



Title	北太平洋表層における福島第一原子力発電所事故後の放射性セシウム濃度の長期変動：練習船「おしよろ丸」による継続観測
Author(s)	今井，圭理；渡辺，豊
Citation	北海道大学水産科学研究彙報，76，4-9
Issue Date	2026-07-31
DOI	https://doi.org/10.14943/bull.fish.76.4
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100162
Type	departmental bulletin paper
File Information	bull.fish.76.4.pdf



北太平洋表層における福島第一原子力発電所事故後の放射性セシウム濃度の長期変動 ——練習船「おしよろ丸」による継続観測——

今井 圭理^{1)*}・渡辺 豊²⁾

(2026 年 5 月 28 日受付, 2026 年 6 月 15 日受理)

Long-Term Variations of Radiocesium in Surface Waters of the North Pacific after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident : Long-term monitoring by T/S Oshoro-maru

Keiri IMAI¹⁾ and Yutaka W. WATANABE²⁾

Abstract

The accident at the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in March 2011 resulted in the release of large amounts of radioactive cesium into the North Pacific. In this study, we analyzed radiocesium (^{137}Cs) concentrations in surface seawater samples collected during cruises of the research and training vessel "Oshoro-Maru" of the Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, from May 2011 to March 2023. The study area covered a wide region of the North Pacific Ocean extending from the Sea of Japan to the Bering Sea, and a total of 902 samples were evaluated. The results revealed that ^{137}Cs concentrations in the surface seawater of the North Pacific rapidly decreased during the initial post-accident period and subsequently decreased to low concentration levels with relatively small temporal variations after 2017. Furthermore, this study demonstrates that long-term monitoring using the research vessel repeatedly surveying the same oceanic regions is effective for understanding broad-scale environmental dynamics of long-lived radionuclides.

Key words : FNPP1 accident, Radioactive cesium, Surface seawater, North Pacific, Long-term monitoring, T/S "Oshoro-Maru"

緒 言

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う巨大津波により、東京電力・福島第一原子力発電所事故が発生し、大量の放射性物質が大气および海洋へ放出された。特に、放射性セシウム (^{137}Cs) は人為起源で存在する核種であり、半減期が約 30 年と長い。また、海水中で比較的保存性が高いことから、事故由来放射性物質の長期的な挙動を把握する上で重要な放射性核種として扱われている。

事故直後には、福島県沖沿岸域を中心として高濃度の ^{137}Cs が観測され、多くの研究機関によって海洋における放射性物質の分布、輸送および拡散過程に関する観測が集中的に実施された (Honda et al., 2012 ; Aoyama et al., 2013a,b ; Kanda, 2013)。その結果、事故由来 ^{137}Cs は黒潮および黒潮続流域を通じて北太平洋へ広域的に輸送されることが明らかとなり (Tsumune et al., 2012, 2013), 2012 年夏には北太平洋中央部付近まで到達していたことが報告されている (Kumamoto et al., 2016)。また、海洋内部への沈み

込みに伴い、200-600 m 付近に ^{137}Cs 極大層が形成されたことも報告されている (Kumamoto et al., 2017)。我々も、「おしよろ丸」を利用した 2011 年から 2016 年までの表層海水観測結果を用いて、北太平洋各海域における ^{137}Cs 濃度減少率の海域差について報告している (Imai and Watanabe, 2022)。

一方、事故から十年以上が経過した現在では、福島第一原子力発電所事故由来の ^{137}Cs は、初期の急激な輸送・拡散過程から広域的に低濃度かつ安定した状態へ移行しつつあると考えられる。福島第一原子力発電所を含む原子力発電所周辺海域では継続的なモニタリングが実施されている (及川ら, 2013 ; Takata et al., 2018 ; 横田, 2022)。しかしながら、日本周辺海域から北太平洋広域にわたる長期的かつ継続的な観測例は限られている。また、近年では ALPS 処理水の海洋放出開始に伴い、海洋環境中における放射性物質濃度の継続監視や背景レベルの把握が改めて重要視されている (眞田ら, 2024 ; Takata et al., 2025)。さらに、陸域へ沈着した ^{137}Cs は、降雨イベントに伴う河川流出や沿岸堆積物の再懸濁によって、再び沿岸

¹⁾ 北海道大学水産学部附属練習船おしよろ丸
(T/S Oshoro-Maru, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

²⁾ 北海道大学大学院地球環境科学研究院地球圏科学部門
(Division of Earth System Science, Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

*連絡著者: 今井圭理 (imai@fish.hokudai.ac.jp)

海域へ供給される可能性が指摘されている(乙坂, 2013; Fukuda et al., 2017; Kubo et al., 2018)。そのため、海洋表層における ^{137}Cs 濃度は、事故由来放射性物質の単純な減衰過程のみならず、海洋循環や沿岸過程、陸域環境変動を反映する指標となる可能性がある。したがって、長期的な環境指標として継続的にモニタリングすることが重要である。

北海道大学水産学部附属練習船「おしよ丸」は、年間を通じて実習航海および研究航海を実施しており、北海道・東北沖を中心とした日本沿岸域から北太平洋およびベーリング海に至る広範囲を航行している。「おしよ丸」航海の航路上にて表層海水を採取し測定することができれば、放射性物質を日本沿岸から北太平洋広域にわたり継続的に監視することが可能となる(今井・渡辺, 2015; Imai and Watanabe, 2022)。

本研究では、福島第一原子力発電所事故発生約2ヶ月後から2023年3月までに、「おしよ丸」の航路上において継続的に採取した表層海水試料中の ^{137}Cs 濃度について測定・解析を行った。これにより、事故後十年以上にわたる北太平洋広域における ^{137}Cs 濃度の長期的推移を評価するとともに、濃度低下が進行した後の沿岸域における局所の変動についても検討した。

サンプリングおよび方法

^{137}Cs の測定用海水試料は、2011年5月から2023年3月にかけて実施された北海道大学水産学部附属練習船「おしよ丸」実習航海を利用して、日本海、オホーツク海およびベーリング海を含む広範な北太平洋海域の表層から計902地点で採取された(Fig. 1)。表層海水試料は各観測地点を通過する際に海面下約5 mに設けられた研究用海水の取水口から取り込まれ、ポンプを利用して「おしよ

ろ丸」研究室へ揚水されたものを採取した。モニタリング開始時の2011年はデュラン瓶を用いて2 Lを採取していたが、その後、測定される ^{137}Cs 濃度の検出精度を上げるために、2014年後半以降はプラスチックバッグを用いて採水量を10 Lへ増量した。これらの海水試料は、ろ過を行わず常温で保存した。

採取された海水は研究室に持ち帰った後、海水試料(8 L)に濃硝酸(16 mL; 富士フィルム和光純薬株式会社, 保証試薬)を加えて酸性化した後、塩化セシウム(0.10 g; 富士フィルム和光純薬株式会社, 99.9%)を添加した。次に、リン酸モリブデン酸アンモニウム(AMP; KANSO 社, 高純度)1.60 gを添加した。1時間の通気処理により、海水試料中のセシウムを吸着したAMP/Cs化合物の沈殿を作った。

その後、この沈殿をメンブレンフィルター(孔径0.45 μm)でろ過して回収し、デシケーターを用いて乾燥させた。これらの化合物中の ^{137}Cs の放射能を井戸型ゲルマニウム半導体検出器を用いて48時間かけて測定した。 ^{137}Cs の検出限界は0.0001 Bq/Lであった(廣瀬, 2011; Levy et al., 2011)。

結果および考察

表層海水中における ^{137}Cs 濃度の時系列変化

Fig. 2(a)に2011年5月から2023年3月までの期間に各観測点において採取された表層海水中の ^{137}Cs 濃度の時系列変化を示す。一方、Fig. 2(b)に観測期間の2011年5月から2023年3月の間を約半年から1年間毎に17の期間に区分して、各期間内で測定された表層海水中の ^{137}Cs 濃度の平均値を時系列に表した(期間I(2011年5月から2011年11月), 期間II(2011年12月から2012年6月), 期間III(2012年7月から2012年12月), 期間IV(2013年3

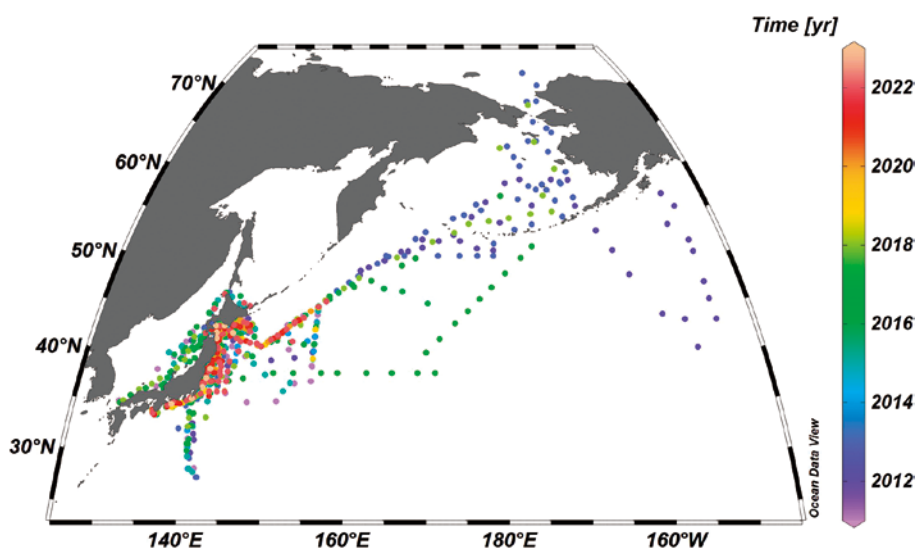


Fig. 1. Sampling points of surface water for radiocesium measurement from May 2011 to March 2023. The figure was created using Ocean Data View (ODV) [<http://odv.aw.de>].

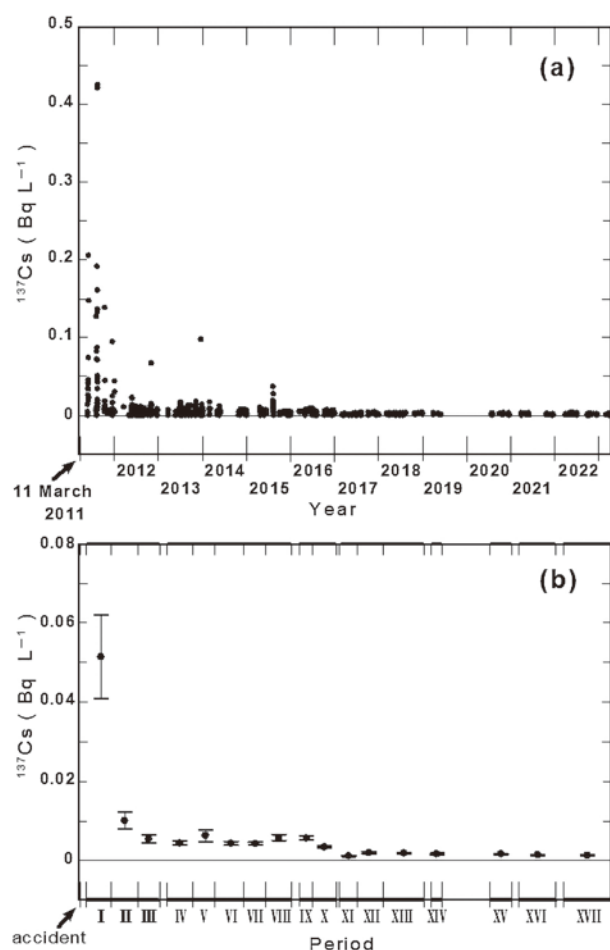


Fig. 2. Time-series of ^{137}Cs in the surface water over the North Pacific from May 2011 to March 2023. (a) All measured ^{137}Cs radioactivity concentrations obtained in this study. (b) Mean ^{137}Cs activity concentrations for each of the 17 periods: Period I (May 2011–November 2011), Period II (December 2011–June 2012), Period III (July 2012–December 2012), Period IV (March 2013–August 2013), Period V (September 2013–February 2014), Period VI (April 2014–October 2014), Period VII (December 2014–May 2015), Period VIII (June 2015–December 2015), Period IX (March 2016–June 2016), Period X (June 2016–December 2016), Period XI (February 2017–June 2017), Period XII (July 2017–December 2017), Period XIII (February 2018–December 2018), Period XIV (March 2019–May 2019), Period XV (July 2020–December 2020), Period XVI (March 2021–December 2021), and Period XVII (March 2022–March 2023).

月から2013年8月), 期間 V (2013年9月から2014年2月), 期間 VI (2014年4月から2014年10月), 期間 VII (2014年12月から2015年5月), 期間 VIII (2015年6月から2015年12月), 期間 IX (2016年3月から2016年6月18日), 期間 X (2016年6月19日から2016年12月), 期間 XI (2017年2月から2017年6月), 期間 XII (2017年7月から2017年12月), 期間 XIII (2018年2月から2018年12月), 期間 XIV (2019年3月から2019年5月), 期間 XV (2020年7月

から2020年12月), 期間 XVI (2021年3月から2021年12月), および期間 XVII (2022年3月から2023年3月)). なお, 期間区分は航海計画および試料数の偏りを考慮して設定したため, 必ずしも一定間隔ではない。また, 本解析は日本海からベーリング海に至る広範な北太平洋海域において得られた計 902 データを用いて算出した平均値である。

以前の報告(今井・渡邊, 2015)に示した通り, 2011年5–7月の観測においては最高値で 0.425 Bq/L と比較的高い濃度が観測されたが, その後の観測では時間の経過とともに顕著な減少傾向が認められた。特に, 2012年7月以降は濃度低下が著しく, 多くの観測点において ^{137}Cs 濃度は事故以前に報告されている外洋域におけるバックグラウンドレベルの値を示し, 事故により一時的に上昇した表層海水中の ^{137}Cs が, 希釈・拡散および物理・生物過程を通じて急速に低減したことを示した。

その後, 2016年頃までの期間においては, 各観測点および観測時期によって一定のばらつきが認められるものの, 濃度の減少速度は緩やかとなり, ^{137}Cs 濃度の平均値の変化から系統的な上昇あるいは下降は確認されず, 全体として, 低い濃度範囲で推移する段階へ移行したことが示された。Takata et al. (2018) による日本海を含む日本周辺の沿岸海域におけるモニタリングによっても事故後から2016年までに我々の結果と同様の ^{137}Cs 濃度の挙動が示されている。このことは, 広域的には ^{137}Cs 濃度の大きな変動が認められない状態に達していることを示唆している。

さらに, 2017年以降の各期間における ^{137}Cs 濃度の平均値は 0.002 Bq/L 以下であり, 標準偏差も 0.0002 Bq/L 以下と小さかった。このことから, 2017年以降は極めて低濃度かつ安定した状態で推移していたことが示された。これらの濃度水準は Aoyama et al. (2011) によって報告された外洋域における事故以前の ^{137}Cs 濃度レベル (0.002 Bq/L 以下) に近く, ^{137}Cs 濃度が時間の経過とともにバックグラウンドレベルへ漸近していることを示唆している。よって, 時間の経過とともにワンランク低い濃度のフェーズへ移行したものと考えられ, 我々の観測海域の大きさを考慮すると, 少なくとも北太平洋の広域では事故前に報告されたバックグラウンドレベルに近い濃度範囲で推移していた可能性が高い。

以上のように, ^{137}Cs 濃度は事故後の初期段階における急激な減少過程を経て, 2017年以降は広域的に低濃度で推移し, 大きな濃度変動は認められなかった。

沿岸域における一時的な ^{137}Cs 濃度上昇

広域的には ^{137}Cs 濃度が低い濃度範囲で推移する過程にあったものの, 2015年7月下旬(期間 VIII 内)には, 前後の観測時期と比較して高い値が観測された(Fig. 2(a))。これらの観測値は ^{137}Cs 濃度が 0.010 Bq/L (最大値 0.037 Bq/L) を上回っており, 2015年7月26日から8月4日に実施し

た福島県沖沿岸域を対象とした集中的観測において得られたものである。

Fig. 3 に同期間における表層海水の採水地点を示す。図中では ^{137}Cs 濃度が 0.010 Bq/L 以上を示した観測点を黒丸、それ以下を白丸で示した。高濃度を示した観測点は福島県陸岸に近い沿岸域に分布しており、その沖合および周辺海域と比較して相対的に高い ^{137}Cs 濃度を示した。

当該観測以前の 2015 年 7 月 15 日から 25 日にかけて、福島県周辺では降雨が観測された。特に 7 月 16 日には、福島県の郡山市以东の地域において、アメダス観測点および気象台等の地上観測地点 23 地点中 11 地点で日積算降雨量 $100\text{--}200 \text{ mm}$ を記録しており、顕著な集中降雨が発生していた(気象庁ホームページ; <https://www.data.jma.go.jp/stats/etam/index.php>)。

福島第一原子力発電所事故後、陸域へ沈着した ^{137}Cs は、降雨イベントに伴う河川流出によって沿岸海域へ供給される可能性が指摘されている(山敷ら, 2013)。Fukuda et al. (2017) は、本研究海域とほぼ同様の海域において、大雨後に沿岸海水中の ^{137}Cs 濃度が一時的に上昇したことを報告している。本研究で観測された 2015 年の高濃度事例についても、観測海域および観測時期の特徴が Fukuda et al. (2017) の結果と一致しており、降雨に伴う陸域からの ^{137}Cs 供給の影響を受けた可能性が高い。

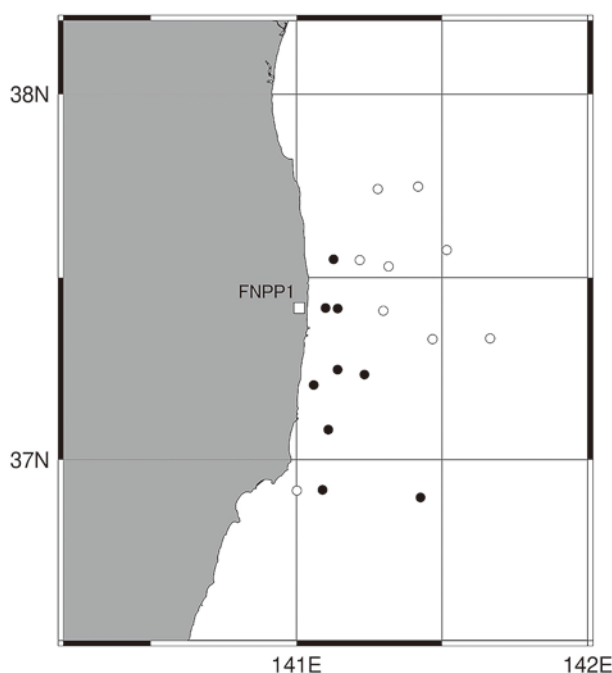


Fig. 3. Observation stations established during the coastal survey conducted off Fukushima Prefecture in late July 2015. Black circles indicate stations where the ^{137}Cs activity concentration in surface seawater exceeded 0.010 Bq L^{-1} , whereas open circles indicate stations with concentrations below this threshold. The square denotes Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FNPP1).

一方、沿岸域へ流入した ^{137}Cs は海底堆積物へ移行した後、再懸濁によって再び海水中へ再供給される可能性が指摘されている(乙坂, 2013)。さらに、Kubo et al. (2018) は、沿岸域の堆積物からの高放射性セシウム粒子が海水中に再懸濁することによって底生生物からの放射性物質の除去を遅らせる可能性を示している。そのため、本研究で観測された濃度上昇には、沿岸浅海域に堆積した粒子由来 ^{137}Cs の再懸濁が寄与していた可能性もある。

しかしながら、2015 年以降の観測では、同程度の高濃度事例はほとんど確認されていない。陸域においても 2021 年には福島県浪江町の高瀬川流域において、降雨時に森林土壌の浸食によって河川に流入する ^{137}Cs 含有粒子がほとんど検出されることが報告されている(Tatsuno et al., 2022)。さらに、水深 200 m までの福島県沖合において採取される動物プランクトンからは 2017 年 5 月以降高放射性粒子は検出されていない(Ikenoue et al., 2022)。これらのことは、事故初期に陸域へ沈着した ^{137}Cs の河川を介した海洋への供給量、ならびに沿岸堆積物からの再供給量が、時間の経過とともに減少していることを示している。

事故後数年間においては、降雨イベントや沿岸堆積物の再懸濁に伴う ^{137}Cs 供給が、沿岸域表層海水中の一時的な濃度上昇として現れていた可能性がある。また、本研究のように広域海域を対象とした長期的な継続観測によって、沿岸域では局所的に比較的高い値を示しながらも、全体としては低い濃度範囲へ移行していく過程を捉えることができた。

まとめ

本研究では、2011 年 5 月から 2023 年 3 月にかけて、日本海からベーリング海に至る北太平洋海域において、「おしよる丸」航海中に採取した表層海水試料中の ^{137}Cs 濃度を解析した。その結果、福島第一原子力発電所事故直後には比較的高濃度の ^{137}Cs が観測されたものの、2012 年以降は急速な濃度低下が認められ、2017 年以降には広域的に 0.002 Bq/L 以下の低濃度かつ準定常的な状態へ移行したことが明らかとなった。これらの濃度水準は、事故以前に報告されている外洋域のバックグラウンドレベルに近く、北太平洋表層海水中の ^{137}Cs 濃度が、事故後十年以上を経て広域的に背景レベルへ近づいていることが示された。

一方で、2015 年の福島県沖沿岸域では、一時的に 0.010 Bq/L を超える比較的高い ^{137}Cs 濃度が観測された。この濃度上昇は、先行研究で報告されている降雨イベント後の沿岸海域における ^{137}Cs 濃度上昇と同様の傾向を示しており、陸域からの河川流入や沿岸堆積物の再懸濁に伴う局所的な再供給過程の影響を受けた可能性が高い。しかしながら、2015 年以降には同程度の高濃度事例はほとんど確認されず、陸域起源あるいは堆積物由来の ^{137}Cs 供給も時間の経過とともに減少していることが示唆された。

本研究では、同一船舶による継続的な海洋観測によって、事故直後から十年以上にわたる北太平洋広域の¹³⁷Cs濃度変化を追跡することができた。特に、¹³⁷Csのように海洋中で長期間残留する物質について、同様の海域を繰り返し観測する長期モニタリングが、広域的な濃度変化や環境動態を把握する上で極めて有効であることが示された。近年ではALPS処理水の海洋放出に伴い、海洋環境中における放射性物質の背景レベル把握と継続監視の重要性が改めて高まっている。本研究で得られた長期観測データは、福島第一原子力発電所事故後の北太平洋における¹³⁷Csの長期的環境動態を理解するための基礎資料として有用であり、将来的な海洋環境モニタリングを継続していく上でも重要な知見を提供するものである。

謝 辞

本研究および調査を行うにあたり、サンプリングの準備、放射性セシウムの分析・測定およびデータ解析に多大なる御支援を頂いた北海道大学大学院地球環境科学研究院の技術補佐員の高橋香澄氏に深甚なる謝意を表する。また、サンプリングに御協力して頂いた北海道大学水産学部附属練習船「おしよ丸」船舶職員に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- Aoyama, M., Fukasawa, M., Hirose, K., Hamajima, Y., Kawano, T., Povinec, P.P. and Sanchez-Cabeza, J.A. (2011) Cross equator transport of ¹³⁷Cs from North Pacific Ocean to South Pacific Ocean (BEAGLE2003 cruise). *Prog. Oceanogr.*, **89**, 7-16. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.12.003>
- Aoyama, M., Tsumune, D. and Hamajima, Y. (2013a) Distribution of ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the north Pacific Ocean : impact of the TEPCO Fukushima-Daiichi NPP accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **296**, 535-539. <http://doi.org/10.1007/s10967-012-2033-2>
- Aoyama, M., Uematsu, M., Tsumune, D. and Hamajima, Y. (2013b) Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs. *Biogeosciences*, **10**, 3067-3078. <http://doi.org/10.5194/bg-10-3067-2013>
- Fukuda, M., Aono, T., Yamazaki, S., Nishikawa, J., Otosaka, S., Ishimaru, T. and Kanda, J. (2017) Dissolved radiocaesium in seawater off the coast of Fukushima during 2013-2015. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **311**, 1479-1484. <http://doi.org/10.1007/s10967-016-5009-9>
- 廣瀬勝己 (2011) 海洋の放射性物質の動態と計測. *ぶんせき*, **8**, 446-450.
- Honda, M.C., Aono, T., Aoyama, M., Hamajima, Y., Kawakami, H., Kitamura, M., Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Takigawa, M. and Saino, T. (2012) Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the western North Pacific one month after the Fukushima accident. *Geochem. J.*, **46**, e1-e9. <http://doi.org/10.2343/geochemj.1.0152>
- Ikenoue, T., Yamada, M., Ishii, N., Kudo, N., Shirogami, Y., Ishida, Y. and Kusakabe, M. (2022) Cesium-137 and ¹³⁷Cs/¹³³Cs atom ratios in marine zooplankton off the east coast of Japan during 2012-2020 following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Environ. Pollut.*, **311**, 119962. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119962>
- 今井圭理・渡邊 豊 (2015) 「おしよ丸」を利用した北太平洋表層における東京電力福島第一原子力発電所事故後の放射性セシウム濃度の継続的調査. 北海道大学水産科学研究彙報, **65**(2), 111-116. <http://doi.org/10.14943/bull.fish.65.2.111>
- Imai, K. and Watanabe, Y.W. (2022) The reducing rate of radiocaesium ¹³⁷Cs in the North Pacific surface water after the TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **331**, 3847-3855. <http://doi.org/10.1007/s10967-022-08403-0>
- Kanda, J. (2013) Continuing ¹³⁷Cs release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012. *Biogeosciences*, **10**, 6107-6113. <http://doi.org/10.5194/bg-10-6107-2013>
- Kubo, A., Tanabe, K., Suzuki, G., Ito, Y., Ishimaru, T., Kasamatsu-Takasawa, N., Tsumune, D., Mizuno, T., Watanabe, Y.W., Arakawa, H. and Kanda, J. (2018) Radioactive cesium concentrations in coastal suspended matter after the Fukushima nuclear accident. *Mar. Pollut. Bull.*, **131**, 341-346. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.042>
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Nagai H., Yamagata T., Kawai Y., Oka E., Yamaguchi A., Imai K. and Murata, A. (2017) Fukushima-derived radiocaesium in the western North Pacific in 2014. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **311**, 1209-1217. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-5055-3>
- Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Murata, A. and Kikuchi, T. (2016) Meridional distribution of Fukushima-derived radiocaesium in surface seawater along a trans-Pacific line from the Arctic to Antarctic Oceans in summer 2012. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **307**, 1703-1710. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4439-0>
- Levy, I., Povinec, P.P., Aoyama, M., Hirose, K., Sanchez-Cabeza, J. A., Comanducci, J-F., Gastaud, J., Eriksson, M., Hamajima, Y., Kim, C.S., Komura, K., Osvath, I., Roos, P. and Yim, S.A. (2011) Marine anthropogenic radiotracers in the Southern Hemisphere : New sampling and analytical strategies. *Prog. Oceanogr.*, **89**, 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.12.012>
- 及川真司・渡部輝久・高田兵衛・鈴木千吉・中原元和・御園生淳 (2013) 日本周辺の海水、海底土、海産生物に含まれる⁹⁰Sr及び¹³⁷Cs濃度の長期的推移 —チェルノブイリ事故前から福島第一原子力発電所事故後まで—。分析化学, **62**, 455-474.
- 乙坂重嘉 (2013) 海底堆積物中の放射性セシウム濃度の推移. *Isotope News*, **710**, 12-15.
- 眞田幸尚・ト部 嘉・齋藤まどか・尻引 武・御園生敏治・舟木泰智 (2024) 処理水の海洋放出に伴うトリチウムモニタリングデータの評価. 環境技術, **53**, 188-193.
- Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N. and Ikenoue, T. (2018) Appearances of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant-derived ¹³⁷Cs in coastal waters around Japan : Results from marine monitoring off nuclear power plants and facilities, 1983-2016. *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 2629-2637. <http://doi.org/10.1021/acs.est.7b03956>
- Takata, H., Wada, T., Miura, H., Wakiyama, Y., Niida, T., Imai, K. and Ooki, A. (2025) Tritium and ¹³⁷Cs levels in marine fishes and in their host seawater around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant from 2021 to 2024. *J. Environ. Radioac.*, **289**, 107760. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107760>
- Tatsuno, T., Waki, H., Kakuma, M., Nihei, N., Wada, T., Yoshimura,

- K., Nakanishi, T. and Ohte, N. (2022) Cesium-rich microparticles runoff during rainfall : a case study in the Takase river. *Radiat. Prot. Dosim.*, **198**, 1052–1057. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac052>
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M. and Hirose, K. (2012) Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model. *J. Environ. Radioac.*, **111**, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.10.007>
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Uematsu, M., Misumi, K., Maeda, Y., Yoshida, Y. and Hayami, H. (2013) One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, **10**, 5601–5617. <https://doi.org/10.5194/bg-10-5601-2013>
- 山敷庸亮・恩田裕一・五十嵐康人・若原妙子・立川康人・椎葉充晴・松浦裕樹 (2013) 阿武隈川から海洋への浮遊土砂を通じた放射性物質の移行状況調査. 京都大学防災研究所年報, **56**, 25–36.
- 横田瑞郎 (2022) 福島第一原子力発電所事故後の海産生物における放射性セシウム濃度の推移—放射能モニタリングデータの集約と解析—. 海生研研報, **27**, 21–47.