

(第6号様式)

## 学位論文審査の結果の要旨

氏名	楊 海燕
審査委員	主査 郭 新宇 副査 日向 博文 副査 森本 昭彦 副査 加 三千宜

論文名 Changes in the Kuroshio and North Equatorial Current during the last 35,000 years

### 審査結果の要旨

最終氷期から現代まで、気候変動に伴い大きな海水準変化が起こった。観測データから、最終氷期最盛期(約21,000年前)には現在より130-140mの海面低下があったことが報告されている。最終氷期最盛期以後、海面は急激に上昇し、6千年前頃に現在の海水準に達した。また、最終氷期最盛期に偏西風が南下したことがいくつかの古気候モデルの結果に見られている。

最終氷期以後の黒潮の変遷については、観測データからの推測はあるものの、時間と空間の制約があるため、不明な点が多く残っている。数値モデルは観測データの空間解像度の不足を解消できるが、計算資源の制限からこれまでの多くのモデルでは計算範囲を東シナ海と日本南岸に限定して黒潮の変遷を調べている。その結果、黒潮に密接に関連する北赤道海流と黒潮続流の変遷を十分に理解せず黒潮の変遷を議論しており、黒潮の変遷のメカニズムを局所的に捉えがちなものである。また、古気候モデリング相互比較プロジェクト(PMIP)の大気海洋結合モデルは、全球海洋をカバーしているが、モデルの空間解像度が粗いため、中規模渦や黒潮流域を精度よく表現することができていない。

西向きに流れる北赤道海流はフィリピン沖で北向きの黒潮と南向きのミンダナオ海流に分岐する。北赤道海流の流量だけではなく、その分岐点の位置(緯度)も黒潮とミンダナオ海流の流量を左右する。しかしながら、既存の古海洋モデリング研究では、北赤道海流の流量を議論するものはあるが、この分岐点の位置(緯度)の変化についてはほとんど触れていなかった。したがって、最終氷期からの海水準変動と気候変動の複合的影響によって北赤道海流の強さと分岐点の位置がどのように変化してきたか、そしてこれらの変化が黒潮と黒潮続流の変化にどのように関連しているのかを検討する必要がある。

楊海燕氏は、本学位論文において、中規模渦を解像できる水平解像度1/12度で北太平洋全体と南太平洋の一部を表現し、海水準の変化を考慮した地形を利用した海洋循環モデルを構築した。モデルの駆動力と初期条件は全球古気候モデルの結果を利用した。古気候モデルの不確実性を減らすために、最終氷期最盛期を対象としたPMIPから入手した10個の古気候モデル結果を別々に1/12度の海洋循環モデルに導入し、黒潮流域のアンサンブル平均を得た。その後、アンサンブル

ル平均とほぼ一致する計算結果をもたらした古気候モデル (MIRCO4m) の 3 万 5 千年前から現在までの 5 つの年代の結果を駆動条件として高解像度海洋モデルを実行し、黒潮と北赤道海流の長期変動特性を明らかにした。具体的な成果は以下の通りである。

#### (1) 最終氷期最盛期における黒潮流域のアンサンブル平均

最終氷期最盛期の 10 個の気候モデルのダウンスケーリング結果から得た平均場において、黒潮流軸は、現代に比べ、東シナ海では少し太平洋側にシフトし、本州南東部では 1 度程北上し、東経 146° 周辺の黒潮続流域では 2 度程南下していた。また、最終氷期最盛期の北太平洋の亜熱帯循環は北太平洋上の風場の変化により強化されていた最終氷期最盛期の北赤道海流は貿易風の強化に応答して強化され、その結果沖縄トラフの南部と中部の黒潮の流速が大きくなった。また、日本近海の海水温のアンサンブル平均では、日本海および黒潮と親潮間の混合水域で最大の海水温の降下 (約 6°C) が見られた。

#### (2) 過去 35,000 年間の黒潮の変化

3 万 5 千年前、3 万年前、最終氷期最盛期、6 千年前、産業革命前という 5 つの年代の古気候モデル (MICRO4m) の結果を用いて、1/12 度の海洋循環モデルを実行し、5 つの年代の黒潮の流路と流量を比較した。その結果、6 千年前と産業革命前の黒潮はほぼ同じ流路を示し、また、最終氷期の三つの年代 (3 万 5 千年前、3 万年前、最終氷期最盛期) の黒潮もほぼ同じ流路を示した。5 つの年代の黒潮を比較すると、最終氷期最盛期の黒潮は東シナ海のトカラ海峡の手前で最も南の流路を取っていた。また、日本の南東沖では最終氷期の黒潮は小さな蛇行を伴い、北上していた。黒潮続流では、最終氷期には南下していた。最終氷期の黒潮続流の南下は、風応力の渦度がゼロになる位置の南下に関連していた。そして、黒潮の表層流速は 6 千年前と産業革命前には弱く 0.9m/s 程度であったが、最終氷期には強く約 1.4m/s に達した。黒潮の流速の大きさについて、古海洋学でよく用いられる指標である水温の鉛直勾配より、水温の水平勾配の方が実際の流速変化に合うことを海洋循環モデルの結果から示した。

#### (3) 過去 35,000 年間における北赤道海流とその分岐点緯度の変化

上記の 5 つの年代を比較すると、北赤道海流の流速は最終氷期に強くて、占める範囲は狭くなる特徴がある。現在の北赤道海流の分岐点は、海面では北緯 13.3 度、水深 500m では北緯 17.3 度であり、分岐点の位置は水深の増加に伴い高緯度側に傾いている。最終氷期の北赤道海流の分岐点は、現代のものと比べると海面と水深 500m とともに南下していたが、水深の増加に伴い高緯度側に傾く傾向は同じであった。

北太平洋の亜熱帯循環において、黒潮と黒潮続流はその北の境界に、北赤道海流はその南の境界に当たるため、(2) と (3) の成果を総括すると、最終氷期には北太平洋における亜熱帯循環全体が現代のものより南下していたと言える。このような南下は北太平洋の風場の変化と力学的な整合性が取れる。

提出された学位論文の研究成果の一部は、国際学術雑誌に 1 編の論文が公表されている。最終氷期の北赤道海流の変化と黒潮流域のアンサンブル平均の研究成果は投稿準備中である。

本学位論文の公聴会は令和 4 年 10 月 18 日にオンライン形式で開催し、約 45 分の英語による論文発表と 25 分の質疑応答が行われた。引き続き、学位論文審査委員会を開き、本論文の内容を厳正に審議した結果、審査委員が全員一致で、博士 (理学) の学位を授与するのに値するものと判定した。