数値計算による吹送流を考慮した海表面浮遊粒子追跡に関する研究

——ナホトカ号重油流出事故について新潟県沿岸域の被害調査との比較——

犬飼直之*・早川典生**・福島祐介***・細山田得三***

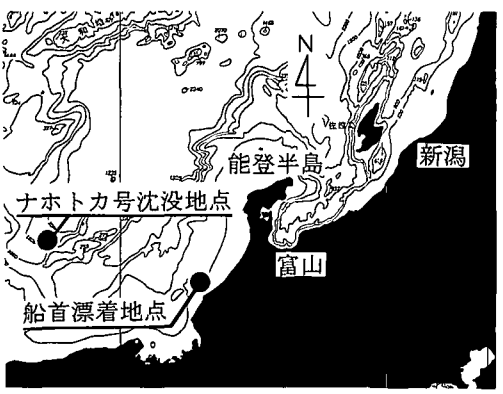
1. はじめに

1997年1月2日，島根県隠岐島沖(図—1参照)でロシア・タンカー・ナホトカ号が沈没した事故により，島根県から新潟県にかけての沿岸域では重油の漂着などの被害を受けた．この重油流出事故では行政の対応が遅れたことなどが指摘されているが，これは重油の漂流の予測が遅れたことが原因の一つではないかと考えられる．よって今後の教訓として早急な数値予測モデルなどの開発が必要なのではないかと考えられる．

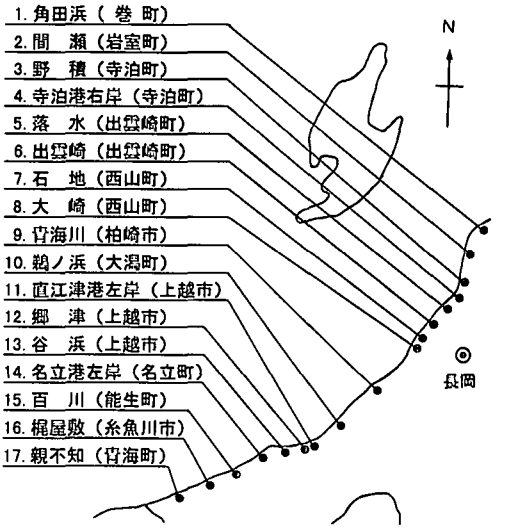
本研究では，まず新潟県沿岸域において重油の漂着状況の調査などを複数回にわたりおこない，調査結果を基に数値計算により能登半島付近の海の流れと重油の漂流状況を再現したものである．また，重油の調査時では重油回収のボランティア活動にも参加した．

2. 現地調査

重油が新潟県沿岸に漂着したのに伴い，1月27日，2月13日，3月6日に新潟県内の富山県境から新潟市にかけての海岸の重油の漂着状況の調査をおこなった．図—2に調査地点を示す．



図—1 能登半島周辺の海底地形（計算領域）



図—2 調査地点

全期間において漂着重油は富山県付近では確認できず，約30 km東の能生町付近（図—2(15)参照）以東より確認できた．漂着量は上越市付近が最大で，出雲崎町付近にかけて次第に量が少なくなっていった．全域で漂着重油は直径5～6 cm程度の玉状(写真—1参照)であったが，重油塊が漂着した海岸もあった（写真—2参照）．

1月27日の調査時では特に上越と石地で大粒の重油が波に乗って次から次へと漂着していた．また，しぶきに飛ばされたのか，全域で砂浜のかなり奥部にまで重油が点在していた．重油は鮮明な茶色をしており(写真—3参照)，水飴のような粘性をしていた．ボランティアの方々が全域で回収作業をしていたが，漂着する重油の方が多く，重油が次から次へ漂着していた．

2月13日では新たに漂着する重油は全域であまり見られなかった．浜には砂まみれの古い重油が点在していたが（写真—4），ボランティアの方々の作業の成果か，その量は前回よりも激減していた．また，新しい重油は汀線付近にしか見られなかった．しかし，砂を掘り起こすと，砂まみれの重油が多数確認できた．

3月6日では新たに漂着する重油は全域で見られなかった．砂浜では砂まみれでボロボロになった重油（写

* 正会員 工修 長岡技術科学大学環境・建設系 助手
** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学環境・建設系 教授
*** 正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 教授
**** 正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 助教授

写真—1 （石地、1月27日）

写真—2 （青海川、1月27日）

写真—3 （青海川、1月27日）

写真—4 （石地、2月13日）

写真—5 （石地、3月6日）

写真—6 （石地、3月6日）

真—5)が点在していたが，揮発して少し固化した重油も確認できた（写真—6）．

3. 風の頻度特性の解析

冬の日本海の流れは風に大きな影響を受けていると考えられるので，1月1日から31日までの新潟市の風向・風速の頻度特性を解析した．データは新聞の朝・夕刊に掲載された天気図より作成した．図—3に風向・風エネルギー分布を，図—4に各風エネルギーの全体に対する比率を示す．

これらの図より，この期間において風向はNNWとW, SWの順で卓越しており，風速10 m/秒以上のエネルギーが全体のおよそ50%を占めていることが分かった．

4. 数値計算

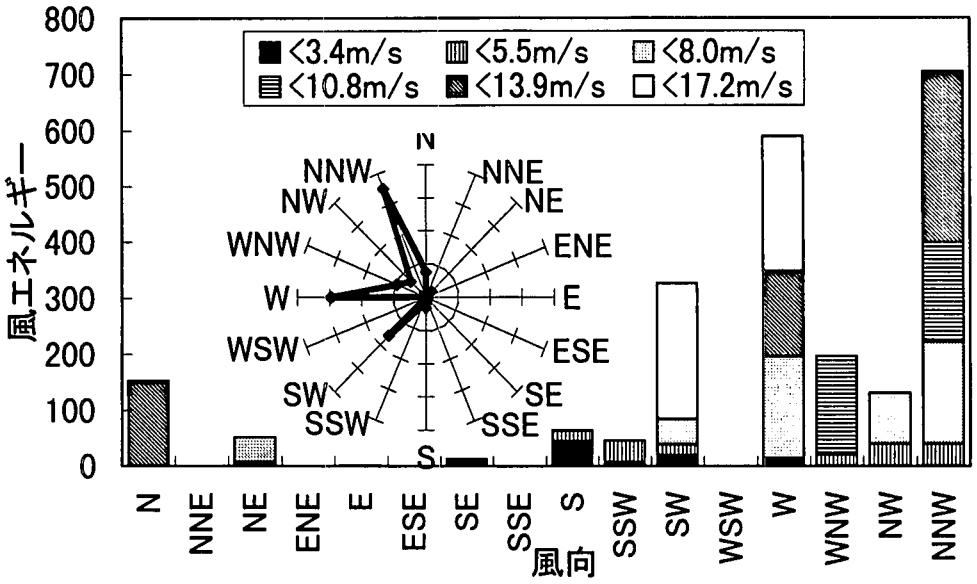
4.1 概　　要

重油の拡散過程を再現するために島根県から秋田県にかけて（図—1参照）数値計算をおこなった．

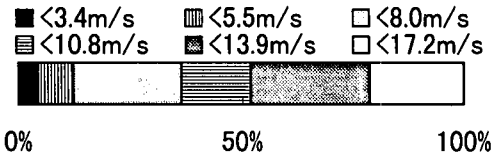
まず，潮汐流・海流・吹送流を考慮した流れの計算をおこない，Euler流場を再現した．次に，Euler流場に重油にみたてた標識粒子を放出し，Lagrange的に粒子を追跡した．そして，計算結果と現地調査などの調査結果を比較・検討し，計算の妥当性を検討した．

4.2 流れの計算法

潮流を考慮した吹送流の基本方程式はNavier-Stokesの方程式を水深方向に積分した平面2次元長波の方程式



図—3　風向・風エネルギー分布（新潟，平成9年1月1日～31日）



図—4　風エネルギーの比率（新潟，平成9年1月1日～31日）

によって次のように表される．

連続式：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial[(h+\zeta)u]}{\partial x}+\frac{\partial[(h+\zeta)v]}{\partial y}=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

運動方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-fv+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{\tau_x^b-\tau_x^s}{\rho_w(\zeta+h)}-A_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)=0 \cdots\cdots(2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}-fu+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{\tau_y^b-\tau_y^s}{\rho_w(\zeta+h)}-A_h\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)=0 \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，f はコリオリ係数，A_h は渦動粘性係数，C はChezyの粗度係数，τ^b は海底面での摩擦応力，τ^s は海面でのせん断応力である．

これらの式を差分法で陰解法に属するADI法で差分化し，水平二次元の単層流れで流れの計算をおこなった．

4.3　粒子拡散の計算法

流れの計算は各計算点での流速と水位の時間変動を求める手法でありEular的な流れを求める手法である．しかし，重油の拡散移動を計算するためには，油粒子をLagrange的に追跡する必要がある．そこで，流れの計算で求められたEular流場に，油粒子に相当する標識粒子を放出し，それがどのように移動していくかをLagrange的に追跡した．

今 i 番目の標識粒子の時間 t_{m-1} における位置を $X_i(t_{m-1})$ とすると，フロートの移動速度と潮流場の関係は次式で表される．

$$dX_i/dt=U(X_i(t),\ t) \quad \cdots\cdots(4)$$

式(4)を時間 t について t_{m-1} から t_m まで積分しTaylor展開し，さらに乱れや分子拡散を考慮すると次式のようになる．

$$X_i(t_m)=X_i(t_{m-1})+\int U(X_i(t))dt+a\gamma \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで，a は比例定数，γ は平均0，分散1の正規乱数である．

4.4　計算条件

計算領域（図—1参照）を東西41格子×南北31格子，格子間隔15 kmの格子地形に分割して計算をおこなった．

流れの計算での潮汐流・海流・吹送流の計算条件を表—1に示す．

潮汐流と海流の計算では実水深を利用したが吹送流計算ではエクマン層厚を考慮して20 m以深は一定とした．吹送流計算では，風向・風速は新潟の観測結果で代表させた．また，60パターン（2個/日×30日）の風による流れの計算を，それぞれにおいて定常になるまでおこない，粒子拡散計算に使用した．

粒子拡散計算では計算の単純化のために重油の質量は考慮せず，凝縮や固化などの変形は考慮しなかった．また漂流重油の先端部の流れを把握するために粒子を計算開始時にのみ放出し計算をおこなった．

5. 計算結果

5.1 流れの計算

潮汐流，海流，吹送流の計算結果より，能登半島付近における流速値を比較した（図—5）．図より，吹送流がこの期間では大きな要因となっていることが分かる．

よって，本論文では吹送流のみの流れの計算結果を利用して粒子拡散計算をおこなうこととした．

5.2 粒子拡散計算

図—6 に第 8 管区・第 9 管区海上保安部提供による重油の移動状態を示す．また，図—7 に計算による（1）1 月 12 日(事故発生後 10 日後)，(2)22 日(10 日後)，(3) 2 月 1 日（30 日後）の重油の分布を示す．

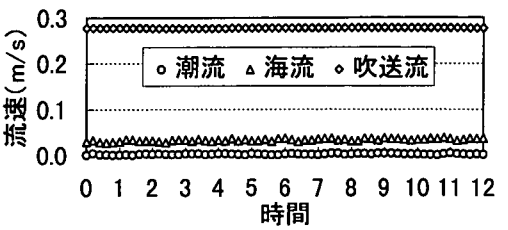
図—6 によると，重油は 1 月 12 日に能登半島の西側を北上したが，計算でも同様の結果となっている（図—7（1）参照）．16 日（14 日後）くらいに能登半島を越えたが，計算でも 17 日に能登半島を越えた，重油は 1 月 21 日に上越市に漂着し，22 日には上越市から新潟市まで全域にかけて漂着したが計算でも 21 日に上越市に漂着し 22 日には新潟までの全域に分布している(図—7(2)参照)．また，図—7（3）を見ると，重油は新潟県沿岸全域に到達しているのがわかる．また上越市沖付近では重油がとどまっている様子がわかる．これより，能登半島を越えてきた流れは上越市付近に集中することが確認された．これらの結果より，今回の計算で重油の流況をある程度再現できたのではないかと考えられる．

表—1　計算条件

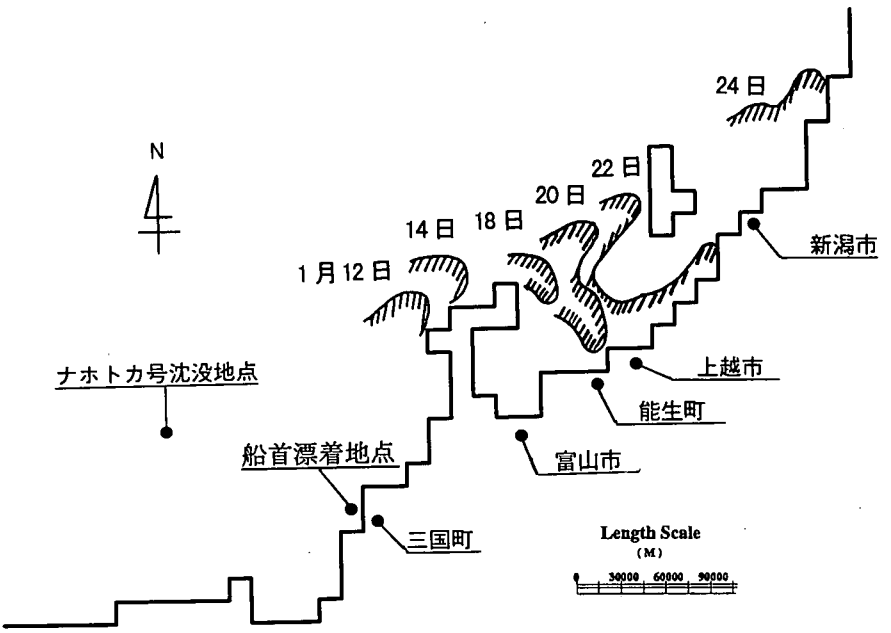
格子間隔	15 km
地形・水深	日本近海海底地図（海上保安庁）
タイムステップ	60 km
強制水位・位相差・拡幅	同時潮位図より位相を決定 新潟における潮汐調和量の 3 分 1
海流流量	対島海峡の断面流量の 1/3
風向・風速	NNW，15.6 m/s（流速比較時） 天気図より新潟の朝・夕方の値を入力 （1 月 1 日〜31 日）（流況再現時）

6. まとめ

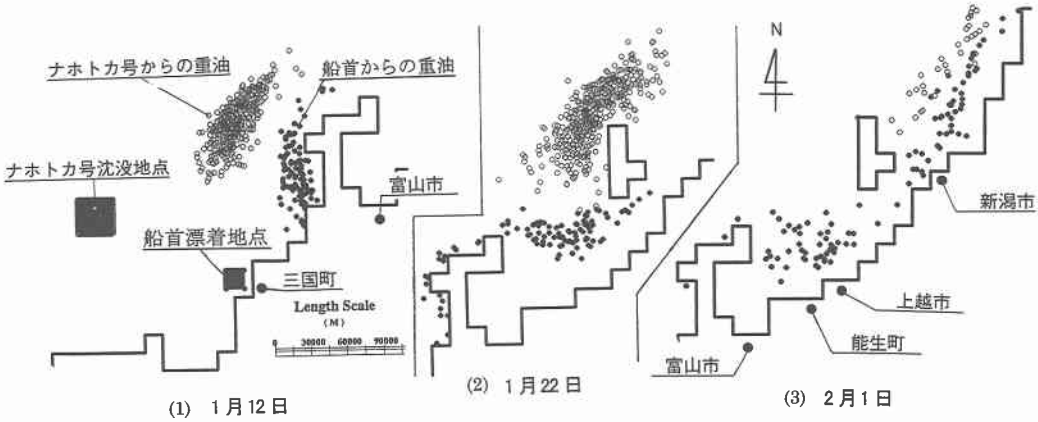
本研究によって得られた結果を列挙する．



図—5　流速の比較（能登半島付近）



図—6　海上保安庁による観測結果



図—7 重油拡散計算結果

6.1 現地調査

漂着重油は富山県境付近では確認できず，県境からおよそ 30 km 東の能生町以東から全域で確認された．

重油は 5〜6 cm 程度の玉状が多かったが，柏崎市付近の海岸では重油塊が漂着した．重油は上越市付近が最多で新潟市付近になると量・大きさとも減少した．

漂着した重油の量は 1 月下旬が最多で，2 月になると減少を始め，3 月中旬には新たに漂着する重油は確認されなくなった．

6.2 風の頻度特性

この期間において，エネルギー的には NNW と W の風向が卓越している．

風速 10 m/秒以上の風エネルギーが全体の 50%を占める．

6.3 数値計算

吹送流で能登半島付近の日本海の流れを再現した．

能登半島付近の日本海の流れは吹送流に大きな影響を受けており，東向きに流れを形成している．

能登半島の東側（富山湾側）では半島による流れの剝離域が形成され，能登半島先端部からは上越市沖と佐渡沖へ向かう 2 つの大きな流れが存在する．

謝辞：本研究を進めるにあたり第八管区海上保安部と第九管区海上保安部より情報の提供を受けた．また，文部省科学研究補助金（萌芽的研究 08875093 研究代表者細山田得三）で行った．ここに感謝の意を表する．

参考文献

犬飼直之・早川典生・宝田盛康 (1995): 数値計算による大阪湾の海水交換に関する研究，海洋開発論文集，第 11 巻，pp. 109-113.

今里哲久・淡路敏之 (1982): 鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験，沿岸海洋研究ノート，第 20 巻，宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，pp. 235-256.

早川典生・細山田得三・西川 誠・宝田盛康・犬飼直之 (1995): ラグランジュ的粒子追跡法による広島湾湾奥部の海水交換に関する研究，海洋開発論文集，第 11 巻，pp. 103-108.

村上和男・森川雅行・堀江 毅 (1985): ADI 法による高潮の数値計算法，港湾技研資料，No. 529.