

猪苗代湖の吹送流および河川流シミュレーション†

宮村 倫司*・文屋 信太郎**・中林 靖***・吉村 忍****

ABSTRACT The finite element fluid flow analyses to simulate currents in the Lake Inawashiro are conducted. The geometry model and finite element meshes of the lake are generated by using a newly developed method that is presented in this paper. In this method, the moving least square method is used to interpolate the sampling points on contour lines. The fluid flow analyses based on the shallow water equations (SWE analyses) and a preliminary 3D incompressible viscous flow analysis (3D analysis) are conducted. Some parameters and boundary conditions used in the analyses are based on observation data. Movement of acid water that comes from the Nagase River is simulated by the analyses. The preliminary 3D analysis is conducted for evaluating the size of the mesh and computation time of realistic fully 3D simulation. The present geometry modeling method is implemented by using preprocessors in the system of open source software for the parallel finite element (FE) analyses, ADVENTURE. The finite element fluid flow analyses are performed by using existing parallel codes. The code for the 3D analysis is a module of the ADVENTURE system. The code for the SWE analysis will be open to the public as a module of the system in the future.

1. はじめに

福島県の中央に位置する猪苗代湖はpHが5程度の弱酸性湖であるため、COD(化学的酸素要求量)の値が低く、支笏湖と並んで日本で一番水質の良い湖である¹⁾。弱酸性である理由は、流域に強酸性温泉がある長瀬川が、北側から流入しているためである。しかし、近年、pH値が少しずつ上昇しており、それに伴う水質の悪化が懸念されている^{2~4)}。藤田等は猪苗代湖の流動や水質の観測を継続している^{5,6)}。また、観測結果に基づいて、北部湖岸の土砂堆積の問題⁷⁾、湖の内部静振の問題⁸⁾に関する研究を行っている。

ところで、数値シミュレーションは、水環境の変動

Simulation of Currents in the Lake Inawashiro Driven by Wind and Inflows from Rivers. By Tomoshi Miyamura (Department of Computer Science, College of Engineering, Nihon University), Shintaro Bunya (Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre Dame), Yasushi Nakabayashi (Department of Computational Science and Engineering, Faculty of Engineering, Toyo University) and Shinobu Yoshimura (Department of Quantum Engineering and Systems Science, Graduate School of Engineering, University of Tokyo).

* 日本大学工学部情報工学科

** ノートルダム大学土木工学科

*** 東洋大学工学部コンピュータシミュレーション工学科

**** 東京大学工学系研究科システム量子工学専攻

† 2005年7月14日受付 2006年1月12日再受付

を予測するための有効な手段であると考えられる。湖沼についても、数値シミュレーションを用いた研究が行われている(例えば、文献9))。実物を観測する場合には、測定点の数が限定されるのに対して、数値シミュレーションを行えば、任意の点の物理量を求めることができる。また、様々な条件の下でのシミュレーション結果を基にして、水質の悪化を改善するための最適な方法を見つけることも期待できる。水環境のシミュレーションの中で最も重要なのが、水の流れを求める流動解析である。その結果を利用して汚染物質の拡散や、生態系の解析等を行うこともできる¹⁰⁾。

湖沼や海洋における水深は、解析領域の寸法に比べると小さいため、鉛直方向の流動現象は何らかの形で簡略化して取り扱われることが多い。鉛直方向の流れに対して水平方向の流れが卓越的であるという仮定が成立する場合には、水平二次元の浅水長波方程式に基づくモデルがしばしば用いられる。温度成層や密度成層などの影響により鉛直方向の流速分布を陽的に解く必要がある場合には、マルチレベルモデルなどの準三次元モデルが用いられる。湖沼や海洋は複雑な形状の湖岸あるいは海岸線を持つため、任意形状を扱うことのできる有限要素法による解析が有効であると考えられる。これらのモデルを有限要素法により離散化するための様々なスキームが提案されている^{11,12)}。Fujita

等は猪苗代湖の浅水長波方程式に基づく有限要素解析を行っている¹³⁾。ただし、そこで用いられているメッシュは比較的粗いものである。一方、先に紹介した内部静振の問題や、それに伴う垂直方向の攪拌現象の解明、あるいは、温度成層の形成や温度差による密度差を駆動力とする水の流れ等のシミュレーションを行うためには、厳密な三次元シミュレーションが必要である。しかし、海洋や湖沼の広域モデルに対して、ナビエ・ストークス方程式に基づく三次元非圧縮性粘性流体解析を行った例はほとんどない。

本研究の最終的な目的は、猪苗代湖の様々な環境変動を予測するためのシミュレーションシステムを構築し、観測データと比較できるような高精度なシミュレーションを行うことである。そこで、本論文では、最初に複雑な形状をした自然物である湖の形状モデリングおよびメッシュ生成手法を提案する。この手法では、等高線上のサンプリング点群を補間するために移動最小二乗法¹⁷⁾を用いる。本手法は大規模並列計算力学のためのオープンソースソフトウェアシステムであるADVENTUREシステム^{14)~16)}のプリプロセッサ群を基盤技術として実装する。開発したプリシステムを用いて猪苗代湖の形状モデル(表面パッチ)を生成する。

生成した形状モデルを用いて、まず浅水長波方程式に基づく解析を行う。これには、文屋等により開発された並列解析コードを利用する^{18)~21)}。本コードはADVENTUREシステムの1モジュール(ADVENTURE_ShallowWater)として公開する予定である。本解析では、最も流量の大きい長瀬川から流入する酸性の水が、湖全体に拡散する様子を調査する。観測データを基に、河川の流入量や流出量、および、風向と風速を解析条件として計算する。一方、猪苗代湖のような深い湖では垂直方向の水の流れがあるので、浅水長波方程式に基づく解析には限界がある。そこで、ADVENTUREシステムに含まれるADVENTURE_Fluidを用いて予備的な三次元非圧縮性粘性流体解析を行い、本格的な解析に必要なメッシュの規模や計算時間について検討する。

以下、第2節では猪苗代湖について紹介する。第3節では、浅い湖のメッシュを生成する手法を提案する。第4節では猪苗代湖のメッシュ生成について述べる。第5節では、猪苗代湖の浅水長波方程式に基づく解析について述べる。第6節では、三次元非圧縮性粘性流体解析について検討する。第7節では結論をまとめる。

2. 猪苗代湖について^{1, 22)}

猪苗代湖の面積は約103.3 km²、湖岸延長は約50.4

kmであり、日本で4番目に大きい湖である。南北方向の直径は約14 km、東西方向の直径は約10 kmである。平均水深は約51.5 m、最大水深は約91.5 mである。北部の水深は浅く、南部ではすり鉢状に水深が深くなっている。北部の猪苗代町内を流れる小黒川と長瀬川 of 全窒素量と全リン量が近年わずかに上昇している³⁾。

北部から流入する長瀬川の流入量は他の川に比べてはるかに大きい。また、冒頭に述べたように長瀬川は酸性の河川である。長瀬川以外には10本の川が流入している。一方、北西部にある小石ヶ浜水門および北東部にある安積疏水取水口からは水が流出している。流出量の多くは小石ヶ浜水門からのものである。水位を調整するために、流出量は水門により人工的に調整されている³⁾。

3. 湖のメッシュ生成手法の開発

3.1 メッシュ生成の手順

ここでは地形図を用いて湖の三次元的な表面パッチ(三角形ポリゴンの集まりで表現された閉じた形状モデル)を生成する方法を提案する。表面パッチは形状モデルの一種である。なお、日本国内の湖沼図の等高線は、デジタルデータ化されておらず、国土地理院の数値地図にも収録されていない。提案手法の手順を以下に示す。

- A) デジタルカメラにより地形図を撮影する。
- B) 撮影画像の歪みを画像処理(アフィン変換)により補正する。
- C) 湖岸線および等高線上にあるいくつかの点のピクセル座標値を市販の画像処理ソフトおよびマウスを用いて読み取る。
- D) ピクセル座標における座標値を、適当な点を原点とした実際の座標値に変換する。
- E) ソリッドモデラにより、湖岸線データを用いて深さを一定とした表面パッチを生成する。
- F) 等高線上のサンプリング点群を移動最小二乗法¹⁷⁾により補間し、湖底面の形状に従って、表面パッチの頂点を移動する。
- G) 表面パッチの三角形ポリゴンの品質(アスペクト比)を改善し、また、三角形ポリゴンの平均的な寸法を調整する。
- H) 三次元解析の場合には四面体メッシュを生成する。

以上の処理の中で、A)からD)については、数値地図があればそれを利用することもできる。E)、G)、H)については、大規模並列計算力学のためのオープンソースソフトウェアシステムであるADVENTUREシ

システム¹⁴⁾の前処理モジュール群を利用する。D)については、コマンドベースソリッドモデラであるADVENTURE_CAD²³⁾を用いる。このソフトウェアでは、読み取った湖岸線上の点の座標値を用いて多角形を定義すれば、これを押し出した形状の幾何モデルが、表面パッチとして出力される。この処理は、専用のコマンドによりスクリプトを記述し、それを実行することにより行う。作成された表面パッチでは水深が一定であるため、F)の処理により、節点を深さ方向に移動して、水深の変化を考慮した表面パッチを生成する(図1)。この処理については、次節において詳しく述べる。

一方、G)、H)については、四面体メッシュジェネレータであるADVENTURE_Tetmeshに付属するモジュールにより処理を行う。F)の処理によりアスペクト比の悪い三角形ポリゴンが発生するので、表面パッチを改良するためのソフトウェアであるTetmesh_pモジュールを用いてG)の処理を行う。また、このソフトウェアにより、作成する四面体メッシュの規模や、形状表現の精度に応じて、表面パッチの細さを調整することもできる。これにより高品質かつ適切な規模の表面パッチが生成できる。最後のH)の処理では、表面パッチから四面体メッシュを生成するソフトウェアであるTetmesh_mモジュールを用いて、高品質の四面体メッシュを生成する。

第5節に示す浅水長波方程式による解析では、二次元メッシュの各節点において水深を与える必要があるため、これを表面パッチから求める。なお、次節に示すMLS Mを用いた補間手法により、水深を等高線上のサンプリング点群から直接計算することも可能である。

3.2 MLS Mによる深さの変化の考慮

移動最小二乗法(Moving Least Square Method: MLS M)はElement Free Galerkin法(EFGM)¹⁷⁾等のメッシュレス法の形状関数として用いられている。ここでは、MLS Mを湖のような2.5次元形状の物体のメッシュ生成に利用する。

以下では、地表面に沿った二次元座標系のことを地表面座標系と呼ぶ。また、ある点を地表面に投影した点の地表面座標系における座標を、その点の地表面座標と呼ぶ。等高線上のサンプリング点群は、深さを属性とし

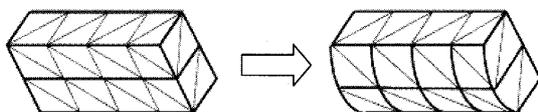


図1 表面パッチの深さ方向寸法の修正

て持つ地表面座標系上の点群であり、入力データとして与えられる。

MLS Mを使って、深さ一定の表面パッチと等高線上のサンプリング点群から、湖底面の形状を考慮した表面パッチを作成する手法について以下に述べる。深さ一定の表面パッチの各節点の地表面座標は、等高線上の各サンプリング点の地表面座標とは一致しない。そこで、表面パッチの各節点における深さを、サンプリング点群からMLS Mを用いて補間する(図2)。ある点の地表面座標を \mathbf{x} と表し、そこにおける水深を $d(\mathbf{x})$ とする。 $d(\mathbf{x})$ を以下のように多項式で近似し、近似された値を $d^h(\mathbf{x})$ とする。

$$d(\mathbf{x}) \approx d^h(\mathbf{x}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ は多項式の基底関数を表すベクトル、 $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ は基底関数に掛けられる係数を表すベクトルである。本論文では $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ として、主に次式に示す4次多項式の基底関数を用いる。

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{x}) = [1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad xy \quad y^2 \quad x^3 \quad x^2y \quad xy^2 \quad y^3 \quad x^4 \quad x^3y \quad x^2y^2 \quad xy^3 \quad y^4] \quad (2)$$

係数ベクトル $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ は、以下に示す重みつき二乗和を最小にするように決める。

$$J = \sum_{i=1}^m w(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|) \{ \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{a}(\mathbf{x}) - d_i \}^2 \quad (3)$$

ここに、 \mathbf{x}_i は等高線上のサンプリング点の地表面座標、 d_i はサンプリング点における水深、 w はサンプリング点 \mathbf{x}_i が点 \mathbf{x} に一致するときに重みが最大になるような重み関数である。ここでは w として以下の関数を用いる。

$$w(r) = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{r}{\rho}\right)^2 + 8\left(\frac{r}{\rho}\right)^3 - 3\left(\frac{r}{\rho}\right)^4 & (0 \leq r \leq \rho) \\ 0 & (r > \rho) \end{cases} \quad (4)$$

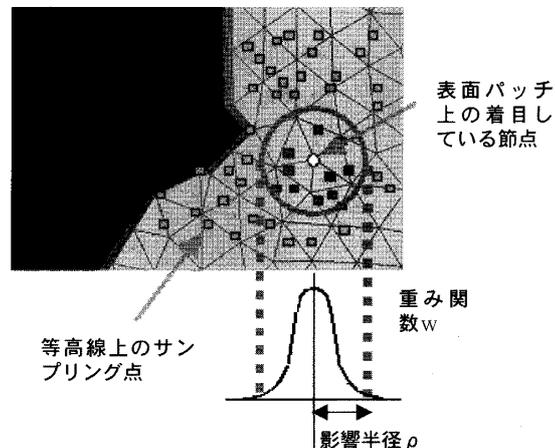


図2 MLS Mによる深さ方向寸法の内挿

式(4)の ρ は影響半径と呼ばれている。 ρ が大きい程、 \mathbf{x} から遠いところにあるサンプリング点の影響を考慮することになる。また、式(4)は \mathbf{x} に近い点の方が内挿に大きく寄与することを表している。式(3)を $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ の各成分で偏微分し、それを0とすると、以下のような $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ に関する連立一次方程式が得られる。

$$\mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{a}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{d}} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{\mathbf{d}}$ は影響領域内の節点数分の d_i を並べたベクトルである。 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は係数行列である。この式により、 $d^h(\mathbf{x})$ は以下のように、サンプリング点の水深の値に形状関数を掛けて和をとった形で表される。

$$\begin{aligned} d^h(\mathbf{x}) &= \mathbf{p}^T(\mathbf{x})\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{d}} \\ &= \phi(\mathbf{x})\bar{\mathbf{d}} \equiv \sum_{i=1}^m \Phi_i(\mathbf{x})d_i \end{aligned} \quad (6)$$

図2には、ある節点に対する影響半径内にあるサンプリング点と重み関数も示す。影響半径の中に十分な数のサンプリング点がない場合や、サンプリング点の分布に偏りがある場合には、 $\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})$ が計算できないことがある。その場合には、影響半径を大きくすることが必要である。

MLSMの問題点として、内挿された値がサンプリングにおいて与えられた値に必ずしも一致しないことが挙げられる。本研究では、式(2)に示したような高次の基底関数を用いることにより、両者の差を小さくしている。

以上の処理を深さ一定の表面パッチの底面および側面の各節点に対して行う。側面の節点については、最初の深さ方向の座標値と移動量が比例するように移動する。

4. 猪苗代湖の表面パッチ作成

前節で提案した手法により猪苗代湖のメッシュを生成する。猪苗代湖の地形図をデジタルカメラで撮影し、撮影画像の歪みを補正した結果を図3に示す²⁴⁾。これより湖岸線および等高線上の点(サンプリング点)の座標値を求める。湖岸線上の点は358点、等高線上のサンプリング点は合計2386点である。等高線上の点群を図4に示す。等高線上の点の分布は、均一ではないことが図4よりわかる。湖岸線付近で水深が0に近くなり、メッシュの形状が鋭角になるのを防ぐために、湖岸線の外側にも一定の幅の領域を設けてサンプリング点を置き、そこでの水深をすべて10mにしている。また、湖の内部においても、水深が10m以下のときには全て10mにしている。湖岸線上の点も水深10mのサ

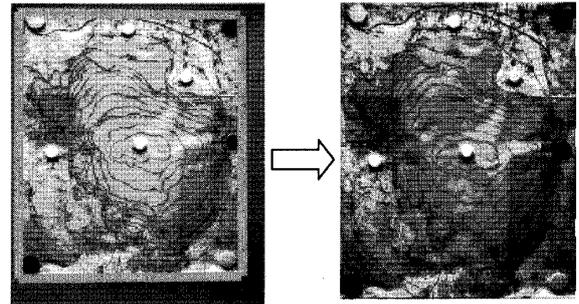


図3 デジタルカメラで撮影した地形図のひずみ補正

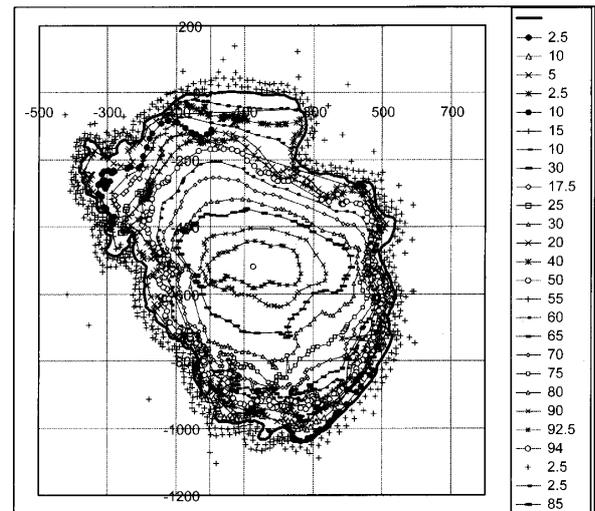


図4 等高線上の点群

ンプリング点として用いる。従って、内挿がうまくいけば、湖岸線において深さ10mの垂直な面ができる。ただし、3.2節に述べたように、MLSMにより内挿された面は、必ずしもサンプリング点を通らないため、湖岸線における水深は設定された10mに正確には一致しない。また、猪苗代湖の北部水域の水深は、かなり広い範囲にわたって10m以下であるため、最低水深を10mとする仮定については更に検討する必要がある。

次に、以下の二種類の条件をMLSMに対して設定して表面パッチを生成する。

- 影響半径は1429mとし、影響半径内に入るサンプリング点の数が40点未満のときは、40点以上になるまで影響半径を1.2倍ずつ大きくしていくようにする。
- 影響半径を1688mとする。この場合、影響半径内に入るサンプリング点の数は、どの点においても40点以上となる。

影響半径内に入る点の数が少ないときに、影響半径を徐々に大きくする操作を何回も繰り返すと、生成され

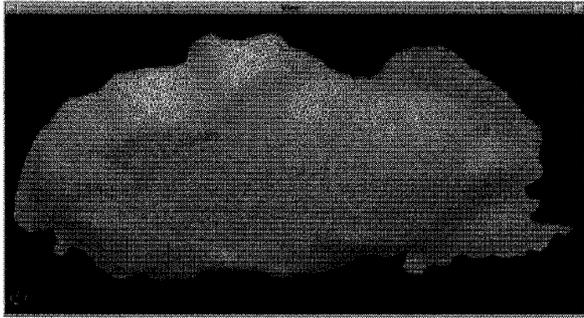


図5 提案手法により生成した猪苗代湖の表面パッチ(深さを10倍に拡大して表示)

た曲面に細かい凹凸が発生する。条件(a)では、凹凸は許容できる程度となった。影響半径内に入る点の数が少ない場合を許容すると、サンプリング点が少ない領域付近で、凹みが生じる。一方、影響半径をあまり大きくすると、意味のある細かい凹凸までもがスムージングされる。MLSMに二次の基底関数を使った場合には、この傾向が強かったため、式(2)に示した四次の基底関数を使うことにした。これにより、大きめの影響半径を用いても、意味のある細かい凹凸はある程度は表現できる。以下の解析では、条件(b)に基づいて生成した表面パッチを用いる。次に、生成された表面パッチに対して、前節に述べたように、ADVENTURE_Tetmeshに含まれるTetmesh_pモジュールを用いて、三角形の品質および寸法を調整する。生成された表面パッチを図5に示す。

5. 二次元浅水長波方程式に基づくシミュレーション

5.1 二次元浅水長波方程式

二次元浅水長波方程式は、鉛直方向の流れに対して水平方向の流れが卓越的であるという仮定の下で、三次元非圧縮性Navier-Stokes方程式を水底から水面まで鉛直方向に積分し、水平方向の断面平均流速を導入することによって導かれる²⁶⁾。連続の式は以下となる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここに、 ζ は基準水位から水面までの高さ、 H は底面から水面までの高さ(基準水位に ζ を加えたもの)、 $\mathbf{u} = (u, v)$ は断面平均流速である。一方、運動量方程式は、水平方向の各成分にそれぞれ成立し、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv - \tau_{sx} + \tau_b u - M_x = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - fu - \tau_{sy} + \tau_b v - M_y = 0 \quad (9)$$

と表される。ここに、 g は重力加速度、 τ_b は底面摩擦係数である。 f はコリオリパラメータであり、 ω を地球の角速度、 ϕ を緯度とすると、

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (10)$$

となる。 ω の値は約 7.27×10^{-5} である。 τ_{sx} および τ_{sy} は表面摩擦力を表し、水の密度 ρ 、空気密度 ρ_a 、水面摩擦係数 γ 、風速 $\mathbf{w} = (w_x, w_y)$ を用いて表される以下のモデルを用いる²⁶⁾。

$$\tau_{sx} = \frac{\rho_a \gamma w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho H}, \quad \tau_{sy} = \frac{\rho_a \gamma w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho H} \quad (11)$$

τ_b は底面摩擦係数であり、マンニングの粗度係数 n を用いて表される次のモデルを用いる²⁶⁾。

$$\tau_b = \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{4/3}} \quad (12)$$

また、 M_x と M_y はそれぞれ x 方向と y 方向の粘性項であり、ここでは係数一定の渦動粘性モデル²⁷⁾を用いる。式(7)から(9)に加えて、陸との境界では、スリップ条件を与える。以上の基礎式をquasi-bubble要素を用いた有限要素法により離散化する²⁷⁾。河川における流入および流出条件は、式(7)で与えられる質量保存則の重みつき残差式に含まれる空間微分項を部分積分して得られる境界積分項によって流量として与える。解析コードでは、以上の基礎式に対して領域分割法を適用し、並列化された実装としている。また、専用のプリおよびポストプロセッサも備えている。

5.2 冬場の猪苗代湖の河川流および吹送流シミュレーション

第4節に述べた湖岸線上の点群を入力データとして、図6のような節点数:4525、要素数:8479の二次元メッシュを生成する。この図には、境界条件として与える流出入する川の名前と流量も示している。要素の寸法は、次式で定義されるクーラン数 C をほぼ一定に保つように決めている。

$$C = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\Delta x} \quad (13)$$

従って、水深が深いほど要素の寸法が大きくなっている。時間増分 Δt は0.25秒としている。各節点における水深は、第4節に述べた表面パッチを用いて求めている。なお、後に示す解析結果では複雑な渦構造が捉えられていることから、ここで作ったメッシュの解像度は、今回の計算条件においては十分に高いものである。

ると考えられる。

猪苗代湖は、最大水深が91.5 mの深い湖であるため、夏場は温度成層が発達する⁸⁾。そのため、二次元浅水長波方程式において導入される二次元平均流の近似が成立しない。それに対して、冬季は鉛直方向の混合が活発で二次元平均流の近似が成り立ち易い。そこで、本論文では冬場の条件を用いて計算を行うことにする。水深が約90 mのとき、波による変動の周期が約80秒以上であれば、波の波長が水深の25倍という二次元平均流近似の基準が満たされることを確認している。すなわち、猪苗代湖の水深は、二次元平均流近似の導入という観点から見れば、十分に浅いといえる。

北部の長瀬川と南部の舟津川から水が流入するものとし、それ以外の川からの流入はないものと仮定する。また、北西部の小石ヶ浜水門および北東部の安積疏水において水が流出するものとする。流出入量については観測データを基に与える^{4,28)}。風については、冬季の観測結果に基づき南南西よりの風が吹いているものと想定する²⁹⁾。入力した川の流出入量や風向風速は平均値であり、実際には時間軸方向に変動している。し

かし、ここでは、これらの値は一定であると仮定している。特に風向風速については時間軸方向および空間的な変動が大きいため、この仮定は実際の現象とは異なる。流出入量、風速等はその他のパラメータと共に表1に示す。風を表す水面摩擦係数、マンニングの粗度係数、水平方向渦動粘性係数については、浅水長波方程式に基づく海洋や湖沼の解析において一般的に用いられている値としている。また、コリオリ力は考慮する。

計算モデルとして、(a)風を入力せずに川から流入する水による駆動力のみを考えるモデルと、(b)川からの流入と共に、風を入力させたモデルを考える。初期状態における流速は全ての点において0であると仮定して、実時間で30日分の計算を行う。計算ステップ数は10,368,000である。Pentium4 (2.6GHz) 4台を用いた並列計算による計算時間は、約8日である。なお、1台で計算したときの計算時間は約20日である。

図7から図9に風を入力しない場合の計算結果を示

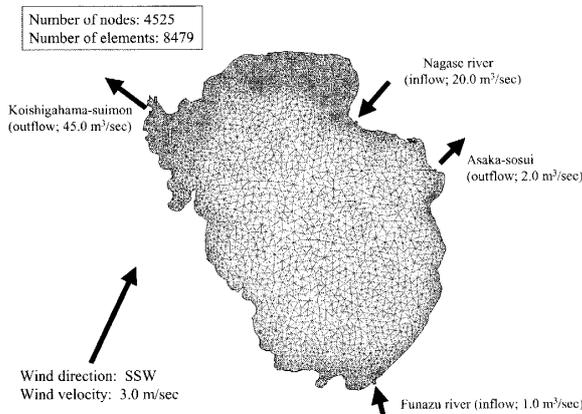


図6 浅水長波方程式に基づく解析のための二次元メッシュ

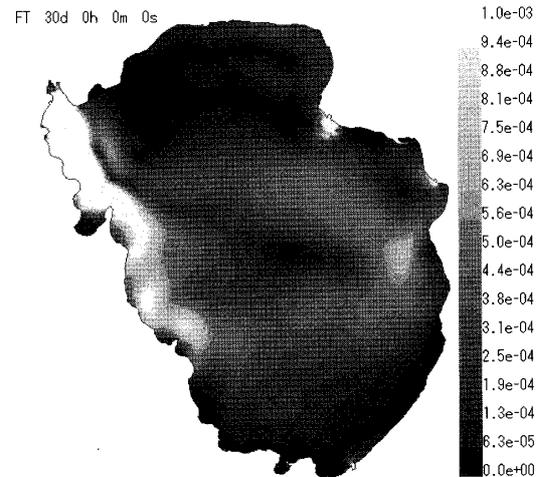


図7 30日目の流速絶対値の分布(風なし)

表1 浅水長波方程式に基づく解析のパラメータ

Time increment Δt	0.25 sec
Coriolis parameter f	$f = 2\omega \sin \phi$ ($\omega = 7.292 \times 10^{-5}$, $\phi = 37.4^\circ$)
Wind friction coefficient γ	0.001
Manning's roughness n	0.03 m ^{1/6}
Lateral eddy viscous coefficient	1.0 m ² /sec
Amount of inflow from Nagase river	20.0 m ³ /sec
Amount of inflow from Funazu river	1.0 m ³ /sec
Amount of outflow to Asakasosui	2.0 m ³ /sec
Amount of outflow to Koishigahama-suimon	45.0 m ³ /sec
Wind direction	SSW
Averaged wind velocity	3.0 m/sec

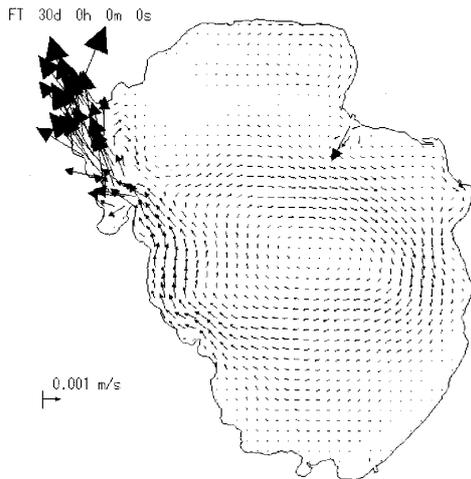


図8 30日目の流速ベクトル場(風なし)

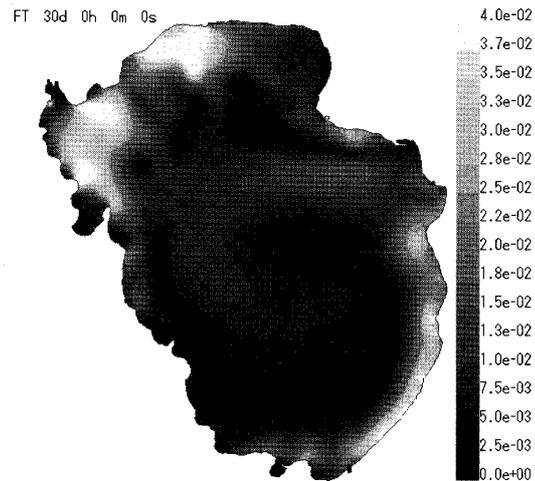


図10 30日目の流速絶対値の分布(風あり)

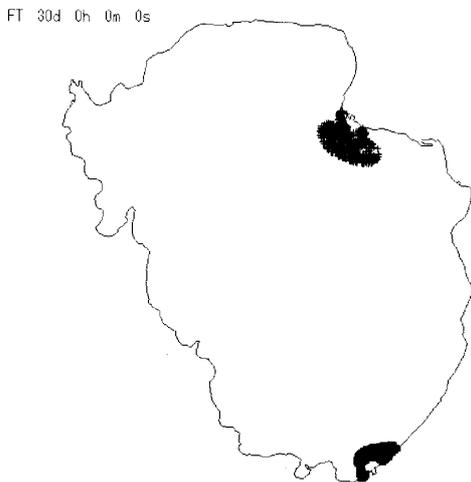


図9 流脈線に沿ったパーティクルトレース(30日目, 風なし)

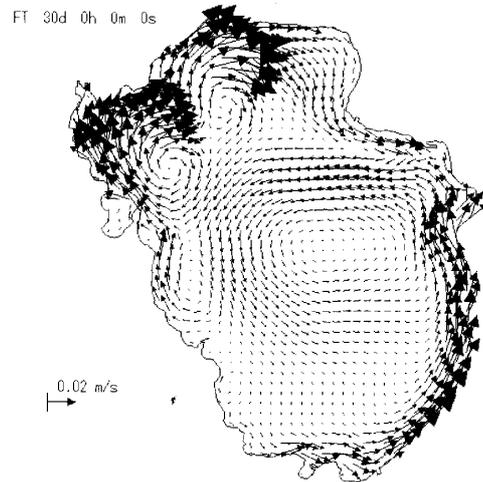


図11 30日目の流速ベクトル場(風あり)

す. 図7に30日目の流速の絶対値の分布を示す. 北西部の小石ヶ浜水門付近の速度が大きいことがわかる. 図8に30日目の流速ベクトル場を示す. 長瀬川と小石ヶ浜水門以外の場所の特徴としては, 湖の南部全域に時計回りの大きな渦が発生していることが挙げられる. 別途計算したコリオリ力なしの結果と比較すると, この渦はコリオリ力の影響で発生したと考えられる. 図9に, 流脈線に沿った30日間のパーティクルトレースを行った結果を示す. すなわち, 長瀬川と舟津川の河口付近に一定の時間間隔で発生させた仮想粒子(以下, パーティクルトレースの図では, 長瀬川からの粒子を+, 舟津川からの粒子を□で表す)を時間と共に変化する流れ場の上で30日間浮遊させている. 仮想粒子はあまり移動していない.

一方, 図10から図14には, 河川の流出入に加えて風を入力した場合の計算結果を示す. 図10に30日目の流速の絶対値の分布を示す. 分布の形状は図7に比べて複雑である. また, 速度の大きさも図7に比べると1桁程度大きい. 図11に30日目の流速ベクトル場を示す. 南南西よりの風が吹いていることによって湖岸に沿って北向きの強い流れが発生している. また北西部の浅瀬ではその補流として南向きの流れが現れている. 中央部の時計回りの大きい渦以外にも, その西および北に合計三個の時計回りの渦が発生していることがわかる. また, 北西部および南東部において湖岸線に沿った流れが発生している. 図12から図14に流脈線に沿ったパーティクルトレースを行ったときの10日目, 20日目, 30日目の様子をそれぞれ示す. 長瀬川の

FT 10d 3h 3m 20s

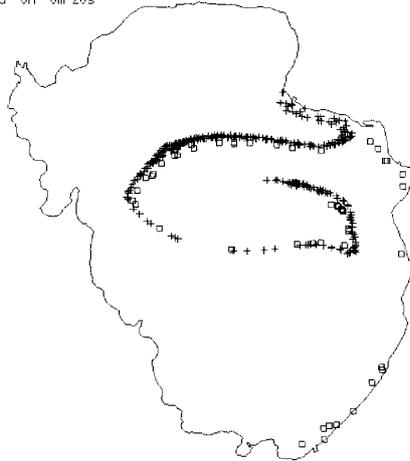


図12 流脈線に沿ったパーティクルトレース(10日目, 風あり)

FT 30d 0h 0m 0s

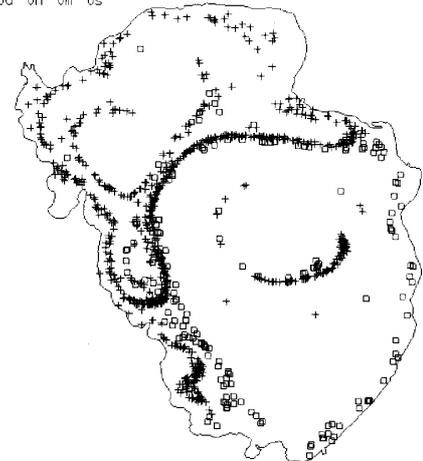


図14 流脈線に沿ったパーティクルトレース(30日目, 風あり)

FT 20d 2h 38m 20s

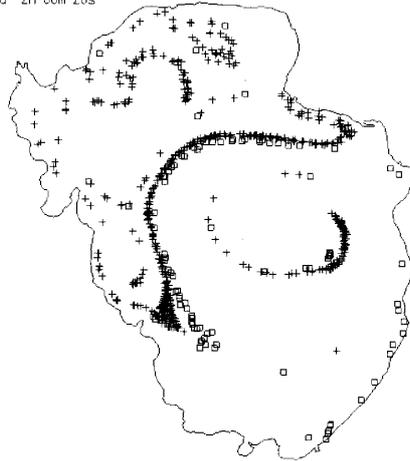


図13 流脈線に沿ったパーティクルトレース(20日目, 風あり)

河口付近に発生させた仮想粒子が湖の南東部を除く全域に移動していることがわかる。一方、舟津川の河口付近に発生させた仮想粒子は、湖の東の湖岸線に沿って北上していることがわかる。

以上の計算結果より、酸性の長瀬川から流入した水の移動には風の影響が大きく、河川の流入による慣性流の影響はそれと比較して1桁ほど小さいことが示唆される。また、水深の分布や複雑な湖岸線の形状も湖全体の流れに大きく影響しており、複雑な渦が発生する様子が計算結果として得られた。しかし、風向、風速の変動を考慮していないため、ここで得られた結果は、実際の現象と比較できるものではない。また、本解析では水のpHの違いによる拡散を考慮していない。

6. 三次元非圧縮性粘性流体解析に関する検討

前述のように、猪苗代湖は深い湖であるため、垂直方向の水の流れを考慮しなければ説明できない現象がある。そのため、深さ方向に流れを平均する浅水長波方程式に基づく解析には限界がある。そこで、本節では四面体一次(P1-P1)要素を用いた有限要素法に基づく三次元非圧縮性粘性流体解析について検討する。

最初にメッシュの規模について検討する。猪苗代湖は湖沼としては深い湖に分類されるものの、幾何学的には非常に偏平な形状である。アスペクト比の良い四面体要素により深さ方向に十分細かい分割をするには、非常に多くの要素が必要となる。例えば、実際の10倍の水深(最大水深は約910 m)の表面パッチを生成し、深さ方向の要素分割数が、最も深いところで約20となるようにメッシュの寸法を調整する。この表面パッチから生成した四面体メッシュの要素数は2,640,340個、節点数は471,937個(約189万自由度)となる。深さ方向の分解能は同程度にしたまま水深を実際の値にすると、メッシュの規模は更に増大する。また、水深が浅い部分における深さ方向の要素数も更に増やす必要がある。

次に、生成したメッシュによる三次元非圧縮性粘性流体解析の計算時間について検討する。流入する川(長瀬川, 流入速度1.0 m/sec)と流出する川(小石ヶ浜水門)をひとつずつ設定した場合の計算を行う。流出する川はトラクションフリー境界とする。動粘性係数としては空気に相当する値を用いる。このとき、レイノル

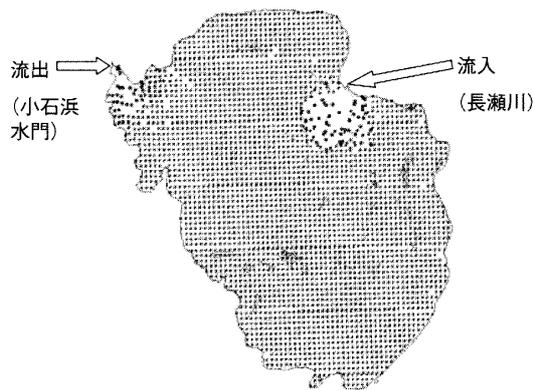


図15 三次元非圧縮性粘性流体解析の結果(流線に沿ったパーティクルトレース)

ズ数は 1.0×10^6 から 5.0×10^6 程度となる。ソルバーとしては、ADVENTURE システムに含まれる ADVENTURE_Fluid モジュールを用いる。このソルバーは SUPG 法と PSPG 法による安定化を行っている。時間方向の離散化には、Crank-Nicolson 法を用いており、各時間ステップにおいて流速場と圧力場を同時に陰的に解いている。線形ソルバーとしては、Bi-CGSTAB 法、Bi-CGSTAB2 法、GPBi-CG 法および GMRES(m) 法が用意されており、今回は GPBi-CG 法を使う。日本大学工学部環境保全・共生共同研究センターに設置されている PC クラスタ (Intel Xeon 2.4GHz, Memory 2GB の PC16 台を Myrinet 2000 により接続) の全ノードをほぼ占有して 5000 時間ステップ分の並列計算を行ったところ、計算時間は 10 日と約 20.5 時間となった。図15に5000時間ステップにおける流線に沿ったパーティクルトレースの結果を示す。

以上のことから、湖沼の三次元非圧縮性粘性流体解析を今回使用した規模の PC クラスタで行うためには、四面体要素分割における適切な粗密制御や Newton-Raphson 法の導入による移流項の精度向上等、何らかの付加的な技法の導入が必要であるといえる。

7. おわりに

猪苗代湖の水環境変動予測シミュレーションを行うことを目標として、移動最小二乗法を用いて、地形図から湖の詳細な表面パッチや四面体メッシュを生成する手法を新しく開発した。これにより生成した表面パッチを水深データとして用いて、浅水長波方程式に基づく解析コードにより、温度成層が発達していない冬場における河川流および吹送流のシミュレーション

を行った。川の流出入量、風向、風速は観測結果に基づき与えた。ただし、これらの時間的および空間的な変動については考慮していない。解析条件には現実と異なる仮定が含まれているものの、計算結果では酸性の長瀬川から流入した水が、湖の中に拡がっていく様子が捉えられており、より現実的な解析条件を与えれば、観測結果と比較できるような結果が得られると考えられる。また、本論文における解析結果からも、酸性の長瀬川から流入した水の移動には風の影響が大きく、河川の流入による慣性流の影響はそれと比較して 1 桁ほど小さいことが示唆される。最後に、三次元非圧縮性粘性流体解析コード (ADVENTURE_Fluid) による直接的な三次元解析を行うために必要なメッシュの規模と計算時間について検討し、河川流の計算結果を示した。今後は、水温の影響、河川の流入量や風の変動、あるいは、汚染物質の流入等の条件を考慮したより高精度のシミュレーションを行い、観測結果との比較検討を進めたい。

謝辞

本研究の一部は文部科学省学術フロンティア推進事業 (日本大学工学部) における成果である。また、本研究において使用したソフトウェアの一部は、ADVENTURE プロジェクトにおいて開発されたものである。猪苗代湖のメッシュ生成において、元日本大学工学部卒研究生の竹重佑美氏と白樫卓也氏の協力を得た。日本大学工学部土木工学科の長林久夫教授および藤田豊助教授には、猪苗代湖の研究に関する様々なアドバイスをいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 猪苗代・裏磐梯湖沼水環境保全対策推進協議会ホームページ, <http://www.ht-net21.ne.jp/~kosuikyoo/>
- 2) 福島県: 福島県生活環境部環境保全領域 水環境グループホームページ, <http://www.pref.fukushima.jp/kankyoo/mizu/>
- 3) 長林, 藤田, 斉藤, 瀬尾: 猪苗代湖における pH の機構に関する一検討, 日大生産工学部第32回学術講演会, 79/82 (1999)
- 4) 山田, 長林: 長瀬川下流域の pH に影響を及ぼす各種イオン負荷特性の影響, 平成 16 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 146/147 (2005)
- 5) 藤田, 田中, 芦澤, 大岩, 岡野, 平石, 中川, 野沢, 戸塚, 山路, 多久和, 沢本: 猪苗代湖の長瀬川河口水域における流動と水質観測, 東北地域災害科学研究, **37**, 99/104 (2001)
- 6) 藤田, 田中, 長岐: 猪苗代湖の北部水域における流動現象の観測, 東北地域災害科学研究, **40**, 163/168 (2004)
- 7) 田中, 藤田, 岡島: 安積疎水取水口における土砂堆積と

- 周辺湖浜の漂砂環境との関連, 自然災害科学, **22**-4, 455/465 (2004)
- 8) 藤田, 田中, 戸塚, 山路, 愛川, 澤本: 猪苗代湖における水温変動の観測とその可視化, 可視化情報学会論文集, **22**-8, 64/70 (2002)
 - 9) 池永, 向山, 大島, 吉本, 山田: 網走湖における青潮発生に関する現地観測と数値解析の比較, 土木学会論文集, 775, 11/27 (2004)
 - 10) 平野, 文屋, 吉村: 閉鎖性水域における干汐渦の機能に着目した生態系・潮流結合シミュレーション, 日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, No 03-26, 45/46 (2003)
 - 11) 金子: Helmholtz型水位方程式を用いた3次元有限要素海洋モデル“ECO-FEM”, 日本計算工学会講演論文集, **8**-2, 527/530 (2003)
 - 12) 中山, 森下, 岡田: 有限要素 CIP-m スキームを用いた流況予測シミュレーション, 計算工学講演会論文集, **8**-2, 531/534 (2003)
 - 13) Y. Fujita and M. Sasaki: Flow Characteristics and Water Quality Change in Lake Inawashiro, Proc. Of the 12th Congress of the APD-IAHR, 1381-1390 (2000)
 - 14) ADVENTURE プロジェクトホームページ, <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>
 - 15) ADVENTURE_Fluid マニュアル, <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/download/manual/AdvFluid-0.41b-manual-jp.pdf>
 - 16) 宮村, 中林, 河合, 吉村: ADVENTURE システムによる猪苗代湖の流体シミュレーション, 計算工学講演会論文集, **9**-2, 805/808 (2004)
 - 17) T. Belytschko, Y. Lu and L. Gu: Element-Free Galerkin Methods, International Journal for Numerical Methods in Engineering, **37**, 229/256 (1994)
 - 18) S. Bunya, S. Yoshimura and J. J. Westerink: Quasi-bubble finite element formulation for the shallow water equations with discontinuous boundary implementation, International Conference on Computational Methods (2004)
 - 19) S. Bunya, J. J. Westerink and S. Yoshimura: Discontinuous boundary implementation for the shallow water equations, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **47**, 1451/1468 (2005)
 - 20) 文屋, 吉村: 擬似気泡関数近似による浅水長波方程式のための有限要素モデル, 第17回日本機械学会計算力学講演会講演論文集, 389/390 (2004)
 - 21) 文屋, 吉村: Quasi-bubble要素を用いた混合型有限要素法による潮流計算, 日本計算工学会論文集 (投稿中)
 - 22) 福島県: 猪苗代湖総合管理計画(パンフレット), 福島県喜多方建設事務所
 - 23) 河合, 吉村, 古川: ADVENTUREにおける解析およびパラメトリックスタディの自動化, 日本計算工学会講演論文集, **7**-1, 207/210 (2002)
 - 24) 国土地理院発行の2万5千分の1地形図(「猪苗代」, 「原」他計6枚)
 - 25) 株式会社アライドエンジニアリング: ADVENTURE Cluster ホームページ, <http://www.alde.co.jp>
 - 26) 日本数値流体力学有限要素法研究委員会編: 有限要素法による流れのシミュレーション, シュプリンガー・フェアラーク東京, 191/195 (1998)
 - 27) P. Mewis and K.-P. Holz: A quasi bubble-function approach for shallow water waves, Advances in Hydro-Science and Engineering, **1**, 768/774 (1993)
 - 28) 福島県管理河川流量年報, 福島県土木部河川課 (1979-1993)
 - 29) 福島県気象月報, 日本気象協会福島県支部, 2月号, 12月号 (2003)