ちか頃の話題

■海洋深層循環と氷期気候変動

[海洋のコンベヤーベルト]

海洋は地球表面の約７割を占め、飛行機の窓の外を見下ろせばその青色の広がりを身近に感じることもできる。一方で、海洋深層というと光の届かない暗闇の世界で、我々の生活とは全く縁のない場所のように思われる。しかしながら、我々が目にする表層の海水も、以前は深層にあったものであるかもしれないし、今後長い年月をかけて流される間に深層に行きつくかもしれない。深層の海水は表層の海水とつながっており、ゆっくりではあるが絶えず両者の交換が起こっている。このような交換が重要となる時間スケールで考えると（つまり非常に長い目で見ると）、海洋深層の変化は我々の生活とも無縁ではなくなる。それでは、海洋の表層と深層はどのようにつながっているのか？ここで重要となるのが、海洋の表層と深層を結ぶ全球的な循環（海洋深層循環）である。その循環像をわかりやすく示したのが「ブロッカーのコンベヤーベルト」と呼ばれるものであり（図１）、そこでは海洋深層循環の次のような様相を端的に示している。北大西洋高緯度域では表層から深層に海水が沈み込み、沈み込んだ海水は深層で南向きに輸送され、世界中をめぐるあいだに上昇しながら表層に戻される。そして表層に戻された海水は、再び北大西洋高緯度域の沈み込み域に向かう、というものである。海洋深層循環は、黒潮や親潮などの海流に比べると非常にゆっくりしたものであり、循環が一周するのに1000年以上の時間を要する。このようなゆっくりした流れであっても深層に存在する海水の量は膨大なものであり、大西洋では深層の冷たい水を南向きに、表層の暖かい水を北向きに輸送することで、地球の気候を決める上での重要な役割をもつ。例えば、表層から深層への沈み込みが存在する大西洋は、太平洋に比べて北向きの熱輸送量が大きくなり、ヨーロッパの気候が緯度のわりには温暖である一因となっている。

さて、この「コンベヤーベルト」であるが、地球温暖化の進行とともに弱化あるいは停止してしまうのではないか、そしてそれが大規模な気候変化を引き起こすのではないか、という懸念がある。このような推測には、過去に起こった気候変動が背景にある。今回は、過去の気候変動と海洋深層循環との関わりについて紹介したい。

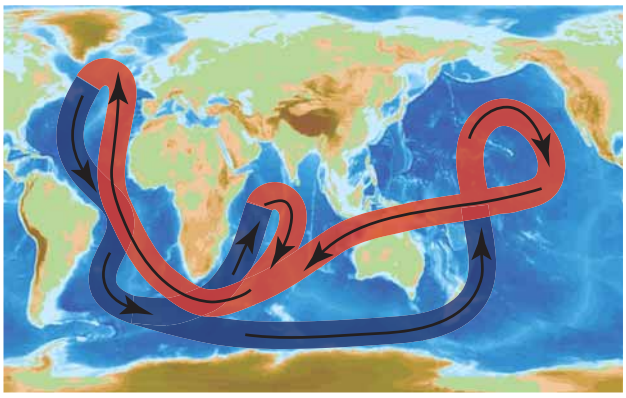

図1：海洋深層循環の概念図（Broecker,1987を参考に作成）。赤色が表層の海水、青色が深層の海水、矢印がそれらの流れの方向を示している。

[氷期における大規模気候変動]

過去の地球には北半球の広範囲に渡って大陸氷床がひろがる「氷期」と呼ばれる寒冷な時期が存在した。一方、現在の地球は南極氷床とグリーンランドにのみ大陸氷床が存在する温暖な間氷期にあたる。もっとも最近の氷期（最終氷期）は約11万年前に始まり、約２万年前に最盛期（Last Glacial Maximum、略してLGM）となり、約１万年前に終焉した。氷期の気候を特徴づけるものとして、気候の寒冷化に加え、ダンスガード・オシュガー振動（略してDO振動）と呼ばれる1000年程度の周期で引き起こされる気候状態の「ゆらぎ」の存在が挙げられる。つまり、氷期における寒冷な気候状態が時に急激に温暖化するイベント（DOイベントと呼ばれる）が起こり、気温の指標となるグリーンラ

ンド氷床コアの酸素同位体比データによると、最終氷期のあいだに大小含めて20回以上の温暖化イベントが検出されている（大きなものでは10度以上の温暖化イベントとなる；図２）。このDO振動は、数十年程度の短期間で起こる温暖化と、1000年程度の長期にわたる寒冷化で特徴づけられる。このような振動がなぜ生じるのであろうか？そこで中心的な役割を担っているであろうと目されているのが、最初に述べた海洋深層循環である。つまり､氷期においては｢コンベヤーベルト｣が停止しており、それが急激に復活することによって温暖化イベントが生じるという説が有力視されている。それでは、なぜ氷期には海洋深層循環が止まったり復活したりしたのか？それについては、まだ明確な回答は得られていない。氷期にはDOイベントに同調して、氷床からの融け水の証拠とされる大陸起源の岩石屑が海底堆積物中に見出されており（ハインリッヒイベントと呼ばれる)、海水に比べ密度の軽い氷床からの融解水が流れ込むことで海洋深層循環を停止させるという考えがブロッカーらによって提唱されている。しかしながら、気温変化、海洋深層循環変化、氷床の融解水流出がどのような時系列で起こっていたかについては議論があり、果たしてハインリッヒイベントがDOイベントの原因なのか結果なのか（DO振動が氷床との相互作用を伴う現象なのか海洋深層循環の自励振動なのか)、まだ決着がついていない。

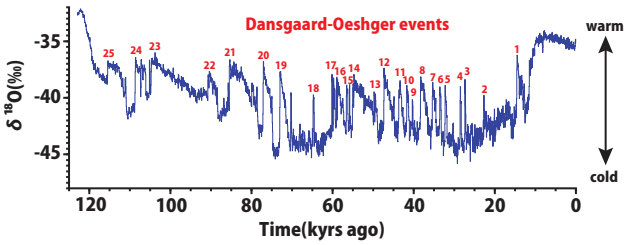

図2：グリーンランド氷床コア(NGRIP members, 2004)から得られた酸素同位体比データ。ダンスガード・オシュガーイベントを赤色の数字で示している。

[LGM再現シミュレーション]

氷期におけるDO振動を十分な説得力をもって説明するためには、大気海洋結合大循環モデルをはじめとする詳細な気候モデルでその再現を試みる必要があるだろう。その試みの第一歩ともいえるターゲットとして、LGMの再現シミュレーションが、古気候モデリング比較プロジェクト（PMIP）などを通じさまざまな研究機関の気候モデルによって実施されている。試みの初期（PMIPの第１フェーズがはじまる1990年代）には、せいぜい数十年程度の時間積分を行うのが精一杯であったが、近年では1000年程度の時間積分も実施されはじめており、PMIPの第２フェーズ（PMIP2）においては、LGMにおける海洋深層循環についても議論できるようになってきた。それでは、そこで再現されるLGMでのコンベヤーベルトはどのようなものになるのか？実は、現状ではその答えがモデルによって大きく変わってしまう。つまり、PMIP2参加モデルのうち、現在に比べてLGMでのコンベヤーベルトが強くなるモデルが半分、逆に弱くなるモデルが半分となるのである。一方、古海洋指標と呼ばれる地質学的データ、特に炭素同位体比のデータからはLGMのコンベヤーベルトは現在ほど強くないことが示唆されている。これらの結果をどう解釈すべきであろうか？いろいろな可能性が考えられるが、モデルによってLGMで再現されるコンベヤーベルトが大きく異なってしまうのはなぜか？まずはその理由を説明しなくてはならない。

このような背景のなか、ここからは我々の行っている研究を紹介したい。図３は、大気海洋結合大循環モデルMIROCにより再現されたLGMにおける海面水温（SST）である（現在からの差で図示)。最新の古気候指標データであるMARGOの結果も並べて掲載した。中低緯度に比べて高緯度での寒冷化が大きいなどの特徴は両者で一致している一方、赤道域での寒冷化がモデルでは比較的一様に起こるのに対し、データでは東岸でより顕著であるなどの相違もある。IPCC第４次報告書の６章でも取り上げられているように、こういった特徴はMIROCだけでなく、どのモデルにも同様に見られるものである。さて、問題の海洋深層循環であるが、MIROCではLGMにコンベヤーベルトが顕著に強くなるという結果になる。なぜそのような応答になったのか？モデルの結果であればいろいろ詳しく調べることができる。MIROCの結果を解釈するために行った海洋大循環モデルCOCOによる感度実験から得られた結果を以下で少し具体的に紹介していく。

海洋深層循環は、それを駆動するプロセスに着目して「海洋熱塩循環」と呼ぶこともある。海洋熱塩循環はその名が示す通り、温度と塩分を決める海面での熱および水のやりとり、すなわち海面での熱フラックス（短波放射、長波放射、顕熱、潜熱）と水フラックス（蒸発、降水、河川流入）によって駆動される循環である。海洋循環の変化は、海面での熱フラックス、水フラックス、それに風応力（運動量フラックス）のいずれか

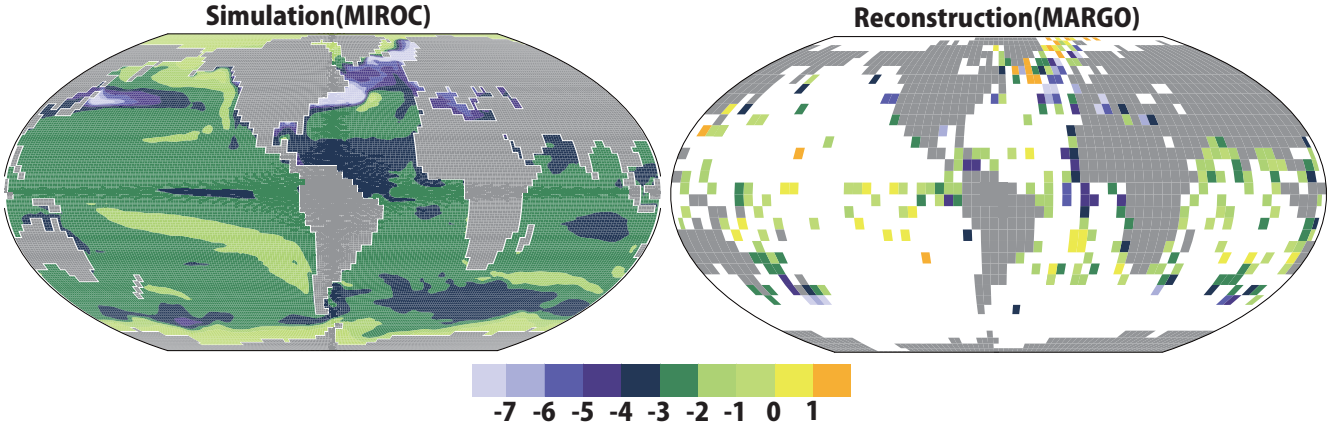

図3：LGMと現在気候との海面水温（SST）の差（単位はK）。（左）MIROCによるシミュレーション結果。（右）古気候指標データ(MARGO, 2009)により再現された分布。

の変化に起因しているはずであるので、それらの要因を切り分けるために行ったCOCOによる感度実験の結果が図４にまとめてある。縦軸がコンベヤーベルトの強さ、横軸が海面冷却の強さ（０は現在の熱フラックス、１はLGMの熱フラックス）を示している。いろいろと点があるが、まずは図のa,b（星印）がそれぞれ「現在」「氷期」の再現実験の結果、c,d,e（白抜きの円）がそれぞれ「熱フラックスのみLGM条件（水フラックスと風応力は現在条件）」「水フラックスのみLGM条件」「風応力のみLGM条件」に変更した感度実験の結果を示したものであることを確認いただきたい。これらの実験の結果から、LGMでの熱フラックス変化は循環を弱化する一方、水フラックスと風応力変化は循環をやや強化し、すべてLGM条件にすると循環が顕著に強化することがわかる。このような非線形な応答になるのも興味深いが、まずは熱フラックスによって循環が弱化することに注目したい。これは、一見直観に反した結果のように思える。というのも、図３に示したようにSSTは深層循環の沈み込み域である北大西洋高緯度域で顕著に低下しており、そこでより密度の高い水が形成され循環を強めるように働くと考えられるからである。この解釈はある程度は正しいといえる。図４の赤点を見ていただきたい。これは、熱フラックス条件が現在からLGMに徐々に遷移した場合の応答を調べるための感度実験である。海面冷却がLGMの４割までは（横軸の0.2と0.4）確かに循環は強くなるのである。一方で、海面冷却がLGMの６割に達すると循環は突然弱くなり、その際に北大西洋での深層水形成域が低緯度側へ移動するという現象を伴うこともわかった（図は省略）。これらの結果から、古海洋データから示唆されているLGMでのコンベヤーベルトの弱化は、次のようなメカニズムで説明できるのではないかと考えている。現在の深層水形成域はグリーンランド海およびラブラドル海にあるが、それらの深層水形成は海面冷却によってある程度までは強化される一方、海面冷却がある閾値以上になるとそこが海氷に覆われて深層水形成が停止する。その結果、より低緯度側に深層水形成域が移動し、深層循環も現在に比べ弱化するのではないかと考えている。

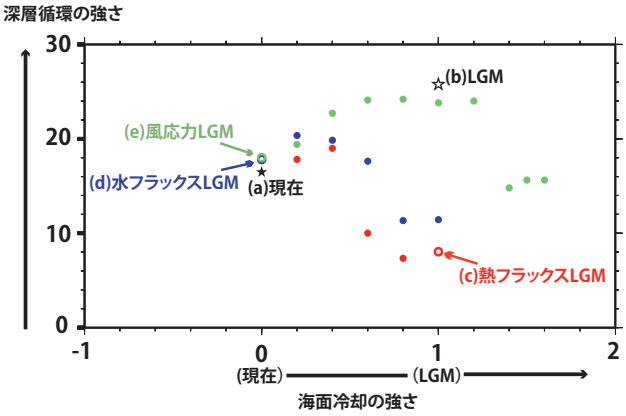

図4：COCOによる感度実験での海面熱フラックス（横軸）と深層循環の強さ（縦軸）の関係図。横軸は現在とLGMとの差を１とした時の海面冷却の強さ、具体的には熱境界条件＝現在実験での熱境界条件＋（横軸の値）×（LGM実験での熱境界条件－現在実験での熱境界条件）とした設定での実験を意味する。縦軸は大西洋での子午面流線関数の最大値（単位はSv）。図中の各点はそれぞれが1000年以上の時間積分を実施した実験結果のプロットである。各点の実験設定については本文を参照。

では、熱フラックス、水フラックス、風応力のすべてをLGM条件にすると循環が強化してしまう（先に述べた非線形な応答をする）のはどう解釈すればよいだろう？図４にもう少しお付き合いいただきたい。図４の青点は、水フラックスをLGM条件（風応力は現在条件）に固定し、その上で熱フラックス条件を現在から

LGMに徐々に遷移させた感度実験の結果である。水フラックスを現在条件で行った赤点の結果と、基本的には同様な結果が得られている。一方、図３の緑点は、風応力をLGM条件に変更し、その上で熱フラックス条件を現在からLGMに徐々に遷移させた結果である。そこでは、海面での冷却がLGM条件になっても深層水形成の弱化が起こらず、赤点の結果とは異なる応答を示している。その場合にも、海面冷却をさらに強化していくと（横軸の1.4以上）、循環の弱化が確かに起こることもわかる。このことは、風応力がLGM条件となった場合、循環の弱化を引き起こす海面冷却の閾値が変化することを意味しており、非線形な応答もこれで納得できる。LGMには現在に比べ風速が顕著に強くなるので、そのことが海氷分布や深層水形成に影響を与えたものと考えられる。

これらの結果からいろいろなことが説明できそうである。MIROCのLGM実験では古海洋データに反してコンベヤーベルトが強化してしまうが、それは循環弱化が起こる海面冷却の閾値に達する前の状態にあるためであり、現実のLGMに比べてMIROCの結果では海面冷却を過小評価している可能性を意味しているとも解釈できる（例えば、MIROCの現在気候のシミュレーションでは大西洋に高温バイアスがあり、それがLGM実験で十分な冷却が得られない一因となっているのではないかと考えている）。また、モデルによって結果が大きく分かれてしまうというPMIP2での状況も、海面冷却の閾値に達しているかどうかという違いによって説明することができるのではないだろうか。さらには、実際のLGMが海面冷却の閾値のある程度近くにあり、（LGMよりは多少暖かい）氷期にはこの閾値を上回ったり下回ったりして、そのたびに深層循環の強さが大きく変わり、それが氷期のDO振動と関係しているのではないか、とも考えている。

[今後に向けて]

大気海洋結合大循環モデルによる1000年以上の長期積分の実施により、氷期の海洋深層循環についての詳細な議論が可能になってきた。今後さらに結果の解析が進み、氷期の気候についてのより深い理解へとつながることを期待している。一方で、古気候・古海洋データについても日々新しい蓄積があり、海洋深層循環についても、炭素同位体比に加えていくつかの指標が新しく利用されはじめている。しかしながら、それらのデータはあくまで指標であり、循環場以外のさまざまな要素による影響を受けている可能性がある。そういった古気候・古海洋データを正しく解釈し、循環場についての情報を引き出すためには、指標の分布に影響する物質循環プロセスをモデル化することによって、モデルとデータとのより定量的な比較を進めていくことも必要であると考えている。我々もそのために必要なモデル開発を進めているところである。そのなかでも、海洋炭素循環については大気二酸化炭素濃度への影響を通じて、それ自体が気候において重要な要素である。氷期間氷期サイクルに同調して、大気二酸化炭素濃度が80ppm程度の振幅で変化していることが知られているが、そのメカニズムに関しても大きな謎として残されている。そこでの海洋の役割は非常に大きいと考えられており、深層循環と炭素循環との関連についても重要な課題のひとつである。

海洋深層循環は長い目で見れば我々の生活とも無縁ではないと述べたが、氷期におけるDO振動のように数十年で大きく気候を変える可能性も持っている。海洋深層循環が今後どのように変わり、将来の気候にどのような影響を及ぼしうるのか？過去の気候変動はその答えの一面を見せてくれる一方、将来の気候変動が過去の繰り返しである保証はない。将来の気候変動を評価するにあたって、詳細な気候モデルによる予測の果たす役割は当然大きい。気候モデルにより氷期の気候変動を再現するという試みも、モデルの腕試しとして実施するだけでなく、そこからモデルの改善や将来予測の向上に役立つ知見をより具体的に提示していくことが今後ますます求められるであろう。私としても科学的好奇心を強く惹きつける氷期の気候変動についてのさまざまな謎にチャレンジするとともに、将来の気候変動についての知見へつなげる研究を目指したい。

（東京大学大気海洋研究所
気候システム研究系講師　岡　顕）