

# Radioactive Monitoring on the RN Soyo Maru Expedition in the Sea of Japan and Its Applications to Research for Geochemical Cycles

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/47142">http://hdl.handle.net/2297/47142</a>

## 日本海放射能調査および海洋研究への適用 —中央水産研究所「蒼鷹丸」調査航海を例にとって—

井上睦夫<sup>1\*</sup>・藤本 賢<sup>2\*\*</sup>・森田貴己<sup>2</sup>

2016年9月7日受付, Received 6 September 2016  
2016年10月18日受理, Accepted 18 October 2016

### Radioactive Monitoring on the R/V *Soyo Maru* Expedition in the Sea of Japan and Its Applications to Research for Geochemical Cycles

Mutsuo INOUE<sup>1\*</sup>, Ken FUJIMOTO<sup>2\*\*</sup> and Takami MORITA<sup>2</sup>

#### Abstract

As a result of atmospheric nuclear test explosions, the Chernobyl reactor accident, radioactive effluents from nuclear power plants, etc., and radioactive waste disposal, anthropogenic radionuclides (e.g., <sup>137</sup>Cs and <sup>108m</sup>Ag) have spread widely into the world's oceans, including the Sea of Japan. Therefore, around the Japanese Archipelago, radioactivity monitoring of anthropogenic radionuclides has been continually conducted since the 1950s using various marine samples. Particularly in the Sea of Japan, radioactive waste disposal by the former Soviet Union during the 1970s and 1980s became apparent in 1993. Therefore, to assess the effect of the disposal in the Sea of Japan, radioactive monitoring in deep sea environments has been conducted every year since 1996 on the R/V (Research Vessel) *Soyo Maru* expedition (National Research Institute of Fisheries Science), in addition to the previous conventional surface/coastal monitoring. In the present paper, we exhibit the sampling techniques for seawater (CTD-RMS), marine sediment (core samplers), biota (deep sea pods and benthos nets), and sinking particles (sediment traps) for deep-sea environmental monitoring. We also present the applications of the samples collected on the expeditions to research of geochemical cycles and of the assessment of low-level contamination caused by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident (March 2011) within the Sea of Japan.

**Key Words:** radioactive monitoring, anthropogenic radionuclide, R/V *Soyo Maru*, Sea of Japan  
キーワード: 放射能モニタリング, 人工放射性核種, 調査船蒼鷹丸, 日本海

<sup>1</sup>金沢大学環日本海域環境研究センター低レベル放射能実験施設 〒923-1224 石川県能美市和気オ24 (Low Level Radioactivity Laboratory, Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, 24 O, Wake, Nomi, 923-1224 Japan)

<sup>2</sup>水産研究・教育機構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 (National Research Institute of Fisheries Science, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-8648 Japan)

\*連絡著者 (Author for correspondence)

\*\*現在の所属 (Present address): 水産庁増殖推進部研究指導課 〒100-8907 東京都千代田区霞が関1-2-1 (Fisheries Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, 1-2-1, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8907 Japan)

## I. はじめにー日本海と放射能ー

1950–1970年代の大気圏内核実験, 1986年のチェルノブイリ原発事故, 原子力関連施設からの放射能漏洩, さらに放射能汚染物の海洋投棄に起因する海洋放射能汚染は, 世界規模で広がった。それに対応すべく, 世界的海洋規模での海洋放射能モニタリングもなされてきた (Povinec, 2004)。我が国においても, 1954年のビキニ環礁水爆実験による第五福竜丸被爆事件をきっかけに, 日本列島を取り巻く海洋でもセシウム-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ; 半減期30.2年) を中心としたモニタリング調査が継続して行われてきた (Ikeuchi, 2003 ; 及川ほか, 2013 ; Kofuji and Inoue, 2013) (図1)。これらに加え, 日本海では, 1985年旧ソ連ウラジオストック港内軍港における原潜原子炉事故による放射性廃棄物の, さらに1993年に過去20年以上にわたる旧ソ連・ロシアによる日本海への放射性廃棄物の投棄が明らかになった (Yablokov, 2001)。この問題に対応すべく, 1993年に日本のグループによる調査航海が, さらに1994年, 1995年に国際共同調査航海 (日本, 韓国, ロシア, 国際原子力機関 (IAEA)) が, 日本海北部を中心に実施された (天野ほか, 1996)。太平洋側では我が国の低レベル放射性廃棄物の海洋投棄が計画されていたことから, 国立研究開発法人水産研究・教育機構 (旧水産総合研究センター) 中央水産研究所は, その事前調査として深海域の調査を行っていた。一方, 日本海では

主要な水産物のモニタリング調査はあったが, 日本海深海域では漁業が行われていなかったことから, 深海域の調査は実施されてはいなかった。よって, 旧ソ連・ロシアによる深海投棄の長期影響を調べるため, 1996年より, それまで北太平洋深海域で行ってきた海産生物放射能調査を日本海の深海域へ拡大した (森田・藤本, 2016)。これら日本海の水産生物, 海水, 堆積物の放射能モニタリングは, 現在に至るまで, 毎年7~8月に実施されている。さらに, 日本海は, その海岸に沿って多くの原子力発電所を抱えることから原発事故の危機に常時直面しているほか, その表層は絶えず海水循環に伴う太平洋, 東シナ海からの汚染物質の流入の危機にもさらされている。それゆえ, 本調査航海は, 通常時のバックグラウンド調査も兼ねている。本稿では, 中央水産研究所所属の調査船蒼鷹丸による一連の日本海放射能調査航海 (深海及び近海海産生物等放射能調査) について紹介する。

このような平常時の放射能モニタリング調査に加え, 本調査航海は関係研究機関や大学に研究用試料を提供するなど, 海洋分野の学術研究への適用もなされてきた。天然起源を含む放射性核種は, 海洋環境における物質動態調査の有効なトレーサーである。本稿では, 同調査航海で採取された日本海海水試料の, 放射性核種を利用した研究への適用例についても報告する。

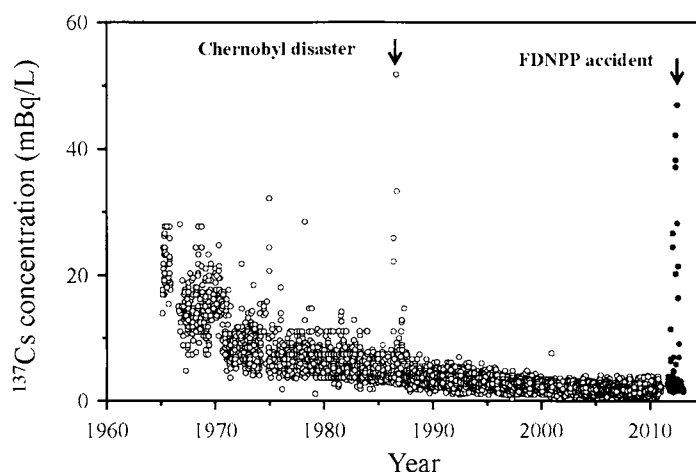


図1 日本列島沿岸域表層海水における $^{137}\text{Cs}$ 濃度の長期経時変動 (Kofuji and Inoue, 2013 ; 福島原発事故以前の値は当時の文部科学省(現原子力規制庁)公表データ)。

Fig. 1 Long-term variation of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in coastal seawater samples around the Japanese Archipelago (Kofuji and Inoue, 2013).

## II. 海洋放射能調査

### 1) 調査航海

大気圏内核実験や原子力発電所事故などにより大気中に放出された放射性物質は、降水物や降雨などにより地表や海表面に、海洋投棄の場合は、直接的に海洋環境にもたらされる。これら放射性物質は、海水から直接、またはプランクトンなど食物連鎖を介して餌から海洋生物中に取り込まれる他、海水中の懸濁粒子とともに移動する。それゆえ海洋環境における人工放射性核種の挙動調査には、海水、堆積物、海洋生物など様々な試料採取、放射能測定に基づく総括的な議論が必要となる。日本海における2010年7月の蒼鷹丸放射能調査地点およびその調査項目を図2にまとめた。

### 2) 試料採取法

海洋モニタリング試料の代表的な採取法と機材を図3にまとめた。蒼鷹丸は、水産研究・教育機構中央水産研究所所属の漁業調査船である(図3a)。船内には、簡便な化学処理なども行える実験室を完備している他(図3b)、海洋調査のあらゆる試料採取に対応しうる調査器材が備えられている(図3c~j)。

#### 2-1) 海水試料

電気伝導度(塩分)・水温・水深計(Conductivity Temperature Depth profiler; CTD)を使用し、調査海域の鉛直水塊構造を把握する。放射性核種の鉛直方向への拡散状況を把握するため、CTDにロゼット採水ボトル(Rosette Multi-bottle Sampler; RMS)を備えつけ、目的水深の海水試料を採取する(図3c)。表層海水は、走行中にも船内で採取される。

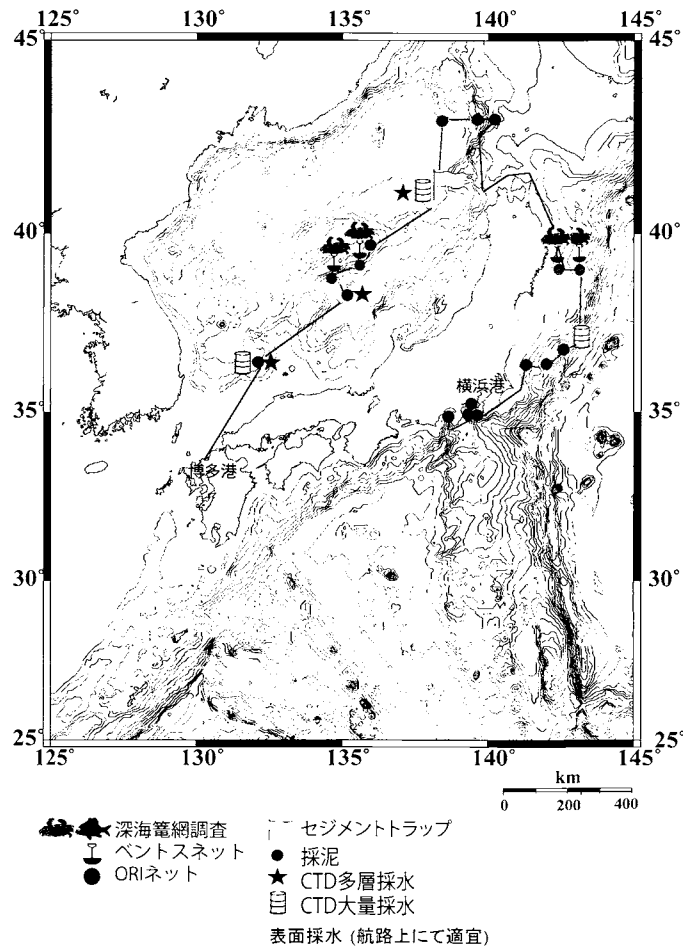


図2 蒼鷹丸調査航海における調査の一例 (Leg 1-Leg 2; 2010年7月12~23日; 横浜-博多; 平成22年蒼鷹丸第4次調査航海 深海及び近海海産生物等放能調査調査要項).

Fig. 2 Sampling sites in Leg 1 and Leg 2 on Soyo Maru expedition (July 12-23, 2010; Yokohama-Hakata).

## 2-2) 堆積物試料

旧ソ連・ロシアによる日本海への放射性廃棄物の投棄等人的事故の影響について、スミスマッキンタイヤ採泥器(Smith-McIntyre sampler)などを使用し、採泥調査を行う(図3d)。過去の汚染の状況、堆積環境の情報を得るため、G.S.型表層採泥器(G.S.-type triple-tube core sampler: 図3e)および重力式採泥器(gravity core sampler: 図3f)を用い堆積物を柱状試料でも採取する。柱状海底堆積物試料を一定間隔に切り分け、各層の放射性核種濃度を測定する。

## 2-3) 生物試料

海洋に生息する生物試料の放射能濃度の把握のため、通常の漁業では採取が困難な深海域においても、籠および異なるタイプのネット曳網を行い、様々な水深、サイズの生物試料を採取する。

### 2-3.1) 深海籠網

日本海における生物相の放射能レベルを把握するための指標生物として、日本海深部に分布するベニズワイガニ等を、深海籠網(図3g)を海底に一晩放置し採取する。

### 2-3.2) ネット曳き

深海籠では採取困難な移動性の低い底生生物を採取することを目的とし、ベントスネットを調査船で曳く(1~2ノット、1ノットは1.852 km/h: 図3h)。また、ベントスネット内側にプランクトンネットを取り付けることにより、微細な底生生物も採取する。円筒円錐型のプランクトンネットおよび中深層用ネットを2~3ノットで曳き、表層プランクトンおよび中深層に分布する動物プランクトン等生物試料を採取する(図3i)。

## 2-4) 沈降粒子試料

日本海の放射性核種の沈降除去メカニズムの解明のため、沈降粒子捕集トラップ(セジメントトラップ: 図3j)を日本海盆水深1,100~1,500 mおよび3,500 mに1年間係留し、海水中を沈降する粒子を回収する。捕集瓶は2週間ごとに自動的に回転、放射性セシウム濃度の経時変動が調べられる。日本海では現在係留されていないが、先の結果(1998年7月~2012年7月実施)から、通常時の<sup>137</sup>Csの沈降量は季節的に大

きな変動があり、日本周辺に大気から降下する同核種降下量と同レベルであることが確認されている(皆川, 2005)。

## 2-5) 放射能測定

調査航海で採取した試料については、放射性核種の濃集、試料減容化を目的とし、中央水産研究所内で、化学分離、灰化、乾燥などの前処理を施す。モニタリング試料数が多くなるため、大規模な処理が必要となる(図3k)。放射能測定は、主にゲルマニウム検出器を利用したガンマ線計測を適用、ガンマ線放出核種(<sup>137</sup>Cs, <sup>108m</sup>Agなど)を対象とする(図3l)。壊変等により、これら核種濃度は核実験以降減少を続けていることから、さらなる濃集処理(特に化学処理)が必要とされている(Inoue *et al.*, 2003; Povinec, 2004)。

蒼鷹丸の日本海調査航海の成果の一つとして、Morita *et al.* (2010)の報告がある。測定の結果、<sup>108m</sup>Ag(半減期418年)が、魚類、海水、海底土からは検出されない一方、ベニズワイガニやズワイガニの肝臓から広範囲・定常的に検出された。ただこの濃度は特に高くはなく、<sup>137</sup>Csなど他の人工放射性核種同様、かつての核実験等による放射性降下物由来であると考えられた。現在も日本海深海域の放射能調査は継続されているが、海水、堆積物、海産生物試料とも、これまで放射性廃棄物海洋投棄の影響は確認されていない。

なお、本稿では、調査航海・試料採取を中心に紹介した。放射性核種や測定結果およびその解説については、本稿で引用したものを含む論文等を参考にされたい。

## 3) その他の日本海放射能調査

日本海側はその海岸に沿って、泊(北海道)、柏崎刈羽(新潟県)、志賀(石川県)、敦賀、美浜、大飯、高浜(福井県)、島根(島根県)、玄海(佐賀県)と多くの原子力発電所を有する。蒼鷹丸の沖合調査航海以外にも、原子力発電所近辺の主要漁場の放射能レベルの把握を目的とし、海洋環境放射能総合評価事業として、海洋試料(海産生物・海水・海底土)の放射能調査モニタリングが、日本海(太平洋海域も含む)沿岸域を中心とし、1983年から現在にいたるまで毎年実施されている(公益財団法人海洋生物



図3 放射能モニタリングの試料採取法: a) 蒼鷹丸全景 (892トン, 長さ60.0 m, 幅11.4 m), b) 船内実験室, c) ロゼット採水システムを備える電気伝導度(塩分)・水温・水深計(CTD-RMS), d) スミス・マッキンタイヤ採泥器, e) G.S.型表層採泥器, f) 重力式採泥器, g) 深海籠網, h) ベントスネット, i) ORI ネット, j) 沈降粒子捕集トラップ, k) 試料灰化処理, およびl) ゲルマニウム検出器。

Fig. 3 Sampling equipment and techniques for radioactivity monitoring: a) the R/V *Soyo Maru*, (892 t, length 60.0 m, width 11.4 m) b) the dry laboratory room, c) conductivity Temperature Depth profiler equipped Rosette Multi-bottle Samplers (CTD-RMS), d) Smith-McIntyre sampler, e) G.S.-type triple-tube core sampler, f) gravity core sampler, g) deep sea pod, h) benthos net, i) ORI net, j) sediment trap system, k) ashing treatment, and l) germanium (Ge) detector.

環境研究所が、科学技術庁～文部科学省～原子力規制庁から受託)。これらの結果、日本海側沿岸域の海水試料において、原子力施設由来の $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ 濃度の上昇はみられていない一方、2011年3月の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所起源のこれら核種のわずかな濃度上昇が、北海道および新潟沿岸に確認されている(及川ほか, 2013)。これは、日本海における福島原発由来の放射性セシウムの供給、循環、除去過程に重要な知見をもたらした(Inoue *et al.*, 2013)。

さらには、原子力発電所を取り巻く沿岸域においては、各自治体(特に県)が、海水、海産物などの放射能モニタリングを定期的に行っている。その結果については、ホームページ(例えば、福井県原子

力監視センター)などで報告されている。

#### IV. 日本海物質循環研究への適用

蒼鷹丸調査航海を利用した天然、および人工放射性核種をトレーサーとした、最近の日本海物質循環研究への適用例を、以下に簡単にまとめた。

##### 1) ラジウム同位体比からみた対馬暖流の循環

ラジウム同位体は、東シナ海においては、大陸側の浅い大陸棚および沿岸堆積物より海水に継続的に供給される。半減期が $^{226}\text{Ra}$ (1600年)に比べ著しく短い $^{228}\text{Ra}$ (5.75年)の濃度分布を反映し、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比は、大陸棚浅層海水(4.0)が、黒潮海水(<0.03)

の数十倍高い値を示す (Inoue *et al.*, 2012c)。これら表層海水は東シナ海で混合後、対馬暖流として日本海を北上する。本研究では、対馬暖流循環解析のため、2009～2014年7月の蒼鷹丸調査航海測線上の $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比の水平分布を求めた (図4a)。

日本海中心域表層 (～135°E, ～39°N) では、沿岸域 (対馬暖流沿岸分枝) に比べ $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比が高い値を示した。これは大陸側浅層海水の寄与が大きいことを示唆する (沖合分枝)。さらに日本海北東域の $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比は、対馬暖流の沿岸・沖合分枝の混合を反映したものといえる。7月の日本海表層海水の $^{228}\text{Ra}$ 濃度および塩分より、対馬暖流の沿岸・沖合分枝、それら混合分枝における大陸側浅層海水の混合比を、それぞれ、～8%、～16%、～11%と見積もった (図4b)。詳細は、Inoue *et al.* (2016) に詳しい。

## 2) ラジウム同位体からみた日本海固有水の滞留時間

日本海表層は対馬海流やリマン海流が循環系を形成しているが、水深約300 m以深では、日本海固有水として深層循環が形成されている。特に、1,000 m以深は、ほぼ均一の物理的特徴をもつ下部固有水に占められる。

2007年7月に日本海盆、2009年7月大和海盆にて、

CTD-RMS (図2c, d) により海水試料 (～50 L) を計14層で採取し、 $^{228}\text{Ra}$ および $^{226}\text{Ra}$ 濃度の鉛直分布を求めた (図5)。 $^{228}\text{Ra}$ 濃度は、表層では1.2 mBq/Lと高く、深さとともに急減したものの、水深1,000～3,500 mで～0.1 mBq/Lと均一であった。一方、 $^{226}\text{Ra}$ 濃度は表層で1.3 mBq/L、下部固有水で2.0～2.8 mBq/Lと微増した。ラジウムの濃度、半減期などから、日本海盆、大和海盆の下部固有水 (～1,000 m以深) の平均滞留時間は、ともに80年と見積もられた (Inoue *et al.*, 2015)。

## 3) 日本海における福島原発由来の放射性セシウムの鉛直分布

福島第一原発事故直後には、日本海北東域表層を中心に日本海表層にも福島原発由来の放射性降下物がもたらされた。その経時変動より、これら放射性セシウムは、対馬暖流とともに津軽海峡 (および宗谷海峡) を経て日本海から流出したと考えられた (Inoue *et al.*, 2012a, b)。混合層以深の福島原発由来の放射性セシウムの影響をみるため、海水試料を鉛直方向に採取した。 $^{134}\text{Cs}$ 濃度は全試料で検出限界以下、 $^{137}\text{Cs}$ 濃度は震災前と同レベルであった (図6)。日本海混合層以深への影響は著しく小さいことが確認された (Inoue *et al.*, 2013)。

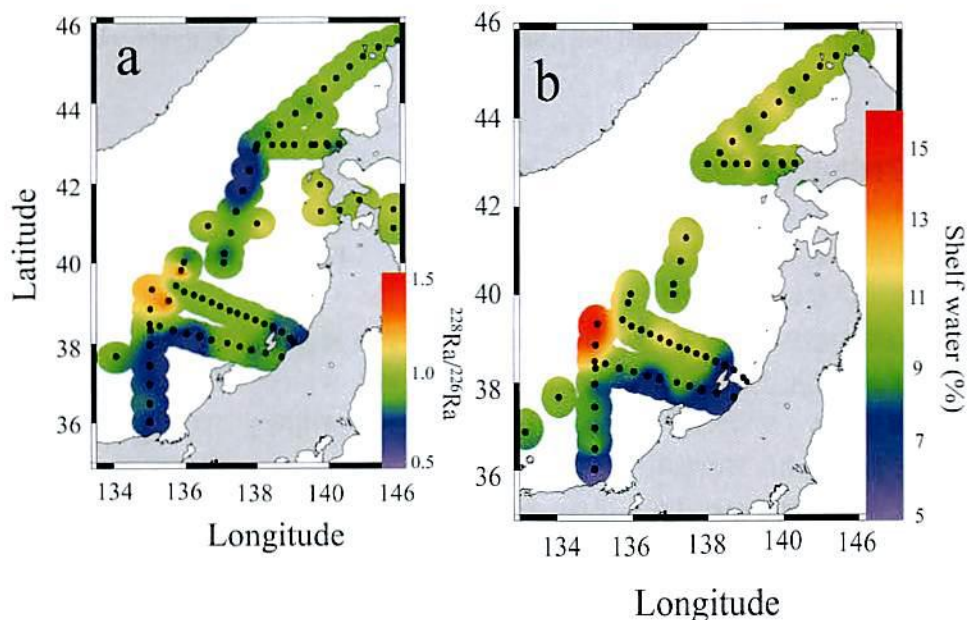


図4 日本海表層のa)  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 比とb) 東シナ海大陸棚浅層海水の混合比。

Fig. 4 Lateral profiles of a)  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio and b) fraction of continental shelf water at the surface within the Sea of Japan in July of 2009–2014 (Inoue *et al.*, 2016).

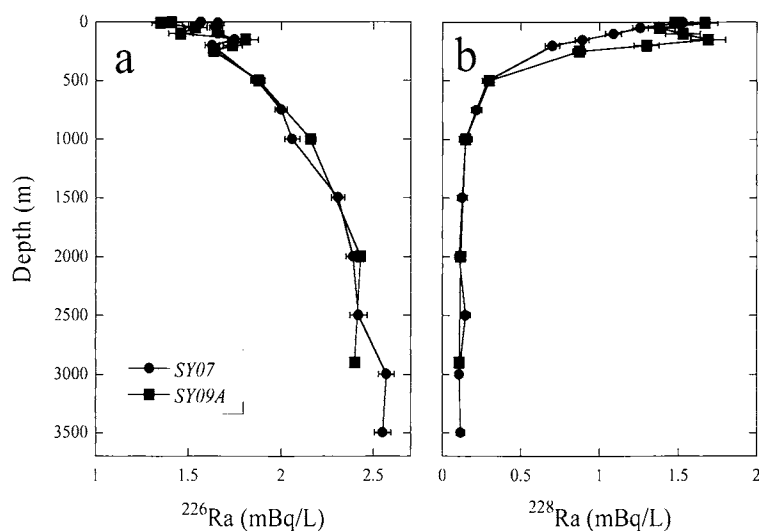


図5 日本海盆、大和海域における a)  $^{226}\text{Ra}$  および b)  $^{228}\text{Ra}$  濃度の鉛直分布.

Fig. 5 Vertical profiles of a)  $^{226}\text{Ra}$  and b)  $^{228}\text{Ra}$  concentrations of sea water samples from the Japan Basin (SY07) and the Yamato Basin (SY09A) within the Sea of Japan (Inoue *et al.*, 2015).

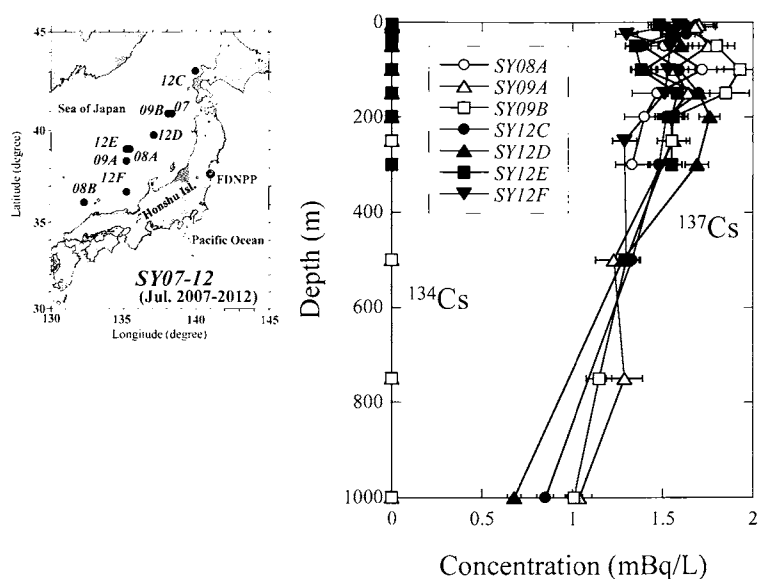


図6 日本海水深0-1000 mにおける  $^{134}\text{Cs}$  および  $^{137}\text{Cs}$  濃度の鉛直分布 (2012年7月).

Fig. 6 Vertical profiles of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations at 0-1000 m in depths within the Sea of Japan in July 2012 (Inoue *et al.*, 2013).

謝辞：本稿で、適用例として挙げた研究に使用した海水試料は、平成21～26年蒼鷹丸調査航海において採取されたものである。金沢大学環日本海域環境研究センター低レベル放射能実験施設所属の学部4年および博士前期課程1, 2年の学生（計8名）は、平成19～28年にわたり調査航海への参加の機会をいただき、非常に貴重な体験をさせていただいた。著者の一名（井上）は、航海でお世話になりました中央

水産研究所放射能調査グループの皆様、および蒼鷹丸同乗研究者、船長および乗組員の皆様に心より感謝いたします。

#### 文献

天野 光・藪内典明・松永 武, 1996: 極東の放射性廃棄物投棄海域における環境放射能調査-第1回日韓露共同



- 海洋調査における原研の調査-。 *JAERI-Research*, **49**, 125.
- 福井県原子力監視センター, 2016 :  
<http://www.houshasen.tsuruga.fukui.jp/>.
- 原子力規制庁, 2016 : 日本の環境放射能と放射線。  
<http://www.kankyo-hoshano.go.jp/>.
- Ikeuchi, Y., 2003: Temporal variations of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in Japanese coastal surface seawater and sediments from 1974 to 1998. *Deep-Sea Research II*, **50**, 2713-2726.
- Inoue, M., Kofuji, H., Yamamoto, M., Sasagawa, H. and Komura, K., 2003: Application of low background gamma-ray spectrometry to environmental monitoring samples: water leaching treatment for  $^{40}\text{K}$  removal. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **255**, 211-215.
- Inoue, M., Tanaka, K., Kofuji, H., Nakano, Y. and Yamamoto, M., 2007: Seasonal variation in the  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio of coastal water within the Sea of Japan: Implications for the origin and circulation patterns of the Tsushima Coastal Branch Current. *Marine Chemistry*, **107**, 559-568.
- Inoue, M., Kofuji, H., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Yoshida, K., Fujimoto, K., Takada, T. and Isoda, Y., 2012a: Lateral variation of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in surface seawater in and around the Japan Sea after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, **109**, 45-51.
- Inoue, M., Kofuji, H., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Fujimoto, K., Yoshida, K., Hayakawa, K., Suzuki, A., Takashiro, H. and Minakawa, M., 2012b: Low-levels of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in surface seawaters around the Japanese Archipelago after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in 2011. *Geochemical Journal*, **46**, 311-320.
- Inoue, M., Yoshida, K., Minakawa, M., Kiyomoto, Y., Kofuji, H., Nagao, S., Hamajima, Y. and Yamamoto, M., 2012c: Spatial variations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , and  $^{228}\text{Th}$  activities in seawater from the eastern East China Sea. *Geochemical Journal*, **46**, 429-441.
- Inoue, M., Furusawa, Y., Fujimoto, K., Minakawa, M., Kofuji, H., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Yoshida, K., Nakano, Y., Hayakawa, K., Oikawa, S., Misonoo, J. and Isoda, Y., 2013:  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  ratio and  $^7\text{Be}$  concentration in the Sea of Japan as indicators for water transport: Comparison with migration pattern of Fukushima Dai-ichi NPP-derived  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . *Journal of Environmental Radioactivity*, **126**, 176-187.
- Inoue, M., Minakawa, M., Yoshida, K., Nakano, Y., Kofuji, H., Nagao, S., Hamajima, Y. and Yamamoto, M., 2015: Vertical profiles of  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{226}\text{Ra}$  activities in the Sea of Japan and their implications on water circulation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **303**, 1309-1312.
- Inoue, M., Shirotani, Y., Furusawa, Y., Fujimoto, K., Kofuji, H., Yoshida, K., Nagao, S., Yamamoto, M., Hamajima, Y., Honda, N., Morimoto, A., Takikawa, T., Shiimoto, A., Isoda, Y., Minakawa, M., 2016: Migration area of the Tsushima Warm Current Branches within the Sea of Japan: Implications from transport of  $^{228}\text{Ra}$ . *Continental Shelf Research* (in press) .
- Kofuji, H. and Inoue, M., 2013: Temporal variations in  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  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. *Journal of Environmental Radioactivity*, **124**, 239-245.
- 皆川昌幸, 2005 : 海洋における人工放射性核種の挙動に果たす沈降粒子の役割に関する研究. 平成16年度中央水産研究所主要成果集「研究のうごき」, **3**, p.4.
- Morita, T., Ohtsuka, Y., Fujimoto, K., Minamisako, Y., Iida, R., Nakamura, M. and Kayama, T., 2010: Concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{108\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and atom ratio of  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  in tanner crabs, *Chionoecetes japonicus* and *Chionoecetes opilio* collected around Japan. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 2311-2322.
- 森田貴己・藤本 賢, 2016 : 放射能調査に取り組む水産総合研究センター. 福島第一原発事故による海と魚の放射能汚染, 水産総合研究センター編, 成山堂書店, 東京, 39-58.
- 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 $^{90}\text{Sr}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ 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.
- Povinec, P., 2004: Developments in analytical technologies for marine radionuclide studies. Livingstone, H.D. ed., *Marine Radioactivity*, Elsevier, Amsterdam, 237-294.
- Yablokov, A.V., 2001: Radioactive waste disposal in sea adjacent to the territory of the Russian Federation. *Marine Pollution Bulletin*, **43**, 8-18.