

## 2. 全球放射性セシウムデータベースを解釈するための海洋大循環モデルシミュレーション

津旨 大輔<sup>1\*</sup>・Frank O. BRYAN<sup>2</sup>・Keith LINDSAY<sup>2</sup>

・坪野 考樹<sup>1</sup>・三角 和弘<sup>1</sup>・青山 道夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>National Center for Atmospheric Research (P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307 USA)

<sup>3</sup>筑波大学 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

\* E-mail: tsumune@criepi.denken.or.jp

将来の放射性物質汚染を検知するためには、現状の放射性物質濃度分布を把握する必要がある。そのためIAEAでは全球放射性物質濃度データベースを構築している。データベースで最もデータが多い放射性セシウムに対しても、全球分布を把握するためにはデータ密度が不足している。全球海洋大循環モデルシミュレーションを実施し、データベースとの比較による検証を行い、再現性が高いことを確認した。現状の全球濃度分布を解析し、北太平洋と北大西洋が高濃度となる要因を把握した。さらに、データベースでは推定が出来なかった海盆毎のインベントリ（総量）の解析を行い、北太平洋と北大西洋が他海域のソースとなることを確認した。予測計算を通じて、データベースのギャップを埋めるために今後の観測が必要な海域を提案した。

**Key Words :** *Radioactive caesium, Global database, Ocean general circulation model, Inventory*

### 1. はじめに

福島第一原子力発電所事故によって、大量の放射性セシウムが海洋へ放出された。事故以前においても、大気圏核実験による地球規模のフォールアウト、欧州の再処理工場からの排出によって海洋に供給され、放射性セシウムはバックグラウンド濃度として存在していた。将来の放射性物質の汚染を検知するためには、放射性物質の全海洋における分布を把握する必要がある。この目的のために、IAEAによってデータベースが構築されている (IAEA MARIS)。このデータベースは、海洋学的トレーサーとしても利用されることを目的としており、共同研究プログラムも実施されている (IAEA CRP (Corporate Research Program), LAMER (Levels and Assessment of Marine Environmental Radioactivity))。このデータベースのデータ密度は時間的にも空間的にも不均一である。データベースで最もデータが多い放射性セシウム (<sup>137</sup>Cs) に対しても、全球分布を把握するためにはデータ密度が不足している。海洋大循環モデルシミュレーションによるデータベースの補間や外挿は、全海洋における濃度分布の把握

や海洋学的トレーサーとしての利用に有効である。

このような背景のもと、北太平洋<sup>12)</sup>および南半球<sup>9)</sup>に着目し、いくつかのモデル研究が実施されて来た。

これらの研究においては、大気圏核実験による全海洋上のフォールアウト分布を適切に設定する必要があったが、海洋への降下量については大きな不確実性が残されている<sup>4)</sup>。また大気圏核実験によるフォールアウト、再処理施設からの排出、福島第一原子力発電所事故を同時に考慮したシミュレーションは存在しない。また比較対象とすべきデータベースのデータは品質管理が十分ではなく、シミュレーション結果と比較すべきデータを選別する必要も残されている。

本研究の目的は以下の通りである。大気圏核実験によるフォールアウト、再処理工場からの排出、福島第一原子力発電所の事故による放出を考慮した海洋大循環モデルシミュレーションを行い、観測結果のデータベース<sup>6)</sup>と比較して再現性を検証する。現状の全海洋の<sup>137</sup>Cs濃度分布を解析する。さらに、データベースでは推定出来なかった海盆毎のインベントリ（総量）の解析を行う。予測計算を通じて、データベースのギャップを埋めるため

に今後の観測が必要な海域を提案する。

## 2. 方法

### (1) 海洋大循環モデル

米国大気研究センターで開発され、公開されている Parallel Ocean Program version 2 (POP2) of the Community Earth System Model version 2 (CESM2)<sup>7)</sup>を用いた。水平解像度は経度方向に1.125度、緯度方向に0.28度から0.54度と、赤道域を詳細に可変とした。鉛直分割は60層で、表層では10m、底層では最大250mと可変とした。再現計算期間は、1945年から2030年とし、月変動を考慮した駆動力の気候値(Normal Year Forcing)を繰り返し与えた。

### (2) ソースターム

大気圏核実験による<sup>137</sup>Csのフォールアウトの全海洋上の分布は、GPCPによる降雨データの気候値<sup>8)</sup>に比例すると仮定し、かつ緯度方向にはAoyama et al. (2006)<sup>9)</sup>の分布に従うとして設定した。この分布が、筑波におけるフォールアウトの時系列変化<sup>4)</sup>に比例すると仮定し、時間変化するフォールアウトを構築した。英国セラフィールドと仏国ラ・アーグの再処理工場からの放出率は記録されており、1952年から1998年まで設定した<sup>9)</sup>。福島第一原子力発電所事故による海洋供給は、大気降下<sup>10)</sup>と直接漏洩<sup>11)</sup>の推定結果を用いた。

### (3) データベース

データベースは、IAEAによって公開されているMARIS (<https://maris.iaea.org/home>) を含み、新たに構築され、放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同研究拠点の一環として筑波大学のホームページでdoi付きで公開されているHAM database<sup>9)</sup>を用いた。

## 3. 結果と考察

### (1) データベースとの比較

データベース中の観測結果と計算結果の比較を行った。全球海洋大循環モデルは縁辺海における解像度が不足しており、再現性が不十分なため、縁辺海（バルチック海、地中海、黒海、紅海、日本海、東シナ海）におけるデータは比較対象から外した。また、点源のソースターム（再処理工場からの放出、海洋における大気圏核実験場（ビキニ環礁、エニウエトク環礁）、福島第一原子力発電所（2011年3月以降）の近傍海域も比較対象外とした。その他、特異的なデータをデータの品質管理の観点から削除した。その結果、HAM databaseには163,260データが存在したが、ここで比較対象としたデータ数は、

19,548と全体の約12%となった。また、データは北太平洋および北大西洋に多く、他の海域では少ない。

データ数の多い北太平洋および北大西洋を中心に、1960年代から2000年代、さらに2011年3月以降の比較を行った。1960年代、1970年代の表層濃度における観測結果の比較は、よい一致を示した（図-1,2,3,4）。北太平洋においては、西側よりも東側のほうが高濃度となる現象を再現出来た。また北大西洋においては、再処理工場の影響によって、スカンジナビア半島に沿った高濃度を再現出来たが、やや過小評価となった。1980年以降は、濃度分布が小さくなり、海盆内においてはほぼ一様となった。一例として北太平洋の結果を図-5に示す。北太平洋において2002年に観測された緯度方向の鉛直断面分布をよく再現することが出来た。また、北太平洋と比較して、北大西洋のほうが濃度の貫入深度が深い傾向も再現することが出来た。水平解像度は1度と、中規模渦の再現性には問題が残るため、高解像度モデル<sup>12)</sup>による結果として再現性が劣るが、福島第一原子力発電所事故後の計算結果は観測結果と概ね一致した。

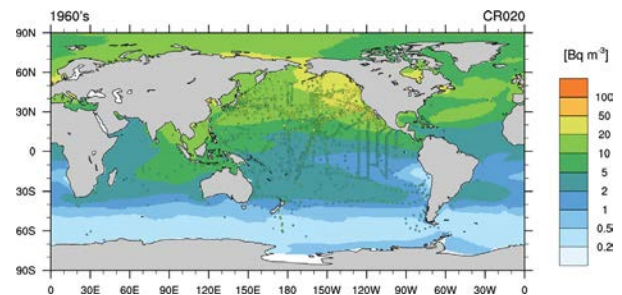


図-1 1960年代の表層<sup>137</sup>Cs濃度分布、カラーコンターは計算結果、○の色分けが観測結果を示す。

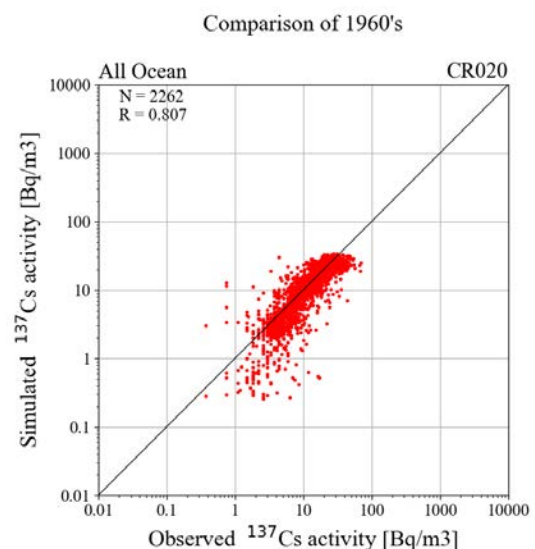


図-2 1960年代の表層<sup>137</sup>Cs濃度分布の計算結果と観測結果の比較。

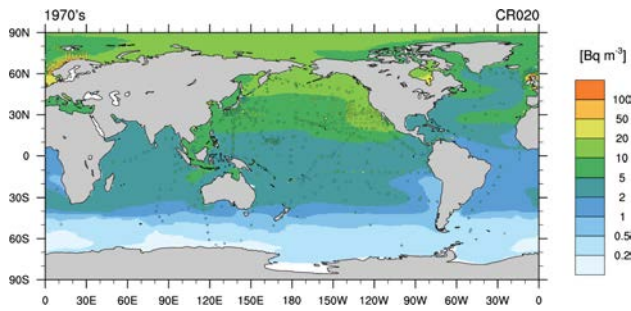


図-3 1970年代の表層<sup>137</sup>Cs濃度分布、カラーコンターは計算結果、○の色分けが観測結果を示す。

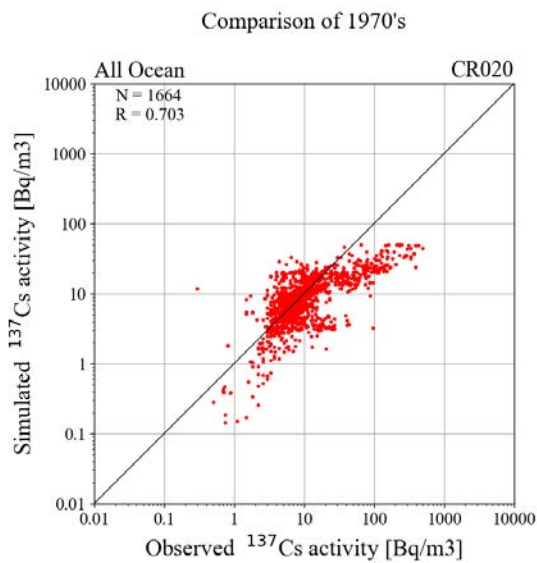


図-4 1970年代の表層<sup>137</sup>Cs濃度分布の計算結果と観測結果の比較。

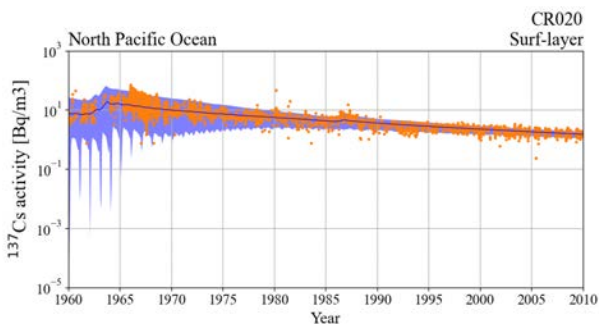


図-5 北太平洋における表層<sup>137</sup>Cs濃度。青いハッチは計算結果、点は観測結果を示す。

## (2) インベントリ

データベースでは、データ数が不足しているため、海域毎のインベントリ（総量）を推定することが困難である。一方で、計算結果は誤差を含むものの、質量保存則

を満足しており、海域毎のインベントリおよびその変化を計算することが可能である。ここでは、データベースのデータの時空間密度は不均一であるものの、データベースとの比較によってある程度の再現性を確認した後、インベントリの解析を実施した。全球のインベントリは、大気圏核実験による地球規模のフォールアウトのため1966年に最大となった（図-6）。北太平洋と北大西洋を足したインベントリは、1966年において全球の約67%であり、大半を占めることが分かった。その後、核種崩壊の影響によって減少した。

北太平洋でも、1966年にインベントリが最大となった。北太平洋からインド洋、北極海、中部太平洋へのフラックスは正の値であり、北太平洋は他の海域への供給源であった。つまり、核種崩壊の影響に加え、他海域への流出の影響で、インベントリが減少した。福島第一原子力発電所の事故により、2011年のインベントリは20%増加した。北大西洋では、再処理工場からの放出により、インベントリは1970年代後半に最大となる。北大西洋からグリーンランド海への流出フラックスは他のフラックスより大きく、他の海洋盆地への供給源となっている。2000年以降、ラブラドル海や南大西洋から北太平洋への流入フラックスは流出フラックスより大きくなる。インド洋のインベントリは、主に北太平洋からの流入西胚されているが、北太平洋や北大西洋と比較すると小さい。

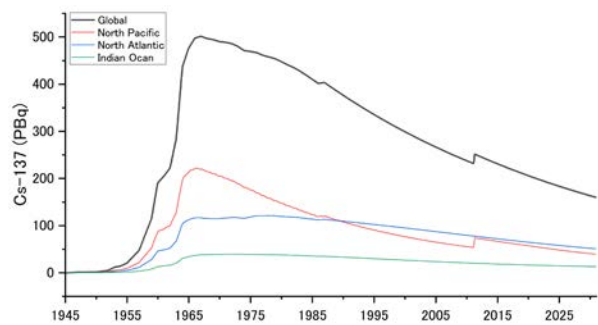


図-6 各海域のインベントリ(PBq)の時系列変化

## (3) 今後の観測

2030年までの予測計算の結果、2030年においても、深層を除き、全ての海域で<sup>137</sup>Cs濃度は検出可能なレベルにあることが分かった。特に南大西洋は、2020年まで濃度が上昇しており、その後の濃度低下割合も小さいという特徴的な濃度変化を示すが、観測データがほとんど存在しない。今後の観測によって、この濃度変化を確認することが望ましい。また南大洋は1960年代から70年代にかけては過小評価となり、フォールアウトの過小評価の可能性が考えられる。一方、2000年代においては、他海域

からの流入の影響も踏まえ、再現性が向上している。南大洋においてもデータが少ないが、今後の濃度推移についても注視することが望ましい。

#### 4. まとめ

データベースを解釈するための海洋大循環モデルによる<sup>137</sup>Cs濃度のシミュレーションを実施した。データベースと比較することによって、特にデータが多く存在する北太平洋や北大西洋においては再現性が高いことを確認した。また各海域のインベントリの時系列と海域間のフラックスをにより定量的に解析した。大気圏核実験のフォールアウトによる<sup>137</sup>Cs濃度は、2030年以降も深層を除き、全海洋で検出されるレベルを維持出来ることが分かった。海洋大循環モデルによるシミュレーションは、データベースのギャップを埋めるための将来の観測計画を立てる際に有益である。

#### 参考文献

- 1) Tsumune, D., Aoyama, M., Hirose, K., Maruyama, K., and Nakashiki, N.: Calculation of artificial radionuclides in the ocean by an ocean general circulation model, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 248, 777-783, 10.1023/a:1010665300905, 2001.
- 2) Tsumune, D., Aoyama, M., and Hirose, K.: Behavior of <sup>137</sup>Cs concentrations in the North Pacific in an ocean general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 108, 10.1029/2002jc001434, 2003a.
- 3) Tsumune, D., Aoyama, M., and Hirose, K.: Numerical simulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>239,240</sup>Pu concentrations by an ocean general circulation model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 69, 61-84, 10.1016/s0265-931x(03)00087-0, 2003b.
- 4) Tsumune, D., Aoyama, M., Hirose, K., Bryan, F. O., Lindsay, K., and Danabasoglu, G.: Transport of <sup>137</sup>Cs to the Southern Hemisphere in an ocean general circulation model, *Progress in Oceanography*, 89, 38-48, 10.1016/j.pcean.2010.12.006, 2011.
- 5) Aoyama, M., Hirose, K., and Igarashi, Y.: Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests <sup>137</sup>Cs fallout, *J Environ Monit*, 8, 431-438, 10.1039/b512601k, 2006.
- 6) Aoyama, M. HAMGlobal2021: Historical Artificial radioactivity database in Marine environment, Global integrated version 2021, 10.34355/CRiED.U.Tsukuba.00085, 2021.
- 7) Danabasoglu, G., Lamarque, J. F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K., Fasullo, J., Garcia, R., Gettelman, A., Hannay, C., Holland, M. M., Large, W. G., Lauritzen, P. H., Lawrence, D. M., Lenaerts, J. T. M., Lindsay, K., Lipscomb, W. H., Mills, M. J., Neale, R., Oleson, K. W., Otto - Bliesner, B., Phillips, A. S., Sacks, W., Tilmes, S., Kampenhou, L., Vertenstein, M., Bertini, A., Dennis, J., Deser, C., Fischer, C., Fox - Kemper, B., Kay, J. E., Kinnison, D., Kushner, P. J., Larson, V. E., Long, M. C., Mickelson, S., Moore, J. K., Nienhouse, E., Polvani, L., Rasch, P. J., and Strand, W. G.: The Community Earth System Model Version 2 (CESM2), *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, 10.1029/2019ms001916, 2020.
- 8) Adler, R. F., Sapiano, M., Huffman, G. J., Wang, J., Gu, G., Bolvin, D., Chiu, L., Schneider, U., Becker, A., Nelkin, E., Xie, P., Ferraro, R., and Shin, D. B.: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation, *Atmosphere (Basel)*, 9, 10.3390/atmos9040138, 2018.
- 9) Aarkrog, A.: Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50, 2597-2606, 10.1016/s0967-0645(03)00137-1, 2003.
- 10) Aoyama, M., Kajino, M., Tanaka, T. Y., Sekiyama, T. T., Tsumune, D., Tsubono, T., Hamajima, Y., Inomata, Y., and Gamo, T.: <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part two: estimation of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs inventories in the North Pacific Ocean, *Journal of Oceanography*, 72, 67-76, 10.1007/s10872-015-0332-2, 2016.
- 11) Tsumune, D., Tsubono, T., Misumi, K., Tateda, Y., Toyoda, Y., Onda, Y., and Aoyama, M.: Impacts of direct release and river discharge on oceanic <sup>137</sup>Cs derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 214-215, 10.1016/j.jenvrad.2020.106173, 2020.
- 12) Tsubono, T., Misumi, K., Tsumune, D., Bryan, F. O., Hirose, K., and Aoyama, M.: Evaluation of radioactive cesium impact from atmospheric deposition and direct release fluxes into the North Pacific from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 115, 10-21, 10.1016/j.dsr.2016.02.019, 2016.