

# AMR 法を用いた Space-Time 有限要素法による 移動境界を有する浅水長波流れ解析

A Shallow Water Flow Analysis with Moving Boundaries  
Based on Space-Time Finite Element Method using Adaptive Mesh Refinement Method

高瀬慎介\* ・ 田中聖三\*\* ・ 樫山和男\*\*\*

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 第三技術部(〒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) University of Notre Dame Department of Civil Engineering and Geological Sciences  
(302 Cushing Hall of Engineering, Notre Dame, IN 46556, USA)

\*\*\*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 space-time stabilized finite element method for the shallow water flow considering moving boundary using the AMR (adaptive mesh refinement) method. The AMR method is introduced to the back-ground mesh in order to improve the numerical accuracy and to treat the geographical topography accurately. The stabilization method based on GLS (Galerin / least-squares) method is employed. The present method is applied to several numerical examples. The efficiency of the present method is shown by numerical results.

**Key Words :** *Shallow Water Flows, Space-Time Finite Element Method, Mesh Re-Generation Technique, Adaptive Remeshing Method*

## 1. はじめに

近年、津波、高潮、洪水氾濫などによる浸水災害が、数多く発生している。これらの浸水災害に対する防災計画や防災対策を講じるためには、想定されるシナリオに対して時々刻々と変化する浸水範囲を予測することが重要となる<sup>1)</sup>。近年、浸水被害の予測に関する検討には、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手法が多く用いられている。

浸水災害に関する数値シミュレーションでは、一般に移動境界を考慮した浅水長波方程式が支配方程式として用いられている。そして、それらは、移動境界の取り扱い手法とメッシュの再構築手法の違いにより分類することができる。移動境界の取り扱い手法に関しては、大きく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<sup>2)-6)</sup> 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<sup>7)-11)</sup> の 2 つの手法に分類できる。両者はそれぞれに特長があり、Lagrange 的手法は、水際線の水粒子を追跡してその動きに応じてメッシュの再構築を行うため、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られることができる。一方、Euler 的手法は固定メッシュを用いるため、メッシュの破綻などが生じず Lagrange 的手法に比べてロバスト性に富む特長がある。また、メッシュの再構築手法に着目すると、水面変化の激しい領域に対して要素の細分化を行う方法、

節点を動かし粗密付けを行う方法<sup>13)14)</sup>、部分的に要素の再構築を行う方法<sup>10)15)</sup>などが提案されている。

筆者らは、既往の研究において比較的粗いメッシュで高精度な解が得られる Lagrange 的手法に着目して、メッシュ細分化手法を用いた解析手法の提案<sup>10)</sup>を行っている。この手法では、水面形状の表現、水際線位置は精度よく解析が行えるが、メッシュを時々刻々と移動させて解析を行うため、移動後の地形形状の情報を取得することが困難であった。そのため、解析で重要となる谷線や尾根線などの地形線を考慮することが難しく複雑地形の適用性に難があった。また、水域の分離や結合などが生じる問題には、メッシュが破綻し解析が困難になるなどの問題があり、適用性とロバスト性に問題点があった。これらの問題に対して筆者らは、メッシュの破綻を回避するため、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<sup>18)</sup>を適用した Space-Time 安定化有限要素法解析手法<sup>11)</sup>を提案した。しかし、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では、あらかじめ流体が移動する領域全体に対してほぼ均一なバックグラウンドメッシュを設置する必要があるため、時々刻々変化する水際線位置や水位の変動などの現象に応じてメッシュを局所的に再構築することが困難という問題点があった。

そこで、本論文では、上記の問題点を解決するため、バックグラウンドメッシュに AMR (Adaptive Mesh Refinement: 適合格子細分化) 法を適用した Space-Time 安定化有限要素法解析手法の構築を行った。従来の浅水長

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では、解析に必要な解像度をあらかじめバックグラウンドメッシュ全体に反映する必要があった。提案する手法では、解析メッシュに対して要素の細分化を行い、その細分化情報をバックグラウンドメッシュに反映し、バックグラウンドメッシュに対して要素の細分化を行っている。この方法により、現象に応じて局所的に粗密のついたメッシュ再構築が行えるようになるとともに、バックグラウンドメッシュに対して細分化を行うため、微地形を考慮したメッシュを作成することができ、計算精度のさらなる向上が期待できる。なお、離散化手法としては、時間精度が3次精度<sup>12)</sup>となるSpace-Time安定化有限要素法を用いた。

本手法の有効性および適用性を検討するため、数値解析例として、衝撃波問題、障害物を有する波の遡上問題、津波の遡上問題を取り上げ、理論解や実験結果との比較を行った。

## 2. 数値解析手法

### 2.1 支配方程式

浅水長波方程式は、非圧縮粘性流体の支配方程式である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することにより得られる。いま、支配方程式として、以下に示す保存型の浅水長波方程式を用いる。

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

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(図-1参照)。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、 $\nu$ は渦動粘性係数であり、以下のように定義される。

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

ここで、 $u_*$ 、 $n$ 、 $\kappa$ は摩擦速度、マンニングの粗度係数、カルマン定数である。また、 $\mathbf{R}$ は圧力と底面摩擦に関す

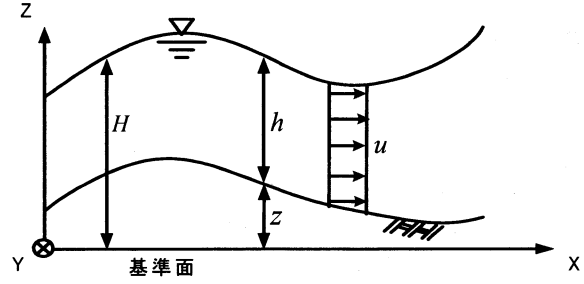


図-1 座標系

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、 $z$ は基準面からの底面の高さである。

支配方程式(1)の離散化に対して、GLS (Galerkin / Least-Squares) 法に基づく安定化Space-Time法を適用する。なお、離散化の詳細は文献<sup>10)</sup>を参照されたい。

### 2.2 解析アルゴリズム

本論文で用いているAMR法を適用したメッシュ再構築手法による浅水長波流れ解析手法のフローチャートを図-2に示す。本解析手法は、要素の細分化、メッシュの再構築、流量・水深・水際線位置の計算と3つのパートにより構成されている。

はじめに、メッシュ再構築に必要なバックグラウンドメッシュに対して、水際線位置、水位の変動量を用いてAMR法を適用する。この処理により、従来のバックグラウンドメッシュでは、難しかった現象に応じた局所的な要素の粗密付けが行えるようになる。バックグラウンドメッシュに対するAMR法の適用方法については、次節で詳しく述べる。

次に、AMR法を適用したバックグラウンドメッシュを用いて解析メッシュの再構築を行う。新たに再構築された解析メッシュは、物理量をもっていないため、作成された解析メッシュに対して物理量の再配置を行う。

そして、再構築された解析メッシュを用いて、Space-Time法により解析を行う。このとき、水際線の移動はLagrange的に取り扱い、計算によって得られた水際線の流速を用いて水際線位置を決定する。その際、移動後の水際線上の水深は0とし、次の時間ステップの解析を行っている。また、解析によって求められた移動境界形状を用いて、内部領域の節点位置を求めている。なお、水際線の移動境界処理方法については、文献<sup>10)</sup>に詳しい。また、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って水域が分離するなどの境界条件処理では、バックグラウンドメッシュより解析領域を再構築するときに、その境界条件処理

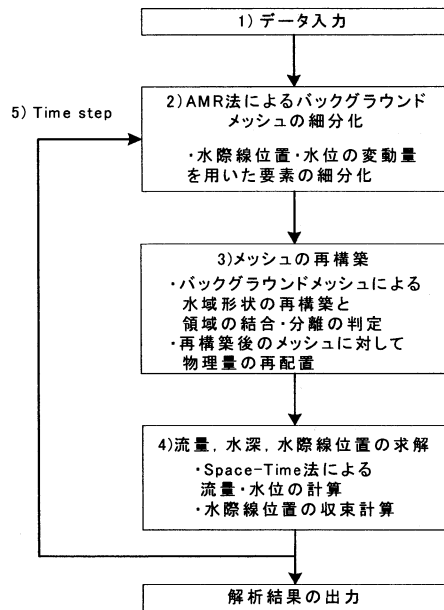


図-2 フローチャート

を施し解析を行っている。詳しくは、文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

### 2.3 AMR法を適用したメッシュ再構築手法

従来の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<sup>11)</sup>では、図-3(a)に示すようなV字スロープを有する遡上現象の解析を行う場合、解析に必要な解像度をもつバックグラウンドメッシュをあらかじめ解析領域全体に反映し(図-3(b))、これを基準にして各時刻における水際線位置を用いることにより、解析メッシュを再構築する(図-3(c))。そのため、解析メッシュの解像度は、初期のバックグラウンドメッシュに依存するものとなる。従って、メッシュ再構築の際に、現象に応じた局所的な要素の細分化を行おうとする場合には、バックグラウンドメッシュに対して細分化を行う必要がある。しかし、バックグラウンドメッシュは、地形形状は考慮されているが、物理量(流量や水深)に関する値は持っていないため、直接バックグラウンドメッシュに対して、現象に応じて局所的に細分化することができなかった。そこで、本論文では、解析で用いている要素とバックグラウンドメッシュの要素を対応させ、バックグラウンドメッシュの要素に対して細分化を行った。以下に、図-3(a)と同様にV字スロープを有する遡上現象を解析する場合(図-4(a))を例に説明する。

図-4(b)に示す遡上域でのn-stepでの解析メッシュを用いてバックグラウンドメッシュの細分化を行う場合について考える。細分化は水位量に着目し、計算によって得られた水位を用いて、各要素での水位の2階微分値を計算する。そして、式(5)を満足する要素に対して、要素の細分化を行う。この考えは、1次要素を用いた場

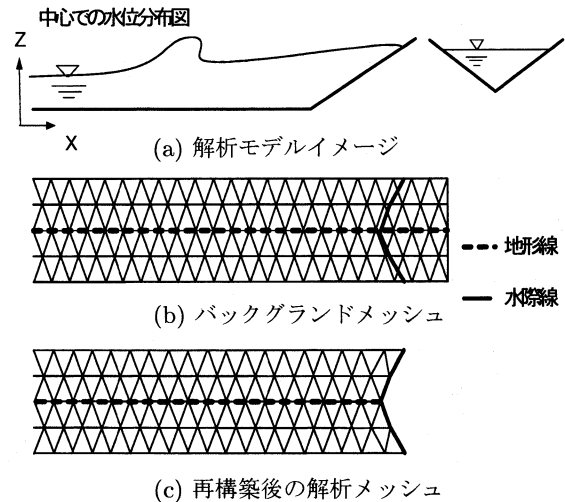


図-3 従来のバックグラウンドメッシュによるメッシュ再構築手法

合の補間誤差が水位の2階微分値に依存することに基づいている。

$$\|\nabla^2 H\| \geq H_a \quad (5)$$

ここで、 $H$ は基準面からの水位の高さ、 $H_a$ は求められた2階微分値の最大値と最小値の平均値であり、以下のように定義される。

$$H = h + z$$

$$H_a = \frac{\|\nabla^2 H\|_{\max} + \|\nabla^2 H\|_{\min}}{2}$$

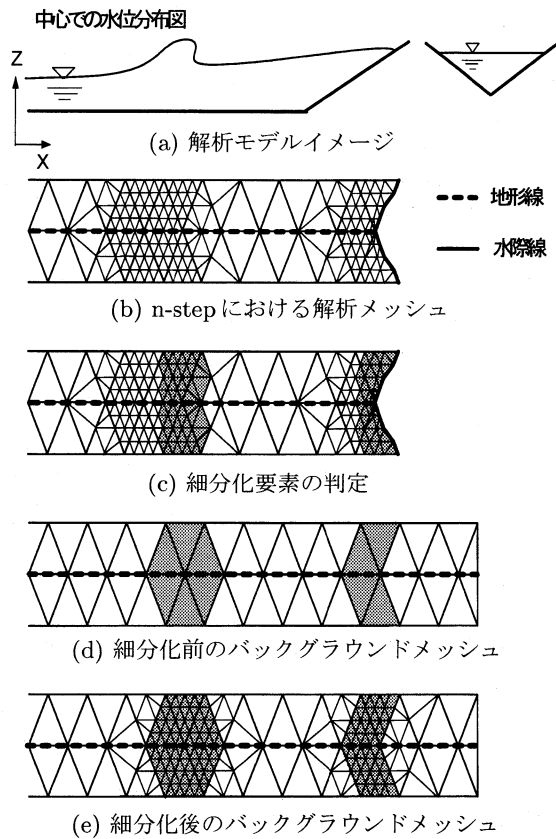
なお、水位の2階微分値を評価する際には、まず各要素で評価される水位の1階微分値を用いて、節点における1階微分値を次式のように最小二乗法により求めている。

$$\int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot H_{Least} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \nabla H d\Omega \quad (6)$$

$$\nabla^2 H = \nabla H_{Least} \quad (7)$$

ここで、 $H_{Least}$ は最小二乗法によって求められた各節点での水位の1階微分値である。そして、この節点での水位の1階微分値を用いて各要素の2階微分値を評価している。要素の細分化に際しては、水際線に隣接する要素も細分化要素として取り扱う。以上の操作により、図-4(c)に示す灰色要素が判定される。

AMR法の適用はバックグラウンドメッシュに対して行うため、解析メッシュ上での細分化情報を図-4(d)に示すように、バックグラウンドメッシュ上に細分化される要素(灰色の要素)を設定する。その情報により、バックグラウンドメッシュに対して2段階の細分化を行う(図-4(e))。ここで、解析メッシュからバックグラウンドメッシュへの細分化情報の検索は、図-5を用い以下のように行っている。図-5において、四角で囲まれた数字はLevel0での要素番号、丸で囲まれた数字はLevel1での要素番号を表わしている。このとき、細分



化における各Levelにおいて各要素ごとに細分化前の要素番号があらかじめ記憶されており、その情報を用いて細分化に選択された要素がLevel0のどの要素に含まれているのかを白矢印の方向に沿って、各Levelごとに検索する。この検索により、Level0での細分化される要素が選択される。選択された要素は、黒矢印の方向で1段階ずつ細分化が行われる。このとき、要素のひずみを小さくするために、隣接する要素では、1段階の細分化になるように細分化を行う。この作業により、Level2で細分化に選択された要素が属するLevel0での要素は必ず細分化される。

また、本研究では、バックグラウンドメッシュの要素に対して細分化を行うため、あらかじめ作成した地形線を壊すことなく、細分化を行うことができる。この細分化されたバックグラウンドメッシュを用いて解析メッシュの再構築を行う。

新たに作成された解析メッシュの各節点では、物理量（流量と水深）が配置されていない。そのため、図-6に示すように、時間の不連続面（ $t_n^+$ と $t_n^-$ ）の間において $t_n^-$ での要素節点の物理量からCIVA法<sup>19)</sup>で用いられる3次補間式を用いて、物理量の再配置を行っている。なお、バックグラウンドメッシュに対するAMR法による要素細分化に有する演算量は、バックグラウンドメッシュの要素数にも依存するが、本論文での数値解析例

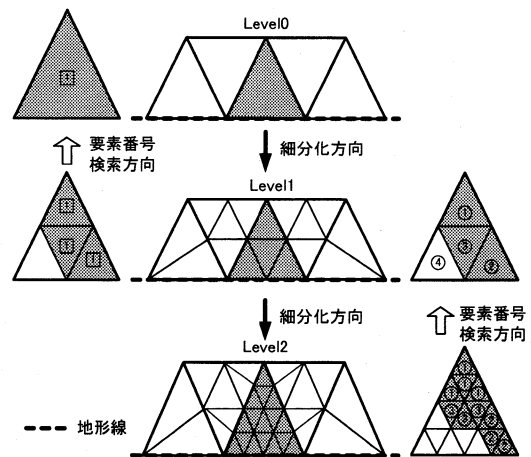


図-5 細分化要素検索と要素細分化パターン

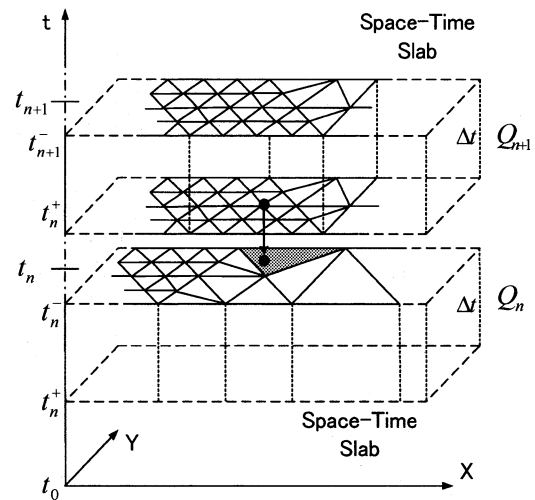


図-6 物理量の補間とSpace-Time Slab

では、全体の10%~20%程度である。

### 3. 数値解析例

数値解析例として、衝撃波問題、障害物を有する波の遡上解析を取り上げ、理論解、実験値との比較を行い、AMR法を適用したメッシュ再構築手法の有効性について検討を行う。また、本解析手法の実問題への適用性について検討を行うため、北海道南西沖地震津波解析を行う。

#### 3.1 衝撃波問題

AMR法を適用したメッシュ再構築手法の有効性について検討するため、衝撃波問題<sup>21)22)</sup>を取り上げる。この問題は、内側に屈折している水路に射流状態となる流入条件を与えると側壁の屈折の影響を受けて水面が高くなり、その水面変化が衝撃波となり流れの中を伝播す

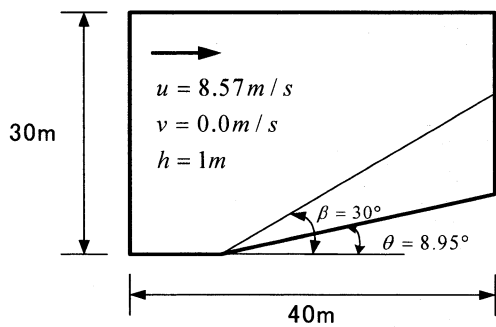


図-7 数値解析モデル

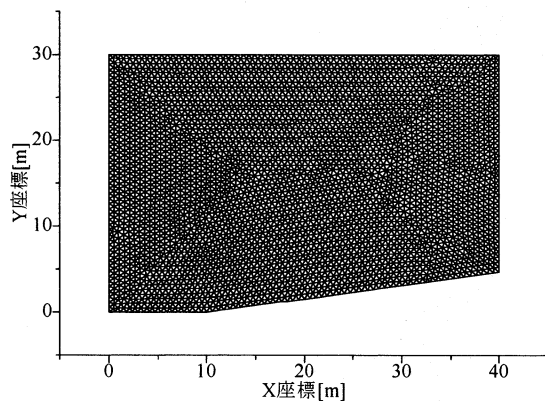


図-8 初期のバックグラウンドメッシュ

る。本解析では、水際線の移動境界がないため、バックグラウンドメッシュを用いたメッシュ再構築を行わずに解析を行うことは可能であるが、本手法の計算精度の検証を行うため、毎ステップごとに、AMR法により細分化されたバックグラウンドメッシュを解析メッシュとして解析を行っている。また、数値解析モデル図を図-7に、使用した初期のバックグラウンドメッシュを図-8に示す。初期条件として、Froude数が2.74になるように、水深 $h = 1.0[\text{m}]$ 、流速 $u = 8.57[\text{m/s}]$ 、 $v = 0.0[\text{m/s}]$ を与える<sup>21)22)</sup>。また、境界条件として、流入部で水深 $h = 1.0[\text{m}]$ 、流速 $u = 8.57[\text{m/s}]$ 、 $v = 0.0[\text{m/s}]$ を与え、壁面においてはslip条件を与えた。微小時間増分量は $0.001[\text{s}]$ を用いて解析を行った。

計算結果として、図-9にAMR法を適用した場合の定常時でのバックグラウンドメッシュを示す。また、AMR法を適用した場合の水面形状の等高線図を図-10に示す。この図より、水位が不連続となる点線上に水面形状の等高線間隔が密になっていることからAMR法を用いることにより、衝撃波による水位の不連続面を表現していることがわかる。また、図-10におけるA-B-Cラインでの水位形状と理論解との比較を図-11に示す。AMR法を用いることにより、理論解ともよい一致を示している。このことにより、本手法の有効性が確認できた。

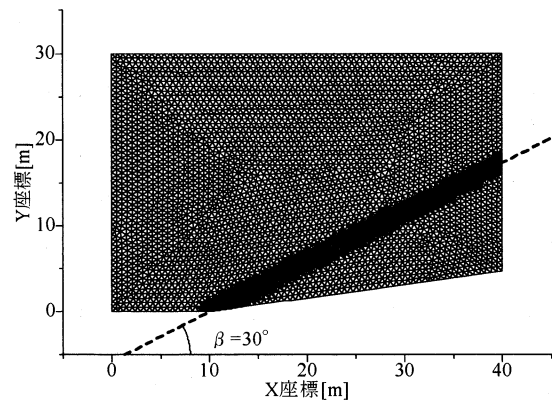


図-9 AMR法適用後のバックグラウンドメッシュ（定常時）

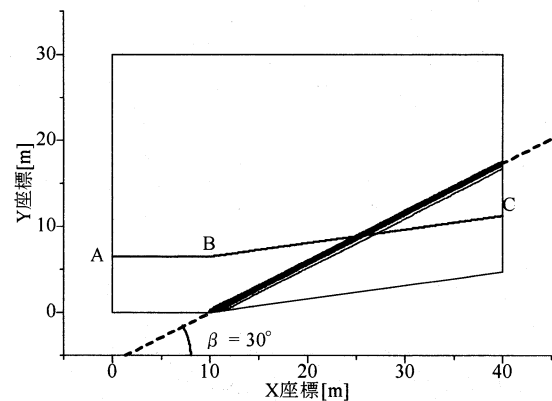


図-10 等値水面図（定常時）

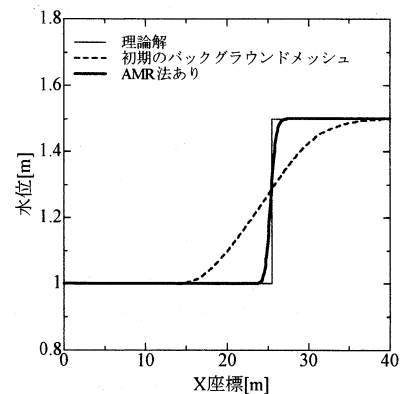


図-11 A-B-Cライン上における水面形状の理論解との比較

### 3.2 障害物を有する波の遡上問題

移動境界問題に対する本手法の有効性を検討するため、障害物を有する波の遡上問題を取り上げ、2次元水路による実験値との比較を行った。実験では、ピストン型造波機を有する断面水槽に斜面勾配1:10のスロープを設置し、そのスロープに障害物として円柱（直径 $0.115[\text{m}]$ ）を置き、波の遡上実験を行った。実験装置の概要図を図-12、図-13に示す。また、初期のバックグラウンドメッシュを図-14に示す。実験の入射波条件として、造波周波数： $0.30\text{Hz}$ 、造波板変位： $\pm 0.035[\text{m}]$

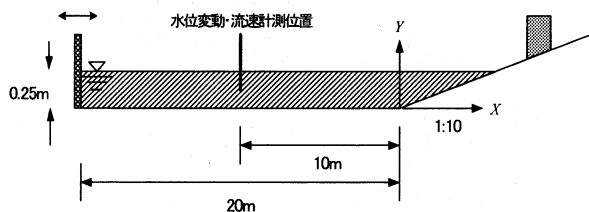


図-12 実験装置モデル図

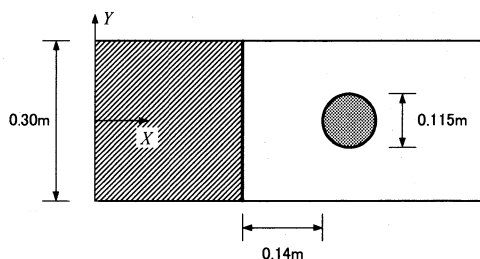


図-13 実験装置モデル図（円柱近傍）

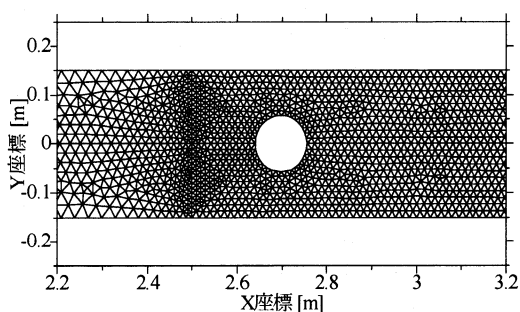
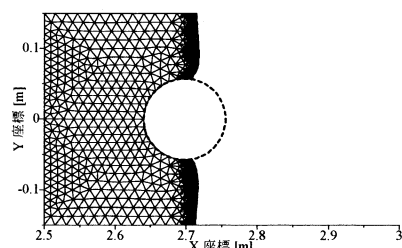


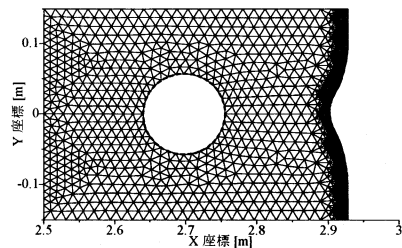
図-14 初期のバックグラウンドメッシュ（円柱近傍）

を用いて造波を行った，数値解析では，スロープ開始位置から10.0[m]の位置に設定した計測装置により得られた水位と流速を用いて解析を行った．計算条件として，壁面，円柱においてはslip境界とし，微小時間増分量は0.001[s]，マンニングの粗度係数0.01を用いて解析を行った．

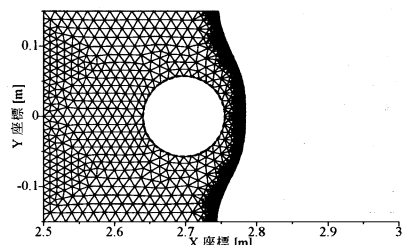
計算結果として，図-15に各時刻における解析メッシュを示す．この図より，水域の結合・分離を伴う流れもメッシュが破綻することなく，安定に解析が行われていることがわかる．また，水域の結合直前の解析メッシュを図-16，図-17に示す．水際線の結合判定はバックグラウンドメッシュの要素サイズに依存するため，AMR法を適用しない場合，実験結果より先に水域の結合が起こっている．AMR法を適用することにより，バックグラウンドメッシュの細分化が行われたため，実験値ともよい一致を示していることがわかる．このことにより，移動境界問題に対する本手法の有効性が確認できた．



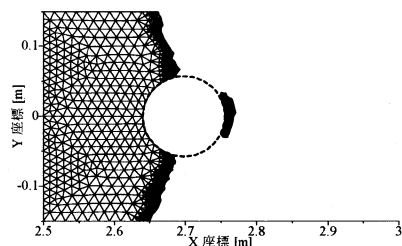
(a) 10.2 秒後



(b) 11.5 秒後



(c) 13.0 秒後



(d) 13.2 秒後

図-15 各時刻における解析メッシュ

### 3.3 北海道南西沖地震津波解析

本手法の実地形への適用性の検討を行うため，北海道南西沖地震津波解析を取り上げる．米山ら<sup>23)</sup>は，大型造波水路によって行われた実験を現地換算値を用いて解析を行っている．本解析でも，米山らと同様に現地換算の値を用いて解析を行っている．また，水理実験の3次元模型と同じ地形データから等高線を作成し，等高線をブレイクラインとしたバックグラウンドメッシュを作成した．図-18に作成した等高線図と解析領域図を，図-19に作成した初期のバックグラウンドメッシュを示す．図-18に示す $x=1000\text{m}$ から解析領域とし，その位置での波形を入力波条件として解析を行っている．用いた入力波形を図-20に示す．解析条件として微小時間増分量は0.05[s]，マンニングの粗度係数0.025を用いて解析を行った．

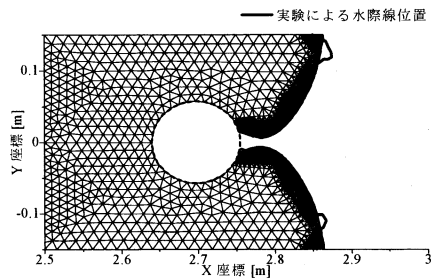


図-16 AMR法を適用した場合の解析結果 (10.8秒後)

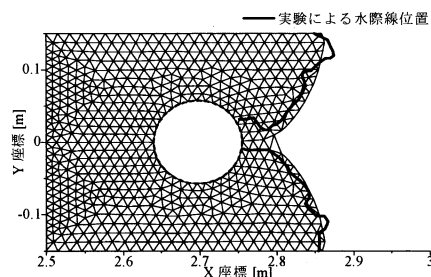


図-17 AMR法を適用しない場合の解析結果 (10.8秒後)

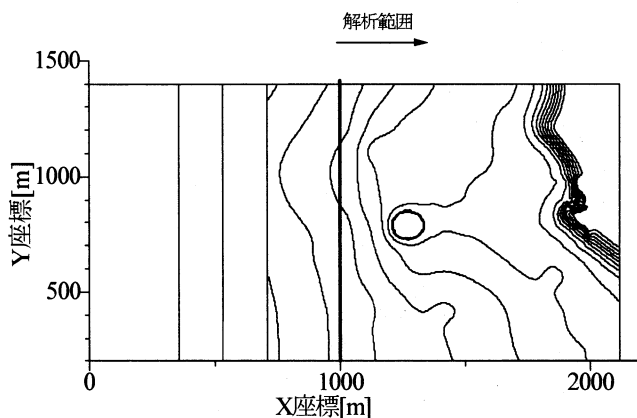


図-18 地形形状と解析範囲

計算結果として、図-21に各時刻における解析メッシュを、図-22にそれぞれの急勾配付近での解析メッシュを示す。また、図-23に最大遡上曲線図を示す。これらの図より、AMR手法を適用することにより、谷へ進入し遡上する現象が捉えられていることがわかる。

#### 4. おわりに

本論文では、移動境界を伴う浅水長波流れ解析におけるLagrange的手法で問題になる計算の適用性とロバスト性を向上させるため、AMR手法を用いた安定化

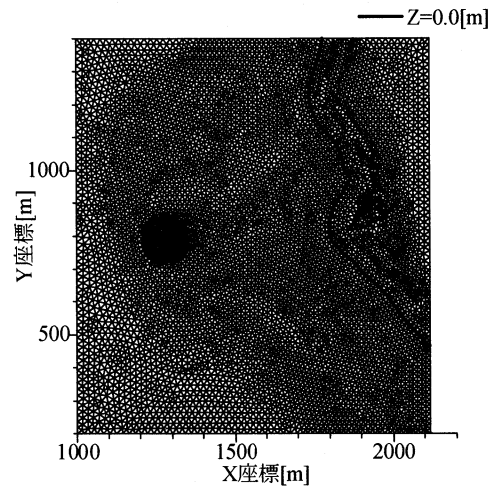


図-19 初期のバックグラウンドメッシュ

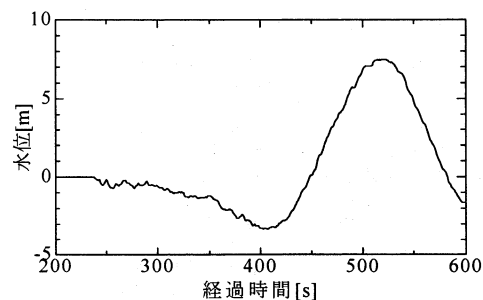


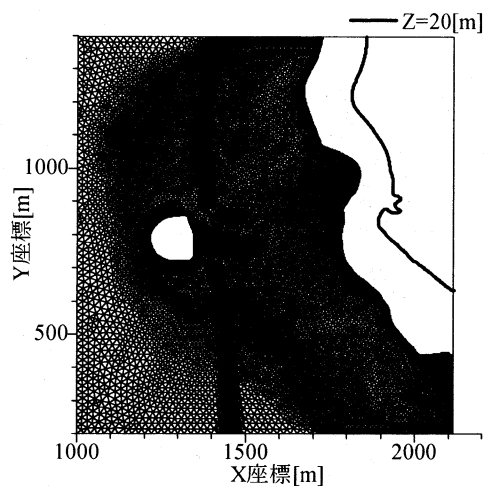
図-20 X=1000mでの解析入力波形

Space-Time有限要素解析手法の提案を行った。本手法の妥当性および有効性を検討するため、本手法を衝撃波問題、波の遡上問題に適用して、理論解および実験結果との比較を行った。

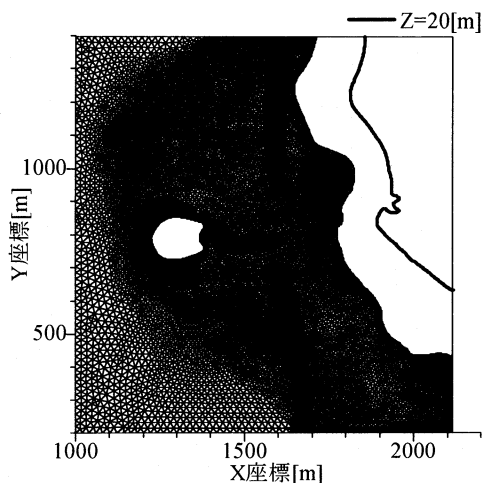
その結果以下の結論を得た。

- バックグラウンドメッシュに対してAMR法を導入したことにより、微地形を正確に考慮した上でメッシュの粗密付けが可能となり、従来の手法の持つ高いロバスト性に加えて計算精度の向上が実現できた。
- 衝撃波問題において、AMR法を用いたことにより水位の不連続面をより正確に捉えることができ、理論解と良い一致を示した。
- 波の遡上問題において、AMR法を用いたことにより、従来のLagrange的手法では適用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になり、実験結果とも良い一致を示した。

今後は、複雑な建物形状を有する都市域の浸水災害事例に対して本手法を適用し、その有効性の検討を行う予定である。



(a) 480 秒後



(b) 500 秒後

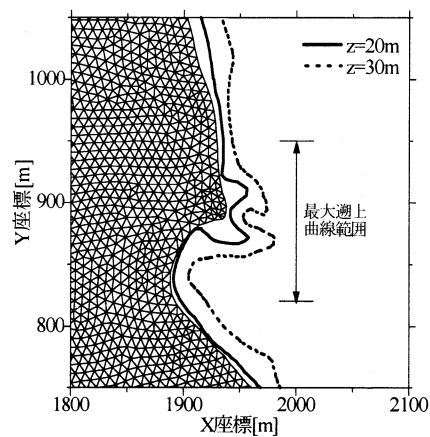
図-21 各時刻における解析メッシュ

## 5. 謝辞

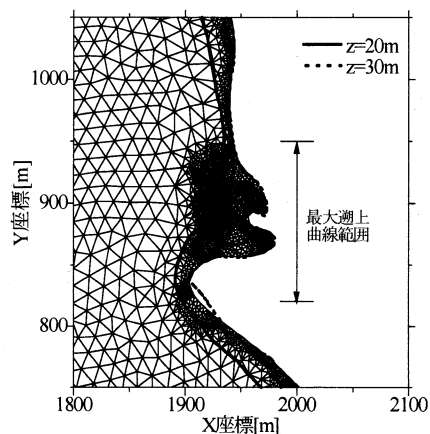
本研究を行うにあたり、独立行政法人 港湾空港技術研究所 関克己博士（当時中央大学助教）には、波の遡上実験において多大な助言をいただきました。また、京都大学防災研究所 米山望准教授には、北海道南西沖地震津波解析において解析データを提供していただきました。ここに記して、感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 高橋智幸：津波防災における数値計算の利用，日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌，**12** 2, pp.23-32, 2004.
- 2) 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.
- 3) 文屋信太郎，Westerink, J.J., 吉村忍：Local Discontinuous Galerkin 法による浅水流・洪水シミュレーション，数値流体力学シンポジウム，日本流体力学会，**21**, A10-4, 2007



(a) AMR 法なし



(b) AMR 法あり

図-22 急勾配谷の拡大図

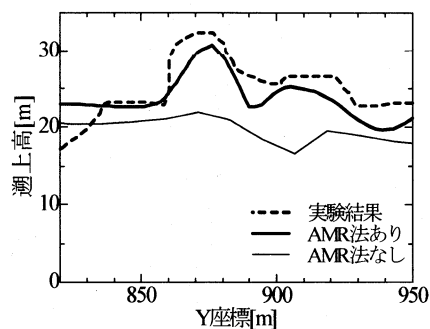


図-23 急勾配谷付近での最大遡上曲線

- 4) 赤穂良輔，伊井仁志，肖鋒：CIP/Multi-Moment 有限体積法を用いた非構造格子津波シミュレーターの開発数値流体力学シンポジウム，日本流体力学会，**21**, A10-2, 2007
- 5) 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.
- 6) 登坂宣好，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.
- 7) 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.
  - 8) Gopalakrishnan, T.C. and Tung, C.C. : Numerical analysis of moving boundary problem in costal hydrodynamics, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **3**, pp.179-200, 1983.
  - 9) 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
  - 10) 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.
  - 11) 高瀬慎介，田中聖三，樫山和男：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，応用力学論文集，土木学会，**10**，pp.193-200, 2007.
  - 12) Donea, J. and Huerta, A. : Finite Element Methods for Flow Problems, Wiley, 2003.
  - 13) Liang, Q. and Borthwick, A.G.L. : Simple treatment of non-aligned boundaries in a Cartesian grid shallow flow model, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **56**, pp.2091-2110, 2008
  - 14) T. Huazhong. : Solution of the shallow-water equations using an adaptive moving mesh method, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **44**, pp.789-810, 2004
  - 15) Remacle, J-F., Frazao. S.S., L. Xiangrong. and Shephard. M.S. : An adaptive discretization of shallow-water equations based on discontinuous Galerkin Methods, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **52**, pp.903-923, 2006
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) Tanaka, N. : 'The CIVA method for mesh-free approaches' : improvement of the CIP method for n-simplex. *Comput. Fluid Dyn. J.*, **8(1)**, pp.121-127, 1999.
  - 20) 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
  - 21) Ming-Hseng Tseng. : Explicit finite volume non-oscillatory schemes for 2d transient free-surface flows, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **30**, pp.831-843, 1999.
  - 22) Lai, J.S, Lin, G.F and Guo, W.D. : An upstream flux-splitting finite-volume scheme for 2D shallow water equations, *Int. J. Numer. Meth, Fluids*, **48**, pp.1149-1174, 2005.
  - 23) 米山望，松山昌史，田中寛好：1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析，土木学会論文集，土木学会，**705**，pp.139-150, 2002.

(2008年4月14日 受付)