

論文の内容の要旨

論文題目 オホーツク海における海水分布予測システムの研究

氏名 松沢 孝俊

日本近海で唯一海氷が発生するオホーツク海は漁業資源やエネルギー資源の宝庫であるが、同時に流氷による事故の危険性が存在する。そのため海氷の変動を正しく予測することは、氷海域沿岸の生活にとって重要なことである。

海氷の変動を予測するためには近年では専ら数値計算を行う。海氷の発生・成長・移動・融解を予測するためには、海氷の力学的運動、熱塩循環を含む海洋変動、大気の変動、そして海洋表層での熱交換による海氷量変化のそれぞれを同時に扱う必要があり、その手法は研究段階である。特に工学的に意味を持つ海氷の力学的な挙動を広範囲について計算するためには、従来用いられている連続体モデルでは物理モデルとして不十分であり、個別要素モデルでは計算コストが過大で実用的ではない。

本研究では、オホーツク海程度のスケールでの海氷変動予測を行うために、海氷運動の力学的数値モデルとして DMDF モデルを採用し、それに対し熱塩循環を表現できる 3次元海洋モデル、および海水と海氷に対する熱交換モデルを連成し、オホーツク海における海氷の初生時期である 11 月から数値計算を試みた。DMDF モデルを用いて海氷の変動と海洋の変動を同時に扱う研究は今までに複数が存在するが、本研究では氷盤のラフティング現象および海水からの海氷の発生等を考慮しつつ、実際の海域について長期間の計算を行うとともに、数値モデ

ルを評価する。

本研究で使用した DMDF モデルは、1994 年に Rheem らによって開発された力学的な海氷運動の数値モデルであり、ひとつの計算格子内に規則的な氷盤の分布(氷群と呼ぶ)を仮定して、それらの運動と変形の時間発展を準ラグランジュ法によって解くものである(図 1)。この手法の特長としては、氷盤およびその集合の運動量が陽的に計算されるため、連続体モデルに比べて海氷の物理的な挙動がより正しく表現されることと、それにも関わらず広範囲に渡る計算を短時間に行うことができる点が挙げられる。本研究ではこれにラフティング現象の考慮を加え、実海域の長期間計算に対応するよう改良した。ラフティング現象とは、氷盤同士が高い圧力で互いに押し付けられる場合等に一方が他方の上に乗上げて重なる現象で、特に若い(薄い)氷の存在期に多く見られ、面積の減少・厚さの増加・圧力の解放が行われるため海氷分布に少なからず影響を及ぼしていると言われる。従って、初生期を含む長期間の再現計算を行う場合には、この現象の考慮が重要であると考えられる。

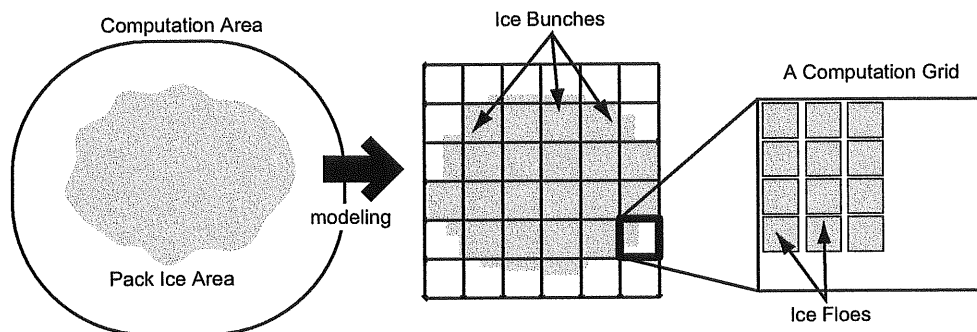


図 1: DMDF モデルにおける海氷のモデル化。ひとつの計算格子にひとつの氷群(Bunch)が定義され、氷群中は規則正しく分布した多数の氷盤で構成される。

海洋変動のモデルとしては、3次元静水圧近似プリミティブ方程式による数値モデルを作成して使用した。変数は3次元流速、海水温度、塩分濃度であり、渦動粘性係数および渦動拡散係数については Bryan and Lewis(1979)による定式化を採用した。また海水密度を海水温度と塩分濃度および静水圧の関数として計算し、密度不安定の場合は鉛直方向に強制対流が生じるという手法を採った。

熱力学的過程については、海水表面に入射する長・短波長放射、顕熱熱伝達、潜熱放出、自然輻射(射出)を考え、それぞれバルク式で計算し総入射量を求める。海水温度が結氷点を下回る場合には、負の余剰熱量が海氷の生成に変換される。

海氷については上面に入射する熱量を海氷と同様バルク式で求め、海氷上面の温度と下面温度(結氷点に等しい)との関係で厚さが増減するとする。面積の変化は周囲の海水温度による。但しこの数値モデルでは雲量と降雪の影響は非考慮で

ある。

数値計算に用いたデータとしては、気圧、風向・風速、気温、湿数について気象庁アジア域客観解析、初期海水温度および塩分濃度分布について World Ocean Atlas 98 を用いた。計算結果の検証などに用いる海水密接度は DMSP F11 SSM/I センサデータを用いた。本研究においては大気の変動は上記気象データより直接与えることとした。

本研究でははじめに、海水の状態から海氷が発生する過程を再現するために、11月から12月にかけての海氷の初生時期について、海洋変動と海氷の熱力学的変化のみを考慮した数値計算を行った。その結果、海氷の初生と分布はよく再現されたが、計算海水量は SSM/I データと比べて少ない傾向にあった。そこで熱力学的なパラメータを合理的に調整することで計算海水量を調節した計算を行い、それらが有効であることを示した。(図 2)

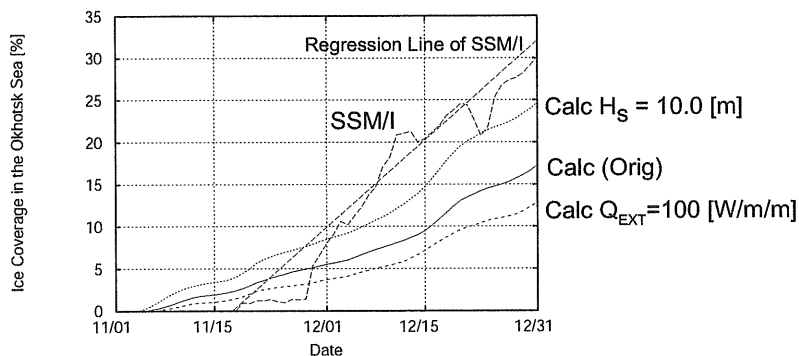
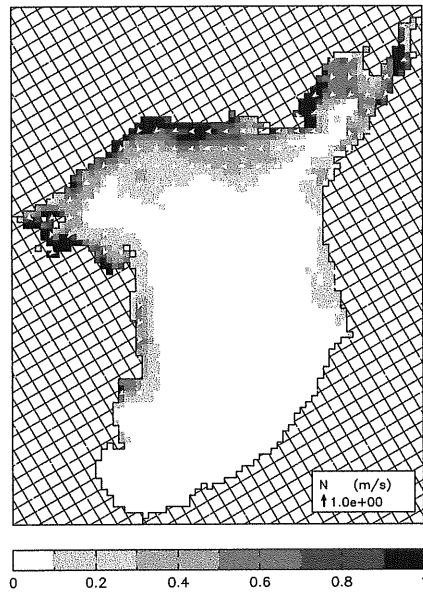


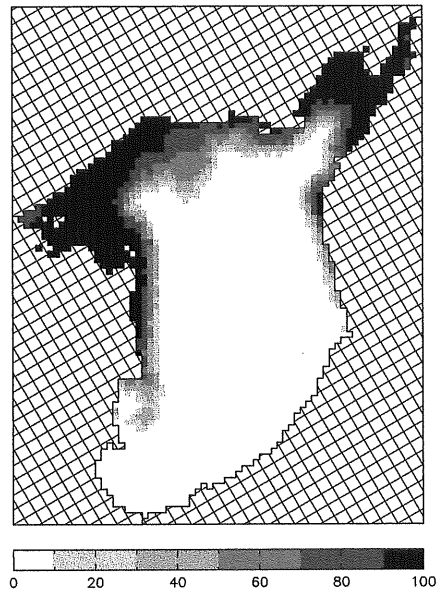
図 2：オホーツク海全体における海氷の占有面積の時間推移。当初の計算結果 (Orig) と、それに対して海水の混合層厚さの増加 ($H_s=10.0$) と、余剰流入熱量 ($Q_{ext}=100$) の考慮という調整を行ったものを、SSM/I データと比較したものを。

次に DMDF モデルの挙動を観察するため、海水量が安定する 2 月について DMDF モデルのみによる再現計算を試みた。特にラフティング現象を考慮した計算と考慮しない計算の両方を行って比較したところ、海氷分布のうちで高い圧力を生じる部分の周囲において密接度の減少と氷厚の増加という実現象と合致する傾向が現れた。このことは本研究で導入したラフティングのモデルの妥当性と、オホーツク海の海水密接度分布におけるラフティング現象の重要性を示唆する結果である。

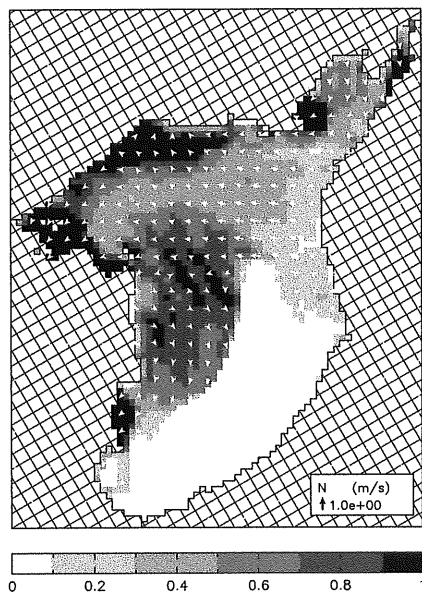
最終的に、DMDF モデル、海洋モデル、熱交換モデルの全てを連成し、1993 年 11 月 1 日から翌年 4 月 30 日に渡る長期間計算を試みた。その結果、密接度分布の推移 (図 3) は SSM/I データと非常に良い相関を示した。



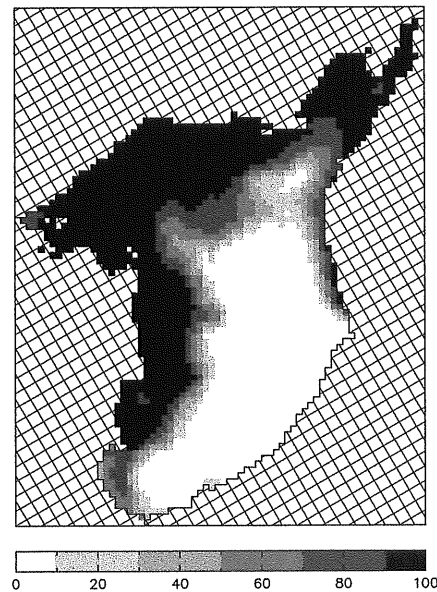
(a) Calculated Ice Concentration (0~1)
1993/12/28



(b) SSM/I Ice Concentration [%]
1993/12/28



(c) Calculated Ice Concentration (0~1)
1994/01/28



(b) SSM/I Ice Concentration [%]
1994/01/28

図 3:11月1日を初期値(海氷分布なし)とする計算(DMDFモデル、海洋モデル、熱交換モデルを全て連成)の計算氷密接度と SSM/I データの比較。(a)(b)はそれぞれ 12月28日の、(c)(d)はそれぞれ1月28日の、計算氷密接度と SSM/I データ。

但し 1994年2月以降については海洋モデルによる海水温度が計算対象海域全体について過度に冷却されて計算され、海氷分布もそれに伴って SSM/I データと乖離した。この原因は海洋モデルにおいて海底における境界条件が比較的浅い水

深で打ち切られているためであり、正当な海水温度分布が計算されればこの問題は解消されると考えられる。

DMDF モデルによって海氷の運動を考慮した計算と、熱交換モデルによる海氷の増減のみを考慮した計算の両方を行って比較したところ、オホーツク海全体に対する海氷の占有面積は運動を考慮すると小さくまとまることが分かった。これは密接度が增大するとラフティングの影響が顕著になることを示している。また SSM/I データからの二乗平均平方根誤差について比較すると、海水温度が異常にならない範囲では DMDF モデルの考慮・非考慮に関わらず約 0.2 程度であった。これは全体的に海氷量が SSM/I データより過小であった事が原因であり、より現実的な熱力学的パラメータの調整をする必要があると結論できる。

本研究では、数値モデル自体の高度化・実用化とともに、構築した数値モデルをモジュールとする海氷分布予測システムの実用化を構想することを目的のひとつとしている。海氷予測計算をシステムとして稼働させるためには、数値計算に必要なデータを効率的に入手・管理し、数値計算を行った結果を効果的に取り出すことができるための設計が必要である。

そこで本研究で数値計算を行うにあたって要した作業においては、使用するデータについて詳細な諸元を調査した上で統一的なフォーマットに変換し、各数値モデルについてもモジュールとして連成することを考慮したプログラミングを行った。データのフォーマットは、入力データ・出力データともに汎用データベースと親和性の高い CVS 形式を選択した。これらによって数値計算モジュールのメンテナンス性とシステムの開発効率が向上する。

ここで構想されるシステムは、氷海に関するデータセンターとして機能することが想定される。すなわち、氷海に関する気象・海象を含めてデータが集積され、変動予測あるいは影響評価等の要求に応じて数値計算が行われ、その結果を用途に応じた方法で閲覧できるものとなる。本研究ではその構成として、ユーザインターフェースに GIS(地理情報システム)ソフトウェアを採用してデータベースおよび数値計算モジュールと連携させる構成(図 4)を提案し、その具象化と用例について検討した。

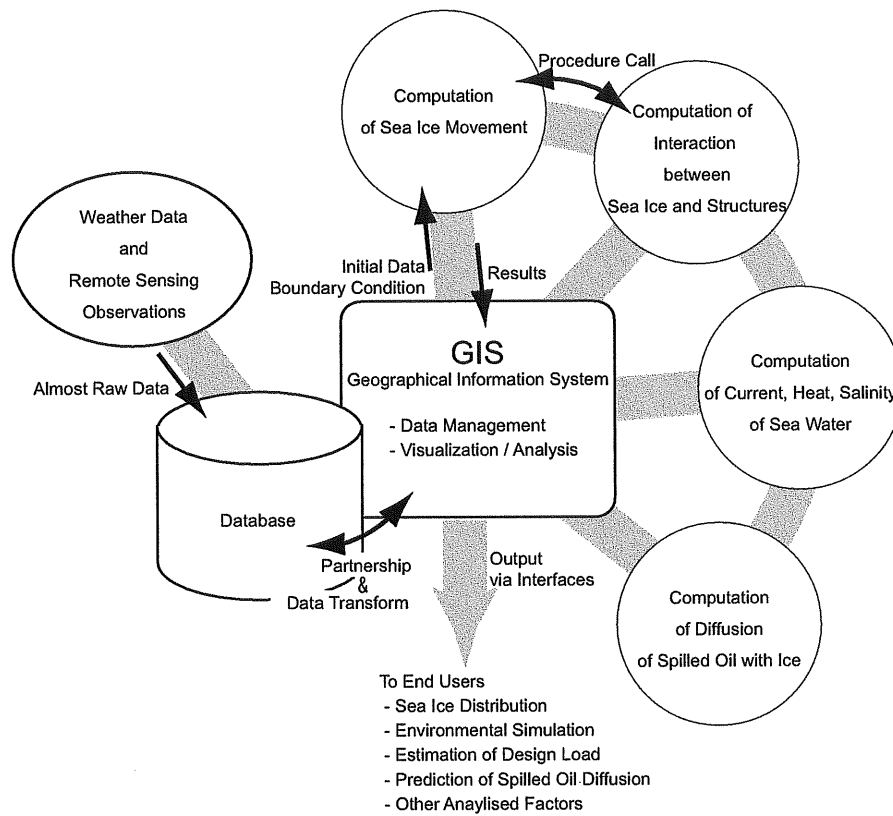


図 4: 本研究で提案する GIS を中心とした氷海に関するデータセンターの構成。
データベースと数値計算モジュールとビューアーで構成される。