6では2012年3月以降に明確な増減傾向が見られない定常状態だった。

大槌湾内における津波による堆積物の攪乱状況を調べるために、大槌湾内St.7で柱状堆積物を採取した。いずれの汚染物質濃度も表層で比較的高濃度であり、下層において低くなった。含水率は表層から7cmから17cmにかけて低く、目視で砂礫が確認されている。このことから、湾内堆積物は津波によって旧来の堆積層ごとかく乱され、再堆積したことが示された。さらに、津波(引き波)によって汚染物質を吸着した堆積物が外洋へ運搬された可能性が示唆された。

そこで、沖合へどれくらい陸起源の汚染物質が運搬されているかを調べるために、大槌湾から東沖合に75kmまで採取された堆積物中のLPs濃度と汚染物質濃度を測定した。Lignin濃度は分析対象としたlignin phenol 8種の総和を $\Sigma 8$ として示す。大槌湾内から沖合75kmまでの表層堆積物中 $\Sigma 8$ はOT3とOT4の間で急激に減少し、この間に陸起源有機物の寄与の境界があることが明らかになった(図5-2A)。この傾向は、炭素安定同位体比やC/N比といった他の有機物起源推定指標とも整合性のある結果となった。PAHsをはじめとした汚染物質濃度もこれに伴いOT3を含めた湾内で高く、OT4で低くなることが示され(図5-2A)、これらの汚染物質が陸起源の堆積物によって輸送されたことが示唆された。しかし、 $\Sigma 8$ の低いOT5、OT6といった沖合においてPCBsやhopanesは湾内と同等の濃度が検出され、大気経由の輸送等陸起源有機物を伴わない輸送が示唆された。この点については海底谷試料の結果と共に口述する。

さらに、OT3からOT4にかけて細かく調べると、大槌湾口から8km離れたOT3-3とOT3-4の間に $\Sigma 8$ が減少する境界が存在した(図5-2B)。そこで、OT3-3とOT4の柱状堆積物における $\Sigma 8$ の鉛直分布を調べたところ、OT4がほぼ変動がないのに対し、OT3-3では8cmあたりにピークを持ち、その後ゆるやかに減少傾向を示した(図5-2C)。このことから、OT3-3においては津波堆積物が表層から12cmまで堆積していると考えられた。汚染物質濃度も同様に、表層12cm層に濃度のピークが認められた。これらの層は、震災津波によって輸送された陸起源有機物が堆積したのと考えられる。

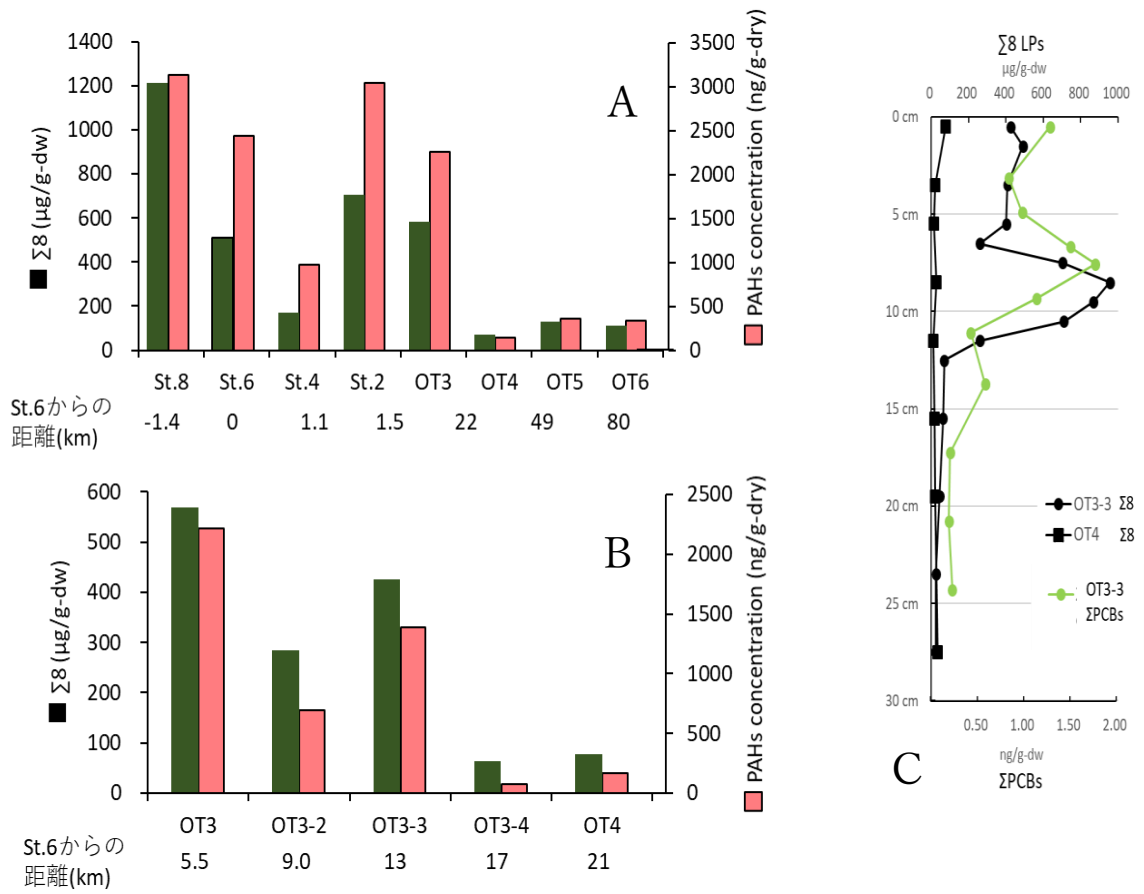


図 5-2

A, B 大槌湾から大槌沖にかけての表層堆積物中Σ8濃度およびPAHs濃度変化

C OT3-3およびOT4のΣ8およびOT3-3のPCBs鉛直分布

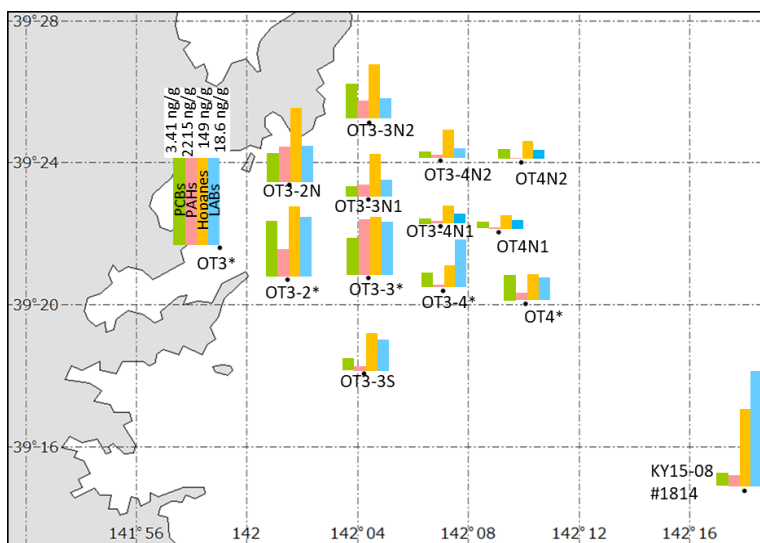


図 5-3 大槌湾沖および釜石沖海底谷#1814 表層堆積物における汚染物質の平面分布(ng/g-dry)

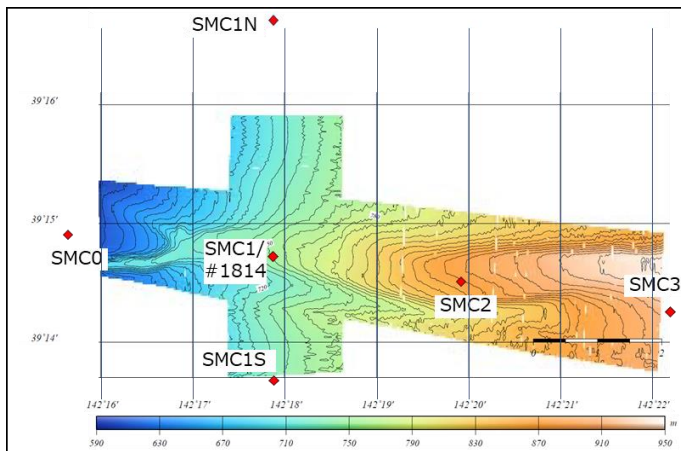


図 5-4 釜石沖海底谷試料採取地点および深度

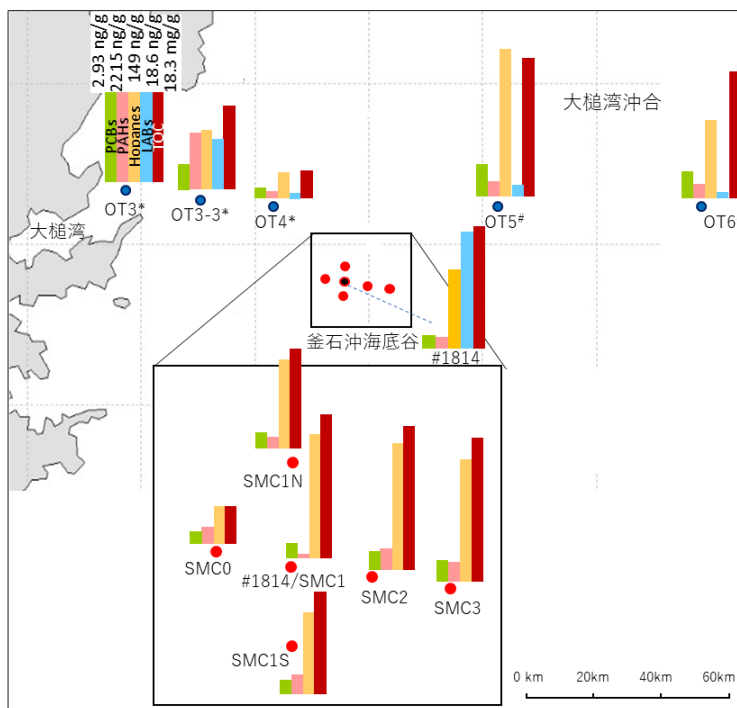


図 5-5 釜石沖海底谷・大槌沿岸・沖合表層堆積物中汚染物質濃(ng/g-dry)および有機炭素量(mg/g-dry)

このような陸起源物質の沖合への輸送が面的にどのように広がったのかを把握するために、OT3-4から北側に測点を広げた。大槌沖 13 地点および釜石沖海底谷#1814 の表層堆積物中の有機汚染物質の平面分布を図 5-3 に示した。各種汚染物質は大槌沖において面的に広がっており、すべての成分において沿岸からの距離が遠くなるにつれて濃度が低下す

る傾向が認められた。しかし、海底谷においては比較的沖合側の OT3-4 や OT4 とその周辺の測点よりも高い濃度で検出された。特に、LABs においては OT3 の濃度よりも高濃度となった。

釜石沖海底谷において大槌沖合よりも高濃度の LABs および hopanes が検出されたことを受けて、海底谷に特徴的な有機汚染物質の輸送プロセスの有無を調べた。試料採取地点を図 5-4 に示す。#1814 とほぼ同地点を SMC とし、谷の外の地点として SMC0, SMC1N, SMC1S を設定した。谷底部を SMC2 および SMC3 とした。

なお、本試料の分析では LABs はトラブルにより分析できなかったため結果から除外した。PCBs は一部のピークが夾雑により同定・定量できなかったため 13 種について結果を示す。釜石海底谷周辺 6 地点と大槌沖 5 地点および SMC1 とほぼ同地点である#1814 の表層堆積物中の hopanes, PAHs, PCBs, 有機炭素の濃度を図 5-5 に示した。海底谷周辺では、全体的に hopanes が高濃度で検出された。これについては、沖合の OT5 や OT6 においても高濃度の hopanes が示されていることから、沖合に hopane の起源があることが示唆された。OT5、OT6、海底谷周辺の堆積物は、大槌湾周辺と比較して有機炭素量も高かった。このことから、有機物に富んだ微細堆積粒子が海底谷に輸送・堆積される際に、有機汚染物質も吸着していたと考えられた。PAHs や PCBs は OT4 と比べ高い濃度であったが、湯有機炭素当たりの濃度は低いため、陸域からの輸送が起源と考えられた。SMC1 と同等の地点である#1814 表層において LABs が高濃度で検出されたが、OT-5, OT-6 では低濃度であることから、LABs は hopane, PAHs, PCBs と異なる負荷源を持つことが示唆された。

以上をまとめると、震災津波によって湾内では旧来の堆積層が 20cm 程度かく乱され再堆積したこと、沖合では震災前(1989 年)には沖合 2km まで運ばれていた陸起源有機物 (Ishiwatari 2009) が、湾内の汚染物質とともに沖合 8 km (OT3-3) まで到達し、OT3-3 では 10cm 程度堆積したことが明らかになった。これらの現象は面的に広がったと考えられる。沖合の hopanes や海底谷における LABs の負荷源および輸送プロセスの解明は今後の課題である。

## (2) 二枚貝を用いた震災由来人為起源有機汚染物質の空間分布と経時変化

### 【目的】

二枚貝を用いた微量汚染物質のモニタリングは Mussel Watch と呼ばれ、世界中の沿岸海域で用いられているモニタリング手法である(Goldberg 1975)。中でも *Mytilus* 属は、世界中に広く分布していること、周辺環境の汚染物質を軟体部に蓄積すること、固着性であることから生息域の汚染状況を反映しやすいこと、汚染に対する耐性が高いことから、指標生物として用いられている。三陸沿岸で採取したムラサキイガイ(*M. galloprovincialis*)中における人為起源有機汚染物質濃度の測定を行うことにより、東日本大震災によって三陸沿岸域に人為起源有機汚染物質がどのように広がり、変化したかを調べることを目的とした。

### 【試料と方法】

東北太平洋岸の岩手県大槌湾から茨城県大津漁港までの港湾 12 点について、2011 年 9 月から 2015 年 9 月までは毎年サンプリングを行った。2016 年度以降は、被害の大きかった岩手県大槌町～福島県相馬市の北側 6 地点については毎年、南側 4 地点については隔年ごとのサンプリングを継続した。

採取したムラサキイガイは軟体部を取り出したのち約 30 個体をホモジナイズし、凍結乾燥・粉化した。有機溶媒で加圧溶媒抽出した後、ゲル浸透クロマトグラフィーと 2 段階のシリカゲルカラムクロマトグラフィーで精製・分画した。PCBs18 種は GC-ECD、LABs25 種、PAHs28 種、Hopanes18 種は GC-MS で同定・定量した。

### 【結果概要】

図 5-6 に各地点における各人為起源有機汚染物質濃度を示した。地点は緯度の高い順に表している。震災後の東北沿岸の人為起源有機汚染物質濃度を評価するにあたり、震災前に日本各地で採取したムラサキイガイ中人為起源有機汚染物質濃度(Mizukawa, Hirai et al. 2017)と比較を行った。これらのデータは震災前全国データと表記する。

東北沿岸の PCBs 濃度は、すべての地点で震災前全国データよりも低濃度であった。各試料採取地点の中では江名港における PCBs 濃度が比較的高かったが、経年的な濃度変化は認められず、この水域の特色であると考えられる。大槌湾では 2015 年度までと 2016 年以降では濃度が約半分に減少した。組成に着目すると、釜石、大船渡、気仙沼では震災直後の 2011 年から近年にかけて、2-4 塩素の割合が減少していた。過去に使用された PCBs を含む堆積物が津波によりかく乱されたことにより水中に再懸濁し、比較的疎水性の低い低塩素の PCBs が溶存態へ再分配したことによることが示唆された。

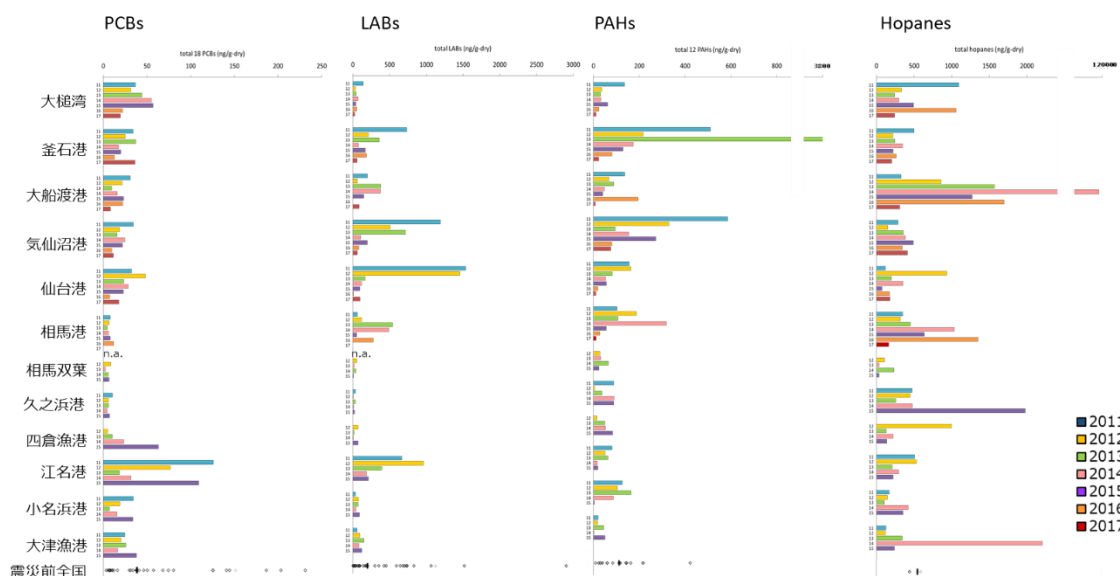


図 5-6 東北沿岸ムラサキイガイ中汚染物質濃度の経年変化および震災前全国データとの比較(ng/g-dry, 震災前全国データのバーは中央値を表す)

LABs も PCBs 同様に震災前全国データと比較して濃度は低かった。しかし、2011 年～2013 年にかけて、それ以降よりも濃度が高い地点が数地点あった。特に、仙台の LABs 濃度は 2011 年、2012 年において 1500ng/g-dry 以上の値が検出された。仙台は 2013 年 3 月に下水処理場が復旧したという報告があり(Prefecture 2013)、それまでの簡易処理では除去できていなかった下水による汚染が反映されたものと考えられる。大船渡港と相馬港については 2013 年に 2012 年の 2 倍以上の LABs 濃度が確認され、2014 年も同等であったことから、復旧に伴う人間活動の影響が表れていると考えられる。LABs の I/E ratio は大船渡港と相馬港は 2013 年と 2014 年にいずれも 1.0 前後と低い値をとっているため、未処理に近い生活排水が流入している可能性が示唆された。このことから、下水道というインフラ設備の損壊や復旧の過程を本マーカーと通して確認することができた。

PAHs は PCBs、LABs と異なり、2011 年から 2013 年にかけて釜石、気仙沼において震災前全国データを上回る PAHs が検出された。特に、2013 年の釜石港は 3700ng/g-dry を超える非常に高濃度な値となった。2014 年の mussel 中 PAHs 濃度は、相馬港を除いたすべての地点で震災前全国データの範囲内であり、2014 年にかけて濃度は低下する傾向にあると考えられた。2013 年に 2012 年の約 14 倍の PAHs 濃度が確認された釜石港も、2014 年には他の地点と同程度のレベルに戻った。しかし 2013 年とはサンプリング地点が異なるため、一概に PAHs 濃度が低下したとは言えない。また、相馬港では 2014 年に 2013 年の約 11 倍の PAHs 濃度が確認された。釜石港の MP/P 比は 2012 年に強い石油起源性を示したが、他は強い燃焼起源性を示している。相馬港は一貫して強い石油起源性を示しており、その傾向は 2014 年にかけて強くなっている。大船渡港、気仙沼港で強い石油起源性、仙台港では石油と燃焼の混合起源であることが示された。また、Methyl Pyrene/Pyrene ratio, Methyl Chrysene/Chrysene ratio についても MP/P ratio と同様の傾向であった。また、PAHs は一部の成分において毒性が報告されており、EU では食用二枚貝中の 4 種 PAHs(benzo[a]anthracene, Chrysene, Benzo[b]fluoranthene, Benzo[a]pyrene)の総濃度の基準値は 30 ng/g-wet と定められている(EU 2011)。本研究で得られた結果からは、2013 年の釜石を除いていずれの年・地点においても EU 基準値を下回った。

Hopanes 濃度は 2013 年大船渡港において 100  $\mu\text{g/g-dry}$  以上となり、非常に高濃度であった。Hopane の成分比である Tm/Ts 比も、2013 年大船渡港のみ 0.2 だったが、その他の試料では 0.5-1 の間を示していた。このことから、この時期に質の異なる原油の流入があったことが示された。それ以外の地点においても、経年的な濃度変化よりも散発的に濃度が高くなる現象が認められた。このため、震災による影響よりも復興に伴う人間活動による影響を多く受けていることが考えられた。

ムラサキイガイを用いた三陸沿岸域のモニタリングより、人為起源汚染物質の多くは初年度と比較して濃度の減少が確認された。しかし、三陸沿岸域では、復興に伴う人間活動の活性化由来と推察される変化も同時に認められた。その後の復興の過程も含めた影響も考慮する



と、年によって濃度が変動する地点については周辺環境に汚染源が存在している可能性があり、周辺環境の調査および継続した定点のモニタリングをしていく必要がある。

#### 5-4-2 大槌湾における重金属元素の堆積状況

##### <研究の背景と目的>

2011年3月に東北地方太平洋沖地震が発生し、これに伴う大津波の発生により大きな被害を受けた。津波の引き波により三陸沿岸では、陸域に存在した多くの人工構造物、人工物質が海域へと流出した（小川ほか，2017）。また、日本沿岸域では有害汚染物質の使用・排出規制に対する法的整備が遅れていた高度経済成長期に、多くの化学物質が海域に流出し、その一部は海底堆積物の深部に埋没しており現在でも蓄積していることが知られている（真田ほか，1999）。これらの化学物質が津波の攪乱によって、陸域、湾内、湾外へと運ばれ再堆積した可能性もある。主な研究海域である大槌湾は、岩手県の三陸海岸の中部に位置し、湾内には大槌川・小槌川・鶴住居川の3河川が流入している。津波の最大遡上高が15.36mもあったとされおり、津波により運ばれた様々な物質が大槌湾およびその周辺海域に堆積していると考えられる。なお、多くの津波堆積物は砂粒子が主体であったが、一部は細粒の泥を含む砂泥互層を形成しており、細かい粒子の泥を含む津波堆積物にはヒ素(As)や鉛(Pb)などの重金属を多く含有するものがあり、その管理には十分に留意が必要であるとの報告がある（武田ほか，2014）。そこで、本研究では微小粒子に注目して、大槌湾とその周辺海域における堆積物中重金属元素の水平および鉛直分布を明らかにし、現在の堆積状況の把握と、経時的な変化について考察した。

##### <調査概要>

###### 【試料と方法】

湾内および沿岸域の表層堆積物試料はスミスマッキンタイヤー型採泥器により採取し、湾内の柱状堆積物試料については、ダイバーが海底まで潜水しアクリルパイプによって採取した。また、湾外および外洋域の柱状堆積物試料についてはマルチプルコアラーを使用して採取した。柱状堆積物試料は0.5cmから1cm毎にカットし、冷凍して研究室へ持ち帰って保存した。冷凍した堆積物試料を常温で解凍後、凍結乾燥して口径63 $\mu$ mのメッシュのふるいを通した微小粒子について分析を行った。重金属元素は、堆積物試料に混酸(硝酸-フッ化水素酸-過塩素酸)加えて電子レンジを使用してテフロンボムにより加熱・溶解した。その後ホットプレートで蒸発乾固し3%硝酸で溶解した。この溶液を誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)および原子吸光光度計(AAS)を使用して分析した。

###### 【結果概要】

## (1) 粗大粒子および微小粒子の堆積

大槌湾はリアス式海岸に典型的な、奥行き深い細長い湾でありある。湾口部が狭いため、大槌川・小槌川・鶴住居川の河川群によって運び込まれる堆積物は、比較的良く湾内に保存すると考えられる（藤岡ほか，1988）。堆積物の粒径はその堆積物（粒子）の化学組成を変化させる要因の一つとなる場合がある。そこで本研究では、 $63\mu\text{m}$  の口径のふるいを使用して、粗大粒子（砂以上）と微小粒子（泥）に分けて研究を行った。震災直後の2012年5月において採取した表層堆積物中の粗大粒子（ $>63\mu\text{m}$ ）の分布を示した（図5-7）。粗大粒子の割合が90%（wt%）を超える観測点は、湾北部に位置し防波堤のあるSta. 0、湾の東側のSta. 2'、湾奥西側の鶴住居川周辺のSta. 16、14、13であった。大槌川および小槌川の河口（Sta. 8）から湾中央部の観測点（Sta. 5）までは周辺と比較すると粗大粒子の割合は少ないが、最も少ないSta. 8でも約30%を示しており湾全体に粗大粒子が堆積していることが明らかとなった。なお、湾中央部に微小粒子が多いことは、過去の底質調査と矛盾しない（堀越ほか，1976）。

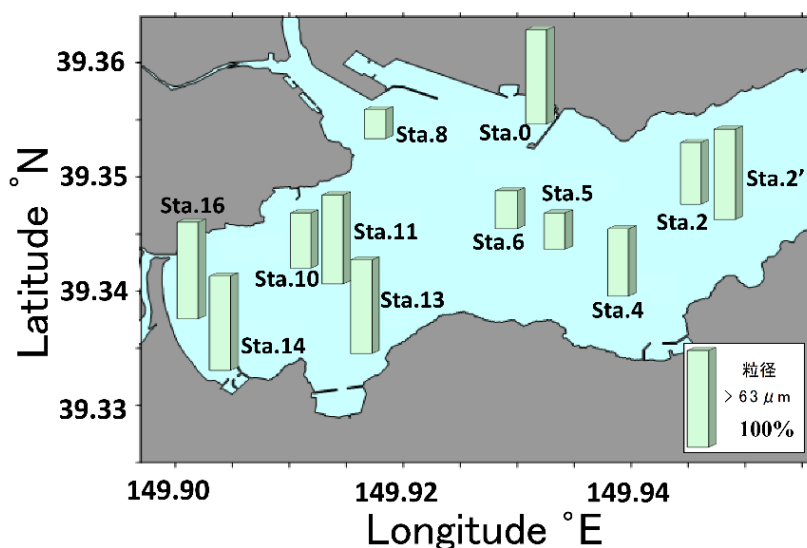


図 5-7 大槌湾における粒径  $63\mu\text{m}$  以上の粒子の割合

## (2) 湾内における粘土鉱物起源金属元素の水平分布 (Al、Ti など)

震災直後の2012年5月、湾内12観測点におけるAl含有量の平均値は75.1g/kgであった。最小値は北側防波堤Sta. 0で58.3g/kg、最大値は湾奥西側の鶴住居川河口に近いSta. 16で89.5g/kgであった。Al/Ti比は湾全体で13から18程度と大きな変化はなかったが、Sta. 16だけが20を超える結果となった。鶴住居川はカコウ岩類を供給する

との報告（藤岡ほか，1988）があるので、鵜住居川の河川堆積物の影響による可能性が考えられる。なお、湾全体的には、微小粒子中の粘土鉱物の組成にそれほど大きな変化がないことが示唆された。

### (3) 湾内における重金属元素の分布

湾内の粘土鉱物組成に大きな変化がないことから、有機物や生物粒子の希釈効果を考慮してAlで規格化することとして、Cu/Al比の湾内分布を示した（図5-8）。Cuは固着性の水生生物から船底を保護する静生物質として使用され、養殖業などでも使用されている。Cu/Al比は、北側防波堤Sta.0において $3.47 \times 10^{-3}$ と最大値を示した。また、大槌川および小槌川の河口に位置するSta.8と湾央のSta.6、5で高い値を示した。このような傾向は、ZnやPbなどでも観察された。大槌湾全体のCuの平均含有量は70.7mg/kgであり、2007年東京大学海洋研究所淡青研究航海（KT-07-27）で採取した東京湾表層堆積物試料で100.7mg/kgと比較すると低い値を示した。また、触媒として使用され、石炭や石油中に存在することから排ガスなどの指標とされているVは東京湾の1/3程度であった。2013年7月にダイバーによって採取した柱状堆積物試料のうちSta.0におけるCu、Zn、Ni、CdおよびPbの鉛直分布では表層から約27cmまでは高い値を示し、これ以深では急激に低い値を示した。したがって、Sta.0の表層堆積物において津波の影響によると考えられる高濃度の重金属の堆積を確認することができた。

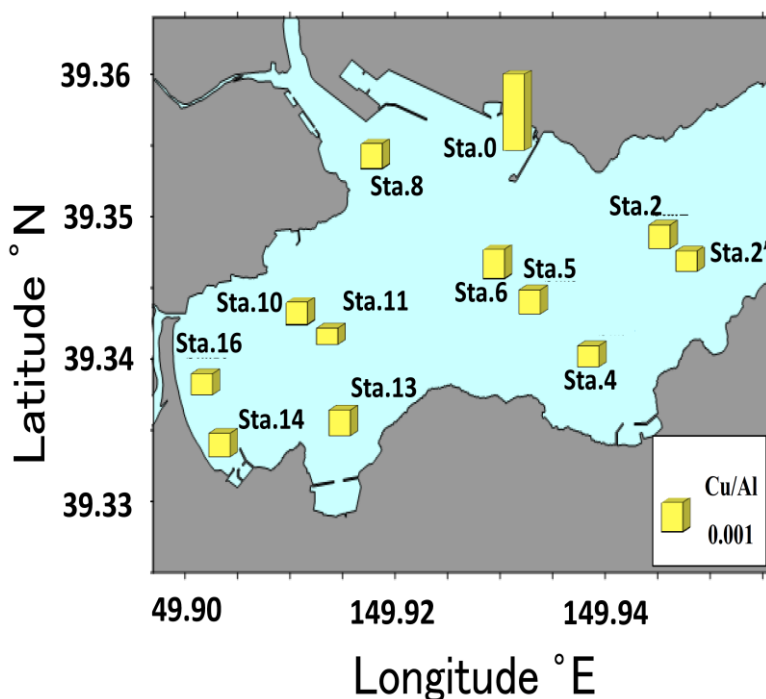


図5-8 大槌湾におけるCu/Al比の水平分布

#### (4) 湾内における重金属元素の経年変化

湾内における表層堆積物の経時変化については、Sta. 8 (河口)、Sta. 6 (湾央)、Sta. 4 (湾口) の3観測点について継続的に観測を行った(途中の3年程度は試料を採取していない)。一例として、図 5-9 に各観測点の Zn の経年変化を示す。Zn は鋼材の防食、乾電池や顔料などに使用されている元素であるが、全体的に河口域の Sta. 8 で高含有量を示し、湾口の Sta. 4 が低含有量となっており、外洋側に行くに従い減少する傾向を示した。震災後の2年間程度は全ての観測点で比較的高含有量を示し、最近では平衡か低い値を示している。なお、測定方法は異なるが(分析した試料の粒径が異なる)、震災前の2000年7月湾央付近の観測点での Zn の含有量は 114mg/kg との報告があり(長岡ほか, 2004)、2018年3月の Sta. 6 で 110mg/kg とほぼ同じ値を示した。

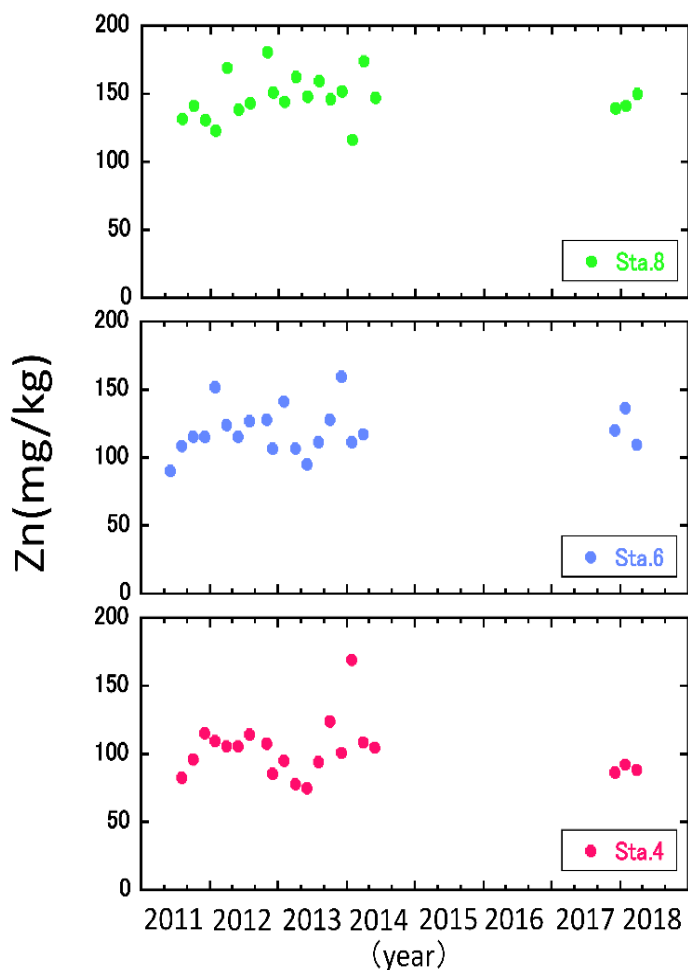


図 5-9 大槌湾における Zn 含有量の経年変化

### 5-4-3 二枚貝殻分析による汚染履歴の復元

#### <研究の背景と目的>

大津波は沿岸域の環境を大きく改変した。なかでも堆積物の巻き上がりや陸源物質の流入に由来する汚染物質の環境中への負荷が懸念される。ムラサキイガイは広い分布範囲を持ち、採取が容易であり、汚染物質を体内に濃集しやすいため、いわゆる「マッセルウォッチ」と呼ばれるような、環境をモニタリングするために分析されるモデル生物である。さらに、二枚貝の殻は付加成長をするため、その殻の重金属元素を分析することで、汚染の変遷を過去にさかのぼって明らかにできる可能性を持っており、近年多くの研究がされるようになってきた。特に貝殻には観測が困難な津波発生直後だけでなく、発生前の環境情報が記録されている。本研究では、大津波による海洋汚染の実態把握および汚染過程の解明のため、以下の2つの目的で研究を行った。

(1) 津波の被害を受けた東北太平洋沿岸から採取されたムラサキイガイの殻に含まれる重金属元素などを分析し、津波前後での環境変化や陸源物質の動態の変遷などの復元。(2) 太平洋沿岸域から採取されたムラサキイガイの軟体部の重金属元素を分析し、海洋汚染のモニタリング。

#### <調査概要>

#### (1) イガイ貝殻中の重金属

2011年9月に大槌湾で採取したムラサキイガイ貝殻中の重金属元素を分析した結果、非常に明瞭なMn/Ca比のピークが認められた(図5-10)。このピークは分析を行った2個体で共通しており、さらに貝殻断面に形成される微細成長線観察と貝殻形成時の水温の指標となる酸素安定同位体比を測定した結果、Mn/Ca比が急上昇したのは津波が発生した時期と一致した。このMn/Ca比のピークは40日程度で収束したが、津波後のMn/Ca比は津波前と比較して高い状態が続いていた。マンガンは海水中の濃度が低く、土壌中や海底堆積物の濃度が高い元素である。貝殻に取り込まれるのは溶存態マンガンであり、これは津波発生時に土壌の流入や海底堆積物の攪乱が起き、さらに海水中の酸化還元状態が変化した結果、貝殻中のMn/Ca比が上昇したと考えられる。津波後もMn/Ca比が高かった要因としてはむき出しの土壌が増加したことや、地盤沈下によって陸源物質が沿岸域に流入しやすくなったことを示唆している(Murakami-Sugihara *et al.* 2019)。

大槌湾での結果を踏まえ、釜石、大船渡、気仙沼、仙台、相馬、相馬、四倉、小名浜から採取したムラサキイガイの貝殻も分析した結果、釜石、大船渡、気仙沼、仙台、相馬、四倉からは大槌同様、Mn/Ca比の上昇がみとめられた(図3.2)。また、大槌の貝殻

の分析結果から、貝殻の Mg/Ca 比が水温の変化パターンと同調していたことから、Mg/Ca 比の変動パターンから津波発生時期を推定したところ、Mn/Ca 比の上昇は津波直後であったことが明らかとなった。これまでの研究から、大槌湾で採取したイガイ貝殻の Mn/Ca 比が津波による堆積物の巻き上がりや陸源物質流入の指標となることを明らかにした。

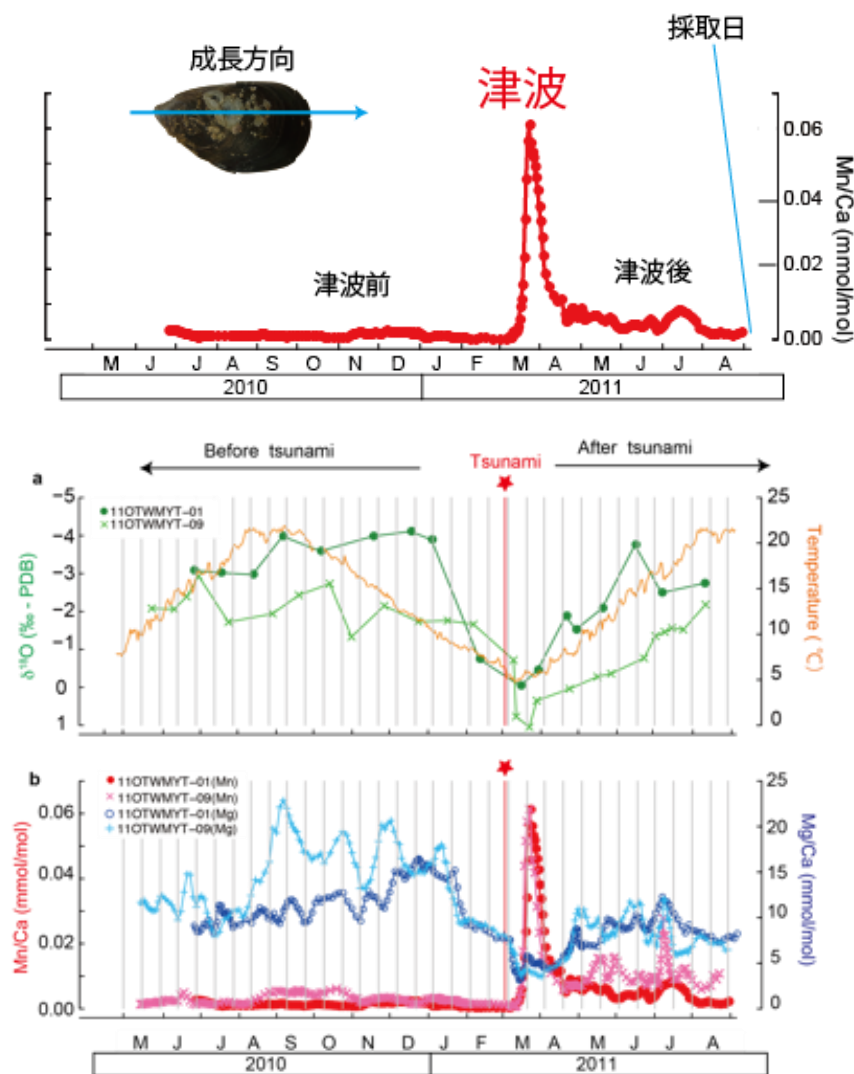


図 5-10 大槌湾で採取したムラサキイガイ貝殻中の Mn/Ca 比の変遷と酸素安定同位体比と Mg/Ca 比の比較。

これらの結果から、大槌湾で採取したイガイ貝殻の Mn/Ca 比が津波による堆積物の巻き上がりや陸源物質流入の指標となることを明らかにした。また、大槌湾の個体では、Mg/Ca 比の変化パターンと貝殻形成時の水温の目安となる酸素安定同位体比は良く一致していた。東北沿岸の他の場所で採取した個体の Mn/Ca 比も、場所毎に傾向が異なるものの、Mg/Ca 比が低くなるタイミング、すなわち津波発生直後に Mn/Ca 比が上昇する事が明らかとなった。ただし、ピーク時の濃度やピークの持続時間は湾毎に異なった。さ

らに小名浜から採取した個体は他の地点と比較して Mn/Ca 比が高かった。

さらに、Mn/Ca 比と Ba/Ca 比の変遷が同調している湾（気仙沼、四倉）、とピークにズレが見られる湾（大船渡）があることがわかった。Ba も Mn 同様、陸源から沿岸に供給される元素であるが、Ba は一旦植物プランクトンに取り込まれたりするなど、Mn とは挙動が異なる。このため貝殻中の Mn と Ba の変化パターンが異なると考えられる。

## (2) イガイ軟体部中の重金属

ムラサキイガイ軟体部中の重金属類の濃度の変化を図 5-11 と図 5-12 に示す。多くの地点で、2011 年に高くなったが、2012 年以降は低下する傾向がみられた。一方で地域毎の差も大きく、イガイ軟体部の重金属は地域固有の元素濃度の差を反映していると考えられた。これらの結果から、東北太平洋沿岸における津波による重金属汚染の可能性は低いと考えられる。

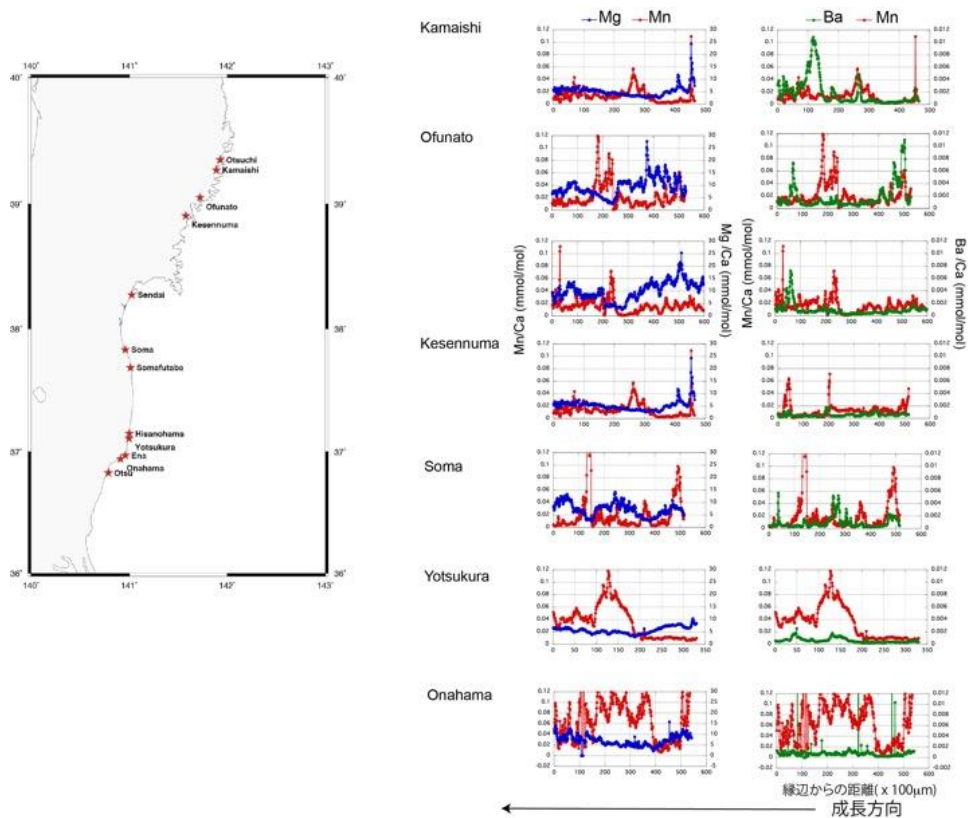


図 5-11 ムラサキイガイの採取位置と微量元素組成。赤はマンガン(Mn)、青はマグネシウム(Mg)、緑はバリウム(Ba)のそれぞれカルシウムに対する比を示す

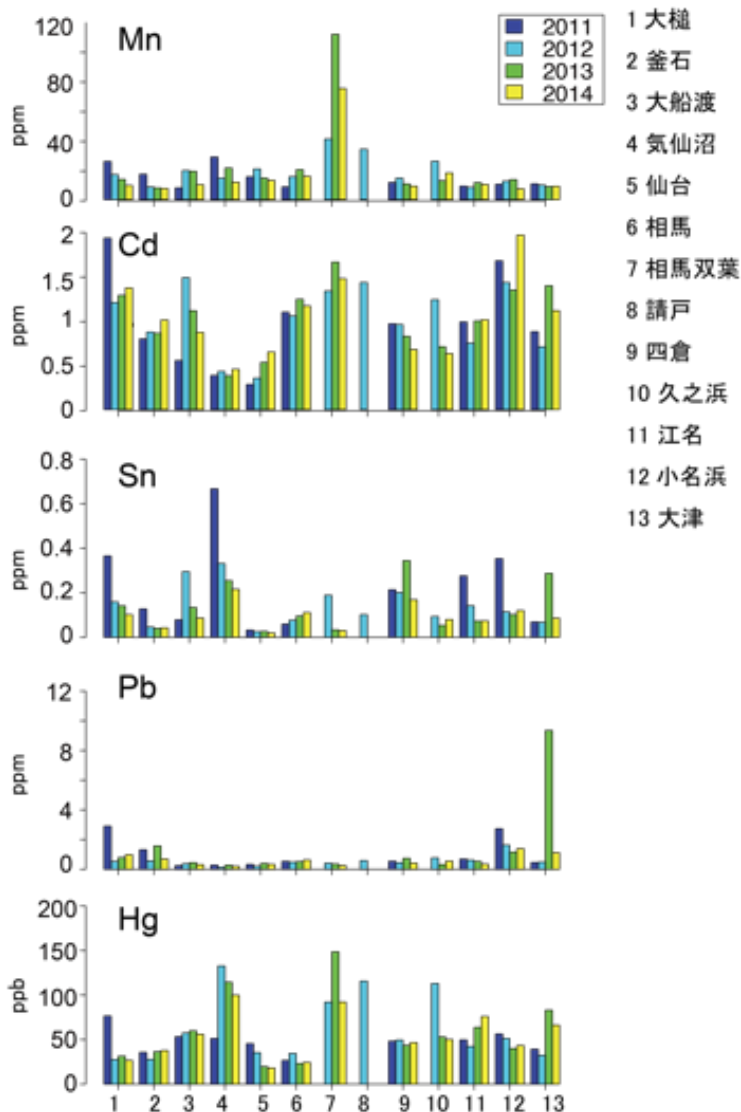


図 5-12 イガイ軟体部中の重金属元素の時空間変動

#### 5-4-4 海水中の人為起源微量金属元素

##### (1) 海水中の人為起源微量金属元素の分布と動態

###### <研究の背景と目的>

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震により、三陸沿岸の豊かな漁場は甚大な被害を受けた。この時、津波によって陸上にある人工物質が多量に沿岸域に付加された。特に海水中では微量だが、陸上には多量に存在する人為起源重金属元素は沿岸環境に大きな影響を与えうる。運ばれた人為起源重金属元素の大部分は海底に沈降したが、一部は海底から海水に回帰したと考えられる。三陸沿岸域の復興においては、



この陸上から付加された人為起源物質の現状を把握し、その動態を明らかにする必要がある(小川ら, 2017)。そこで、本課題では、天然には微量にしか存在しないが、人為起源物質に多く含まれる重金属元素(例えば白金、鉛など)について、海水中の分布を明らかにすると共に、海水—堆積物間の移行過程についても明らかにした。

#### <調査概要>

##### 【試料と方法】

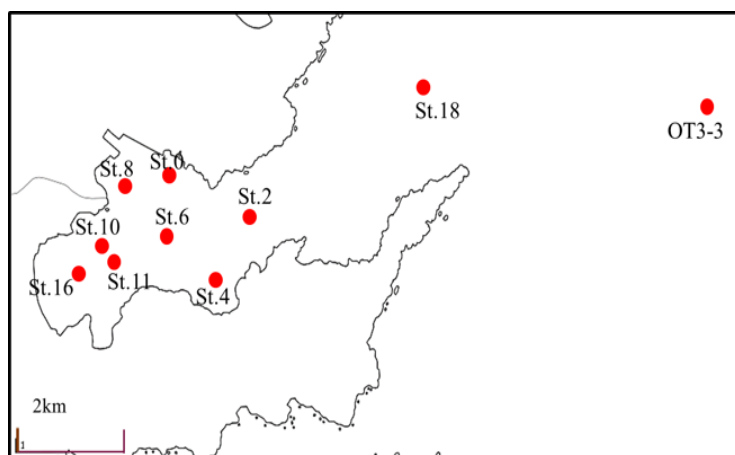


図 5-13 岩手県大槌湾の採水地点

本研究課題では岩手県大槌湾において海水を採取・分析した。大槌湾内の湾奥から湾口まで測点を設け、2012年5月から2019年5月まで観測を行い、海水を採取した(図 4.1)。さらに大槌川、小槌川、鶺住居川でも採水を行った。海水試料はX型ニスキン採水器を用いて、クリーンに採取した。海水試料はカプセルフィルターにより汚染のないように船上で濾過を行った。河川水試料は洗浄済みのポリプロピレン製手付きビーカーを用いて採水し、持ち帰ってろ過を行った。

本研究では、海水中の微量重金属元素を実験室において汚染なく濃縮し、高感度に分析する方法を開発した。特に海水中の白金については、陰イオン交換樹脂カラムによる濃縮法を用いて、 $10^{-13}\text{M}$  のレベルで分析することが可能になった(Suzuki et al., 2014)。また、海水中の鉛、カドミウム、マンガン、銅、亜鉛などの微量金属元素はキレート樹脂カラム濃縮法により前濃縮し(Kondo et al., 2016)、高分解能 ICP 質量分析計により測定した。

##### 【結果概要】

大槌湾において2012年5月から2013年5月までの3回の観測で得られた海水中の白金を分析し、その結果をまとめた(図 4.2)。

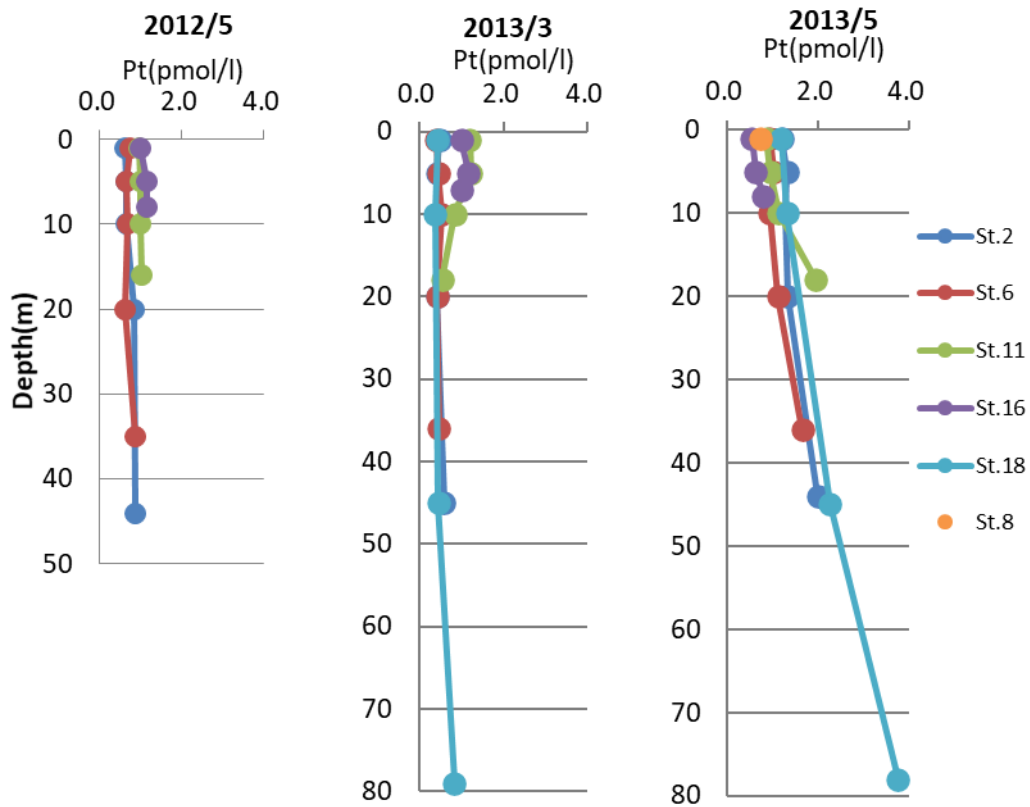


図 5-14 大槌湾における白金の鉛直分布

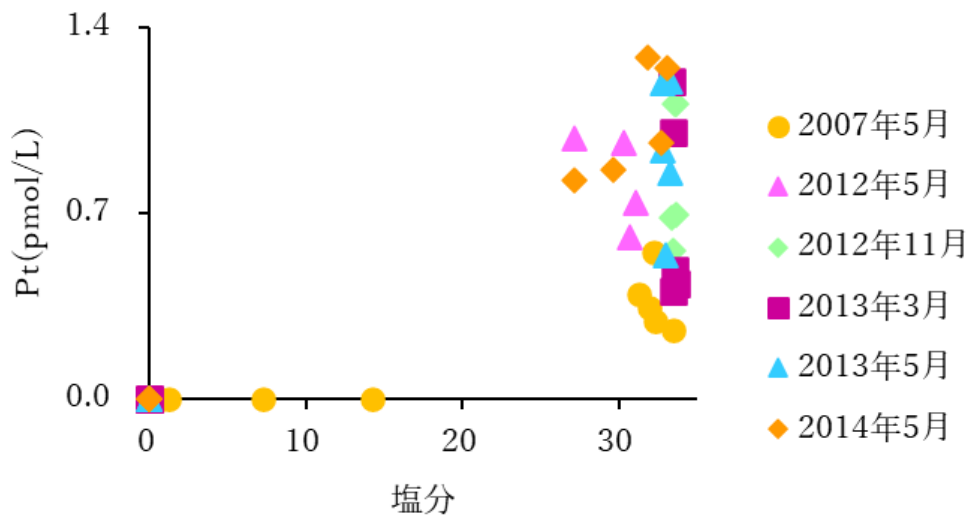


図 5-15 2007年から2014年にかけて採取された大槌湾表層水中の塩分と白金濃度の関係

大槌湾において、河口域および底層において濃度が高い傾向が見られた (図 5-14)。水塊毎の白金濃度について検討を行ったが、水塊構造に対応した濃度変化は顕著ではなく、外部からの供給が濃度分布に影響を与えたと考えられる。

また、2007 年から 2014 年までに得られた海水中の白金濃度を塩分に対してプロットした図を示す (図 5-15, 鈴木, 2015)。河口域においては、塩分 30 以上で急激に白金濃度が上昇することが明らかとなった。一方、大槌湾への流入河川水中の溶存態白金の濃度は検出限界(0.015pmol/L, Mashio et al., 2016)以下であり、東京湾流入河川のように高濃度(0.15 – 13.6 pmol/L, Obata et al., 2006)ではなかった。東京湾のように高濃度の溶存態白金が直接河川から流入しているわけではない。大槌湾では河川経由で運ばれた粒子状物質が海底に堆積し、塩分の高い海水と接触することにより白金が粒子状物質から放出されている可能性が考えられた。

そこで、大槌湾の表層堆積物について、6%酢酸溶液(画分 1)、6%酢酸および 1M 塩酸ヒドロキシルアミンの混合溶液(画分 2)を用いて逐次抽出を行い(Kato et al., 1995)、抽出液中の白金濃度を測定した。大槌湾の表層堆積物中の白金濃度は 0.46–14.4 ng/g となったが、画分 1 には 1.8 to 75.7%、画分 2 には<52%の白金が含まれていることが明らかになった(Mashio et al., 2020)。大槌湾表層堆積物に対し白金は比較的緩やかに結合していると考えられる。この緩やかに結合した白金が塩分の高い海水と接触することにより、海水中に放出されたと考えられる。

本研究では、大槌湾の海水中の溶存態の鉛、カドミウム、マンガン、銅、亜鉛の鉛直分布についても明らかにした。鉛濃度は 0.054–0.254nM、カドミウムは 0.21–0.41nM、マンガンは 3.79–49.1nM、銅は 2.6–4.0、亜鉛は 2.0–7.7nM の範囲内にあり、他の海域と比較しても高濃度の海水は観測されなかった。

## (2) 海水中の微量金属元素の存在状態

### <研究の背景と目的>

陸域由来の人為起源物質は、通常、河川を通じて河口域に輸送され、沿岸部で堆積される、あるいは外洋域まで輸送され希釈される。しかし、東北地方太平洋沖地震の発生時においては、津波によって一気に陸上の人工物が押し流され、沿岸域に輸送された。このようなプロセスにより輸送された人為起源金属元素(銅、鉛、カドミウム等)の濃度が急速に上昇すると生物活動が抑制される可能性がある。例えば、海水中の銅は植物プランクトンにとって必須の元素であるが、水和したフリーの銅イオン濃度が高い場合、毒性を示すことが知られている。しかし、海水中で銅は 99.9%以上が有機錯体を形成するため、実際に植物プランクトンに対する毒性は抑えられている。このため、海水中での銅の存在状態を明らかにすることは重要な課題である。そこで、本研究では電気化学的手法を用いて、大槌湾海水中の銅の存在状態を明らかにした。

## <調査概要>

### 【試料と方法】

海水中の銅の存在状態に関する研究では、高感度なカソードィックストリッピングボルタンメトリー(CSV)が最もよく使われている。CSV法では、サリチルアルドキシム(SA)を人工配位子として添加することによって、海水中の銅を測定することが出来る(Campos and van den Berg, 1994)。海水中の天然の有機配位子の濃度と条件安定度定数を求めるためには、海水に既知量の銅を添加して反応する銅を CSV法で測定する「金属滴定法」が一般的に用いられている。この方法では、人工配位子 SA と天然の有機配位子が銅との錯生成反応を競うことになるため、「競争配位子平衡(CLE)—CSV法」とも呼ばれている。

本研究では、この CLE—CSV法を用いて海水中の銅の存在状態を明らかにした。図 4.1 の観測点で、上記と同じ採水法・濾過法を用いて海水試料を採取した。採取した海水試料は冷凍した後、東京大学柏キャンパスの大気海洋研究所に持ち帰った。海水中の銅濃度を CSV法により、銅の有機配位子は CLE—CSV法により測定した(Wong et al., 2018)。

### 【結果概要】

大槌湾の海水中の溶存態の銅濃度、銅に対する有機配位子の濃度と条件安定度定数を明らかにした。海水中の銅濃度は 1.95 – 3.08 nM となり、他の沿岸域と比べて比較的低濃度であった。一方、銅の有機配位子は 2 種類検出された。海水中の有機配位子は、比較的条件安定度定数の高い「強い」有機配位子(Log K = 14.4 – 15.6)と条件安定度定数が比較的低い「弱い」配位子(Log K = 12.1 – 12.9)に分けられる。強い配位子濃度は 1.94 – 3.62 nM の範囲となり溶存態銅の濃度とよく対応していた。一方、弱い配位子は 5.67 – 28.2 nM の範囲となり、大きく変化した。弱い配位子の条件安定度定数は、これまでに報告されている腐植物質の条件安定度定数と近い値(Log K = 12 – 13.22, Kogut and Voelker, 2001)となった。これらの有機配位子の濃度と条件安定度定数から遊離の銅(II)イオン濃度を計算したところ、 $10^{-14.4}$  –  $10^{-13.2}$  M 程度となった。植物プランクトンの生育に対しては大きな影響を与えないレベルの濃度であった。

## 5-4-5 陸起源天然有機物の流入実態

### <研究の背景と目的>

巨大津波によって陸域から海域へ流入したと考えられるものには、が礫や環境汚染物質だけでなく、集水域に存在した土壌有機物や高等植物由来有機物など、陸起源天然有機物も含まれており、量的には環境汚染物質よりもはるかに多い。これらの多くは、直接、沿岸生態系に悪影響をもたらすものではないが、巨大津波による陸起源物質全般の

海域への流入規模とその流入範囲、また、河口域、湾内に堆積・埋没していた陸起源有機物がどの程度攪乱されたのかを知る上で重要である。また、各環境汚染物質の分布と比較することにより、環境汚染物質の流入プロセスの理解にもつながる。そこで本研究では、陸起源有機物の指標として、炭素・窒素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) に着目し、これらを指標に大槌湾内における陸起源有機物の時空間分布を明らかにすることを目的とした。

#### <調査概要>

##### 【試料と方法】

大槌湾内の堆積物中における陸起源物質の震災後の時系列変化をモニタリングするため、湾内定点において隔月で採取した海底表層堆積物試料に対し、炭素・窒素安定同位体比の測定を行った。採泥にはスミス・マッキンタイヤ採泥器を用いた。

また、2013年5月に、湾内の堆積物中の陸起源物質の鉛直分布調べるため、湾内の柱状堆積物試料（長さ約35 cm）をアクリルパイプを用いてダイバーにより採取した後、直ちに1-2 cm区切りで分割した。これらの試料についても測定対象とした。また、大槌湾湾口から沖合付近の海域において、震災による陸起源物質の湾外への輸送の拡がりの程度を調査するため、淡青丸 KT-12-20 および新青丸 KS14-19 次航海において、マルチプルコアラーを用いて、湾口から沖合にかけての海域から柱状堆積物試料を採取し（長さ約30 cm）、1-2 cm区切りで分割し測定試料とした。

堆積物試料は解凍後、凍結乾燥、酸処理等の前処理を行った後に、燃焼分解装置一体型の、同位体比質量分析装置（サーモフィッシャー社、Flash 2000）で  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  の測定を行った。また同時に有機炭素含量、窒素含量も測定した。

##### 【結果概要】

#### (1) 大槌湾内の堆積有機物中の炭素・窒素安定同位体比等の時系列変化

湾内の代表的な3地点、河口域 (Stn.8)、湾央 (Stn.6)、湾南部沖 (Stn.4) (図 5-13 を参照) における表層堆積物中の有機炭素・窒素含量および C:N モル比の時系列変化を図 5-16 に、炭素・窒素安定同位体比の時系列変化を図 5-17 に示した。

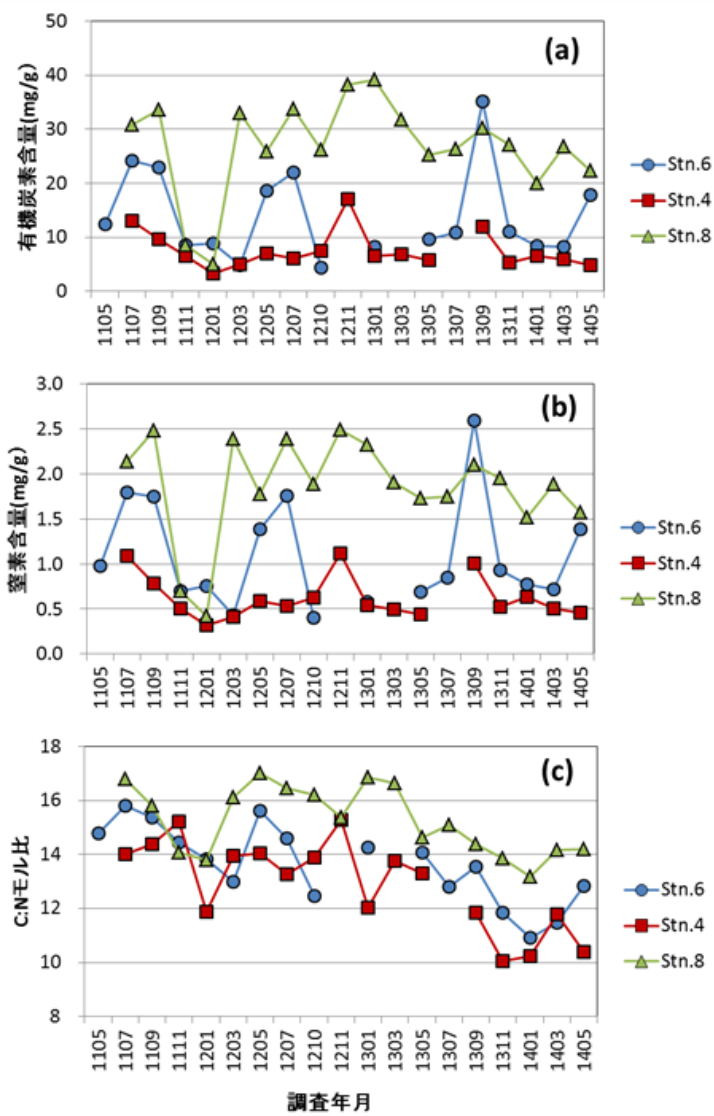


図 5-16 大槌湾内 3 測点における表層堆積物中の(a)有機炭素含量、(b)窒素含量、(c)C:Nモル比の時系列変化 (2011 年 11 月~2014 年 5 月)

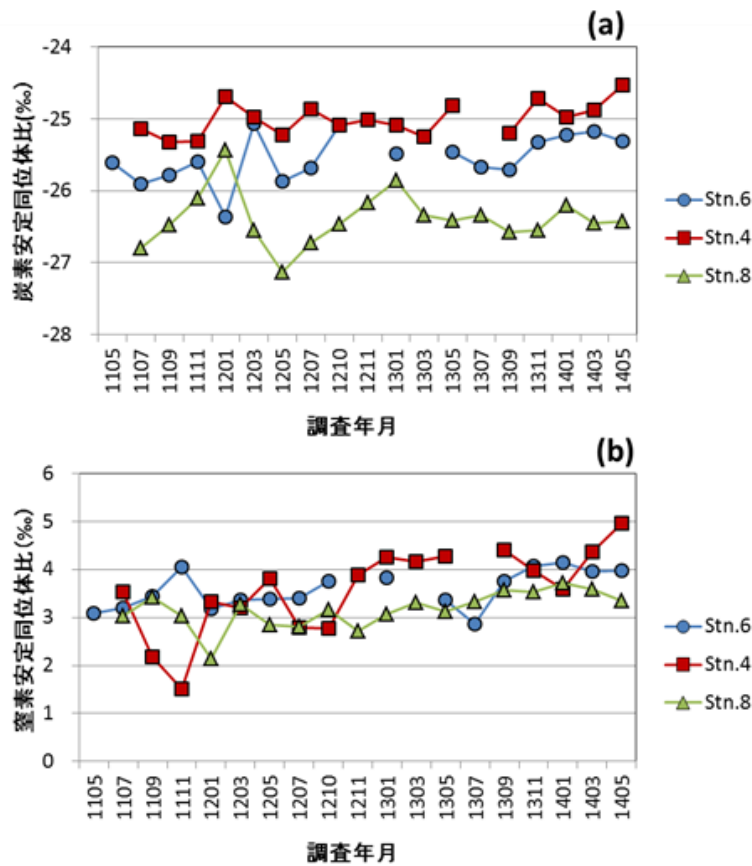


図 5-17 大槌湾内 3 測点における表層堆積物中の(a)炭素安定同位体比、(b)窒素安定同位体比の時系列変化 (2011 年 11 月～2014 年 5 月)

有機炭素含量・窒素含量は、河口域に近い地点ほど高くなり (Stn.8 > Stn.6 > Stn.4)、C:N モル比、炭素安定同位体比、窒素安定同位体比の指標によって示される陸起源有機物の寄与は、同様に、河口域に近い地点ほど高くなる (Stn.8 > Stn.6 > Stn.4) 明瞭な傾向が認められた。一方時系列変化に関しては、有機炭素・窒素含量は有意な傾向は認められないのに対し、陸起源の寄与に関しては、C:N 比、炭素・窒素安定同位体比のいずれの指標とも、2013 年 5 月以降に陸起源有機物の寄与が徐々に低下している傾向が示され。月による変動も大きいため、不確定な部分もあるが、この陸起源寄与の低下傾向は、C:N 比の低下などから推察すると、さらに遡って、2013 年 1 月くらい、つまり震災後 2 年後くらいから始まっていた可能性も示唆される。この理由の可能性としては次の 2 点が考えられる。1) 震災の巨大津波によって湾内に大量に堆積した陸起源物質が徐々に除かれ、2 年後になってようやく、震災前の堆積状態に戻り始めた。2) 震災後 2 年目くらいから湾内の生物生産 (養殖生物由来も含む) が徐々に活発化し、それに由来す

る有機物が海底に多く堆積し、陸起源の寄与が相対的に低下した。いずれにせよ、湾内の底質の変化は、底生生物に直接影響するだけでなく、水柱含めた湾内全体の物質循環にも影響をもたらす可能性が高いため、今後も注視する必要がある。

## (2) 大槌湾内における柱状堆積物試料中の炭素・窒素安定同位体比等の鉛直分布

津波による堆積物の攪乱や再堆積の過程を調べるためには、柱状堆積物試料を採取し、各成分の鉛直分布を調べる必要がある。そこで、2013年5月に大槌湾内の数か所において、アクリルパイプを用いて、柱状堆積物試料を採取した。図 5-18 に、湾中央部、Stn.7 (図 4.1 参照) における柱状堆積物試料に対して測定された、炭素・窒素安定同位体比、

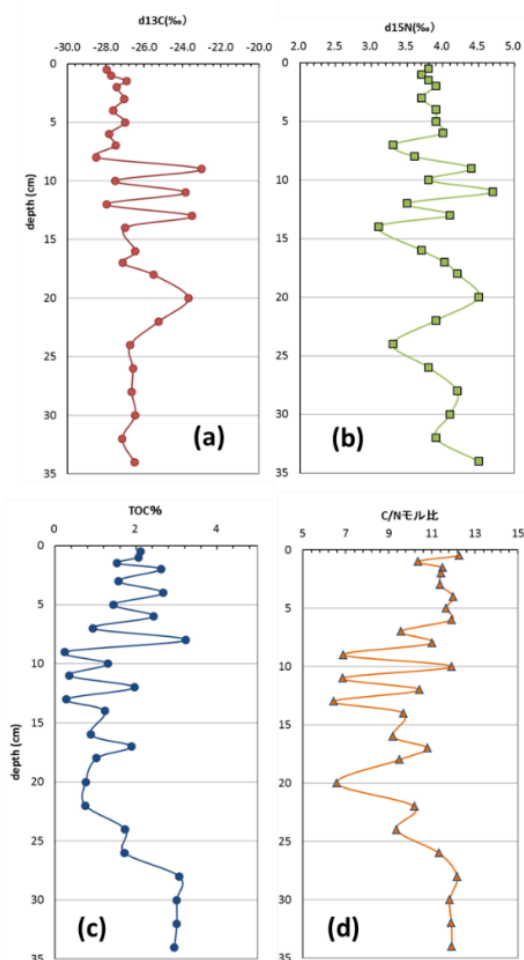


図 5-18 大槌湾内 Stn 7 における柱状堆積物試料中の (a)炭素安定同位体比、(b)窒素安定同位体比、(c)有機炭素含量、(d)C:N モル比の鉛直分布 (2013年5月)



有機炭素含量、C:N モル比の鉛直分布を示す。有機物の起源の指標となり得る、炭素・窒素安定同位体比、C:N モル比は、鉛直方向に大きく変動したが、3者ともほぼ同様なパターンを示し、相互の間にも直線関係が認められたため、この鉛直的な変動は、陸起源と現地性の有機物の寄与の割合が短い間隔で大きく変化していることを示唆している。特に顕著なのが、8-14 cmの間に見られるパルス状の大きな変動であるが、これは水分含量が低く粒径の粗いと考えられる堆積物層に一致し、有機汚染物質濃度の極小層、人為起源の銅・亜鉛の極大層とも一致していた。この層が2011年3月11日の巨大津波と関係しているとする、攪乱と再堆積を含む複雑な過程が生じていた事が考えられる。

### (3) 大槌湾湾口～沖合にかけての炭素・窒素安定同位体比等の分布

淡青丸 KT-12-20 次航海で湾外の測点において採取された柱状堆積物試料に対する測定結果では、湾口部 (Stn.OT3) に対して、湾外 (Stn.OT4, 5, 6) (図 5-19) の地点では、陸起源の寄与は急激に減少していることが、炭素安定同位体比、窒素安定同位体比、C:N モル比のいずれのデータからも示され、震災によって輸送された陸起源有機物が堆積物中に卓越して残存しているのは湾口部付近までである可能性が示唆された。さらに、新青丸 KS-14-9 次航海において Stn.OT3 と Stn.OT4 の間にさらに短い間隔で測点を3つ設け (Stn.OT3-1, OT3-2, OT3-3)、陸起源物質が沖合に向かってどの程度まで拡がっているのかを詳細に調べた。図 5-20.に、Stn.OT3～Stn.OT4 における炭素・窒素安定同位体比、

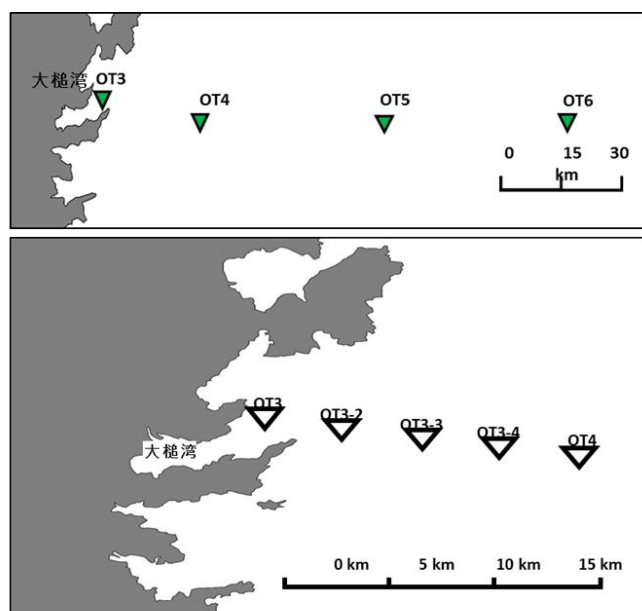


図 5-19 上：淡青丸 kT-12-20 次航海による大槌湾沖合海域 (OT3～OT6) の調査地点、下：新青 KT-14-9 次航海による OT3～OT4 間における調査地点

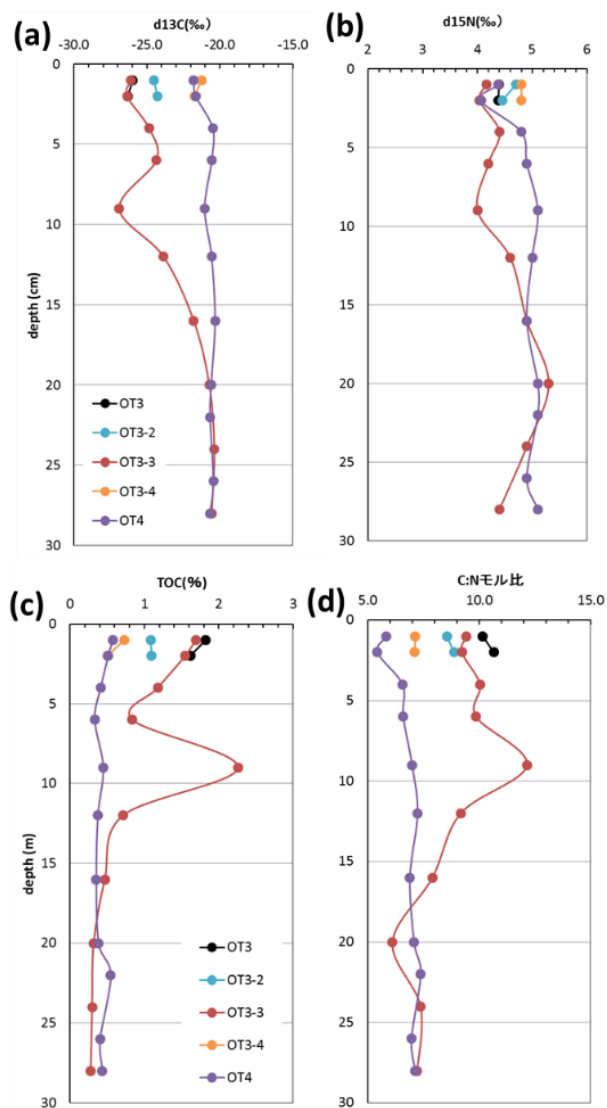


図 5-20 大槌湾湾口～沖合部にかけての柱状堆積物試料中の  
 (a)炭素安定同位体比、(b)窒素安定同位体比、(c)有機炭素含量、  
 (d)C:N モル比の鉛直分布 (2014 年 10 月) \*測点位置は図 5-4  
 を参照

有機炭素含量、C : N モル比の鉛直分布を示す (OT3-2 と OT3-4 については、データは表層のみ)。その結果、Stn.OT3-3 は、湾口の Stn.OT3 とほぼ同じく、陸起源の寄与のシグナルが強く残っているのに対し、Stn.OT3-4 ではほぼ Stn.OT4 と同じく現地性有機物の寄与が強かった。また、これらの分布は有機汚染物質の分布とも整合性のあるものであった。結論として、3 月 11 日の巨大津波によって輸送されてきた陸起源物質の広がりには、Stn.OT3-3 と Stn.OT3-4 の間付近までであることが特定された。また、Stn. OT3-3 の鉛直分布では、深度 8 cm 付近に、強い陸起源物質の寄与と高い有機物含量を示すシャープなピークが存在した。これは、有機汚染物質のピーク位置とも極めてよく一致して

おり、一時的な陸起源物質の強いインプットが生じたことを示している。

## 5-5 復興への貢献

本研究により、震災直後における大槌湾およびその周辺海域における表層堆積物中の重金属元素と有機汚染物質の分布を明らかにすることができた。また、元素や化合物にもよるが、その平均値が東京湾などの都市域の堆積物と比較すれば低濃度であり、経時的にも多少の変化はあるもののそれ程大きな変化がないことが明らかとなった。また、大槌湾海水中の溶存態カドミウム、マンガン、銅、亜鉛、鉛を測定したところ、他の沿岸海域と比較して高濃度の海水は観測されず、生物活動を阻害するような濃度レベルにはないと考えられた。さらに、銅の有機配位子濃度と条件安定度定数を明らかにし、現状の海水中の溶存態銅の濃度レベルでは、植物プランクトンの成育に影響を与えないことを示した。これらの知見は、人為起源物質が水産資源に与える影響を解明するために役立ち、現地で生活している人達の生活に安心を与えることができるものと期待される。

ただし、沿岸の海底環境は、そこに棲息している生物や生態系に影響を及ぼすだけでなく、物理化学過程や生物過程を通して周辺の海域へも影響を与える。今後、生物過程、堆積後の初期続成過程、復興工事、更なる自然災害などによる影響により、本研究期間中に得られた分布は変化する可能性があることは注視しなくてはならない。これに関連して、本研究で得られた、海水中の微量金属元素の中の白金が、沿岸域に堆積した人為起源物質の放出過程の新しいトレーサーになりうることを示すことができたのは重要な成果であり、今後沿岸域におけるモニタリングのツールとして役立つ可能性がある。

一方、陸起源物質の流入は沿岸域の汚染を引き起こす可能性がある一方、水産生物に対する栄養塩源としても重要である。本研究中の二枚貝殻の分析結果から、海水の栄養塩分析からは解明できない、栄養塩循環メカニズムの一部を明らかにする事ができた。栄養塩は生物生産に直接影響を与えるため、その変動メカニズムを明らかにする事は、持続可能な漁業のために必要不可欠な知見である。特に、二枚貝殻の微量元素組成の分析は成長時の環境情報を引き出すことが可能なため、例えば貝の成長が早い時期にどのような環境であったのかを明らかにできる可能性がある。本研究の手法を水産重要種の貝に応用する事で、成長に最適な環境を明らかにでき、効率的な養殖や漁業のために資する事も期待される。

以上、最先端の分析技術を駆使し、大槌湾を中心とした、三陸沿岸域の二枚貝中、堆積物中、海水中の有機汚染物質、重金属元素の高感度・精密測定を行い、行政レベルでの調査では明らかにならない、高精度のモニタリング結果を通じて、漁業者が安心して水産業を持続できるような環境情報を明らかにすることができた。また、陸起源物質の高感度指標の開発により、養殖など、河川由来の物質の供給過程に依存する水産業に対し有用な情報を提供できる可能性も示すことができた。

## 5-6 引用文献

- 堀越増興, 太田 秀, 土田英治. 1974年12月 (KO-74-2) 調査報告2. 5大槌湾の小型マクロベントス定量調査結果と海底地形・底質分布との関連. 1976. 東京大学大槌センター報告, 2, 40-44.
- Goldberg, E. D. (1975). "The mussel watch — A first step in global marine monitoring." *Marine Pollution Bulletin* 6(7): 111.
- 藤岡換太郎, 塚脇真二, 吉田晴子, 山中基由, 小坂和夫, 牧野泰彦. 大槌湾とその周辺地域の地質, 1988. 東京大学大槌臨海研究センター所報, 4, 15-46.
- Takada, H. and R. Ishiwatari (1990). "Biodegradation experiments of linear alkylbenzenes (LABs): isomeric composition of C12 LABs as an indicator of the degree of LAB degradation in the aquatic environment." *Environmental Science & Technology* 24(1): 86-91.
- Campos, M.L.A.M., and van den Berg, C.M.G., 1994. Determination of copper complexation in sea water by cathodic stripping voltammetry and ligand competition with salicylaldehyde. *Analytica Chimica Acta*, 284, 481-496.
- Kato, Y., Tanase, M., Minami, H. and Okabe, S., 1995. Remobilization of transition elements in pore water of continental slope sediments. In *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*, Eds. Sakai, H. and Nozaki, Y., pp. 383-405.
- 真田幸尚, 佐藤 太, 飯田英峰, 高田秀重, 山本 愛, 加藤義久, 上野 隆. 放射性各種および molecular marker による東京湾の堆積過程の解明. 1999. *地球化学*, 33, 123-138.
- Kogut, M.B., Voelker, B.M., 2001. Strong copper-binding behavior of terrestrial humic substances in seawater. *Environ. Sci. Technol.* 35, 1149-1156.
- 長岡千津子, 山本義和, 江口さやか, 宮崎信之, 2004. 大阪湾における低質重金属濃度と底質環境との関係. *日本水産学*, 70 (2) , 159-167.
- Obata, H., Yoshida, T., Ogawa, H., 2006. Determination of picomolar levels of platinum in estuarine waters: A comparison of cathodic stripping voltammetry and isotope dilution-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chimica Acta* 580, 32-38.
- Ishiwatari, R. T., Kasuhiko, Hirakawa, Y., Yamamoto, S. (2009). Transport of terrestrial organic matter to marine sediments: off Sanriku (NE JAPAN), northwestern Pacific. 24th International Meeting on Organic Geochemistry, Bremen, Germany.
- EU (2011). "Commission Regulation (EU) No 835/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for polycyclic aromatic hydrocarbons in foodstuffs Text with EEA relevance." *Official Journal of the European Union* L215 54: 4-8.
- MOE. (2012). "The effects of waste devices contained PCBs by the Great East Japan

- Earthquake (ver.9)." Retrieved 10/19, 2016, from [https://www.env.go.jp/jishin/attach/saigai\\_pcb\\_eikyo\\_201212.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/attach/saigai_pcb_eikyo_201212.pdf).
- Saha, M., H. Takada and B. Bhattacharya (2012). "Establishing Criteria of Relative Abundance of Alkyl Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) for Differentiation of Pyrogenic and Petrogenic PAHs: An Application to Indian Sediment." *Environmental Forensics* 13(4): 312-331.
- Prefecture, M. (2013). "Recovery report from Senen treatment center." Retrieved 0906, 2016, from <http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/senen-wwt/dayori1.html>.
- 駒井 武, 川辺能成, 原 淳子, 宮崎晋行, 張 銘, 2014. 土壤汚染リスク調査, 産業総合研究所地質調査センター巨大地震による複合的地質災害に関する調査研究報告書, 383-398.
- Suzuki, A., Obata, H., Okubo, A., Gamo, T., 2014. Precise determination of dissolved platinum in seawater of the Japan Sea, Sea of Okhotsk and western North Pacific Ocean. *Marine Chemistry* 166, 114-121.
- 鈴木麻彩実, 2015. 西部北太平洋とその縁辺海および河口域における白金の分布と挙動に関する研究. 東京大学, 2015, 博士学位論文.
- Kondo, Y., Obata, H., Hioki, N., Ooki, A., Nishino, S., Kikuchi, T., Kuma, K., 2016. Transport of trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in late summer 2012. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 116, 236-252.
- Mashio, A.S., Obata, H., Tazoe, H., Tsutsumi, M., Santos, Ferrer I, A. and Gamo, T, 2016. Dissolved platinum in rainwater, river water and seawater around Tokyo Bay and Otsuchi Bay in Japan. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 180, 160-167.
- Mizukawa, K., Y. Hirai, H. Sakakibara, S. Endo, K. Okuda, H. Takada, N. Murakami-Sugihara, K. Shirai and H. Ogawa (2017). "Spatial Distribution and Temporal Trend of Anthropogenic Organic Compounds Derived from the 2011 East Japan Earthquake." *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73(2): 185-195.
- 小川浩史, 穴澤活郎, 小畑 元, 白井厚太郎, 杉原奈央子, 高田秀重, 真塩麻彩実, 水川薫子, 南 秀樹, 2017. 大槌湾における陸域由来環境汚染物質の分布と変動, *日本水産学会誌*, 83, 648-651.
- Wong, K.H., Obata, H., Kim, T., Mashio, A.S., Fukuda, H. and Ogawa, H., 2018. Organic complexation of copper in estuarine waters: An assessment of the multi-detection window approach. *Marine Chemistry*, 204, 144 - 151.
- Murakami-Sugihara N., Shirai K., Hori M., Amano Y., Fukuda H. Obata H., Tanaka K., Mizukawa K., Sano Y., Takada H., Ogawa H., (2019) Mussel shell geochemical analyses reflect coastal environmental changes following the 2011 Tohoku tsunami. *Earth and Space*

Chemistry, 3,1346-1352.

Mashio, A. S., Obata, H., Fukuda, H., and Ogawa, H, 2020. Spatiotemporal variations of platinum in seawater in Otsuchi Bay, Japan after the 2011 tsunami. *Science of the Total Environment*, 708, 134659, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134659.

## 6 物理過程と生態系の統合モデル

### 6-7 研究の背景と目的

三陸沿岸は北西太平洋に位置し、津軽暖流水、親潮水、黒潮水が複雑に混合した海域となっている。そして、これらの海水の動きは化学物質の攪拌や移動、ならびに生物過程に大きな影響を与えている。そこで、本サブテーマでは、三陸沿岸生態系の統合モデルを構築することを目的とする。

研究においては、特にリアス湾と湾外の海流系の間で生じる相互作用を重視し、それを実現するために海洋循環モデルのマルチスケール連結階層モデリングを前例のない高い水準且つ大きな規模で実施する。そして、湾内の物理場の解明を行うとともに、湾内における低次生産過程までモデリングすることによって、地球化学・生物学的な実態も明らかにする。

一方、今日におけるそうした最先端の海洋循環モデルであっても、海底境界層過程の再現性には大きな問題を抱えており、それは将来における一層精緻な沿岸海洋モデリングを実現するためには必ず解決されなければならない問題と言える。そこで、沿岸域の海底境界層の実態解明を、乱流を解像する DNS(直接数値シミュレーション)モデルを用いて実施する。

さらに、波浪(うねりと風波)も、海水の流れ(海流や潮流及び乱流)と並んで、沿岸の養殖業や採介藻漁業等に大きな影響を及ぼす。そこで、リアス湾内における波浪の実態解明も波浪モデルを用いて実施する。

なお、これらのモデリング研究の遂行に際しては、モニタリング(海洋環境観測)研究との連携も緊密に実施し、モデル数値データと現場観測データを相互比較・検証することによって、三陸沿岸の物理過程と生態系の実態解明及びモデリング精度向上を実現する。

### 6-8 研究の概要および結果

#### 6-8-1 大槌湾における気候值的な物理場解明に資するネスティング手法を用いた数値

モデリングと低次生産過程の組み込み

(1) はじめに

三陸沖は豊かな漁場であると同時に、沿岸ではリアス式海岸という地形を活かした養殖業が盛んである。しかし 2011 年の東日本大震災に伴う大津波によつての養殖施設が壊滅的な被害を受けただけでなく、海岸及び海底地形の変化や沿岸域の生態系そのものが大きな被害を受けた。こうした生物環境の震災前後の変化や震災後の回復過程の調査研究とその理解において物理場の把握が必要となるものの、震災前までの物理場に対する研究はその理解に十分とは言えなかった。岩手県の大槌湾(図 6-1)を例にとると、東京大学大気海洋研究所沿岸国際研究センターによる湾内全域の水温・塩分の測定は年に数回程度であり、潮汐の影響が大きい大槌湾の物理場を理解するには時空間解像度が不十分であった。また海底設置型の超音波流速計による流速場の測定は湾中央部において 2003 年 10 月から 2004 年 10 月にかけて行われたのみ (Otoabe et al. 2009) であった。三陸リアス式海岸の各湾内は震災後も速やかに養殖機材が多数投入され、航路も確保する必要があるため、船舶及び係留系による時空間的に高密度な観測を新たに行うことは難しい状況にある。

こうした困難を克服する手法として海洋数値モデリングが考えられる。しかしこれまでの大槌湾を対象とした研究 (Kawamiya et al. 1996) では水平解像度が約 400 m と水平スケールが 10 km にも満たない湾の物理場を再現するには不十分なものであった。また研究対象期間が植物プランクトンの春季ブルームのみを対象としており、他の季節における物理場のモデリングは行われてこなかった。

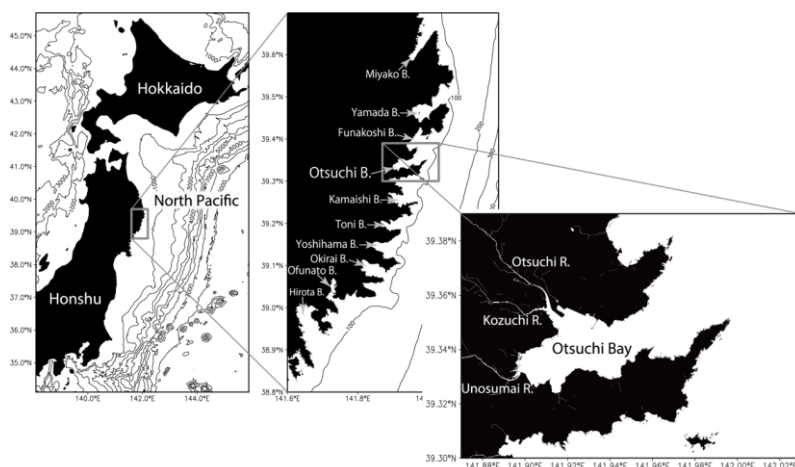


図 6-1 大槌湾の位置

また、三陸沿岸域は北太平洋に直接面しており、津軽暖流水・親潮水・沿岸親潮水・黒潮水が複雑な循環場を形成している。さらに、日本沿岸の太平洋側は潮汐による水位及び流動場の変動による影響が大きい。つまり、湾内のモデリングを行う際に、こうした外洋による影響の考慮は必要不可欠である。



一方で、三陸沿岸には一級河川のような大河川は存在せず、中小の河川による淡水流入があり、防波堤のような人工構造物の影響等を考慮すると、100 m オーダーの空間解像度では不十分であり、より高解像度化する必要がある。

本研究では大槌湾をモデルケースとして、ネスティング手法を用いることで日本周辺を高解像度化した太平洋モデル及び大槌湾内で十分な解像度を確保した湾モデルの2つの海洋数値モデルを開発することによって、こうした湾内の気候値的な物理場の解明を行うとともに、大槌湾内における低次生産過程までモデリングすることによって、地球化学・生物学的な研究に対する情報の提供を目的とした。

物理モデルに関しては既に坂本ら (2015) 及び Sakamoto et al. (2017) として発表済みであるが、低次生産過程の組み込みに際して物理モデルのアップデートを行った。本稿では既出論文の内容も含めて、大槌湾における冬季及び夏季の平均循環場と、低次生産過程に含まれる植物プランクトンの変動について述べる。

## (2) 手法

本研究では、太平洋全域を対象とした「外洋モデル」と大槌湾を対象とした「湾モデル」をそれぞれ構築した。また湾モデルには NPZD と呼ばれる基本的な低次生産過程を組み込み、オンラインで計算するモデルとした。本節では各モデルの概要と実験法について述べる。

## (3) モデル

本研究で使用したモデルは海洋大循環モデル COCO (Hasumi 2006) をベースに、双方向ネスティング手法を取り入れたモデル (Kurogi et al. 2013; Urakawa et al. 2015) である。ネスティング手法とは、水平解像度の比較的低いモデル (外モデル) の一部に、より水平解像度の高いモデル (内モデル) を埋め込んで両モデル間で通信を行うことにより、外モデルの結果を水平境界条件として内モデルを高解像度化するものである。双方向ネスティングでは内モデルの計算結果も外モデルの計算に反映させる。この手法によりモデル領域の全域を一様に高解像度化する必要がなくなり、限られた計算資源で研究対象海域を高解像で計算することが可能となる。

外洋モデルでは太平洋全域を対象とし、三重ネストモデルとして段階的に日本近海で高解像度化する設定とした (cf. Urakawa et al. 2015)。入れ子になっている各モデルの領域を図 6-2 に、水平解像度を表 6-1 に示す。

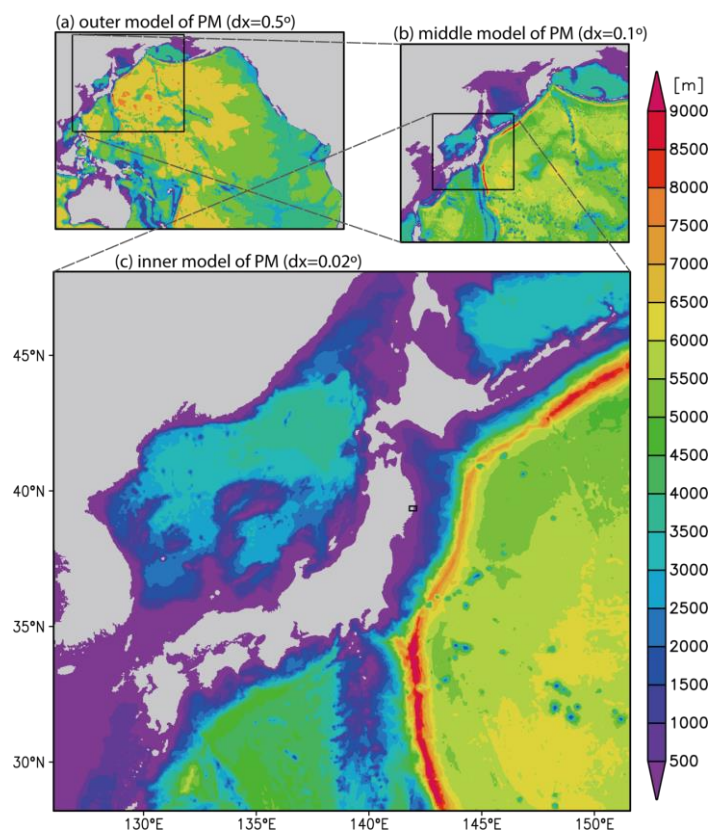


図 6-2 外洋モデルの各ネストモデル(a: outer, b: middle, c: inner)の領域。c の 39°N,142°E 付近にある枠は湾モデルの middle1 領域 (図 3a)。

表 6-1 外洋モデルで使用した各ネスト段階における水平解像度。φ は緯度を示す。

モデル	水平解像度(緯度方向×経度方向)
outer	$0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ} \cos \phi$
middle	$0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ} \cos \phi$
inner	$0.02^{\circ} \times 0.02^{\circ} \cos \phi$

モデル地形はアメリカ海洋大気庁 (NOAA) の 2 分グリッド地形データ ETOPO2 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>) から作成した。初期値は静止状

態とし、NOAA の国立海洋データセンター (NODC) による World Ocean Atlas 2009 の水温及び塩分場の年平均値 (Locarnini et al. 2010; Antonov et al. 2010) から成層を与え、外力は Common Ocean-ice Reference Experiments (CORE) ver. 2 (Large and Yeager 2009) の normal year forcing と  $0.1^\circ$  グリッドの河川網モデルによる日毎気候値 (Yoshimura et al. 2008) を用いた。また、潮汐は月及び太陽の軌道から算出される起潮力を与えた。実験は初期値から 7 年間行っている。潮汐以外の詳細については Urakawa et al. (2015) に詳しい。なお、本論文においては外洋モデルの結果については記述しない。

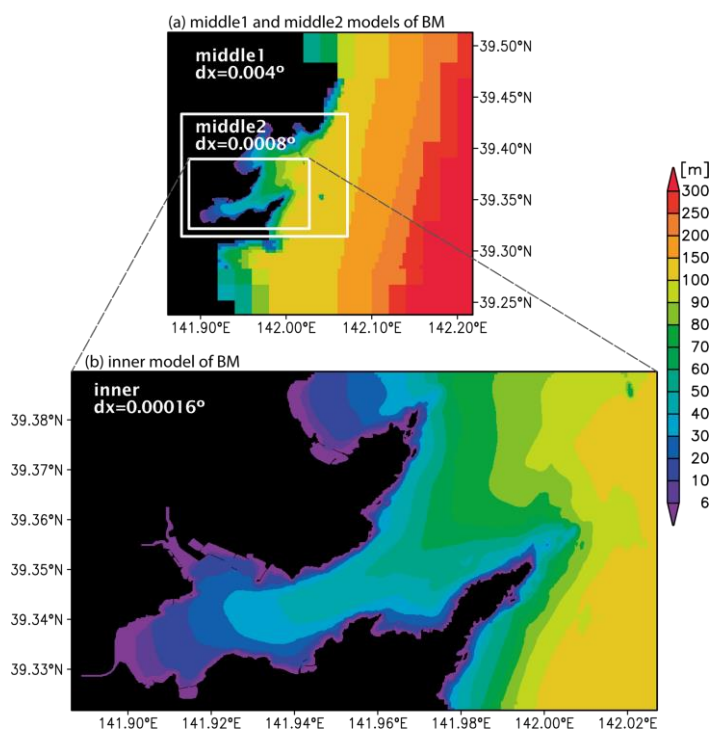


図 6-3 湾モデルの各ネストモデル (a: middle1 及び middle2、b: inner) の領域。

表 6-2 湾モデルで使した各ネスト段階における水平解像度。 $\phi$  は緯度を示す。

モデル	水平解像度 (緯度方向 × 経度方向)
outer	$0.02^\circ \times 0.02^\circ \cos \phi$
middle1	$0.004^\circ \times 0.004^\circ \cos \phi$
middle2	$0.0008^\circ \times 0.0008^\circ \cos \phi$
inner	$0.00016^\circ \times 0.00016^\circ \cos \phi$

湾モデルでは大槌湾とその周辺海域を対象とし、四重ネストとした。各モデル領域

を図 6-3 に、水平解像度を表 6-2 に示す。なお、湾モデルにおいては上で述べたオフラインによる外洋モデルからの単方向ネスティングを実現するために、最も外側のモデル（外モデル）を外洋モデルの最も内側のモデルと同一の水平解像度とし、単に外洋モデルの出力を時空間的に補間して外側から 2 番目のモデルに与える機能を持つものとした点が外洋モデルと異なる。また Sakamoto et al. (2017) では本モデルの inner/middle2/outer に相当する三重ネストモデル（ただし Sakamoto et al. (2017) における middle2 相当のモデルは intermediate と称していた）としていた。しかし middle2 と outer の解像度差が大きかったため middle1 を導入した。モデルの主な物理パラメータを表 6-3 に示す。

表 6-3 湾モデルで使用した主なパラメータ

Harmonic 型 Smagorinsky 渦粘性係数	0.4
背景鉛直拡散係数	10.0 (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
海底摩擦係数	2.6×10 <sup>-3</sup>
計算時間間隔	3 s

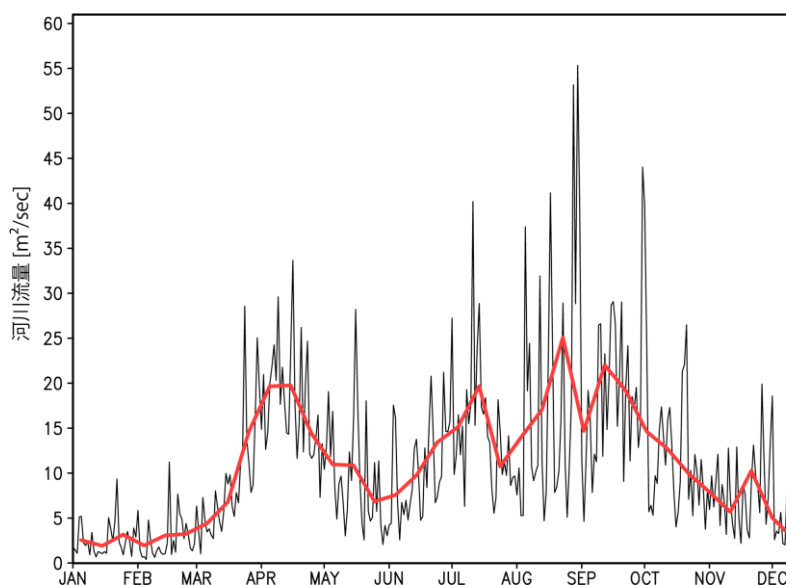


図 6-4 湾モデルに与えた大槌湾に注ぐ三河川の総淡水流入量。Yoshimura et al. (2008) から作成した日気候値（黒線）から旬気候値（赤線）を算出し、湾モデルに適用した。

モデルの海底地形は日本水路協会が整備した海底地形デジタルデータ M7000 シリーズを用いて作成した。海岸地形は、国土交通省国土地理院 (GSI) の基盤地図情報から取得できる 10 m メッシュの数値標高モデル(<http://www.gsi.go.jp/index.html>) から作成した。モデルに与えた気象要素は、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター (ICRC) による 1998 年から 2010 年までの 13 年間の定点観測から得られた旬平均値 (乙部ら 1999 など) を用いて旬毎気候値を作成し、モデル全域に与えた。河川流量は外洋モデルで与えられた日気候値のうち大槌湾湾口部に与えられた値を旬平均し (図 6-4)、大槌湾奥部に流入する 3 河川 (小槌川・大槌川・鶴住居川; 図 1) に対して安保ら (2005) などを参考に、小槌川 : 大槌川 : 鶴住居川 = 1 : 2 : 4 となるように分配し、各河川の河口より上流側で降水量に付加する形で与えた。

実験は静止状態から風応力及び河川流量をゼロから徐々に大きくするスピニングアップを行った後、さらに外洋モデルの流速場をゼロから徐々に増加させる計 3 ヶ月のスピニングアップを行った結果を初期値とし、外洋モデルの 7 年目の出力を用いて 1 年間通して実施し、解析に使用した。

#### (4) 低次生産過程

本研究で使用している海洋大循環モデル COCO は物理場を解くものであるため、オンラインで低次生産過程を計算するために、予めオフラインモデルとして開発されていた Hasumi and Nagata (2014) の低次生産過程モデルを湾モデルで使用する COCO に組み込んだ。低次生産過程は海水中の栄養塩である硝酸塩濃度 (N) が光合成・死亡・

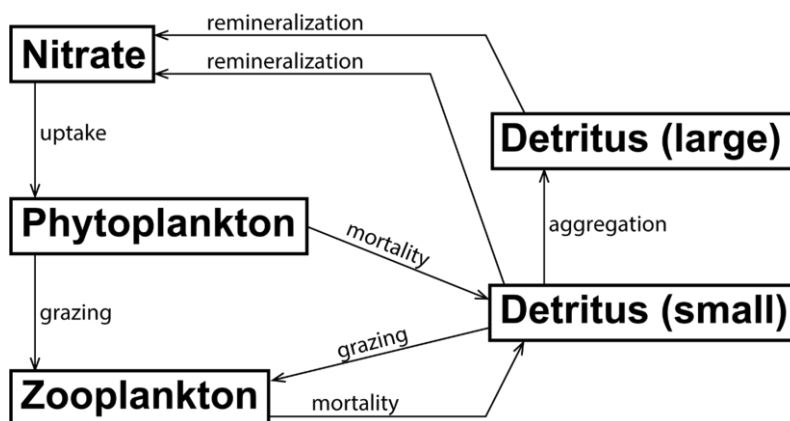


図 6-5 低次生産過程モデル概略図。Hasumi et al. (2014) の Fig. 1 で示されるモデル概略図のうち、鉄とバクテリア及び溶存有機物 (DOM) の過程を省き、デトリタス (Detritus) から硝酸塩 (Nitrate) への remineralization 過程が追加されている。

捕食・分解などの過程を通して植物プランクトン(P)・動物プランクトン(Z)・デトリタス(D) にどのように分配されるかをモデル化した NPZD タイプと呼ばれるものである。詳細は Hasumi and Nagata (2014) を参照されたい。なお、Hasumi and Nagata (2014) ではデトリタスが大小 2 種類設定され、さらに鉄とバクテリアの過程がモデル化されているものの、本研究では鉄とバクテリアの過程は省略し、D が 2 種類の NPZD として使用した (図 6-5)。主なパラメータを表 6-4 に示す。

表 6-4 低次生産過程モデルで使用した主なパラメータ

植物プランクトン最大成長率 $P_0$	2.0 day <sup>-1</sup>
植物プランクトン死亡率	0.02 day <sup>-1</sup>
Q10 ファクター	2.0
植物プランクトン呼吸利用速度	0.02 day <sup>-1</sup>
動物プランクトンによる植物プランクトンの最大捕食率	0.5 day <sup>-1</sup>
動物プランクトン死亡率	0.07 day <sup>-1</sup>
動物プランクトンのバイオマス依存死亡率	0.15 day <sup>-1</sup> ( $\mu$ molN/L)
デトリタスの分解率	0.16 day <sup>-1</sup>
デトリタス (small) の凝集率	0.05 day <sup>-1</sup>

NPZD モデルにおいて外力として必要な外洋及び流入河川水における硝酸塩濃度は以下のように設定した。外洋に関しては World Ocean Atlas 2013 (Locarnini et al 2013; Zweng et al. 2013; Garcia et al. 2014) の気候値のうち、三陸沖の 37.5-42.5°N, 142.5-150.5°E における水温と塩分、及び深度を説明変数として硝酸塩濃度を推定する多重回帰モデルを作成し、外洋モデルの水温と塩分から硝酸塩濃度を算出して使用した。河川に関しては流入する各河川における観測値 (安保ら 2005; 福田私信) の平均値を使用した (表 6-5)。

表 6-5 低次生産過程モデルに使用した河川から入る硝酸塩濃度

河川名	硝酸塩濃度 ( $\mu$ mol/L)
大槌川	35.0
小鎗川	26.0
鵜住居川	29.0

## (5) 結果

大槌湾内の循環について、スペースの都合上冬季（1月）、春季（4月）及び夏季（8月）の循環像について記述する。また、低次生産過程については植物プランクトンの変動について記述する。

### ● 冬季の循環（1月）

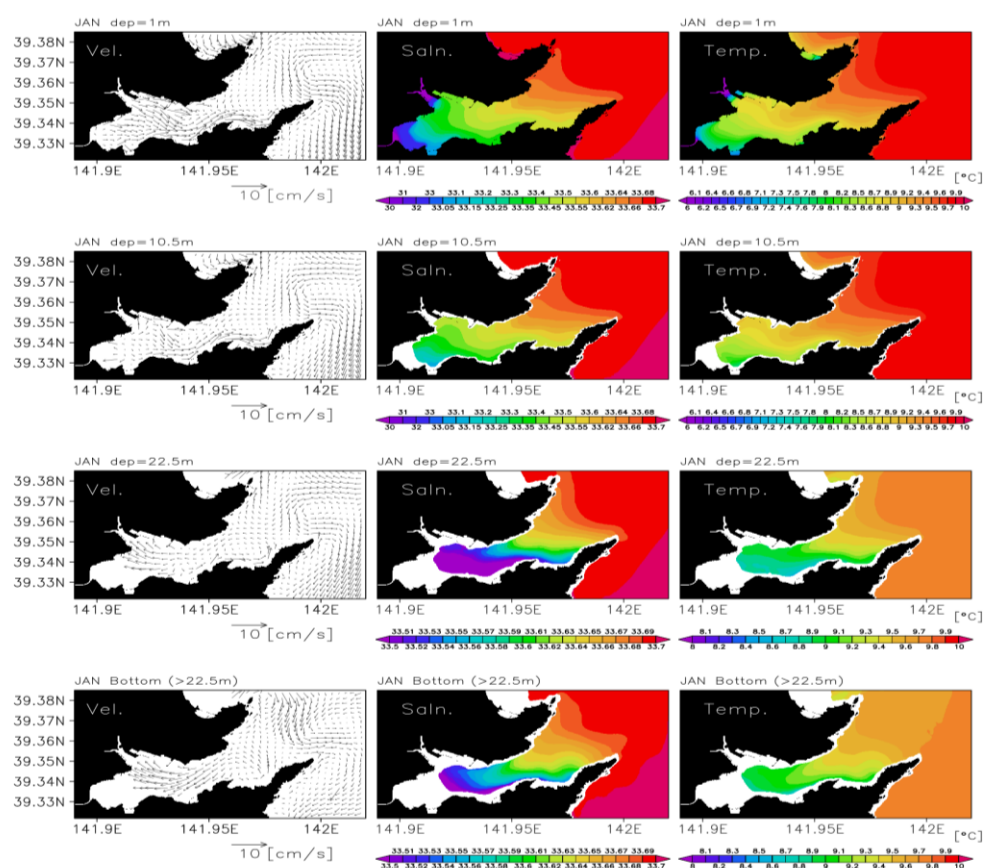


図 6-6 湾モデルの1月平均流速場（左）、塩分（中央）及び水温（右）。上から深度が1m、10.5m、22.5m、及び22.5mより深い部分の海底直上値を示す。塩分及び水温のカラーは深度毎に異なることに注意。

1月の月平均循環の概要は以下の通りである（図 6-6）。湾奥では河川流入量の小さい冬季は河水が海水と混合しながら深度 20m より浅い上層で東向き（流出方向下層では西向き（流出方向））に流れる。一方で湾口から湾中央部にかけては外洋水が流入し、湾の南岸近くで流出する循環となっている。

通常、大槌湾周辺の北太平洋沿岸では岸に近い浅い海域に高温・高塩分の津軽暖流水

が存在し、この東側及びこれより深い部分に低温・低塩分の親潮系の水が存在している。

このため、湾口から流入する外洋水は通常は津軽暖流水である。この影響で湾中央部から湾口部にかけて南北方向に水温勾配が生じている。

• 春季の循環（4月）

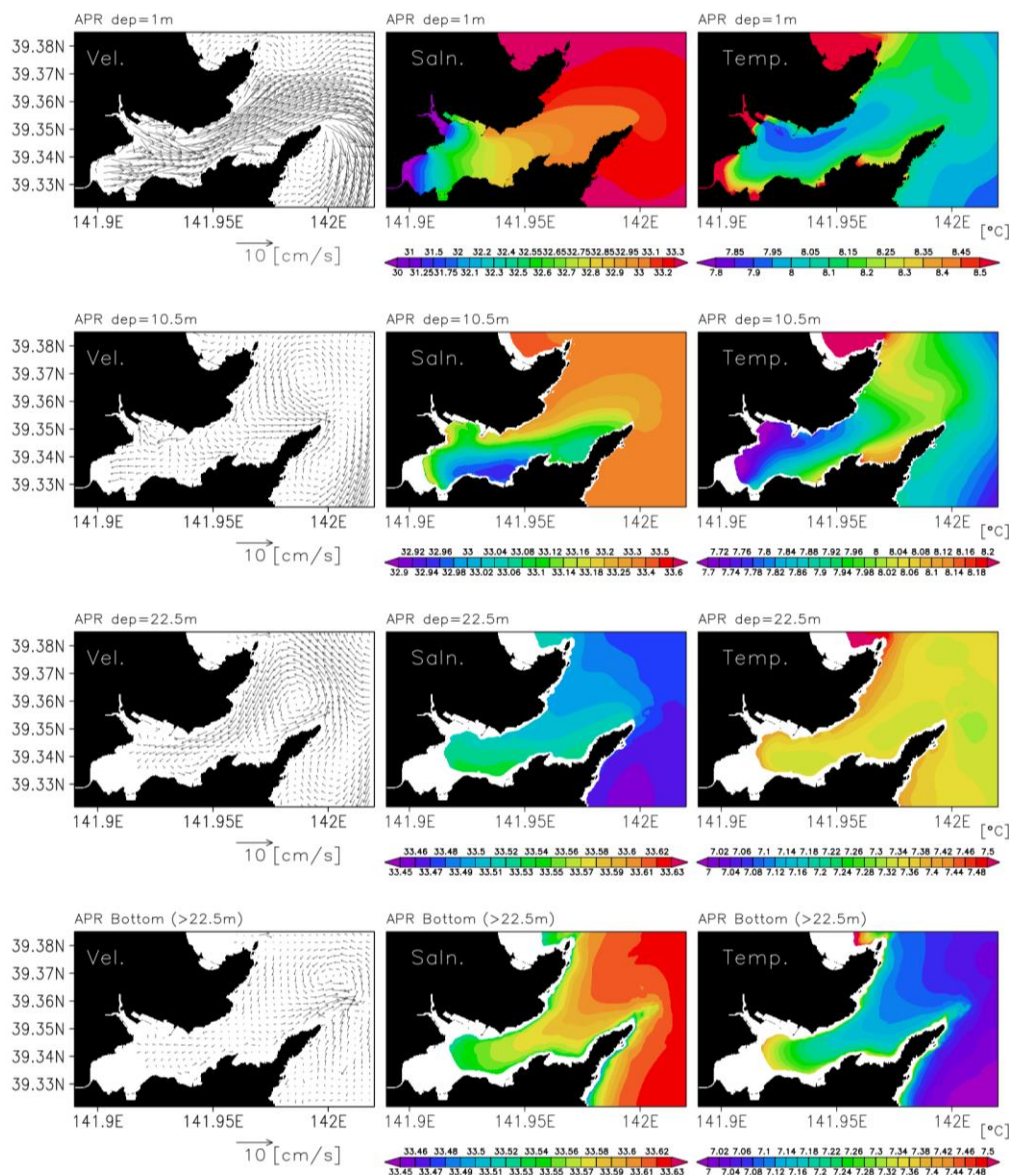


図 6-7 図 6 と同様。ただし 4 月の平均値。

4 月における月平均の循環は以下の通りである（図 6-7）。冬季に比べ流入量の多い河川水(図 4)の影響で、表層から数メートル深程度では低塩分層が形成され、概ね湾奥から湾口に向かう流れが卓越する。塩分躍層以深では湾の北側で中層から外洋水（津軽暖流水）の流



入、湾の南側で中層ないし底層から流出という反時計回りの循環が見られる。

• 夏季の循環 (9月)

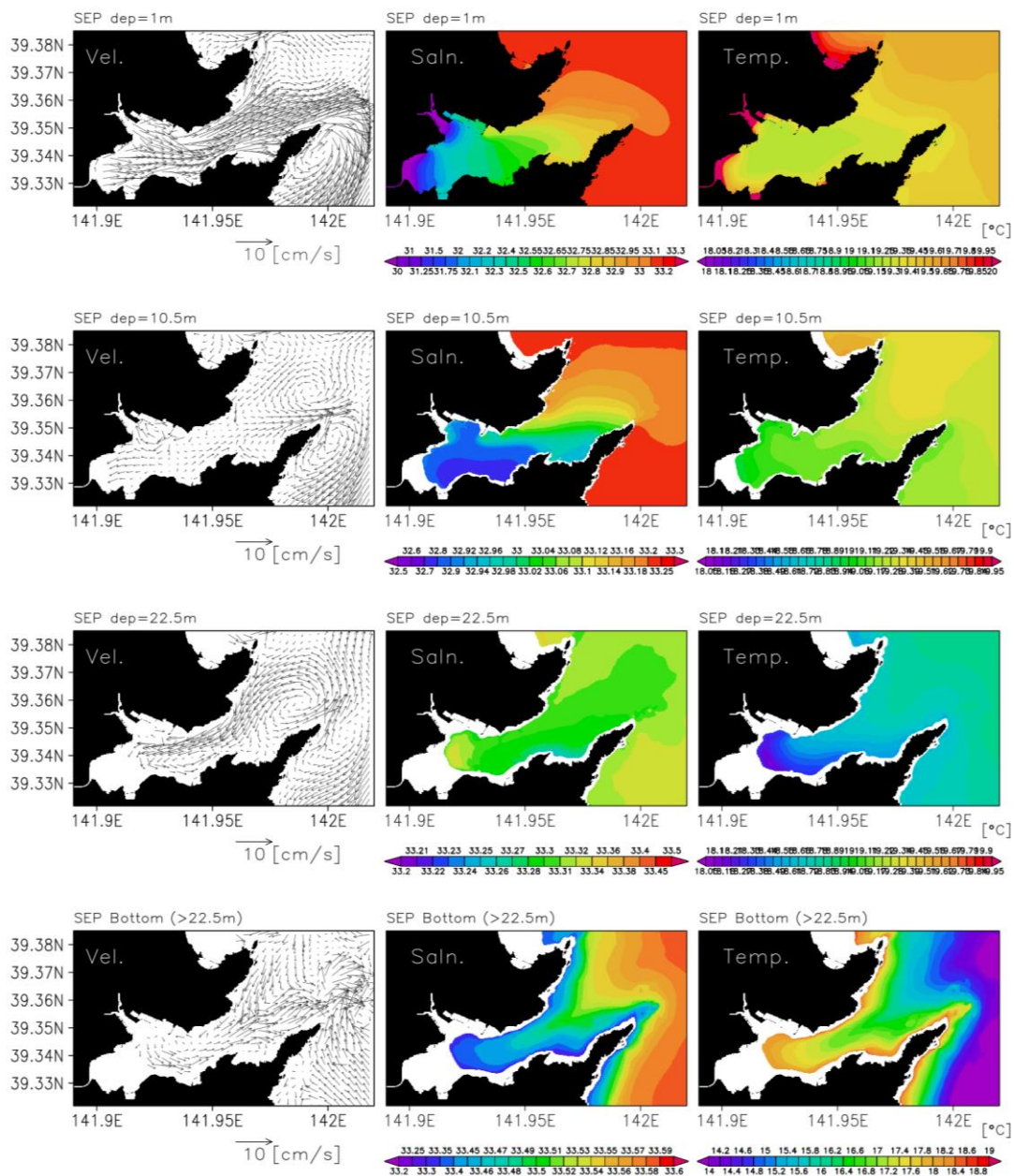


図 6-8 図 6 と同様。ただし 9 月の平均値。

9月における月平均の循環は4月と同様であるが、塩分躍層以深の流速は4月より大きい。(図 6-8)。一方で、湾内の塩分は全体的に4月より低い。河川水の流入量は4月

と9月で大きな差はなく（図 6-4）、外洋水の影響と考えられる。

また、夏季の大槌湾においては上層と下層で潮流の向きが逆転し、潮汐周期で振動する二重潮と呼ばれる現象が観測される（Tanaka et al. 2017 など）。本モデルでも湾内において上層と下層における流速を49時間のウィンドウで相関を取ると、冬季（12-3月）は正の相関が卓越し、夏季（5-10月）は負の相関が卓越する（図 6-9、青線）。それぞれ

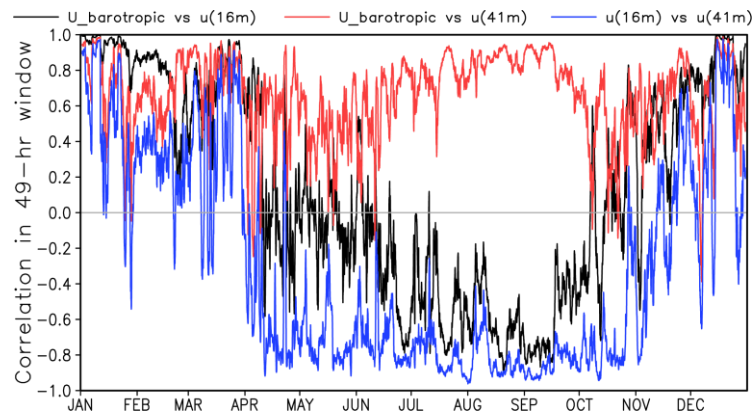


図 6-9 モデル中の 39.347°N, 141.95°N における順圧東西流速及び深度 16m 及び 41 m における東西流速の相関係数時系列。黒線が順圧流速と深度 16m 流速、赤線が順圧流速と深度 41m 流速、青線が深度 16m 流速と深度 41m 流速の相関をそれぞれ示す。相関係数は1時間毎に各時刻を中心とした49時間の範囲において算出している。

の流速と順圧流速との相関係数の時系列と比較することで、冬季は順圧的、夏季は傾圧的な潮流となることが示され、夏季の二重潮が再現されていることがわかる (cf. Sakamoto et al. 2017)。

#### ● 植物プランクトンの変動と春季ブルーム時の分布

大槌湾内における植物プランクトン時系列は、3ないし4月の春季ブルームとそれ以外の季節の比較的低い濃度を示した（図 6-10）。これまでの観測と比較すると春季ブルームは2月下旬から3月にかけてシャープな植物プランクトンの増加と、その後続くシャープな減少を示唆しており（福田私信、図なし）、モデルにおける時間変化はやや鈍い。また春季ブルーム時の植物プランクトン量の最大値もモデルでは過小評価、それ以外の時期では過大評価であった。

植物プランクトンの春季ブルーム時における海面付近の空間分布は、湾内では南側に偏る傾向が見られた（図 6-11）。4月の海面水温は南側の方が僅かであるが高い傾向にあり、これを反映していると思われる。

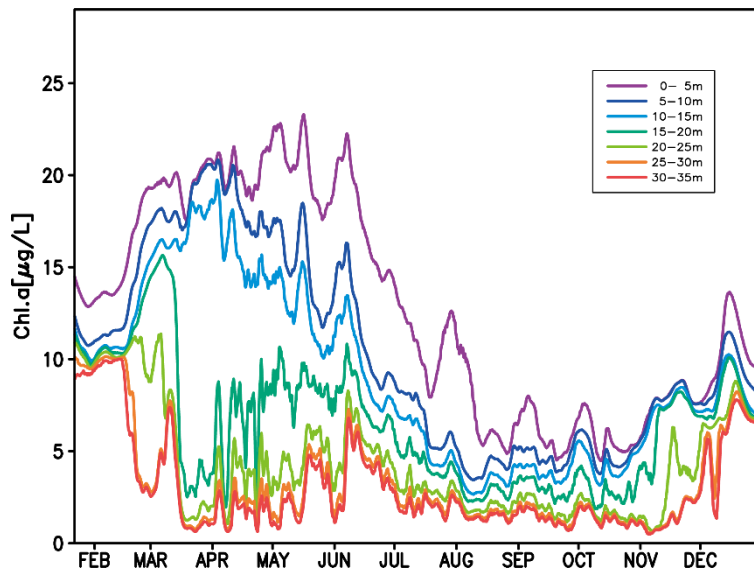


図 6-10 海面から深度 35m までの 5m 毎の大槌湾内における植物プランクトン量最大値の時系列。植物プランクトン量はクロロフィル a の量に相当させるためにモデルで表現される植物プランクトンにおける硝酸塩濃度に 1.6 を乗じている。線の色と深度の対応は図中凡例を参照のこと。

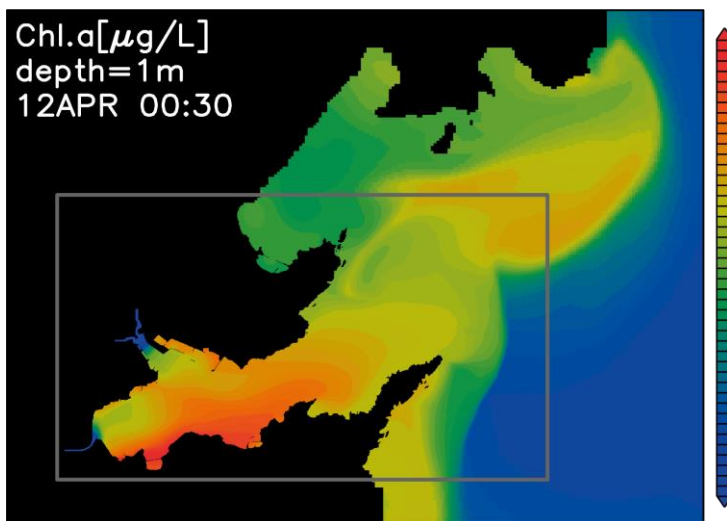


図 6-11 春季ブルーム時における植物プランクトンの硝酸塩濃度に 1.6 を乗じたクロロフィル a 相当量の海面（モデル最上層）分布。モデル内の時刻は 4 月 12 日の 0-1 時の 1 時間平均値。

## (6) 議論

本研究の数値シミュレーション結果が現実と整合するのか検証する必要がある。しかしながら、大槌湾では養殖施設や船舶航路の都合上、長期間の詳細な観測を実施することが困難であり、湾内循環の季節変動を論じている研究は多くない。ここでは Otobe et al. (2009) と Ishizu et al. (2017) の結果と比較する。

Otobe et al. (2009) は湾中央部に海底設置型超音波多層流向流速計 (ADCP) を概ね南北等間隔に 3 台設置し、約 1 年間にわたる観測を行った。これによると、通年にわたり概ね反時計回りの循環が卓越しているものの、冬季は強い西寄りの季節風の影響により表層で東向き・流出傾向となり下層ではそれを補うような西向き・流入傾向になっていると推測している。3 節で示したモデルによる循環像のうち夏季表層における流出傾向を除けば、モデルによる循環像はこの観測研究と概ね整合する。

一方、近年の観測的研究である Ishizu et al. (2017) では、湾口の南北両岸近くの海底設置型 ADCP による流向流速プロファイルや、湾内で定期的に行われている CTD による温度・塩分の観測などから大槌湾内の循環像を推測した。これによる湾内の循環像は概ね Otobe et al. (2009) と同様とされ、冬季は上層で流出、下層で流入傾向となる。一方、夏季は海面近くで流出傾向、それより深い部分では反時計回りとされ、本モデルの結果と整合する。Ishizu et al. (2017) では津軽暖流水の流量が大槌湾内の循環場に大きく影響しているとしており、本モデルにおいて外洋の状態と河川水の影響も含めた湾内での成層が適切に表現されたことで、観測結果と概ね整合する平均循環場が再現されたと考えられる。

## (7) 課題と今後の展望

本研究の実施にあたって課題として挙げられるのは、海面境界条件としての大気場の時空間解像度ならびに河川流量の時間解像度の不足である。前者については既に領域気象モデルを用いたダウンスケーリングによる解決を試みている。後者はいくつかのモデル出力を候補として本研究で利用可能か検討しているところである。

本研究の最終目標として海況予測を行うことを目標としている。本稿執筆時点では未実施であるものの、上で挙げた気象要素と河川流量に加えて北太平洋域の再解析モデル (Tanaka et al. in prep.) の出力を外洋モデル出力と差し替えることにより実施することで、観測研究との直接比較と化学及び生物学的研究に対する情報提供と海況予測の実現可能性について検討したい。

## (8) 参考文献

- 安保綾子, 乙部弘隆, 高木稔 (2005): 大槌湾に流入する河川水. 国際沿岸海洋研究センター研究報告, 30, 4–8.
- Antonov, J. I., D. Seidov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010): World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.
- Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O. K. Baranova, M. M. Zweng, J. R. Reagan, and D. R. Johnson (2014): World Ocean Atlas 2013, Volume 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate). S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 76, 25 pp.
- Hasumi, H. (2006): CCSR Ocean Component Model (COCO) version 4.0, Rep. 25, Center for Climate System Research, University of Tokyo, Chiba, Japan.
- Hasumi, H., and T. Nagata (2014): Modeling the global cycle of marine dissolved organic matter and its influence on marine productivity. *Ecol. Model.*, 288, 9–24, doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.05.009.
- Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka, and K. Komatsu (2017): Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, 73, 115–131, doi: 10.1007/s10872-016-0383-z.
- Kawamiya, M., M. J. Kishi, M. D. Kawser Ahmed, and T. Sugimoto (1996): Causes and consequences of spring phytoplankton blooms in Otsuchi Bay, Japan. *Cont. Shelf Res.*, 16, 1683–1698.
- Kurogi, M., H. Hasumi, and K. Tanaka (2013): Effects of stretching on maintain the Kuroshio mender. *J. Geophys. Res.* 118, 1182–1194, doi:10.1002/jgrc.2012.
- Large, W.G., and S. G. Yeager (2009): The global climatology of an inter- annually varying air-sea flux data set, *Clim. Dyn.*, 33, 341–364, doi: 10.1007/s00382-008-0441-3.
- Locarnini R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, and D. R. Johnson (2010): World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, M. M. Zweng, C. R. Paver, J. R. Reagan, D. R. Johnson, M. Hamilton, and D. Seidov (2013): World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 73, 40 pp.
- 乙部弘隆, 大槻真理子, 盛田孝一, 黒沢正隆, 岩間祐吉, 柏崎恒二 (1999): 海象・気象観測

- 結果 (1998 年度版) , *Otsuchi Marine Science*, 24, 58–72.
- Oboe H., H. Onishi, M. Inada, Y. Michida, and M. Terazaki (2009): Estimation of water circulation in Otsuchi Bay, Japan inferred ADCP observation. *Coastal Marine Science*, 33, 78–86.
- 坂本天, 浦川昇吾, 羽角博康, 石津美穂, 伊藤幸彦, 小松輝久, 田中潔 (2015): 双方向ネスト太平洋モデルによる三陸沿岸の高解像度生態系モデリングに向けた物理モデルの構築. *沿岸海洋研究*, 53 巻, 1 号.
- Sakamoto, T. T., L. S. Urakawa, H. Hasumi, M. Ishizu, S. Itoh, T. Komatsu, and K. Tanaka (2017): Numerical simulation of Pacific water intrusions into Otsuchi Bay, northeast of Japan, with a nested - grid OGCM. *J. Oceanogr.*, 73, 39–54, doi:10.1007/s10872-015-0344-y.
- Tanaka, K, K. Komatsu, S. Itoh, D. Yanagimoto, M. Ishizu, H. Hasumi, T. T. Sakamoto, L. S. Urakawa, and Y. Michida (2017): Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan. *J. Oceanogr.* 73, 25–78, doi:10.1007/s10872-015-0338-9.
- Urakawa, L. S., M. Kurogi, K. Yoshimura, and H. Hasumi (2015): Modeling low salinity waters along the coast around Japan using a high-resolution river discharge dataset. *J. Oceanogr.* 71, 715–739, doi:10.1007/s10872-015-0314-4.
- Yoshimura, K., T. Sakimura, T. Oki, S. Kanae, and S. Seto (2008): Toward flood risk prediction: a statistical approach using a 29-year river discharge simulation over Japan. *Hydrological Research Letters* 2, 22–26. DOI:10.3178/HRL.2.22.
- Zweng, M. M., J. R. Reagan, J. I. Antonov, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T. P. Boyer, H. E. Garcia, O. K. Baranova, D. R. Johnson, D. Seidov, and M. M. Biddle, (2013): *World Ocean Atlas 2013 Volume 2: Salinity*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.

## 6-8-2 海面加熱下の浅海域に見られる潮流海底境界層のスケーリング

### (1) はじめに

沿岸海域の主要な流れでありその物理環境場を決定づける潮流についてはこれまで多くの研究が行われてきた (e.g. Simpson and Sharples, 2012)。しかし、種々の形態・特徴をもつ内海・内湾では潮流場の局所的特性が顕著なため、振動流である潮流そのものの普遍的かつ本質的な特性が十分理解されているとは言い難い。近年の計算機資源の増大とネスティングを初めとする計算手法の進歩に伴い、外洋域から沿岸海域までを包括して取り扱えるモデルが開発され(坂本ほか, 2013a)、様々な駆動源(潮流、吹送流、密度流)を同時に取り扱うことが可能となった (Sakamoto et al., 2013b)。その意味で、我々は沿岸物理環境場のより深い理解へ向けた新たな段階を迎えている。しかしながら、これら最先端モデルでも潮流に伴う強い乱流混合過程は何らかのパラメタリゼーションに依っているのが現状である。

潮汐混合が本質的な現象の一つに潮汐前線がある (図 6-12)。この前線は、海面加熱の下、潮汐混合に起因する海底境界層が海面まで達する混合域と達しない成層域の境に形成される水温 (密度、塩分) 前線であり (図 2; Simpson, 1981)、それを挟む海域では生物生産活動に大きな違いが生じることが知られている (Simpson and Sharples, 2012)。

その形成位置の指標として、海面加熱と潮汐混合のエネルギー・バランスに基づいた Simpson-Hunter (SH) パラメータ  $H/U^3$  が提案されているが ( $H$  は水深、 $U$  は平均潮流振幅; Simpson and Hunter, 1974)、前線上での  $H/U^3$  の値 (臨界値) は海域によって異なり (Sun and Isobe, 2008)、普遍的指標としては疑問が残る。

Sakamoto and Akitomo (2006, 2008, 2009; 以後 SA09) は DNS モデル実験を行い、潮流海底境界層の乱流特性とその鉛直混合効果を初めて詳細に調べた。そ

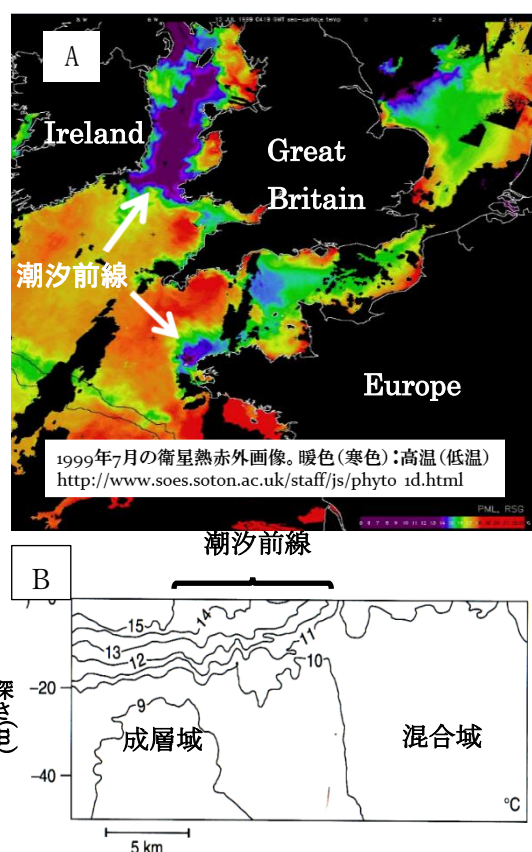


図 6-12 (A) イギリス周辺海域の海面  
(B) Irish Sea での水温鉛直断面分布

ここでは、密度一様条件における乱流の時間、長さスケールがそれぞれ $1/|\sigma + f|$ 、 $u_*/|\sigma + f|$ で与えられること、密度成層下では海底境界層の発達(率)が $|\sigma/f|$ 、すなわち緯度に依存すること、などを明らかにした ( $\sigma$ :潮汐振動数、 $f$ :慣性振動数 (コリオリ・パラメータ)、 $u_*$ :海底での周期平均摩擦速度)。なかでも、海底境界層の発達率が $|\sigma/f|$ に依存する性質は、乱流によるエネルギー変換効率 $\varepsilon$ (乱流エネルギー生成率に対するその位置エネルギーへの変換率の比)の緯度依存性を示唆し、一定の $\varepsilon$ を前提とした SH パラメータには根本的な見直しが必要であることを示唆している。

本研究では海面加熱時の潮流海底境界層の乱流特性をスケーリングの観点から明らかにするとともに、その有効性を、乱流を解像する DNS(直接数値シミュレーション)モデルを用いた数値実験により検証した。以下ではその内容を Akitomo et al. (2016)に沿って概観する。

## (2) スケーリング

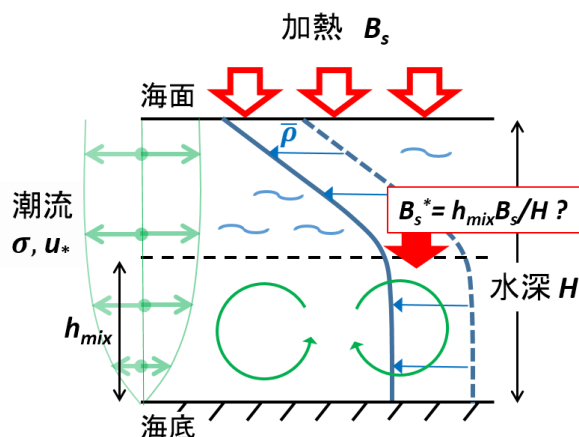


図 6-13 海面加熱下での潮流海底境界層の模式図。海面からの加熱量が全層に等しく配分される場合は、境界層の実効加熱率は  $B_s^* = h_{mix} B_s / H$  で与えられる。

地球自転の下で大気や海洋の境界層厚 $h_{mix}$ は、熱的条件の違いによる三つの基本スケールを用いて、

$$\frac{1}{h_{mix}^2} = \frac{1}{h_H^2} + \frac{1}{h_N^2} + \frac{1}{h_B^2} \quad (1)$$

で与えられる(Zilitinkevich et al., 2007)。ただし、

$$h_H = \frac{C_H u_*}{|f|}, \quad h_N = \frac{C_N u_*}{|fN|^{1/2}}, \quad h_B = \frac{C_B u_*^2}{|fB_s|^{1/2}}$$



は、それぞれ密度一定条件、成層条件（浮力振動数 $N$ ）、加熱条件（浮力フラックス $B_s$ ）での境界層厚のスケールである（ $C_H, C_N, C_B$ は定数）。

これを周期平均した潮流海底境界層に適用すると、密度一様条件のもとでは $|f|$ を $|\sigma + f|$ で置き換えて $h_H = C'_H u_* / |\sigma + f|$ と書ける（Sakamoto and Akitomo 2008）。同様の修正は $h_N, h_B$ に対しても当てはまる。さらに加熱条件下では、乱流が海底付近で生じるのに対し加熱は海面で働くため、上記スケーリングを適用するには、境界層上端 $h_{\text{mix}}$ での実効加熱率 $B_s^*$ を評価する必要がある（図 6-13）。周期平均場が平衡状態にあるとき浮力（密度）は全ての深さで同じよう増加（減少）すると考えられるので、境界層に対する実効加熱率 $B_s^*$ は（境界層厚/水深）に比例し、 $B_s^* = h_{\text{mix}} B_s / H$ で与えることが可能である。

中緯度での浅海域を対象として、背景の成層を考えなければ（ $N = 0$ ）、 $|\sigma + f| \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $B_s \sim 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ 、 $u_* \sim 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ 、 $h_{\text{mix}} H^{-1} \sim 1$ 、 $C_H, C_B \sim 1$ と見積もられ、式(1)の第1項は第3項に比べて2桁小さい。従って、

$$\frac{1}{h_{\text{mix}}^2} \approx \frac{1}{h_B^{*2}} = \frac{h_{\text{mix}}}{H} \frac{1}{h_B^2} = \frac{|\sigma + f| B_s h_{\text{mix}}}{C_B^2 u_*^4 H}$$

の近似が成り立つ。これを $h_{\text{mix}}$ について解くことで、

$$h_{\text{mix}} \approx (h_B^2 H)^{1/3} = C_{\text{tbl}} \left( \frac{u_*^4 H}{|\sigma + f| B_s} \right)^{1/3} \quad (2)$$

が得られる。ただし、 $C_{\text{tbl}} = C_B^{2/3}$ である。(2)式から明らかなように、潮流による海底境界層の厚さには水深 $H$ が影響することが特徴であり、 $H$ が増すとともに海面加熱の影響が弱まり層厚 $h_{\text{mix}}$ は増加すると理解できる。

同じスケーリングを用いてエネルギー変換効率 $\varepsilon$ を見積もる。 $\varepsilon$ は乱流運動エネルギーからポテンシャルエネルギーへの変換率 $B$ と乱流エネルギー生成率 $P$ の比で定義される。 $B, P$ はそれぞれ、

$$B \approx C_b B_s^* h_{\text{mix}} = \frac{C_b B_s h_{\text{mix}}^2}{H}, \quad P \approx C_p u_*^3 \quad (3)$$

でスケーリングされることから、 $\varepsilon$ は(2)式を利用して、

$$\varepsilon \approx \frac{C_b B_s h_{\text{mix}}^2}{C_p u_*^3 H} = C_\varepsilon \left( \frac{B_s}{u_* H |\sigma + f|} \right)^{1/3} \quad (4)$$

と求まる。ただし、 $C_b, C_p$ は定数、 $C_\varepsilon = C_{\text{tbl}}^2 C_b C_p^{-1}$ である。エネルギー変換効率 $\varepsilon$ は海面加熱率、潮流強度、緯度に加えて、ここでも水深に依存して変化することがわかる。

### (3) DNS 実験

上で求めた $h_{\text{mix}}$ と $\varepsilon$ に対するスケーリング則を検証するため、3次元 DNS 実験を行

った。実験領域は大きさ $L_x \times L_y \times H$  ( $L_x = L_y = 149 \sim 212$  m,  $H = 11.7 \sim 33.2$  m)の矩形領域である (図 6-14)。支配方程式系は SA09 にならい、以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u_{\text{tide}} \cdot \nabla)u + (u \cdot \nabla)u_{\text{tide}} + (u \cdot \nabla)u + fk \times u = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p - k \frac{\rho}{\rho_0} g + \nu \nabla^2 u \quad (5)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (u_{\text{tide}} \cdot \nabla)\rho + (u \cdot \nabla)\rho = \kappa \nabla^2 \rho \quad (7)$$

流速 $u$ は基本潮流 $u_{\text{tide}}$ からの偏差ベクトル、 $p$ は圧力、 $\rho$ は基準海水密度 $\rho_0$  ( $10^3$  kg m $^{-3}$ )からの偏差、 $f$ はコリオリパラメータ、 $g$ は重力加速度( $9.8$  m s $^{-2}$ )、 $\nu$ は粘性係数、 $\kappa$ は拡散係数である(いずれも $10^{-4}$  m $^2$  s $^{-1}$ )。 $k$ は鉛直単位ベクトル、 $\nabla$ 、 $\nabla^2$ は3次元の勾配演算子およびラプラシアンを表す。

海面は非粘着のリジッドリッドとし、一定の浮力フラックス $B_s$ を与えた。海底は断熱

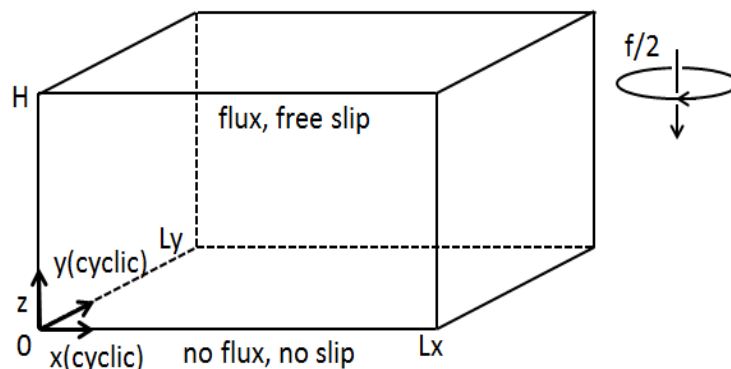


図 6-14 モデル海と境界条件

で粘着条件を課し、水平境界は $x, y$ 方向とも周期境界条件を用いた。基本潮流 $u_{\text{tide}}$ は角振動数 $\sigma$ で振動する水平圧力勾配 $\partial p_{\text{tide}}/\partial x$ で駆動される。すなわち、

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_{\text{tide}}}{\partial x} = F \sin \sigma t$$

である。ここでは角振動数 $\sigma$ を一定( $1.45 \times 10^{-4}$  s $^{-1}$ ; 周期 $T_{\text{tide}} = 2\pi/\sigma = 12$  時間)とした。実験は静止、一様状態から始め、平衡状態に達するまで積分を行った。基本潮流の振幅 $U_{\text{tide}}$  ( $0.085 \sim 0.256$  m s $^{-1}$ )、コリオリパラメータ $f$  ( $-0.364 \sim -2.91 \times 10^{-4}$  s $^{-1}$ )を変えて、42 ケースについて実験を行った。無次元パラメータのレイノルズ数 $Re = U_{\text{tide}} H_{\text{tide}}/\nu$ と時間ロスビー数 $Rot = |\sigma/f|$ はそれぞれ $1,410 \sim 4,000$ 、 $0.5 \sim 4.0$ の範囲である(ただし、 $H_{\text{tide}} = \sqrt{2\nu/|\sigma + f|}$ )。また、水深 $H$ は $H_{\text{tide}}$ を基準として $10, 20H_{\text{tide}}$  ( $11.7 \sim 33.2$  m) の場合を考え、海面浮力フラックス $B_s$ は $0.117 \sim 2.33 \times 10^{-8}$  m $^2$  s $^{-3}$  ( $5 \sim 50$  W m $^{-2}$ )の範囲で変化させた。

#### (4) 実験結果

数値積分は 30 周期行い、運動エネルギーや位置エネルギーが一方向的に増減することのない平衡状態(振動状態)となった。図 6-15 は実験結果の一例を示す。海底上にはおよそ 10m 厚の乱流境界層が形成されているが、乱流の影響は上方に及び、密度成層域でも波長、振幅が 10~20m 程度の内部波が励起されている。

このケースにおける乱流運動エネルギー生成項  $P$  と位置エネルギーへの変換項  $B$  および浮力  $b$  のプロファイルを見ると(図 6-16)、乱流がおもに海底直上で生じ、境界層上端で位置エネルギーへの変換が

最大になっていることがわかる。以下では最後の 3 周期で平均した  $B$  項が最大となる高さで、海底境界層の厚さ  $h_{mix}$  を定義し(図 6-16 の  $\times$  印)、スケーリングとの比較を行った。

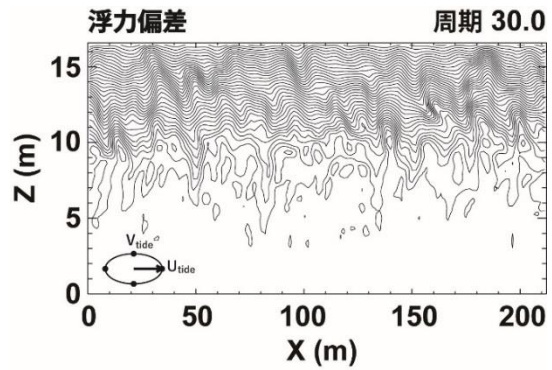


図 6-15 浮力偏差の x-z 断面分布

浮力  $b = -\rho g / \rho_0$  について全域平均からの偏差を示す。  $t = 30T_{tide}, y = L_y/2$ 。  $(Rot, Re, H/H_{(tide)}) = (2, 3000, 10)$ 、  $B_s = 1.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  (30 W  $\text{m}^{-2}$ ) の場合。等値線間隔は  $2 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$  ごと。Akitomo et al. (2016) による。

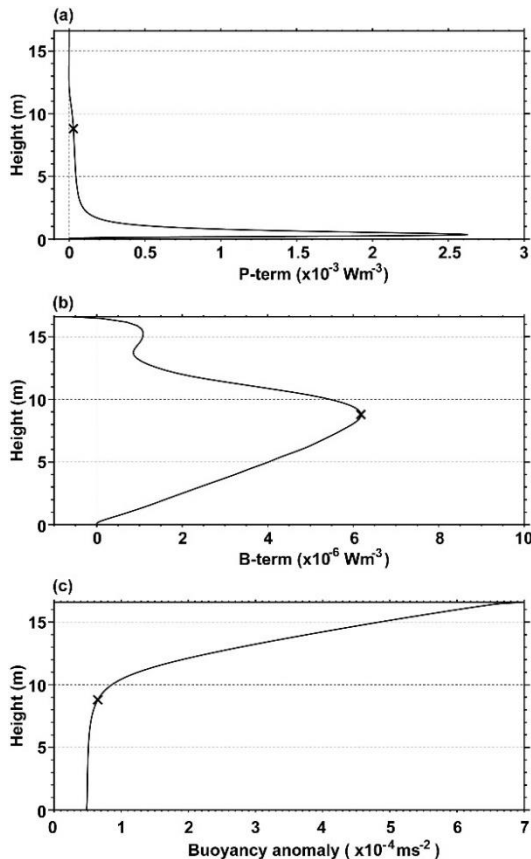


図 6-16  $P$  項、 $B$  項、浮力偏差  $b$  の鉛直分布。(a)  $P$  項、(b)  $B$  項、(c) 浮力偏差  $b$ 。いずれも  $3T_{tide}$  での平均値。 $(\times)$  は  $B$  項が最大となる高さ(境界層厚  $h_{mix}$ )。他は図 5 と同じ。Akitomo et al. (2016) による。

図 6-17 は式(2)~(4)のスケーリングと実験結果を比較したものである。いずれのスケーリングも実験結果とおおむね良い一致を示しており、その妥当性が明らかになった。ただし、エネルギー変換効率 $\varepsilon$ についてはスケーリングが実験値に比べ過小評価気味である。このずれは時間ロスビー数 $Rot$ 、浮力フラックス $B_s$ が大きい場合に見られる。流動場を詳細に調べたところ、強い加熱のため乱流の発生が間欠的になっている( $P$ 項が小さい)ことがその原因であった(Akitomo et al., 2016))。従って、乱流が継続的に発生・発達している場合にはここで導いたスケーリングは妥当なものと結論づけることができる。

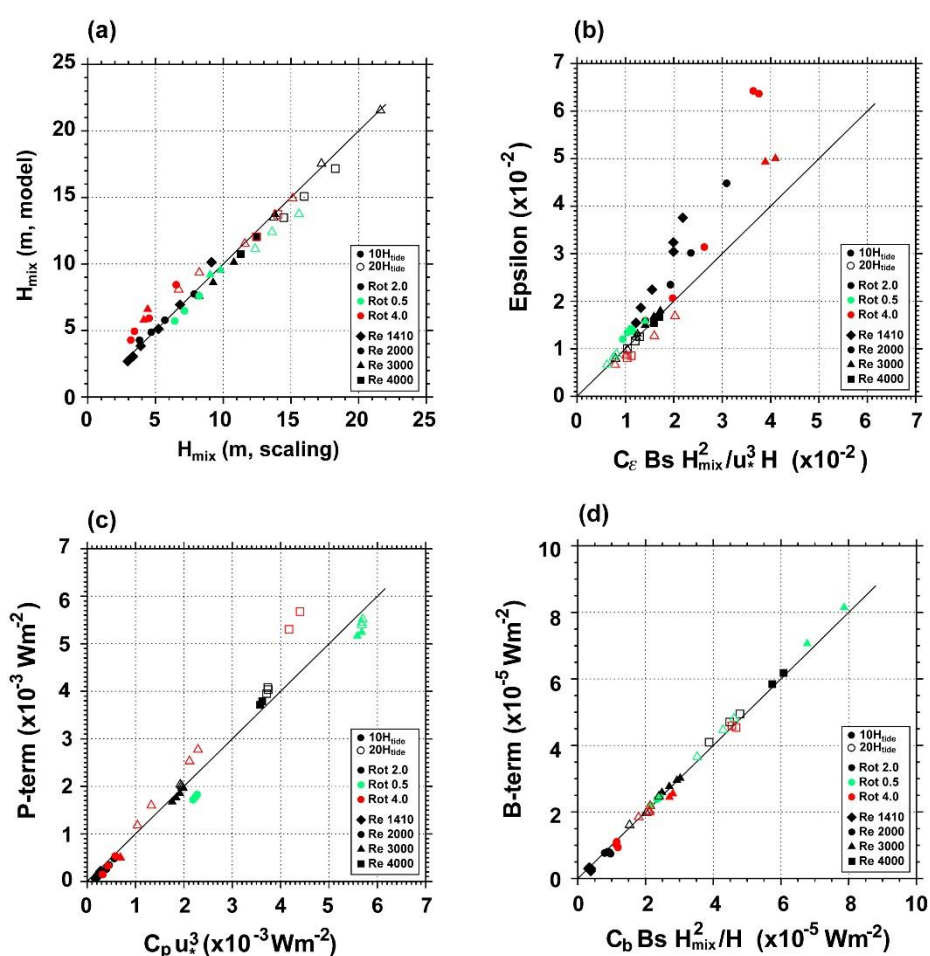


図 6-17 各種スケーリングの検証

(a) 式(2)による  $h_{mix}$ 、(b) 式(4)による  $\varepsilon$ 、(c)、(d) 式(3)による  $P$  項、 $B$  項。いずれの場合も横軸がスケーリング、縦軸が実験結果。定数は(a)  $C_{tbl} = 0.383$ 、(b)  $C_\varepsilon = C_b C_p = 0.0403$ 、(c)  $C_p = 11.6$ 、(d)  $[C_b] = 0.468$ 。Akitomo et al. (2016) による。

## (5) 結語

浅海域において潮流に起因する海底境界層は乱流生成が海底付近で生じるのに対し、成層化の原因となる加熱が海面で働くため、海洋表層の境界層(混合層)とはその形成メカニズムに違いがある。この境界層についてのスケーリング則を検討し、数値モデル実験で検証した。境界層の厚さは式(2)で、またエネルギー変換効率(4)でスケーリングできることをはじめて示した。ここでのスケーリングで重要なのは境界層に対する加熱は海面加熱率 $B_s$ ではなく、境界層上端における有効加熱率 $B_s^* = h_{\text{mix}} B_s / H$ で与えられるという点である。乱流が十分に発達する条件下であれば、数値モデル実験での結果は得られたスケーリング則を支持している(図 6-17)。

最初にも述べたように沿岸浅海域の海況を決める重要な現象のひとつとして潮汐前線がある。その形成位置を決める SH パラメータ  $H/U_{\text{tide}}^3$  は、乱流生成と浮力変換とのバランスから決まり、

$$\frac{H}{U_{\text{tide}}^3} = \frac{8k\varepsilon}{3\pi B_s}$$

で与えられる(Simpson and Hunter, 1974)。ここで、 $k$ は海底摩擦係数である。しかし、本研究で得られた $\varepsilon$ に対するスケーリング(4)は、 $\varepsilon$ が $u_*$ と $H$ と $|\sigma + f|$ に依存することを示しており、これを上式に適用すると( $u_*$ は $U_{\text{tide}}$ に比例すると考える)、

$$\frac{H}{U_{\text{tide}}^2} \sim \left(\frac{8k}{3\pi}\right)^{3/4} B_s^{-1/2} |\sigma + f|^{-1/2} \quad (8)$$

と整理できる。この結果は潮汐前線の位置を決める指標として、 $H/U_{\text{tide}}^3$ よりも $H/U_{\text{tide}}^2$ がより適切であること、その臨界値が分潮( $\sigma$ )や緯度( $f$ )によって変化することを示唆している。この定式化の成否については観測データを基にした十分な検証が必要であるが、より普遍的で精度の高いパラメータとして十分検討する価値があると考えられる。

## (6) 参考文献

Akitomo K, Hirano M, Kinugawa Y, Sakamoto K, Tanaka K (2016) Scalings of the tidally induced bottom boundary layer in a shallow sea under a surface heating. J Oceanogr 72:541-552

Sakamoto K, Akitomo K (2006) Instability of the tidally induced bottom boundary layer in the rotating frame and their mixing effect. Dyn Atmos Oceans 41:191-211

Sakamoto K, Akitomo K (2008) The tidally induced bottom boundary layer in a rotating frame: similarity of turbulence. J Fluid Mech 615:1-25

Sakamoto K, Akitomo K (2009) The tidally induced bottom boundary layer in the rotating

- frame: development of the turbulent mixed layer under stratification. *J Fluid Mech* 619:235–259
- Sakamoto K, Yamanaka G, Tsujino H, Nakano H, Hirabara M (2013a) Development of a 2 km-resolution Japanese coastal ocean model-toward a next-generation operational monitoring and forecasting system (in Japanese). *Weather Serv Bull* 80:S99–S109
- Sakamoto K, Tsujino H, Nakano H, Hirabara M, Yamanaka G (2013b) A practical scheme to introduce explicit tidal forcing into OGCM. *Ocean Sci Discuss* 10(2):473–517
- Simpson JH (1981) The shelf-sea fronts: implications of their existence and behavior. *Phil Trans R Soc Lond A302*: 531-546
- Simpson JH, Hunter JR (1974) Fronts in the Irish Sea. *Nature* 250:404–406
- Simpson JH, Sharples J (2012) Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press, Cambridge, p 448
- Sun Y-J, Isobe A (2008) Lagrangian H/U3 Values computed around front using a fine-resolution numerical model and ferryboat-monitored SST dataset. *J Phys Oeanogr*, 38: 2575-2586
- Zilitinkevich S, Esau I, Baklanovc A (2007) Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers. *Q J R Meteorol Soc* 133:265–271

### 6-8-3 大槌湾の波浪

#### (1) はじめに

波浪は風を成因とする重力波で、便宜上、比較的短周期（数秒程度）の「風波（風浪）」と比較的長周期（7秒～数10秒）の「うねり」に分類される。風波は、その場に吹いている風からのエネルギー入力によって発達過程にある波である。一方、うねりは、風が止むか風向が変わることで風波が風域を離れ、風からのエネルギー入力がなくなり減衰過程にある波である。波浪は、海面に常時生じている様々な波動現象の中でエネルギーが最も高い現象の一つで、人間活動に与える影響が強いため、日々の天気予報で波浪の予測情報が提供されている。ただし、現業の波浪予測に使用されている数値モデルは沖合域を対象としており、海岸地形や海底地形の影響を強く受ける内湾域を対象としていない。また、内湾域では波浪の実態や力学機構に関して沖合域に比べて不明の点が多いという科学的課題も残されている。

本課題が対象とする三陸の内湾域は、リアス海岸に特有の、海岸線が数100m～数kmのスケールで入り組んだ複雑な地形を特徴とする。湾内の波浪は、沖合から伝播して来るうねりと相関関係が強いことが以前から知られているが、うねりが湾内の波浪に与える影響の程度とその変動特性、並びにうねりの起源についての知見がほとんどない。また、湾内に局所的に吹く風で発達する風波の実態も未解明のままである。特にうねりと共存する場合の風波の発達に関しては既往研究に矛盾点がいくつか存在する。まず、理論研究では風向とうねりの伝播方向が同方向でも逆方向でも風波の発達が抑制されると指摘されているのに対して、水槽実験による研究では、風とうねりが同方向の時は風波の発達が抑制されるものの、逆方向の時は風波の発達が促進されることが指摘されている。現状では、このように理論と実験の間に齟齬があり、また理論も統一的な見解が得られていない。

三陸内湾域は古くから養殖業や採介藻漁業が盛んで、地域の主要産業となっている。一方で、湾内の漁業活動の多くは数トン程度の小型漁船で行われるため、1m程度の波高でも作業に支障をきたす場合が多い。そのため波浪予測に対する地域のニーズは高いが、現業の波浪予測は沖合域しか対応していないため、漁業者は天候と沖合の波浪の情報から湾内の波浪の状況を推定せざるを得ないのが実情である。また、湾内の波浪のエネルギーとその分布は養殖施設のデザインや配置を規定する主要因子である。さらに、こうした社会的なニーズや前述の課題に加えて、波浪と風の相互作用によるラングミュア循環は表層乱流の生成や生物・物質の集積の効果をもつことや、波浪による擾乱はウニ類の過度な摂餌を抑制することで藻場の維持に寄与していることなど、波浪が内湾域の生態系に与える直接的影響も指摘されている。しかしながら、その実態の定量的解明

は進んでいない。そこで、本課題では、三陸の代表的な半閉鎖性の小規模湾として岩手県の大槌湾を研究対象として、以下の4点を目的とした。

- ① 風と波浪の同時連続観測・リアルタイムデータ配信システムの構築
- ② 湾内の波浪におけるうねりと風波の寄与率の実態解明
- ③ うねりが風波の発達に及ぼす影響の実態解明
- ④ 湾内を対象とした波浪予測モデルの構築とうねりの起源推定

なお、本課題の成果の一部は Komatsu and Tanaka (2017) に発表している。

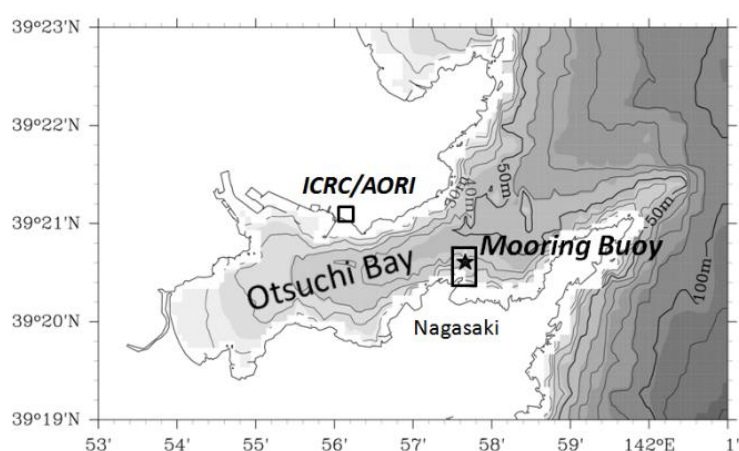


図 6-18 大槌湾と風・波浪モニタリングブイの設置位置

## (2) 風と波浪の同時連続観測・リアルタイム

### データ配信システムの構築

風と波浪のリアルタイムモニタリングシステムを、太平洋に面した岩手県大槌湾の湾内南部の長崎から 300 m 離れた水深 40 m の場所 (図 6-18、39°20.65'N, 141°57.62'E) に 2012 年 10 月 3 日に設置し、2017 年 6 月 7 日に撤収するまで 4 年 8 か月にわたり運用した。大槌湾は典型的なリアス式湾で、幅 3 km の湾口が沖に向かって北東方向に開いている。

このシステムは、単独測位方式の GPS 受信機を搭載した発泡ポリスチレン製の円盤型ブイ式波高計 (直径 1.1 m、高さ 0.6 m ; (株) ゼニライトブイ製のカスタム仕様)

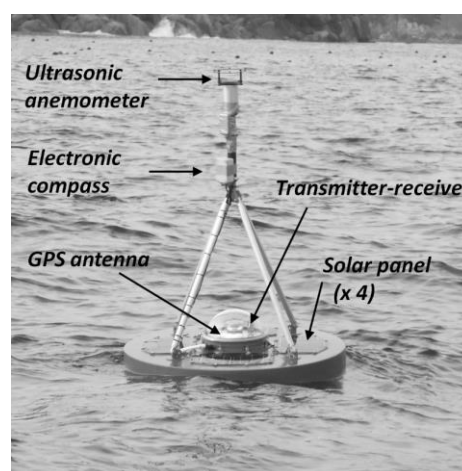


図 6-19 風・波浪モニタリングブイ



とブイの上部 1.5 m の高さに付設した 2 成分超音波風速計 (Model85106; R.M. Young Company 製) で構成され (図 6-19)、ロープを介して 2 点で海底に係留された。なお、波高計は、周期が 3 s 以上の波浪にブイが追従するように設計されており、送受信機、制御・記録装置、太陽電池パネル、蓄電池も搭載されている。

超音波風速計では、風速と風向を毎正時直前の 10 分間、0.5 s 間隔で連続計測し、データは波浪ブイ内部の SD カードに記録した。また、1 時間ごとに 10 分間の平均風速・風向を自動算出した。ブイの水平方向の回転に伴う風向の誤差は付属の磁気方位計 (Model32500; R.M. Young Company) で自動的に補正されている。なお、解析では 10 分間の平均値のみを使用しており、ブイの動揺に伴って生じる風速と風向の計測誤差の影響はほぼ相殺されているため解析結果には大きく影響しない。

GPS 波高計では、毎正時直後の 20 分間、ブイの 3 次元的な変位を 0.4 s 間隔で測位し、データ処理をして SD カードに記録した。この GPS 波高計はハイパスフィルタによって GPS システムに起因する測位誤差の影響を除去しており、既存の超音波式波高計との比較では有義波高で 0.1 m、有義波周期で 0.5 s、有義波向で数度程度の精度を有している (Harigae et al., 2004)。得られた 3 次元測位データからゼロアップクロス法により、有義波高、有義波周期、有義波向が 1 時間ごとに自動算出され、前述の平均風速・風向と併せて Iridium 衛星経由で、リアルタイムに配信され、時系列図とともにインターネット上で公開された (<http://lmr.aori.u.tokyo.ac.jp/feog/kosei/ootuchi/>)。なお、連続データを記録した SD カードは、約半年ごとのシステムのメンテナンス時に回収し、波浪データについては、ブイの 20 分間の鉛直変位と水平移動速度のクロススペクトルから波浪エネルギーの 2 次元スペクトルを 1 時間ごとに計算して解析に利用した。

本システムによる大槌湾環境モニタリングのホームページに対する閲覧状況を調査したところ、1 日当たりで平均すると 10~20 件程度のアクセスがあった (図 6-20)。また、モニタリングデータの利用に関して、岩手県沿岸広域振興局等の外部の 5 機関から申請があった。本モニタリングについては、地域の漁業者からの評判も良く、データの利活用が進んだことは、本事業の主要な目的の一つである、震災地域漁業の早期復興に多少なりとも貢献することができたと推察する。さらに、内湾域において風と波浪の 2 次元スペクトルを 4 年以上にわたってモニタリングした事例は日本国内には無く、国外でも聞いたことが無い。波浪における風波とうねりの分離は風と波浪の 2 次元スペクトルを同時に計測することで初めて可能になるため、本モニタリングにより、後述の多くの知見を得ることができた。

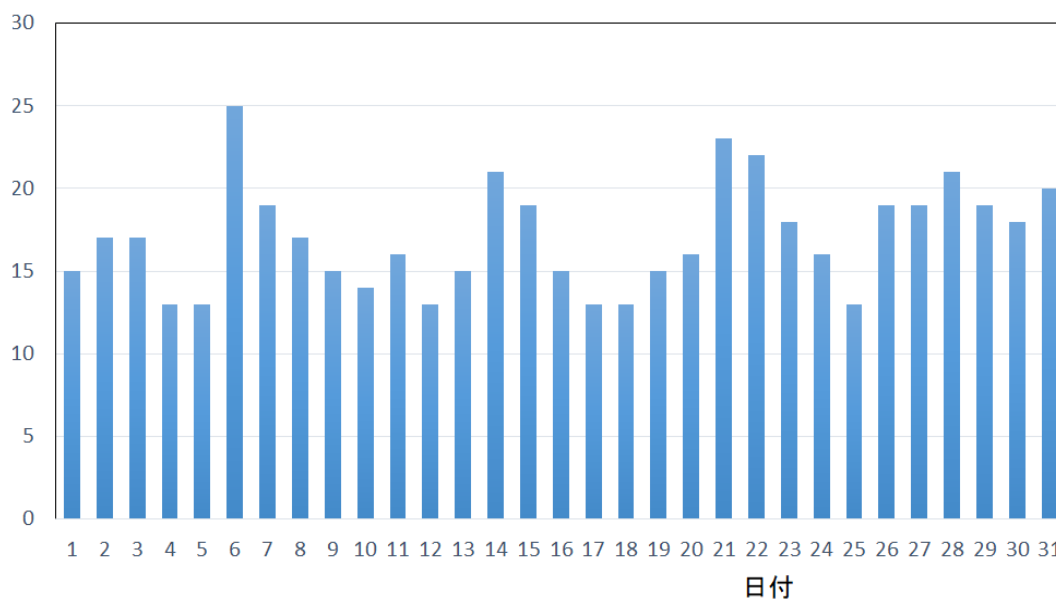


図 6-20 2017 年 5 月の大槌湾環境モニタリングページへの日別アクセス数

### (3) 湾内の波浪におけるうねりと風波の寄与率の実態解明

大槌湾内の月ごとの有義波高の平均値は、夏季に低く、冬季に高い特徴が見られた。ただし、月内の変動も大きく、頻度分布を調べると、月内の最大波高は同じ月でも年によって変動が大きいことが分かった (図 6-21a)。興味深いことに、有義波向が年と月に関係なく約  $60^\circ$  で北東方向から伝播して来る成分が主体であったのに対して、平均風向は明瞭な季節変動を示し、夏季は  $180^\circ$  (南よりの風)、冬季は  $270^\circ$  (西よりの風) が主体であった (図 6-21b)。有義波向の  $60^\circ$  という方向は大槌湾の湾口が開いた方向と一致しており、加えて、有義波向と平均風向が大きくずれていることは、湾内の波浪で支配的なのは湾内に吹く局所的な風で発達している風波ではなく、沖合から湾内に向けて伝播して来たうねりであることを示唆している。実際、有義波周期の平均値は約  $9\text{ s}$  と比較的長く (Komatsu and Tanaka, 2017)、大槌湾の大きさと湾内で代表的な風速を考えると、風波とは考えにくい。また、大槌湾の有義波の波周期と波形勾配の出現頻度を調べると、大槌湾では沖合に比べて長い有義波周期の出現頻度が高く、波形勾配が  $0.01$  以上の出現頻度が沖合に比べて 1 桁以上も低いことが分かった (Komatsu and Tanaka, 2017)。大槌湾の波浪は、波周期が比較的長く波形勾配が小さいという、うねりの特徴を明瞭に表しており、以上の点からも、大槌湾の波浪は、うねりが支配的であることが推察された。

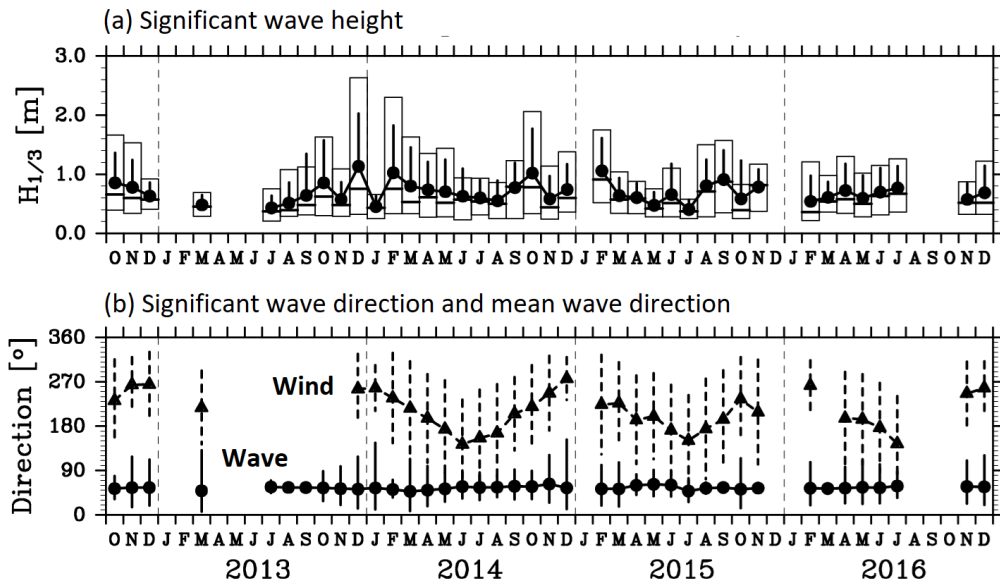


図 6-21 大槌湾で観測された有義波高 (a) と有義波向および平均風向 (b)。図の縦線は月内の標準偏差、図 4a の横線は、10, 50, 90 パーセンタイル値を示す。

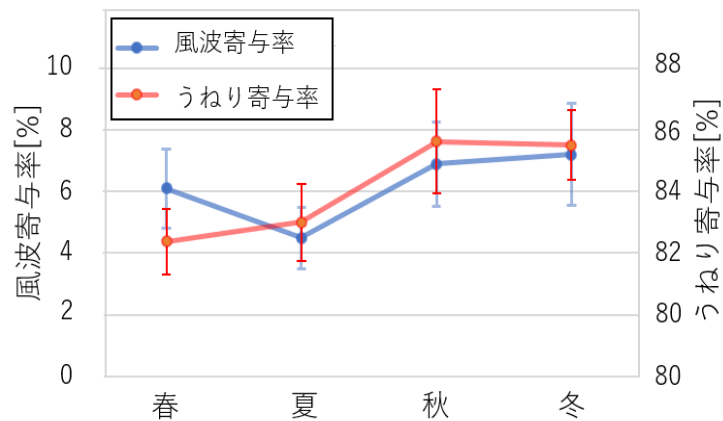


図 6-22 大槌湾内におけるうねり(右軸)と風波(左軸)の寄与率の季節ごとの平均値。縦線は標準偏差を示す。

そこで、大槌湾内で観測された波浪の全エネルギーに占めるうねりと風波それぞれのエネルギーの寄与率を風速・風向と 2 次元スペクトルのデータを用いて、Portilla et al. (2009) のアルゴリズムで算出した。季節ごとのうねりと風波の寄与率を図 6-22 に示す。うねりの平均寄与率は 82–86%、一方、風波の平均寄与率は 4–8%であり、うねりの寄与率が圧倒的に高いことが分かった。本課題のように長期間の観測から日本国内の沿岸域におけるうねりと風波の寄与率を解明した事例はない。内湾域のうねりの寄与率は、

湾口部の形状、うねりの起源域までの距離、うねりの起源域での風速、湾内の風速などが規定すると考えられる。

#### (4) うねりが風波の発達に及ぼす影響の実態解明

冒頭で述べた通り、うねりと風波の相互作用については不明の点が多く、うねりと共存する場合に風波の発達がどう変化するかに関しては、既往研究において統一的な見解が得られていない。現業の波浪予測では、風向が急変する前線付近で精度が著しく劣化することがよく知られており、その一因がこの点にあると推察される。さらに、重要な課題として、既往研究においては、うねりが風波の発達に及ぼす影響を実海域において定量的に実証した事例が無い。その理由は、一般的に、現実の海洋では波向や波周期を異にする複数のうねりと風波が共存するため、うねりと風波を分離し、両者の相互作用を系統的に解析することが難しいからである。その点、大槌湾では、前述の通り約 60° の沖合方向から年中ほとんど波向を変えずに規則的なうねりが伝播して来ており、いわば天然の造波機付き風洞水槽に近い状況が再現されている。そこで、湾内の波浪を比較的安定して計測できた 2012 年 10 月～2016 年 12 月のデータを用いて、うねりの波向に対して風が同方向（順風、20-100°）と逆方向（逆風、200-280°）の場合に分けて、うねりが風波の発達に与える影響を調べた。解析では、うねりが風波の発達に与える影響度を、順風と逆風の双方の場合について、期間中にうねりの波形勾配が最小の時の風波のエネルギーを基準として、その基準値に対する比で見積もった。なお、風速に応じて風波のエネルギーが変化するため、風波のエネルギーは重力加速度と摩擦速度を使って無次元化し、規格化を行った。

うねりが風波の発達に与える影響度は順風の場合も逆風の場合も概して 1 を下回り、うねりの存在によって、うねりの無い場合に比べて風波の発達が抑制されることが分かった(図 6-23)。つまり、現実の海洋においては、うねりの上で発達する風波の発達が、うねりの伝播方向と風向に関係なく抑制される可能性が高いことが明らかとなった。この結果は従来 of 理論研究 (Phillips and Banner, 1974; Chen and Belcher, 2000) の結論と整合的であった。ただし、逆風時ではデータのばらつきが大きく、吹送距離が長くなると、うねりの影響度が 1 を上回り、逆に、うねりの存在が風波の発達を促進させる可能性も示唆された。この結果は、既往の実験研究 (Mitsuyasu and Yoshida, 2005) の結論と整合する。順風時と逆風時でうねりが風波の発達に及ぼす影響が異なる要因については現時点では不明である。従来 of 理論研究でも提示されている機構が相互に異なっており、この点の解明は今後の課題としたい。

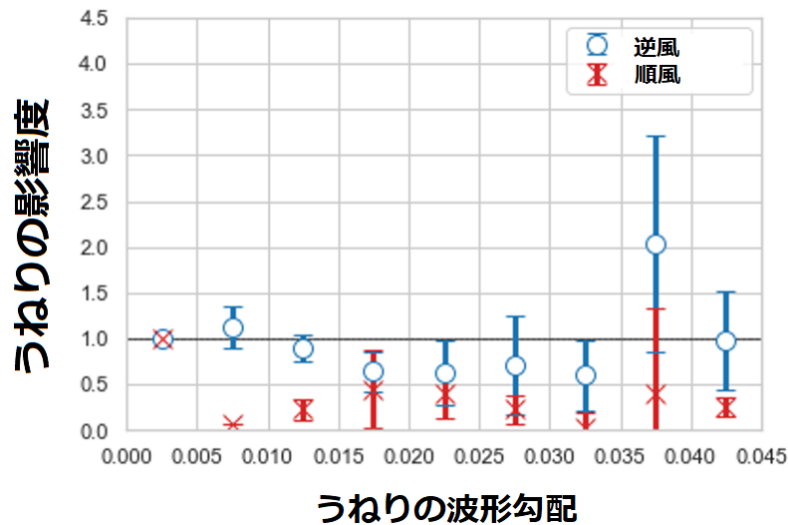


図 6-23 うねりが風波の発達に与える影響度。うねりの波形勾配が最小の場合の風波のエネルギーに対する比で表した。縦軸の 1.0 は、うねりの影響がほぼ無視できる場合の風波のエネルギーを表す。風波のエネルギーを重力加速度と摩擦速度で無次元化して規格化した値を、うねりの波形勾配について 0.005 間隔で平均した値を示す。縦線は 95%信頼区間を示す。

#### (5) 湾内を対象とした波浪予測モデルの構築とうねりの起源推定

前項までの解析で、大槌湾内の波浪は沖合から伝播して来るうねりの寄与が圧倒的に大きく、湾内の局所的な風による風波の発達もこのうねりの影響を強く受けていることが分かった。では、このうねりはどこを起源とするのか。ここでは、この起源を推定するため、まず、大槌湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間で相関解析を行い、続いて、大槌湾を対象とした波浪予測モデルを構築してうねりの逆追跡実験を実施した。

大槌湾および大槌湾の南北に位置する釜石湾と宮古湾それぞれの湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間で相関解析を行った。ここで、大槌湾の有義波高は本課題のモニタリングシステムで得られた値、釜石湾と宮古湾の有義波高は国土交通省の全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) のモニタリングデータを使用した。また、沖合海上風は気象庁の領域モデル GPV/MSM-S の格子点値を使用し、相関係数は海上風の各格子点からそれぞれの湾に向かう方向の風速成分を使用して計算した。興味深いことに、3つの湾で最北の宮古湾と最南の釜石湾との間の距離は 42 km であるが、相関係数が有意に高い領域 ( $p < 0.05$ ) は3つの湾で明瞭に異なっており、しかもその領域の分布す

る方向は、それぞれの湾から見て各湾の有義波向の方向と一致し、かつその方向はそれぞれの湾の湾口が沖合に向かって開いた方向と一致していることが分かった (図 6-24)。同じ相関解析を、宮古湾のほぼ真東の沖合 (NOWPHAS の岩手中部沖観測点) と釜石湾のほぼ真東の沖合 (NOWPHAS の岩手南部沖観測点) で観測された有義波高を使用して実施すると、海上風と相関係数が有意に高い領域は両者でほぼ一致していた (Komatsu and Tanaka, 2017)。このことは、三陸内湾域の波浪が、沖合から伝播して来るうねりの影響を強く受けており、しかもそのうねりの発生海域は各湾の湾口の形状に強く依存することを示している。湾口部の地形による遮蔽効果によって、それぞれの湾に固有の方向から伝播して来るうねりの影響を強く受けていることが分かった。以上の解析から、うねりの起源のおおよその位置は推定されたが、その場所がうねりの起源となっている理由は不明である。そこで、大槌湾を対象とした波浪予測モデルを構築し、モデル追算実験を実施してその要因を探索した。

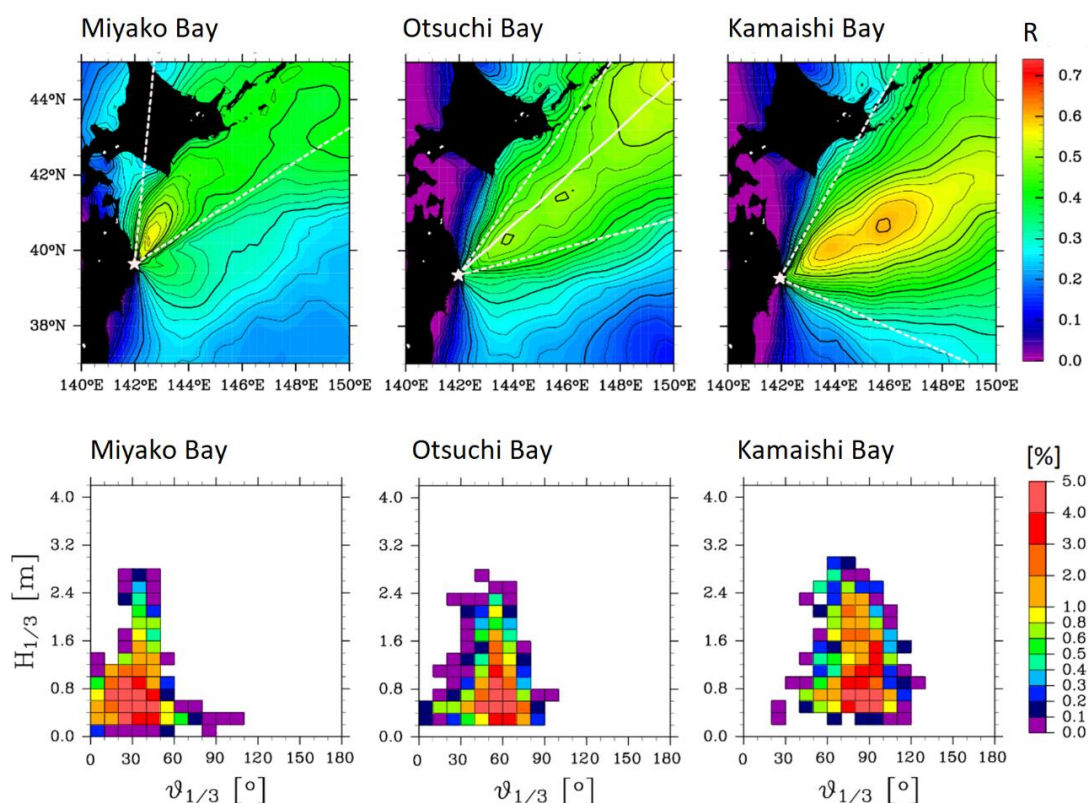


図 6-24 宮古湾、大槌湾、釜石湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間の相関係数(上)。解析の期間は 2012 年 10 月～2016 年 12 月。図中の白い破線は、各湾の湾口が開いた方向を示す。各湾で観測された有義波高と有義波向の結合出現頻度(下)。

波浪予測モデルは、現在主流の第3世代モデルを使用して構築した。このモデルは、波浪をエネルギーの2次元スペクトルで表現し、その場所場所における時間変化を以下のエネルギー平衡方程式を解くことで推定するものである。

$$\frac{\partial F(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot \nabla F(f, \theta) = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

ここで、 $F(f, \theta)$  は  $f, \theta$  をそれぞれ成分波の周波数と波向として、場所と時間  $t$  に依存する波浪の2次元スペクトルである。 $C_g$  は成分波の群速度、右辺は、 $S_{in}$  が風からのエネルギー入力項、 $S_{nl}$  が成分波間の共鳴相互作用による非線形エネルギー伝達、 $S_{ds}$  砕波によるエネルギー散逸を表し、 $S_{in}$  と  $S_{ds}$  は経験式で、 $S_{nl}$  は理論式だが計算が非常に煩雑である。第3世代のモデルは、それ以前は直接計算できなかった  $S_{nl}$  を近似式の導入で計算を簡便化し、直接計算を可能にしたのが最大の特徴である。ただし、この近似式は汎用性に欠け、モデルの計算精度の劣化をもたらすことが分かったので **Komatsu and Masuda (1996)** は近似を用いない効率的な計算法を開発して計算精度を高める改良を行った。本課題のモデルでは、**Komatsu and Masuda (1996)** の手法を採用してモデルを構築した。なお、モデルは、太平洋全域 (70°S-70°N, 100°E-160°W) を対象としたモデル、三陸沿岸から沖合域 (35°N-45°N, 140°E-150°E) を対象としたモデル、大槌湾とその周辺 (39.30°N-39.42°N, 141.89°E-142.07°E) を対象としたモデルの3重の入れ子構造にしており、各モデルは外側のモデルの推定値を側面の境界条件とした (1-way nesting)。水平解像度と時間積分幅は、太平洋モデルを 0.5°×0.5°, 15 min、三陸モデルを 0.05°×0.05°, 3 min、大槌湾モデルを 200 m × 200 m, 1 s に設定した。また、太平洋モデルと三陸モデルは深水波モデルとし、大槌湾モデルは有限水深波モデルとした。湾奥部や海岸付近の浅水効果は、**Booij and Holthuijsen (1999)** の浅海モデルの定式を採用して表現した。外力は、太平洋モデルは気象庁の長期再解析値 **JRA55**、三陸モデルと大槌湾モデルは気象庁の領域モデル **GPV/MSM-S** の海上風速を与えてモデルを駆動させた。例として、太平洋モデルで再現した有義波高・波向の冬季平均値を図 6-26a に示す。

大槌湾の湾内長崎沖のモニタリング点に最も近いモデル格子点で最大波高が推定された2012年12月5日の4時を起点とし、3時間毎に2次元スペクトルを逆追跡した。ここで、大槌湾内の波浪は湾口形状の遮蔽効果によって、波向60°の成分が卓越することが分かっているため、その波向が60°の成分の卓越周波数より求められる群速度から、3時間遡った先までの場所を推定した。次に、逆追跡から推定された場所における波向60°の成分の有義波高を算出した (表 6-6)。2次元スペクトルを過去に遡って追跡すると、時間を遡るにつれてスペクトル値は増加し、10時間遡った12月4日18時に波群は湾から128 km 沖合で最大の5 m<sup>2</sup> s のスペクトル値を示し、有義波高は最大の3.38 m となった。さらに時間を遡ると、スペクトル値は一転して減少し、27時間遡った12月4日0時に、385 km 沖合で最小となり、有義波高は最小値の0.58 m となっ

た (図 6-26b、表 6-6)。大槌湾からの距離に応じた波向が  $60^\circ$  の成分の有義波高の変化を図 6-27 に示す。

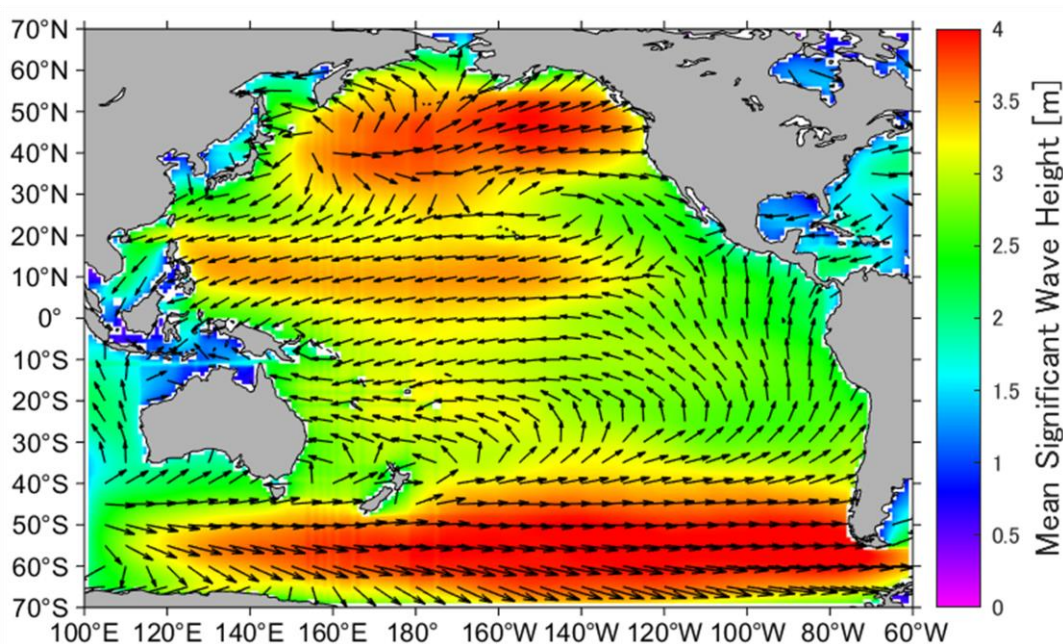


図 6-26a 太平洋全域を対象とした波浪モデルで推定した有義波高と有義波向の 2012 年冬季の平均値。

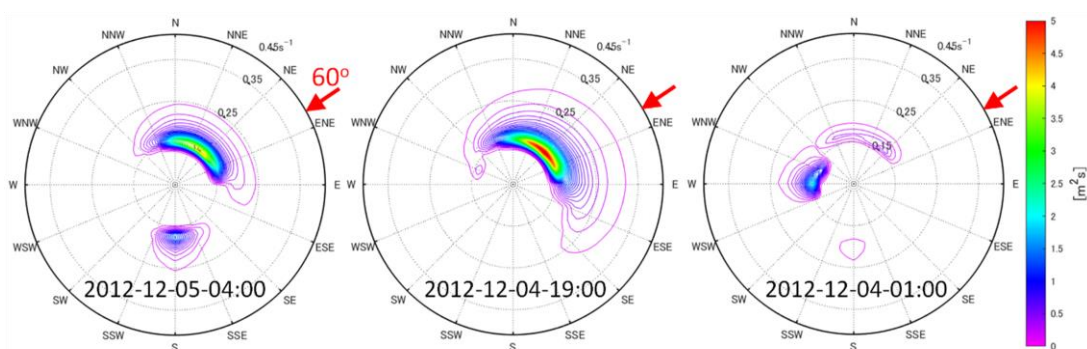


図 6-26b 逆追跡によって推定した日時において、波浪モデルで推定された 2 次元スペクトル。  $60^\circ$  の波向を赤の矢印で示す。



表 6-6 2次元スペクトルの逆追跡から推定した3時間ごとの、波群の緯度・経度、大槌湾からの距離、有義波高。有義波高の値が最大、最小となる日時、緯度経度、距離をそれぞれ青、赤で示す。

日時	緯度(N)	経度(E)	起点からの距離[km]	有義波高[m]
12月5日4時	39.4	142	0	1.45
12月5日1時	39.6	142.4	40	2.41
12月4日22時	39.8	142.8	83	3.22
12月4日19時	40	143.2	128	3.38
12月4日16時	40.2	143.6	176	2.96
12月4日13時	40.4	144	224	2.73
12月4日10時	40.6	144.4	272	2.02
12月4日7時	40.8	144.8	316	1.61
12月4日4時	41	145.2	352	0.83
12月4時1時	41.2	145.4	385	0.58
12月3日22時	41.4	145.8	418	0.66
12月3日19時	41.6	146	455	0.67

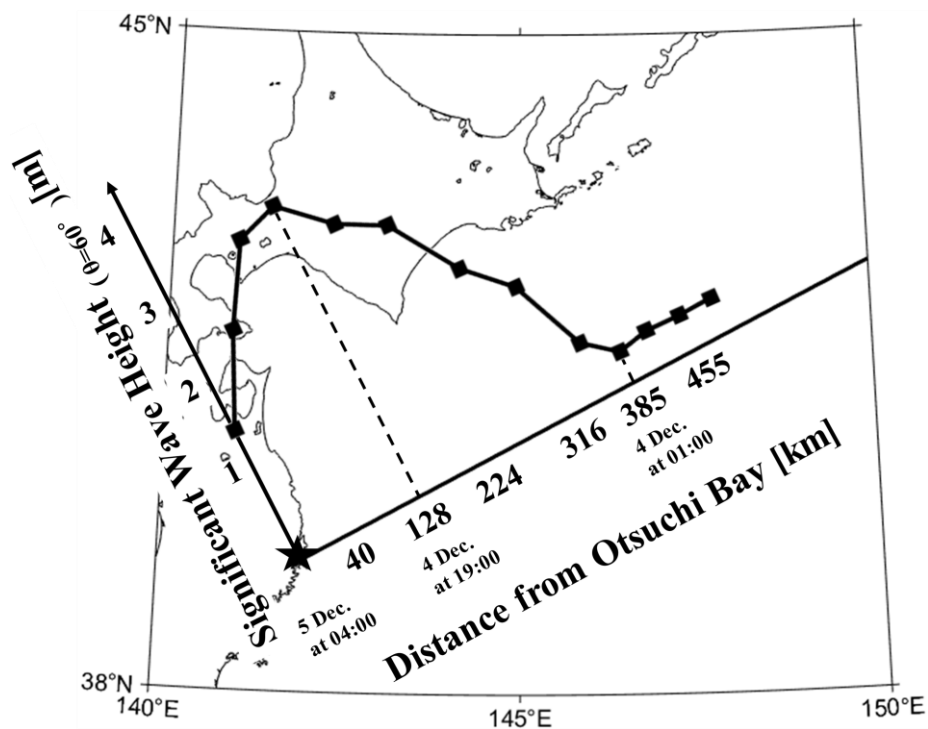


図 6-27 波浪モデルで推定された2次元スペクトルの波向60°成分の逆追跡より算出した有義波高。★は大槌湾の位置を示す。

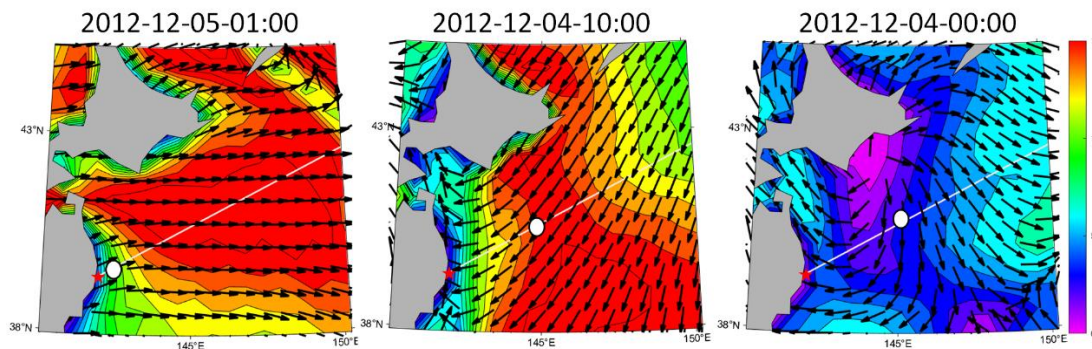


図 6-28 逆追跡で推定した各日時における三陸沖合域の気象庁領域モデルによる風速・風向の分布。白の実線は大槌湾からみて  $60^\circ$  の大圏航路、○は逆追跡により推定したこの日時における波群の場所、★は大槌湾の位置を示す。

有義波高が最小値であった 12 月 4 日 0 時、波浪が発達過程にある 12 月 4 日 10 時、減衰過程にある 12 月 5 日 1 時の風速・風向の分布を見ると (図 6-28)、12 月 4 日 0 時に大槌湾の沖合 385 km における風向は北～北北東になっており、大槌湾に向かう方向の風速成分がわずかに存在することが分かる。その後、時間を順方向にたどると、大槌湾に向かう方向の風速の増大とともに、波向  $60^\circ$  の風波成分が発達し、12 月 4 日 10 時には北東からの風速成分が大きくなっており、12 月 4 日 18 時まで発達を続け、この時点で風向が急変するとともに、この成分はうねりとなって減衰しながら伝播し、12 月 5 日 4 時に大槌湾に到達したことが分かる。以上の結果、うねりの元となった風波成分が発達を開始した場所をうねりの起源とすれば、この実験では、湾から 385 km 沖合の場所が起源であると推定された。ただし、これは、1 回の追跡実験のみの結論である。そこで、うねりが到達した場所での波高を規定する主要な因子が、発生海域の風速と発生海域から到達場所までの伝播距離であると仮定し、この 2 つをパラメータとして以下の思考実験を行ってみた。

- ① まず、大槌湾から所定の距離にある場所で、大槌湾の方向に向かって所定の風速の風が吹き続けたとする。
- ② 風は、この風によって生成された風波が飽和状態に達するまで吹き続けたとする。
- ③ 風波が飽和状態に達すると、風が突然止んで、上記の風波がうねりとなって、大槌湾の方向に減衰しながら伝播する。

そうすると、大槌湾内の波浪に影響を与え得るうねりの発生起源は、大槌湾から  $60^\circ$  方向の沖合、300 km を中心とした前後数 100 km の範囲の海域であることが推察され、前述のモデル追算実験の結果と一致した。推定されたうねりの起源海域は、三陸沖合で発達する低気圧の移動経路上にあり、大槌湾の方向に伝播して行くうねりが発生しやすい気象条件にあることが推察される。

## (6) 結論

岩手県大槌湾内に風・波浪のモニタリングシステムを設置し、4年8か月にわたって運用し、データをリアルタイムで配信した。データは、地域の漁業者をはじめ行政担当者で利活用されるとともに、得られたデータから、三陸内湾域のうねりの影響を定量的に初めて解明し、うねりの起源を推定した。また、うねりが風波の発達に与える影響の実態を実海域において初めて解明するなど、多くの科学的成果も得ることができた。新たに構築した大槌湾の波浪モデルは、今後、波浪予測の現業運用や湾内外の生態系研究に役立てていきたい。

## (7) 参考文献

- Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. (1999) A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666
- Chen, G. and Belcher, S.E. (2000) Effects of long waves on wind-generated waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 2246-2256.
- Harigae M, Yamaguchi I, Kasai T, Igawa H, Nakanishi H, Murayama T, Iwanaka Y, Suko H (2004) Abreast of the waves: open-sea sensor to measure height and direction. *GPS World*, 16, 16-27.
- Komatsu K, Masuda A (1996) A new scheme of nonlinear energy transfer among wind waves: RIAM method-algorithm and performance. *J. Oceanogr.* 52, 509-537.
- Komatsu, K., Tanaka, K. (2017) Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.*, 73,87-101.
- Mitsuyasu, H. and Yoshida, Y. (2005) Air-Sea Interactions under the Existence of Opposing Swell. *J. Oceanogr.*, 61, 141.
- Phillips, O. M., and M. L. Banner (1974) Wave breaking in the presence of wind drift and swell. *J. Fluid Mech.*, 66, 625- 640.
- Portilla, J., Ocampo-Torres F. J., and Monbaliu, J. (2009) Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 26, 107-122.

## 6-9 研究の意義

沿岸域の海洋循環は、その空間スケールの小ささ故に、外洋の循環に比べると極めて複雑な時空間変動を呈することが特徴であり、三陸沿岸もその例外ではない。本サブテーマでは一貫してそうした沿岸域に特化した精緻な数値モデルの開発に取り組むことで、従前には見られなかった精緻な沿岸流況や生態系変動のシミュレーションに成功した。また、浅海域における潮流に起因する海底境界層については、乱流生成が海底付近で生じるのに対し、成層化の原因となる加熱が海面で働くため、海洋表層の境界層(混合層)とはその形成メカニズムに違うことも明らかになり、その理論的なスケーリングにも成功した。さらに、三陸内湾域のうねりの定量評価を初めて解明するとともに、うねりの起源やうねりが風波の発達に与える影響の実態も解明することに成功した。

## 6-10 成果の公表

### (1) 論文

山本光夫, 加藤孝義, 多部田茂, 北澤大輔, 藤野正俊, 小豆川勝見, 松尾基之, 田中潔, 道田豊 (2015). 東日本大震災後の釜石湾における海域環境変化. 日本水産学会誌, 81, 243-255.

Urakawa, L. S., M. Kurogi, K. Yoshimura, and H. Hasumi (2015). Modeling low salinity waters along the coast around Japan using a high-resolution river discharge dataset. *Journal of Oceanography*, 71, 715-739.

Itoh, S., H. Kaneko, M. Ishizu, D. Yanagimoto, T. Okunishi, H. Nishigaki, and K. Tanaka (2016). Fine-scale structure and mixing across the front between the Tsugaru Warm and Oyashio Currents in summer along the Sanriku Coast, east of Japan. *Journal of Oceanography*, 72, 23-37.

Akitomo, K., M. Hirano, Y. Kinugawa, K. Sakamoto, and K. Tanaka (2016). Scalings of the tidally-induced bottom boundary layer in a shallow sea under a surface heating. *Journal of Oceanography*. 72, 541-552.

Sakamoto T T, S. Urakawa, H. Hasumi, M. Ishizu, S. Itoh, and K. Tanaka (2017). Numerical Simulation of Pacific Water Intrusions into Otsuchi Bay, northeast of Japan, with a nested-grid OGCM. *Journal of Oceanography*. 73, 39-54.

Tanaka, K., K. Komatsu, S. Itoh, D. Yanagimoto, M. Ishizu, H. Hasumi, TT. Sakamoto,

- S.Urakawa, and Y. Michida (2017). Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan. *Journal of Oceanography*. 73, 25-38.
- Komatsu, K. and K. Tanaka (2017). Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. *Journal of Oceanography*. 73, 87-101.
- Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka, K. Komatsu (2017). Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. *Journal of Oceanography*. 73, 115-131.
- Yanagimoto D., Tanaka K., Fujio S., Nishigaki H., Ishizu M. (2019). Observation of Near-Bottom Current on the Continental Shelf Off Sanriku. In: Komatsu T., Ceccaldi HJ., Yoshida J., Prouzet P., Henocque Y. (eds) *Oceanography Challenges to Future Earth*. Springer, Cham, 171-178.
- Kusakabe, M., S. Nobata, K. Saito, K. Ikeba, S. Ogasawara, K. Tanaka, Y. Takei, S. Hyodo (2019). Body condition and reproductive status of chum salmon during homing migration in Otsuchi Bay, Japan, after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. *Fisheries Oceanography*, 85(1), 43-51.

## (2) 報告文等

- 秋友和典・前田侑里香 (2013). 沿岸性熱塩前線の特性：形成機構と位置について. *沿岸海洋研究*, 50(2), 141-147.
- 小松幸生, 田中潔 (2014). 大槌湾における風・波浪のリアルタイムモニタリング. *九州大学応用力学研究所所報*, 146, 87-97.
- 田中潔 (2015). 東日本大震災後に三陸沿岸で総合展開中の海洋物理学研究. *海洋政策研究財団ニューズレター*, 351.
- 田中潔, 道田豊 (2015). 三陸沿岸において東京大学大気海洋研究所が展開中の海洋物理学研究. *第64回東北海区海洋調査技術連絡会議事録*.
- 坂本天, 浦川昇吾, 羽角博康, 石津美穂, 伊藤幸彦, 小松輝久, 田中潔 (2015). 双方向ネスト太平洋モデルによる三陸沿岸の高解像度生態系モデリングに向けた物理モデルの構

- 築. 沿岸海洋研究, 53, 15-24.
- Tanaka, K., K. Komatsu, S. Itoh, D. Yanagimoto, M. Ishizu, H. Hasumi, T.T. Sakamoto, S. Urakawa, and Y. Michida (2016). High-resolution hydrographic observation with local communities in the Sanriku coastal seas, Japan. *TEAMS International Conference, March 2016*, 35-36
- Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka and K. Komatsu (2016). Mooring observations of ocean circulation in Otsuchi Bay influenced by open ocean conditions. *TEAMS International Conference, March 2016*, 37-38.
- Yanagimoto, D., K. Tanaka, S. Fujio, H. Nishigaki, and M. Ishizu (2016). Observation of spatial distribution near -bottom current speed on bottom current speed on the continental shelf off Sanriku. *TEAMS International Conference, March 2016*, 39-40.
- Sakamoto, T.T., L.S. Urakawa, H. Hasumi, K. Tanaka (2016). Numerical simulation /of climatological circulation in Otsuchi Bay. *TEAMS International Conference, March 2016*, 41-42
- Urakawa, L.S., H. Hasumi, M. Kurogi, T.T. Sakamoto, K. Tanaka (2016). For numerical simulation of Otsuchi Bay; tides in our nested-grid model. *TEAMS International Conference, March 2016*, 43-44.
- 小松幸生、松村俊吾、田中潔 (2016). 大槌湾の表層・底層水質リアルタイムモニタリングの現状と課題. *月刊海洋* 48, 242-248.
- 田中潔 (2016). 岩手県三陸沿岸における海洋物理学研究 (2015 年度) . 第 65 回東北海区海洋調査技術連絡会議事録.
- 田中潔, 羽角博康, 小松幸生, 伊藤幸彦, 柳本大吾, 坂本天, 石津美穂, 浦川昇吾, 道田豊 (2016). 三陸の海洋環境・生態系の土台を決定づける海流. *日本水産学会誌*, 82, 137.
- 田中潔, 羽角博康, 小松幸生, 伊藤幸彦, 柳本大吾, 坂本天, 石津美穂, 浦川昇吾, 道田豊 (2017). 三陸沿岸の流況. *沿岸海洋研究*, 54, 97-104.
- 田中潔, 羽角博康 (2017). 小松幸生, 伊藤幸彦, 柳本大吾, 坂本天, 仁科慧, 道田豊. 三陸沿岸の海洋物理学研究について. *日本水産学会誌*, 83, 644-647
- 田中潔, 孫艶枚, 道田豊, 柳本大吾 (2018). 三陸沿岸における海洋物理学研究 (2017 年度) . 第 67 回東北海区海洋調査技術連絡会議事録
- 田中潔 (2019). 大槌湾で現在実施中の通年海洋観測(モニタリング)の紹介. 第 68 回東北海区海洋調査技術連絡会議事録.

小松幸生, 藤井孝樹, 田中潔 (2020). 三陸内湾域で卓越するうねり性波浪の起源と海岸地形との関係について. 第69回東北海区海洋調査技術連絡会議事録.

### (3) 漁業復興への貢献、アウトリーチ活動およびその他の関連活動

流況資料を新おおつち漁業協同組合、釜石東部漁協協同組合、釜石湾漁協協同組合に提出、随時。

広田湾流況調査経過報告書第一号を広田湾漁業協同組合に提出、2015年3月。

大槌湾根浜海岸の防潮堤工事のための流況資料を岩手県沿岸広域振興局農林部に提出、2014年5月。

大槌湾での漂着遺体に係る調査のための流況資料を岩手県釜石警察署に提出、2014年7月。  
大槌湾片岸海岸防潮堤の災害復旧工事のための流況資料を岩手県沿岸広域振興局土木部に提出、2016年2月。

震災行方不明者の捜索に関する協議のための流況資料を大槌町総務部危機管理室に提出、2016年5月。

大槌湾海洋環境モニタリングリアルタイム中継の実施

2012年12月14日より開始、平均アクセス数約400件/月

NHK BS-1 テレビにて研究活動を紹介、放映日時：2015年10月14日14:00-14:30、番組名：TOMORROW 科学ではばたけ 復活! 三陸漁業。

## 7 執筆者一覧

### 1. はじめに（本課題の概要）

永田俊・木暮一啓

### 2. 海洋広域連続モニタリングシステムと海洋分析セクションの構築

津田敦・西部裕一郎

### 3. 地震・津波による生態系攪乱とその後の回復過程に関する研究

#### 3-2-1 グループ 1（岩礁藻場の生物群集とエゾアワビの個体群構造）

河村知彦・早川 淳・松本有記雄・高見秀輝・

#### 3-2-2 グループ 2（アユの個体群構造）

大竹二雄・川上達也

#### 3-2-3 グループ 3（大槌湾に回帰するサケ親魚ならびに稚魚の動態）

兵藤晋、野畑重教、川上達也、佐藤信彦、峰岸有紀、塚越英晴、後藤友明、帰山雅秀、  
北川貴士、青山潤

#### 3-2-4 グループ 4（干潟の巻貝類の遺伝的多様性と集団構造、沿岸性大形底生生物群集、 三陸沖大陸棚・大陸斜面の底生生物群集）

小島茂明・清家弘治

#### 3-2-5 グループ 5（藻場の分布と生物群集）

小松輝久

#### 3-2-6 グループ 6（スナメリの分布と個体群構造）

白木原園雄

#### 3-2-7 グループ 7（高次捕食者の行動生態）

佐藤克文

#### 3-2-8 グループ 8（岩手県沿岸の魚類資源動態）

後藤友明

#### 3-2-9 グループ 9（気仙沼舞根湾および舞根新生塩性湿地の生物群集）

山下 洋

#### 3-2-10 グループ 10（海草藻場の生物群集）

仲岡雅裕・田中法生

#### 3-2-11 グループ 11（岩礁海岸の底生動物群集）

野田隆史

#### 3-2-12 グループ 12（アマモ場の魚類群集）

小路 淳



3-2-13 グループ 13 (石巻沿岸の藻場・干潟の環境・生物群集)

玉置 仁

3-2-14 グループ 14 (干潟域の二枚貝および外来巻貝の個体群動態)

大越健嗣・鈴木聖宏

3-2-15 グループ 15 (大槌湾・越喜来湾・松島湾の底生生物相と付着生物群集)

広瀬雅人

3-2-16 グループ 16 (岩手県南部沿岸域の環境および生物群集)

朝日田 卓・難波信由・三宅裕志・林崎健一・山田雄一郎

3-2-17 グループ 17 (沿岸水産資源生物の動態)

白藤徳夫・栗田 豊・清水大輔・八谷光介・佐々木系・田中庸介

4. 震災に伴う沿岸域の物質循環プロセスの変化に関する研究

福田秀樹・佐藤菜央美・高巢裕之・永田 俊

5. 陸域由来の環境汚染物質の流入実態

小川 浩史・小畑 元・佐野 有司・白井 厚太郎・杉原 奈央子・呂 佳蓉・高田 秀重・  
水川 薫子・南 秀樹・真塩 麻彩実

6. 物理過程と生態系の統合モデル

6-7 「大槌湾における気候值的 な物理場解明に資するネスティング手法を用いた数値モデ  
リングと低次生産過程の組み込み」

坂本天・浦川昇吾・羽角博康・伊藤幸彦・田中潔

6-8 「海面加熱下の浅海域に見られる潮流海底境界層のスケーリング」

秋友和典・平野真弘・衣川悠也・坂本圭・田中潔

6-9 「大槌湾の波浪」

小松幸生・藤井孝樹・田中潔