

海洋におけるプルトニウムの動態解析

1. はじめに

1945年7月16日、人類最初の核実験がアメリカ合衆国ニューメキシコ州で行われました。この核実験をもって「核の時代」の幕開けとされています。この核実験はトリニティ実験というコードネームで呼ばれ、プルトニウム原子爆弾の爆発実験であり、同型の爆弾が数週間後の8月9日に長崎市に投下されました。以来、1980年までに旧ソ連、米国、イギリス、フランス、中国により500回以上の大気圏核実験が行われ、全海洋に存在するプルトニウム($^{239+240}\text{Pu}$)の総量は約12PBqと推定されています。プルトニウムは、化学毒性に比べて放射性毒性がはるかに大きく、最大身体許容負荷量が極めて小さいため、最も危険度の高い核種のひとつです。そのため、大気圏核実験によりもたらされた後の、環境中での動態を解明する必要があります。

2. 日本周辺海域における海底堆積物中のプルトニウム同位体

環境中に存在する大気圏核実験起源の主要なプルトニウム同位体は、 ^{238}Pu (半減期：87.7年)、 ^{239}Pu (半減期：2.411万年)、 ^{240}Pu (半減期：6564年)、 ^{241}Pu (半減期：14.35年)です。太平洋におけるプルトニウム同位体の主要な起源は、1950年代から1960年代初めに行われた大気圏核実験による大量の地球規模放射性降下物(グローバルフォールアウト)と1946年から1958年にかけて米国太平洋核実験場で行われた

核実験(ビキニ核実験)による放射性降下物(局地フォールアウト)のふたつに大別されます。太平洋は、ビキニ核実験起源のフォールアウトがあるということが他の大洋にない特徴です。

オホーツク海¹⁾、太平洋・釧路沖¹⁾、日本海・積丹半島沖²⁾、太平洋・銚子沖¹⁾、太平洋・相模湾³⁾、沖縄トラフ⁴⁾から採取した海底堆積物中の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度と $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比の鉛直分布を図1に示します。 $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度は、一般的に、ある深さで極大となり、以深では減少するという分布を示します。特に相模湾ではその傾向が顕著に表れています。 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比は、表1に示すとおり、海域によって異なります。これは、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比が起源により異なることによります。グローバルフォールアウト起源の同位体比は 0.18 ± 0.014 、ビキニ核実験起源は $0.30 \sim 0.36$ の範囲であることが報告されています。日本周辺海域で観測された同位体比は、このふたつの起源のプルトニウムが堆積していることを示しています。同位体比からそれぞれの起源がどれだけ堆積しているかを求めると、沖縄トラフ、相模湾、銚子沖では、ビキニ核実

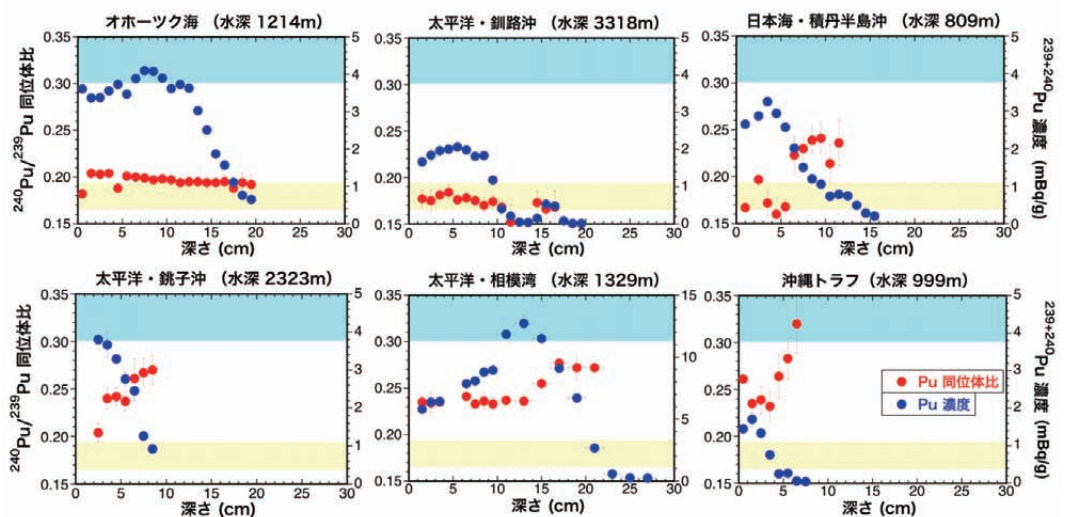


図1 日本周辺海域における海底堆積物中の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度と $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 同位体比の鉛直分布(青丸は濃度を、赤丸は同位体比を示す。黄色及び青色の網掛けは、それぞれ大気圏核実験によるグローバルフォールアウト比(0.18 ± 0.014)及び太平洋核実験場(ビキニ核実験)起源局地フォールアウト比($0.30-0.36$)を示す。Wang and Yamada (2005), Zheng and Yamada (2004, 2005, 2006)を一部改変。)

験起源のプルトニウムが44~53%を占めていました(表1)。太平洋核実験場があったマーシャル諸島から北赤道海流と黒潮によりプルトニウムが運ばれ、これらの海域で海水中に存在する粒子状物質により海水中から吸着・除去(スキベンディング)され、沈降・堆積したためです³⁻⁴⁾。現在でもビキニ環礁のラグーンからプルトニウムが放出されていることが知られています。積丹半島沖とオホーツク海でも対馬海流等により運ばれ、割合は少ないもののビキニ核実験起源のプルトニウムが堆積しています。釧路沖はグローバルフォールアウトが主要な起源です。

表1 日本周辺海域における海底堆積物中の²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比、ビキニ核実験起源Puの割合及び堆積物柱中のPu蓄積量

	²⁴⁰ Pu/ ²³⁹ Pu 同位体比	ビキニ核実 験起源 (%)	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu蓄積量 (Bq/m ²)
オホーツク海	0.182-0.204	12	271
太平洋・釧路沖	0.152-0.184	~0	62
日本海・積丹半島沖	0.160-0.241	18	91.2
太平洋・銚子沖	0.204-0.270	45	>74
太平洋・相模湾	0.233-0.277	44	434
沖縄トラフ	0.232-0.320	53	32.5

堆積物柱中の²³⁹⁺²⁴⁰Pu蓄積量も海域により大きく異なっています(表1)。これは、海洋表層での生物生産量や大気・河川を通して陸域から運ばれる粒子量が異なることによるスキベンディングの違いによるためです。相模湾における²³⁹⁺²⁴⁰Pu蓄積量は434 Bq/m²であり、このうち44%がビキニ核実験起源であることから(表1)、ビキニ核実験起源が191 Bq/m²、残りの243 Bq/m²がグローバルフォールアウト起源です。相模湾の緯度帯(30-40°N)におけるグローバルフォールアウトによる大気からの積算降下量は42 Bq/m²と見積もられており、相模湾の海底堆積物には積算降下量に比べて5.8倍のプルトニウムが蓄積しています。これは、相模湾の海水中に存在する様々な粒子状物質による吸着・除去が活発に行われているためです。

3. 海水中のプルトニウム同位体

大気圏核実験によりプルトニウムが環境中にもたら

されてから60~70年が経過しましたが、²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度及び²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比は海洋において未だ定常状態になっておらず、海水中での鉛直分布や海水柱中の存在量は時間とともに変化しています。

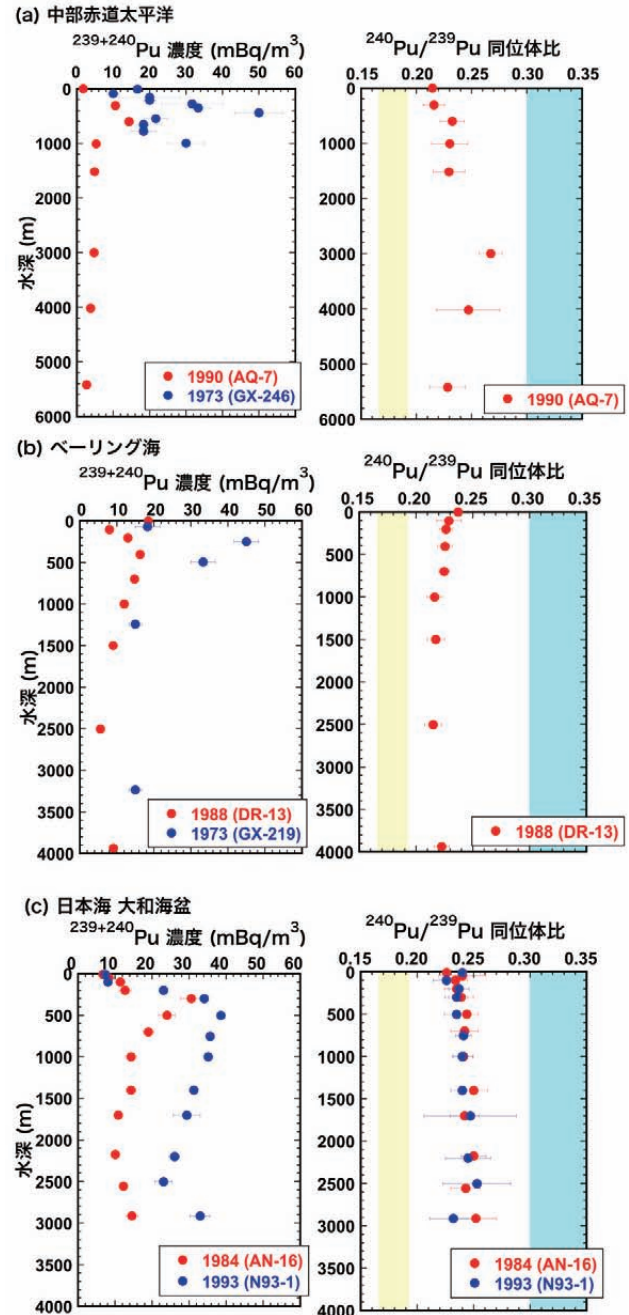


図2 海水中の²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度と²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比の鉛直分布(黄色及び青色の網掛けは、それぞれグローバルフォールアウト比及び局地フォールアウト比を示す。Yamada and Zheng (2010, 2012, 2020)を一部改変。)

中部赤道太平洋⁵⁾, ベーリング海⁶⁾, 日本海大和海盆⁷⁾における²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度の時間変化と²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比の鉛直分布を図2に示します。中部赤道太平洋とベーリング海では, 1973年のGEOSECS航海で得られた²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度(青丸)に比べて, 15~17年後(赤丸)には有意に減少していることが明らかになりました(図2a, b)^{5,6)}。その減少率は海域により異なり, 中部赤道太平洋で 0.89 ± 0.07 Bq/m³/yrであったのに対し, ベーリング海でその倍以上の 2.6 ± 0.2 Bq/m³/yrと見積もられました(表2)。これは, ベーリング海は世界で最も生物生産量が大きい海域のひとつであり, 活発なスキベンジングによるためと考えられます。一方, これとは逆に, 日本海では時間とともに²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度が増加しており(図2c), その増加率は 5.1 ± 0.2 Bq/m³/yrであることを発見しました(表2)。日本海は外洋と接する4つの海峡の水深が浅く(最大130m), 半閉鎖的の海域であり, 対馬海峡を通して流入したプルトニウムの0.02%が日本海に留まれば, この増加率を説明することができます⁷⁾。

表2 海水柱中での²³⁹⁺²⁴⁰Pu存在量の時間変化

	海水柱中 存在量の差 (Bq/m ³)	減少率 (Bq/m ³ /yr)	増加率 (Bq/m ³ /yr)
中部赤道太平洋	15.1±1.2	0.89±0.07	-
ベーリング海	38.9±3.0	2.6±0.2	-
日本海大和海盆	43.8±1.7	-	5.1±0.2

中部赤道太平洋, ベーリング海, 日本海大和海盆における²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比は, いずれの海域においても海面から海底直上まで, グローバルフォールアウト比に比べて, 有意に大きい値を示しました(図2)。これは, ビキニ核実験起源のプルトニウムが存在していることを表しており, ビキニ核実験起源のプルトニウムがベーリング海の深海にまで及んでいることが我々の研究によりはじめて明らかになりました⁶⁾。ビキニ核実験起源のプルトニウムは, 北赤道海流, 黒潮, 黒潮続流, 北太平洋海流, アラスカ海流, アリューシャン海流によってベーリング海まで運ばれ(図3), 粒子による除去, 沈降, 溶解・脱着しているものと考えられます。

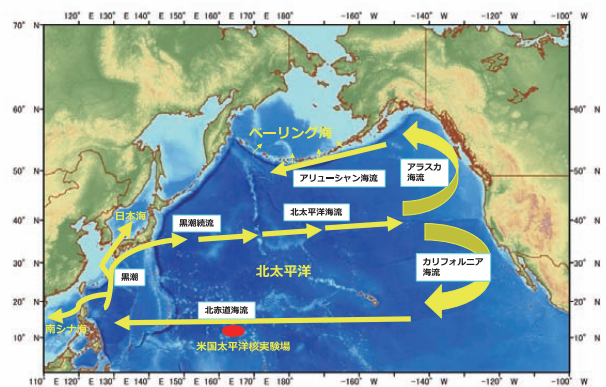


図3 海流によるビキニ核実験起源プルトニウムの輸送過程(赤色は太平洋核実験場の位置を示す。Yamada and Zheng (2020)を一部改変。)

4. おわりに

全球におけるプルトニウムの動態を解明するためには, 今後も様々な海域において, 海水中の²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度の時間変化と²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比の分布を明らかにしていく必要があります。

参考文献

- 1) Zheng, J., Yamada, M. (2006). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 267(1), 73-83.
- 2) Zheng, J., Yamada, M. (2005). Science of the Total Environment, 340(1-3), 199-211.
- 3) Zeng, J., Yamada, M. (2004). Environmental Science and Technology, 38(13), 3498-3504.
- 4) Wang, Z.-L., Yamada, M. (2005). Earth and Planetary Science Letters, 233(3-4), 441-453.
- 5) Yamada, M., Zheng, J. (2012). Science of the Total Environment, 430, 20-27.
- 6) Yamada, M., Zheng, J. (2020). Science of the Total Environment, 718, 137362.
- 7) Yamada, M., Zheng, J. (2010). Science of the Total Environment, 408(23), 5951-5957.

(中央研究所 海洋環境グループ 山田 正俊)