

学 位 論 文 題 名

Formation Mechanisms and Temperature Variations of Mode Waters in the North Pacific: An Ocean GCM Study

（海洋大循環モデルを用いた北太平洋における
モード水の形成過程と水温変動に関する研究）

学位論文内容の要旨

モード水とは、鉛直的に一様な密度や温度を持つ水塊であり、世界の海洋の表層付近から深層にかけてこのような特異な領域が観測されている。亜熱帯循環系付近では、このモード水は表層から亜表層（数 100m）付近に存在しており、亜熱帯循環の流れやその構造に大きな影響を与え、さらに、一様な性質を持つ水塊が、表層で得られた変動のシグナルを別の遠隔地に運ぶことができるため、その貯熱量の大きさから大気海洋結合系で生じる気候変動に重要な役割を果たしている可能性がある。従って、このようなモード水の形成過程や、変動について詳しく調べる必要がある。

北太平洋の海洋亜表層では亜熱帯モード水（STMW）、中央モード水（CMW）、東部亜熱帯モード水（ESTMW）と呼ばれる3つのモード水が知られている。このうち STMW と CMW の形成には冬季の北西太平洋に形成される深い混合層の存在が重要であると定性的には指摘されており、それに関係して、強い混合層勾配である混合層フロントがモード水（低渦位水）の形成過程に重要な役割を果たしているという理論的研究も行われているものの、東部北太平洋にはそのような深い混合層は存在せず、ESTMW の形成過程は良くわかっていない。また、深い混合層が存在する北西太平洋に形成されるにもかかわらず、STMW と CMW がなぜ分かれて存在しているのかということも明確になっていない。また、北太平洋では数十年規模の気候変動の存在が知られており、特に 1970 年代半ばに気候シフトと呼ばれる、アリューシャン低気圧の強化に伴う偏西風の強化が起これ、海面水温の広範囲にわたる低下が起こった。そして CMW の形成域がこの変動の中心付近に存在しているが、このような気候変動に対する現実の CMW の水温変動メカニズムは良くわかっていない。そこで本研究は、海洋大循環モデル(OGCM)を用いて、北太平洋亜熱帯循環系付近に存在するモード水の形成過程を調べ、ESTMW の形成要因と、STMW と CMW が分離して形成される理由について示し、CMW の水温変動メカニズムを明らかにした。

OGCM のデータから、各モード水の形成過程の診断を水温躍層モデルを用いて行った。このモデルは、冬季の混合層の底における渦位を定義するものであるが、低渦位水の形成は、混合層の底における、弱い密度の水平勾配の影響、強い混合層フロントの影響、強い等密度面の傾き（鉛直流速）の影響の3つの要素が重要になる。それぞれを分布を調べた結果、ESTMW の形成には、東部北太平洋に存在する弱い水平密度勾配が重要であることが明らかになった。このような密度分布になる理由は、ちょうどその海域には、弱い温度水平勾配と、強い塩分水平勾配の領域が存在しており、密度に対して温度と塩分の効果が相殺するように働いているためである。また、これら表層の温度、塩分の分布はそれぞれ、太平洋高気

圧の存在、北米沿岸での南向きの流れによる高緯度の淡水過剰域からの移流によって生じていることを説明した。

また、CMW の形成には、強い混合層フロントの影響が、STMW にはそれと共に混合層の底での等密度面の勾配の影響が大きいことが示された。さらに、混合層フロントの影響は、流れが強い場合、混合層勾配が大きい場合、また流れの方向と混合層深さの等値線との成す角が大きい（直角に近い）場合に大きくなる。これらを調べると、STMW 形成域付近では南向きの再循環流が、CMW 形成域付近では東向きの黒潮続流が混合層の等値線にほぼ直角に交わっている。一方この2つのモード水の間では流れは強いものの、混合層の等値線との成す角は小さいために、混合層フロントの影響が小さくなっており、このことが2つのモード水の分離を明確にしていることが示唆された。さらに、等密度面の勾配は、鉛直流速によって決まっているが、その成分は風応力による Ekman 収束によって生じる鉛直流速がほとんどである。STMW 形成域での等密度面の勾配の影響には、それによる比較的強い下向き鉛直流速が寄与しており、このことも2つのモード水が分離して形成される重要な役割を果たしていることがわかった。

次に、気候シフトに対する、CMW の水温応答とそのメカニズムについて、OGCM の海表面に与える風応力のみ経年変動させた場合、温度のみ経年変動させた場合、どちらも変動させた場合の3つの数値実験を行って調べた。温度のみ変動させた実験では、表層の冷却シグナルが亜表層に沈み込むことによって、気候シフト後に亜表層全体で低温化が起こっていることを示しており、過去の亜表層の水温変動に着目した研究を支持する結果となった。しかし、両者を経年変動させた現実的な実験では、CMW 領域ではその低温化が小さくなるか、むしろ高温化する傾向が現れ、観測データによる解析とも比較的良く合っていた。そこで、この水温変動メカニズムを調べるために、さらに風応力のみ経年変動させた実験について調べた。この実験では、CMW 領域での高温化が明瞭に現れた。これは、偏西風強化に伴う亜熱帯循環強化によって、CMW の形成域とその位置が東へシフトしたために等温線も東へ移動し、高温化が引き起こされたためである。以上の結果から、CMW 領域では、気候シフトによる風応力と温度の変動の効果が互いに打ち消し合う様に働いていることが明らかになった。両者共に変動させた実験と、風応力のみ変動させた実験での水温アノマリの標準偏差を比較すると、モード水領域では、両者の変動を与えた場合のほうが水温変動の振幅が小さくなっていることが示され、現実の CMW でもこの様な相殺メカニズムによって、変動シグナルが小さくなっていることが示唆された。

気候変動の研究において多く用いられている粗い解像度を持つ海洋モデルが、亜表層の水温変動に対してどのような影響を与えているかを調べるために、OGCM の水平解像度に対する亜表層水温変動の感度を調べた。荒い解像度を持つ OGCM では、混合層深さの勾配が弱くなり、CMW がほとんど形成されないために、CMW 領域での水温変動の相殺メカニズムが存在せず、その亜表層の水温変動も、今回用いた比較的細かい解像度を持つ OGCM の水温変動とは異なっていた。このことから、亜表層での水温変動について調べるためには、適切な解像度を持つ OGCM を用いる必要があることを示した。

今まではっきりしていなかった北太平洋のモード水の形成過程が明らかにされたことで、亜熱帯循環の構造や内部の流れの場がより明確になり、さらにモード水の気候変動に対する応答が明らかにされたことによって、より正確な亜表層の水温変動量が議論でき、モード水の気候変動に対する役割が明確にされることが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 竹 内 謙 介

副 査 教 授 久保川 厚

副 査 助教授 谷 本 陽 一

副 査 助教授 須 賀 利 雄 (東北大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Formation Mechanisms and Temperature Variations of Mode Waters in the North Pacific: An Ocean GCM Study

(海洋大循環モデルを用いた北太平洋における
モード水の形成過程と水温変動に関する研究)

海洋中で水温や塩分の鉛直勾配が小さい水塊、つまり同じような性質を持つ海水が亜表層に比較的多くに存在する場合、そのような水塊をモード水と呼ぶ。モード水は海面での変動の情報を海面下に溜め込んだものというようにも見る事ができ、気候変動にも影響を与えていると考えられる。又、力学的には渦位が小さい水塊であり、海洋循環へも影響を与える、と言う意味で重要な存在である。北太平洋亜熱帯循環では西岸境界付近の亜熱帯モード水が古くから知られていたが、北部中央の中央モード水 (Suga 他, 1997)、東部の東部亜熱帯モード水 (Hauntala 他, 1998) 等も知られるようになってきた。

従来、モード水の成因はこれまで冬季の冷却によってできた厚い海面混合層と結びつけて考えられてきた。Kubokawa (1999) はさらに、混合層が単に厚いだけではなく、厚さが空間的に急に変化する (混合層フロント) ことが重要であることを指摘した。しかし、混合層が厚い領域は亜熱帯モード水と中央モード水の周辺には存在するが、東部亜熱帯モード水の付近には存在しないため、東部亜熱帯モード水の成因は不明であった。また、亜熱帯モード水と中央モード水がなぜ分離して存在するのも不明であった。数値モデルでは、ほとんどの場合、両モード水は分離されずに再現されている。

観測データからモード水の成因を研究するのに必要な水温、塩分の 3 次元的な分布は気候値でしか得られないが、気候値では経年変動の影響等で混合層やモード水がなまってしまい、解析が困難である。そこで申請者は北太平洋を対象とし

て海洋大循環モデルにより海洋の状況を再現し、その中でのモード水の形成機構を調べる、と言う方法でこの問題に取り組んだ。モデルは亜熱帯モード水、中央モード水、東部亜熱帯モード水を、最初の2つのモード水が分離はしていないが再現しており、その他混合層の深さの分布等、現実の海洋をある程度良く再現している。

申請者はこの海洋大循環モデルの結果を解析し、まず、東部亜熱帯モード水に関して水平密度勾配が小さいことが重要であることが示した。このモード水の形成域ではもともと海面水温の勾配が小さい上に、強い海面塩分勾配があり、それらの密度勾配への寄与が打ち消し合うことで弱い密度勾配が形成されている。この様な海面水温と海面塩分の分布は亜熱帯循環域東部の高気圧の影響によることが示唆された。また、この観点から他の海洋も調べ、南太平洋には似た機構によるモード水が存在する可能性を示唆し、また他の海洋では可能性が低いことを示している。東部亜熱帯モード水の形成機構は本研究で初めて提唱されたもので、また厚い混合層が介在しなくてもモード水が形成される機構を示したことも注目される。さらに塩分が重要な要素であることを指摘した点も新しい知見である。

亜熱帯モード水と中央モード水の分離に関しては、モデルにおいては両者の分離が再現されていないものの、その形成機構は両者にそれぞれ相当する領域で異なっていることを指摘した。この事はモデルの精度が高くなれば両者が分離する可能性を示唆するものであり、両モード水の形成や分離の原因についての研究に大きな示唆をあたえるものである。

申請者はさらに十年規模の気候変動において、大気の変動に対する海洋の変動を研究した。大気の変動は海洋に主に海面熱フラックスと風応力と言う、二つの方向から海洋に影響を与えるが、申請者はこの二つの効果を分離して解析し、両者ともモード水の形成を通じて海洋に与える影響が大きいこと、両者は逆の反応を引き起こし、お互いに効果を打ち消す方向であることを示した。また、解像度の悪い数値モデルではモード水の形成が弱くなるため、このようなモデルによる気候変動研究では結果が歪められる可能性があることを指摘した。

この様に申請者の研究はモード水の形成機構の研究に新局面を開くものであり、海洋循環や気候変動の研究にも重要な貢献として高く評価されるもので、申請者が研究者として研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学力を有していることを示している。よって審査員一同は申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。