

福島県沿岸域における海底土壌中放射性セシウムの 分布状況と経時変化

渡邊亮太・島村信也・藤田恒雄

Distribution and Temporal Changes of Radioactive Cesium in Sediments
in the Coastal Waters off Fukushima Prefecture

Ryota WATANABE, Shinya SHIMAMURA and Tsuneo FUJITA

ま え が き

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大地震に伴う福島第一原子力発電所（以下 1F）事故により、大量の放射性物質が環境中に放出された。海洋においては、発電所施設からの汚染水の直接漏洩や大気中の放射性物質のフォールアウト、雨水等の流れ込みにより、ヨウ素 131 が約 1.1×10^{16} Bq、セシウム 134 が約 3.5×10^{15} Bq、セシウム 137 が約 3.6×10^{15} Bq 放出されたとする試算が東京電力から公表されている¹⁾。

海洋環境中の放射性物質については事故後、複数の機関によるモニタリング調査が実施されているが、福島県でも港湾や海面漁場等での海水・海底土壌のモニタリング調査を継続し行っている²⁻⁴⁾。調査結果によると、海水の放射性セシウム濃度は比較的早期に検出下限値未満（1Bq/L）まで低下し、現在でも検出されていないが、海底土壌については事故当初の濃度から低下傾向が続いているものの、海水と比較して低下速度が緩やかであり、海域での濃度差等もみられている。そこで本研究では、海底土壌に含まれる放射性セシウムに着目し、これまでの放射性物質モニタリング調査の結果をとりまとめ、福島県沿岸域における海底土壌中の放射性セシウムの分布状況と経時変化の傾向について報告する。

材料および方法

福島県の沿岸部において、スミス・マッキンタイヤ型採泥器による海底土壌の採取を行った。各調査定点の詳細を図 1、表 1 に示す。福島県沿岸部北部から南部にかけて 11 定線を設定し、各々について水深別に複数の定点を設けた。調査開始時 2011 年 5 月には 9 点で調査を行ったが、順次追加し、2015 年 9 月時点では 55 点で調査を行った。採取頻度は原則として 48 点で毎月 1 回、7 点で年 2 回行った。なお、本研究では 2011 年 5 月から 2015 年 3 月までの結果について報告する。

採取した海底土壌は吸引ろ過による脱水処理を行った後、U-8 容器に約 100g 充填し放射性セシウム濃度測定用の試料とした。測定は福島県水産試験場と福島県原子力センターにて、Ge 半導体検出器によりガンマ線測定を行った（検出下限値約 10Bq/kg-wet）。次に、試料の一部を 105°C で加熱乾燥し、乾燥前後の重量から含水率を算出し、測定結果を乾土 1kg あたりの値に換算した。

また、スミス・マッキンタイヤ型採泥器による調査とは別に、放射性セシウムの鉛直方向の分

布状況を把握する目的で G.S.型表層採泥器（アシユラ）による調査と、海底面の放射性物質濃度を連続的に測定するために曳航式ガンマ線計測装置による調査を行った。

G.S.型表層採泥器による調査は、調査定点を 1F 沖に 3 地点（水深 7、10、12m 地点）、四倉沖 1 地点（水深 50m 地点）、江名沖 1 地点（水深 50m 地点）の計 5 地点に設け、2014 年 5 月から 2015 年 2 月に採泥を行った。なお、採泥位置はスミス・マッキンタイヤ型採泥器による採泥位置と同所であり、2014 年 10 月～12 月は欠測である。採取した海底土壌は、表面から 0-2cm、2-4cm、4-7cm、7-10cm、10-13cm、13-16cm の層毎に試料とした。それぞれの試料は前述と同様脱水処理の後、水産試験場にて Ge 半導体検出器による測定を行い、乾土 1kg あたりの値に換算した。

曳航式ガンマ線計測装置は、NaI シンチレーション検出器を内蔵した装置を船舶によって曳航することで、海底面の放射性物質濃度を連続的に測定することが可能な装置である⁵⁾。従来の採泥調査では点でのデータのみ得られていたが、この装置により線状に放射性セシウム濃度の分布状況を把握することが可能となった。調査は 2014 年 11 月と 12 月に四倉沖東西方向（北緯 37 度 5 分、東経 141 度 1 分～北緯 37 度 5 分、東経 141 度 20 分）、2015 年 2 月に 1F 沖南北方向（北緯 37 度 20 分、東経 141 度 12 分～北緯 37 度 31 分、東経 141 度 12 分）の計 2 定線で行った（図 1）。

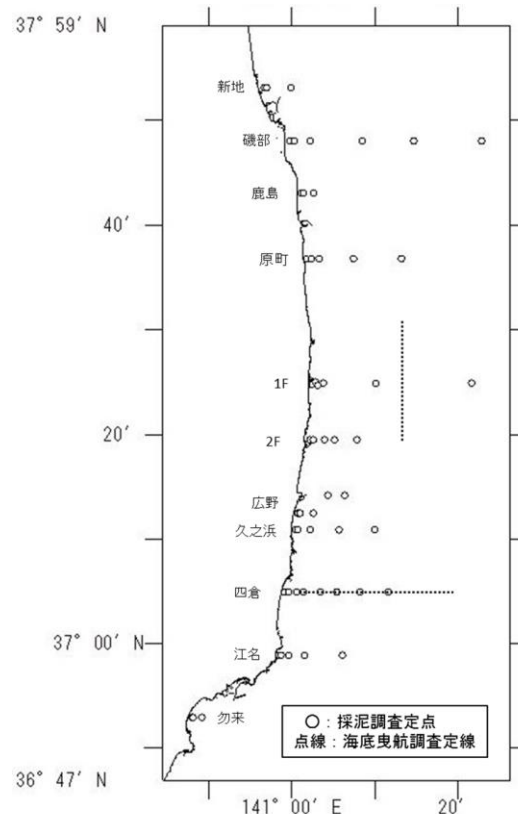


図 1 調査定点・定線図

表 1 採取地点（10 進法表記）

定線	水深	緯度	経度	採取頻度	定線	水深	緯度	経度	採取頻度
新地沖	7m	37.883	140.945	毎月	広野沖	7m	37.210	141.012	毎月
	10m	37.883	140.951	毎月		10m	37.210	141.017	毎月
	20m	37.883	140.998	毎月		20m	37.210	141.044	毎月
磯部沖	7m	37.800	140.996	毎月		30m	37.237	141.072	毎月
	10m	37.800	141.006	毎月		50m	37.237	141.105	毎月
	20m	37.800	141.036	毎月		久之浜沖	7m	37.183	141.007
	30m	37.800	141.142	年2回	10m		37.183	141.011	毎月
50m	37.800	141.243	年2回	20m	37.183		141.035	毎月	
100m	37.800	141.380	年2回	50m	37.183		141.095	毎月	
鹿島沖	7m	37.717	141.018	毎月	100m		37.183	141.166	毎月
	10m	37.717	141.023	毎月	四倉沖	7m	37.083	140.986	毎月
	20m	37.717	141.044	毎月		10m	37.083	140.993	毎月
原町沖	7m	37.613	141.031	毎月		20m	37.083	141.010	毎月
	10m	37.613	141.039	毎月		30m	37.083	141.022	毎月
	20m	37.613	141.053	毎月		50m	37.083	141.057	毎月
	30m	37.613	141.124	年2回		75m	37.083	141.090	毎月
	50m	37.613	141.220	年2回	100m	37.083	141.135	毎月	
1F 沖	7m	37.414	141.039	毎月	江名沖	125m	37.083	141.191	毎月
	10m	37.414	141.041	毎月		7m	36.983	140.973	毎月
	12m	37.418	141.048	毎月		10m	36.983	140.979	毎月
	14m	37.412	141.051	毎月		20m	36.983	140.995	毎月
	20m	37.417	141.063	毎月		50m	36.983	141.024	毎月
	50m	37.417	141.167	年2回		100m	36.983	141.101	毎月
2F 沖	130m	37.417	141.360	年2回	勿来沖	7m	36.883	140.800	毎月
	7m	37.325	141.037	毎月		10m	36.883	140.803	毎月
	10m	37.325	141.043	毎月		20m	36.883	140.820	毎月
	20m	37.325	141.065	毎月					
	30m	37.325	141.085	毎月					
50m	37.325	141.130	毎月						

結 果

放射性セシウムの分布状況と経時変化

スミス・マッキンタイヤ型採泥器を用いた採泥調査による、各定点の年度別放射性セシウム濃度 ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$) の平均値を図2に示す。2011年度は、平均で1,000Bq/kg-dryを超過した地点が磯部沖定点、久之浜沖定点、四倉沖定点で複数存在し、その他では数百Bq/kg-dryとなる地点が大部分を占めたが、原町沖以北の海域では100Bq/kg-dry未満の地点もみられた。最大で久之浜沖水深20m地点の2,067Bq/kg-dry、最小で磯部沖水深50m地点の35Bq/kg-dryであった。

2012年度は、全体の傾向として放射性セシウム濃度が前年度より低下し、平均で1,000Bq/kg-dryを超過した地点はみられず、最大で四倉沖水深50m地点の627Bq/kg-dry、最小で新地沖水深7m地点の11Bq/kg-dryであった。原町沖以北の海域では100Bq/kg-dry未満の地点が大部分を占めたが、広野沖以南の海域では100Bq/kg-dry未満まで低下した地点は存在しなかった。また、久之浜沖定点、四倉沖定点では放射性セシウム濃度の低下速度の傾向として、比較的浅海域(水深7~20m)で急速に低下したが、それ以深では緩やかだった。

2013年度は、引き続き濃度が低下し、原町沖以北海域で1地点以外全て平均100Bq/kg-dry未満、広野沖以南海域でも100Bq/kg-dry未満の地点がみられた。それらの海域での平均値の最大・最小は、最大が江名沖水深50m地点の365Bq/kg-dry、最小が磯部沖水深50m地点の6Bq/kg-dryであった。また、当該年度より1F、福島第二原子力発電所(以下2F)の近傍海域でも調査を実施した。1F沖では水深10m前後のごく浅海域で濃度が高く、水深7m地点で1,878Bq/kg-dry、10m地点で1,789Bq/kg-dryであったが、水深50m、130mの沖合の地点ではそれぞれ19Bq/kg-dry、104Bq/kg-dryと比較的低い値だった。2F沖では水深10m地点と30m地点の平均値が1,000Bq/kg-dryを超過するなど、1F沖の平均値のような水深による明確な傾向はみられなかった。

2014年度は、原町沖以北海域で平均の濃度が一桁の値となる地点が新地沖や磯部沖のごく沿岸部を中心に増加し、それ以外の地点でも50Bq/kg-dry未満にまで低下した。広野沖以南海域では、水深20mまでの浅海域で100Bq/kg-dry未満となる地点が増加したのに対し、水深50m以深では低下傾向はみられるものの、100Bq/kg-dryを下回る地点は少なかった。最大は広野沖水深20m地点の312Bq/kg-dry、最小は磯部沖水深10m、50mの3Bq/kg-dryであった。

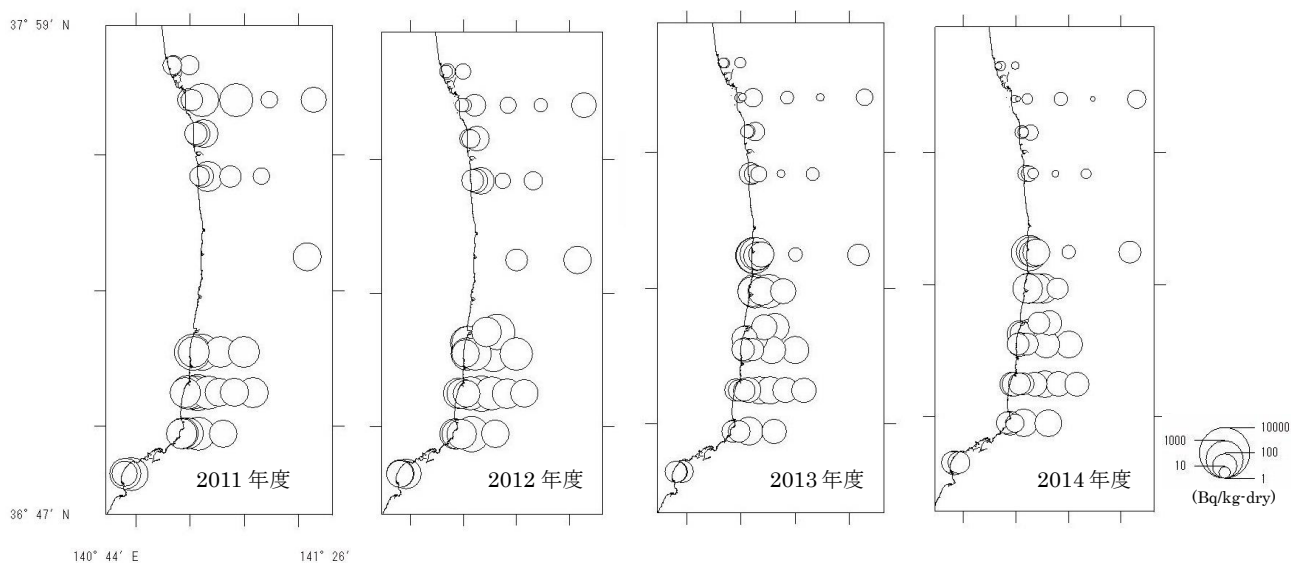


図2 年度別放射性セシウム濃度平均値

放射性セシウム濃度の経時変化について、海域によって低下速度等の傾向に差があるものの、全ての定点で事故発生当初から継続して低下傾向がみられている。各定点における経時変化の詳細な傾向を以下に示す。なお、水深による区分として、20m 以浅を沿岸部、それより深所を沖合とした。

新地沖定点では、2011年6月に水深7m 地点で236Bq/kg-dry、10m 地点で426Bq/kg-dry、20m 地点で160Bq/kg-dry だったが、同年8月には順に45、104、172Bq/kg-dry となり、より沿岸部で急激な濃度の低下がみられた(図3)。翌9月には各定点で100Bq/kg-dry 未満に低下し、以降100Bq/kg-dry を超過することはなかった。2012年からは10Bq/kg-dry 未満の地点もみられ、2014年から2015年までには10Bq/kg-dry 未満と検出下限値未満となる地点が大部分を占めている。

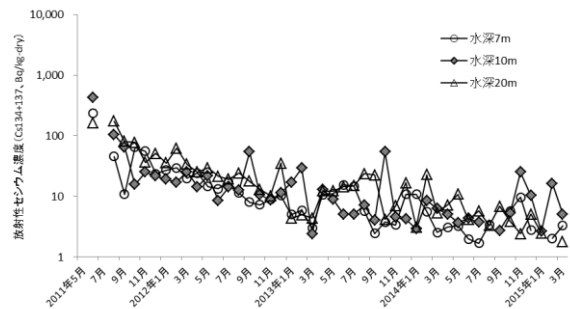


図3 新地沖定点放射性セシウム濃度推移

磯部沖沿岸部定点では、2011年6月に水深7m と10m 地点で549Bq/kg-dry、20m 地点で305Bq/kg-dry だったが、同年8月には順に140、81、466Bq/kg-dry と新地沖同様ごく沿岸部で濃度の低下が著しかった(図4)。それ以降100Bq/kg-dry 未満となる地点が増加し、水深7m、10m 地点では2013年から2015年に10Bq/kg-dry 未満が大部分を占めた。水深20m 地点では、2011年9月に2,485Bq/kg-dry、11月に5,966Bq/kg-dry という高い値が記録され、さらに濃度の低下速度が若干遅い傾向があるなどの特徴がみられた。沖合定点では年2回の頻度で、2011年8月から調査を実施した。水深30m 地点では2011年8月に1,894Bq/kg-dry の高い値が記録されたが、2012年2月には46Bq/kg-dry に急激に低下し、以降は50Bq/kg-dry 未満で推移し、2015年には10Bq/kg-dry 未満で推移した。水深50m 地点では調査開始当初から50Bq/kg-dry 未満であり、2013年以降は10Bq/kg-dry 未満で推移した。水深100m 地点では調査開始当初193Bq/kg-dry を記録し、2012年2月には315Bq/kg-dry に上昇したが、それ以降比較的緩やかな低下を続け2014年、2015年には50Bq/kg-dry 未満で推移した。

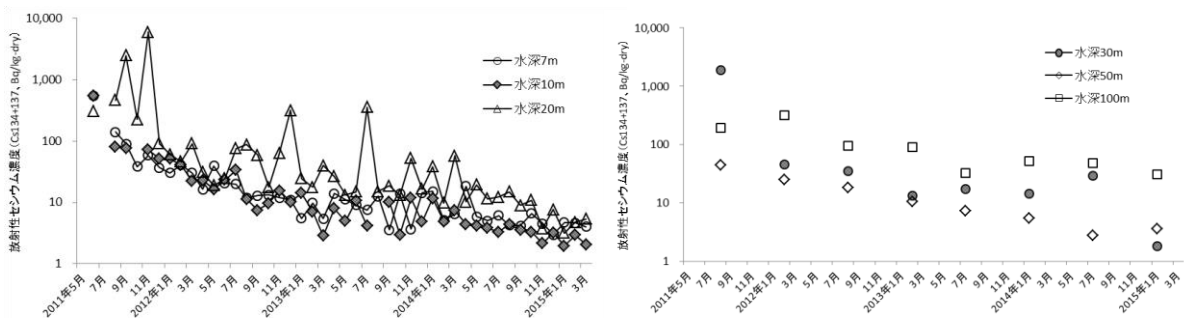


図4 磯部沖定点放射性セシウム濃度推移

鹿島沖定点では、2011年5月に水深7m 地点で500Bq/kg-dry、10m 地点で739Bq/kg-dry、20m 地点で897Bq/kg-dry だったが、同年8月には順に117、111、243Bq/kg-dry に低下した(図5)。水深7m、10m 地点は2011年に100Bq/kg-dry 前後で推移し、2012年以降100Bq/kg-dry 未満で安定して推移したが、水深20m 地点は2011年、2012年に他2地点よりもやや高い傾向があり、2012年2月に1,389Bq/kg-dry、2013年1月に380Bq/kg-dry の比較的高い値が記録されるなど異なる特徴がみられた。2013年以降は各定点で50Bq/kg-dry 未満が大部分を占め、特に水深7m、10m 地点では10Bq/kg-dry 未満の月も増加した。

原町沖沿岸部定点では、2011年8月に水深7m地点で65Bq/kg-dry、10m地点で75Bq/kg-dryを記録した一方で、20m地点では特異的に濃度が高く999Bq/kg-dryだったが、次回調査を実施した2012年2月には順に79、182、49Bq/kg-dryに変化し、ごく沿岸部ではわずかに濃度が上昇していた(図6)。以降2012年、2013年は100Bq/kg-dry未満となる月が増加する中で100-500Bq/kg-dryとなる月もみられたが、2014年以降はほとんどが50Bq/kg-dryを下回った。沖合定点では、2011年8月から年2回の頻度で調査を実施した(2012年12月~2013年3月は毎月実施)。調査開始当初、水深30m地点では91Bq/kg-dry、水深50m地点では46Bq/kg-dryだったが、以降は緩やかな低下を続け2014年、2015年は10Bq/kg-dryを下回った。調査期間を通して100Bq/kg-dryを超過することはなかった。

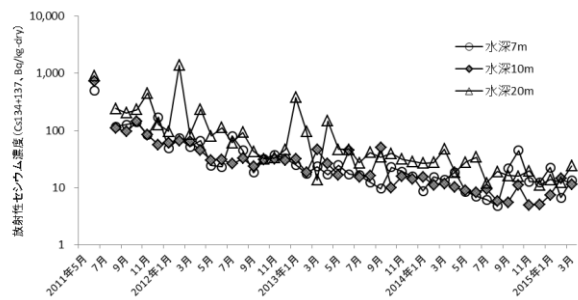


図5 鹿島沖定点放射性セシウム濃度推移

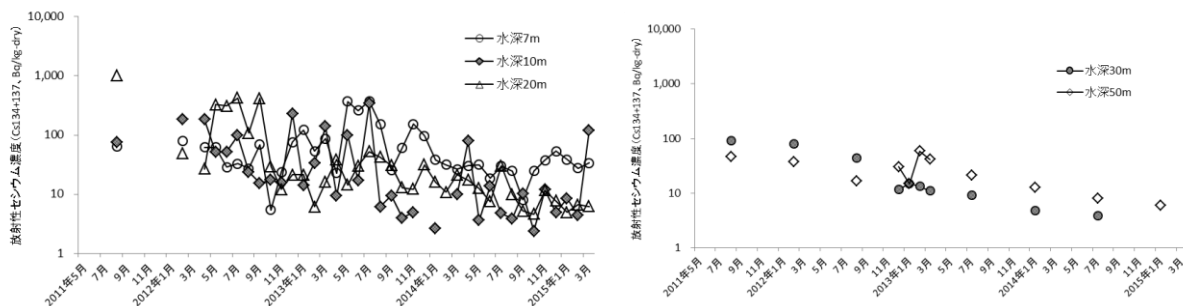


図6 原町沖定点放射性セシウム濃度推移

1F沖定点での調査は、2011年7月より水深130m地点で開始し、2012年12月に水深50m地点、2013年4月に水深7m、10m、20m地点、2013年11月に水深12m、14m地点で順次開始した。沿岸部定点では、他定線と比較して濃度が高く水深20m地点以外は100Bq/kg-dryを超過している(図7)。特に水深7m、10m地点では濃度が高い傾向があり、調査開始当初2,006Bq/kg-dry、1,500Bq/kg-dryを記録し、2013年は1,000Bq/kg-dry以上で増減を繰り返した。2014年、2015年は濃度が比較的低下したものの1,000Bq/kg-dry前後で推移している。水深12m、14m地点では、2013年に1,000Bq/kg-dry前後が記録されたが、水深10m以浅と比較し濃度が概ね半分以下であり100-500Bq/kg-dryで推移した。水深20m地点ではさらに濃度は低く、例外的に高い濃度が検出される月があるものの(2014年11月に1,018Bq/kg-dryが検出された。)、2014年、2015年は100Bq/kg-dry前後で推移した。沖合定点では、水深50m地点で調査開始当初の68Bq/kg-dryから徐々に低下して推移してきたのに対し、水深130m地点では437Bq/kg-dryから低下し、2014年、2015年は100Bq/kg-dry前後で推移した。

2F沖沿岸部定点では、2013年4月から調査を開始し、水深7m地点で894Bq/kg-dry、10m地点で1,119Bq/kg-dry、20m地点で920Bq/kg-dryだったが、翌月には順に500、1,059、237Bq/kg-dryに低下した(図8)。しかし、それ以降は増減を繰り返し明確な低下傾向がみられず、さらに水深10m、20m地点では1,000Bq/kg-dryを超過する高い濃度も検出されたが、2014年、2015年は大部分が500Bq/kg-dry未満で推移した。沖合定点では、2013年4月に水深30m地点で628Bq/kg-dry、50m地点で119Bq/kg-dryだったが、翌月には5,368、119Bq/kg-dryとなり水深30m地点で急激な濃度の上昇がみられた。水深30m地点ではそれ以降も1,000Bq/kg-dryを超過する月があったが、全体としては徐々に低下を続け2014年、2015年は200Bq/kg-dry前後で推移した。水深50m地点

では濃度の増減はみられたものの水深 30m 地点よりは比較的低く、2013 年は 80-600Bq/kg-dry、2014 年、2015 年は 100Bq/kg-dry 未満で推移した。

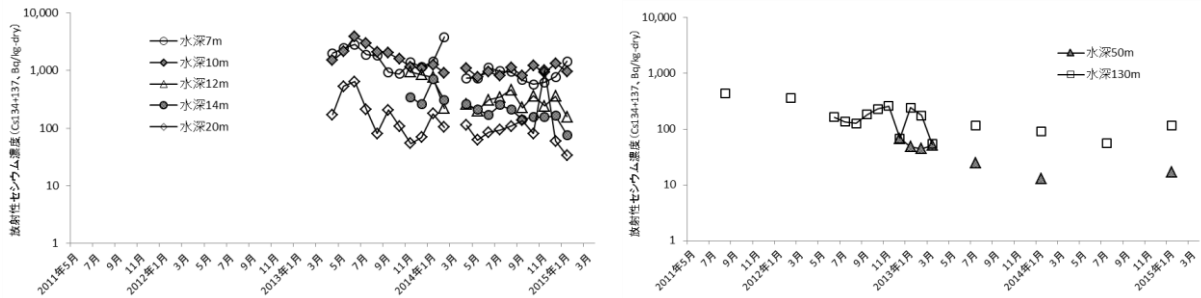


図 7 1F 沖定点放射性セシウム濃度推移

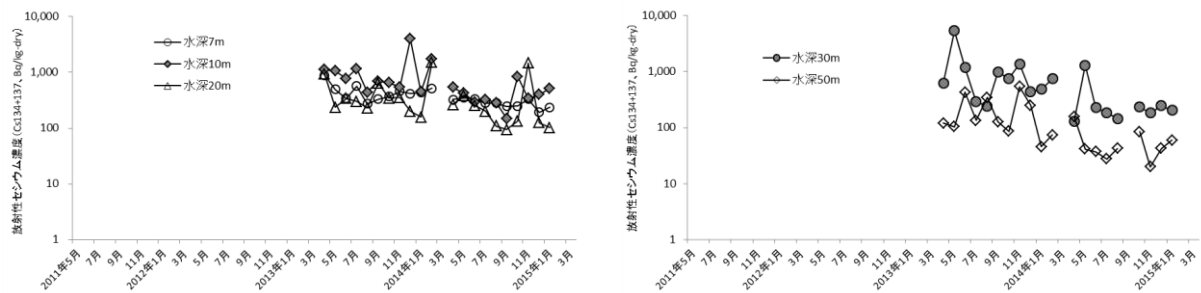


図 8 2F 沖定点放射性セシウム濃度推移

広野沖沿岸部定点では、2012 年 6 月に水深 7m 地点で 502Bq/kg-dry、10m 地点で 799Bq/kg-dry、20m 地点で 814Bq/kg-dry を記録し、2012 年は 500Bq/kg-dry 前後で推移したが、2013 年以降は徐々に低下を続け 200Bq/kg-dry 前後で推移した (図 9)。沖合定点では、2012 年 6 月に水深 30m 地点で 209Bq/kg-dry、50m 地点で 803Bq/kg-dry を記録し、以降徐々に低下を続けた。水深 30m 地点は 2012 年に 200Bq/kg-dry 前後、2013 年、2014 年は 100Bq/kg-dry 前後で推移したのに対し、水深 50m 地点では 2012 年に 500Bq/kg-dry 前後、2013 年に 300Bq/kg-dry 前後、2014 年、2015 年に 200Bq/kg-dry 前後で推移し、深所で比較的高い傾向があった。

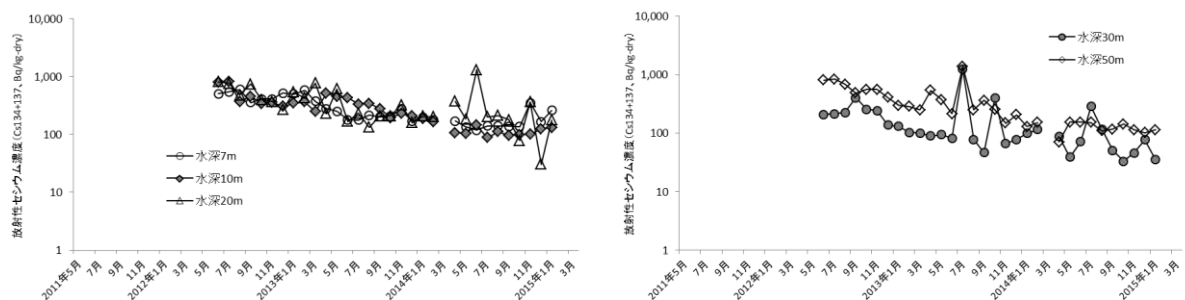


図 9 広野沖定点放射性セシウム濃度推移

久之浜沖沿岸部定点では、2011 年 8 月に水深 7m 地点で 3,311Bq/kg-dry、10m 地点で 734Bq/kg-dry、20m 地点で 3,776Bq/kg-dry を記録したが、次回調査を実施した 2012 年 2 月には順に 469、883、357Bq/kg-dry となり、水深 7m、20m 地点では急激に低下したが水深 10m 地点では上昇した (図 10)。2012 年中盤以降はどの定点でも 300Bq/kg-dry を下回り、2014 年、2015 年は 100Bq/kg-dry 未満で推移した。沖合定点では、2011 年 8 月に水深 50m 地点で 1,019Bq/kg-dry、100m 地点で

1,258Bq/kg-dry を記録したが次回調査を実施した 2012 年 2 月には 623、288Bq/kg-dry に低下した。以降は両地点とも減少傾向が続いているが低下速度は比較的緩やかであり、2014 年、2015 年は 200Bq/kg-dry 程度で推移した。

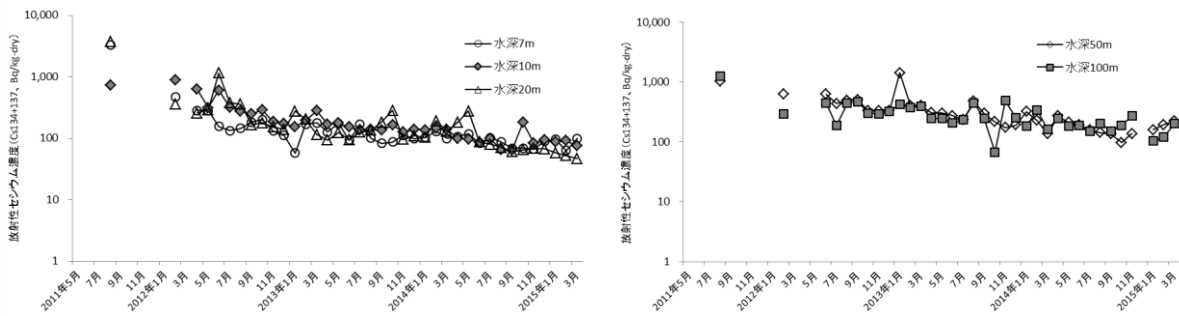


図 10 久之浜沖定点放射性セシウム濃度推移

四倉沖沿岸部定点では、2011 年 5 月に水深 7m 地点で 1,503Bq/kg-dry、10m 地点で 6,003Bq/kg-dry、20m で 9,271Bq/kg-dry を記録したが、同年 7 月には順に 470、1,557、1,645Bq/kg-dry に低下した（図 11）。以降 2011 年は水深 7m 地点で明確な低下傾向がみられず 100-1,500Bq/kg-dry 程度でばらつきがあったが、水深 10m、20m 地点では 500Bq/kg-dry 程度にまで徐々に低下した。2012 年は概ね 100-500Bq/kg-dry、2013 年から 2015 年は 50-200Bq/kg-dry 程度で推移したが、水深 7m 地点では未だ 100Bq/kg-dry 以上が多く記録されたのに対し 10m、20m 地点では大部分が 100Bq/kg-dry 未満となり、より沿岸部で濃度の低下速度が遅い傾向があった。沖合定点では、2011 年の濃度の変動に明確な傾向がみられず、また濃度の幅も非常に大きく最大で 9 月の水深 30m 地点で 8,189Bq/kg-dry、最小で 7 月の水深 125m で ND だった。2012 年は濃度のばらつきが比較的小さくなり、概ね 1,000Bq/kg-dry 未満で推移したが、水深 50m 地点ではやや高い濃度がみられた。以降は全体として緩やかに低下したがその速度に差があり、水深 30m、125m では 2015 年までで大部分が 100Bq/kg-dry 未満となっているが、50m、75m、100m では 100Bq/kg-dry を超過した。

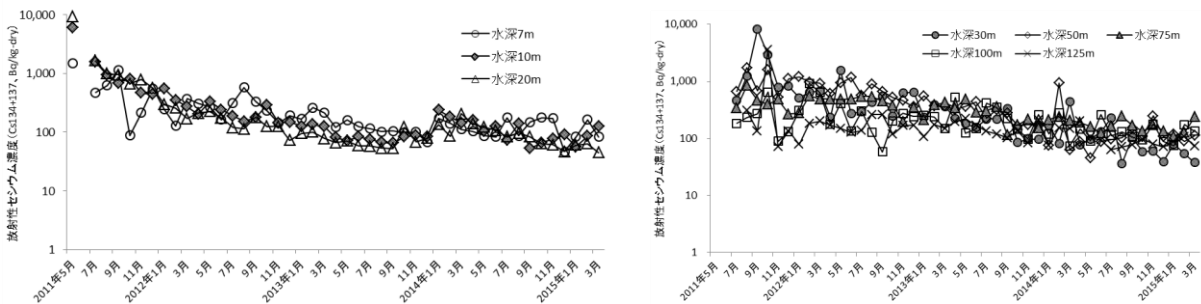


図 11 四倉沖定点放射性セシウム濃度推移

江名沖沿岸部定点では、2011 年 5 月に水深 7m 地点で 1,168Bq/kg-dry、水深 10m 地点で 2,150Bq/kg-dry、水深 20m 地点で 4,653Bq/kg-dry が記録されたが、同年 7 月には順に 934、1,363、733Bq/kg-dry に低下し、以降も徐々に低下を続けた（図 12）。2011 年から 2012 年は 3 定点で 100-500Bq/kg-dry が大部分を占めたが、2013 年から 2014 年中盤は水深 7m と 10m 地点で 100-200Bq/kg-dry、水深 20m 地点で 50-100Bq/kg-dry と低下速度に差が生じ、それ以降は水深 7m、10m 地点で 50-100Bq/kg-dry、水深 20m 地点で 50Bq/kg-dry 未満で推移した。沖合定点では、2011

年 8 月に水深 50m 地点で 799Bq/kg-dry、水深 100m 地点で 165Bq/kg-dry だったが、次回調査を実施した 2012 年 2 月には 1,088、414Bq/kg-dry とどちらの定点も濃度が上昇していた。さらに次に調査を実施した 2012 年 8 月には 952Bq/kg-dry、204Bq/kg-dry と若干の濃度の低下がみられたが、翌 9 月には 449、122Bq/kg-dry と半分程度にまで低下した。以降は明確な減少傾向はみられず、水深 50m 地点で 200-500Bq/kg-dry、水深 100m 地点で 100-200Bq/kg-dry で推移した。

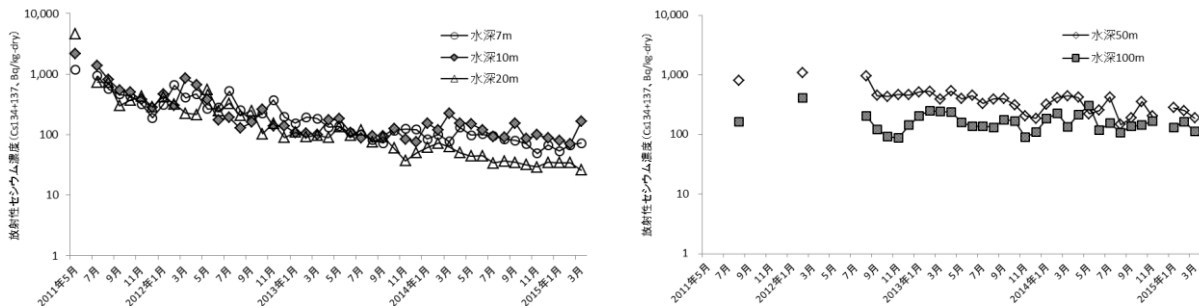


図 12 江名沖定点放射性セシウム濃度推移

勿来沖定点では、2011 年 5 月に水深 7m 地点で 486Bq/kg-dry、水深 10m 地点で 2,614Bq/kg-dry、水深 20m 地点で 2,796Bq/kg-dry を記録したが、同年 7 月には順に 761、793、1,300Bq/kg-dry に変化し水深 7m 地点でのみ濃度が上昇した（図 13）。しかし、翌 8 月には 218、907、1,466Bq/kg-dry に変化し水深 7m 地点でのみ濃度が減少した。さらに翌 9 月には 251、406、976Bq/kg-dry に変化し、以降 2012 年までは水深 7m 地点が 50-350Bq/kg-dry、10m 地点が 100-450Bq/kg-dry、20m 地点

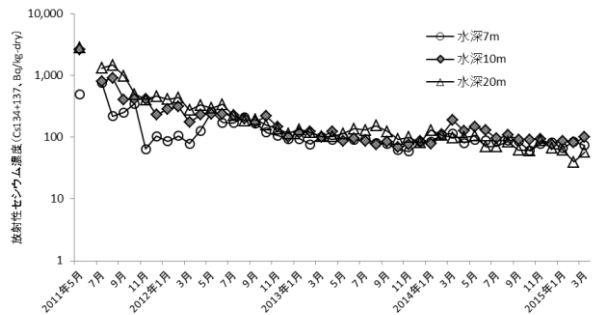


図 13 勿来沖定点放射性セシウム濃度推移

が 100-500Bq/kg-dry と変動しながら推移した。それ以降になると、水深 7m、10m 地点が概ね 100Bq/kg-dry 前後で推移し、20m 地点が 2013 年は 100-150Bq/kg-dry、2014 年は 50-100Bq/kg-dry で推移した。

放射性セシウムの鉛直分布

G.S.型表層採泥器調査による、地点別、月別の放射性セシウム濃度の鉛直分布を図 14 に示す。地点別にみると、1F 近傍に位置する水深 7m、10m 地点では濃度が高く、1F 沖水深 12m 地点と四倉、江名沖水深 50m 地点では比較的低い傾向があった。

1F 沖水深 7m 地点では、2014 年 6 月～9 月まで海底土表面から深層まで数百 Bp/kg-dry でほぼ一様な濃度であったが、2014 年 5 月、2015 年 1、2 月は深層で濃度が大きく上昇し、最も深い層で極大となった。1F 沖水深 10m 地点では、2014 年 5、6 月に比較的表層で高い濃度がみられたが、その後の調査では全ての層で一緒もしくは深層ほど徐々に濃度が上昇する傾向があった。1F 沖水深 12m では、月によって深さに伴う濃度の変化や極大となる層が異なっており、傾向が認められなかった。四倉沖水深 50m 地点と江名沖水深 50m 地点では、海底土表面から深さ 2-4cm または 4-7cm の比較的浅い層で極大となり、それ以降で濃度が低下する月が多かった。

各地点、各層における 2014 年 5 月～2015 年 2 月までの含水率の平均値を表に示す。1F 沖水深 10m 地点については、2014 年 5 月に特異的に含水率の高い海底土が採取されたために 2014 年 6 月～2015 年 2 月までで算出した値を平均値とした。四倉沖、江名沖水深 50m 地点では全ての採取層で 0.2 以上となったのに対し、1F 沖の 3 地点についてはほとんどで 0.2 を下回り、海域・水

深による差が認められた。

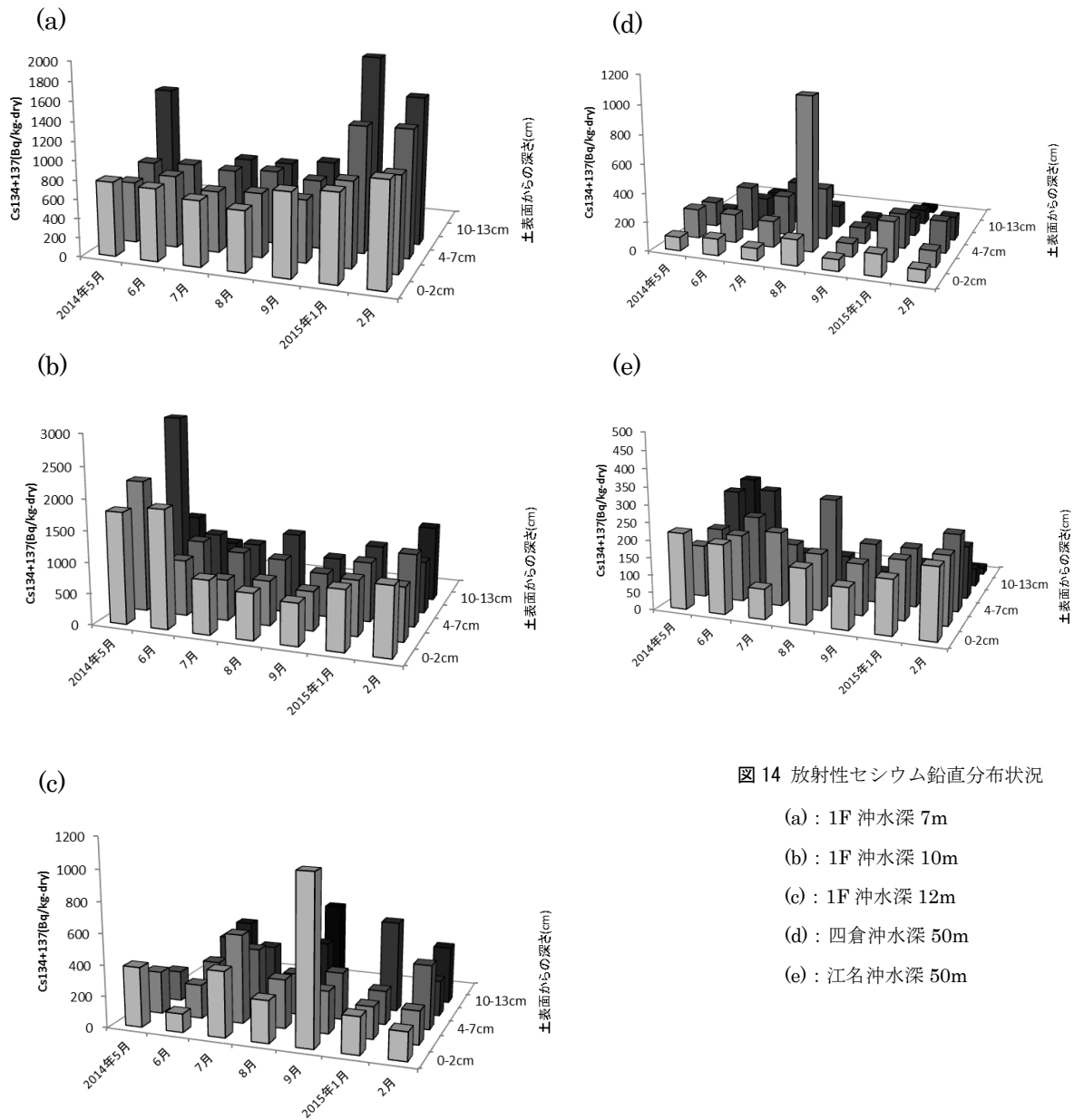


図 14 放射性セシウム鉛直分布状況

- (a) : 1F 沖水深 7m
- (b) : 1F 沖水深 10m
- (c) : 1F 沖水深 12m
- (d) : 四倉沖水深 50m
- (e) : 江名沖水深 50m

表 2 各層含水率平均値

採取地点	水深	海底土表面からの深さ					
		0-2cm	2-4cm	4-7cm	7-10cm	10-13cm	13-16cm
1F沖	7m	0.168	0.149	0.142	0.152		
	10m	0.190	0.190	0.194	0.189	0.213	
	12m	0.162	0.152	0.150	0.164	0.164	0.167
四倉沖	50m	0.222	0.228	0.303	0.232	0.242	0.242
江名沖	50m	0.243	0.228	0.220	0.213	0.235	0.238

※2014年5月～2015年2月の平均値。

1F 沖水深 10m 地点のみ 2014年6月～2015年2月の平均値。

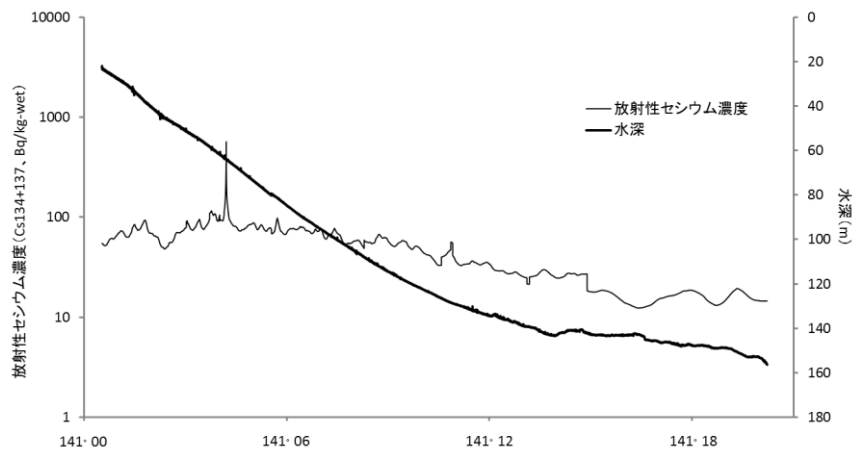
放射性セシウム濃度の連続測定による分布調査

曳航式ガンマ線計測装置での調査結果による、定線別放射性セシウム濃度の推移と、記録した地点の水深を図 15 に示す。

四倉沖東西南北方向調査定線では、西部から沖合に向かって水深 63m 地点まで 50~100Bq/kg-wet で推移した。その後水深 64m 付近において 2m 程度のごく短い範囲で局所的に濃度が上昇し、最高で 570Bq を記録した。それ以深では濃度が 100Bq/kg-wet 未満に低下し、沖合に向かうに従って低下する傾向があった。調査定線の最も東部である水深 156m 地点では 15Bq/kg-wet を記録した。

1F 沖南北方向調査定線では、概ね北緯 37 度 27.5 分を基点とし、北部と南部で放射性セシウム濃度に差が認められた。北部海域では 50Bq/kg-wet 未満を記録し、数 Bq/kg-wet を記録する地点もみられたが、南部海域では比較的濃度が高く、数十~数百 Bq/kg-wet で濃度が推移した。水深の変化により、北緯 37 度 27.3 分~25 分は海底面に段差がある磯場のような地形と考えられるが、平坦な地点と比較し放射性セシウム濃度の変動幅が大きかった。南部海域では、ごく短い範囲だが濃度が上昇し 1,000Bq/kg-wet 以上を記録した地点が複数存在し、最高で 6,170Bq/kg-wet を記録した。局所的な濃度の上昇地点は平坦な地点と磯場の両方で存在し、各々 1~3m の範囲だった。

(a)



(b)

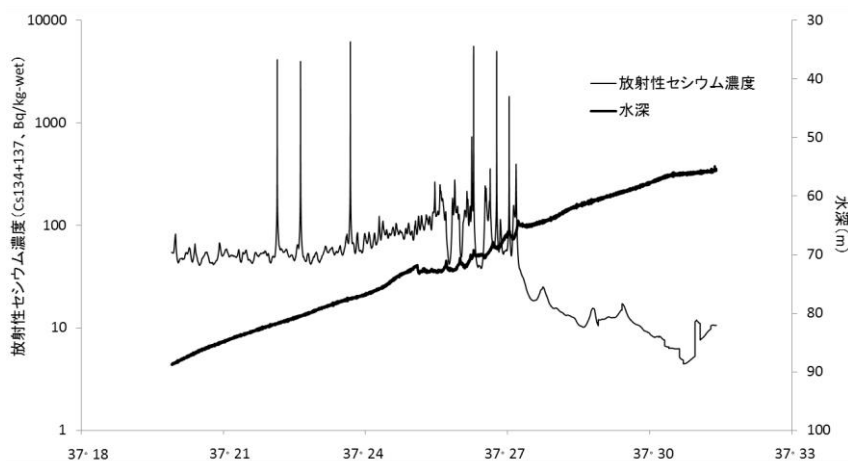


図 15 放射性セシウム線状分布状況

(a) : 四倉沖定線 (東西方向) (b) : 1F 沖定線 (南北方向)

考 察

福島県沿岸部における海底土壌中の放射性セシウム濃度の傾向として、事故当初の高濃度の分布状況から比較的短期間で大幅に低下した後、緩やかな低下が継続する傾向がほとんどの地点で見られるが、その速度や濃度の値に地点による大きな差があった。特に、1F 周辺を基準とした北側と南側の海域で明確に差が生じており、北側海域では 10Bq/kg-dry 以下の地点も増え、震災前の濃度に近づきつつある一方で、南側海域では当初から大きく濃度が低下したものの、未だ 100Bq/kg-dry を超過する地点も残っている。津旨ら⁶⁾による、表層海水における事故後の ¹³⁷Cs 濃度の拡散シミュレーション結果によると、海洋に直接漏洩した ¹³⁷Cs は沿岸沿いを南下する高濃度の部分と、外洋に運ばれる比較的 low 濃度の部分があったとされている。このため、海域により海底土の汚染度合いにも差が生じ、1F から南側の浅海域では比較的高濃度であったと考えられる。

また、福島県～茨城県沿岸部での海底上の濁質は傾斜流、陸棚波等により主に南向きに輸送される⁷⁾とする報告もあり、汚染された海底土が底層流や波浪によってまきあげられた後、南方向に拡散したことも南側の海域で濃度の低下が比較的遅れている要因として考えられる。

東西方向については、久之浜、四倉、江名沖等で、水深 50m 以深の定点の中に濃度が上昇する、もしくは低下が遅れているものがみられた。放射性セシウムは土壌粒子に吸着しやすいが、その吸着量は粒子の表面積と相関があり、より細かい粒子ほど吸着量が多いといわれている⁸⁾。また、砂質よりも泥質が優占する深所の海底土で ¹³⁷Cs 濃度が高くなるといった事例⁹⁾や、経時的に浅所から深所に濃度の高い海底土が移行したという事例¹⁰⁾がある。そのため、濃度が高く、低下が遅れている定点については、海底土の粒子に当初、多量の放射性セシウムが吸着したことに加え、細かい粒子のものが浅所から深所に、時間の経過とともに拡散していることが一因の可能性がある。しかし、水深が深くなるにつれ必ずしも濃度が上昇するというわけではなく、深所で逆に低下する定点も存在するため、単純な西から東への輸送ではなく、実際には複雑な機構により拡散していることが示唆された。

放射性セシウム濃度の鉛直分布については、地点や調査を実施した月によって分布層に多少のばらつきがあるものの、1F 近傍の浅所では表層から深層まで一様、もしくは深層に高濃度の層が分布したのに対し、四倉・江名の深所では表層もしくは中層に高濃度の層が分布し、深層では低濃度となった。傾向が異なった定点間では、水深に差があるため海底土の粒径が異なっており、含水率にも差があらわれている。放射性セシウムの鉛直方向の分布様式は、攪乱・浮遊による影響とともに、底質中の粒子間を間隙水が移動するのに伴い放射性セシウムが吸着した微細粒子が移動することが影響するとされ¹¹⁾、粒径の異なる定点間では鉛直方向の移動様式が異なっていたと考えられる。含水率が低く粒径が大きいと考えられる 1F 近傍海域の 3 点では、間隙水が表層から深層まで伝わりやすく、微細粒子の移動が容易だったために濃度の鉛直分布が一様もしくは深層で高くなり、その一方で粒径がより小さいと考えられる四倉・江名の深所では、間隙水が深層まで伝わりにくかったため表層もしくは中層で濃度が高くなった可能性が考えられる。

曳航式ガンマ線計測装置を用いた海底放射能連続測定では、調査を実施した 2 定線における詳細な分布状況が明らかとなったが、特に 1F 沖南北方向の調査では、1F よりもやや北側を基点として南北で明確な濃度差がみられた。これは上述の採泥器による調査結果と一致しており、事故当初の高濃度汚染水漏洩時の拡散状況と、その後の沿岸流による海底土粒子の移動を反映したものだと考えられる。また、ごく短い範囲での局所的高濃度地点が四倉沖定線で一点、1F 沖定線で複数点記録されたが、これらは段差のある地形と平坦な地形の両方で確認された。段差のある地形の深くなる部分で、放射性セシウム濃度が局所的に上昇する事例は他の機関が行った同様の調査でも報告されている¹²⁾。海底地形と堆積物の関係については、段差による深場に堆積した粒子

は移動しにくく、さらに他所から移動してきた粒子が集積することによりホットスポット的な役割を果たすとされ¹¹⁾、これが高濃度地点が存在する要因だと考えられる。平坦な地形に関しては、土壌粒子の表面積と放射性セシウム吸着量との関係⁸⁾から、他と比較して非常に細かい粒子が存在する地点で濃度が上昇した可能性が考えられる。しかし、局所的高濃度地点の範囲は1~2m程度と極めて狭く、測定装置のわずかな移動により放射線計数率が非常に小さくなることに加え、高濃度地点間での濃度差も500~6,000Bq程度と非常に大きいため、単に底質の違いだけではなく、小さな高線量の線源が海底に存在しその線量を記録した可能性も考えられる¹²⁾。こうした地点では別途採泥調査を実施しているが、高濃度の海底土の採取には成功しておらず、原因の特定には至っていない。

四倉沖では、東京大学生産技術研究所と共同による同様の調査を2012年11月に行っている¹³⁾。2012年の結果は、水深40~50mで濃度が最高値に達し、さらに沖合では水深とともに濃度が低下した。また、水深約70m以浅では¹³⁴Csは100Bq/kg-wet以上、¹³⁷Csは200Bq/kg-wet以上を記録している。2014年の結果と比較すると、全体的に濃度の低下がみられるとともに、特に浅所において¹³⁴Csの低下のみではなく¹³⁷Csについても大幅に低下していることから、海底土の放射性セシウム濃度の低下は物理的半減期によるものと、拡散等他の影響による部分も大きいことが示された。

要 約

1. 海底土壌の放射性物質モニタリング調査について、2011年から2015年までの結果にもとづき分布状況や濃度の推移についてとりまとめ、同時に放射性物質の鉛直分布調査や、海底曳航型連続測定調査による結果についても報告した。
2. 放射性セシウム濃度は事故後、比較的短期間で大幅に低下した後、緩やかな低下傾向が継続している。
3. 放射性セシウム濃度は海域によって明確に異なっており、1Fより北側の海域では大部分が10Bq/kg-dry以下だった一方、南側では100Bq/kg-dry以上のものもみられた。事故後、海洋に直接漏洩した汚染水の拡散経路と、海底土壌粒子が底層流などにより南方に輸送されたことが影響していると考えられた。
4. 沖合の定点では放射性セシウム濃度の低下が遅れている、または上昇している地点がみられ、沖合へ海底土壌粒子が拡散していると考えられた。
5. 放射性セシウム濃度の鉛直分布は、浅所で表層から深層まで一様であったのに対し、深所では表層で高濃度となる傾向があった。粒度による間隙水の移動様式の差異が影響している可能性が考えられた。
6. 海底放射能連続測定調査では、海域による濃度分布の傾向等、モニタリング調査と一致する結果が得られた。また、非常に狭い範囲の局所的な高濃度地点が記録された。

文 献

- 1) 東京電力株式会社：東北地方太平洋沖地震の影響による福島第一原子力発電所の事故に伴う大気および海洋への放射性物質の排出量の推定について、東京電力プレスリリース 2012年。
- 2) 島村信也・根本芳春・佐藤美智男：放射性物質が海面漁業に与える影響(3)、平成23年度福島県水産試験場事業概要報告書、49-50(2012)。
- 3) 島村信也：海水、海底土のモニタリング調査、平成24年度福島県水産試験場事業概要報告

- 書、50-51 (2013).
- 4) 島村信也：海水、海底土のモニタリング調査、平成 25 年度福島県水産試験場事業概要報告書、66-67 (2014).
 - 5) ソートン ブレア・矢野裕亮・浦環：曳航式ガンマ線計測装置の開発、海洋調査技術、25 (2)、1-6 (2013).
 - 6) 津旨大輔・坪野考樹・青山道夫・廣瀬勝巳：福島第一原子力発電所から漏洩した ^{137}Cs の海洋拡散シミュレーション、電力中央研究所報告、V11002 (2011).
 - 7) 八木宏・杉松宏一・西敬浩・川俣茂・中山哲巖・宇田川徹・鈴木彰：常磐沿岸域における底層環境・懸濁物動態に関する現地観測、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、69 (2)、I_1046-I_1050 (2013).
 - 8) He Q., D. E. Walling : Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments、 J. Environ. Radioact. 、 30 (2)、117-137 (1996).
 - 9) 及川真司・渡部輝久・高田兵衛・鈴木千吉・中原元和・御園生淳：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 (6)、455-474 (2013).
 - 10) 葉葺久尚・石山央存・横尾闘太・大野峻史・阿部綾・古俣修・丸田文之：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 (2013).
 - 11) 添盛晃久・小豆川勝見・野川憲夫・桧垣正吾・松尾基之：東京湾底質における福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムの濃度変化、分析化学、62 (12)、1079-1086 (2013).
 - 12) 独立行政法人海上技術安全研究所：1F 近傍の放射性物質分布の把握、平成 26 年度 放射性物質測定調査委託費（海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究）事業成果報告書、21-67 (2015).
 - 13) 藤田恒雄・Blair Thornton・島村信也：曳航式放射線測定装置を用いた海底土の放射線測定、平成 24 年度福島県水産試験場事業概要報告書、52-53 (2013).