

学 位 論 文 題 名

Interdecadal self-sustained oscillations  
in ocean thermohaline circulation.

（海洋熱塩循環における数十年周期の自励振動）

学位論文内容の要旨

近年、大気や海洋の長期間に渡るデータが得られるようになり、大気海洋系に数十年という長い時間スケールをもった変動があることが発見され、注目されている。これらの変動を引き起こす原因のひとつとして、高緯度で生じる海洋の自励振動が考えられている。この自励振動は、海表面における熱塩の境界条件を mixed boundary conditions と呼ばれる方法で与えたときに、海洋大循環モデルを用いた数値実験において見出されることがわかっている。しかし、これらの振動は非常に複雑な構造を伴っており、そのメカニズムは明らかにされていない。また、各々のモデルによって、振動の形態も違っており、統一的な解釈ができるのかも定かではなく、さらには、何故 mixed boundary conditions のときにだけ起こるのかも明らかにされていない。一方、長期にわたって得られる海洋データは海表面温度だけなので、複雑な構造を持った自励振動が、現実是否存在するのかも明らかにされていない。そこで本研究では、海洋自励振動のメカニズムを明確にすること、そして海洋自励振動が現実の海洋に存在できるかどうかを明らかにすることを目的とし、理論解析、数値実験、データ解析と幅広い方向から海洋自励振動を考察した。

まず、二種類の簡単な解析モデルを用いて、自励振動が起こる必要十分条件を求め、その条件が海表面での熱塩の境界条件にどのように依存するかを調べた。用いた解析モデルの一つは、上層と下層を表す二つの箱で構成される鉛直一次元モデルであり、亜寒帯を代表するものである。もう一つのモデルは、前述のモデルの上層の側方に亜熱帯上層を代表するもう一つの箱を加え、子午面循環の効果を取り入れたモデルである。これらの解析モデルを、restoring, mixed, free boundary conditions という三つの境界条件のもとで解析した。restoring boundary conditions のもとでは、温度、塩分の両

方の海表面フラックスが、海表面での値と境界条件として与えた平衡値との差に比例した形で与えられる。従って、温度、塩分の両方に平衡値へ引き戻そうとする負のフィードバックが働くことになる。この負のフィードバックは温度に関しては、海表面温度が大気の温度に馴染むという現象を考えれば理解できるし、理論的な裏付けもある。しかしながら、塩分についてはそれを支持する理論がないばかりでなく、非現実的なメカニズムが働くことが考えられる。例えば、海表面塩分が平衡塩分より高くなると、負のフィードバックが働き、降水が強制的に引き起こされ、塩分が低くなる。このように非現実的な機構が働くことを避ける一つの方法として、海表面で降水と蒸発の差を直接与える境界条件が使われるようになった。これが mixed boundary conditions である。mixed boundary conditions は、restoring boundary conditions に比べれば、現実の大気海洋系によく対応しているが、欠点もある。例えば、海表面温度が大気の温度よりも高くなり海洋が大気に熱を放出したときには、大気の温度も上がるはずであり、平衡温度が一定である mixed boundary conditions の場合よりも温度にかかるフィードバックが弱いはずである。フィードバックが弱い極端な場合として、海表面の熱フラックス自体を与える free boundary conditions を考えた。現実の大気海洋系は mixed boundary conditions と free boundary conditions の間にあり、しかも mixed boundary conditions に近い状態であると考えられる。従って、この二つの境界条件のもとでの自励振動の振る舞いを調べることによって、現実の大気海洋系で自励振動が存在可能であるかどうか推測できる。解析の結果、どの境界条件のもとでも、ある条件を満たせば自励振動が存在可能であることが示された。restoring boundary conditions のときには、海表面での熱と塩の交換係数が違うことが必要条件となることがわかった。従って、restoring boundary conditions を用いた数値実験で自励振動が起きないのは、境界条件そのものが原因ではなく、熱と塩の交換係数を同じにとっているためである可能性が示された。mixed boundary conditions のときには、鉛直一次元モデルでは、蒸発過剰のときだけ振動可能であり、降水過剰のときに振動するには、もう一方の解析モデルで取り入れた亜熱帯の効果が必要であることが示された。また、free boundary conditions のときには、自励振動が存在可能であるが、そのための必要十分条件はかなり厳しいことが示された。現実の大気海洋系は、mixed boundary conditions と free boundary conditons の間にあり、しかも前者により近い状態にあるので、これらの理論的解析の結果から、海洋自励振動は自然界に存在する可能性が十分にあることが示された。

次に、大循環モデルを用いた数値実験を行い、mixed boundary conditionsのもとで周期 28 年という海洋自励振動を得た。この自励振動は、亜寒帯にその中心を持ち、成層が卓越する状態と鉛直対流混合が卓越する状態が繰り返し現れることによって起きていた。この振動の三次元的な解析および種々の数値実験によって、東岸で維持されている鉛直対流、非常に強い塩分フロント、亜熱帯との熱塩交換、海表面での熱と塩の交換係数の違い (mixed boundary conditions)、亜寒帯循環という五つの要素が自励振動にとって重要であることが示された。

次に、大循環モデルで現れた自励振動を解析モデルによって導かれた理論で説明できるかどうか検討した。まず、大循環モデルの環境条件は、子午面循環の効果を取り入れた解析モデルから導かれた自励振動条件を満たしていた。その環境条件を用いて、解析モデルで振動を再現し、大循環モデルの振動と比較した結果、温度 - 塩分平面上での振動の軌跡が似ていることが示された。これらの結果から、大循環モデルに現れた自励振動は、簡単な解析モデルで基本的に説明できることが示され、自励振動が起こるためには亜熱帯と亜寒帯の熱塩交換が重要であることが明らかにされた。亜熱帯と亜寒帯の熱塩交換が自励振動に取って必要であるという結果は、数値実験による case study の結果とも一致していた。

このように高緯度で成層と鉛直対流を繰り返す自励振動に対応するような現象として、ラブラドル深層水の形成量の変動をあげ、他の研究者らの解析結果をもとに検討した。また、アラスカ湾にある St.P という観測点のデータを用いて、データ解析を行い、自励振動が現実の海洋に存在するかどうか検討した。その結果、密度の鉛直構造の時間変動に対する主成分分析によって、十年より長い時間スケールを持った変動を表すモードが得られた。このモードは、亜表層で成層が強くなったり、弱くなったりをする変動を表しており、自励振動に対応している可能性が示された。

現在までに得られている観測データだけからでは、海洋の自励振動の存在の是非を明らかにすることはできないが、本研究の結果から、数十年の周期を持つ海洋自身が引き起こす自励振動が、現実の海洋にも存在する可能性が十分にあることが示唆される。

# 学位論文審査の要旨

|    |     |        |
|----|-----|--------|
| 主査 | 教授  | 竹内謙介   |
| 副査 | 教授  | 若土正暁   |
| 副査 | 教授  | 久保川 厚  |
| 副査 | 助教授 | 日比谷 紀之 |

## 学位論文題名

### Interdecadal Self-Sustained Oscillations in Ocean Thermohaline Circulation.

(海洋熱塩循環における数十年周期の自励振動)

海洋は風応力とともに、熱や塩分の海面からの入出によって駆動されている。前者はかなり理解が進んでいるのに対し、密度による駆動についてはまだ多くの課題が残る、特に、熱と塩分の違いによって起きる現象については、解明されているものは非常に少ない。この問題に関して、近年話題になっているのが数十年スケールの海洋自励振動である。本研究はこの自励振動のメカニズム、条件を明らかにすることを目的としている。

海洋数値モデルの海面での境界条件として、モデルの海面水温、塩分の値が実測値に近づく様な負帰還として表現される事が多い。しかし、熱の入力に対しては負帰還が働くが、塩分に関しては海面塩分が増加しても降水が増加するような事はなく負帰還は働かない。塩分に関して負帰還型の境界条件を用いることは物理過程を歪めている可能性がある。その為、熱には負帰還型、塩分フラックスは固定して与える混合型と呼ばれる境界条件が最近数年試みられるようになった。

ところが、このような混合型海面境界条件を使用した数値モデルの高緯度域で、十年から数十年の時間スケールの自励振動を起こすものがあることが報告されるようになり、数例に上っている。一方、データ解析から気候にやはりその位の時間スケールの変動があることが次第に明らかになってきて、研究者の関心を集めている。海洋の自励振動も有力なメカニズムの候補として注目を集めてきている。

しかし、これまで数値モデルで示されてきた自励振動は、個々の機構も明快に解明

されておらず、どうして混合型の境界条件でのみ自励振動がおきるか等、統一的な理解にはほど遠い状況であった。その為、実際の海洋でその様な現象が起こり得るのかについての議論は困難であった。

本研究では先ず、高緯度海洋の上層と下層を表す2 Boxモデルの振る舞いを、負帰還型、混合型および熱、塩分とも負帰還を伴わない自由型の海面境界条件の元で調べている。この解析により、どの境界条件の元でも自励振動は可能であるが、混合型の場合、蒸発が過剰で有ることが条件となり、数値モデルで示された、降水が過剰な高緯度域での振動を説明出来ないことが示された。そこで中、低緯度との海水交換を表現するために第3のBoxをつけ加えたモデルの振る舞いが解析された。

この結果、次の事が明らかになった。1) 混合型の境界条件では降水過剰な場合、成層と混合を繰り返す数十年周期の振動が起こり得る。2) 負帰還型では熱と塩分の時定数が異なった場合のみ振動が可能。3) 自由型では振動は起こりにくい。

次に、数値モデルとの対応をより詳しく調べるため、数値モデルによって自励振動を再現している。これまでのモデルに比べ、比較的単純な地形や塩分フラックス分布を用い、より一般的な特性を指向している点に特徴がある。このモデルでは高緯度域に海洋上層に成層が発達する時期と、混合が卓越する時期が交互に現れる周期約28年の自励振動が再現されている。この数値モデルとBoxモデルの比較や、さらに追加されて行われた条件を変えた数値モデルによる実験により、Boxモデルが数値モデルで起きている自励振動の本質を抽出したものであることが示された。

最後に、これらで示された自励振動が実際の海洋で起きている可能性があるかが観測データの解析により調べられた。海面以外の観測は長い期間に亘るものが少なく、確定的な結論を出すには至らなかったが、北大西洋と北太平洋で自励振動と関連する可能性がある現象が示された。

以上本研究は、これまで数値モデルに現れていた自励振動の本質を単純なモデルでエレガントに示したもので、統一的な理解を可能にした点で高い価値が認められる。また、自励振動の条件が明確になり、実際の海洋でも起こり得ることが示されたことも重要な成果である。さらに、中、低緯度との海水交換が自励振動に必須であることを示したこと等、この分野の研究にとっての貢献は小さくない。審査員一同は本研究の価値と申請者の高い研究能力を評価し、申請者が博士の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認定した。