

## 東京電力福島第一原子力発電所事故による日本海及びオホーツク海への影響<sup>†</sup>

難波江 靖\*

Impact of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident on the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk<sup>†</sup>

Yasushi NABAE\*

### Abstract

The Japan Coast Guard has been investigating radioactivity in the waters around Japan since 1959. The 2011 Tohoku Earthquake that occurred off the Pacific coast caused a tsunami. The TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station was severely damaged and a radioactive accident occurred. Radioactive materials were released into the environment, flowed out from the coastlines of Niigata and Yamagata prefectures to the ocean, and transferred to the Notsuke Strait by ocean currents. By utilizing the half-lives of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs of seafloor sediment could be separated into the concentration due to the global fallout and the concentration due to three accidents at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. It was suggested that silt clay in the seafloor sediments selectively adsorb radioactive cesium.

### 1 東京電力福島第一原子力発電所事故の概要

#### 1.1 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日14時46分、三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の地震が発生し、宮城県栗原市で震度7を観測したほか、東日本を中心に北海道から九州地方にかけての広い範囲で震度6強～1の地震が発生した。また、この地震に伴い福島県相馬で高さ9.3 m以上、宮城県石巻市鮎川で高さ8.6 m以上の津波を観測するなど、北海道から沖縄にかけての広い範囲で津波を観測した(気象庁)。

#### 1.2 東京電力福島第一原子力発電所

東京電力福島第一原子力発電所は、福島県双葉

郡大熊町と双葉町にまたがって位置し、敷地面積は約350万m<sup>2</sup>である。同発電所は、東京電力が初めて建設・運転した原子力発電所であり、1971年3月に1号機が営業運転を開始して以来、順次増設を重ね現在6基の原子炉を有しており、総発電設備容量は469万6千kWである(首相官邸)。

#### 1.3 2011年3月11日における原子炉の運転状況

当日は、福島第一原子力発電所1、2及び3号機が定格出力運転中であった。4、5、および6号機は定期検査中のため停止中であったが、4号機は燃料が炉内から使用済燃料プールに全数移送済み、5および6号機は原子炉内に燃料が装荷されていた(首相官邸)。

<sup>†</sup> Received October 6, 2020; Accepted November 19, 2020

\* 第五管区海上保安本部 海洋情報部 5<sup>th</sup> Regional Coast Guard Headquarters Hydrographic and Oceanographic Department

#### 1.4 地震・津波による事故の発生

運転中であった福島第一原子力発電所1号機から3号機は、全号機とも自動停止したため冷却機能維持のための非常用ディーゼル発電機が自動起動したが、津波により6号機の1台を除くすべての非常用ディーゼル発電機が停止し、1号機から5号機は全ての電源を失った。

1号機は、15時36分に原子炉建屋上部で水素爆発と思われる事象が発生した。2号機は、3月15日6時頃、圧力制御室付近において水素爆発と思われる大きな衝撃音が確認された。3号機は、原子炉圧力容器内の圧力を低下させるため原子炉圧力容器のベント操作が数回行われたが、14日11時01分頃、原子炉建屋上部で水素爆発と思われる事象が発生した。なお、本事故により原子力安全・保安院は、3月12日に国際原子力事象評価尺度（INES）において、レベル3（重大な異常事象）と暫定評価しIAEAに通報している（首相官邸）。

#### 1.5 放射能事故により放出された放射能

原子力安全・保安院は、第7回福島第一原子力発電所事故の技術的知見に関する意見聴取会において、福島第一原発事故に伴い大気中に放出された放射性物質の総量の推計値は、 $^{131}\text{I}$ が15万TBq、 $^{137}\text{Cs}$ が0.82万TBqで、これらをヨウ素換算値にすると48万TBqであると公表した。ヨウ素換算値は、ヨウ素換算値= $^{137}\text{Cs}$ のBq数 $\times$ 40によって算出される（IAEA 345「User's Manual 2008 Edition（2008年版INESユーザーズマニュアル）」P.16）。

原子力安全委員会は、8月24日、大気中に放出された放射性物質の総量の推計値は、 $^{131}\text{I}$ が13万TBq、 $^{137}\text{Cs}$ が1.1万TBq、ヨウ素換算値にすると57万TBqと公表した。

東京電力は、福島第一原子力発電所から大気中に放出された放射性物質総量の推計値は、 $^{131}\text{I}$ が約50万TBq、 $^{137}\text{Cs}$ が約1万TBq、ヨウ素換算値にすると約90万TBqとした。また、海洋に放出された放射性物質の推計値は、 $^{131}\text{I}$ が約1.1

万TBq、 $^{137}\text{Cs}$ が約3600TBqとなった。東京電力は、平成24年5月24日、これらの推計結果を公表した（内閣官房）。

## 2 放射性物質の大気中の移行状況

福島第一原子力発電所から大気中に放出された放射性物質は、風によって風下に運ばれながら風の乱れによって水平・鉛直方向に広がり、あるいは降水に取り込まれて大気中から一部が除去されて地表面に沈着する。風は、地形や地表状態、海陸風や山谷風などの局地風、高・低気圧などの影響を受けて複雑に変化する。福島第一原子力発電所周辺でも西側にある山岳や局地風の影響を受けて複雑な気流場が形成され、放射性物質は複雑に輸送されたと考えられる。一般的に気体に比較して粒子の放射性物質は、降水により大気中から除去されやすく、その大気中濃度が高い所で雨・雪が降り始めた場合には湿性沈着量が大きな地域であるホットスポットが出現する。一方 $^{131}\text{I}$ は乾性沈着しやすいため、その沈着量は $^{137}\text{Cs}$ ほど降水現象に依存しない（Morino et al., 2011）。

## 3 放射性物質の陸上の移行状況

文部科学省は、広域の放射性物質による影響の把握などを行うため航空機モニタリングを実施した。2011年4月6日～29日に第1回航空機モニタリングを実施し、その後日本国内の全域で航空機モニタリングを実施した。飛行高度は、対地高度で150から700mである。地表面の空間線量率は、航空機下部の直径約300から1500mの円内の空間線量率の値を平均化した。航空機モニタリングにより地表面への $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の沈着量が明らかにされた（鳥居建男・他、2012）。

福島第一原子力発電所周辺地域は高い沈着量が分布している。福島第一原子力発電所から北西方向の福島県中通り及び飯館の沈着量が特に高く、山形、群馬、栃木にも有意な沈着が示されている。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は福島第一原子力発電所周辺地域のすべての土壌で約1.0であり、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ は同じ挙動をしたと考えられる。気象庁の

アメダスによれば、放射性物質が放出された期間中2回の降雨があり、継続した降水は、3月15日17時から3月16日4時までは福島県、3月21日8時から3月23日6時までは茨城、千葉、栃木、埼玉、東京の各都県で降り続いた。地表に堆積している放射性物質の多くはこの時に沈着したと考えられる (Kinoshita et al., 2011)。

森林地域の場合、降雨で降下した $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ (以下放射性セシウム)の多くが林冠にトラップされ、林床へはおもに林内雨の洗脱で移行したと推定されている。樹木に初期沈着した放射性セシウムの洗脱には、降雨の強度や頻度が強く影響する (Kajimoto et al., 2015)。

森林などから河川水系に流入した放射性セシウムは、河川水中に溶存した溶存態、あるいは河川水中の浮遊懸濁物質等の粒子に吸着された懸濁態で、上流から下流に輸送される。福島県の夏井川と鮫川における放射性セシウムの移動状況の観測では、台風時の大雨イベントによって1年間に放射性セシウムの30～50%が移動したと試算している。また河口近くで塩分濃度が増加すると、溶存態濃度が約2倍に増加し、懸濁物質から放射性セシウムの一部が脱離していることが示唆された (Iijima, 2015)。

### 3.1 阿賀野川

文部科学省は福島県と群馬県から新潟県に流れている阿賀野川の上流において放射性物質の堆積を航空機モニタリングにより確認した (葉葦・他, 2013)。新潟県は、福島第一原子力発電所事故による影響を把握するため放射能調査を早期から実施し、2011年8月の調査では阿賀野川河口で河床堆積物から $^{134}\text{Cs}$ が38 Bq/kg-湿土が検出された。また阿賀野川沖水深20mの海域で $^{134}\text{Cs}$ が72 Bq/kg検出された (新潟県, 2012; Inoue et al., 2013)。

### 3.2 北海道の陸域

文部科学省は、北海道における航空機による放射能調査を2012年4～5月に実施した。この調

査の報告書によれば、北海道全域において放射性セシウムは10 kBq/m<sup>2</sup>よりも低い値であった。これは全国で最も低いレベルであり、北海道内で顕著な放射性物質の沈着は報告されていない (原子力規制委員会)。

北海道農政部の報告書によれば、北海道全域の農地を含む表面土壌放射能調査では $^{134}\text{Cs}$ は検出限界以下であり、 $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度は、福島第一原子力発電所事故前の値を下回っていた (北海道)。これらの結果から、福島第一原子力発電所事故に由来する放射性物質が北海道の陸域から北海道周辺海域へ流出したものは、限定的であると考えられる。

## 4 放射性物質の海域での移行状況

海水中では、放射性セシウムは99%以上が溶存態で、懸濁態として存在しているのは1%以下であり、濁態放射性セシウムの沈降速度は数10～数100 m day<sup>-1</sup>程度である。福島第一原子力発電所事故の研究において、放射性セシウムはアルミノケイ酸塩のような鉱物に吸着しているとの報告があった。沿岸や大陸棚において、放射性セシウムが付着した海底堆積物は再び浮揚し、それは大陸棚斜面に向かって水平に輸送される場合がある (本田, 2015)。

### 4.1 直江津沖、加茂沖、酒田沖

日本海における福島第一原子力発電所事故の影響を調査するため、直江津沖、加茂沖、酒田沖で海底堆積物の放射能を調査した (Nabae et al., 2018)。海底堆積物を2015年7月に酒田沖で採取、2016年8月に加茂沖及び直江津沖で採取した。Fig. 1には測点を、Table 1には測定結果を示している。酒田沖では $^{134}\text{Cs}$ が0.16～0.68 Bq/kg、加茂港沖では $^{134}\text{Cs}$ が2.03～3.75 Bq/kgを検出した。しかし、直江津沖の海底堆積物から $^{134}\text{Cs}$ は検出されなかった。

### 4.2 北海道周辺海域

海上保安庁海洋情報部は、海洋汚染防止及び海

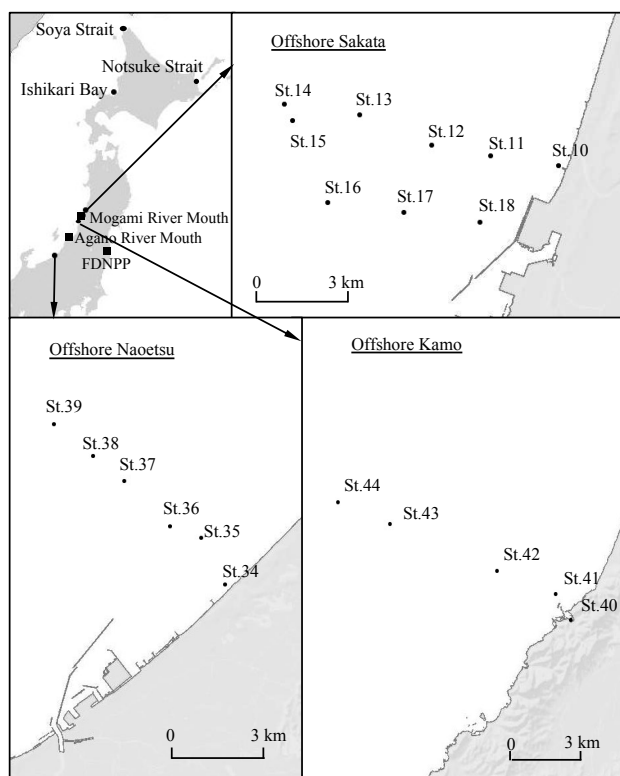


Fig. 1. Survey points map of Naoetsu, Kamo, and Sakata.

図1. 直江津沖, 加茂沖, 酒田沖測点図.

洋環境保全のための科学的調査の一環として、海洋における放射能調査を継続的に実施している。北海道周辺の測点について Fig. 2 に示した。石狩湾では2011年6月表面海水から $^{134}\text{Cs}$ が1.9 m Bq/L 検出され、2012年7月には海底堆積物から $^{134}\text{Cs}$ が0.7 Bq/kg- 乾土が検出された（海上保安庁海洋情報部, 2013, 2014）。測点 NO-7 ~ 10 について2010年及び2011年の表面海水の $^{137}\text{Cs}$ の濃度を Table 2 に示した。 $^{137}\text{Cs}$ の濃度は測点 NO-7 ~ 10 の全てにおいて増加しており、福島第一原子力発電所事故の影響がこれらの海域に及んでいることを示唆している。

### 4.3 宗谷海峡

日本海とオホーツク海との境界である宗谷海峡において福島第一原子力発電所事故に由来する放射性物質の移行を確認するため2015年9月に海底堆積物の放射能調査が実施された（Nabae et al., 2016）。Fig. 3 及び Table 3 に宗谷海峡における測点と調査結果を示した。調査海域の水深は

Table 1. Measurement results of seabed sediments offing Niigata and Yamagata prefectures.

表1. 新潟県沖及び山形県沖の海底堆積物の測定結果.

Survey arias	No	Latitude	Longitude	Depth [m]	Sampling day	$^{134}\text{Cs}$ [Bq/kg]	$^{137}\text{Cs}$ [Bq/kg]
Sakata Offing	St.10	38° 59' 06"	139° 50' 12"	8.2	13-Jul-15	N.D	0.28 ± 0.04
	St.11	38° 59' 18"	139° 48' 30"	26.8	13-Jul-15	0.32 ± 0.04	1.5 ± 0.1
	St.12	38° 59' 30"	139° 47' 00"	44.7	13-Jul-15	0.68 ± 0.02	4.0 ± 0.1
	St.13	39° 00' 06"	139° 45' 12"	53.6	13-Jul-15	0.16 ± 0.03	0.75 ± 0.04
	St.14	39° 00' 18"	139° 43' 18"	55.9	13-Jul-15	N.D	0.43 ± 0.04
	St.15	38° 59' 59"	139° 43' 31"	55.5	13-Jul-15	N.D	0.52 ± 0.16
	St.16	38° 58' 23"	139° 44' 24"	55.9	13-Jul-15	N.D	0.86 ± 0.04
	St.17	38° 58' 12"	139° 46' 18"	45.7	13-Jul-15	0.64 ± 0.05	3.8 ± 0.1
Kamo Offing	St.18	38° 58' 00"	139° 48' 14"	22.4	13-Jul-15	N.D	2.5 ± 0.3
	St.40	38° 45' 46"	139° 43' 58"	13.2	6-Aug-16	0.61 ± 0.06	4.7 ± 0.1
	St.41	38° 46' 22"	139° 43' 27"	17	6-Aug-16	N.D	0.49 ± 0.04
	St.42	38° 46' 55"	139° 41' 27"	39.6	6-Aug-16	N.D	0.29 ± 0.03
	St.43	38° 48' 02"	139° 37' 48"	59.6	6-Aug-16	N.D	0.32 ± 0.04
Naoetsu Offing	St.44	38° 48' 32"	139° 36' 02"	79.7	6-Aug-16	0.33 ± 0.04	3.2 ± 0.1
	St.34	37° 14' 30"	138° 20' 01"	6.8	5-Aug-16	N.D	0.13 ± 0.04
	St.35	37° 15' 38"	138° 19' 16"	20.9	5-Aug-16	N.D	0.19 ± 0.06
	St.36	37° 15' 55"	138° 18' 18"	39.5	5-Aug-16	N.D	0.52 ± 0.04
	St.37	37° 17' 01"	138° 16' 53"	62.3	5-Aug-16	N.D	0.97 ± 0.04
	St.38	37° 17' 37"	138° 15' 54"	79.4	5-Aug-16	N.D	1.1 ± 0.1
	St.39	37° 18' 23"	138° 14' 42"	99.7	5-Aug-16	N.D	0.96 ± 0.04

Table 2. Measurement results around Hokkaido Prefecture.

表 2. 北海道周辺の測定結果.

Station name	Surface seawater : $^{137}\text{Cs}$ (mBq/L)	
	Collected in June and August 2011	Collected in April and June 2010
NO-7	$2.41 \pm 0.05$	$1.4 \pm 0.04$
NO-8	$2.64 \pm 0.05$	$1.5 \pm 0.05$
NO-9	$3.82 \pm 0.08$	$1.4 \pm 0.04$
NO-10	$3.14 \pm 0.07$	$0.96 \pm 0.04$

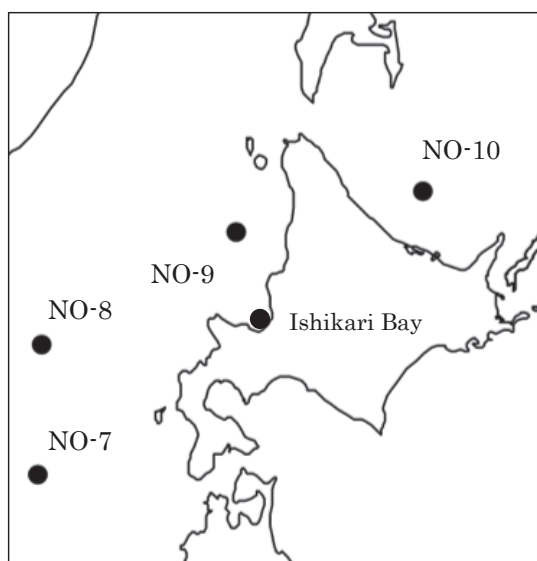


Fig. 2. Survey points around Hokkaido by the Japan Coast Guard.

図 2. 海上保安庁による北海道周辺の測点.

0.5 ~ 28.2 m で、最深部は St.23 であった。  $^{137}\text{Cs}$  は 0.11 - 2.3 Bq/kg で、 St.19 はこの調査海域で最も高い値を示した。  $^{134}\text{Cs}$  は St.19 で検出され 0.059 Bq/kg であり、宗谷海峡に福島第一原子力発電所事故に由来する放射性物質が達していたと言える。 St.19 で採取した海底堆積物は泥質であり、そして他の測点は砂質であった。調査海域の地質学上の特徴は、海底が主として岩質である。 St.24 から西方向に海底谷があり、砂質が分布している。泥質の海底堆積物は少なく、泥質は僅かに St.19 と St.24 の周辺に分布しているのみである (海上保安庁水路部, 1975)。試料採取の結果として、  $^{134}\text{Cs}$  が唯一検出された St.19 は泥質の海底堆積物であった。陸上や河川の堆積物において、  $^{134}\text{Cs}$  は泥質やシルト質の堆積物に対して選択的吸着挙動が観測されたとの報告がある (田林・山室, 2013 ; Yoshimura et al., 2014)。これと同様に宗谷海峡の海底堆積物においても、放射性セシウムは粒径の微細な泥質に選択的に吸着したと考えられる。この結果は、海底堆積物の粒径が海水から海底堆積物への放射性セシウムの吸着挙動の重要な要因であると示唆される。

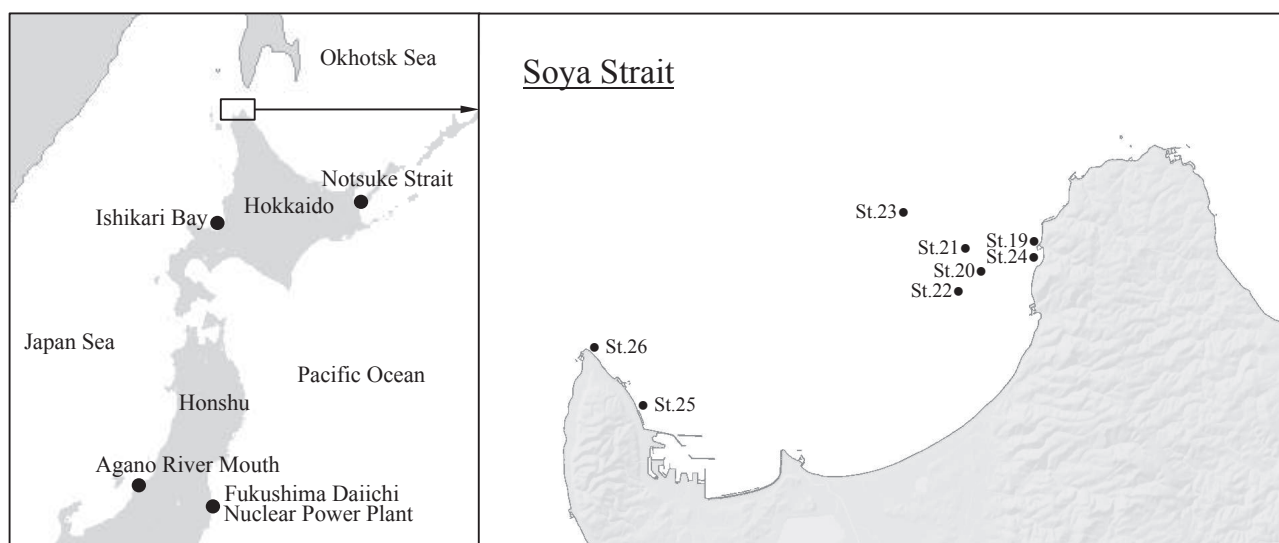


Fig. 3. Soya Strait survey points map.

図 3. 宗谷海峡測点図.

Table 3. Measurement results in the Soya Strait.

表 3. 宗谷海峡における測定結果.

No	Latitude	Longitude	Depth [m]	Sampling day	$^{134}\text{Cs}$ [Bq/kg]	$^{137}\text{Cs}$ [Bq/kg]
St. 19	45°29'09"	141°52'39"	2.8	9-Sep-15	0.059±0.019	2.3±0.1
St. 20	45°28'58"	141°50'59"	20.4	17-Sep-15	N.D	0.47±0.02
St. 21	45°29'12"	141°50'46"	22.6	17-Sep-15	N.D	0.46±0.02
St. 22	45°28'48"	141°50'26"	23.5	17-Sep-15	N.D	0.53±0.02
St. 23	45°29'43"	141°50'16"	28.2	17-Sep-15	N.D	0.65±0.02
St. 24	45°29'06"	141°52'43"	3.2	9-Sep-15	N.D	1.2±0.1
St. 25	45°25'28"	141°40'26"	0.5	10-Sep-15	N.D	0.42±0.03
St. 26	45°26'59"	141°38'44"	0.5	10-Sep-15	N.D	0.11±0.02

#### 4.4 野付水道

野付水道において海底堆積物を採取し放射能調査が実施された (Nabae et al., 2016). 野付水道はオホーツク海南部で北海道標津町沖に位置する. Fig. 4 に測点図, Table 4 に測定結果を示した. この海域の水深は野付水道の中でも特に浅く, 20 m 以浅の海域が広く分布していた. 調査は, 2015 年 2 月及び 2016 年 2 月の 2 回実施されたが St.6, 30, 31 では海底堆積物は採取できなかった.

測定の結果は, St.33 において  $^{134}\text{Cs}$  が 0.034 Bq/kg,  $^{137}\text{Cs}$  が 1.43 Bq/kg 検出された. 北海道農政部の報告書によれば,  $^{134}\text{Cs}$  の放射能濃度は北海道全域の農地を含む表面土壌放射能調査では全て不検出であった. そして  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度は福島第一原子力発電所事故以前の値を下回っていた. このことから,  $^{134}\text{Cs}$  が標津町付近の河川から海域へ流出したものは限定的であると考えられる.

#### 5 $^{134}\text{Cs}$ の移行距離に対する濃度変化

文部科学省及び新潟県の調査によれば, 阿賀野川上流域及び河口の河床堆積物から  $^{134}\text{Cs}$  が検出された. 直江津沖, 酒田沖, 加茂沖, 石狩湾, 宗谷海峡, 野付水道の各海域において採取された海底堆積物から  $^{134}\text{Cs}$  が検出された. 北海道農政部の報告によれば北海道の農地からは  $^{134}\text{Cs}$  は検出

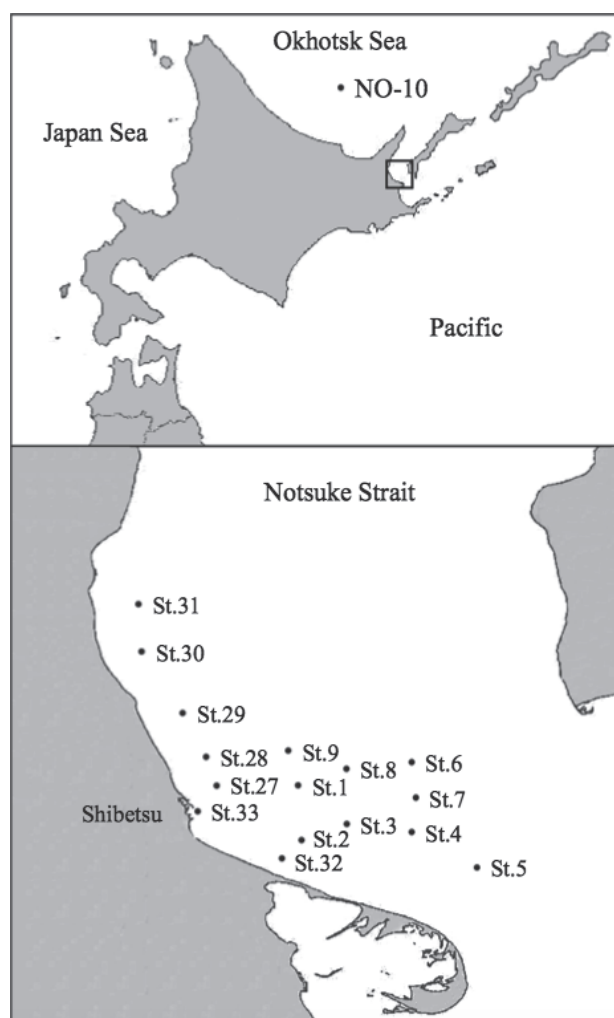


Fig. 4. Notsuke Strait survey points map.

図 4. 野付水道測点図.

Table 4. Measurement results in the Notsuke Strait

St. 2\* and St. 33\* are remeasurements of St. 2 and St. 33 samples with an extended measurement time.

Seabed sediments could not be collected at St. 6, 30, 31.

表 4. 野付水道の測定結果.

St.2\*及び St.33\*は, St.2 及び St.33 の試料について計測時間を延長して再計測したものである.

St.6, 30, 31 は海底堆積物が採取できなかった.

No.	Sampling day	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Time [s]	<sup>134</sup> Cs [Bq/kg]	<sup>137</sup> Cs [Bq/kg]
St. 1	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (0.19)	ND (0.33)
St. 2	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (0.33)	ND (0.20)
St. 2*	Feb 23, 2015	100	250,000	ND (0.14)	0.41±0.14
St. 3	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (—)	ND (0.25)
St. 4	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (0.22)	ND (0.39)
St. 5	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (—)	ND (0.16)
St. 6	Feb 23, 2015	—	—	—	—
St. 7	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (0.19)	ND (0.19)
St. 8	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (—)	ND (0.02)
St. 9	Feb 23, 2015	100	86,400	ND (0.09)	ND (—)
St. 27	Feb 6, 2016	2,000	250,000	ND (0.01)	0.35±0.012
St. 28	Feb 6, 2016	2,000	250,000	ND (0.02)	0.95±0.018
St. 29	Feb 6, 2016	2,000	250,000	ND (0.01)	0.86±0.015
St. 30	Feb 6, 2016	—	—	—	—
St. 31	Feb 6, 2016	—	—	—	—
St. 32	Feb 6, 2016	2,000	250,000	ND (0.02)	0.28±0.013
St. 33	Feb 6, 2016	2,000	250,000	LTD (0.03)	1.45±0.023
St. 33*	Feb 6, 2016	2,000	600,000	0.034±0.0086	1.43±0.015

されていないので、石狩湾、宗谷海峡、野付水道で検出された<sup>134</sup>Csは、北海道の陸地や河川から供給されたものは限定的で、その多くは他の海域から水塊の移動に伴い移行したことを示唆している。これらの各海域には Fig. 5 のとおり対馬暖流及び宗谷暖流が存在している (Japan Coast Guard, 2015)。対馬暖流は直江津沖を北東方向に流れ、本州北西岸を北上し、北海道西岸を北へ、宗谷海峡に達する。対馬暖流はその一部を宗谷海峡に分派し宗谷暖流として根室海峡を通過したのち野付水道に達する。

Fig. 6 は、縦軸に各海域における海底堆積物の<sup>134</sup>Csの最大値 (2011年3月11日に減衰補正した

値)を示し、横軸に阿賀野川河口から対馬暖流と宗谷暖流を通り各海域までの概略の距離を示したものである。直江津沖では<sup>134</sup>Csは不検出であったが、これは福島第一原子力発電所事故に由来する<sup>134</sup>Csが直江津沖には達していなかったことを示している。海底堆積物の<sup>134</sup>Csの濃度は、阿賀野川河口から離れるにしたがい指数関数的に減少していた。これは河川を懸濁態として移行した<sup>134</sup>Csが河口において海水に触れ、その多くが溶解態になり水塊とともに移行する。河口付近の水塊の一部は対馬暖流及び宗谷暖流によって野付水道まで移行し移流拡散している状態にあると考えられる。直江津沖では<sup>134</sup>Csが検出されなかった

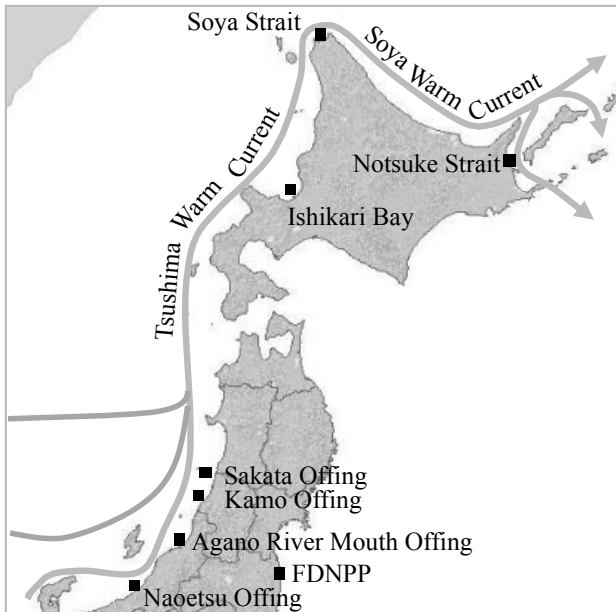


Fig. 5. Currents map of Tsushima Warm Current and Soya Warm Current.

図 5. 対馬暖流及び宗谷暖流の海流図.

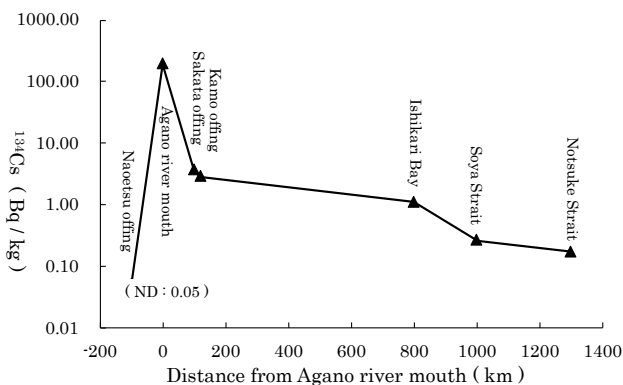


Fig. 6. <sup>134</sup>Cs concentration of seabed sediments and distance from the Agano River mouth.

- The maximum value of <sup>134</sup>Cs in seafloor sediments was corrected on March 11, 2011.
- The distance from of the Agano River mouth is the approximate distance when migrating via the Tsushima Warm Current and the Soya Warm Current.

図 6. 海底堆積物の <sup>134</sup>Cs 濃度と阿賀野川河口からの距離.

- <sup>134</sup>Cs は最大値を示した海底堆積物の濃度を 2011 年 3 月 11 日に減衰補正した.
- 阿賀野川河口からの距離は対馬暖流及び宗谷暖流上を移行した場合の概略の距離.

ことから、日本海へ流出した <sup>134</sup>Cs の一部は直江津よりも北東沿岸の河川から供給されたことを示唆している。

## 6 グローバルフォールアウトに由来する <sup>137</sup>Cs の分離

1945 年から開始された大気圏内核実験は、放射性物質を環境中に大量に放出、グローバルフォールアウトによって全球に <sup>137</sup>Cs などが拡散された。 <sup>137</sup>Cs は半減期が 30 年であり、大気圏内核実験が行われていない今日においても海底堆積物や海水から検出される。

福島第一原子力発電所の各原子炉から環境中に放出された <sup>134</sup>Cs と <sup>137</sup>Cs の <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs 放射能比は、1 号原子炉では約 0.89–0.93、2 号原子炉は約 0.96–1.05、3 号原子炉は約 0.97–1.04 であり、全体としては約 1 であった (Komori et al., 2013)。この放射能比は、放出時の割合であり、<sup>134</sup>Cs の半減期が 2 年で <sup>137</sup>Cs の半減期が 30 年であることから時間経過とともに変化する。

福島第一原子力発電所事故後に測定された <sup>137</sup>Cs の値は、事故に由来する <sup>137</sup>Cs とグローバルフォールアウトに由来する <sup>137</sup>Cs の双方が含まれている可能性がある。事故によって放出された <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs 放射能比を概数である 1.0、グローバルフォールアウトに由来する <sup>137</sup>Cs を <sup>137</sup>Cs<sub>(GF)</sub>、2011 年 3 月 11 日に減衰補正した <sup>134</sup>Cs・<sup>137</sup>Cs を <sup>134</sup>Cs<sub>(Mar11.2011)</sub>・<sup>137</sup>Cs<sub>(Mar11.2011)</sub> とすると、

$$^{137}\text{Cs}_{(\text{GF})} = ^{137}\text{Cs}_{(\text{Mar11.2011})} - ^{134}\text{Cs}_{(\text{Mar11.2011})}$$

と表すことができ、グローバルフォールアウトに由来する <sup>137</sup>Cs の概数を知ることができる。酒田沖、加茂沖、石狩湾、宗谷海峡、野付水道の各海域における海底堆積物に含まれるグローバルフォールアウト <sup>137</sup>Cs<sub>(GF)</sub> を Table 5 に示す。各海域の <sup>137</sup>Cs<sub>(GF)</sub> は 0.55–2.29 Bq/kg の範囲であり、福島第一原子力発電所事故前の 2010 年に採取した日本近海の海底堆積物の <sup>137</sup>Cs は 0.6–5.6 Bq/kg、平均値 2.5 Bq/kg であるので (海上保安庁海洋情報部, 2012)、グローバルフォールアウトに由来する <sup>137</sup>Cs を正しく分離することができたと



Table 5. Concentration of global fallout in seabed sediments. The concentration was corrected on March 11, 2011.

表 5. 海底堆積物におけるグローバルフォールアウトの濃度. 濃度は 2011 年 3 月 11 日に減衰補正したものである.

Station Number (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}_{(\text{Mar}11.2011)}$	$^{134}\text{Cs}_{(\text{Mar}11.2011)}$	$^{137}\text{Cs}_{(\text{GF})}$
Kamo offing St.40	5.29	3.64	1.65
Sakata offing St.12	4.42	2.85	1.57
Ishikari Bay	1.65	1.1	0.55
Soya Strait St.19	2.55	0.26	2.29
Notsuke St.33	1.6	0.17	1.43

言える.

## 7 海底堆積物の粒子分級と放射性セシウム濃度の吸着挙動

福島第一原子力発電所の周辺地域の池における調査では, 小さい粒径の堆積物は放射性セシウムをよく吸着した (Yoshimura et al., 2014). 川の堆積物の調査では, 放射性セシウムは粘土とシルトの堆積物に吸着し, そして砂への吸着は僅かであった (田林・山室, 2013). 海底堆積物について, 放射性セシウムの吸着挙動と粒子分級の間を明らかにするための調査を実施した (Nabae et al., 2018). 試料は, 直江津沖, 加茂沖及び酒田沖の海底堆積物について, 放射能測定後に各 St. 毎に 30 g を分取し, 目空き 850  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  の篩を使用して, Coarse sand, Medium sand, Fine sand, Clay-Silt に分級させた (Tsujiimoto et al., 2016). 2000  $\mu\text{m}$  より大きな海底堆積物は放射能測定用試料調製時に排除している.

Fig. 7 は粒子分級の結果である. Fig. 7 (a) は加茂沖及び酒田沖の試料のうち  $^{134}\text{Cs}$  が検出されなかった海底堆積物の粒子分級を示す. Fig. 7 (b) は加茂沖及び酒田沖の試料のうち  $^{134}\text{Cs}$  が検出された海底堆積物の粒子分級を示す. Fig. 7 (c) は直江津沖の試料の粒子分級を示す. Fig. 7 (a) と Fig. 7 (b) を比較すると Clay-Silt と Medium sand との割合に違いが見られた.  $^{134}\text{Cs}$  が検出されなかった St.10 と St.42 では, Clay-Silt の割合

がわずかに 0.12% と 0.27% であった. 一方で,  $^{134}\text{Cs}$  が検出された St.12 と St.40 において, Clay-Silt の割合は 29.57% と 22.14% であった.  $^{134}\text{Cs}$  は Clay-Silt がわずかな海底堆積物では検出されず, Clay-Silt を多く含む海底堆積物では  $^{134}\text{Cs}$  が検出された. Fig. 7 (d) では Clay-Silt の含有率が増加するにしたがって  $^{134}\text{Cs}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  の濃度が増加した. これらは海水から海底堆積物への放射性セシウムの吸着挙動において, 海底堆積物の粒径が重要な要因であることを示唆している. 福島第一原子力発電所の周辺地域の池や川の堆積物の調査から, 放射性セシウムは淡水と海水との双方において Clay-Silt に選択的に吸着されていると考えられる. しかし Fig. 7 (c) の St.38 と St.39 では Clay-Silt が 20% 以上含まれているにもかかわらず, 海底堆積物から  $^{134}\text{Cs}$  は検出されなかった. これは  $^{134}\text{Cs}$  を含む水塊が直江津沖に達していなかったことを示唆している.

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり, 海洋汚染調査室茂木由夫氏から, 丁寧な指導を賜りました. ここに感謝の意を表します.

## 文 献

- 原子力規制委員会放射線モニタリング情報, [http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5847/24/203\\_0727.pdf](http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5847/24/203_0727.pdf)Zb, 2015 年 8 月 25 日閲覧.
- 葉葦久尚・石山央存・横尾闘太・大野峻史・阿部綾・古俣 修・丸田文之 (2013) 福島第一原子力発電所事故による阿賀野川下流域における放射性セシウム分布状況の調査, RADIOISOTOPES, 62, 649-658.
- 北海道土壤モニタリング調査結果, <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/gjf/dojomonitoring.htm>, 2020 年 9 月 24 日閲覧.
- 本田牧夫 (2015) 時系列式セジメントラップによる原子力発電所事故由来の粒状態放射性核種の挙動に関する観測研究, 地球科学, 49,

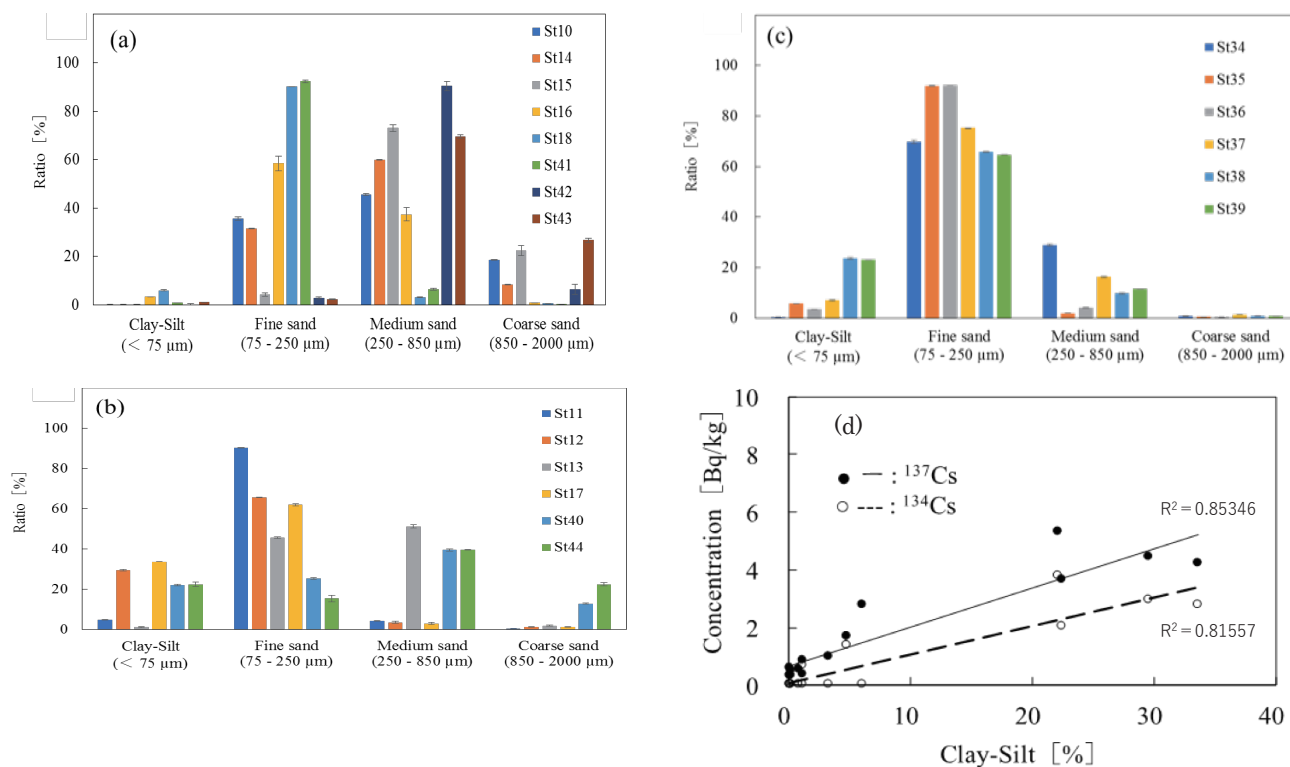


Fig. 7. Particle classification and  $^{134}\text{Cs}$  adsorption rate of seabed sediments. The sample is 30 g for each survey point offing Naoetsu, Sakata, and Kamo.

(a) : Samples in which  $^{134}\text{Cs}$  were not detected offing Sakata and Kamo.

(b) : Samples in which  $^{134}\text{Cs}$  were detected offing Sakata and Kamo.

(c) : Sample in offing Naoetsu ( $^{134}\text{Cs}$  not detected).

(d) : Concentration of  $^{134}/^{137}\text{Cs}$  and classification ratio of Clay-Silt (concentration 0 is not detected).

図 7. 海底堆積物の粒子分級と  $^{134}\text{Cs}$  吸着率. 試料は直江津沖, 酒田沖, 加茂沖の各 St.30g.

(a) : 酒田沖, 加茂沖の  $^{134}\text{Cs}$  が検出されなかった試料.

(b) : 酒田沖, 加茂沖の  $^{134}\text{Cs}$  が検出された試料.

(c) : 直江津沖の試料 ( $^{134}\text{Cs}$  は不検出).

(d) :  $^{134} \cdot ^{137}\text{Cs}$  の濃度と Clay-Silt の分級割合 (濃度 0 は不検出).

[4], 227-238.

Iijima, K. (2015) Status of the researches on the behavior in the environment of radioactive cesium transported from forests to river systems, Chikyukagaku, 49, [4], 203-215.

Inoue, M., H. Kofuji, S. Oikawa, T. Murakami, M. Yamamoto, S. Nagao, Y. Hamajima, and J. Misonoo (2013) Spatial variations of low levels of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in seawaters within the Sea of Japan after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Applied Radiation and Isotopes, 81, 340-343.

Japan Coast Guard (2015) Sailing Directions for

South and East Coasts of Honshu, 6-9, Japan Hydrographic Association, Tokyo.

海上保安庁水路部 (1975) 海底地質構造図.

6410<sup>33S</sup> 宗谷, 海上保安庁海洋情報部, 東京.

海上保安庁海洋情報部 (2012) 放射能調査報告書 平成 22 年調査結果, 1-16, 海上保安庁海洋情報部, 東京.

海上保安庁海洋情報部 (2013) 放射能調査報告書 平成 23 年調査結果, 1-17, 海上保安庁海洋情報部, 東京.

海上保安庁海洋情報部 (2014) 放射能調査報告書 平成 24 年調査結果 1-17, 海上保安庁海洋情報部, 東京.

- Kajimoto, T., S. Saito, T. Kawasaki, D. Kabeya, K. Yazaki, H. Tanaka, T. Ota, Y. Matsumoto, R. Tabuchi, Y. Kiyono, T. Takano, K. Kuroda, T. Fujiwara, Y. Suzuki, M. Komatsu, S. Ohashi, S. Kaneko, A. Akama, and M. Takahashi (2015) Dynamics of Radiocesium in Forest Ecosystems Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Journal of the Japanese Forest Society*, 97, 33-43.
- Kinoshita, N., K. Sueki, K. Sasa, J. Kitagawa, S. Ikarashi, T. Nishimura, W. Ying-Shee, Y. Satou, K. Handa, T. Takahashi, and M. Sato (2011) Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, *PNAS*, 108, [49], 19526-19529.
- 気象庁, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震, [https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011\\_03\\_11\\_tohoku/index.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/index.html), 2020 年 9 月 22 日閲覧.
- 国土交通省, 東日本大震災の発生, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h22/hakusho/h23/index.html>, 2017 年 4 月 21 日閲覧.
- Komori, M., K. Shozugawa, N. Nogawa, and M. Matsuo (2013) Evaluation of Radioactive Contamination Caused by Each Plant of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Using  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  Activity Ratio as an Index, *Bunseki Kagaku*, 62, [6], 475-483.
- Morino, Y., T. Ohara, and M. Nishizawa (2011) Atmospheric behavior of radioactive materials from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *J. Natl. Inst. Public Health*, 60, [4], 292-299.
- Nabae, Y., S. Miyashita, and S. Nakashima (2016) Observation of radiocesium in seabed soil at the Notsuke Strait of the southern Sea of Okhotsk derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Radiation Safety Manage*, 15, 9-15.
- Nabae, Y., S. Miyashita, and S. Nakashima (2017) Observation of Radioactive Cesium in Seabed Soil at the Soya Strait Derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Radiation Safety Management*, 16, 8-12.
- Nabae, Y., M. Tsujimoto, S. Miyashita, and S. Nakashima (2018) Distribution of Radioactive Cesium from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in Seabed Sediment from Offshore Niigata Prefecture and Yamagata Prefecture, *RADIOISOTOPES*, 67, [12], 573-581.
- 内閣官房, Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Power Company, <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/05IVfinal.pdf>, 2017 年 4 月 21 日閲覧.
- 新潟県 (2012) 福島第一原子力発電所事故に伴う新潟県内の放射線等の監視結果報告書 (2011 年度版), <https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/genshiryoku/1356783391658.html>, 2020 年 9 月 24 日閲覧.
- 首相官邸, 東日本大震災, [http://japan.kantei.go.jp/kan/topics/201106/iaea\\_houkokushoe.html](http://japan.kantei.go.jp/kan/topics/201106/iaea_houkokushoe.html), 2017 年 4 月 21 日閲覧.
- 田林 雄・山室真澄 (2013) 霞ヶ浦流入河川堆積物における粒径と放射性セシウム濃度の関係, *Japanese Journal of Limnology*, 74, 183-189.
- 鳥居建男・眞田幸尚・杉田武志・田中 圭 (2012) 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査, *日本原子力学会誌*, 54, [3], 12-16.
- Tsujimoto, M., S. Miyashita, and S. Nakashima (2016) A correlation between the transfer factor of radioactive cesium from soil into rice plants and the grain size distribution of paddy soil in Fukushima, *Radiation Safety Management*, 15, 1-8.
- Yoshimura, K., Y. Onda, and T. Fukushima (2014) Sediment particle size and initial radiocesium

accumulation in ponds following the Fukushima DNPP accident, Scientific Reports, 4, 4514.

### 要 旨

海上保安庁は、1959年から日本周辺海域において、放射能調査を実施している。2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による津波により、東京電力福島第一原子力発電所では甚大な放射能事故が発生した。この事故により環境中に拡散・放出された放射性物質は、新潟県及び山形県から河川等により海洋へ流出し、海流によって野付水道へ移行した。海底堆積物の $^{137}\text{Cs}$ の濃度について $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の半減期の違いからグローバルフォールアウトによる濃度と東京電力福島第一原子力発電所事故による濃度を分離することができた。海底堆積物のシルト・粘土は放射性セシウムを選択的に吸着することが示唆された。