

44. High-Nutrient Low-Chlorophyll海域の鉄の収支の推定

三角 和弘^{1*}・Keith LINDSAY²・Frank O. BRYAN²・J. Keith MOORE³・
Scott C. DONEY⁴・津旨 大輔¹・吉田 義勝¹

¹電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²National Center for Atmospheric Research (1850 Table Mesa Dr., Boulder, CO 80305, USA)

³University of California at Irvine (3214 Croul Hall, Irvine, CA 92697-3100, USA)

⁴Woods Hole Oceanographic Institution (Woods Hole Rd., MS#25, Woods Hole, MA 02543-1050)

* E-mail: misumi@criepi.denken.or.jp

鉄は栄養塩が豊富にあるにもかかわらずクロロフィル濃度が低い, High-Nutrient Low-Chlorophyll (HNLC) 海域で海洋の一次生産を制限していると考えられている. 温暖化により海洋循環が変化すると, HNLC海域における鉄の収支が変化し, 温暖化の進行を加速あるいは減速する可能性がある. 従って, その収支の変化を理解することが温暖化予測の不確実性の低減に役立つと考えられる. 本研究では気候変動に関する政府間パネルの第5次評価報告書向けの計算結果を利用して, 温暖化時のHNLC海域における鉄の収支の変化について調べた.

Key Words : iron, ocean, global warming, primary production, earth system model

1. はじめに

鉄はプランクトンの増殖に必須の微量元素で鉄の不足は東部赤道太平洋, 南大洋, 北太平洋亜寒帯域で一次生産を制限していると考えられている^{1,3)}. これらの海域は, 硝酸塩, リン酸塩, ケイ酸塩などの他の栄養塩が豊富にあるにもかかわらず, クロロフィル濃度が低いことから, High-Nutrient Low-Chlorophyll (HNLC) 海域とよばれている. 温暖化に伴うHNLC海域表層の鉄の収支の変化は, 海洋の一次生産の変化を通じて温暖化にフィードバックするため, 鉄の収支を理解することは温暖化予測をする上で重要であると考えられる.

本研究では, 気候モデルに生物地球化学過程を結合した, 地球システムモデルを用いた温暖化予測シミュレーションの結果から, 温暖化した時のHNLC海域表層の鉄の収支の変化を調べた.

2. 使用したモデルと解析手法

米国大気研究センターで開発された, 地球システムモ

デルCESM1⁴⁾の20世紀再現計算と高CO₂排出シナリオ(RCP8.5^{5, 6)})の計算結果を解析した. これらの計算の手順や再現性の詳細は別の論文に述べられているのでこちらも参考にさせていただきたい^{7, 8)}. それぞれ1990年代と2090年代の10年平均の結果を解析に利用した.

地球システムモデルの海洋モデルは, 米国ロスアラモス国立研究所で開発が行われているPOP2 (Parallel Ocean Program version 2^{9, 10)}) がベースとなっており, 水平解像度は約1度, 鉛直60層である. 海洋生態系モデルとしてBECモデル (Biogeochemical Elemental Cycling¹¹⁾) が組み込まれていて, ここに鉄循環が含まれている. 海洋モデルはフラックスカプラーにより, 大気, 陸面, 海氷のモデルと結合されている.

3. 結果と考察

1990年代の順圧流線関数, 表層水温, 硝酸塩濃度, 溶存鉄濃度を観測データと比較したところ, 概ね良く再現されていた. モデルの計算結果は東部赤道太平洋, 南大洋, 北太平洋亜寒帯域で一次生産が鉄の不足により制限

されており、HNLC海域を再現していた。

HNLC海域表層の、1990年代の鉄の収支を調べたところ、供給されている鉄の約7割が海洋の物理過程により供給されており、風成塵等による海洋外部からの供給量は約3割であった（図-1）。HNLC海域で主に海洋の物理過程によって鉄が供給されているということは、過去の観測データなどの推定からも指摘されており^{12, 13)}、我々の結果は過去の知見と整合的であった。

それぞれのHNLC海域における詳細な供給過程を調べたところ、南大洋では等密度面拡散と対流性混合、東部赤道太平洋では赤道潜流を経由したパプア・ニューギニア周辺の堆積物起源の鉄の湧昇が重要な役割を果たして

いた。北太平洋亜寒帯域はモデルのバイアスが大きく、今後の改善が望まれた。

同様の解析を2090年代の結果に適用したところ、南大洋では表層の成層化により、対流性混合による鉄の供給が減少した一方で、西風の強化に伴う平均流による子午面循環と亜熱帯循環のスピニアップにより鉛直、水平移流による鉄の供給が増加し、正味で鉄の供給量は増加した。赤道太平洋域では、西部で南赤道反流が弱まり、パプア・ニューギニアの沿岸域から赤道潜流へ輸送される鉄の量が増加し、東部の表層へ湧昇により供給される鉄の量も増加した。

2090年代の全球積算した一次生産量と輸出生産は、成

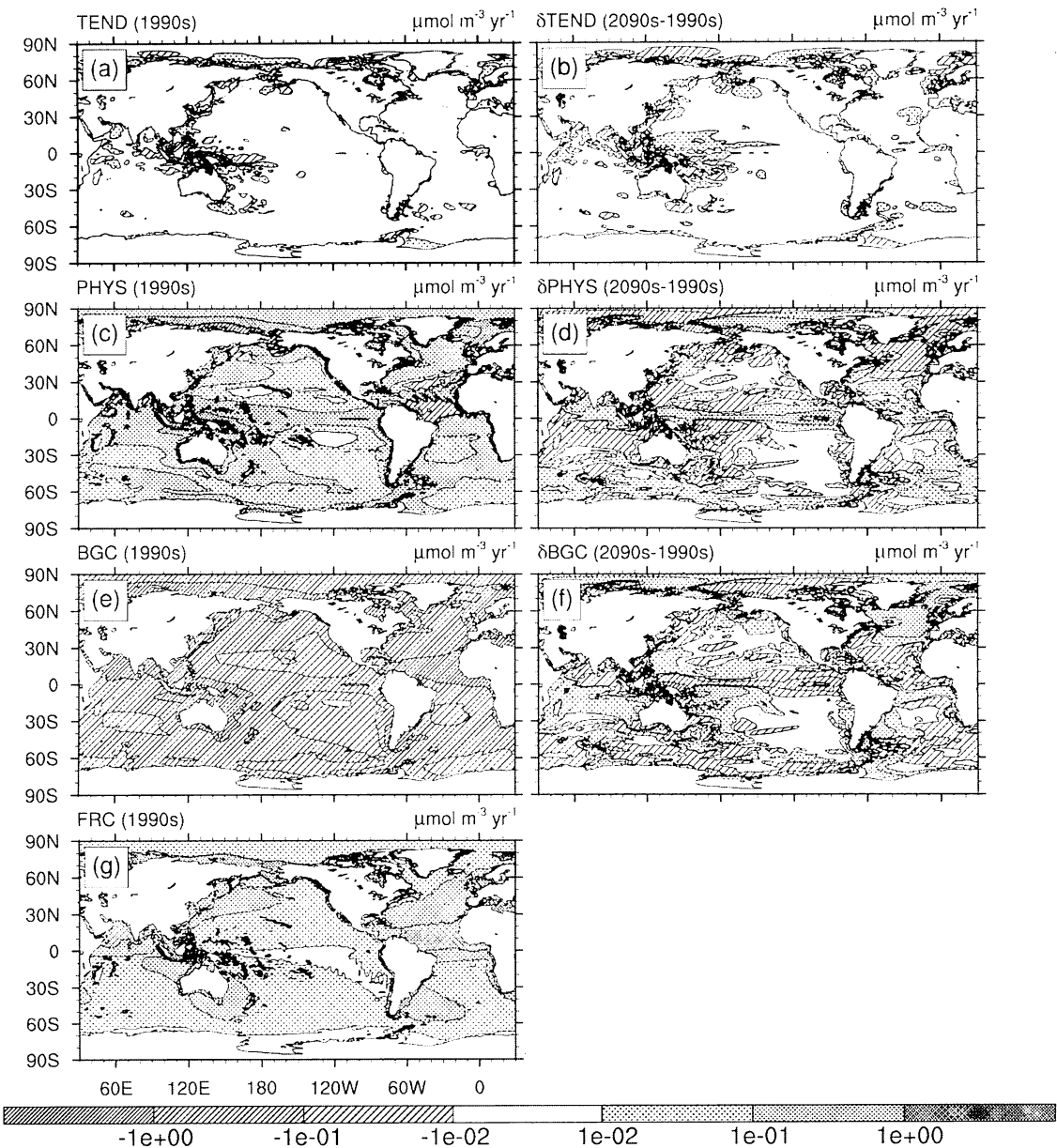


図-1 海洋表層の鉄の収支. (a, b)時間変化項, (c, d)物理過程の項, (e, f)生物地球化学過程の項, (g)外部強制項. 左段は1990年代の結果, 右段は2090年代と1990年代の差.

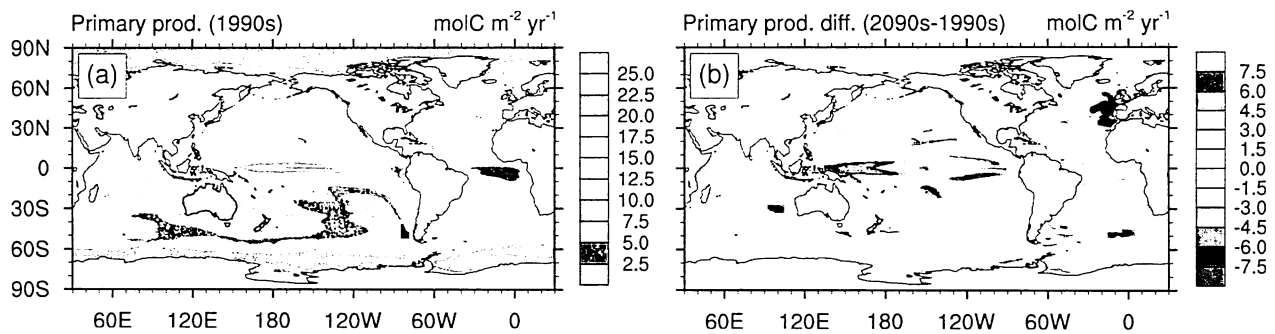


図-2 海洋の一次生産量. (a)1990 年代, (b)2090 年代と 1990 年代の差.

層化に伴うマクロ栄養塩供給の減少により、減少していたが、HNLC海域で積算した一次生産と輸出生産は増加しており、その増加の約半分は鉄の供給の増加に伴うものだった(図-2)。

南大洋の平均流による子午面循環と南半球の亜熱帯循環のスピンアップ、南赤道反流の弱化は近年の観測データや多くのCMIP (Coupled Model Intersomparison Project) モデルの予測と整合的である¹⁴⁻¹⁶⁾。我々の結果は、温暖化に伴う海洋循環の変化がHNLC海域表層への鉄供給量を増加させ、大気中のCO₂濃度増加を抑制する、負のフィードバックとして働くことを示唆している。

この実験では将来の風成塵の降下量の変化や、海水のpHの変化による鉄の分画の変化など、考慮していない様々な過程がある。また、北太平洋亜寒帯域はモデルのバイアスが大きかった。今後個々のプロセスを調べ、モデルに組み込むこと、モデルのバイアスを低減することが課題としてあげられる。

謝辞：シミュレーションとデータの解析には、米国大気研究センターのスーパーコンピュータBluefireとクラスターマシンMirageを利用した。

参考文献

- 1) Martin, J. H., and Fitzwater, S. E.: Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east pacific subarctic, *Nature*, 331, 341-343, 1988.
- 2) Martin, J. H., Gordon, R. M., and Fitzwater, S. E.: Iron in Antarctic waters, *Nature*, 345, 156-158, 1990.
- 3) Martin, J. H., Coale, K. H., Johnson, K. S., Fitzwater, S. E., Gordon, R. M., Tanner, S. J., Hunter, C. N., Elrod, V. A., Nowicki, J. L., Coley, T. L., Barber, R. T., Lindley, S., Watson, A. J., Van Scoy, K., Law, C. S., Liddicoat, M. I., Ling, R., Stanton, T., Stockel, J., Collins, C., Anderson, A., Bidigare, R., Ondrusek, M., Latasa, M., Millero, F. J., Lee, K., Yao, W., Zhang, J. Z., Friederich, G., Sakamoto, C., Chavez, F., Buck, K., Kolber, Z., Greene, R., Falkowski, P., Chisholm, S. W., Hoge, F., Swift, R., Yungel, J., Turner, S., Nightingale, P., Hatton, A., Liss, P., and Tindale, N. W.: Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean, *Nature*, 371, 123-129, 1994.

- 4) Hurrell, J. W., Holland, M. M., Ghan, S., Lamarque, J. F., Lawrence, D. M., Lipscomb, W. H., Mahowald, N. M., Marsh, D., Rasch, P. J., Bader, D., Collins, W. D., Gent, P. R., Hack, J. J., Kiehl, J., Kushner, P., Large, W. G., Marshall, S., Vavrus, S., and Vertenstein, M.: The Community Earth System Model: A framework for collaborative research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 10.1175/BAMS-D-12-00121.1, 2013.
- 5) Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., and Wilbanks, T. J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463, 747-756, 2010.
- 6) van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Smith, S. J., Calvin, K. V., Karas, J., Kainuma, M., Nakicenovic, N., Riahi, K., van Ruijven, B. J., Swart, R., and Thomson, A.: What do near-term observations tell us about long-term developments in greenhouse gas emissions?, *Climatic Change*, 103, 635-642, 2010.
- 7) Lindsay, K., Bonan, G. B., Doney, S. C., Hoffman, F. M., Lawrence, D. M., Long, M. C., Mahowald, N. M., Moore, J. K., Randerson, J. T., and Thomson, P. E.: Preindustrial control and 20th century carbon cycle experiments with the Earth System Model CESM1-BGC), *Journal of Climate*, submitted.
- 8) Moore, J. K., Lindsay, K., Doney, S. C., Long, M. C., and Misumi, K.: Marine ecosystem dynamics and biogeochemical cycling in the Community Earth System Model (CESM1-BGC), *Journal of Climate*, accepted.
- 9) Smith, R., Jones, P., Briegleb, B. P., Bryan, F. O., Danabasoglu, G., Dennis, J., Dukowicz, J., Eden, C., Fox-Kemper, B., Gent, P. R., Hecht, M., Jayne, S. R., Jochum, M., Large, W. G., Lindsay, K., Maltrud, M. E., Norton, N., Peacock, S., Vertenstein, M., and Yeager, S. G.: The Parallel Ocean Program (POP) reference manual, 2010.
- 10) Danabasoglu, G., Bates, S. C., Briegleb, B. P., Jayne, S. R., Jochum, M., Large, W. G., Peacock, S., and Yeager, S. G.: The CCSM4 ocean component, *Journal of Climate*, 25, 1361-1389, 2012.
- 11) Moore, J. K., and Braucher, O.: Sedimentary and mineral dust sources of dissolved iron to the world ocean, *Biogeosciences*, 5, 631-656, 2008.
- 12) de Baar, H. J. W., de Jong, J. R. M., Bakker, D. C. E., Loscher, B. M., Veth,

- C., Bathmann, U., and Smetacek, V.: Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean, *Nature*, 373, 412-415, 1995.
- 13) Fung, I. Y., Meyn, S. K., Tegen, I., Doney, S. C., John, J. G., and Bishop, J. K. B.: Iron supply and demand in the upper ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 281-295, 2000.
- 14) Ganachaud, A., Sen Gupta, A., Brown, J. N., Evans, K., Maes, C., Muir, L. C., and Graham, F. S.: Projected changes in the tropical Pacific Ocean of importance to tuna fisheries, *Climatic Change*, 1-17, 2012.
- 15) Beal, L. M., De Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., Zahn, R., Cronin, M., Hennes, J., Lutjeharms, J., Quartly, G., Tozuka, T., Baker-Yeboah, S., Bomman, T., Cipollini, P., Dijkstra, H., Hall, I., Park, W., Peeters, F., Penven, P., Ridderinkhof, H., and Zinke, J.: On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate, *Nature*, 472, 429-436, 2011.
- 16) Meijers, A. J. S., Shuckburgh, E., Bruneau, N., Sallee, J. B., Bracegirdle, T. J., and Wang, Z.: Representation of the Antarctic Circumpolar Current in the CMIP5 climate models and future changes under warming scenarios, *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 117, 2012.