

高度化した沿岸流動数値計算法を用いた 原油流出シミュレーション

灘岡和夫*・吉野忠和**・二瓶泰雄***

1. はじめに

1997年7月2日に東京湾中ノ瀬付近で発生したダイヤモンド・グレース号の座礁に伴う原油流出事故は、大量の原油が東京湾内に流出・拡散し、川崎・横浜港等に漂着するなど大きな社会的問題となった。このような流出事故が起こった際には、被害を最小限に食い止めるために、オイルフェンスを設置したり、油回収船を出勤させるなどの緊急措置が講じられる。このような油の回収作業を的確かつ迅速に行うためには、水表面付近を漂う原油そのものの漂流挙動を予測することが必要不可欠であることから、汎用性の高い沿岸流動数値計算手法を構築して、油挙動に関する“高精度数値予報システム”を確立していくことが強く求められている。

東京湾のような閉鎖性水域を対象とした沿岸流動シミュレーションや今回の原油流出事故に関する数値解析はこれまでのところ数多く行われている(例えば, 中辻ら, 1995; 田中ら, 1996; 渡辺ら, 1998)。しかしながら, 従来よく用いられている流動計算法を, 地形が複雑でかつ密度分布に強い空間的非一様性が存在するような沿岸域に適用する際には, 流動計算法自体に起因する数値計算精度上の問題が現れることが指摘されている(例えば, Stelling & Kester, 1994)。さらに, 油漂流計算に特に重要な風応力の取り扱いに関しては, 実際には図-1に示すような空間的に非一様な風パターンが存在し, それが流動パターンに多大な影響を及ぼすことが指摘されているにもかかわらず(灘岡ら, 1997), 一般的には風応力を空間的に一様として取り扱うことがほとんどである。このようなことから, 従来の沿岸流動計算法は, 実際の流動現象や油挙動を十分に再現しているとは言い難い。

そこで本研究では, 従来の沿岸流動数値計算法の枠組みにおけるいくつかの問題点を解決することで数値計算法の高度化を図るとともに, それに基づいて原油流出シ



図-1 空間的に非一様な風分布の一例

ミュレーションを行うことを試みた。ここでの沿岸流動計算法の高度化に際しては, 従来の流動モデルで多く使われている σ 座標系が抱える問題点を解決するために, 灘岡ら(1999a), 吉野ら(1999)が提案した新しい σ 座標系(Dual- σ 座標系)を適用した。さらに, 風応力の取り扱いに関しては, 気象場計算をカップリングさせて実際の気象場を再現し, その計算結果を流動モデルに取り込んだ(灘岡ら, 1999b)。そして, 上記の方法によって高度化された沿岸流動数値計算法を用いて, 東京湾で実際に起きたダイヤモンド・グレース号の座礁事故に伴う原油流出を対象に数値シミュレーションを実施した。

2. 新しい σ 座標系(Dual- σ 座標系)の適用

(1) 従来の σ 座標系の問題点

もともと気象分野で提案された σ 座標系は, 図-2(a)に示すように海底地形に沿って計算格子を設定するために, 地形変化を容易に取扱うことができ, 現在, 海洋・沿岸海洋分野においても多く用いられている。しかしながら, この σ 座標系を海底面が傾斜する領域に適用した場合, 主として水平拡散項と圧力勾配項に対する数値計算上の評価が問題となることが指摘されている。具体的には, 水平拡散項に関しては, 座標変換時に生成される高次の項を省略することに伴い, 人工的な鉛直拡散が生じてしまう(Stelling & Kester, 1994)。また, 圧力勾配

*フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

**正会員 修(工) 東京都建設局第五建設事務所補修課橋梁維持係

***正会員 博(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

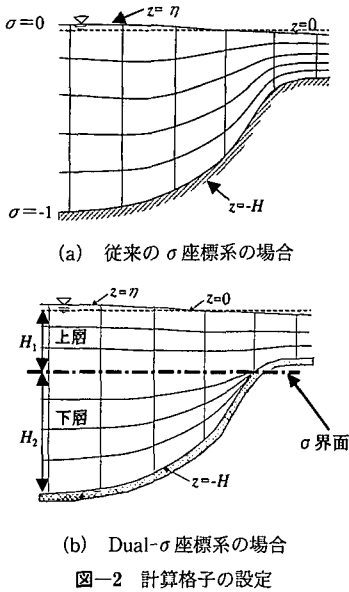


図-2 計算格子の設定

項に関しては、 σ 座標変換時に生じた付加的な空間微分項を差分化する際に大きな数値誤差が発生することが知られている (Janjic, 1977; Mesinger, 1982)。これらの数値誤差が顕著となる条件は、海底地形が急傾斜している領域 (すなわち、計算格子の水平面からの傾きが大きいところ) において、密度の急な空間勾配が存在するところであることから、複雑地形を有し密度変化も大きい沿岸域に対して従来の σ 座標系をそのまま適用すると、この種の数値誤差の発生が避けられなくなる。

(2) 新しい σ 座標系の概要

そこでここでは、このような問題点を比較的簡単なアルゴリズムによって解消するために、灘岡ら (1999a)、吉野ら (1999) により提案された新しい σ 座標系 (Dual- σ 座標系) を沿岸流動計算法に適用することとした。このDual- σ 座標系では、図-2(b)に示すように、計算領域を上層・下層に分けて (そこでの界面を σ 界面と呼ぶこととする)、それぞれの層に対して別々の σ 座標系を導入する。このように上層・下層に分離することにより、一般的に密度変化が大きい上層の計算格子を海底面形状の影響を受けないようにほぼ水平に設定することが可能となり、上述した水平拡散項と圧力勾配項に関する数値誤差を大幅に軽減できるものと期待できる。実際、シンプルな条件下において、従来の σ 座標系とDual- σ 座標系を用いた場合の水平拡散項と圧力勾配項に関する計算精度を比較したところ、Dual- σ 座標系の場合、従来の σ 座標系と比べて大幅に計算精度が向上することが確認されている (灘岡ら, 1999a; 吉野ら, 1999)。

本研究では、このDual- σ 座標系を、従来の σ 座標系をベースとした汎用的な海洋流動シミュレーションコード

であるPOM (Princeton Ocean Model, Blumberg & Mellor, 1983) に組み込み、それを後述する原油シミュレーションに応用している。このDual- σ 座標系を適用した場合には、単に上下層それぞれに対して別々の σ 座標系を定義しているだけで、各層の基礎方程式やアルゴリズムとしては従来の σ 座標系に対するものと同形のものを用いることから、計算コードの修正はわずかですみ、実際の計算時間も σ 座標系のコードと比べてそれほど増加しない。したがって、このDual- σ 座標系を導入した場合、クリープ補正などの既存の補正法 (Stelling & Kester, 1994) を導入する場合と比べると、比較的軽微な計算労力で実施することが可能になる。なお、このDual- σ 座標系を用いた計算における σ 界面の設定に関しては、図-2(b)のように水平に設定する形だけでなく、密度躍層面に追従するように時空間的に変化させることも原理上可能であるが、本研究では、 σ 界面を図-2(b)のように水平に設定した。また、Dual- σ 座標系の定義や取り扱いに関する詳細、その計算精度等に関しては、灘岡ら (1999a) を参照されたい。

3. 気象場計算に基づく風応力の評価

図-1のように空間的非一様性を有する風パターンをより実際に近い形で再現するために、灘岡ら (1997) は、AMeDAS等の疎らな測点での実測データを空間補間して風応力を算出している (以下、この手法を「補間法」と呼ぶ)。しかしながら、補間法では、観測点が少ない海上における風分布の再現性に問題があったことから、ここでは、気象場自体を数値解析し、その計算結果から風応力分布を算出すること (灘岡ら, 1999b) を試みた。

(1) 気象場計算の概要

ここで用いた計算モデルは、汎用的な気象モデルとして知られるRAMS (Regional Atmospheric Modeling System, Pielke *et al.*, 1992; 神田ら, 1999) である。このRAMSは、総観規模の気象場の影響を適切に取り込み、かつそれを東京湾スケールなどの局所気象場に反映させるために、4次元データ同化手法と多重ネスティング手法を採用している。このうち、4次元データ同化手法として、総観規模の気象場データであるECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) データとAMeDASなどの地上気象データを用いて、6時間ごとに客観解析データを作成し、これを初期値及び同化データとして計算に連続的に取り込んでいる。また、多重ネスティング手法としては、図-3にその計算結果の一例が示されているように、太平洋や日本海を含む広領域 (Grid 1)、関東域 (Grid 2)、東京湾スケール (Grid 3) といった空間解像度や領域スケールの異なる3つの計算領域を設定し、これらを同時並行的に計算し

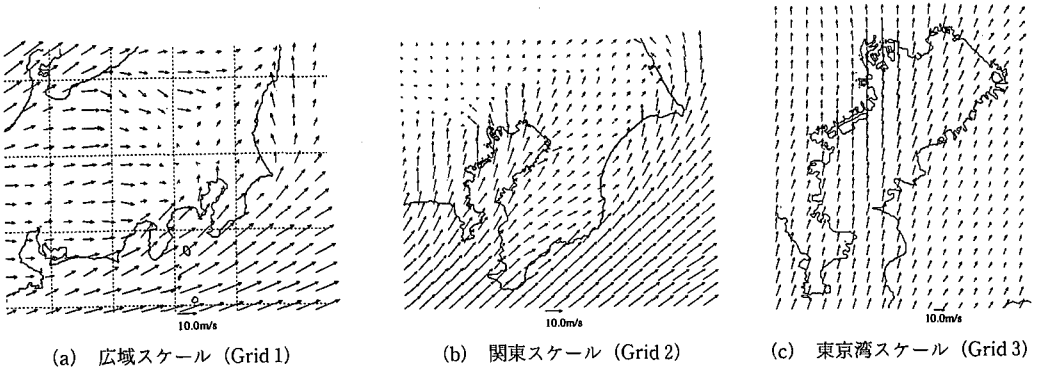


図-3 気象場計算結果の一例 (7/3 15:00)

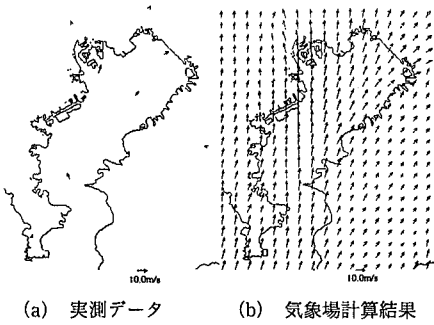


図-4 風の空間分布の比較 (7月3日12時)

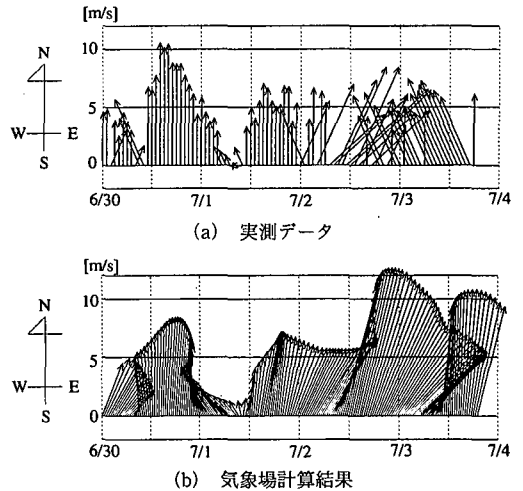


図-5 風向・風速の時系列データの比較 (第二海堡)

ている (two-way nesting). なお、計算期間は後述する原油流出シミュレーションに合わせて1997年6月27日21時から7月3日21時までとした。

(2) 気象場計算の再現性の検討

まず、風の空間構造の再現性を検討するために、典型的な風系パターンが見られた7月3日12時におけるAMeDASなどの実測データと計算結果を図-4に示す。図示にあたっては、対数則を用いて地表面から10mの高さの風速値に変換して表示している。気象場計算結果と実測データを比較すると、湾奥部に見られる発散パターンを気象場計算結果は良好に再現していることが分かる。次に、時間的な変動を比較するために、東京湾上の第二海堡における実測データとその地点での計算結果の時系列データを図-5に示す。これを見ると、計算期間の後半では風向や風速レベルがやや異なるものの、全体的な傾向は概ね一致していることが分かる。以上のようなことから、気象場計算結果は概ね良好に海上風を再現していることが分かる。

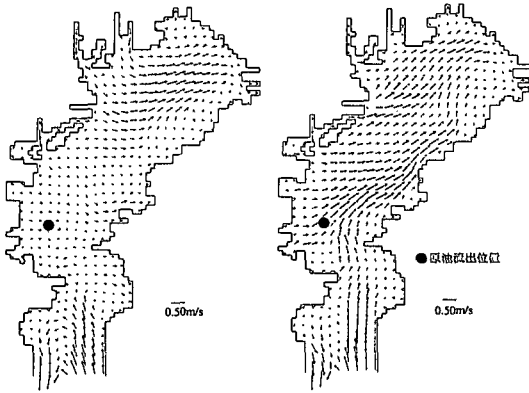
4. 原油流出シミュレーション

(1) 計算概要

1997年7月2日10時頃、東京湾の中ノ瀬付近で起き

たダイヤモンド・グレース号の座礁に伴う原油流出事故を対象にした原油流出シミュレーションを行った。ここでの計算モデルとしては、上述したように、POMにDual- σ 座標系を導入したものを用いることとした。POMでは、静水圧・Boussinesq近似を仮定した3次元NS方程式と連続式を基礎式として、水平・鉛直渦動粘性係数をSmagorinsky型モデルとレベル2.5の乱流クロージャーマデルを用いて算定している。

計算期間は事故前後の6月27日～7月3日までとし、計算領域は城ヶ島・岩井袋以北の東京湾を覆う領域で、水平方向は800mの正方形格子を用い、鉛直方向には水深を15層に分割し、 σ 界面を15mに設定した。境界条件としては、開境界では主要4分潮を潮汐として与えて水位を時間的に変化させた。また、河川条件としては、主要5河川(鶴見川、多摩川、荒川、江戸川、隅田川)を対象として、河川上流端メッシュにおいて塩分濃度を5%、水温を21度に固定した。そこでの流量は、鶴見川、多摩川、江戸川に関しては実測値を用いて、隅田川と荒



(a) case 1 (補間法) (b) case 2 (RAMS)
 図-6 一潮汐間の平均流構造 (油流出直後, 表層)

川に関しては江戸川の実測流量と、環境庁の流量調査結果から得られた江戸川と隅田川、荒川の流量比率を参考にして与えた。

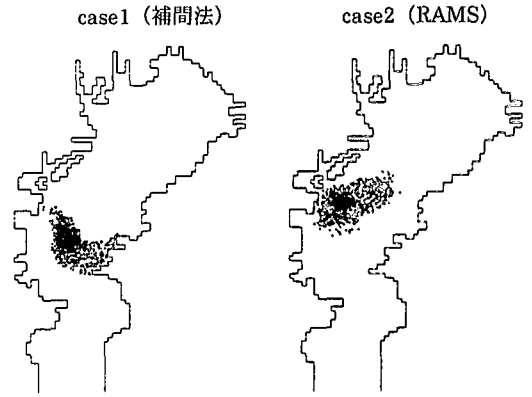
原油の追跡に関しては、原油を鉛直方向に移動しないで水表面上を漂う中立粒子と仮定したラグランジュ的な移流・拡散計算を行った。粒子は、事故記録に基づいて、7月2日10時から3時間にわたって連続的に水表面に計1320個投入した。粒子の移流・拡散計算で用いる水表面流速としては、表層メッシュにおける流速値を用いている。

ここでは、風応力の与え方に着目し、補間法から得られた風応力を用いたケース (case 1) と、RAMSの計算結果に基づくケース (case 2) の2ケースについて行った。

(2) 計算結果及び考察

油流出時における流動特性を把握するために、流出直後の半日周期間にわたって平均された表層流速ベクトルを図-6に示す。これを見ると、case 1 (補間法) では、流出地点近傍では明確な流れはなく、湾奥部において北東向きの流れが存在していることが分かる。それに対して、RAMSの結果を用いたcase 2では、全般的に北東向きの流れとなっており、原油流出点近くでは千葉側に向かう流れが生じていることが分かる。次に、流出事故発生後5、25時間における原油粒子分布に関する計算結果を図-7に示す。計算結果を見てみると、case 1に関しては、図-6(a)に示されている流動パターンに対応して、それほど北上せずに、油流出点付近に拡散して分布している。それに対して、case 2においては、粒子群はまず神奈川側沿いに北上し(図-7(a))、その後千葉側へ輸送されていることが分かる(図-7(b))。

このような油分布に関する計算結果と実測データを比較するために、図-8に、航空写真(7/2 15時、渡辺ら、

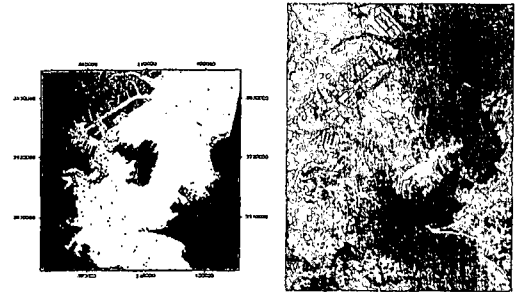


(a) 5時間後 (7/2 15時)



(b) 25時間後 (7/3 11時)

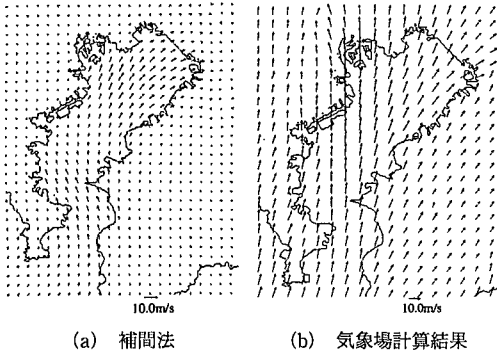
図-7 投入粒子の追跡結果



(a) 5時間後 (7/2 15時) (b) 25時間後 (7/3 11時)

図-8 油膜分布の実測結果

1998) 及び衛星画像 (7/3 11時, SPOT-2) から読みとれた油膜分布を示す。これを見ると、case 1における粒子分布は実測結果よりもかなり南方で神奈川県側に沿って位置しており、実測結果と大きく異なっていることが分かる。それに対して、case 2では、7/2 15時の時点では計算値と実測値は良好に一致し、また、7/3 11時では、全体的に千葉県側に寄っているものの、その北上位置は概ね一致していることが分かる。このような計算結果の相違は、風応力の取り扱いの違いに起因するものと考えられる。両ケースで用いられた風分布の典型例を見てみ



(a) 補間法 (b) 気象場計算結果
 図9 補間法と気象場計算による風分布の比較
 (7月3日12時)

ると(図9), 油流出点付近では, 卓越風向が補間法の場合には南東, RAMSの場合には南もしくは南南西と異なっていると同時に, そこでの風速レベルにも両者に差が生じていることが分かる。このエリアでは, 近くの海上測定点が第二海堡しか存在しないので, 補間法の場合には, そこでの影響を強く受けたために相対的に弱い南東風が広い範囲で設定される形になり, 油分布が北上せずに拡散してしまったものと考えられる。なお, case 2においても, 7/3 15時における粒子分布は, 実測結果よりも千葉側に偏った結果となっている。これは, 主として, 図5に示されているように, 7月3日での流出領域付近での南東風を精度よく再現されていないために, case 2では神奈川県側への粒子の広がりを表現できなかったものと考えられる。このことは, 気象場計算において, 地形変化の大きい富津岬周辺を対象とした高解像度グリッドを設定し, そこでの気象場をより高精度に再現することの必要性を示唆しているが, これについては今後の課題としたい。

5. 結 論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

1) 従来の沿岸流動数値計算法の問題点を解決するために, 流動計算法の高度化を図ることを試みた。具体的には, 従来の σ 座標系に内在する問題点を比較的軽微な計算労力で回避するための方法として提案されたDual- σ 座標系(灘岡ら, 1999a; 吉野ら, 1999)を適用した。そして, 従来まで正確に取り扱われていなかった風応力に対し, 汎用気象モデルに基づく計算結果を用いて評価することを試みた。

2) このように高度化された沿岸流動数値計算法を用いて, 東京湾で発生したダイヤモンド・グレース号の座礁事故に伴う原油流出事故を対象とした数値シミュレーションを試みた。ここでは, 風応力の評価法として, 上述した気象場計算結果を用いる場合と, 著者らが以前提

案した実測データに基づく空間補間法を適用した場合の2ケースについて行った。その結果, 今回の原油流出地点付近は測点の少ない領域であったことから, 気象場計算結果を用いたケースの方がより実測結果に近い原油流出分布が得られることが示された。

謝辞: 本研究で用いた風データは, 東京都港湾局港湾整備部, 千葉港湾事務所, 運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所, 日本気象協会海洋調査課, 京葉シーバース(株)より提供を受けた。河川流量データに関しては, 建設省関東地方建設局京浜工事事務所, 江戸川工事事務所より提供して頂いた。運輸省港湾技術研究所鶴谷広一氏より今回の油流出事故状況に関する情報をご教示頂いた。また東京工業大学日向博文氏からは東京湾の流動シミュレーションに関して数多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 神田 学・井上裕史・鶴野伊津志(1999): “環八雲”の数値シミュレーション, 天気(投稿中)。
- 田中昌宏, Stelling G. S. and A. Markus(1996): 東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 1121-1125。
- 中辻啓二・尹 銀星・白井正典・村岡浩爾(1995): 東京湾における残差流系に関する3次元数値実験, 海岸工学論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 386-390。
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・吉野忠和(1997): 東京湾における風系の時空間変動性の実態と湾内海水流動への影響について, 海岸工学論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 396-400。
- 灘岡和夫・吉野忠和・二瓶泰雄(1999a): 沿岸海水流動数値計算法の高度化のためのDual- σ 座標系の提案, 土木学会論文集(投稿中)。
- 灘岡和夫・吉野忠和・二瓶泰雄・神田 学・鶴野伊津志((1999b): 海上風推定法の提案と非一様風系パターンが海水流動へ及ぼす影響, 土木学会論文集(投稿予定)。
- 吉野忠和・灘岡和夫・二瓶泰雄(1999): 新しい σ 座標系に基づく沿岸海動数値計算法の高度化, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 65。
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・田村正行・村上正吾・木幡邦男(1998): 東京湾におけるタンカー事故による原油流出解析, 海岸工学論文集, Vol. 45, No. 2, pp. 926-930。
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor(1993): Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol. 88, pp. 4579-4592。
- Janjic, Z. I.(1977): Pressure gradient force and advection scheme used for forecasting with steep and small scale topography, *Beitr. Phys. Atmos.*, Vol. 50, pp. 186-199。
- Mesinger, F.(1982): On the convergence and error problems of the calculation of the pressure gradient force in sigma coordinate models, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, Vol. 19, pp. 105-117。
- Pielke, R. A. et al.(1992): A Comprehensive meteorological system-RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol. 49, pp. 69-91。
- Stelling, G. S. and J. A. TH. M. Van Kester(1994): On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes, *Int. J. Numerical Method in Fluids*, Vol. 18, pp. 915-935。