

流れと拡散に関する環境シミュレーション・プロセスの電算化

三井造船(株)玉野研究所 小寺洋一（正員）・藤原 航・原 平八郎（正員）
同上 システム・エンジニアリング事業部 山本英司

1. まえがき

港湾・海岸における流れと拡散の有限要素法による数値シミュレーションは、現地観測・実験から得られたデータの集積及び力学モデルの高精密化さらに電子計算機の高速化・低コスト化等の周辺の状況に支えられ、めざましい進展がなされている。しかし、これに伴ない、大量の入出力データの作成・整理に環境シミュレーション・プロセスの大半を費すようになってきておりこのために多くの問題点が発生しているのも事実である。そこで、シミュレーション・プロセスの省力化及び高信頼性をはかるため、最新の機材とシステムテクニックを駆使して入力から演算・出力までの一括システムを完成させた。すなわち、データの入力にはタブレットとグラフィックディスプレイにより海図・港湾図等より直接データを読みとり・入力できるようにし、またデータの出力は、対話方式による図及びグラフの作成のほか特に時刻歴データを動的に画像処理できるようにした。この手順の中で各種解析プログラム（流れ・拡散）のデータの保管形式は規格化されており、プログラム・システムとして有機的に作動するようになっている。

2. システムの概要

図1は、システム全体の構成と使用機器を示すものである。本システムは、大別すると、

- (1) 入力データ作成システム（対話処理）
- (2) 流れと拡散の解析システム（バッチ処理）
- (3) 出力データの編集システム（バッチ処理または会話処理）

より成立っており、これらを有機的に結合したものである。

各システム間のデータ授受はファイル受渡しとして、各システムの独立化をはかった。さらに、各システムの入口と出口におけるファイルは徹底した規格化を行ない、将来の解析機能拡張に対処している。

3. 流れと拡散に関する解析システム

各種の事業が環境に及ぼす影響を事前に予測することは、高度の技術を要すものである。まず、過去に行なわれた海象・気象等の観測結果の調査分析を十分に行ない、これらより明らかにされている事実に対応した数学モデルを選択し、流れと拡散の実態を十分把握することが必要となる。本システムでは、現在のところ、表1に示す解析機能をサポートしている。解法は、従来の差分法にかわって有限要素法で統一している。今後、解析機能の拡張等を行ない、より精度の高いシステムとしていく予定である。

4. インプットデータ作成システム

構造データ作成システムと境界データ作成システムから成り、解析に必要な全てのデータを対話形式で作成する。

4.1 構造データの作成

港湾・海域の環境問題の解析においては、次のような固有のむずかしさがある。

- (1) メッシュ分割は、港湾計画図、海図等を利用して行うのに対し、このメッシュ点の水深は、最新の深浅測量図を中心にして求める場合が多い。このとき、縮尺倍率の異なった図面の場合が多く、スケールの換算計算にかなりの時間を費やし、誤りも生じ易い。
- (2) また、一般に海岸線は入り込んでおり、水深も複雑に変化している。
- (3) 解析の効率化という観点から、同じ形状の要素をなるべく多く用いたい。

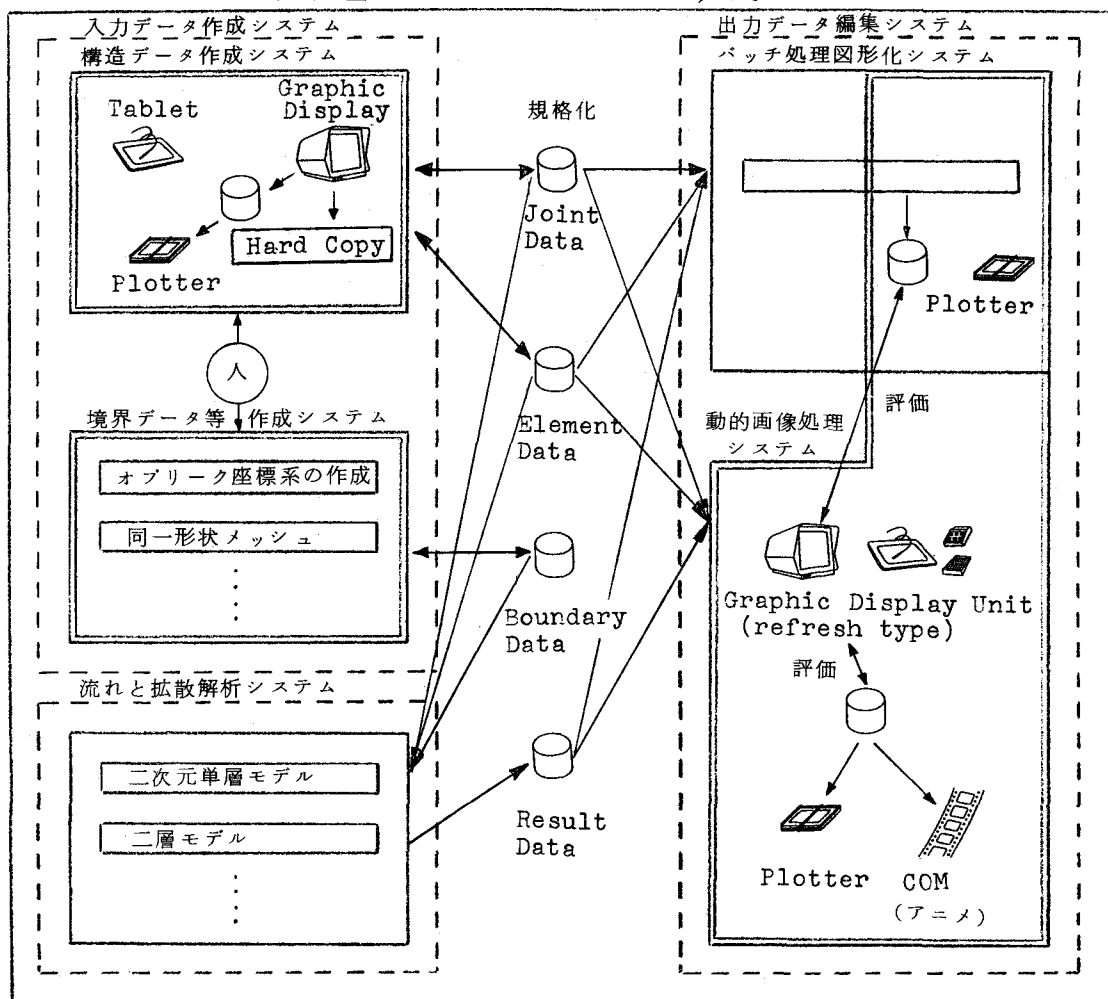


図1 システム全体構成と使用機器 (注) 2重枠: 対話処理

表1. 解析機能

	数学モデル	定常・非定常	解 法	適 用 例
流れ	二次元 単層モデル	定 常 準 定 常 非 定 常 波 海浜流定常 非定常	流れ函数を主変数, Newton Raphson 法 周期的摂動法 陽な二段階 Lax-Wendroff 法 E. Noda の方法 波の効果・ラディエーションストレス "	海 流 潮汐流 潮汐流 津波 波 浪 沿岸流 離岸流 "
	二層モデル	非 定 常	陽な二段階 Lax Wendroff 法	河口密層流
拡散	二次元 単層モデル	定 常 非 定 常	Crank Nicolson 法	SS, COD 拡散 "
	二層モデル	非 定 常	"	"
	三次元モデル	非 定 常	"	"

このため、構造解析の分野で開発・使用されているメッシュ・ジェネレータをそのまま適用しても、あまり効果的でない。本報では、メッシュ・ジェネレータ自体の機能は単純でも、判断を加えながらメッシュ分割が行なえる手法が最も適しているものと判断して、自動節点読み取り装置（タブレット）とグラフィック・ディスプレイを利用した対話式メッシュ・ジェネレータを開発した。

本システムによる構造データの作成手順は次のようになる。

- (1) まず、図面の縮尺倍率、三角点等の基準となる2点を入力した後、各図面により、港湾形状、地形水深をタブレットで入力する。入力された値を大型計算機を介してプロッタあるいはグラフィック・ディスプレイへ出力し、エラーチェックと修正を行う。
- (2) 解析領域を指定すると、その範囲の港湾形状、地形図、等水深図の合成されたものが、同じく、プロッタあるいはグラフィック・ディスプレイへ出力される。
- (3) このプロッタ図等をもとに、再度タブレットを使用して節点と要素を順次入力していく。この際、同じ形状の要素が規則的に配列している場合には、タブレットで入力した2点間を等間隔に分割し、新しい節点と座標をジェネレートする Divide Line 機能、および要素番号と要素構成節点をジェネレートする Mesh Incidence 機能を用いることにより効率よくメッシュ分割を行うことができる。また、節点や要素を消去する機能もある。
- (4) このようにして得られたメッシュ点における水深は、(1)で入力した水深図をもとに自動的に求められる。
- (5) タブレットで入力するため、節点座標に誤差が生ずるが、指定誤差内の座標値を丸める機能がある。また、計算効率を上げるため、バンド幅を最小とする節点のリナンバリングとフロント幅を最小とする要素のリナンバリング機能のいずれかを使用できる。

図2は本システムによって節点データを入力しているときの写真である。

4.2 境界データ等の自動作成

(1) オブリーク座標系の定義

陸岸における境界では

(a) 流速を零とするか、あるいは

(b) 流れが境界を通過しないという条件 $V_n=0$ を与える必要がある

(a)の場合問題はないが、(b)の場合、次のような方法を用いた。

連続方程式の離散化において、重み関数 w を乗じて、領域 V 内で積分すると (1) 式が得られる。

$$\int_V w \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{ (H+\eta) u \}}{\partial x} + \frac{\partial \{ (H+\eta) v \}}{\partial y} \right\} dV = 0 \quad (1)$$

(1) 式の第2, 3項を部分積分すると、

$$\int_V \left\{ w \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial x} (H+\eta) u - \frac{\partial w}{\partial y} (H+\eta) v \right\} dV + \int_S (H+\eta) V_n dS = 0 \quad (2)$$

となる。したがって、 $V_n=0$ は自然境界条件として満足されるようになる。しかし、この条件だけでは、安定した解を得るには不十分なため、本報では、この条件に加えて、図3のようにオブリーク座標系を定義し、 $V_n=0$ とした。図3のB, D点のように、オブリーク座標系が一義的に決まる場合には問題はないが、C点のように一義的に決まらない点がある。連続系では、凹点で流速値が零、凸点で ∞ となる。一方、離散系では境界条件として決定的なものはないが、平均的な意味で $V_n=0$ とする Gray の方法は一つの有効な方法と考えられ、本システムでも選択できるようになっている。

すなわち、

$$\int_S V_c \phi_c n dS = 0 \quad (3)$$

ここで、 $U_c = U_c i + V_c j$ ， ϕ_c : 形状関数， η : C点における単位法線ベクトル $S: A B C D E$ である。

$S: A B C D E G \cdot A$ とし、で囲まれた領域をEとすると、

$$\int_S U_c \phi_c n dS = \int_{\Gamma} U_c \phi_c n d\Gamma = \int_E (U_c \frac{\partial \phi_c}{\partial x} + V_c \frac{\partial \phi_c}{\partial y}) dA = 0 \quad (4)$$

$U_c = V_n \cos \theta_c$ ， $V_c = V_n \sin \theta_c$ であるから、

$$\cos \theta_c \int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial x} dA + \sin \theta_c \int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial y} dA = 0 \quad (5)$$

$\sin^2 \theta_c + \cos^2 \theta_c = 1$ であるから

$$\cos \theta_c = \int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial y} dA / \sqrt{(\int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial x} dA)^2 + (\int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial y} dA)^2} \quad (6)$$

$$\sin \theta_c = \int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial x} dA / \sqrt{(\int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial x} dA)^2 + (\int_E \frac{\partial \phi_c}{\partial y} dA)^2} \quad (7)$$

が得られる。

(2) 同一形状要素の扱い

要素剛性マトリックスの計算は、高次の形状関数を用いる場合、一般に計算時間を要す。ここでは、同一形状の場合その計算を一度だけですますようにし、計算時間の短縮をはかっている。

5. 出力データの編集システム

非定常現象等を有限要素法で解析する場合、膨大な量のデータが出力されるが、これらのデータの適確な把握には多大の労力を要する。解析全般を見渡すことができ、しかも専門家でなくても経時変化の様相を分り易く把握できる結果の表示法が必要となるが、ここでは、動的画像処理システム RIPPLE²⁾を採用した。

RIPPLE は次のような特長を有している。

- (1) リフレッシュ型グラフィックディスプレイを利用した対話型、図形出力処理システムである。
- (2) 有限要素法の解析結果に対し、静的及び動的画像処理が行える。
- (3) 動的画像の表示においては、経時変化に応じた連続管面表示とともに、特定時刻の指示、表示の一時停止、表示コマの1コマ送り、コマの逆送り等の機能を備えており、利用者の理解しやすい表示間隔も選択できる。
- (4) 静的画像及び動的画像をプロッタやグラフィックコムに出力することができる。

このシステムを採用することにより、グラフィックディスプレイの管面上でレポートにそのまま使用できる各種図形を迅速に作成することができるほか、グラフィックコムによるアニメーションフィルムの作成により複雑な非定常現象が明確に把握できるようになった。

このシステムを利用して、港湾周辺の潮流流及びその流れ場でのCOD汚濁拡散を解析し、アニメーションフィルムとしたものの内のあるコマを図4に示す。このうち(a)は解析モデル、(b)はメッシュ分割図、(c)は潮流ベクトル図でタイマーを同時表示したもの、(d)はCOD等濃度線図で潮流ベクトル図とタイマーを同時表示したものである。このアニメーションにより流れと拡散の計算結果を総括的かつ正確に把握することができる。

6. 本システムによる効果

本システムの使用により、次のような効果が得られた。

- (1) 境界形状や水深が複雑な場合でも、インプットデータの作成に要す期間および工費を大幅に低減

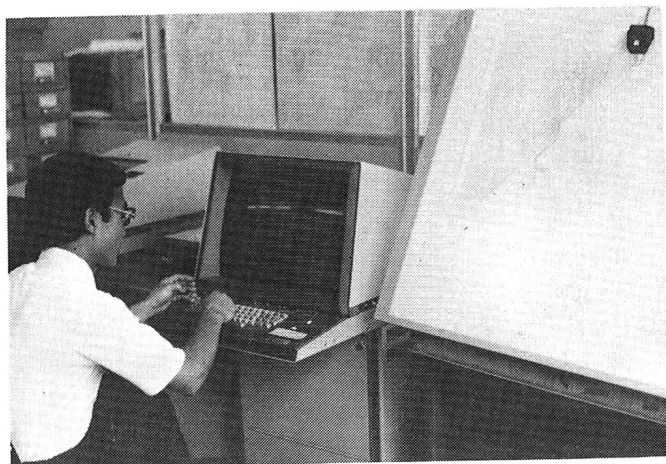


図2 節点データ入力風景

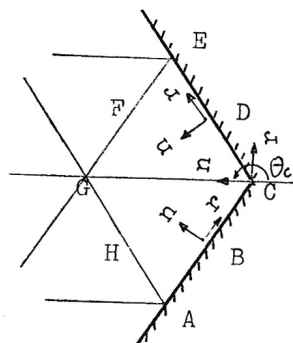
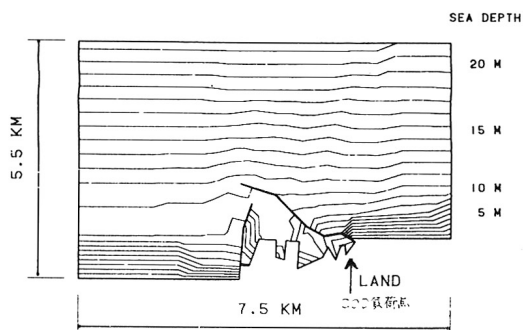
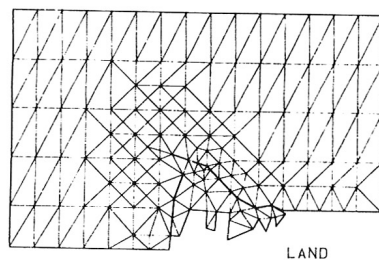


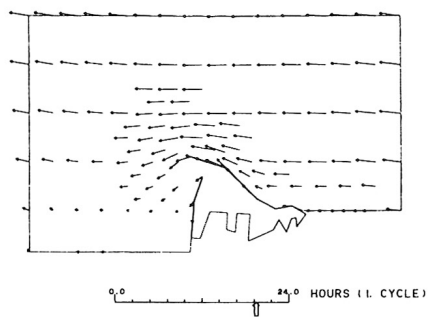
図3 オブリーク座標系の定義



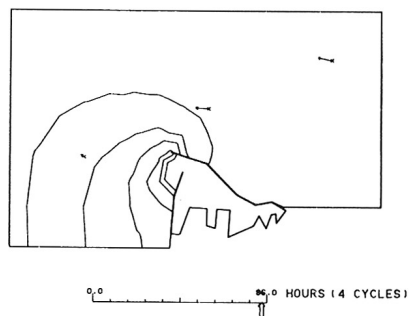
(a) 解析モデル



(b) メッシュ分割図



(c) 潮流ベクトル図



(d) COD等濃度線図

図4 解析例

できる。たとえば、実工数3～4人日を要していたものが1日程度に減少した。

- (2) 異なった縮尺倍率の図面（港湾計画図、海図、深浅測量図等）から構造データの節点座標値や水深を作成する際に必要であったスケール換算計算に費やす期間・工費および誤りの解消がはかれる。
- (3) 計算結果の把握が効率良く、適確に行なえるようになった。たとえば、従来のプロッターベースで、所要期間5日、実工数1人日程度のものが、所要期間0.5日、実工数0.5人日程度となった。
- (4) ライトペンによって画像へ直接入力することができ、かつ描画速度が早いことから、各種の図形はそのままの形でレポートに使用できるよう、目的にそった出力の加工が容易、かつ迅速にできる。
- (5) フィルムによるアニメーションは、専門技術者でなくても、経時変化の挙動を分り易く把握できる。

7. あとがき

港湾・海岸における水理関係の環境問題（流れと拡散）を解くための有限要素法によるシミュレーションシステムを、pre/post processor を中心に紹介した。

現実の港湾・海岸の現象は複雑で、パラメータの定式化やそれらの値には未解明のものも多い。今後、これらの因子も考慮し、さらに解析機能の拡張を行うことにより、より精度の高い解析システムを確立していく予定である。

参考文献

- 1) 原平八郎, 小寺洋一, 笠原公一: 港湾土木における流れと拡散の環境シミュレーション, 三井造船技報 第108号, 昭和55年10月, PP. 1~7
- 2) システム本部: RIPPLE - 有限要素解析における動的画像システム, 三井造船技報 第109号, 昭和56年1月, PP. 1~8
- 3) W.G. Gray: An Efficient Finite Element Scheme for Two - Dimensional Surface Water Computation, Finite Element in Water Resources, Gray (ed), Pentech Press, 1976, P. 4. 33
- 4) 川原睦人他: 2段階ラックス・ウェンドロフ有限要素による潮汐流解析, 第23回海岸工学講演会講演集 (1976)
- 5) M. Kawahara, K. Hasegawa: Periodic Galerkin Finite Element Method of Tidal Flow, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 12, 1978, P. 115
- 6) I. Imafuku, Y. Kodera, M. Sayawaki, M. Kono: A Generalized Automatic Mesh Generation Scheme for Finite Element Method, Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 15, 1980, P. 713
- 7) J. Suhara, J. Fukuda: Automatic mesh generation for finite element analysis, in Advance in Computational Methods in Structural Mechanics and Design, Univ. of Alabama Press, 1974, PP. 607~624
- 8) 堀江毅: 沿岸海域の流れと物質拡散の予測手法, 第16回水工学に関する夏期研修会講義集Bコース, 1980, 土木学会水理委員会
- 9) 杉本昭典: 水質汚濁 現象と防止対策, 技報堂, 昭和49年
- 10) 埋立計画の実施と環境影響調査, フジ・テクノシステム