

10 海洋環境保全のための流出油漂流予測システムの 高度化と今後の展望

浅見 光史*, 高橋 千織*

Integrated system for oil spill contingency and its application to actual cargo ship grounding accident

by

ASAMI Mitsufumi and TAKAHASHI Chiori

Abstract

This paper describes a prediction system that integrates the latest element models of oil spilled into the marine environment. The system simulates oil evaporation, emulsification, and oil dissolution using marine meteorological data with theoretical models of oil entrainment into the water, oil droplet shape, and horizontal/vertical transport of oil. The behavior of heavy fuel oil spilled from a ruptured fuel tank in an actual cargo ship grounding accident was simulated using this system. The simulation results reproduced each location and arrival time of the drifting oil with appropriate accuracy. Furthermore, the effects of the physical properties of spilled oil, including input data for the simulation, were evaluated as an example of sensitivity analysis. The analysis showed that slight differences in the properties such as density and kinetic viscosity coefficient, which were assumed in the simulation, could cause large differences in the movement of spilled oil and the location of drifting oil drifting.

* 環境・動力系

原稿受付 令和 4年4月26日

審査日 令和 4年6月 1日

1. はじめに

予期せぬ事故事象により海洋へ流出した油は、海洋環境に致命的な損害を与える可能性があるのみならず、被害補償にかかる膨大な費用が懸念される。流出油の挙動あるいは拡散範囲を合理的に予測することは、海洋環境の維持や災害への早期対策のために重要である。1970年代の初期の油流出モデルは、穏やかな海または定常流における環境での油膜の三相拡散モデルに基づくものであった¹⁾。海洋に流出した油は、さらに油の物理的および化学的特性、気象海象条件および流体の特性に依存する複雑な過程を経て海洋中を拡散、漂流するほか、海面温度や塩分に依存して蒸発や乳化をする。現在に至るまで、実際の海洋環境の影響を考慮できる要素モデルが多数提案されており、現在ではそれらを統合することにより、油の特性、沈降過程、海流、海上の気流のほか、流出油の風化に関連する要因を反映できると考えられる。

本稿は、現在における最新の知見を統合した流出油漂流予測システムについて、システムを構成する油運命モデルを概要するとともに、このシステムを実際の海洋への油流出事象に適用し、実現象をどの程度再現するかを示す。最後に、本システムあるいは本システムを運用する場合の課題を提示する。

2. 流出油運命モデルの概要

海洋に放出された油は、相互依存する多くの複雑な力や風化過程の影響を受ける。油は、海上の気流および海流に駆動されるほか、時間とともに蒸発、分散、溶解、乳化、光分解、生物分解、沈降あるいは堆積、の過程により風化する。油の風化とともにその物理的な性質が変化するため、それがまた輸送あるいは風化に影響していく。こうした、海洋へ放出された油がどのような運命を辿るかを予測する運命モデルについて概要する。

2.1 海中への油滴連行

流出直後の油は主に海面に存在するので、海上の気流の影響を受ける。このとき、風の吹く距離である吹送距離が短いと海上の気流による摩擦寄与が大きく、長いと波による混合による寄与が大きくなる。このように流出油の駆動力が変化するため、波に影響され海面から海中へ連行される油量を推定するモデルが必要である。Lie²⁾は、海表面で砕波の生じた際の油連行量を推定するために、海表面における油の連行モデルおよび油滴形状モデルを提案した。海表面から海中へ移動する連行量 Q_0 は、無次元数の Weber 数(We)および Ohnesorge 数(Oh)を用いて次式で表される：

$$Q_0 = a \cdot We^b \cdot Oh^c \quad (1)$$

a, b, c は実験により得られるパラメータである。単位時間に生じる砕波に連行する油の割合 Q は、海上の気流により生じる砕波で覆われる海表面の比 F_{bw} を掛けることで得られる：

$$Q = Q_0 \cdot F_{bw} \quad (2)$$

We は慣性力および油-水表面張力の比であり、次式で表される³⁾：

$$We = \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_s \cdot d_0}{\sigma_{0-w}} \quad (3)$$

ρ_w は海水密度、 g は重力加速度、 H_s は有義波高、 d_0 は静止状態での最大油滴径、 σ_{0-w} は油-水表面張力である。 d_0 は、油の密度 ρ_0 を用いて次式で与えられる⁴⁾：

$$d_0 = 4 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{0-w}}{(\rho_w - \rho_0) \cdot g}} \quad (4)$$

Oh は粘性力を慣性力および表面張力に関連付ける無次元数であり、油の動粘性係数 ν を用いて次式で与えられる：

$$Oh = \frac{\nu}{\sqrt{\rho_0 \cdot \sigma_{0-w} \cdot d_0}} \quad (5)$$

実験結果から(1)式の a, b, c は $a = 4.604 \cdot 10^{-10}$ 、 $b = 1.805$ 、 $c = -1.023$ とされるので、(1)の Q は次のようになる：

$$Q = 4.604 \cdot 10^{-10} \cdot We^{1.805} \cdot Oh^{-1.023} \cdot F_{bw} \quad (6)$$

一方、単位時間当たり砕波で覆われる海表面の比 F_{bw} は次式で表される⁵⁾：

$$F_{bw} = \begin{cases} \alpha \cdot \frac{U - U_{th}}{T_s}, & U > U_{th} \\ 0, & U < U_{th} \end{cases} \quad (7)$$

U (m/s)は海面上 10 m での風速、 U_{th} (m/s)は砕波の起きる最小風速、 T_s (s)は有義波周期であり、定数 α は 0.032 (m/s)⁻¹、 $U_{th}=5$ m/s とされる。

砕波の影響により、表面に浮遊する油の一部が沈降する。海表面上の油滴が時間間隔 Δt 中に同伴される確率 p は次式で表される⁶⁾：

$$p = 1 - \exp(-Q \cdot \Delta t) \quad (8)$$

2.2 油滴の形状分布

水中に存在するときの油滴の形は、その移動のみならず、蒸発、乳化のような油の風化過程にも影響を与えるため、油滴形状のモデルが必要である。この形状は、表面張力および粘性に依存する。Johansen⁷⁾および Lie²⁾は、水中における油滴の直径が対数正規分布に従うことを示した。Johansen⁷⁾は Reynold 数(Re)および We 、Lie²⁾は Oh および We を用いて直径の中央値を求めている。何れの液滴形状分布でも、粘性のある油は大きな液滴を呈し、砕波の波高が高くなると小さな油滴を呈する傾向を示す。本稿では、Johansen⁷⁾による分布を用いる。この分布は、海表面の油膜厚にも影響し、厚さが増加すると大きな液滴を呈することを示す。油滴直径の個数中央値 $D_{50}^{(N)}$ は次式で表される：

$$D_{50}^{(N)} = (A \cdot We^{-C} + B \cdot Re^{-D}) \cdot h \quad (9)$$

第1項は We に関連する表面張力の制約、第2項は Re に関連する粘性の制約を示す。(9)式の係数は、経験的に $C = D = 0.6$ 、 $A = 2.251$ 、 $B = 0.027$ が与えられる。 Re および We は次式で与えられる：

$$Re = \frac{\rho_0 \cdot h \cdot \sqrt{g \cdot H}}{\mu}, We = \frac{\rho_0 \cdot h \cdot g \cdot H}{\sigma_{0-w}} \quad (10)$$

個数中央値 $D_{50}^{(N)}$ は、次式で体積中央値 $D_{50}^{(V)}$ に換算できる：

$$\ln(D_{50}^{(V)}) = \ln(D_{50}^{(N)}) + 3 \cdot S^2 \quad (11)$$

S は実験から得られる自然対数単位の対数標準偏差を示す。

2.3 油滴の水平輸送

海洋へ放出された油は、海流および風により輸送される。Jonesら⁸⁾による風のドリフト係数は2%とされる。海表面近傍の油滴が波の伝播方向へ移動する Stokes drift による剪断は、海表面からの深度増加に応じて急激に低下する。風によるドリフト(海表面における風の2%)および Stokes drift(海表面における風の1.5%)を組み合わせた、風速の3.5%が油の水平輸送に寄与することになる。この水平輸送に伴い、海表面から数メートル程度の深さで油が混合される。油滴の鉛直輸送は、2.4に示すモデルで行われる。

2.4 油滴の鉛直輸送

(1) 海中へ沈降した油の再浮遊

海中における油滴は、油滴の直径および油と海水の密度差による浮力に依存して再浮遊する。終端における鉛直上昇速度は、Stokesの法則および液滴周囲の Re を用いて、次式で表される⁹⁾：

$$w = k_w \cdot r^p \quad (12)$$

$Re < 50$ の場合、 $p = 2$ 、 $k_w = 2 \cdot g \cdot (1 - \rho_0/\rho_w)/(9 \cdot \nu)$ 、それ以外では $p = 0.5$ 、 $k_w = \sqrt{16/3} \cdot g \cdot (1 - \rho_0/\rho_w)$ となる。 r は液滴半径である。

(2) 乱流混合

油滴は浮力によって海表面側へ移動するほか、乱流混合によって上下方向に移動する。乱流混合は、鉛直方向の剪断、海水の成層化、あるいは波のエネルギー散逸による風の履歴に依存し、その程度は渦拡散係数で表される。海上の風速から渦拡散係数を概算する簡易法が提案されているが¹⁰⁾、本稿では、海洋循環モデルから得られる渦拡散係数を用いる。ラグランジュ粒子の追跡においては、乱流フラックスはランダムウォークで表される¹¹⁾。各時間ステップにおいて、それぞれの粒子は拡散によりランダムに移動するとともに、浮力に影響される。時間ステップあたりのランダムな移動距離は、渦拡散係数から求められる。

(3) 波による鉛直混合

Craigら¹²⁾によると、砕波による乱流運動エネルギーフラックス ϕ は、海の状態にあまり影響されず、海水側の摩擦速度 u_* および $\alpha \sim 100$ を用いて次式で与えられる：

$$\phi = \alpha \cdot u_*^3 \quad (13)$$

u_* は、海面応力 τ_0 および海水密度 ρ_w を用いて $u_* = (\tau_0/\rho_w)^{1/2}$ と表される。

(4) 乱流渦拡散係数

乱流渦拡散係数 K_{total} は、「大気と海の境界層での剪断による混合」「砕波による直接混合」に関する拡散係数の線形結合

として得られる¹⁷⁾。前者は海洋モデルの乱流クロージャーにより得られ¹³⁾、その渦粘性係数は、乱流運動エネルギー k および乱流長さ l を用いて、次式で得られる：

$$\beta \cdot (2 \cdot k)^{1/2} \cdot l \quad (14)$$

β は経験的モデル定数であり、本稿で用いる Mellor-Yamada レベル2.5モデル¹⁴⁾の場合 $\beta = 0.2$ である¹³⁾。これに海表面近傍での砕波による混合の項を追加して、乱流渦拡散係数 K_{total} は次式で表される¹⁵⁾：

$$K_{total} = \beta \cdot (2 \cdot k)^{1/2} \cdot l + c_w \cdot (2 \cdot k_w)^{1/2} \cdot l_w \quad (15)$$

c_w は経験的定数、 k_w は乱流運動エネルギー、 l_w は波からの混合の乱流長さスケールである。右側第2項は砕波による混合を示す。 l_w は次式で表される¹⁵⁾：

$$l_w = \left(\frac{\phi}{g \cdot f_0} \right)^{1/2} \quad (16)$$

ここで、 f_0 は白波(white cap)の発生期間を表す時間スケールであり、 $f_0 = 0.1 \text{ s}^{-1}$ が用いられる。海表面付近の乱流運動エネルギー k_w は k に等しいとされ¹⁵⁾、 l_w は深さに依存せず、 k は深さとともに急速に減少することから、 K_{total} は海表面近傍の波に依存することになる。

2.5 油の風化

油の風化については、流出油の種類により各風化過程の時間スケールが異なるため、油の種類別に整備されたデータを利用すべきである。そこで、NOAA¹⁶⁾によって開発された ADIOS oil library(NOAA-Oil(2020))の風化データを用いた。これは実測に基づく約1000種類の油に関する特性データベースであり、本研究に必要な蒸発、乳化のような風化過程に関するデータも含まれている。

3. 予測シミュレーションの概要

3.1 青森県八戸港貨物船座礁に伴う燃料油流出事象の概要

2021年8月11日(水)午前7時35分頃、青森県八戸港外で錨泊中の貨物船 CRIMSON POLARIS が強風で流され座礁した。12日には、船橋楼と貨物倉の間で船体が二つに分断され、油の流出が確認された。13日には、燃料タンクの1つが破損し、内部の重油282トン全量が流出したことが明らかとなった。貨物船燃料油流出に関するクロノロジーの概要を表-1、海上災害防止センターによる油漂着状況を図-1に示す。

3.2 計算条件

(1) 海流の計算

本研究では、海洋モデル Princeton Ocean Model (POM)¹⁷⁾から得られる水平解像度1/36 deg.の3次元流速を用いて解析を行った。計算条件を表-2に示す。水平解像度1/12deg.の海流データ JCOPE2M¹⁸⁾再解析値による日平均出力の流速、塩分、水温および水位を時空間的に内挿して初期条件および側方境界条件とし、POMにより水平解像度1/36 deg.、鉛直40層の海流を求めた。海面における熱および放射には WOA 月平均気候値¹⁹⁾を用い、潮汐モデル NAOTIDEJ NAO.99b²⁰⁾を用い

表-1 貨物船燃料油流出に関するクロノロジ概要

2021年 8月11日	07時35分	八戸沖で座礁。
	22時30分	積み荷の木材チップの一部が流出。この時点での油流出はなし。
8月12日	04時15分	船体が分断(No.6貨物艙(3,367トンのウッドチップ積載)およびNo.3燃料タンク(重油282トン積載)の位置)。燃料油の流出を確認。
	17時	長さ約24 km, 幅約800 mに亘り流出。一部は三沢市沿岸に到達。百石町漁協近傍でも確認。三沢市方向へ移動。
8月13日	19時	燃料タンクの1つが破損し内部の重油282トンのほぼ全量が流出の報告。
		流出油の範囲が拡大し約19 kmに分布。青森県三沢市沿岸に漂着。
8月14日		流出油が青森県おいらせ町および八戸市の一部の沿岸の複数箇所に漂着。
8月15日		救命艇2隻が青森県八戸市市川町の沿岸に漂着。
		流出油がおいらせ町の百石漁港に漂着。
8月16日		流出油が八戸港南側の大久喜漁港および深久保漁港沖に浮遊。一部漂着。沖に設置の定置網一帯に油膜が分布。
		流出油が青森県六ヶ所村三沢対射爆撃場から八戸市の八戸港八太郎4号埠頭までの4市町村の沿岸各地に漂着。
8月18日		流出油が船体から北西方向に約2 km, 幅約200 mに亘り帯状に分布しており、船体から未だ流出している旨報告。海中に暴露された燃料供給タンクとエンジンをつなぐ配管から漏出の可能性が報告。
8月20日		配管からの漏洩を防護する作業終了。



図-1 沿岸への油漂着状況

表-2 海洋モデルの計算条件

基本海洋モデル	Princeton Ocean Model (POM)
計算解像度	1/36deg. (経度および緯度)
初期条件および側方境界条件	JCOPE2M再解析データ(解像度1/12deg. (経度および緯度), 日平均値)
データ同化	JCOPE2M再解析データを用いて, 200 m以深で塩分および水温を逐次修正。
海面気象データ	JMA GPV-MSM 初期時刻(0時間)データ(解像度0.05deg. (経度), 0.0625deg. (緯度))
計算領域	longitude:141-142.5deg., latitude:40-41.5deg.
乱流モデル	Nakanishi and Niino (2009)
潮汐	潮汐モデルNAOTIDEJ NAO.99bを使用。

表-3 海洋流出油運命予測の計算条件

基本モデル	OpenDrift
放出源座標	Longitude: 141.504405, latitude: 40.57888 (8/12 00:00におけるAIS情報による位置)
放出源の移動	放出源座標から移動なし。
放出源半径	10 m
放出源面分布	Gaussian
1粒子あたり油質量	282 kg/particle
放出計算粒子数	1000 particle
全油流出量	282 ton
流出油性状	NOAA Oil Library: IFO-80LS 2014(100%)
流出開始-終了時刻	2021/08/12 04:15-08/12 05:15(1時間で全量放出)
油流出位置	海表面に放出。
陸域接触粒子	計算粒子が陸域に接触した場合, 全量が陸域に付着し, 計算から除去。
水平拡散係数	100 m ² /s
計算期間	2021/08/12 04:15-08/16 20:45
油風化過程	蒸発, 乳化過程を考慮。
油回収	非考慮(08/14に約1100m ³ 回収(油水分離前量))。

て潮汐を与えた。海上の気流には, JMA GPV-MSM 初期時刻データによる6時間値を用いた。なお, 200 m以深における塩分および水温をJCOPE2M再解析値でナッジングすることにより逐次修正をした。

(2) 海洋流出油の運命予測

海洋モデルによって得られた3次元流速を用いて, 海洋へ流出した油の運命予測を行った。計算条件を表-3に示す。計算のフレームワークにOpenDrift²¹⁾を用いた。油の放出源は, 当該貨物船から発信されたAIS(自動船舶識別装置)から, 8月12日00時00分に位置したとされる座標とした。この放出源は移動せず, 半径10mにおいてGaussian分布で放出させた。計算粒子数は1,000に設定しており, 全油流出量を282tonとした場合, 1粒子当たりの油質量は282kgである。流出油はIFO-80LS 2014であるとした。密度および動粘性係数はそれぞれ, 956.0 kg/m³(15.5°C), 58 cSt(50°C)である。油の流出開始時刻を8月12日4時15分とし, 海表面へ放出開始後1時間で全量放出すると仮定した。

4. 計算結果

2.で概要した流出油運命モデルを用いて, 3.に示す計算条件に基づき, 青森県八戸港貨物船座礁に伴う燃料油流出事象の予測シミュレーションを行った。以下, 表-1に示したクロノロジにあわせて, 図-1に示される実測で確認された油漂着の状況とともに, 計算結果との比較を行った。

4.1 海表面への流出直後

表-3の計算条件のとおり, 8月11日07時35分に八戸沖で座礁した貨物船は, 12日04時15分に船体が分断し, 燃料タンクから燃料油が流出を開始, 13日19時には, 1つの燃料タンク内部の重油282トンのほぼ全量が流出されたことが確認されている。このとき, 流出油の範囲が拡大し約19kmに分布, 青森県三沢市沿岸に漂着している。図-2は, 8月12-

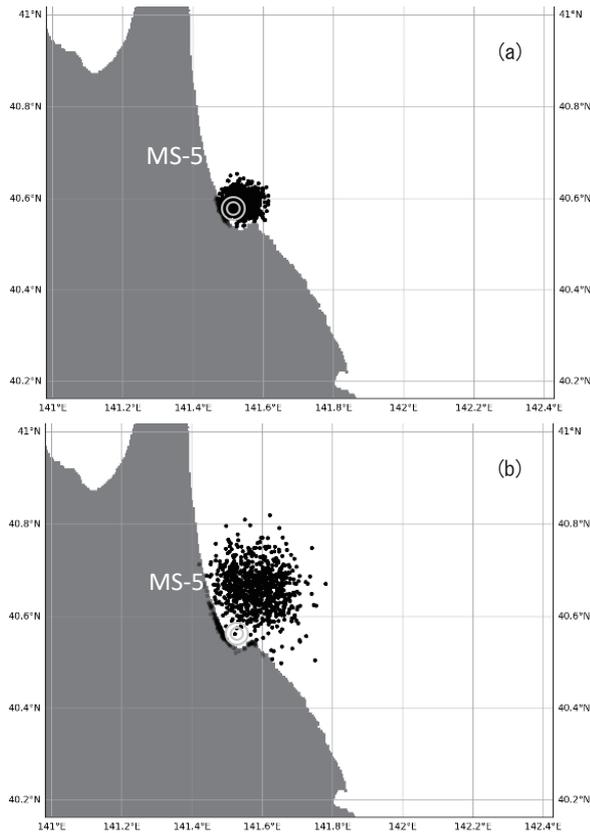


図-2 油流出直後における油の分布の推移。(a) 12日。(b) 13日午後。◎は放出源。

13日における流出油のシミュレーション結果である。これらの図は、流出油は、12日に三沢市沿岸に到達するもの数 km 範囲(経度 0.1 deg.範囲)にとどまっているが、時間の経過とともに、13日には約 20 km 範囲(経度 0.25 deg.範囲)に分布が拡大することを示唆しており、実測結果を概ね再現している。

4.2 海流および海上の気流による広域への拡散

図-3は、8月14-16日における流出油シミュレーション結果である。表-1によると、14日には、流出油が青森県いらせ町および八戸市の一部の沿岸の複数箇所に漂着していることが確認されている。対応するシミュレーション結果が図-3(a)であり、流出油が八戸市から北北東方向へ移動しつつ沿岸へ漂流していくことを示唆する。16日には、流出油は八戸港南側の大久喜漁港および深久保漁港沖に浮遊、一部漂着し、また沖では定置網一带に油膜が分布していることが確認されているが、ほとんどの計算粒子が北北東方向へ移動するのに対して、図-3(b)(c)が示すように、少数の粒子は南東側へ移動し、小さな海流および海上の気流にしたがい、大きく移動せずに(c)に示す楕円領域近傍を漂うことを示唆しており、実測結果を再現する結果となっている。北上した油の一部は、漂着の確認された青森県六ヶ所村三沢対地射爆撃場から八戸市の八戸港八太郎4号埠頭までの4市町村の沿岸各地への漂着を示唆している(図-3(c) 白い矢印で図示する範囲)。

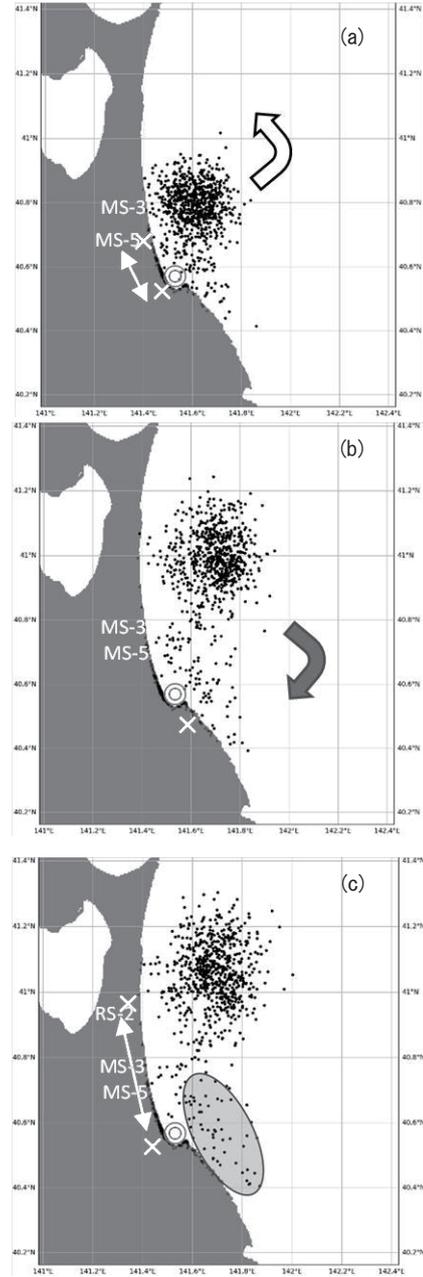


図-3 油流出から数日経過後における油の分布の推移。(a) 14日午前。(b) 16日午前。(c) 16日午後。◎は放出源。

5. 考察

青森県八戸港貨物船座礁に伴う燃料油流出事象を対象として、3.2に示した計算条件を用いて流出油シミュレーションを実施した結果、報告されている沿岸への油漂着状況の経時変化を再現することが明らかにされた。表-3に示す海洋流出油運命予測の計算条件に関しては、多くの仮定が含まれている。中でも「流出油性状」は、本シミュレーションで移動や変化を追跡する物質そのものであり、計算に対する感度も高いと考えられる。ここでは、流出油の違いにより拡散状況がどの程度異なるかを検討した。このため、流出油として、動粘性係数の大きい重油 INTERMEDIATE FUEL OIL300 (SOCSEX)(密度 986.0 kg/m³(15°C), 動粘性係数 494 cSt(50°C))

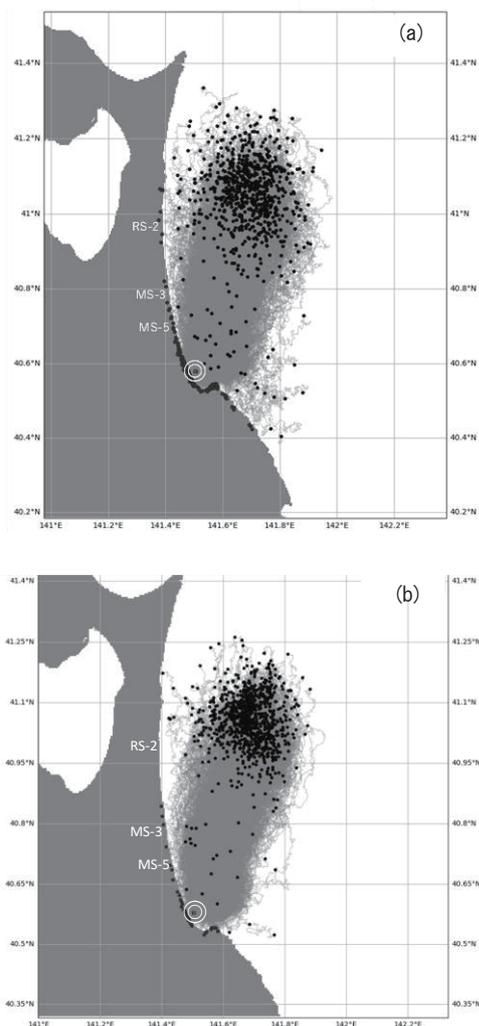


図-4 油流出開始から計算終了までの流出油の軌跡。一部の粒子は陸域へ漂着している。(a) IF0-80LS 2014, (b) INTER-MEDIATE FUEL OIL300を放出油として仮定。◎は放出源。

を仮定した。その他の計算条件は表-3と同一である。図-4に計算結果を流出油の軌跡として示す。(b)は、(a)と比較して、陸域への漂着位置が粗になる。油流出直後の海流および海上の気流は、いずれも北北東へ向かう流れが卓越する。規制前の重油が規制後と比較して密度および粘性が大きく、海流および海上の気流による慣性力による移動量が小さくなることから、油の放出直後に陸域方向へ移動する量が少なくなり、その後水平方向に拡散する際にも、陸域へあまり漂着することなく、沖側へ移動していくと考えられる。

6. 結論および課題

本稿では、現在における最新の知見を統合した流出油漂流予測システムについて、システムを構成する要素モデルを概要し、このシステムを実際の海洋への油流出事象に適用し、実測で確認される油の漂着位置と比較することで、漂着する時間および位置を概ね再現できることを示した。また、計算条件の仮定値の一つである、流出油の性状を感度評価の一例

として挙げ、油により漂着位置に大きな違いが生じることを明らかにした。本稿では流出油に関する感度評価のみを示したが、流出油は主に海表面を移動することから、海上の気流に大きく影響され、移動量が大きい。そのため、実事象に適切に対応した油の流出源位置、流出時間および流出率を設定する必要がある。また、流出油漂流の駆動力の一つである予測海流については、海洋モデルに基づく精度が必要とされるが、予期せぬ事故事象に迅速に対応できるようにするためには、必要に応じて任意の領域における予測海流が常時提供されるような環境整備が必要と考えられる。

References

- 1) Fay, J. A.: The spread of oil slicks on a calm sea. Oil on the Sea Plenum, New York, 1969.
- 2) Li, Z. et al., *Mar. Pollut. Bull.*, 119(2017), 145–152.
- 3) Reed, M. et al., Tech. rep., SINTEF Institute for Materials and Chemistry, Trondheim, Norway, 2009.
- 4) Grace, J. R. et al., *Can. J. Chem. Eng.*, 56 (1)(1978), 3–8.
- 5) Holthuijsen, L. et al., *J. Phys. Oceanogr.*, 16(1986), 290–297.
- 6) Röhrs, J. et al., *Ocean Science*, 14, 6(2018), 1581-1601.
- 7) Johansen, O. et al., *Mar. Pollut. Bull.*, 93(2015), 20–26.
- 8) Jones, C. E. et al., *J. Geophys. Res. Ocean.*, 121(2016), 7759–7775.
- 9) Tkalic, P. et al., *Mar. Pollut. Bull.*, 44(2002), 1219–1229.
- 10) Sundby, S., *Deep-Sea Res. Pt. I*, 30(1983), 645–661.
- 11) Visser, A. W., *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 158(1997), 275–281.
- 12) Craig, P. D. et al., *J. Phys. Oceanogr.*, 2546–2559(1994).
- 13) Warner, J. C. et al., *Ocean Model.*, 8(2005), 81–113, 2005.
- 14) Mellor, G. L. et al., *Rev. Geophys., Space Phys.*, 20(1982), 851-875.
- 15) Röhrs, J. et al., *Limnol. Oceanogr.*, 59(4)(2014), 1213-1227.
- 16) Lehr, W. et al., *Environ. Modell. Softw.*, 17(2002), 189–197.
- 17) Mellor, G.L. et al., *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications*, Springer, New York, 55-72, 2002.
- 18) Miyazawa Y. et al., *J. Oceanogr.*, 65(2009), 737-756.
- 19) Conkright, M. E. et al., *World Ocean Atlas 2001*, NODC Internal Rep. 17, 17, 2002.
- 20) Matsumoto, K. et al., *J. Oceanogr.*, 56(2000), 567-581.
- 21) Dagestad, K.-F. et al., *Geosci. Model Dev.*, 11(2018), 1405–1420.