海生研研報, 第22号, 17-24, 2016 Rep. Mar. Ecol. Res. Inst., No. 22, 17-24, 2016

特集 海洋環境・水産物の放射能の推移-事故後5年を経過して-

日本全国の海水・海底土中放射性Csの長期変遷

高田兵衛^{*1}[§] • 日下部正志^{*1} • 稲富直彦^{*1} • 長谷川一幸^{*1} • 池上隆仁^{*1} • 渡邉幸彦^{*2} • 渡部輝久^{*3} • 鈴木千吉^{*3} • 御園生 淳^{*3} • 森薗繁光^{*3}

Long Term Distribution of Radiocesium in the Japanese Coastal Seawater and Sediments

Hyoe Takata^{*1§}, Masashi Kusakabe^{*1}, Naohiko Inatomi^{*1},Kazuyuki Hasegawa^{*1}, Takahito Ikenoue^{*1}, Yukihiko Watanabe^{*2}, Teruhisa Watabe^{*3}, Chiyoshi Suzuki^{*3}, Jun Misonoo^{*3}, Shigemitsu Morizono^{*3}

要約:海洋生物環境研究所は、漁場環境の海洋環境放射能モニタリングを目的とした国の委託事業の 一環として、1983年度から全国の原子力発電所等の前面海域における海洋環境放射能調査を行ってい る。また、2011年3月の東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故を受けて同発電所周辺海域での重 点的な調査も行ってきた。本報告ではこれらの調査結果をもとに、放射性Cs(¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs)を中心に、 海水、海底土中の人工放射性核種濃度が1983年以降、どのような変遷をたどったのかについてまとめた。 海水においては、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故によって、日本の広い範囲で一時的な ¹³⁷Cs濃度の上昇が確認されたものの、その後は漸減傾向を続けてきた。2006~2010 年度(5年間)の 海水中の¹³⁷Cs濃度平均は1.6mBq/L(濃度範囲:1.1~2.5mBq/L)であった。2011年の東京電力株式会社 福島第一原子力発電所事故直後の調査では、同事故由来の¹³⁴Cs及び¹³⁷Csを東日本の太平洋側を中心に 検出した。その後は、¹³⁴Csの検出頻度はその短い半減期(約2年)と海洋拡散により減少した。¹³⁷Csに ついては、同原発から10km圏内の表層水中の濃度は、事故から4年経過した2015年度調査においても、 事故前より一桁程度高い値で推移していたが、30km圏外の濃度は事故前の水準に近づきつつある。 海底土中¹³⁷Cs 濃度は1983年の調査開始以来、ゆるやかな減少を続けてきたが、同発電所周辺海域に

おいては事故直後から上昇し、当所が調査を実施している同発電所周辺沖合海域において2011年9月に はほとんどの観測点で最高値に達した(8~580 Bq/kg-dry)。以降,海底土中¹³⁷Cs濃度変動はあるものの、 減少している。

キーワード:海水,海底土,¹³⁴Cs,¹³⁷Cs,東電福島第一原子力発電所事故

まえがき

(公財)海洋生物環境研究所は,漁場環境の海洋 環境放射能モニタリングを目的とした国の委託事 業の一環として,1983年度から全国の原子力発電 所の前面海域(以下,原子力発電所等周辺海域と 称する)において,人工放射性核種の濃度調査を 行っている。また,2011年3月の東京電力株式会 社福島第一原子力発電所(以後,東電福島第一原 発と略す)事故により多量の放射性核種が陸域の みならず大気及び海洋環境中に放出されたため, 同原発周辺海域(以後,東電福島第一原発モニタ リング海域と称する)においても人工放射性核種 の分布や挙動を明らかにする調査を実施してい る。これらの調査については,既に詳細な報告が なされている(高田・鈴木,2003;及川,2012;及川 ら,2013,2014;Oikawa *et al.*,2013,2015;Kusakabe *et al.*,2013;日下部,2014;Watabe *et al.*,2013;

(2016年7月22日受付, 2016年10月18日受理)

^{*1} 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

[§] E-mail: takata@kaiseiken.or.jp

^{*2} 公益財団法人海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜四丁目7-17)

^{*3} 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局(〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階)





高田,2016;高田ら,2013,2015; Takata et al., 2015,2016;磯野ら,2015a,2015b)。本報告ではこ れらの調査結果をもとに、1983年以降,海水,海 底土中の人工放射性核種濃度がどのような変遷を たどったのかを紹介する。なお、本報告は、上記 の諸報告書と原子力規制庁の委託により当研究所 が実施した「平成27年度原子力施設等防災対策等 委託費(海洋環境における放射能調査及び総合評 価)事業」の成果の一部を併せてとりまとめたも のである。

方 法

調査海域と測点 調査海域,測点配置,試料採取 の方法,放射性核種分析法等は,各調査の開始当 初より変わっていないので(及川ら,2014;磯野 ら,2015a,2015b),同様に継続されており,以 下では,2015年度の調査概要を示す。

原子力発電所等周辺海域においては全国に合計 15海域を設定し(第1図A),各海域にそれぞれ4 測点が設けられている。これらは、1983年以降の 調査開始時に設定された定点であり2015年度も引 きつづき同一測点で調査を行った。1991年度から は青森県六ヶ所村に建設が進む使用済み核燃料再 処理施設の本格稼働を前に青森県から岩手県の沖 合海域において22測点を設けて調査を行っている (第1図B)。東電福島第一原発事故後、新たな観 測点が東電福島第一原発モニタリング海域に設定 されており、同原発から30km圏外に位置する沖 合海域32点と外洋海域10点(第2図A),10km圏 内の近傍・沿岸海域7点において調査を行った(第 2図B)。

海水試料の採取 原子力発電所等周辺海域では 2015年5~6月に1回,1試料(各測点各層で得られ た試料)当り100~200Lの海水をバンドン型採水 器で採取した。採水は同一測点において,表層(海 面から1m下)と海底面から10~40m上の2層につ いて行った。東電福島第一原発モニタリング海域 のうち沖合海域では5月,7~8月,10~11月及び 2016年1~2月の4回,外洋海域では5~6月,10月 の2回, 近傍・沿岸海域では毎月1回(2016年4月 ~2017年3月),1試料当り60~80Lの海水をバン ドン型採水器で採取した。沖合及び外洋海域では 各測点において2~7層、近傍・沿岸海域では表層 (海面から0.5m下)のみから採水を行った。いず れの海水試料も濾過はせず,海水1L当り2mLの 6M塩酸または濃硝酸を採水直後に添加し、冷暗 所に保管した。

海底土試料の採取 原子力発電所等周辺海域では 全測点において,海水試料採取後にエクマンバー ジ採泥器またはボックスコアラー(離合社製:一 辺45cm四方ステンレス製のボックスにより最大



第2図 東電福島第一原発周辺の海域(東電福島第一 原発モニタリング海域)に設定した測点(2015 年度)。A:東電福島第一原発から30km圏外の 測点(沖合海域と外洋海域),B:東電福島第一 原発から10km圏内の測点(近傍・沿岸海域)。

40cm程度の深さの柱状試料が採取される)で海底 土を採取した。東電福島第一原発モニタリング海 域では沖合海域の32測点において,海水試料採取 後にマルチプルコアラー(離合社製:内径8cmの アクリルパイプ8連により柱状試料を採取し水密 を保つ機構により攪乱の少ない試料が採取され る)で海底土を採取した。各採泥器で採取した海 底土の表面から深さ3cmまでの層を約2.5kg(マル チプルコアラーでは2.5kgになるまで複数回採取 を実施)分取し,放射能測定用試料とした。海底 土試料は分析に供するまで,冷蔵または冷凍保存 した。



第3図 1983~2015年度に原子力発電所等周辺海域の 表層水で観測された¹³⁷Cs濃度。2011年度にベー 夕線計測した試料には¹³⁷Csの他,¹³⁴Csが含ま れる可能性があるため,一部の結果について は,便宜上,¹³⁴⁺¹³⁷Csと標記した。各値の縦棒 は計数誤差(1σ)を示す。ND(検出下限値以 下)はプロットせず。



第4図 東電福島第一原発モニタリング海域の海水中 で観測された¹³⁷Cs濃度の経日変化。10km圏内 での調査は2013年11月から開始した。各値の 縦棒は計数誤差(1σ)を示す。測点の括弧内 は同原発からの距離を示す。Takata et al.(2016) の結果に原子力規制庁の公表値(原子力規制 庁,2016)を加えグラフを修正した。

試料の放射能分析 海水試料の¹³⁷Csは放射性セシ ウム分析法(文部科学省, 1976)に従って化学分離 により調製した測定試料をガンマ線スペクトロメ トリー(文部科学省, 1992)で定量した。海底土 は乾燥処理した後プラスチック製容器へ一定量分 取し,ガンマ線スペクトロメトリーにより¹³⁷Csを 定量した。各試料の定量下限値は海水では¹³⁴Cs及 び¹³⁷Csは0.3~1.0mBq/L,海底土では約0.7Bq/kgdryである。これら分析法の詳細は及川ら(2013) を参照されたい。



第5図 東電福島第一原発モニタリング海域の海水中 で観測された¹³⁷Cs濃度の経年変化。各値の縦 棒は計数誤差(1σ)を示す。Oikawa et al. (2013) 及びTakata et al. (2016)の結果に原子力規制 庁の公表値(原子力規制庁, 2016)を加えた。



 第6図 海水中¹³⁷Csの存在量を求めた対象海域。沖合海域の大陸棚上27点を対象(調査対象海域面積: 6,160 km²,容積:753 km³)とした。Takata et al. (2016)の結果から引用した。

結果と考察

海水中の¹³⁷Cs-原子力発電所等周辺海域 本調査 を開始した1983年度から2015年度まで原子力発電



第7図 調査対象海域中の海水中¹³⁷Cs存在量の時系列 変化。数値はTakata *et al*. (2016)の結果から 引用した。

所等周辺海域における表層及び下層海水に含まれる¹³⁷Csの経年変化を第3図に示した。調査開始以 来,海水に含まれる¹³⁷Csの分析は化学分離・精製 後,塩化白金酸セシウムとして測定用試料を調製 し,低レベルまで定量できるベータ線測定法を適 用してきた。しかし,東電福島第一原発事故によっ て,核分裂生成物の一つとしての¹³⁷Csとほぼ同量 の放射能量(放射能比:~1)の放射化生成物の¹³⁴Cs (半減期2年)も放出された。同法では¹³⁴Csと¹³⁷Cs のベータ線を区別できないため,2012年度以降は 全てガンマ線スペクトロメトリーによる測定を 行っており,¹³⁴Csと¹³⁷Csを区別して定量してい る。ベータ線計測による方法を用いた2011年度の 結果については,一部の試料を¹³⁴⁺¹³⁷Csとして区 別している。

表層海水に含まれる¹³⁷Csは本調査開始時より継続して検出されており、全海域を通して¹³⁷Cs濃度 はゆるやかな減少傾向を示していた。これらは、 1945~1965年に主に北半球で実施された大気圏核 爆発実験に起因している。また、1986年4月に起 こったチェルノブイリ原子力発電所事故の影響を 受けて一時的に海水に含まれる¹³⁷Cs濃度の上昇が 確認されたが、調査当時はベータ線計測による方 法であったため、¹³⁴Csの存在を確認できていない が、翌年の1987年度の調査ではチェルノブイリ原 子力発電所事故前の¹³⁷Cs濃度レベルに戻っている ことを確認した。チェルノブイリ原子力発電所事 故以降の¹³⁷Csの濃度レベルや漸減傾向は各海域で 大きな差は認められず、全国的にほぼ同じで、東 電福島第一原発事故前の原子力発電所等周辺海域



第8図 1983~2015年度に原子力発電所等周辺海域の 海底土表層3cmで観測された¹³⁷Cs濃度。ND(検 出下限値以下)はプロットせず。各値の縦棒 は計数誤差(1σ)を示す。及川ら(2013)の 結果に原子力規制庁の公表値(原子力規制庁, 2016)を加えた。

において,2006~2010 年度(5年間)の海水中の ¹³⁷Cs濃度平均は1.6mBq/L(濃度範囲:1.1~ 2.5mBq/L)であった。漸減傾向については,対 数近似式を当てはめて見かけの半減期を求める と,¹³⁷Csの物理的半減期(30.1年)よりも短い12 ~20年程度(及川ら,2013)であった。2011年度 は東電福島第一原発事故により,海水中の¹³⁷Cs濃 度は宮城,福島第一,福島第二及び茨城海域を中 心に上昇した。その後2015年度までの海水中の

海水中の¹³⁷Cs-東電福島第一原発モニタリング海域 東電福島第一原発モニタリング海域の東電福 島第一原発から10km圏内での近傍・沿岸海域に おける表層水の¹³⁷Cs濃度を第4図に示す。表層水 の¹³⁷Cs濃度は、2015年1月に5.3(測点T-D5)~ 140mBq/L(測点M-101)の範囲にあり、その一 年後の2016年1月は8.2(測点T-D9)~54mBq/L(測 点M-101)の範囲にあり東電福島第一原発近傍の 測点では事故前5年間(2006~2010年度:1.3~ 2.5mBq/L)の濃度より1~2桁高い水準にあった。

次に東電福島第一原発モニタリング海域の東電 福島第一原発から30km圏外で観測された¹³⁷Cs濃 度を第5図に示した。なお,図には事故前5年間 (2006~2010年度)に原子力発電所等周辺海域の 宮城,福島第一,福島第二及び茨城海域で観測さ れた¹³⁷Cs濃度の平均値(全国調査で得られた平均 と同じく1.6mBq/L)を実線で示した。海水中の ¹³⁷Cs濃度は,事故後大きく上昇し,表層水の¹³⁷Cs 濃度は,2011年4月に最高値の186,000mBq/Lが観 測された後,急速に低下した。その後は減少傾向 が緩やかになり,2013年度に10mBq/L前後まで低 下し,2014年度以降は最大値が10mBq/Lを超える ことは無かった。東電福島第一原発モニタリング 海域の東電福島第一原発から30km圏外での調査 における¹³⁷Cs濃度の平均値は2014年度で 2.44mBq/L,2015年度は2.35mBq/Lであり,事故 前5年間の平均値(1.6mBq/L)に近づきつつある。

更に、福島県並びに近隣県の沖合(第6図:北 は宮城県金華山沖から南は千葉県銚子沖にかけ て, 陸から概ね30kmから90kmの沖合) において, 大陸棚上の27点の内側域を対象(調査対象海域面 積: 6160 km², 容積: 753 km³) として, 27測点で の海水中¹³⁷Cs濃度を用いて、海水中¹³⁷Cs存在量を 推定した(Takata et al., 2016)。2011年度5月初旬 の調査対象海域における海水中¹³⁷Cs存在量は 283TBaであった(第7図)。この値は2011年3月か ら4月にかけて北太平洋に付加(大気経由及び直 接流入)された東電福島第一原発事故由来の¹³⁷Cs 量 (16~19PBq: Aoyama et al., 2016) のうち, 1.5 ~1.8%が同調査海域の海水中に存在していたこと になる。その後は急激に減少し、5ヶ月で20分の1 (14.9TBq: 2011年10月) まで減少し, 以降はほ ぼ横ばいに推移し、事故後4年の2015年2月には 1.89TBqまで減少し、この値は事故前の調査対象 海域の存在量(1.1TBq)と近づいている事が明 らかとなった。しかしながら、同原発近傍・沿岸 において,事故前に比べ海水中¹³⁴Cs及び¹³⁷Cs濃 度は高い値を観測していることから、海水におい ては広範囲にその濃度レベルを注視していく必要 がある。

海底土中の¹³⁷Cs-原子力発電所等周辺海域 1983 年度から2015年度までの調査結果のうち,海底土 中¹³⁷Cs濃度の経年変化を第8図に示した。海底土 に含まれる¹³⁷Csは,海水の場合とは異なり,同一 海域内においても濃度にばらつきがあった。濃度 は,海底土の性状により異なる傾向があり,泥質 の場合に高く,砂質の場合に低い傾向が見られ た。例えば,北海道,新潟及び福井海域は泥や中 細砂混じりの泥の場合が多く,その他の海域は砂 質あるいは泥混じり中細砂が多い砂質であるた め,¹³⁷Cs濃度は前者で高く,後者で低い傾向があっ



第9図 東電福島第一原発モニタリング海域の海底土表層3cmで観測された¹³⁷Cs濃度の水平分布。Kusakabe *et al*. (2013)及び日下部(2014)の結果に原子力規制庁の公表値(原子力規制庁, 2016)を加えた。



第10図 東電福島第一原発モニタリング海域の海底土表層3cmで観測された各測点における¹³⁷Cs濃度の経年変化。太 字(黒)線は各調査での全測点の幾何平均値を示している。Kusakabe *et al.* (2013)及び日下部(2014)の結 果に原子力規制庁の公表値(原子力規制庁, 2016)を加えた。

た(及川ら,2013)。ただし,全国の海域におけ る海底土の¹³⁷Cs濃度の経年変化は調査開始当初か ら漸減傾向がみられた。また,海底土では,日本 海側の海域の表層海水に見られたチェルノブイリ 原子力発電所事故に起因すると考えられる¹³⁷Csの 顕著な上昇はいずれの海域でも確認されていない ことがわかっている(及川ら,2013)。東電福島 第一原発事故前5年間(2006~2010年度)の原子 力発電所等周辺海域における海底土中の¹³⁷Cs濃度 は,0.72~8.0Bq/kg-dryの範囲(検出下限値以下 (ND)を除く)で,平均値は2.1Bq/kg-dryであった。

海底土中の¹³⁷Cs-東電福島第一原発モニタリング 海域 東電福島第一原発事故から2ヶ月を経過し た2011年 5月より海底土の採取を開始し,その後, 2ヶ月毎あるいは3ヶ月毎の継続的な調査を行って きた。同発電所周辺沖合海域においては事故直後 から上昇し,当所が調査を実施している同発電所 周辺沖合海域において2011年9月にはほとんどの 観測点で最高値に達した(8~580 Bq/kg-dry)。

変動の詳細について、2011年5月から2016年1-2 月までに得られた¹³⁷Cs濃度の水平分布及び時系列 変化をそれぞれ第9図及び第10図に示す。事故後 半年間は測点間にばらつきがあるものの,¹³⁷Cs濃 度は上昇傾向にあり、その後は減少傾向に転じて いた。調査を行った海域の中で低い濃度を示した のは北側(宮城県・金華山沖)と南側(千葉県・銚 子沖)の測点(A1, A3, L1及びL3)であった。一方, ¹³⁷Csが高濃度を示した測点は東電福島第一原発に 近接した測点ではなく、2011年5~9月では、北側 の測点 (B1, B3, C1及びD1) や, 南側の測点J1 などであった (Kusakabe et al., 2013)。それ以降 は水平分布に関しては宮城県沖から茨城県沖に位 置する岸に近い測点を中心(例えばD1, E1, G0, I0及びI1) に100~200Bq/kg-dryの高濃度が観測さ れた。一方,仙台湾の測点B3は減少傾向にあり, これは海底土(堆積物)の水平移動又は生物攪乱 による表層の¹³⁷Csの下方への移動(即ち,海底面 に存在する¹³⁷Csの海底土下層への移動)又はその 両方が起こることに起因すると考えられる(日下 部,2014)。また,2011年9月から2016年1~2月ま での全測点の¹³⁷Cs濃度について幾何平均を計算し た結果(第10図),事故後約4年半で幾何平均値は 47Bq/kg-dryから13Bq/kg-dryまで指数関数的に減 少していた。実際は、¹³⁷Csは堆積物の表層3cmよ りも深い位置にも存在し、また調査海域よりも外 (遠方)にすでに輸送された分も存在していると
 考えられる(Black and Buesseler, 2014; Buesseler,
 2014; Otosaka and Kato, 2014)が、海底土に含
 まれる¹³⁷Cs濃度は海水ほど容易に減少しないた
 め、今後も海水と同様に注意深く継続して監視す
 る必要がある。

謝 辞

本報告で用いたデータは、科学技術庁、文部科 学省及び原子力規制庁から受託した「原子力施設 等防災対策等委託費(海洋環境における放射能調 査及び総合評価)事業」の成果の一部である。本 事業実施に際し、全国漁業協同組合連合会、各道 県漁業協同組合連合会及び地元漁業協同組合の皆 様に、ご理解とご協力を賜った。2015年度の試料 採取では、海洋エンジニアリング株式会社、海洋 試料分析では、公益財団法人日本分析センター、 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、株式 会社環境総合テクノス及び一般財団法人九州環境 管理協会の皆様のご協力を頂いた。記して心より 感謝いたします。

引用文献

- Aoyama, M., Kajino, M., Tanaka, T.Y., Sekiyama, T.T., Tsumune, D., Tsubono, T., Hamajima, Y., Inomata, Y. and Gamo, T. (2016). ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the North Pacific Ocean derived from the TEPCO Fukushima Dai–ichi Nuclear Power Plant accident, Japan in March 2011. Part two: estimation of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs inventories in the North Pacific Ocean. J. Oceanogr., **72**, 67–76.
- Black, E.E., and Buesseler, K.O. (2014). Spatial variability and the fate of cesium in coastal sediments near Fukushima, Japan. *Biogeosciences*, 11, 5123-5137.
- Buesseler, K.O. (2014). Fukushima and ocean radioactivity. *Oceanogr.*, **27**, 92–105.
- 原子力規制庁(2016). 放射線モニタリング情報. http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/428/list-1.html (2016年9月7日に閲覧).
- 磯野良介・高田兵衛・山田 裕・稲富直彦・渡部 輝久・鈴木千吉・御園生 淳・森薗繁光・日 下部正志(2015a).福島第一原子力発電所事 故後3年間における日本周辺の海水及び海底

土中の¹³⁷Cs及び⁹⁰Sr濃度の推移. 海生研研報, **No. 20**, 57-65.

- 磯野良介・稲富直彦・高田兵衛・長谷川一幸・池 上隆仁・渡邉幸彦・山田 裕・渡部輝久・鈴 木千吉・御園生 淳・森薗繁光・日下部正志 (2015b).福島第一原子力発電所事故後4年間 における日本周辺の海水及び海底土中の¹³⁷Cs 及び⁹⁰Sr濃度の推移.海生研研報, No. 21, 23-32.
- 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.
- 日下部正志(2014).福島県および近隣県沖海域に おける海水・海底土中の放射性核種濃度の時 系列変化.海洋と生物,**36**,277-282.
- 文部科学省(1976). 放射能測定法シリーズ3, 放 射性セシウム分析法,昭和51年改訂. 文部科 学省,東京, 1-56.
- 文部科学省(1992). 放射能測定法シリーズ7, ゲ ルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペ クトロメトリー, 平成4年改訂. 文部科学省, 東京, 1-362.
- 及川真司(2012). 海洋環境試料の放射能分析. 海 洋と生物, **34**, 206-216.
- 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 Prefecture, Japan, *Biogeosciences*, 10, 5031–5047.
- 及川真司・高田兵衛・磯山直彦・稲富直彦・渡部 輝久・鈴木千吉・御園生 淳・森薗繁光・日 下部正志(2014).日本周辺海域環境での⁹⁰Sr 及び¹³⁷Cs濃度の長期的推移-昭和58年度~平 成24年度までの調査結果-.海生研研 報, No.19, 1-15.
- 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.
- Oikawa, S., Watabe, T. and Takata, H. (2015).

Distributions of Pu isotopes in seawater and bottom sediments in the coast of the Japanese archipelago before and soon after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. J. Environ. Radioact., **142**, 113–123.

- Otosaka, S. and Kato, Y. (2014). Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories. *Environ. Sci. Process. Impacts*, 16, 978–990.
- 高田和男・鈴木 譲(2003).わが国の原子力発電 所周辺海域における海産生物,海底土および 海水中¹³⁷Cs濃度の長期傾向.保健物理,**38**, 128-139.
- 高田兵衛(2016). 放射性セシウムの河川を介し た陸域からの海洋環境への影響について. 海 洋と生物, **38**, 315-320.
- Takata, H., Hasegawa, K., Oikawa, S., Kudo, N., Ikenoue, T., Isono, R.S. and Kusakabe, M. (2015). Remobilization of radiocesium on riverine particles in seawater: The contribution of desorption to the export flux to the marine environment. *Mar. Chem.*, **176**, 51–63.
- 高田兵衛・帰山秀樹・喜多村 稔・横田瑞郎・池 上隆仁・日下部正志(2015).海洋環境におけ る動物プランクトン中の東電福島第一原発由 来放射性Csの動態.海洋と生物, **37**, 310-318.
- Takata, H., Kusakabe, M., Inatomi, N., Ikenoue, T. and Hasegawa, K. (2016). The contribution of sources to the sustained elevated inventory of ¹³⁷Cs in offshore waters east of Japan after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *Environ. Sci. Technol.*, **50**, 6957– 6963.
- 高田兵衛・及川真司・渡部輝久・吉川貴志・御園生淳 ・日下部正志(2013).福島県沖合を中心とし た海洋放射能汚染の現状.海洋と生物,36, 269-282.
- Watabe, T., Oikawa, S., Isoyama, N., Suzuki, C., Misonoo, J. and Morizono, S. (2013).
 Spatiotemporal distribution of ¹³⁷Cs in the sea surrounding Japanese Islands in the decades before the disaster at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011. Sci. Total Environ., 463-464, 913-921.