

審査の結果の要旨

氏名 佐川 玄輝

海洋の約1割が、凍る海である。海氷はその表面特性により太陽光の殆どを反射し、海氷が無い状態に比べて1桁程、太陽からの熱吸収が小さくなる。従って、気温が下がり海氷ができると、海氷の効果により更に気温を下げ海氷が広がる。逆に気温が上がると海氷は加速度的に少なくなり更に気温が上がる。この正のフィードバック効果は、地球温暖化の他、気候変動に大きく関わる重要な問題である。また、海氷の下にできる冷たく重い水は海洋の鉛直循環を引き起こし、豊かな海洋生態系の源となる他、数千年かけて地球を巡る海洋大循環の駆動力となっている。すなわち、海氷は地球温暖化問題を始めとする気候・海洋変動問題の重要なキーの一つになっている。

海氷は、大きさ形状とも様々な無数の氷盤で構成されているが、従来、数値計算で地球規模の海氷変動を扱う場合、海氷域全体を一つの連続体として定式化することにより取り扱われてきた。中でも、1980年頃に Hibler が考案した粘塑性モデルが、広く用いられている。一方、例えば上記の様な大気・海氷・海洋間の熱収支プロセスを考えると、海氷域中に開いた狭小な開水面が極めて重要な役割を果たすことは明らかであり、高解像度計算の必要性が認識されている。また、生態系への影響プロセスの表現、氷海域での船舶や構造物への影響などの問題には、高解像度計算が不可欠である。しかし、粘塑性モデルは海氷域を大雑把に一つの特性を持つ連続体で表した物であり、高解像度計算には限界がある。本論文は、高解像度の大気・海洋・海氷計算に向けて、氷盤の衝突物理というミクروسケールの現象を丹念に追求し、その定式化に成功したものである。また、そのモデル式をオホーツク海の海氷変動計算に適用し、その実用性も確認している。以下、本論文の構成と内容を示す。

第1章は序論であり、海氷変動計算の重要性を指摘すると共に海氷の力学的モデリングの歴史と現状を概説し、氷盤衝突を考慮した海氷力学モデルの必要性を述べている。

第2章「海氷力学の数値モデル」では、海氷変動を数値計算する際に用いられる既存の力学的モデルについて、その特質に注目しながら解説している。海氷の既存力学モデルは前述の連続体モデルと、氷盤個々を追跡する個別要素モデルに大別される。連続体モデルで最も使われているのが粘塑性モデルであり、本論文では、その構成式の物理的意味を詳しく考察している。また、粘塑性モデルを並列計算用に改修した弾粘塑性モデルを紹介している。最後に、個別要素モデルについて解説している。

第3章「氷盤群を要素とする海氷モデルの開発」では、氷盤衝突によるレオロジーが粘塑性モデルでは表現し得ないものであることを説明した後、Rheem らによって提案された DMDF モデルを大幅に改良している。DMDF モデルは、計算格子内に形状・大きさとも均質な氷盤を規則的に分布させ、計算格子間の氷群の衝突の際の運動量保存則により、海氷のレオロジーを表現するモデルである。本論文では、この特徴を保ったまま、氷盤衝突物理と氷盤密接時の応力伝達を詳しく考察し、DMDF モデルをより理論的に頑健で、計算のフレキシビリティのあるものに改良している。そして、こうして導き出し

た理論式を、個別要素モデル計算結果との比較や、単純領域計算により、検証している。

第4章「氷盤衝突を考慮した連続体海氷モデルの開発」では、上記とは異なるアプローチにて別の海氷モデルを考案している。上記のモデルは、氷盤の衝突物理を氷群という仮定の下で正しくかつ精密にモデル化したものであるが、そのため、氷盤が密になると氷圧が無限大に発散する。上記のモデルでは、疑似弾性を取り入れることによりそれを解決している。また、基本的に計算格子線に垂直方向の氷盤衝突を定式化しているため、氷圧が空間的に直線的に伝わる傾向があるという欠点もあった。そこで、これまで実績のある粘塑性モデルに対し、氷が密でない時には衝突物理に基づくレオロジーを取り入れるという手法を考案している。そのため、第3章で得た定式化をベースに粘塑性モデルとの親和性を考慮した新たな定式化を行い、2つのモデルの接合パラメータを見いだしている。

第5章「海氷数値計算モデル」は、海氷・海洋連成計算を行うのに必要な他のモデル、すなわち、海洋モデル、海氷熱力学モデル、及びモデルに使用する物理パラメータについて説明している。

第6章「オホーツク海計算に用いるデータ」では、第7章で行う計算に必要なデータを紹介している。与えるデータは気候値もしくはそれに相当するデータであるため、平年値に相当する計算結果が得られる。

第7章「オホーツク海における海氷シミュレーション」では、第3、4章で開発した二つの海氷モデルを用いた計算をして、結果を種々考察している。まず、第3章のモデルを用いて、オホーツク海全域の海氷・海洋結合計算を行っている(7.1節)。計算は海氷の全く無い秋から始め、海氷が全て融解する春まで、1シーズンの中期計算を実施している。その結果、海氷分布、海氷総面積の時間変化とも、観測結果と良く一致することを示している。

第7章の第2部(7.2節)は、第4章のモデルを用いた計算である。ここでは、高解像度計算を意識して、緯度経度で1/12度の解像度で計算を行っている。海洋計算は計算負荷が大きいので、第6章で示した海流データを与え、海氷単体の計算をしている。氷盤衝突応力の大きさを決めるパラメータを変えた計算を行い、その結果を比較した。その結果、氷盤衝突物理の影響を大きくすると、低密接度域における密接度が増え、代わりに高密接度域における密接度が減るという興味深い計算結果が得られた。これにより、将来の高解像度計算に供し得る海氷力学モデルが開発できたと言える。

第8章は「まとめ」であり、本研究の結論を総括し、本研究で開発したモデルの将来性について論じている。

以上要するに、本論文は、気候変動に対して重要な役割を果たし、また、寒冷域資源開発・輸送および水産・観光などの経済活動に重大な影響を持つ海氷の変動予測計算の研究分野において、氷盤の衝突物理を考慮した新たな海氷モデルを考案し、実際にオホーツク海にそれを適用して実用性を確かめると共に、来るべき高解像度計算への道のりを示したもので、海洋工学、環境学、海洋学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は、博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。