

氏名・(本籍)	いわ 岩	さか 坂	なお 直	と 人
学位の種類	理	学	博	士
学位記番号	理博第	1116	号	
学位授与年月日	平成元年3月24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	Study on Variation of Sea Surface Temperature and Surface Heat Fluxes in the North Pacific (北太平洋における海面水温と 海面熱フラックスの変動に関する研究)			
論文審査委員	(主査) 教授 鳥羽良明			
			教授 田中正之	
			助教授 花輪公雄	
			助教授 川村宏	

## 論 文 目 次

### Contents

#### Chapter 1. General Introduction

- 1.1. Introduction
- 1.2. Scope of the Present Study

#### Chapter 2. Characteristics of Large Scale Sea Surface Temperature Fluctuations in the North Pacific and their Relation to 500 hPa Height over the Northern Hemisphere during 1969-1979

- 2.1. Introduction
- 2.2. Data and Data Processing
- 2.3. Characteristics of the SST Anomaly Field in the North Pacific

2.4.	EOF Analysis of the SST Anomaly
2.5.	Relationships between the Results of EOF Analysis for the SST Anomaly and the 500 hPa Height Anomaly Fluctuation
2.6.	Summary and Discussion
Chapter 3.	Partition of the North Pacific Ocean Based on Similarity in Temporal Variations of the SST Anomaly
3.1.	Introduction
3.2.	Data
3.3.	Analysis Method
3.4.	Results and Discussion
Chapter 4.	Climatology of Surface Heat Fluxes in the North Pacific
4.1.	Introduction
4.2.	A Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS)
4.3.	Bulk Methods
4.4.	Data Processing Procedure
4.5.	Climatology of Surface Fluxes and Surface Meteorological Variables
4.6.	Meridional Heat Transport of the North Pacific
4.7.	Discussion
Appendix to Chapter 4	
Chapter 5.	Characteristics of Surface Fluxes and Sea Surface Temperature Variations in the North Pacific and their Relationship
5.1.	Introduction
5.2.	SST Anomaly Fluctuation —— Supplemental Study ——
5.3.	Net Heat Flux Anomaly Fluctuation in the North Pacific
5.4.	Relationship between the SST Fluctuation and the Ocean Surface Fluxes
5.5.	Conclusion
Chapter 6.	Conclusion
Acknowledgement	
References	
Tables and Figures	

# 論文内容要旨

本研究は、北太平洋における海面水温および海面熱フラックスの大規模変動の特徴とその相互の関係を明かにし、大気海洋結合系の変動・相互作用を理解することを目的としたものである。用いた資料は日本海洋データセンター (JODC) 提供の海面水温資料 (1969年から1979年) と、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) 作成の総合海洋気象データセット (COADS) である。

第1章では、本研究の位置づけと、本論文の全体の構成について記した。

第2章では、JODC 提供の資料から新たに月平均緯度経度 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  平均海面水温データセットを作成し、そのデータセットを用いて北太平洋の海面水温の変動の様子を調べた。対象期間は1969年1月から1979年12月である。また、北半球 500 hPa 高度場資料を用いて、海面水温変動と気圧場の変動との関係についても調べた。

はじめに、海面水温アノマリの変動の一般的特徴を調べた。それらの結果をまとめると次のようになる。海面水温アノマリは、広い範囲にわたってほぼ同時に出現し、東または西に移動あるいは拡大しやがて減衰していく。その変動のスケールは、時間スケールが数カ月および数年、空間スケールが東西3千ないし4千 km、南北1千ないし2千 km である。海面水温アノマリの移動ないし拡大の仕方は一見無秩序であるかのように見える。しかし、海面水温アノマリが亜熱帯循環系に移流されていると解釈できる場合もある。

北太平洋の海面水温アノマリの変動の全体的な構造を調べるため主成分解析を行った。ここで用いた主成分解析法は、時系列の分散共分散行列を用いる方法で、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  データセットから改めて $5^{\circ} \times 10^{\circ}$  格子データセット作成して解析を行った。この章では、有意な主成分として第1主成分と第2主成分を取り上げた。

北太平洋の海面水温アノマリの第1主成分 (寄与率18.2%) は、北太平洋のほぼ全域に広がる同心楕円状の空間パターンを持ち、第2主成分 (13.9%) は、およそ $35^{\circ}$  Nを境として南北に振動する空間パターンを持つ。それらの係数時系列には、数カ月および数年の周期が卓越していた。第1主成分で注目すべき点は、1972/73 El Niño event に相当するピークが係数時系列に表れていないことである。また、第2主成分の時系列では、1971年と1976年、1977年の夏の極めて大きなピークが特徴的である。

北太平洋の海面水温アノマリの変動と大気の全球的な変動との関係を調べるため、各主成分の時系列と500 hPa 高度場アノマリとの相関解析を行った。相関の有意性の検定は、500 hPa 高度場アノマリの変動を1次マルコフ過程と仮定し、モンテカルロ法によって行った。北太平洋の海面水温アノマリの第1主成分の係数時系列と北半球500 hPa 高度場との同時相関解析の結果、PNA テレコネクションパターンを示す相関係数分布が得られた。さらに、両者のラグ相関を行ったところ、500 hPa 高度場アノマリを第1主成分に対して1カ月先行させた場合にはPNAパターンを示すのに対して、第1主成分を500 hPa 高度場に対して1カ月先行させた場合、北太平洋から北米大陸上にかけては、有意なパターンは認められなかった。これらの結果

から、北太平洋の海面水温アノマリの変動は大気のグローバルスケールの変動と密接に結びついており、特に第1主成分で表される変動は大気のPNAパターンを示す変動に起因することが明らかになった。

第2主成分と500 hPa高度場との相関解析では、グローバルスケールの構造を持つ相関パターンは得られなかった。

第3章では、第2章で作成した海面水温データセットを用いて、海面水温アノマリの時間変動の類似性に着目してのクラスター解析を行った。

ここで用いたのはWard法と呼ばれる方法である。この解析によって、海面水温アノマリが類似性を持って変動する海域として、北太平洋の中緯度西部海域 (REGION A) がひとまとまりの海域として抽出できた。この海域は、第2章の主成分解析では単独の主成分として表現できなかったものである。さらに、北太平洋は、4つの主な海域に分けることができた。すなわち、北西海域 (REGION A)、西部熱帯海域 (REGION B)、北太平洋中央海域 (REGION C)、東部境界海域 (REGION D)、である。

各海域の特徴は次のように記述できる。REGION Aは、西岸境界流が存在するとともに、冬季には東アジアモンスーン (季節風) が卓越し、これらが海面水温変動を特徴づけている。REGION Bでは、海面水温変動は極めて穏やかである。しかし、熱帯において海面水温が $27.5^{\circ}\text{C}$ 以上の海域は大気の対流活動の活発な海域と一致することから、この海域の特に低緯度の領域の変動は大気の循環と密接に関係していると考えられる。REGION Cの海面水温アノマリの変動は、PNAテレコネクションパターンの影響を大きく受けている。REGION Dの海面水温アノマリの変動もPNAパターンと高い相関を持つ。また、東岸境界流も影響しているかもしれない。

第4章では、海面フラックスについて、COADSを用いて調べた。海面フラックスは、大気・海洋それぞれに対する境界条件として、それぞれの大循環や構造を規定する。したがって海面フラックスについて調べることは、大気海洋結合系の変動を考える上で重要である。

COADSは、NOAAが作成した、現在、最大の総合的な海上気象データセットであり、1854年から1979年の全海洋の海上気象観測を統一した書式のもとに品質管理を行ってまとめたものである。

解析に用いる海面フラックスデータセットは、COADSのうちの個々の観測をまとめたCMR.5データを用いて、1950年から1979年の北太平洋について作成した。フラックスの計算にはバルク法を用いた。なお、バルク法の問題点などについての議論もこの章で行っている。

解析に用いるデータセットは、月平均 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 平均データセットで、以下の手順で作成した。まず、物理的および統計的基準により不良データを取り除き、各観測値ごとに潜熱・顕熱・風の海面応力・長波放射の各フラックスを計算した。また、日平均雲量等を計算して、その値を用いて日平均日射フラックスを計算した。つぎに、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 平均値を算出した。この $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 平均値に対して補間と平滑化を行い、そののち、 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 平均月平均値を計算

した。以上の手順は、フラックス計算のバルク公式の定義に従い、かつ、データの時空間分布の不均一性が、平均値に及ぼす影響をできるだけ抑えるために採用している。なお、ここで用いたバルク公式は、顕熱・潜熱および風の応力については Kondo (1975)、長波については Clark et al. (1974) である。また、日射については Reed (1977) と Kondo and Miura (1985) の二種類の公式を用いた。

このようにして計算した $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 月平均データセットから、まず、30年平均値を求め、気候値について調べた。

各月の正味熱フラックスの気候値についてみると、10月から2月は北太平洋のほぼ全域で熱放出となっており、特に、日本南岸から日付変更線付近までの中緯度帯（黒潮海域）での熱放出が大きい。4月から9月は、熱獲得期となっている。ここでは、日射を二種類の式で推定しているが、両者の結果は夏季の高緯度とハワイからカリフォルニア半島間の海域で大きく食い違う。年平均気候値では、黒潮海域で熱放出の他は、全域でほぼ熱獲得となっている。

風の応力は、西部北太平洋は東アジア冬季モンスーンによって特徴づけられる。すなわち、秋季から冬季にかけて日本付近では北西風が、また、南シナ海では北東風が卓越するが、夏季にはこれらの海域はごく弱い南風が吹く。高緯度の冬季はアリューシャン低気圧によって特徴づけられる。低緯度では熱帯収束帯が認められる。これは、春から夏にかけて北上し、秋から冬にかけて南下する。北太平洋東部では他の海域に比べて季節変動は小さい。

過去の研究のうち、対象とした期間および使用データがほぼ同じである Hsiung (1985) と比較すると、潜熱フラックスは、黒潮海域を除き、 $20 \text{ W/m}^2$ 程度本研究の方が放出量が少なく、一方、Reed で計算した日射は、Hsiung の日射推定値より  $20 \text{ W/m}^2$ 程度獲得量が多い。この違いは、用いたバルク公式の違いと、Hsiung の場合には気象要素の月平均値からフラックス計算を行っていることによる。

これらの熱フラックスの値から、北太平洋の南北熱輸送量を見積った。それによると、日射を Reed の式で見積った場合は全緯度帯で南向きの輸送となり、その絶対値は過去の同様の研究と比較して最も大きい。一方、日射を Kondo and Miura の式で計算した場合は、北緯20度以北では北向き、以南では南向き輸送となる。北向き輸送は北緯30度で極大値をとる。ただし、熱輸送量の推定誤差は、とくに日射および長波のバルク公式の推定誤差がはつきりしないため、現在のところ定量的な評価を十分に行うことは難しい。しかし、ここで得られた結果および過去の同種の研究の結果は、北太平洋の南北熱輸送量はその輸送方向についても特定することはできないほど小さいことを示している。

第5章では、第4章で作成した海面フラックスのデータセットを用いて、海面フラックスの非季節変動について調べ、さらに海面水温変動との関係についても調べた。海面フラックスの推定値は用いるバルク公式の違いによって値が大きく異なることなどのため、推定値の絶対値について議論するには慎重さを要する。しかし、バルク公式のもたらす誤差がバイアス的に効くことを考慮すれば、熱フラックスの変動については現在使われているバルク公式から計算し

た値を用いてかなり議論できるものと考えられる。

まず、正味熱フラックスのアノマリに対して主成分解析とクラスター解析を行った。解析は、全期間（1950年1月から1979年12月）および冬季（12月から3月）について行った。また、北半球の気圧場との関係を見るため、海面気圧場と500 hPa高度場の資料も用いた。また、第2・第3章の追試の意味もふくめ、海面水温アノマリに対しても同様の解析を行った。

海面水温については、全期間の主成分解析・全期間および冬季のクラスター解析の結果は、第2・第3章の解析結果とほとんど変わらなかった。しかし、冬季の海面水温に対しては、相関行列を用いた主成分解析で、REGION Aの変動に相当すると考えられるモードが第2主成分として抽出された。

正味熱フラックスについては、次のような結果が得られた。主成分解析では全期間を対象とした場合と冬季を対象にした場合とで結果はほとんど変わりが無い。第1主成分は東西振動的な空間パターンを示し、その西側のピークは日本南岸から黒潮続流域付近にある。第2主成分は等値線が北西から南東に傾き、ピークが西・中央・東部に現れる。これらの主成分の時系列と北半球気圧場との相関解析の結果、第1主成分で表される正味熱フラックスの変動は冬季東アジアモンスーンの変動と密接に結び付いている事が明らかになった。また、第2主成分は北太平洋東部の高気圧の変動に伴う風の場の変動と結び付いていることも明らかになった。

低次モードの主成分で表現される冬季の海面水温変動と、海面熱フラックスとの関係について、相関解析によって調べた。その結果、第1主成分で表現される海面水温変動（またはREGION Cの変動）は正味の熱フラックスの変動とはほとんど相関がなく、第1主成分は海洋内での熱の再分配と結び付いていることが示された。さらに風の応力との相関を調べたところ、第1主成分の変動は、風の応力による掻き混ぜの効果だけでなく、風の応力の東西成分によって生じるEkman輸送に伴う海面水温の南北移流と結び付いていることが明らかになった。

海面水温の相関行列主成分解析の第2主成分の変動（または、REGION Aの水温変動）は、主成分の空間パターンのピーク付近の海域には風の応力との相関は認められなかったが、正味熱フラックスとは相関の高い変動を示していた。さらに気圧場との相関解析結果を考慮すると、東アジアから北太平洋西部にかけてのジェットの変動すなわちユーラシア大陸・太平洋間の地表気圧差の変動（すなわち冬季東アジアモンスーンの変動）が、正味熱フラックスの変動と直接的に結び付き、さらにフラックスの変動が第2主成分で表現される海面水温変動を担っているという関係が抽出された。

以上、本研究の結果をまとめると次のようになる。北太平洋における海面水温の非季節変動については、主成分解析やクラスター解析によって、組織化された大規模スケールの変動を抽出することができた。さらに、そのような変動は、大気の大規模スケールの変動と結び付いていることが明らかになった。一方、海面熱フラックスについてみると、そのアノマリ変動の時空間スケールは海面水温のそれより小さく、その変動は大気の変動と直接的に結び付いていることがわかった。

北太平洋の海面水温変動と海面フラックスとの関係については次の結論を得た。北太平洋西部では、大規模スケールの組織化された海面水温変動は正味の海面熱フラックスの変動と結び付いている。それに対して、中央・東部では、大規模な海面水温は風の応力の変動に伴う Ekman 輸送と掻き混ぜの効果による海洋内部での熱の再分配による。

以上のような海面水温変動の海域による違いや海面水温と海面フラックスとの関係の海域による違いは、大気のみならず海洋上層の構造の違いにもよっている。すなわち、北太平洋中央・東部の中緯度では、亜熱帯循環と亜寒帯循環系との境界付近では南北温度傾度が大きい。そのため、この海域で卓越する東西風が海洋表層で南北の Ekman 輸送を引き起こし、それによる温度の南北移流が海面水温にきわめてよく反映される。また、この海域では海洋混合層が西部の続流域などに比べて浅く、風の応力による掻き混ぜの効果も海面水温の変動に寄与する。北太平洋西部の続流域では冬季に深い混合層が形成されるため、海面水温変動には海面での正味の熱フラックスが寄与することになる。さらに、南シナ海では、海洋混合層が薄く、海面熱フラックスの変動が海洋混合層の 1 次元過程を通じて海面水温に反映されやすい。

本研究で示された結果は、大気海洋結合モデルにおける境界条件を与えるものであり、また、海面水温変動についての一連の結果は、モデルにおいて再現されるべき大気と海洋の関係を与えるものである。しかし、本研究で得られた海面水温と大気変動についての関係はどちらかと言えば定性的なものであり、より定量的な議論が今後必要になってくるであろう。

## 論文審査の結果の要旨

大規模な地球環境の変動、すなわち気候変動の仕組みを理解し、その予測の可能性を追求することが、いま大気海洋陸水系の地球物理学の最も重要な課題のひとつとなっている。この気候変動は、大気・海洋・陸面の相互作用系としての気候システムの変動として起っているが、なかでも海洋は、地球表面に占める割合が大きく、大きな質量と熱容量をもって運動する流体であるために、特に数週間より長い時間スケールの気候変動において本質的な働きをしている。

この研究は、大気の運動に対する下端の境界条件となる海面水温、ならびに、大気との直接の相互作用である海面における熱量や運動量の大気海洋間のフラックスの分布とその変動について、北太平洋のほぼ全域を対象として、現存の最も信頼性のある観測データと解析手法を用いて精細な研究を行ったものである。

1985年に公表された米国 NOAA の COADS と呼ばれる世界最大の総合海洋気象データセットから、2千万個のデータを用いて行った労作で、たとえば、フラックスの評価に、月平均値に対してバルク公式をあてはめるのではなく、個々の観測時のフラックスを評価したものから月平均値を求めた点、また永年の平均的な季節変化の気候値だけでなく、30年にわたる時系列としてのデータベースを作成した点などが、特に注目すべき新しい点である。

解析においては、海面水温と海面フラックス分布の変動特性、および、それをもたらす大気海洋相互作用の特徴を、主成分解析とクラスター解析、ならびに海面水温やフラックスと、海面気圧場ならびに 500 hPa 高度場との主成分の相関解析の手法を用いて明らかにしている。すなわち、北太平洋は海面水温の変動の構造の異なるいくつかの海域に分けられることがわかったが、そのうち北太平洋の中部東部では、PNA パターンと呼ばれる大気の大規模な構造の変動が偏西風の変動となり、それが海洋表層のエクマン輸送の変動を通じて中東部の海面水温の変動をもたらすこと、また、日本南東方海域では、黒潮によって運び込まれた多量の熱が大気へ出ていく海域であるため、ジェット気流の蛇行、季節風の変動に伴う海面熱フラックスの変動が直接海面水温の変動をもたらしていること、などが推論された。

また、得られたデータベースの30年間の時系列として表わされた海面水温および海面フラックスの分布とその変動の特性は、将来海洋大気結合大循環数値モデルで再現されるべきものとみなされる。

このように、本論文は最新の観測データセットより大量のデータを用いて、北太平洋の大規模な海面水温および熱フラックス等の分布とその変動の構造を解析し、大規模な大気海洋相互作用の実態について、多くの知見を引き出すことに成功したものであり、申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

よって岩坂直人提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。