

— 論 文 —

東京電力福島第一原子力発電所事故以降の 日本周辺海域における海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度*

梶山 秀樹^{1**}・安倍 大介¹・重信 裕弥¹・藤本 賢¹・
小笠 恒夫¹・中田 薫²・森田 貴己²・渡邊 朝生¹

要 旨

東京電力福島第一原子力発電所 (以下 Fukushima dai-ichi Nuclear Power Plant を略し FNPP と表記) 事故に伴い海洋環境へ放出された放射性セシウムのうち、 ^{134}Cs および ^{137}Cs の我が国周辺海域における拡散状況を把握するために、2011年4月から2012年11月にかけて、福島県沖を中心とした西部北太平洋、日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海における海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を測定した。FNPP の面する西部北太平洋においては FNPP 事故直後より高濃度の ^{134}Cs および ^{137}Cs が検出され、時間の経過とともに ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度は低下する傾向を示した。しかしながらその水平・鉛直分布は不均一であり、その分布形成の主たる成因は福島県沖を中心とした日本東方沖の西部北太平洋における黒潮、親潮および中規模渦による複雑な水塊構造が考えられた。一方、日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海にて採取した海水からは FNPP 事故以前から存在する ^{137}Cs のみが検出され、 ^{134}Cs は検出されず、当該事故によるこれらの海域への ^{134}Cs および ^{137}Cs の負荷は極めて微量であったと考えられる。

キーワード：東京電力福島第一原子力発電所、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比、西部北太平洋

1. はじめに

2011年3月11日に発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震ならびにそれに伴う津波により東京電力福島第一原子力発電所 (以下 Fukushima dai-ichi Nuclear Power Plant を略し FNPP と表記) で運転中であった3基の原子力プラントで燃料溶融を伴う事故が発生し、大量の放射性物質が大气および海洋へ放出された。海洋への放射性物質の放出は北半球全域に及んだ大气経由のフォールアウトに加え、FNPP 敷地内からの直接流出によるものであり、比較的長半減期である放射性セシウムのうち、 ^{134}Cs および ^{137}Cs の北太平洋への総放

* 2014年2月3日受領; 2014年3月10日受理

著作権：日本海洋学会, 2014

1 独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所海洋・生態系研究センター

〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4

2 独立行政法人水産総合研究センター本部

〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3

クイーンズタワー B15階

** 連絡著者：梶山 秀樹

TEL: 045-788-7654 FAX: 045-788-5001

e-mail: kaeriyama@affrc.go.jp

出量は10-20 PBqと推定されている(例えば Kawamura *et al.*, 2011; Kobayashi *et al.*, 2013; Povinec *et al.*, 2013a)。海洋に放出された放射性物質は最終的に海産生物を摂取することにより人体の被ばく線量に影響を与えることが危惧される。そのため、海洋における放射性物質の拡散状況、海産生物への移行を把握することが重要である(Yoshida and Kanda, 2012)。FNPP事故直後より海水、海底堆積物、水産物の放射性ヨウ素(^{131}I)、 ^{134}Cs および ^{137}Cs のモニタリングが開始され、 ^{131}I は半減期が8日と短いため、2011年5月以降検出されていないが半減期が2.1年、30.7年と比較的長い ^{134}Cs および ^{137}Cs は海水、海底堆積物、水産物のいずれにおいても継続して検出されている。特に水産物については、FNPP事故から3年が経過した現在でも福島県およびその周辺の海域では水産物の出荷制限ならびに自主的な操業自粛が行われており、水産業の復興に多大な影響を与えている。また、北太平洋の表層における ^{134}Cs および ^{137}Cs の広域拡散状況(Aoyama *et al.*, 2013a,b; Buesseler *et al.*, 2012; Honda *et al.*, 2012; Kaeriyama *et al.*, 2013; Kamenik *et al.*, 2013)、福島県沖合を中心に東日本沖沿岸域における海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の時系列変動(Aoyama *et al.*, 2012; Inoue *et al.*, 2012a, b; Kofuji and Inoue, 2013; Oikawa *et al.*, 2013)、福島県沖合の大陸棚を中心に海底堆積物の ^{134}Cs および ^{137}Cs の水平、鉛直分布、時系列変動(安倍ら, 2012; Otsuka and Kobayashi, 2013; Kusakabe *et al.*, 2013; Blair *et al.*, 2013)、魚類をはじめとする各種海産生物における ^{134}Cs および ^{137}Cs の時系列変動(Buesseler 2012; Wada *et al.*, 2013)などがデータの蓄積とともに公表されてきた。しかしながらFNPPは北太平洋に面しているため、FNPP事故後の放射能モニタリング調査は福島県沖合を中心に西部北太平洋を対象としたものが多く、日本海や東シナ海におけるFNPP事故の影響を評価した知見は断片的である。例えば、Inoue *et al.* (2012b)は2011年6月から2012年2月にかけて、日本海およびオホーツク海の表層海水について ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を報告しており、FNPP事故に起因する大気フォールアウト経由で極低濃度の ^{134}Cs ($< 0.1 \sim 1 \text{ mBq L}^{-1}$) が認められた。Wu *et al.* (2012)は東シナ海、南シナ海および黄海において2011年4月から6月にかけての ^{137}Cs 濃度を報告してお

り、その平均値は 1.1 Bq m^{-3} であった。彼らは東シナ海におけるFNPP事故の影響はチェルノブイリ事故に比べ軽微であったと結論づけている。さらに、Kim *et al.* (2012)は2011年3月から7月にかけて採取された韓国周辺海域における海水および海産生物の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を報告しており、いずれの試料からもFNPP事故由来である ^{134}Cs は検出されていない。一方で、FNPP事故の海洋生態系への影響を把握する上で重要な情報であるFNPPからの放出量の逆推定、あるいは今後の拡散状況を推定するためのシミュレーションモデルの精度向上に欠かすことのできない事故後半年程度の西部北太平洋における海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の実測値は未だ限定的である(Masumoto *et al.*, 2012)。

本研究では(独)水産総合研究センターの調査船を中心に、事故直後の2011年4月から2012年11月にかけて我が国周辺海域である西部北太平洋を中心に、既往知見の限られる日本海、東シナ海に加え、FNPP事故後の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度について報告のない、瀬戸内海およびベーリング海で採取した海水試料の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を報告し、FNPP事故後のこれらの海域における ^{134}Cs および ^{137}Cs の分布状況について議論する。

2. 材料および方法

2.1 試料採取

海水試料は2011年4月～2012年11月の期間に日本周辺海域を対象に、北海道東方の親潮海域～房総半島南部の太平洋沿岸、日本海、瀬戸内海、東シナ海ならびにオホーツク海において採取した(Fig. 1)。試料の採取は(独)水産総合研究センター調査船(北光丸, 若鷹丸, 蒼鷹丸, たか丸, みずほ丸, しらふじ丸, 洋光丸)、水産庁調査船照洋丸および北海道教育庁実習船北鳳丸にて実施した。試料はバケツによる表面海水あるいは、ポンプ汲み上げによる表層海水を主に採取したが、一部の航海ではCTD-RMSによる鉛直採水、バンドーン採水器による近底層の採水を実施した。採取した試料の多くはろ過を行わず、20 L容ポリテナーに直接収容し、濃塩酸100 mLあるいは濃硝酸40 mLを添加しpHを約1.0あるいは約1.6に調整した。ただし、福島県南部～千葉県

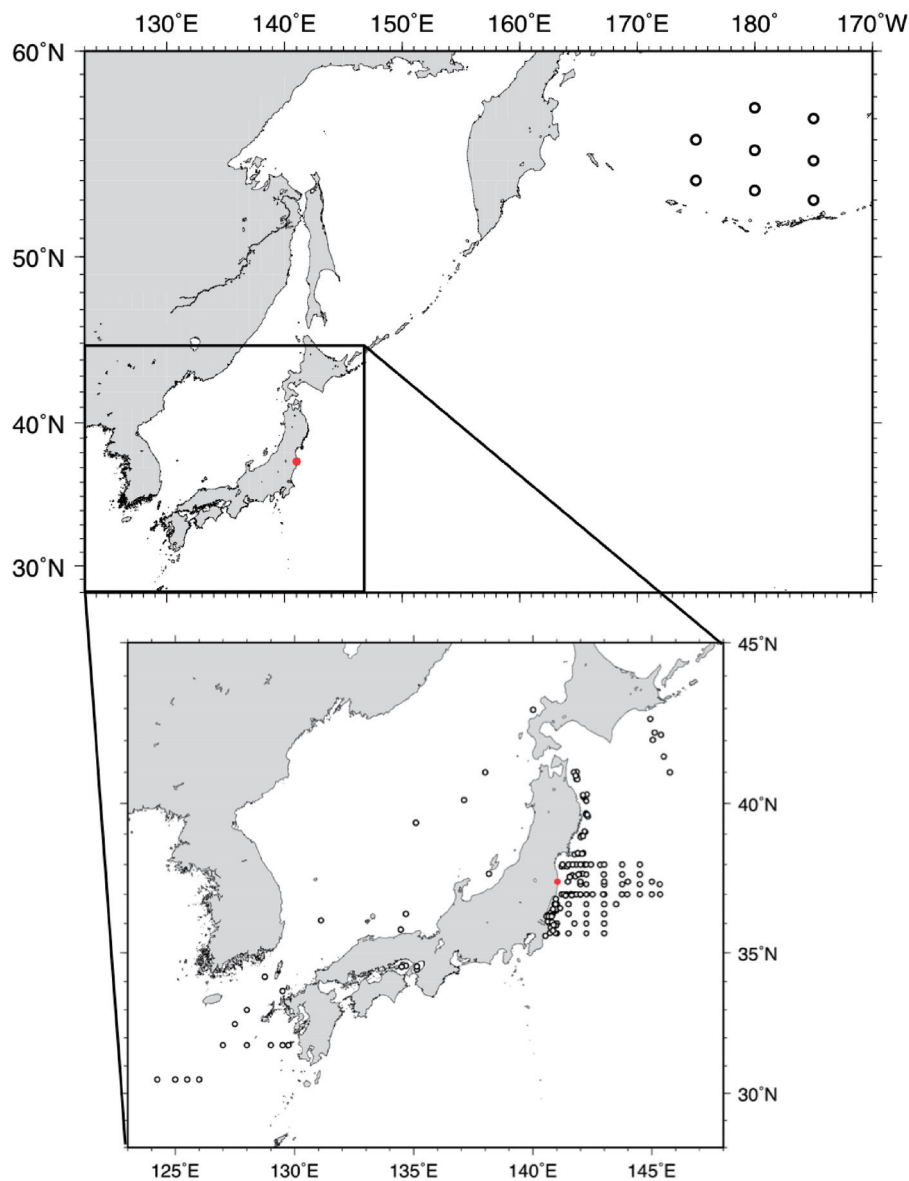


Fig. 1. Study area with sampling locations represented as open circles. Closed red circle in the inset indicates the position of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant.

沖の水深 100 m 以浅の地点で採取した試料は懸濁物質の影響が懸念されたため、濃硝酸添加前に孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過を行った。なお、FNPP 事故以降の西部北太平洋における海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度はろ過の有無により差が認められないことが報告されており (Honda *et al.*, 2012; Buesseller *et al.*, 2012), 本研究で得られた未ろ過海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度は

文献値と比較することができると考えられる。

2.2 ^{134}Cs および ^{137}Cs 分析

海水試料は Aoyama *et al.* (2000), Aoyama and Hirose (2008) などを参考にリンモリブデン酸アンモニウム (以下 AMP) 共沈法によりセシウムを AMP に吸着し、

ゲルマニウム半導体検出器で AMP を測定することにより ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を決定した (Kaeriyama *et al.*, 2013)。本手法による重量回収率は 95% 以上であった。なお、本研究では化学収率は 100% を仮定した。また、ゲルマニウム半導体検出器による試料の測定時間は 7200 秒～85000 秒である。 ^{134}Cs および ^{137}Cs の濃度計算は文部科学省放射能測定法シリーズ 7 に従いコベル法により計算し、試料採取日に減衰補正した。 ^{137}Cs の対象ピークは 662 keV とし、 ^{134}Cs の対象ピークは分岐比の高い 605 keV および 796 keV とした。なお、 ^{134}Cs 濃度は 2 エネルギー領域の加重平均値として求めた。各対象ピークの計数誤差の 3 倍 (3σ) を検出限界とし対象ピークの計数が 3σ 以下の試料は不検出とした。検出下限値は 7200 秒の測定で約 5.0 mBq kg⁻¹, 85000 秒の測定で約 1.4 mBq kg⁻¹ であった。85000 秒の測定による ^{137}Cs の検出下限値は FNPP 事故以前における日本周辺海域の表面海水の ^{137}Cs 濃度 (1–2 mBq kg⁻¹; 例えば及川ら, 2013) と同程度であり、FNPP 事故の影響の有無

を検証できる濃度である。また、 ^{134}Cs のサム効果補正は既知濃度の ^{134}Cs 溶液を数段階に希釈し直接測定を行うことで補正係数を求めた (検出器により 1.05～1.32 の範囲)。なお、FNPP 事故直後の 2011 年 4 月の試料は 2 L 容マリネリ容器に海水試料を充填し、ゲルマニウム半導体検出器による 7200 秒の測定に供した。マリネリ容器での測定における ^{137}Cs の検出下限値は 123–285 mBq kg⁻¹ の範囲であった。また、マリネリ容器での測定結果については ^{134}Cs のサム効果補正を行っておらず、他の測定結果との比較は困難であり、参考値として示す。

3. 結果

3.1 西部北太平洋

3.1.1 北海道南東沖海域

2011 年 6 月の表層海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度は 12

Table 1. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected off the coast of Hokkaido. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on the sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
A4	42°15.0'N	145°07.5'E	2011/6/8	5	15 ± 3.0	14 ± 3.9
A4	42°15.0'N	145°07.5'E	2011/7/16	5	27 ± 3.8	33 ± 5.4
				150	< 7.1	< 9.7
				300	< 7.7	< 9.3
				5	2.7 ± 0.52	4.2 ± 0.66
A4	42°15.0'N	145°07.5'E	2012/5/9	50	< 4.9	< 5.2
				100	< 4.5	< 6.8
				300	< 4.6	< 6.0
				500	< 4.6	< 5.6
				5	< 9.2	12 ± 3.6
A7	41°30.0'N	145°30.0'E	2011/6/9	5	20 ± 3.7	16 ± 4.2
A9	41°00'.0'N	145°45.0'E	2011/6/9	5	2.4 ± 0.46	4.0 ± 0.56
S1	42°41.0'N	144°56.0'E	2011/9/7	5	< 1.3	2.9 ± 0.49
				100	2.1 ± 0.48	2.5 ± 0.49
				200	60 ± 3.4	69 ± 4.2
S2	42°11.0'N	145°23.0'E	2011/9/7	5	53 ± 3.2	69 ± 4.3
				100	51 ± 3.1	51 ± 3.7
				200	34 ± 2.6	42 ± 3.4
S3	42°01.3'N	145°02.6'E	2011/9/8	5	15 ± 1.9	18 ± 2.4
				100	15 ± 2.0	21 ± 2.6
				200		

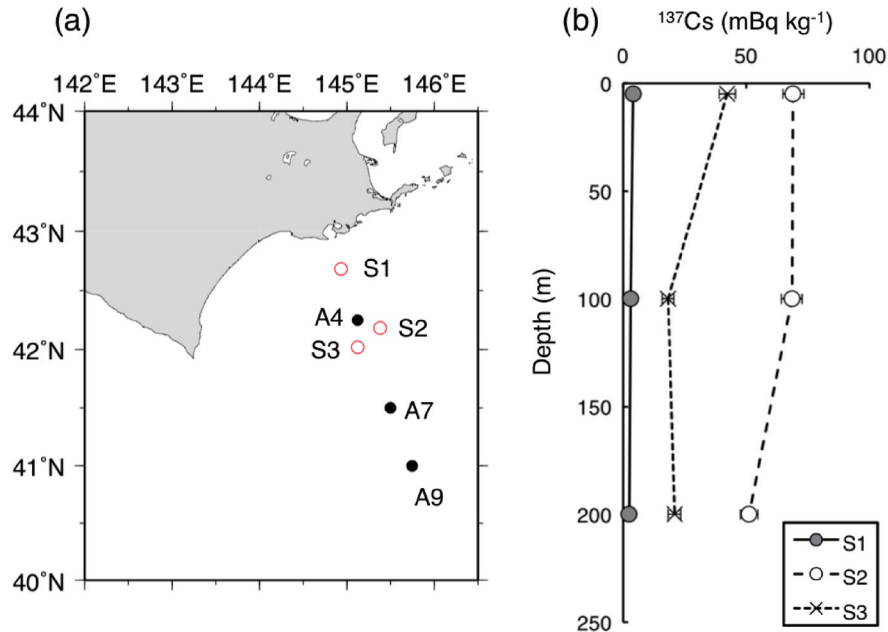


Fig. 2. (a) Sampling locations off the coast of Hokkaido. (b) Vertical profiles of ^{137}Cs obtained from three sampling stations in September 2011.

～20 mBq kg⁻¹の範囲にあったが、A7において ^{134}Cs が検出限界未満 (< 9.2 mBq kg⁻¹)であった (Table 1)。A4における2011年7月の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度は表層で 27 ± 3.8 mBq kg⁻¹および 33 ± 5.4 mBq kg⁻¹と6月 (15 ± 3.0 mBq kg⁻¹および 14 ± 3.9 mBq kg⁻¹)に比べ上昇したが、2012年5月には 4.2 ± 0.66 mBq kg⁻¹および 2.7 ± 0.52 mBq kg⁻¹に低下した。2011年9月に採取した3地点 (S1, S2およびS3)では深度200mまでほぼ一様な分布を示し、沖合の地点 (S2およびS3)で ^{137}Cs 濃度が18–69 mBq kg⁻¹と岸寄りのS1の2.5–4.0 mBq kg⁻¹よりも高い値を示した (Fig. 2)。

3.1.2 東北地方－房総半島沖海域の水平分布

東北地方沖から房総半島沖の海域では、2011年4月より調査を開始した。2011年4月の試料については上述のAMP共沈法を適用せず、2Lマリネリ容器での直接測定を行ったため、 ^{137}Cs の検出下限値が123–285 mBq kg⁻¹と他の分析値よりも高い。そのため多くの試料で ^{134}Cs および ^{137}Cs は不検出であったが、3地点において ^{134}Cs および ^{137}Cs が検出され、その濃度は ^{137}Cs で279–

443 mBq kg⁻¹であった (Table 2)。2011年5月に採取した試料は7kgの試料をAMP共沈法によりセシウムを吸着し測定することにより検出下限値を9.0 mBq kg⁻¹以下の条件で測定した。その結果145°20'E以西の36°20'N–38°00'Nの海域において ^{134}Cs および ^{137}Cs を検出した (Fig. 3およびTable 3)。FNPP北側の143°00'E以西において ^{137}Cs 濃度が200 mBq kg⁻¹以上の分布が確認された。2011年10月～11月および2012年4月に青森県～茨城県沖において採取した表層海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度をTable 4に示す。2011年10月～11月の ^{137}Cs は4.8–67 mBq kg⁻¹の範囲にあり、39°N以北で濃度が低い傾向にあった。2012年4月の福島県北部海域における ^{137}Cs は3.0–19 mBq kg⁻¹であり沖合になるほど低濃度であった。また、F250における2011年11月および2012年4月の結果を比較すると54 mBq kg⁻¹から3.0 mBq kg⁻¹まで ^{137}Cs 濃度の低下が認められた。

3.1.3 東北地方－房総半島沖海域の鉛直分布

2011年11月にFNPPの北側37°25'Nおよび南側37°00'Nに東西方向の測線を設け、最大深度500mまでの

Table 2. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the western North Pacific in April 2011. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on the sampling date. The water sample collected in April 2011 was measured directly with a 2 L Marinelli beaker; the detection limit in this table is higher than those of other samples.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
A450	41°00.0'N	141°43.4'E	2011/4/15	5	< 87	< 144
A150	40°46.7'N	141°52.2'E	2011/4/15	5	< 84	< 153
A250	40°53.9'N	141°48.1'E	2011/4/15	5	< 99	< 156
B150	40°16.6'N	142°05.9'E	2011/4/16	5	< 96	< 165
B350	40°04.7'N	142°15.3'E	2011/4/16	5	< 84	< 156
C250	39°38.4'N	142°13.5'E	2011/4/17	5	< 96	< 165
C450	39°38.1'N	142°17.3'E	2011/4/17	5	< 84	< 156
D250	38°54.2'N	142°00.6'E	2011/4/18	5	< 126	< 207
D350	38°56.0'N	142°05.8'E	2011/4/18	5	< 93	< 123
D450	39°05.4'N	142°10.4'E	2011/4/18	5	< 114	< 174
E250	38°22.6'N	141°53.5'E	2011/4/19	5	< 102	< 165
E450	38°21.1'N	142°04.1'E	2011/4/19	5	< 114	< 192
F150	37°34.4'N	141°32.6'E	2011/4/21	5	< 93	< 132
				25	< 108	< 165
				50	< 87	< 150
F350	37°35.9'N	141°47.1'E	2011/4/21	5	< 89	< 252
				25	< 93	< 147
				50	< 93	< 102
F450	37°40.6'N	141°56.9'E	2011/4/21	5	< 93	< 147
				20	< 87	< 168
H150	36°29.1'N	140°57.6'E	2011/4/22	5	< 102	< 180
H250	36°28.6'N	140°56.2'E	2011/4/22	5	< 78	< 126
H350	36°27.2'N	140°58.9'E	2011/4/22	5	< 90	< 165
H350	36°27.2'N	140°58.9'E	2011/4/22	20	< 96	< 144
H350	36°27.2'N	140°58.9'E	2011/4/22	50	< 105	< 171
MY12	37°59.8'N	141°14.8'E	2011/4/24	5	341 ± 49	398 ± 84
MY13	37°59.8'N	141°29.7'E	2011/4/24	5	178 ± 37	279 ± 66
MY14	37°59.7'N	141°49.6'E	2011/4/24	5	< 123	< 168
MY15	38°00.0'N	142°09.7'E	2011/4/24	5	160 ± 30	< 168
MY16	38°00.2'N	142°29.6'E	2011/4/24	5	< 93	< 189
MY17	37°59.3'N	142°50.1'E	2011/4/24	5	130 ± 34	< 150
MY18	38°00.1'N	143°10.2'E	2011/4/24	5	< 153	< 222
S03	36°59.5'N	141°12.2'E	2011/4/23	5	460 ± 60	443 ± 91
S04	37°00.0'N	141°24.2'E	2011/4/23	5	< 204	< 285
S05	37°00.2'N	141°36.2'E	2011/4/23	5	< 87	< 156
S06	36°59.9'N	141°45.1'E	2011/4/23	5	< 108	< 189
S07	36°59.3'N	142°00.1'E	2011/4/23	5	< 96	< 132
S08	36°59.7'N	142°15.4'E	2011/4/23	5	< 99	< 204
S09	37°00.1'N	142°30.4'E	2011/4/23	5	< 87	< 171

Table 3. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the western North Pacific in May 2011. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
HH01	35°39.9'N	142°59.8'E	2011/5/16	0	< 7.8	< 8.4
HH02	35°40.0'N	142°15.0'E	2011/5/17	0	< 6.7	< 6.9
HH03	35°40.0'N	141°30.0'E	2011/5/17	0	< 7.8	< 10
HH04	35°40.0'N	141°00.0'E	2011/5/17	0	< 9.3	< 11
HH05	36°00.0'N	143°00.0'E	2011/5/16	0	< 7.4	< 9.3
HH06	36°00.0'N	141°00.0'E	2011/5/18	0	< 7.4	< 9.0
HH07	36°00.0'N	141°45.0'E	2011/5/18	0	< 6.3	< 9.6
HH08	36°00.0'N	142°15.0'E	2011/5/18	0	< 7.4	< 9.0
HH09	36°20.0'N	143°00.0'E	2011/5/16	0	< 3.6	< 5.4
HH10	36°20.0'N	142°15.0'E	2011/5/19	0	61 ± 3.6	68 ± 5.0
HH11	36°20.0'N	141°30.0'E	2011/5/19	0	< 7.4	< 6.0
HH12	36°20.0'N	140°50.0'E	2011/5/19	0	14 ± 3.0	9 ± 2.9
HH13	36°40.0'N	141°00.1'E	2011/5/20	0	< 7.5	15 ± 3.9
HH14	36°40.0'N	141°30.0'E	2011/5/20	0	64 ± 4.9	50 ± 6.0
HH15	36°39.9'N	142°14.9'E	2011/5/20	0	620 ± 15	735 ± 22
HH16	36°40.0'N	143°00.0'E	2011/5/20	0	13 ± 3.7	17 ± 4.0
HH17	36°40.0'N	143°30.0'E	2011/5/20	0	< 7.8	< 11
HH18	37°00.0'N	141°50.0'E	2011/5/21	0	365 ± 8.3	445 ± 12
HH19	37°00.0'N	142°14.9'E	2011/5/21	0	278 ± 9.8	319 ± 14
HH20	37°00.0'N	143°00.0'E	2011/5/21	0	1596 ± 23	1841 ± 32
HH21	37°00.0'N	143°44.9'E	2011/5/22	0	< 4.3	< 5.4
HH22	37°00.0'N	144°30.0'E	2011/5/22	0	< 7.4	< 9.0
HH23	36°59.8'N	145°20.3'E	2011/5/22	0	< 3.6	< 3.6
HH24	37°19.9'N	145°20.1'E	2011/5/23	0	12 ± 2.8	11 ± 3.7
HH25	37°20.0'N	144°30.0'E	2011/5/23	0	19 ± 3.4	19 ± 4.4
HH26	37°20.0'N	143°45.0'E	2011/5/23	0	31 ± 3.8	36 ± 5.3
HH27	37°19.8'N	143°00.0'E	2011/5/23	0	125 ± 6.9	136 ± 9.1
HH28	37°20.0'N	142°15.0'E	2011/5/24	0	440 ± 16	424 ± 21
HH29	37°20.0'N	142°00.0'E	2011/5/24	0	275 ± 9.9	265 ± 13
HH30	37°40.0'N	141°55.0'E	2011/5/24	0	309 ± 11	354 ± 15
HH31	37°40.0'N	142°15.0'E	2011/5/24	0	391 ± 12	422 ± 16
HH32	37°40.0'N	142°59.2'E	2011/5/24	0	451 ± 14	440 ± 17
HH33	37°40.0'N	143°45.0'E	2011/5/25	0	< 7.8	< 7.5
HH34	37°40.0'N	144°30.0'E	2011/5/25	0	343 ± 12	350 ± 15
HH35	38°00.0'N	144°30.0'E	2011/5/25	0	< 7.4	< 9.0
HH36	38°00.1'N	143°45.0'E	2011/5/25	0	314 ± 7.7	393 ± 11
HH37	38°00.0'N	143°00.0'E	2011/5/26	0	441 ± 12	493 ± 17
HH38	38°00.0'N	142°15.0'E	2011/5/26	0	936 ± 13	1120 ± 19
HH39	38°00.0'N	142°00.0'E	2011/5/26	0	514 ± 14	550 ± 18
HH40	37°59.9'N	141°39.8'E	2011/5/26	0	178 ± 8.7	192 ± 11

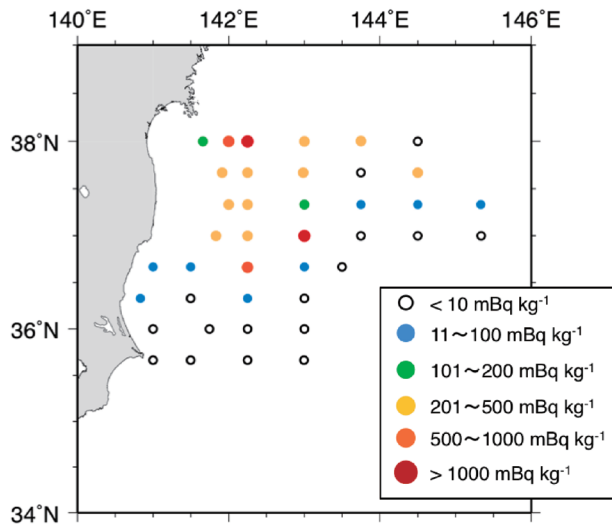


Fig. 3. Surface seawater sampling locations in May 2011. Closed and open circles indicate sampling locations. Colors of the closed and open circles indicate the concentrations of ^{137}Cs .

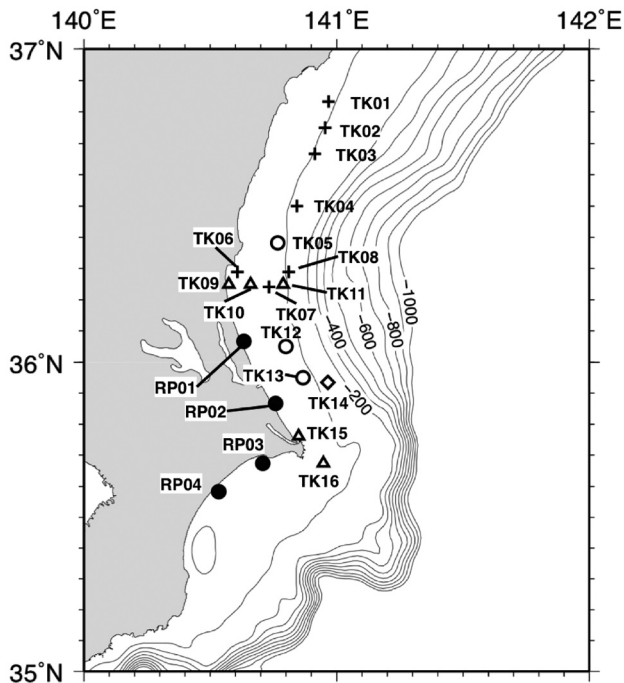


Fig. 5. Seawater sampling locations in September and October 2011 (closed circle), November 2011 (open diamond), February 2012 (open circle), May 2012 (cross), and July 2012 (open triangle).

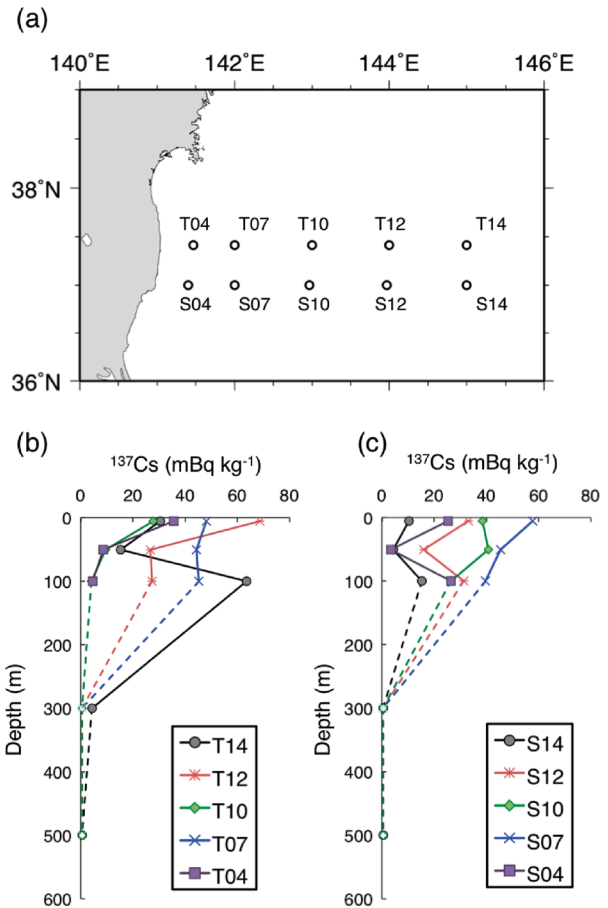


Fig. 4. (a) Seawater sampling locations in November 2011. (b) and (c) Vertical distribution of ^{137}Cs at each sampling station. Open symbols with dashed lines indicate values under the detection limit (3σ), which were then plotted.

鉛直採水を行った (Fig. 4 および Table 5)。FNPP の南北で ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度に明瞭な違いは認められなかった。また、いずれの地点においても深度 300m 以深で ^{134}Cs および ^{137}Cs は検出されず、表層で高濃度となる傾向が伺えた。しかしながら深度 100 m にピークが認められる地点 (T14, S14, S12 および S04) の存在、 ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高低に東西トレンドが認められないなど、その分布は複雑であった。一方、 $36^{\circ}50'N$ 以南の茨城県沖合を中心に房総半島の南側までの海域において、2011 年 9 月から 2012 年 7 月にかけて試料を採取した (Fig. 5 および Table 6)。なお、当該海域における

Table 4. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the western North Pacific during October 2011 and April 2012. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
A150	40°47.6'N	141°49.5'E	2011/10/12	5	< 4.4	< 5.1
A250	40°51.8'N	141°50.6'E	2011/10/12	5	< 3.0	< 4.1
A550	41°00.8'N	141°50.1'E	2011/10/13	5	< 3.2	< 4.8
B150	40°13.6'N	142°07.2'E	2011/10/10	5	< 4.0	6.0 ± 1.7
B250	40°06.7'N	142°13.2'E	2011/10/10	5	< 2.7	< 4.3
B550	40°17.6'N	142°16.4'E	2011/10/17	5	6.9 ± 1.4	8.1 ± 1.6
C250	39°40.2'N	142°14.3'E	2011/10/8	5	25 ± 2.3	29 ± 3.1
C550	39°34.4'N	142°18.5'E	2011/10/8	5	< 3.5	< 3.8
D250	38°56.6'N	142°01.5'E	2011/10/26	5	< 3.7	4.8 ± 1.6
D550	39°03.9'N	142°12.8'E	2011/10/19	5	< 3.4	< 4.1
E150	38°20.1'N	141°44.5'E	2011/10/27	5	33 ± 2.4	36 ± 3.2
E250	38°21.2'N	141°54.1'E	2011/10/27	5	43 ± 2.9	47 ± 3.9
E550	38°22.6'N	142°07.3'E	2011/10/29	5	53 ± 3.1	67 ± 4.5
F150	37°35.3'N	141°33.2'E	2011/10/31	5	11 ± 1.8	14 ± 2.5
F250	37°38.0'N	141°39.0'E	2011/10/31	5	42 ± 3.0	54 ± 4.2
G150	36°59.8'N	141°17.5'E	2011/11/3	5	19 ± 2.2	22 ± 3.1
G250	36°57.1'N	141°22.8'E	2011/11/3	5	39 ± 2.6	44 ± 3.6
G550	36°58.2'N	141°38.0'E	2011/11/8	5	31 ± 2.5	38 ± 3.6
F550	37°41.0'N	142°04.7'E	2011/11/14	5	6.8 ± 1.4	12 ± 2.0
H150	36°29.9'N	140°57.1'E	2011/11/16	5	27 ± 2.3	35 ± 3.4
H250	36°30.0'N	140°58.9'E	2011/11/16	5	10 ± 1.6	15 ± 2.3
H550	36°31.8'N	141°08.7'E	2011/11/17	5	15 ± 1.7	24 ± 2.6
F1	37°56.0'N	141°12.2'E	2012/4/21	5	11 ± 1.6	19 ± 2.5
F3	37°56.8'N	141°17.9'E	2012/4/21	5	8.0 ± 1.3	11 ± 1.9
F6	37°55.9'N	141°26.7'E	2012/4/21	5	< 3.5	5.4 ± 1.5
F250	37°38.0'N	141°39.0'E	2012/4/19	5	1.6 ± 0.36	3.3 ± 0.48

試料採取地点は水深が浅く、懸濁物質の量が多かったため、海水試料を孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過し懸濁物質を除去している。2011年9月および10月に鹿島灘および九十九里浜沖の水深10m程度の4地点で採取した海水試料からは $57\text{--}215\text{ mBq kg}^{-1}$ の ^{137}Cs が検出され、同一地点における深度による違いは認められず、犬吠埼を境に北の2地点で $94\text{--}215\text{ mBq kg}^{-1}$ と南の2地点の $57\text{--}80\text{ mBq kg}^{-1}$ に比べ高濃度であった。なお、2011年11月に鹿島灘の沖合では ^{137}Cs が 21 mBq kg^{-1} であり、2011年9月および10月の結果に比べ低濃度であった。2012年2月に $35^{\circ}57'\text{N}\text{--}36^{\circ}23'\text{N}$ の範囲において採取した表面海水からは $6.0\text{--}8.8\text{ mBq kg}^{-1}$ の

^{137}Cs が検出された。2012年5月には $36^{\circ}30'\text{N}\text{--}36^{\circ}50'\text{N}$ の水深約100mの4地点(TK01-04)、および那珂川河口の岸沖方向に3地点(TK06-08)において表面および近底層より採水した。TK01-TK04における ^{137}Cs は $21\text{--}112\text{ mBq kg}^{-1}$ の範囲にあり、近底層よりも表面海水で高濃度の傾向にあったものの、南北における濃度の高低に傾向は認められず、2011年11月の表層海水の結果と同程度か、もしくは濃度が高い傾向にあった。一方、TK06-08においては、岸側の地点で ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度が高い傾向にあった。しかしながら、那珂川河口において2012年7月に採取した試料では、岸沖方向の濃度差が不明瞭であり、2012年5月の結果に比べ低濃度

Table. 5. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the western North Pacific in November 2011. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
T14	37°25.0'N	145°00.0'E	2011/11/9	5	18 ± 1.6	30 ± 2.8
				50	8.4 ± 1.3	15 ± 2.2
				100	40 ± 2.3	64 ± 4.0
				300	< 2.6	4 ± 1.1
				500	< 2.6	< 3.7
T12	37°25.0'N	144°00.0'E	2011/11/9	5	43 ± 2.4	69 ± 4.3
				50	14 ± 1.6	27 ± 2.8
				100	20 ± 1.7	27 ± 2.9
				300	< 3.0	< 3.4
				500	< 2.8	< 4.0
T10	37°25.0'N	143°00.0'E	2011/11/10	5	20 ± 1.7	28 ± 2.8
				50	7.4 ± 1.1	9.5 ± 1.9
				100	2.6 ± 0.8	4.1 ± 1.3
				300	< 3.3	< 3.8
				500	< 3.0	< 4.6
T07	37°25.0'N	142°00.0'E	2011/11/10	5	39 ± 2.3	48 ± 3.6
				50	26 ± 2.0	44 ± 3.5
				100	29 ± 2.0	45 ± 3.5
				300	< 2.8	< 3.8
				500	< 2.8	< 3.8
T04	37°25.0'N	141°28.0'E	2011/11/10	5	29 ± 2.2	36 ± 3.3
				50	8.4 ± 1.3	8.5 ± 1.8
				100	1.9 ± 0.3	4.5 ± 0.54
S04	37°00.0'N	141°24.0'E	2011/11/11	5	14 ± 1.6	25 ± 2.8
				50	3.0 ± 0.5	3.4 ± 0.61
				100	15 ± 1.7	26 ± 3.0
S07	37°00.0'N	142°00.0'E	2011/11/11	5	36 ± 2.2	58 ± 4.0
				50	34 ± 2.2	45 ± 3.6
				100	23 ± 1.9	40 ± 3.5
				300	< 2.7	< 4.6
				500	< 3.1	< 4.2
S10	37°00.0'N	142°58.0'E	2011/11/11	5	27 ± 2.1	38 ± 3.3
				50	23 ± 1.8	41 ± 3.4
				100	16 ± 1.6	26 ± 2.7
				300	< 3.2	< 4.6
				500	< 3.1	< 4.2
S12	37°00.0'N	143°58.0'E	2011/11/12	5	22 ± 1.8	33 ± 3.1
				50	9.3 ± 1.3	16 ± 2.1
				100	19 ± 1.7	31 ± 3.0
				300	< 3.3	< 4.4
				500	< 3.3	< 4.4
S14	37°00.0'N	145°00.0'E	2011/11/12	5	6.2 ± 1.1	10 ± 1.9
				50	1.9 ± 0.3	4.3 ± 0.57
				100	10 ± 1.4	15 ± 2.5
				300	< 2.6	< 4.1
				500	< 2.8	< 3.8

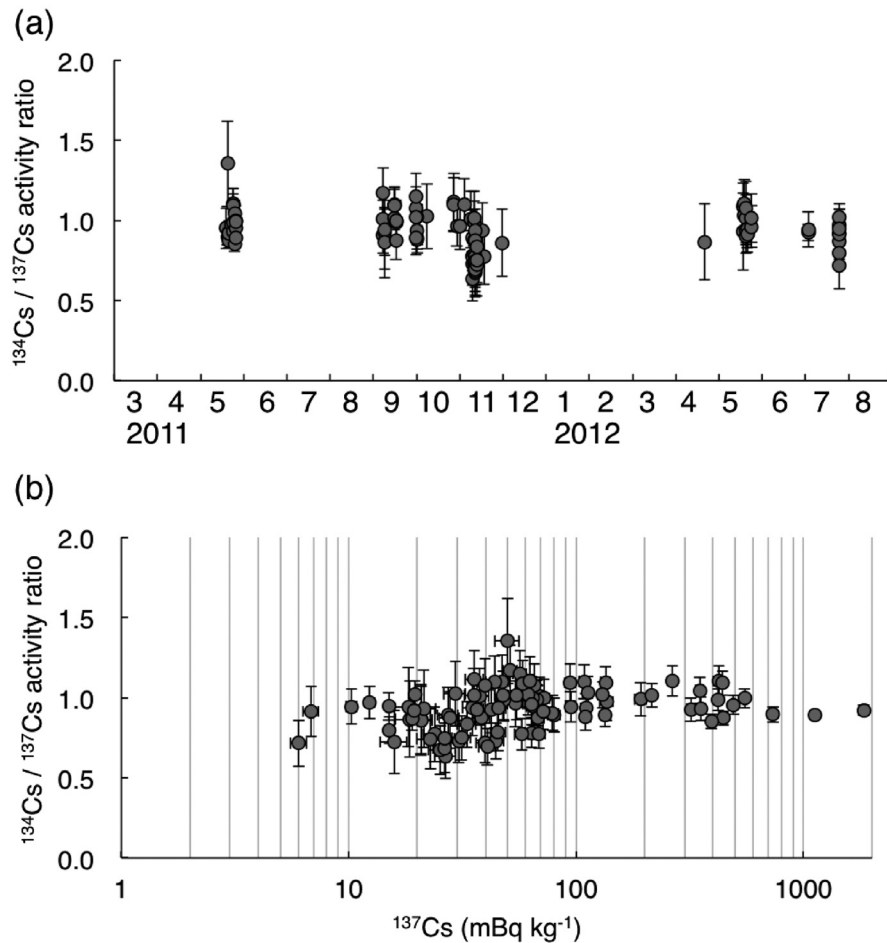


Fig. 6. (a) Relationship between $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio and sampling date. (b) Concentration of ^{137}Cs . The $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio was calculated from decay-corrected data on March 11, 2011.

であった。さらに、2012年7月の房総半島沖では10–37 mBq kg^{-1} の ^{137}Cs が検出されたが、2011年5月の近傍点 (HH04 および HH06) では ^{137}Cs が不検出 ($< 11 \text{ mBq kg}^{-1}$; Fig. 3 および Table 3) であった。

3.2 日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海

日本海、瀬戸内海および東シナ海で2011年に採取した試料の多くは、ガンマ線測定時間を7200秒としたため検出下限値が ^{137}Cs で $\sim 5.0 \text{ mBq kg}^{-1}$ であり、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs とともに不検出の試料が多数を占めた (Table 7, 8 および 9)。日本海において2012年6月から11月に採取

した試料では、2.0–2.4 mBq kg^{-1} の ^{137}Cs を検出したものの、 ^{134}Cs は不検出 ($< 1.1 \text{ mBq kg}^{-1}$) であった (Table 7)。瀬戸内海では播磨灘および大阪湾にて2011年11月および2012年1月に表層海水を採取したところ、2.0 mBq kg^{-1} 以下の ^{137}Cs を検出したものの、 ^{134}Cs は不検出であった (Table 8)。東シナ海においても2012年6月以降に採取した表層海水で1.4–2.4 mBq kg^{-1} の ^{137}Cs を検出したものの、 ^{134}Cs は不検出 ($< 1.1 \text{ mBq kg}^{-1}$) であった (Table 9)。2012年7月から8月に採取したベーリング海の表層海水からは1.8–2.3 mBq kg^{-1} の ^{137}Cs を検出したものの、 ^{134}Cs は検出されなかった (Table 10)。

Table 6. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the western North Pacific during September 2011 and July 2012. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on the sampling date. Water samples presented in this table were passed through a membrane filter (pore size $0.45\mu\text{m}$) before performing the ammonium phosphomolybdate (AMP) procedure, because the sampling location was shallower than that of other locations, and SS were rich in the samples.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
RP01	36°04.0'N	140°38.0'E	2011/9/15	3	126 ± 5.5	135 ± 6.3
				7	186 ± 6.7	215 ± 8.0
RP02	35°52.0'N	140°45.5'E	2011/9/15	3	102 ± 4.7	109 ± 5.5
				7	88 ± 4.4	94 ± 5.2
RP03	35°40.5'N	140°42.5'E	2011/9/16	3	61 ± 3.7	72 ± 4.4
				7	50 ± 3.5	68 ± 4.4
RP04	35°35.0'N	140°32.0'E	2011/9/16	3	56 ± 3.5	67 ± 4.4
				7	54 ± 3.4	64 ± 4.1
RP01	36°04'N	140°37.0'E	2011/10/1	3	112 ± 4.1	131 ± 5.7
				7	100 ± 3.9	134 ± 5.6
RP02	35°52'N	140°45.5'E	2011/10/1	3	87 ± 3.8	110 ± 5.4
				7	82 ± 3.7	110 ± 5.5
RP03	35°40.5'N	140°42.8'E	2011/9/30	3	60 ± 3.5	80 ± 4.9
				7	59 ± 3.4	65 ± 4.4
RP04	35°35.0'N	140°32.0'E	2011/9/30	3	55 ± 3.1	57 ± 4.0
				7	53 ± 3.0	62 ± 4.0
TK14	35°56.1'N	140°57.9'E	2011/11/30	0	14 ± 1.8	21 ± 2.5
TK05	36°23.0'N	140°46.0'E	2012/2/19	0	< 4.3	8.8 ± 1.7
TK12	36°03.0'N	140°48.0'E	2012/2/18	0	5.7 ± 1.4	7.1 ± 2.0
TK13	35°57.0'N	140°52.0'E	2012/2/21	0	< 3.8	6.0 ± 1.9
TK01	36°50.0'N	140°58.1'E	2012/5/21	0	42 ± 2.5	64 ± 4.0
				50	45 ± 2.7	71 ± 4.3
TK02	36°45.0'N	140°57.3'E	2012/5/24	0	42 ± 2.8	64 ± 4.4
				53	33 ± 2.4	48 ± 3.8
TK03	36°40.0'N	140°54.8'E	2012/5/19	0	80 ± 3.9	112 ± 5.8
				52	48 ± 3.1	62 ± 4.4
TK04	36°30'N	140°50.5'E	2012/5/18	0	44 ± 2.9	58 ± 4.0
				52	14 ± 1.8	21 ± 2.8
TK06	36°17.4'N	140°36.5'E	2012/5/20	0	62 ± 3.1	95 ± 4.8
				13	29 ± 2.3	40 ± 3.3
TK07	36°14.5'N	140°44.0'E	2012/5/20	0	49 ± 3.0	79 ± 4.7
				42	12 ± 1.8	21 ± 2.8
TK08	36°17.4'N	140°48.6'E	2012/5/20	0	38 ± 2.8	55 ± 4.1
				101	18 ± 2.0	17 ± 2.6
TK09	36°15.0'N	140°34.4'E	2012/7/25	0	13 ± 0.53	20 ± 0.77
				7	12 ± 0.52	19 ± 0.76
TK10	36°15.0'N	140°39.6'E	2012/7/25	0	4.1 ± 0.39	6.8 ± 0.52
				25	9.2 ± 0.44	15 ± 0.63
TK11	36°15.0'N	140°47.3'E	2012/7/25	0	7.8 ± 0.45	15 ± 0.69
				75	2.8 ± 0.34	6.0 ± 0.47
TK15	35°45.7'N	140°51.0'E	2012/7/25	0	11 ± 0.51	19 ± 0.73
				24	7.8 ± 0.43	12 ± 0.61
TK16	35°40.5'N	140°56.9'E	2012/7/3	0	22 ± 0.63	37 ± 0.97
				53	6.4 ± 0.40	10 ± 0.55

4. 考察

4.1 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比

FNPP 事故により環境へ放出された ^{134}Cs および ^{137}Cs の放射能比は放出当時 (2011 年 3 月から 4 月) で約 1.0 と考えられている (小森ら, 2013)。また, 西部北太平洋において FNPP 事故後に報告された既報の文献値においても, 放出当時に減衰補正した ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を用いた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は約 1.0 と報告されている (例えば Buessler *et al.*, 2012; Kaeriyama *et al.*, 2013; Honda *et al.*, 2012)。本研究では 249 検体の海水試料の分析を行い, 北海道南東沖から房総半島沖の西部北太平洋にて採取した 134 検体から 2 核種 (^{134}Cs および ^{137}Cs) を検出した。さらに, 2011 年 3 月 11 日に減衰補正した両核種の計数誤差が 15% 未満であった試料 95 検体について, $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を求めた (Fig. 6)。このようにして得られた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は, 試料採取日および ^{137}Cs 濃度によらずほぼ一定の値を示しており, 全体平均は 0.93 ± 0.13 ($n=95$) であった。Kaeriyama *et al.* (2013) によると $175^{\circ}30'E$ 以西の西部北太平洋の表面海水における FNPP 事故直後に減衰補正した $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は 2011 年 7 月, 11 月および 2012 年 7 月の期間においてそれぞれ, 0.96 ± 0.10 , 0.90 ± 0.07 および 0.85 ± 0.12 と時間の経過とともに低下することを報告している。特に ^{137}Cs 濃度が 10 mBq kg^{-1} 以下において $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比が低い値であった (Kaeriyama *et al.*, 2013 の Fig. 4 参照)。これは FNPP 事故の影響を受けていない海水, すなわち ^{134}Cs が存在せず, 数 mBq kg^{-1} の ^{137}Cs が存在する海水と FNPP 事故により $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比が 1.0 の海水の混合効果を示していると考察している。本研究で得られた 2011 年 3 月 11 日に減衰補正した $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比が時間とともに変化しないことは, FNPP 事故の影響を受けていない海水による混合効果が, 外洋域に比べ小さいことを示していると考えられる。なお, Kaeriyama *et al.* (2013) で示唆された, 海水の混合に伴う ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の低下と $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の関係は ^{137}Cs 濃度が 10 mBq kg^{-1} 以下において顕著であったが, 本研究で得られた

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比のうち, ^{137}Cs 濃度が 10 mBq kg^{-1} 以下における値は 95 検体中 2 検体と限定的であったため, $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の変動が外洋域に比べ小さかったと考えられる。今後も福島県沖を中心にモニタリングを継続するとともに, 移流, 拡散に伴う FNPP 由来の ^{134}Cs および ^{137}Cs の混合割合を正確に把握することが重要であろう。そのためには供試料を増やすことや, 測定時間の延長, 天然放射性核種 ^{40}K の除去等の化学分析, 極低バックグラウンドゲルマニウム半導体検出器による測定など, 0.1 mBq kg^{-1} レベルでの ^{134}Cs の定量, および $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の変動を監視する必要がある。

4.2 西部北太平洋における ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の時系列変動

福島県沖を中心とした西部北太平洋では FNPP 事故以前に比べ高濃度の ^{137}Cs および ^{134}Cs が確認された。Fig. 7 に Fig. 3 で示した 2011 年 5 月の結果と, Buessler *et al.* (2012) による 2011 年 6 月の西部北太平洋における ^{137}Cs 濃度の水平分布を示す。 37°N 以北においては 2011 年 5 月から 6 月の 1 ヶ月間で ^{137}Cs 濃度の水平分布に明瞭な違いは認められない。一方, 37°N 以南の多くの地点では 2011 年 5 月に 100 mBq kg^{-1} 以下であったのに対し, 2011 年 6 月の $36^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 付近において 500 mBq kg^{-1} 以上の濃度が観測されており, ^{137}Cs 濃度の上昇が認められた。その後, 2011 年 11 月の時点では $10\text{--}40 \text{ mBq kg}^{-1}$ と濃度は低下している (Table 4)。Aoyama *et al.* (2012) は房総半島東端の茨城県波崎市地先における表面海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度について, 2011 年 4 月 25 日から 12 月 5 日までの時系列変動を報告している。波崎市地先における ^{137}Cs は 4 月から 5 月にかけて $50\text{--}100 \text{ Bq m}^{-3}$ であったのに対し, 6 月以降 1000 Bq m^{-3} 以上と高濃度になり, 7 月中旬以降低下している。Aoyama *et al.* (2012) は波崎市地先と FNPP 港湾内で ^{137}Cs 濃度のピーク出現日時に約 2 ヶ月の時間差があることと, いわき市小名浜地先での ^{137}Cs 濃度時系列変動より, 5 月下旬までいわき市沖に確認された高気圧性暖水渦が, 福島県いわき市小名浜から茨城県波崎市沿岸の海域において, ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高い海水の南下を妨げていたと述べている。Fig. 7 に示した 2011 年 5 月および 6 月の 37°N 以南で認められた ^{137}Cs

濃度の水平分布の違いも、Aoyama *et al.* (2012) で示唆された2011年5月30日まで存在した暖水渦による ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高い海水の南下が妨げられていたことを反映していると考えられる。Fig. 8に西部北太平洋における表面海水および表層海水の ^{137}Cs 濃度の時系列変動を、北部(38°N以北)、中部(37°N–38°N)および南部(37°N以南)に分け示す。いずれの海域においても時間の経過とともに ^{137}Cs 濃度は低下する傾向を示し、南部に比べ北部および中部において ^{137}Cs 濃度の低下傾向は顕著であった。FNPP事故直後の2011年5月に北部、中部で ^{137}Cs が高濃度であったのは2011年3月下旬～4月上旬の大気フォールアウトによる海面沈着がFNPPの北東方向に顕著であった点(Kawamura *et al.*, 2011; Kobayashi *et al.*, 2013; Rypina *et al.*, 2013), ならびに先述の暖水渦の存在が影響したと考えられる。なお、2011年5月に37°N以南よりも37°N以北、特にFNPPの北側で ^{137}Cs が高濃度であったことはOikawa *et al.* (2013) でも報告されている。2011年6月以降の ^{137}Cs 濃度の低下が南部よりも北部、中部で明瞭であったのは、暖水渦の消失に伴いFNPP近傍の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高い海水が主に南方向へ輸送され、 ^{134}Cs および ^{137}Cs の混合効果が高まったためと考えられる。更に、北部、中部においては、 ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の低い津軽暖流水の流入による混合効果が考えられる。しかしながら、Kofuji and Inoue (2013) によると、津軽暖水の影響は季節により異なることが示唆される。すなわち、北部三陸沿岸ならびに下北半島において2011年4月から5月の期間、大気経由により上昇した ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度が混合効果により低下した後、2011年7月から8月にかけて再び上昇している(Kofuji and Inoue, 2013)。これは夏季に津軽暖水が青森県東方沖にて、高気圧性渦を形成し、沖合の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高い海水を北部三陸沿岸ならびに下北半島へ輸送したためと考察している。

本研究で得られたFig. 8の西部北太平洋のデータ全体における ^{137}Cs 濃度の変動と2011年3月11日からの日数の関係をべき関数により以下の式で近似した。

$$y = 1.6 \times 10^4 x^{-1.1} (r^2 = 0.31; n = 88) \quad (1)$$

ここで、 x は2011年3月11日からの日数、 y は ^{137}Cs 濃度(mBq kg⁻¹)を示す。また、37°N以北のデータに

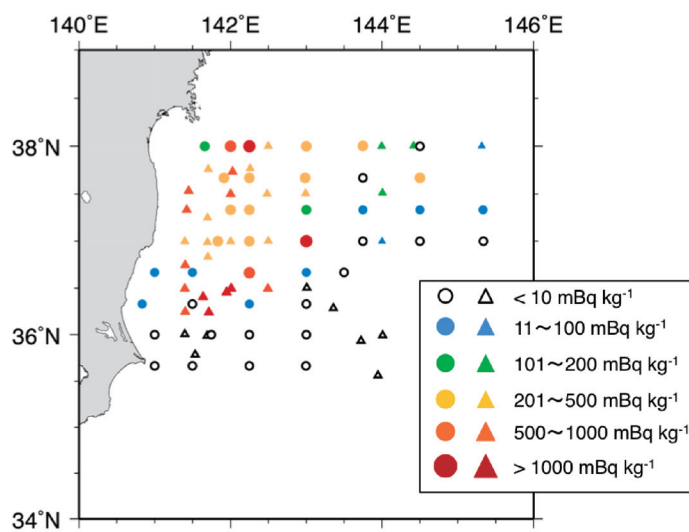


Fig. 7. Sampling locations and ^{137}Cs concentration in May (circle) and June (triangle) 2011. Circles are identical to those shown in Fig. 3. The data of June 2011 were obtained from Buesseler *et al.* (2012). Colors of the closed and open symbols indicate the concentrations of ^{137}Cs .

限定し同様の近似式を求めると以下の式が得られた。

$$y = 3.6 \times 10^5 x^{-1.8} (r^2 = 0.52; n = 54) \quad (2)$$

原子力規制委員会による放射線モニタリングの結果より、2013年5月16日～6月2日の海水の ^{137}Cs 濃度は、1.2～21 mBq L⁻¹、2013年8月11日～26日の調査で1.6～9.9 mBq L⁻¹の範囲であった(http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/8000/7947/24/424_2_0807.pdf, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8241/24/440_1010.pdf) 上記式(1)および(2)から推定される ^{137}Cs 濃度は、2013年5月24日で8.3 mBq kg⁻¹および2.5 mBq kg⁻¹、2013年8月18日で7.5 mBq kg⁻¹および2.1 mBq kg⁻¹であり、放射線モニタリングによる実測値の範囲内にあった。さらに、FNPP事故前の ^{137}Cs 濃度レベルを2.0 mBq kg⁻¹と仮定すると、当該海域全体では式(1)よりFNPP事故から8年でFNPP事故以前の濃度レベルまで低下すると試算される。今後、少なくとも10年スケールでの長期的なモニタリング調査が必要であろう。

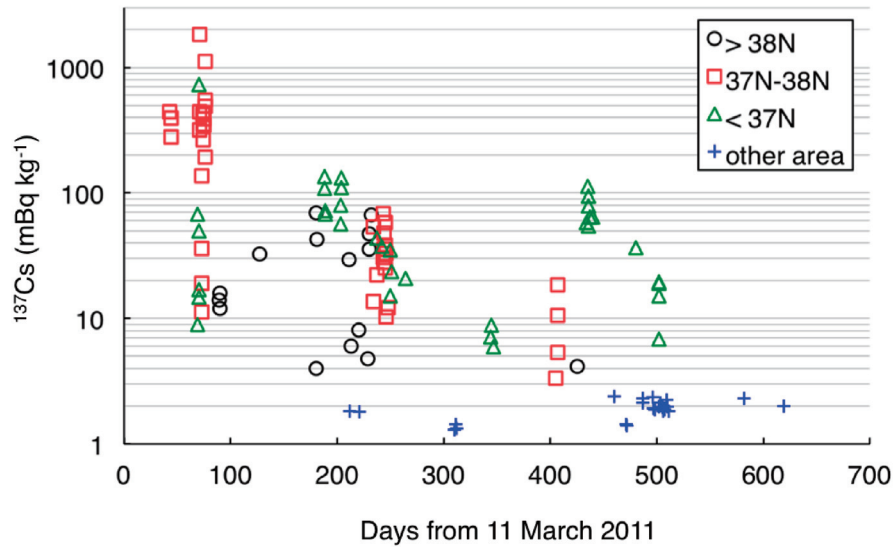


Fig. 8. Temporal variations of ^{137}Cs in the western North Pacific in the area north of 38°N (open circle), 37°N – 38°N (open square), south of 37°N (open triangle), and in other areas, including the Japan Sea, Seto Inland Sea, East China Sea, and Bering sea (cross).

4.3 西部北太平洋における ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の鉛直分布

2011年11月の福島県沖における ^{137}Cs 濃度の鉛直分布では表層にピークを持つ分布と、表層および深度100 mで ^{137}Cs が高濃度となり深度300 mで低濃度あるいは不検出 ($< 4.6 \text{ mBq kg}^{-1}$) となる分布が散見された (Fig. 4 および Table 5)。また、福島県から千葉県沖の水深100 m以浅においては表層と近底層で同程度の ^{137}Cs 濃度が検出された (Table 6)。このような、福島県沖を中心とする海域ではFNPP事故後、表層ではなく亜表層あるいは底層にピークを持つ ^{137}Cs 濃度の鉛直分布がいくつか報告されている。及川ら (2013) は1983年度より継続されている「海洋環境における放射能調査及び総合評価事業」の2011年度までの結果をまとめている。本評価事業は全国の原子力発電所を対象とした、その前面海域における海水、海底土、海産生物の人工放射性核種の長期モニタリング事業である。及川ら (2013) によると、FNPP事故以前の茨城県沖における ^{137}Cs は表層、下層で同じ濃度レベルであったものが、FNPP事故以降に実施された2011年度の調査では表層 ($< 10 \text{ mBq L}^{-1}$) に比べ下層 (87~113 m) で高濃度 (10

-100 mBq L^{-1}) となることを報告している。また、Buessler *et al.* (2012) および Povinec *et al.* (2013b) は2011年6月の福島県沖を中心とした ^{137}Cs 濃度の鉛直分布を報告しており、多くの地点で表層に ^{137}Cs 濃度のピークが認められるものの、いくつかの地点では深度50 m付近の亜表層に ^{137}Cs 濃度のピークを持つ鉛直分布を報告している。更に Oikawa *et al.* (2013) はFNPP事故以降における文部科学省による海域モニタリングのうち、海水の放射性核種濃度の結果をまとめており、2011年5月から12月にかけて、深度200 mまでの下層においてFNPP由来の ^{134}Cs 濃度が上昇したと報告している。彼らは ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の季節変動と、海水の密度の指標となる $\sigma-t$ の関係を精査し、2011年5月から12月の期間、25.5–26.5 $\sigma-t$ の等密度面に沿って 10 mBq L^{-1} 以上の高濃度な ^{134}Cs および ^{137}Cs を含む表層の海水が下層へと輸送されたと考察している。海洋において99%以上が溶解態として存在する ^{134}Cs および ^{137}Cs の分布の成因は、その放出源と水塊構造により決定されると考えられる。福島県沖を中心とする本州東方沖の西部北太平洋は親潮、黒潮、中規模渦などの相互作用により複雑な水塊構造を呈しており、このように複数の水塊が混在し、混ざり合う海域においては、海洋へ放

Table 7. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the Japan Sea. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
JS01	41°00.0'N	138°00.0'E	2011/7/23	5	< 4.5	< 4.0
JS02	39°22.0'N	135°05.3'E	2011/7/24	5	< 2.9	< 5.0
JS03	40°06.5'N	137°06.9'E	2011/7/26	5	< 3.2	< 3.9
JS04	42°58.0'N	140°00.7'E	2011/7/28	5	< 3.8	< 4.1
JS05	36°06.5'N	131°06.4'E	2012/6/13	5	< 1.1	2.4 ± 0.44
JS06	35°48.0'N	134°27.0'E	2012/7/10	5	< 0.92	2.1 ± 0.40
JS07	36°20.0'N	134°40.0'E	2012/7/10	5	< 0.86	2.3 ± 0.39
JS08	37°41.0'N	138°09.8'E	2012/11/19	5	< 0.95	2.0 ± 0.44

Table 8. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the Seto Inland Sea. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
HN01	34°33.0'N	134°40.0'E	2011/10/9	5	< 1.4	1.8 ± 0.52
			2012/1/16	5	< 1.3	1.7 ± 0.36
HN02	34°31.0'N	134°30.0'E	2011/10/10	5	< 2.9	< 3.7
			2012/1/17	5	< 1.2	1.3 ± 0.43
OB01	34°25.0'N	135°08.0'E	2011/10/8	5	< 1.2	< 1.6
			2012/1/15	5	< 1.3	1.3 ± 0.39
OB02	34°32.0'N	135°07.5'E	2011/10/8	5	< 2.9	< 3.8
			2012/1/16	5	< 1.3	1.4 ± 0.39

出された ^{134}Cs および ^{137}Cs の水平・鉛直分布も複雑である。今後、Oikawa *et al.* (2013) が示した海水の密度などの情報と ^{134}Cs および ^{137}Cs の分布様式との関係を精査し、FNPP 事故に起因する放射性セシウムの鉛直方向への拡散状況について更なる整理が必要である。

4.4 日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海への FNPP 事故の影響

日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海にて採取した海水試料から ^{134}Cs は検出されず、いずれの海域においても $\sim 2.4 \text{ mBq kg}^{-1}$ の ^{137}Cs のみが検出された (Tables 7-10 および Fig. 8)。FNPP 事故以前における日本周辺海域ならびに西部北太平洋の表層海水の ^{137}Cs 濃度は $1 \sim 2 \text{ mBq kg}^{-1}$ 程度であり (例えば Inoue *et al.*,

2012b; 及川ら, 2013), 本研究結果と同程度である。そのため本研究結果からは、これらの海域における FNPP 事故に起因する ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の上昇は認められなかったと考えられる。しかしながら、Inoue *et al.* (2012b) は ^{134}Cs および ^{137}Cs の検出下限値が約 0.1 mBq kg^{-1} と極めて高感度な分析を行い、2011 年 6 月の日本海において $1.70\text{--}2.61 \text{ mBq L}^{-1}$ の ^{137}Cs および $0.16\text{--}1.49 \text{ mBq L}^{-1}$ の ^{134}Cs を検出したと報告している。本研究結果では 2012 年 6 月、7 月および 11 月に $2.0\text{--}2.4 \text{ mBq kg}^{-1}$ の ^{137}Cs を検出しており、Inoue *et al.* (2012b) による結果と同程度であった。また、及川ら (2013) によると、日本海に面した北海道、新潟県、石川県ならびに西日本の佐賀県において放射性セシウム濃度 ($^{134+137}\text{Cs}$: β 線測定のため 2 核種合計値) の若干の上昇を確認した

Table 9. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the East China Sea. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
ECS01	31°45.0'N	129°30.0'E	2011/10/15	5	< 3.0	< 3.6
ECS02	31°45.0'N	129°45.0'E	2011/10/16	5	< 3.5	< 4.7
ECS03	30°30.0'N	124°15.0'E	2011/10/18	5	< 1.1	1.8 ± 0.46
ECS04	30°30.0'N	125°30.0'E	2011/10/18	5	< 2.8	< 3.7
ECS05	33°00.0'N	128°00.0'E	2011/10/19	5	< 3.2	< 4.3
ECS06	34°10.0'N	128°45.0'E	2011/10/20	5	< 3.4	< 4.7
ECS07	33°40.0'N	129°30.0'E	2011/10/20	5	< 3.4	< 4.5
ECS08	31°45.0'N	129°00.0'E	2012/6/25	5	< 0.91	1.4 ± 0.41
ECS09	31°45.0'N	127°00.0'E	2012/6/24	5	< 1.1	1.4 ± 0.37
ECS10	30°30.0'N	125°00.0'E	2012/7/19	5	< 1.0	2.4 ± 0.43
ECS11	30°30.0'N	126°00.0'E	2012/7/20	5	< 0.88	1.9 ± 0.42
ECS12	32°30.0'N	127°30.0'E	2012/7/21	5	< 0.98	1.9 ± 0.41
ECS13	31°45.0'N	128°00.0'E	2012/10/13	5	< 0.89	2.3 ± 0.43

Table 10. Activities of ^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater samples collected from the Bering Sea. The analytical error is based on 1σ of the counting statistics. When the radioactivity was not detected, the detection limit (3σ) was presented. Activities were decay corrected on sampling date.

Station	Latitude	Longitude	Sampling date	Depth (m)	Concentration(mBq/kg)	
					^{134}Cs	^{137}Cs
BS01	56°00.0'N	175°00.0'E	2012/7/25	5	< 1.0	2.0 ± 0.38
BS02	54°00.0'N	175°00.0'E	2012/7/26	5	< 0.88	2.1 ± 0.38
BS03	53°30.0'N	180°00.0'	2012/7/28	5	< 0.91	2.0 ± 0.42
BS04	55°30.0'N	180°00.0'	2012/7/29	5	< 0.91	1.8 ± 0.37
BS05	57°30.0'N	180°00.0'	2012/7/30	5	< 1.0	1.9 ± 0.43
BS06	57°00.0'N	175°00.0'W	2012/8/1	5	< 0.9	2.3 ± 0.42
BS07	55°00.0'N	175°00.0'W	2012/8/2	5	< 1.0	2.0 ± 0.41
BS08	53°00.0'N	175°00.0'W	2012/8/3	5	< 1.0	1.8 ± 0.42

とされ、これらは FNPP 事故に伴う大気経路であったと考察している。一方で、日本海に面した福井県、西日本の島根県、鹿児島県および愛媛県では FNPP 由来と考えられる ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の上昇は確認されなかったと述べている。さらに、FNPP から大気経路による ^{134}Cs および ^{137}Cs の海面沈着量を推定したモデルの結果からも、その沈着量は西部北太平洋に圧倒的であり、他の海域における沈着量は極めて微量であったことが推定されている (Kobayashi *et al.*, 2013 の Fig. 5 参照)。以上のことより日本海、西日本の海域、東シナ海

およびベーリング海において、大気経路によると考えられる FNPP 由来の ^{134}Cs および ^{137}Cs の降下は極微量で、かつ局所的であったと考えられる。

5. 結論

2011 年 4 月から 2012 年 11 月の期間に福島県沖西部北太平洋を中心に、日本海、瀬戸内海、東シナ海およびベーリング海における海水中の ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度を測定した。西部北太平洋においては 2011 年 5 月以降、

FNPP 事故前に比べ 2 桁以上の ^{137}Cs 濃度の上昇および ^{134}Cs の検出が観測されたが、時間の経過とともにその濃度は低下傾向を示した。また、いわき市沖に 2011 年 5 月末まで存在した暖水渦により、FNPP 事故直後の極めて ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の高い海水の南下は制限されていたこと、水塊構造の複雑さに伴う ^{134}Cs および ^{137}Cs の複雑な鉛直分布構造などが示唆された。一方、日本海、東シナ海、瀬戸内海およびベーリング海において ^{134}Cs は検出されず、顕著な ^{137}Cs 濃度の上昇も確認されなかった。本研究で適用した測定手法ではこれらの海域における FNPP 事故に伴う ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度の上昇は確認されなかった。本研究を含め、FNPP 事故以降に公表された西部北太平洋における ^{134}Cs および ^{137}Cs の時空間変動は、FNPP 事故直後における直接漏洩および大気経由の海面沈着による影響が支配的であったといえよう。FNPP 事故から 3 年あまりが経過した今後、海洋における ^{134}Cs および ^{137}Cs の時空間変動を解明するためには、モニタリング調査の継続に加え、陸域からの河川を経由した負荷や地下水を通じた負荷など、直接漏洩に比べ低濃度ではあるが継続的な海洋への負荷量を把握することが重要になってくると考えられる。そのため、FNPP 事故が我が国周辺の海域へ及ぼした影響を追跡する、あるいは今後の海洋における ^{134}Cs および ^{137}Cs 濃度レベルを把握するためには、河川およびその流域からの ^{134}Cs および ^{137}Cs の移動量など陸域環境における ^{134}Cs および ^{137}Cs の挙動も視野に入れることが重要である。

謝 辞

本研究は水産庁委託事業「放射性物質影響解明事業」、ならびに復興交付金事業「海洋生態系の放射性物質挙動調査」の助成を受けて実施された。(独)水産総合研究センター調査船(北光丸, 若鷹丸, 蒼鷹丸, たか丸, みずほ丸, しらふじ丸, 洋光丸), 水産庁調査船照洋丸および北海道教育庁実習船北鳳丸の船長はじめ乗組員ならびに乗船調査員には東日本大震災ならびに東京電力福島第一原子力発電所事故直後からの調査であったにも関わらず試料の採取にご理解, ご協力を頂いた。ここに深く御礼を申し上げる。

References

- 安倍大介, 帰山秀樹, 重信裕弥, 藤本賢, 小埜恒夫, 瀬藤聡, 渡邊朝生, (2012): 福島第一原子力発電所事故に伴う海洋底および海底境界層の放射能分布. 第 23 回海洋工学シンポジウム論文集, CD-ROM (OES23-059).
- Aoyama, M., Hirose, K., Miyao, T. and Igarashi, Y. (2000): Low level ^{137}Cs measurements in deep seawater samples. *Appl. Radiat. Isotopes*, **53**, 159-162.
- Aoyama, M. and Hirose, K. (2008): Radiometric determination of anthropogenic radionuclides in seawater. In: Povinec, P. P. (ed). *Analysis of Environmental Radionuclides, Radioactivity in the Environment*, Vol. 2. Elsevier, Amsterdam, London. 137-162.
- Aoyama, M., Tsumune, D., Uematsu, M., Kondo, F. and Hamajima, Y. (2012): Temporal variation of ^{134}Cs and ^{137}Cs activities in surface water at stations along the coastline near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident site, Japan. *Geochem. J.*, **46**, 321-325.
- Aoyama, M., Tsumune, D. and Hamajima, Y. (2013a): Distribution of ^{137}Cs and ^{134}Cs in the North Pacific Ocean: impacts of the TEPCO Fukushima-Daiichi NPP accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **296**, 535-539.
- Aoyama, M., Uematsu, M., Tsumune, D. and Hamajima, Y. (2013b): Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released ^{134}Cs and ^{137}Cs . *Biogeosciences*, **10**, 3067-3078.
- Blair, T., Ohnishi, S., Ura, T., Odano, N., Sasaki, S., Fujita, T., Watanabe, T., Nakata, K., Ono, T. and Ambe, D. (2013): Distribution of local ^{137}Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Mar. Pollut. Bull.*, **74**, 344-350.
- Buesseler, K. O. (2012): Fishing for answers off Fukushima. *Science*, **338**, 480-482.
- Buesseler, K. O., Jayne, S. R., Fisher, N. S., Rypina, I. I., Baumann, H., Baumann, Z., Breier, C. F., Douglass, E. M., George, J., Macdonald, A. M., Miyamoto, H., Nishikawa, J., Pike, S. M. and Yoshida, S. (2012): Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **109**, 5984-5988.
- 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.
- Inoue, M., Kofuji, H., Hamajima, Y., Nagao, S., Yoshida, K. and Yamamoto, M. (2012a): ^{134}Cs and ^{137}Cs activities in coastal seawater along the Northern Sanriku and Tsugaru Strait, northeastern Japan, after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **111**, 116-119.
- Inoue, M., Kofuji, H., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Yoshida, K., Fujimoto, K., Takada, T. and Isoda, Y. (2012b): Lateral variation of ^{134}Cs and ^{137}Cs concentrations in surface seawater in and around the Japan Sea after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **109**, 45-51.
- Kaeriyama, H., Ambe, D., Shimizu, Y., Fujimoto, K., Ono, T., Yonezaki, S., Kato, Y., Matsunaga, H., Minami, H., Nakatsuka, S. and Watanabe, T. (2013): Direct observation of ^{134}Cs and ^{137}Cs in surface seawater in the western and central North Pacific after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Biogeosciences*, **10**, 4287-4295.

- Kameník, J., Dulaiova, H., Buesseler, K. O., Pike, S. M. and Št'astná, K. (2013): Cesium-134 and 137 activities in the central North Pacific Ocean after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, **10**, 6045–6052.
- Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima S. and Awaji, T. (2011): Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ^{131}I and ^{137}Cs discharged into the ocean because of the Fukushima daiichi nuclear power plant disaster. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 1349–1356.
- Kim, C. K., Byun, J. I., Chae, J. S. Choi, H. Y., Choi, S. W., Kim, D. J., Kim, Y. J., Lee, D. M. Park, W. J., Yim, A. J., Yum, J. Y. (2012): Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioact.*, **111**, 70–82.
- Kobayashi, T., Nagai, H., Chino, M. and Kawamura, H. (2013): Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 255–264.
- Kofuji, H. and Inoue, M. (2013): Temporal variations in ^{134}Cs and ^{137}Cs concentrations in seawater along the Shimokita Peninsula and the northern Sanriku coast in northeastern Japan, one year after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **124**, 239–245.
- 小森昌史, 小豆川勝見, 野川憲夫, 松尾基之 (2013): $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を指標とした福島第一原子力発電所事故に由来する放射性核種の放出原子炉別汚染評価. *分析化学*, **62**, 475–483.
- Kusakabe, M., Oikawa, S., Takata, H. and Misonoo, J. (2013): Spatiotemporal distributions of Fukushima-derived radionuclides in nearby marine surface sediments. *Biogeosciences*, **10**, 5019–5030.
- Masumoto, Y., Miyazawa, Y., Tsumune, D., Tsubono, T., Kobayashi, T., Kawamura, H., Estournel, C., Marsaleix, P., Lanerolle, L., Mehra, A. and Garraffo, Z. D. (2012): Oceanic dispersion simulations of ^{137}Cs released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Elements*, **8**, 207–212.
- 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 ^{90}Sr 及び ^{137}Cs 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.
- Oikawa, S., Takata, H., Watabe, T., Misonoo, J. and Kusakabe, M. (2013): Distribution of the Fukushima-derived radionuclides in seawater in the Pacific off the coast of Miyagi, Fukushima, and Ibaraki Prefectures, Japan. *Biogeosciences*, **10**, 5031–5047.
- Otosaka, S. and Kobayashi, T. (2013): Sedimentation and remobilization of radiocesium in the coastal area of Ibaraki, 70 km south of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Environ. Monit. Assess.*, **185**, 5419–5433.
- Povinec, P. P., Hirose, K. and Aoyama, M. (2013a): Fukushima Accident: Radioactivity impact on the environment, Elsevier, Amsterdam, 382 pp.
- Povinec, P. P., Aoyama, M., Biddulph, D., Breier, R., Busseler, K., Chang, C. C., Golser, R., Hou, X. L. Jesřkovsky, M., Jull, A. J. T., Kaizer, J., Nakano, M., Nies, H., Palcsu, L., Papp, L., Pham, M. K. Steier, P. and Zhang, L. Y. (2013b): Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters — a comparison of the Fukushima impact with global fallout. *Biogeosciences*, **10**, 5481–5496.
- Rypina, I. I., Jayne, S. R., Yoshida, S., Macdonald, A. M., Douglass, E. and Buesseler, K. (2013): Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison. *Biogeosciences*, **10**, 4973–4990.
- Wada, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Fujita, T., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Morita, T. and Igarashi, S. (2013): Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima. *J. Environ. Radioact.*, **124**, 246–254.
- Wu, J. W., Zhou, K. B. and Dai, M. H. (2012): Impacts of the Fukushima nuclear accident on the China Seas: Evaluation based on anthropogenic radionuclide ^{137}Cs . *Chin. Sci. Bull.*, doi: 10.1007/s11434-012-5426-2.
- Yoshida, N. and Kanda, J. (2012): Tracking the Fukushima radionuclides. *Science*, **336**, 1115–1116.

^{134}Cs and ^{137}Cs in seawater around Japan after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident

Hideki Kaeriyama^{1**}, Daisuke Ambe¹, Yuya Shigenobu¹, Ken Fujimoto¹, Tsuneo Ono¹, Kaoru Nakata², Takami Morita² and Tomowo Watanabe¹

Abstract

The horizontal and vertical distributions of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the surface seawater around Japan and in that of the western North Pacific, respectively, were examined. The seawater samples were collected between April 2011 and November 2012, and the concentrations of ^{134}Cs and ^{137}Cs varied from < 0.9 to 1600 mBq kg^{-1} and from < 1.6 to 1800 mBq kg^{-1} , respectively. ^{134}Cs was detected from only the samples obtained in the western North Pacific. In the other areas, particularly the Japan Sea, East China Sea, Seto Inland Sea, and Bering Sea, it was below the detection limits of $0.9\text{--}4.5 \text{ mBq kg}^{-1}$. In the western North Pacific, the highest concentration of ^{137}Cs was observed in May 2011 and showed an exponential decrease with time. The average value of decay-corrected activity ratios $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ on March 11, 2011, was 0.93 ± 0.13 , which is the signature of ^{134}Cs and ^{137}Cs originating from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. The horizontal and vertical distribution patterns of ^{137}Cs off the coast of Fukushima showed heterogenic and complex patterns and may be affected by the interaction of cold and warm water masses such as the Oyashio and Kuroshio currents and mesoscale eddies.

Key words : Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, ^{134}Cs and ^{137}Cs , $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio, Western North Pacific

(Corresponding author's e-mail address: kaeriyama@affrc.go.jp)

(Received 3 February 2014; accepted 10 March 2014)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2014)

1 Research Center for Fisheries Oceanography and Marine Ecosystem, National Research Institute of Fisheries Sciences, Fisheries Research Agency, 2-12-4, Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

2 Fisheries Research Agency, 2-3-3, Minato Mirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa 220-6115, Japan

** Corresponding author : Hideki Kaeriyama

TEL: +81457887654 FAX: +81457885001

e-mail: kaeriyama@affrc.go.jp