

漂流予測における流出油の性状変化について

寄高博行, 岡野博文: 海洋研究室

宗田幸次: 海洋調査課

澤井幸保: 環境防災課

Change of Properties of Spilled Oil in Trajectory Prediction

Hiroyuki YORITAKA and Hirofumi OKANO: Ocean Research Laboratory

Kouji MUNEDA: Ocean Surveys Division

Yukiyasu SAWAI: Marine Environmental Protection and Disaster Prevention Division

1 はじめに

油流出事故が発生した場合、速やかに防除措置を講ずる必要があるが、流出油の性状の変化は、防除措置に大きな影響を与える。流出後の油の性状（残存量及び粘度）の変化は、蒸発量と含水量によって定まる。これら流出油の性状変化を予測し、防除措置の参考資料とするため、平成12年6月に運用が開始された漂流予測計算プログラムに、流出油の蒸発と含水の過程を組み込み、指定時間後の残存量と粘度を表示する機能を追加した。本報告では用いた既存の研究結果を概説し、漂流予測計算プログラム内の使用法を記述する。

2 流出油の性状変化

2.1 蒸発

油は様々な炭化水素等の有機化合物の混合物であり、蒸発を取り扱う場合には沸点によって分類した数種の成分に分け、各成分毎の蒸発方程式を連立させて数値的に解くという手法が用いられてきた（*e.g.* Rasmussen, 1985）。しかし水槽実験の結果を解析して蒸発に係わるパラメータを決定するためには支配方程式が単純であることが求められることから、S&O財団（1995）は油を蒸発成分と難蒸発成分の2成分で近似する手法を提案し、同時に実施されたオマーン原油に対する水槽実験結果に適用した。その後、石油連盟（1998）が実施した26種の原油と

C重油に対する水槽実験結果を解析し、S&O財団（2000）はそれぞれの油種に対して2成分系モデルにおけるパラメータを求めている。

S&O財団（1995）に従うと、蒸発率 Q は、

$$Q = Q_{100} - \frac{1}{3}(Q_{100} - Q_{0.1})(2 - \log_{10} \frac{t}{T_Q}) \dots\dots\dots(1)$$

と対数曲線に乗る。ここで、 t は経過時間、 T_Q は蒸発時定数、 $Q_{0.1}$ 、 Q_{100} 、はそれぞれ $t/T_Q = 0.1$ 、100のときの蒸発率（経過時間 t までに蒸発した重量/初期重量）を示しており、 $t/T_Q = 0.1$ は揮発成分が抜け、2成分系として対数曲線に従い始める時刻、 $t/T_Q = 100$ は蒸発成分がほぼ蒸発して難蒸発成分のみが残る時刻と見なせる。

2.2 含水

油と海水は静置しておくとは直接は混ざり合わないが、海域に流出した場合には主に波浪の影響で油中に海水が取り込まれ、一部の例外を除き、ムース化した高粘度油を形成する（water in oilの状態；w/o型エマルジョンの状態）。Rasmussen（1985）は含水率を計算するために、含水率の上昇率が波浪の大きさの関数である含水速度と[飽和含水率-含水率]の2因子に比例するという微分方程式を用いた。しかし、この式には蒸発によって油分が減少する効果が含まれていないため、S&O財団（1995）は新たに蒸発等の効果を取り入れた含水率の微分方程式を提案した。影響の小さい密度変化の効果を見捨ると、

$$\frac{dY_w}{dt} = \frac{1}{1-Q} \left\{ \frac{K}{h} (Y_s - Y_w) (1 - Y_w)^2 + (1 - Y_w) Y_w \frac{dQ}{dt} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで Y_w は含水率(水分の体積/全部の体積)を、 K は単位時間に単位面積を通じて無水油が取り込む水の含水速度を、 h は油膜の厚さを示す。 Y_s は飽和含水率で、

$$Y_s = Y_e \frac{1 - Q_e}{1 - Q_e + (1 - Y_e)(Q_e - Q)} \dots\dots\dots(3)$$

と表される。ここで Y_e は終端飽和含水率を示し、 Q_e は終端蒸発率を示し Q_{100} にほぼ等しい。

2.3 動粘度

含水による粘度の変化は Hossain and Mackay (1980) によって提案されており、

$$\eta = \eta_{oil} \cdot e^{2.5 \left(\frac{Y_w}{1 - 0.654 \cdot Y_w} \right)} \dots\dots\dots(4)$$

と表される。ここで η は粘度、 η_{oil} は無水油の粘度を示す。S&O 財団 (1995) は(4)式から水槽実験における η_{oil} を逆算し、その対数が蒸発率に対して線形に変化することから、

$$\eta_{oil} = \eta_0 \cdot \beta^Q \dots\dots\dots(5)$$

を提案した。ここで η_0 は初期粘度を示す。

動粘度を算出するための密度は含水によって、

$$\rho = \rho_{oil} (1 - Y_w) + \rho_w Y_w \dots\dots\dots(6)$$

と変化する。ここで ρ は密度を、 ρ_{oil} は無水油の密度を、 ρ_w は海水の密度を示す。S&O 財団 (1995) は(6)式から水槽実験における ρ_{oil} を逆算し、蒸発率に対して線形に変化することから、

$$\rho_{oil} = \rho_0 + \alpha \cdot Q \dots\dots\dots(7)$$

を提案した。ここで ρ_0 は初期密度を示す。動粘度 ν は η/ρ で計算される。

3 性状変化テーブルの作成

3.1 原油及びC重油

上記の式及びS&O財団(2000)の解析によるパラメータを用いて、流出から200時間後まで1時間毎の

蒸発率、含水率、動粘度、密度のテーブルを作成した。含水方程式(2)についてはルンゲ・クッタ法を用いて数値的に解いた。時間ステップは短いほど望ましいが、0.01時間で有効数値内の精度は確保できた。石油連盟(1998)による水槽実験は26種の原油及びC重油について、それぞれ2種類の水温(10℃と25℃)と風速(2.6m/sと6.4m/s)の条件下で行われており、風速の2条件はそれぞれ波浪階級1と2に対応している。このうちライト・セリア原油(ブルネイ)の含水率については高水温・強風でのパラメータが得られていないため、高水温・弱風と低水温・強風の平均のパラメータを用いた。計算結果の例として、マーバン原油(アラブ首長国連邦)とC重油の性状変化を第1図に示す。

油流出事故が発生した場合に油種に関する詳しい情報が得られないことも想定されるため、全ての原油の代表値、各地域(中東、東南アジア、オセアニア、中南米、極東)の代表値、各産油国の代表値もそれぞれ算出した。代表値の算出にあたっては、石油連盟が公表している各油種の1998年10月~2000年9月までの輸入量を重みとして、

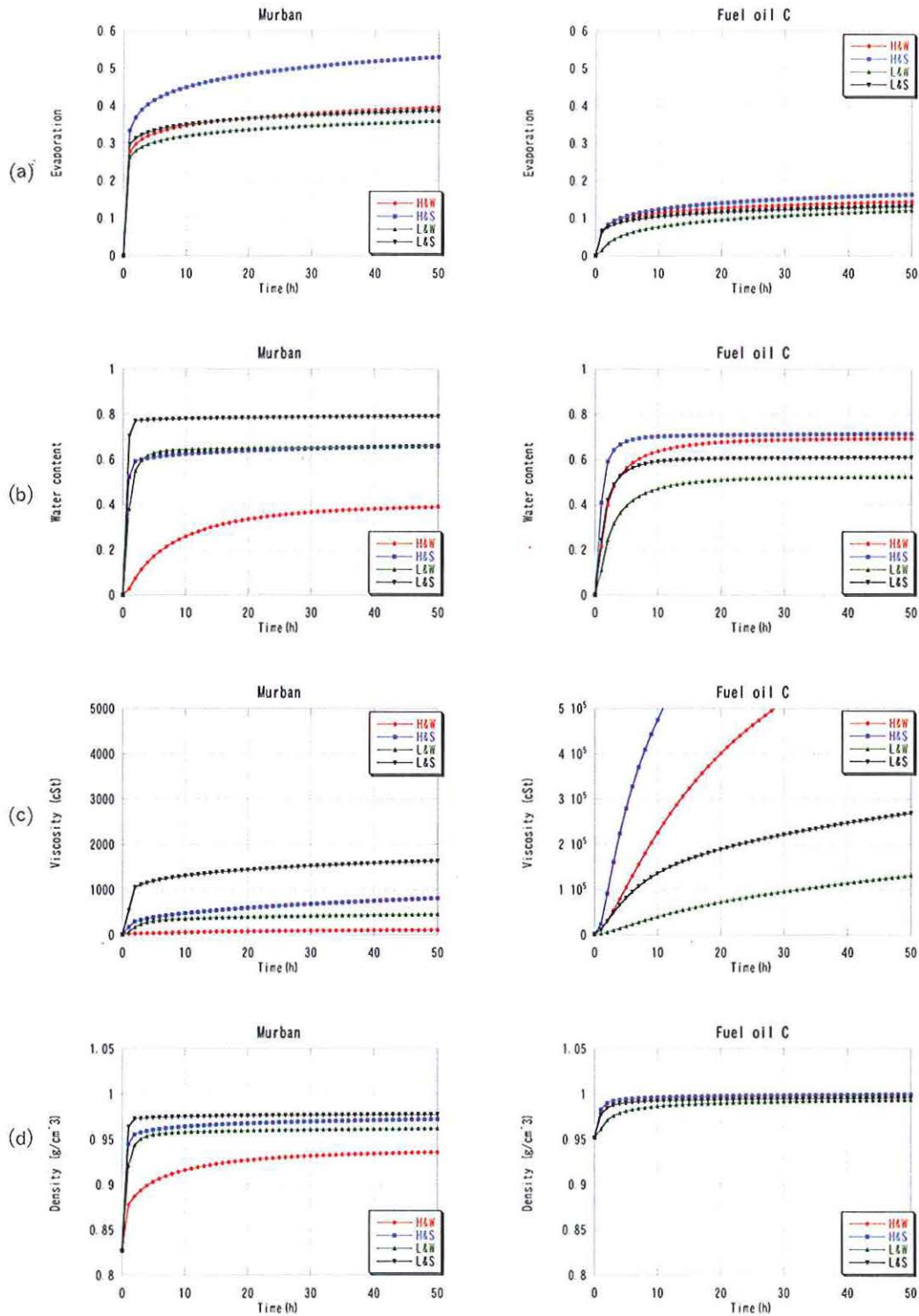
$$X = \frac{\sum V_i \cdot X_i}{\sum V_i} \dots\dots\dots(8)$$

とした。ここで X は蒸発率、含水率、動粘度、密度を、 V は輸入量を、添字の i は各油種を示す。石油連盟(1998)による実験油種と輸入量を第1表に示す。ベリー原油(サウジアラビア)と勝利原油(中国)については輸入量が不明なためテーブルから削除した。また、実験が行われていないピルトン原油(ロシア)については、低流動点、軽質という情報から暫定的に類似のマーバン原油の解析結果を使用することとした。

3.2 A重油、ガソリン、ナフサ

石油連盟(1998)の実験対象となっていなかったA重油については、その後実施され、公表された追加実験のデータを用いて、S&O財団(2000)の手法と同様に(1)~(7)式に対する最小自乗法でパラメータを求め、性状変化テーブルを作成した。

また、ガソリン及びナフサの軽質油については日本造船協会(1981)の実験データを使用した。この



第1図 マーバン原油(左)とC重油(右)の性状変化。(a)蒸発率, (b)含水率, (c)動粘度 [cSt], (d)密度 [g/cm³]. 赤は高水温・弱風, 青は高水温・強風, 緑は低水温・弱風, 黒は低水温・強風の条件を示す
 Fig. 1 Change of properties of Murban crude (left panels) and fuel oil C (right panels). (a) evaporation rate, (b) water content rate, (c) kinetic viscosity [cSt] and (d) density [g/cm³]. Red marks denote high water temperature and weak wind, blue marks denote high water temperature and strong wind, green marks denote low water temperature and weak wind, black marks denote low water temperature and strong wind conditions.

第1表 石油連盟(1998)が実験した原油と1998年10月~2000年9月の輸入量[kL].

Table 1 Crude oils examined in Petroleum Association of Japan (1998) and imported volume for October 1998 to September 2000.

産地域	産国	油種	輸入量(kL)
東南アジア	マレーシア	ラブアン・ライト	335,799
	ブルネイ	ライト・セリア	3,153,460
	インドネシア	アタカ	197,967
		デュリー	2,555,773
		スマトラライト	15,923,790
中東	イラン	イラン・ライト	14,418,284
		イラン・ヘビー	20,161,227
		フローザン・ブレンド	16,768,283
		アラビアン・ライト	21,383,524
	サウジアラビア	アラビアン・ヘビー	11,546,059
		アラビアン・ミディアム	17,356,183
		ペリー	-
	クウェート	クウェート	30,709,066
	分割地帯	ワフラ	7,837,408
		カフジ	15,436,445
		ブート	2,129,990
	カタール	カタール・マリン	18,049,083
	オマーン	オマーン	28,330,523
	アラブ首長国連邦	マーバン	46,219,467
		ウムシャイフ	19,626,978
ドバイ		3,222,701	
アッバー・ザクム		28,055,550	
ムバラス・ブレンド		3,344,232	
中南米	メキシコ	イスマス	1,995,024
オセアニア	オーストラリア	ワンドゥー	1,500,124
極東	中国	勝利	-

実験は室内外様々な条件で行われているが、測定間隔が不均一なため全て同じ条件として取り扱った。その際、これらの軽質油に対しては含水過程を無視できるとして(1), (5), (7)式に対するフィッティングを行った。

4 漂流予測計算プログラムでの利用

改良された漂流予測計算プログラムにおいては、上記の手法により作成された流出油の性状変化テーブルが読み込まれ、200時間後までの予測が可能となっている。予測条件入力画面では、「原油」「ガソリン」「ナフサ」「A重油」「C重油」の5種から選択する形式となっており、「原油」を選択した場合には詳細設定画面において油種を指定できる。また、予測条件入力画面で油を選択した場合には、流出量 V_0 を kL 単位で入力する必要がある。計算開始にあたっては、ガソリン、ナフサの軽質油を除いて石油連盟(1998)の実験条件に従って、水温の高・低、風速の強・弱を設定する必要がある。しきい値を実験条件の平均値をとって17.5°C, 4.5m/s とし、リアルタイムデータベースから読み込まれた流出点の水

温、風速がしきい値の上か下かを判断し、それぞれ該当する時系列を使用する方法を採った。

流出油対策の参考資料とするため、漂流予測結果の出力には動粘度と残存量が記される。残存量は油量(水分を除いた量) V_{oil} と漂流量(水分を含んだ量) V が併記され、

$$V_{oil} = V_0 (1 - Q) \dots\dots\dots(9)$$

$$V = V_0 \frac{1 - Q}{1 - Y_w} \dots\dots\dots(10)$$

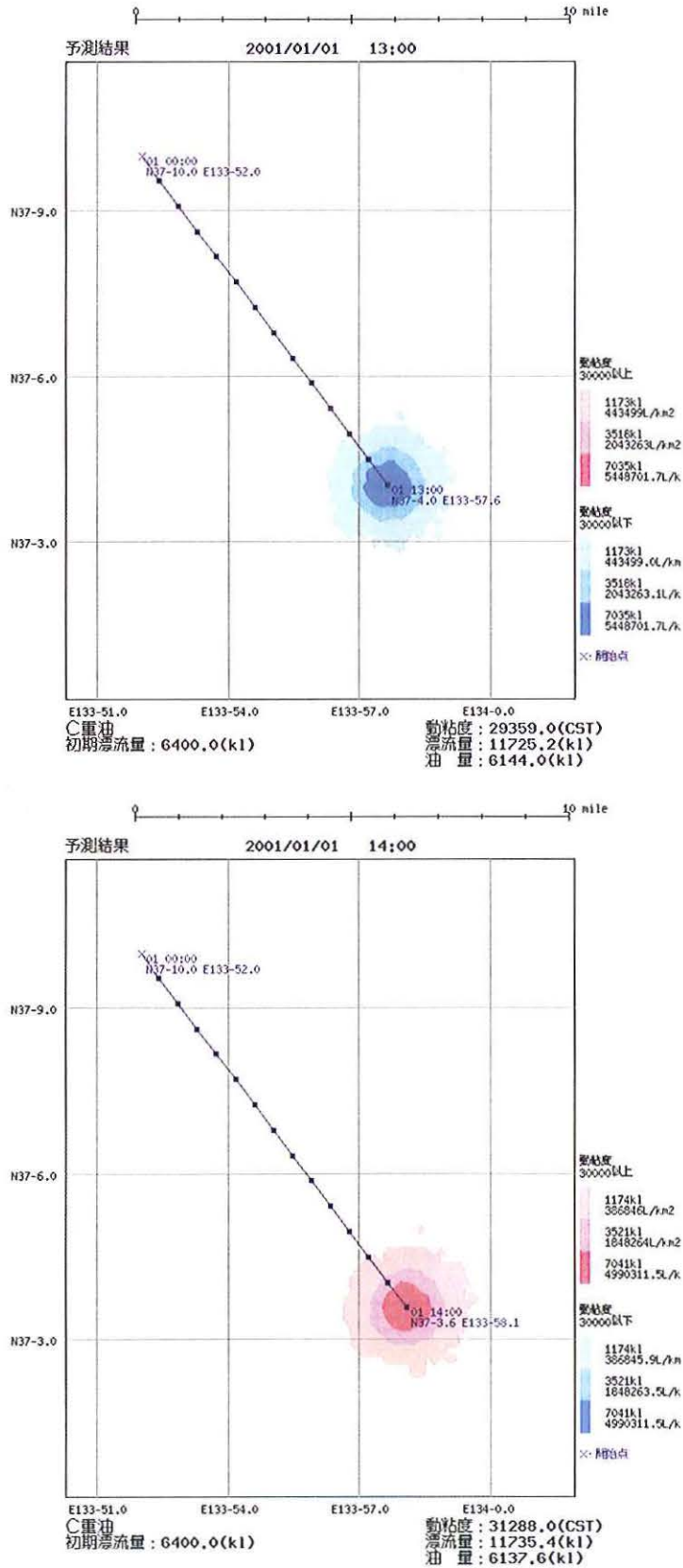
で計算される。

流出油の高粘度化は防除措置に影響を与えるため、プログラムでは30,000cStをしきい値として、動粘度が時間とともに増加ししきい値を越えた場合に分布表示を青系統から赤系統に変更して注意喚起を行っている(第2図)。また、このしきい値は詳細設定画面において変更可能となっている

流出油の広がりについては、重力、慣性、粘性、界面張力など内部の力学的要因による広がりが論じられているが(e.g. Fay, 1969)、これらの過程は流出のほんの初期でのみ支配的であるため、プログラムでは通常の漂流物と同様に乱流拡散によるのみ拡がるとした。分布表示は粒子密度の大きいメッシュからソートして60%, 30%, 10%に分割し、それぞれの領域について単位面積あたりの漂流量を示している(第2図)。

5 おわりに

水路部においては平成11年度から流出油の性状変化を漂流予測プログラムに組み入れるための検討を始めたが、過去の調査・研究対象とは異なる分野のため知見・情報に乏しく、基礎的な資料の収集から開始するという段階であった。一方、漂流予測精度向上のために平成10年度に設置された警備救難部と水路部による「漂流予測に関する合同検討委員会」においては、漂流予測精度の精度向上方策最終報告書を平成11年3月にとりまとめた後、フォローアップのための委員会においてやはり平成11年度から流出油の性状変化予測に関する検討が開始された。その検討過程で幸いにも当該分野に詳しいシップ・アンド・オーシャン財団の協力が得られ、最新の知見



第2図 高粘度化前(上)と高粘度化後(下)の油分布表示

Fig. 2 Display of oil distribution for 'before high viscosity' (upper panel) and 'after high viscosity' (lower panel).

を取り入れた油の性状変化予測機能を漂流予測プログラムに組み入れることができた。今回漂流予測プログラムに組み込んだ機能が流出油の防除措置を計画するにあたって一助となれば幸いである。

謝辞

資料の収集及び解析にあたり、シップ・アンド・オーシャン財団菅原一美研究員及び田崎 亮氏（元シップ・アンド・オーシャン財団顧問）に多大なご支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- Fay, J. A. : The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea, in *Oil on the Sea*, Prentice-Hall, New York, pp.53-64 (1969).
- Hossain, K. and D. Mackay : Demoussuffier-A New Chemical for Oil Spill Countermeasures, *Spill Technology Newsletter*, 5, 6, 154-156 (1980).
- 日本造船研究協会：海洋油濁防止装置の性能評価基準に関する調査報告書，64pp (1981)。
- Rasmussen, D. : Oil Spill Modeling-A Tool for Cleanup Operation, *Proceedings of Oil Spill Conference*, Los Angeles, CA, USA, pp.243-249 (1985).
- 石油連盟：流出油の経時変化に関するデータ，CD-ROM (1998)。
- シップ・アンド・オーシャン財団：海上流出原油の風化について（蒸発・乳化と物性の変化）—原油風化試験結果の理論解析とその応用—，110pp (1995)。
- シップ・アンド・オーシャン財団：2成分系モデルによる原油風化実験の解析（蒸発・乳化と物性の変化），35pp (2000)。
- 石油連盟：<http://www.paj.gr.jp/>