

防災現場用重油拡散モデルの敏感度に関する一考察

柳 青 魯*・李 和 云**・金 昭 遠***

1. 緒 論

油汚染の問題は、海洋資源の開発と海洋利用度の増大に伴い、ますますその発生頻度と規模が大きくなり、またその累積による沿岸環境の破壊は、新たな環境問題として、深刻さを増して来ている。

特に、生態環境面で影響が大きい沿岸域に対し、適用性の良い緊急防災現場用重油拡散モデルの開発には、沿岸域の気象学的特性である風、気温、水温、日射量および沿岸・海洋の海流、潮流、吹送流、波浪などの力学特性に対する高精度で迅速な予測が要求される。

本研究では、韓国沿岸に適用して来たモデル OIL-SPILLFM (OIL SPILL Forecasting Model) による流出油拡散の計算例から、まず影響因子の敏感度を検討する。次に、海域の物理的特性に起因するモデルの問題点や限界を検討しながら油と海象との物理作用の定式化を進め、新しいモデル開発の基本となるデータベースの構築や資料の補正の効率化に関して考察していく。

2. 流出油の影響とそのモデリング

2.1 油の流出と挙動

流出重油の海岸・海洋での一生は、海域特性と油の種類により、その特性が大きく違って来るので、簡単には言えないが、流出油の挙動特性に対する影響因子と時間スケールを模式的に考えて整理すると、次のように説明することができる。①流出初期には移流・拡散および蒸発が激しく、それに対しては、流れと風が大きく影響する。②時間の経過に従い、含水率が増大し、乳濁化および鉛直分散を伴いながら、第 2 段階の物理的に処理の困難な分散段階に入る。この過程で、油の比重と粘度などの物理化学的な性質の変化が互いに影響し、長寿状態になる。③さらに、固化したり乳濁化が進んだりすると海中や海底または海浜での生物化学的分解に頼らざるを得ない状態になる。固まった成分は、タールボール状となり、海底や海岸の漂砂ようになる。この様な油の挙動

は、海洋学的・気象学的因子の影響を受けながら、何十年も沿岸域の環境に重大な影響を与えながら、微生物の分解により消滅して行くと考えられている。

2.2 影響と対策に関するモデルの定義

油に対する防災システムにおいて、各段階別にモデルは、①海域別の事故、海上活動による油の流出頻度の予測および管理用のモデル、②流出した場合の油の挙動に関するモデル、③油汚染による環境への影響、被害の分析および評価モデル、に大きく分けられる (Lee ら, 1990)。これらのモデルは、その適用の目的により、沿岸海域の計画・設計用と、緊急防災用のものに分けられる。ここで防災と関係して重要なことは、いかに流出した油を早く回収し得るかという問題と、いかに環境に敏感な海域を避けて漂流させるか、という問題に集約される。このような事故による流出油の初期防除作業の効率を上げるための油拡散モデルを、防災現場用の重油拡散モデルと定義する。

3. 重油拡散モデル (OILSPILLFM)

3.1 OILSPILLFM の基本構造

モデルは基本的に広域モデルから狭域モデルへと段階的に数値解析を行うものであり、広域モデルの格子間隔は 200 km とし、狭域モデルの格子間隔は 200 m, 100 m, 50 m とした。海域の油汚染に対する敏感度と事故発生確率解析により、まず、韓国で油汚染の危険度が最も高い仁川と釜山周辺の沿岸海域を、詳細検討対象海域とした。広域で対象にした海域は、図-1 に示した東中国海、黄海、東海 (日本海) であり、潮流、海流、風の広域的誤差を小さくして、韓国沿岸での根本的な誤差の原因が低減できるように、海域を広く取った。OILSPILLFM では、狭域から広域の各々の格子上で、計算に必要な外力因子に関する資料が蓄積されるようになっており、海域の精度の高い観測および数値解析結果が容易に導入され、空間的・時間的精度が持続的に向上される構造になっている。

またモデルの起動は、表-1 に示したような対話型入力画面により計算条件が決められ、計算結果は画像によって見る事ができる。

* 正会員 工博 金沢大学工学部教授 土木建設工学科
(韓国釜慶大学校教授 海洋工学科)
** 工博 韓国釜山大学校副教授 大気科学科
*** 工修 韓国釜慶大学校大学院 海洋工学科

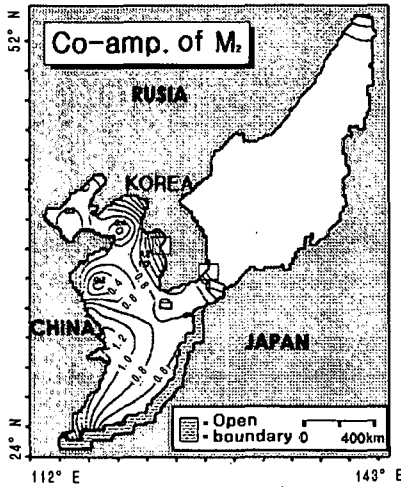


図-1 広域モデルによる潮汐・潮流の計算例

表-1 対話型入力画面

1. Oil spill start time? [year, month, day, hour, minute]
2. Forecasting duration time? [hour]
3. Latitude(N) of spill position? [degree, minute, second]
4. Longitude(E) of spill position [degree, minute, second]
5. Spill type? [Instantaneous=①, Continuous=②] ① spill amount? [liter] ②-1 spill duration time? [hour, minute] ②-2 spill amount? [liter/sec]
6. Consider of weathering? [yes=①, no=②]
7. Field data? [real time data=①, data base=②] ① available field data in hour - currents [day, time, V(m/s), D(°)] - winds [day, time, V(m/s), D(°)] - others [AirTemp., WaterTemp., Rain, Wave] - oil founded [Time, Location, Quantity]
8. Output start time? [day, hour]
9. Output finish time? [day, hour]
10. Output time interval? [minute]

3.2 外力因子

a) 海流

OILSPILLFM では、済州海峡で東～北東方向に 15 cm/s、大韓海峡で北東方向に 50 cm/s 程の流れを平均的に考慮した。また韓国の国立海洋調査院観測資料を基に、広域・狭域の各々の格子に対するデータベースを構築して、海流の変動特性を必要に応じて考慮できるようにし、測定値がない領域は、周りの平均値を使うことにした。

b) 潮流

潮流は実時間の予測ができる物理量であり、図-1 に示した領域の開境界から各成分潮（ここでは 4 大分潮）の振幅と遅角を入れ(Choi, 1980)、内部海域での潮汐波

の伝播特性を計算し、詳細モデルに接続して、各々の格子上で成分潮による潮流の調和定数を求めることとした。数値計算の基本方程式は、鉛直積分された N-S 方程式、すなわち、2 次元潮汐・潮流に対する次の式を用いた。

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + V \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + V \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta + h)V] = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに式 (1) および式 (2) は運動方程式、式 (3) は連続方程式、 t は時間、 x, y は水平距離、 U, V は x, y 方向の水深平均流速、 f はコリオリパラメータ、 ζ は水面変位、 h は水深または摩擦影響限界水深 (undisturbed level)、 C は底面摩擦係数である。これらの基本式を有限差分法の ADI スキームで計算し、韓国沿岸の潮汐・潮流の重要観測点での検証を終えてから、各々の格子での潮流調和解析を行い、次式に示す各分潮流の定数を求めて、モデルでの実時間潮流計算に用いるようにした。

$$U_i = \sum_i a_i \cos[\omega_i(t_0 - t) - \phi_i] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに U_i は 4 大分潮流の合成流速ベクトル、 a_i は分潮流の振幅、 ϕ_i は分潮流の遅角、 ω_i は分潮流の角速度、 t_0 は予測開始日の各分潮の子午線通過時間、 t は予測開始日時からの時間である。

c) 海上風

海域の大気圧力場が求められると次のような力学的釣り合いから海上風の算出が可能である。

$$\frac{k}{\rho} \nabla^2 p = -(f^2 + k^2) \nabla^2 \phi \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに p は圧力、 f はコリオリパラメータ、 ρ は密度、 k は摩擦係数、 ϕ は速度ポテンシャルである。

ここでは、気象庁の 3 時間間隔の地上気圧画像を、インターネットから求めて、風場を計算するようにした。事故が発生すると、過去 2 回の資料から、3 時間後の気圧場を外挿して風を算出し、求められた風場を Fourier 変換して空間的分解能を向上させるようにした。台風時には台風中心・影響圏と背景場を分離して、各々の時間的变化を計算し、最終的に線形合成するようにした。また沿岸から 40 km 以内の海域に対しては、沿岸地形の影響をも含んだ海陸風の影響による接岸の可能性を考慮するようにした(柳ら, 1992)。

d) 波浪およびその他

波浪は質量輸送による漂流・接岸と、鉛直分散および乳濁化に大きく影響する。ここでは計算された風場から不規則波を予測して、吹送速度を計算する方法を用い、漂流を計算するようにした(柳ら, 1994)。油の分散と乳濁化への影響は、油が存在する格子での有義波を用いるようにした。

風による吹送流は前報の方法を用いて求め(柳ら, 1994)、また水温と気温は海域の月平均値を用いた。沿岸域の複雑な波浪起因性の流れ、河川流との干涉による3次元性の流れ、沿岸での海流の渦と湧昇流などの流れ構造の再現が必要であるが、資料不足のため無視した。

3.3 油の挙動

a) 移流・拡散および漂着

流れ成分のベクトル合成である漂流速度から水平移流拡散を計算する。ここでは一般的に使われる移流拡散方程式をLagrange的に表現した次式

$$S_i^n = V^n \Delta t + d_i^n \dots\dots\dots (6)$$

を用い、数値的安定性と油滴の生成・消滅(蒸発、漂着など)の再現を容易にした。ここに S_i^n は i 番目の漂流油滴が Δt 時間に移動した距離であり、 V^n は合成漂流速度、 d_i^n は広がりや乱流拡散による移動距離であり、油の拡散特性を考慮したrandom walk methodを用いた。流出油の海岸または沿岸域の各種の施設への漂着量は、海岸特性と施設特性に応じて考慮できるようにした(Ryuら, 1993)。

b) 鉛直分散

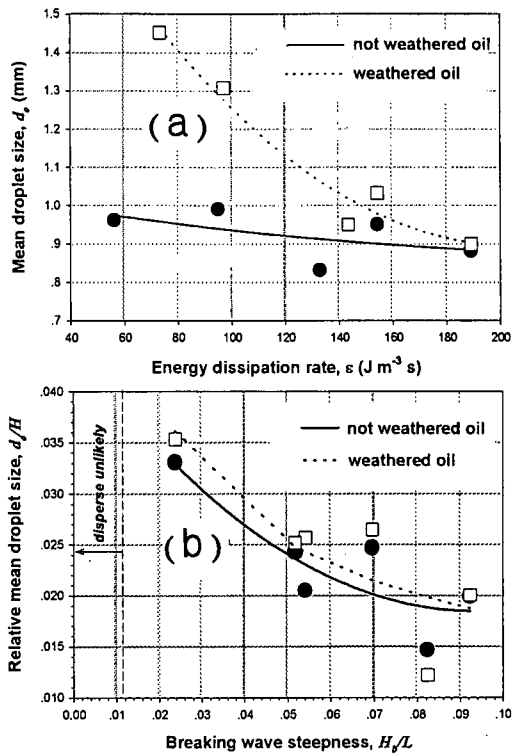
油の鉛直分散は、主に波浪によるものと流れのせん断力によるものがある。ここでは油膜の破壊に関する流れと波の影響に関する実験結果を定式化して応用するようにした。実験はせん断発生装置と2次元造波水槽を用いて行った。実験に用いた重油はArabian重油であり、風化前の密度0.888、風化後の密度0.90のものを対象に、初期油膜の厚さを0.6—1.2 mmにし、せん断力と波による油膜の時間的変動を画像処理手法で測定した。その結果の一例を示したのが図-2であり、図中の●と実線は風化前の重油、□と点線は風化後の重油を対象にした結果である。それを基にした次式により油滴の大きさを判定するようにした。

$$d_0 = c\varepsilon^{-a} \dots\dots\dots (7)$$

$$d_0/H_0 = w(H_0/L)^{-b} \dots\dots\dots (8)$$

ここに d_0 は平均油滴直径(mm)、 ε は流れによるエネルギー逸散率($\text{J m}^{-3} \text{s}$)、 H_0 は波高、 L は波長である。式中の定数は油膜の厚さと密度により $1.0 \leq c \leq 15.0$ 、 $0.05 \leq a \leq 0.08$ 、 $0.005 \leq w \leq 0.006$ 、 $0.4 \leq b \leq 0.6$ の値で計算するようにし、上式から計算した油滴の大きさに比例して、後述する乳濁化の係数が変動するようにした。

c) 蒸発



(a): 流れの影響, (b): 波の影響

図-2 油滴諸元の変化実験例

蒸発は従来の研究成果を模式的に表現した次の1次反応式で計算した。

$$\frac{dN}{dt} = -K_e N \dots\dots\dots (9)$$

ここに N は単位面積当たりの油滴量、 K_e は減衰係数で、気象条件と油種によって異なるが、重油の場合、 10^{-5} を用いて蒸発による半減期と一致させた。

d) 乳濁化

流出重油の乳濁化は次式により計算できる。

$$\frac{dy_w}{dt} = [K_s(y_w^{SAT} - y_w)] - \left(\frac{K_0}{\eta}\right) \cdot y_w \dots\dots\dots (10)$$

ここに y_w は油類の水分含量、 t は時間、 K_s は海上状態によって変化する定数であり、ここでは波形勾配と漂流速度の関数であるが、前述した油滴の大きさに比例する。 y_w^{SAT} は最大水分含有量、 K_0 は界面活性剤の含量に比例する定数、 η は経験因子である。この乳濁化の計算結果は漂流にも影響すると思われるが、これは今後の課題である。ただし、ここでは現場の防除対策を決める指針を与えるための乳濁化の度合いを、必要に応じて使えるようにした。

3.4 拡散の計算例

a) KOREA HOPE 事故(黄海)

1990年7月10日13時30分、仁川港入口の海上の重

油流出事故（流出量 1,500 t）に対する実時間重油拡散を計算し、現場での調査結果と比較したものが図-3である。図中の点が計算結果であり、実線は同一経過時間に対して現場で追跡した油滴の拡散範囲である（3日後の状況）。ここでCASE Iは潮流のみを考慮した場合、CASE IIは潮流と仁川での風に関する10年間の毎時統計資料を取り入れた場合、CASE IIIはCASE IIに蒸発の効果を考慮した場合の結果である。この結果から、風と蒸発の効果を入れることにより、精度の向上が確認でき

る。

b) ALEXANDRIA 事故（東海）

1995年6月30日、釜山海域の重油流出事故に対する漂流追跡結果と計算結果を示したものが図-4である。5日間の漂流計算結果であるが、図中の実線は観測した漂流軌跡の主方向を示し、CASE Iは潮流、CASE IIは潮流と風、CASE IIIは潮流と海流、CASE IVは潮流と風と海流の影響を考慮した結果である。これらの図から外力因子を正確に考慮するに連れて、予測精度が上がるこ

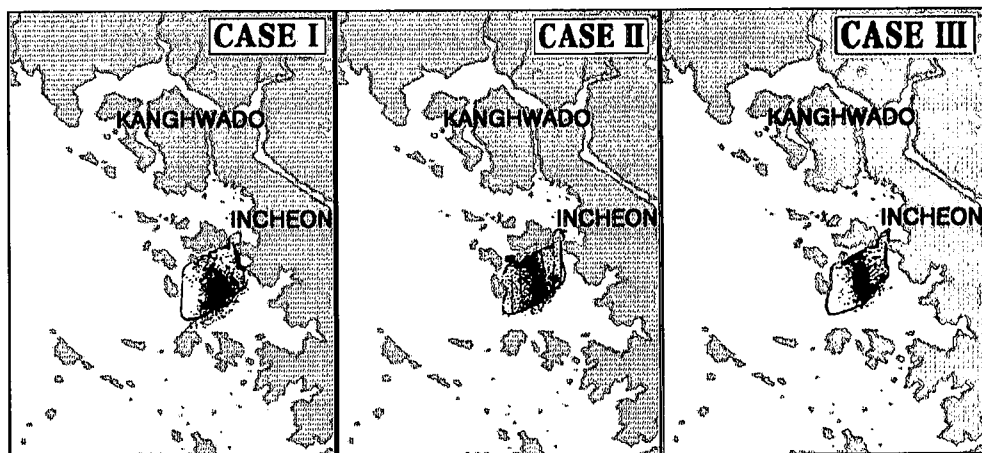


図-3 KOREA HOPE 事故の重油拡散（3日後）

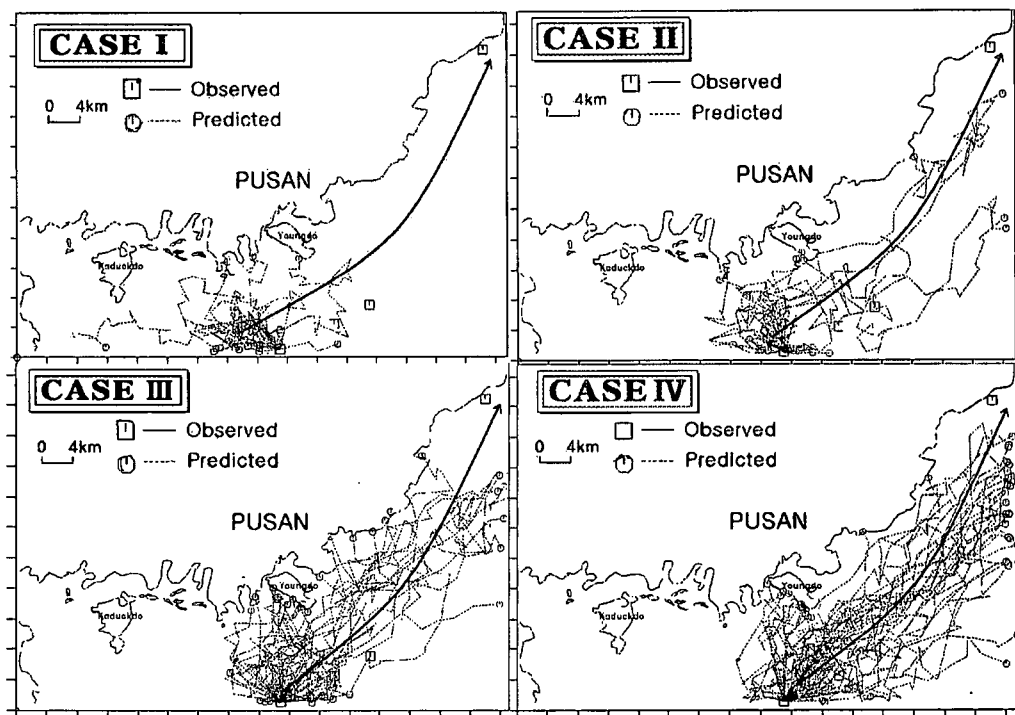


図-4 ALEXANDRIA 事故の重油拡散（5日後）

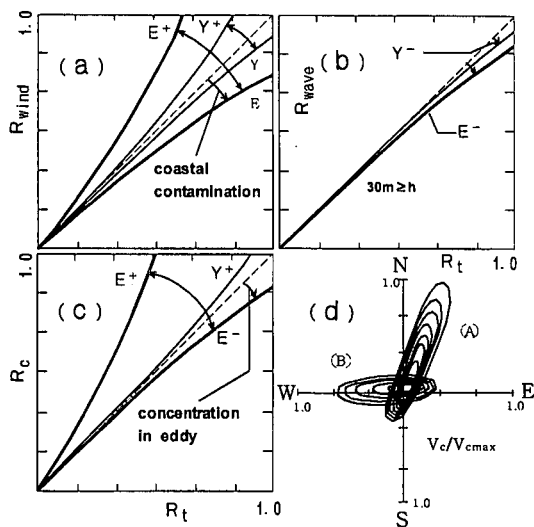


図-5 外力因子の典型的敏感度

とが認められる。

4. Modelの敏感度解析

4.1 敏感度解析

敏感度とは潮流による重油の相対拡散面積に対する風、波浪、海流の影響の度合いとして定義したものである。図-5は、仁川と釜山を中心とした200 km範囲における重油拡散のシミュレーション結果を用いて、敏感度を比較した典型的なパターンである。(a)は、風の影響に対する敏感度を示し、 E^+ は東海で風によって重油の広がりが潮流のみを考慮した場合(R_t)を基準にして広がった場合を、 E^- は狭くなった場合を示す。なお、破線からの広がりが、敏感度の高さを表す。 Y^+ 、 Y^- は、黄海に対する同様の結果である。ここで E^- 、 Y^- は風による油の漂着効果に起因するが、相対的に東海で風の影響が大きくなっているのが認められる。(b)の波浪に対するものも、同様に考えると、東海で沿岸への接岸漂着に影響を大きく与えるものになる。(c)の海流の影響は、当然のことながら対馬暖流の影響が強い東海南部で大きく影響し、場合によって、負(-)の影響が見られるのは、海流周りの渦(直径:数10 km, 持続時間:数日間~数週間)の影響が強く入る場合に生じる現象である。これを方向別に分けて考察すると(d)に示すような方向性の敏感度が得られる。ここで図中(A)は主流に近い海域での現象を示し、(B)は沿岸水との干渉の結果から生じる大きな渦による敏感度の典型的なパターンを示している。図より、海流の影響がモデルの精度を大きく左右することが考えられる。

4.2 緊急防災目的モデルの開発方向

上述した論議から考えられる従来のモデルが持つ限界と、今後の防災目的モデルの開発方向をまとめると、以下のように整理することができる。①黄海沿岸海域では潮流の精度を上げながら、風の実時間予測精度をいかに上げるかを考えること、②東海南部では潮流とともに海流の渦と沿岸での回流をどのように予測して精度を上げるかといった問題、風と波浪の問題、それも沿岸付近での複雑な諸現象を精度よく取り入れることができる方法の開発、③現場の測定値を利用したデータベースの充実化と数値モデルによる空間補正などの過程での自己学習アルゴリズムの導入、④事故現場での実時間資料の多様な取り入れシステムの構築、⑤現場での防災指針決定者が直接に操作して必要な資料が容易に求められるようにする。

5. 結 論

緊急防災現場用の重油拡散モデルの適用において海域別の物理的影響因子の敏感度の特徴を論議した。このモデルが総合的重油防除システムの下で有用性を発揮するためには、各々の重油と海象の物理的相互作用に関するサブモデルとデータベースの改善を重ねながら、海域別の物理特性と敏感度が十分に検討された油拡散モデルを構築して行かなければならない。また、油膜の破壊に関する実験結果を乳濁化の定式化などに適用するようにしたが、オイルフェンスなどの現場運用の効率を取り入れた総合的な防除対策に結び付けるのは今後の課題にしたい。

謝辞：本研究の整理に当たり、貴重な助言を賜った金沢大学石田啓教授、斎藤武久助手に謝意を表す。また本研究は韓国環境部(海洋研究所)の支援によるものである。

参 考 文 献

- 柳 青魯・朴 鐘和・張 宰豪 (1994): 油汚染の接岸特性のシミュレーションにおける不規則波の影響, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 996-1000.
- 柳 青魯・朴 鐘和・李 和云 (1992): 沿岸汚染物質の挙動のsimulation model, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 930-934.
- Choi, B. H. (1980): A tidal model of the Yellow sea and the Eastern China sea, KORDI Rept. 80-02.
- Lee, H. W., N. Kobayashi and C. Ryu (1990): Review on oil spills and their effects, Research Rept. CACR 90-3, University of Delaware, 174 p.
- Ryu, C., S. Chang and H. W. Lee (1993): Numerical Modeling of oil dispersion in the coastal waters, Jour. KSWQ, 9(3), pp. 167-177.