

## 古第三紀始新世の地形変化による 海洋熱塩循環場変化とその力学機構について

海洋物理学分科 田旗栄太 (TABATA, Eita)

始新世（5600 万年前から 3400 万年前）は、新生代で最も温暖な気候状態から、長期的な寒冷化により大規模な氷床が形成され始めるなど、寒冷な気候状態（アイスハウス）に移行した世であり（Zachos et al.,2001）、重要な気候変動が起きた期間であるとして注目されている。特に、南極大陸に氷床が形成され始めた始新世・漸新世移行期（EOT：Eocene-Oligocene Transition）という期間（3400 万年前頃）については、気候への影響が非常に大きかった期間であるため、気候モデルや地球システムモデルを用いた数値モデル実験による研究が多く行われている（例えば、Goldner et al.,2014）。しかし、始新世の長期的な寒冷化が起きた始新世中期に関する数値モデル研究は少なく、その気候変動の要因やメカニズムは明らかにされていない。そしてこのような問題の要因として、前述のような長期的な気候変動に強い影響を与えていたと考えられる熱塩循環（気候システムの中で最も時間スケールが長い）が、その熱塩循環の変化を引き起こし得た当時の地形変化（熱塩循環よりさらに時間スケールが長い）によってどのような影響を受けたのかについても同様に議論が進んでいないことが挙げられる。例えば、北太平洋深層水形成の弱化（熱塩循環場変化）（Thomas et al.,2008）やタスマン海峡の開通（地形変化）（Bijl et al.,2013）などが始新世中期の寒冷化（気候変動）と同時期に起こっていたことが示唆されているが、タスマン海峡の開通が原因で北太平洋深層水形成の弱化が起きたのかはまだ不明であるし、北太平洋深層水形成の弱化がどのような循環場変化によって引き起こされたのか不明であるために、長期的な寒冷化に影響を与えていたのか、ということについても明らかになっていない。

始新世中期の熱塩循環場変化と地形変化の関係について議論が進んでいない大きな要因として、当時の熱

塩循環場とその変化の要因の理解が不明瞭であることが挙げられる。それは、当時形成されていたと示唆される北太平洋深層水の形成を再現する気候システムモデルが少ないことから北太平洋深層水の存在自体が疑問視されていたり（Lunt et al.,2016、Vahlenkamp et al.,2018、Toumoulin et al.,2020）、熱塩循環場変化に踏み込んで議論する研究が少なかったりするためである。熱塩循環場変化について言及している論文についても、多くの研究では子午面鉛直循環（MOC）のみしか着目せず、全球にわたる 3 次元的な深層循環場の変化に注目することはない。また、そのような全球的な深層循環場変化に注目した Toumoulin et al. (2020) では、インド洋深層での循環場が大きく変化していることを発見しているものの考察には立ち入らず、その要因や力学機構、その変化による循環場全体への影響などについては一切触れていない。始新世中期の熱塩循環場とその変化に対する理解を深めなければ、気候系において重要な役割を果たす海洋大循環の全体像を正確に捉えることができない。前述した北太平洋深層水形成の弱化とタスマン海峡の開通、そして始新世中期の寒冷化の関係はその代表例と言うことができ、当時の地形変化が全球的な深層循環場をどのような要因でどのように変化させたのか、についての理解を深めることで当時の気候変動をより明瞭に調査することができると思う。

本研究では、始新世中期における熱塩循環場変化とその力学機構の理解を深めるために、Thomas et al.(2008) が提唱したような北太平洋深層水形成の弱化と、始新世に起きたと考えられているドレーク海峡やタスマン海峡の開通（例えば Hodel et al.,2021、Sijp et al.,2013）の関係を評価し、当時起きた地形変化が北太平洋深層水形成の弱化を説明しうるのか、そして説明できるとした場合、どのような力学機構でその弱

化は起きたのか、ということについて調べた。そのため当時の気候状態を想定した境界条件を用いた全球海洋モデルによってシミュレーションを行い、それぞれの海峡を開閉させることで生じる熱塩循環場変化を観察した。その結果、始新世地形においてタスマン海峡開通は北太平洋深層水形成を弱化させる効果があった一方で（図1）、ドレーク海峡開通、あるいは両海峡の開通は北太平洋深層水形成に影響を与えないことがわかった。タスマン海峡が開通したことで南大西洋表層の西岸境界流が強化され（図2）、その境界流の強化によってウェッデル海が高塩分化したことでウェッデル海での深層水形成が強化された（図3）。強化されたウェッデル海深層水はインド洋をって太平洋海盆に押し寄せるようになり、北太平洋深層水の南下緯度を制限させた。この結果は、タスマン海峡の開通により、北太平洋深層水形成の弱화가始新世初期の終わり頃に始まったことを示唆するものであり、それは Thomas et al. (2008) の掘削データ解釈と整合的である。一方、ドレーク海峡開通と両海峡の開通が北太平洋深層水形成に影響を与えなかったという本実験結果は、北太平洋深層水形成の弱化時期を踏まえると、ドレーク海峡の開通時期が漸新世初期であるとの制約を与えることになる。

さらに本実験で再現された、タスマン海峡開通に伴う深層水温の低下は、掘削データから考えられている当時の深層水温低下より小さかったことから、北太平洋深層水形成弱化による気候系への影響は弱く、地形変化による熱塩循環場変化と始新世中期からの継続的な寒冷化との関連性は薄い、という結論に至ったが、北太平洋深層水形成の弱化を引き起こした熱塩循環場変化が間接的に他のシステムに影響を与え、寒冷化に寄与したという可能性を排除するものではない。前述のような北太平洋深層水形成弱化とタスマン海峡の開通と始新世中期から始まった長期的な寒冷化の時系列の関連性から、北太平洋深層水形成の弱化による始新世地球システムへの影響を調査することが今後の課題である。

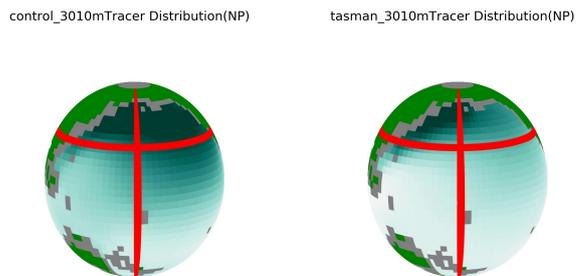


図1：太平洋海盆水深 3010m における NP トレーサー分布（NP トレーサー分布とは当時のベーリング海付近の深層に配置したパッシブトレーサーのこと。このパッシブトレーサーの広がりを NPDW の支配領域として捉える）。右が基準実験で、左がタスマン海峡開通実験。深緑の分布が高 NP トレーサー濃度を示すため、左右の図を比較することで、タスマン海峡開通によって NPDW の支配領域が縮小したことがわかる。

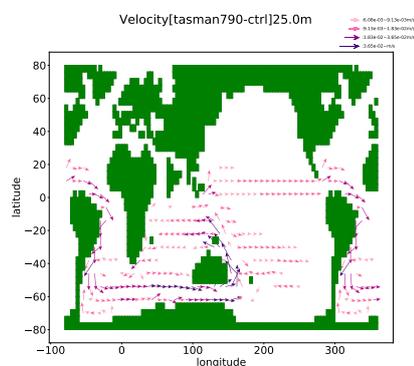


図2：基準実験とタスマン海峡開通実験の表層流速偏差ベクトル場。この図からタスマン海峡開通によって南大西洋表層の西岸境界流が極向きに強化されたことがわかる。この境界流強化によって中緯度の高塩分水が極域により多く輸送されるようになり、ウェッデル海が高塩分化し、ウェッデル海深層水形成が強化された。

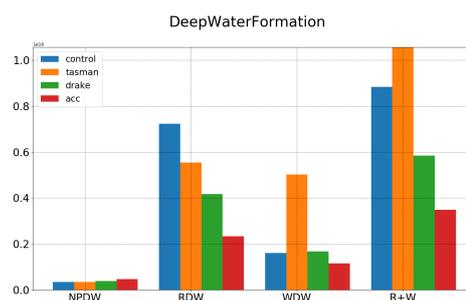


図3：3箇所の深層水形成領域（それぞれ、NPDW が北太平洋高緯度、RDW がロス海、WDW がウェッデル海の深層水）における深層水形成量。一番右の R + W は RDW と WDW を足し合わせたもの。青が基準、橙がタスマン海峡開通、緑がドレーク海峡開通、赤が両海峡開通状態の実験である。この図からタスマン海峡開通によってウェッデル海深層水形成が強化されたことがわかる。そして、NPDW 形成量が4種類の実験でほとんど変化ないので、R + W からタスマン海峡開通状態が最も総深層水形成量が多いことがわかる。力学的説明が完了していないため修士論文には記載されていないが、この総深層水形成量の増加が北太平洋深層内部領域での湧昇量を増加させたことが NPDW の支配領域縮小に重要である。