

## 論文の内容の要旨

論文題目： 氷盤衝突を考慮した海水力学モデルの開発と  
それを用いたオホーツク海の海水変動数値計算

氏名： 佐川 玄輝

海氷は地球表面の 10%弱を占め、地球の現在の気候を形成、維持している重要な要素である。また、海氷生成に伴う高密度水の形成は海洋大循環の駆動力でもあるため、全球海洋の物質循環へも大きく寄与している。現在進行している地球温暖化によってそのような重要な役割を持つ海氷が著しく減少を続けており、影響が懸念されている。

また海氷は工業面、産業面でも重要な意味を持つ。例えば日本にとって最も身近な凍る海であるオホーツク海においては、サハリン島北部沿岸で石油と天然ガスの開発プロジェクトが進んでおり、また北海道沿岸では漁業が盛んに行われている。これらにとって冬に張り出す海氷は大きなリスクとなる。一方で、北海道沿岸に押し寄せる海氷は付近の貴重な観光資源にもなっている。

気候変動に伴って海氷変動が将来的にどのようなようになるかを知るため、あるいはより短期的な海氷変動を予測するためにも、数値シミュレーションが有効である。海氷の数値シミュレーションモデルには熱的な成長・融解を解く熱力学モデルと、海氷の流動や圧縮変形などを解く力学モデルの 2 つが含まれ、その両方が重要である。

本研究ではそのうちの海水力学モデルに注目し、既存の海氷モデル、いわゆる連続体的海氷モデルではあまり考慮されていない氷盤衝突物理を取り入れた新しい海氷モデルの開発を行った。モデルの開発過程においていくつかの性能評価計算を行った後に、オホーツク海における海氷変動数値計算を行った。その計算結果を観測との比較によって評価した。また本研究で導入した氷盤衝突物理を海水力学モデルで考慮することによる計算結果の違いの考察から、海氷変動に対して氷盤衝突物理がどのような影響を及ぼしているかを調べた。

本研究では、2 つの海水力学モデルを開発した。1 つは Rheem et al.(1997)により開発された海氷モデル(Distributed Mass / Discrete Floe モデル)をベースに改良を加えたものである。このモデルは、海氷を氷盤の集合体と捉えて、その内部応力を氷盤群同士の衝突相互作用として求めるような定式化を行っている。これは離散的要素の集合体という現実海氷の姿に忠実な視点に立って海水力学を解くことを目的としたモデルであり、最近では短期の海氷数値予報などの研究に用いられている。しかしその一方で、全ての力学を氷盤衝

突という物理のみで求めようとしているために、海氷が密接になって衝突氷盤群としての扱いきれなくなるときの困難が生じる。筆者はこのような問題点を指摘した上で、この問題を、海氷が密集するときに起きている、氷盤衝突による内部応力モードから連続体的な応力モードへの変化を考慮していないことによるものであるとして、海氷密接時における連続体的な扱いを加えたモデルを開発した。連続体的海氷のモデルとして、海氷力学に必須とされる塑性体に、数値安定性を目的とした擬似的弾性を加えた弾塑性的なモデルを導入した。構築したモデルの検証計算として、海氷が一様風によって圧縮されるという状況を想定したシミュレーションを行い、海氷圧力場変動を調べたところ、擬似的弾性の効果による弾性波が密接海氷中を伝播し、それによって圧力は振動を起こしながらも減衰して、やがて平衡圧力場に収束するという様子が確認された。このような力学場の振動は現実的なものではなく、数値計算を陽解かつ安定に進めるためにのみ必要なものであるが、弾性パラメータを調整することで場が準定常化するまでの時間は短縮できるので、目的が要求する時間スケールに応じ適切なパラメータを選び、定常的な解を得ることが可能である。

しかし、このモデルでは力学相互作用の定式化を 1 次元的に行っていて、真に 2 次元の海氷力学を解いてはいないという問題があり、その影響が 2 次元圧力場などに見られた。そのため、2 つめのモデルとして、真に 2 次元のレオロジー(応力と歪速度の関係式)を解く連続体的海氷モデルをベースにして、それに氷盤衝突のレオロジーを導入するための手法を考え、導入した。氷盤衝突のレオロジー式形状として、1 つ目のモデル開発時に導出した氷盤群衝突相互作用の理論式の特性を再評価して、連続体モデルとの結合に適した表現を考案した。この理論式については、離散要素シミュレーションの計算結果との比較によってその妥当性が検証されていて、それによる内部応力は歪速度について非線形の関数となっている。完成した新しいレオロジーモデルは、海氷密接時には粘塑性体として振る舞い、海氷が密接で無くなって離散性が強まったときに衝突氷盤群として振舞うように設計されている。

開発した 2 つのモデルを、オホーツク海における海氷変動数値計算に適用した。まず 1 つめのモデルと 3 次元静力学海洋モデル(MEC モデル)を合わせた結合モデルによる 1 海氷期のシミュレーションを行った。その結果、北部で海氷が生成され、分布が拡大して 2 月には南端の北海道沿岸まで達し、やがて後退して北部で消滅するという 1 海氷期の海氷域変動サイクルを再現でき、この様子は衛星観測とも良く一致した。特に海氷域拡大期の再現性が高いことが確認された。海氷総面積の時間変化(図 1)も衛星観測による平均値に近い結果が得られた。また熱力学作用と力学作用を経て形成される海氷厚さ分布についても、観測の知見と矛盾しない現実的な結果が得られた。

次に、2つめに開発したモデルを用いて、氷盤衝突物理の影響について調べた。そのために、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(図2)。その比較の結果、氷盤衝突物理の影響は北海道沿岸からクリル海盆付近に広く分布する、低密接度の海氷域に顕著に見られることを見出した。この低密接度域とそれに隣接する高密接度域において氷盤衝突パラメータ変化の影響が現れ、氷盤衝突応力を比較的大きく取ったときには、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ように、低密接度域から高密接度域への密接度勾配が緩やかになる傾向が見られた。これは、従来のレオロジーモデルでは塑性時の応力に比べて無視できるほど小さいとしてきた氷盤衝突応力を重視することで、低密接度の海氷が高密接度の海氷に容易に取り込まれにくくなったことを意味する。また、計算では、図2の片方の計算で見られていた(図中Aの★で示す)高密接度海氷の氷舌(ice tongue)ともいえるような特徴的な形状が、氷盤衝突の影響度合いを強めたときには拡散して生じなくなるという顕著な違いも見られた。実際に氷盤衝突強度としてどの程度の値を用いればよいかは今後の検討課題であるが、本研究の成果により、氷盤衝突という従来あまり考慮されてこなかった物理を含めることで、氷縁や低密接度海氷域を中心とする海域での計算精度向上を図れる可能性が示された。

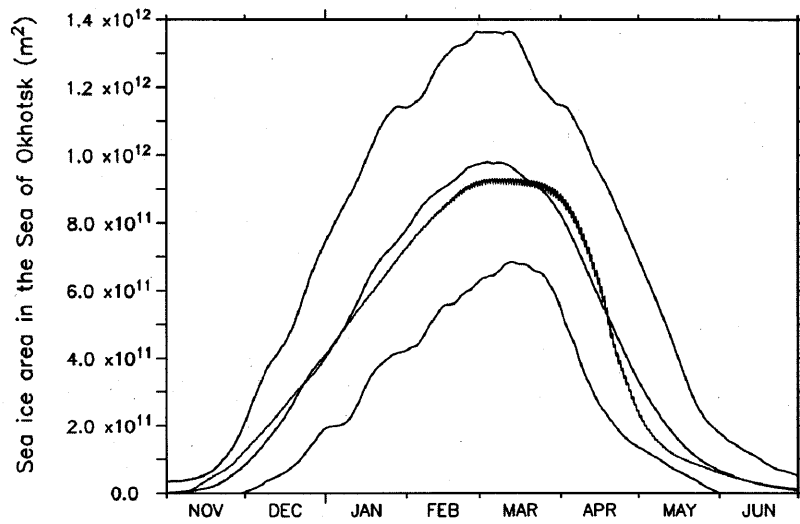


図1. 海洋-海氷結合計算により得られた、オホーツク海海氷面積の季節変化。赤線が計算結果、黒線が衛星観測による平年値、最小値、最大値。

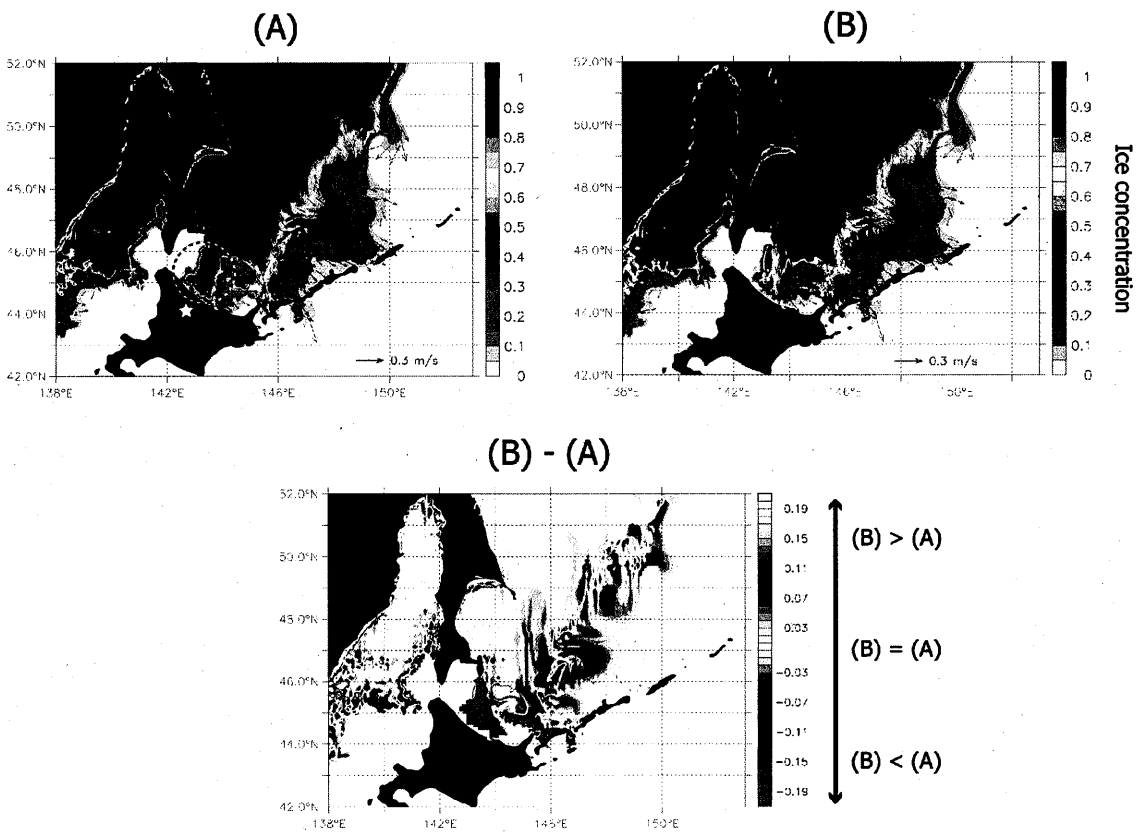


図2. 海氷単体計算において、氷盤衝突レオロジーの強度パラメータを変えて行った2種類の計算(A), (B)による計算開始後約75日後(3月1日)の海氷密接度と、その差分(B)-(A)。