

氏名・(本籍)	須賀としお雄
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博第1210号
学位授与年月日	平成3年3月28日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 地球物理学専攻
学位論文題目	A Study Concerning Subtropical Mode Water in the North Pacific (北太平洋における亜熱帯モード水の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 鳥羽良明      教授 田中正之 教授 近藤純正 助教授 花輪公雄 助教授 川村宏

## 論 文 目 次

### CONTENTS

#### CHAPTER 1. GENERAL INTRODUCTION

1.1. Background

1.2. The Purpose and Organization of this Dissertation

#### CHAPTER 2. THE MIXED-LAYER CLIMATOLOGY IN THE NORTHWESTERN PART OF THE NORTH PACIFIC SUBTROPICAL GYRE AND THE FORMATION AREA OF SUBTROPICAL MODE WATER

2.1. Introduction

2.2. Data

- 2.3. Definition of the Mixed Layer
- 2.4. Seasonal Variations of the Mixed Layer
- 2.5. Wintertime Deep Mixed Layer — STMW Formation Area —
- 2.6. Summary and Remarks

CHAPTER 3. SEASONAL VARIATIONS OF THE SUBSURFACE PYCNOSTAD IN  
THE NORTH PACIFIC SUBTROPICAL GYRE AND THE CIRCULATION OF SUBTROPICAL MODE WATER

- 3.1. Introduction
- 3.2. Data and Methods
- 3.3. The Climatology of the Geostrophic Flow Fields
- 3.4. Seasonal Variations of Pycnostad and the STMW Circulation
- 3.5. Summary and Remarks

CHAPTER 4. SEASONAL AND INTERANNUAL VARIATIONS OF SUBTROPICAL MODE WATER IN THE 137°E SECTION

- 4.1. Introduction
- 4.2. The Data and Analytical Methods
- 4.3. Seasonal Variation of STMW — Ensemble Analysis of STMW Cores —
- 4.4. The Circulation and Dissipation of STMW
- 4.5. Interannual Variations of STMW Cores
- 4.6. Interannual Variations of Properties on an Isopycnal Lying within STMW
- 4.7. Conclusions

CHAPTER 5. SYNOPTIC OBSERVATIONS OF SUBTROPICAL MODE WATER SOUTH OF HONSHU, JAPAN IN THE SPRING OF 1988 AND 1989

- 5.1. Introduction
- 5.2. Data and Methods
- 5.3. Characteristics of STMW South of Honshu in the Spring of 1988 and 1989
- 5.4. Some Observations Related to the Variation of STMW Circulation
- 5.5. Summary

CHAPTER 6. CONCLUSION

ACKNOWLEDGMENTS

REFERENCES

TABLE AND FIGURES

# 論文内容要旨

北太平洋の亜熱帯モード水 (STMW) は、亜熱帯循環系の季節密度躍層と主密度躍層の間に広く分布し、海水特性の鉛直一様性で特徴づけられる水である。STMW は北大西洋におけるそのカウンターパートである18°C水とともに、亜熱帯循環系上層で体積的にモードとなっている主要な水塊として古くから注目されてきた。近年、海洋大循環や大規模な大気海洋相互作用の変動に対する STMW の影響が指摘されるようになり、気候システムの変動を解明する上で、STMW の形成・循環・散逸の過程を十分理解することが極めて重要であると考えられる。本研究は、これまで十分に記述されていなかったこの STMW の形成・循環・散逸の一連の過程について、その長期平均的な抽象を明らかにするとともに、その変動性にも着目して海洋大循環や大気海洋相互作用の変動との関連を考察するものである。主に用いた資料は、日本海洋データセンター (JODC) に蓄積された海洋観測資料と、独自に行った船舶観測による最新の資料である。

第1章では、序論として STMW に関するこれまでの研究をレビューすることで本研究の位置づけを明確にし、その目的を述べた。

第2章では、北太平洋亜熱帯循環系北西部における混合層の気候学を提示することにより、STMW の形成域の特徴を明らかにした。本州南方及び東方の亜熱帯循環系北西縁部は、黒潮が低緯度から熱を運び込み、かつ、冬季に大陸から乾燥した寒気をもたらされるため、大量の熱を大気に放出している。この激しい冷却にともない、混合層が厚く発達して STMW が形成されると考えられている。

JODC に収められている1945年から1987年までの全ての各層観測資料に改めて品質管理を施し、混合層の厚さ、水温、塩分、密度、溶存酸素、見かけの酸素利用度 (現場の水温、塩分における飽和酸素量と溶存酸素量の差、AOU と略す) について緯度2度、経度5度毎、月毎の長期平均場を求めた。海域毎のこの混合層の季節変化から、本州南方及び東方の黒潮のすぐ南で冬季に極めて厚い混合層が発達すること、その海水特性が STMW のそれに一致していることを示した。

この冬季の厚い混合層について、個々の観測点のデータを吟味し、その厚さが黒潮との相対的な位置関係に強く依存することを示した。この関係を考慮し、黒潮からの距離を水温躍層の深さで表すことにより、黒潮からの距離を南北座標に用いて改めて平均場を作成した。これらの解析から、STMW の形成域の典型的な分布域が東経132度から140度の北緯29度以北、東経140度から150度の北緯30度以北、東経150度以東の北緯31度以北であることを示した。その海水特性は東経134度から139度の水温19°C、ポテンシャル密度  $25.0 \text{ kgm}^{-3}$  から東経150度付近の17°C、 $25.3 \text{ kgm}^{-3}$  まで変化していた。また、塩分及び AOU の特徴的な値として、 $34.79-34.86$  及び  $0-0.2 \text{ ml}^{-1}$  を得た。AOU は海水が大気との接触を絶った後、生物活動による酸素消費にともなって増加するので、海水の年齢の指標となる。ここで得られた STMW 形成域の AOU は、

形成時（ゼロ歳）の STMW に対応する値として今後の AOU の利用に際して参照される。

第 3 章では、STMW の分布の季節変動を明らかにし、その循環について議論した。第 2 章で示したように STMW の形成域が亜熱帯循環系のごく限られた海域であるのに対し、その分布域が循環系内の広範な海域にわたっていることから、STMW の大規模な循環が期待される。

まず、第 2 章で用いた資料から、STMW の密度に対応する等密度面に関して地衡流の長期平均場を求めた。黒潮は本州南方で典型的な二つの流路をとることが知られている。本州沿岸に沿った非大蛇行流路と紀伊半島沖・遠州灘沖で大きく南に蛇行する大蛇行流路である。ここでは、この二つの時期に分けて平均場を作成した。非大蛇行期は、黒潮とその南の黒潮逆流とからなる大きな単一の高気圧性の再循環流が本州南方と東方にまたがって存在していること、大蛇行期は、高気圧性の循環が蛇行の峰をはさんで本州南方と東方の二つに分かれていることを示した。この結果と第 2 章による STMW 形成域の分布から、黒潮非大蛇行期には本州東方で形成された STMW が黒潮逆流によって本州南方に移流されるのに対して、大蛇行期にはそのような移流はなくなるか弱まっていると予想される。

この描像を確認するために、上と同様の資料から季節毎の平均断面図を代表的な緯線、経線に沿って作成した。海水の移流と拡散は等密度面に沿って卓越することを踏まえ、各断面図の鉛直座標にはポテンシャル密度を用いた。外力と拡散が無視できるとき流体粒子のもつ渦位は流れに沿って保存する。STMW を形成するような深い混合層は低渦位のソースとなっており、形成域を離れた後はこの低渦位が STMW のトレーサとなる。また、ここで対象とする海域では惑星渦度に対して相対渦度は十分小さいと考えられるので、近似的な渦位を海洋観測資料から計算することができる。本研究でもこの渦位を STMW のトレーサとして採用した。平均断面内で、黒潮非大蛇行期には、低渦位層が形成域から季節の進行とともに黒潮逆流に沿って広がり、また、それにもなって AOU も低下する様子を示し、新たに形成された STMW が黒潮逆流によって移流されていることを裏づけた。一方、大蛇行期には、そのような移流を示す分布はみられず、上記の描像を支持する結果を得た。

STMW の移流経路にあたるいくつかの海域について、上層の体積分布をポテンシャル密度-AOU の階級毎に調べた。そのモードが非大蛇行期には STMW の移流に対応して季節的に変化すること、大蛇行期にはそのような変化はみられないことを示して、平均断面による結果を異なる観点から支持した。また、同様の海域に対して、個々の観測点における渦位や AOU の季節変化を調べ、STMW の移流を確認した。

第 4 章では、本州南方の東経137度に沿う海洋観測定線における STMW を解析した。この観測線は西向きに流れる黒潮逆流を横切っており、本州東方で形成された STMW が移流されてくることが予想される。まず、第 2 章及び第 3 章で得られた STMW の形成・循環の長期平均的描像を確認しつつ精密化した。次にその経年変動を記述し、循環系及び大気海洋相互作用との関係を考察した。この観測は気象庁が冬季（1月）は1967年以降、夏季（6/7月）は1972年以降実施しているもので、長期にわたり観測点が一定であり、また質の揃った資料が得られて

いる。この資料の特徴に着目して、前の二章のように平均場を作るのではなく、STMWの中核水を抽出しその集合の特性を主に扱った。先に述べたように、STMWは低渦位で特徴づけられる。各観測点毎に、渦位の鉛直極小層によってSTMW中核水を定義した。

STMW中核水の解析に先立ち、夏季及び冬季の断面内での水温-AOU階級毎の面積分布を吟味し、そのモードの季節による違いが、北大西洋亜熱帯循環系表層に関して見積られている見かけの酸素利用率(AOUR)と整合していることを示した。これにより、北太平洋のSTMWの年齢評価に際しても同様の値を利用できることを確認した。

STMW中核水及びその海水特性の断面内での分布を詳細に記述し、夏季及び冬季にこの断面に分布するSTMWの主要な部分は直前の冬に本州東方で形成されたものであることを示した。さらに、ある冬に本州東方で形成されたSTMWは、引き続き夏までにはこの断面の北緯26度以北にまでしか現れないが、次の冬までには北緯23度付近にまで現れることを示した。夏季のSTMWは、黒潮と黒潮反流からなる高気圧性循環の内側よりの比較的早い黒潮反流がもたらし、冬季のSTMWは外側よりの比較的遅い流れがより東方からもたらすものと考えられる。夏季(冬季)のSTMWの海水特性の典型的な値は、水温 $17.5-19.1^{\circ}\text{C}$  ( $15.9-17.7^{\circ}\text{C}$ )、塩分 $34.77-34.89$  ( $34.71-34.83$ )、ポテンシャル密度 $24.75-25.35\text{ kgm}^{-3}$  ( $25.05-25.55\text{ kgm}^{-3}$ )であり、第2章に示したSTMW形成域の西(東)よりの特性に対応していて、上記の見方を支持している。夏季(冬季)のSTMWの形成域からの平均移動速度は約 $7\text{ cms}^{-1}$  ( $5\text{ cms}^{-1}$ )と見積られた。また、STMWの散逸に関して、ある年に形成されたSTMWは、概ね2年以内に更新されるか主躍層の水と混合してその個性を失うことが示唆された。

断面内のSTMW中核水の空間分布と海水特性の経年変動を調べた。黒潮大蛇行期には直前の冬に形成されたSTMWの分布域が減少する傾向を示し、大蛇行期には本州東方からのSTMWの顕著な移流がなくなるという第3章の結論を支持した。

また、その塩分に、夏季が先行する長周期の変動があることを示した。これは、夏季の断面に、より新しいSTMWが現れるというこれまでの結論を裏づけるものである。

次に、典型的なSTMWの中心部に対応する等密度面上の渦位及びAOUの経年変動を扱った。黒潮の蛇行にともなってこの渦位が高くなる明瞭な傾向を示し、大蛇行にともないSTMWの顕著な移流がなくなることを明確に支持した。さらに、STMWの形成にとって重要な冬季の冷却の指標として、根室とイルクーツクの海面気圧差で定義されるモンスーン・インデックス(MOI)を採用し、冬季のMOIと渦位及びAOUの同時及びラグ相関を調べた。全期間について、有為な相関がほとんどみられなかったが、これはこの断面内のSTMWの分布が移流過程の変動をも反映しているためと考えられた。そこで、非大蛇行期のみの時系列に対して相関をとり、北緯27度から28度で引き続き夏季の渦位と、また、北緯26度から30度で同じくAOUとそれぞれ有為な相関があることを示した。これは、STMWの形成が冬季の大気海洋相互作用と深く関わっていることを示唆している。

第5章では、本州南方及び南東方におけるSTMWのシノプティックな観測例を示して、こ

れまでに得られた結論を確認し、さらに新たな知見を加えた。STMW の循環系あるいは気候システムにおける役割をより明確に理解するため、我々の研究グループが最近展開している研究船やボランティア船による観測資料を用いた。

1988年及び1989年の春季に行ったCTD（電気伝導度・水温・深度計）、XBT（投棄型水深水温計）及び採水観測の資料から、STMW のシノプティックな分布を示した。黒潮大蛇行期にあっていた1988年は、本州東方にはSTMW が厚く分布しているのに対し、本州南方には顕著なSTMW が分布せず、大蛇行にともなう黒潮逆流の変動によって本州東方から南方へのSTMW の移流が弱まっていること示唆していた。一方、非大蛇行期だった1989年は、本州南方に直前の冬に本州東方で形成されたとみられるSTMW が分布しており、STMW の顕著な移流を示唆していた。気象庁による海況旬報の海面水温場や100 m 深水温場、東京小笠原間のXBT モニタリングの結果等も、二つの年のSTMW の分布の違いが移流過程の変化によることを示唆していた。これらの結果はSTMW の循環についての第3章の結論を支持するものである。

第6章では、本研究の結論をまとめた。冬季の海面冷却にともない、本州東方及び南方の黒潮のすぐ南に厚い混合層が発達し、ここでSTMW が形成される。季節の進行とともに、西／南西向きの黒潮逆流がSTMW を本州東方から本州南方へと $5\sim 7\text{ cm s}^{-1}$ で移流する。黒潮と黒潮逆流からなる高気圧性の再循環流は、黒潮非大蛇行期には本州南方と東方にまたがる単一循環系をなすが、黒潮の大蛇行にともなって本州東方と南方とに分かれる。このため、大蛇行期には本州東方から南方への顕著なSTMW の移流はなくなる。また、ある年に形成されたSTMW は概ね2年以内に更新されるか混合によってその個性を失う。

STMW は冬季の激しい大気海洋相互作用の情報を記憶し、その情報を循環系内に広く伝達する水と捉えることもできる。この情報の伝達が、その後の混合層過程あるいは海洋の循環にどのような影響を与えているかを評価することは、気候システムの変動に対する海洋の寄与を理解する上で重要な位置を占めている。本研究で明らかにしたSTMW の形成・循環・散逸の諸特性は、そのような研究を進めるための基礎を与えるものである。

## 論文審査の結果の要旨

北太平洋亜熱帯循環系の北西部にあたる本州南方及び東方海域は、西岸境界流である黒潮により多量の熱が低緯度から運び込まれ、3次元過程で分布したのち大気に放出される海域である。特に季節風の吹き出しに伴い熱放出の卓越する冬季には、鉛直対流によって深さ300~400 mに達する深い混合層が発達することが知られている。この混合層で形成され、海水特性の鉛直一様性で特徴づけられる、亜熱帯循環系上層の主要な水塊が亜熱帯モード水 (STMW) である。STMW は、形成後循環系内を広く移動・分布すると考えられ、その変動はこの海域の表層から亜表層の貯熱量や密度構造等に、ひいては循環系や気候系に大きな変動をもたらしている可能性が高い。本研究は、これまで限られた資料による部分的な記述しかされてこなかった STMW について、利用可能な既存の海洋観測資料を最大限に活用し、また独自の海洋観測資料をも合わせ用い、その形成から移動・散逸までの長期平均的な全体像を捉えることに成功したものである。

本研究では、日本海洋データセンターに蓄積された1945~1987年の全ての各層観測資料を用いて、力学変量や海水特性に関する月平均、季節平均、年平均の水平分布図や鉛直断面図を多数作成して STMW の3次元的な分布を調べている。その際、対象海域における海洋構造の主要な境界である黒潮の流路の時間的・空間的変動に着目して、黒潮流軸を基準とする座標系を採用する、あるいは、本州南方における黒潮の2つの典型的な流路である大蛇行流路と非大蛇行流路の時期に分けて平均化する、などの手法を適宜用いている。これにより、黒潮の変動を考慮しない従来の平均場から読み取れなかった STMW の特徴を捉えることに成功している。

まず、冬季に STMW を形成する深い混合層とその海水特性の分布を明らかにした。混合層の厚さ・水温以外の特性の分布をこのように広い海域で調べた例は他になく、混合層の気候学として興味深い。次に、STMW のトレーサとしての力学的な保存量である渦位、また、STMW が形成されてからの経過時間の指標としての見かけの酸素利用度 (AOU) を用い、本州東方で形成された STMW が西ないし南西向きに移動し、概ね2年以内に散逸していく様子を明らかにした。また、黒潮非大蛇行期と大蛇行期とで STMW の移動パターンが異なることを示した。この結果は、同時に、これまでに十分に研究されていなかった黒潮-黒潮逆流系、すなわち、亜熱帯再循環に関して、その存在を地衡流場と物質分布から支持し、黒潮の大蛇行に伴うその変動をはじめ資料から示したものである。さらに、これらの知見をもとに、長期にわたる定線観測断面に分布する STMW の時系列解析を行い、STMW の形成の強弱と冬季の大気による海面冷却の強弱との関連を示している。

本研究で明らかにした STMW に関する諸過程は、大気-海洋系の変動に対する STMW の役割を解明する上での重要な基礎であり、気候系の変動に関する今後の観測、理論、数値的研究にひとつの指針を与えるものである。

このように、本論文は、多量の観測資料を海洋物理学的な考察に基づいて解析することによ

り、亜熱帯モード水の形成・移動・散逸の長期平均的な全体像をはじめて明らかにし、同時にその変動と循環系・大気海洋相互作用の変動との関連を明確に指摘したものであり、申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。

よって、須賀利雄提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。