

氏名	とよ だ たか ひろ 豊 田 隆 寛
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2885 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	海洋大循環モデルを用いた北太平洋の表層・中層における水塊構造と循環の解析
論文調査委員	(主 査) 教 授 淡 路 敏 之 助 教 授 秋 友 和 典 教 授 木 田 秀 次

### 論 文 内 容 の 要 旨

北大西洋と共に海洋による極向き熱輸送を担う北太平洋の循環構造の解明は気候変動システムの理解に不可欠である。北太平洋の子午面循環は比較的浅く、大部分の熱輸送は 1000~2000m 以浅の「浅い子午面循環」が担っている。本研究ではその熱輸送の実体である北太平洋表層・中層循環系における水塊の形成と移流過程に関して、特に未解明な部分の多い東部亜熱帯モード水と中層水の物理過程を対象に、高性能の海洋大循環モデルを開発してシミュレーション実験を行い、以下のような結果を得た。

まず、モデルで得られた亜熱帯モード水の解析から、北太平洋で観測されている3種類のモード水のうち、西部亜熱帯モード水及び中央亜熱帯モード水に関しては、冬季に高温な黒潮続流域上を寒冷な偏西風が吹くために生じる強い海面冷却によって 300m 深にも達する深い混合層が発達し、モード水の特徴付ける低渦位層が形成されるという従来の観測的知見と整合的な結果を得た。

次に、最近発見された北太平洋東部海域の 24.0~25.4 $\sigma_{\theta}$  層に存在する東部亜熱帯モード水については、対象海域での海面冷却の大きさは深い混合層を形成するには不十分で、何らかの効果的なプレコンディショニングが必要とされていたが、これに関して、高精度の渦分解大循環シミュレーション実験により、東部亜熱帯モード水の季節から経年スケールの観測的特徴を再現することに成功するとともに、解析により東部亜熱帯モード水の形成に関するプレコンディショニング機構を解明した。すなわち、夏から秋にかけて北米大陸から吹く貿易風の強化に伴い、25°N 付近での海面からの蒸発が活性化して表層水が高塩化する。この東風は同時に北向きのエクマン輸送を励起し、その収束域にあたる 30°N 付近に東西に伸びた表層塩分極大域が出現する。この塩分極大域の東部 (140°W 周辺) では、加えて層積雲による短波放射の減少が顕著なために、夏季における海面水温の上昇が抑えられる結果、晩秋期における海面水温の低下が強まり、季節躍層の密度成層は逆に一層弱まる。そのため、比較的弱い冬季の海面冷却でも深くまで達する対流混合が生じることにより東部亜熱帯モード水が形成される。

中層循環に関しては、その指標である北太平洋中層水の主な起源はオホーツク海での結氷に伴うサブダクションとクリル海峡通過時の強い潮汐混合であるという先行研究の知見に基づき、この西岸からの渦位供給を新たに考慮に加えたユニークな中層循環の応答シミュレーション実験を行った結果、クリルでの鉛直混合によるオホーツク海表層水の高塩化は沈み込む海水の密度及び体積を増加させることで中層の換気を強化する一方、潮汐混合による下方への拡散により中層下部は低塩化することを明らかにした。これに伴い、等密度面を横切る質量輸送は中層で収束、表層と深層で発散し、北太平洋の「浅い子午面循環」は 2~3Sv (1Sv = 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) 強化されることをはじめて指摘した。この中層への質量供給に対する力学的応答は、西岸境界層の赤道向きの流れを強化する沿岸ケルビン波と、プール領域の循環を強化する高次モードのロスビー波によりなされ、その結果、中層水は循環境界を越えて効率的に亜熱帯中層へと輸送されるとともに、亜寒帯内部領域の表層循環の強化により、亜寒帯域を特徴付ける中暖・中冷構造の現実的な再現が可能になることを示した。

以上の結果は、北太平洋表層・中層の循環と水塊形成に関する海面過程や西岸過程の役割に関して新たな知見を与えるものであり、北太平洋の気候変動を理解・予測する上で意義深い成果である。

### 論文審査の結果の要旨

北太平洋における10年スケールの気候変動の要因として注目されている shallow overturn(海洋中層 1000~2000m 深までの南北循環)は、亜熱帯モード水や中冷・中暖水に代表される表層水塊及び塩分極小で特徴づけられる北太平洋中層水の形成と循環によって主に担われている。しかもこれらの水塊は、二酸化炭素等の地球温暖化物質を効率的に取り込み、全北太平洋へ輸送していることが観測により指摘されたことから、北太平洋表層・中層水塊の形成と循環過程の理解は、気候変動メカニズム研究の重要な課題として国際的に注視されるようになった。これはまた、北太平洋の循環構造は大西洋ほどには理解されていない現状を考えると、19世紀後半のチャレンジャー号による観測航海以来、海洋物理学の中心的テーマである全球海洋構造の理解という点からも重要である。

申請者は、この問題に関して、特に未解明な部分の多い東部亜熱帯モード水と北太平洋中層水の形成・輸送過程を詳細に再現できる高性能の海洋大循環モデルを開発・使用してシミュレーション実験を行い、貴重な研究成果を得ている。

まず、シミュレーション実験で得られた3種類の亜熱帯モード水の解析から、西部及び中央亜熱帯モード水については、冬季に高温な黒潮流域上を寒冷な偏西風が吹くことにより生じる強い海面冷却によって300m深にも達する深い混合層が発達することによりモード水の特徴付ける低渦位層が形成されるという、従来の知見と整合する結果を確認した。対照的に、海面冷却だけでは深い混合層が形成されず、従って何らかの効果的なプレコンディショニングのメカニズム解明が待たれていた東部亜熱帯モード水に関して、申請者はこのモード水の時空間構造を初めて正確に再現することにより、そのメカニズムの解明に成功した。すなわち、夏から秋にかけて北米大陸から吹く貿易風の強化に伴い、25°N付近の海面蒸発が活性化して高塩化した表層水が、貿易風によるエクマン輸送によって北上し、その収束域である30°N付近に東西に伸びた表層塩分極大域を形成する。東部亜熱帯モード水域(140°W周辺)に相当する表層塩分極大域の東部では、層積雲による短波放射の減少に起因した海面水温の相対的低下が加わるために、晩秋における季節躍層の密度成層が非常に弱くなり、比較的弱い冬季の海面冷却でも深い対流混合が発生して東部亜熱帯モード水が形成されることを明らかにした。従来、恒久躍層の押し下げによる成層の安定性の低下や、亜熱帯・亜寒帯の境界でのスタビリティ・ギャップに起因した成層の弱化、更にはアウトクロップラインの間隔の広さによる多量のサブダクションの発生等、いくつかの説がプレコンディショニング機構として提案されてきたが、いずれも結果論の域を出なかったのに対して、亜熱帯モード水の観測事実を包括的に説明できる申請者の結果は関係者の注目を集めた。

次に、北太平洋における中層循環に関して、申請者はその重要な駆動源であるオホーツク海でのサブダクションとクリル列島域での強い潮汐混合に対する内部循環の応答に着目したユニークなシミュレーション実験を行い、以下の事実を明らかにした。クリルでの潮汐混合効果により、北太平洋中層の換気は27.5 $\sigma_{\theta}$ 層にまで強化され、中層は低塩・低温化する。このうち、北太平洋中層水の中心層付近の低塩化(換気の強化)は主に潮汐混合によるオホーツク海での沈み込みの強化によるのに対し、中層下部の低塩化は潮汐混合そのものによる下方への拡散が原因であることを示した。従って、内部循環の変化を引き起こす等密度面を横切る質量(体積)輸送は潮汐により強化されたオホーツク海での沈み込みと拡散に伴って生じることになる。沈み込みは表層から中層へ海水を輸送し、拡散は深層及び表層から中層へ海水を取り込む。このため等密度面を横切る質量輸送は中層で収束、表層と深層で発散し、中層における収束は質量供給源として作用して、クリル海峡から離れる向きの流れを励起する一方、上層と深層における発散は質量吸い込み口として働き、クリル海峡に向かう流れを引き起こすために、北太平洋の浅い子午面循環と深い子午面循環がそれぞれ最大で2~3Sv(1Sv=10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)強化されることを指摘した。これに伴い、亜寒帯域の中冷・中暖構造の定量的再現性が高まることをはじめて示した。さらに、中層の力学過程を調べることにより、クリルからの質量供給に対する応答は主に沿岸ケルビン波と傾圧高次モードの東進ロスビー長波によって生じること、そのうち沿岸ケルビン波による応答はクリル海峡から西岸境界に沿って赤道に向かう流れを強め、一方、東進ロスビー長波による応答はプール領域の循環を強化するために、循環経路が北太平洋亜熱帯の換気を強めるように変化して親潮の亜熱帯循環への進入傾向が強まるなど、換気された亜表層・中層海水が循環境界を越えて効率的に輸送されるメ

カニズムを明らかにした。申請者は以上の結果から、中層循環の応答の理解にケルビン波と東進ロスビー長波の両方が必要であり、こうしたケルビン波と東進ロスビー長波の組み合わせの欠如が現実的な中層換気理論が未だに構築されていない理由であると示唆している。従って、これら2種の波の効果を同時に取り入れれば、新しい中層循環の理論構築が可能であり、さらには深層循環理論と通気躍層理論の統一に道が拓けると期待できる。

以上のように、本研究は北太平洋表層・中層の循環と水塊形成の解明に大きく貢献するものとして高く評価できる。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。