津波シミュレーションのための CIVA-安定化有限要素法

高橋佑典¹・桜庭雅明²・檜山和男³

¹正会員 修士(工学) 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²正会員 博士(工学) 日本工営(株) 中央研究所(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

³正会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

本論文は、津波解析の高精度解法の構築を目的とし、非構造格子に基づく CIVA-安定化有限要素法による解析手法の提案を行うものである。この手法は、支配方程式を移流ステップと非移流ステップとに分離し、前者には CIVA 法、後者には SUPG 法に基づく安定化有限要素法を用いて計算を行う方法である。支配方程式としては、波の非線形性と分散性の両者を考慮することが可能な Boussinesq 方程式を用いている。いくつかの数値解析例を通して、本手法の妥当性、有効性について検討を行った。

Key Words: CIVA method, SUPG finite element method, Tsunami, Boussinesq equation

1. はじめに

地震に伴い発生する津波は、津波が到達する沿岸地域の人命や経済活動に深刻な被害をもたらす。津波に対する防災・減災対策を行う上で、津波による被害を正確に予測し、把握することは非常に重要であり、これまで数値シミュレーションは被害予測の有効な手段として用いられてきた。津波の数値シミュレーションには、支配方程式として浅水長波方程式が一般に用いられ、これまでに様々な解析手法が提案されてきた^{1),2),3)}。しかし、浅水長波方程式では波の非線形性については考慮されているが、波の分散性については考慮されていない。そこで、近年はこれらの両者の性質を考慮した Boussinesq 方程式が用いられ、多くの研究がなされている^{4),5),6)}。一方、離散化解析手法としては、一般に構造格子に基づく有限差分法が多く用いられてきた。しかし、複雑な地形形状、構造物の形状を取り扱う津波のシミュレーションにおいては、任意形状の適合性に優れた非構造格子に基づく解析手法が有効であると考えられる。また、非構造格子は水深変化に応じて格子サイズを自由に変更することが可能なため、沖合の波源域から遡上域までの計算をネスティング処理などを行わずに実行できる長所もある。

そこで本研究では、津波解析の高精度解法の構築を目的とし、非構造格子に基づく CIVA-安定化有限要素法⁷⁾による解析手法の提案を行うものである。CIVA-安定化有限要素法は、既往の研究で浅水長波流れ解析⁷⁾に対し適用がなされている。この手法は、支配方程式を移流ステップと非移流ステップとに分離し、前者には移流

方程式に対する高精度解法である CIVA 法^{8),9)}、後者には SUPG 法に基づく安定化有限要素法⁶⁾を用いて計算を行う方法である。本研究においては、CIVA-安定化有限要素法を沖合から遡上計算までを行う津波シミュレーションに適用するために、弱非線形性と弱分散性を考慮した Boussinesq 方程式に適用することを試みる。両者の手法はともに非構造格子に基づく手法であるため、津波の解析領域に含まれる複雑な地形形状、構造物の形状などに対する適合性が良好であるといえる。いくつかの数値解析例を通して、本手法の妥当性と有効性について検討を行った。

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式

支配方程式には、弱非線形性と弱分散性を考慮した Boussinesq 方程式を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(u_i H)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i H)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i H)}{\partial x_j} + \frac{gn^2 u_i \sqrt{u_j u_j}}{H^{\frac{1}{3}}} + gH \frac{\partial(H+z)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{h^2}{3} \frac{\partial(u_i H)}{\partial t \partial x_j} \right) = 0 \quad (2)$$

ここに、式(1)は連続式、式(2)は運動方程式であり、 u_i は x_i 方向の断面平均流速である。 H は全水深、 h は静水深、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 z は地盤高である。本手法では、(2) 式の運動方程式を Time splitting 法により、移流ステップと非移流ステップの 2

図-1 CIVA 法 の 概 念 図

つのステップに分離する．

$$\frac{\partial(u_i H)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(u_i H)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(u_i H)}{\partial t} + (u_i H) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{g n^2 u_i \sqrt{u_j u_j}}{H^{\frac{1}{3}}} \\ + g H \frac{\partial(H+z)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{h^2}{3} \frac{\partial(u_i H)}{\partial t \partial x_j} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3) は移流ステップの式であり，移流方程式である．また，その解法には CIP 法¹⁰⁾の考え方を非構格子に適用した CIVA 法^{8),9)}を用いる．一方，式 (1) と式 (4) は非移流ステップの式であり，その解法には SUPG 法に基づく安定化有限要素法⁶⁾を用いる．各時間レベルで，移流ステップの計算 (式 (3)) を先に行い，移流ステップで得られた計算結果を用いて非移流ステップの計算 (式 (4)) を行う．両者の計算の終了後，時間レベルを進め，解析の終了ステップに到達するまで計算を繰り返す．

(2) 移流ステップの計算

移流ステップの計算には，CIVA(Cubic Interpolation with Volume/Area coordinates) 法^{8),9)}を用いる．CIVA 法は，移流方程式の高精度解法である CIP(Constrained Interpolation profile) 法¹⁰⁾を三角形要素，四面体要素へ適用可能とした手法である．

図-1 のように，CIVA 法は，移流方程式の厳密解である式 (5) に基づき，上流点での物理量 f^n を移流させることで，計算点における物理量 f^{n+1} を 3 次補間により求める方法である．なお，本研究においては，物理量 f は x_i 方向の線流量 $u_i H$ である．

$$f^{n+1}(x_i, t) = f^n(x_i - u_i \Delta t, t - \Delta t) \quad (5)$$

図-2 面積座標

この方法では，まず各節点 (x_1, x_2) における既知流速 u_i^n ，及び微小時間増分量 Δt を用いて時間レベル n における物理量の上流点の位置 $P(x_1 - u_1 \Delta t, x_2 - u_2 \Delta t)$ を決定し，点 P を包含する上流側要素の探索を行う．そして，点 P での物理量 f^n を，面積座標 L_i (図-2)，及び点 P を包含する要素の節点の物理量を用いて，次式 (6) により内挿補間する．

$$\begin{aligned} f_{(L_1, L_2, L_3)}^n = \sum_{i=1}^3 \alpha_i L_i \\ + d \sum_{\substack{j,k=1 \\ j \neq k}}^3 \beta_{jk} \left(L_i^2 L_k + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに， α_i ， β_{jk} は係数であり，上流側の要素の物理量 f とその空間微係数より求める．なお， $d = 1$ の場合には 3 次補間， $d = 0$ の場合には 1 次補間の式となる．

(3) 非移流ステップにおける計算

式 (1)，式 (4) に対し，空間方向の離散化として SUPG(Streamline-Upwind/Petrov-Galerkin) 法に基づく安定化有限要素法⁶⁾を適用することで，以下の重み付き残差式を得る．

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{U}^* \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} + \mathbf{G} \mathbf{U} - \mathbf{R} \right) d\Omega \\ + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{K}) \right) d\Omega \\ + \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} \tau (\mathbf{A}_i)^T \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \\ \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} + \mathbf{G} \mathbf{U} - \mathbf{R} \right) d\Omega \\ + \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} \delta \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} \right) d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{U}^* \cdot \mathbf{T} d\Gamma \end{aligned} \quad (7)$$

ここに，各ベクトル，マトリックスは以下のである．

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} H \\ u_1 H \\ u_2 H \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ c^2 \frac{\partial z}{\partial x_1} \\ c^2 \frac{\partial z}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{h^2}{3} \frac{\partial(u_i H)}{\partial x_1} \\ \frac{h^2}{3} \frac{\partial(u_i H)}{\partial x_2} \end{bmatrix},$$

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

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u_*}{H} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_*}{H} \end{bmatrix}, u_* = \frac{gn^2 \sqrt{\bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2}}{H^{\frac{1}{3}}}$$

ここに， $\mathbf{U}$ は未知ベクトル， $\mathbf{U}^*$ は重み， $\mathbf{R}$ は勾配項ベクトル， $\mathbf{K}$ は分散項のベクトルで， $\mathbf{A}_i$ ， $\mathbf{G}$ はそれぞれ移流項，摩擦項の係数行列である．また，上線付きの文字は移流ステップにおいて計算された物理量を表す．右辺の境界積分項はトラクションである．

式 (7) 中の左辺第一項目と第二項目及び右辺の境界積分項は Galerkin 項で，第三項目の要素毎の積分の総和項は．移流効果の卓越による数値不安定性を抑えるための SUPG 法による安定化項であり，第四項目の要素毎の積分の総和項は水面の不連続面における不安定性を回避するための Shock-Capturing 項である．以下に，本研究で使用した安定化パラメータ⁶⁾を示す．

$$\tau = \left(\frac{1}{(\tau_{SUGN1})^2} + \frac{1}{(\tau_{SUGN2})^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

ここで，

$$\tau_{SUGN1} = \left(\sum_{a=1}^{nel} (c |\mathbf{j} \cdot \nabla N_a| + |\mathbf{u} \cdot \nabla N_a|) \right)^{-1}$$

$$\tau_{SUGN2} = \frac{\Delta t}{2}, \mathbf{j} = \frac{\nabla H}{\|\nabla H\|}$$

$$\delta = \tau_{shock} (\|\mathbf{u}_{int}\|)^2,$$

$$\tau_{shock} = \left(\sum_{\alpha=1}^{n_{en}} |\mathbf{u} \cdot \nabla N_\alpha| \right)^{-1},$$

$$\|\mathbf{u}_{int}\| = \|\mathbf{u}\|$$

なお， N_a は形状関数， Δt は微小時間増分量である．式 (7) に対して，全水深 H ，線流量 $u_i H$ とともに線形補間

図-3 移動境界手法の概念図

の三角形一次要素を用いて空間方向の離散化を行うと，次の有限要素方程式を得る．

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_\tau + \mathbf{D})\dot{\mathbf{U}} + (\mathbf{S} + \mathbf{S}_\tau)\mathbf{U} + (\mathbf{F} + \mathbf{F}_\tau)\mathbf{U} + (\mathbf{H} + \mathbf{H}_\tau)\mathbf{R} + \mathbf{TU} = 0 \quad (8)$$

ここに， $\mathbf{M}$ ， $\mathbf{D}$ ， $\mathbf{S}$ ， $\mathbf{F}$ ， $\mathbf{H}$ ， $\mathbf{T}$ は係数行列であり，それぞれ質量行列，移流項に関する行列，分散項に関する行列，摩擦項に関する行列，勾配項に関する行列，衝撃捕捉項に関する行列であり，添字 τ 付きの行列は SUPG 法に起因する行列を表している．なお，時間方向の離散化には，Crank-Nicolson 法を用いた．また，連立一次方程式の解法には，Element-by-element GPBiCG 法を用いた．

(4) 移動境界手法

津波の浸水・遡上の挙動を表現するために，水際線の移動を表現する移動境界手法が必要となる．本研究では，固定メッシュを用いる Euler 的手法に基づく移動境界手法¹²⁾を適用する．図-3 に，その概念図を示した．処理のプロセスは以下の通りである．

- (1) 各節点における全水深 H と微小水深 ϵ とを比較し， $H \geq \epsilon$ ならば水域点， $H < \epsilon$ ならば陸域点とする．また，陸域点に対しては流速 $u_i^n = 0$ とする．
- (2) 各要素を要素内の 3 節点の水域点の数により，3 つの要素に分類する．要素内の節点が 3 つとも水域点ならば水域要素，1 つもしくは 2 つの節点が水域点ならば水際要素，要素内の節点が 3 つとも水域点でないならば陸域要素とする．
- (3) 水域要素，水際要素を計算領域とする．

これにより，各時間レベルにおける水の移動を表現する．また，水際要素は判定された計算領域における境界となるため，陸域の点に対して $u_i^n = 0$ なる条件を与える．

図-4 流体力評価に用いる領域

(5) 構造物に作用する流体力の評価手法

津波のシミュレーションでは、構造物に作用する流体力を正確に評価することは重要である。本論文では、構造物に作用する流体力を、時間ステップごとに計算された水深と流速を用いて、次の重み付き残差式の表面力項（右辺）より評価する⁶⁾。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^0} \mathbf{U}^* \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \bar{\mathbf{A}}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \mathbf{R} + \mathbf{G}\mathbf{U} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega^0} \left(\frac{\partial \mathbf{U}^*}{\partial x_i} \right) \cdot \left(-\mathbf{L}_i \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{K}) \right) d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_{in}} \mathbf{U}^* \mathbf{T} d\Gamma \end{aligned} \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{A}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -u_1^2 & 2u_1 & 0 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ c^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{A}}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -u_1 u_2 & u_2 & u_1 \\ -u_2^2 & 0 & 2u_2 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c^2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\hat{t}_1 H \\ -\hat{t}_2 H \end{bmatrix}$$

ここで、境界 Γ_{in} は構造物の境界であり、領域 Ω^0 は構造物まわりの一層分の領域である（図-4 参照）。式 (9) は構造物まわり一層分のメッシュにより構成される領域 Ω^0 において成立し、右辺の境界積分項が構造物に作用する流体力としての抗力を表している。なお、 t_i は境界に働く単位長さあたりの分布力である。有限要素法を適用することで、支配方程式に対する重み付き残差式から流体力を容易に求めることが可能となる。

3. 数値解析例

(1) 孤立波伝播問題

CIVA-安定化有限要素法の妥当性の検討を行うために、図-5 に示す Street の水理実験モデル¹³⁾を用いた孤立波の伝播問題を取り上げる。初期条件として、 $x=10\text{m}$

図-5 解析モデル

図-6 無次元位置 $x/h=30$ における水位変動量の時系列

図-7 無次元位置 $x/h=41.6$ における水位変動量の時系列

に波峰が位置する、波高 0.12m の孤立波を与える。壁面での境界条件は Slip 条件を設定し、微小時間増分量は 0.005s として計算を行い、無次元位置 $x/h = 30$ 、 $x/h = 41.6$ の位置における無次元水位変動量 ζ/h の比較を行った。図-6、図-7 に、Boussinesq 方程式及び浅水長波方程式による解析結果の比較を示す。図より、浅水長波方程式による解析結果は実験値と大きく異なるのに対し、Boussinesq 方程式による解析結果は実験値と良い一致を示している。これは、分散性を考慮することにより、非線形性の特徴である波の前傾化が抑制されたことに起因するものである。

また、図-8、図-9 に、本手法と SUPG 法に基づく安定化有限要素法³⁾による解析結果の比較を示す。 $x/h = 30$ の位置では両者に差異は見られないが、 $x/h = 41.6$ の位置では、本手法の解析結果は SUPG 法に基づく安定化有限要素法による解析結果と比較して、波のピーク値及びピーク値以降の結果が若干ではあるが実験値に近い値となっていることがわかる。

図-8 無次元位置 $x/h=30$ における水位変動量の時系列

図-9 無次元位置 $x/h=41.6$ における水位変動量の時系列

図-10 解析モデル

(2) 津波遡上問題

次に本手法を，図-10 に示す解析モデルを用いた津波の遡上問題^{15),16)}に適用した．なお，計算条件として，図-11 に示す実験での造波板の x 方向の移動速度の時系列をもとにして，沖側境界における入射波を x 方向の線流量として入力した．また，Manning の粗度係数を $0.01\text{s}/\text{m}^{\frac{1}{3}}$ ，微小時間増分量は 0.005s として計算を行った．

図-11 造波板の移動速度の時系列

図-12 観測点 P1 における水位変動量の時系列

図-13 観測点 P2 における水位変動量の時系列

図-14 観測点 P3 における水位変動量の時系列

図-15 観測点 P4 における水位変動量の時系列

図-16 解析モデル

図-17 構造物に作用する流体力の時系列

図-12, 図-13, 図-14, 図-15 には, それぞれ観測点 $P1(x=-3.8m)$, $P2(x=-2.3m)$, $P3(x=-1.25m)$, $P4(x=-0.75m)$ における水位の実験結果と計算結果の時系列を示した。観測点 $P1, P2$ においては, 解析結果は実験値と概ね一致しており, 波の挙動を捉えられていることがわかる。観測点 $P3, P4$ では, 実験値と比較して若干の差異が生じているものの, 水位の急激な変化を捉えられていることがわかる。

(3) 構造物を有するダムブレイク問題

構造物に作用する流体力の評価手法の妥当性の検討のために, 構造物を有するダムブレイク問題を取り上げる。解析モデルは図-16 に示す Gomez らの水理実験モデル¹⁴⁾で, 初期条件として 0.29m の水位差を与える。

図-18 流れの様子 (0.36sec 時)

図-19 流れの様子 (0.60sec 時)

図-20 流れの様子 (1.56sec 時)

壁面における境界条件は Slip 条件とし, 微小時間増分量を 0.001sec とした。

図-17 に構造物に作用する流体力の時刻歴, 図-18, 図-19, 図-20 に各時刻における水位分布を示す。図-17 より, 解析結果は実験値と良い一致を示し, 流体力評価法の妥当性が確認された。

図-21 解析の初期条件 (左) と津波伝播の様子 (右)

図-24 2700s における解析結果

図-22 女川における水位変動量の時系列

図-25 3780s における解析結果

図-23 陸前高田における水位変動量の時系列

図-26 浸水域の比較

(4) 広域の津波遡上解析

本手法の実際問題への適用例として、東日本大震災における津波遡上解析を取り上げた。図-21 に、全体の解析領域と初期条件を示した。初期条件としては Mansinha & Smylie の方法¹⁷⁾により作成された初期水位を用い、断層モデルには東北大 Ver.1.0¹⁸⁾を用いた。境界条件は海岸部で反射境界条件 (Non-slip 条件) を与え、沖合では開境界条件を与えた。なお、本例題では水深変化に応じて Courant 数がほぼ一定となる有限要素メッシュ¹⁹⁾を作成して用いた。なお、女川地区については陸域を含めた有限要素メッシュとしており、海域では Manning の粗度係数を $0.025\text{s/m}^{\frac{1}{3}}$ 、陸域では $0.04\text{s/m}^{\frac{1}{3}}$ として与

えた²⁰⁾。図-22、図-23 にそれぞれ女川、及び陸前高田における水位変動量の時系列を示した。図より、SUPG 法に基づく安定化有限要素法の結果と比較して、本手法の解析結果は、水位変動をより鋭敏に表現していることがわかる。これは、SUPG 法に基づく安定化有限要素法と比較して本手法は減衰効果が小さいためであると考えられる。また、図-24、図-25 は、時刻 2700s および 3780s における領域全体と女川地区の水位分布である。そして、図-26 に、浸水域の比較を示す。図より、計算結果と実際の浸水域は良く一致していることが分かる。

4. 終わりに

本論文では、津波解析の高精度化を目的として、支配方程式に Boussinesq 方程式を用い、離散化手法には CIVA-安定化有限要素法を用いる津波の解析手法の提案を行った。いくつかの数値解析例を通して、本手法の妥当性と有効性の検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 孤立波伝播問題および津波遡上解析において、本手法の解析結果は実験値と良い一致を示した。また、本手法による解析結果は SUPG 法に基づく安定化有限要素法による解析結果と比較して、ピーク値を良く捉えられていることが確認された。
- 構造物を有するダムブレイク問題において、流体力の計算結果は実験値と良い一致を示した。
- 実地形を対象とした広域の津波伝播解析において、本手法による解析結果は、SUPG 法に基づく安定化有限要素法による解析結果に対し、ピーク値の比較において減衰傾向が小さいことが確認された。また、非構造格子のため、ネスティング処理が不要なことが確認できた。

今後の課題として、構造物の影響を考慮した広域津波遡上解析、大規模問題への本手法の適用などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科研費(基盤研究(B) 課題番号 24360183)の助成を受けた。

参考文献

- 1) S.W. Bova, G.F. Carey : A symmetric formulation and SUPG scheme for the shallow water equations, *Advances in Water Resources*, Vol.19, No.3, pp.123-131, 1996.
- 2) 福井貴也, 越村俊一, 松山昌史: 格子ボルツマン法による津波氾濫流の 2D-3D ハイブリッド・シミュレーション, *土木学会論文集 (B2)*, Vol.66, No.1, pp.61-65, 2010.
- 3) M.B. Adityawan, 田中仁: 浅水流方程式と乱流モデルを組み合わせた孤立波遡上の数値計算, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.66, No.1, pp.91-95, 2010.
- 4) 藤間功司, 後藤智明, 首藤伸夫: 非線形分散波理論の数値的な検討, *海岸工学論文集*, Vol.31, pp.93-97, 1984.
- 5) 藤間功司, 後藤智明, 首藤伸夫: 非線形分散波式の精度の検討, *土木学会論文集*, Vol.369, II-5, pp.223-232, 1996.

- 6) 利根川大介, 榎山和男: 安定化有限要素法による非線形分散波理論に基づいた津波遡上解析手法の構築研究, *応用力学論文集*, Vol.12, pp.127-134, 2009.
- 7) 吉松弘行, 榎山和男: CIVA-安定化有限要素法による地すべりを起因とする造波解析, *日本地すべり学会誌*, Vol.43, No.3, pp.131-141, 2006.
- 8) 田中伸厚: 数値流体力学のための高精度メッシュフリー手法の開発, *日本機械学会論文集 (B 編)*, Vol.64, No.620, pp.103-110, 1998.
- 9) 立石絢也, 榎山和男: 保存型 CIVA 法の構築と格子ボルツマン法への適用, *応用力学論文集*, Vol.8, pp.243-249, 2005.
- 10) T. Yabe and T. Aoki : Universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation I; One-dimensional solver, *Computer Physics Communications*, Vol.66, No.2-3, pp.219-232, 1991.
- 11) 松本純一, 梅津剛, 川原睦人: 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*, Vol.1, pp.263-272, 1998.
- 12) 桜庭雅明, 弘崎聡, 榎山和男: 自由表面流れ解析のための CIVA/VOF 法に基づく高精度界面捕捉法の構築, *応用力学論文集*, Vol.6, pp.215-222, 2003.
- 13) R.L. Street, S.J. Burgers and P.W. Whitford : The Behavior of Solitary Waves on a Stepped Slope, *Dept. Civ. Eng. Stanford Univ. Tech. Rep.*, No.93, 1968.
- 14) M.Gomez-Gesteira, R.A. Darimple : Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.130, pp.63-69, 2004.
- 15) チャルレス シマモラ, 嶋原良典, 藤間功司: 建物群に作用する水理実験, *Vol.54*, pp.831-835, 2007.
- 16) K. Fujima, F. Achmad, Y. Shighihara and N. Mizutani : Estimation of tsunami force acting on rectangular structures, *Journal of Disaster Research*, Vol.14, No.6, pp. 404-409, 2009.
- 17) L. Mansinha and D.E. Smylie, : The displacement fields of inclined faults, *Bullet of the Seismological Society of America*, Vol.61, pp.1433-1440, 1971.
- 18) 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル: 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター, <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp>
- 19) K. Kashiya and T. Okada, Automatic mesh generation method for shallow water flow analysis. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.15, pp.1037-1057, 1992.
- 20) 津波浸水想定設定の手引き Ver.2.00: 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 2012.

(2014. 6. 20 受付)

CIVA-stabilized finite element method for tsunami numerical simulations

Yusuke TAKAHASHI, Masaaki SAKURABA and Kazuo KASHIYAMA

This paper presents a numerical method based on CIVA-Stabilized finite element method (CIVA-SUPG) for tsunami simulations. The Boussinesq equation is employed for the governing equation of motion. The equation system is divided into two phases; an advection phase and a non-advection phase. The equations for advection phase are solved by CIVA method, and the equations for non-advection phase are solved by a stabilized finite element method based on SUPG method. The present method is applied to several numerical examples to show the validity and efficiency.