

特集 黒潮の恵み

最終氷期の黒潮の復元

久保田好美 くぼた よしみ

国立科学博物館 地学研究部

7万～2万年前は「最終氷期」と呼ばれる気候が現在よりも寒冷であった時代だ。特に、2万3000年前～1万9000年前は、LGM (Last Glacial Maximum) と呼ばれ、氷期の最寒冷期を指す。最終氷期には、地球の気候を決定づける様々な要素(例えば、大気中の二酸化炭素濃度、海水準、大陸氷床の大きさなど)が現在と異なるため、地形が変化し、気候・海洋システムの挙動も現在とは異なっていた。LGMには海水準が130 mも低下したが、その影響は東シナ海などの縁辺海で顕著であった(図1)。東シナ海では陸棚のほとんどが陸化し、海岸線が大幅に前進していた。一方、東シナ海の南部には、

水深が1000 m以上の深い谷、沖縄トラフが開いている。現在の沖縄トラフは黒潮が流れる海であるが、過去にもそうだったのかという問いには現在まで長い議論が続いている。

黒潮は、太平洋の西側を低緯度から高緯度側に流れる海流として大量の熱や塩分を運ぶため、気候システムに大きな影響を与えてきたと考えられている。一方、大西洋にも西側に強化された海流「メキシコ湾流」が存在する。最終氷期のメキシコ湾流の挙動についてアメリカやヨーロッパを中心に精力的に研究が進められてきたが、それに比べると黒潮の研究例は少ない。その理由はいくつかあるが、まず北大西洋高緯度域が深層水循環の起点であり、気候変動に敏感に応答することや気候変動の直接の要因になることにより全球的な気

Kuroshio in the Last Glacial Period: History of the study and new approach

Yoshimi KUBOTA

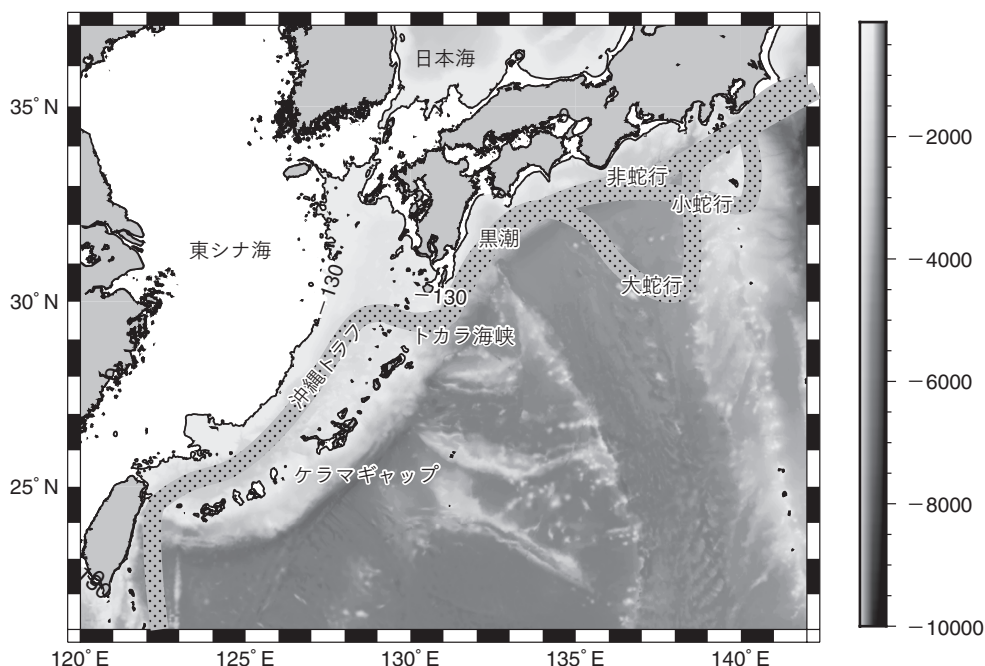


図1—LGMの東シナ海の地形

候変動に敏感な海域だとみなされてきたからだ。一方、北太平洋高緯度域では表層塩分が低いため深層水は形成されず、したがって北太平洋は全球的な気候変動を考える際にそれほど重要な海域だとみなされてこなかった。しかし、2010年にScience誌にOkazaki et al.の研究⁹が掲載され、最終氷期から現在の完新世に移行する最終融氷期という時代(約1万8000年前～1万1000年前)に、千年ほどのタイムスケールで北太平洋高緯度域も気候変動に敏感に反応していたことが示された。近年、こうした研究を含めてグローバルな視点で北太平洋にも注目が集まるようになったが、過去の黒潮の研究は未だ不足していると言わざるを得ない。ここでは、これまでの最終氷期の黒潮についてレビューし、筆者らの研究でどのように過去の黒潮を復元するのかを解説したい。

これまでの黒潮の古海洋研究

観測記録がない古い時代の海洋情報を得るには、海洋底に降り積もった堆積物を活用する。地震で活動的な海域を除いて、深海では静かにそしてゆっくりと沈降粒子(プランクトンの死骸や排泄物、さらに

陸から河川や風の作用によって運ばれてきた碎屑物の集合体)が堆積する。北太平洋では、1000年間で数cm～数十cmの堆積があり、数m～数十mの堆積物を採取することで数万～数十万年まで遡ることができる。こうして得られた柱状の海底堆積物試料をコアと呼ぶ。5万年前までは放射性炭素年代を用いて年代メモリを詳細に入れることができるため、海洋コアを用いることで連続した高精度の解析を行うことができる。海洋の堆積物は、沈降粒子と、海底に生息する微小な底生生物の死骸、海底での化学的な反応による二次的な生成物で構成される。この中でも微化石と呼ばれる顕微鏡サイズのマイクロなプランクトンや底生生物の化石は、古海洋の解析に役立ってきた。例えば、有孔虫や珪藻といったプランクトン微化石の群集解析からは当時の表層の海洋環境(水温や塩分、栄養塩の程度)が推定できる。また、特に有孔虫は炭酸カルシウム(CaCO_3)の骨格をもつため、化学的な分析にも活用されてきた。有孔虫が炭酸カルシウムの骨格を形成するときに、水温の違いや、周りの海水の組成の違いによって異なる元素や同位体(元素番号は同じで、質量数の違うもの)を取り込むことが知られ、例

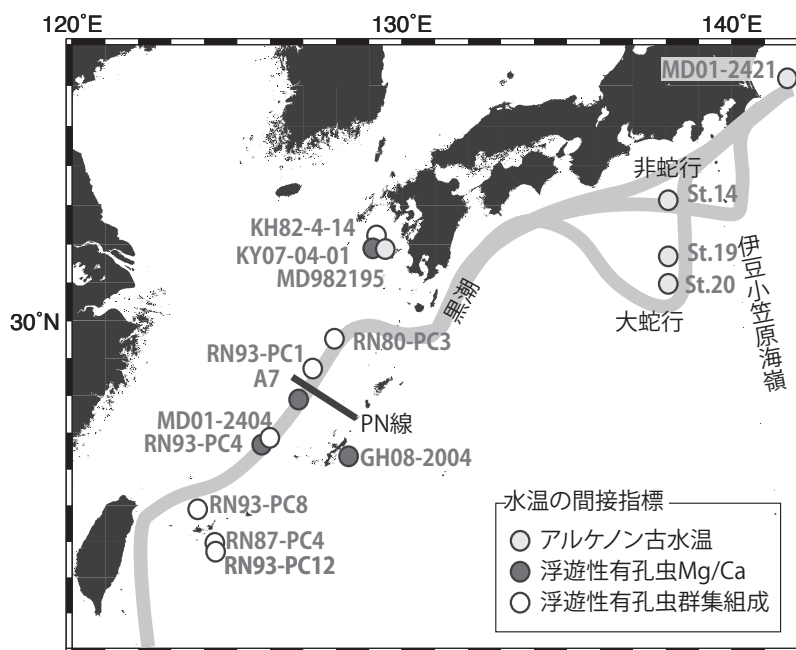


図2—黒潮の経路とコアの地点

えば、マグネシウムとカルシウムの比(Mg/Ca)は水温の、酸素同位体比は水温と塩分の間接的な指標となる。しかし、太平洋での炭酸塩の骨格をもつ微化石を用いた研究は、大西洋ほど簡単ではない。というのは、太平洋と大西洋で海水の炭酸塩の飽和度(溶解のしやすさ)が異なり、太平洋は大西洋に比べて浅い水深でも炭酸塩が残りにくい。これが、太平洋での黒潮の研究を困難にしている一因でもある。

東シナ海における海洋コアを用いた黒潮の初期の研究は、沖縄トラフ内外のコアを用いた堆積学的な研究や微化石の群集解析から始まった(図2)。Ujiié et al.(1991)², Ujiié and Ujiié(1999)³, Ujiié et al.(2003)⁴の一連の研究では、沖縄トラフと琉球列島東側の太平洋側の浮遊性有孔虫の群集組成変化を比較し、LGMにおいて黒潮の指標種である*Pulleniatina*(プレニアチナ)属の産出率が沖縄トラフで著しく低くなることから、黒潮の本流は沖縄トラフへ流入していなかったと解釈された。プレニアチナ属は、熱帯から亜熱帯に好んで生息する種であること、現在の東シナ海において黒潮軸部に沿って多く産出し、琉球列島の太平洋側にも少な

いことから、黒潮の指標種とみなされてきた種である^{3,5}。Ujiié et al.(1991)²では、黒潮の入口である台湾東方沖に陸橋の存在が指摘され、その後のUjiié and Ujiié(1999)³でもこれを踏襲しさらに詳しい議論がなされている。しかし、その後の琉球列島の地質学的な研究によって、沖縄トラフは少なくとも中期更新世にはすでに開いており、2万年前の陸橋の可能性は否定されている(本特集の横山祐典氏の解説参照)。浮遊性有孔虫の群集組成に関しても、最終氷期に黒潮が沖縄トラフを流れていなかったとする証拠としては不十分だろう。というのは、プレニアチナ属の相対産出度が、黒潮主軸の存在のみで決まっているならば最終氷期においては太平洋側での同属の相対産出度は増加するはずである。しかし、石垣島南方沖から採取されたコアを用いた、浮遊性有孔虫の群集組成変化の解析からは、最終氷期に同属の相対産出度が増えたという証拠はなく、現在と比較するとむしろ減少していた⁴。また、プレニアチナ属の産出の変動は海水準が安定している完新世(約4000年前)にも起こり³、黒潮変動との関連性がよくわかっていない⁶。

その後の研究では、様々な間接指標から黒潮の議論がなされてきたが、それらのほとんどはLGMにも沖縄トラフに黒潮が流れていたという結論を導いている。沖縄トラフ中部と北部のコアからは、ニューギニアやインドネシア、フィリピンの山岳部にしか分布していない *Phyllocadus* の花粉がLGMにも断続的に産出することを示しており、これらの花粉は黒潮流で運ばれたとしか考えられないことから、沖縄トラフ側にある程度の黒潮の流れがあったことを示している^{7,8}。また、浮遊性有孔虫骨格のMg/Caと酸素同位体比を組み合わせて、塩分の指標である海水の酸素同位体比を復元したSun et al.(2005)⁹、Chen et al.(2010)¹⁰、Kubota et al.(2010)¹¹の研究は、沖縄トラフ中部および北部では大陸氷床による塩分(正確には、海水の酸素同位体比変化)を考慮して最終氷期と現在を比較しても、塩分に変化が見られず、最終氷期にも太平洋からの高塩分水の寄与が大きかったことを示唆している。水温の復元にアルケノン古水温を使っていることに問題があるが、同様に塩分を求めた研究でもLGMに塩分の低下は見られなかった^{12,13}。これは、沖縄トラフ北部(KH82-4-14)で浮遊性有孔虫の群集解析を行ったXu and Oda(1999)⁵の結果とも矛盾しない。沖縄トラフ北部では、最終氷期にプレニアチナ属が減少し、栄養が富む水塊を好む *Globigerina bulloides*(グロビゲリナ ブロイデス)が増加するが、LGMには低塩分の指標とされる *Globigerina quinqueloba*(グロビゲリナ キンキローバ)の産出は増加しない。*G. quinqueloba*が増加するのはその後の融氷期であり、海水準の最も低下した時代とは一致しないため、黒潮の沖縄トラフへの侵入は海水準に制約されないことを示している。さらに、Lee et al.(2013)¹⁴では、沖縄トラフ内外のコアを用いて浮遊性有孔虫のMg/Caから最終氷期の水温を比較した。黒潮が沖縄トラフに侵入していなければ、沖縄トラフ内で大幅に水温が低下することが推測されるが、比較の結果は、沖縄トラフ内外で水温がほとんど変わらなかった。また、Kubota et al.(2017)¹⁵は、沖縄トラフでの水温の鉛直分布について複数種の浮

遊性有孔虫の酸素・炭素同位体比を用いて解析を行った。その結果、最終氷期の鉛直水温分布が現在とあまり変わらなかったか、現在よりも水温勾配が緩やかになっていたことを示した。これらの地質学的な証拠をあわせると、表層海洋環境を示す多くの地質学的データがLGMにも黒潮が沖縄トラフに侵入していたことを示しており、それに矛盾するプレニアチナ属の減少や東シナ海における広範囲の微化石群集組成変化はグローバルな気候変動による水温低下や、地形変化に伴うローカルな海洋循環の変化による栄養塩供給の変化など別の理由によるものと考えるべきであろう。

海水準低下に伴う沖縄トラフでの黒潮流路および流量変化に関して数値モデルから研究した例はKao et al.(2006)¹⁶とLee et al.(2013)¹⁴がある。Kao et al.(2006)の結果によると、135 mの海水準低下時にも、黒潮の主軸は現在と同じように台湾東方から沖縄トラフに流入していたことが示唆された。ただし、出口は現在のようにトカラ海峡ではなく、ケラマギャップに南下し、東シナ海に流入する黒潮の流量は現在よりも43%減少した。一方、Lee et al.(2013)では、Kao et al.(2006)とは異なる海洋モデルを用い海水準低下による黒潮の流路を求めたが、135 mの海水準の低下だけでは黒潮の経路を変えることができなかったと結論づけた。流量と流速については、沖縄トラフ内での流量は22%減少したが、最大流速は25%増加した。これらの海洋モデルの結果から言えることは、海水準低下が沖縄トラフへの入口の経路には影響を与えないこと、しかし地形の変化によって沖縄トラフ内の流量が減少する可能性があること、さらに沖縄トラフから太平洋への出口の経路や沖縄トラフ内での流速についてはモデルによって結果が異なるということである。ただし、これらの海洋モデルは海水準以外の影響、例えば、偏西風や貿易風の位置や強さ、水温の低下など最終氷期の気候条件が考慮されていないため、氷期の黒潮の状態を正しく表現できてはいないことに注意しなければならない。したがって、今後は氷期の気候条件を組み込んでさらに発展させた数値モデルにより

検証する必要がある。

東シナ海以外に目を向けると、四国南岸から本州南岸での黒潮については、1970年代からの研究の蓄積がある。微化石群集を用いた研究については山本(2009)¹⁷⁾に詳しいため、ここでは地球化学的な手法を用いた代表的な研究について紹介したい。Sawada and Handa(1998)¹⁸⁾は、遠州沖、西七島海嶺の南北、北緯30~33度の間で採取された3本のコア(北からSt. 14, 19, 20)のアルケノン古水温から、南北表層水温差をもとに黒潮蛇行度の復元を試みた。遠州沖では、蛇行が発生すると蛇行した黒潮と沿岸部の間に下層からの湧昇が起こり表層に冷水塊が発生する。最北部のコアは、黒潮の非蛇行経路に位置し、最南部のコアの位置は、黒潮蛇行経路に対応している。したがって、蛇行が発生すると南北の水温差は大きくなる。さらに、黒潮の流速が遅いほうが大蛇行の経路をとりやすいという海洋モデルの結果¹⁹⁾をもとに、蛇行経路をとるときには黒潮流速が遅い、つまり亜熱帯循環が弱かったと推論している。LGMにおけるアルケノン古水温の復元結果からは、北部の水温が比較的高く、非蛇行経路をとりやすかった、つまり亜熱帯循環(黒潮)が現在よりも若干強かった可能性が示唆された。そして、亜熱帯循環が最も弱化するのは、1万5000年頃だった。

Yamamoto et al.(2005)²⁰⁾では、Sawada and Handa(1998)¹⁸⁾のコアサイトよりもさらに北部の黒潮-親潮混合域(MD01-2421)のアルケノン古水温復

元を行い、Sawada and Handa(1998)で復元された西七島海嶺の南部コア St. 19, 20 の古水温との差をとることによって、最終氷期以降の本州沖の黒潮-親潮境界の緯度を復元した。その結果、黒潮-親潮混合域で最も水温が低下したのは、LGMではなくその後の融氷期にあたる1万3000年前頃であり、この時期に最も黒潮-親潮境界が南下した。ここでも、LGMに最低水温にならずに数千年以上遅れており、単純に氷期-間氷期(10万年周期)のみに支配されるのではなくそれに重ね合わせて2.3万年周期や3万年周期の変動が存在することが指摘されている¹⁷⁾。水温変化が単純な氷期-間氷期サイクルに沿ったパターンを示さないことは、本州南岸から黒潮流領域での特徴であり、東シナ海を含めて長期記録を比較することで今後さらに面白い結果が導き出せるかもしれない。

● これからの黒潮研究

これまで述べてきたように最終氷期の黒潮の研究には30年以上の蓄積があるが、新たにわかってきた海洋物理学的な視点を組み入れ最終氷期の黒潮の変動を考えていく必要がある。そのためにはこれまでのデータのみでは不十分であり、東シナ海から本州南岸にかけて広範囲に黒潮に関する地質学的データをより高解像度に、より定量的に解析していく必要があると考えている。黒潮の先行研究のほとんどが、表層環境のみに焦点を当てたものが多く、黒潮の流れに敏感に反応する垂表

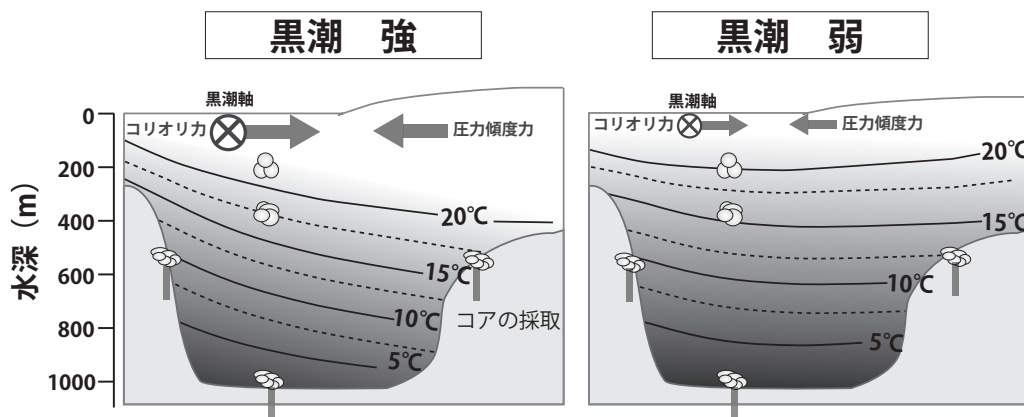


図3—PN線上(図2)の水温の断面の概念図

層から中層の環境変動が明らかになっていないことから、これらのデータの重要性も今後増していくものと考えられる。

こうした背景から、筆者らの研究では、東シナ海に着目し、表層から中層までの水温を復元することにより定量的に黒潮の流速や流量を推定するプロジェクトを始めている²¹。東シナ海は、黒潮流軸の移動や蛇行の影響が小さいため、黒潮の流速・流量推定に適した海域である。強い表層流がある海域での流量や流速というパラメータを地質学的証拠から推定する試みは、メキシコ湾流で実施された例がある²²。Lynch-Stieglitz et al. (1999)²²では、フロリダ海峡の複数地点のコアからLGMのフロリダ海峡の断面の密度分布を復元し、流量を推定した。メキシコ湾流でも黒潮でも、強い表層流が存在する海域では、水深によって密度勾配が表れる(図3)。現在の東シナ海では、黒潮断面の密度勾配は水深約150~700 mにおいて黒潮の流速と高い相関をもつことが知られている²³。密度は、水温と塩分によって決まるパラメータである。しかし、地質学的な記録から水温を復元することはそれほど困難ではないが、塩分を高精度に復元することは難しい。実は、Lynch-Stieglitz et al. (1999)の研究の密度の復元には、水温と塩分を分離できず密度の復元に大きな仮定があることから、正確な復元ができていない可能性があるという問題点があった。密度は水温の変化による寄与が大きいため、筆者らの研究では水温勾配を求めることによって黒潮流速の推定を試みている。具体的には、東シナ海の黒潮流軸を横切るようにトランセクトを切るように、堆積物コアを採取した。それらのコアを用いて、鍵となる水深での東西の水温勾配を復元することを計画し(よこすかYK12-15航海)、このコアの解析をすでに始めている。また、四国南岸~本州南岸の黒潮域についても、音波探査で堆積場が安定した地点を選定し、複数本のコアを採取した(白鳳丸KH16-6航海)。これらの解析については、数年後の成果が期待される。

文献

- 1—Y. Okazaki et al.: Science, **329**, 200(2010)
- 2—H. Ujiie et al.: Mar. Micropaleontol., **18**(1-2), 115(1991)
- 3—H. Ujiie & Y. Ujiie: Mar. Micropaleontol., **37**, 23(1999), doi: 10.1016/S0377-8398(99)00010-9.
- 4—Y. Ujiie et al.: Mar. Micropaleontol., **49**, 335(2003), doi: 10.1016.S0377-8398(03)00062-8.
- 5—X. Xu & M. Oda: Mar. Geol., **156**, 258(1999)
- 6—Y.-S. Lin et al.: Mar. Micropaleontol., **59**, 153(2006), doi: 10.1016/j.marmicro.2006.
- 7—H. Kawahata & H. Ohshima: Global and Planetary Change, **41**, 251(2004)
- 8—H. Y. Xu et al.: Chinese Science Bulletin, **54**, 3739(2009), doi:10.1007/s11434-009-0027-y.
- 9—Y. Sun et al.: Paleoceanography, **20**, PA4005(2005), doi: 10.1029/2004PA001061.
- 10—M. T. Chen et al.: Geophys. Res. Lett., **37**, L23603(2010)
- 11—Y. Kubota et al.: Paleoceanography, **25**, PA4205(2010), doi:10.1029/2009PA001891.
- 12—A. Ijiri et al.: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **219**(3-4), 239(2005)
- 13—H. Yu et al.: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **281**(1-2), 154(2009)
- 14—K. E. Lee et al.: Geophys. Res. Lett., **40**, 392(2013)
- 15—Y. Kubota et al.: Quaternary International, **452**, 1(2017), doi:10.1016/j.quaint.2017.06.021
- 16—S. J. Kao et al.: Geophys. Res. Lett., **33**, L16604(2006), doi:10.1029/2006GL026822.
- 17—山本正伸: 地質学雑誌, **115**(7), 325-332(2009)
- 18—K. Sawada & N. Handa: Nature, **392**, 592(1998)
- 19—I. Yasuda et al.: J. Oceanogr. Soc. Jpn., **41**, 259(1985)
- 20—M. Yamamoto et al.: Geophys. Res. Lett., **32**, L05609(2005), doi: 10.1029/2004GL021903.
- 21—久保田好美・多田隆治: 月刊地球, **7**, 406(2012)
- 22—J. Lynch-Stieglitz et al.: Nature, **40**, 644(1999)
- 23—E. Oka & M. Kawabe: J. Oceanogr., **54**, 605(1998)

久保田好美 くぼた よしみ

高校生の頃に、ジュリーマンの「古代への情熱」を読んで、考古学や歴史に興味を持ちました。私の研究対象の微化石(小さな化石)に出会ったのは大学院時代ですが顕微鏡でやっと見えるサイズの微化石が、過去の地球のダイナミックな変動を教えてくれることに感動しました。それから、海底の堆積物の中に含まれる微化石を使って気候・海洋変動を明らかにする研究を行っています。特に東アジア地域の気候に大きく関係する黒潮やアジアモンスーンに焦点を当てていますが、人類史との関連にも興味を持っています。