



海洋における放射性物質移行 モデルの検討

浅野 智宏

東海事業所安全管理部

資料番号：56-4

Study on Mathematical Modeling of Radioactive
Material Transport in Coastal Waters

Tomohiro Asano

(Health and Safety Division, Tokai Works.)

原子力施設から沿岸海洋に放出される放射性物質の海洋における拡散、海底土への移行等の挙動を評価することは、環境監視業務上、あるいは環境評価上重要な課題の1つである。本報告では、東海事業所においてこれまで実施してきた海洋における放射性物質移行モデルの検討内容、モデルの概要、解析例及び今後の検討課題について述べる。

Key Words : Mathematical Simulation, Sediment and Radionuclide Transport in Coastal Waters, Finite Element Method, Hydrodynamics.

1. はじめに

我が国は、四方を海に囲まれた特有の国土を有しており、古くから漁業、海上輸送等、経済、産業の発達といった面で海から様々な恩恵を受けてきた。原子力施設についても、そのほとんどが沿岸立地であり、液体廃棄物は適切な処理を施し放出規準を下回っていることを確認した後、海洋に放出される。各施設周辺においては、周辺住民の健康と安全を確保するといった観点から海洋環境モニタリングが実施されている。

動燃東海事業所においても、定常的な海洋環境モニタリングとして、海水、海底土、海産生物等の定期的な採取・測定を行っている。これまでのモニタリングで得られた結果からは、原子力施設に起因すると考えられるような蓄積傾向は認められていない。

しかしながら、長半減期核種の環境中での長期影響評価の観点から、放射性物質の海洋中での拡散、海底土への移行等の挙動を評価することは、環境監視業務上あるいは環境評価上重要な課題の1つである。海洋における拡散現象を解析するためのアプローチは、従来より各方面において海洋工学的、あるいは数理学的に行われてきている。特に近年は、高

性能の電子計算機の出現により、拡散・移行の場をシミュレーションとして取り扱うことができるようになってきた。東海事業所ではこのような状況を踏まえ、海洋における放射性物質移行モデルの検討の一環として、コンピュータシミュレーションにより長期影響評価を行うことの可能性を検討するため、1977年から1982年にわたり米国 Battelle 研究所 (Pacific Northwest Laboratory) に研究を委託した。東海事業所では、その成果を起点として引き続き検討、解析を行っている。

本報告では、これまでのモデル開発の経緯、モデルの概要、解析例、今後の検討課題等について記載する。

2. 海洋拡散解析に係る研究の現状

海洋拡散評価は、その挙動が地域的・時間的に大きく変動し複雑であるため、一般的な評価手法が確立されるまでに至っていない。このため、評価を行う場合には、施設の特性、地域的な特性等を考慮した評価モデルを立案することが必要となる。

我が国の原子力施設の例では、ほとんどが放出口での濃度規制を十分に満足していることを確認する

にとどまり、海洋拡散解析を行っている例は少ない。

東海再処理施設の例では、関係機関の援助の基に放出口近傍の海域 (near-field) については水理模型実験に基づく実験式等を基礎として評価し、これより遠方の海域 (far-field) については、東海前面海域において実施した拡散実験の結果を基礎として、Brooks の式を基礎とした解析解モデルを加味して海洋拡散式を組立てて安全評価を行っている。

海洋拡散に係る過去の研究を振り返ってみると、1936年 Rossby が、「海においては大規模な水平乱流が水平混合を起こす。」と発表したことがきっかけとなった。それまでは、海洋の拡散現象を取り扱う場合には、水平方向の拡散は鉛直傾度と比べ水平傾度が小さいことから、省略しても問題ないとされていた。さらに、1941年以降、Kolmogoroff に始まる近代乱流理論の発達で、大気や海の拡散現象の解析を急速に進展させることとなった。

1958年にドイツの Joseph-Sendner、ソ連の Osmidov、日本の大久保らは、濃度の場には遷移確率を種々仮定して濃度自体の拡散の理論を発展させた。さらに Bowels らは、1958年ごろからシア (shear) 効果の概念を用いた解析を行い、現実の海洋拡散の機構がシア効果により説明されるようになった。これら当時の解析解モデルの発展は、蛍光光度計等の測定機器類の実用化により、染料による海洋拡散実験あるいは水理模型実験が可能となったことによるところが大きい。

これらの海洋工学の進展と平行し、高性能の電子計算機の出現とあいまって、差分法、有限要素法、境界要素法等の数学的手法の発達も海洋拡散の研究を急速に進展させることとなった。従来は直接的には解くことができなかった Navier-Stokes 方程式等の流体力学に係る方程式についても、これらの方法で解くことが可能となった。また、モデルについても K- ϵ モデル等の乱流モデルによる解析の手法が具体化されてきている。

本報告では、有限要素法を用いたモデルを基礎としていることから、ここでその手法の概要と特徴について少し触れておく。有限要素法は、他の数値解析法と同様に、高性能の電子計算機により未知数の元数の非常に多い多元連立方程式が、短時間のうちに解くことができることを利用して解析するものである。このため、微分方程式で与えられるアナログ量を計算処理が可能なデジタル量に変換することが必要となる。この過程を離散化とよんでいるが、有

限要素法はこの離散化手法の1つである。その特徴は、

- i 解析領域の境界形状が任意に作成できること
- ii 変分定理のうち重み付き残差法を基礎としていること
- iii 有限要素内を補間関数で補間できること
- iv 境界条件を取り入れやすいこと
- v バンド行列を係数とする連立方程式を得ること
- vi 汎用プログラムの作成に適していること

等が挙げられる。この手法を用いることにより、解析解モデルのような定常場の解析だけでなく、非定常な場における拡散解析も可能である。本報告ではその数学的手法等については触れないが、モデルの概要等について次章以降で述べる。

3. 移行モデル開発の経緯

東海事業所では上記のような各方面の研究を踏まえて、海洋における放射性物質移行モデルの検討を行うこととした。これまでの検討の経緯は、4つの Phase に分けられる。Phase I から Phase III については、沿岸海域に放出される放射性物質の海洋中での拡散、海底土への移行・蓄積の長期予測をコンピュータシミュレーションにより実施することの可能性を調査することを目的として、米国 Battelle 研究所の大西博士 (Y. Onishi, Ph.D) に研究を委託した。東海事業所では、その成果をふまえて Phase IV として解析、検討、プログラムの追加等を行った。

以下に各 Phase において実施した検討内容を記載する。

(1) Phase I (1977年～1978年)

Phase I は、次期以降モデル開発を行っていくために必要な情報の収集・調査を目的とし、放射性物質の海水中での拡散、海底土への移行等のモデル化に際して考慮すべき事項の検討、これらに関連する因子の影響の検討等を Battelle 研究所の大西博士らに委託した。この結果大西博士は、自ら開発したモデル FETRA (Finite Element TRANsport model) が有用である旨を提案した。FETRA は、河川、湾における汚染物質の移行・蓄積を解析するための有限要素モデルであり、米国においては James 川の Kepone 汚染、Columbia 川及び Clinch 川における放射性物質汚染等の評価に使用された実績があった。近年は、英国 Sellafield 再処理施設からの海洋放出に起因する放射性物質の拡散解析に適用された例があるが、当時は海洋への適用の例がなく、次の Phase

において一次近似として波浪、流れに関するモデルを組み込み、予備的な検証を行うこととした。

(2) Phase II (1979年～1980年)

Phase IIは、Phase Iの調査を基にFETRAに波浪及び非定常な海域の流れを反映させる方法について検討し、予備的なシミュレーションを行うことを目的として同研究所に委託した。大西博士は、波浪の反射・屈折については、R.S.Dobson により開発された波浪反射モデル L03D を、また、流れについてはJohn D.Wang により開発されたCAFE-I、または RMA-IIを用いることを提案し、これらモデルにより予備的なシミュレーションを実施した。しかしながら、モデルがいくつかの不安定な要素を含んでいること、入力すべきパラメータを得ることが困難なこと等の問題点が挙げられた。

(3) Phase III (1981年～1982年)

Phase IIIは、Battelle 研究所への委託研究の最終期として、これまでの研究の問題点の整理、シミュレーションの実施、モデルの引き渡しについて委託した。大西博士は、流れについては CAFE-Iを用いることとし、モデルの不安定要素を改善するため計算節点のメッシュの変更等を行った。またFETRAについても source/sink の項を追加し、モデルの安定性を修正した。これら修正したモデルによりシミュレーションを実施し、報告書として取りまとめた。また、プログラムについては、原型が PDP VAX及び CDC7600で実行していた CDC バージョンであったため、事業団においても計算の実行が可能のように IBM バージョンに変換した。

(4) Phase IV (1982年～1984年)

Phase IVは、Phase IIIまでの成果に基づき、事業団が日本アイ・ビー・エム株式会社の協力を得てモデルの評価とシミュレーションの実行等を行った。いくつかのケース・スタディの結果から、プログラム上の修正を行ったほか、計算結果の図形化処理プログラムを追加した。

これまでのモデル開発の経緯は以上のとおりであり、現在は Phase Vとしてプログラムの効率化と入力パラメータの検討を行っている。

4. 移行モデルの概要

海洋における放射性物質の移行を考える時、プールや池などの閉鎖系の水域と大きく異なる点は境界のない開放系の水域であるということであり、海域の流れ、波、風のような動的な外力に大きく左右さ

れる。

Phase IからPhase IIIにおいては、このような観点からいくつかのモデルの適用性を検討した。これにより整備した移行モデルの概要と構成は図1に示

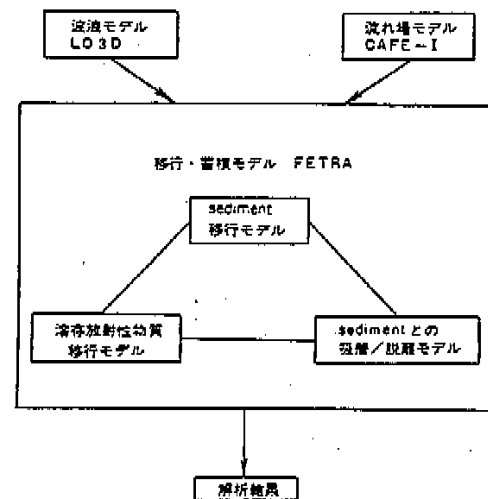


図1. 移行モデルの構成

すとおりである。移行モデルは、波浪の反射、屈折を解析するモデル L03D、海域の非定常流れを解析する有限要素モデル CAFE-I、海域における放射性物質及び sediment の移行・蓄積を解析する有限要素モデルFETRA の3つの基本モデルから構成されている。以下に、FETRAを中心として各モデルの概要を記載する。

4.1 波浪モデルL03D

FETRA において、波浪による沿岸域での放射性物質の拡散、sediment の攪乱等を解析するために必要なパラメータは、wave refraction model L03D により解析する。

波浪が十分に発達するまで風が所与の条件を継続するものと仮定すると、波の周波数 f (1/s) 及び最大波高 H_m (m) は、風速 u (m/s) の関数として次式で与えられる。(Hasselmann et al, 1976)

$$f_w(u) = 1.372/u \quad (1)$$

$$H_m(u) = 0.02478 u^2 \quad (2)$$

ここで、波が十分に発達するまでの時間は次式で与えられる。

$$t_w = 7278 \cdot u \quad (3)$$

また、任意の地点における波高 H は次式で与えられる。

$$H = H_m \cdot K_r \cdot K_s \quad (4)$$

ここで、 K_r は屈折率、 K_s はshoaling 率である。
両パラメータは、Shore Protection Manual (U.S. Army Corps of Engineers) に示される Snell の法則を基礎とした計算方法により計算される。

これらの計算をすべての波の条件に応じて計算することは実用的でないで、風速階級ごとに波の周波数を分類し、風向ごと、波の周波数ごとにL03Dの計算を行い、FETRA への入力のためのデータを準備することとした。

4.2 流れ場モデル CAFE-I

FETRA において、放射性物質の移行を解析するための海域の流れは、2次元有限要素モデルCAFE-Iにより解析する。CAFE-Iは、非定常粘性流体の流れを解析することができる。モデルには、風による吹送流(海面に働くせん断応力として取り扱う)、潮汐による水位変動、コリオリの力を含んでおり、これらによる海域の流れの計算結果がFETRAに入力され、拡散方程式の移流項に反映されることとなる。

CAFE-I で用いている流れ場の基本式は、(5)式の連続の式と(6)及び(7)式の運動量保存式である。これら流れ場のメカニズムの概念図を図2に示す。

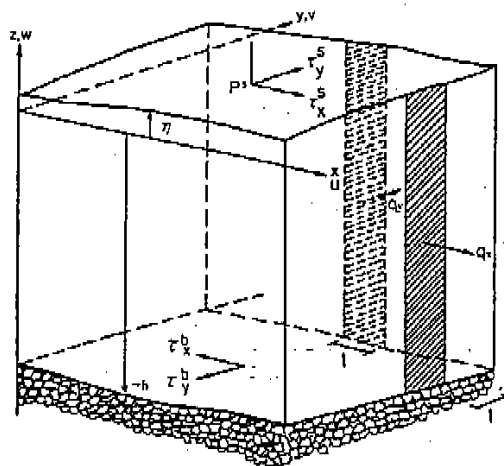


図2. 流れ場のメカニズムの概念図

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}q_x) - f q_y + \frac{\partial}{\partial x}(F_p - F_{xx}) - \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0}(\tau_x^t - \tau_x^b) - \bar{m}_x - \frac{1}{\rho_0}(P_s \frac{\partial H}{\partial x} +$$

$$\Delta \rho g H \frac{\partial h}{\partial x}) - g \eta \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}q_y) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{u}q_y) + f q_x - \frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(F_p - F_{yy}) + \frac{1}{\rho_0}(\tau_y^t - \tau_y^b) - \bar{m}_y - \frac{1}{\rho_0}(P_s \frac{\partial H}{\partial y} + \Delta \rho g H \frac{\partial h}{\partial y}) - g \eta \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここで、

H : 水深

$H = h + \eta$: h : 平均水深、 η : 水位変化

q_x, q_y : x 方向及び y 方向への流量

q_i : 体積増加率(物質収支的に閉じた系であれば $q_i = 0$ であるが、放出水のような他の系からの流入のある系ではその増加率)

u, v : x 方向及び y 方向への流速

f : コリオリの係数

F_p : 圧力

F_{xx}, F_{xy} : 応力テンソル

F_{yx}, F_{yy} : 応力テンソル

τ_x^t, τ_y^t : 海面におけるせん断応力

τ_x^b, τ_y^b : 海底面におけるせん断応力

ρ : 海水密度

P^s : 海面圧力

g : 重力加速度

m_x, m_y : 運動量増加率

応力テンソル F_{xij} は、次式で与えられる。

$$F_{xij} = E_{ij} \left(\frac{\partial q_i}{\partial x_j} + \frac{\partial q_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

ここで、 E_{ij} は渦動粘性係数である。

また、海面に働くせん断応力は次式で与えられる。

$$\tau^s = \rho_a C_D U^2 \quad (9)$$

$$C_D = (1.1 + 0.0536U) \times 10^{-3} \quad (10)$$

ここで、

ρ_a : 空気の密度

C_D : 吹送係数 (wind drag coefficient)

U : 海面上10mにおける風速

また、海底との摩擦により海底面との間に働くせん断応力は次式で与えられる。

$$\tau_x^b = C_t \rho (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_x}{H^2} \quad (11)$$

$$\tau_y^b = C_t \rho (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_y}{H^2} \quad (12)$$

$$C_t = n^2 g / H^3 \quad (13)$$

ここで、

C_i : 海底摩擦係数

ρ : 海水の密度

n : Manning の粗度係数

CAFE-I は、(5)、(6)及び(7)式に基づき各計算節点における海域の流れを計算し、FETRA への入力データを準備する。

4.3 移行・蓄積モデル FETRA

FETRA は、図1に示すように3つのサブモデルから成り立っている。すなわち砂、シルト等の海洋中に浮遊しているsedimentの移行サブモデル、海水中に溶存している放射性物質の移行サブモデル及び両者の相互作用を考慮した移行サブモデルである。これらはモデルごとにそれぞれ入力すべきパラメータが異なるが、その基本拡散式を一般化すると(14)式のように表わすことができる。

$$h \frac{\partial C_i}{\partial t} + hu \frac{\partial C_i}{\partial x} + hv \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x h \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y h \frac{\partial C_i}{\partial y}) - D + S \quad (14)$$

ここで、

h : 水深

C_i : 放射性物質またはsedimentの海水中濃度

u, v : x, y 方向への流速

k_x, k_y : x, y 方向への拡散係数

D : 海水中濃度の減少の項

S : 海水中濃度の増加の項

D 及び S 項は、計算対象となる物質によって異なり、各サブモデルで取り扱う対象物質によって計算パラメータが異なる。以下に、各サブモデルの概要とそのモデルの D 及び S 項の計算方法を記載する。

(1) sedimentの移行サブモデル

sedimentは、その粒子径により沈降速度、応力、吸着容量等の物理量が異なる。FETRA では、砂(sand; $64 \sim 200 \mu\text{m}$)、シルト(silt; $4 \sim 64 \mu\text{m}$)、粘土(clay; $0.2 \sim 4 \mu\text{m}$)の3種類に分類して取り扱っている。

sedimentの移行のメカニズムは、図3のように概念的に表わすことができる。

移行・拡散のメカニズムとしては、

i sedimentの移流・拡散

ii 沈降と凝集

iii 海底への沈降と海底からの脱離

iv sedimentの流入と混合

が考慮されている。

sedimentの移行に関する(14)式の D 及び S 項は以下のとおりであり、これを(14)式に代入し有限要素方程式に展開する。

$$D = S_{Dj} \quad (15)$$

$$S = S_{Rj} + h \cdot Q_l \cdot C_j + h \cdot Q_{sj} \quad (16)$$

ここで、

S_{Dj} : sediment j の海底土への沈着率

S_{Rj} : sediment j の海底土からの脱離率

Q_l : 流量フラックス (lateral flux of flow)

Q_{sj} : 他の系からの sediment の投入率

S_{Dj} 及び S_{Rj} は、表面波を伴う沿岸域、沖合域及び寄せ波域のそれぞれの条件に応じて、経験式等に基づき計算する。

(2) 溶存放射性物質の移行モデル

溶存放射性物質は、海水中で浮遊状態にあるsedimentや海底に沈着している sediment との間で吸

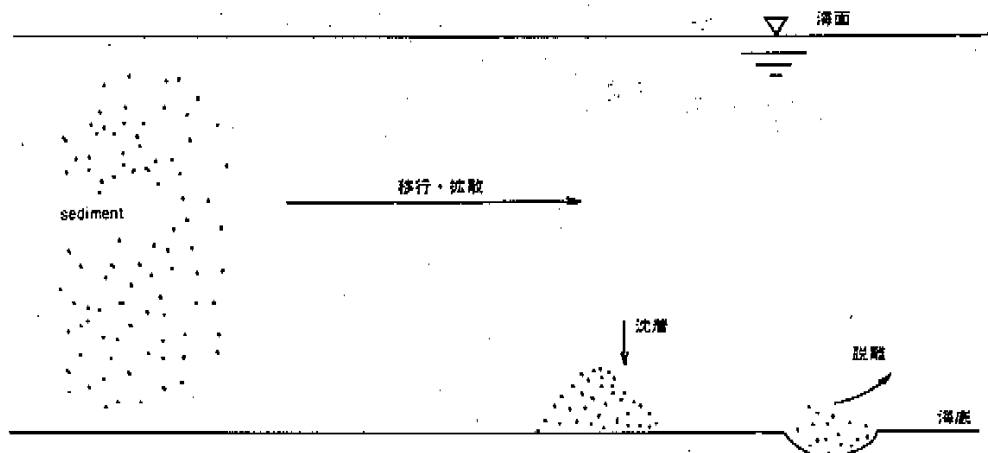


図3. sedimentの移行のメカニズムの概念図

着・溶離の相互作用を及ぼしあいながら移行・拡散していく。この解析メカニズムとして、

- i 溶存放射性物質の移流・拡散
- ii sediment への吸着・溶離
- iii 放射性崩壊等による減衰
- iv 汚染源からの放射性物質の流入と混合

が考慮されている。溶存放射性物質の移行に関する(14)式のD及びS項は以下のとおりであり、これを(14)式に代入して有限要素方程式に展開する。

$$D = h \cdot \lambda \cdot C_w + h \cdot Q_i \cdot C_w + \sum_j K_j K_{d_j} C_j C_w + \sum_j K_{b_j} \gamma_j (1 - P) D_j K_{d_j} C_w \quad (17)$$

$$S = \sum_j h \cdot K_j G_j + \sum_j K_{b_j} \gamma_j (1 - P) D_j G_{b_j} + h \cdot Q_w \quad (18)$$

ここで、

- λ : 崩壊定数
- C_w : 放射性物質の海水中濃度
- K_{d_j} : 分配係数
- K_j : 海水中の sediment j への吸着/溶離が一定の割合で平衡に達するとした時の吸着率または溶離率
- K_{b_j} : 海底土の sediment j への吸着/溶離が一定の割合で平衡に達するとした時の吸着率又は溶離率
- C_j : sediment j の海水中濃度
- γ_j : sediment j の密度
- P : 海底土の空孔率
- D_j : sediment j の海底における有効直径
- G_j : sediment j に吸着した放射性物質の海水中濃度
- G_{b_j} : sediment j に吸着した放射性物質の海底土中濃度
- Q_w : 放射性物質の放出率

他の記号の意味は(15)及び(16)式と同様である。

(3) sediment に吸着した放射性物質の移行サブモデル

sediment と放射性物質は吸着/溶離の相互作用を及ぼしながら移行・拡散していく。この場合のsediment に吸着した放射性物質の解析メカニズムとしては、

- i 放射性物質の移流・拡散
- ii sediment への吸着・溶離
- iii 放射性崩壊等による減衰
- iv 海底土への沈降と海底土からの脱離
- v 汚染源からの放射性物質の流入と混合

が考慮されている。本サブモデルに関する(14)式のD及びS項は以下のとおりであり、これを(14)式に代入

して有限要素方程式に展開する。

$$D = S_{Dj} \cdot G_j + h \cdot \lambda G_j + h Q_i G_j + h K_j G_j \quad (19)$$

$$S = K_j K_{d_j} C_j C_w h + G_{b_j} S_{Rj} + h Q_j \quad (20)$$

ここで、 G_j は sediment j に吸着した放射性物質濃度であり、他の記号の意味は(19)~(18)式と同様である。

5. 海洋における放射性物質移行の解析例

5.1 解析条件

上記のモデルを適用した場合の解析例を以下に示す。海洋における放射性物質の移行の解析にあたり、図4に示す東海前面海域を解析対象とした。CAFE-I及びFETRAについては内側の領域(南北60km×東西20km)を対象としたが、L03Dの解析においては十分に発達した後の情報をFETRAに反映させるた

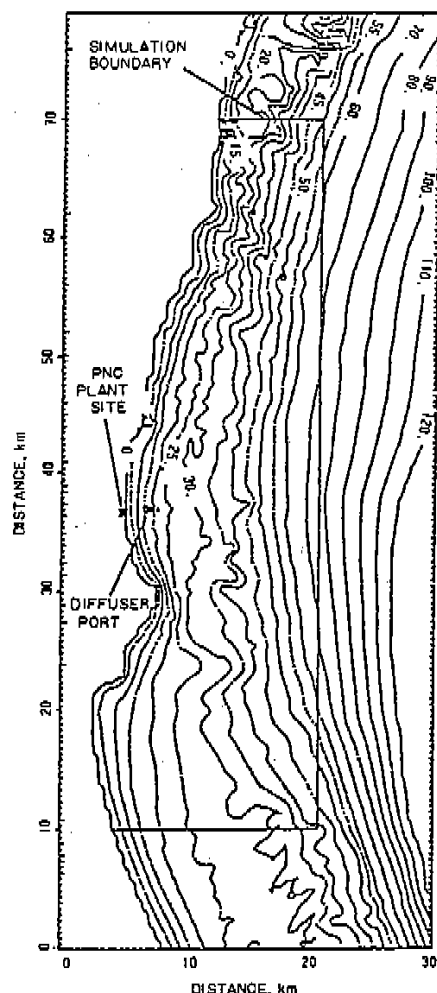


図4 解析対象領域

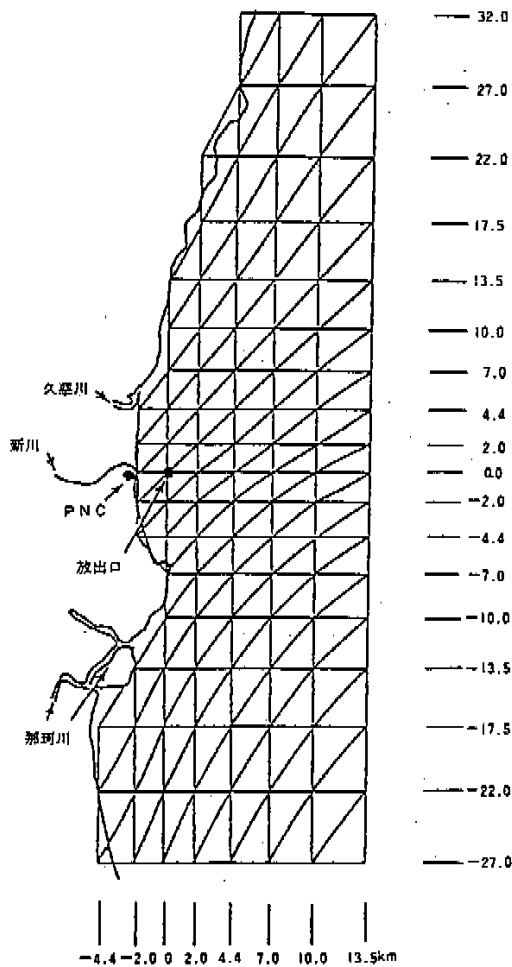


図5. 有限要素分割

め図の外側の領域(南北80km×東西30km)を対象とした。また、解析対象領域のモデル化にあたり、有限要素分割は図5に示すメッシュを設定した。計算節点は、CAFE-Iは3節点三角要素、FETRAは各要素の辺上にも節点を有する6節点三角要素である。海底地形形状については図4に示す平均水深を、各計算節点での値として入力した。

また、解析においてはパラメータを設定することが必要になる。これらについては、現在妥当なパラメータの設定方法及び設定値について検討を進めている段階であり、本試算では文献値等を参考として表1に示すパラメータ類を仮定した。

5.2 L03Dの解析例

東海前面海域の海底地形条件に基づく解析結果の一例を図6に示す。図6の例は、北東から南西方向

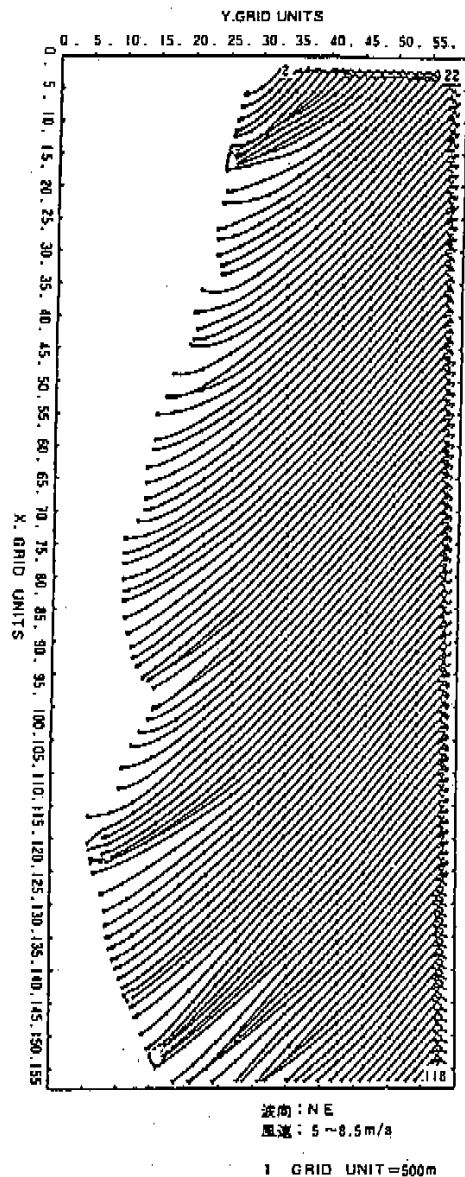


図6 L03Dの解析例

に向かって波が寄せ始めた場合の wave ray のプロット図であり、左側の空白の部分が陸地。各波線がそれぞれの波の挙動を示している。沿岸域に近づくに従い、海底地形の影響により Snell の法則に基づいた反射・屈折を示し、砕波状態となり海岸線でエネルギーを失っている状態が解析されている。これと同様の解析を風向ごと風速階級ごとに行い、必要な情報をデータファイルとして準備しておき、FET-RA に反映されることとなる。

表1. 本試算で用いた諸パラメータ類

項 目	諸パラメータ類の設定値等			
海水の取り扱い	2次元			
海底土の取り扱い	3次元			
計算モード	非定常			
放射性物質の放出率		2.74E-5	Ci/d	(0.01Ci/y)
拡散係数				
	x方向	100	m ² /d	(8.64E6 cm ² /s)
	y方向	100	m ² /d	(8.64E6 cm ² /s)
sedimentの初期海水中濃度				
	砂	0.0038	kg/m ³	
	シルト	0.0002	kg/m ³	
	粘土	0.0002	kg/m ³	
sedimentの直径				
	砂	0.05	mm	
	シルト	0.016	mm	
	粘土	0.002	mm	
分配係数				
	砂	8	m ² /kg	
	シルト	40	m ² /kg	
	粘土	80	m ² /kg	
sedimentへの吸着/脱離が一定の割合で平衡に達するとした時の吸着率または脱離率				
	海水中に浮遊しているsedimentに対して	20	1/d	
	海底土に沈着しているsedimentに対して	4	1/d	

5.3 CAFE-Iの解析例

CAFE-Iによる流れの解析は、動的に働く力としては風と潮汐を対象としている。風による吹送流の解析に当たっては、風向・風速の1時間値データをそれぞれのタイムステップとして入力することとしている。CAFE-Iで入力すべき風速データは海面上10mの風速であるが、観測データがないことから、本試算では東海事業所内の地上約70m（海拔約100m）の気象観測塔塔頂における観測データを入力した。

1日後から6日後の各タイムステップにおける海域の流速分布の解析結果の例を図7に示す。右下に示した解析期間の風向頻度は、前半は主に南方面からの風であったのに対して、後半は主に北方面からの風に移っている。これにより、解析期間の後半にかけて流速が小さくなってきているものと考えられる。これらの解析結果が、各タイムステップにおける海域の流れのデータとしてFETRAに反映されることとなる。

5.4 FETRAの解析例

L03D及びCAFE-Iの解析結果に基づきFETRAにより非定常流れ場における海水中放射性物質濃度分布の計算を行った。1日後から6日後のCAFE-Iの各タイムステップに対応した解析結果を図8に示す。解析結果は、海域における等濃度線分布として示しており、各等濃度線の値は各図の上に示した値である。等濃度線の分布形状としては、流れ場の影響を強く受けているようである。また、図9に流下方向への海水中濃度分布を放出率と各計算節点での水深で規格化した場合の規格化濃度分布を示す。縦軸に規格化濃度を、横軸に流れの方向への距離をとっている。流れの方向への濃度の低減率は、ほぼ距離に反比例する形で低減している。

FETRAでは、この他sedimentの海水中濃度、sedimentに吸着した放射性物質の海水中あるいは海底土への沈着濃度の計算も可能である。

6. 今後の課題

本報告では、これまで実施してきた移行モデルの検討の経過とその概要について述べてきたが、本格的な適用に当たっては、

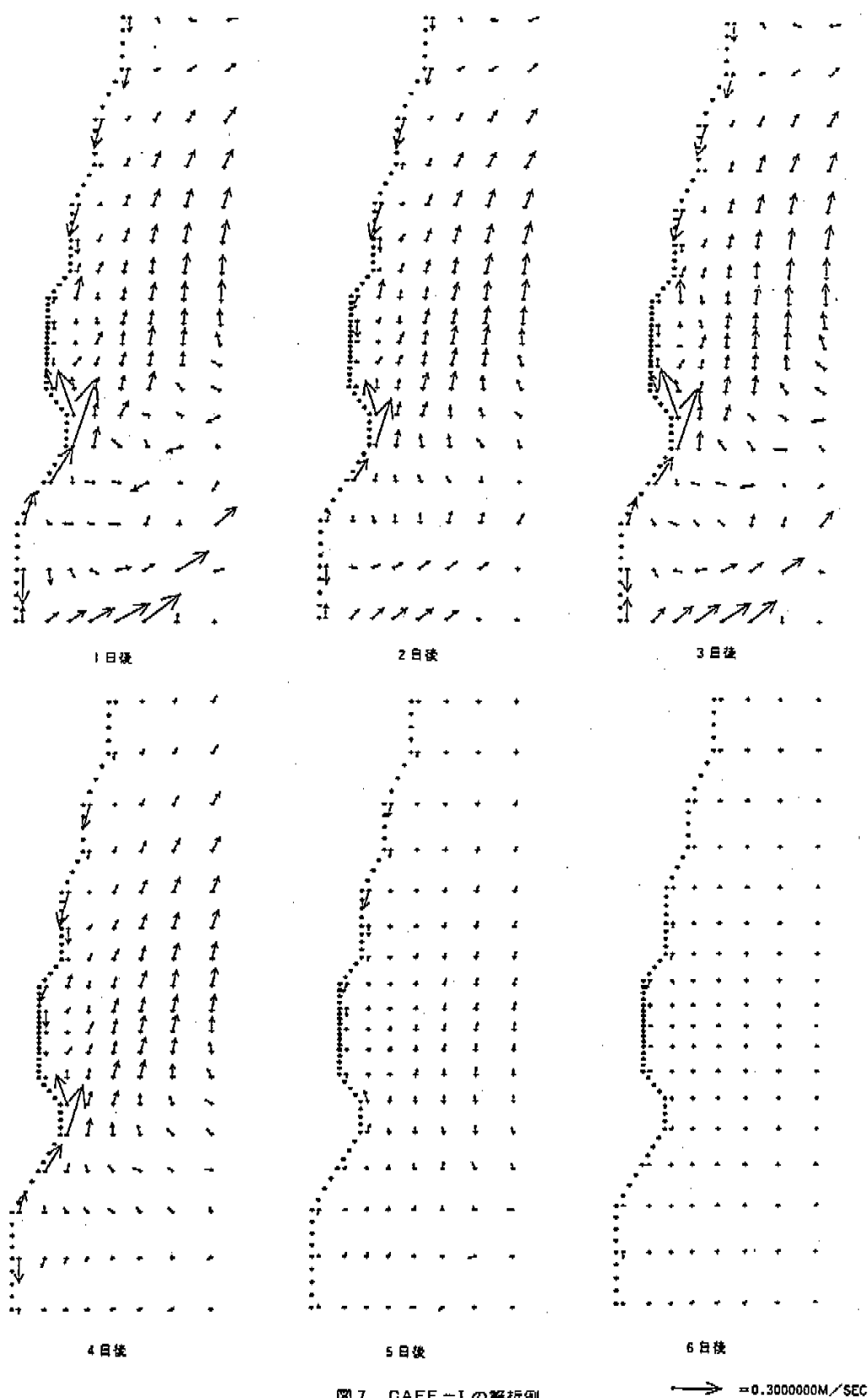


図7. CAFE-Iの解析例

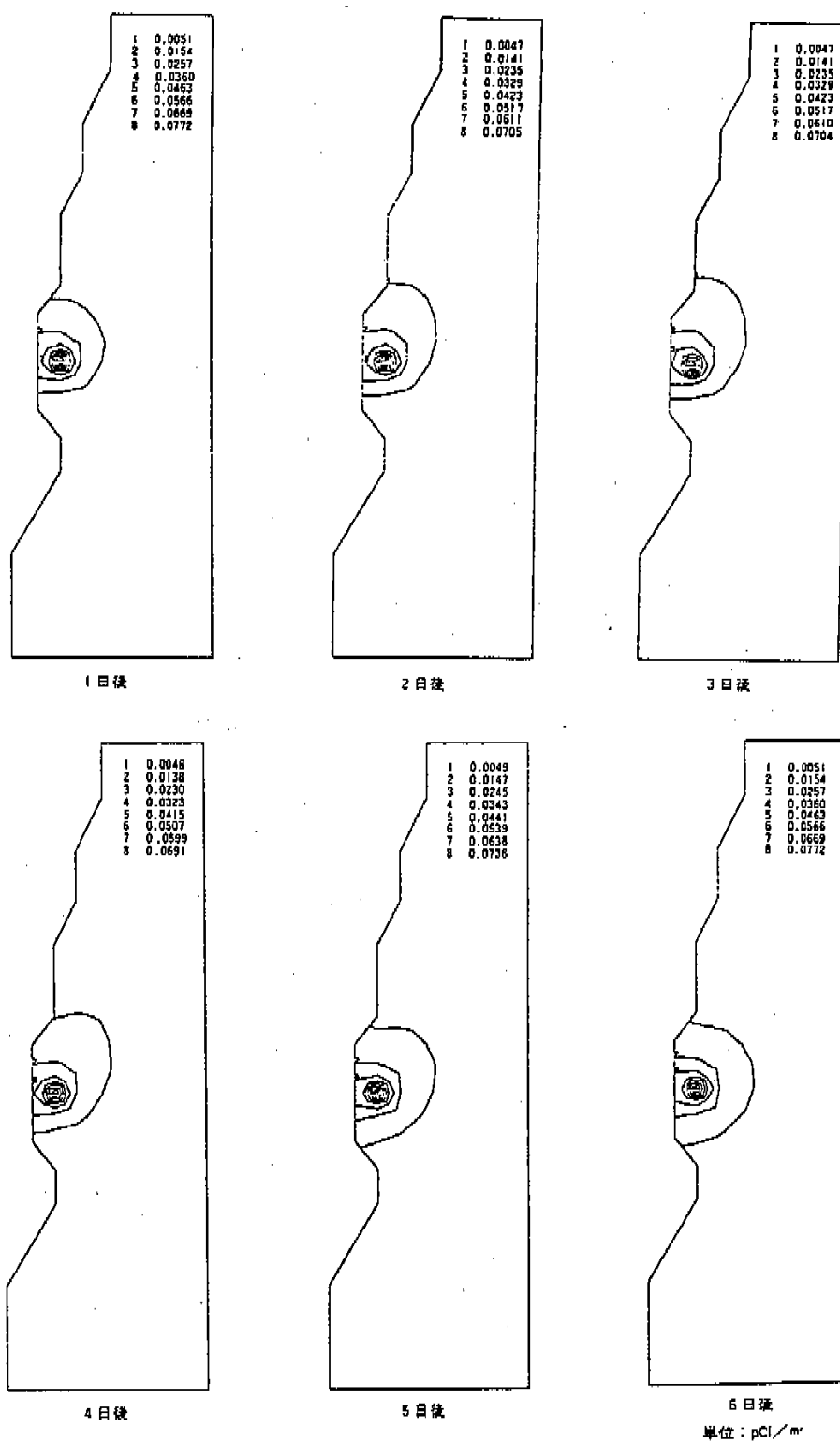


図 8. 海水中放射性物質濃度の解析例

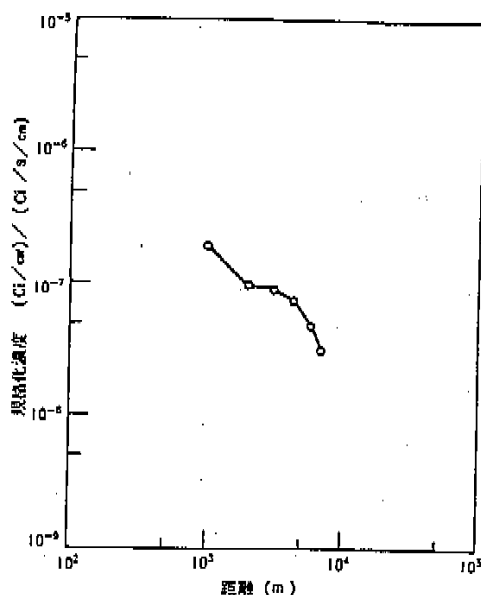


図9. 流下方向への規格化温度分布

- i 移行・蓄積の評価に用いるパラメータの設定
- ii 境界条件の設定
- iii 計算時間の短縮化
- iv 他の因子のモデル化の可能性
- v モデルの実用性の向上

等いくつかの課題が残されている。

これまでの検討は、主として数理工学的観点からの移行モデルの検討を実施してきており、実海域における実証といった観点からの検討は今後の課題として残されている。これは東海事業所に起因する蓄積傾向が認められないこと、また広域にわたる連続的な流動調査、実海域における拡散係数、sediment への分散係数等、本モデルの実証に必要な調査を継続的に実施することが困難なことによるものである。しかしながら、流動調査としては、図4に示した放出口付近において継続的な調査を実施してきており、また海底土の放射能バックグラウンド調査についても定期的の実施している。そこで、これらの既存データを整理し直し、モデルに入力できるよう情報の整理を開始した。また、パラメータの設定につ

いてもモデルの実証といった観点から、文献等を中心に検討していく予定である。

計算時間の短縮化については、現在 FETRA により 1 週間程度の期間のシミュレーションを実施するためには、FACOM M-380R コンピュータで約 1500 秒程度の CPU 時間を要することから、モデルの精度を落とすことなく計算時間を短縮化する方法の検討として、境界条件処理、行列消去の効率化等のプログラム上の整理を行っているところである。

また、これまでの検討に含まれていない波の回折マクロな海流等のモデル化の可能性についても文献等を中心に検討し、実用的なモデルについてはプログラム化を検討していきたいと考えている。

一方これらの課題とは相反する部分もあるが、実用性といった観点からは、その計算精度の許す範囲でモデルを極力単純化することが必要である。これらについても今後の検討の進捗状況をにらみつつ、検討する予定である。

7. おわりに

本報告では、これまでの検討内容の概要について述べてきた。しかしながら、本格的な適用にあたっては既に述べたような課題があり、現在 Phase V として、モデル実証のための既存データの整理、計算時間の短縮化のためのプログラムの整理を行っている。関連する情報等あれば、御指導いただければ幸いである。

参考文献

- 1) 杉本照典: 水質汚濁 現象と防止対策; 1974
- 2) 数理工学 No. 263: 特殊ナビエ・ストークス方程式; 1985
- 3) 川原勉人: 有限要素法流体解析; 1985
- 4) Yasuo Onishi, Stacy E. Wise: Mathematical Simulation of Transport of Sediment and Kepone in the James River Estuary; PNL-2731; 1978
- 5) Yasuo Onishi: Mathematical Simulation of Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters; BNWL-2228; 1977
- 6) Yasuo Onishi: Finite Models for Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters; BNWL-2227; 1977
- 7) Yasuo Onishi, F.L. Thompson: Mathematical Simulation of Sediment and Radionuclide Transport in Coastal Waters; NUREG/CR-2424; 1984
- 8) US Army Corps of Engineers: Shore Protection Manual; 1984
- 9) John D. Wang, Jerome J. Connor: Mathematical Modelling of Near Coastal Circulation; 1975
- 10) 浅野望三 他: 海洋における放射性物質移行モデルの検討; 日本環境物理学会第20回研究発表会