

学 位 論 文 題 名

A numerical Investigation of Transport Processes of Dense Water Produced in the Polar Continental Shelf Regions

（極域の大陸棚上で生成される高密度水の輸送過程に関する数値的研究）

学位論文内容の要旨

極域の大陸棚上には、沿岸ポリニアと呼ばれる海水密度度が低い領域が存在する。このような領域では、生成された海水が風や海流の影響を受けて効率よく沖側に運ばれるために、海水密度度が低い状態が維持されていることが、知られている。そのために、沿岸ポリニアでは、多くの海水が生成され、同時に大量のブラインが海洋に排出される。そしてこのブライン排出過程によって、極域の大陸棚上では高密度水が生成されると考えられている。このようにして極域の大陸棚上で生成された高密度水は、外洋の中層水および深層水の起源として重要であることが、1980年代より様々な論文の中で指摘されてきた。しかし、この高密度水が、極域の大陸棚上から外洋中層および深層へ、どのような力学機構によって輸送されるのかは、これまで、明らかにされていなかった。

そこで本研究では、極域の大陸棚上で作られた高密度水が、大陸棚上から陸棚斜面域を経て外洋へと輸送される力学機構を明らかにすることを目的としている。特に、海底勾配・水深の変化に注目し、これらの変化が高密度水の輸送過程に与える影響を調べた。また、北極海などでは陸棚斜面上に密度成層が存在するため、高密度水の輸送機構に影響を与えることが考えられる。海底勾配・水深の変化の影響と共に、密度成層が高密度水の輸送過程に与える影響についても、調べた。

この目的を達成するために、研究手法として、数値モデルによる実験を採用した。理想化した沿岸ポリニアを設定した数値実験を行い、その結果を解析した。また、その結果を説明するためのより単純化した解析モデルを調べ、数値実験の結果と比較することで、高密度水の輸送過程を明らかにした。理想化した沿岸ポリニアとして、大陸棚から陸棚斜面へと海底勾配・水深が変化する計算領域を設定し、大陸棚上に塩分フラックスを与えることで高密度水を生成し、その輸送過程を調べた。本研究では、海底地形の変化が高密度水の輸送過程に与える影響に注目しているため、採用する数値モデルとしては、海底地形の変化に対応できる座標系を用いたものを選んだ。また数値実験の結果を説明するための解析モデルでは、斜面上の流れが海底勾配・水深などから受ける影響の一般的特徴を調べ、その結果を数値実験の状況に適応し、その影響を見積った。

数値実験の結果、大陸棚上で生成された高密度水の輸送過程は、2種類の過程に分けられることがわかった。1つは渦の発達による高密度水の輸送、もう一つは海底斜面に沿う沈降流による輸送である。大陸棚上では、渦の発達による輸送が卓越している。一方、陸棚斜面上では、海底斜面に沿う沈降流による輸送が卓越する。そしてその境界には、高密度水と外洋の水塊とを分ける密度前線（シェルフ・ブレイク・フロント）が発達することが示された。

また、塩分保存式の釣り合いを調べ、異なる海底勾配・水深での数値実験の結果を比較することで、これら2つの高密度水の輸送過程の特徴を明らかにした。渦による高密度水の輸送の特徴は、以下のようにまとめられる。渦による輸送の場合、高密度水の沖側への輸送速度は比較的遅く、またその厚さは大陸棚全体にわたっているため、周りの水塊との混合の影響が少ない。その結果、高密度水が沖側へ輸送されるまでに時間を要するが、沖側での密度増加に大きく貢献する。また、このような渦による高密度水の輸送は、海底勾配が急になり水深が深くなるところに生じるシェルフ・ブレイク・フロントまでで抑さえられることが示された。一方、海底斜面に沿う沈降流は、10~20mの厚さを持ち、数10 cm/s の速さで高密度水を沖側へ輸送する。そのため、密度差が大きくなると、陸棚斜面上を沈降する際に、上層の水塊との混合が盛んに行われるようになる。結果として、渦による輸送に比べて、速く高密度水が沖側へ輸送されるが、沖側の密度の増加は上層との混合によって抑さえられることがわかった。

さらに運動量バランスを調べることで、陸棚斜面上の流れが圧力傾度力によるものであることが示された。詳しくは以下のように説明される。渦によって高密度水がシェルフ・ブレイクまで運ばれることで、陸棚斜面上には水平密度勾配が生じ、これにより上層では岸向きの、海底付近では沖向きの圧力傾度力が生じる。この力は、上層ではコリオリ力と、海底付近ではコリオリ力と海底摩擦力の合力と釣り合う。そのため、上層では岸を左に見る方向の流れが、海底付近では岸を右に見る方向の沈降流が発達することが分かった。特に海底付近の沈降流に対しては、海底摩擦力が重要な役割を果たしていることが分かった。

このように、高密度水の輸送過程には、2つの重要な過程があることが示された。そして、それぞれの過程が卓越する領域の境界には、シェルフ・ブレイク・フロントが発達することも、数値実験の結果から分かった。このシェルフ・ブレイク・フロントの発達は、以下のように説明できる。渦により沖側へ輸送された高密度水は、そこに新たな密度・流速場を作る。もしこの密度・流速場が不安定であるならば、さらにそこから渦が発達し、高密度水が沖側へ輸送される。しかし、もし新たに作られた密度・流速場が安定であるならば、そこから不安定は発達せず、渦による高密度水の輸送は抑さえられる。以上のような考えのもと、2層・準地衡流モデルを用いて、陸棚斜面上の流れの安定性を調べた。その結果、陸棚斜面上の流れの一般的特徴として、水深が深くなり海底勾配が急になるほど、流れは安定になることが示された。この結果を数値実験の状況に適用し、安定となる流れの位置を見積った結果、数値実験の結果と良い一致を見た。このことから、大陸棚上での渦による高密度水の輸送は、その輸送自身が作る海底斜面上の密度・流速場が安定となることで、それ以上高密度水が沖側に進むことを妨げることが示された。

以上の結果を踏まえて、高密度水の輸送過程に対する密度成層の効果を調べた。この実験では、初期状態として北極海を代表する密度成層を与えて計算を行った。その結果は、北極海沿岸域での観測結果を良く再現していた。初期状態に密度成層がある効果として、以下に示すようなことが挙げられる。(1) 海底斜面に沿う沈降流は、深さと共に密度差が減少するために、その発達が抑さえられる。(2) シェルフ・ブレイク・フロント上の低気圧性の渦が陸棚斜面上に高密度水を流出させる効果が重要になる。また、この成層効果を取り入れた実験では、外洋中層の水塊が大陸棚の方へ流入する結果も得られた。この外洋からの大陸棚への流入は、シェルフ・ブレイク上での海洋観測でも捉えられている。それは、シェルフ・ブレイク上の低気圧性渦が高密度水を流出させる時に、同時に外洋の水塊を取り込むために起きていることが示された。

以上により、本研究は、極域における大陸棚上で作られた高密度水の大陸棚から陸棚斜面への輸送機構を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 若 土 正 暁

副 査 教 授 金 成 誠 一

副 査 助 教 授 大 島 慶 一 郎

副 査 教 授 池 田 元 美 (地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

A numerical Investigation of Transport Processes of Dense Water Produced in the Polar Continental Shelf Regions

極域の大陸棚上で生成される高密度水の輸送過程に関する数値的研究)

南北両極域をはじめとする高緯度海域は、海水が凍り海水の形成する海として知られている。海水が凍結する際、塩分を全く含まない純水の結晶が析出し、その周囲にはその分だけ塩分濃度を増した海水、即ちブラインが生成する。このブラインのごく一部は、成長していく海水の内部に閉じ込められるが、それ以外のほとんどは海水底面から排出され、高塩分のため下の海水中を流下していき、やがては大陸棚上に高密度水を生成する。ブラインが排出される割合は、海水の生産速度に比例する。

本研究で想定した沿岸ポリニアは、海を広く覆う海水域の内部に厳冬期でも存在し続ける開水面或は疎氷域であり、そこでは非常に効率の良い海水生産がなされている。海水の生産工場とも言うべき沿岸ポリニアでは、当然効率良く大量のブラインが排出されているはずである。この極域沿岸域でブライン排出によって生成される高密度水は、世界の海洋深層水の源であり、海洋大循環の駆動源にもなっている。

極域沿岸域における高密度水の生成とそれの外洋への輸送過程については、古くから多くの海洋学研究者に注目されてはいたが、観測データがほとんど無かった事もあり、研究はそれほど進展していない。近年、海洋観測技術の急速な進歩にともない、極域でも現場観測が少しずつ実施されるようになってきた。しかし、そのほとんどが夏季に限定されたものであるため、冬季に起こる海洋現象の理解には今でも主に理論的研究に頼らざるを得ないのが現状である。

本論文の内容は、極域の大陸棚上で生成される高密度水が、そこからどのような物理過程を経て大陸棚斜面域、さらには外洋へと輸送されていくのかを、現実に即した海底地形を考慮したモデルを用いて理論的に調べ、その力学機構を初めて明らかにしたもので、極域海洋学に新しい知見を加えた特色のある研究である。その成果は、要約すると次のようになる。

まず、大陸棚上で生成する高密度水の外洋への輸送には、場所によって異なる物理過程が介在している事を数値実験によって明らかにした。即ち、大陸棚上では渦の発達による輸送が卓越し、陸棚斜面上では海底斜面に沿う沈降流による輸送が卓越する。また、この両者の境界に顕著な密度前線の発達する事もわかった。

次に、海底斜面勾配や水深を変化させた数値実験を行い、それぞれの輸送過程の特徴を調べた。渦による場合、高密度水の沖側への輸送効率はあまり良くはないが、最終的な沖側での密度増加には大きく貢献する。また、高密度水の輸送は密度前線のところで抑えられ、それより沖側に進出する事は無い。一方、沈降流による場合、沖側への輸送速度は速い(数10cm/s)が、沈降する際の上層水との混合のため、沖側での密度増加は比較的小さい。

さらに、2層・準地衡流モデルを用いて陸棚斜面上の流れの安定性を調べた結果、水深が深く海底斜面勾配が急になるほど、流れは安定になる事がわかった。また、大陸棚上での渦による高密度水の輸送は、この斜面沈降流が安定になることで、それ以上沖側へ進まない事もわかった。この結果は、安定な斜面沈降流の樹立が密度前線の最終的な位置を決めている事を示唆している。

最後に、実際の極域沿岸域で得られた観測結果と比較するために、高密度水の輸送過程における密度成層の効果を調べるための数値実験を行った。密度成層を考慮したこの実験結果は、北極海沿岸域での観測結果を良く再現しており、本質的な点で密度一様な場合と変わらない事も示した。

これを要するに、著者は、大陸棚で生成される高密度水の外洋への輸送過程の新知見を得たものであり、極域沿岸域の海洋力学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。