

階層型連成シミュレータを用いた釜石湾における防波堤の破堤と浸水範囲に関する検討

有川 太郎

1. 概要

2011年に生じた東日本大震災は、沿岸部における津波・高潮等の自然外力に対する防護の方向性を、防災から減災へと転換するきっかけとなった。具体的には、低頻度で生じる非常に大きな津波に対しては、堤防のようなハード対策だけでなく、避難や事前計画といったソフト対策も合わせて、対応することとなった¹⁾。

他方、第5期科学技術基本計画において我が国が目指すべき未来社会の姿として Society 5.0 が提唱され²⁾、「必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細かく対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、生き活きと快適に暮らすことのできる社会」という超スマート社会を提唱している。そのような社会においては、災害時において、避難情報に資する情報を、人々に対して適切に示す必要があると考えられる。

また、国連の提唱する「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ/SDGs」を実現するための一つの Pathway を示すものとして、IIASA の出す一連の報告書³⁾のなかで、提示された6つの変革がある。その一つに Digital 革命があり、データに基づく社会が持続可能な社会を生み出すということを述べている。

そのような状況において、防災、とりわけ、避難についても、より緻密な情報に基づき避難するような仕組みになっていくだろうと考えられる。そのためには、浸水のデータバン

クや、リアルタイムの予測データなどの高精度化が必要となる。

一方で、災害の発生確率は低頻度であることから、機械学習のように代表されるような膨大なデータから予測するという手法では、堤防の破堤まで考慮したような緻密な浸水予測に対しては、データ数が少ないため、現状では難しい。そのため、堤防の破堤や建物の流出といったことを考慮できる数値計算手法による予測手法の開発が重要となるが、津波の発生から、構造物の破壊までを計算するためには、津波の伝播計算のための広い計算範囲かつ構造物の破壊が表現できる程度の詳細計算を同時に行う必要がある、すべての範囲で格子解像度を上げて計算することは、現状の計算機的能力では難しい。また、構造物の変形・破壊まで計算するためには、流体計算だけでなく、地盤や構造変形解析を行うことができる計算手法が必要となる。

そこで、三次元 Navier-Stokes 方程式と構造・地盤解析とを連成させたシミュレーションの開発が行われてきた^{4),5)}。一方で、津波波源域の流体計算に波動方程式を用いて、三次元 Navier-Stokes 方程式と連成させる開発も行われてきた^{6),7)}。そのうえで、波源から浸水、構造物の変形まで含めて一連に計算で

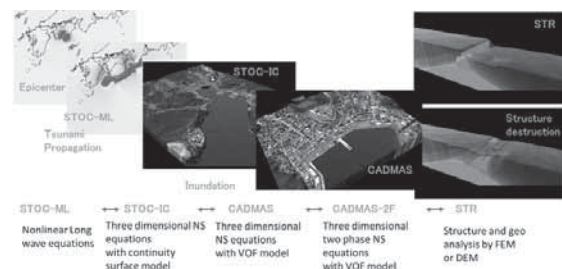


図 1 Multiscale Multiphysics Integrated Calculator for Storm surge and Tsunami (MMICST)

* 中央大学理工学部・教授

きる方法が開発されてきた (図 1)⁸⁾。

本報告では、様々なシミュレーションを連成させ、階層的に津波の発生・伝播・遡上・構造物の破壊・浸水状況の再現まで計算できる手法に関して、釜石湾口防波堤の破堤に焦点を当てて、これまで出された論文を再整理するとともに、連成計算による結果の妥当性について考察を行うものである。

2. 津波シミュレーションの歴史

2.1 津波伝搬計算の黎明期

津波の数値解析の経緯については、後藤 (1986)⁹⁾ にわかりやすくまとめられている。それによると、Ueno (1965)¹⁰⁾ による 1960 年のチリ津波の計算が、津波の数値計算としては、初めてのようである。そこでは浅水長波方程式を用いて、太平洋全域を対象としてチリから日本までの計算を行っており、格子サイズは 5 度 (最大で約 550km) で行われていた。Ueno の結論として、津波の到達時間は比較的によく一致し、また津波の高さが日本やハワイで高かった理由を明らかにしている。一方で、論文の図から推測すると、全格子数は 900 格子程度の計算領域だと思われるが、津波のエネルギーの発散や収束まで計算するには、当時の計算機では力不足だったとも述べられている。

2.2 津波伝搬計算の発展期から全盛期へ

近年の津波数値解析の傾向は、首藤 (1989)¹¹⁾ に記されている。当時から今日に至るまで、津波数値解析の最も重要な目標は沿岸に到達する津波の高さを精度良く、かつ、早く計算することである。今村ら (1986)¹²⁾ では、アラスカ沖地震津波の解析を 5 分の格子 (最大で約 9km) を用いて行っている。1965 年と比べるとおよそ 3600 倍の格子数である。Baba ら (2016)¹³⁾ は、京コンピュータを用い、約 1000 億格子数の計算を行っている。それによると、およそ 80000 ノード数を用いて、実時間にして 80 秒程度の計算を、20 秒の計算時間でできるとしている。これは、日本の

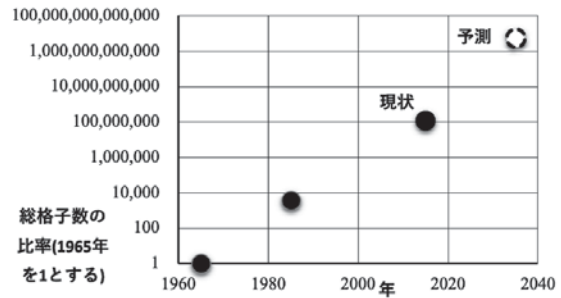


図 2 1965 年の総格子数を 1 とした場合における平面 2 次元計算の格子数の推移と予測

西日本沿岸部全体を約 2 メートルの格子サイズで計算しており、1965 年の計算から 50 年程度で、コンピュータの進歩とともに、計算できる量、速度、質が格段に向上したことがうかがえる。このままの速度でコンピュータが進化し続けると、20 年から 30 年後には、最新の計算機を用いて約 10^{16} 個つまり、1 京個の格子数を用いた計算が可能となるだろう (図 2)。

その間、方程式の分散性の影響など、方程式そのものも進歩する、一方で、波源推定に関する研究もかなり進められ、津波の発生、伝播計算を行い、沿岸部に到達する津波の高さを推定するという技術については、首藤 (1989)¹¹⁾ の目指したおおよその目標を達成したのではないかとと思われる。

およそ 60 年のなかで、平面 2 次元計算を用いた津波伝搬計算の手法は成熟したが、一方で、社会の様子も、堤防の建設、背後地の資産の増大など、当時からずいぶんと変化した。その変化は、より緻密な災害予測による準備を必要とし、技術的にもそのようなきめ細やかな予測ができる技術が重要となってきた。そこで、波源から浸水、そして破壊まで一連で計算できる手法の開発に取り組んでいる。以下では、その手法の概要を示す。

3. 連成シミュレーション手法

津波の波源から構造物の破壊まで一連の計算を行うため、5 つの異なるシミュレー

ションを連成させている (図 1)。まず、津波の波源から伝播までは、静水圧を仮定した多層の非線形長波方程式 (STOC-ML) を用い、それと海表面を VOF 法で計算する単相の Navier-Stokes 方程式 (CADMAS-SURF/3D) を接続させるが、間にバッファとなるよう、連続式から海表面を計算する単相の Navier-Stokes 方程式 (STOC-IC) を入れている。さらに、気相の影響を考慮するため、単相の VOF 法と気液 2 相の VOF 法 (CADMAS-2F) を接続し、最後に FEM で計算される構造・地盤計算 (STR) と接続した。ここでは、Multiscale Multiphysics Integrated Calculator for Storm surge and Tsunami (MMICST) と呼ぶ。

2.1 基礎方程式

(1) STOC-ML

基礎方程式は、デカルト座標系で記述された連続方程式 (式 (2.1)), x 方向運動方程式 (式 (2.2)), y 方向運動方程式 (式 (2.3)), 静水圧式 (式 (2.4)), 自由表面の式 (式 (2.5)) であり、 z 方向流速は連続の式から決定している。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w) = 0 \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y v u) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w u) - f_0 v \\ = -\gamma_v \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_H 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w v) + f_0 u \\ = -\gamma_v \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_H \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_y \nu_H 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_v \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \quad (2.4)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \quad (2.4)$$

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad (2.5)$$

ここで、 x, y, z はデカルト座標系の軸方向の座標、 u, v, w は、 x, y, z 軸方向の流速、 η は水位変動、 h は基準水面からの水深、 ρ は水の密度、 p は圧力、 γ_v は有効体積多孔率 (メッシュの液相の体積率: $0.0 \leq \gamma_v \leq 1.0$)、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は、 x, y, z 方向の有効面透過率 (断面を占める液相の面積率: $0.0 \leq \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z \leq 1.0$)、 g は重力加速度、 ν_H は水平方向の動粘性係数、 ν_v は鉛直方向の動粘性係数、である。

(2) STOC-IC

STOC-IC は非静水圧モデルであり、式 (2.4) に代わり、鉛直方向にも Navier-Stokes 方程式 (式 (2.6)) を用いる。

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\gamma_x u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\gamma_y v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\gamma_z w w) \\ = -\gamma_v \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma_v \frac{\rho}{\rho_0} g_z + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

(3) CADMAS-SURF/3D および CADMAS-SURF/3D-2F

CADMAS-SURF/3D は、単相のモデルであり、基礎方程式には、3 次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式を用いる (式 (2.7) ~ (2.10))。自由表面解析モデルには、複雑な表面形状を解析可能である VOF 法を用いる (式 (2.11))。一方で、気液 2 相モデルである CADMAS-SURF/3D-2F においては、気相の密度 ρ_G の計算を行っている。圧縮性の導入により時間的・空間的に分布を持ち、気相密度の実質微分である $\dot{\rho}_G$ は式 (2.12) に従う。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho - \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & -u \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uv}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vv}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wv}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & -v \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \\ & -\gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vw}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & -w \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \\ & -\gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = \gamma_v S_F \quad (2.11)$$

$$\dot{\rho}_G = \gamma_v \frac{\partial \rho_G}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial \rho_G}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial \rho_G}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial \rho_G}{\partial z} \quad (2.12)$$

ここで、 S_f は造波のためのソース項、 ρ^* は浮力を考慮する密度、 p は圧力、 v_e は分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和であり、また、 λ_v 、 λ_x 、 λ_z は C_M を慣性力係数として、式(2.13)のように表される。

$$\begin{aligned} \lambda_v &= \gamma_v + (1-\gamma_v)C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1-\gamma_x)C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1-\gamma_y)C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1-\gamma_z)C_M \end{aligned} \quad (2.13)$$

また、 D_x 、 D_y 、 D_z はエネルギー減衰帯のための係数、 S_ρ 、 S_u 、 S_v 、 S_w は造波ソースのためのソース項であり、多孔質体からの抵抗力 R_x 、 R_y 、 R_z は、 C_D を抵抗係数として、式(2.14)のように流速の 2 乗に比例する形でモデル化する。

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1-\gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1-\gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1-\gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

ここで、 Δx 、 Δy 、 Δz は x 、 y 、 z 方向の格子間隔である。

(4) STR

ここでは、構造物ならび地盤の変形計算を行い、流体側から圧力を受け取り、それによる変形量を流体側に送信している。流体は変形に応じた空隙率の変化を時々刻々計算し、構造物側の変形の影響を計算する。基礎式は、式(2.15)となる。

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_{si}}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j} + \rho_s \ddot{a} \quad (2.15)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 ρ_s は質量密度、 \ddot{a} は外力加速度、 u_s は変位である。地盤の場合には、式(2.16) および式(2.17) で計算を行う。

$$\rho \frac{\partial^2 u_{si}}{\partial t^2} = \sigma_{ij,j} + \rho g \quad (2.16)$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + p' I_{ij} \quad (2.17)$$

ここで、 ρ は地盤の密度であり、式(2.18)で計算される。 σ'_{ij} は有効応力テンソル、 p' は空隙水圧、 I_{ij} は単位テンソルである。

$$\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f \quad (2.18)$$

ここで、 n は、間隙率、 ρ_s は土粒子の密度、 ρ_f は間隙水の密度である。

地盤内の浸透流解析も行い、運動方程式および質量保存式を以下に示す。

$$\dot{\mathbf{w}} = k(-\nabla p + \rho_f \bar{\mathbf{g}} - \rho_f \ddot{\mathbf{u}}) \quad (2.19)$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{w}} = -\nabla \cdot \dot{\mathbf{u}} - C_{kf} \dot{p} \quad (2.20)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{w}}$ は、地盤に対する間隙水の相対変位、 k は、透水係数、 $C_{kf} = n/k_f$ であり、 k_f は、間隙水の体積弾性係数である。

3.2 連成計算方法

STOC-ML と STOC-IC については、富田・本多⁷⁾に、STOC と CADMAS の連成については、有川・富田⁶⁾に、CAMAS-SURF/3D-2F と STR の連成については、有川ら⁴⁾にそれぞれ詳細に記載されている。また、CADMAS-SURF/3D と CADMAS-SURF/3D-2F の連成については、STOC-IC と CADMAS-SURF/3D の連成方法と同じ方法を用いている。CADMAS-SURF/3D-2F の水面より上の気相部分の境界条件については、水面のすぐ上の位置では水面と同じ流速境界条件とし、それよりも上空側では流入出なしの条件としている。

3.3 越流時における防波堤の滑動試験の検証

(1) 計算条件

越流による防波堤の破壊について、有川ら(2012)¹⁴⁾の物理試験と比較を行った。計算手法は、CADMAS-SURF/3D と STR とのカップリングシミュレーションとなる。図3は、CADMAS-SURF/3D の計算断面であり、格子サイズは $x=y=z=0.010\text{m}$ とした。

構造物側のケーソンは、ヤング率 2.35×10^{11} 、ポアソン比 0.333、密度 2.349g/cm^3 、マ

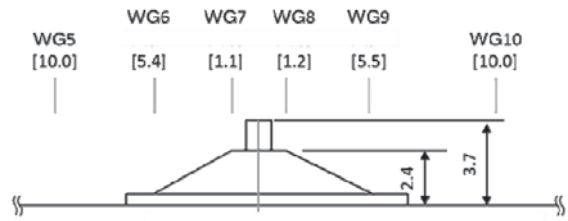


図3 CADMAS-SURF/3D の計算領域断面図

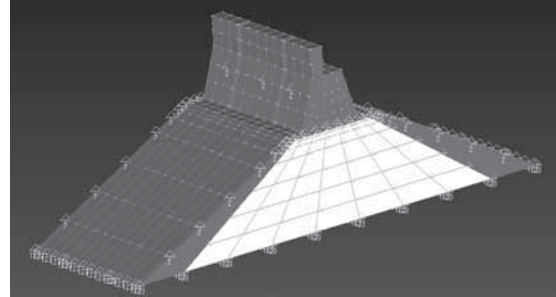


図4 構造物側のメッシュの様子

ウンドは、密度 2.135g/cm^3 、静摩擦係数 0.6、動摩擦係数 0.2 とした。構造物のメッシュについて、図4に示す。また、マウンドは不透過として計算を行った。

(2) 結果

図5に計算におけるケーソンが滑動する瞬間のスナップショットを示す。参考のため、図6に、水理模型実験のケーソンの滑動の様子を横からと上からのスナップショットを示す。これをみると、両端のケーソンと中央のケーソンは、ほぼ同時に動きだしているものの、端のケーソンのほうが移動距離が長いことがわかる。一方で数値計算では中央のケーソンのほうが移動距離が長かった。図7に水位差の時系列比較を示す。計算時間短縮のため、水位上昇速度を実験よりも早くしたことにより、ピーク発生時間に差が生じているが、実験とよく一致していることがわかる。

したがって、端と中央部でケーソンの動きが異なるところまでは忠実に再現できていないが、動き出す瞬間は、よく計算できていることになる。そのため、マウンドの浸透による支持力低下や、マウンドの変形などの影響を計算に適切に再現することで、そのようなケーソンの挙動の再現性を高められるかどうかを検証することが、今後の課題である。

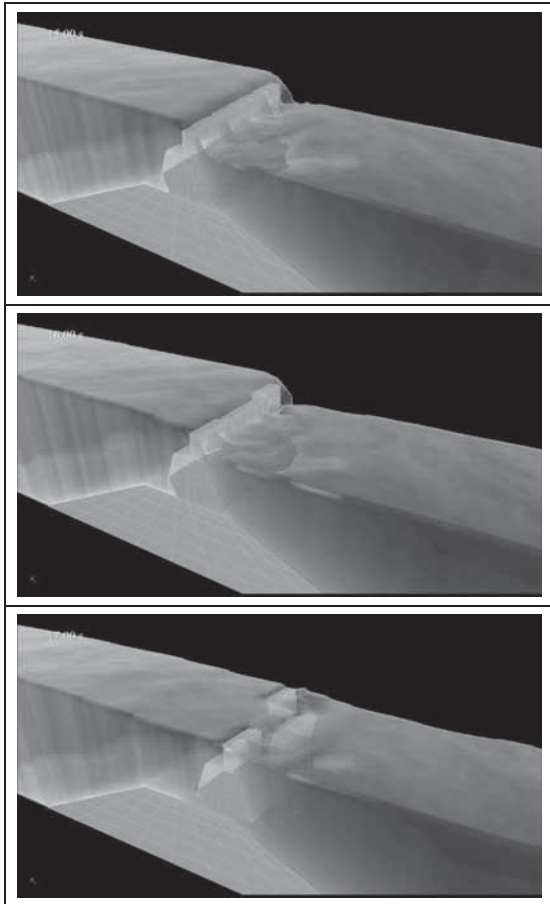


図 5 ケーソンが動く瞬間のスナップショット

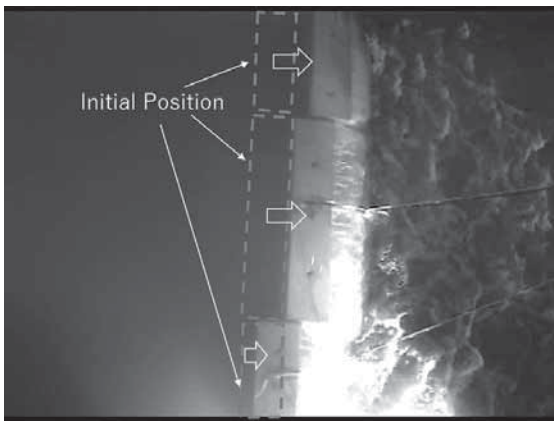


図 6 ケーソンが動く瞬間のスナップショット (水理模型実験の結果, 上から見た図)

4. 釜石湾港防波堤の破堤検証

MMICST を用いて釜石湾口防波堤の東日本大震災時の倒壊現象の再現計算を行った。図 8 は、釜石湾における防波堤の被災前の配置図である。

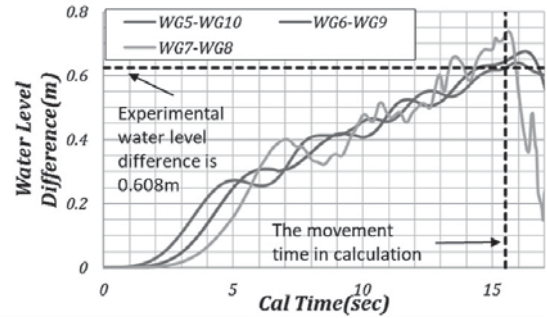


図 7 数値計算と実験の防波堤前後の水位差の比較

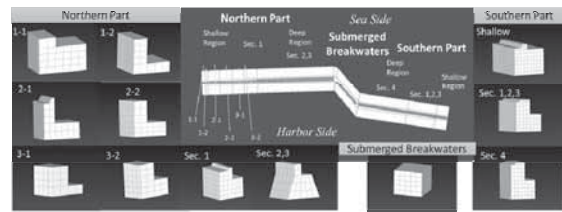


図 8 釜石湾港防波堤の工区と数値モデル



図 9 計算領域図 (8+STR とある領域に CADMAS-SURF と STR の連成領域が設定されている)

北側に位置する防波堤は全延長 990m、南側は 670m の延長であり、さらに 330m の開口部には潜堤が設けられている。防波堤の天端高は D.L.6.0m (T.P.5.2m) であり、深部側のケーソンでは、深さ 60m から 27m まで砕石マウンドで形成されている。東日本大震災時には、およそ半分程度流された (有川ら, 2011)¹⁵⁾

4.1 計算条件

(1) 入力データ

図 9 には、計算領域を示す。計算時間の関係から、もっとも外側の領域からの計算ではなく後述するように、計算領域 1 の東側 (右側) 境界から津波を与える形式で、計算を行うこととした。計算時間は、30 分の物理時間の計算を行うのに、60 日以上かってお

表 1 各計算領域におけるシミュレータの種類、格子数、計算 CPU 数

Domain Number	Solver	Grid size(m)	Number of Cells (X)	Number of Cells (Y)	Number of Cells (Z)	Number of CPUs
1	STOC-ML	200	108	141	1	1
2	STOC-ML	100	166	110	1	1
3	STOC-ML	50	240	150	1	1
4	STOC-ML	10	1100	690	1	1
5	STOC-ML	10	410	500	1	1
6	STOC-IC	10	330	400	1	1
7	CADMAS-MG	10	260	300	52	70
8	CADMAS-2FC	5	400	480	52	240
STR	STR	表 2 を確認				

表 2 構造物の物理パラメタ

Type	Position	Depth	Section Name	Number of Caissons	Material	Young Modulus	Shear Modulus	Poisson ratio	Density [kg/m ³]	
Breakwater	North	Shallow	1-1	2	Concrete without porosity	2.35x10 ¹⁰	8.815x10 ⁷	0.333	2010	
			1-2	1					2040	
			2-1	6					2010	
			2-2	6					2020	
			3-1	6					2030	
			3-2	1					2000	
	Deep	1	3	1980						
		2, 3	19	1980						
	Submerged			13					1900	
	South	Shallow	1, 2, 3	3					2090	
			Deep	1, 2, 3					7	2030
				4					12	1980
	MoundMound									Foundation with porosity

り、物理時間との比は、約 3000 倍程度であった。表 1 に、各計算領域における格子サイズなどを示す。流体側の最小領域の格子サイズは 5m とした。

図 8 に、防波堤の計算用の図面を示す。ここでは、計算の安定性を鑑みて、ケーソン前面にあるスリット部は無視してモデル化を行った。また、表 2 にケーソンの名前と材料特性を示す。なお、ケーソンとマウンドの摩擦係数は、基本的には静止摩擦係数 0.6、動摩擦係数 0.4 とした。北側の 3-1 工区には摩擦増大マットが敷設されていたため、静止摩擦係数を 0.8、動摩擦係数を 0.6 と設定した。

(2) 入射条件

東日本大震災時に、釜石湾沖で得られた GPS 波浪計 (39° 15′ 31″ E, 142° 05′ 49″ N) のデータを用いて、入射データを作成し、計算領域 1 の STOC-ML の領域の外側境界に設定した (図 10)。

ただし、計算時間の短縮のため、図 11 に示すとおり、最初の 15 分のデータを削った。また、防波堤の前後の水位差を、有川ら (2011)¹⁵⁾ の水位差と一致させるために、入射データを 1.3 倍して計算を行った。

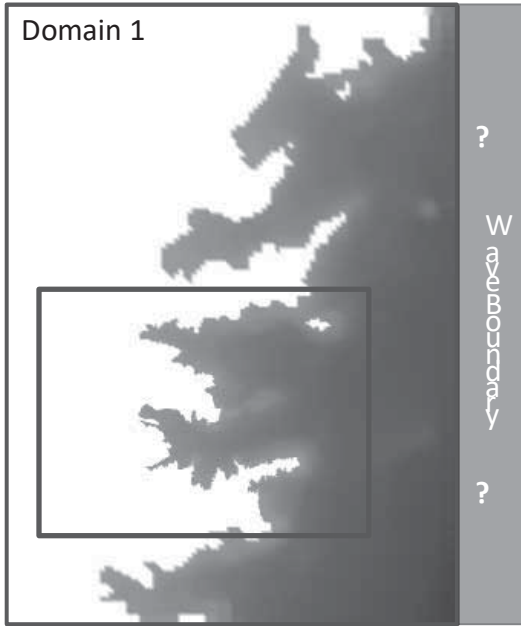


図 10 入射境界と計算領域の関係

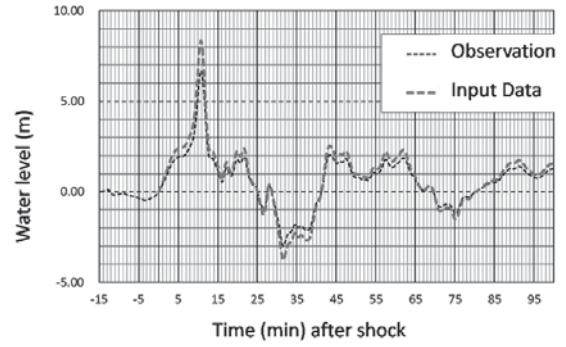
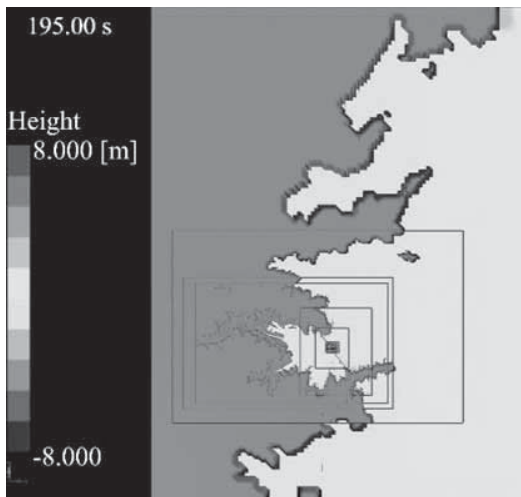
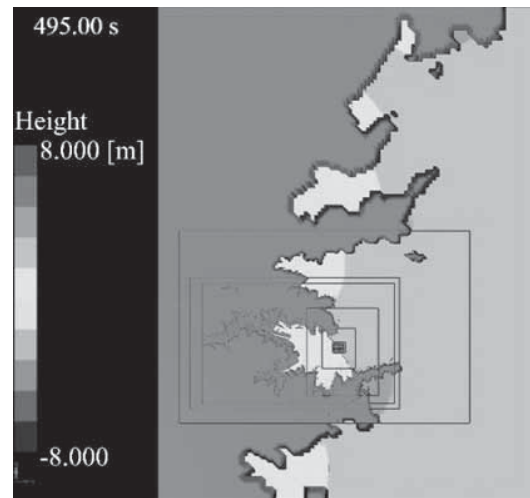


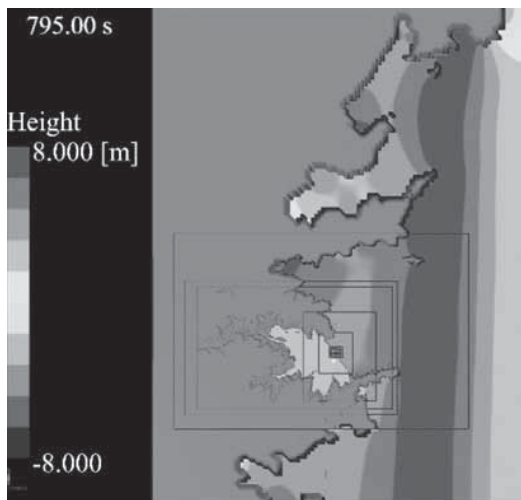
図 11 入射波データ (赤) と観測値 (黒) の比較, 入射波データは, 観測値を 1.3 倍し, 最初の 15 分をカットした



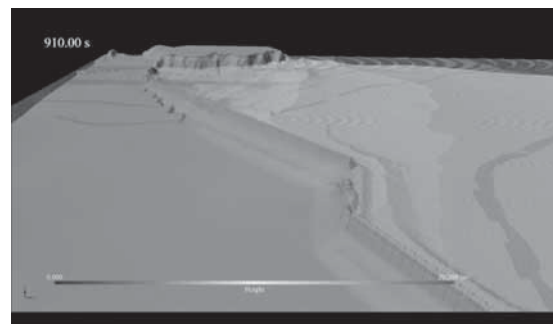
C.T.195_s_(1095_s), L.T.15:04:33



C.T. 495_s_(1395_s), L.T.15:09:33



C.T. 795_s_(1695_s), L.T. 15:14:33



C.T. 905_s_(1805_s), L.T. 15:16:23

図 12 津波伝播の様子と, 計算領域 8 におけるスナップショット (C.T.: 計算時間, L.T.: 現地時間), 計算領域 8 の構造物の破堤の様子は図 13, 14 に示す。

4.2 計算結果

(1) 津波の伝搬について

図 12 に津波の伝播している様子のわかるスナップショットを示す。これによると、30 分弱で防波堤近傍まで津波が伝播している様子がわかる。また、数値計算がうまく連成され、安定して計算が行われている様子がわかる。

(2) 潜堤の流出について

潜堤の流されていく様子を図 13 に示す。これをみると、およそ地震発生後 30 分から流出しはじめ、20 秒程度で流れ出し終えていることがわかる。湾口部の流速は 10m/s を超えており、それは、有川ら (2011)¹⁵⁾ の結果とも整合する。また、ケーソンよりも潜堤のほうが早く流出していることも、その考察と一致している。

(3) 北側のケーソンの倒壊について

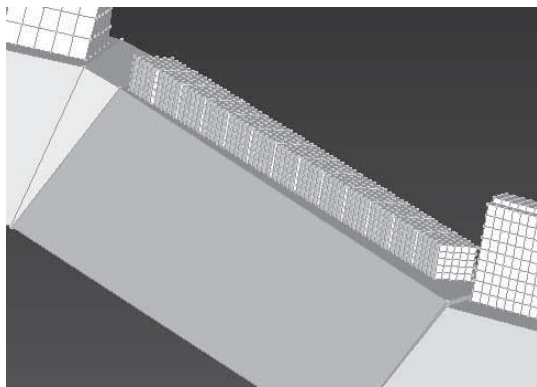
北側防波堤におけるケーソンの前面、背面の水位差を図 14 に示す。それによると、計

算時間において 970 秒付近で水位差が 9.0m 程度となり、ケーソンが倒壊し始め、30 秒程度のなかで徐々に倒壊していったことが図 15 からわかる。また、破壊の様子からもわかるとおり、より北側の浅い部分から流れはじめ、ついで、深い部分のケーソンが流れていっており、これは、これまでの考察とも一致する (有川ら, 2011)¹⁵⁾。

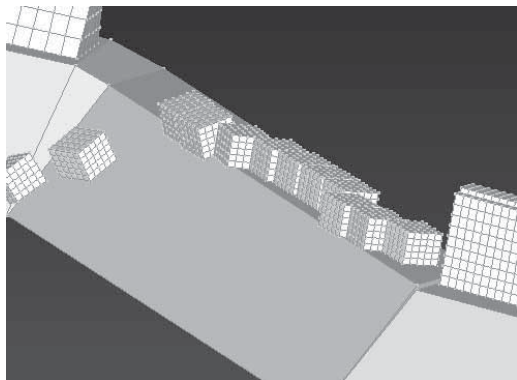
(4) 浸水計算の妥当性

最後に浸水計算の妥当性の検証を行った。MMICST シミュレーションを用いた場合のケースについて、図 16 に A ~ I における痕跡値と MMICST の結果を比較した、また浸水の空間分布を図 17 に示す。

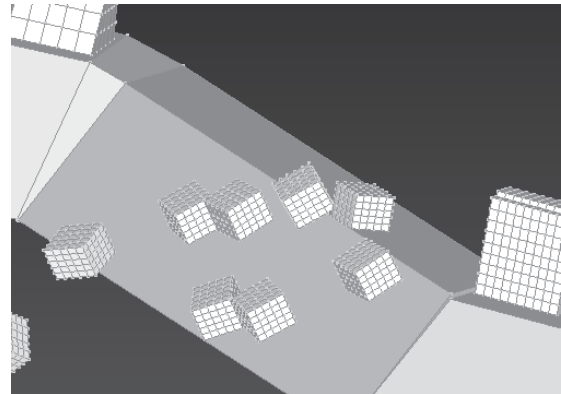
これをみると、痕跡高より全体的に高めであることは、入射データを 1.3 倍していることが影響していると考えられるが、痕跡値と



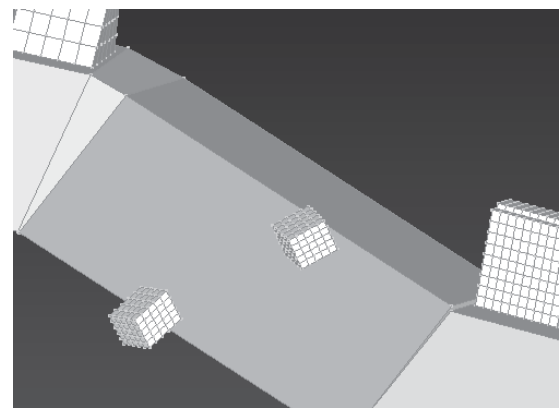
C.T.900_s_(1800_s), L.T.15:16:18



C.T. 910_s_(1810_s), L.T. 15:16:28



C.T. 920_s_(1820_s), L.T. 15:16:38



C.T. 930_s_(1830_s), L.T. 15:16:48

図 13 計算領域 8 における潜堤の流出の様子 (C.T.: 計算時間, L.T.: 現地時間)

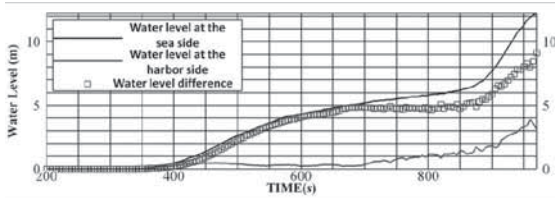
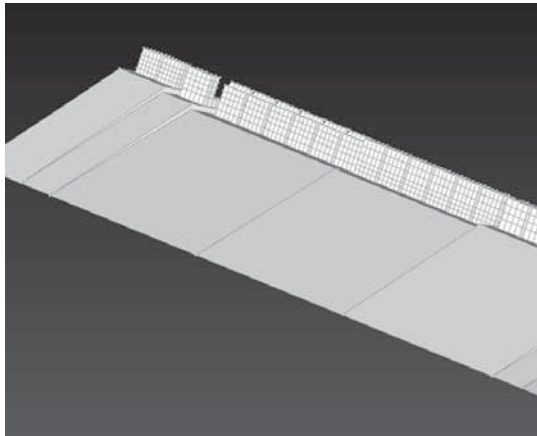


図 14 北側防波堤の前後の水位差の時系列

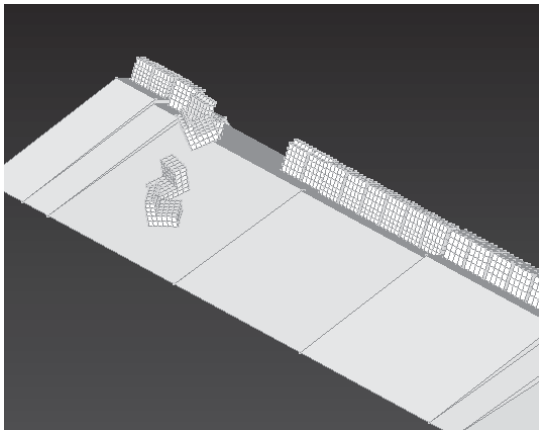
傾向は一致していることがわかる。H 点については、前面構造物の影響が大きいと推測している。従って、防波堤の倒壊状況が、現地状況と整合していることが考えられ、シミュレータの妥当性が示された。今後、計算機がより速度を増すことで、波源から浸水域の破壊までを、より実用的に計算できれば、さらに詳細な検討が可能となることが期待される。

5. 結論

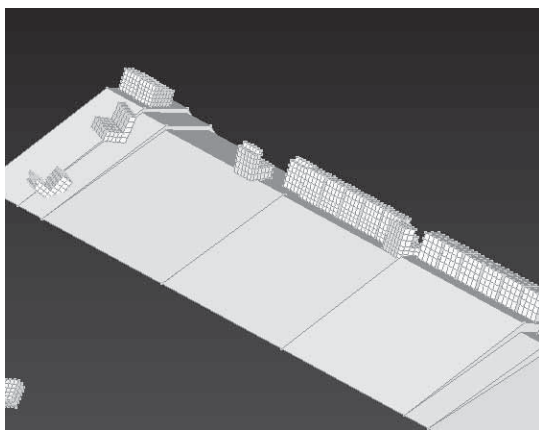
1965 年のシミュレーションによる津波解析は、45 年の経過の中で 3 次元の流体シミュレーションと構造変形シミュレーションを連成し、構造物の破壊計算までできるようにな



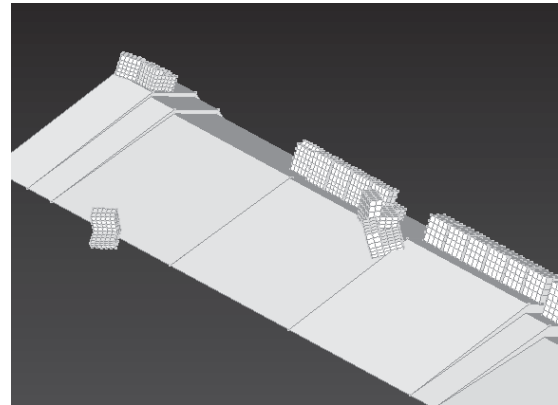
C.T. 970_s_(1870_s), L.T. 15:17:28



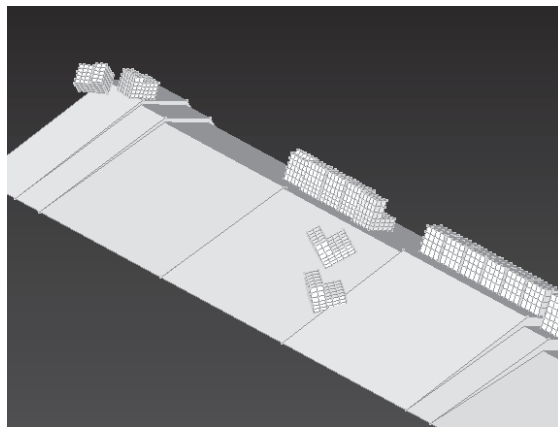
C.T. 985_s_(1885_s), L.T. 15:17:43



C.T. 995_s_(1895_s), L.T. 15:17:53



C.T. 1005_s_(1905_s), L.T. 15:18:03



C.T. 1005_s_(1905_s), L.T. 15:18:03

図 15 計算領域 8 におけるの北堤ケーソンの流出の様子 (C.T.: 計算時間, L.T.: 現地時間)

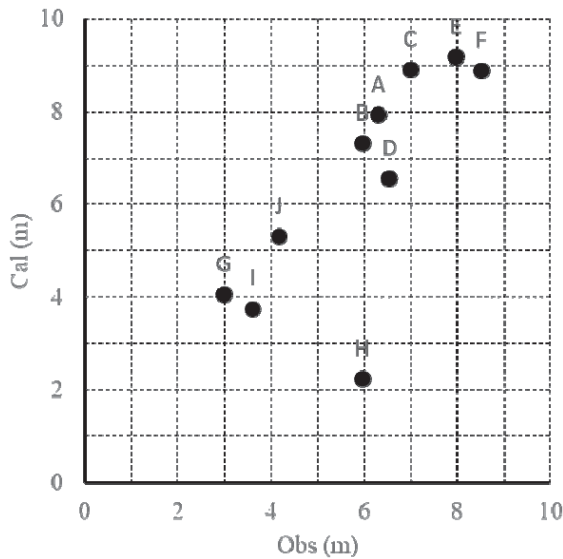


図 16 浸水深の痕跡値との比較

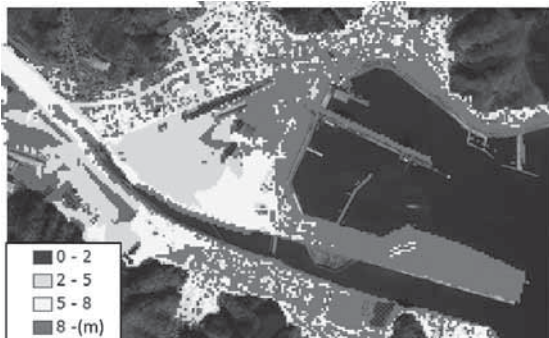


図 17 MMICST モデルで計算した浸水範囲の様子

りつつある。本稿では、釜石湾口部の防波堤の倒壊現象ならびにそれに伴う浸水計算を実施し、整合する結果が得られた。

マウンド内の浸透や破壊、洗掘現象などの影響を考慮できるようになることが今後の課題となるが、それらについても、徐々に個別の結果が得られつつあると考えており、近い将来には、すべての物理現象を組み合わせた

計算が可能となると期待している。

一方で、計算精度を向上させていくためには、波源そのものの精度は言うまでもなく、海底地盤のデータ、地盤内部のデータや、陸上部の建物など、より詳細な入力データも必要となる。モニタリング技術、計測技術の自動化も合わせて検討すべきである。そのうえで、デジタル化時代に向けた避難支援やまちづくりに活用していきたい。

謝辞

本稿を記載するにあたり、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。港湾空港技術研究所の下迫健一郎氏、高川智博氏、千田 優氏、防災科学研究所の青井 真氏、鈴木 亘氏には、様々なご教示ならびにご支援をいただきました。また、数値計算において、株式会社水域ネットワークの関 克己氏、中央大学工学部海岸・港湾研究室の学生諸君のサポートをいただきました。ここに記し、感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会（中間とりまとめ）、平成 23 年 6 月 26 日、http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/toshinetsu/saigai_taisaku_wg/001_s02_00.pdf, 2011
- 2) 文部科学省：科学技術基本計画，平成 28 年 1 月 22 日，https://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/kihon/main5_a4.htm
- 3) Sachs, J.D., Schmidt-Traub, G., Mazzucato, M. et al. (2019) : Six Transformations to achieve the Sustainable Development Goals. Nat Sustain 2, 805–814. <https://doi.org/10.1038/s41875-019-0051-4>

- org/10.1038/s41893-019-0352-9
- 4) 有川太郎, 浜口一博, 北川和士, 鈴木智憲: 数値波動水槽と構造物変形計算との連成計算手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.I_866-I_870, 2009.
 - 5) 有川太郎, 秋山 実, 山崎 昇: 数値波動水槽と DEM のカップリングによる固気液 3 相計算システムの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_21_I_25, 2011.
 - 6) 有川太郎, 富田孝二: 階層型シミュレーションによる高精細津波遡上計算手法の開発, 港湾空港技術研究所報告, Vol.53, No.2, pp.3-18, 2014.
 - 7) 富田孝史, 本多和彦, 高潮津波シミュレー (STOC) による津波被害解析手法, 港湾空港技術研究所報告, Vol.55, No.2, pp.3-33, 2016.
 - 8) T. Arikawa, Y. Chida, K. Seki, T. Takagawa, and K. Shimosako, "Development and Applicability of Multiscale Multiphysics Integrated Simulator for Tsunami," J. Disaster Res., Vol.14, No.2, pp. 225-234, 2019, DOI: 10.20965/jdr.2019.p0225
 - 9) 後藤智明 (1986): 津波数値計算, 水工学に関する夏期研修会講義集, 第 22 回, 土木学会, p.B.3.1-21
 - 10) T. Ueno (1965): Numerical computation for the Chilean Earthquake Tsunami, *Oceanogr., Mag.*, vol17., p. 87-94
 - 11) 首藤伸夫 (1989): 津波の数値計算, 土木学会論文集, 第 411 号 /II-12, p.13-23
 - 12) 今村文彦・後藤智明・首藤伸夫 (1986): 1964 年アラスカ津波の外洋伝播, 第 33 回海岸工学講演会論文集, p.209-213
 - 13) T. Baba et. al (2016): Large-scale, high-speed tsunami prediction for the Great Nankai Trough Earthquake on the K computer, *The International Journal of High Performance Computing Applications*, Vol. 30 (1) p.71-84
 - 14) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 長谷川巖, 稲垣茂樹, 佐藤正勝, 下澤治: 東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_826-I_830, 2012.
 - 15) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉慶善, 高橋研也 (2012): 釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討 - 水理特性を中心とした第一報 -, 港湾空港技術研究所資料, No.1251, 52p.