

Tanaka, K., S. Nagao, Y. Kitade, M. Niki, T. Katsumata, T. Miyama, and H. Yoshinari. *Limnology and Oceanography* (2022. **67**, 1184-1193, doi: 10.1002/lno.12065): Spread of Fukushima-derived radiocesium over the coastal ocean in response to typhoon-induced flooding in September 2011 の和文解説

2011年9月の台風(12号)によって河川から海洋に流出した 福島原子力発電所起源の放射性セシウム分布 (陸-川-海を繋ぐ水循環)

田中潔¹、長尾誠也²、北出裕二郎³、仁木将人⁴、勝間田高明⁴、美山透⁵、吉成浩志⁶

(1 東京大学、2 金沢大学、3 東京海洋大学、4 東海大学、5 海洋研究開発機構、6 国立環境研究所)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災と巨大津波は、福島第一原子力発電所(以下、FDNPP)に甚大な被害を与え、多量の放射性物質(放射性セシウム等)が海洋に流出した。放射性物質がFDNPPから海洋に至る経路については、1) 大気から海洋上への降下、2) FDNPPからの直接流出、3) 地下水からの流出、4) 河川からの流出、の4経路が存在する(e.g., Buesseler et al. 2017)。

本研究では、河川から海洋に流出する放射性セシウムに着目した。河川は陸上に沈着した放射性物質を集積しながら、海洋へ輸送する。放射性セシウムが河川によって輸送される過程については、これまで多くの研究が行われている(参考文献省略。詳細は原著論文を参照されたい)。しかし、河川から流出した放射セシウムが、海洋で沖に向かって拡がっていく過程を調べた研究は少ない。特に河川が大雨によって大規模出水したときの拡がりを捉えた例は、これまでほとんど報告されていない。

一般に、河川の大規模出水時やその直後の海洋観測は、悪天候のため困難であることが多い。しかし、本研究では台風に伴う極めて大規模な出水から8日以内に、黒潮親潮混合域の緯度帯に位置する常磐沖において、広範な海域で観測を実施することに成功した。実はこのとき、常磐地域の主要河川である利根川と那珂川では、2007年以來の大規模出水が生じていた。本研究ではこの観測結果に基づき、「陸-川-海」を繋ぐ水循環と、それに

伴う放射性セシウムの海洋への流出過程を調べた。

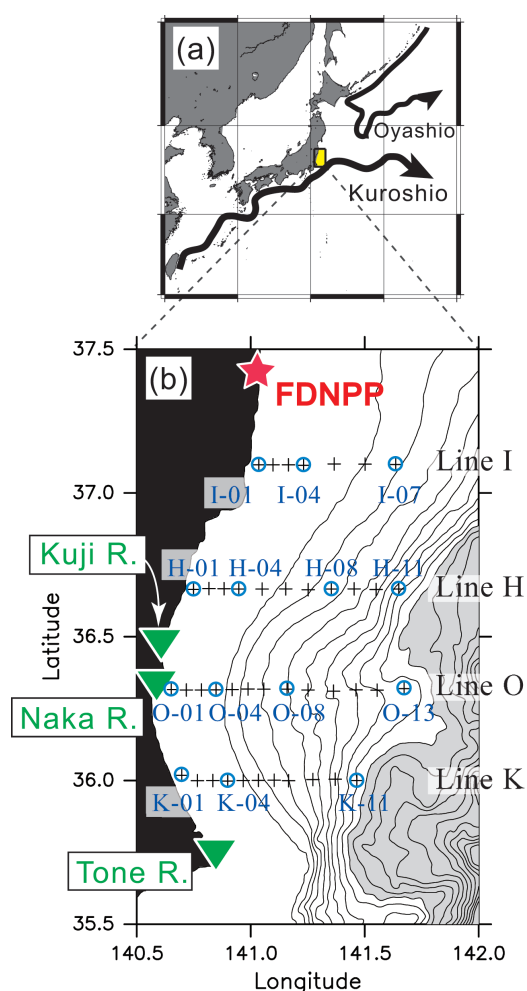


図 1. (a) 観測海域(黄線で囲まれた域)。 (b) 測線及び測点分布。測線は、いわき市(I)・日立市(H)・大洗町(O)・鹿嶋市(K)の沖合に設定。十字(+)はCTD測点を、白抜き青丸(O)は採水点を表す。下向き緑三角(▼)は、久慈川・那珂川・利根川の河口位置を表す。

2. 観測方法

2011年9月7日～12日の期間、図1の常磐沖海域で水温・塩分の深度分布観測(CTD)と測流(ADCP)、及び表層水(深度10m)の採水を実施した(淡青丸KT-11-22次震災対応航海)。測線及び測点は、図1bに示される通りである。

採水した海水中の放射性セシウムの濃度測定は、金沢大学低レベル放射能実験施設及び尾小屋地下実験施設のゲルマニウム半導体検出器を用いて行った(e.g., Nagao et al. 2013)。本研究では以下、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の溶存態及び粒子態の全ての濃度合計値について、測定日から採取日に壊変補正を施したものを「放射性セシウム濃度」と表記する。

3. 結果

図2に表層(深度10m)の放射性セシウム濃度(白抜きカラー○印)と、塩分(等値線と陰影部)の分布を示す。FDNPPに近い測線よりも、遠くに位置する測線のほうが高濃度の放射性セシウムが検出されている。また、沖合で高濃度セシウムが検出された測点では、塩分が低い傾向が見られる。

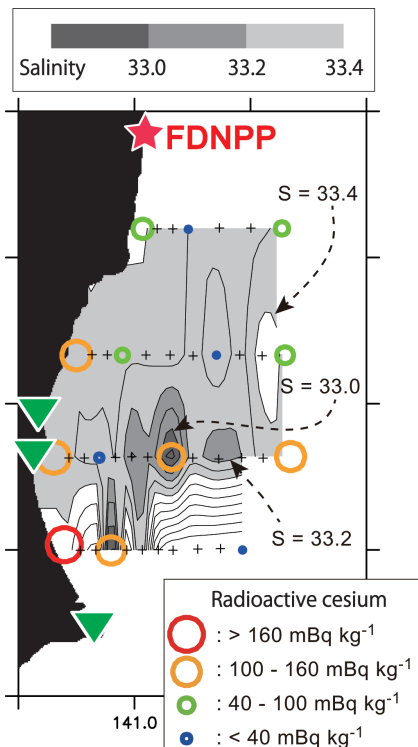


図2. 表層(深度10m)の放射性セシウム濃度(白抜きカラー○印)と、塩分(等値線と陰影部)の分布。○印が大きいほど放射性濃度は高い。陰影が濃い域ほど、塩分が低い。

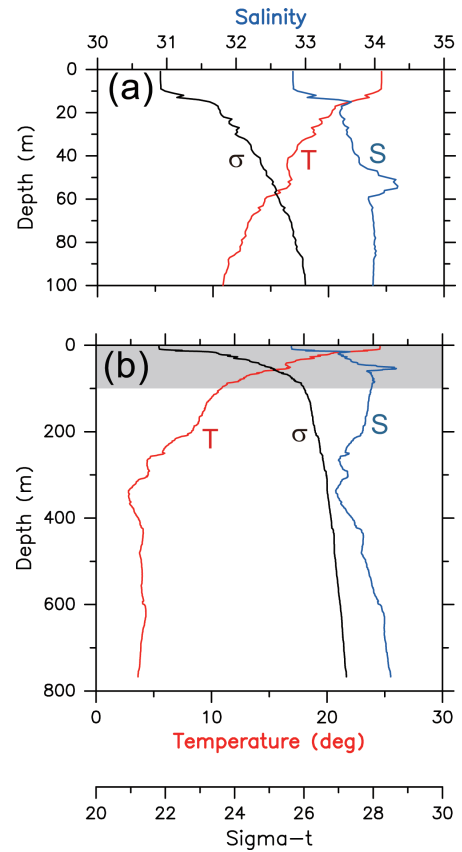


図3. St. O-08での水温(T)、塩分(S)、海水密度シグマティ(σ)の鉛直プロファイル。(a)上層100mを拡大表示。(b)海底までの分布。(b)の陰影部は(a)の深度帯を表す。

図3はSt. O-08(低塩分で高濃度放射性セシウムの水が検出された沖合測点)での、塩分等の鉛直プロファイルを示す。低塩分水は、深度10m以浅の薄い表層にのみ存在している。これら図2及び図3の結果から、今回の観測で検出された低塩分水と高濃度放射性セシウムは、FDNPPから離れた場所に河口を持つ河川(那珂川や利根川、久慈川)から海洋に流出した可能性が示唆される。

次に、塩分と放射性セシウム濃度の関係を詳しく見た。図4は塩分と放射性セシウム濃度の相関図を示す。図中の灰色●印は最沿岸の4測点(K-01, O-01, H-01, I-01)を示し、黒色●印はそれ以外の沖合点を示す。前者の最沿岸点は河口に近いことと、水深が非常に浅く河川水流出時に海底堆積物が巻き上げられることとによって、放射性セシウムの多くは粒子態であると考えられる(参考文献省略)。これに対して、後者の沖合点は河口から遠く、且つ海底堆積物の巻き上げも深度10-20mに形成されている強い躍層(図3)に阻まれるため、

放射性セシウムの多くは溶存態であると考えられる。そして、沖合の測点（黒色●印）については、塩分と放射性セシウム濃度に有意な相関が存在した。すなわち、今回の観測において、沖合で検出された低塩分水と高濃度放射性セシウムは、那珂川や利根川から流出したものであることが強く示唆される。

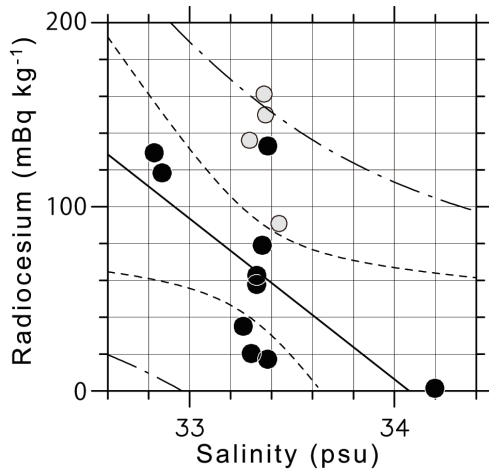


図 4. 塩分と放射性セシウム濃度の相関図。灰色●印は最沿岸の 4 測点 (K-01, O-01, H-01, I-01) を示し、黒色●印はそれ以外の沖合点を示す。実線は黒色●印 (沖合測点) に対する線形回帰直線を表し ($r = -0.68, p < 0.05$)、破線はそれに対する信頼区間 (95%) を、一点鎖線は予測区間 (95%) を表す。

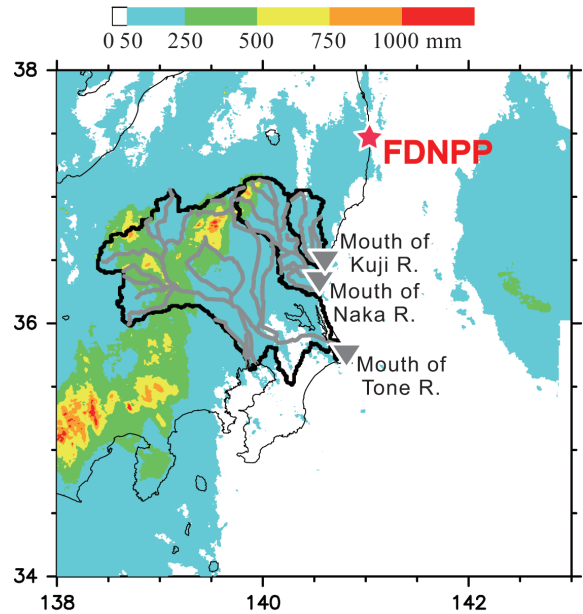
はじめにも述べた通り、今回の観測の直前には、台風 (12 号) が日本各地に豪雨をもたらしていた。台風中心は FDNPP よりも遠く離れた西側を通過したものの、那珂川や利根川の上流域には極めて多量の降水が生じていたことは特筆すべき事である。図 5a は、観測直前の 8 日間 (8 月 30 日~9 月 6 日) の降水量分布 (積算値) を示す。那珂川及び利根川の上流域で、期間中に積算降水量が 500 mm を超える豪雨が生じている。また、FDNPP の近傍では、降水が少なかったことも興味深い。

一方、図 5b は ^{137}Cs の、陸上への初期沈着量を示す。図 5a の那珂川及び利根川上流域で豪雨が生じていた地域 ($36.5\text{-}37.0^\circ\text{N}$, $138.5\text{-}140.0^\circ\text{E}$ 付近) には、 ^{137}Cs が予め多量に沈着していたことが分かる。

そして、この観測直前の 8 日間における豪雨は、利根川や那珂川に大規模な出水を引き起こし

た。図 6 は利根川・那珂川・久慈川の流量時系列を示す。利根川と那珂川では 9 月 4 日にそれぞれ $2800\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, $700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ の流量を記録しており、これらは 2007 年以來の大規模な出水となった。

(a) Amount of precipitation (8/30-9/6)



(b) Initial fallout of ^{137}Cs (CRIED, Tsukuba Univ)

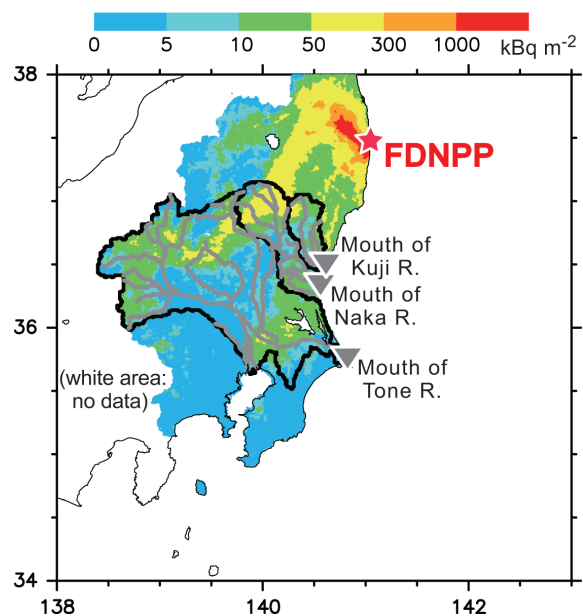


図 5. (a) 観測直前 8 日間 (8/30~9/6) の積算降水量。 (b) ^{137}Cs の初期沈着量。 (a) (b) ともに灰色太線は久慈川・那珂川・利根川水系の流路を、黒色太実線はそれら水系の流域境界を表す。降水量については、気象庁解析雨量データから算出。 ^{137}Cs 沈着量については、筑波大学アイソトープ環境動態研究センター公開の ^{137}Cs 初期沈着量データセットに基づいて作成。河川水系流路と流域については、国土交通省国土数値情報データから作成。

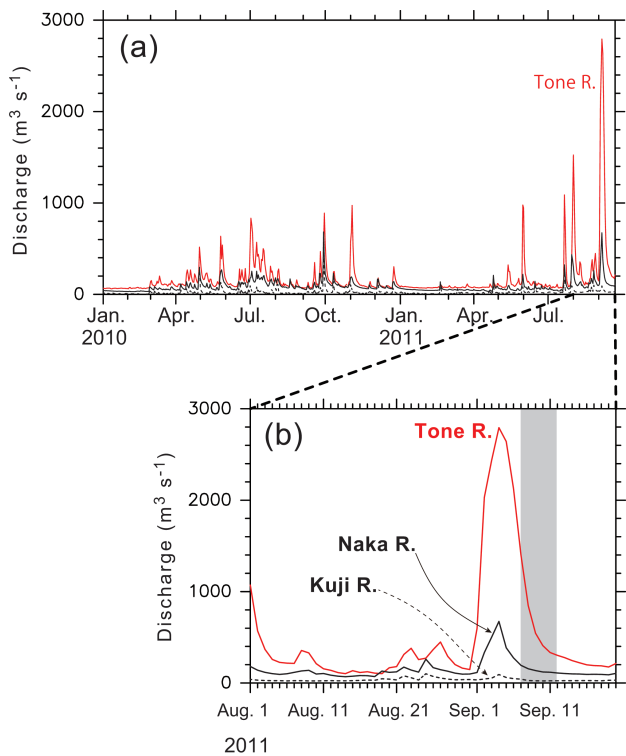


図 6. 利根川(芽吹橋)・那珂川(野口)・久慈川(榑橋)の流量時系列。(a) 2010年1月1日～2011年9月20日。(b) 2011年8月1日～2011年9月20日。(b)の陰影部は、海洋観測の期間を表す。国土交通省 水文水質データベースより作成。

さらに、これらの河川からの大規模出水は、引き続き海洋での大規模ブルーミング(植物プランクトンの大増殖)をもたらした。すなわち、出水が生じる前は、クロロフィル高濃度域は岸近傍に限られていた(図7a)。これに対して、出水が生じた直後の観測期間中は、クロロフィル高濃度域は遙か沖合にまで拡がっている(図7b)。そして、沖合に拡がったクロロフィル高濃度域は、低塩分域と良く一致する。すなわち、今回の観測で検出された低塩分水と高濃度放射性セシウムは、FDNPPから離れた場所に河口を持つ大きな一級河川(那珂川や利根川)から海洋に流出したものであることが、ブルーミングの発生分布からも確認できる。

図8には今回の結果のまとめを、ADCPによる測流値やデータ同化モデルによる黒潮強流域とともに示す。大規模出水で那珂川(や久慈川)から海洋に流出した河川水や放射性セシウムは、地球自転の影響を受けて岸沿いに南下しながら、やがて沖へ拡がっていったと考えられる。一方、利根川からの流出については、犬吠埼の影響を受けて、

河口から沖へすぐに拡がっていったものが多いと考えられる。利根川からの流出水については、黒潮の影響を受けながら北東方向へ流された可能性も考えられる。

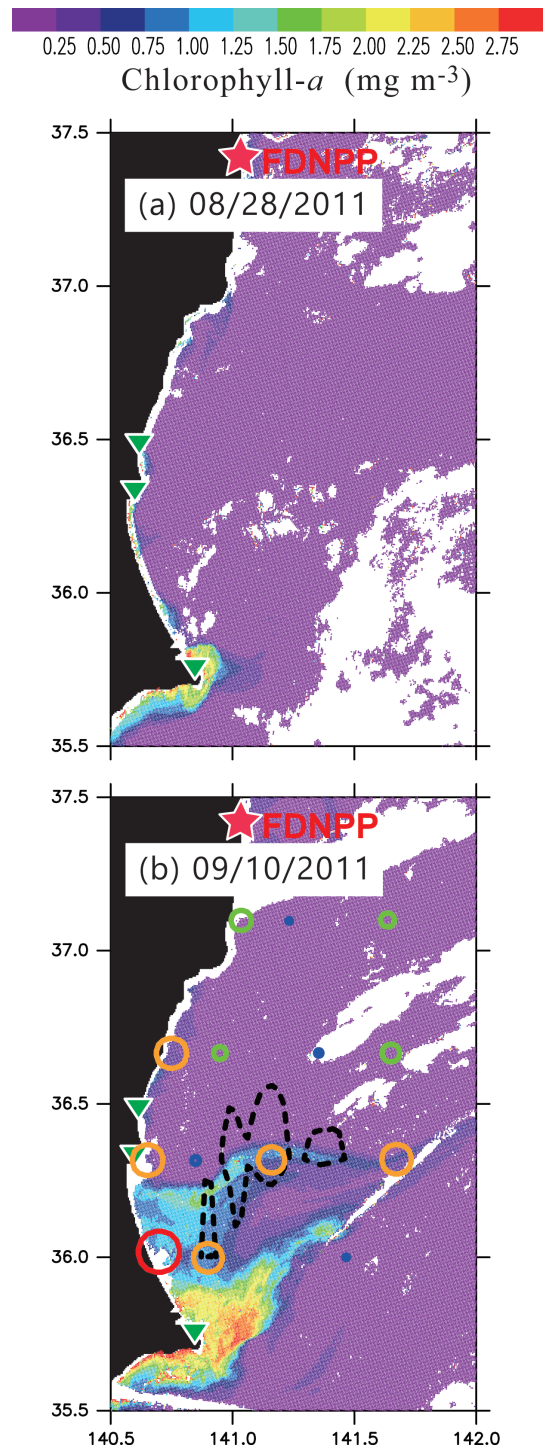


図 7. クロロフィル a の海面分布。(a) 2011年8月28日(海洋観測の約10日前)。(b) 2011年9月10日(海洋観測の期間中)。(b)の白抜きカラー○印は図2に示した放射性セシウム濃度を、黒色破線は塩分33.2の等値線を表す。Korea Ocean Satellite Center 公開の静止海色衛星 GOCI データより作成。

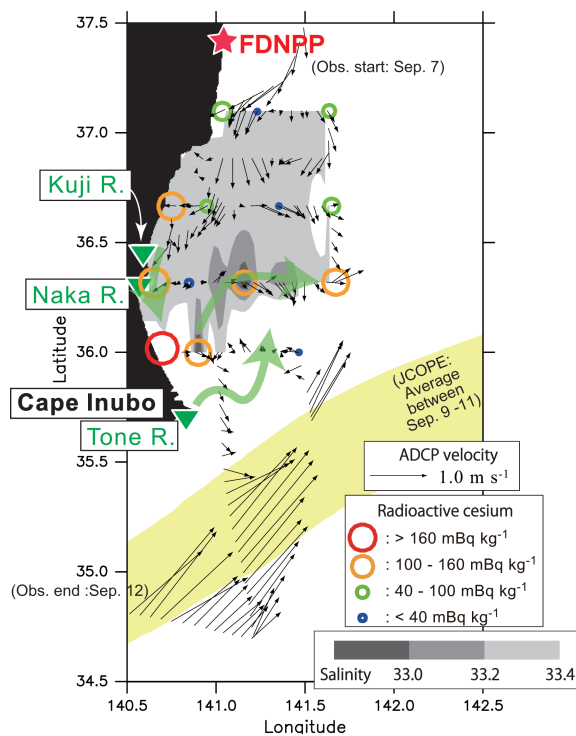


図 8. まとめの図。黒色の細矢印は船底搭載の ADCP による測流結果（深度 24.7 m）を、黄色の帯状域は海洋研究開発機構 データ同化モデル JCOPE によって再現された観測期間中の黒潮強流域 ($> 1.0 \text{ m s}^{-1}$) を表す。緑色の太矢印は、河川流出水の推定移流経路を表す。

4. まとめ

- 2011 年 9 月 7 日～12 日の期間、常磐沖海域で水温・塩分の深度分布観測 (CTD) と測流 (ADCP)、及び表層の放射性セシウム濃度測定のための採水を実施した (淡青丸 KT-11-22 次 震災対応航海)。
- FDNPP (福島第一原子力発電所) に近い測線よりも、遠くに位置する測線のほうが高濃度の放射性セシウムが検出された。また、沖合で高濃度セシウムが検出された測点では塩分が低い傾向が見られ、両者の間には有意な相関が存在した。
- 観測の直前には、台風 (12 号) によって那珂川や利根川の上流域で豪雨が生じていた。この豪雨域は放射性セシウムの初期沈着量が多かった地域と概ね一致する。
- 上記豪雨は那珂川や利根川で、2007 年以來の大規模な出水をもたらした。この大規模出水は、海洋での大規模ブルーミング (植物プランクトンの大増殖) をもたらした。

- 以上のことから、今回の観測で検出された常磐沖の低塩分水と高濃度放射性セシウムは、FDNPP から離れた場所に河口を持つ那珂川や利根川からの大規模な出水によって生じたと結論づけられる。その大規模出水は、台風 (12 号) によって、これらの河川の上流域における豪雨によって引き起こされたものである。

本研究の最も特筆すべき点は、様々なデータ (現場海洋・降水量・ ^{137}Cs 初期沈着量・河川流量・人工衛星・数値シミュレーションのデータ等) を組み合わせて、「陸-川-海」を繋ぐ水循環過程 (図 9) を明瞭に示したことに有る。

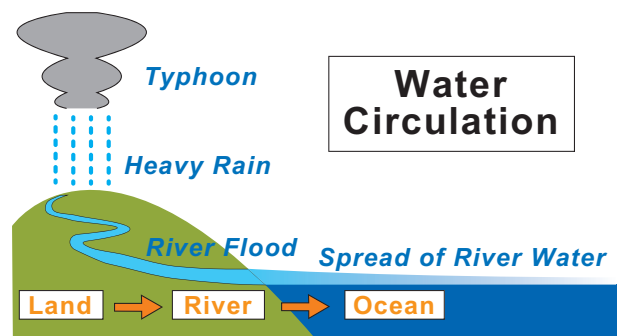


図 9. 「陸-川-海」を繋ぐ水循環過程の模式図。

なお、今回の観測で検出された表層放射性セシウム濃度の最高値は 165 mBq kg^{-1} であったが、この値は厚生労働省による飲料水のための基準値 (10 Bq kg^{-1}) の 1.65 % である。

参考文献

- Buesseler, K., M. Dai, M. Aoyama, C. Benitez-Nelson, S. Charmasson, K. Higley, V. Maderich, P. Masqu, and others. 2017. Fukushima Daiichi-derived radionuclides in the ocean: Transport, fate, and impacts. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, **9**: 173-203. doi:10.1146/annurev-marine-010816-060733.
- Nagao, S., M. Kanamori, S. Ochiai1, S. Tomihara, K. Fukushi, and M. Yamamoto. 2013. Export of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the Fukushima river systems at heavy rains by Typhoon Roke in September 2011. *Biogeosciences*, **10**: 6215-6223. doi:10.5194/bg-10-6215-2013.

(他の参考文献は省略。原著論文を参照されたい)