

学 位 論 文 題 名

Dynamical Response of Horizontal Temperature Fields in the Mid-latitude Thermocline to the Decadal Variation of Wind Stress Curl

(風系の数十年変動に起因する中緯度温度躍層における水平温度場の力学的応答)

学位論文内容の要旨

中緯度の海洋大循環場は、温度躍層内で熱を極に向けて運び、運ばれた熱を大気へ放出している。中緯度海洋から放出される熱の蓄積は、中緯度大気循環場の東西非対称性をつくり、それゆえ、中緯度における気候の東西分布をつくる。また、海洋は、大気に比べ大きな貯熱量をもつため、十年から数十年の気候変動において、その時間スケールを決めていると考えられている。したがって、中緯度海洋の長期変動の研究は、中緯度の気候変動を理解する上で重要な課題といえる。本研究の目的は、北大西洋の中緯度において1950年代後半から1970年代前半にかけて起きた、十数年の時間スケールをもつ大規模な温度躍層内の温度変動のメカニズムを提案することにある。

北大西洋の中緯度温度躍層で観測された温度変動の水平空間パターンは、亜熱帯循環と亜寒帯循環の両者で、東西に正負逆の温度アノマリをもつ特徴がある。この水平空間パターンを、温度躍層における気候値の水平温度分布と比較した結果、平均場の特徴的な水平温度構造と変動の空間パターンには地理的關係があることがわかった。すなわち、亜熱帯循環では、亜熱帯前線を境に、北西部で顕著に温度が下がり、亜熱帯前線上と南東部では弱いながら温度が上がった。また、亜寒帯循環では、北大西洋海流を境に、西部で温度が上がり、東部で温度が下がった。このことは、温度変動の水平空間パターンは、平均場の水平温度構造に支配されていることを示唆している。一方、北大西洋上のwind stress curlの変動を、気象庁の地上気圧データから地衡風の関係を用いて調べた結果、1950年代後半から1970年代前半にかけて、wind stress curlは北大西洋の亜熱帯循環と亜寒帯循環上で全体的に弱くなったことがわかった。

以上の観測事実から、北大西洋の中緯度温度躍層で観測された十数年の時間スケールをもつ温度変動に対して以下の2つの仮説を立てた。

- 1) 温度変動を起こした主要な原因は、亜熱帯循環と亜寒帯循環上のwind stress curlの弱化であった。
- 2) 東西で正負逆の温度アノマリをもつ水平空間パターンは、wind stress curlの変動の空間パターンではなく海洋自身の応答特性に起因してつくられた。

この仮説に基づいて、wind stress curlの弱化に起因する中緯度温度躍層における水平温度場の力学的応答を、簡単な数値モデルを用いて調べた。数値モデルは、4層で表現されるレベルモデルを用いた。モデル海洋は、北大西洋の亜熱帯循環と亜寒帯循環を理想化した閉じた海洋とした。また、現実を理想化した東西一様な風応力と海表面熱フラックスを、モデル海洋の駆動力とした。数値実験では、場が定常に達した後、東西一様なwind stress curlを突然弱くし、それに対する温度場の応答を20年間調べた。

実験結果は、北大西洋で観測されたものとはほぼ同様の、温度変動の水平空間パター

ンと平均場の水平温度構造の地理的關係を再現した。このことは、北大西洋で観測された温度変動の主要な原因はwind stress curlの弱化であったこと、また、変動の水平空間パターンは海洋の応答特性に起因していたことを示している。

従来の研究は、wind stress curlの変化に対する温度躍層の応答を、温度躍層の鉛直方向のシフトから説明してきた。この力学過程は、ローカルなエクマンポンピングの変化と東岸で励起された長波バロクリニックロスビー波の西方伝搬による線形応答であった。しかし、線形応答では、東西一様なwind stress curlの弱化に起因して、東西で正負逆の温度アノマリが形成されるメカニズムを説明することはできない。本研究では、このメカニズムを、風応力と海表面熱フラックスで維持される中緯度温度躍層の、波動伝搬と移流効果による非線形応答として研究した。

非線形応答のプロセスを力学的に解釈する目的で、新しい解析方法を考案した。この解析方法は、水平温度場の変動を記述する2つの方程式を利用する。これらの方程式は、エクマン層を除く全水深で鉛直方向に積分された温度（以下、 Γ と呼ぶ）と温度躍層内で鉛直方向に積分された温度（以下、 Θ と呼ぶ）の波動伝搬と移流に関する1階非線形変微分方程式という形式をとる。本研究で注目する Θ の変動は、非線形性より Γ の変動に依存しているため、 Θ の変動の理解には Γ の変動も理解する必要がある。これらの方程式に基づいて、モデルの結果から Γ と Θ の移流伝搬経路（以下、特性曲線と呼ぶ）を求め、水平温度場の変動の時空間的特徴を解析した。

その結果、wind stress curlの弱化による、温度躍層における水平温度場の非線形応答に関する以下のメカニズムが明らかになった。

wind stress curlを弱くすると、エクマンポンピングの変化により、ローカルに Γ 場の変化が起こる。同時に、 Γ の特性曲線に沿って、東岸で励起された第1バロクリニックモードの長波ロスビー波が西方伝搬し、 Γ 場は新たな定常状態に達する。 Γ 場の変動は、移流効果によりロスビー波が侵入できない亜寒帯循環西部を除いて、温度躍層の鉛直方向のシフトに基づく線形応答にほぼ等しい。 Γ 場の変動にともない、第1バロクリニックモードの流速場が西岸境界を含む海洋全体で弱化する。

第1バロクリニックモードの流速場変化は、 Θ の特性曲線をローカルに変えるため、亜熱帯循環と亜寒帯循環の温度躍層内に Θ のアノマリを形成する。アノマリは、風応力と海表面熱フラックスで維持される温度躍層に特有な水平温度構造に支配されて、東西で正負逆に形成される。特に顕著なアノマリ形成域は、亜熱帯循環の西岸境界流内と続流域の南部（負のアノマリ）、続流域の北部（正のアノマリ）、亜熱帯前線上（正のアノマリ）、及び、亜寒帯循環の北東領域（負のアノマリ）である。

温度躍層内に形成された Θ のアノマリは、 Θ の特性曲線に沿って移流伝搬する。亜熱帯循環は、 Θ の特性曲線が西岸から延びる西部領域と東岸から延びる東部領域に分けられる。このため、アノマリの移流伝搬は、 Θ の特性曲線に沿って東西のコントラストを強めるよう広がる。一方、亜寒帯循環では、 Θ の特性曲線は西岸からのみ延びるため、アノマリの移流伝搬により東西のコントラストが強められることはない。

温度躍層内の水平温度場の変動には、第1バロクリニックモードの流速場変化による温度アノマリの形成と、形成されたアノマリの移流伝搬のプロセスが重要であることがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 成 誠 一 副 査 教 授 竹 内 謙 介

副 査 助 教 授 日 比 谷 紀 之 副 査 教 授 池 田 元 美

(北海道大学大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Dynamical Response of Horizontal Temperature Fields in the Mid-latitude Thermocline to the Decadal Variation of Wind Stress Curl

(風系の数十年変動に起因する中緯度温度躍層における水平温度場の力学的応答)

近年、Levitus (1989) の海洋データ解析以来、数十年スケールの海洋変動と気候変動の問題が、海洋研究の重要な課題の一つとなってきたが、こうした数十年スケールの海洋変動がどのようにして起こっているかを明らかにした研究はこれまでになかった。Levitus は、1950年代と1970年代の海洋構造の差異が、グローバルな大気変動で引き起こされたものと考えたが、その具体的例証を示すことはしていない。申請者は、大西洋を対象として、大西洋の風場を解析し、風応力の渦度場が、1950年代と1970年代で大きく異なることを見出した。そこで、(1) この風応力の場が、Levitus が示した海洋変動をひき起こしたもの、(2) 海洋温度場変動は、風応力渦度場の空間分布に依存するのではなく、海洋全域の風応力渦度場の全域での弱化（もしくは強化）に対する海洋自身の応答による、という二つの仮説をたてた。この仮説の妥当性を、風と熱で駆動される数値モデルを用い、風応力の場の弱化（もしくは強化）が、観測されたような数十年スケールの海洋構造変動を引き起こすことを実験的に確かめた。いうまでもなく、この数値実験の結果は、北大西洋で観測された水平温度場の変動の主要な特徴を良く再現しており、確かに数十年のタイム・スケールの海洋変動が、大西洋全域の風応力渦度場の弱化（もしくは強化）によって引き起こされることを裏付けている。風場が強化される場合は、変動の空間パターンは、弱化の場合とはほぼ逆の分布になる。次ぎに、申請者は、独自の非線形熱輸送方程式を含む海洋温度場の移流伝播解析モデルを構築し、この解析モデルを数値計算結果に適用することによって、上記の海洋変動が、如何なるメカニズムでもたらされるのかを明らかにするための解析を行った。この解析手法は、申請者独自の工夫によるもので、非線

形熱輸送方程式を含んでいるという点で、従来の線形解析手法とは一線を画すものである。その結果、100-1500m層の水平温度場の数十年スケール変動に特徴的な、東西で異なる空間パターンは、流速場アノマリーに起因する温度場アノマリーが、移流伝播の特性曲線に沿って移流・伝播するという非線形応答の結果であることがわかった。また、十年以上のタイム・スケールの変動場では、その調節過程で、鉛直循環流による変動場の鉛直移流および拡散が重要な役割を果たすことも明らかになった。こうした一連の結果は、グローバルな風応力渦度場の変動に対する中緯度循環系内温度躍層の水平温度場の長期応答として一般化することができ、太平洋にも適応しうる可能性が十分考えられる。以上を要するに、申請者は、地球上の海洋の数十年変動のメカニズムの理解に大いに貢献する新知見を得たものと評価される。よって、申請者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格あるものと認める。