

東京湾におけるタンカー事故による原油流出解析

渡辺 正孝* ・天野 邦彦** ・石川 裕二***
田村 正行****・村上 正吾*****・木幡 邦男*****

1. はじめに

平成 9 年 7 月 2 日午前 10 時 5 分に東京湾内本牧沖約 6 km (中ノ瀬) において原油を積載したタンカー、ダイヤモンドグレース号が座礁し、約 1,550 kl の原油が流出したとされる事故が起こった (図-1)。

タンカーからの油流出が起こった際には、被害低減のためオイルフェンスの設置、油回収船による流出油の回収等の措置により汚染の拡散範囲、程度の軽減が図られるが、これら措置を効果的なものとするためには流出した油の挙動の将来予測を迅速かつ正確に行うことがまず必要になると考えられる。

本研究では、油流出に代表される汚濁物流出が東京湾において起こった場合、流出汚濁物 (油) の移動現象を予測する手法の作成を目的として東京湾の流動計算モデルを用いた粒子追跡手法を適用し、計算結果の検証に航空機及び衛星写真を用いた検討を行った。

2. 検討方法

2.1 流動計算モデル概要及び入力条件

流動計算モデルには Blumberg and Goodrich (1990) により開発された 3 次元循環モデルに熱収支のモデルを組み込むことで改良したモデル (渡辺ら, 1998) を用いることで潮汐流, 吹送流, 水温・塩分に基づく密度流により駆動される流動を再現することを試みた。モデルについての詳細および検証結果については渡辺ら (1998) を参照されたい。

計算の境界条件として取得が必要になる入力条件としては、主要流入河川からの淡水流入量, 湾口における潮汐, 海面における熱収支を評価するための気象条件が挙げられる。

東京湾における主要流入河川からの淡水流入量のデータとしては、鶴見川, 多摩川, 荒川, 江戸川からの日平

均流量については建設省が流量年表の中で公表している。流量年表の公表は測定時期の次年度となっており、今回の検討においては公表データについての入手は不可能であった。しかし、今回の事故の重大性に鑑み、最終的に公表されるデータと若干異なる可能性はあるものの計算時に入手可能な最良のデータである上記 4 河川流量の速報値を建設省関東地方建設局より提供を受け、これらを淡水流入量データとして用いた。隅田川については測定データが入手できなかったため、流域規模が同等の多摩川と同量の流量を入力することで、代替した。

潮汐の作用として城ヶ島と岩井袋における潮汐常数を、さらに水温予測のための気象条件としては日平均気温, 日射量, 雲量, 相対湿度及び風向風速 (千葉気象台) を与えた。表面応力計算のための風向風速は 1 時間平均値 (図-2) を与えた。湾口部における水温, 塩分濃度の境界条件, 水温, 塩分濃度の初期条件としては、公共用水域水質観測結果 (東京都, 神奈川県, 千葉県) を用いた。計算の開始は事故当時の流動条件を再現することを目指して約 2 ヶ月前の平成 10 年 5 月 1 日からとし、7 月 5 日まで $\Delta t = 10$ 秒の時間ステップで行った。

水平方向のグリッドサイズは 1 km × 1 km で、鉛直方向には 10 層に分割した σ 座標系を用いている。また、上記 5 流入河川については上流 10 km までを計算範囲に含めて河口部における淡水, 塩水の混合を計算することで河川からの淡水流入が適切に評価されるようになっていく。また、事故当時すでに東京湾横断道路のトンネル部換気塔 (川崎人工島) 及びトンネル出口部分の木更津人工島 (通称海ほたる) が建設されていたため、現況再現計算において、これらの影響を考慮するためそれぞれ対応する位置の格子において水の流れを妨げる面を与えた。

2.2 流出油の挙動追跡

タンカー事故による油汚染の場合、流出した油の量がすぐには判明しないと言う問題がある。そのため、本研究においては汚染の広がりを限られた情報に基づき予測することを目的とし、流出原油に見立てた粒子をモデルに投入し、これら粒子の軌跡をモデル上で追跡することで汚染範囲の予測を行った。

* 正会員 Ph.D. 国立環境研究所
** 正会員 工博 国立環境研究所 (現 建設省土木研究所)
*** (財) 地球・人間環境フォーラム
**** 工博 国立環境研究所
***** 正会員 工博 国立環境研究所
***** 理博 国立環境研究所

油の移動速度としては式(1)(Hoult, 1972)を用い、モデル計算から得られた流速と風向風速の観測値(千葉気象台における1時間平均値)を代入して得られた重心の移動速度を粒子に与えて軌跡を追跡計算した。

$$\frac{dx}{dt} = U_{\text{current}} + 0.035 U_{\text{wind}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

追跡粒子の投入条件については、どこでどれだけ量の油が流出したのかについての情報が不明であるため、海上保安庁が報告している推定航跡図(図-1)に基づいて座礁した位置から曳航された記録をもとに連続的に粒子を逐次投入することで油の流出を表現した。

3. 検討結果

3.1 事故当日の流動解析結果

風向きにより東京湾における流動及び水質分布は大きく変化することが既往の研究により知られており(例えば, Nakata and Kuramoto, 1992; 田中ら, 1996; 鈴木ら, 1997), 事故が発生した7月2日には南西からの強い風が吹いていたため、流出した油が東京湾全体に広がる

ことが懸念された。計算終了の7月5日までの間、風向きは南～南西の風が吹き続けていた(図-2)。このような風向きの場合、湾西側の河川流入水と風により北向きに流される表層水が衝突し、湾の長軸に垂直に等高線が引かれる形の水温・塩分濃度分布を示すことが知られている(例えば, 中辻ら, 1995)。

今回の計算では、人工島を考慮した場合、しなかった場合の2ケースの計算を行った。人工島の影響については、図-3(a), (b)中に示されるように川崎人工島については該当位置における計算格子の南北間で水の移動が起こらない、木更津人工島については、当該位置において計算格子の南北、東西間でそれぞれ水の移動が起こらないよう、まるで巨大な矢板が存在するという仮定のもとに計算を行っている。この仮定については、計算格子が1 kmであるため、川崎人工島(直径約195 mの円形構造物)の影響については過大に評価されている可能性が高いが、木更津人工島(海底で1480×240 m、海上で650×100 mの矩形構造物)については問題がないとはいえないものの、妥当な仮定と考えられる。

事故が起こった7月2日の日平均流速ベクトルの比較を図-3(a), (b)及び図-4(a), (b)に示す。表層においては、湾全域において東向きの流れが卓越し、湾の東岸に沿って北上する流れが確認できる(図-3(a))。

これに対して、上記2つの人工島を考慮しない場合、表層において湾全体の流れのパターンに大きな違いは見られないものの東京湾東岸側を木更津から北側の千葉に向かう流れは人工島を考慮した場合に比べて強いものとなっている(図-4(a))。

中層における流れについて見ると、人工島がある場合には木更津付近から西向きにやや弱い流れがあることが計算されているが(図-3(b)), 人工島が存在しないとして計算した場合にはこの西向きの流れが強く計算される結果となっている(図-4(b))。

表層、中層における流れについて比較した結果、人工島の有無により湾全体の流れのパターンには大きな違い

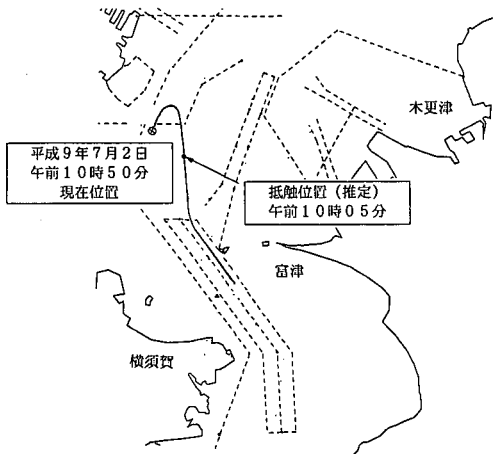


図-1 推定航跡図

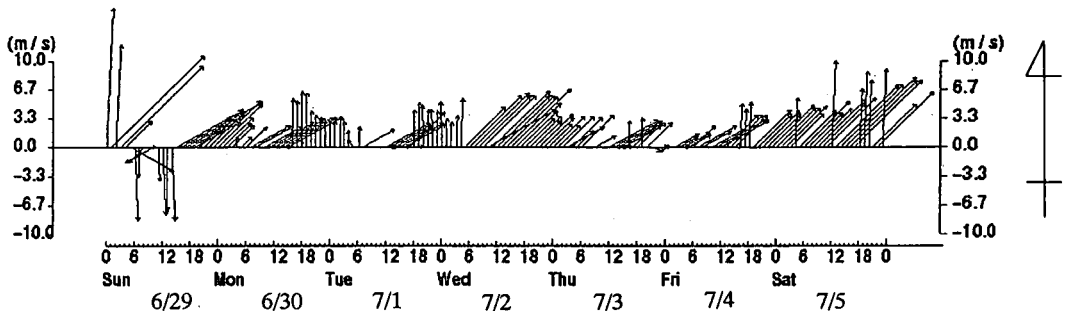


図-2 風向・風速ベクトル図(平成9年6月29日～7月5日)

が見られなかったものの、表層においては東岸側を北に向かう流れ、中層において木更津付近から西に向かう流れについて人工島の影響で抑制されていた可能性を示唆する結果となった。

3.2 油の拡散検討結果

事故発生から約5時間後の7月2日午後3時頃に航空

機から撮影された現場周辺写真をもとに作成した5時間後の油膜の広がりを図-5に示す。川崎港沖に5 km程度の範囲で油膜が広がっていることが示されている。

座礁した位置から曳航された記録を基に連続的に粒子を逐次投入することで油の拡散を追跡する手法を用いたが、事故5時間後の7月2日午後3時における粒子の拡

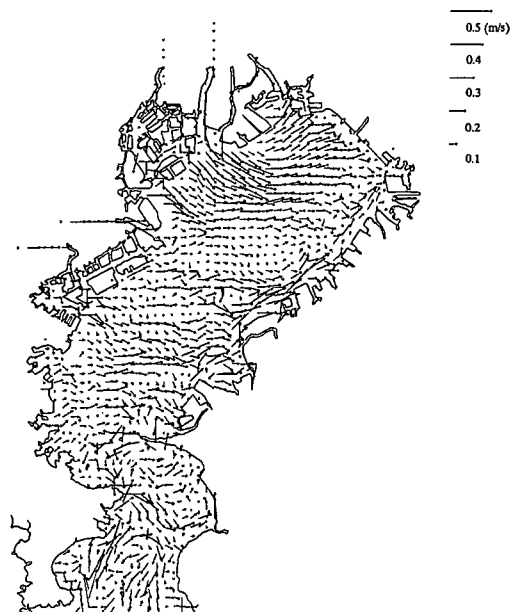


図-3(a) 7月2日の日平均水平流速ベクトル図
(人工島を考慮した場合、表層)

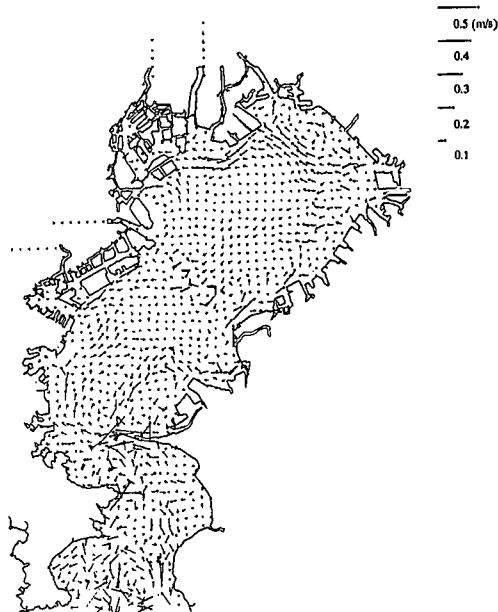


図-3(b) 7月2日の日平均水平流速ベクトル図
(人工島を考慮した場合、中層)

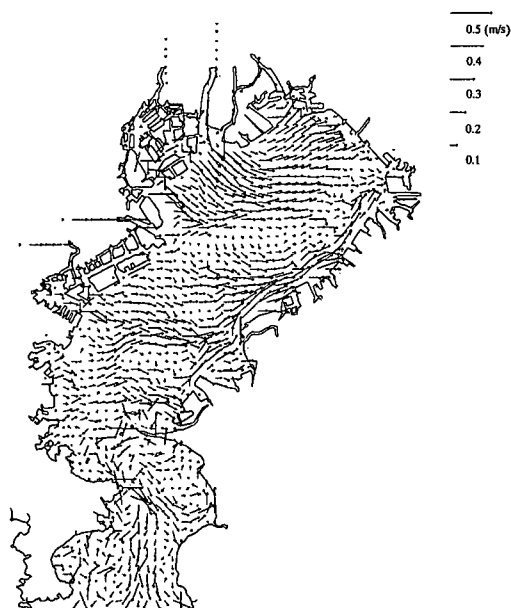


図-4(a) 7月2日の日平均水平流速ベクトル図
(人工島を考慮しない場合、表層)

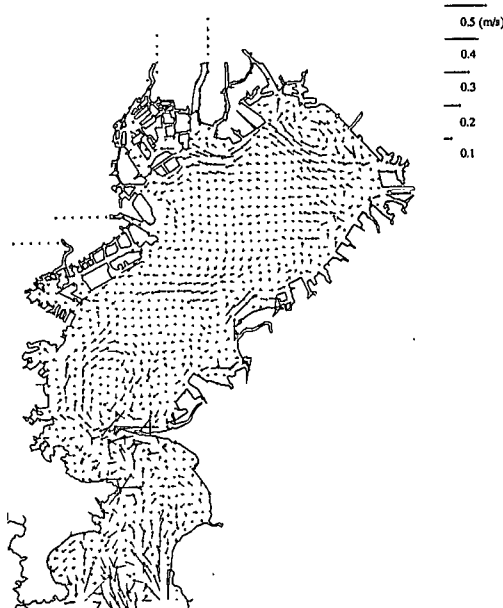
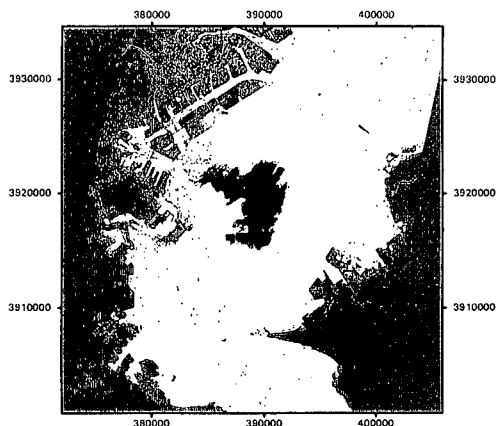
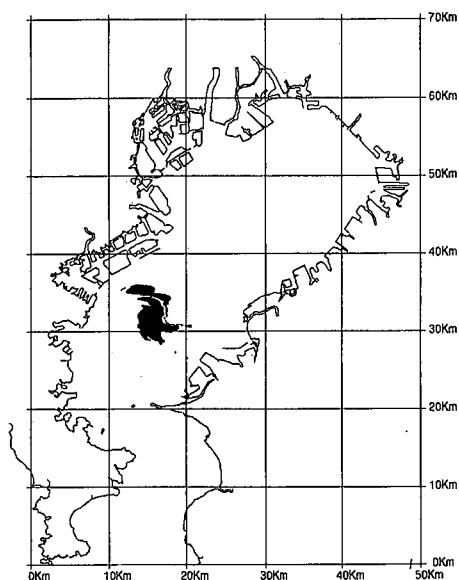


図-4(b) 7月2日の日平均水平流速ベクトル図
(人工島を考慮しない場合、中層)



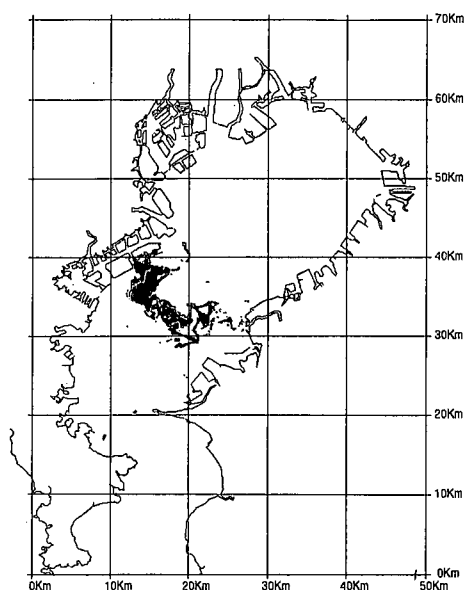
図—5 航空写真より判読した油膜の分布
(平成9年7月2日午後3時頃)
※数字は Universal Transverse Mercator (UTM)



図—6 投入粒子分布 (流出油の分布を示す)
(平成9年7月2日午後3時)

散状況の計算結果と観測結果を比較することで油の流出に関するこの仮定の検証を行った。計算は人工島を考慮したケースの結果を用い、油の流出については図—1に基づき粒子を投入した結果、図—6に示される分布が得られた。当日の流れの分布から得られた東向きの流れによって流出地点より東側へ向かい流出油が拡散していることが分かる。また、この結果は航空写真から得られた分布と良好な一致を示しており、油の流出の初期条件として座礁した位置から曳航された記録を基に連続的に粒子を逐次投入するという仮定が妥当であったことを示す結果となっている。

事故発生から約25時間後(7月3日午前11時)の粒子



図—7 投入粒子分布 (流出油の分布を示す)
(平成9年7月3日午前11時)



図—8 衛星写真 (SPOT-II) に示された油膜の分布 (宇宙開発事業団提供の画像を基に作成 平成9年7月3日午前10時54分)
※数字は Universal Transverse Mercator (UTM)

の分布について図—7に示す。流出した粒子の分布は東京湾の長軸に垂直方向に拡散する結果となっている。7月2日における2潮汐期間の残差流について見ると、表層において横浜港から木更津へと向かう流れが示され、流れの一部は千葉港に向かう北東の方向へと進むが(図—3(a)), 粒子の大部分は、川崎港沖から木更津に向けて帯状に滞留する結果となった。

図—7に示した計算結果とほぼ同時刻の7月3日午前10時54分にSPOT IIによる東京湾の衛星画像が得られている。この画像を基に作成した油の拡散範囲を図—8

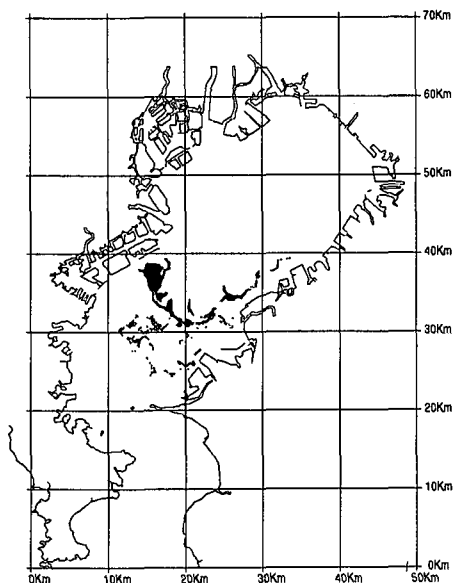


図-9 投入粒子分布 (人工島を考慮しない場合)
(平成9年7月3日午前11時)

に示す。この図から読みとれる油膜の拡散範囲と計算から得られた7月3日午前11時における粒子の拡散の分布は良好な一致を示しており、今回の検討において用いた手法によって流出油の移動現象の予測が、高い精度で可能であることを示す結果となった。

人工島が無いとして計算した場合の油の拡散について、図-7に示した再現計算と同じ時刻における投入粒子の分布を見ることで比較を行った結果、粒子は表層において東京湾東岸を北上する流れにのって湾奥部にまで到達するという結果が得られた (図-9)。

4. 考察およびまとめ

東京湾における流動解析モデルを用いて粒子追跡手法により油の拡散に関する予測計算を行った結果、粒子の挙動は観測された油膜の分布を精度高く再現した。

今回の計算では、新たに建設された人工島の影響評価を盛り込んだ結果、物質移動に重要な残差流について湾全体のパターンは大きく変化しなかったものの、人工島周辺の流れには変化があり、粒子が海面に放出された場合、それらの挙動にも影響することが認められた。人工島の再現には1つの格子間で流れを遮断するという手段を用いたが、川崎人工島が直径約195 mの円形構造物であり、木更津人工島が海底で1480×240 m、海上で650×100 mの矩形構造物であるため現在の方法では影響が過

大に評価されている可能性は否定しきれない。しかしながら、今回の計算結果からは、これら2つの人工島が東京湾における残差流については物質移動に影響を及ぼしている可能性も否定できないため影響についての判断については今後さらに検討が必要と考えられる。

油流出の初期値としては、曳航記録をもとに粒子を注入することで再現を試みた。今回の事故においても初期の段階で油流出の情報が明確には得られていなかったことを考慮すると、初期値の検証を行う意味においても事故直後の油流出状況を正確に把握し、流出特性を検証することがその後の計算結果の精度を向上させると考えられる。今回の検討結果は、海洋における汚濁物流失事故が起こった場合の影響予測を行う場合、航空機および衛星写真からの情報をシミュレーションモデルの検証データとして利用し、シミュレーションモデルによる計算とのカップリングを行うことの重要性を示す結果となった。

油の挙動については流出後のタール化など今回の検討では全く考慮されておらず、さらに改善が必要と考えられるが、量的に見て重要な油膜部分の分布を予測することは今回の検討で用いた手法を適用することで可能と考えられる。

謝辞：河川流量データについては速報値を建設省関東地方建設局より、衛星写真については宇宙開発事業団よりご提供いただいた。記して感謝いたします。

参考文献

- 鈴木 亨・松山優治・長島秀樹 (1997): 成層期の東京湾における北東風による循環流および湧昇域の形成過程に関する数値実験, 沿岸海洋研究, 第35巻, 第1号, pp. 99-108.
- 田中昌宏・Stelling, G. S.・Markus, A. (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, 第43巻, pp. 1121-1125.
- 中辻啓二・尹 鐘星・白井正典・村岡浩爾 (1995): 東京湾における残差流系に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 386-390.
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦男 (1998): 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集, 投稿中.
- Blumberg, A. F. and D. M. Goodrich (1990): Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay, Estuaries, V. 13, pp. 236-249.
- Hoult, D. P. (1972): Oil spreading on the sea, Annual Rev. of Fluid Mech., V. 4, pp. 341-368.
- Nakata, K. and T. Kuramoto (1992): A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo bay, Pro. Adv. Mar. Tech. Conf., V. 5, pp. 107-132.