

論文 Original Paper

珊瑚礁の礁湖内の潮流のシミュレーション

I 基礎となる考えと保存式の解法

岸 本 健

Computer Simulation of Tide Flow in Coral Shelf

I. Solving Schemes of Governing Equations

Ken KISHIMOTO

Abstract: Tide analysis is used for forecasting tidal wave by tsunami and typhoon and analysis for the mass transfer in lakes, ponds and gulfs and this becomes important for conducting assessment of the effects of tidal flow on bioecological and human life environment.

Standing on the side of outdoor leisure and marine sports, this analysis provides the informations about tide velocity, riptide and seawater temperature, which contributes to more safety sport activities, diving, snorkeling and open water swimming.

In this paper, the first step for the above sakes, we selected C language to analyze the coral tide by using Leap Frog scheme for time progressing and Lax-Wendroff scheme for spacial integration and developed the computer code for analyzing shoal water waves flow in coral sea and testing computer codes by execution on a simple geometric model. Even this code have some incomplete points which cannot carried out to simulate the real geome-tries with exhaustive results, this seems to be modestly running. In the next paper, more detail simulation coding will be reported about the coral sea around Yoron Island at the south west of Kagoshima prefecture.

概要: 海洋の潮流解析は、津波や台風波浪の解析や、湾や湖の潮流解析に使用されており、環境・生物系への影響を予測するために極めて重要である。

一方、この解析をレジャーの観点からみると、ダイビング、シュノーケリングなどのマリンスポーツにおける潮流の情報提供、安全対策の資料提供などの寄与をすることができる。

この論文では、潮流解析を行い、結果を広く利用していくための第1ステップとして、珊瑚礁や河川河口部の浅瀬、湿原地帯等を対象とした浅水地帯の水がその外縁の大洋の潮汐の支配を受けて、リーフ近傍や礁池内を流動する状態の解析方法を報告する。

1. はじめに

珊瑚礁や河口部の浅瀬、湿原地帯等の浅水地帯では、その外縁の大洋の潮汐の支配を受けて、リーフ近傍や礁池内に潮流が流動する。この潮流は海洋における物質移動に大きな役割を持っている。そのため、海洋の潮流解析は、汚染物質の拡散と蓄積の予測、土木工事や地形変化による潮流の変化や底質の移動の見積もること、環境・生物系への影響を予測するために極めて重要である。

これらの解析は、津波や台風波浪の解析や、湾や湖の潮流解析に使用され、1980年以降では、水俣湾の有機

水銀の流出計算、琵琶湖の水質予測、有明海の干拓の影響調査、最近では、諫早湾の堰開閉問題など環境生物系の問題に対応する予測問題として注目されている。

一方、この解析をレジャーの観点からみると、ダイビング、シュノーケリングなどのマリンスポーツにおける潮流の情報提供、安全対策の資料提供などの寄与をすることができる。

この論文では、この解析をレジャーに提供する第1ステップとしてリーフ外の潮汐の支配を受けて、リーフ近傍や礁池内を潮が流動する状態をナビアストークスの方程式を解くことで解析してゆくための方法を報告する。

珊瑚礁の岸の構造を図1に示す。この図の中心を斜めに切る線は断面を示す説明線である。リーフを中心として、陸からリーフまでは礁池（イノー）であり、もっ

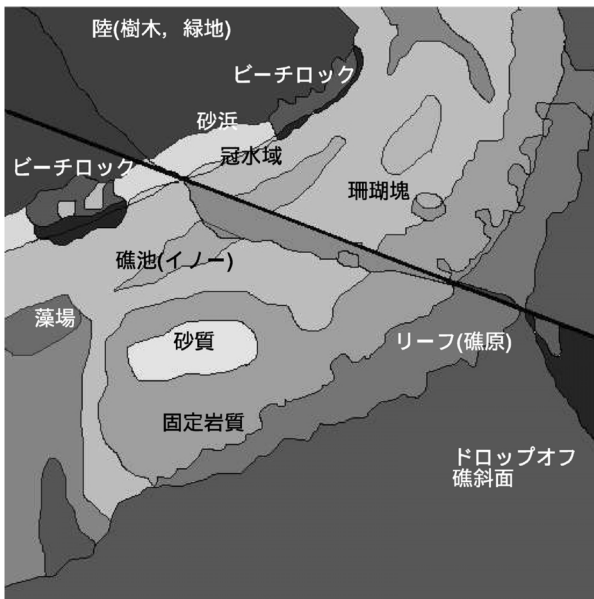


図1 珊瑚礁の構造とモデル

とも深い部分で25 m程度の浅い海であり海岸の近くにあることが多く、リーフは干潮時には水面より上になる。

リーフはその表面ばかりでなく、かなり深い内部にも空洞部分を持っている。そのため、イノーとリーフの外とは堤防のような隔離があるわけではなく、干潮時さえも外洋と礁池の間には潮位に対応した潮の流れがある。しかし、この論文では、リーフの詳細構造と物質交換量の関係についての知見には言及しない。

リーフ内の礁池(イノー)の底質は、砂ばかりではなく、固定岩質もあり、海面下数mから水面に成長した珊瑚塊も点在し、一部では、藻の群生する部分も存在する。このような場所を対象とした、イノー内の海水の動きを解析する方法についてこの論文は言及する。この解析を行うプログラムをここでは、“CORAL”と呼称することとした。

このプログラムが実際の地図上の地点のある時刻の状態を表すためには、冠水域である潮冠帯をふくんだ地形データと実測に基づいた外洋の潮汐予測プログラムが必要となる。冠水域は砂浜など数mの深度しかなく干潮時には海面上に出、満潮時には没しその上に海流が見られる域であり、接岸流や離岸流の存在を解く必要があるものと、リーフのように水没時には乗り越えて海水の移動が起るものがあり、取り扱いに工夫が必要となる。

空間境界条件には対象とする陸と浅い海を含む地形データと外洋を、時間境界条件には対象とする位置における潮汐予測プログラムの出力を初期条件とし、流速なし、潮位は平均値として、解析プログラムを動作させる。その結果をその後の処理形式を考慮した形式で、保存する方式を取る。

潮汐予測プログラムは国立天文台が開発した潮位予測

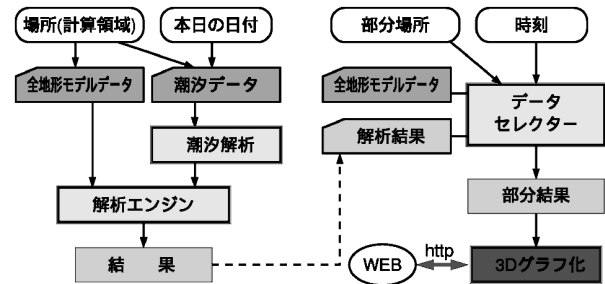


図2 解析プログラムとデータ

計算を用いることとする。

計算の開始では、潮位予測に基づく適当な干満差を持ち、12時間を周期とした正弦波の変化する潮位変化を与えて実行し、計算がほぼ安定するまでの数周期計算を行った後、潮位予測のプログラムが出力する潮位を境界条件として数周期前から計算を始め必要な日時の計算を実行する。この計算は、詳細な地形データが必要であり、空間刻みを小さくするとそれに伴って時間刻みも小さくなるために、計算機のリソース、特に計算速度を要求する。

計算のためのリソースが必要であるとして、WEBに直結したスーパーコンピュータを常時このサービスのために使用するわけにはいかない。

つまり、計算サービスは要求された任意の日時に対して、その都度計算を行うことができないことになる。このための必要とする計算時間を最も長くとることを可能にするには、CPU速度というリソースを外部記憶領域というリソースに変換すればよいことになる。つまり、予測のために多くのケースについて計算するのではないとして、明日一日のデータを前日に計算しておけば、サービスに供することが可能となるため、最長の計算時間は一日のシミュレーションを一日で終わらせればよいことになり、この規模であれば、高性能化したパソコン数台で対応できることになる。

そこで、一日を計算の一単位として終了し、計算終了時には計算結果、およびすべての内部変数を保存して終了する。次の計算は、この内部変数を読み込み、内部状態を前回終了時の状態に戻して実行する。サービスには、要求された時間と地域を計算した結果から抽出選択して提供することとなる。

2. 流動モデル

一連の論文の第一次ステップとして、非圧縮性、等温の海流を考える。海水が非圧縮性という仮定は妥当ではあるが、海水は $\rho = \rho(G, T)$, G : 塩分濃度, T : 温度で表せるように密度を変えるため、一定密度流体として扱うことができない。礁池内では、陸部からの雨水が湧き出す場所があり、塩分濃度にもむらがあり、水深数 cm

表1 計算モデルの比較

| モデル | NS 線形化 | 3次元 | 静水圧 | 計算時間 (相対) |
|----------|-----------|-----|------|--------------|
| 3次元海洋モデル | 非線形 | 多層 | 非静水圧 | 120~540 |
| VOFモデル | 非線形 | 多層 | 非静水圧 | 3.8~14.5 |
| 非静水圧モデル | 非線形 | 多層 | 非静水圧 | 1600~15700 |
| 静水圧モデル | 非線形 | 多層 | 静水圧 | 35~70 |
| 浅水モデル | 非線形 | 一層 | 静水圧 | 3.2~8.0 |
| 線形長波モデル | 線形化 | 一層 | 静水圧 | 1.0 |

になるリーフの近くの海水は干満の無潮流時に日射を受けて40°Cを越えることもまれにある。そのため、この密度変化を簡単に導入できるように考慮してモデルを構築する。このようなモデルに対して従来の解析モデルには、非静水圧モデル、静水圧モデル、線形長波モデルなどがある。

これらの特徴は、表1に示す。

この論文のアルゴリズムは浅水モデルを利用する。このモデルは海水などの流れだけではなく、大気循環⁽¹⁾、海洋潮流解析などの大規模なシミュレーションに使用される。

浅水モデルは、密度が一定の水深の小さな流体が二次元的に移動すると考える。そのため、位置を x, y の二次元として、2方向の分速度と u, v 、平均水面高さ h を解くものである。このモデルは、潮流のシミュレーションでよく使用され、2次元に水面高さを加えた疑似3次元の解析を行う。そして、N-S保存方程式を変形して、流速ではなく、流量を保存量と考えて方程式を立てる。つまり、 $M=(\eta+h)u$ 、 $N=(\eta+h)v$ という量を定義する。

2.1 連続の式

通常連続の式は、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

である。浅水モデルは、これを z 方向（垂直）に積分する。積分は、平均水位を基準として、潮位を η で、水深 $-h$ とし、密度変化がわずかであるとすると、

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = \text{Const}$$

となり、これを整理すると、

$$\rho \frac{\partial \eta}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\eta+h)u}{\partial x} + \rho \frac{\partial (\eta+h)v}{\partial y} + \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{\partial w}{\partial z} dz = 0$$

となる。浅水モデルでは、垂直方向の水の動きはないと考えるので、 $w=0$ であり、

$$\rho w \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

を得る。ここで、 ρ_w は垂直方向積分平均した密度である。

2.2 運動量保存式

海水の流れの運動量の保存式中で、 x 方向の保存式は、

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = f_{col} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x + \tau_s - \tau_b \end{aligned}$$

となる。 f_{col} はコリオリ (Coriolis) の力、 τ_s は空気に接する表面の風による摩擦力、 τ_b は海底の摩擦力である。ここで、浅水モデルでは、 z 方向の運動量はない ($w \sim 0$ と仮定する) として、流量フラックス

$$M = \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \rho u dx = (\eta+h)\bar{u},$$

$$N = \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \rho v dz = (\eta+h)\bar{v}$$

を代入する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} \\ = fN - (\eta-h) \frac{\partial \eta g}{\partial x} + K_h \left\{ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right\} \\ + K_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz + \frac{(\tau_s - \tau_b)_x}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} \\ = fM - (\eta-h) \frac{\partial \eta g}{\partial y} + K_h \left\{ \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right\} \\ + K_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz + \frac{(\tau_s - \tau_b)_y}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

この式で、方程式をクローズするために新しくレイノルズ応力などの相関応力関数をせん断応力項（右辺第3項）と垂直方向摩擦、および、水面と海底の摩擦を与える必要がある。

摩擦

浅海長波では、垂直方向 (z) 速度を考えないために、垂直方向についての値は、モデルによって導く必要がある。

海岸工学⁽²⁾で浅海長波に関する式として扱っている式(2)、(3)中での、底面の摩擦 R_x, R_y は、

$$R_x = K_h \left\{ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right\} + K_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz$$

$$R_y = K_h \left\{ \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right\} + K_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz$$

また、コリオリ Coriolis の力は

$$fN = 2\omega v (\eta+h) \sin \phi$$

$$fM = 2\omega u (\eta+h) \sin \phi$$

である。これは北半球での符号となっている。 ω は地球の自転角速度 ($=2\pi/(24 \times 60 \times 60) \text{ rad/s}$)、 ϕ は緯度 ($\sin \phi = 0.42 \sim 0.61$) である。

$$\rho \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} = fN - \rho g \frac{\partial \eta}{\partial x} + R_x + \tau_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = fM - \rho g \frac{\partial \eta}{\partial y} + R_y + \tau_y \quad (6)$$

摩擦項 R_x と R_y と, radiation stress から, τ_x, τ_y は

$$\tau_x = -\frac{1}{\rho(\eta+h)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \tau_{sx} \quad (7)$$

$$\tau_y = -\frac{1}{\rho(\eta+h)} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \tau_{sy} \quad (8)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_{-h}^{\eta} \overline{uv} dz = 0 \quad (9)$$

である。

摩擦項は, 水平渦粘性係数を K_h で示すと,

$$R_x = K_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad R_y = K_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

ここで, K_h は議論のある定数であるが, 堀川⁽²⁾の参考として出した図から式にすると

$$K_h = 0.024 - 0.0032 \exp(h/2.5)^{-0.4} \quad (10)$$

という関係を得て, これを用いる。

τ_s は, 表面で風から受ける摩擦であり, $\tau_s = \rho_a 1/2 \gamma_s^2 |u|u$ である。6~7 m/s の強い風について, $\gamma_s^2 = (4.8 \pm 1.0) \times 10^{-3}$ という提案がある⁽²⁾ので, これを採用した。

底から受ける力 τ_b は, 底質によって変化させる必要があるが, ほとんど報告はない。そこで, 最初のステップとしては, 底質を考慮にいれずに計算がうまく走るかどうかを報告するにとどめるため,

$$\tau_{bx} = \frac{K_b^2}{(\eta+h)^{1/3}} |u|u, \quad \tau_{by} = \frac{K_b^2}{(\eta+h)^{1/3}} |v|v \quad (11)$$

とした。この論文では, $K_b^2 \sim 0.005$ 程度としている。

2.3 本計算での仮定

本プログラム CORAL Version 1.0 では次のような仮定をしている。

1. 海水の密度は一定。つまり, 加熱されて温度が高くなったり, 攪拌によって冷水と混合し, 対流現象が起ることは無視している。さらに, 沿岸部で淡水との混合や, 蒸発による塩分濃度による密度変化は考えない。
2. 浅海仮定をしている。そのため, 解法は 2D (擬 3D) である。垂直方向の速度は無視しうほど小さい。
3. 乱流の渦混合係数は一定。
4. 底質の違いによる摩擦係数の違いは考えず, 底質は一樣。
5. 外洋境界条件は, 満干幅 1 m の正弦波で変化する周期 12 時間の潮汐。

この仮定のもと, 前述までの議論に基づいて次の式を導いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} = & -\frac{g}{\rho} (h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & + K_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{K_b^2}{(h+\eta)^{4/3}} M \sqrt{u^2+v^2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = & -\frac{g}{\rho} (h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & + K_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{K_b^2}{(h+\eta)^{4/3}} N \sqrt{u^2+v^2} \end{aligned} \quad (14)$$

ただし,

$$M = (\eta+h)u \quad (15)$$

$$N = (\eta+h)v \quad (16)$$

解き方は, 設定したグリッドシステムの上で, 上記の微分方程式を差分化して解いた。

3. グリッドシステムと差分

グリッドシステムは, 通常の流体解析で使用されるモデルの準じた。まず, 運動量保存式には解の安定性を重視して, Staggered Grid を用いた。図 3 に示すように, 中心の格子点には, η, h, ρ などスカラー量を配置し, 波線で囲まれる矩形体積の代表値であり, $(i+1/2, j)$ には, X 方向のベクトルである M, u を $(i, j+1/2)$ には, Y 方向のベクトルである N, v を配置する。差分展開では, このグリッドの位置を添字として展開する。

また, このグリッドシステムでは傾斜境界に三角要素を配置することには対応せず, 矩形のまま適用し, 境界条件の与え方を工夫して, 傾斜境界に対応することとした。

3.1 境界条件

境界条件には, 次のようなものがある。

1. 冠水する汀線
2. 外洋との境界
3. 岸壁

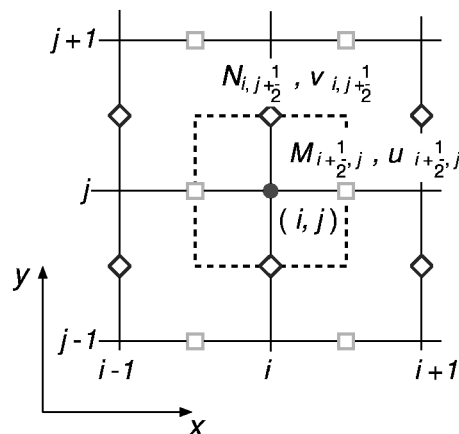


図 3 計算グリッドシステム

である。

冠水する汀線

冠水する渚は、このような浅い海での流れを分析する場合には需要となる。特に、次のバージョンで考えている砂浜や泥質の物質移動には重要な条件であるが、この論文では、簡単に汀線移動を潮位で計算して与えることにする。

外洋接続条件

外洋と計算領域の接続は、以下のようになめらかな接続とする。

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0, \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0, \frac{\partial M}{\partial x} = 0, \frac{\partial M}{\partial y} = 0, \frac{\partial N}{\partial x} = 0, \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

岸壁条件

岸壁条件は潮の干満潮の水位の変化に対して冠水境界が変化しない境界を想定している。この境界はスカラー条件であるので、グリッドシステムではスカラーで割り付ける。

図5-(A)のように $j-1$ が境界条件かどうかを判定するとき、それぞれの状態はスカラーセルによって決める。今、点 S が計算のための対象となっているとき、この周囲8個のセルそれぞれの、水位 η と水深 h によって、冠水しているか水面上か水面下かを判定する。図は S が水面下、 S' が水面より上にある岸壁の境界条件とする。ここでは、 y 方向に岸がある (x 方向に平行に汀線がある) ので、

$$S(i, j-1) \text{ が岸の場合 } M_{i,j-1} = -M_{i,j}$$

$$N_{i,j-1} = 0$$

$$\eta_{i,j-1} = \eta_{i,j}$$

として、汀線上 (A-B) でこの線に平行な流れ成分は対象になるように与える。実際の水位は衝突流の運動量の分だけ高くなるが、ここでは、静水位で与えるので、水

位の変化なしとする。

このようにしたケーススタディを図5の中に表で記入した。この表で、(TABLE-A) は、検査領域に隣接する要素であるが、(TABLE-B) は、 $\partial^2 M / \partial x \partial y$ などを計算するときを使用する検査面を囲む4点を計算するときに必要な、斜め横に接する4つの要素を示すことになる。

$P_{i-1,j-1}$ 考えた場合、図4のように3通り考えられる。そのいずれもが図5の表に一致するためには、 X 方向のベクトルを解くときには $P_{i-1,j}$ の検査に続いて、 $P_{i-1,j-1}$ を行うと、この3つの図は1つのアルゴリズムの扱えることになる。

一方、 Y 方向の運動量では、 N を解く式となるが、図6のように、 X 方向の場合と同じに扱う。異なるのは、斜め横の要素の扱いだけである。

4. 計算方法と収束方法

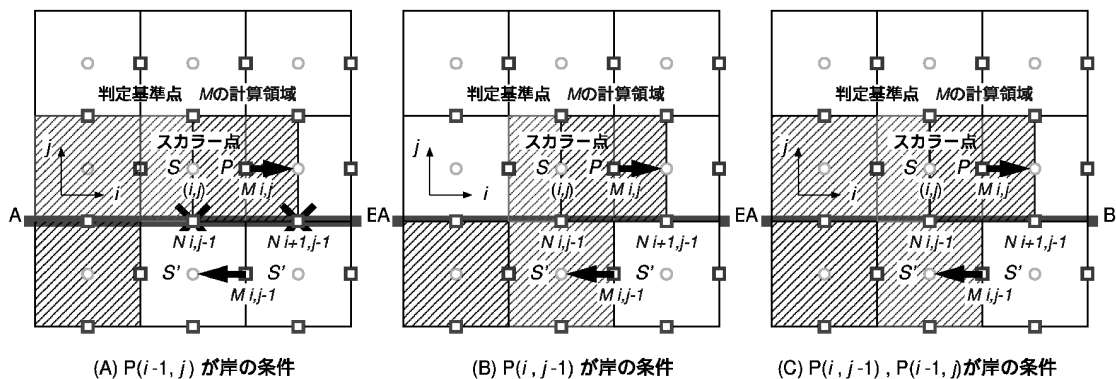
4.1 収束方法

本計算は、非定常計算であるが図2に示すように外洋の潮汐データ (潮位、潮流の方向と速度、潮流温度) を用いる。そのため、日付を指定されたとき前日の計算結果を元に計算を行い、指定された日一日分のデータを計算を行えば良いことになる。しかし、最初の計算を行う場合の初期値は、全水位一様、速度ゼロ、水温一定として、2日分の仮の潮位を正弦波で与えて計算する。

$$\eta_{out}(t) = |\eta_0| \sin\left(\frac{2\pi}{86400} t\right)$$

このため、前日のデータを元にして計算するときには実情に合わない誤差を含むと考えられる。

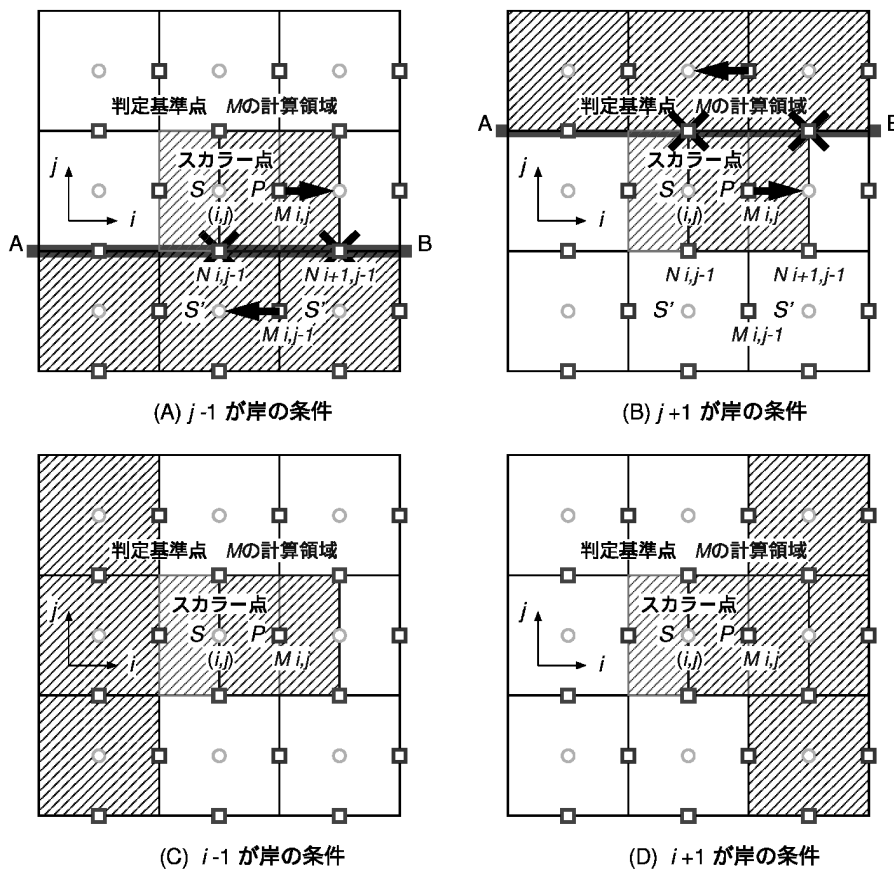
そのため、実用に供するには、数日間の運用期間を必要とする。



(TABLE-C)

| | | | |
|-----|---------------------------------|-----|--|
| (A) | $S_{i-1,j-1} : M_{i-1,j-1} = 0$ | (B) | $S_{i-1,j-1} : M_{i-1,j-1} = -M_{i-1,j}$ |
| (C) | $S_{i-1,j-1} : M_{i-1,j-1} = 0$ | | |

図4 Mの計算のための境界条件の処理の図(II)



(TABLE-A)

| | | | |
|-------------|--|-------------|--|
| $S_{i,j-1}$ | $M_{i,j-1} = -M_{i,j}$ $N_{i,j-1} = 0$ $\eta_{i,j-1} = \eta_{i,j}$ | $S_{i,j+1}$ | $M_{i,j+1} = -M_{i,j}$ $N_{i,j+1} = 0$ $\eta_{i,j+1} = \eta_{i,j}$ |
| $S_{i+1,j}$ | $M_{i+1,j} = 0$ $N_{i+1,j} = -N_{i,j}$ $\eta_{i+1,j} = \eta_{i,j}$ | $S_{i-1,j}$ | $M_{i-1,j} = 0$ $N_{i-1,j} = -N_{i,j}$ $\eta_{i-1,j} = \eta_{i,j}$ |

(TABLE-B)

| | | | |
|---------------|--|---------------|--|
| $S_{i+1,j-1}$ | $M_{i+1,j-1} = -M_{i+1,j}$ $N_{i+1,j-1} = 0$ $\eta_{i+1,j-1} = \eta_{i+1,j}$ | $S_{i+1,j+1}$ | $M_{i+1,j+1} = -M_{i+1,j}$ $N_{i+1,j+1} = 0$ $\eta_{i+1,j+1} = \eta_{i+1,j}$ |
| $S_{i-1,j-1}$ | $M_{i-1,j-1} = -M_{i-1,j}$ $N_{i-1,j-1} = 0$ $\eta_{i-1,j-1} = \eta_{i-1,j}$ | $S_{i-1,j+1}$ | $M_{i-1,j+1} = -M_{i-1,j}$ $N_{i-1,j+1} = 0$ $\eta_{i-1,j+1} = \eta_{i-1,j}$ |

図5 Mの計算のための境界条件の処理の図

この計算では、もっとも条件の緩い場合でもクーラン数 $\Delta t / \Delta x < 0.2$ として計算している。クーラン数がこの条件よりも大きいと、計算上の空間の特定の場所から解の振動発散が起こる。クーラン数を小さくすることは、 Δt を小さくすることであるが、解を得るまでの長時間の計算を必要とする。

いずれも解の振動を避けるためには、人工的な粘性を

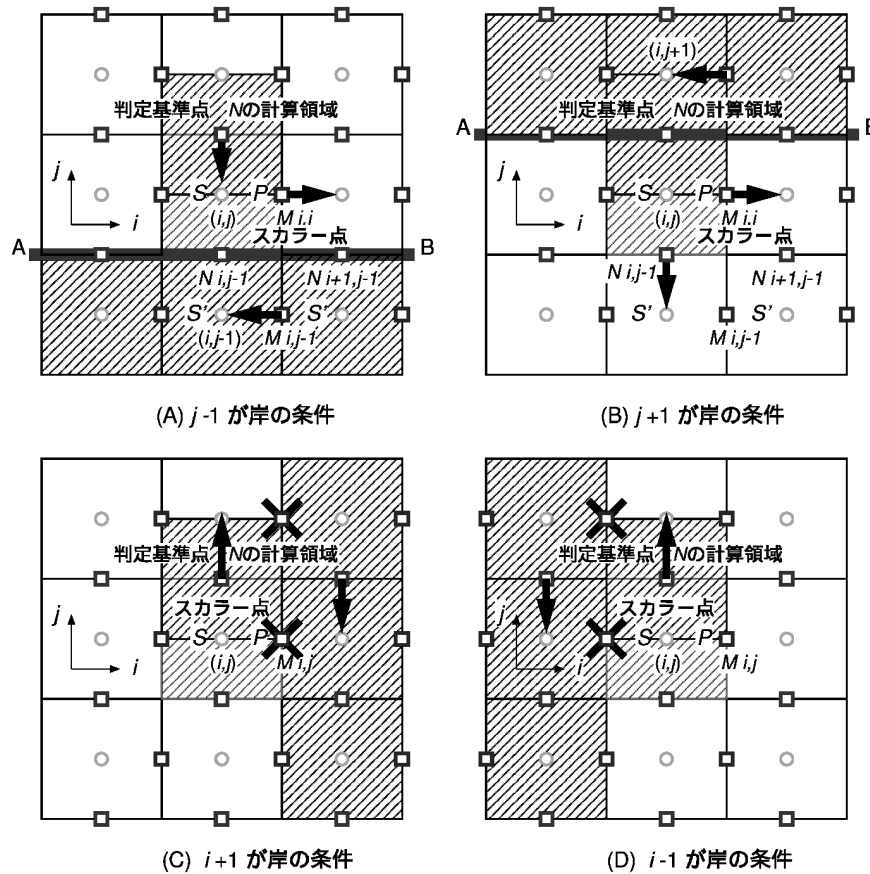
導入するが、ここでは水平渦拡散係数を操作した。

5. 計算結果

計算のプログラムは、名前を CORAL とつけた。起動方法は

coral [option]

-c : 接続ファイルから計算継続



(TABLE-A)

| | | | |
|-------------|--|-------------|--|
| $S_{i,j-1}$ | $M_{i,j-1} = -M_{i,j}$ $N_{i,j-1} = 0$ $\eta_{i,j-1} = \eta_{i,j}$ | $S_{i,j+1}$ | $M_{i,j+1} = -M_{i,j}$ $N_{i,j+1} = 0$ $\eta_{i,j+1} = \eta_{i,j}$ |
| $S_{i+1,j}$ | $M_{i+1,j} = 0$ $N_{i+1,j} = -N_{i,j}$ $\eta_{i+1,j} = \eta_{i,j}$ | $S_{i-1,j}$ | $M_{i-1,j} = 0$ $N_{i-1,j} = -N_{i,j}$ $\eta_{i-1,j} = \eta_{i,j}$ |

(TABLE-B)

| | | | |
|---------------|--|---------------|--|
| $S_{i+1,j-1}$ | $M_{i+1,j-1} = -M_{i,j-1}$ $N_{i+1,j-1} = 0$ $\eta_{i+1,j-1} = \eta_{i,j-1}$ | $S_{i+1,j+1}$ | $M_{i+1,j+1} = -M_{i,j+1}$ $N_{i+1,j+1} = 0$ $\eta_{i+1,j+1} = \eta_{i,j+1}$ |
| $S_{i-1,j-1}$ | $M_{i-1,j-1} = -M_{i,j-1}$ $N_{i-1,j-1} = 0$ $\eta_{i-1,j-1} = \eta_{i,j-1}$ | $S_{i-1,j+1}$ | $M_{i-1,j+1} = -M_{i,j+1}$ $N_{i-1,j+1} = 0$ $\eta_{i-1,j+1} = \eta_{i,j+1}$ |

図6 Nの計算のための境界条件の処理の図

- a : 改良計算法を用いる
- k xxxxxx: 渦拡散係数 0.02
- T xxxxxx: 最大計算時間 2.00 day
- t xxxxxx: 時間刻み 1.00000e-02
- p xxxxxx: 表示インターバル 10.00
- o xxxxxx: 結果を格納するファイル
RESULT-01-01

- f xxxxxx: 設定ファイル
- w xxxxxx: 潮の干潮差 m 1.000
- h : このヘルプ

として、GUIではなくオプションを選択できる通常のUNIXプログラムの形式をとっている。

- この計算は、
1. 設定ファイルを読み込む。

表 2 実行条件を設定するファイル

| KEY : | 意 味 |
|------------------|----------------------------|
| a : | 緩和フラグ OFF |
| U _o : | 外洋潮流の X 成分 0.03 m/s |
| V _o : | 外洋潮流の Y 成分 -0.01 m/s |
| W _x : | 海面上の風の X 成分 0.50 m/s |
| W _y : | 海面上の風の Y 成分 -0.70 m/s |
| SR : | 日射エネルギー (MAX) 2.5000e+03 W |
| St : | 日射エネルギー最大時刻 5184046.8 sec |
| SD : | 計算領域の大きさ 24390.4 m |
| X : | X 方向分割数 41 |
| Y : | Y 方向分割数 41 |
| File : | 水深を示す PPM ファイル ss03.ppm |
| Sm : | 水深データ平滑化 しない |
| cF : | 継続結果格納ファイル contss03.data |
| rF : | 結果を格納ファイル RESULT-ss-03 |
| Kh : | 水平渦拡散係数 2.0000E-02 |
| Kv : | 垂直渦拡散係数 0.0000E+00 |
| Kb : | 水底摩擦係数 3.0000E-02 |
| dt : | 無次元分割時間 1.0000E-02 |
| pd : | 印刷インターバル 20.0000 |

この設定ファイルでは、表 2 に示すように計算の条件を自由に指定できる。ほとんどの境界条件やパラメータを設定できるようにしている。この表は、下記の例で実行した値でもある。

- 境界条件は、対象となる地形の PPM (Portable Pixel Map) ファイルを読み込み、計算を始める。この PPM ファイルは、カラーであり、各 Pixel は RGB 要素で記入されている画像ファイルである。現在は、R : 256 × G : 256 × B : 256 の画像を用いているが、Full Pixel の $2^{12} \times 2^{12} \times 2^{12}$ に対応している。この値を (P_R, P_G, P_B) として表すと、この中の B (青要素) P_B を用いて地形とした。標準海面を P_{B0} とすると、水深は、 $h = h_{max} (P_B - P_{B0}) / P_{B0}$ と、8 bit で表す。この例を図 7 に示した。

また、 $P_B = 0$ の場所は、外洋境界条件を与えるものとした。

- 境界条件の図ファイルを読み込んで計算を実行。として計算を進めている。

計算の性能を確かめるサンプルとして、外洋の流れを、実際の海洋より低速な条件、 $U = 0.03 \text{ m/s}$, $V = -0.01 \text{ m/s}$ として解いた。地形は図 7 に示し、計算安定から約 22 日後の流れの結果を抽出して、ベクトル図として図 8 に示した。

このサンプルは、いくつかの実際の地形の要素を含ませて作成している。図 7 に示すように、海面付近では東側が比較的傾斜の緩やかな部分であり、海洋流の下流に当たる西側は急な斜面である。

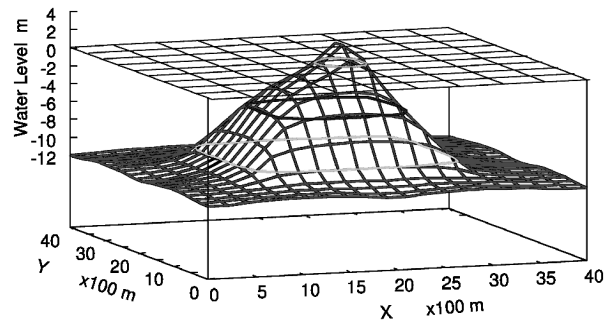


図 7 計算のための設定の地形

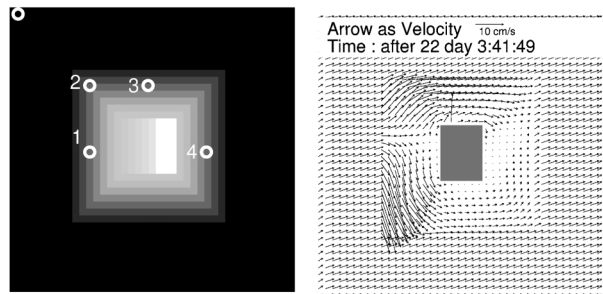


図 8 計算性能チェックのための設定と流れのベクトル図

この図の中の 4 つのサンプル点について初期値からの収束の状態を図 9 に示す。

まだまだ収束までの時間が長い、初期の解の安定解からの大きなずれの存在など、改善の余地がある。この図 9 で (2, 2) という地点は、外洋であるので、干満差を 1 m として計算し、潮位差を無次元で示したものであり、初期の計算値は 120 m ほどの非現実的な値を示すが、長時間経過後安定した潮位に収束する。同時にこの地形では、陸に近い部分では潮位差が外洋より少ないという実際の現象と同じとなる。

この論文では示すことができないが、図 8 に示すような、流速ベクトル、潮位など計算結果項目が出力されるインターバルは、任意に指定しうる。このデータを時系列として並べれば時刻の異なる多くの図を得ることができる。現在のこのプログラムではこの時系列図を GIF-ANIMATION により出力している。次のバージョンでは、これを FLASH で出力し、より詳細な情報を提示できるものと考えている。

具体的な地形を、前述のような仮定の元で計算をした例を図 10 に示す。これは、鹿児島県大島郡与論町の南東部、珊瑚礁が発達している美しい海岸である、大金久海岸、赤崎海岸部分を取り上げた。また、与論町喜山町議から提供いただいた同じ場所の航空写真を図 11 を示す。

実際の場所の詳細な潮の流速は不明であるが、潮の流れの方向は珊瑚の生育状況、イノー底の流模様などが

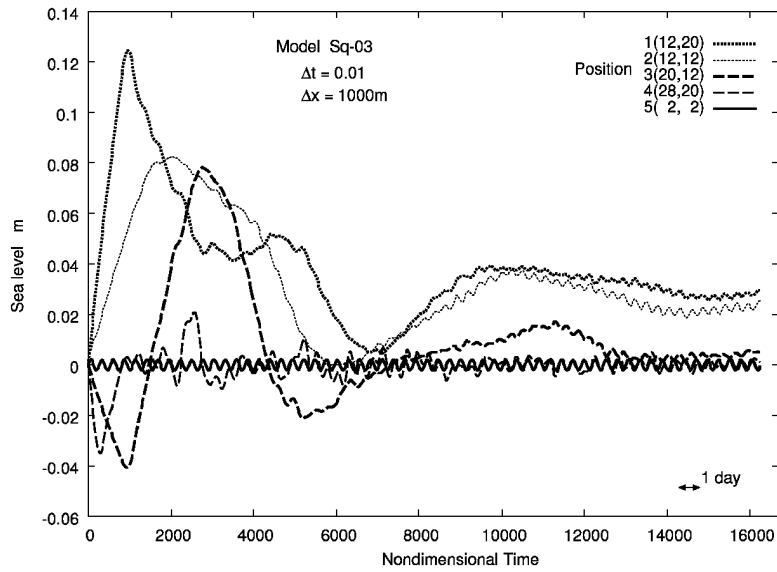


図9 サンプル計算での収束

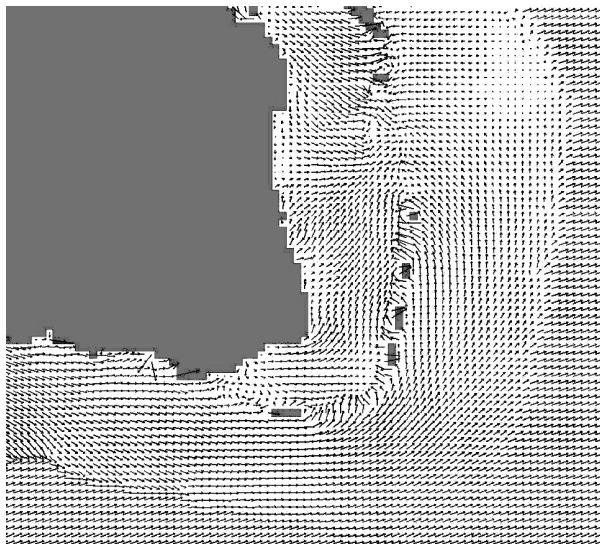


図10 与論島の南東部の計算

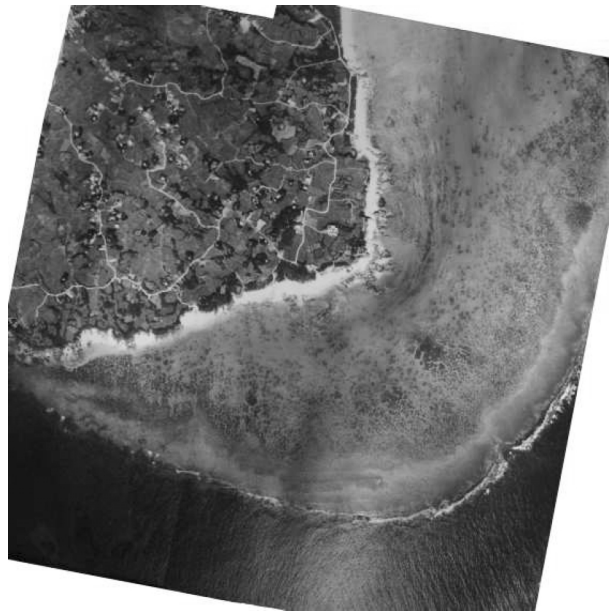


図11 与論島の南東部の航空写真⁽³⁾

表3 計算環境

| | |
|----------|--|
| MACHINE | ASUS T12+IDEHD 160 GByte 1 台 |
| CPU | Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 2.80 GHz |
| OS | Vine Linux×3.0 |
| Compiler | gcc バージョン 3.3.2 2003 12 18 |
| Language | C |
| Source | 3128行, 79122バイト |
| 計算速度 | 図10は表示なし, 平滑化なしで, 194分 図9は表示なし, 平滑化なしで, 17分 |

ら判断できる。計算ではほぼこの方向を計算しているものとする。この計算での計算環境は表3に示す。この実際の地形への適用とその精度に関しては次の論文に

述べる。

ま と め

この論文では、

1. Leap Frog スキームと Lax-Wendroff スキームを用いて、潮流の計算コードを開発した。
2. 境界条件を詳細に検討し、荒い計算メッシュでも海浜近くの流れを正確に出せる工夫をした。
3. この計算により、海浜のレジャー情報を作成できる可能性を示した。

また、今後の課題として、底質の輸送の詳細な計算、

日射による礁池内の対流，塩分濃度分布などの計算を可能にして，珊瑚礁内の生態系調査のための資料を作成可能とすることなどがある。

この計算とコーディングを卒業研究の一部として実行してくれた当時機械情報工学科学生の坂口尚嗣君に感謝します。

記号

| | | | |
|-----------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| G | 海水の塩分濃度 | $M = (\eta + h)U$ | |
| N | $= (\eta + h)V$ | T | 海水温度 |
| K_h | 水平渦粘性係数 | K_b | 底質粘性係数 |
| η | 水面上昇 | ρ | 海水の密度 kg/m^3 |
| τ_b | 底質によるせん断力 | τ_s | 風による表面せん断力 |
| g | 重力加速度 | h | 水深 |
| p | 圧力 | u, v, w | それぞれ x, y, z 方向の速度 |
| x, y, z | 実座標系 | | |

参考文献

- [1] 小高正嗣，石渡正樹，竹広真一，石岡圭一，豊田英司，林 祥介．地球型惑星大気大循環モデル agcm6 の開発．地球惑星科学関連学会2003年合同大会，2003．
- [2] 堀川清司．海岸工学—海洋工学への序説—，第4章，p. 184．東京大学出版会，1973．
- [3] 与論町喜山康三町議提供．航空写真，7 1969．