

陸奥湾の流れの数値シミュレーション

仲村 俊毅

はじめに

シミュレーションという言葉の原義は「物まね」ということであり、自然科学の分野ではほとんど全ての実験が含まれる。しかし、一般には水や大気の運動や、物質の拡散を記述する偏微分方程式を数値的に解く事を指している。水産の分野では、海水交流や作レイによる環境変化の予測、温排水拡散予測、生態系も含めたモデルによる漁業環境アセスメント等の問題に、最も普通に用いられる手法のひとつとなっている。本報告では、これらの数値シミュレーションのなかで、最も一般的な、潮汐による海水流動を陸奥湾をモデルとして検討してみた。このような試みは陸奥湾では初めてであるので、計算上の細かなテクニックを戸原 (1974)⁽¹⁾ に従って述べる。また、通常このような数値シミュレーションには大型、高速の計算機が必要とされるが、ここではマイクロコンピュータ (PC-9801、RAM223KB、使用言語BASICインタープリター) を用いたので、それを意識したプログラム上の問題点についても述べる。

基礎方程式

水の運動を記述するNauier-Stokes の方程式について、潮汐による海面傾斜や、海面、海底での摩擦を考慮して書き直し、x 方向 (東西方向) 成分についてのみ記すと、次式になる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

この式から陸奥湾の潮流モデルを作成するのであるが、その際に2、3の仮定により、式を簡略にする。

- (1) 左辺第2～第4項は慣性項または移流項と呼ばれるが、潮位変動よりも水深がかなり大きい陸奥湾では無視できる。また、この項が入らない方が、計算速度も速く、プログラミング上にも非常に有利である。
- (2) 右辺第2項は海面または海底での摩擦を表す項であるが、ここでは海底摩擦のみを考慮し、 Manning形式⁽²⁾で書く。
- (3) 右辺第3項は水平拡散項であるが、後述するように、計算に用いた格子点の間隔が粗いので、この項を計算すること自体、あまり意味がないと考えられるので、無視する。

以上のような仮定をふまえ、さらに鉛直平均流 (水深方向については、流れは一律) を仮定し、x 方向及び y 方向 (南北方向) の運動方程式と連続方程式を書けば、次式のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{n^2 g \sqrt{U^2 + V^2} \cdot U}{H^{4/3}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{n^2 g \sqrt{U^2 + V^2} \cdot V}{H^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (H \cdot U)}{\partial x} + \frac{\partial (H \cdot V)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

U、V : x 方向、y 方向への鉛直平均流速 H : 全水深 (水深 h + 潮位 ζ)

ζ : 潮位 n² 摩擦係数 g : 重力の加速度

計算式及び計算方式

(1)~(3)式の微分方程式は連続量を記述するものであり、これを数値的に解く場合、離散量に置き換えるため、差分化しなければならない。いうまでもなく、差分化された式を解いた結果は、元の微分方程式の解ではなく、その近似解を与えることになる。このような近似解法におけるさまざまな問題は、この近似の方法によって生ずる。そして、それらの問題に応じたさまざまな解法が工夫されている。本報告においては、比較的多く用いられている陽 (explicit) 解法の一つである、2 ステップ蛙飛び法 (Leap frog method) を採用した。(1)~(3)式を中心差分によって書き変えると、

$$U_{(m,n)}^{(r+1)} = U_{(m,n)}^{(r-1)} - 2 \Delta t g \left\{ n^2 \frac{U_{(m,n)}^{(r-1)} \cdot (U_{(m,n)}^{(r-1)} + V_{(m,n)}^{(r-1)})^{1/2}}{H^{4/3}} + \frac{\zeta_{(m+1,n)}^{(r)} - \zeta_{(m-1,n)}^{(r)}}{2 \Delta l} \right\} \quad (4)$$

$$V_{(m,n)}^{(r+1)} = V_{(m,n)}^{(r-1)} - 2 \Delta t g \left\{ n^2 \frac{V_{(m,n)}^{(r-1)} \cdot (U_{(m,n)}^{(r-1)} + V_{(m,n)}^{(r-1)})^{1/2}}{H^{4/3}} + \frac{\zeta_{(m,n+1)}^{(r)} - \zeta_{(m,n-1)}^{(r)}}{2 \Delta l} \right\} \quad (5)$$

$$\zeta_{(m,n)}^{(r+2)} = \zeta_{(m,n)}^{(r)} - 2 \Delta t \left\{ \frac{H_{(m+1,n)}^{(r)} \cdot U_{(m+1,n)}^{(r)} - H_{(m-1,n)}^{(r)} \cdot U_{(m-1,n)}^{(r)}}{2 \Delta l} + \frac{H_{(m,n+1)}^{(r)} \cdot V_{(m,n+1)}^{(r)} - H_{(m,n-1)}^{(r)} \cdot V_{(m,n-1)}^{(r)}}{2 \Delta l} \right\} \quad (6)$$

となる。ここで Δl は格子点間隔、Δt は計算時間間隔、r は計算ステップ、m、n はそれぞれ x 方向、y 方向の格子点を意味する添字である。

図 1 に格子点配置を示した。陸奥湾全域を図のような等間隔の格子で覆い、x、y の交点上で各物理量を計算してゆく。計算点は図 2 に示したように、千鳥状に配置し、一つの格子点では、U、V、または ζ のいずれかひとつの計算しか行わない。また、時間ステップ奇数点では潮位 ζ だけを、偶数点では U、V の 2 つの計算を行う。計算点配置上の注意は、x 軸上の境界は U 点上に、y 軸上の境界は V 点上にとることで、こうすることにより、陸岸境界上における境界条件、U = 0、V = 0 を考慮できる。格子点間隔は 163.5m であるが、上に述べたような工夫が必要であることから、数値モデル上の地形と実際の地形はかなり異なる結果となってしまった。主要な相置点は、湾口部が広がったこと、夏泊半島双子鼻が極端に大きくなったこと、大湊湾奥部がほとんど無視されたこと等である。この地形条件の精密化は、計算機の大型化、高速化により可能ではあるが、マイクロコンピュータと BASIC 言語を用いたモデルではこの程度が限界である。

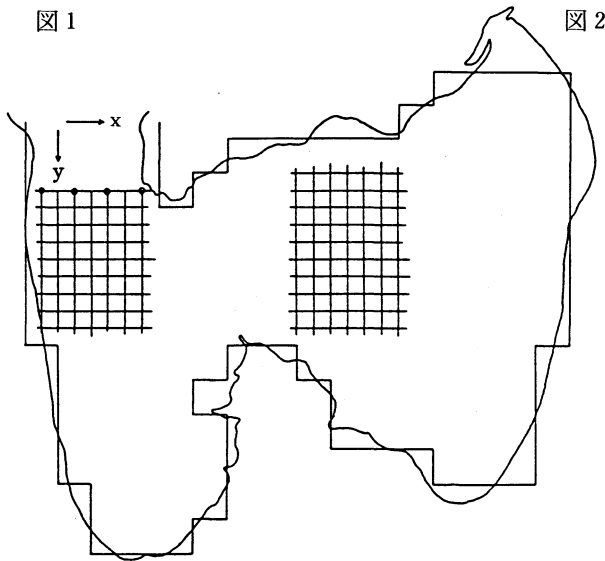


図1 格子点と地形 ○印は外海潮位入力点

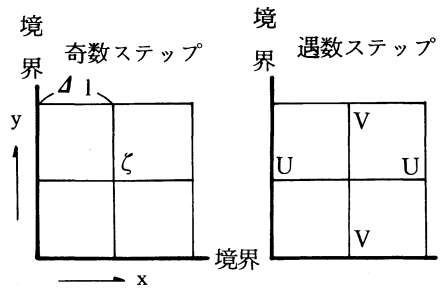


図2 計算ステップ、計算点境界のとり方

各格子点において、(4)、(5)、(6)式を計算していくわけであるが、この時、U、V、ζの値を平均化する必要がある。この平均化操作は、蛙飛び法に現われる解の振動をおさえることや、陸岸付近では陸岸に直交する流速成分は小さくなるという物理的イメージを、正確かどうかは別として再現することが目的である。そして、平均化に先だて、U点上にV、ζの値を、V点上にU、ζの値を補間する必要がある。この補間もまた、(4)、(5)式の形からみてプログラミング上、非常に有利である。U点上におけるV、ζの値は

$$V(m, n) = \frac{1}{4} \{ V(m+1, n+1) + V(m-1, n+1) + V(m+1, n-1) \}$$

$$\zeta(m, n) = \frac{1}{2} \{ \zeta(m+1, n) + \zeta(m-1, n) \}$$

であり、V点上へのU、ζの値も同様に補間する。この補間で工夫が必要なのは境界上の値である。x軸上の左側境界上では

$$V(m, n) = V(m+1, n-1) + V(m+1, n+1) - V(m+2, n)$$

$$\zeta(m, n) = 1.5\zeta(mU1, n) - 0.5\zeta(m+3, n)$$

となり、右側境界上では逆に $m+1 \rightarrow m-1$ 、 $m+2 \rightarrow m-2$ 、 $m+3 \rightarrow m-3$ とする。V点境界上への補間も同様に行える。

この補間の後に平均化操作を行うわけであるが、平均の方法にはいろいろあるが、一般的には重み付き平均法が採用される。

$$U_{(m, n)} = \partial \cdot U_{(m, n)} + \frac{1-\partial}{4} \{U_{(m+1, n+1)} + U_{(m+1, n-1)} + U_{(m-1, n+1)} + U_{(m-1, n-1)}\}$$

であり、V、ζにも同様の形式で平均化する。ここで∂は重みで、通常0.9~0.99程度である。この∂の値としては最も効率よく解の振動をおさえ得る値を採るべきであるが、ここでは0.9とした。

次に計算安定条件から計算時間間を求める。

$$\Delta t < \frac{\Delta l}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\max}}}$$

であるので、ここでのΔt=40秒とした。

プログラム

図3に計算の物理的イメージを、図4に実際の計算のフローを示した。計算の流れ自体はきわめて単純で、プログラミング上の工夫は何ら必要としない。

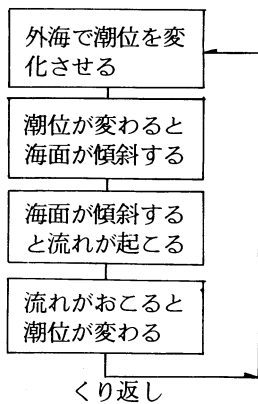


図3 計算の物理的イメージ

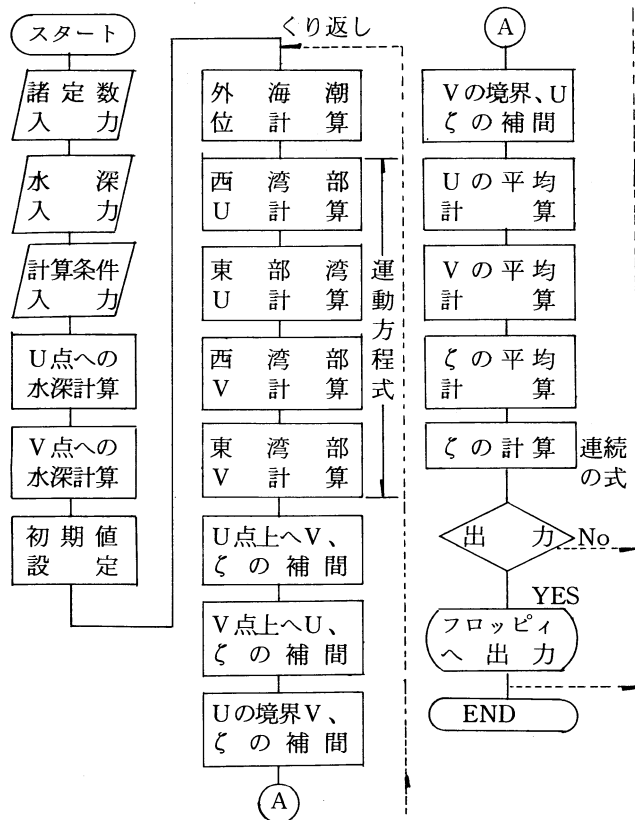


図4 計算のフローチャート

付表1にプログラムリストを示した。プログラム自体もまた未完成の部分がある。例えば、U点上やV点上に補間した値についても平均化操作をした方がよいが、ここではそれを行っていない。計算時間は40秒としたが、潮位は40秒ずらせばよいだけなので、実際には80秒間隔で計算を行っていく。この80秒という時間は、実際の現象の進行速度であるので、計算時間は、これを大きく下回らなければならない。計算時間が実際の現象の進行速度を上回ると、水位が極端に振動し、安定した値が得られないが、場合によっては発散する。このプログラムでは1ステップ当りの計算時間は40.7秒となり、80秒という制約条件を満たしている。また、中間的な結果を出力する場合、データ量が多ければ、プリンターへの出力は不可能になる。すなわち、計算とプリンターへの出力時間の合計が制約条件がある80秒を越えてしまうためである。そこで、ここではフロッピーディスクヘシーケンシャルファイルとして出力する方法を選んだ。出力に要する時間は約11秒で、計算時間との合計においても52~53秒と、80秒という制約条件を満たしている。

このような数値シミュレーションを行う場合、計算速度が重要な意味を持つ。地形条件をより詳細にすると、計算格子点が増加するうえに、計算安定条件を満たすため、計算時間の制約をより短くしなければならない。BASIC言語の教科書では、計算時間を短くする工夫として、IF文を少なくする、マルチステートメントを多用する等が挙げられている。これは計算時間を短くするのではなく、GOTO文のサーチ時間を短縮することになる。付表2は計算部分のみCHAIN文で切り離し、マルチステートメントを多用したプログラムであるが、これでは1ステップ当り40.5秒と、0.2秒の短縮となった。また、外海潮位を与える部分ではSIN関数を用いているが、これにも時間短縮の工夫をしたものの、1ステップ当り0.1秒の短縮にとどまった。この程度の時間短縮では、より大きなモデルの作成はできず、BASICコンパイラーやFORTRANコンパイラー等の導入により計算速度を速くする必要がある。

本計算では実際の現象の進行時間80秒を1ステップとして、720ステップ(16時間)まで計算した。潮汐の周期は12時間とした。初期条件として、最初平水位で流速すべての点で0としているので、計算開始から3~4時間目までは値が信用できないので、5時間目から16時間目まで1時間間隔で出力し、これを平均して潮汐残差流を求めた。720ステップまでの計算には8時間15分位を要している。コリオリの力や、風のストレスを考慮すると、1ステップ当り1~2秒の時間増加となる。

結 果

(1) モデルの妥当性について

表1に潮位と海底摩擦のモデルの出力結果を示した。外海境界点には、振幅30cm、周期12時間の潮位を強制的に与える。数値モデルの価値は、実際の現象をどの程度再現し得るかによって決まる。モデルの妥当性、再現性については慎重な検討が必要である。仮りに結果が「まとも」であっても、理論的な要請に合致しなければ、モデルは無価値である。また、理論的要請を満たしていても、再現性がなければ、モデルを検討し直す必要がある。本報告に用いたモデルでは、格子点間隔が粗いため、再現性についての詳細な検討は避けるが、次のような理由により、おおむね妥当なモデルと思われる。

表1 潮位と海底摩擦モデルの出力結果

| 時間 (hr) | 潮時 | 外海 境界点 潮位 (cm) | 青森港 潮位 (cm) | 大湊港 潮位 (cm) | 平 箱 東 西 方 向 流 速 (cm/sec) | 平 箱 南 北 方 向 流 速 (cm/sec) | 大 島 沖 東 西 方 向 流 速 (cm/sec) | 大 島 沖 南 北 方 向 流 速 (cm/sec) | 野 辺 地 東 西 方 向 流 速 (cm/sec) | 野 辺 地 南 北 方 向 流 速 (cm/sec) |
|------------|-----|-------------------------|-------------------|-------------------|--|--|---|---|---|---|
| 5 | | 15.2 | 14.0 | 15.9 | - 0.6 | - 5.0 | - 3.7 | 0.3 | - 0.5 | - 0.5 |
| 6 | 平水位 | 0.2 | 3.0 | 5.0 | - 0.8 | - 7.0 | - 5.4 | 0.5 | - 0.5 | - 0.7 |
| 7 | | -14.8 | -14.4 | -12.5 | - 1.2 | - 9.0 | - 8.6 | 1.1 | - 0.9 | - 1.1 |
| 8 | | -25.9 | -28.4 | -29.5 | - 1.0 | - 6.6 | - 5.7 | 1.0 | - 0.3 | - 0.7 |
| 9 | 干潮 | -30.0 | -31.3 | -34.1 | - 0.4 | - 1.2 | - 0.8 | 0.6 | 0.3 | - 0.1 |
| 10 | | -26.1 | -27.7 | -28.7 | 0.1 | 2.6 | 2.0 | 0.1 | 0.5 | 0.2 |
| 11 | | -15.2 | -17.1 | -19.1 | 0.6 | 5.3 | 4.6 | - 0.3 | 0.6 | 0.6 |
| 12 | 平水位 | - 0.2 | - 1.0 | - 3.9 | 1.0 | 8.3 | 7.2 | - 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| 13 | | 14.8 | 14.8 | 14.7 | 1.1 | 8.5 | 7.5 | - 1.0 | 0.7 | 1.0 |
| 14 | | 25.9 | 27.2 | 28.1 | 0.9 | 5.6 | 5.0 | - 0.9 | 0.3 | 0.7 |
| 15 | 満潮 | 30.0 | 31.8 | 33.0 | 0.4 | 1.9 | 1.6 | - 0.6 | - 0.2 | 0.2 |
| 16 | | 26.1 | 27.7 | 30.0 | - 0.1 | - 2.1 | - 1.8 | - 0.2 | - 0.5 | - 0.2 |

表1の結果から

(一) 水位変動と流速変動との位相は約90°ズレており、平水位近傍の時点で最も流速が速くなる。これは理論上の要請に合致する。

(二) 干潮または満潮の後、まもなく転流する。これは本州北西岸水路⁽³⁾の記述に一致する。

(三) 青森港と大湊港の潮高比は1.06である。潮汐表における⁽⁴⁾1.05と略一致する。

(四) 潮汐表では⁽⁴⁾湾外よりも湾奥で潮位差が大きくなるとされているが、このモデルにおいても同様の傾向を示している。

本報におけるモデルでは、座標軸のとり方から南北方向の流れの符号は逆になり、正は南下流、負は北上流となっている。平箱沖の南北方向と大島沖の東西方向に比較的速い流れを生ずるが、流速値は10cm/secを越えない。

(2) 流況パターン

本報では次の6つのモデルについて、検討を行う。以下、本文にはモデル番号でモデル名を示す。

モデルⅠ：潮位+海底摩擦

モデルⅡ：潮位+海底摩擦+東風 5 m/sec

モデルⅢ：潮位+海底摩擦+西風 5 m/sec

モデルⅣ：潮位+海底摩擦+コリオリの力

モデルⅤ：潮位+海底摩擦+コリオリ+東風

モデルⅥ：潮位+海底摩擦+コリオリ+西風

上げ潮最強流時(13hr)では、流向はすべて湾奥へ向かう方向となり、各モデルでは大きな差はない。流速は、モデルⅠ、Ⅱでは、湾口で10cm/sec以上、西湾中央から東湾中央にかけて

5 cm/sec以上、青森湾奥部、野辺地湾奥部では1 cm/sec未満となっている。モデルⅡはⅠに比べ、全体に流速がやや小さくなるが、潮流の方向と風の方向が逆であるので、当然の結果である。モデルⅢからⅥではⅠ、Ⅱに比べると平館で流速が小さくなり、脇野沢側で速くなる。

下げ潮最強流時（7hr）では、流向はすべて湾口へ向かい、各モデルで大差ない。流速は湾口部及び脇野沢南岸で10cm/secを越え、西湾中央から東湾中央にかけて5 cm/sec以上、双子鼻以南の青森湾と野辺地湾奥部で1 cm/sec未満となる。モデルⅢからⅥでは、平館側で流速が遅く、脇野沢側で速くなる。流速のパターンは上げ潮最強流時とほとんど同じで、流向は逆となっている。

(3) 潮汐残差流

表2に各モデルの数地点における流速成分の12時間平均値を示した。これらは潮汐残差流または恒流を示す。いずれも数値は小さく、0.1~0.3cm/secの範囲である。これを月間流程に換算すると、

表2 流速成分の12時間平均値 (cm/sec)

| モデル番号 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平館東西方向 | 0.00 | -0.08 | 0.09 | 0.02 | -0.05 | 0.08 |
| 〃 南北方向 | 0.11 | 0.01 | 0.21 | 0.11 | 0.00 | 0.19 |
| 大島東西方向 | 0.16 | 0.18 | 0.13 | 0.13 | 0.18 | 0.13 |
| 〃 南北方向 | -0.01 | 0.03 | -0.03 | -0.02 | 0.03 | -0.02 |
| 野辺地東西方向 | 0.03 | -0.03 | 0.08 | 0.03 | -0.07 | 0.09 |
| 〃 南北方向 | 0.03 | 0.10 | -0.06 | 0.04 | 0.09 | -0.04 |

2.6~7.8km/月となる。湾内に設置されているブイロボットによる測得流から求めた月間流程は、⁽⁵⁾観測地点や観測層により大きなバラツキはあるが、1~273km/月となっており、モデル上の数値をかなり上回る。この理由は、ひとつにはモデルでは鉛直平均流を扱っていることによる。最も流速値が大きくなるのは西風モデルの平館沖南北方向の流速成分である。これは、陸奥湾に対して抱いている、東風→流動、西風→鉛直混合という我々のイメージとは逆の結果となっている。野辺地沖では、西風モデルと東風モデルでは流向がほぼ反転し、流れの形成が、風に大きく依存していることを示唆している。

12時間平均流のパターンでは、東風のとき川内沖、むつ沖、双子鼻沖に無流に近い地点が出現する。一方、西風のときは東湾中央部や双子鼻沖とその南側に無流に近い地点が出現し、川内沖や野辺地湾では、やや速い流れを生ずる。流向は東風のとき、むつ、川内沖、野辺地沖、双子鼻沖に小規模な渦流が形成されている。西風のときは、東湾中央から野辺地湾にかけて、かなり規模の大きい左回りの渦流が形成される。これらの結果は、しばしば海岸観測等で観察される小規模な渦流や、ホタテガイ浮遊幼生のパッチ状分布が風によってされるのではないかという仮説を支持している。しかし、いずれのモデルにおいても、湾全体をめぐる左回りの環流系は形成されなかった。

問 題 点

本報告における数値シミュレーションにおいて、いくつかの興味ある示唆が得られた。しかし、十分に満足し得る結果が得られたとは言えず、モデルの再現性について問題を残している。問題点のひとつには鋭直平均流をとり扱っている点である。通常、我々の扱う流れのデータは、特定の観測層についてのものであり、それらから鉛直平均流をイメージするのは難しい。これについては、鋭直方向にいくつかの層を考慮した、多層モデルを検討する必要がある。

本モデルにおける最も大きな問題点は、計算時間の節約のため、外海境界点を脇野沢と平館の間に置いたことである。本来、このような設定は不適切であるので、できるならば、外海境界点は竜飛から佐井の間まで引き上げ、湾口部はフリーにしなければならない。

格子点間隔の粗さも、本モデルでの問題である。格子点間隔は $1,635.5m$ で、格子点を千鳥状に配置したので、同一方向の流速成分の計算点は $3,271m$ 離れることになる。陸奥湾での慣性円運動の直径は流速を $1cm/sec$ とすると約 $300m$ 、流速を $10cm/sec$ とすると、約 $3,000m$ となる。また、しばしばその存在を指摘される小渦流の大きさは $2,000\sim 5,000m$ と想像される。仮りに渦流の大きさを $5,000m$ として、その中に同一方向の流速成分計算点を4個含むものとする、格子点間隔は約 $800m$ となる。したがって、格子点間隔は、少なくとも $1,000m$ 、できれば $500m$ とする必要がある。いうまでもなく、格子点間隔が半分になれば、計算量は4倍になる。

以上述べたような問題は、計算機の大容量化、高速化により、解決は可能である。もちろん、数値シミュレーションの結果を鵜呑みにするのは危険であるが、それらを実験、または観測の計画のための作業仮設として使うことができる。また、ホタテガイの自然発生機構や、津軽暖流水の流入に伴う湾内水の応答、ホタテガイ浮遊幼生の湾外流出、生態系モデルの組み込みによる低次生産者の動態といった、“雲をつかむような話”に対して、ある程度の見通しを与える手段として、数値シミュレーションの意義は大きい。

参 考 文 献

- (1) 戸原義男 (1974) 水産土木に関する水理環境研究の概要と今後の動向 水産土木 vol. 10, No. 2
- (2) 土木学会編 水理公式集 昭和46年度改訂版
- (3) 海上保安庁 本州北西岸水路誌 昭和50年9月
- (4) 日本気象協会青森支部 むつ湾の気象暦—昭和53年—
- (5) 青森県 昭和49年度むつ湾漁業開発基本計画調査報告書 昭和50年3月

付表-1 プログラムリスト

```
100 REM 'SIMLA9'  
110 DIM U(34,30),V(34,30),HP(34,30),Z(34,30),C(34,30)  
120 DT=40:DS=1635.5:GA=9.8:N=.03  
130 T=43200!:PAI=3.14159:HA=.3  
140 GOT=2*DT*GA*N*N  
150 ADT=DT*GA  
160 FOR J=2 TO 28 STEP 2  
170 FOR I=2 TO 32 STEP 2  
180 READ HP(I,J)  
190 NEXT I:NEXT J  
200 DATA 75,80,70,50,0,0,0,0,0,0,0,0,0,10,15,20,10  
210 DATA 50,70,70,40,0,0,0,0,0,0,0,0,0,10,15,25,25,15  
220 DATA 30,65,60,40,0,0,10,15,20,20,20,22,25,33,31,18  
230 DATA 30,55,60,40,0,30,40,35,37,35,35,32,35,35,32,20  
240 DATA 40,62,65,62,40,40,48,45,43,43,43,43,42,40,33,20  
250 DATA 40,60,62,60,60,57,55,52,47,44,45,46,44,40,34,10  
260 DATA 20,55,59,59,57,57,55,52,51,51,50,47,45,40,35,10  
270 DATA 10,50,57,57,55,49,50,45,35,45,45,45,44,42,35,10  
280 DATA 0,40,55,55,52,45,0,0,20,40,40,42,42,40,32,0  
290 DATA 0,30,50,50,48,0,0,0,0,15,25,35,40,35,24,0  
300 DATA 0,25,38,47,45,25,0,0,0,10,10,25,32,30,10,0  
310 DATA 0,20,35,42,37,20,0,0,0,0,0,0,20,20,10,0  
320 DATA 0,0,27,32,27,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
330 DATA 0,0,10,10,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
340 FOR J=1 TO 29  
350 FOR I=1 TO 33  
360 READ C(I,J)  
370 NEXT I:NEXT J  
380 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,2,2,2,2,2,0  
390 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,3  
400 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,1,1,1,1,1,1,3  
410 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,3  
420 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
430 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
440 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
450 DATA 2,0,1,0,1,0,1,0,3,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
460 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,0,2,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
470 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
480 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
490 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
500 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
510 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
520 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
530 DATA 2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3  
540 DATA 0,3,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,3,3,3,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,3,0  
550 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0  
560 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,3,0,0,0,0,0,3,0,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0  
570 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0  
580 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,0,2,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0  
590 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0  
600 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,3,3,3,3,0,1,1,1,1,1,3,0,0  
610 DATA 0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,1,1,1,1,3,0,0  
620 DATA 0,0,0,3,0,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,0,0,0,3,3,3,3,0,0,0,0,0  
630 DATA 0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
640 DATA 0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,0,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
650 DATA 0,0,0,0,2,1,1,1,1,1,1,1,1,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
660 DATA 0,0,0,0,0,3,3,3,3,3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
670 FOR J=2 TO 28 STEP 2  
680 FOR I=3 TO 31 STEP 2  
690 HP(I,J)=(HP(I+1,J)+HP(I-1,J))/2  
700 NEXT I:NEXT J  
710 FOR J=3 TO 27 STEP 2  
720 FOR I=2 TO 32 STEP 2  
730 HP(I,J)=(HP(I,J-1)+HP(I,J+1))/2  
740 NEXT I:NEXT J  
750 FOR I=1 TO 33  
760 FOR J=1 TO 29  
770 U(I,J)=0:V(I,J)=0:Z(I,J)=0  
780 NEXT J:NEXT I  
790 FOR K=1 TO 720  
800 FOR I=2 TO 8 STEP 2  
810 Z(I,8)=HA*SIN(PAI*(160*(K-1)+80)/T)  
820 NEXT I  
830 FOR J=8 TO 28 STEP 2  
840 FOR I=3 TO 11 STEP 2  
850 IF C(I,J)<>1 GOTO 900  
860 SMX=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*U(I,J)  
870 HPX=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333  
880 ZTX=(Z(I+1,J)-Z(I-1,J))/DS  
890 U(I,J)=U(I,J)-GDT*SMX/HPX-ADT*ZTX  
900 NEXT I:NEXT J  
910 FOR I=13 TO 31 STEP 2  
920 FOR J=2 TO 24 STEP 2  
930 IF C(I,J)<>1 GOTO 980  
940 SMX=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*U(I,J)  
950 HPX=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333
```

付表-1 続 き

```

960 ZTX=(Z(I+1,J)-Z(I-1,J))/DS
970 U(I,J)=U(I,J)-GDT*SMX/HPX-ADT*ZTX
980 NEXT J:NEXT I
990 FOR J=9 TO 27 STEP 2
1000 FOR I=2 TO 12 STEP 2
1010 IF C(I,J)<>1 GOTO 1060
1020 SMY=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*V(I,J)
1030 HPY=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333
1040 ZTY=(Z(I,J+1)-Z(I,J-1))/DS
1050 V(I,J)=V(I,J)-GDT*SMY/HPY-ADT*ZTY
1060 NEXT I:NEXT J
1070 FOR I=14 TO 32 STEP 2
1080 FOR J=3 TO 23 STEP 2
1090 IF C(I,J)<>1 GOTO 1140
1100 SMY=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*V(I,J)
1110 HPY=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333
1120 ZTY=(Z(I,J+1)-Z(I,J-1))/DS
1130 V(I,J)=V(I,J)-GDT*SMY/HPY-ADT*ZTY
1140 NEXT J:NEXT I
1150 FOR I=2 TO 8 STEP 2:V(I,7)=V(I,9):NEXT I
1160 FOR J=2 TO 28 STEP 2
1170 FOR I=3 TO 31 STEP 2
1180 IF C(I,J)<>1 GOTO 1210
1190 V(I,J)=.25*(V(I+1,J+1)+V(I-1,J+1)+V(I-1,J-1)+V(I+1,J-1))
1200 Z(I,J)=.5*(Z(I+1,J)+Z(I-1,J))
1210 NEXT I:NEXT J
1220 FOR J=3 TO 27 STEP 2
1230 FOR I=2 TO 32 STEP 2
1240 IF C(I,J)<>1 GOTO 1270
1250 U(I,J)=.25*(U(I+1,J+1)+U(I+1,J-1)+U(I-1,J+1)+U(I-1,J-1))
1260 Z(I,J)=.5*(Z(I,J+1)+Z(I,J-1))
1270 NEXT I:NEXT J
1280 FOR J=2 TO 28 STEP 2
1290 FOR I=1 TO 33 STEP 2
1300 IF C(I,J)<=1 GOTO 1350
1310 A=I-1:B=I-2:C=I-3
1320 IF C(I,J)=2 THEN A=I+1:B=I+2:C=I+3
1330 V(I,J)=V(A,J-1)+V(A,J+1)-V(B,J)
1340 Z(I,J)=1.5*Z(A,J)-.5*Z(C,J)
1350 NEXT I:NEXT J
1360 FOR J=1 TO 29 STEP 2
1370 FOR I=2 TO 32 STEP 2
1380 IF C(I,J)<=1 GOTO 1430
1390 A=J-1:B=J-2:C=J-3
1400 IF C(I,J)=2 THEN A=J+1:B=J+2:C=J+3
1410 U(I,J)=U(I-1,A)+U(I+1,A)-U(I,B)
1420 Z(I,J)=1.5*Z(I,A)-.5*Z(I,C)
1430 NEXT I:NEXT J
1440 FOR J=2 TO 28 STEP 2
1450 FOR I=3 TO 31 STEP 2
1460 IF C(I,J)<>1 GOTO 1480
1470 U(I,J)=.9*U(I,J)+.025*(U(I+1,J+1)+U(I+1,J-1)+U(I-1,J+1)+U(I-1,J-1))
1480 NEXT I:NEXT J
1490 FOR J=3 TO 27 STEP 2
1500 FOR I=2 TO 32 STEP 2
1510 IF C(I,J)<>1 GOTO 1530
1520 V(I,J)=.9*V(I,J)+.025*(V(I+1,J+1)+V(I+1,J-1)+V(I-1,J+1)+V(I-1,J-1))
1530 NEXT I:NEXT J
1540 FOR J=2 TO 28 STEP 2
1550 FOR I=2 TO 32 STEP 2
1560 IF C(I,J)<>1 GOTO 1630
1570 Z(I,J)=.9*Z(I,J)+.025*(Z(I+1,J)+Z(I-1,J)+Z(I,J+1)+Z(I,J-1))
1580 A=(HP(I+1,J)+Z(I+1,J))*U(I+1,J)
1590 B=(HP(I-1,J)+Z(I-1,J))*U(I-1,J)
1600 C=(HP(I,J+1)+Z(I,J+1))*V(I,J+1)
1610 D=(HP(I,J-1)+Z(I,J-1))*V(I,J-1)
1620 Z(I,J)=Z(I,J)-DT*((A-B+C-D)/DS)
1630 NEXT I:NEXT J
1640 PRINT
1650 PRINT USING"STEP ####";K
1660 PRINT TIMES$
1670 PRINT Z(8,14),U(7,14),V(7,14)
1680 IF K<225 GOTO 1800
1690 PX=K/45:PZ=PX-INT(K/45)
1700 IF PZ<>0 GOTO 1800
1710 PX=PX-4
1720 PX$=STR$(PX)
1730 FILE$="2:"+PX$
1740 OPEN FILE$ FOR OUTPUT AS #2
1750 FOR J=2 TO 28 STEP 2
1760 FOR I=3 TO 33 STEP 2
1770 PRINT #2,Z(I-1,J),U(I,J),V(I-1,J+1)
1780 NEXT I:NEXT J
1790 CLOSE
1800 NEXT K

```

付表-2 プログラムリスト

```

100 REM 'CALCUL'
110 FOR K=1 TO 720
120 FOR I=2 TO 8 STEP 2:Z(I,8)=HA*SIN(PI*(160*(K-1)+80)/T):NEXT
130 FOR J=8 TO 28 STEP 2:FOR I=3 TO 11 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 150
140 SMX=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*U(I,J):HPX=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333:ZTX=(
Z(I+1,J)-Z(I-1,J))/DS:U(I,J)=U(I,J)-GDT*SMX/HPX-ADT*ZTX
150 NEXT:NEXT
160 FOR I=13 TO 31 STEP 2:FOR J=2 TO 24 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 180
170 SMX=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*U(I,J):HPX=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333:ZTX=(
Z(I+1,J)-Z(I-1,J))/DS:U(I,J)=U(I,J)-GDT*SMX/HPX-ADT*ZTX
180 NEXT:NEXT
190 FOR J=9 TO 27 STEP 2:FOR I=2 TO 12 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 210
200 SMY=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*V(I,J):HPY=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333:ZTY=(
Z(I,J+1)-Z(I,J-1))/DS:V(I,J)=V(I,J)-GDT*SMY/HPY-ADT*ZTY
210 NEXT:NEXT
220 FOR I=14 TO 32 STEP 2:FOR J=3 TO 23 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 240
230 SMY=SQR(U(I,J)*U(I,J)+V(I,J)*V(I,J))*V(I,J):HPY=(HP(I,J)+Z(I,J))^1.333:ZTY=(
Z(I,J+1)-Z(I,J-1))/DS:V(I,J)=V(I,J)-GDT*SMY/HPY-ADT*ZTY
240 NEXT:NEXT
250 FOR I=2 TO 8 STEP 2:V(I,7)=V(I,9):NEXT
260 FOR J=2 TO 28 STEP 2:FOR I=3 TO 31 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 280
270 V(I,J)=.25*(V(I+1,J+1)+V(I-1,J+1)+V(I-1,J-1)+V(I+1,J-1)):Z(I,J)=.5*(Z(I+1,J)
+Z(I-1,J))
280 NEXT:NEXT
290 FOR J=3 TO 27 STEP 2:FOR I=2 TO 32 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 310
300 U(I,J)=.25*(U(I+1,J+1)+U(I+1,J-1)+U(I-1,J+1)+U(I-1,J-1)):Z(I,J)=.5*(Z(I,J+1)
+Z(I,J-1))
310 NEXT:NEXT
320 FOR J=2 TO 28 STEP 2:FOR I=1 TO 33 STEP 2:IF C(I,J)<=1 GOTO 350
330 A=I-1:B=I-2:C=I-3:IF C(I,J)=2 THEN A=I+1:B=I+2:C=I+3
340 V(I,J)=V(A,J-1)+V(A,J+1)-V(B,J):Z(I,J)=1.5*Z(A,J)-.5*Z(C,J)
350 NEXT:NEXT
360 FOR J=1 TO 29 STEP 2:FOR I=2 TO 32 STEP 2:IF C(I,J)<=1 GOTO 390
370 A=J-1:B=J-2:C=J-3:IF C(I,J)=2 THEN A=J+1:B=J+2:C=J+3
380 U(I,J)=U(I-1,A)+U(I+1,A)-U(I,B):Z(I,J)=1.5*Z(I,A)-.5*Z(I,C)
390 NEXT:NEXT
400 FOR J=2 TO 28 STEP 2:FOR I=3 TO 31 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 420
410 U(I,J)=.9*U(I,J)+.025*(U(I+1,J+1)+U(I+1,J-1)+U(I-1,J+1)+U(I-1,J-1))
420 NEXT:NEXT
430 FOR J=3 TO 27 STEP 2:FOR I=2 TO 32 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 450
440 V(I,J)=.9*V(I,J)+.025*(V(I+1,J+1)+V(I+1,J-1)+V(I-1,J+1)+V(I-1,J-1))
450 NEXT:NEXT
460 FOR J=2 TO 28 STEP 2:FOR I=2 TO 32 STEP 2:IF C(I,J)>1 GOTO 490
470 Z(I,J)=.9*Z(I,J)+.025*(Z(I+1,J)+Z(I-1,J)+Z(I,J+1)+Z(I,J-1))
480 A=(HP(I+1,J)+Z(I+1,J))*U(I+1,J):B=(HP(I-1,J)+Z(I-1,J))*U(I-1,J):C=(HP(I,J+1)
+Z(I,J+1))*V(I,J+1):D=(HP(I,J-1)+Z(I,J-1))*V(I,J-1):Z(I,J)=Z(I,J)-DT*(A-B+C-D)/
DS)
490 NEXT:NEXT
500 PRINT :PRINT USING'STEP #####':K:PRINT TIME$:PRINT Z(8,14),U(7,14),V(7,14)
510 IF K<225 GOTO 590
520 PX=K/45:PZ=PX-INT(K/45):IF PZ<>0 GOTO 590
530 PX=PX-4:PX%=STR$(PX):FILE$='2:'+PX%
540 OPEN FILE$ FOR OUTPUT AS #2
550 FOR J=2 TO 28 STEP 2:FOR I=3 TO 33 STEP 2
560 PRINT #2,Z(I-1,J),U(I,J),V(I-1,J+1)
570 NEXT:NEXT
580 CLOSE
590 NEXT

```