

## 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

小島茂明<sup>1,2</sup>・伊藤 萌<sup>2</sup>・松政正俊<sup>3</sup>

### Changes in local populations of *Batillaria attramentaria* after a mega-tsunami on the Sanriku Coast, Japan

Shigeaki Kojima, Hajime Itoh and Masatoshi Matsumasa

(2016年6月6日受付, 2016年6月28日受理, 2017年7月13日早期公開)

<sup>1</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科

<sup>2</sup>東京大学大気海洋研究所

<sup>3</sup>岩手医科大学全学教育推進機構・教養教育センター

連絡先: 小島茂明, 東京大学大学院新領域創成科学研究科

〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5

E-mail: kojima@aori.u-tokyo.ac.jp

#### 要旨

2006～2008年にホソウミニナの採集をおこなった三陸海岸の8ヶ所の生息地（津軽石川河口干潟、山田湾織笠干潟、大船渡湾蛸浦漁協先、気仙沼湾宿舞根漁協岸壁、長面浦、雄勝湾、万石浦、松島湾櫃ヶ浦）で、2011年と2012年に本種の分布状況を確認すると共に採集をおこない、ミトコンドリアDNAの塩基配列およびマイクロサテライトに基づいて各地域個体群の遺伝的変化の有無を検証した。いずれの生息地でも個体数の減少は見られたものの、本種の生残が確認された。ミトコンドリアDNAでは織笠干潟と雄勝湾で遺伝的多様性の低下が検出された。また櫃ヶ浦では、優占する塩基配列の交代が見られた。一方、マイクロサテライトでは震災前後の変化より採集場所間の差異の方が大きく、いずれの場所でも震災による遺伝的組成の変化は検出されなかった。こうした違いは、ミトコンドリアDNAとマイクロサテライト（核DNA）の遺伝様式および進化速度の違いによるものと考えられる。

#### Abstract

In 2011 and 2012, a survey and sampling of a tideland snail, *Batillaria attramentaria*, were conducted at eight sites along the Sanriku coast where specimens of this species had been sampled between 2006 and 2008, specifically at the mouth of the Tsugaruishi-gawa River, the mouth of the Origasa River, Ohfunato Bay, Kesenuma Bay, Nagatsura Lagoon, Ogatsu Bay, Mangokuura Lagoon, and Hitsugaura Lagoon. At all sites, the snail populations survived the mega-tsunami in 2011 despite decreases in snail density. Changes among the genetic characteristics of each local population were verified based on nucleotide sequences of the mitochondrial DNA and microsatellites analyses. Analysis of the mitochondrial DNA revealed a decrease in genetic diversity among local populations at the mouth of the Origasa River and Ogatsu Bay, as well as a shift in the dominant sequence type found in Hitsugaura Lagoon. In contrast, microsatellite analysis revealed no genetic changes among local populations. This difference is thought to be attributable to differences in inheritance and evolutionary rates between mitochondrial DNA and microsatellites.

#### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震にともなう巨大津波は、東日本太平洋岸の生態系に大きな攪乱を及ぼした。海底の上や砂泥中に生息していた底生生物が津波により流されたり、土砂に埋没したりしたものと予想される。実際、底生生物の個体群密度の減少や群集組成の変化が、潮間帯 (Kanaya et al. 2017, Miura et al. 2012, Noda et al. 2016), 潮下帯 (Kawamura et al. 2014, Komatsu et al. 2015, Takami et al. 2013), 浅海底 (Abe et

al. 2015, Seike et al. 2013, 2016) や深海底 (Kitahashi et al. 2014, 2016) で報告され、現在も追跡調査が続けられている。一方で、巨大津波が生物量や種組成だけでなく、それぞれの種を持つ遺伝的多様性の低下や遺伝的浮動による遺伝子頻度の変化など、地域集団の遺伝的な性質を変えた可能性もある。特に分散能力の小さい種では、一度変化した遺伝的な性質が長期間にわたって維持されることが期待されるので、現在の集団の遺伝的特性を解析することで過去の津波履歴を復元できるかもしれない。こうした観点から、我々は三陸海岸の干潟の優占種であ

るホソウミナナ *Batillaria attramentaria* を対象にして、巨大津波による個体群の遺伝的攪乱の実態を明らかにするため調査をおこなった。

ホソウミナナはプランクトン幼生期を持たない直達発生種であり、成体の移動能力も高くないため、比較的小さい空間スケールで容易に隔離され、遺伝的に分化することが期待される。ミトコンドリアDNAにコードされているチトクロームcオキシダーゼサブユニットI (COI) 遺伝子の部分塩基配列を指標とした既往研究 (Itoh 2014, Kojima et al. 2004, Miura et al. 2006) で、国内の集団が黒潮流域と対馬暖流域で遺伝的に分化していること、三陸海岸には両者が入れ子状に分布していることが明らかになっている。核DNA上のマイクロサテライトの解析では国内のホソウミナナが大きく3つの集団に分かれ、黒潮流域と対馬暖流域の集団に加えて、三陸沿岸の集団が第3のグループを形成していた。これは黒潮流域と対馬暖流域間の分化が生殖的隔離を伴わない種内変異のレベルに留まっており、おそらく三陸海岸で二次的に接触、交配したことにより、両者の中間的な集団が形成されたことを示している (Itoh 2014)。三陸海岸で採集された黒潮流域タイプの塩基配列のCOI遺伝子を持つ個体と対馬暖流域タイプ塩基配列のCOI遺伝子を持つ個体の間にマイクロサテライトの組性に有意な違いが見られないことから、両者が自由交配していることが示された。更に詳細に解析すると、三陸海岸ではほとんどの湾に、独自の遺伝的特性を持った個体群が分布していることが明らかになった (Itoh 2014)。

震災後に松島湾周辺でおこなわれた調査では、5ヶ所の干潟のうち4ヶ所でホソウミナナの個体数が激減したことが報告されている (Miura et al. 2012)。一方、松政ら (2015) は震災後3年半後に、それまでホソウミナナの分布が確認されていなかった広田湾小友浦で移入個体を発見したと報告している。このことは、本種のような直達発生種では、津波によって新たに形成された干潟への移入に時間を要することおよび、自然な状況下での分散能力が極めて低いことを示している。

本研究では、2006~2008年にホソウミナナのサンプリングをおこなった三陸海岸の8ヶ所の生息地を再訪し、本種の分布状況を確認すると共に採集をおこない、ミトコンドリアDNAの塩基配列およびマイクロサテライトに基づいて各地域個体群の遺伝的変化の有無を検証した。

## 2. 材料と方法

2011年8月19日に岩手県山田湾織笠干潟、2012年5月27~28日に岩手県津軽石川河口干潟、大船渡湾崎浦漁協先、宮城県気仙沼湾宿舞根漁協岸壁、長面浦、雄勝湾湾奥、万石浦、松島湾櫃ヶ浦でホソウミナナの分布調査と採集をおこなった。採集したホソウミナナ個体から全DNAを抽出し、Itoh (2014) と同じ方法でミトコンドリアDNA・チトクロームcオキシダーゼサブユニットI (COI) 遺伝子の部分配列を決定し、28種のマイクロサテライト (Itoh et al. 2014, Miura et al. 2014) のフラグメント解析をおこなった。得られた結果を震災前のデータ (Itoh 2014, 未発表データ) と比較した。

震災前に採集された個体について核DNAにコードされているリボゾームRNA遺伝子の内部転写スペーサー領域 (ITS1) の塩基配列を決定し、COI遺伝子の塩基配

列と合わせて、Bayesian skyline plot法により有効集団サイズの変動を推定した。年代推定には巻貝類の標準的なCOI遺伝子の分子進化速度である100万年当たり2.4% (Hellberg and Vacquier 1999) を用いた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 震災後のホソウミナナの分布状況

調査をおこなった場所における震災前後の分布状況を Fig. 1 に示す。

津軽石川河口干潟では震災前にホソウミナナが多産した潮だまりがあった中州が消失したが、より海側の場所に本種個体が低頻度ながら生息しているのが発見されており (松政ら 2015)、2012年にそこからホソウミナナを採集した。継続的な野外調査から、この個体群の密度が2013年に急激に増加し、震災前の状態に近づきつつあることが報告されている (松政ら 2015)。塩分変動や乾燥への耐性が比較的に強いこと、津波の様な大規模攪乱に遭遇しても少数の個体が生き残る可能性が高い種では、直達発生という繁殖様式が攪乱後に確実に遺伝子を残す戦略として有効であると考えられる。

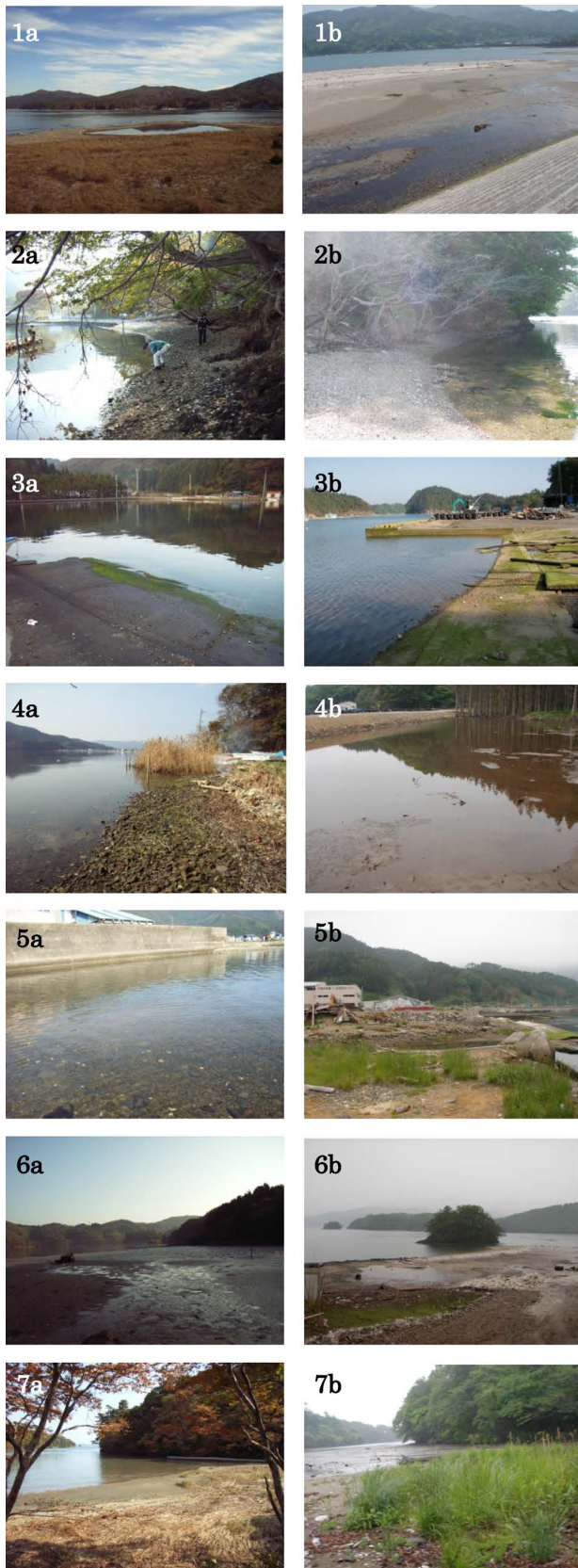
織笠干潟は2011年夏には中潮の干潮時にも干出せず、大槌側の海底ではホソウミナナが見つかることができなかった。しかし、建設中だった河口堰の工事現場の枠に砂利がトラップされ、その中に多数のホソウミナナが生息しているのを発見した (Fig. 2)。また、対岸の海底にも低頻度ながら生息しているのが発見されている (松政未発表データ)。

大船渡湾では、地盤沈下が見られたものの、元々ホソウミナナの生息場所が海中の砂利の間であったため、大きな変化は認められなかった。気仙沼湾では震災前にホソウミナナを採集した船着き場が破壊されていたが、同じ場所に数が大きく減ったものの生き残っていた。長面浦では、震災前に採集をおこなった陸側の水路は復興工事のため消失し、岸辺の採集場所も地盤沈下してホソウミナナを発見することができなかった。しかしながら、堤防の海側の面や内側の海水溜まり、海岸の土嚢の間に溜まった砂利の間などに少数の個体が観察された。これは、Miura et al. (2012) の報告と一致する。雄勝湾で震災前にホソウミナナを採集した河口の砂利底に泥が溜まり、ホソウミナナが見られなかったが、破壊された堤防の瓦礫の間に砂利が溜まった部分に生息しているのを確認した。

万石浦では地盤沈下のために海岸線が移動していたが、多数のホソウミナナやウミミナナが生息していた。一方、震災前に数を増していたカワアイ (Kojima et al. 2008) は見つからなかった。櫃ヶ浦では干潟自体には目立った変化は見られず、ホソウミナナの個体密度もそれほど減少していなかったが、アシ原が消滅して、フトヘナタリが大型個体のみになっていた。

### 3.2 集団遺伝学的解析結果

上記の8ヶ所の個体群について、震災前後で遺伝的特性を比較したところ、COI遺伝子では2ヶ所 (織笠干潟、雄勝湾) で遺伝的多様性の低下が検出された (Fig. 3)。いずれの場所でもホソウミナナ個体群密度が激減し、採集時点でまだ回復していなかった。津軽石川河口干潟と



**Fig. 1.** Habitats of *Batillaria attramentaria* along the Sanriku Coast before and after the 2011 mega-tsunami. 1) the mouth of Tsugaruishi-gawa River on 4 Nov., 2007 (1a) and 17 May, 2012 (1b). 2) Ohfunato Bay on 5 Nov., 2006 (2a) and 27 May, 2012 (2b). 3) Kesennuma Bay on 4 Nov., 2006 (3a) and 27 May, 2012 (3b). 4) Nagatsuraura Lagoon on 4 Nov., 2006 (4a) and 28 May, 2012 (4b). 5) Ogatsu Bay on 4 Nov., 2006 (5a) and 28 May, 2012 (5b). 6) Mangokuura Lagoon on 4 Nov., 2006 (6a) and 28 May, 2012 (6b). 7) Hitsugaura Lagoon on 3 Nov., 2006 (7a) and 28 May, 2012 (7b).

大船渡湾の個体群は元々、遺伝的多様性が極端に低く、震災による低下の余地がほとんどなかったものと考えられる。一方で、気仙沼湾と長面浦の個体群は震災後も比較的高い遺伝的多様性を維持しているが、その原因は不明である。櫃ヶ浦では、優占する塩基配列の交代が見られた (Fig. 3)。これは巨大津波による個体群の縮小と急速な回復に伴う遺伝的浮動 (ボトルネック効果) によるものと考えられる。一方、マイクロサテライトでは震災前後の変化より採集場所間の差異の方が大きく、いずれの場所でも震災による遺伝的組成の変化は検出されなかった。ミトコンドリアDNAが、母から子へのみ伝えられる母系遺伝をおこなうのに対し、核DNA上にあるマイクロサテライトは両親から受け継がれる。そのため、震災による個体数減少の影響は、ミトコンドリアDNAでより強く顕れる。また一般に進化速度がミトコンドリアDNAより速いとされるため、多様性が減少したとしても、より短い時間で回復することが期待される。実際、多くのマイクロサテライトはCOI遺伝子に比べて高い多様性を維持しており、これが個体群の縮小時に特定の遺伝子を持つ個体の消失を防ぐ働きをしていると考えられる。遺伝様式の異なるミトコンドリアDNAと核DNAのデータを総合して解析することによって、巨大津波直後の沿岸生態系に何が起きたのかをより詳細に解明することができると期待される。

COI遺伝子およびITS1の塩基配列を用いて有効集団



**Fig. 2.** Site where individuals of *Batillaria attramentaria* were discovered, located in frames for the construction of a weir in an estuary at the mouth of the Origasa River on 19 August, 2011.

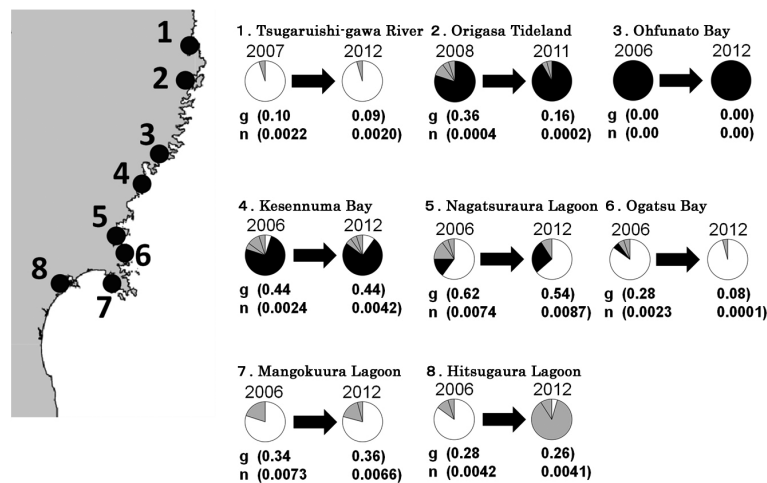


Fig. 3. Changes in haplotype composition, determined based on partial nucleotide sequences of the mitochondrial *COI* gene, among eight local *Batillaria attramentaria* populations, caused by the 2011 mega-tsunami (Modified from Itoh and Kojima, 2016).

サイズの時間的変動を推定したところ、最終氷期中の減少と氷期終了から現在まで続く単調で急速な増加が示された一方で、巨大津波に対応するサイズ変化は検出されなかった。これは巨大津波による攪乱後の回復が、二つの遺伝子領域の分子進化速度に対して短い時間で完了するためと考えられる。

プランクトン幼生期を持たない直達発生種であるホソウミナナでは、1世代あたりの移動距離が小さく容易に地理的隔離と遺伝的分化が起きることから、現在の個体の遺伝子解析から過去の環境変動を復元するのに絶好の対象である。

三陸海岸で本種は、過去の巨大津波の繰り返しの中で独自の遺伝的集団構造を形成してきたものと考えられる。豊富なマイクロサテライトマーカー (Itoh et al. 2014, Miura et al. 2014) に加えて、次世代シーケンサーを用いた解析により、周期的な大規模環境攪乱が沿岸生物集団に与える影響と回復過程の様相を明らかにすると共に、過去の巨大津波に関して、新たな視点から情報が提供されるものと期待される。

## 引用文献

- Abe, H., Kobayashi, G. and Sato-Okoshi, W. (2015). Impacts of the 2011 tsunami on the subtidal polychaete assemblage and the following recolonization in Onagawa Bay, northeastern Japan. *Mar. Environ. Res.* 112, 86–95.
- Hellberg, M. E. and Vacquier, D. (1999). Rapid evolution of fertilization selectivity and lysin cDNA sequences in Teguline gastropods. *Mol. Biol. Evol.* 16, 839–848.
- Itoh, H. (2014). Phylogeographic study of the Asian horn snail *Batillaria attramentaria* (Mollusca, Gastropoda). Doctoral Thesis, the University of Tokyo, Tokyo.
- Itoh, H. and Kojima, S. (2016). The genetic disturbance caused by the mega-tsunami on a coastal species. In K. Kogure, M. Hirose, H. Kitazato and A. Kijima (eds.) *Marine ecosystems after Great East Japan Earthquake in 2011*, 79–80.
- Itoh, H., Kamimura, S., Takeshima, H. and Kojima, S. (2014). Isolation and characterization of microsatellite loci in the Asian horn snail *Batillaria attramentaria* (Mollusca, Gastropod). *Mol. Ecol. Resour.*, <http://tomato.bio.trinity.edu/manuscripts/13-4/mer-13-0029.pdf>.

- Kanaya, G., Suzuki, T., Kinoshita, K., Matsumasa, M., Yamada, K., Seike, K., Okoshi, K., Miura, O., Nakai, S. and Sato-Okoshi, W. (2017). Disaster-induced changes in coastal wetlands and soft-bottom habitats: an overview of the impacts of the 2011 tsunami and Great East Japan Earthquake. *Biol. Int.* in press.
- Kawamura, T., Takami, H., Hayakawa, J., Won, N.-I., Muraoka, D. and Kurita, Y. (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 Environ. Res.* 18, 47–56.
- Kitahashi, T., Jenkins, R. G., Nomaki, H., Shimanaga, M., Fujikura, K. and Kojima, S. (2014). Effect of the 2011 Tohoku Earthquake on deep-sea meiofaunal assemblages inhabiting the landward slope of the Japan Trench. *Mar. Geol.* 358, 128–137.
- Kitahashi, T., Watanabe, H., Ikeharac, K., Jenkins, R. G., Kojima, S. and Shimanaga, M. (2016). Deep-sea meiofauna off the Pacific coast of Tohoku and other trench slopes around Japan: A comparative study before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Jour. Oceanogr.* 72, 129–139.
- Kojima, S., Hayashi, I., Kim, D., Iijima, A. and Furota, T. (2004). Phylogeography of an intertidal direct-developing gastropod, *Batillaria cumingi*, around the Japanese Islands. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 276, 161–172.
- Kojima, S., Ozeki, S., Iijima, A., Okoshi, K., Suzuki, T., Hayashi, I. and Furota, T. (2008). Genetic characteristics of three recently discovered populations of the tideland snail *Cerithidea djadjarimensis* (Martin) (Mollusca, Gastropoda) from the Pacific coast of the eastern Japan. *Plankton Benthos Res.*, 3, 96–100.
- Komatsu, T., Ohtaki, T., Sakamoto, S., Sawayama, S., Hamana, Y., Shibata, M., Shibata, K. and Sasa, S. (2015). Tsunami on seagrass and seaweed beds in Otsuchi Bay, Sanriku Coast, Japan. In *Marine productivity: perturbations and resilience of socio-ecosystems*. Ceccaldi, H. J., Hénocque, Y., Koike, Y., Komatsu, T., Stora, G. and Tusseau-Vuillemin, M.-H. (eds.), pp. 43–53, Springer International Publishing Switzerland, Cham.
- 松政正俊・木下今日子・伊藤 萌・小島茂明 (2015). 三陸の渚：その大規模攪乱に対する脆弱性と頑強性. *DNA多型* 23: 9–16.
- Miura, O., Torchin, M. E., Kuris, A. M., Hechinger, R. F. and Chiba,

- S. (2006). Introduced cryptic species of parasites exhibit different invasion pathways. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 103, 19818–19823.
- Miura, O., Sasaki, Y. and Chiba, S. (2012). Destruction of populations of *Batillaria attramentaria* (Caenogastropoda: Batillariidae) by tsunami waves of the 2011 Tohoku Earthquake. *Jour. Moll. Stud.* 78, 377–380.
- Miura, O., Makino, W. and Urabe, J. (2014). Characterization and cross-species utility of polymorphic microsatellite markers in the Asian mud snails *Batillaria attramentaria* and *B. multiformis*. *Conser. Genet. Resour.* 6, 461–463.
- Noda, T., Iwasaki, A. and Fukaya, K. (2016). Recovery of rocky intertidal zonation: two years after the 2011 Great East Japan Earthquake. *Jour. Mar. Biol. Ass. U.K.* 96, 1549–1555.
- Seike, K., Shirai, K. and Kogure, Y. (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., Kitahashi, T. and Noguchi, T. (2016). Sedimentary features of Onagawa Bay, northeastern Japan after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: sediment mixing by recolonized benthic animals decreases the preservation potential of tsunami deposits. *Jour. Oceanogr.* 71, 141–149.
- Takami, H., Won, N.-I. and Kawamura, T. (2013). Impacts of the 2011 mega-earthquake and tsunami on abalone *Haliotis discushan-nai* and sea urchin *Strongylocentrotus nudus* populations at Oshika Peninsula, Miyagi, Japan. *Fish. Oceanogr.* 22, 113–120.