



10年間福島第一原発事故で海洋に放出された放射性物質を追いかけて



青山 道夫
Aoyama Michio

1. 事の始まり

良く知られたことだが、2011年3月11日に東京電力福島第一原子力発電所で3つの原子炉炉心がメルトダウンする過酷な事故が起き（以降福島原発事故）、炉内の放射性物質が環境中に放出された。一口で言えば福島原発事故は、海岸にあり丘を掘り下げて標高を下げ低いところに立地していた原子力発電所が、国際原子力機関 IAEA を含む国内外の組織及び東京電力社内からの防潮堤のかさ上げや非常用発電機の高台への移設等の警告や助言があったにも関わらず備えを怠ったため、地震と津波に遭って冷却水を喪失して3つの原子炉で燃料が熔解したという事故である。事故の結果、多量の放射能が海洋に加えられた^{1,2)}。福島原発事故の場合、原子炉が海岸に立地しているため、事故に際し大気中に放出された放射能のかなりの部分が直接海上に降下したと推測されている。更にモデル計算によってもそれが示唆されている³⁾。また降下物以外に、高濃度の放射能で汚染された水が海洋に直接漏洩していることも判明した^{4,5)}。筆者は当時気象庁気象研究所の地球化学研究部の研究官として在籍しており、海洋環境における¹³⁷Cs等の人工放射性核種の長期挙動の研究を行っていた。更に2011年4月からは「海洋環境での人工放射性核種の放出事故あるいは人為的放出時の挙動の予測モデルと継続的な監視体制の研究」を開始する準備をしていた。この研究の目的と

して次のように予算要求書に書いた（結果として内容は実施されたが、日本政府の予算書類上ではこの名前の研究自体は実施されておらず、歴史に残っていない）。大事なことであるので概要を引用する。

「現在東アジアには、我が国を含めて約80基の原子力発電所が稼動中であり、我が国では本格的な使用済み核燃料再処理施設が試運転中である。また、日本近海では原子力軍艦が航行しており、その周辺において原子力潜水艦の老朽化に伴う廃棄も行われている。冷戦終結後の新しい問題としては、小型核兵器や放射性物質によるテロの潜在的脅威が存在する。このため、我が国を含めた周辺諸国で放射性物質の放出を伴う原子力災害が起きた場合に備えた海洋環境における放出事故あるいは人為的放出時の挙動の予測モデルの構築と継続的な人工放射能のレベルの監視体制の構築が望まれる。従って本研究は、

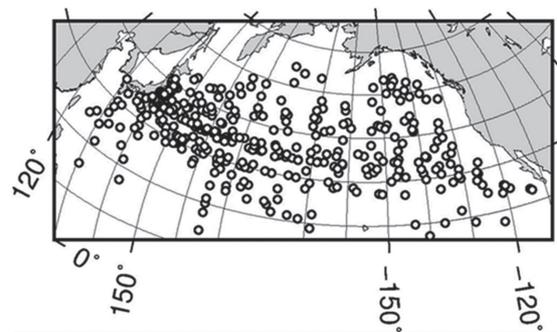


図1 表層440試料の採取地点

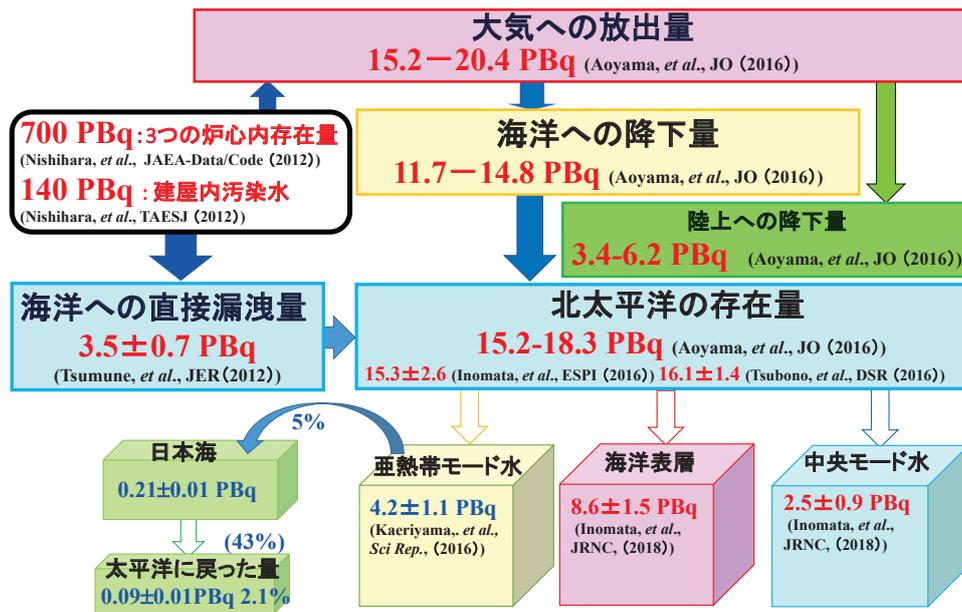


図2 福島原発事故により環境中に放出された放射性Csのマスバランス
¹³⁷Csと¹³⁴Csは、放出時はほぼ同じ量であり、放出時の値に換算してある

海洋環境での人工放射性核種の放出事故あるいは人為的放出時の挙動の予測モデルの構築と原子力利用に伴う放射性核種の海洋環境での挙動を把握するための継続的な監視体制の確立および海洋大循環モデルと組み合わせた挙動の研究をおこなう。」

福島原発事故が起きたとき、筆者は2011年4月の研究開始に合わせて北太平洋全域での表面海水の採水を行うように、コンテナ船を運航する船会社に依頼し準備を進めていた。事故が起きたので直ちに採水計画を前倒しし、2011年3月31日に出港する船2隻に採水用の2Lボトルを載せて、4月1日から4月11日まで日本近海では1日2回、近海を離れるとアメリカ西海岸まで1日1回の表層海水の採水を行ってもらった。北太平洋での福島原発事故で放出された放射性Csの総量を1PBq未満の解像度で求めるためには、この採水で得られた海水2Lで¹³⁷Csを0.5Bqm⁻³まで値を決めなければならなかった。金沢大学尾小屋地下測定室⁶⁾に筆者の方法^{7,9)}でAMPを使って抽出した試料を送った。その後も北太平洋をカバーするために多くの航海で採水をしてもらい、最終的に2012年12月までにはコンテナ船による17航海と複数の調査研究船による採水で北太平洋をカバーする440試料を得ることができた¹⁰⁾。(図1)

本稿では、福島原発事故により環境中に放出された放射性Csが事故後10年間にどのように長期挙動したかを北太平洋から日本海や北極海までの広域で概観する。

2. 福島原発事故によって環境中に放出された放射性Csのマスバランス

これら採取した試料の分析結果を解析して得られた最大の成果の1つは、北太平洋の¹³⁷Csの総量が15~18PBqであると計算できたことである²⁾。この値は青山以外の2つの方法で検証されている^{11,12)}。またモデル計算を行う準備も進めていたので^{13,14)}、直ちに観測されたあるいは公表されたデータを使い、福島第一原発からの直接漏洩量が3.5 ± 0.7PBqであると世界で最も早く正確に推定し報告することができた⁴⁾。正確な直接漏洩量と、北太平洋での観測値に基づく存在総量、更に大気モデルから得られた北太平洋への降下量を使い、質量保存の法則に基づいて北太平洋での総量の観測値と整合性を持った推定を行うことにより、大気に放出された¹³⁷Csの量と陸上への降下量もきちんと求めたことは大きな貢献であった(図2)。陸上でのみの観測データから大気に放出された¹³⁷Csの量の推定を行う手法では、見えていない半分の海上では線量のデータがな

表1 表層海水中¹³⁷Cs放射能濃度 概括表 単位 Bq m⁻³

場所	1970年までの観測最高値	2000年台後半	2011年事故直前	2011年事故直後	2012年	2014年	2015年	2016年	2018年	2020年7月
ベーリング海	23			0.8		1.3***	7.2		2.4***	
北海道南親潮	177	2.0	1.3	最大 514	26.5	12.2	9.3			
福島第一原発北 56 放水口				最大 6.8 × 10 ⁷	330~19,000	130~22,000	47~7,000	26~1,000	52~1,000	
福島第一原発沖		1.6~1.8	1.7		4,700	1,600	340~130	46		
亜熱帯循環西部	78	2.4	1.4		1.0~4.5		1.0~2.6	1.4~1.9	1.3	
北米大陸西岸	69	2.3	1.1	7.5	1.8*	3.6*	8**		4.2***	
日本海	27	2.3	1.5	最大 159	9.0	3.6	3.8	1.0~1.9	1.5~1.8	
東シナ海	10	2.3	1.5	2.8	2.3	4.8	2.9	1.3	1.2	

データは青山による HAMglobal2018 データベース (doi: 10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00001) 及び更新版 (HAMglobal2020, 未公表)

* Smith *et al.*, 2015 の報告値

** 事故起源分のみ Smith *et al.*, 2017 による

*** 2019年12月 <http://ourradioactiveocean.org/results.html> 2020年11月1日アクセス

いことから、筆者の見解では手法には原理的に無理があり、福島原発事故で環境中に放出された大気経由の¹³⁷Csの量を正確に求めることは難しい。事実陸上のみからのデータから推定した値には過小評価や過大評価となっているケースが多々見受けられる¹⁵⁾。しかし、筆者らの研究グループは北太平洋での総量を求めたことにより、大気へ放出された¹³⁷Csは15~20 PBqであるとする世界で最も精度よく推定できている値を得た^{16,17)}。更にその後の研究により、北太平洋には、総量の約半分に当たる8.6 PBqが表層に存在し、亜熱帯モード水中に4.2 PBq、中央モード水中に2.5 PBqが分布し、更に亜熱帯モード水に入った放射性Csの一部は東シナ海低層を経由し日本海に入り、その後津軽海峡を抜けて太平洋に戻っていることも観測結果の解析から分かっている^{18,19)}。

3. 事故直後の沿岸から外洋での様相

福島原発事故直後の福島県沿岸での¹³⁷Csの様相は本誌2011年12月で筆者が報告している²⁰⁾。また、2020年7月までの各海域での¹³⁷Cs放射能濃度の推移を事故前から含めて一覧表として表1に示す。

2011年8月末までの福島第一原発近傍30 km圏での¹³⁷Csの濃度変化は下記のようなものであった。福島第一原発近傍の沿岸では、4月上旬に $68 \times 10^6 \text{ Bq m}^{-3}$ を最高として、8月末まで $10^4 \sim 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$ の値が測定されている。更に、30 km圏のすぐ外側での文部科学省及び福島県による測定では $10^2 \sim 10^5 \text{ Bq m}^{-3}$ となっている。事故前の同海域での¹³⁷Cs濃度がおよ

そ $1.3 \sim 1.7 \text{ Bq m}^{-3}$ であったので、7月末時点で比較しておよそ3桁高い状態である。北太平洋全域では、福島原発事故現場から100~1,000 km離れた西部北太平洋での¹³⁷Cs濃度は $10^1 \sim 10^3 \text{ Bq m}^{-3}$ となっており、事故前の¹³⁷Cs濃度に比べて1~3桁高い状態である²¹⁾。既に述べた北太平洋全域での筆者による測定結果によると、北太平洋のところどころに大気経由で輸送されたものが局所的に降下してできたと考えられる周辺より高濃度となっている領域が、北緯40度と北緯50度の間日付変更線付近や日本から3,000 km以上離れている日付変更線を越えた東太平洋において存在し、¹³⁴Csが 2 Bq m^{-3} 程度検出されると共に、¹³⁷Csが事故前から2倍程度に増加していることが示された^{10,22)}。これは放出時の¹³⁴Csと¹³⁷Csの放射能比がおよそ1であること^{23,24)}と整合していた。福島原発事故で放出された¹³⁷Csについて、再現シミュレーションを沿岸海洋モデル^{25,26)}(ROMS)を用いて福島県沖合海域を対象に行った。福島第一原発の近傍2点での観測結果の平均値とシミュレーション結果による放出メッシュの平均値を合わせることで、漏洩量を推定した。大きな直接漏洩は3月26日から4月6日までほぼ一定の割合で生じ、その後大幅に減少しているが、8月末の時点で漏洩はゼロにはなっていない。漏洩が大きい5月末までの漏洩量は $3.5 \pm 0.7 \text{ PBq}$ であると見積もられた^{4,26)}。福島沖に漏洩した¹³⁷Csは、渦等の影響によって複雑な挙動を示すが、主には沿岸に沿って南下し、黒潮に沿って東へ拡散する。その濃度は、100 km離れた場所で 10^3 Bq m^{-3} 以下と計算されている。その

後の輸送経路については、直接漏洩した ^{137}Cs は基本的には、亜熱帯循環（黒潮と黒潮続流）に沿って東に向かって進み北米大陸西岸に到達した^{27,28)} と共に一部は海洋内部を南へ輸送された^{1,18,19,29-31)}。また、核実験起源の ^{137}Cs と福島原発事故起源の ^{137}Cs を分離して評価するために今回新たに放出された ^{134}Cs のデータが重要であることも指摘していた。筆者は現在でも ^{134}Cs も測定し、核実験起源の ^{137}Cs と分離することで、福島原発事故由来の寄与を正確に推定するように仕事をしている。

4. 表層での広がり：表層を東へ北太平洋を横断し、北米大陸西岸に到達、更にベーリング海北極海へ到達するルート

まず、 ^{137}Cs の最も速い経路は、北太平洋の黒潮及び黒潮続流の速度からも容易に類推されるように、表面輸送である。大気からの降下は、主に北東に移動した低気圧と共に事故サイトから主に北東側に広がった。表層での ^{137}Cs の濃度が 10 Bq m^{-3} を越える領域は2011年6月には東経160度までしか到達していなかったが、その後海洋表層での輸送により東に移動し、2011年7～9月には東経165度まで広がっている。2011年10～12月には東経170度程度まで広がっており、更にその東側の東経170度から西経170度の領域でも、濃度わずかな表層 ^{137}Cs 濃度の上昇が見出されている。更に、2012年1～3月では表層での ^{137}Cs の濃度が 10 Bq m^{-3} を越える領域は東経180度線（日付変更線）付近まで達していることが観測された。この観測結果から東への移動速度を見積もると、270日間で1,800 km 移動したことになり、1日当たり7 km、 8 cm s^{-1} という推定ができる。海洋物理学の観測から見積もられているこの海域での表層の流速は $4\sim 16 \text{ cm s}^{-1}$ であることから、得られた速度は環境中に放出されたあと海洋表面から海洋に入り、よく溶けて海水と共に輸送されていると考えることができることを示している³²⁾。2014年夏には北米大陸沿岸で福島事故由来の ^{137}Cs が検出されている²⁸⁾。計算すると、その速度は東太平洋では1日当たり3 km まで低下していた¹⁾。これは東西での風速分布の差で基本的には説明可能な大きさであった。北向き輸送では、北極海カナダ海盆では、2012年及び2013年には事故起源 ^{137}Cs は

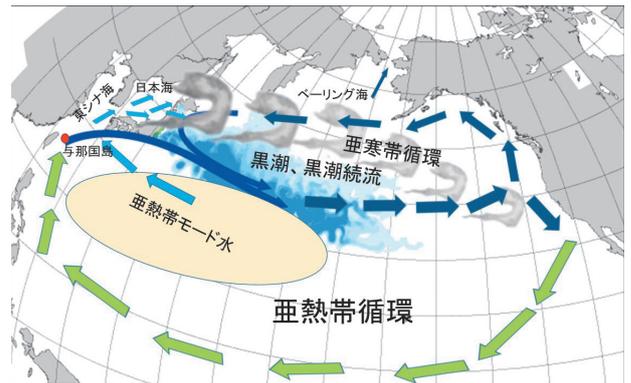


図3 表層循環模式図と放射性Csの観測あるいは推定される輸送経路

観測されなかったが、2014年にはわずかではあるが深度150 m 付近の太平洋起源水中に事故起源 ^{134}Cs が検出された。表層輸送に関しては、モデルシミュレーションによる再現計算でも、北太平洋で観測された ^{137}Cs の輸送の様相と良好な一致を示し、ほぼ3年で太平洋を横断し、北米大陸西海岸に到達した⁷⁾。北米大陸西海岸での表層海水中 ^{137}Cs 濃度は2017年でも上昇傾向にあった。 ^{137}Cs 濃度は、2015年から2017年の間に西部亜寒帯地域では減少及びベーリング海では増加していた。ベーリング海での増加は、おそらく北太平洋の亜寒帯循環によるベーリング海への福島原発事故由来の ^{137}Cs の長距離輸送に起因している。そして長距離輸送に関連する2017年のベーリング海での増加は、将来北極海で ^{137}Cs が増加する可能性を示唆している³³⁾ (図3 濃い青の矢印)。

5. 海洋内部への輸送

外洋に出た放射性Csの輸送過程については、観測及びモデル研究によって、1) 表層輸送、2) 中央モード水形成にともなう長い時間スケールの内部輸送、3) 亜熱帯モード水形成にともなう相対的に早い内部輸送の3つの輸送経路が明らかになってきた^{1,19,29)}。これらの3つの領域への配分の結果は既に図2に示してある。また表層輸送については既に前の節で述べた。ここで海洋学になじみの薄い読者のために、内部輸送に関わるモード水の説明をする。海洋学的には、表層水塊の1つとしてモード水と呼ばれる水塊があり、ある海域の表層（海面から水深500 m 程度まで）に、海域に固有の水温や塩分等で

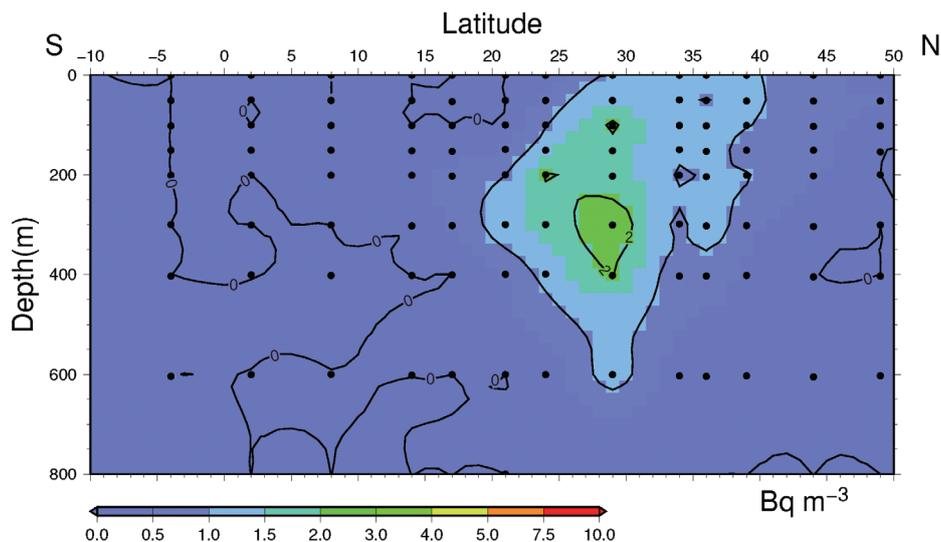


図4 2015年に東経165度線で観測された福島原発事故由来¹³⁷Csの海洋内部での広がり

特徴づけられる海水が広く分布している。このモード水は太平洋を含む各大洋の中緯度において、冬季に表層で良く混じっている混合層が周りに比べて深くまで発達する海域で形成される。代表的なものに黒潮続流域で生成する中央モード水や黒潮の南側で生成する亜熱帯モード水がある。第2の経路は、中央モード水の形成である。2012年6~7月の放射性Cs放射能の最大値は、東経165度線上では北緯34~39度の約400mの深さで観測された。この深さは中央モード水の範囲にあり、中央モード水中の放射性Cs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。2015年では中央モード水に相当する水塊では事故起源放射性Csは観測されず、東方に輸送されてしまっていた。第3の経路は亜熱帯モード水の形成である。事故直後に黒潮・黒潮続流のすぐ南側に大気から沈着した放射性Csは、2011年3月に同海域で形成されていた亜熱帯モード水の沈み込みにともなって亜熱帯域の亜表層（深度約200~400m）を南に運ばれ、2012年1月には北緯20度まで到達した。2012年10~11月の東経147度及び東経155度における鉛直断面観測で得られた放射性Cs濃度と他の物理パラメータを総合すると、福島原発事故から19か月後の西部北太平洋においては亜表層に福島原発事故由来の放射性Csのピークが確認され、これらは亜熱帯モード水並びに中央モード水に捉えられたと判断された。更に2015年夏に行った東経165度線に

沿う観測の結果によると、¹³⁴Cs濃度で見ることが出来る福島原発事故由来の放射性Csは図4に示すように亜熱帯モード水域内の北緯20度から30度の深さ300mから400mに極大を持つ分布をしていた。これらの鉛直分布の観測結果は、福島原発事故由来の放射性Csが1年の時間スケールで海洋内部に導入される最も有効な経路は、亜熱帯モード水と中央モード水形成にともなう沈み込み（サブダクション¹⁾であることを示している。サブダクションで沈み込んだ¹³⁷Csは、放射性壊変と移流拡散により濃度は減少していくが、一部は既に日本海に輸送されていると共に、将来はインド洋から大西洋及び太平洋赤道域に東部で南に越えて南太平洋に輸送されるであろう^{13,34)}。

6. 表層での広がり：海洋内部亜熱帯モード水から西へ東シナ海低層に到達，表層に出て日本海へ，更に津軽海峡を抜けて太平洋に戻るルート及び2019年に与那国島に到達したシグナル

亜熱帯循環域内北部から東シナ海北部の低層に数年以内の短い時間で到達し、その後東シナ海で表層と混合し、日本海に広がったとみられる現象も観測

1 冬季の冷却により、密度が大きくなった表層海水が、その密度が周囲の海水の密度とバランスする深さまで沈み込むこと

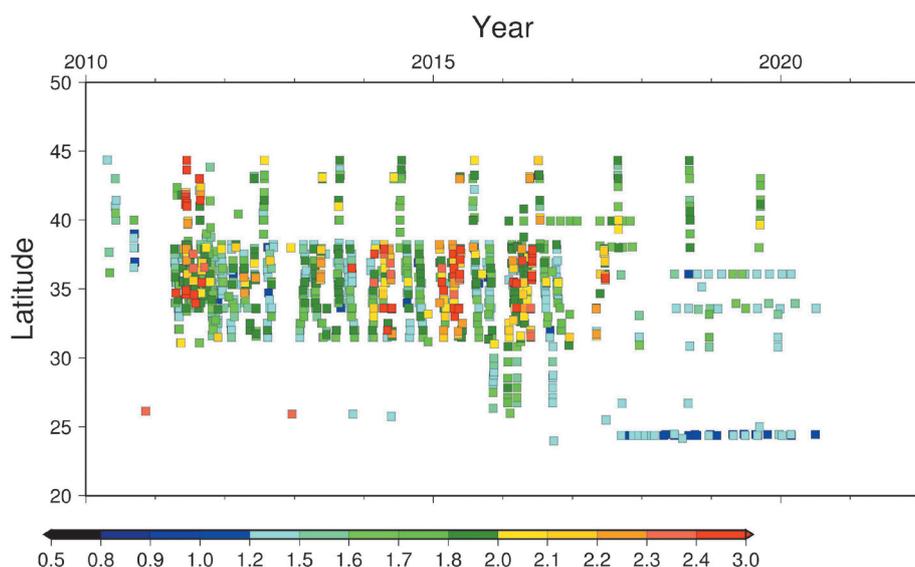


図5 東シナ海と日本海で観測された表層海水中の¹³⁷Cs放射能濃度のホフモーラダイアグラム(時間と緯度の推移図)(Bq m⁻³)

されている。この再循環は、まず2014年に東シナ海北部の九州の西方海域の低層でシグナルが見え始めた。その後表層にも濃度上昇のシグナルが見えて、それは東シナ海北部から対馬海峡を抜け日本海南部や北部でも2015年及び2016年には¹³⁷Cs濃度が3 Bq m⁻³となり、福島原発事故前の核実験起源¹³⁷Cs濃度の1.5 Bq m⁻³の倍程度を示し極大となった¹⁹⁾(図5及び図3水色の矢印)。その後日本海では¹³⁷Csはゆっくり減少したが、南部での減少傾向は北部より早く、結果として2019年から2020年では、日本海南部では既に濃度が低下し1.5 Bq m⁻³程度となっているが、日本海北部ではそれよりも大きい1.8 Bq m⁻³を超える状態が続いている(筆者による未公表資料)。日本海に輸送された福島原発事故由来の¹³⁷Csの量は亜熱帯モード水中の量のほぼ5%にあたる0.21 PBqが2017年までに輸送され、更に日本海に入った量の43%は津軽海峡から太平洋側に戻ったと推定される(図2と図3)¹⁹⁾。また、筆者らの2020年7月までの石垣島と与那国島での観測結果から(筆者による未公表資料)¹³⁷Cs濃度では明瞭ではないが¹³⁴Csと¹³⁷Cs放射能比が有意に0.5付近まで上昇し、日本海に到達した福島原発事故由来Csのそれと同じ程度となった。これにより、事故後8年間かけて亜熱帯循環域を大きく時計回りに回って、福島原発事故由来の¹³⁴Csが与那国島まで

到達したことが見出されたと言える(図3緑の矢印)。

7. 今後すべきこと

北太平洋では、本稿で述べた1) 表層輸送、2) 中央モード水形成にともなう長い時間スケールの内部輸送、3) 亜熱帯モード水形成にともなう相対的に早い内部輸送の3つの輸送経路のうち、1) 表層輸送と3) 亜熱帯モード水形成にともなう相対的に早い内部輸送は観測によりその様相を捉えることができている。幸いにもどの場所においても観測された濃度上昇は、魚への生体濃縮を考慮しても人間生活には影響を与えない大きさであった。これらの福島第一原発事故起源の放射性Csの表層での長期挙動はモデル計算でも良く再現できており、今回の福島第一原発事故の影響評価を行う上だけでなく、将来もしも沿岸に立地する原子力発電所あるいは原子力施設が事故を起こし放射性物質を海洋に注入したときに表層輸送としてどのように挙動するかを予測することができる。またとれるならば対策をとることも寄与できる。しかし、例えば亜熱帯モード水から東シナ海低層を経由し日本海に到達した、観測で明瞭にとらえられている輸送は、残念ながら世界最先端のモデルでも再現できていない。海面にどのように降下したかにも依存するのは事実であるが、

大気モデルの性能向上と合わせて海洋モデルの性能向上も今後の課題である。また、与那国島に到達したシグナルは極めて弱い³が、約10年の時間スケールでの挙動は今後も少なくとも数年間は追跡し、挙動を見極める必要があると筆者は考える。これらの海洋内部経路や長期挙動の観測結果を上手に海洋モデルに反映させることにより、筆者が構築しようとした「海洋環境での人工放射性核種の放出事故あるいは人為的放出時の挙動の予測モデル」と「原子力利用に伴う放射性核種の海洋環境での挙動を把握するための継続的な監視体制の確立」が実現することを願って本稿を終える。原子力発電を続けるのであれば、備えは必要であり、もし正しく備えなければ福島で起こした事故を繰り返すことにもなりかねない。備えあれば憂いなしである。

引用文献

- 1) Aoyama, M., et al., *Journal of Oceanography*, **72**, 53-65 (2016)
- 2) Aoyama, M., et al., *Journal of Oceanography*, **72**, 67-76 (2016)
- 3) Science Council of Japan, A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, **103** (2014)
- 4) Tsumune, D., et al., *J. Environ. Radioact.*, **111**, 100-108 (2012)
- 5) Buesseler, K., et al., *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 9931-9935 (2011)
- 6) Hamajima, Y. and Komura, K., *Appl. Radiat. Isot.*, **61**, 179-183 (2004)
- 7) Aoyama, M., et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **282**, 781-785 (2009)
- 8) Aoyama, M., et al., *Radioact. Environ.* **11**, 137 (2008)
- 9) Aoyama, M., et al., *Appl. Radiat. Isot.*, **53**, 159-162 (2000)
- 10) Aoyama, M., et al., *Biogeosciences*, **10**, 3067-3078 (2013)
- 11) Tsubono, T., et al., *Deep Sea Research Part I*, **115**, 10-21 (2016)
- 12) Inomata, Y., et al., *Environmental Science: Processes & Impacts*, **18**, 126-136 (2016)
- 13) Tsumune, D., et al., *Progress In Oceanography*, **89**, 38-48 (2011)
- 14) Aoyama, M., et al., *Geophysical Research Letters*, **35**, L01604 (2008)
- 15) Aoyama, M., et al., *J. Environ. Radioact.*, **217** (2020)
- 16) Aoyama, M., et al., *Progress in Nuclear Science and Technology*, **6**, 1-7 (2019)
- 17) Buesseler, K., et al., *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **9**, 173 (2017)
- 18) Inomata, Y., et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **318**, 1587-1596 (2018)
- 19) Inomata, Y., et al., *Ocean Sci.* **14**, 813-826 (2018)
- 20) 青山道夫, *Isotope News*, **692**, 10-14 (2011)
- 21) Honda, M. C., et al., *Geochem. J.*, **46**, e1-e9 (2012)
- 22) Aoyama, M., et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **296**, 535-539 (2013)
- 23) Nishihara, K., et al., *Transactions of the Atomic Energy Society of Japan*, **11**, 13-19 (2012)
- 24) Nishihara, K., et al., *JAEA-Data/Code*, **18**, 1-190 (2012)
- 25) 坪野考樹, 他, 地域海洋モデル ROMS を用いた物質拡散の計算法 (CRIEPI, 2010)
- 26) 津旨大輔, 他, 福島第一原子力発電所から漏洩した¹³⁷CS の海洋拡散シミュレーション (CRIEPI, 2011)
- 27) Smith, J. N., et al., *Environmental Science & Technology*, **51**, 10494-10502 (2017)
- 28) Smith, J. N., et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **112**, 1310 (2015)
- 29) Kaeriyama, H., et al., *Environmental science & technology*, **48**, 3120-3127 (2014)
- 30) Kumamoto, Y., et al., *Scientific reports*, **4**, 4276 (2014)
- 31) Yoshida, S., et al., *Geophysical Research Letters*, **42**, 7139-7147 (2015)
- 32) Aoyama, M., et al., *Biogeosciences*, **10**, 3067-3078 (2013)
- 33) Kumamoto, Y., et al., *Polar Science*, **21**, 228-232 (2019)
- 34) Aoyama, M., et al., *Progress in Oceanography*, **89**, 7-16 (2011)

(筑波大学客員教授 福島大学客員教授)