

移動境界を有する浅水長波流れ解析のための バックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築手法

A Mesh Re-Generation Technique Based on Background Mesh
for Shallow Water Flows with Moving Boundaries

高瀬慎介*・田中聖三**・檜山和男***

Shinsuke TAKASE, Seizo TANAKA and Kazuo KASHIYAMA

*正会員 修士(工学) (株) 計算力学研究センター 技術開発部 (〒142-0041 東京都品川区戸越1-7-1 戸越NIビル)

**正会員 博士(工学) 中央大学助教 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

***正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

This paper presents a mesh re-generation technique based on background mesh for shallow water flows with moving boundaries. The stabilized space-time finite element method based on GLS (Galerkin Least Square) method is introduced for both space and time discretization to compute the moving boundary problems in shallow water flows, accurately. In order to improve the robustness of computation and the consideration of accurate landform the re-generation technique using a back-ground mesh is introduced. The present method is applied to several wave run-up problems. The efficiency of the present method is shown by numerical results.

Key Words : *Shallow Water Flows, Space-Time Finite Element Method, Moving Boundaries, mesh re-generation technique*

1. はじめに

近年、津波、高潮、洪水などによる浸水災害が多発している。これらの浸水災害は、人間の生命・財産に直接的に影響を与えるため、時系列の浸水の範囲を予測することは工学上重要である。浸水被害の予測に関する研究は、かつては模型実験が主流であったが、近年では計算機性能および計算技術の進歩、さらには高精度な地形および住宅に関する数値地図の整備・普及により、数値シミュレーションによる方法が主流になりつつある。

数値シミュレーション手法に関する既往の研究では、支配方程式には一般に移動境界を考慮した浅水長波方程式が用いられている。また、流体運動の記述および水際線の取り扱い手法は、固定メッシュを用いて水際線を間接的に表現する Euler 的手法^{1)~8)}と移動メッシュを用いて水際線を直接的に表現する Lagrange 的手法^{9)~12)}の2つに大きく分類されている。Euler 的手法では、差分法による直交格子を用いる手法が一般的であったが、近年では、非構造格子を用いて地形や構造物形状を正確に表現し解析を行うことができる有限要素法^{1)~4)}や有限体積法⁵⁾⁶⁾による解析が数多く行われている。これらの手法では、解析領域全体に対してあらかじめメッシュを生成して解析を行うため、複雑な地形に対しても比較的容易に適用できる長所がある。しかし、間接的に水際線を表現するため、水際位置の正確さは、メッシュサイズに依存し、水際線位置およびその周辺の物

理量の計算精度については課題がある。

一方、Lagrange 的手法では、水粒子を追跡しそれに合わせて要素を変形させる手法⁹⁾¹⁰⁾、領域内部の要素や節点は移動させずに移動境界上で要素を増やしていく手法¹¹⁾や、移動境界に合わせて要素を変形させ、水位変動量を基準にメッシュの細分化を行う手法¹²⁾などが提案されている。筆者らも Space-Time 有限要素法を用いた Lagrange 的手法を提案し¹²⁾、Euler 的手法に比べて比較的粗いメッシュでも水際線位置および物理量を精度よく求めることができることを示した。しかし、メッシュを時々刻々と移動させて解析を行うため、水域の分離や結合などが生じた場合、メッシュが破綻し計算が困難になったり、地形形状の情報を事前に得ることが困難なため地形の正確な表現が難しいといった、ロバスト性と適用性に問題点があった。

そこで、本論文では、上記の問題点を解決する Lagrange 手法に基づく手法の構築を行うものである。具体的には、メッシュの破綻の回避によるロバスト性の向上を実現するため、バックグラウンドメッシュを用いたメッシュ再構築手法¹⁶⁾を導入する。しかし、この手法は、自由表面流れに対して提案されたため、浅水長波流れ解析で重要な地形および地性線を正確に考慮することが困難である。そこで、本論文では、バックグラウンドメッシュに微地形の情報を付加することにより、地形形状を正確に考慮してメッシュの再構築ができるように手法の拡張を行った。この手法の導入により、水域の結合と分離など複雑な挙動が計算可能にな

るとともに、地形形状を正確に考慮したメッシュ再構築が期待できる。なお、離散化手法としては、時間精度が3次精度¹³⁾となるSpace-Time有限要素法を用いた。本手法の妥当性および有効性を検討するため、数値解析例として、波の遡上問題、障害物のある波の遡上問題を取り上げ、理論解やEuler的手法による計算結果と比較を行った。

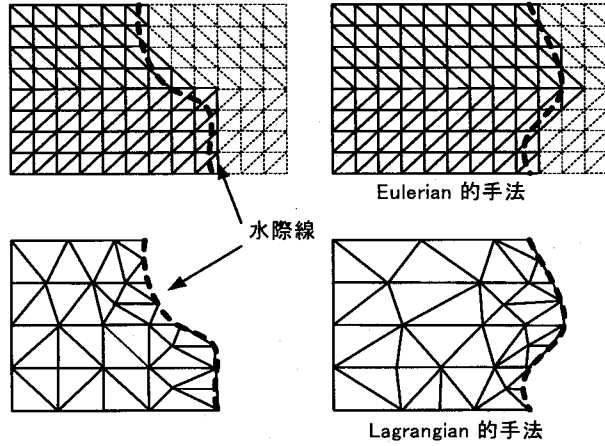


図-1 移動境界処理方法の分類

2. 数値解析手法

2.1 支配方程式

浅水長波流れの支配方程式は、非圧縮粘性流体の基礎方程式であるNavier-Stokes方程式を、浅水長波の仮定に基づき鉛直方向に平均化した浅水長波方程式で表現される。支配方程式として、保存型の浅水長波方程式を用いると、以下のようになる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) - \mathbf{R} = 0, \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{U}$ は保存変数であり、次式のように定義される。

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ここで、 h は全水深、 u および v はそれぞれ、平均流速の各方向成分を示す。また、 $\mathbf{A}_i$ と $\mathbf{K}_{ij}$ はそれぞれ移流項と拡散項のマトリックスであり、次式のようになる。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c^2 - u^2 & u & 0 \\ -uv & v & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -uv & 0 & u \\ c^2 - v^2 & 0 & v \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{11} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -2u & 2 & 0 \\ -v & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{12} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -u & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_{21} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -v & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_{22} = \nu \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -u & 1 & 0 \\ -2v & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

ここで、 $c = \sqrt{gh}$ は波速、 ν は渦動粘性係数であり、以下のように定義される。

$$\nu = \frac{\kappa}{6} h u_*, \quad u_* = \frac{gn^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 n はマンニングの粗度係数、 κ はカルマン定数である。また、 $\mathbf{R}$ は圧力と底面摩擦に関する項であり、次式のようになる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{u_*}{h} uh \\ -gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{u_*}{h} vh \end{bmatrix}, \quad (4)$$

ここで、 z は底面の高度である。

2.2 Space-Time安定化有限要素法の定式化

Space-Time安定化有限要素法¹⁴⁾¹⁵⁾は、時間と空間の両方に対して有限要素法を適用する方法である。まず、図-2に示すように時間・空間領域を N 個の時間・空間要素 Q_n に分割する。ここで、 Q_n は時刻レベル t_n と t_{n+1} の間の時間・空間領域である。弱形式における積分は時間・空間領域 Q_n において行われる。時間・空間要素の補間関数は、時間・空間ともに1次の多項式を用いている。空間に対しては連続であるが、時間に対しては時刻レベルを横切つて不連続なものである。支配方程式(1)に対して、GLS (Galerkin / Least-Squares) 法に基づく安定化Space-Time法を適用すると以下の重み付き残差方程式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{Q_n} \mathbf{U}^* \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) dQ \\ & + \int_{\Omega_n} \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) dQ \\ & + \int_{\Omega_n} (\mathbf{U}^*)_n^+ \cdot ((\mathbf{U})_n^+ - (\mathbf{U})_n^-) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{Q_n^e} \tau \left[\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial t} + (\mathbf{A}_i)^T \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_j} \right) \right] \\ & \cdot \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{K}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) - \mathbf{R} \right] dQ \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{Q_n^e} \delta \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) dQ \\ & = \int_{\Omega_n} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{R} dQ + \int_{P_n} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{H} dP, \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{U}^*$ は保存変数に関する重み関数、 $\mathbf{H}$ はノイマン型の境界、 P_n は時間・空間要素の縦境界である。左辺第1項、第2項は通常のGalerkin項、第3項は時刻 $t = t_n$ における解の連続性を弱く要求するものである。第4、5項は安定化に寄与する項である。第4項は上流化による安定化項であるSUPG項、第5項は不連続面での数値不安定を回避する衝撃補足項である。 τ 、 δ は安定化パラメータである。詳細は文献¹²⁾¹⁷⁾を参照されたい。

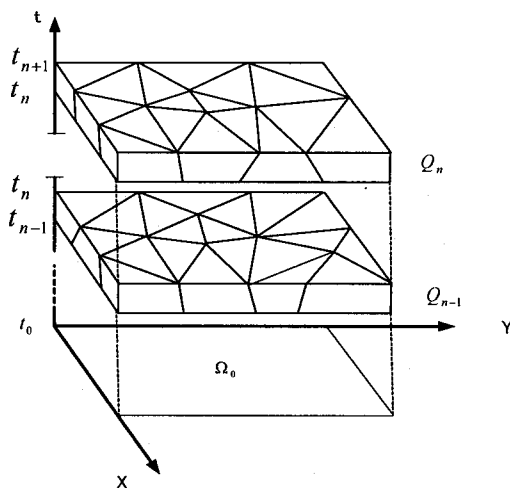


図-2 時間・空間要素 (Space-Time Slab)

2.3 解析アルゴリズム

本論文で用いている移動境界を考慮した浅水長波流れ解析手法の手順を示すと以下ようになる。

1. 初期形状に合わせて、有限要素分割、境界条件、計算条件を入力する。
2. 水際線形状の表現、物理量の再配置、水域の結合・分離処理によりメッシュの再構築を行う。
3. 保存形の浅水長波方程式の運動方程式と連続式より、流量と水深を求解する。
4. 水際線の境界処理を行い、線形弾性方程式を解き内部節点の移動量を求め、解析領域の更新を行う。
5. 水際線の移動量の収束判定を行い、移動量が収束するまで、3)に戻り、反復計算を繰り返す。
6. 時間進行を行い、時間ステップが終了するまで2)～5)を繰り返す。

なお、図-3に本手法のフローチャートを示す。

2.4 バックグラウンドメッシュを用いたメッシュ再構築手法

本論文で用いているメッシュ再構築手法¹⁶⁾は、図-4(a)に示すように、あらかじめ流体が移動する領域全体にバックグラウンドメッシュを設置する。ただし、従来のメッシュ再構築手法は、自由表面流れ解析に対して提案されているため、浅水長波流れ解析で重要となる地形および地性線を考慮することが困難である。この問題点を解決するため本論文では、地形形状を正確に表現したバックグラウンドメッシュを用いる。図-4(a)では、破線は谷線や尾根線などの地性線であり、これらの地性線は三角形要素の辺で表現されている。バックグラウンドメッシュを用いて、解析メッシュを再構築する手順は、以下のDefining StepとFitting Stepの2つの段階に分けて行われる。

(1) 水域形状の表現

1. Defining Step : Defining Stepでは、図-5(a)の太線で囲まれた時刻 n において得られた水域 Ω_n を用

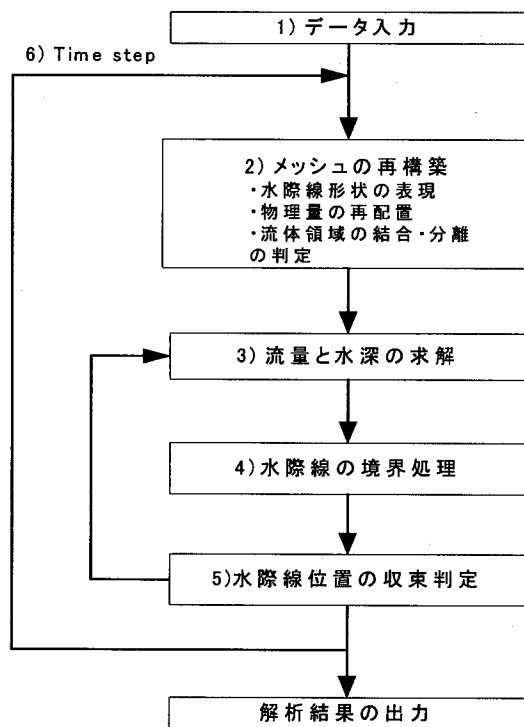


図-3 フローチャート

いて、まず、メッシュを再構築するための領域をバックグラウンドメッシュから定義する。その際、本解析においては、定義された計算領域 Ω_n^{def} は水域 Ω_n を包含するように定義する。

2. Fitting Step : 先のDefining Stepで定義された計算領域 Ω_n^{def} の境界は図-5(a)に示すようにバックグラウンドメッシュに依存した形状のため、再構築対象となる水域 Γ_n と一致していない。そこでFitting Stepでは、 Ω_n^{def} の境界を水域 Γ_n に適合させる。定義された計算領域 Ω_n^{def} において水際線に割り当てられた節点は、その節点からもっとも近い水域の水際線上に移動させる。この領域の移動量を境界条件とし、線形弾性方程式¹⁸⁾を解くことにより、内部節点の移動量(変位量)を求め、新たにメッシュが図-5(b)のように再構築される。このとき、地性線などを表わす内部節点に対しても固定境界条件処理を施し、地性線を壊すことなく内部節点を移動させる。なお、この処理を行うことにより解析に不適切な要素(要素面積が零以下になるような要素)が発生する場合は、その要素を定義領域から除外している。

(2) 物理量の再配置

これまでの手続きにより、新たな解析メッシュが図-5(b)のように再構築されたことになるが、再構築された解析領域 Ω_n^{RG} の各節点座標と水域 Ω_n の各節点座標は一致しておらず(図-6参照)、 Ω_n^{RG} の節点上には物理量(流量と水深)は配置されていない。そのため水域

Ω_n の節点の物理量 $d(X_n)$ を Ω_n^{RG} へ再配置する必要がある。この再配置には、図-7に示すように面積座標に基づくCIVA法で用いられる3次補間式により補間を行っている。

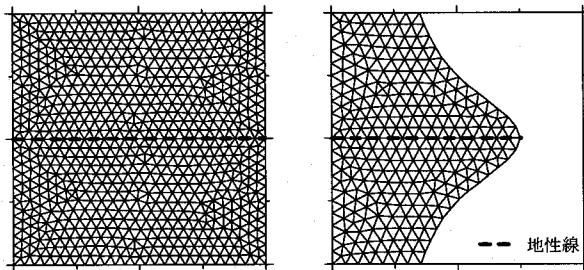
$$d(x_n^{RG}) = \left[\sum_{i=1}^3 a_i L_i + d \sum_{j,k=1}^3 b_{jk} [L_j^2 L_k + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3] \right] \Big|_{X_n} \quad (6)$$

$$a_i = d_i, \quad (7)$$

$$b_{jk} = d_j - d_k + (x_k - x_j) \cdot \nabla d_j, \quad (8)$$

ここで、 L は要素三角形に対して正規化された面積座標である。また、 d は3次補間の調整パラメータであり、 $d=0$ のときは1次、 $d=1$ のときは3次となる。また、物理量 d の空間微分ベクトル ∇d は、最小二乗法により求めている。以上の手続きにより、物理量を伴った解析メッシュが再構築されたこととなり、このメッシュを用いて時間進行を行っていく。

以上の手順により、時刻 $n+1$ で用いる有限要素分割が再構築される。メッシュ再構築手法にバックグラウンドメッシュを用いることの長所として、あらかじめバックグラウンドメッシュ上に解析対象となる地形の地性線（谷線や尾根線）や構造物等の幾何形状を考慮して作成することができ、再構築後のメッシュにそれらの形状を考慮することが可能となる。なお、メッシュ更新の演算量は、バックグラウンドメッシュの要素数と水域領域の要素数の比に依存するが、本論文での数値解析例では、10%~40%程度である。



(a) バックグラウンドメッシュ (b) 水域 Ω_n とメッシュ

図-4 バックグラウンドメッシュと水域

2.5 水域の結合・分離の取り扱い

浅水長波流れ解析を行う場合、水際線同士が接触し、水域が結合したり、水深が小さくなることにより水域が分離する流れを取り扱う必要がある。以下に浅水長波流れ解析でのバックグラウンドメッシュを用いた水域の結合と分離の方法について説明する。

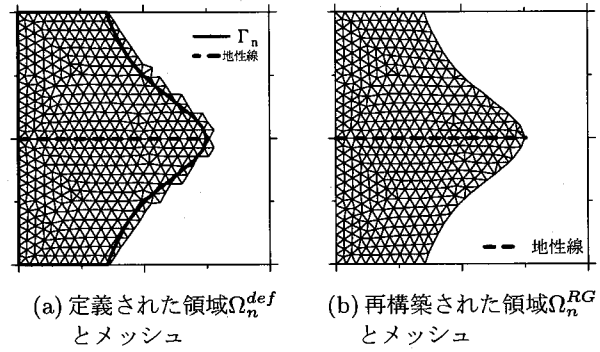


図-5 Defining step および Fitting step

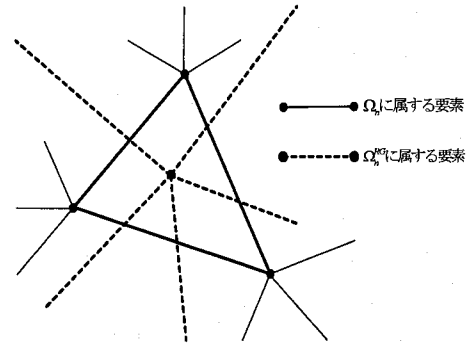


図-6 物理量補間の要素モデル

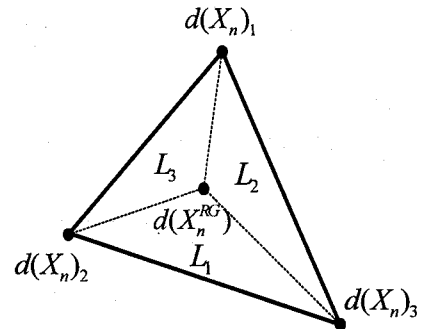


図-7 $d(X_n)$ から $d(X_n^{RG})$ への補間

(1) 水域の結合

水際線同士が接触する場合、2つの水域が1つの水域に結合する。この場合、図-8(a)の斜線部で示された2つの水域が結合する直前の場合を考える。この時のメッシュ再構築におけるDefining Stepでは、図-8(b)に示すような要素形状が得られる。この場合、水域は結合せず2つのままである。一方時刻が進み、図-8(c)に示すような水域の場合を考えると、Defining Stepでは、水域を包含するような要素が選択されるため、図-8(d)のような要素形状が得られる。この場合の要素形状は1つの水域となり、2つの水域が結合したことになる。

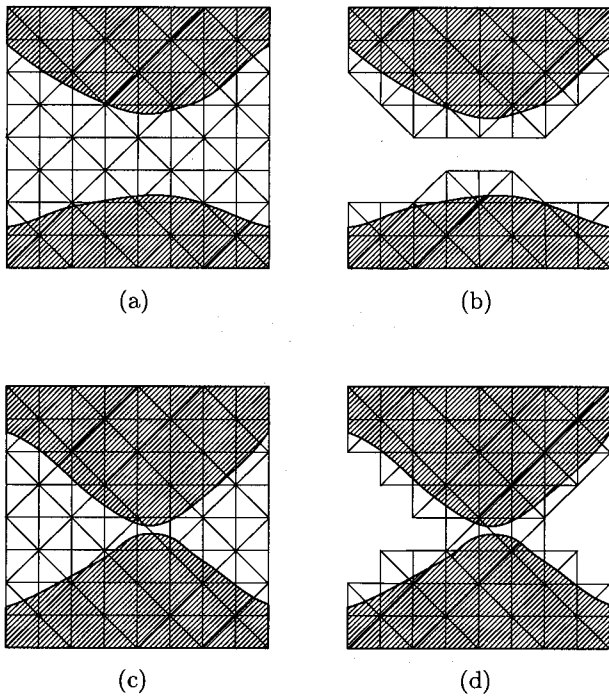


図-8 水域の結合

このように、本手法における水域の結合では、水際線の接触判定は、バックグラウンドメッシュの要素サイズに依存した形になっているが、特に、接触判定等の複雑なアルゴリズムを必要としないため、複雑な流れに対しても安定してメッシュの再構築を行うことができる。

(2) 水域の分離

浅水長波流れ解析では、地形の変化などにより水深が零に近い値になり、そのまま計算すると水深が零以下になり計算が破綻する。そのため、各要素のすべての節点が微小水深以下になった場合、その要素は計算領域より除外し（図-9(a)の斜線部の要素）；図-9(b)のように、新たな解析領域を構築する。この処理により、水域の分離が表現可能となる。本手法における水域の分離方法では、結合の場合と同様に解析に用いている要素サイズに依存する形になっている。なお、分離後の計算過程では、水際線の位置をLagrange的手法で解析を行っていく。

2.6 水際線の境界処理方法

本手法では、水際線をLagrange的に取り扱い、移動境界上の節点移動距離を求めた後に、内部領域の節点位置を求める。節点の移動量は、移動境界上の節点移動距離を境界値とした線形弾性方程式を解くことにより、内部節点の変位量を求め、その変位量を節点の移動量としてメッシュを更新する。水際線の移動境界処理を含む解析領域の更新アルゴリズムは以下のようになる。

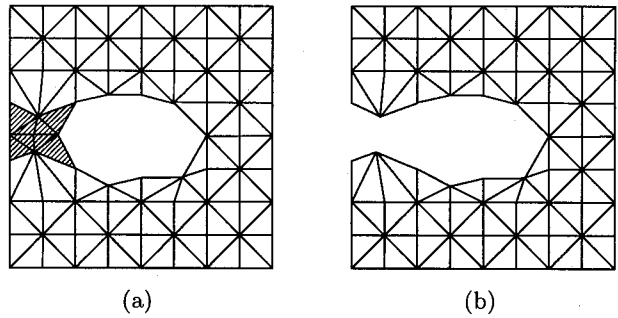


図-9 水域の分離

1. 時刻 t_{n+1} における水際線の位置 $X_{n+1} = x_n$ （時刻 t_n の位置）と仮定する。
2. Space-Time有限要素法によって解析を行う。その際、時刻 t_n での水際線境界上の水位を $H_n = 0$ として境界条件を与える。
3. 時刻 t_{n+1} の実流速を算定する。実流速の算定には最小二乗法に基づいた方法を適用する。
4. 3.で求めた実流速を用いて水際線の座標位置を求める。
5. 4.で求めた座標位置を領域境界の変位として線形弾性方程式を解くことにより、内部領域の節点移動量を求める。
6. 節点位置の収束判定を行い、収束していなければ、 X_{n+1} を時刻 t_{n+1} における水際線位置として、2.に戻り収束するまで計算を行う。

なお、内部の節点移動位置の求め方については、参考文献¹²⁾を参照されたい。

3. 数値解析例

3.1 遡上問題

本手法のメッシュ再構築手法の妥当性の検討を行うことを目的として、波の遡上問題を取り上げる。解析には、一様斜面として斜面勾配1:10のスロープを設置した。入射条件として周期:10[s]、初期水深:0.5[m]、振幅:0.05[m]を与え、微小時間増分量は、0.01[s]で解析を行った図-10に使用したバックグラウンドメッシュを示す。

解析結果として、図-11にGarrier-Greenspanの厳密解¹⁹⁾²⁰⁾、及び、Euler的手法を用いて解析を行った結果との比較を示す。なお、Euler的手法には、安定化有限要素法³⁾を用い、バックグラウンドメッシュと同じ最小メッシュ幅(0.2m)の有限要素を使用している。図より、本解析手法は、Euler的手法と比較して厳密解とよい一致を示していることがわかる。

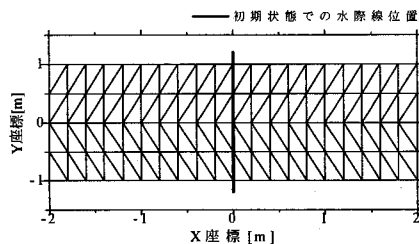


図-10 水際線近傍のバックグラウンドメッシュの拡大図

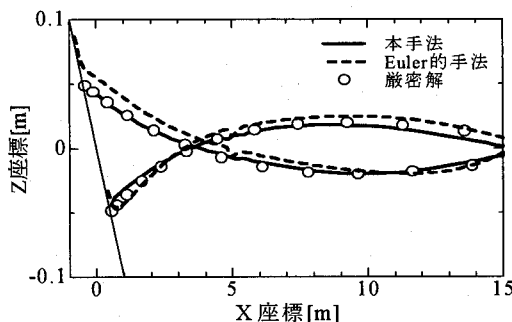


図-11 遡上問題の計算結果の比較

3.2 V字斜面の遡上問題

本解析手法の地性線の表現性を検討するため、V字斜面の遡上問題を取り上げる。図-12に解析モデルを示す。X軸方向に斜面勾配1:10のスロープに対してY軸方向にV字の斜面勾配1:20を与えた。入射波条件として、周期:10[s]、初期水深:0.5[m]、振幅:0.05[m]を与え、微小時間増分量は、0.01[s]で解析を行った。

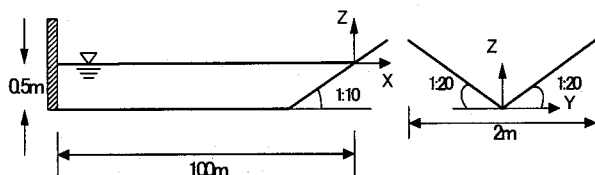


図-12 解析モデル図

解析結果として、10秒後における有限要素分割図を図-13に示す。図-13(上)は、バックグラウンドメッシュを使用してメッシュ再構築を行った場合の有限要素分割図、図-13(下)は、バックグラウンドメッシュを使用せずメッシュの再構築を行った場合の有限要素分割図である。この図より、バックグラウンドメッシュを用いてメッシュの再構築を行った場合、斜面のV字の地形を表現した有限要素分割が実現されていることがわかる。また、図-14に $x=0$ における地形形状の比較

を示す。バックグラウンドメッシュを使用せずメッシュの再構築を行った場合、地形形状を正確に表現できていないことがわかる。このことより、バックグラウンドメッシュを用いてメッシュの再構築を行うことにより、地形を正確に考慮することが可能になることがわかる。

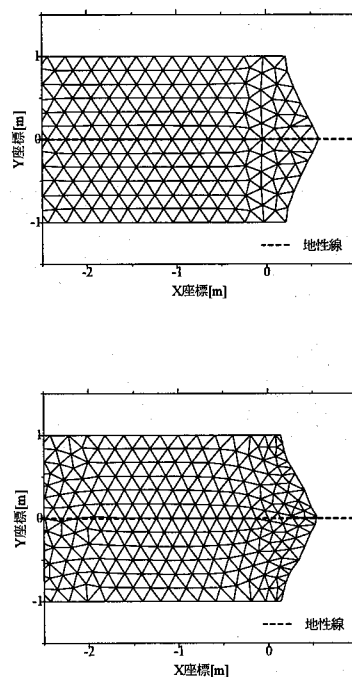


図-13 10秒後における有限要素分割図（上：バックグラウンドメッシュを使用した場合、下：使用しない場合）

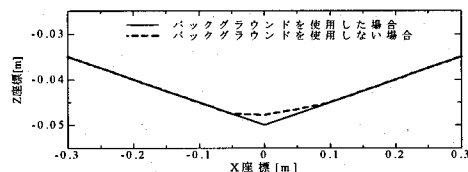


図-14 $x=0$ における地形形状の比較

3.3 障害物のある波の遡上問題

水際線の結合と分離を伴う問題に対する有効性の検討のため、障害物のある波の遡上問題を取り上げる。初期状態の有限要素分割図と地形の等高線図を図-15に示す。斜面勾配1:10のスロープに高さ0.5[m]の障害物($z(x,y) = \max[0.0, 0.5 \times ((x-1.5)^2 + y^2)]$)をおき、解析を行った。図-16に使用したバックグラウンドメッシュの障害物付近の拡大図を示す。入射波条件として、周期:20[s]、初期水深:1.0[m]、振幅:0.3[m]を与え、微小時間増分量0.01[s]で解析を行った。

数値解析結果として、15秒後、19秒後、20.5秒後、

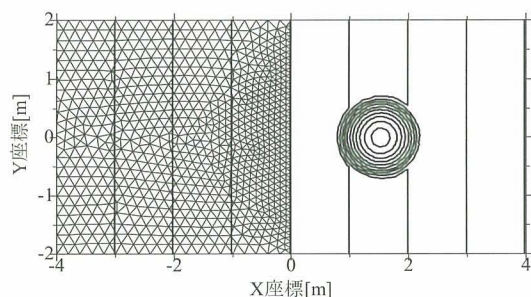


図-15 初期有限要素分割図と地形の等高線

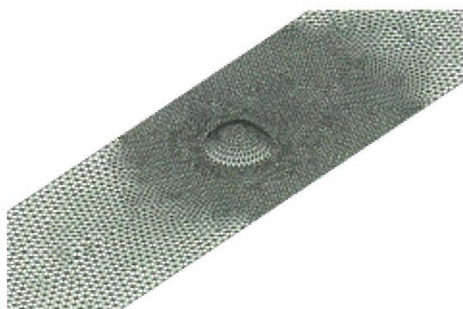


図-16 バックグラウンドメッシュ(障害物近傍)

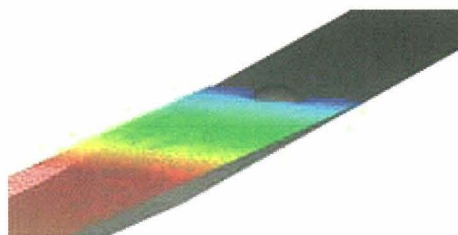
22秒後での水深分布図を図-17に、また、そのときの有限要素分割図を図-18に示す。両図より、バックグラウンドメッシュを用いた再構築手法により、水域の結合・分離を伴う流れもメッシュが破綻することなく、安定に解析が行われていることがわかる。このことより、水際線の結合・分離を有する問題における本解析手法の有効性が確認できた。

4. おわりに

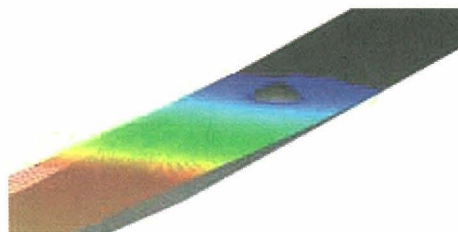
本論文では、移動境界を考慮した浅水長波流れ現象を高精度かつ安定に解析することが可能なLagrange手法に基づく数値解析手法の提案を行った。時間と空間に関する離散化手法としてGLS法に基づく安定化Space-Time有限要素法を用いた。計算のロバスト性と適用性を向上させるため、バックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築手法を導入した。本手法の妥当性および有効性を検討するため、本手法を波の遡上問題に適用して、理論解およびEuler的手法による計算結果との比較を行った。

その結果以下の結論を得た。

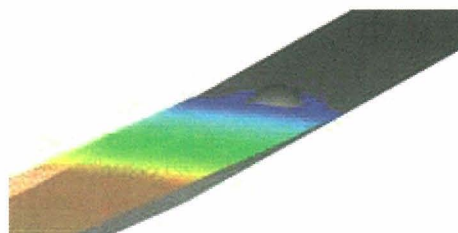
- 本手法による解析結果は、理論解と良好な一致を示すとともに、固定メッシュを用いたEuler的手法と比べて、水位分布および水際線位置を正確に捉えることができることが確認された。
- バックグラウンドメッシュに基づくメッシュ再構築



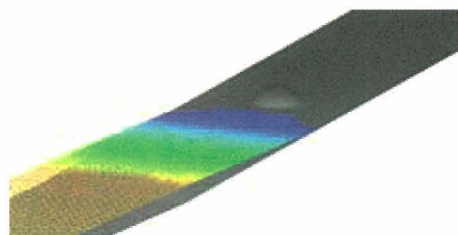
(a) 15 秒後



(b) 19 秒後



(c) 20.5 秒後



(d) 22 秒後

図-17 各時刻における水深分布図

手法を導入することにより、従来のLagrange的手法では取り扱うことが困難であった水域の結合や分離を伴う現象の解析も可能となった。また、バックグラウンドメッシュに微地形の情報を付加することにより、複雑な地形への適用も可能となった。

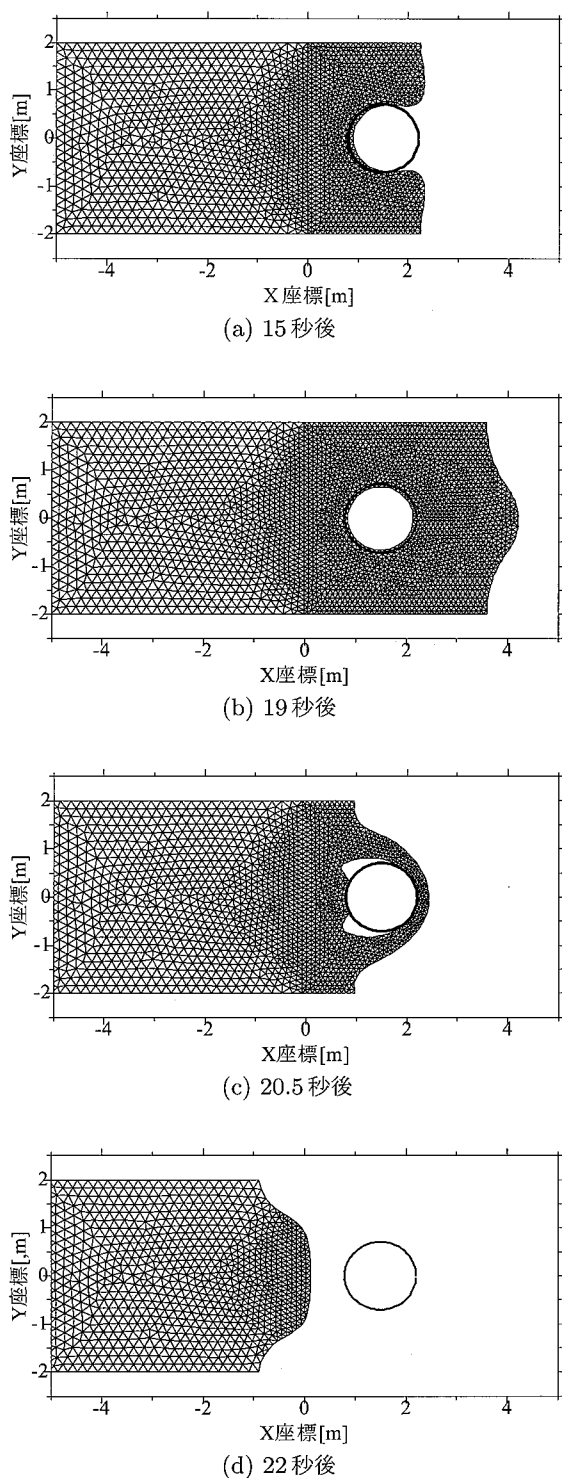


図-18 各時刻における有限要素分割図

今後は、本手法を実際問題の事例に適用してその有効性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Kawahara, M., Umetsu, T. : Finite element method for moving boundary problems in river flow, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **6**, pp.365-386, 1986.
- 2) 唐木田泰久, 樫山和男 : CIVA-安定化有限要素法による

- 移動境界を考慮した浅水長波流れ解析, 計算工学講演会論文集, 日本計算工学会, **10**, pp.305-308, 2005.
- 3) 小林義典, 樫山和男 : 津波による構造物に作用する流体力の安定化有限要素解析, 計算工学講演会論文集, 日本計算工学会, **10**, pp.299-302, 2005.
- 4) 松本純一, 梅津剛, 川原陸人 : 陰的有限要素法による浅水長波流れと河床変動解析, 応用力学論文集, 土木学会, **1**, pp.263-272, 1998.
- 5) Brufau, P., Vazquez-Cendon, M.E. and Garcia-Navarro, P. : A numerical model for the flooding and drying of irregular domains, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **39**, pp.247-275, 2002.
- 6) Mohammadian, A. and Le Roux, D.Y. : Simulation of shallow flow over variable topographies using unstructured grids, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **52**, pp.473-498, 2006.
- 7) Heniche, M., Secretan, Y., Boudreau, P. and Leclerc, M. : A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries, *Advances in Water Resources*, **23**, pp.360-371, 2000.
- 8) 登坂宜好, 矢川元基 共編 : 計算力学 [IV] 自由・移動境界問題の近似解析, 養賢堂, 1995.
- 9) 桜庭雅明, 樫山和男, 菅野諭 : 移動境界を考慮した Space-Time 有限要素法による浅水長波流れ解析, 応用力学論文集, 土木学会, **3**, pp.255-262, 2000.
- 10) Gopalakrishnan, T.C. and Tung, C.C. : Numerical analysis of moving boundary problem in coastal hydrodynamics, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **3**, pp.179-200, 1983.
- 11) Okamoto, T. and Kawahara, M. : Two-dimensional sloshing analysis by the arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **14**, pp.1219-1243, 1992.
- 12) 高瀬慎介, 田中聖三, 樫山和男 : 移動境界を考慮した浅水長波流れ解析のためのメッシュ細分化手法を用いた Space-Time 安定化有限要素法, 応用力学論文集, 土木学会, **9**, pp.169-176, 2006.
- 13) Donea, J. and Huerta, A. : Finite Element Methods for Flow Problems, Wiley, 2003.
- 14) Hughes, T.J.R. and Hulbert, G.M. : Space-Time finite element methods for electrodynamics, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **66**, pp.339-363, 1988.
- 15) Tezduyar, T.E., Behr, M. and Lino, J. : A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interface the deforming-spatial-domain/Space-Time procedure, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **94**, pp.339-351, 1993.
- 16) 田中聖三, 樫山和男 : 界面追跡法による自由表面流れ解析のためのメッシュ再構築手法, 応用力学論文集, 土木学会, **7**, pp.313-321, 2004.
- 17) Tezduyar, T.E. and Senga, M. : Stabilization and shock-capturing parameters in SUPG formulation of compressible flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **195**, pp.1621-1632, 2006.
- 18) Masud, A. and Hughes, T.J.R. : A space-time Galerkin / least-squares finite element formulation of the Navier-Stokes equations for moving domain problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **146**, pp.91-126, 1997.
- 19) 仲山高志, 水口優 : 斜面上の有限振幅重複波理論解の実用性と越波問題への適用, 中央大学理工学部紀要, 第 37 巻, pp.77-94, 1994.
- 20) Carrier, G.F. and Greenspan, H.P. : Water waves of finite amplitude on a sloping beach, *J. Fluid Mech.*, **4**, pp.97-109, 1958.

(2007 年 4 月 12 日 受付)