平成 21 年度修士論文要旨

（東京大学大学院　新領域創成科学研究科　海洋技術環境学専攻）

冬季オホーツク海における海氷と流出油の挙動予測

Numerical prediction of the behavior of sea-ice and spilled oil in the Sea of Okhotsk under ice-covered condition

学籍番号 086801 川内 雅雄
指導教員　　山口 一　教授

（平成 22 年 3 月 24 日修了予定）
Keywords：オホーツク海，海氷，流出油，数値シミュレーション
Keywords： the Sea of Okhotsk, sea ice, spilled oil, numerical simulation

１．序論

「閉じた海」「北半球で最も低緯度の季節海氷域」であるオホーツク海は，毎年冬季には北西部で生成された海氷が風や海流に乗って北海道沿岸域まで南下してくる．また，この海域の西部に位置するサハリン島ではサハリンプロジェクトと呼ばれている大規模油ガス田開発が行われている．もし結氷期にこの海域で油流出事故が発生すれば，海氷と共に流出油が北海道沿岸域まで到達し，海洋環境及び地域経済に大きな影響を与えてしまう．

油流出事故が氷海域で起きた場合，氷下を広がる流出油の検知は難しいため，被害を最小限に食い止める有効な対策法の一つとして高精度な数値モデルによる油の移流･拡散などの挙動予測が挙げられる．正確に流出油の挙動を予測する数値モデルは，事故発生後の効果的な油回収計画立案の際の効果的なツールとなるだけでなく，流出事故を想定した予測結果を用いて潜在的なリスクに対しての対策を行うことが出来る．

財団法人エンジニアリング協会(以下 ENNA)は結氷期のオホーツク海に対応した流出油の挙動予測システム構築の研究プロジェクトを行った[1]．原[2]，舟木[3]はこのプロジェクトに沿い，海氷モデルと油拡散モデルを用いた連成計算を行い，実際のオホーツク海で氷海流出油計算が行えることを確認した．また，氷海域流出油挙動予測システムのプロトタイプを作成した．

これらの成果を元とし，昨年度終了した ENNA プロジェクトで要求された諸元を満たすシステム及びモデルの精度向上と検証を行う．海氷挙動予測計算の精度検証と，流出油挙動予測計算(ハインドキャスト)を行い，結果より油の挙動や北海道への接岸の傾向について明らかにする．

２．挙動予測モデル

2.1　モデル概要

本研究で用いるモデルは，低計算負荷で高解像度計算を両立させる必要がある．これは一週間の挙動予測を PC レベルの計算機で数時間以内に行えることを ENNA プロジェクトで想定しているためである．

そこで計算格子として**Fig 1**に示すものを用いて 1-way nesting計算を行う．まずオホーツク海全域に対して粗い解像度(16km×16km)の海氷挙動予測計算を行い，その結果を境界条件としてサハリン島やアニア湾，北海道沿岸部の高解像度(4km×4km，または 2km×2km)の領域に入力し，氷海流出油挙動予測計算を行う．

また計算負荷の制限より大気海洋モデルとの連成は行わず外部入力値として用いる．

海氷挙動予測モデルは，力学モデルとしてオホーツク海での適応実績が豊富で計算負荷が低い The distributed mass / discrete floe model(DMDF モデル)を使用する．流出油拡散モデルは，林ら[4]のものをベースとしたものを使用する．また油の移流は海氷存在下では海氷と共に，開水域では海流･潮流と風によって移流するとした．

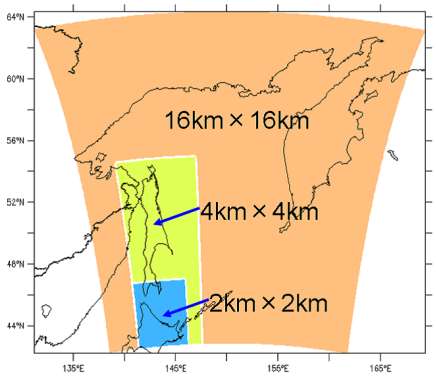


Fig 1　計算領域と計算格子

2.2 外部入力データ

・海氷データ

海氷密接度の初期値として，気象庁の解析図によるものと，リモートセンシングデータであ

るAMSR-Eのデータの2種類を用いて比較検討した．結果の精度に大きな違いはないため，データ頻度の高いAMSR-Eを用いる．氷厚は観測が難しいため一律0.3[m]を初期値として与えた．

・海流データ，潮流データ

北海道大学低温科学研究所提供の，海洋モデルPOM(Princeton Ocean Model)の計算結果を用いている．POMをベースとしてモデルを主要四分潮の変動で駆動した計算結果を調和解析したパラメータを提供して頂き，振幅と位相を計算し潮流データとする．そして海流と潮流のそれぞれ15m水深のものを気候値とみなして海流・潮流応力を計算し，風に関しては風によるドリフト成分を考慮して風応力を15°右偏させて与えた．

・気象データ，海水温データ

気象庁提供の気象客観解析値，及びMGDSSTを用いた．

３．流出油挙動予測計算

高解像度で高精度の海氷挙動予測計算(詳細は４)を用いて流出油挙動予測計算を行った．その代表的な結果を示し，流出油の挙動傾向について述べる．尚，以下の全ての計算では油の初期密度は893 [kg/m^3]，初期粘性は8.0×10^{-3} [m^2/sec]，エマルジョン化した最終密度は970 [kg/m^3]，最終粘性は 3.0 [m^2/sec]，流出量は6000 [m^3]，流出時間は2000 [sec]であり，計算開始とともに油流出が始まるとした．また，油の流出海域は各case毎に異なる(Fig 2)．

まず，流出海域の海氷の有無の結果に与える影響を調べた(case1～3)．ここでcase1は開水中，case2は氷縁部，case3は密な海氷域より油が流出するとしている．各caseでの3日後，7日後の流出油分布をFig 3に示す．油の広がり方はcase1>case2>case3である．またcase1では5日目には北海道に接岸しており，case2では油が海氷域である東向きではなく西向きに向けて広がっている．この結果より，事故海域に海氷が存在しないほど油は広がりやすく，北海道に接岸しやすいこと，氷縁で流出事故が起きた場合，特に開水域に向けて広がる傾向がわかった．

次にオイルロードである宗谷海峡(case4)，及び原油の積み出し基地のあるアニア湾(case5)から油が流出した際の流出油の広がり方の傾向を示す．Fig 4，Fig 5で各caseでの5日後，7日後での油の存在確率分布(2004年2005年2月の計算例(28/29例)の5日後7日後に油がどこに存在する可能性が高いか)を示す．宗谷海峡から流出した場合(case4)，2004年2005年とも5日程度で北海道へ接岸する可能性が高い．アニア湾から流出した場合(case4)，2004年2005年とも少なくとも一週間では油は北海道まで到達しないことがわかった．しかし，一週間以上計算すると，10日程で北海道へと接岸する可能性があることがわかった．

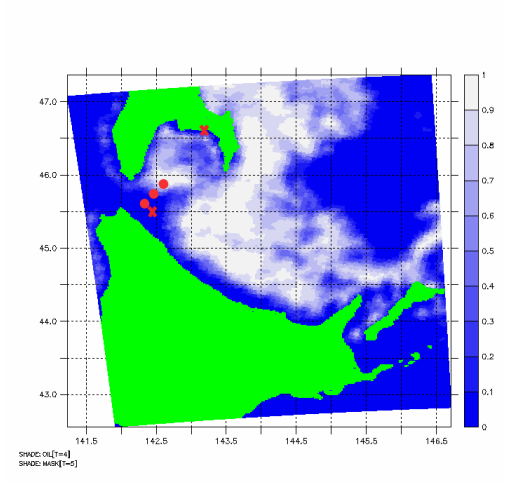


Fig 2　各caseでの油流出地点．赤丸は南西から順に case1,case2,case3 を，赤×は南西からcase4,case5 を示す．また白色は海氷域を，青色は開水域を表す．尚，海氷分布はcase1～3の計算開始日時である2005年2月21日のもの．

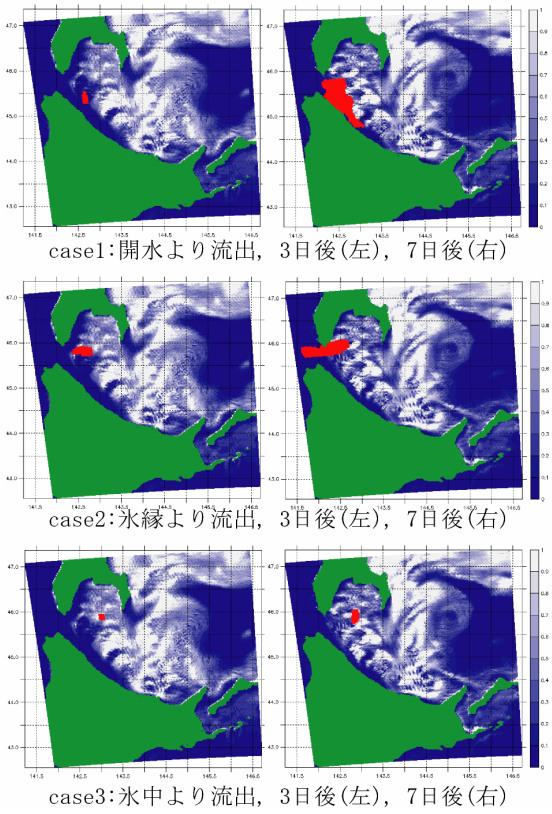
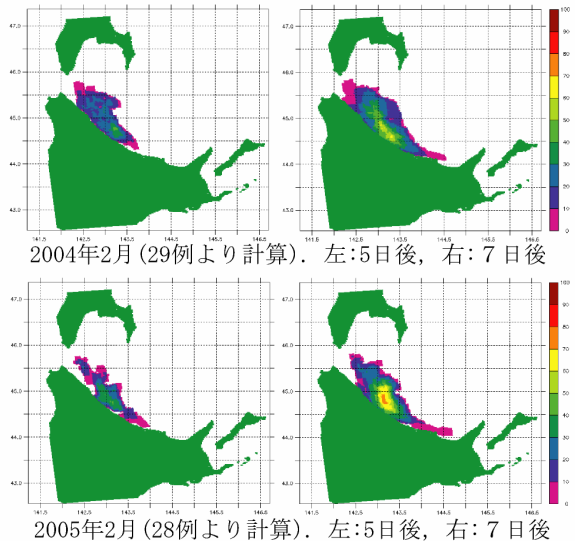


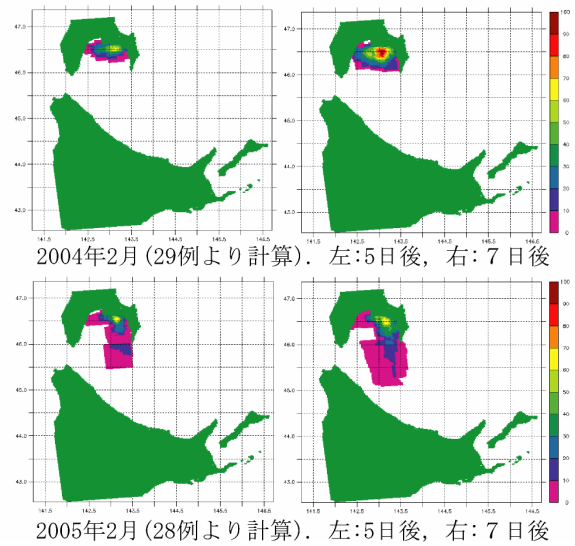
Fig 3　各caseでの3日後，7日後の流出油分布．白は海氷，青は開水部，赤い部分は油が存在する海域を表す．



2004年2月(29例より計算). 左:5日後, 右:7日後

2005年2月(28例より計算). 左:5日後, 右:7日後

Fig 4　宗谷海峡(case4)より油流出した際の 5日後, 7日後の油存在確率マップ. 値が高い程油が存在する確率が高い. 単位は%.



2004年2月(29例より計算). 左:5日後, 右:7日後

2005年2月(28例より計算). 左:5日後, 右:7日後

Fig 5　アニア湾(case5)より油流出した際の 5日後, 7日後の油存在確率マップ. 値が高い程油が存在する確率が高い. 単位は%.

4. 海氷挙動予測計算

3で示すように流出油の挙動は海氷の挙動に大きな影響を受けるため, 流出油の正確な挙動予測には, 高解像度で高精度な海氷挙動予測が不可欠である.

海氷挙動予測計算は2.1で示したように1way nesting法を用いた一週間計算である. 以下で2004年2月の各日スタートの計算29例に対してCritical Success Index(以下CSI), Ice Variation Index(以下IVI)により北海道沿岸域を含む2km格子の領域の検証を行う. 算出法はまず各格子をTable 1, Table 2で分類し, 各分類の個数を数える. その後に(1)式で計算して値を出す. どちらも値は0～1で変化し, 1に近づくほど計算精度が高いことを示す.

Table 1　CSIの格子分類

CSI		計算結果	
		氷有	氷無
実測値	氷有	Hit	Miss
	氷無	Failure	Hit

Table 2　IVIの格子分類

IVI		計算結果の変化分		
		氷出現	氷消失	変化無
実測値	氷有	Hit	Miss	Null
	氷無	Failure	Hit	Null

$$CSI, IVI = Hits/(Hits + Misses + Failures) \quad \cdots(1)$$

気象庁の海氷予報の精度検証にも用いられているCSIは, 海氷の存在の有無により精度を測る指標であるが, 海氷分布の形状に影響を受ける. そこで計算結果上の海氷の変化分により精度を測るIVIを考案し, CSIと共に検証に用いた.

尚, CSI, IVI共にFig 6で示す海域(北海道沿岸域:coastal, アニア湾:aniva, 沖合:horn)に区分けして計算した. これは領域内で, 流出油挙動予測計算にとって有用性が高い海域(coastal, aniva)と, 海氷挙動予測計算の精度があまり高くないが流出油挙動予測に影響が少ない海域(horn)に分けるためである. 尚, Fig 7 (a)のようにhorn部で精度が高くない原因は, 非定常の渦を海流データ上で表現できていないためである.

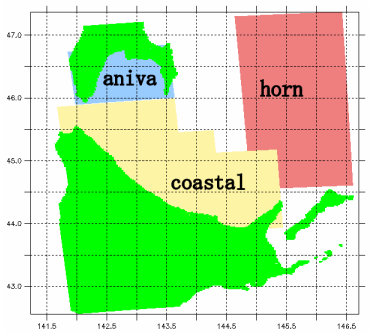


Fig 6　精度検証用海域分け

Fig 8でCSIの各計算開始日に対する推移を, Fig 9では各計算日の1～7日間計算結果から算出したIVIの平均値の推移を示す.

北海道沿岸域(coastal)では精度よく海氷挙動予測が行えていることがわかる. CSIについ

ては気象庁の海氷予報のものと比べても遜色ない値である[5]．またアニア湾(aniva)では，全体量の再現は今一つだが，海氷の変動の傾向は再現出来ている．これより海氷の変動自体は再現出来てはいるものの，その量やかかる時間の再現が弱いことがわかる．で海氷が広がる時期のアニア湾での海氷分布の計算結果と実測値の比較を示す．Fig 7(b)中の黒矢印は計算上の氷縁の動きを表しているが，この図からも上述の傾向が読み取れる．

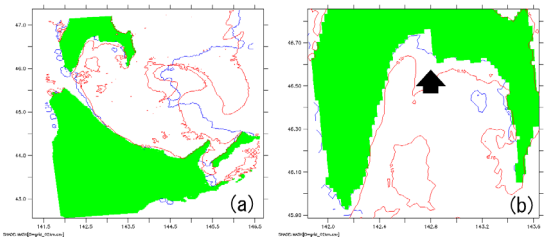


Fig 7　2004 年 2 月 14 日スタートの海氷一週間挙動予測計算結果と実測値との比較．赤線は計算結果，青線は実測値の海氷密接度 0.1 のコンターラインを表す．黒矢印は計算上の氷縁の動きを示す．(a)全域，(b)アニア湾．

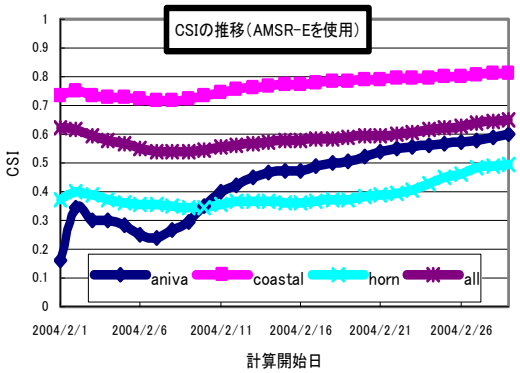


Fig 8　2004 年 2 月計算の CSI の推移．

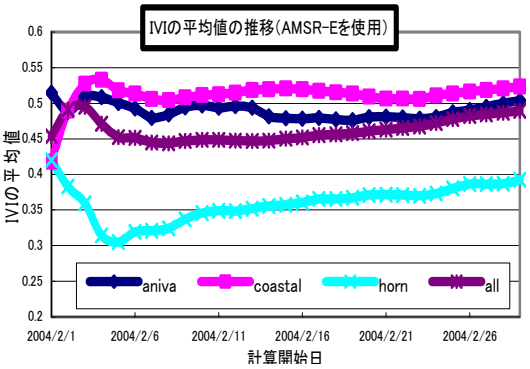


Fig 9　2004 年 2 月計算の IVI 平均値の推移．

5．システム

以上の挙動予測計算を簡便に行えるようユーザーインターフェースを整備し，流出油挙動予測システムを構築した．また，精度や計算負荷に影響を与えることなく，使用するデータセットサイズを約 80%縮小化した．これらのプログラム群や入力データセット，可視化に用いる無料ソフトのインストーラなどをパッケージングして試験的にインターネットで公開した[1]．同時にマニュアルも公開している．現状では入力データセットが揃わないためハインドキャスト計算となっている．

6．結言

本研究では，冬季オホーツク海の海氷と流出油の挙動予測計算を行うモデルの精度向上と検証を行った．以下に成果を示す．

流出油挙動予測計算

- 海氷存在下では油の拡散が抑えられる，氷縁で油流出事故が起きた場合，開水域に向けて広がるなど流出油の挙動は海氷の挙動の影響を大きく受けることを確かめた．
- ハインドキャスト計算を行い，油存在確率マップを作成した．宗谷海峡で油流出事故が起きた場合は 5 日程度で油が北海道に接岸する，アニア湾の場合は 1 週間以内にはしないが 10 日ほどで接岸する可能性がある．

海氷挙動予測計算

- 高精度で高解像度の挙動予測が行えた．
- 計算上の海氷の変動分による精度を測る指標 IVI を考案し，海氷の有無で精度を測る指標 CSI と共に検証を行った．
- 流出油挙動予測において社会的影響の大きな北海道沿岸域においては，精度よく海氷挙動予測が行えていることを確かめた．これにより油予測の精度も期待できる．
- アニア湾においては海氷の変動の傾向を再現出来ていることを示した．

〈参考文献〉

[1] 平成 20 年度海洋石油等開発技術動向調査，(財)エンジニアリング振興協会，平成 21 年 3 月

[2] 原圭吾：オホーツク海における氷海流出挙動予測計算，東京大学大学院　修士論文，2008

[3] 舟木将：オホーツク海における氷海流出油挙動予測システムに関する研究，東京大学大学院　修士論文，2009

[4] 林昌奎，山口一：氷海域の流出油変動シミュレーションモデル，生産研究，Vol56，No.6，2004

[5] M. Chikasawa, T. Imaizumi, and K. Hamada (2008); A numerical experiment of sea ice distribution forecast using MOVE/MRI.COM system in the Southern part of the Sea of Okhotsk; Proc. the 23rd Int. Symp. on Okhotsk Sea and Sea Ice, The Okhotsk Sea and Cold Ocean Reseaarch Association, Mombetsu, 16-22 feb., pp. 91-98

1 http://www.1.k.u-tokyo.ac.jp/oil/