

# パソコンによる水質シミュレーションの可能性について — 徳山湾の流動・拡散シミュレーションを例として —

山口県環境保健研究センター

溝田 哲

## The Possibility of Water Quality Simulation with a Personal Computer

— An Example of Simulation in Tokuyama Bay —

Satoshi MIZOTA

Yamaguchi Prefectural Research Institute of Public Health

### はじめに

筆者は、10年前に、海域や湖沼(ダム湖)の水質保全施策の一環として汚濁解析に携わりその方法論の一つとして水質予測モデルによる水質変化数値シミュレーションを行った。シミュレーションシステムは、実務上利用可能であったパソコンで作成した。

パソコンを利用したシミュレーションは、パソコンの性能からくる制約が大きく、モデルの選定や空間計算ステップ(差分格子)などについての精度を犠牲にせざるを得なかった。

当時作成したシミュレーションシステムの一つに二次元単層流動・拡散モデルがある。このモデルで一週間程度の拡散の様子を見るには、12時間以上の計算時間を必要とした。また、差分格子数を多くして空間精度を上げるこ

とも困難であった。したがって、パソコンを用いてこのモデルに実用性を持たせるのは容易ではなく、実務に用いることはなかった。

現在のパソコンの状況を見ると、その性能は飛躍的に向上し、CPUの動作クロックだけを見ても当時の40倍以上である。そこで、10年前に実用的ではなかったシミュレーションシステムが、現在の状況でどの程度の実用性を示すのか、徳山湾の潮流・拡散シミュレーションの例を通して検討し、これからのパソコンを利用したシミュレーションの可能性を探る。

### シミュレーションシステム

#### 1 モデルの選定

潮流計算には、図1に示す二次元単層流動モデル<sup>1)</sup>を

#### 1. 流動方程式

鉛直方向に平均化された二次元流れの方程式は、次のように表せる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fV - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + Ax \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \left[ \frac{\gamma_s^2 u \cdot (u^2 + v^2)^{1/2}}{h + \xi} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fU - g \frac{\partial \xi}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} + Ay \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \left[ \frac{\gamma_s^2 v \cdot (v^2 + u^2)^{1/2}}{h + \xi} \right]$$

$$\begin{aligned} \gamma_s^2 &= g/C^2 \\ C &= (1/n)R^{1/3} \\ n &= 0.026 \text{ (マンニングの粗度係数)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = - \frac{\partial [(h + \xi)u]}{\partial x} - \frac{\partial [(h + \xi)v]}{\partial y}$$

#### 2. 拡散方程式(深さ方向に平均化された)

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(h + \xi)c]}{\partial t} &= - \frac{\partial [(h + \xi)uc]}{\partial x} - \frac{\partial [(h + \xi)vc]}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial [(h + \xi) \cdot K_x \frac{\partial c}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \xi) \cdot K_y \frac{\partial c}{\partial y}]}{\partial y} + HSc \end{aligned}$$

図1 鉛直方向に平均化された二次元流及び拡散方程式

用い、拡散計算には二次元単層拡散モデル<sup>1)</sup>を用いた。このモデルは、流れを深さ方向に平均化して単層で扱い、水平方向を二次元で計算するものである。

1の運動方程式は潮流現象を記述するものであり、2の拡散方程式は保存性物質の移流拡散現象を記述するものである。ここでは文献<sup>1)</sup>を参考にして、対象領域を図2に示す正方格子で表現する有限差分法(差分法)に基づいて定式化<sup>1)</sup>(一部を図3に例示した)、コンピュータプログラムに記述して計算を行なう。徳山湾を格子分割したものを図4に示す。正方格子の必然性は無いが、計算プログラムの記述や計算の容易性から正方格子を用いた。

2 コンピュータプログラム

(1) 開発環境

利用した開発環境を表1に示す。10年前のシステムは、コンピュータの処理能力が低いことを考慮して可能な限り実用的時間内で計算が行えることを最優先に考えた。

現在のシステムは、10年前のものを表1に示す環境で利用できるように手直したものであるが、計算精度や計算時間など基本的なところの変更はない。

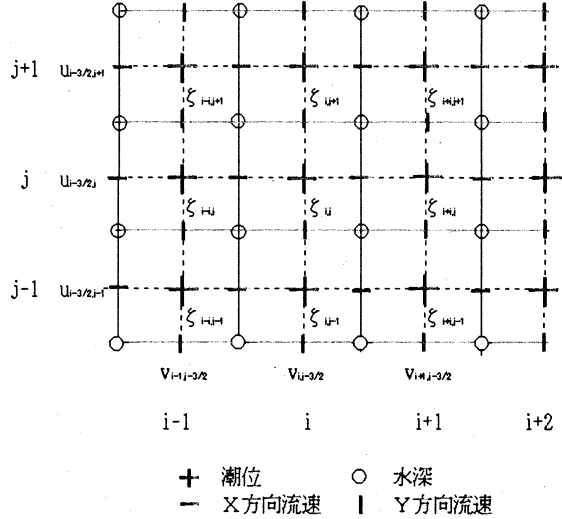


図2 差分格子と各要素の配置

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2, j}^{t+\Delta t} - u_{i+1/2, j}^t}{\Delta t} &= fV^t - g \frac{\zeta_{i+1, j}^{t+\Delta t} - \zeta_{i, j}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - u_{i+1/2, j}^t \frac{u_{i+1/2, j}^t - u_{i-1/2, j}^t}{2\Delta x} \\ &\quad - v_{i, j+1/2}^t \frac{u_{i+1/2, j+1}^t - u_{i+1/2, j-1}^t}{2\Delta y} \\ &\quad + Ax \left( \frac{u_{i+1/2, j}^t - 2u_{i+1/2, j}^t + u_{i-1/2, j}^t}{\Delta x^2} + \frac{u_{i+1/2, j+1}^t - 2u_{i+1/2, j+1}^t + u_{i+1/2, j-1}^t}{\Delta y^2} \right) \\ &\quad - \frac{\gamma \zeta_{i+1/2, j}^t \cdot ((u_{i+1/2, j}^t)^2 + (V^t)^2)^{1/2}}{2} \\ &\quad - \frac{1}{2} (h_{i+1/2, j+1/2} + h_{i+1/2, j-1/2} + \zeta_{i+1, j}^{t+\Delta t} + \zeta_{i, j}^{t+\Delta t}) \\ V^t &= \frac{1}{4} (v_{i+1/2, j+1/2}^t + v_{i+1/2, j-1/2}^t + v_{i-1/2, j+1/2}^t + v_{i-1/2, j-1/2}^t) \end{aligned}$$

図3 運動方程式の差分化の例 (u成分)

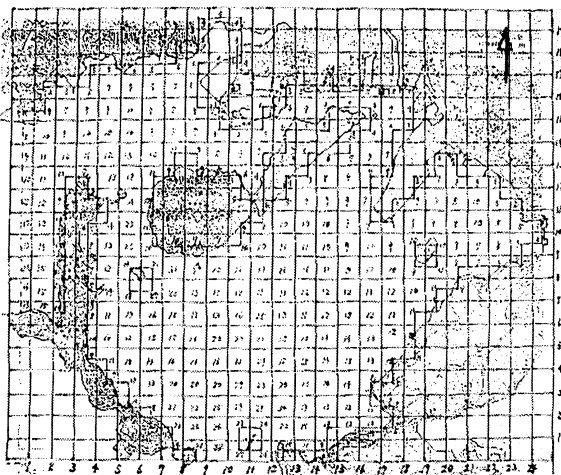


図4 徳山湾の格子分割例

表1 開発環境

		10年前	現在
パソコン	CPU	80386	Pentium III
	クロック	20MHz	750MHz
	RAM	128KB	128MB
	HD	100MB	20GB
OS		MS-DOS	Windows98
プログラム開発言語		N88BASIC <sup>2)</sup>	ActiveBasic <sup>3)</sup>
		MS-FORTRAN <sup>4)</sup>	MS-Visual C <sup>4)</sup>

(2) 計算

10年前は、FORTRANを用いて計算部を作成した。当時のFORTRANは、計算には向くがGUI等の入出力インターフェイスが備わっておらず計算条件等の設定など計算以外の部には不向きであった。GUIを備えたC言語(C)の利用も考えたが、当時のCは計算能力がFORTRANよりも劣る(特に浮動小数点演算において)ということであったので用いなかった。

現在は、MS-Visual Cを用いている。これは、現在のCは計算能力もFORTRANに劣らずGUIも備わっており、かつ日常的に利用している環境なので移植等の作業が容易であること等を考慮したものである。

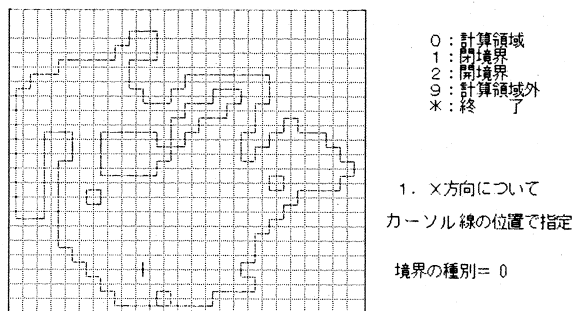


図5 計算格子の設定画面

(3) 条件等の設定

10年前に利用可能な環境であった(Cも利用可能であったが、FORTRANを選んだ為に予算的に利用不可) N88BASICで作成し、全ての条件をコンピュータ画面(画面)上で設定できるようにした。

対象領域の正格子設定例を図5に示す。画面に分割数だけの正格子を描きその格子上を移動するカーソル位置の条件を数値キーで設定(閉境界:1, 開境界:2, 計算域:0, 計算域外:9)することで対象領域を格子分割する。

現在はこれをActiveBasicに移植して用いている。このBasicは、N88BASICを小規模な手直して移植可能なWindows上で動作するBASICコンパイラである。

3. 計算条件

(1) 流動モデル

拡散計算用の計算は、表2に示す空間条件及び境界条件等で行い、計算安定後の一潮汐を視覚化と拡散計算用としてHDに保存した。潮汐調和定数は徳山湾検潮所の潮汐観測データ<sup>3)</sup>の調和解析で求めた。

その他の計算は、表2及び境界強制水位として観測データを用いる条件で行った。

(2) 拡散モデル

表3に示す初期条件及び流入負荷条件と流動条件として潮流計算結果の一潮汐分を用いた。

表2 潮流計算の条件設定

条 件	設 定 値
格子数	X方向 24, Y方向 19
格子間隔	500 m
計算時間ステップ	180 秒
水 深	海図より読み取り.(m)
海底摩擦係数	式1のとおり (R: 平均水深)
境界強制水位	$\zeta = \alpha \sin [(2\pi/T) \cdot t - \theta]$ T: 12時間, t := n · Δt
	X方向境界 $\alpha = 83.4 \text{ cm}, \theta = 227.5 \text{ 度}$
	Y方向境界 $\alpha = 83.4 \text{ cm}, \theta = 228.5 \text{ 度}$ (各8月12日観測値より)
初期水位と流速	共に0 (ゼロ)
河川流入	水路部 (A) 2カ所で40 m <sup>3</sup> /秒

表3 拡散計算の条件設定

要 素	設 定 値
計算時間ステップ	360 秒
潮位及び潮流	潮流計算の結果 (3 潮汐目)
拡散係数	2 m <sup>2</sup> /秒 (全域一定)
開境界濃度	流入 0 流出
	$C_{i-1,j}^{t+1} = C_{i-1,j}^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i-1/2,j}^{t+1} \cdot (C_{i,j}^t - C_{i-1,j}^t)$
条件1 初期濃度	全域 0
負荷量 (kg/秒)	水路部 (A) 3カ所 各50
条件2 初期濃度	水路部 (A) 5000 (無単位)
負荷量 (kg/秒)	全域 0
条件3 初期濃度	全域 0
負荷量 (kg/秒)	開境界部 X方向に 0 Y方向に 30 水路部2地点に各0.5

計算結果と考察

1. 計算所要時間

結果を表4に示す。現在のCPUのクロック速度は10年前の40倍弱であるが、総合的な処理速度としては約8,000倍にもなっている。

表4 計算所要時間の比較

	10 年 前	現 在
潮流計算 所要時間	2 潮汐 (24時間) 90分	60 潮汐 (720時間) 20秒
拡散計算 所要時間	2 潮汐 (24時間) 110分	60 潮汐 (720時間) 24秒

## 2 計算による潮流の様子

小潮(8月15日)の結果を図6に, その128潮汐後の結果を図7に示す。中央部にある島の西側の狭さく部(B)の流れが速く, この海域は西側及び南側の開境界から入り込んだ潮の流れによる交換量が大いことがうかがえる。東側のふくらんだ海域(C)の流速は小さく, 流れが停滞していることが推察できる。よって, 陸から水路部(A)へ負荷があるとすると, 東側の流れの遅い海域で停滞することが予想される。また, 水路部から開境界部(D)に近い海域まで拡散してきた負荷は, 開境界部の潮の出入りによって希釈及び外海に搬出されることが予想され, 外海の濃度が水路部よりも高くない限り開境界部の濃度が負荷を受ける水路部よりも高くなることはないことが推測できる。

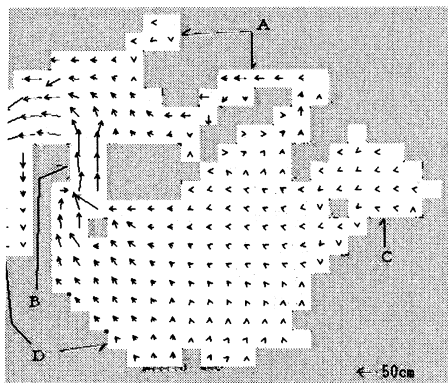


図6 潮流計算結果(小潮:8月15日)

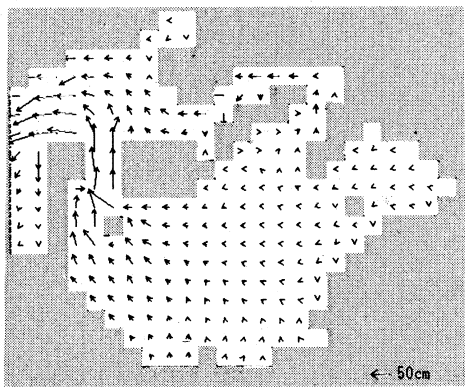


図7 潮流計算結果(大潮:128潮汐後)

今回の潮流計算は, 拡散計算が一潮汐分の潮流データを繰り返し使用する設定であることから, 一定の強制水位を与えて流速ゼロから始めた計算値が安定するまでの数潮汐の計算で良かった。しかし, 長期間の精度良い拡散計算を行う場合には天文学的な潮汐計算を必要とし, 拡散計算期間分の潮流計算が必要となる。

このような長期間の計算は, 10年前の環境では時間的

に困難であったが, 現在では1年間の計算も約4分ででき, 長期間の潮流計算も可能となった。その様子を図7に示した。潮流パターンに大きな違いは見られないが, 流向及び流速の細部に違いが認められる。

## 3. 計算による拡散の様子

70潮汐期間の結果を図8から図10に, 9潮汐期間の結果を図11から図12に示す。図8は, 条件1(表3)による結果である。潮流計算の結果から予想されたように, 濃度分布は水路部から沖合に向けて低くなっている様子が見える。

図9は条件2(表3)による結果である。これも潮流の計算で予想されたように, 水路部の負荷は東側の海域(C)すなわち流速が小さく停滞気味の海域に滞留し, 濃度分布パターンは60潮汐を過ぎるあたりから定常状態に近くなり, その濃度は外海水によって希釈, 搬出され徐々に低濃度になっていく様子が見られる。

図10は, 条件3による計算結果で, 水路部の海域と沖合の境界海域の濃度が同等か沖合の方が高い濃度分布を示す負荷条件を検討した一例である。潮流計算において予想されたように, 外海の濃度が水路部と同程度の条件設定で実現することが出来た。

70潮汐期間の計算は, 10年前では約62時間を要することになる。ここでは, 実働時間として8時間を考え, この時間内で行える9潮汐期間の計算結果を図11及び図12に示した。これをみると, 70潮汐期間計算した結果(図8, 図9)とはかなり異なる濃度分布を示している。条件2の計算結果(図12)では, 濃度分布が定常状態に近くなった現象も認められない。

10年前には, 以上のような長期間の拡散の様子を観ることは計算時間の制約から困難であったが, 現在では実働時間内で可能となった。誇張して言えば, パソコンの処理能力の向上が新たな世界を見せてくれた, とも言える。

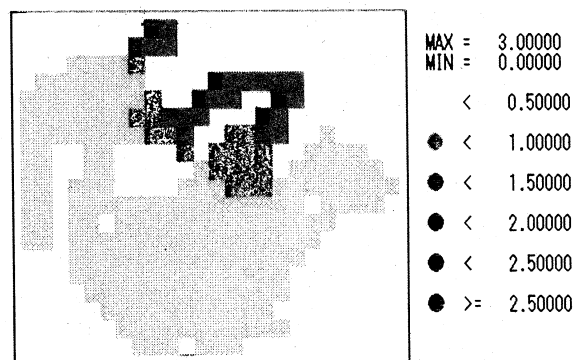


図8 条件1での拡散計算の結果

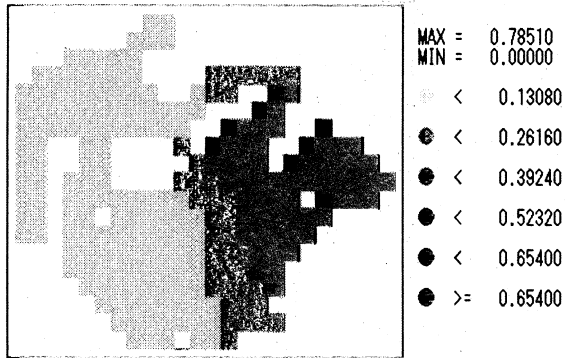


図9 条件2での拡散計算の結果

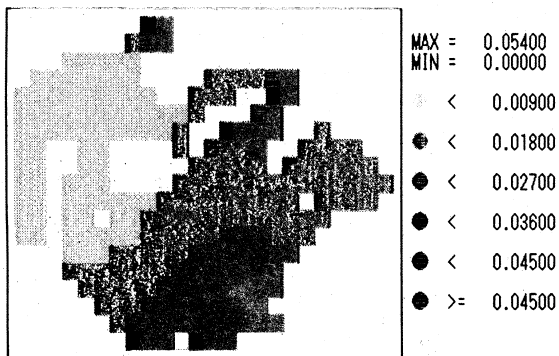


図10 条件3での拡散の結果

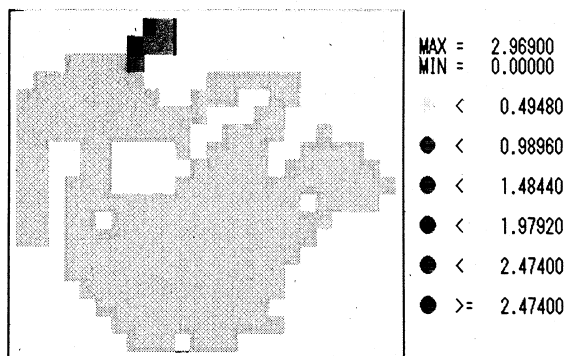


図11 条件1の9潮汐 (CPU時間8時間) の計算結果

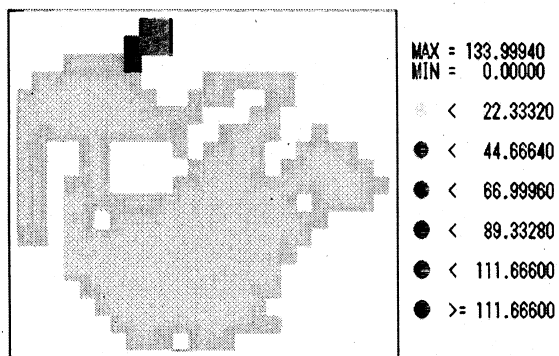


図12 条件2の9潮汐 (CPU時間8時間) の計算結果

#### 4. コンピュータシミュレーションの有用性

以上の結果は二次元単層モデルによる計算結果であるが「一般の海域では水平流が鉛直流に対して卓越しているため平面的な二次元流れによっても流況や物質拡散の大勢を知ることは多くの場合可能である<sup>1)</sup>」と言われていたこともあり、現実の流れや濃度分布の平面的なパターンの大勢はほぼ再現できているものと考えられる。

したがって、今回行った計算結果から相対的な濃度分布の様子を知ることはでき、モニタリングなどで得られた濃度分布の出現する可能性やその条件の探索に利用することは十分可能と考えられる。また、モニタリング調査において、調査地点を選定する場合など、より合理的で合目的な選定を支援する道具としての利用も可能と思われる。内湾海域における調査では、半日周期という潮流変化の為に同時性確保の困難性や、人員の制約から調査地点数や調査頻度の限界もある。コンピュータシミュレーションは、これらを補完する有用で手軽なツールとなり得るものと考えられる。

これらの可能性は、コンピュータシミュレーションが、現実に行うには困難な現場実験などをコンピュータの中で仮想的ではあるが合理的かつ科学的に実現可能とし、許される時間内であればいくらかでも条件を変えて (現実には不可能な条件でも) 実験を行うことが出来るということによるものと言える。

#### 5. これからのパソコンを用いたシミュレーション

##### (1) モデルの選択

これまでは計算時間の制約から、静水压平衡などの仮定を含む二次元モデルや準3次元モデル (深さ方向に数層を設定: レヤーモデルやレベルモデル) を選択せざるを得なかったが、処理速度の向上からこれらの仮定を取り除いたモデルや対象の規模によっては3次元モデルも選択可能になるものと思われる。ちなみに、現在の環境で空間ステップを1/2にした場合の計算所要時間を単純推定すると約90秒となり、空間ステップを1/2にした3次元モデル (深さ方向5m格子として25m平均水深) の計算所要推定時間は約10分となり、いずれも実利用時間内であると言える。

##### (2) 空間精度

処理速度は今後益々向上することが予想され、格子間隔 (差分格子) もさらに小さくして計算対象の空間形状をより細密に近似することが可能となり、空間精度の向上が望めるものと思われる。

## まとめ

10年前に作成した二次元単層流動・拡散シミュレーションシステム(モデル)は、当時のパソコンの処理能力が低かったために計算に多くの時間を必要とし、実用的ではなく実務で使用することはなかった。

そして今日、パソコンの処理能力の飛躍的な向上は、CPUクロックの単純比較だけでも40倍以上であり、総合的には約8000倍の処理能力を示し、10年前に作成したモデルを実用的なものにすることを可能にした。

処理速度の向上は、モデルを実用的にしたのみでなく、差分格子をさらに小さくすることを可能とし、実際の空間形状をより精度良く再現し、より現実に近いレベルでのシミュレーションを可能にすることが期待できる。さらには、3次元モデルも現実的なものと考えられるまでになっている。

このように、パソコンを用いたシミュレーションは、パソコンの性能向上に伴って成長していると言え、これか

らもパソコンのさらなる性能向上が望めることからシミュレーションもさらに成長できるものと期待できる。

したがって、これからは海域のモニタリングデータの解析や調査の支援、汚濁解析、環境改変の影響事前評価など実務における有効なツールとしての利用可能性が益々増大するものと考えられる。

## 文献等

- 1) 堀江 毅他：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技研資料，360 (1980)
- 2) NEC社のBASICインタープリタ。
- 3) Discoversoft社のBASICインタープリタ&コンパイラ。
- 4) マイクロソフト社のFORTRANおよびCコンパイラ。
- 5) 海上保安庁第六管区海上保安本部海洋情報部Webページ (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN6/>)