

岩手県釜石湾の市街地における 平成23年東北地方太平洋沖地震津波の氾濫解析

THE FLOOD SIMULATION OF THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE TSUNAMI IN URBAN AREA OF KAMAISHI BAY

畠山峻一¹・赤穂良輔²・石川忠晴³・小島崇⁴・都丸真人⁵
Shunichi HATAKEYAMA, Ryosuke AKOH, Tadaharu ISHIKAWA, Takashi KOJIMA and Mahito
TOMARU

¹学生会員 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田街4259)

²正会員 工博 東京工業大学院助教 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田街4259)

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田街4259)

⁴正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号)

⁵正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号)

The run-up tsunami in the central city of Kamaishi bay caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake is simulated by the 2-D shallow water model resolving the shape of the roads and the buildings. ~~The flood is roughly the same with the result of tsunami damage investigation, however, the maximum water level in the urban are is higher than it. Compared with the ordinary model which consider the effect of buildings by adjusting the Manning's roughness coefficient, our model can estimate the possibility of the initial tsunami impact more obviously, for example, the rapid growth of water surface and high pressure difference.~~

Key Words: *Tsunami simulation, Urban district, Kamaishi, 2011 Tohoku Earthquake, Triangle*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震による大規模津波は、東北地方を中心に東日本の太平洋沿岸一帯の都市に甚大な被害を及ぼした。写真-1は、同震災において岩手県釜石市の中心市街地を遡上する津波の様子を捉えたものである。津波が家屋を倒壊させながら道路に集中して流れているのが分かる。都市部における津波被害はこのように道路や建物などの配置に依存して拡大していくため、防潮堤や海岸堤防などの防災施設および家屋や道路などの構造物が氾濫流の挙動に与える影響を詳細に把握することは沿岸市街地の津波防災計画を検討する上で重要であり、その主な手段に数値シミュレーションが用いられている。

従来の主流な津波シミュレータは、構造格子を用いた浅水流モデルであり、一般には市街地の家屋や道路までは解像せず、それらの抵抗を土地利用条件に応じた粗度係数を与えることで表現している^{2),3)}。しかし、この方法では道路や空き地への流れの集中など、実際の氾濫挙



写真-1 市街地を遡上する津波 (澤田幸三氏撮影)¹⁾

動を十分に表現できないため、詳細流況を検討するのは難しい。より忠実に構造物の影響を反映させるには、それらを解像できるまで格子を細分化することに加え、建物を不透過物体としてモデル化することが有効である⁴⁾。

ここで、複雑な地形に対して構造格子よりも適合性の高い非構造格子を用いることでさらに精度を高められる。小松・佐々木ら(2010)は、非構造格子を用いて市街地の道路や家屋群の形状を正確に解像した津波氾濫計算を行

い、高い再現性を確認している⁵⁾。

津波が堤防や建物を越流したり構造物外壁で打ち上がった場所では大きな鉛直加速度が発生し浅水流近似の精度が落ちるため、波の挙動や構造物にかかる津波荷重をより高精度に検討するには、VOF法などを用いた三次元モデル⁶⁾が望ましい。しかし、実用的観点から、特に広域計算を行う場合は浅水流モデルが有利であり、構造物の影響を必要十分な精度で予測できれば、今後広く普及していくと思われる。

したがって本研究では、岩手県釜石湾の中心市街地を対象に道路や家屋まで解像した津波再現計算を行い、現地調査の結果と比較した。

2. 対象地域

(1) 釜石湾の地形概要および被害状況

釜石湾の地形概要および浸水範囲（㈱東京建設コンサルタントが岩手県の委託により調査）を図-1に示す。釜石湾は三陸海岸のリアス式内湾であり、さらに中心市街地が湾奥の低地に広がっていることから津波被害が拡大しやすい。そのため湾口に設計津波水位5.1 [T.P. +m]の防波堤を建設し、釜石港海岸の4.0 [T.P. +m]堤防と併せて高い防災性を確保していたが、東北地震では津波がそれらを越流し、市街地に壊滅的な被害を与えた。遡上高は最大約10m以上にもなり、中心市街部のほぼ全域が浸水した。

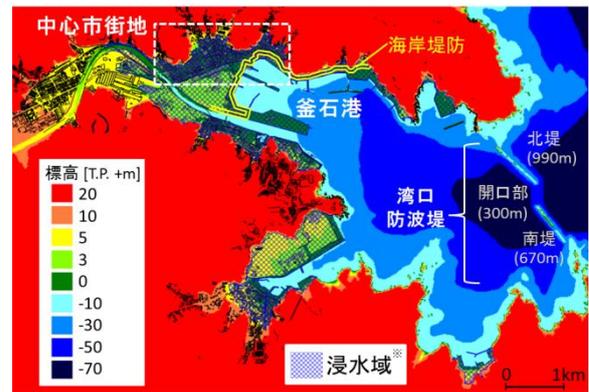
主な被害は図-1に破線で囲まれた沿岸域に集中した。同域中、特に被害の大きかった区域について、建物の構造区分と被災状況（㈱東京建設コンサルタント調査）をそれぞれ図-2(a), (b)に示す。構造区分は主に、鉄筋コンクリート(RC)造、鋼(S)造、木(W)造、その他の4つに分類されている。これと被害状況を比較すると、木造建物のほとんどが流出したのに対し、鉄筋コンクリート造の建物は残存しているのが分かる。また鉄筋コンクリート造建物が密集した領域では比較的流出した建物が少なく、これらが海岸堤防とともに津波被害を軽減させた可能性が高い。以上のような点から、本研究では同域の海岸堤防および建造物を解像した

3. 数値計算

(1) 計算モデルおよび地形データ

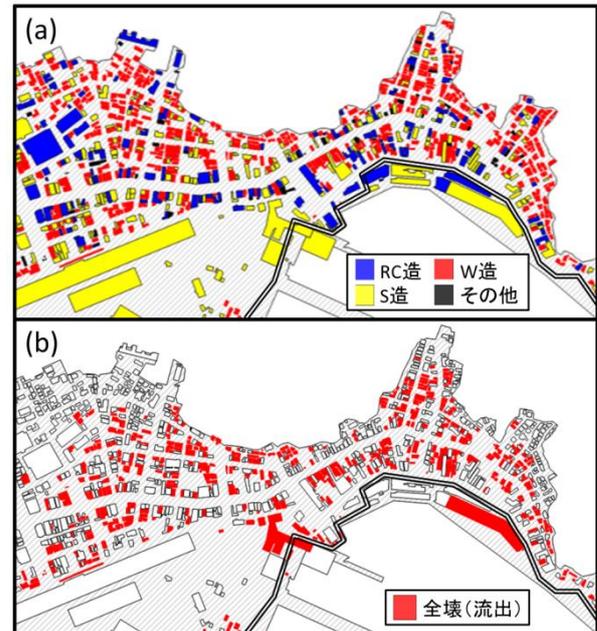
計算モデルは、赤穂・石川(2012)の非構造格子浅水流モデルを使用した⁷⁾。本モデルは2次元浅水流方程式を非構造三角形格子における有限体積法によって離散化して解くもので、底面摩擦力をManning式より与えている。

建物モデルは、無壁舎を除く建物1800棟について、図-3に示す方法で作成した。まず、建物形状を国土院



※㈱東京建設コンサルタント調査結果

図-1 釜石湾の標高分布(JGD2000 X系)と浸水範囲



㈱東京建設コンサルタント調査

図-2 (a) 建物の構造区分 (b) 流失した建物(建物損壊状況判定基準)

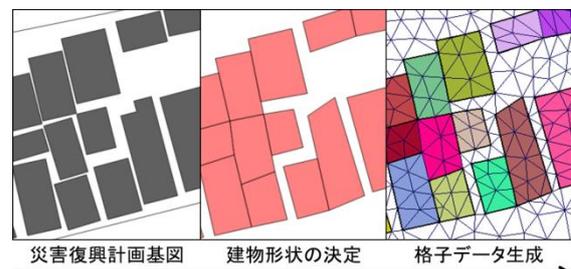


図-3 建物データの作成工程

の災害復興計画基図（縮尺1/2,500, JGD2000 X系）を参考に決定し、建物の角点座標を抽出する。つづいて、これを格子生成ソフトウェア（ANSYS ICEM CFD）に入力し、各点を結んで輪郭線を作成すれば、それに沿って自動的に格子が生成される。建物形状の決定時、格子の質と計算コストとの観点から次の二点に留意して適宜形

状を調整した。まず、各角点間の最小距離を2.5mとし、これに満たない場合は地形特性を大きく変えない範囲で建物の形状を変更した。また、建物同士の壁面間距離が1.5m未満の場合はこれを無視した。また、各建物には上記の被害調査結果を参考に、識別番号、建物階数、構造区分、被災レベルを与えた。

湾内計算領域を図-4に示す。格子数は全体で181,275個あり、格子サイズは、建物解像領域で約3.5m、海側境界で40mとした。その他領域は地形状に応じて5~20mとした。堤防は格子幅に比べてせまいため格子境界として捉え、本間の越流公式により越流量を計算した。また、建物外郭の境界を無限壁とすることで不透過物体として取り扱った。

(2) 計算条件

粗度係数は、国土交通省の津波手引き⁸⁾を参考に、海域を0.025（水域）、陸域は、図-4の建物解像領域内を0.025（空地）、それ以外を0.04（低密度住宅地）とし、初期潮位は地震発生時の天文潮位-0.4 [T.P. +m]とした。

本研究では、波源～湾口までの伝播計算は東北大学モデルver.***（構造格子，leap-frog法）を用いて行い、湾口～市街の湾内遡上計算に非構造格子モデルを使用した。波源モデルは、図-5(a)に示す釜石沖20km地点P0にあるGPS波浪計（水深200m）の観測最大水位と結果が合うよう、断層すべり量を調整した（図-5(b)）。湾内計算領域の海側境界における水位の時間変化が横断方向に概ね一様である（図-5(c) P1~P4; 図-4参照）ことと、境界付近の水深が30m~40mと波速 \sqrt{gh} が支配的であることから、横断平均した水位時間変化として与えた。

計算時間間隔は0.025秒、結果を10秒ごとに出力し、合計3時間分計算を行った。

4. 計算結果と考察

上述の建物不透過モデルの他に、粗度係数の調整によって建物の影響を考慮する従来のモデルでも計算を行い、両者の結果を比較した。以降、前者を“建物あり”，後者を“建物なし”と呼ぶ。“建物なし”では、建物解像領域（図-4）の粗度係数0.025（空地）を0.04（低密度住宅地）に引き上げており、また“建物あり”では、流出した建物を計算開始時から取り除いて計算したケース（“建物あり流出”）についても計算した。

(1) 最大水位分布

図-6(a)に示す津波痕跡調査の結果（東京建設コンサルタント）と各ケースの最大水位分布（図-6(b), (c), (d)）を比較する。浸水範囲は3ケースとも同程度であり調査結果とも概ね一致しているものの、最大水位分布は建物の有無で大きく異なる。“建物なし”で

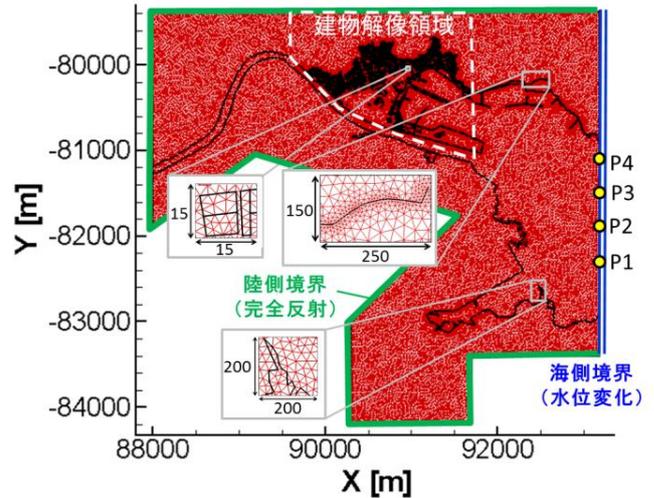


図-4 湾内計算領域(JGD2000 X系)

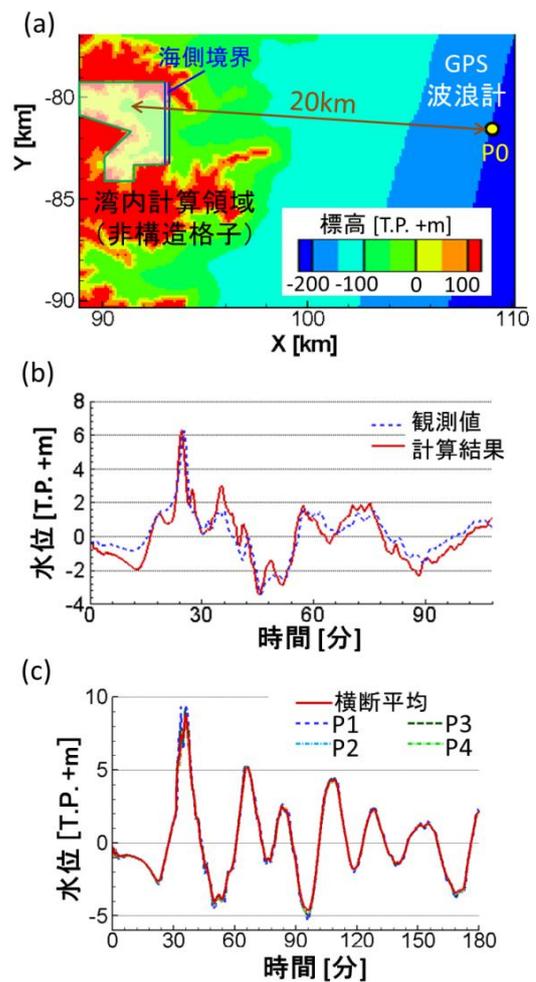
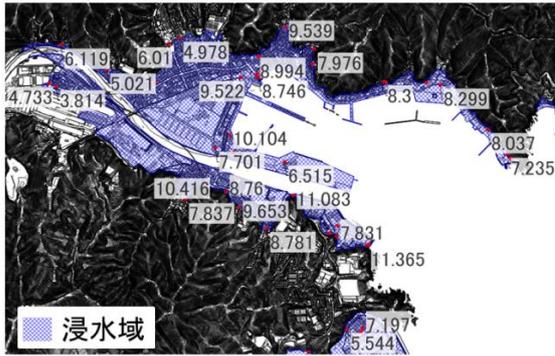


図-5 (a) GPS波浪計観測地点P0 (b) P0の水位時間変化 (c) 湾口に与えた水位時間変化

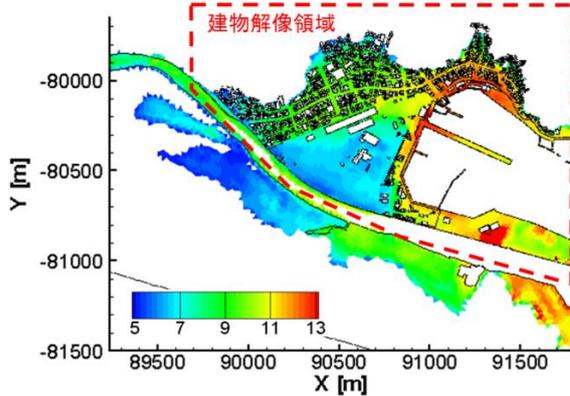
は海岸から湾奥側でも水位が高い場所があるのに対し、“建物あり”および“建物あり流出”では海岸付近で最も高く、湾奥にいくほど低い分布となっている。この特

(a) 津波痕跡値

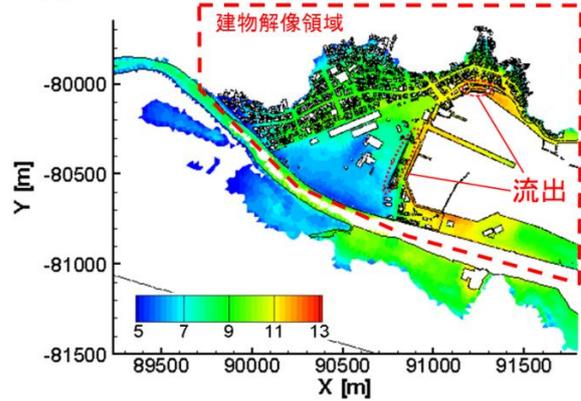


(株)東京建設コンサルタント調査結果

(b) 建物あり



(d) 建物あり流出



(c) 建物なし

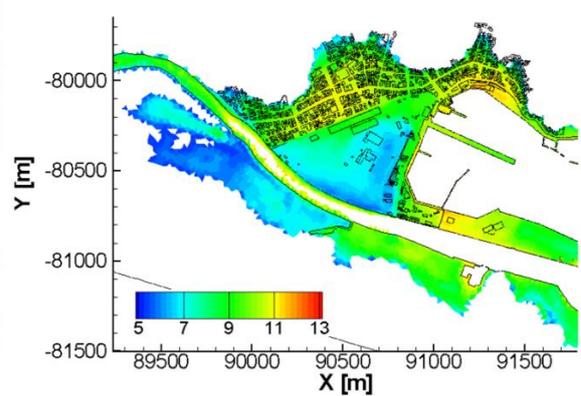


図-6 津波痕跡値と各ケースの最大水位分布 (T.P. +m)

徴は津波痕跡値調査の結果とも一致しており、建物を解像することで地形条件をより正確に反映できたと考えられる。

計算領域内における各地点の水位痕跡値と同地点の計算結果との相関を調べた結果を図-7に示す。各ケースの相関係数Rを比較すると、“建物あり”が最も高い。

“建物なし”と“建物あり流出”における45度線以下の点分布が似ているが、これらは建物解像領域外における地点に関するものであり、“建物あり”では海岸で反射した津波がそれらの位置に到達したことで相関が最も高まった。

建物解像領域内にある地点についてのみ同様に相関を求めると、図-8のようになる。図-7と比べると3ケースとも相関が高まり、また計算領域全体では“建物あり”の相関が最も高かったのに対し、建物解像領域では“建物あり流出”が最も高い相関を示した。ここから、市街地には木造住宅が多く(図-2(a))、最も大きい波は到達する地震発生後約36分(図-5(c))の時点では、既にそれらが倒壊または流出していた可能性が考えられる。

(2) 津波到達時間

市街地を遡上する津波は主に道路に集中するが、従来のモデルは建物の影響を直接的に考慮できず波が扇状に伝播するために、実現象と大きく異なる。そこで、市街

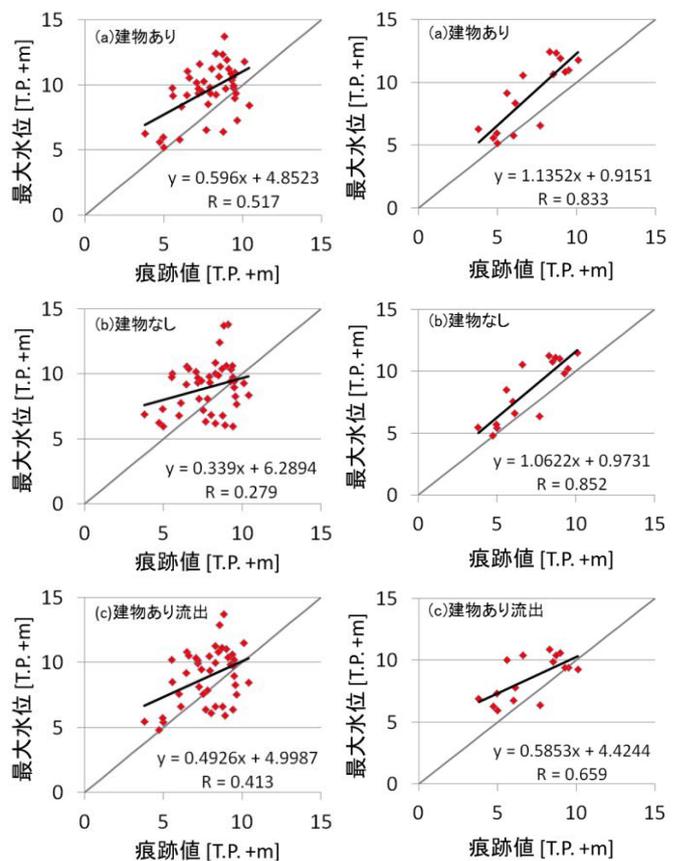


図-7 最大水位と津波痕跡値の相関図 (湾内計算領域)

図-8 最大水位と津波痕跡値の相関図 (建物解像領域)

地の各地点における津波到達時刻が建物の有無によりどの程度変化するかを調べた。

各時刻の水位分布と流速ベクトルを図-9に示す。“建物あり”では、道路に沿って速い流速が生じているのが分かる。(A, B, C), (D, E, F), (G, H, I)はそれぞれ海岸から同程度の距離にある地点の組であり、また図中の時間は津波が堤防を越流した時刻(地震発生後2000秒)を原点(=0sec)とした時刻を示している。“建物あり”の0sec~100secにおいて、B地点の津波到達時刻が他の2地点より20sec遅くなるのに対し、“建物なし”ではA, B, Cいずれも80secの時点で既に3地点とも浸水している。同様に、“建物あり”110sec~130secでは地点Dのある通りで最も波の進行が早く、地点D, Fで津波到達時間は20sec異なる。一方で“建物なし”では100secの時点で3地点とも浸水している。津波がさらに湾奥へ進行する150sec~230secでは、“建物あり”における地点GとIの津波到達時刻の差が最大80secまで拡大するのに対し、“建物なし”では120sec時点でやはりほぼ同時に3地点へ到達していた。最も湾奥の地点Iまでの津波到達時間を“建物あり”と比較すると、2分近くの差が生じており、これは災害時において非常に大きな差である。

(3) 沿岸域の建物密集地帯の流況変化

図-9の地点C付近にある大型建物に囲まれた区域を図-10に示す。同図の大型建物の外周における水深時間変化

を、図-11のように現地の建物寸法から被災時のデジタル写真(釜石広聴広報課提供)と対応させることで推定した。

図-10の地点Paにおいて、計算結果と推定値を比較した(図-12)。各ケースとも、津波の第一波、第二波到達時刻および水深変化が推定値とよく一致しており、水位が2050秒~2160秒(110秒間)において約8 [cm/s]で急増していることが分かる。ただし、三度目に水位が上昇する際、“建物あり流出”におけるものが他2ケースに比べ5m近く低くなっていることが分かる。これは建物を取り除いたことによる流況の変化から、反射波が同領域に到達しなくなったものと考えられ、* 実際のデータとの比較：この部分は後で送信します*。同地点の最大流速分布を図-13に示す。“建物あり”および“建物あり流出”では、流速が建物間で最大12 [m/s]と大きくなる一方、建物後背では約4 [m/s]と小さくっており、これは“建物なし”よりも現実的な分布である。図-10の被害状況と比較すると、最大流速の大きい位置にある建物が流出していることがわかる。

また、“建物あり流出”では、建物を取り除いた位置の流速分布が全体的に“建物なし”のように均一化するものの、図-13(c)右上の建物後背部のように、建物を取り除いてもなお流速の小さい領域も見られる。

また、同領域に波が到達する2110秒(図-12参照)時の水深分布を図-14に示す。大型の建物の付近に死水域

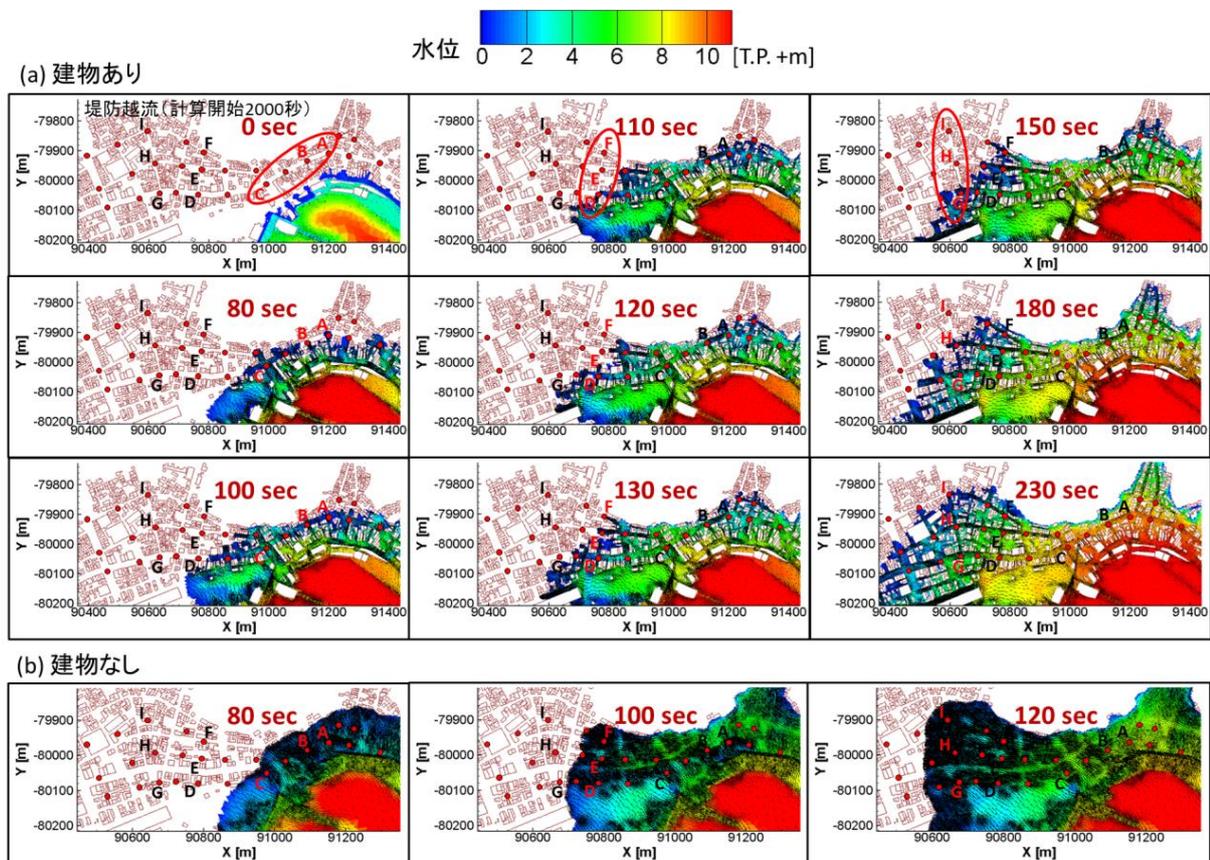


図-9 津波が道路に沿って伝播する様子；(a)建物あり (b)建物なし

ができ、建物の両側で約4m程度の水位（圧力）差が発生していることが分かる。

以上のような水位の急増、建物両面の圧力差、流速の増大などは建物の倒壊に少なからず寄与していると考えられ、これらの現象を検討できるという点で、本モデルは有効であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、釜石湾の市街地を対象に、堤防や建造物を解像した津波氾濫計算を行い、従来のモデルとの比較を行った。その結果、最大水位と痕跡値の相関が高まった。また、道路を解像したことでより詳細な津波到達時刻の検討ができるようになった。さらに、海岸付近の建物周辺の水深時間変化について、被災時の写真から推定したものと比較した結果、第一波、第二波の津波到達時刻および水位上昇速度が一致した。流出した建物を取り除いて計算することで第三波以降の水深が大きく減少した。今後、建物倒壊による流況の変化について検討を進める予定である。

参考文献および引用

- 1) 近藤浩之編：明治・昭和・平成 巨大津波の記録、 pp.33-34、毎日新聞社、2011年7月21日発行。
- 2) 松富英夫、津波の二次元遡上計算、第29回海岸工学講演会論文集、pp.84-89、1982。
- 3) 今村文彦、越村俊一、大家隆行、馬淵幸雄、村嶋陽一：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(version1.0)、東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター、2011。
- 4) 劉曉東・塚茂樹・小原忠和・三上勉・岩間俊二・今村文彦・首藤伸夫：市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析、海岸工学論文集、第48巻、pp.341-345、2001。
- 5) 小松雄二・佐々木淳・松丸亮：非構造格子モデルを用いたバンダアチェにおける2004年インド洋大津波の追算：海岸工学論文集、第66巻、pp.256-260、2010。
- 6) Pham Van Phu, 長谷部伸：三次元 VOF 法を用いた大規模津

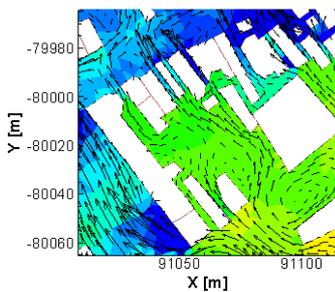


図-14 建物の両側で大きくなる水位差（コンターは緑が7mで青が3m程度です）

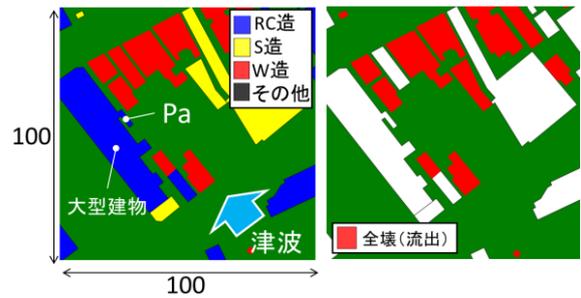


図-10 地点Aの構造物区分および被害状況



図-11 建物寸法を基にした水深の推定

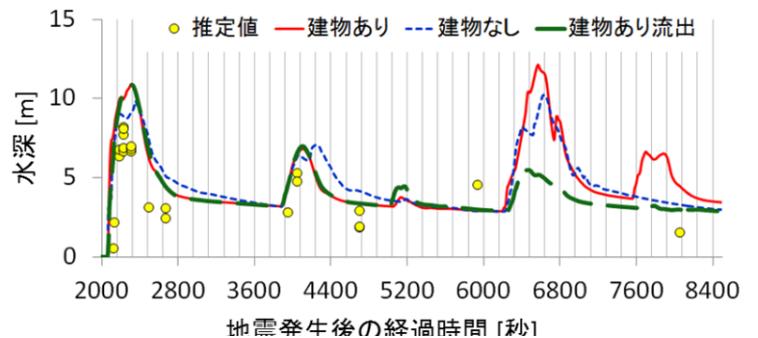


図-12 Paの水深時間変化

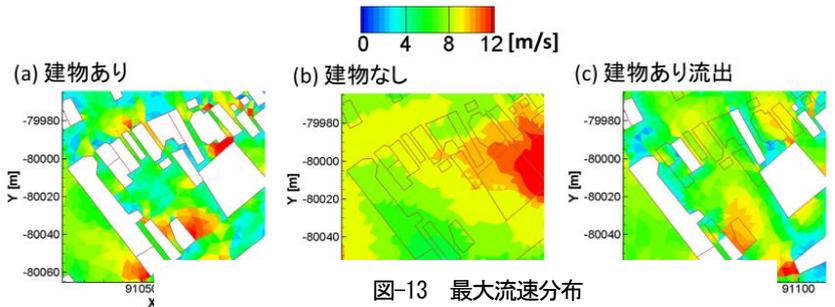


図-13 最大流速分布

(a) 波シ

年1月.

第56巻, pp.I_1543-I_1548, 2012.

- 7) 赤穂良輔・石川忠晴：平成 23 年東北地方太平洋沖地震津波
における利根川下流の津波遡上再現計算, 水工学論文集,

(2013.9.30受付)