

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 4 日現在

機関番号：11101

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24110004

研究課題名(和文) 海洋および海洋底における放射性物質の分布状況要因把握

研究課題名(英文) Understanding the mechanisms controlling the environmental dynamics of radionuclides released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in the ocean.

研究代表者

山田 正俊(YAMADA, MASATOSHI)

弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授

研究者番号：10240037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 107,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、福島第一原発事故により放出された放射性物質の海洋および海洋底における分布状況と要因を把握し、モデル化を図ることである。海水中の水平及び断面観測を行い、北太平洋における原発事故由来放射性セシウム輸送の三つの主要な経路と輸送の様相を明らかにした。北太平洋海流によって表面輸送される経路、亜熱帯モード水の沈み込みに伴って亜表層を南に運ばれる経路及び中央モード水の沈み込みに伴って海洋内部に運ばれる経路である。また、原発近傍海域における放射性セシウム、H-3、Sr-90、I-129、Puの動態を明らかにした。外洋域における粒状態放射性セシウムの鉛直輸送と陸棚斜面での水平輸送を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant(FNPP1) accident has resulted in a substantial release of radionuclides to the atmosphere and ocean, and has caused extensive contamination of the environment. The objectives of this study were to collect seawaters, marine sediments and settling particles in Japanese coast and North Pacific Ocean and to understand the condition and factor of the radionuclide distribution therein. FNPP1-derived radiocesium spread eastward in the surface water across the mid-latitude North Pacific with a speed of 7 km/day and it had been transported into the ocean interior due to formation/subduction of subtropical mode water and central mode water. The release of Pu isotopes from the FNPP1 accident to the marine environment was negligible. The FNPP1-derived radiocesium was detected in settling particles collected at 4810 m in early April 2011 at station in the subarctic gyre and it was quickly transported to the deep sea in the western North Pacific.

研究分野：化学海洋学

キーワード：環境動態解析 放射性物質 環境分析 福島第一原子力発電所事故 海洋 海洋拡散シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 福島第一原子力発電所事故によって環境中にどの程度放射性物質が放出されたかを明らかにすることは、重大な責務のひとつであった。研究開始当初までの観測・モデルの解析結果から、放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$ ・ $^{137}\text{Cs}$ )の総放出量の推定が行われたが、陸域に比べて海域の観測データは圧倒的に少なく、大気経由の海洋への放出量推定の大きな誤差が総放出量算定の不確実性を大きくしていた。2011年4-5月に実施された観測船「みらい」MR11-03航海で、福島第一原発由来の放射性セシウムが西部北太平洋表面海水に広く分布していることが本研究課題研究分担者らにより明らかにされた。しかし、北太平洋全域ではどうなのか、これらがどのような過程を経てもたらされたのか、どのように表面水中を移行していくのか、また、どのように海洋内部を循環するのか、あるいは海底堆積物に輸送されるのかは不明であった。

(2) 福島第一原子力発電所から海洋へ直接漏洩した放射性セシウムの総量はいくらなのか。海洋拡散シミュレーションによって、福島第一原子力発電所から海洋へ直接漏洩した $^{137}\text{Cs}$ の総量を推定し、沿岸流動、中規模渦、黒潮による海洋中の輸送過程を推定することによって、直接漏洩の影響が支配的であった初期の汚染の実態を解明することが重要な課題であった。さらに、長期的な視点に立った場合、大気からの降下、河川を通じた陸からの供給の影響に関しては未解明な点が多く残されていた。特に、海洋汚染に関しては、直接漏洩に加え、大気からの降下、河川を通じた陸からの供給の影響が大きいと考えられた。

(3) 福島第一原子力発電所事故により海洋環境に放出された人工放射性核種の全体像を把握するためには、放射性セシウムのみならず観測を通して $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{129}\text{I}$ およびPu同位体の現状を把握することも重要であった。また、海底への複雑な移行過程については未解明であり、福島第一原子力発電所近傍海域の海底における放射性セシウムとPu同位体の分布状況および堆積物への蓄積量を把握し、供給過程と移行過程の違いを考慮したモデル化を図る必要があった。観測知見と比較による再現性を分析することによって、観測結果を補間しつつ実態解明に資することが重要であると考えられた。

## 2. 研究の目的

(1) 本計画研究の目的は、海洋および海洋底における放射性物質の分布状況、要因を把握し、外洋まで含め、海洋および海洋底にどの程度、放射性物質が分布しているか、その物理、化学、生物過程を細密に調査し、モデル化を図ることである。

(2) 事故直後に開始された海域モニタリングによって得られた観測データから、発電所前面海域への汚染水の漏洩に起因する放射性セシウムの総量は数PBqであると推定された。しかしながら、限られた観測データによるその推定値には大きな不確実性が伴っていた。一方で、大気粉塵によって運ばれ北太平洋の広範囲に沈着した放射性セシウムの総量については、限定的な外洋海域における観測データからは定量化されていなかった。福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウムの総量を見積もることは、原発事故の実態把握に貢献するだけでなく、比較的長い寿命を持つ放射性セシウムの今後の動態を予測するために必要不可欠であった。そのため、「みらい」・「新青丸」・「白鳳丸」・「神鷹丸」などの研究航海を中心に福島第一原子力発電所近傍海域および北太平洋広域で採取する海水および海底堆積物試料中の $^3\text{H}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ ・ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、Pu同位体を分析することで、福島第一原子力発電所から海洋に放出された人工放射性核種の全体像の把握と放射性セシウムの総量を推定することを目的とした。また、その経時変化から、海洋における移流・拡散過程を解明すること及び沈降粒子中の人工放射性核種の時系列変化から、放射性核種の粒子への吸着、脱着、鉛直輸送速度、海底堆積量等の時空間変動を定量化することを目的とした。

(3) 観測データとの比較を通じ、それらを内挿、外挿することにより、海水濃度分布のモデルおよび懸濁物質、海底土への移行モデルの高度化を図り、観測結果の再現性の向上を図るとともに漏洩量や濃度分布などに関する実態解明に資することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 海水中の放射性セシウムの分布と移行過程

民間のコンテナ船(篤志船)に依頼して、北太平洋において広域にわたり表面海水を採取した。航海数は約30、試料数は440で、海洋表層での初期輸送過程を把握した。また、気象庁船舶での2012年および2015年の東経165度線北緯50度から南緯4度までの断面観測、白鳳丸での継続的な鉛直分布の試料採取を行った。篤志船で採取した海水試料は、採取地点が事故サイト近傍以外の外洋では放射能総量が少ないので、すべて金沢大学低レベル放射能実験施設尾小屋地下測定室でGe半導体検出器による測定を行った。さらに、海水試料の採取は計12航海で実施した。また、文部科学省による事故初期の「海域モニタリング」によって得られた海水試料も研究に供した。

(2) 海水中の $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{129}\text{I}$ の分布と移行過程  
福島沖では、海鷹丸航海 UM13-05、新青丸航海 KS14-06、KS15-13、KS16-19において海

水試料採取を行った。また、北太平洋(外洋)では、白鳳丸航海 KH-12-4, KH-14-6 において海水試料採取を行った。また、「海域モニタリング」によって得られた海水試料も研究に供した。

### (3) 海底堆積物中の放射性セシウムと Pu 同位体の分布と移行過程

放射性セシウムを研究対象とする海底堆積物コアは、2011年7月から2016年6月にかけて、福島第一原発沖から南方の犬吠埼に至る陸棚域および斜面域、加えて日本海溝において採取した合計40試料である。この内、6ヶ所に設定した定点では、それぞれ2~5本のコア試料を採取した。また、Pu同位体用の試料は、みらい及び白鳳丸航海で採集した海水及び堆積物コアと「海域モニタリング」によって得られた海水試料も研究に供した。

### (4) 粒子による放射性物質の沈降除去過程

西部北太平洋亜寒帯循環域と亜熱帯循環域に観測地点(それぞれK2:北緯47度/東経160度、水深約5300m、原発から約2000km, S1:北緯30度/東経145度、水深約5800m)を設け、これらの場所の深度500mと4810mに時系列式セジメントトラップを設置し沈降粒子を捕集した。また、事故から約4ヶ月が経過した2011年7月から2015年6月までの約4年間、原発の南東沖約100kmの大陸棚斜面の深度500mと1000mに時系列式セジメントトラップを設置し、時系列で粒子を捕集、捕集粒子中の放射性セシウムを測定した。

### (5) 海洋における放射性物質の移行過程のモデル化

数値モデルを用い、福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質濃度の時空間分布の再構築を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 海水中の放射性セシウムの分布と移行過程

福島第一原発事故で放出された核種のうち主要な核種である放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$ ・ $^{137}\text{Cs}$ )の河口域から外洋域までの海洋内部への配分について、観測およびモデル研究によって明らかにし、その長期挙動を解明した。放射性セシウムの最も速い経路は表面輸送であった(図1)。大気からの降下は、主に北東に移動した低気圧とともに事故サイトから主に北東側に広がった。北太平洋中部での黒潮および黒潮続流域では、大気から降下した放射性セシウムと直接漏洩した放射性セシウムは、海流によって北太平洋中緯度域を、およそ一日当たり7kmの速度で東に輸送され、事故後一年で太平洋中央部日付変更線に達した。モデルシミュレーションによる再現計算でも、表層においては北太平洋で観測された放射性セシウムの輸送の様相と良

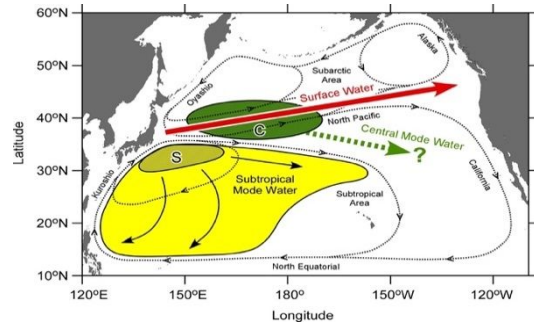


図1 北太平洋における原発事故起源放射性セシウム輸送の経路

好な一致を示した。

第二の経路は、中央モード水の形成である。2012年6月/7月の放射性セシウム放射能の最大値は、東経165度線上では北緯34度から39度の密度26.1~26.3の領域で観測された。これはおよそ400mの深さに対応する。この密度は中央モード水の密度の範囲にあり、放射性セシウムの放射能は亜熱帯モード水を含むすべての周囲の海水の放射能よりも高かった。黒潮の北側で大気から降下した放射性セシウムと直接漏洩した放射性セシウムは効果的に冬季の冷却により海洋内部に運ばれた。また、2015年6月-7月および2016年6月では、東経165度線に沿った北緯36度から北緯44度の領域では原発事故起源放射性セシウムはほとんど見えず、沈み込んだ放射性セシウムがこの地域から東方向に移動したことを示唆している。

第三の経路は亜熱帯モード水の形成である。黒潮の南側で大気から降下した原発事故起源の放射性セシウムは、密度25.1-25.3の亜熱帯モード水の形成により急速に南へ輸送された。2015年6月7月の観測では、東経165度線に沿った北緯40度から北緯15度までの広い範囲で原発事故起源の放射性セシウムが観測され、すでに事故後5年で亜熱帯ジャイア全域に広がっていることを示した。また、その一部は北赤道海流により亜熱帯循環南端を西進したのち、赤道反流で東進し、165度線上の北緯2度に達した。さらに、亜熱帯循環域内から東シナ海に短い時間で再循環し、その後東シナ海から日本海沿岸に広がったとみられる現象も観測している。

### (2) 福島第一原子力発電所近傍海域における $^{134}\text{Cs}$ ・ $^{137}\text{Cs}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、Pu同位体の動態

2011年4月から2014年10月にかけて福島沖を中心とした北太平洋の海域で表層海水を採取し、そのトリチウム濃度の分布や経年変化を調査した結果、最大値は2011年4月に宮城沖で観測され、その値は約0.7Bq/Lであったが、それを除くとほとんどは0.3Bq/L以下となった。事故1年以降は原発のごく近傍(数km程度)でないと異常は観測されなくなり、放射性物質の漏洩が続いていたとしても、大量の海水に希釈され、原発由来のト

リチウムは検出できない程度になった。原発近傍では事故3年後の2014年でも異常が観測され、漏洩は止まっていないと推定された。

2013年5月と2014年5月の福島沖での $^{90}\text{Sr}$ と $^{134}\text{Cs}$ ・ $^{137}\text{Cs}$ 観測の結果、2013年5月に福島第一原子力発電所に最も近い観測点(5km地点)において最も高い濃度18 mBq/Lの $^{90}\text{Sr}$ が観測された。陸域への $^{90}\text{Sr}$ の放出と沈着は少なく河川や地下水からの寄与は無視できることから、沿岸域における $^{90}\text{Sr}$ の濃度増加は原発からの継続的な漏洩を示唆するものである。2014年5月の観測では $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ ともに濃度の減少が観察された。同様の観測を2015年10月および2016年11月に実施した。しかし、 $^{90}\text{Sr}$ 濃度は著しく減少しており、原子炉滞留水の漏洩を示す $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 比を捉えることはできなかった。この理由として、2015年の観測と同時期に港湾内での海側遮水壁が完成しており、原子炉滞留水の漏洩が大幅に抑制されたことが挙げられる。

2013年と2014年の $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 濃度分布は全て類似の分布を示し、分布の形状として南北方向への広がりが幅広い。また、 $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ については海域と時期により変化があることが分かった。 $^{129}\text{I}-^{137}\text{Cs}$ のプロットから、コアインベントリ(0.29)の傾きに近い値と、 $^{129}\text{I}$ が過剰( $^{137}\text{Cs}$ が不足)した値に分けられるが、2013-2015年まで系統立った変化は見られず、 $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ の変化は不規則である。これらは、汚染水処理作業により $^{137}\text{Cs}$ が不足した冷却水が生成し、これを炉心冷却水として使用しているために生じた現象と考えられる。

原発から30km圏内の海底堆積物試料及び海水中プルトニウム同位体( $\text{Pu-239}$ 、 $\text{Pu-240}$ 、 $\text{Pu-241}$ )を分析した結果、海洋環境における福島原発事故由来プルトニウムの有意の増加は検出されなかった。

### (3) 粒子による放射性物質の沈降除去過程とモデル解析

海中粒子による放射性物質の鉛直/水平輸送および除去過程の解明のために、時系列式セジメントトラップを活用し、人工放射性核種の溶存態と粒状態との存在比、粒状態での存在形態、粒状態物質の輸送状況等について解明した。外洋の西部北太平洋亜寒帯循環域と亜熱帯循環域に設置した時系列式セジメントトラップ実験の結果から、事故後1ヶ月後には原発から約2000km離れた海域の水深約5000mまで、事故起源の $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ が到達していたことを明らかにした。“極”初期(水深4810mに最初の放射性セシウムが到達してから二週間程度)には放射性セシウムの他に金属成分が多く含まれる原発原子炉内の物質(通称セシウムボール)が輸送され迅速に沈降した、あるいは比表面積は小さいが海水中の放射性セシウム濃度が高かったため放

射性セシウムを吸着することができた沈降速度の大きい大粒子が沈降したと推察された。一方、“極”初期以外は海水中の放射性セシウム濃度が低下したものの比表面積が大きく放射性セシウムが供給された表層海水と長い時間接する事が可能な沈降速度の遅い小粒子が沈降したため、と考察された。また、福島第一原発の南東沖約100kmの大陸棚斜面における時系列式セジメントトラップセジメントトラップに捕集された $^{134}\text{Cs}$ は、海洋表層から鉛直的に沈降したものに加え、海中を水平的に移動したものを多く含むと推測された。事故起源の放射性セシウムを吸着した浅海域の堆積物が、冬季や荒天時に再懸濁して大陸斜面方向へ運ばれたことが示唆された。

懸濁質海洋分散解析モデルを開発し、懸濁質輸送解析を行った。新田川起源懸濁態 $^{137}\text{Cs}$ の海洋分散及び海底堆積物の時空間変動特性についてもモデル解析を行った。さらに、数値モデルを用い、福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質濃度の時空間分布の再構築を行った。海洋分散現象の時空間スケールを考慮し、領域海洋スケールの福島沖合モデルと北太平洋モデルを構築し、海洋への放射性物質の直接漏洩率の推定と挙動評価及び北太平洋スケールのシミュレーションで2011年から2016年まで、北太平洋の $^{134}\text{Cs}$ 濃度の再現計算を行った。観測結果と比較した結果、再現性は概ね良好であることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計112件)

Kumamoto, Y., Aoyama, M. (他8名): Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific in 2014. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 査読有, 311, 2017, 1209-1217  
DOI:10.1007/s10967-016-5055-3

Tazoe, H., Yamada, M. (他6名, 8番目): Novel method for low level Sr-90 activity detection in seawater by combining oxalate precipitation and chelating resin extraction. *Geochemical Journal*. 査読有, 51, 2017, 1-5 DOI:10.2343/geochemj.2.0441

Aoyama, M., Hamajima, Y., Hult, M., Uematsu, M., Oka, E., Tsumune, D., Kumamoto, Y.:  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan: Part One - Surface pathway and vertical distributions. *Journal of Oceanography*, 2016, 査読有, 72, 53-65

DOI:10.1007/s10872-015-0335-z

Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Murata, A., Kawano, T.: Impact of Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific Ocean about ten months after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 査読有, 140, 2015, 114-122  
DOI:10.1016/j.jenvrad.2014.11.010

Bu, W. T., Zheng, J., Yang, G. S., Yamada, M. (他7名, 11番目): Release of Pu isotopes from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident to the marine environment was negligible. *Environmental Science and Technology*, 査読有, 48, 2014, 9070-9078  
DOI:10.1021/es502480y

Honda, M. C., Kawakami, H.: Sinking velocity of particulate radiocesium in the northwestern North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 査読有, 41, 2014, 3959-3965  
DOI:10.1002/2014GL06012

Kumamoto, Y., Aoyama, M., Hamajima, Y., Aono, T., Kouketsu, S., Murata, A., Kawano, T. Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific. *Scientific Reports*, 査読有, 4, 2014, 4276  
DOI:10.1038/srep04276

Aoyama, M., Uematsu, M., Tsumune, D., Hamajima, Y.: Surface pathway of radioactive plume of TEPCO Fukushima NPP1 released <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs. *Biogeosciences*, 査読有, 10, 2013, 3067-3078  
DOI:10.5194/bg-10-3067-2013

Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Uematsu, M., Misumi, K., Maeda, Y., Yoshida, Y., Hayami, H.: One-year, regional-scale simulation of <sup>137</sup>Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Biogeosciences*, 査読有, 10, 2013, 5601-5617  
DOI:10.5194/bg-10-5601-2013

[学会発表](計219件)

Michio Aoyama, Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Yasunori Hamajima, Yayoi Inomata, Yuichiro Kumamoto: *Trans Pacific Ocean in surface layer and*

*subduction and re-circulation in the ocean interior of radiocesium released from TEPCO FNPP1 accident through the end of 2015.* European Geosciences Union General Assembly 2016, 2016/4/22, Vienna(Austria)

Yuichiro Kumamoto, Michio Aoyama, Yasunori Hamajima, Hisao Nagai (他6名): Fukushima-derived radiocesium in the western North Pacific in 2014. *The First International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016/04/12, Budapest (Hungary)

Jian Zheng, Tatsuo Aono, Keiko Tagami, Sshigeo Uchida, Masatoshi Yamada: Determination of Pu isotopic composition using SF-ICP-MS for radiation impact assessment of Fukushima nuclear accident released Pu in the marine environment. *The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies*, 2015/12/18, Hawaii(USA)

Makio C. Honda, Hajime Kawakami, Minoru Kitamura, Tatsuo Aono, Michio Aoyama, Yukio Masumoto, Masayuki Takigawa, Seiya Nagao: Temporal variability of Fukushima-derived radiocesium and its balance at pelagic time-series station in the western North Pacific. *International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity 2014*, 2014/9/11, Barcelona(Spain)

Daisuke Tsumune, Takaki Tsubono, Michio Aoyama, Katsumi Hirose: A numerical simulation for distribution of <sup>137</sup>Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant by a regional ocean model. *2012 ASLO Aquatic Sciences Meeting*, 2012/07/12, Biwako Hall (Shiga, Ohtsu)

[図書](計19件)

黒倉寿、金子豊二、神田穰太、田野井慶太郎、津旨大輔、松田裕之、森田貴己、八木信行、渡邊壯一、梶圭佑、恒星社厚生閣、水圏の放射能汚染 福島の水産業復興をめざして、2015、109-138

秋山賢一郎、天川裕史、海老原充、蒲生俊敬、岸本充生、伊永隆史、佐々木康人、谷保佐知、高橋純一、中山典子、野津憲治、平田岳史、堀井勇一、馬淵久夫、宮崎章、山下信義、山田正俊、吉永淳、丸善出版株式会社、同位体環境分析、2013、99-124



## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 正俊 (YAMADA, Masatoshi)  
弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授  
研究者番号：10240037

### (2) 研究分担者

加藤 義久 (KATO, Yoshihisa)  
東海大学・海洋学部・客員教授  
研究者番号：00152752

永井 尚生 (NAGAI, Hisao)  
日本大学・文理学部・教授  
研究者番号：10155905

津旨 大輔 (TSUMUNE, Daisuke)  
電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員  
研究者番号：10371494

本多 牧生 (HONDA, Makio)  
海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・上席技術研究員  
研究者番号：20359160

鄭 建 (ZHENG, Jian)  
量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所・福島再生支援本部・主幹研究員  
研究者番号：30370878

浜島 靖典 (HAMAJIMA, Yasunori)  
金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授  
研究者番号：60172970

田副 博文 (TAZOE, Hirofumi)  
弘前大学・被ばく医療総合研究所・助教  
研究者番号：60447381

熊本 雄一郎 (KUMAMOTO, Yuichiro)  
海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任技術研究員  
研究者番号：70359157

青山 道夫 (AOYAMA, Michio)  
福島大学・環境放射能研究所・特任教授  
研究者番号：80343896  
(平成26年度まで連携研究者)

### (3) 連携研究者

植松 光夫 (UEMATSU, Mitsuo)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号：60203478

川上 創 (KAWAKAMI, Hajime)

海洋研究開発機構・広報部・技術主任  
研究者番号：20415988

池原 研 (IKEHARA, Ken)  
産業技術総合研究所・地質情報研究部門・総括研究主幹  
研究者番号：40356423

入野 智久 (IRINO, Tomohisa)  
北海道大学・大学院地球環境研究院・助教  
研究者番号：70332476

高畑 直人 (TAKAHATA, Naoto)  
東京大学・大気海洋研究所・助教  
研究者番号：90345059

升本 順夫 (MASUMOTO, Norio)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：60222436

磯部 篤彦 (ISOBE, Atsuhiko)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号：00281189

木田 新一郎 (KIDA, Shinichiro)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号：50543229

坪野 考樹 (TSUBONO, Takaki)  
電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員  
研究者番号：40371497

三角 和広 (MISUMI, Kazuhiro)  
電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員  
研究者番号：104628890

猪股 弥生 (INOMATA, Yayoi)  
金沢大学・環日本海域環境研究センター・准教授  
研究者番号：90469792

帰山 秀樹 (KAERIYAMA, Hideki)  
水産研究・教育機構・中央研究所・研究員  
研究者番号：10392218

### (4) 研究協力者

日下部 正志 (KUSAKABE, Masashi)  
楊 国勝 (YANG, Guosheng)  
中野 俊也 (NAKANO, Toshiya)  
Pavel Povinec (POVINEC, Pavel)  
Ken Buesseler (BUESSELER, Ken)  
Mikael Hult (HULT, Mikael)  
Hartmut Nies (NIES, Hartmut)