

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浪の影響

柳 青魯*・朴 鐘和**・張 宰豪***

1. 序 論

油の海上流出による環境および産業への影響は、沿岸に近付くほど大きいものと考えられる。流出した油が重要な海岸に接岸するかしないかの予測と共に、対策が必要になる場合が多くなっている。この場合、潮流の弱い海域では、方向性を持った不規則な波浪による影響が無視されている従来の model をそのまま使うのは、問題になると考えられる。

本研究では、潮差の少ない韓国の浦港付近で沈没した油槽船 kyungshin 号 (976 ton; 1988 年 2 月 24 日) 事故による被災調査及び環境への影響調査過程で出て来る油の接岸実態調査結果を用いる。そして、主として沿岸域での油の挙動に関する simulation の問題を検討し、波浪による拡散及び移動が考慮された model を開発・適用する事により、油の接岸特性における不規則波の影響を検討しようとしたものである。そのためにここでは以下のような過程と内容で研究を進めていく。

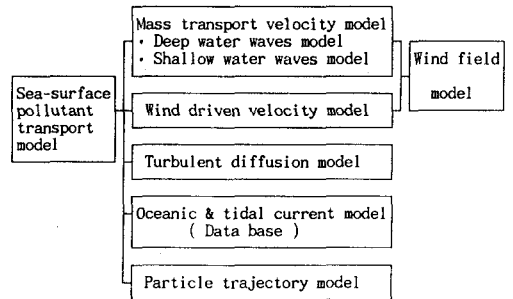
①波浪による質量輸送速度を不規則波を対象にして計算する。その時の波の方向 spectrum は他の波浪推算 model から計算し、深海域では stokes の式を用い、浅海域では Longuet-Higgins の式を適用するが、その間の中間水深では両式を接続する方法を導入した。②海流と潮流は data base 化した特性を利用し、風はその時の現場での観測値及び天気図による海上風の計算値を用いた。また波浪は一部の観測値と天気図入力法による推算結果を用いた。③吹送流は浅海水深効果が考慮できる Wang et al. (1976) の経験式を用いた。④以上の外的因子による油の拡散に対する Lagrangian model を構築した。⑤この新たな model を用いて oil spill 事故例に適用して実際の油の接岸量と計算による結果を比較してその再現性を検証した。⑥この model で不規則波による質量輸送の影響を考慮した場合と無視した場合の沿岸での油の接岸特性の差を検討しその重要性について議論した。

2. モデルの基本構造

海上流出油のような表面汚染物質の挙動は吹送流、潮流、波浪及び乱流拡散等により影響を受ける。このような汚染物質の水平的な移動と拡散過程を Lagrangian で表現すると次式のようなになる。

$$D_i = d_i + \vec{V} \cdot \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D_i は単位時間 (Δt) の間 i 番目の漂流粒子が移動した距離、 d_i は乱流拡散による i 番目漂流粒子が移動した距離であり V は総移流速度である。上式に基づいて模型を構築する時、図一1のような移流拡散 model 構造が考えられる。



図一1 油の移流拡散 model の基本構造

3. 移流速度及び拡散

3.1 不規則波の質量輸送速度

実際の海洋に存在する不規則波は各成分波により表現されるものと考えられ、質量輸送速度そのものも同じ様な考え方で各成分波のそれを重ね合わせて表現できるものとする。成分波の質量輸送速度は深海域 ($kh > 2.1$) では Stokes (1847) の理論、浅海域 ($kh < 1.5$) では Longuet-Higgins (1962) の理論で与えられるが、遷移領域での計算には両式とも問題がある。ここでは Huang (1971, 1983) の式を利用した。ピーク周波数に対する相対水深別不規則波の質量輸送速度算定式は、次式のようなになる。

* 正会員 工博 釜山水産大学教授 海洋工学科
 ** 工博 釜山水産大学研究員 海産研
 *** 工修 釜山水産大学大学院生 海洋工学科

$$u_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \cos \theta}{4 \sinh^2 kh} \cdot \left[2 \cosh 2kh + 3 + kh \sinh 2kh \right. \\ \left. - 3 \left(\frac{\sinh 2kh}{2kh} + \frac{3}{2} \right) \right] \cdot F(f, \theta) df d\theta \\ \text{for } kh < 1.5 \dots \dots (2a)$$

$$v_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \sin \theta}{4 \sinh^2 kh} \cdot \left[2 \cosh 2kh + 3 + kh \sinh 2kh \right. \\ \left. - 3 \left(\frac{\sinh 2kh}{2kh} + \frac{3}{2} \right) \right] \cdot F(f, \theta) df d\theta \\ \text{for } kh < 1.5 \dots \dots (2b)$$

$$u_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \cos \theta \cosh 2kh}{\sinh^2 kh} F(f, \theta) df d\theta \\ \text{for } kh > 2.1 \dots \dots (3a)$$

$$v_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \sin \theta \cosh 2kh}{\sinh^2 kh} F(f, \theta) df d\theta \\ \text{for } kh > 2.1 \dots \dots (3b)$$

$$u_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \cos \theta}{4 \sinh^2 kh} [2 \cos kh + \cosh^2 kh] \\ \cdot F(f, \theta) df d\theta \quad \text{for } 1.5 < kh < 2.1 \dots \dots (4a)$$

$$v_m = 2\pi \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{kf \sin \theta}{4 \sinh^2 kh} [2 \cos kh + \cosh^2 kh] \\ \cdot F(f, \theta) df d\theta \quad \text{for } 1.5 < kh < 2.1 \dots \dots (4b)$$

ここで、 u_m, v_m は質量輸送速度の x, y 方向成分、 k は波数、 h は水深、 $F(f, \theta)$ は波の 2 次元方向 spectrum、 f は周波数、 θ は波方向である。また波の方向 spectrum は朴 (1994) により推算する。

3.2 吹送速度

風による表層での油の移動速度 (V_{wc}) は風係数を 0.03 とすると次式のように表される。

$$\vec{V}_{wc} = 0.03 [U_{10} \cos(\theta_w - \delta) \vec{I} + U_{10} \sin(\theta_w - \delta) \vec{J}] \\ \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 U_{10} は海面上 10 m 高度での風速、 θ_w は風向、 δ は偏向角、 \vec{I}, \vec{J} は単位 vector である。また、浅海域での風と吹送流の偏向角 δ は Tayfun and Wang (1973) の摩擦影響深度 D_f を参考にして次式から計算する。

$$\tan \delta = \frac{\sinh(2\pi h/D_f) - \sin(2\pi h/D_f)}{\sinh(2\pi h/D_f) + \sin(2\pi h/D_f)} \dots \dots \dots (6)$$

$$D_f = \pi \left(\frac{A_h}{\rho_w \Omega \sin \phi} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 A_h は過度粘性係数、 ρ_w は海水密度、 Ω は地球自転角速度、 ϕ は緯度である。

3.3 乱流拡散

流出油の拡散過程は流出油の化学的特性と海洋の物理的性質により異なるが本研究では移動距離 (d) と方向 (θ_k) を random walk 過程として表現すると次の様に記される (Venkatesh, 1987)。

$$d = R_i (6(K_x + K_y) \Delta t)^{1/2} \dots \dots \dots (8)$$

$$\theta_R = 2\pi \times R_2 \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 R_1, R_2 は単位偏差を持つ乱数であり、 K_x, K_y は水平乱流拡散係数成分である。

3.4 粒子追跡法

表層での総移流速度 V (Eulerian 平均速度) は次式のような vector 和で表される。

$$\vec{V} = \vec{V}_m + \vec{V}_w + \vec{V}_{tc} + \vec{V}_\infty \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 V_m は質量輸送 vector、 V_w は吹送速度 vector、 V_{tc} は潮流 vector、 V_∞ は海流 vector である。このような総移流速度により単位時間 (Δt) の間任意の粒子の移動距離は次のように計算する。もし、時間 t_0 の時 $x_0 = (x_0, y_0)$ にある粒子が時刻 t の時の新たな位置 $x_t = x_0 + \Delta x$ に動いたとするとその時の平均速度 $V_L\{x(x_0, t), t\}$ は次のようになる。

$$\vec{V}_L\{\vec{x}(\vec{x}_0, t), t\} = \vec{V}(\vec{x}_0, t) + \Delta \vec{x} \cdot \nabla \vec{V}(\vec{x}_0, t) \\ \dots \dots \dots (11)$$

$$\Delta \vec{x} = \int_{t_0}^t \vec{V}(\vec{x}_0, t) dt \dots \dots \dots (12)$$

ここで、式 (11) を Δt に対して積分すると次式のような新しい位置 $x(x_0, t)$ に対する次式が得られる。

$$\vec{x}(\vec{x}_0, t) = \vec{x}_0 + \int_{t_0}^t [\vec{V}(\vec{x}_0, t) + \int_{t_0}^t \nabla \vec{x}(\vec{x}_0, t') dt'] \\ \cdot \nabla \vec{V}(\vec{x}_0, t) dt \dots \dots \dots (13)$$

$$x(x_0, t) = x_0 + \int_{t_0}^t \left[u(x_0, y_0, t) + \left(\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt' \right) \cdot \frac{\partial}{\partial x} u(x_0, y_0, t) + \left(\int_{t_0}^t u(x_0, y_0, t') dt' \right) \cdot \frac{\partial}{\partial y} u(x_0, y_0, t) \right] dt \dots \dots \dots (14a)$$

$$y(y_0, t) = y_0 + \int_{t_0}^t \left[v(x_0, y_0, t) + \left(\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt' \right) \cdot \frac{\partial}{\partial x} v(x_0, y_0, t) + \left(\int_{t_0}^t v(x_0, y_0, t') dt' \right) \cdot \frac{\partial}{\partial y} v(x_0, y_0, t) \right] dt \dots \dots \dots (14b)$$

ここで、 u, v は粒子がある地点総移流速度の x, y 成分である。

4. モデルの適用及び考察

4.1 油汚染事故の概要と計算条件

a) 事故概要

1988 年 2 月 24 日 07 時 30 分頃韓国東海岸の浦港付近外海で油槽船 Kyungshin 号 (976 ton) が座礁・沈没した事故が発生した。この事故で 2,500 ton 余りの重質油が流出され周辺海域を酷く汚染させ莫大な被害を与えた。この詳細な内容が図-2 に現れている。

事故海域の外海には北向きの海流が存在し、潮差は大

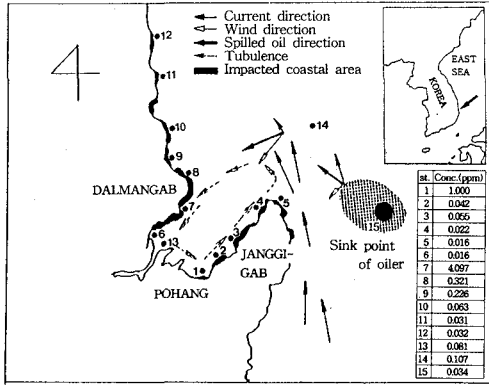


図-2 油槽船の事故位置と付近海域

潮期に約 17 cm で 0.1 m/s 以下の弱い潮流があり湾内には反時計方向の循環流が存在する。事故当時観測された資料によると NE 系の風が卓越し波浪は有義波高 2 m ぐらいの比較的高波が来襲した。

また、油の沿岸領域と調査定点で一次調査期間(1988. 2. 24-1988. 3. 4)の平均 carbon 濃度が示されているが湾内での油の被害が見あたるものである。

b) 計算条件

前述した model による Kyungshin 号事故による油の挙動を simulation するために広域と狭域の計算領域を定めた。日本海全域を対象にした $\Delta x = \Delta y = 55$ km の広域 model では 30 分間隔で海上風および深海波浪を推定した。これを $\Delta x = \Delta y = 600$ m である事故付近海域の狭域 model の入力条件として 1 分間隔の不規則波変形計算による質量輸送速度、吹送速度、乱流拡散及び粒子追跡計算を行った。従来の model では無視されてきた波の影響 (Lee et al., 1990) を論議するために波の項を無視

した場合の計算をも行った。重要な計算領域である狭域 model の格子網と海域地形は図-3 に示した。

海上風の推算は天気図入力法を用い海面気圧と気温は 12 時間間隔の天気図から読み取り、海面水温資料は日本気象庁の海況旬報 (日本気象庁, 1988) で同期間に当たる気温の平均値を読み取った。深海波浪推算は朴 (1994) の model を用いた。ここでは周波数成分を 25 個にし、方向成分は 16 個に分割した 2 次元 spectrum を用いた。

不規則波の変形計算は狭域 model で Karlson (1969) の方法で計算し、それによる質量輸送速度を計算した。また、吹送速度計算における過度粘性係数 $Ah = 100$ g/cm-s を用い、海流と潮流は予め作って置いた data base にて考慮した。

4.2 計算結果及び考察

広域の海上風及び深海波浪推算結果の内、事故発生 1 時間 30 分後である 1988 年 2 月 24 日 09:00 の海上風及び波浪の計算結果を図示したものが図-4 である。計算結果で見ると事故海域付近の風は NE 10 m/s 程度であ

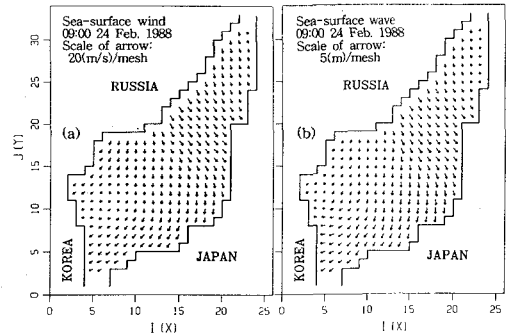


図-4 広域 model での海上風と波浪の計算例

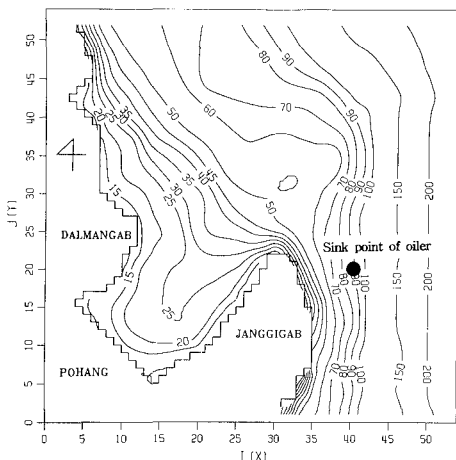


図-3 計算領域の格子網と海底地形

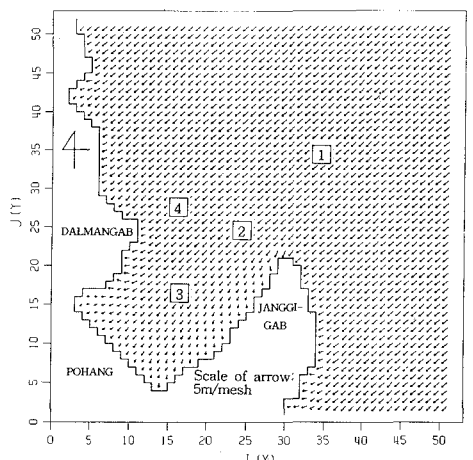


図-5 狭域での不規則波の変形計算の一例

り、波浪は有義波高 2.5 m, 有義波周期 7.3 s, 波向 SW で、当時の浦港付近での観測値と比較的よく一致しているのが確認された。

広域 model で計算した 2 次元波浪 spectrum を狭域 model の入射波浪条件として浅海域での不規則波の変形計算を行い、有義波向と主波向を示したのが図-5 である。沿岸の近くで広域 model の結果と差が出て来るのが見られる。この図にて示された重要地点での波の方向 spectrum は図-6 である。これによると場所によりそれほど差は見出されなかった。

また、このように計算した不規則波による質量輸送速

度分布を表した一例が図-7 である。大部分の領域で 0.1 m/s—0.15 m/s 程度の速度であり、流向は SW と沿岸近くでは湾岸に流れて行くようである。

また、広域海上風模型から求めた風から計算した狭域 model での吹送流の速度分布を示したのが図-8 である。この図によると比較的深海域では 0.25 m/s 程度であり、吹送方向は風向に対して右側に 45° 偏向するが、浅海域ではこの偏向角は小さくなり、ほぼ風方向と一致する傾向が見られる。

以上の計算によるものと data base から求められる油の挙動に対する外力因子を用いて、油の移流・拡散過程を示したのが図-9 および 10 である。図-9 は波浪の影響を考慮しなかった場合の油の接岸特性を示したもので大部分の油粒子は北側の沿岸に輸送され接岸するか、分

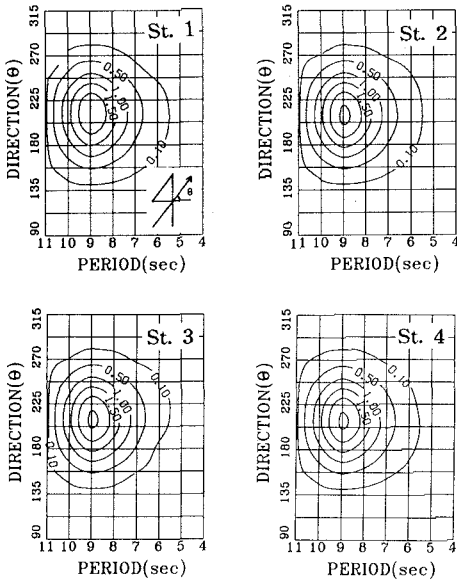


図-6 重要観測点での波浪の方向 spectrum

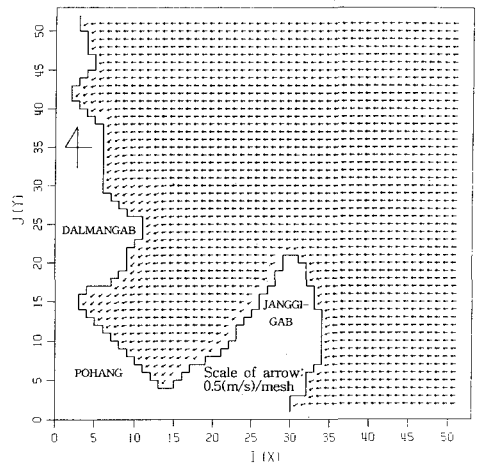


図-8 吹送流の計算例

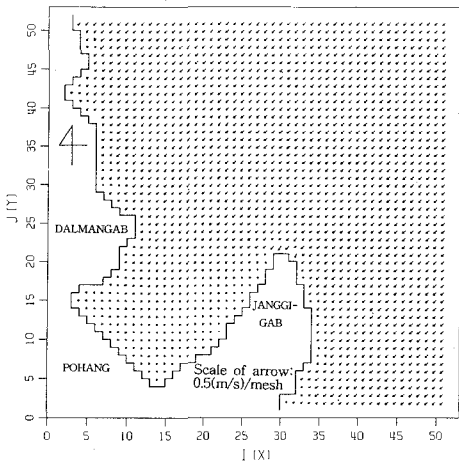


図-7 不規則波による質量輸送速度

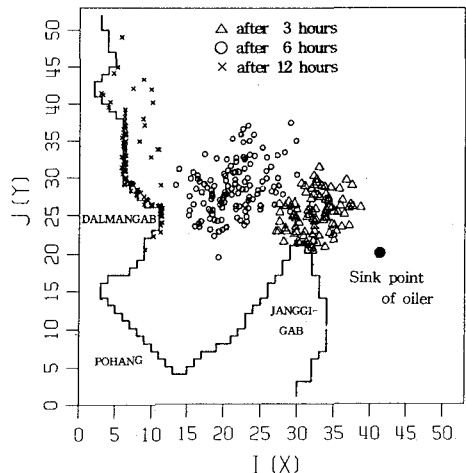


図-9 油粒子の追跡結果 (波浪の影響を無視)

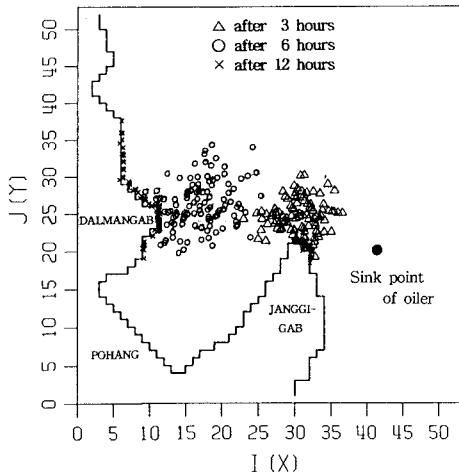


図-10 油粒子の追跡結果 (波浪の影響を考慮)

散して湾内に接岸する可能性は少ないと言えよう。反面、図-10に示したように波浪の質量輸送を考慮した場合には大量の油粒子が湾の循環流に乗って湾内に入り込むものと考えられる。この計算を長時間続き、柳等(1992)のように海岸の接岸特性を考慮して計算すると図-2の様な現場での油の挙動がうまく再現されよう。

ここで油の挙動解析の時、従来のように波浪による影響を無視してはいけない場合があると強調することが出来る。

5. 結 論

本研究では沿岸海域に適用性のある油の挙動に関するsimulation modelを開発して油の接岸特性に対する不規則波の影響を検討した。その結果、浦港のような潮流が弱い外海に面している沿岸海域での油汚染物質の時・空間的な挙動特性をより精度よく解析する為には、風と波浪の影響を詳細に考慮しなければならない事を強調する

ことが出来た。特に不規則波の質量輸送速度算定法による計算は解析的modelで組まされて計算時間が短く、現場での緊急防災時にも応用されると考えられる。また、油汚染には風の精度が重要な影響を与えるから (Lee et al. 1990) 風の精度を上げる必要があり、それに伴って波の精度も上げられるから今後このような問題について取り組んでいきたい。

参 考 文 献

- Huang, N. E. (1971): Derivation of Stokes drift for a deep water random gravity wave field, *Deep Sea Res.*, 18, pp. 255-259.
- Huang, N. E. (1983): A review of the state-of-the-art of oil spill fate/behavior models, *Proc. of 1983 oil Spill Conf.*, pp. 313-457.
- Karlson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, *Proc. ASCE*, 95 (WW4), pp. 437-448.
- Lee, H. W., N. Kobayashi and C. Ryu (1990): Review on oil spills and their effects, *Research Report CACR-90-3*, Center for Applied Coastal Research, Univ. of Delaware, 174p.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats', *J. of Fluid Mech.* 10, pp. 529-549.
- Stokes G. G. (1897): On the theory of oscillatory waves, *Trans. Camb. Phil. Soc.* 8, pp. 441-445.
- Tayfun, M. A. and H. Wang (1973): Monte Carlo simulation of oil slick movement, *J. of Waterways, Harbor and Coastal Eng. Division, ASCE*, 99 (WW3) pp. 309-324.
- Venkatesh, S. (1987): The oil spill behavior model of the Canadian Atmospheric Environment Service. Part 1: Theory and model evaluation. *Atmospheric-Ocean* 26 (1), pp. 93-108.
- Wang, H., J. R. Campbell and J.D. Ditmars (1976): Computer modeling of oil drift and spreading in Delaware Bay, *Ocean Eng. Rep. No. 5*, Univ. of Delaware, 58 p.
- 朴鐘和 (1994): 深海波浪推算模型の開発及び汚染物質輸送への応用, 釜山水産大学海洋工学科博士学位論文, pp. 33-43.
- 柳青魯・朴鐘和・李和云 (1992): 沿岸域油汚染物質の挙動のsimulation model, *海岸工学論文集*, 第39巻, pp. 930-934.