

1000年スケール気候変動：大気－海洋循環

地球環境観測研究開発センター 研究開発センター長代理 原田尚美

古気候・古海洋学の分野では、第四紀以降地球が最も寒かった時代である最終氷期最寒期（Last Glacial Maximum, LGM: 21,000～19,000年前）から融氷期（退氷期）（19,000～11,500年前）における地球気候や環境変動を復元する研究が、非常に多く実施されている。最大の理由は、劇的に気候や環境が変化し、将来予測のアナロジーとしてもきわめて興味深い時代だからであろう。特徴は、氷期に顕著に見られるダンスガード・オシュガーサイクル（注1）に良く似た1000年程度の時間スケールの温暖－寒冷気候変動を繰り返し、グリーンランド氷床や海底堆積物に記録された気温や表層水温によると、温暖期突入時には数十年程度で10℃（気温）から4～5℃（高緯度域の海洋表層水温）も劇的に上昇していた点である。なぜ1000年気候変動が生じたのかメカニズムはまだよくわかっていない。大気や海洋の循環が1000年気候変動にどのように関わっているのか？私はこれを明らかにすることを目的として多くの仲間たちと協力しながら、北太平洋中高緯度域を対象海域に研究を行ってきた。その成果の一部を紹介したい。

LGM以降、大気循環や海洋表層水温（SST）はどのように変動していたのか？日本海やオホーツク海から海底堆積物を採取し、そこに記録される風成塵の起源域の変化（タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠など）から偏西風循環を、水温指標性有機化合物（注2）からSST変動を復元した。その結果、偏西風ジェット軸やSSTは、1000年程度の周期性を持って変動しており、グリーンランド氷床に記録された同じく1000年程度で生じる温暖－寒冷変動（気温変動）に関連した変動であることがわかった。具体的には、温暖期にアジア夏季モンスーンの影響力が強まり、日本周辺では暖かく、湿潤傾向となり、寒冷期には寒冷乾燥気候が卓越することが示された（図1）。全球規模の気候変動伝播メカニズムについては、まだ完全に解明されてはいないが、この結果から、偏西風（惑星波）や北極振動（注3）のような極域の大気経路による気候の伝播の可能性が見いだされた。

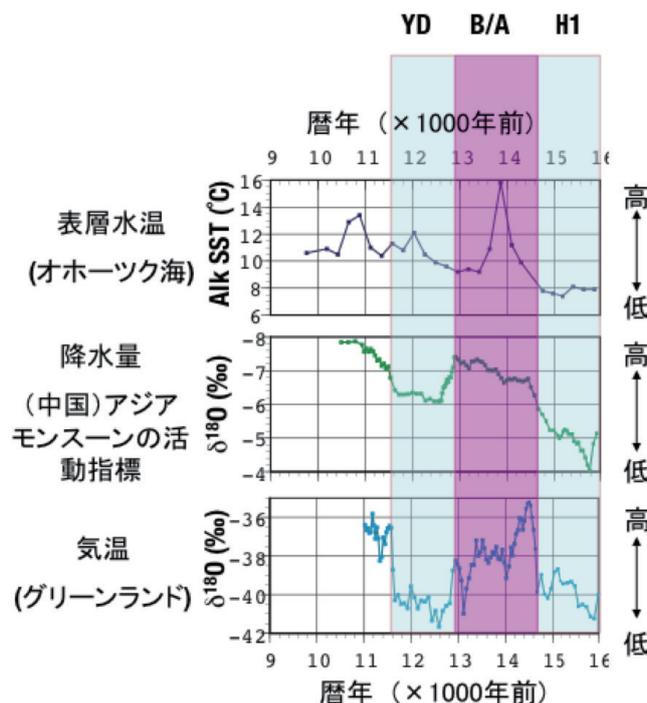


図1 オホーツク海の表層水温とアジアモンスーンの活動、グリーンランドの気温の復元結果。
YDおよびHIはそれぞれヤングドリラス、ハインリッヒイベントIとよばれる寒冷期でB/Aはベーリングアレード温暖期

大気循環や海洋表層における環境変動は、海洋の中層・深層環境変動とも密接に関連している。たとえば、上記で述べてきたオホーツク海の SST は、同海域における海氷形成とも密接に係る。知床沖堆積物に記録された海氷形成の指標 (Proxy: プロキシー) である碎屑粒子 (IRD) は温暖期で少なく、寒冷期で増加していたことがわかっている。従って、知床沖における海氷は、温暖期より寒冷期によく発達し、SST の結果と整合的である。また、海氷形成の程度は、高密度水の形成量に直接関係してくる。高密度水はオホーツク中層水 (北太平洋中層水の起源水) の形成に重要な水塊であり、最終的に北太平洋中層水の形成量に影響する。従って、SST、表層塩分ならびに海氷形成に見られる 1000 年スケール変動や融氷期におけるベーリング・アレード温暖期 (B/A: 14,600 ~ 12,900 年前) およびヤング・ドリマス寒冷期 (YD: 約 12,500 ~ 11,500 年前) に連動した変動は、北太平洋中層水循環に影響を及ぼしていた可能性がある。そこで、中層水起源域のオホーツク海や中層水下流域の下北沖を含む北太平洋高緯度海域全域の海底堆積物中の浮遊性有孔虫および底生有孔虫の ^{14}C 年代差データのコンパイル (注 4) を作成し、中深度層循環速度の推定を行なった。その結果、中深度層の水塊の循環速度が融氷期の HI 寒冷期 (17,500 ~ 14,600 年前) に速くなっていた事がわかった。なぜ、HI 寒冷期に北太平洋高緯度海域の中深度層循環が活発になるのか? 北大西洋海底堆積物にはこの時代、大量の IRD が検出されることから、北大西洋に大量の海氷が存在したか北米大陸氷床の崩壊によって、大量の海氷が海洋へ流れ出したと推測できる。これによって大量の淡水が大西洋高緯度域に供給された結果、北大西洋子午面循環 (注 5) が弱化し、それが遠因となって北太平洋表層水が高塩・低温になり、北太平洋での子午面循環を中深層まで (~2000m) 対流させるきっかけとなったのではないか? この仮説について、ハワイ大学国際太平洋研究センターの Timmermann A. 教授や東京大学の阿部彩子准教授の協力により古気候モデル (LOVECLIM, MIROC) で「淡水散布実験」による検証を行なった (図 2)。具体的には、北米大陸にあった氷床の崩壊に見立てて 100 年ほどの時間をかけて、北大西洋深層水の形成場に淡水を供給した。その結果、急激に北大西洋深層水の形成が停滞した。同時に、低緯度から北上するメキシコ湾流 (暖流) が弱まり、熱が北へ運ばれなくなり、高緯度から寒冷化が始まった。続いて北大西洋中緯度では、貿易風が強まり、赤道付近の熱帯収束帯とよばれる低気圧帯を南半球側に押し下げた。同時に亜熱帯の降雨帯も南半球側に移動したため、北大西洋から北太平洋へ輸送されていた水蒸気量は減少した。当時、海水準は現在よりも大きく低下しており、ベーリング海峡は閉じてユーラシア大陸と北米大陸は地続きとなっており、北極海から北太平洋への淡水流入は制限されていた。以上の 2 つの効果により、北太平洋は高塩分の傾向が強まり、高緯度で深層水形成の条件が整っていったものと考えられる。このように、気候変動に伴って深層循環が大きく変わり、現在とは全く違った循環パターンが存在したことを示すと同時に、深層循環の出発点になるという北太平洋の新たな役割を示した画期的な発見であった。

注 1) ダンスガード・オシュガーサイクル: 最終氷期 (6 万 5 千年前から 1 万 9 千年前までの間) にグリーンランドの氷床に記録された大気成分 (酸素の同位体比など) の結果から、数十年程度で急激に昇温し (10°C 程度の上昇が見られた) 数百年かけて徐々に寒冷化する温暖-寒冷気候変動が発見された、1000 年から 2000 年程度の周期性を持つ急激な気候変動。最初に発見した 2 人の研究者 (Willi Dansgaard と Hans Oeschger) の名前にちなんで名付けられている。原因は特定されていない。

注 2) 長鎖不飽和アルキルケトン: アルケノン、植物プランクトンのハプト藻類のうち、いくつかの種のみが特異的に合成する炭素数 37 から 39 までの脂質成分。特に、炭素数 37 で、不飽和の数が 2 つと 3 つのアルケノン濃度の相対比から過去のハプト藻が生息していた表層水温を見積もることができる。

注 3) 北極振動: 北半球中緯度と北極の相反する気圧場の変化が周期的に見られる現象。北半球の海面気圧の月平均値の平年からの偏差を取り、その値の経験的直交関数展開で計算されてくる第一主成分の結果、冬季のジェット気流や低気圧の位置などに影響を及ぼすことから、日本の冬の気象と密接な関係がある。

- 注4) 浮遊性有孔虫および底生有孔虫の ^{14}C 年代差データ: 海洋表層には原生動物の浮遊性有孔虫, 海底には底生有孔虫が生息している. 宇宙線が大気中の窒素と衝突して生成する放射性各種の炭素 ^{14}C は, 二酸化炭素として海面から海水に溶け込む. このため, 海洋表層には多く存在し, 海洋深層には少ない. 有孔虫は炭酸カルシウムの殻をつくる際に周囲の海水から炭素 ^{14}C を取り込む. 深層水の沈み込みが起きると, 表層の炭素 ^{14}C は深層へ速やかに輸送され, 底生有孔虫の殻にも取り込まれる. 活発な沈み込みによって表層水が深層へよく輸送される時代は, 海底堆積物の同じ層準に存在する浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻に含まれる炭素 ^{14}C の年代差が小さくなり, 沈み込みが停滞し表層水の深層への輸送が滞ると同じ層準に存在する浮遊性有孔虫と底生有孔虫の殻に含まれる炭素 ^{14}C の年代差が大きくなる. つまり, 当時の海水の循環の活発・不活発を浮遊性有孔虫と底生有孔虫の炭素 ^{14}C 年代差によって知ることができる.
- 注5) 北大西洋子午面循環: 地球規模の熱と塩分の変化によって生じる海洋の大循環. 北大西洋北部では, 高い塩分を持つ寒冷な水が沈み込み, 北大西洋深層水を形成する. 沈み込んだ海水は深層を緯度の低い方向に南下している. 表層では, その高緯度域の沈み込みを補うように北上しながら熱を高緯度方向に運ぶ流れがある(メキシコ湾流). このように地球規模の海流の流れは, 子午面方向に南北に動いていることから, こうよばれる場合がある.

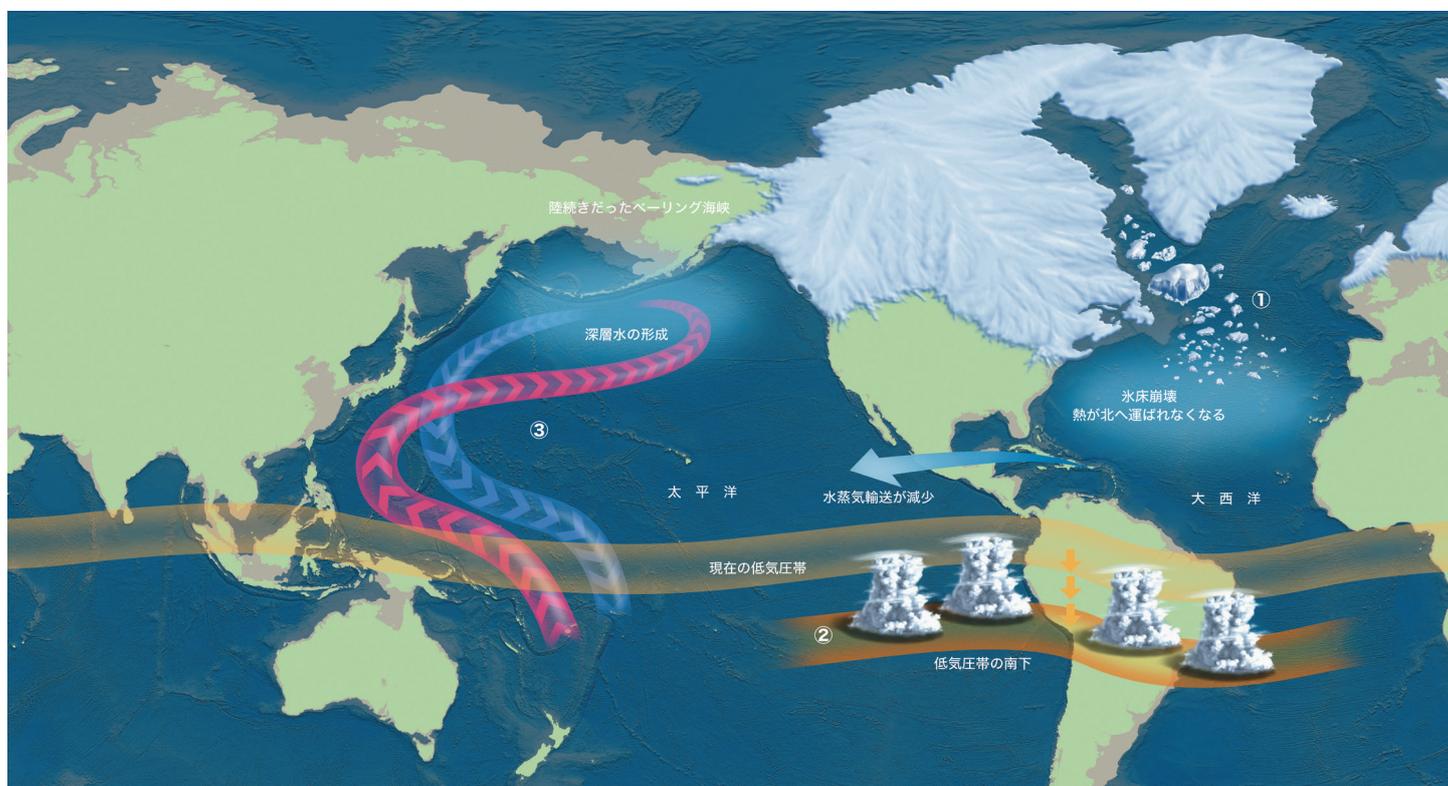


図2