

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.53 No.2 June 2014

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 53 卷 第 2 号 (Vol. 53, No. 2) , 2014 年6月 (June 2014)

目 次 (CONTENTS)

1. 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 有川太郎, 富田孝史 3
(Development of High Resolution Tsunami Runup Calculation Method Based on a Multi Scale SimulationTaro ARIKAWA, Takashi TOMITA)

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

有川 太郎*・富田 孝史**

要 旨

津波災害は、特定地域における浸水被害ではなく、広域にわたって破壊を伴う大災害となりうる
ことが、2011年に生じた東日本大震災によって示された。また、陸域には様々な構造物があること
から、それらの構造物の被害を評価するためには、3次元的な流体運動を高精細に評価する必要が
ある。しかし、高精細な3次元流体解析は計算コストも大きい。そのため、波源から遡上までを効
率良く計算する手法として、STOC(富田ら、2005)ならびに、CADMAS-SURF/3D(有川ら、2005)を接
続する手法を開発し、その妥当性を検証することを本研究の目的とする。

妥当性については、東日本大震災時の女川地区の計算を行い、観測データとの比較でその妥当性
を確認した。また、建物の流出状況の検討を行った。

キーワード：津波，STOC，CADMAS-SURF，遡上計算，スーパーコンピュータ

* 海洋研究領域耐波研究チーム上席研究官

** アジア太平洋沿岸防災研究センター 副センター長・事務局長
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 E-mail：arikawa@pari.go.jp

Development of High Resolution Tsunami Runup Calculation Method Based on a Multi Scale Simulation

Taro ARIKAWA*

Takashi TOMITA**

Synopsis

In order to evaluate the damage due to giant tsunamis, influence of destruction of structures, debris, etc. is required. The power of the tsunami is greatly different depending on the place and the condition. Three dimensional numerical simulator should be required to analyse overflow, scour, flood into buildings and so on. Because the calculation cost of this kind of simulator is very high, nesting and coupling methodology with kind of wave equation is needed. So, the system which connects tsunami propagation simulator and 3-D numerical simulator should be developed. In this paper, accuracy and effectiveness of this coupling system is discussed by using the field data of damage by the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011 in Onagawa area. The STOC-CADMAS system calculates detailed inundation processes occurring in a town from a tsunami's source location.

Applicability of this system verified in Onagawa town. The agreement of observation data indicated that the system works well and the accuracy of the inundation height is depend on mainly tsunami source. The CS3D system also calculates the wave pressures and the forces attacking on the building. So criteria of overturning of building were verified.

Key Words: arrival time, delayed propagation, ocean-water compressibility, solid-earth elasticity, tsunami, wave dispersion

* Research Director, Marine and Structures Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division

** Deputy Director-General, Managing Director, Asia-Pacific Center for Coastal Disaster Research
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 E-mail : arikawa@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 実験概要及び計算概要	7
2.1 計算システムの概要	7
2.2 連成方法	7
(1) 通信方法	7
(2) ST0CからCS3Dへの通信	7
(3) CS3DからST0Cへの通信	8
2.3 テスト計算	8
(1) 計算条件	8
(2) 結果	9
3. 現地地形を用いた津波計算の精度	9
3.1 対象とした地形と計算条件	9
(1) 計算領域諸元	9
(2) 津波波源	9
3.2 計算結果	10
(1) 各領域でのスナップショット	10
(2) 津波伝搬におけるGPS波浪計との比較	11
(3) 浸水高の比較	12
(4) 浸水高と流速の時系列の比較	14
(5) 波力の検討	14
4. プログラムの実行性能	15
4.1 各プログラムの同期処理	15
4.2 プログラムの負荷バランスの検討	15
(1) 検討ケース	15
(2) スレッド並列化による高速化	16
(3) 各領域の計算負荷のバランスによる高速化	16
5. まとめ	17
謝辞	17
参考文献	18

1. はじめに

津波災害は、特定地域における浸水被害ではなく、広域にわたって破壊を伴う大災害となりうる可能性があることが、2011年に生じた東日本大震災によって示された。また、陸域には様々な構造物があることから、それらの構造物の被害を評価するためには、3次元流体力学運動を高精度に評価する必要がある。これまで、線形長波方程式、非線形長波方程式および分散性を含めた方程式を用いて、津波伝搬・遡上計算をしている研究は数多く存在する。一方で、3次元のナビエ-ストークス方程式に基づいた計算手法を用いて、遡上部のみの計算や局所的な地形のみの計算も多く存在する。3次元計算において、津波伝搬から遡上まで一連に解いた計算は、計算コストが大きすぎるため、現在までのところその事例はなく、また、波動方程式と接続し、3次元計算を行う場合において、そのほとんどが、波動方程式の結果を境界として与える1way計算であり、双方向の接続を行い、長時間の遡上計算を行った事例は存在しない。そこで、本研究では、波源から遡上までを効率良く、かつ双方向計算することで長時間の津波の挙動を計算する手法として、STOC(富田ら, 2005)ならびに、CADMAS-SURF/3D(有川ら, 2005)を接続する手法を開発し、その妥当性を検証することを目的とする。

2. 実験概要および計算概要

2.1 計算システムの概要

STOC-CADMAS システムは、STOC-ML→STOC-IC→CADMAS-SURF/3D(以下、CS3D と呼ぶ)の3つの異なるシミュレータを連成させることで、津波の発生源から街中に生じる細かな浸水過程を計算するものである(図-2.1)。

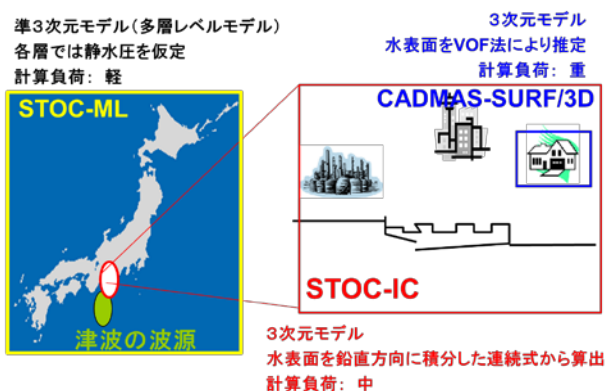


図-2.1 STOC-CADMAS システムの概念図

STOC-ML は、圧力を静水圧で近似し、また、水表面の決定を連続式から算出することで、計算コストを下げたシミュレータであり、主に、発生源の近くからある程度の浅さまでを計算するものである。STOC-IC は、より浅く、複雑な地形の変化に対応するため、圧力をポアソン方程式により解くが、水表面は連続式から決定することで、若干計算コストを抑え、港付近を計算するシミュレータである。最後に CS3D は、越流や段波といった複雑な表面を持つ遡上域に対応するため、Navier-Stokes 方程式を解き、また水表面を VOF 法によって決定するシミュレータである。それらを連成させることで津波の発生源から街中の浸水まで効率よく計算する。

2.2 連成方法

(1) 通信方法

STOC-ML, IC ならびに CS3D は図-2.2のような形で連成計算される。すべてにおいて MPI 通信で行うことになっている。ML, IC, CS3D とともに、その領域を領域分割することができるが、異なる計算方法が入っている場合(たとえば、MLの領域のなかに、ICが入っている場合)には、異なる計算方法を含む親領域は、分割することができない仕組みとなっている。したがって、CS3Dの領域がある程度大きくなった場合には、それを包含する IC も結果として 1 領域で大きくなることとなる。

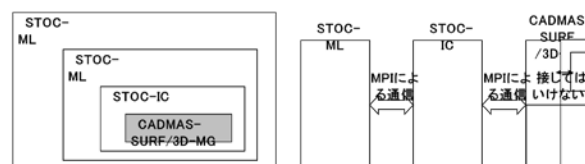


図-2.2 MPMD 方式による連成

(2) STOC から CS3D への通信

CS3D 側では、領域の最外周部を流速固定境界とみなし、STOC から流入面のセル中心の流速値ならびに VOF 関数の F 値を送信する(図-2.3)。

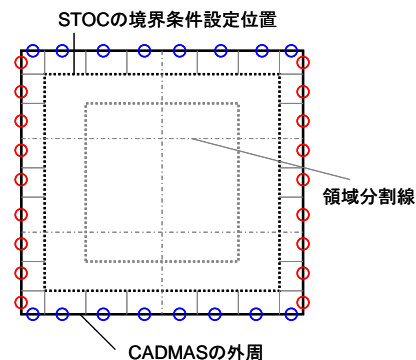


図-2.3 STOC から CS3D への変数送信

データサイズは STOC 側のメッシュサイズで 2 次元断面分×4 面×4 変数となる。流速値については、STOC から受け取った値を対応する複数の位置に一律に与え、F 値については、F=0, 1 の場合にはそのままの値を与え、 $0 < F < 1$ となる場合には、鉛直方向の F 値の積分した値が、STOC 側の水位と一致するように、水面セルより下は 1、水面セルより上は 0 になるようにして、下から順に F 値を与える。

(3) CS3D から STOC への通信

STOC 側では、CS3D 側の 1 セル分内側の位置を流速固定境界とみなし、CS3D から流入面のセル中心の流速値の F 値で重み付けを行った平均値と、流量(HU, HV)の値の合計値を与える (図-2.4, 図-2.5)。

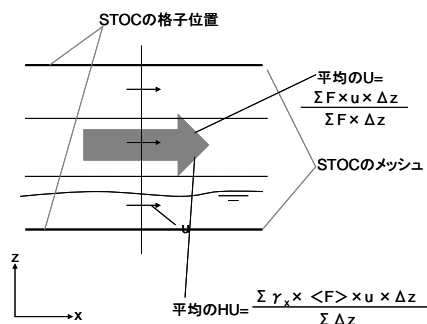


図-2.4 変数の定義(平均流速・流量)

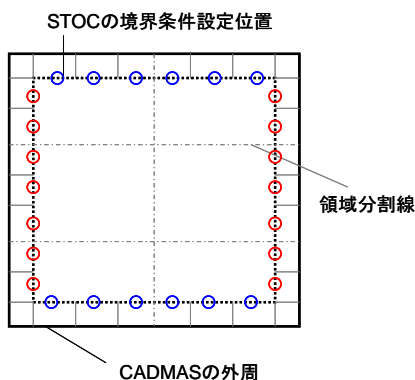


図-2.5 STOC から CS3D への変数送信(流速, 流量)

HU, HV は,

$$HU = \gamma_x \langle F \rangle U \quad (1)$$

$$HV = \gamma_y \langle F \rangle V \quad (2)$$

で定義される法線方向の流量であり、ここで、 γ_x, γ_y は x および y 方向の面積透過率であり、 $\langle F \rangle$ は F 値の積分値である。データサイズは STOC 側のメッシュサイズで 2 次元断面分×4 面×4 変数となる。

また、STOC の運動方程式のセル境界面のフラックスを計算する際に、表面セルでは水位が必要となるため、

図-2.6 のように CADMAS の内側領域の水位の平均値を STOC に送信する。データサイズは 1 次元配列×4 列分となる。

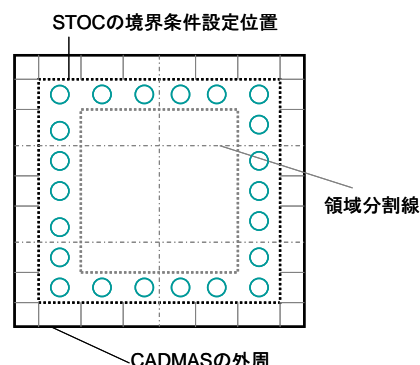


図-2.6 CS3D から STOC への変数送信(水位)

2.3 テスト計算

(1) 計算条件

図-2.7 に示す計算領域において、左側境界から微小振幅波 (半振幅: 0.01m, 波長: 125.21m, 周期: 40 秒, 水深: 1.0m) を入射させた場合の波で計算を行った。CS3D は、図-2.7 のうち「CS3D 領域」と示した部分を計算し、STOC は、残りの領域を計算した。

初期条件は水位を 0m (底面高さは -1m のため、水深は 1m)、流速を 0m/s、STOC の z 方向格子点座標として $z = (-1.0, -0.75, -0.5, -0.25, 0.0, 0.25, 0.5)$ とした。計算時間は 0~80 秒とし、格子条件は、格子の粗さによる影響をみるために表-2.1 のとおり 2 ケース行った。また、ケース 1 は $\Delta t = 0.025s$ 、ケース 2 は $\Delta t = 0.01s$ とした。

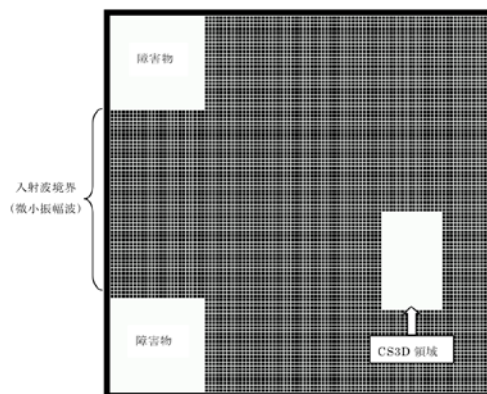


図-2.7 テスト計算領域

表-2.1 テスト計算の格子の大きさ

	Δx_{STOC}	Δx_{CS3D}	ΔX 比
ケース 1	1.5	0.5	1:3
ケース 2	0.6	0.2	1:3
	ΔZ_{STOC}	ΔZ_{CADMAS}	ΔZ 比
ケース 1	0.25	0.125	1:2
ケース 2	0.25	0.125	1:2

(2) 結果

図-2.8 および図-2.9 にそれぞれの計算結果の空間波形のコンターのスナップショットを示す。それぞれCS3D の領域で空間格子の細かさにより、シャープな形状になっていることがわかるが、特に境界において、不整合が生じていないことがわかる。また、格子サイズを細かくすれば、その影響が小さくなっていることも見てとれ、本手法の妥当性が確認できた。

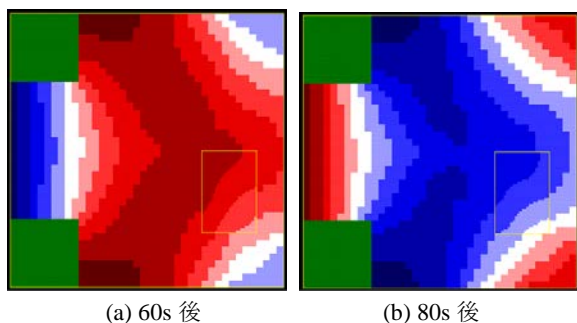


図-2.8 ケース1の波形の空間分布のスナップショット

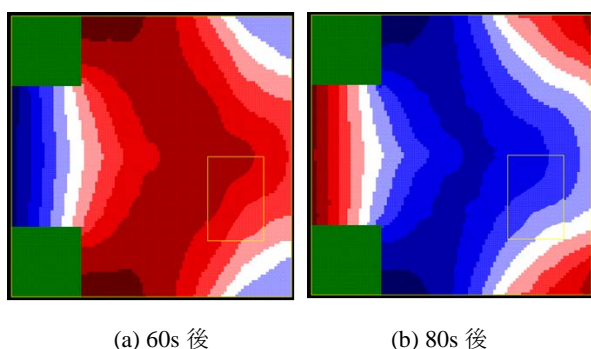


図-2.9 ケース2の波形の空間分布のスナップショット

3. 現地地形を用いた津波計算の精度

3.1 対象とした地形と計算条件

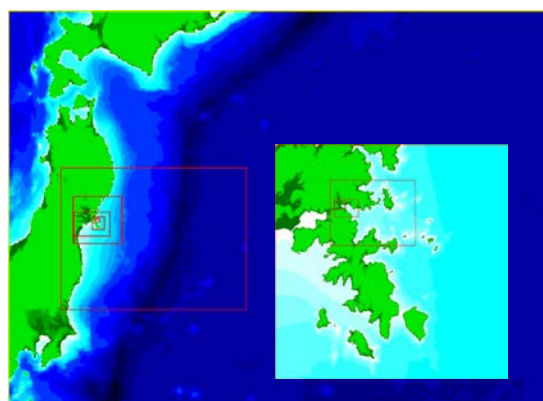
(1) 計算領域諸元

2011年3月に生じた東日本大震災による津波を用いて、女川町を対象として計算を行った。計算領域の格子サイズや格子の数、各領域の計算システムおよび使用したcpu数について、表-3.1 にまとめた。最大の格子数はCS3D の領域で、1500 万格子程度であり、使用するcpu数は、CS3D のみで32cpuを用いた。

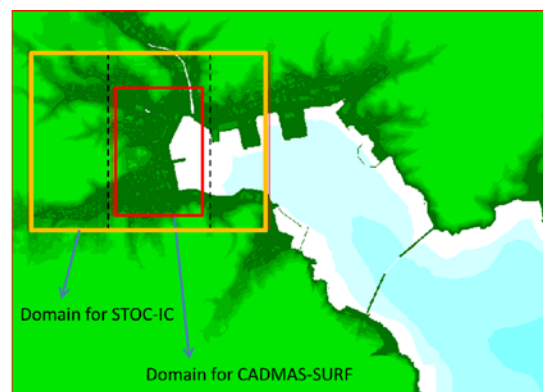
ここでは、CS3D の領域について、1m の格子で、格子数1500 万格子程度の計算を行う。なお、各領域における対象範囲を図-3.1 に示す。

表-3.1 各領域の諸元

領域	格子サイズ (m)	格子比	格子数				計算プログラム名	cpu数
			X	Y	Z	全体		
1	2916	—	500	365	1	182500	STOC-ML	1
2	972	3	510	390	1	198900	STOC-ML	1
3	324	3	405	387	1	156735	STOC-ML	1
4	108	3	900	600	1	540000	STOC-ML	1
5	36	3	930	930	1	864900	STOC-ML	1
6	12	3	1020	780	1	795600	STOC-ML	1
7	4	3	870	627	1	545490	STOC-ML	1
8	4	1	390	285	13	1444950	STOC-IC	3
9	1	4	600	800	32	15360000	CS3D	32



(a) 1～8 領域



(b) 7から9 領域

図-3.1 計算領域

(2) 津波波源

津波波源としては、Fujii et. al.(2011)による ver 4.0 および ver 8.0 (web で公開されており、URL は、http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html となる。以後、「藤井・佐竹 ver4.0」および「ver8.0」と言う)、中央防災会議(2011)ならびに高川・富田(2012)を用い、その違いを検討した。なお、中央防災会議(2011)のモデルと、高川・富田(2012)のモデルにおける初期波源のスナップショットをそれぞれ図-3.2 および図-3.3 に示す。これをみると、中央防災会議(2011)モデルのほうがより北側に大きな波源があることがわかる。

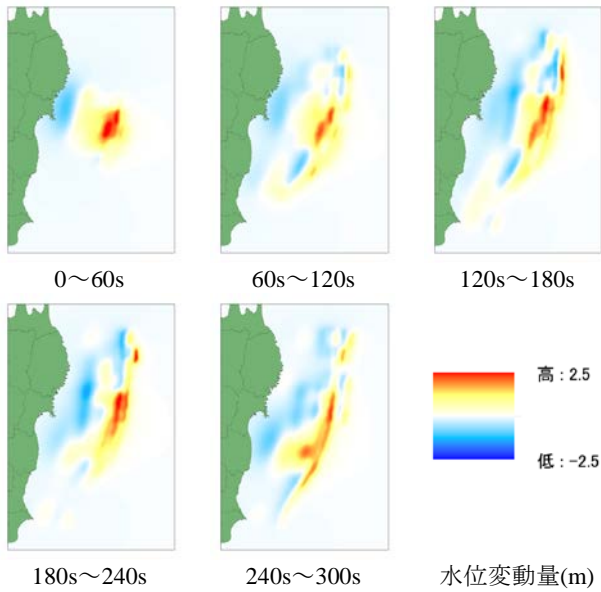


図-3.2 初期波源のスナップショット(中央防災会議(2011)モデル)

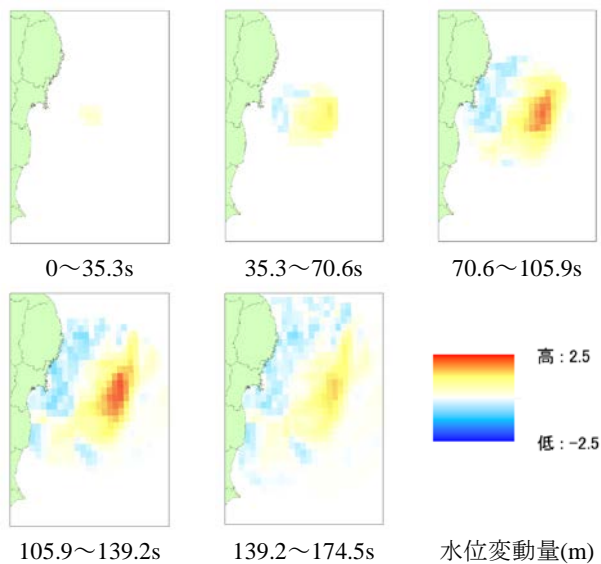


図-3.3 初期波源のスナップショット(高川・富田(2012)モデル)

3.2 計算結果

(1) 各領域でのスナップショット

各領域における境界において不整合が生じていないかどうかについて、空間波形のスナップショットにより確認を行った。ここでは、高川・富田(2012)のモデルを用いたものを図-3.4および図-3.5に示す。これらより、各領域の境界での不整合は見られず、うまく接続されていることがわかる。

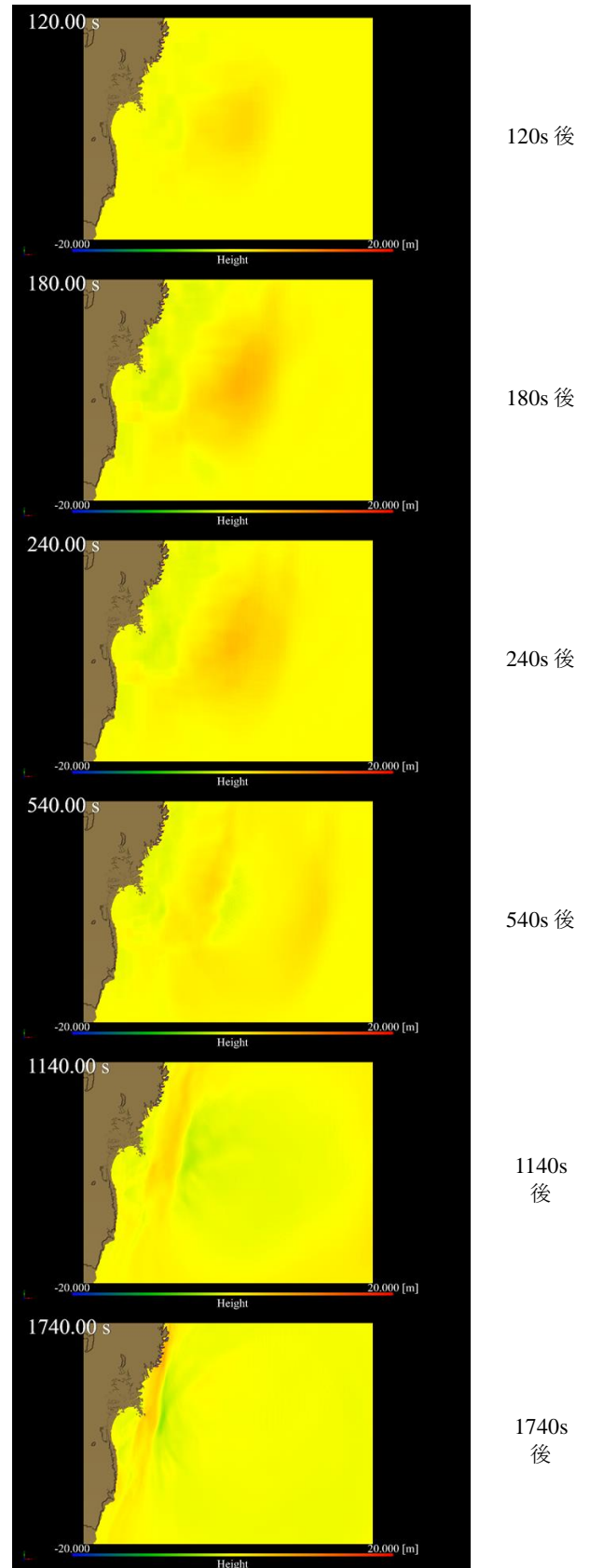


図-3.4 領域2全体の波形のスナップショット

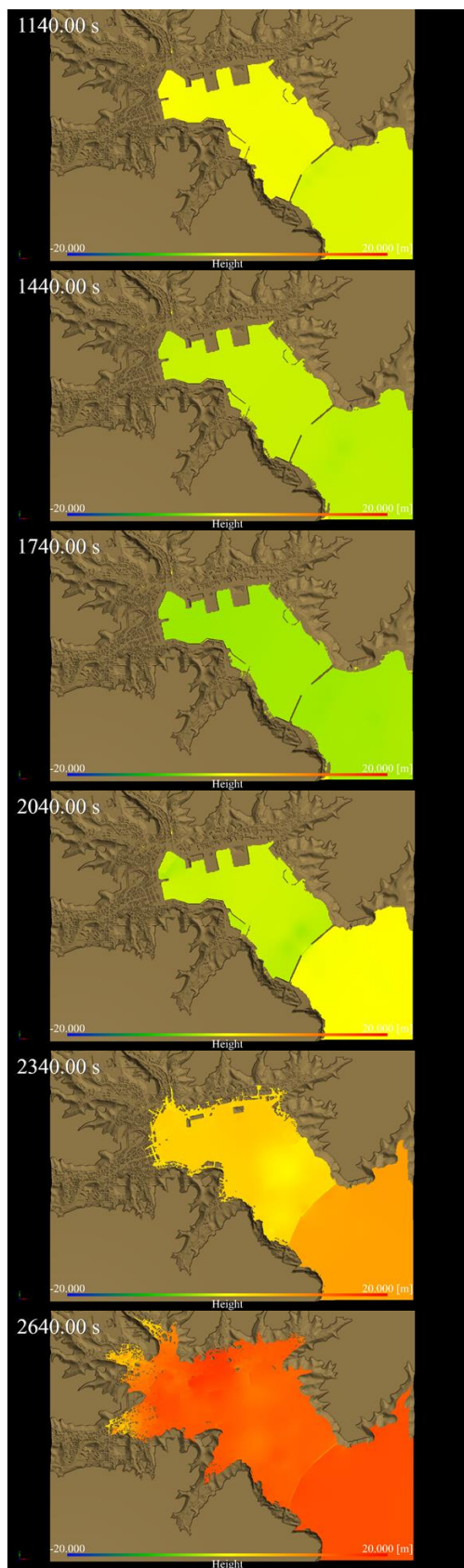


図-3.5 領域 7, 8, 9 の波形のスナップショット

(2) 津波伝搬における GPS 波浪計との比較

GPS 波浪計 (岩手北部(図中の凡例: North of Iwate, 以下同じ), 岩手中部(Middle of Iwate), 岩手南部(South of Iwate), 宮城北部(North of Miyagi), 宮城中部(Middle of Miyagi) および験潮所記録 (仙台新港(Sendai)) で観測された値と, 各波源モデルのシミュレーション結果を比較した(図-3.6). これをみると, 各モデルにおいて伝搬の波形が異なることがわかる. 藤井・佐竹 ver8.0 モデルでは, 宮城北部沖の比較において, 他のモデルよりも 2m 近く小さくなっている. 中央防災会議(2011)と高川・富田(2012)の比較においては, 中央防災会議(2011)モデルのほうが, 岩手県の北側をうまく再現していることがわかる. また, 高川・富田(2012)モデルでは, 仙台新港の波形が切り立ちすぎている.

1140s
後

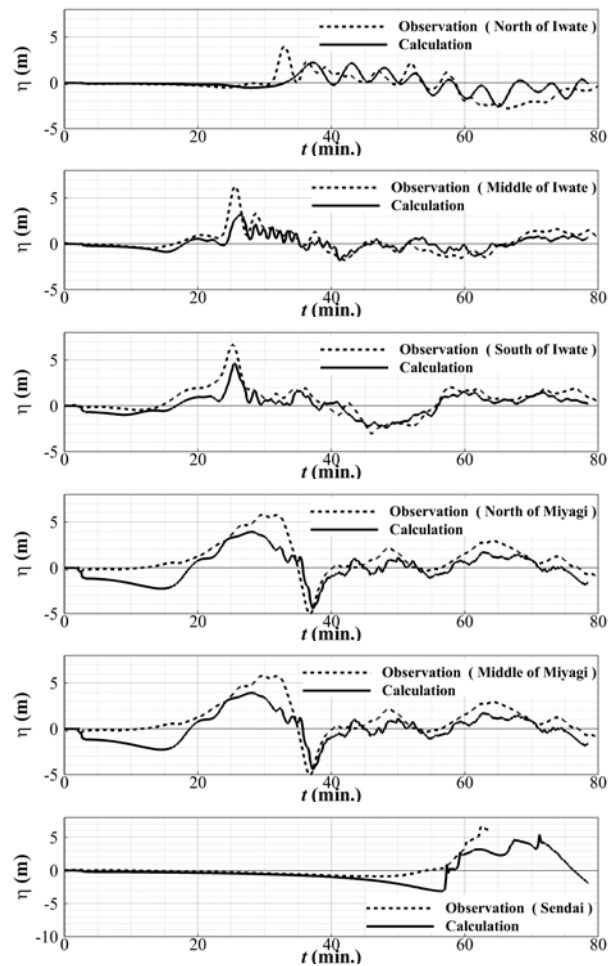
1440s
後

1740s
後

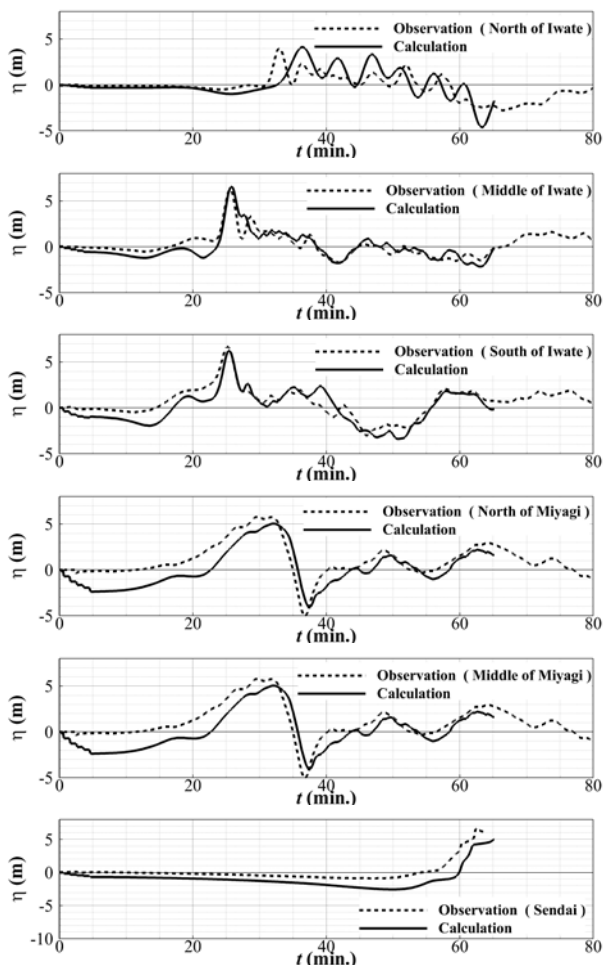
2040s
後

2340s
後

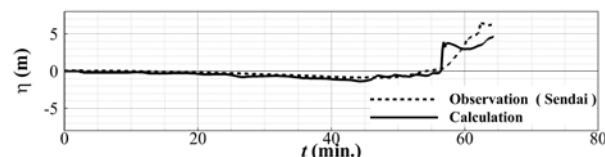
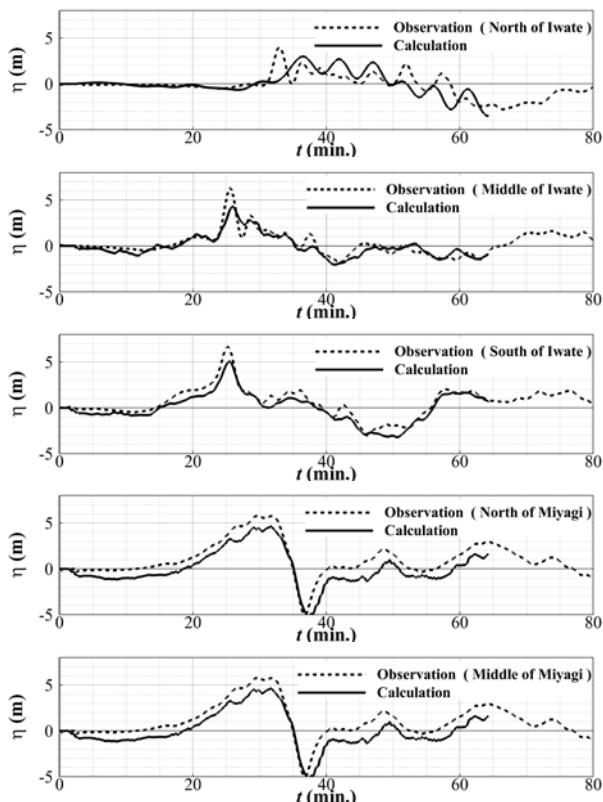
2640s
後



(a) 藤井・佐竹 ver8.0



(b) 中央防災会議(2011)



(c) 高川・富田(2012)

図-3.6 GPS波浪計および験潮所記録との比較(上から, 岩手北部沖, 岩手中部沖, 岩手南部沖, 宮城北部沖, 宮城中部沖, 仙台新港)

(3) 浸水高の比較

図-3.7は, 高川・富田(2012)を用いた浸水場所の津波のスナップショットである. これをみると 1700 秒後あたりから一旦津波が引き始め, その後 2300s 後付近から浸水が始まり, 2800s 後ぐらいに最大浸水深となっていることがわかった. 津波の浸水開始より約 20 分で最大浸水深に到達していることがわかる.

次に, 浸水高を, 痕跡調査結果と比較した. 図-3.8 に比較した場所を示す. 図-3.9 は, 各モデルによる痕跡高との違いを示すものである. これをみると, 藤井・佐竹 ver8.0 モデルは, GPS の結果からも言えることであるが, 全体的に低い結果となっている. そのため, C-14, C-16 などで, 本来浸水しても良いところが浸水していない. 一方で, 中央防災会議(2011)と高川・富田(2012)のモデルではほとんど差がないものの, 中央防災会議(2011)のモデルのほうが, 全体的には少し高めの結果となった.

この痕跡値との比較から Aida(1978)による定義の K 値 ($0.95 \leq K \leq 1.05$ が必要とされる精度)と κ 値 ($\kappa < 1.45$ が必要とされる精度)を計算したところ, 中央防災会議(2011)では, $K=0.792$, $\kappa=1.208$, 高川・富田(2012)では, $K=0.845$, $\kappa=1.203$, 藤井・佐竹 ver8.0 では, $K=0.921$, $\kappa=1.203$ となった. ただし, 藤井・佐竹 ver8.0 では遡上しなかった点 (C-14, C-16, C-21) を省いているため, 同一の比較とはなっていない. この指標でも, 若干ではあるものの, 高川・富田(2012)のモデルのほうが, 中央防災会議(2011)のモデルよりも精度良く計算できていることがわかる.

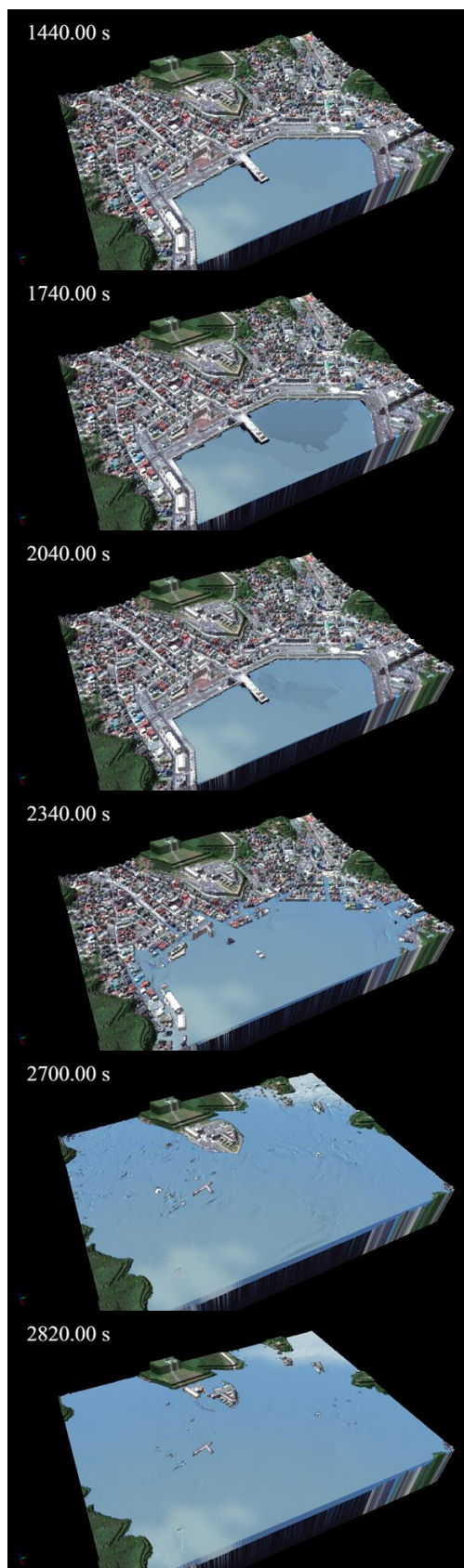


図-3.7 CS3Dの領域9の浸水のスナップショット

1440s
後

1740s
後

2040s
後

2340s
後

2700s
後

2820s
後

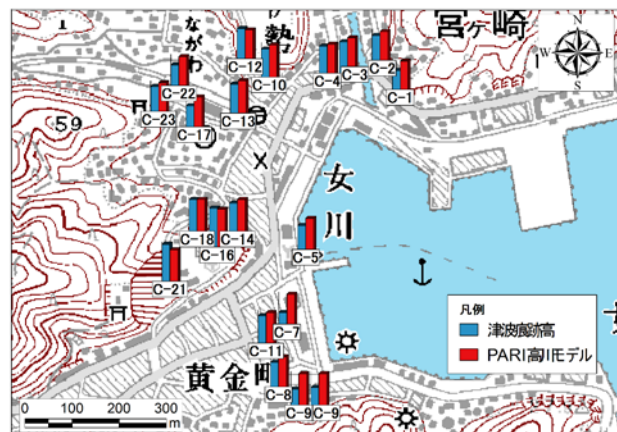


図-3.8 比較対象とした痕跡の場所

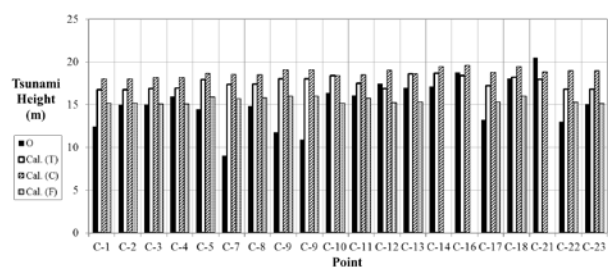


図-3.9 痕跡調査との比較(凡例：O；観測値，Cal.(T)；高川・富田(2012)，Cal.(C)；中央防災会議(2011)，Cal.(F)；藤井・佐竹 ver 8.0)

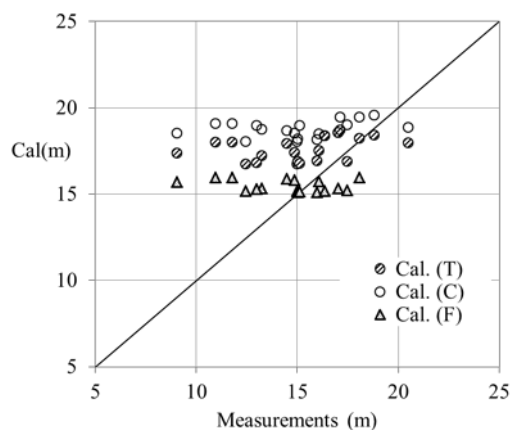


図-3.10 痕跡値と計算値との比較(凡例：図-3.9と同様)

ただし、いずれのモデルも、図-3.10のように浸水高はほぼフラットであり、地形による差異が見られないため、痕跡高が15mよりも低い場所においては、計算のほうが高くなっている。この原因については、建物が流れることにより浸水高が止められる可能性などが考えられるが、詳細な原因の追求については今後の課題としたい。

(4) 浸水深と流速の時系列の比較

越村ら(2011)はビデオから浸水深と流速の時系列波形を解析しており、それとシミュレーションの結果を比較したものを図-3.11 に示す。これをみると、藤井・佐竹モデルは、全体的に早く到達しており、ピーク値も小さい。一方で、中央防災会議(2011)モデルと高川・富田(2012)モデルはほぼ同じような挙動をしているが、中央防災会議モデルのほうが若干ピーク値が大きく、波が引く際にも高川・富田モデルと比較し、遅くなっていることがわかる。

図-3.12 および図-3.13 に遡上時と引波時における流況を示す。これをみると、引波時もうまく再現計算できており、また、越村ら(2011)による流速ともおおよそ一致していることがわかる。

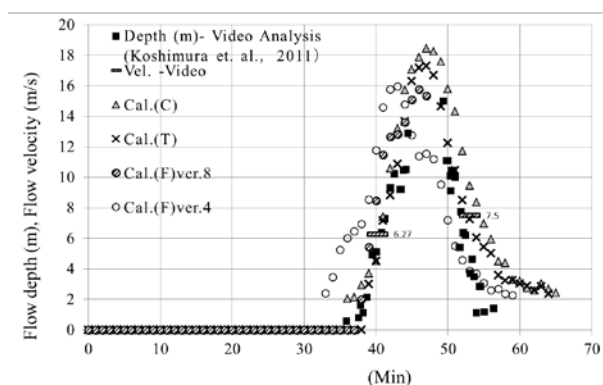


図-3.11 浸水深と流速のビデオ解析(越村ら, 2011)との比較(凡例: Depth(m); 浸水深のビデオ解析値, vel.; 浸水流速のビデオ解析値, Cal.(C); 中央防災会議(2011), Cal.(T); 高川・富田(2012), Cal.(F)ver.8; 藤井・佐竹 ver 8.0, Cal.(F)ver.4; 藤井・佐竹 ver 4.0)

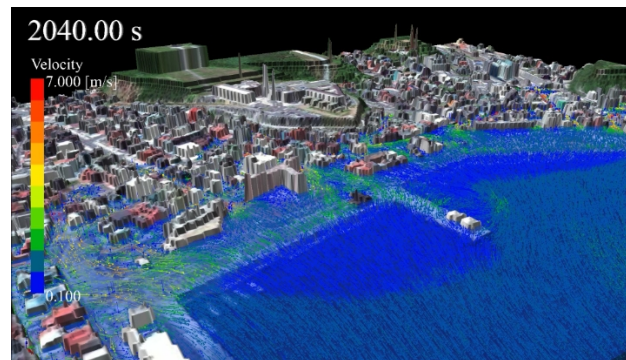


図-3.12 流況(図-3.11 中の浸水流速 6.27m/s の時間帯, 2040s 付近)

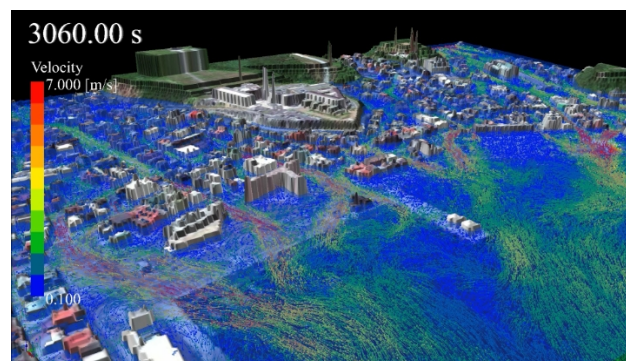


図-3.13 流況(図-3.11 中の浸水流速 6.27m/s の時間帯, 3060s 付近)

(5) 波力の検討

図-3.14 の丸印に示す場所にあった建物に作用する波力について検討した。この建物は津波によって流された4階建てのコンクリートビルである(高橋ら, 2011)。

図-3.15 に、その建物に生じた前面と背面の圧力の鉛直分布を示す。これをみると、背後の圧力が先に大きくなっているが、これは、道路からの周りこみの影響であると考えられる。一方で、圧力が大きくなると(水位が大きくなると)、前面側の圧力が大きくなっており、その差が徐々に大きくなっていることがわかる。

図-3.16 は、圧力を積分して求めた作用力である。これでも、計算では、負の力が働いており、これは道路の影響ではないかと考えられる。

建物は、幅 7.1m, 奥行 5.3m, 高さ 13.8m であり、単位面積当たりの重量を 12kN/m² とすると

気中重量: 2019 kN

水中重量: 1177 kN

となる。計算された波力は、水中重量と気中重量の範囲内に収まっており、妥当な結果ではないかと考えられる。なお、写真等から少なくとも7~8mの浸水時では残存していることはわかっている。



図-3.14 波力の検討を行った建物

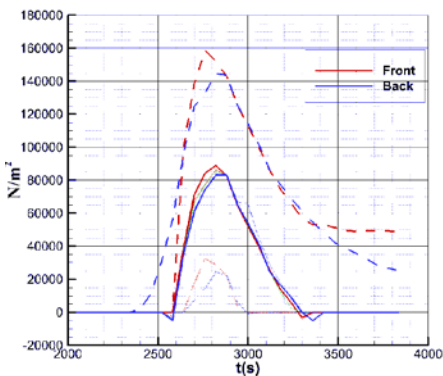


図-3.15 建物に作用した建物前後の圧力（点線は最下層，実線は中央，破線は最上部の点となる）

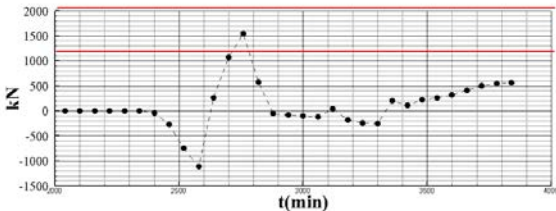


図-3.16 建物に作用した波力

4. プログラムの実行性能

4.1 各プログラムの同期処理

STOC-ML, IC, ならびに CS3D は, 図-4.1 に示すように, それぞれの計算が終了すると, 境界でのデータの受け渡しを行うため, データの同期をとる. 従って, たとえば, STOC-ML の領域では, 計算が終了していても, STOC-IC もしくは CS3D の領域の計算が終了していなければ, 同期するために, その計算機は同期待ちの状態になる仕組みとなっている.

従って, 計算全体の速度を向上させるためには, 各プログラムの計算負荷のバランスを検討する必要がある.

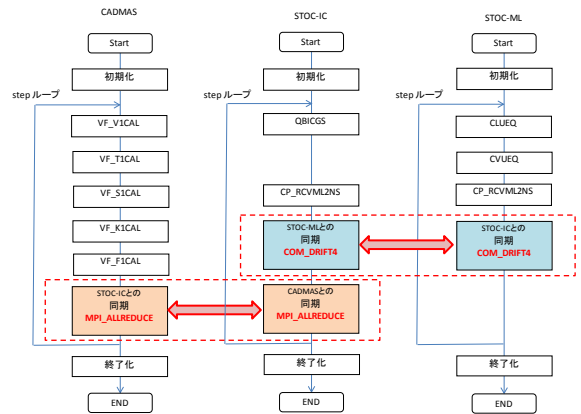


図-4.1 各プログラムのフロー図と同期の位置

4.2 プログラムの負荷バランスの検討

(1) 検討ケース

各プログラムの負荷バランスを検討するために, CS3D の領域を大・中・小の異なる3ケースで検討を行った. 各ケースの計算格子情報(表-4.1~表-4.3)と最内側を含む計算領域図(図-4.2~図-4.4)を示す. 領域1~7までは, 各ケースともに同じとし, 8番目以降の領域について, 領域8をSTOC-MLとして, ICの領域を広くとり, CS3Dの領域を狭くとしたものがケース1, ICの領域と同程度のCS3Dの領域としたものをケース2とした. そして, 領域8をSTOC-ICとしたものがケース3となる.

表-4.1 ケース1の格子情報

領域	格子サイズ(m)	格子比	格子数				計算プログラム名	ノード数
			X	Y	Z	全体		
1	5400	—	256	205	1	52,480	STOC-ML	1
2	1800	3	78	177	1	13,806	STOC-ML	1
3	600	3	48	75	1	3,600	STOC-ML	1
4	200	3	108	141	1	15,228	STOC-ML	1
5	100	2	166	110	1	18,260	STOC-ML	1
6	50	2	240	150	1	36,000	STOC-ML	1
7	10	5	1100	690	1	759,000	STOC-ML	1
8	5	2	1970	1000	1	1,970,000	STOC-ML	2
9	5	1	790	364	11	3,163,160	STOC-IC	4
10	1	5	350	350	38	4,655,000	CS3D	9

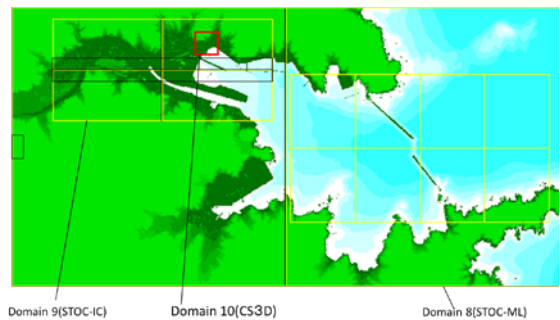


図-4.2 ケース1の最内側領域

表-4.2 ケース2の格子情報

領域	格子サイズ(m)	格子比	格子数				計算プログラム名	ノード数
			X	Y	Z	全体		
1	5400	—	256	205	1	52,480	STOC-ML	1
2	1800	3	78	177	1	13,806	STOC-ML	1
3	600	3	48	75	1	3,600	STOC-ML	1
4	200	3	108	141	1	15,228	STOC-ML	1
5	100	2	166	110	1	18,260	STOC-ML	1
6	50	2	240	150	1	36,000	STOC-ML	1
7	10	5	1100	690	1	759,000	STOC-ML	1
8	5	2	1970	1000	1	1,970,000	STOC-ML	2
9	5	1	480	360	13	2,246,400	STOC-IC	1
10	1	5	2000	1500	40	120,000,000	CS3D	48

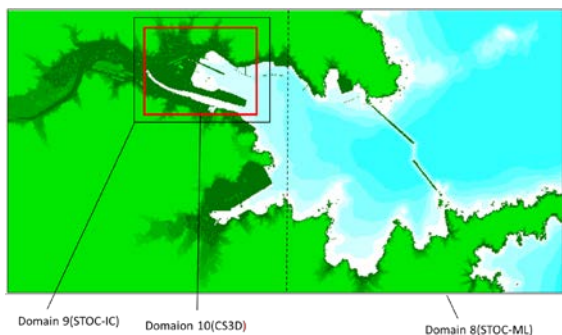


図-4.3 ケース2の最内側領域

表-4.3 ケース3の格子情報

領域	格子サイズ(m)	格子比	格子数				計算プログラム名	ノード数
			X	Y	Z	全体		
1	5400	—	256	205	1	52,480	STOC-ML	1
2	1800	3	78	177	1	13,806	STOC-ML	1
3	600	3	48	75	1	3,600	STOC-ML	1
4	200	3	108	141	1	15,228	STOC-ML	1
5	100	2	166	110	1	18,260	STOC-ML	1
6	50	2	240	150	1	36,000	STOC-ML	1
7	10	5	1100	690	1	759,000	STOC-ML	1
8	5	2	1970	1000	1	1,970,000	STOC-IC	1
9	5	1	8500	3600	40	1,224,000,000	CS3D	510

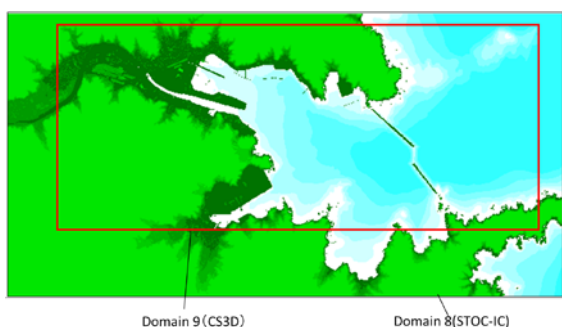


図-4.4 ケース3の最内側領域

(2) スレッド並列化による高速化

ケース1を検討したところ、図-4.5のような計算負荷バランスとなり、ML, ICにおける計算時間が短く、CS3Dの計算時間が長い。ML, ICで同期待ちしている状態であることがわかった。そこで、CS3Dの領域に対し

て、計算するCPUの数を多くし、さらに、スレッド並列化して高速化した結果を図-4.6に示す。これを見ると、今度はCS3Dの計算時間は短くなったものの、ICの計算時間が相対的に大きくなったため、結果として、他のプログラムが同期待ちとなる状態となった。従って、このケースではこれ以上の高速化を行うことが困難となる。

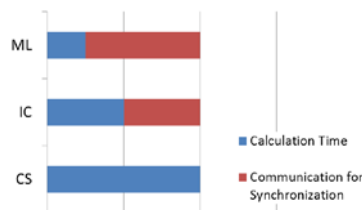


図-4.5 ケース1の計算負荷バランス

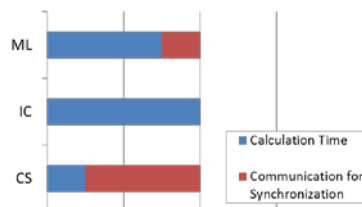


図-4.6 ケース1の計算負荷バランス(CSを高速化)

(3) 各領域の計算負荷のバランスによる高速化

STOC-ML, IC, CS3Dの各システムを高速化することは全体の高速化につながるものの、各システム同士の計算負荷のバランスで、計算時間の短縮が頭打ちになることがわかった。そこで、ケース2では、CS3Dの領域をSTOC-ICと同程度の大きさとする。高速化の限界を検討した。

図-4.7は、表-4.2のようにML, ICには各担当領域に1ノードに1つずつCPUを割り当て、CS3Dに48CPU割り当てたときの結果である。横軸は1stepあたりにかかる時間となる。これを見ると、CS3Dの計算時間がもっとも遅く6s/stepであり、その他のシステムが同期待ちしていることがわかる。

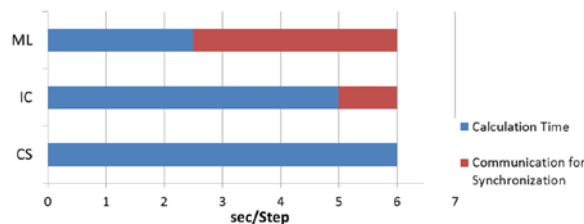


図-4.7 ケース2の計算負荷バランス

そこで、スレッド並列化し、1 プロセスを 8 スレッドで並列化した結果を図-4.8 に示す。これを見ると、各システムともにスレッド並列化をしたことにより、およそ 3 倍の速度向上がみられたが、まだ、CS3D の計算を他のシステムが待っている状態であることがわかる。

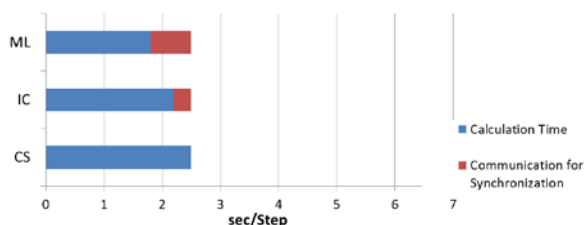


図-4.8 ケース 2 の計算負荷バランス(スレッド並列)

そこで、最後に、CS3D の計算 cpu を 48 ノードから 90 ノードにして計算の負荷バランスを見たところ、図-4.9 のようになり、ほぼどのシステムも同期待ちをしていないことがわかる。この場合においては、CS3D の各ノードが担当する格子数は、1.2 億/90 ノード=133 万/ノード格子数程度となる。これにより、STOC-ML, IC, CS3D の計算実行時間が一致したことになる。

この同期待ちの削除により、最終的には、6.0s/step であったものが、1.7s/step 程度となり、3.5 倍程度まで速度が向上した。ただし、これ以上の速度を向上させるためには、さらにおのおのの計算プログラムの速度を向上させる必要があることがわかる。

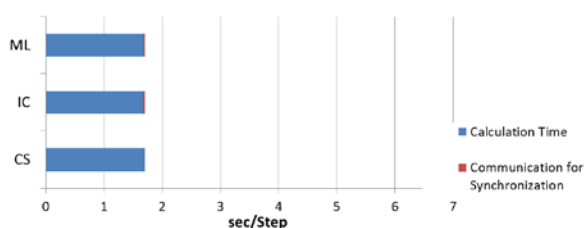


図-4.9 ケース 2 の計算負荷バランス(CS3D の計算ノード数を 90 とした)

つまり、各システムの格子数のバランスが表-4.2 のような場合には、これ以上の速度の向上は難しい。そこで、ケース 3 のように、約 12 億の格子数の計算を行った。510 ノードで実行したところ、システム全体の計算時間は 16s/step であったが、そのうち、待ち時間が 14s/Step であり、ほとんど時間が CS3D を待っていることがわかった。そこで、スレッド並列を行い、待ち時間から同期待ちがなくなるプロセス数を計算すると 8000 ノードであったため、それで計算を行ったところ、待ち時間が 0.01s/Step となり、ほぼゼロとなった。そのときの計算時間は

2.0s/Step となり、ケース 2 と同程度の時間で計算できることがわかった。このとき、CS3D の各ノードが担当している計算格子数は、15 万格子/ノードとなる。これは、1.2 億格子数から 12 億格子数とすることで、行列の収束計算が 10 倍程度多くなっていることを意味している。つまり、10 倍の格子数であった場合、10 倍のノード数を用いても、同程度の計算速度にならず、100 倍のノード数が必要となることを意味している。

まとめると、計算速度全体を向上させるためには、本手法を採用する限りにおいては、STOC-ML の計算領域を可能な限り小さくとり、CS3D を可能な限り大きくとり、計算ノード数を同期待ちが無くなるまで多くすることが重要であることがわかる。

本条件では 2s/step 程度の計算時間となり、1m の格子幅であれば、時間間隔は平均 0.005s/step 程度であるので、1s の積分時間を計算するのに、400s 必要であり、1 時間の積分時間を計算するには、400 時間、およそ 17 日程度必要となることがわかる。

5. まとめ

本研究では、津波・高潮シミュレータ(STOC)と 3 次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)を接続し、津波の波源から遡上まで双方向で効率よく計算できる手法を開発し、その妥当性を検証したものである。その結果以下のことが明らかになった。

- STOC と CADMAS-SURF/3D の接続方法を確立し、その計算手法の妥当性を女川における遡上計算で確認したところ、ビデオ解析結果や測量された痕跡高と比較的よく一致した。
- 波源モデルを藤井・佐竹 (ver4×1.5 倍, ver8), 高川・富田 (2012), 中央防災会議 (2011) で比較したところ、各モデルで精度が異なり、特に、遡上高としては中央防災会議のものが、遡上のシャープさとしては高川モデルの精度が良かった。
- STOC-ML, IC, CADMAS のそれぞれの同期待ちが発生することで計算効率が頭打ちとなることがわかり、それぞれのシステムのロードバランスが大事であることが示された。

(2014 年 1 月 24 日受付)

謝辞

本研究の一部は、HPCI 戦略プログラム分野 3 防災・減災に資する地球変動予測のプロジェクトの一環として行われた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 有川太郎・山田文則・秋山 実 (2005) : 3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.46-50.
- 中央防災会議 (2011) : 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, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/index.html>
- 富田孝史・柿沼太郎 (2005) : 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, vol.044, No.02-05
- 高橋重雄, 戸田和彦, 菊池喜昭, 菅野高弘, 栗山善昭, 山崎浩之, 長尾毅, 下迫健一郎, 根木貴史, 菅野甚活, 富田孝史, 河合弘泰, 中川康之, 野津厚, 岡本修, 鈴木高二朗, 森川嘉之, 有川太郎, 岩波光保, 水谷崇亮, 小濱英司, 山路徹, 熊谷兼太郎, 辰巳大介, 鷲崎誠, 泉山拓也, 関克己, 廉慶善, 竹信正寛, 加島寛章, 伴野雅之, 福永勇介, 作中淳一郎, 渡邊祐二(2011) : 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231.
- Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara and T. Kanazawa, 2011, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, EPS special issue

港湾空港技術研究所報告 第53巻第2号

2014.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Development of High Resolution Tsunami Runup Calculation Method Based on a Multi Scale Simulation	Taro ARIKAWA, Takashi TOMITA	3
---	------------------------------------	---