

沿岸域油汚染物質の挙動の Simulation Model

柳 青 魯*・朴 鍾 和**・李 和 云***

1. 緒 言

海岸域の産業化・高度利用・開発及び海上交通の発達に伴い海岸域の油類汚染事故の発生 potential が高くなり、事故による影響及び被災も非常に大きい、また敏感・多様になっている。これは海域別の環境問題として重要であり、施設に対する直間接的被災と生態・環境の破壊に対する低減対策が要求されている。

このような背景から沿岸海域を効率的に利用し、油汚染による被災を最小化する開発計画・施設物の設計・防災対策の樹立を目的とする総合油汚染 model の開発が必要になる。即ち、事故の発生、油の挙動、環境敏感度、防除対策に関する設計目的 (design purpose) の model 構築が必要である (Lee et al., 1990)。そのためにも最も重要で基本になるのが油の挙動の予測に関する model といえよう。これに対する従来の大部分の model は外海または外海に面した湾内の大規模現状の予測に適用しやすいものが多く沿岸域の局所的な影響が解析できる simulation model は見当たらない (Huang, 1983; Lee et al., 1990)。

本研究では沿岸附近の油汚染に最も敏感な海域での海陸風系、海岸特性、施設物等による油の挙動と油の変質 (weathering) 特性をも考慮できる沿岸域に適用性の優れた model を開発しようとしたものであり、その基礎的結果と特性について検討する。

2. Model の目的と基本構造

本研究では事故現場で combat purpose (Lee et al., 1990) には適用性のない理想的な詳細 model を構築することにより、沿岸海域の設計目的または精度の高い原因究明に卓越な適用性をもつ model を開発しようとしたものである。この model は図-1 に示したように、大きく移流・拡散 (Advection) と油の変質 (Weathering) に関する sub-model 群を組合せることによって構成した。各々の sub-model が複雑な数値 model になっており、

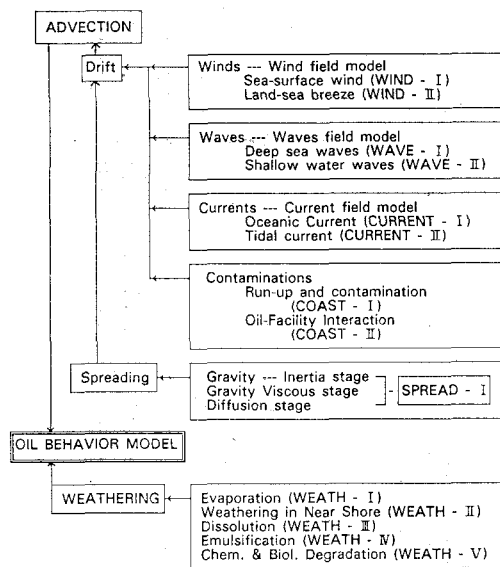


図-1 Model の基本構造

現象によって計算の scheme は異なるが全体的に有限差分法を使い、その内一般化された潮流と波浪変形 model などは従来の model を sub-model として準用した。また海流成分に対してはその変化特性を考慮した data base を用いることにし、風の場合は data base を利用する方法と気象 model による方法を導入した。

3. Advection 及び Wethering

3.1 風系の modeling

風は油 slick の移流と変質に大きく影響を与え、また波浪発生の原因になり油汚染物質の挙動解析において最も重要な外力因子の一つである。ここでは従来の気象資料を用いて式 (1) のようにある時間 t 時の風の vector ($|W(t)|$) を Markov 連鎖法により求める方法 (WIND-I) と数値気象 model、特に海陸風系が考慮できる model により simulation する方法を用いた (WIND-II)。

$$|W(t)| = a_1 |W(t-\Delta t)| + a_2 |W(t-2\Delta t)| + \dots + a_n |W(t-n\Delta t)| + P(t) \quad \dots (1)$$

ここで $a_1, a_2, \dots, a_n$ は自己相関係数、 Δt は時間間隔、

* 正会員 工博 釜山水産大学副教授 海洋工学科

** 工修 釜山水産大学大学院 海洋工学科

*** 工博 釜山大学校講師 大気科学科

P は資料の標準偏差から求められる分散特性をもつ乱数である。

また海陸風系が考慮できる風系 model は以下のような座標系で表現した大気運動の基本方程式を用いる (Lee et al., 1990)。

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} = & f v - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - s}{s} \left(\frac{\partial z_g}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v^m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Dv}{Dt} = & -f u - c_p \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{z^* - s}{s} \left(\frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \\ & + \left(\frac{s}{s - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v^m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{D\theta}{Dt} = & \left(\frac{s}{s - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v^g \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Dq_v}{Dt} = & \left(\frac{q_v}{s - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v^g \frac{\partial q_v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_g} \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = - \frac{s - z_g}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad \dots\dots (7)$$

ここで、

$$z^* = s \left(\frac{z - z_g}{s - z_g} \right) \quad \dots\dots (8)$$

$$\pi = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{R/c_p} \quad \dots\dots (9)$$

$$w^* = w \frac{s}{s - z_g} + \frac{z^* - s}{s - z_g} \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (10)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad \dots\dots (11)$$

ここで、 x, y, z は cartesian 座標系の東西、南北、鉛直方向であり、 u, v, w は x, y, z 方向の速度成分、 w^* は z^* 座標系における鉛直方向の速度成分、 t は時間 (t)、 θ は温位 (K)、 q_v は比湿 (kg/kg)、 T は大気温度、 R は乾燥空気の gas 定数、 c_p は定圧比熱、 P は圧力 (mb)、 P_0 は基準 level 圧力 (=1000 mb)、 f は Coriolis parameter、 g は重力加速度、 K_H は水平方向拡散係数 (m^2/s)、 K_v^g, K_v^q, K_v^s はそれぞれ運動量、熱、比湿の鉛直方向拡散係数、 z_g は標高、 s は上面境界の高さを固定せずに質量の保存を考慮し時間と場所によって変わる物質表面である。

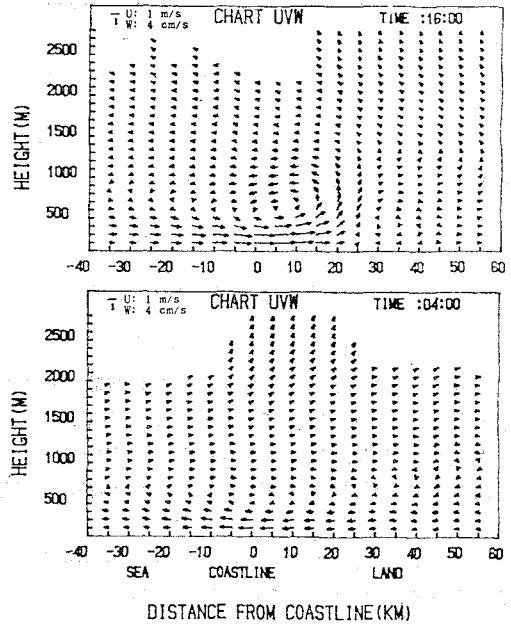


図-2 海陸風の計算例

以上の基本式による海上と地上の条件が与えられると、外洋では海上風が沿岸域では海陸風が考慮できる風系が計算できる。特に海上の風の弱い晴天な春と秋には沿岸数十 km の領域で発達した海陸風が計算及び現地測定で得られることを確かめた (Lee, 1988)。

図-2 は後述する本研究で適用した計算過程に得られた海陸風系の一例を示したものであり、海風・陸風共に表面付近で強い傾向と海岸から 10 km 以内の領域ではかなりの強さが見られ、釜山地域の測定値でも年間 10 % 程度の発生期間と最大 10 m/sec、平均的に 5 m/sec 程度の海陸風が生起することから、この海陸風系は油など表層物質の沿岸附近の挙動に影響すると考えられる。

3.2 油の移流 (Drift)

風による表層での油 slick の移流速度 (U_0) は wind factor を 0.03 として次式のように考える。

$$U_0 = 0.03 [U_{10} \cos(\theta - \alpha) \vec{I} + U_{10} \sin(\theta - \alpha) \vec{J}] \quad \dots\dots (12)$$

ここで U_{10} は海上 10 m 高度での風速、 θ は風向、 α は偏向角 (deflection angle) である。浅海域での α の計算は定常状態を考えて次式で計算する (Lee et al., 1990)。

$$\tan \alpha = \frac{\sinh \left(2\pi \frac{d}{D} \right) - \sin \left(2\pi \frac{d}{D} \right)}{\sinh \left(2\pi \frac{d}{D} \right) + \sin \left(2\pi \frac{d}{D} \right)} \quad \dots\dots (13)$$

$$D = \pi \left(\frac{A}{\rho \omega \sin \phi} \right)^{1/2} \quad \dots\dots (14)$$

ここで d は水深、 D は摩擦影響深度、 A は渦粘性係数、 ρ は海水の密度、 ω は地球自転角速度、 ϕ は緯度。

また風波による流れ成分 (V_w) は Stokes (1847) の質量輸送と浅海での Longuet-Higgins (1953) の理論を結び付けた次式により計算する。この時風による波浪の simulation は従来の MRI model を準用し (WAVE-I), 浅海域の波浪の変形は Dalrymple (1988) の model に浅水効果を考慮して計算する (WAVE-II)。

$$V_w = \frac{a^2 k \sigma}{4 \sinh^2 kd} \left\{ 2 \cosh [2kd(1-\mu)] + (9\mu^2 - 6\mu) + (3\mu^2 - 4\mu + 1) \cosh^2 kd + \frac{6}{kd} (\mu^2 - \mu) \sinh^2 kd \right\} \quad (15)$$

ここで σ は角周波数, a は波の振幅, k は波数, z は静水面を基準とする鉛直座標系で $\mu = z/d$ である。

また潮流と海流に関する sub-model (CURRENT-I, II) による流動計算結果を導入すると油の移動速度 $\vec{U}_i$ は

$$\vec{U}_i = \vec{U}_0 + \vec{V}_w + K_c \vec{U}_0 \quad (16)$$

で表わされる。ここで K_c は潮流と海流の合成成分流 ($\vec{U}_0$) 油 slick の移動速度の比である定数である。

3.3 Spreading

Wang et al. (1976) の spreading に関する3段階過程を考慮して SPREAD-I で次式により計算する。

$$R(t) = 1.14 V^{1/3} \left[\frac{g(\rho - \rho_0)}{\rho V^{1/3}} \right]^{1/4} t^{1/2} \quad \text{for gravity-inertial stage} \quad (17)$$

$$R(t) = 0.98 V^{1/3} \left[\frac{g \rho_0 (\rho - \rho_0)}{\rho (\rho + \nu_w)^{1/2}} \right]^{1/6} t^{1/4} \quad \text{for gravity-viscous stage} \quad (18)$$

$$R(t) = 2 \left[2 E_r (t - t_{gv}) + \left(\frac{R_{gv}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{for diffusion stage} \quad (19)$$

ここで R は oil slick の半径, ρ_0 は油の密度, t は時間, E_r は spill の規模と風により変化する乱流拡散係数, 添字 gv は gravity-viscous stage の最後の条件を表わし, V は流出した油の容積 (m^3) である。

3.4 Evaporation

蒸発による油の変質過程は次式により考慮して WEATH-I で計算する。

$$E_{fi} = K_{ei} \left(\frac{P_i - P_{i,\infty}}{R \cdot T} \right) C_i \quad (20)$$

$$K_{ei} = 16.076 U_{10}^{0.78} R^{-0.11} S_{ci}^{-0.67} \quad (21)$$

ここで E_{fi} は i 番目の carbon 油の成分の蒸発量 ($mol/cm^2 s$), K_{ei} は蒸発伝達係数 (cm/s), P_i は油の蒸発気圧, $P_{i,\infty}$ は大気中の pressure (≈ 0), S_{ci} は Schmidt number, R は universal gas constant, T

は油の上部の大気温度 (K), 添字 i は油の各々の carbon 成分を表す。全体の蒸発量は各油成分の蒸発量の積分値で計算できる (Rasmussen, 1985)。

3.5 Dissolution 及び Emulsification

Dissolution と Emulsification の効果は式 (22), (23) により各々計算する。

$$N_i^d = K_d (e_i x_i C_i^s - C_i^w) \quad (22)$$

ここで N_i^d は成分油の dissolution flux rate, K_d は伝達係数, e_i は溶解促進 factor, x_i は oil phase mole fraction, C_i^s と C_i^w は各々純溶解度と成分油の水中含有量である。

$$\frac{dy_w}{dt} = [K_1 (y_w^{SAT} - y_w)] - \left(\frac{K_2}{\eta} \right) y_w \quad (23)$$

ここで y_w は油の水分含量, K_1 は海上状態による常数, y_w^{SAT} は最大水分含量, K_2 は surfactants の含量による常数, η は経験因子である。

3.6 海岸域の油の挙動遮蔽

海岸の特性による油の接岸・海域施設による遮蔽と再移動は表-1 のような特性を考慮して COAST-I, II で計算する。また海岸及び施設物周辺では波の run-up 領域まで油が移動することと考えるとこの run-up 高は Ryu and Kang (1990) の式を用いる。

$$P(X) = \left[\frac{9.36 \xi_d (1.17 - 0.8X)^3}{X^5} \right] \times \exp \left[-2 \xi_d^4 \left(\frac{X}{1.17 - 0.8X} \right)^{-4} \right] \quad (24)$$

ここで $X = R_{u1/3}/H_{1/3}$ で run-up 高の有義値と有義波高の比であり, ξ_d は有義波と平均周期による surf-similarity parameter である。また P は発生確率である。尚, 海岸域の増・養殖施設による遮蔽効果も波と流れによって変化する関数として考慮し, 接岸した油の再移動

表-1 海岸特性による油の厚さ (Gundlach, 1987)

Shoreline Type	Standard			
	Thickness (mm)	Deviation (mm)	Thickness (mm)	Thickness (mm)
1. Rocky Cliffs (exposed)	2	NA	0.5	2
2. Sand beaches	17	19	4	25
3. Mixed sand and gravel	9	11	2	15
4. Tidal flats	6	6	3	10
5. Rocky shore (sheltered)	5	NA	1	10
6. Marshes	30	14	6	40
7. Eroding peat scarps	4	NA	1	10

1. For medium-viscosity oils, values were measured. NA indicates data available because thickness was not field derived, but estimated relative to field information.

2. Values for light-and heavy-viscosity oil were estimated and were proportionately correct to each other and to light-to-medium viscosity oils for which data were partially available.

は1次の減少関数を用いて考慮した。

$$M_i = M_{i0} \exp(-K_f t) \quad (25)$$

ここで M_i は海域の i 番目区間にある油の量, M_{i0} は初期遮蔽油量, t は初期遮蔽時からの時間 (day), K_f は海岸特性と波・流れの強さにより変化が大きい移動常数で $10^{-8} \sim 10^{-6}$ の値を取る (Gundlach, 1987)。

4. Model の適用例

韓国の釜山を中心とした東南海岸工業 belt 附近海域は大型港湾, 工業, 水産業及び海洋 recreation 施設が密集している領域で油汚染事故の発生確率は高くその被災に対する敏感度も非常に大きい。またこの海域は Tsushima current の流入と潮流及び大風による波浪の影響も大きい領域で海岸特性も複雑になっている。この海域に図-3 のような計算領域を設定して本研究で提案している model の適用性と特徴について検討する。

基本 model 構造 (図-1) で示したような sub-model の計算のまえに海域の利用現況 (主要施設の位置), 海岸線・海底地形の特性に対する data-base を作る必要がある。また WIND-I と Current-I で直接用いられる風と海流の特性に関する data base も必要になる。これらの data base は韓国の港湾庁, 水路局, 釜山市, 気象庁の生資料と整理されているものを本 model に適用しやすい型に作成した。設計目的の検討で敏感度の大きい海岸附近に油が接近する条件を考えて従来の考え方によるものと本 model の結果を比較することにより本 model の特長について検討した。図-3 はこの海域の漲潮流時の代表的な流動を示した一例である。また図-4 と

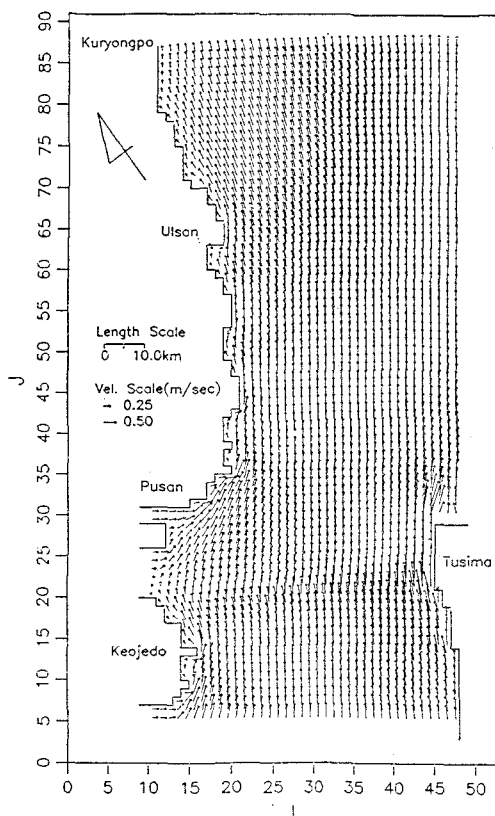


図-3 韓国東南海域の計算領域と流動計算の一例 (釜山 H.W. +2h)

図-5 は各々大潮期, 小潮期における特に海陸風系が卓越に発達する春と秋の条件で計算した油の挙動に関する計算結果を示した一例である。

図-4 と図-5 で細い実線とまわりの点は従来の海陸風系を考慮しなかった場合であり, 厚い実線と黒丸は本研究で提案している model による結果である。ここで実線は油 slick の中心を追跡して表示したもので, 点は分離された oil slick 個々の追跡位置である。また本 model の結果を示した黒丸は A_1, A_2 の事故地点から事故発生 8 潮汐 (半日周潮) 後の油 slick の位置を示したものである。ここでわかるように本 model を適用した場合, 従来の model による結果より海岸よりに挙動している。これは本研究で考慮している海陸風と沿岸の波浪及び海岸線特性などが沿岸附近の油の挙動に大きく影響することを意味する。

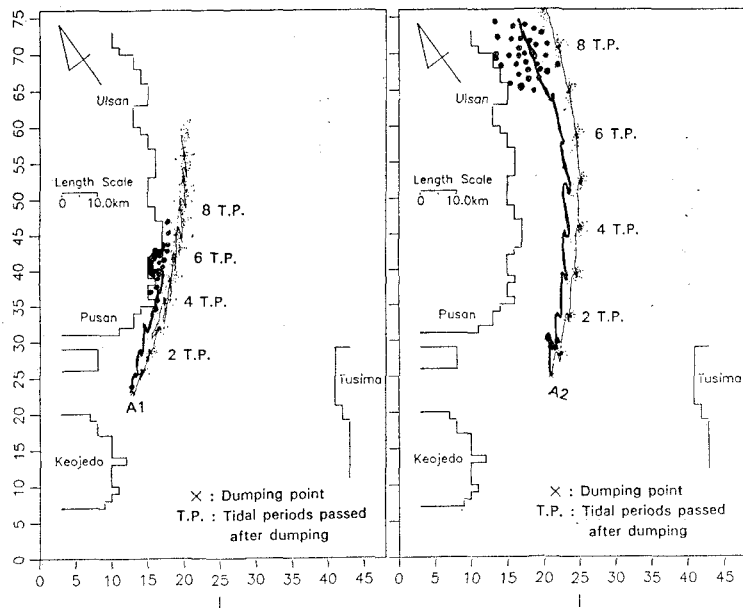
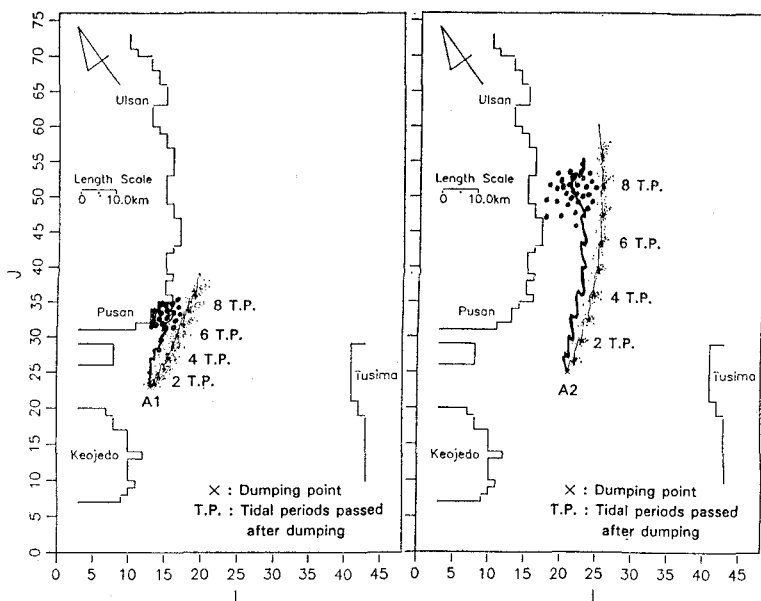


図-4 油汚染物質の挙動に関する simulation の一例 (大潮期, 春)



図—5 油汚染物質の挙動に関する simulation の一例 (小潮期, 秋)

また本研究で提案している model の海岸附近の油の挙動 simulation への適用性が従来のものより卓越であることが言えよう。しかし計算時間は model の複雑性から非常に長くなりこの設計目的の詳細 model の外に combat 用の実時間油の挙動に関する model の開発も別の問題として主要なものと考えられる。

5. 結 論

以上、海岸域の油の挙動をより正確に simulation する為に海岸附近の海陸風、波浪特性の導入及び海岸線と海域利用施設等による油の遮蔽効果を考慮して本研究で開発した model の適用性と従来の model に比較した特長について検討した。その結果理想化された広域及び詳細 model の組合で大型 model であるが海岸域の総合開発と関連した計画・設計に有用な model であることがわかった。

今後、この model を拡張して沿岸特性が考慮できる海域ごとの確率論的油の挙動 simulation model と事故に対する combat 目的の model に簡単化して海域別に特性のある総合的な油汚染 model を作成していきたい。

謝辞：本研究は、韓国科学財団の一般基礎研究課題 No. 911-1307-019-2) の一部であり、併せて海洋産業開発研究 center (RC-OID) の研究事業の補助を受けたも

のであることを付記し深謝の意を表する。

参 考 文 献

- Dalrymple, R. A. (1988): Model for refraction of water waves, J. Waterways, Port, Coastal & Ocean Eng., ASCE 114 (4), pp. 423-435.
- Gundlach, E. R. (1987): Oil holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters, Proc. 1987 Oil Spill Conf., pp. 451-457.
- 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. 313-322.
- Lee, H. W. (1988): Numerical modeling for Predicting on regional atmospheric environment, Ph.D. Thesis, Osaka Univ., 306 p.
- Lee, H. W., N. Kobayashi and C. R. Ryu (1990): Review on oil spills and their effects, Res. Rep. No. CACR-90-03, Univ. of Delaware, 174 p.
- Rasmussen, D. (1985): Oil spill modeling—A tool for clean-up operations, Proc. 1985 Oil Spill Conf., pp. 243-249.
- Ryu, C. R. and H. Kang (1990): A prediction model of irregular wave run-up height on coastal structures, Proc. of 22nd ICCE, pp. 371-383.
- 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.