

学位論文題名

A Study on the Parameterization of the Internal Stress of Sea ice

(海水の内部応力のパラメタリゼーションに関する研究)

学位論文内容の要旨

極域海洋全体にわたって広く見られる海氷は、一般的に大小様々な形状を持った氷板の集合体である。それらの氷板の隙間は、海水面が直接大気にさらされているか、もしくは薄い氷によって覆われている。冬季の北極海などでは、氷板が密に存在する状態が一般的で、その場合氷板同士の隙間は非常に幅の狭い形状を持っており、リードと呼ばれる。各々の氷板は、大気・海洋からの外力を受けて、互いに接触・衝突を繰り返しながら破壊・変形を伴って流動する。この為リードの開閉が起こり、それは熱力学的又力学的に大気-海洋間の相互物理素過程に大きな影響を及ぼしている。

熱力学的には、海面での熱・水蒸気フラックス量は、リードの開閉により大きく左右されている。例えば、熱の鉛直輸送を考えた場合、冬季の北極域などでは面積にして約1%しか占めないリードを通して運ばれる熱が全体の半分以上を占めると積算されている。又冬季におけるリードの開閉はそこでの海氷の生成を通して海水の沈み込を促しその結果海洋の熱塩循環に深くかかわっている。

大きなスケール(10-100km)で力学的にとらえた場合、リードの開閉は氷板の衝突を伴いそれによって生じる氷板同士のコンタクト・フォースによる内部応力を生む働きをする。その結果、此のスケールで海氷の捉えた場合、特に冬季や沿岸部では内部応力の空間的差異による影響が大気・海洋からの影響に拮抗する事が、1970年代よりの観測によって明らかにされている。さらに過去の研究により、リードが閉じる事によって氷板の端やリード内にある薄い氷が変形し、その結果リッジ及びキールが形成され、ここでの変形にともなう単位面積当たりのエネルギーの変化率が、リッジング・キーリングによる海氷位置エネルギーの増加及びその形成にともなう摩擦によるエネルギーの散逸によって、第一義的に説明され、内部応力と歪み速度のテンソル内積を、リードを挟んだ氷板同士が閉じる量及びスライドする量の一次関数と考えられている。しかしながらその定量化に関しては未だに解明されていない部分が多く存在する。そこで、本研究では海氷の内部応力のパラメタリゼーションについて次の4つの項目に整理を行い考察を行った。

(1) 内部応力は過去の研究では非線形の粘性又は塑性として表現されてきたが、特に海氷のように deviatoric と non-deviatoric な部分が結合する場合、一般的な定義及び言語がない為に過去に議論がかみ合わない側面があった。本研究ではまず粘性・塑性流体、粘性係数、降伏曲線、等方性などについて一貫性のある定義を与えた。その結果、内部応力を歪み速度の関数とみなし operator norm を評価する事によって deviatoric と non-deviatoric な部分がカップリングする事により粘性係数が無限大になる様な場合においても粘性係

数を用いずに一貫した議論が行える事を示した。又過去提唱された内部応力のほとんどが、separation of flow and material properties と呼ばれる特徴を有する事を明らかにした。

以上の枠組みの中で、リードの閉じる面積及びスライドする量を歪み速度の強度で無次元化したものを、リッジング関数と定義し、この関数が海氷の変形場、特にその非回転成分に依存すると考えた場合、先のテンソル内積は歪み速度の不変量の関数として表され、ここで海氷力学における内部応力の決定という問題は、リッジングの関数表現を求めるといふ問題と、内部応力の二つの不変量である、シアー内部応力（最大剪断内部応力）とノーマル内部応力（平均圧縮内部応力）と歪み速度の不変量である収束・発散及びシアー（シアー・モーショ）をどの様に対応させるかと、最後にどのように内部応力の強度を表現するかという3つの問題に帰着する事を明らかにした。

(2) リッジング関数をどう表現するかという問題に対し本研究では、海氷が密に存在する場合のリードの開閉及びスライディングを表す為に単純な構造のモデルを作った。その結果、リッジング関数を、海氷の歪み速度の不変量である収束・発散とシアーとリード・パターンにより表現する事が出来、ある一定の広がりを持った海水域でのリードが閉じる面積・スライドする量が、各々のリードごとに計算した量の加重平均として表せた。更に各々のリードについて、リードが閉じる面積・スライドする量は、収束・発散とシアーに線形依存し、それらの係数は氷板の形状及び歪み速度テンソルの主軸に対するリードの向きに依ることが示された。これにより以前から示唆されていた、リッジング関数に対するジオメトリの影響を初めて直接定量化することに成功した。更に、等方的なジオメトリを仮定したシミュレーションを行い、リッジング関数に関して、本研究で求めたモデル値と人工衛星に搭載された合成開口レーダーを使って得られた観測値との比較を行った。その結果、特に海氷の変形において、シアーが収束・発散に卓越している時に、モデル値と観測値が良く一致した。

(3) 次に本研究では、内部応力と歪速度が1対1に対応するという条件に注目してシアー・ノーマル内部応力と収束・発散とシアーとの対応という問題を考察した。まず変形にともなう海氷の単位面積当たりのエネルギー変化率に関する仮説により、シアー内部応力とノーマル内部応力の関係を、リッジング関数、収束・発散とシアーの比率、内部応力と歪み速度の方向性のずれを表す角度によって表現した。ここでリッジング関数を与えた時、導かれた関係式は内部応力平面上において、一定の許される閉じた領域に対応した。次に、内部応力と歪み速度が1対1に対応するという条件は、この領域の境界線上でのみ満たされるということを示した。又この関係式によって定義される境界線上の点は全て、その各々のノーマル内部応力にたいしてシアー内部応力を最少にする条件を満たしていることも示した。即ち、内部応力と歪み速度が1対1に対応するという条件と、ノーマル内部応力にたいして、シアー内部応力が最小になるように、収束・発散とシアーの比率を求めるといふことが等しいことを証明した。又シアー内部応力とシアーの方向性の一致が、シアー内部応力を最小にする必要条件として導かれた。これにより、separation of flow and material properties の枠組みの中において、人工衛星等を使った観測により求めたリッジング関数より、直接内部応力の流れの場に対する依存性を求める手法を示した。

(4) 内部応力の強度についての関数表現に関する問題では、単に違った関数表現を与えた数値実験の結果によって全体を理解しようとした過去の研究手法に対し、ここではまず特定の関数表現に依らない分析手法を確立し、それを基に実際の漂流ブイの観測データを用いて内部応力の役割について解析を行った。その結果モーメントバランスにおいてシアー・ノーマル内部応力が及ぼす影響、シアーの方向性が及ぼす影響、変形場の影響、内部応力の強度が及ぼす影響に分けて評価できることを示した。この事により内部応力の強度の関数表現を求める為に、将来どの様な観測を行えば良いかを明らか

にした。

以上の研究により、現在ある海水モデルの限界及び問題点が明らかになり、又それらを改善するための観測を含めた手法、更に将来メソスケールで季節海水域もしくは氷縁海水域における力学・熱力学過程をモデル化するための手法について知見を得た。

学位論文審査の要旨

主査	教授	若土正暁
副査	教授	松野太郎
副査	教授	池田元美
副査	教授	本堂武夫
副査	助教授	大島慶一郎
副査	教授	山形俊男 (東京大学理学研究科)

学位論文題名

A Study on the Parameterization of the Internal Stress of Sea ice

(海水の内部応力のパラメタリゼーションに関する研究)

海氷は、主に風と海流からエネルギーを受けて運動する。例えば、オホーツク海や南極海の海水域のように、開水面が数多く存在し、そのため各氷盤が自由に動けるような、氷密接度の比較的小さい場での海水の運動は、ほとんど風と海流に依存している。ところが、北極海の冬季の海水域のように、氷密接度が90%以上もあり、しかもまわりを陸地で取り囲まれた地理的環境下にある海氷は、大気や海洋からの外力を受けても自由に動き回ることができず、氷盤どうしの接触・衝突を絶えず繰り返しながら破壊や変形を伴いつつ流動している。そのため、北極海の海水域では、リード（水路）の開閉やリッジング（氷丘脈化）などの力学現象がいたるところで起こっている。従って、このような海水域の運動を理解するためには、風と海流の他に、上で述べた氷盤どうしの接触・衝突などの相互作用に起因する「内部応力」を考慮する必要があることは古くから指摘されていた。

しかし、この「内部応力」を現場で直接測定することは実際上不可能に近く、そのため従来は、それを運動方程式における他の測定可能な項を除いた残差項としてとらえ、その量を評価してきた。その評価した値から、特に北極海のような海水域の運動に、「内部応力」が果している役割は小さくはなく、決して無視できる量でないことが分かった。1970年代に、AIDJEX (Arctic Ice Dynamics Joint Experiment) という、北極海氷の力学に関する大規模な国際共同観測が数年間にわたって実施された。その観測の成果に基づいて構築された海水力学モデルの中で、この内部応力の概念がはじめて導入された。その海水モデルは、特に内部応力についてまだ検討すべき問題点が少なからずある

にもかかわらず、ほとんど改良されないまま、今まで海氷や気候に関する研究者達に広く使用されてきた。

本研究は、その海氷の内部応力のパラメタリゼーションについて理論的に明らかにしたものである。この研究の成果を要約すると以下のようなになる。まず、粘性・塑性流体、粘性係数、降伏曲線、等方性などについて一貫性のある定義を与え、その枠組みの中で、リッジの関数表現問題、内部応力と歪み速度の不変量との対応問題、内部応力の強度をどのように表現するかという問題、の三つの問題を明らかにした。

それら三つの問題のうち、最初のリッジ関数をどう表現するかという問題については、海氷の歪み速度の不変量である収束・発散とシアーとリード・パターンを基に、単純な構造のモデルを開発した。そのモデルを用いた数値実験の結果を、人工衛星に搭載された合成開口レーダから取得された観測値と比較・検証を行ったところ、良い一致が得られた。

次に、内部応力と歪み速度との対応問題について、両者が1対1に対応するための条件は、ノーマル内部応力に対するシアー内部応力が最小になるように、収束・発散とシアーの比率を求めることに等しいことを証明した。同時に、シアー内部応力を最小にする必要条件が、シアーとの方向性の一致にあることも明らかにした。

最後に、内部応力の強度をどのように表現するかという問題では、まず特定の関数表現によらない解析手法を確立し、それを基に北極海における漂流ブイの観測データを用いて内部応力の役割についての解析を行った。その結果、運動量保存にシアー・ノーマル内部応力、シアーの方向性、変形場、内部応力の強度などが及ぼす影響について、それぞれについての評価が可能なことを示した。また、内部応力の強度の関数表現を求めるために、今後実施すべき観測内容の提案を行った。

本研究は、以上のように内部応力について深く考察し、その物理的意味を具体的に示し、さらに現存する海氷モデルの限界や問題点などを明らかにすることにより、それらを改善するための観測を含めた研究手法を提示した。これらは、今後の海氷・気候研究の進展への大きな貢献として高く評価される。

以上の結果は、申請者が研究者として研究活動を行うために必要な高度な研究能力と学力を有していることを示している。よって審査員一同は申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。