

## 学位論文題名

Convection under polynya: the dynamics and effects  
on dense water formation

(ポリニアにおける対流：その力学と高密度水形成に及ぼす影響)

## 学位論文内容の要旨

海洋深層水は、海洋の中でも限られた海域において大気からの冷却や塩分の付加により高密度を獲得することによって形成される。その形成過程について明らかにすることは、世界海洋の熱塩循環とその変動を明らかにする上で非常に重要である。深層水形成過程の1つにポリニアにおける対流がある。ポリニアとは、海氷で覆われた領域の中に生じる氷のない領域のことである。極域海洋の陸棚域では冬期に風や海流によって氷が沖に運ばれ、しばしばポリニアが生じる。ポリニアでは、海に大気からの強い冷却が加えられ急速に海氷が生成される。結氷時に塩分(ブライン)が排出され海洋表層に加えらるることにより、対流が生じ、高密度の水塊が形成される。

ポリニアにおける対流では、その場所における氷の有無が密度(浮力)フラックスを決定する。そのため海洋表層に水平方向に均一でない上向きの浮力フラックスが加わることになる。また、浮力フラックスの加わる領域の水平スケールは、水深や対流中に生じるプリュームと呼ばれる鉛直流の水平スケールに近いほど小さい場合が有り得る。このような条件下における対流過程は、海洋に一樣な冷却が加わって生じる対流過程と比べると未解明の点が多い。

本研究では、ポリニアにおける対流において、氷のない open water の分布と形成される水塊の密度の関係を明らかにすることを目的とし、力学的に鉛直流を表現できる非静水圧3次元数値モデルを用いた数値実験を行った。ポリニアにおける対流は、浮力フラックス(フォーシング)の加わる領域が制限された対流-孤立した対流の集合として扱い、力学的な知見を得ることを試みた。

まず、理想的な孤立した対流の数値実験を行った。数値モデル内に円盤状の浮力フラックスを加える領域を1つ設置し、外部パラメータである、フォーシングの水平スケール、冷却の強さ、コリオリパラメータを変えて、多数の数値実験を行なった。特にフォーシングの水平スケールが小さい場合の対流過程や形成される水塊の密度に注目した。

室内実験による過去の研究から、孤立した対流過程は、フォーシングの水平スケール( $R$ )とロスビーの変形半径( $R_D$ )の大小によって、1.  $R > R_D$  の場合、傾圧不安定が発生し、高密度水の水柱がばらばらになる、2.  $R < R_D$  の場合、傾圧不安定が発生しない、という2つのレジームに分かれること、また、それぞれのレジームにおいて、密度のスケールの外部パラメータに対する依存性が異なることが知られていた。

本研究において、フォーシングの水平スケールが水深( $H$ )よりも小さい場合( $R < H < R_D$ )は、1. や 2. のレジームにおける対流と異なり、複数のブ

リュームが生じない対流が起きることがわかった。この対流は、初期には下降流が卓越し、その後、弱い上昇流を弱い下降流が取り囲むような構造をとる。また、この対流では密度のスケールは、他のレジームと異なり、フォーシングの水平スケールに依存しないことがわかった。これは鉛直方向の運動方程式における非静水圧成分が大きいことから説明できる。この対流はこれまでの2つのレジームと異なる新たなレジームであるといえる。

また、2. の傾圧的に安定なレジームにおいては、密度のスケールと流速のスケールの外部パラメータに対する依存性が過去の研究で求められたものと異なっていた。また、水柱全体の移動が密度の決定に関して重要な過程であることがわかった。

次に、海氷域を想定して、浮力フラックスの強さと加える領域の総面積を同一とし、分布を変えて領域を配置した実験を行った。その結果、形成される水塊の密度は、open water の下の対流の相互作用の有無で変化し、1. open water 間の距離が近いほど、高密度水が多く形成されること、2. open water 間の距離がある程度大きくなると、形成される水塊の密度分布は、それ以上変化せず同一となる、ことがわかった。

これらの結果から、海氷域で多数の open water がある場合、形成される水塊の密度は、open water の大きさと open water 間の距離の関数として表されることが示唆された。open water の大きさがある閾値より小さく、かつ、open water 間の距離がある閾値よりも大きい場合は、密度分布は大きさや距離に依存せず一定で、それよりも大きさが大きい場合、距離が小さい場合は、高密度の水塊が形成される。これは、ポリニアにおける対流を大循環モデル中でパラメータ化する際には、大気からの冷却の強さや海氷密接度だけではなく、open water に関する上記の情報が必要であることを意味している。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	池田元美
副査	教授	若土正暁
副査	助教授	大島慶一郎
副査	助教授	見延庄士郎 (大学院理学研究科)
副査	助教授	秋友和典 (京都大学大学院理学研究科)

## 学位論文題名

### Convection under polynya: the dynamics and effects on dense water formation

(ポリニアにおける対流：その力学と高密度水形成に及ぼす影響)

海洋深層水は強い冷却にともなう高密度水形成によって作られ、全世界海洋の大部分を占める、気候変動や炭素循環に重要な役割を果たす海水である。高密度水の形成は限られた海域でおきるが、その顕著な例が海水に覆われた海域に開いたポリニアとよばれる海面である。大気による冷却はただちに海水生成をもたらす、それにともなって高塩分水（ブライン）が排出される。海洋上部で高密度となるため強い鉛直対流が起きる。ポリニアにおける対流は水平方向スケールが小さいという、海氷域に特有な性質を持っている。従来、ほとんどの海洋モデルは海洋中の圧力を上部の重力によって表す静水圧近似を用いているが、鉛直対流においてはこの近似が成立しないため、非静水圧モデルを用いる必要がある。一般にこのモデルは計算時間を莫大に要するので、対流現象を解明する多くのケーススタディーを進めることが困難であった。

申請者は本論文において、ポリニア下の対流を表現するために、非静水圧モデル中の円形に限られた海域で密度フラックスを与える設定をし、多くのケーススタディーを行った。鉛直対流の基本構造は、百メートル程度の水平スケールをもち、上下流速の大きなブルームである。ポリニア下の対流現象を密度フラックスの水平スケールによって分類し、大きい方から、傾圧不安定のため水平渦に分裂する領域、傾圧安定だが多くのブルームをもつ領域、ひとつのブルームしか持たない領域に分類した。特に最小の領域は、本論文によって初めて提案されたものである。その発達過程は、高密度となった海洋上部が下降するに伴い、周囲の海水が収束して低気圧性の回転を始めると、それは次第に全水深に広がる。海洋下部のブルーム周囲においてのみ高気圧性回転をもち、時間の経過とともにブルーム全体が水平に移動して密度フラックス域から離れていく。高密度水の密度偏差は、単位面積あたり同一の密度フラックスを与えると、単一ブルーム領域でフラックスの半径によらず、傾圧不安定領域では半径に比例する。両者の中間である傾圧安定多ブルーム領域ではそれらの中間の依存度を持つ。

上記の基本実験に加えて、現実のポリニア域に似せ、多くの円形密度フラックス域を与える実

験も行った。密度フラックス域間の距離がプルームの2倍より小さいと、それらは連続した海域に面積平均したフラックスが加えられるものとして扱える。プルームの2倍よりも十分に離れていると、独立したフラックス域となる。

これらのケーススタディーの結果を説明することを目的に、基礎方程式の各項の大きさに注目した見積もりを行い、それらの間の主要なバランスを、数値解の解析によって確認した。また高密度水の密度偏差を、密度フラックス、海洋深さ、冷却広さ、コリオリ係数に関係つけることに成功した。これらの知見は、鉛直対流をそのまま表現できない静水圧近似モデルや水平解像度の低いモデルにおいて、鉛直対流をパラメータ化することに必須である。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として熱心かつ真摯であり、大学院課程における研鑽は取得単位なども併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。