

2次元差分法による津波遡上解析における 建築物・堤防高のモデル化精度の影響

仲矢 直樹¹・浅井 光輝²・馬場 俊孝³・正垣 翔大⁴

¹学生会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail:nakaya@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学 工学研究院社会基盤部門 准教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail:asai@doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 徳島大学 大学院理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 (〒770-8501 徳島市新蔵町 2 丁目 24 番地)

E-mail:baba.toshi@tokushima-u.ac.jp

⁴非会員 応用地質株式会社 社会システム事業部 地震防災部 (〒112-0002 東京都文京区小石川 1-1-17 とみん日生春日町ビル 5 階)

E-mail:masagaki-shyouta@oyonet.oyo.co.jp

将来発生すると危惧される巨大津波に対する防災計画には、津波による沿岸地域への安全性・危険性を把握することが重要であり、浸水域が的確に推定できる手法が必要となる。実務業務では、津波伝搬から遡上までの津波シミュレーションを 2 次元解析により実施しているが、3 次元問題として取り扱うべき問題に対する誤差が無視できないとの指摘もある。しかし、現状ではスパコンなどの大型計算機を使用しなければならず、実務への直接的な応用は困難である。そこで、本研究では 2 次元差分解析の範疇のまま、空間分解能を上げることで家屋等の建築物をできる限り精緻にモデル化し、従来の粗度係数を用いた計算結果と比較検討することで、津波遡上解析の精度について議論することにした。

Key Words: EISPH Method, Finite Difference Method, Tsunami Run-up

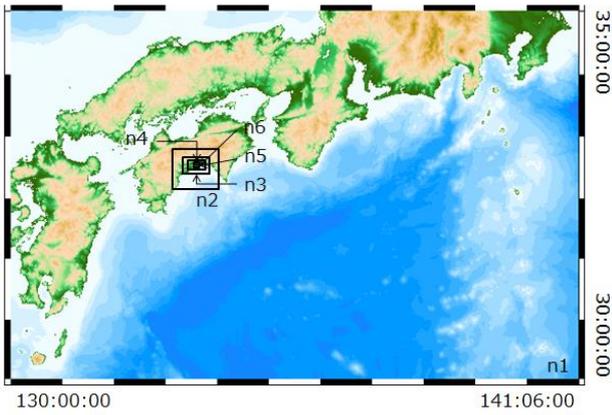
1. 諸言

東日本大震災においてマグニチュード 9.0 という我が国観測史上最大の巨大地震、大津波が発生し、東北地方の沿岸部を中心に、甚大かつ広域的な被害をもたらした。最大クラスを想定した災害への備えが不十分であったことが指摘されており、大規模地震の被害想定、対策の見直し、「減災」の考え方を防災の基本理念として位置付け、想定し得る最大規模の浸水等への対策以下の措置が講じられている¹⁾。減災のためには、津波による沿岸地域への安全性・危険性を把握することが重要であり、特にソフト防災の一環として行う津波防災地域づくりにおいては、浸水域が的確に推定できる手法が必要となる。

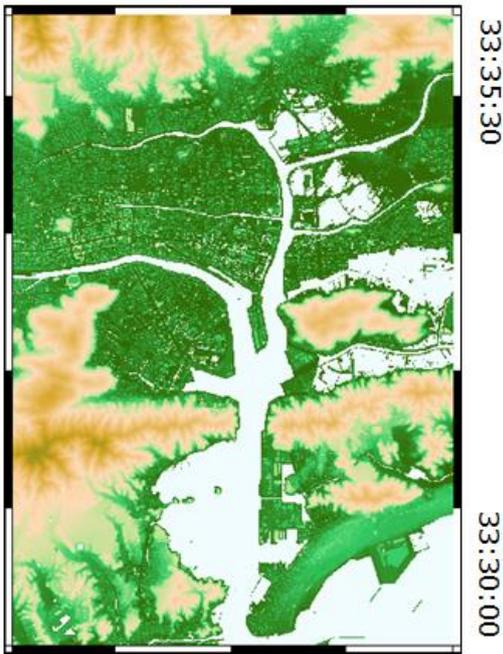
上記の目的のために実施する津波シミュレーションの実務においては、鉛直方向に平均流速と静水圧を仮定する浅水長波方程式に基づいた 2 次元計算が用いられている。特に震源から海岸までの津波伝搬挙動を高速に解析し、リアルタイムな津波警報に役立てることを目的として利用することが多く、しばしば構造格子を用いた差分

法が採用される。また同一の解析手法のまま、津波が陸上へと遡上したあとの市街地の領域まで解析することがある。この際、津波先端部分、建物角部を周る流れなど 3 次元問題として取り扱うべき問題に対する誤差が無視できないとの指摘もある。著者らもその誤差を推計するためにも粒子法による 3 次元津波遡上解析を推進しているが、現状ではスパコンなどの大型計算機を使用しなければならず、実務への直接的な応用は困難である。2 次元津波遡上現象の解析において特に留意すべき点は、建物のモデル化であると考えられる。これまでの実務では最小でも 5m 程度の格子幅を用いた差分法により解析を実施し、また構造格子のまま複雑な形状の建物を取扱うことは困難との考えから、各計算格子に対して家屋の占める割合に応じて粗度係数を設定する方法²⁾が用いられてきた。しかし、赤穂ら³⁾による有限体積法による 2 次元計算の結果から、粗度係数を用いた計算と建物を直接モデル化した例では、特に津波到達時間等に有意な差が生じている。

以上の背景と潤沢な計算機資源が確保できる現状を鑑



(a) ネスティングイメージ



(b) 最終的な分解能でのモデル (n6)

図-1 数値実験モデル

み、本研究では2次元差分解析の範疇のまま、空間分解能を上げることで家屋等の建築物をできる限り精緻にモデル化し、従来の粗度係数を用いた計算結果と比較検討することで、特に津波遡上解析の精度について議論することにした。また建築物以外にも、遡上解析において影響度が高いものと予想される堤防高、および河床高についてもできるだけ正確な情報を用いてモデル化することにした。なお、数値実験の対象領域は、南海トラフ地震時に甚大な被害が予想されている高知県高知市とした⁴⁾。

2. 解析手法と地震シナリオの設定について

本研究では、2次元差分法として、並列化やネスティン

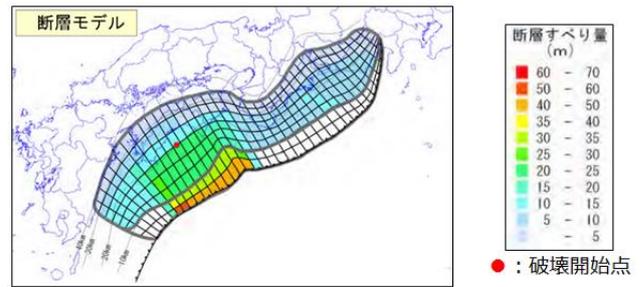


図-2 断層モデル

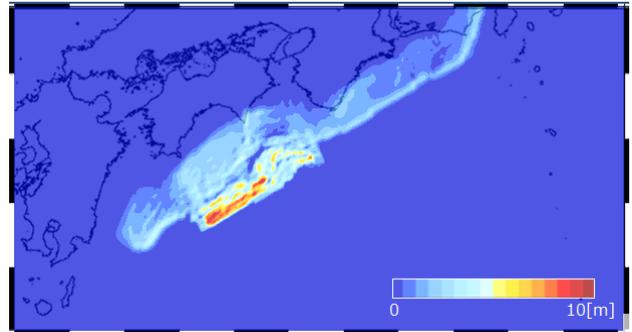


図-3 水位変動分布

グにより大幅に計算負荷を軽減し、高分解な津波計算が可能な JAGURS⁹⁾を用い、建築物および堤防高までをできるだけ忠実にモデル化した解析モデルにより精緻な計算を実施した。

(1) 解析手法の説明

まずは JAGURS による津波伝搬・遡上解析の手順とその特徴を下記に整理する。

- ① 断層パラメータを入力とし Okada⁹⁾のモデルによる地殻変動解析を実施する。
- ② 地殻変動から推定される水位変動を初期値・境界値として津波解析を実施する。
- ③ ネスティング解析により、多段階解像度での津波解析を実施する。

以上の解析手順により、地震に伴う地殻変動を考慮した津波伝搬および遡上解析を実施する。また津波の初期値・境界値となる水位変動は、地殻変動による上下変動分に加え、式(1)より求まる水平方向の地殻変動によって生じる鉛直方向の水位変動の両者を考慮している。

$$Uh = -Ux \frac{\partial H}{\partial x} - Uy \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

ここに、 Uh は水平移動に伴う鉛直方向の地殻変動量、 Ux 、 Uy はそれぞれ x 、 y 方向の地殻変動量である。

本研究では、図-1に示すように $n1 \sim n6$ までの6つ領域を設定し、ネスティング解析を実施した。その解像度はそれぞれ、18s、6s、2s、23s、29s、227s (1sは約30m)である。18s、6sの解析モデルの作成には、陸地・海底地形データセット ETOPO1を使用し、2s、23sの解析モデルには国土地理院の基盤地図情報 10mメッ

シユの数值標高モデルデータ (DEMデータ) を、また 29s, 227s の解析モデルは 5m メッシュの DEM データを用いることで陸域部分の標高を設定した。また、海域の数值実験モデルの作成には、日本水路協会の海底地形データ M7000 シリーズを用いた。ここで DEM データは、航空測量により計測した地表の標高情報を一定の間隔の格子上で保存したデータであり、建物や樹木等の除外した地表面の標高を与えるものである。このため、建築物・堤防・河床の詳細なモデル化方法については 3 章(1) 節にて説明する。

(2) 地震シナリオの設定

本研究では、高知市における最大級の津波被害を推定するため、内閣府想定モデルのケース 4 (四国沖に大すべり域+超大すべり域を設定) ⁷⁾ を地震シナリオとし、前節で示した手順にて津波解析を実施した。図-2 にその断層すべり量の空間分布を示す。そこから Okada モデルによる地殻変動量を算出し、そこから式(1)により水位変動量へと変換した結果を図-3 に示している。なお、最も広範な領域である n1 の解析領域は、この際の有意な水位変動を示した領域をすべて包含した領域として設定している。

3. 遡上解析モデルの作成手順と粗度係数の設定 指針

(1) 建築物・堤防・河床の形状の反映

図-4 に示すように、地表面形状の設定に使用した DEM データには、建築物等の人工物は含まれない。また DEM データには堤防高を正しく表現できている保障はなく、その扱いは明確ではない。そこで、建物形状の定義には国土地理院の SHP ファイル (建築物の輪郭を外形線として定義したファイル) を用い、また堤防高、河床高の実測データをできる限り忠実に反映した解析モデルを構築することにした。なお、この堤防高・河床高の実測データを高知県・高知市よりご提供いただいた。まず SHP データは各建物に対してその輪郭と高さ情報が収録されている。図-5 の赤線が SHP データとして定義した建築物の輪郭線を示す。同図中の黒線による構造格子が差分法による解析メッシュを示す。図に示す通り、輪郭線を含むメッシュとそれにより囲まれたメッシュ状の標高値に SHP データで定義された建築物の高さを追加した値を解析メッシュの標高値として更新した。

また、図-6 に示すように堤防高も計測点間を線分で結んだラインデータとしてデータを保管されていたため、

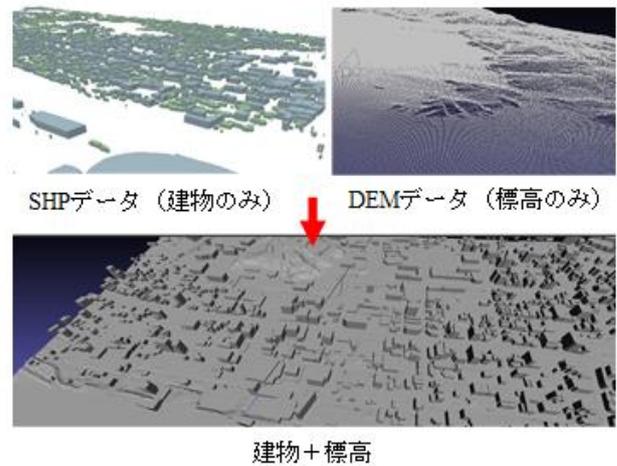


図-4 建築物形状の反映

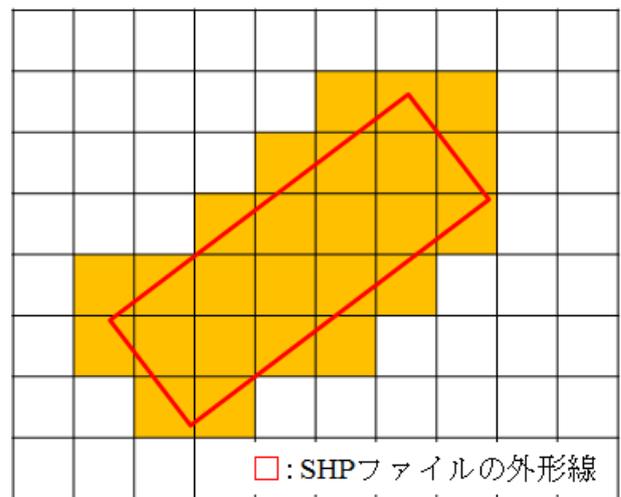


図-5 SHP データに基づく建築物モデル化

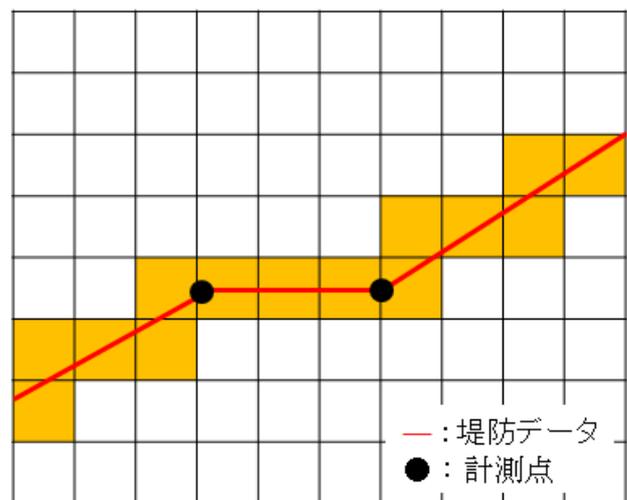


図-6 線分データとして定義した堤防高

建築物のモデル化と同じようにメッシュ毎に定義する標高値を更新した。この堤防高は絶対標高として定義されていたことから、該当する領域内の解析メッシュの標高値をこの堤防高の値にそのまま変更した。

なお、堤防高については、現況の調査結果である堤防高をそのまま反映したモデルに加えて、巨大地震時に堤防が液状化あるいは圧密沈降に伴い、沈降することを想定したモデルも準備した。この際、過去の地震被害調査結果に基づくレベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアルの指針に従い、現況の堤防高の25%まで低減するモデルも別途作成し、100%の状態との比較を行うことにした。

(2) 粗度係数の設定指針

浅水長波理論に準じる2次元差分法により津波遡上を解析する際、土地利用に応じ、マンシングの粗度係数に相当する等価粗度係数を適宜変更しながら解析することが簡便的に用いられることが多い。今回は特に建築物の形状を解像度の高い構造格子のままモデル化した影響を調査するため、DEMデータから得られた平坦な標高のまま解析する際には、市街地の建物建蔽率等から勘案し、領域全体に一定の粗度係数 ($n=0.08$) を与えることにした。一方で、SHPデータに収録されている建築物の高さを反映した解析モデルにおいては、津波は建築物以外の領域（市街地では主に道路に相当）に縮流しながら流れていくため、粗度係数 ($n=0.025$) と設定した。両者のモデルの違いは、建築物の有無とそれに伴う等価粗度係数の違いのみであり、それ以外の堤防高および河床高を含む条件はすべて同一とした数値実験を実施した。

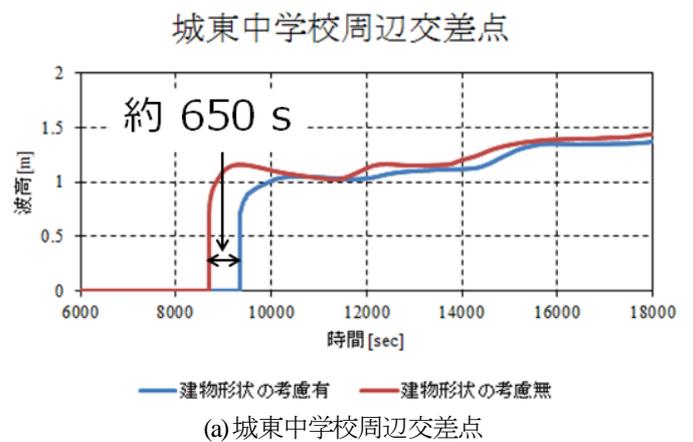
4. 数値解析結果と考察

前節で示した4つの解析モデル（建築物あり・なし、堤防高100%・25%の組み合わせ）による相違を比較検討した。比較検討においては、図-7に示す観測点を設けて、地点ごとの波高・到達時間の観測を行った。特に顕著な差が生じていた地点での結果を図-8の(a)、(b)に示す。(a)城東中学校周辺交差点での結果では、建物形状を考慮するモデルと考慮しないモデルでは650 sec程の到達時間の差が生じていた。また、(b)昭和小学校周辺交差点での結果では、到達時間に400 sec程の差が生じており、波高も50 cm程の差が生じていることを確認した。建物の密集度と津波の流量方向の差により、等価粗度係数だけでも表現できない現象があることを示唆した結果であると考えている。

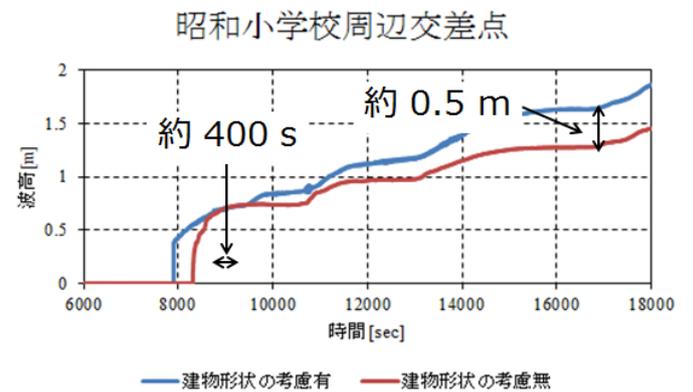
以上のことより、建築物を考慮しないモデルでも、おおまかな浸水域の予測をすることは可能ではあるが、到達時間でみると地点によってはプラス・マイナス数分の差が生じているため、防災計画立案時など詳細な津波到達時間が必要になる場合には、建築物の形状を与えたモデルによる解析が必要になると考えられる。



図-7 観測点



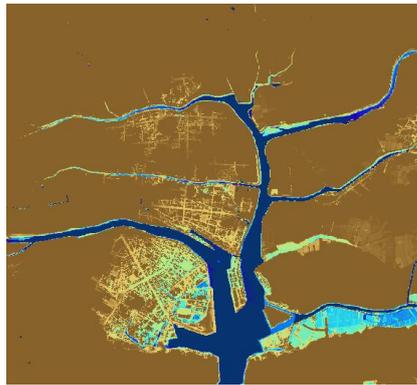
(a) 城東中学校周辺交差点



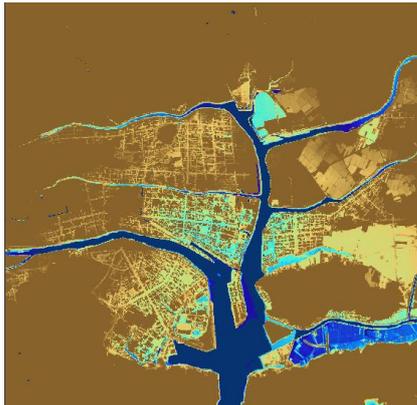
(b) 昭和小学校周辺交差点

図-8 地点ごとの観測結果

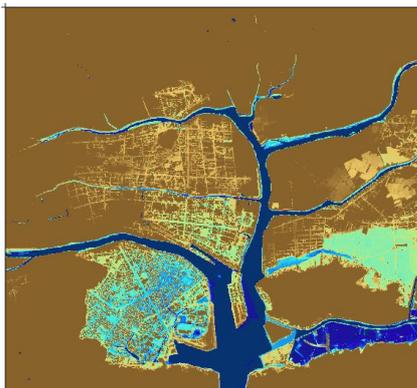
図-9に現況堤防高、堤防高25%とした場合での数値実験結果を示す。同図より、堤防高を25%とした場合の方が浸水面積が大幅に広がることを確認できる。この結果からも予想通りであるが堤防高あるいは河床高の結果が津波遡上に大きな影響を与えるため、実測時に準じた精緻かつ高詳細なモデルによる遡上解析を実施する必要があることを示している。



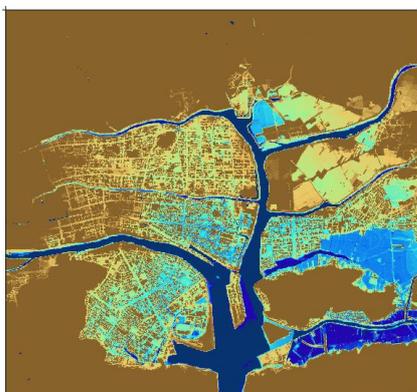
(a) 現況堤防高 (10800s)



(b) 堤防高 25% (10800s)



(c) 現況堤防高 (18000s)



(d) 堤防高 25% (18000s)



図-9 各堤防高での浸水深

5. 結言

実務で使用する 2 次元差分法による津波遡上解析の精度および信頼性向上に向けて、計算機性能の向上およびソフトウェアの機能向上の恩恵を受け、高詳細なモデルにより建築物および堤防高をできる限り忠実にモデルに反映した津波遡上解析を実施した。

従来は建築物を取り除いた DEM に準じて等価粗度係数を用いた解析を実施してきた。しかし、本数値実験が示した通り、建築物を陽にモデルに反映した解析結果と比べると、津波到達時間においてプラス・マイナス数分の差が生じていることが確認できた。また、堤防高の差により遡上域にも大きな差が生じたことから、高詳細な解析モデルの構築が必要となるだけでなく、堤防沈降の精緻な予測モデルが必要となることを示唆する結果を得た。

今回の比較検討では、2 次元解析モデルにおける取扱いによる解析結果の差を示したにすぎず、解析結果の検証・妥当性の確認にはなっていない。今後、同じレベルの地形モデルを使った 3 次元解析結果との比較等を実施することで、2 次元および 3 次元解析の限界等をより詳細に調べ、高精度な津波遡上解析へと発展させる必要がある。

謝辞：本研究の一部は JPS 科研費・基盤研究(B)17H02061 の助成を受けたものです。また、高知県からの受託研究「南海トラフ地震高知市長期浸水避難対策に関する研究」にもその一部をサポートいただきました。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：浸水設定の手引き（平成 24 年 10 月 ver2.00）。
- 2) 劉曉東，堺茂樹，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，341-345，2001。
- 3) 赤穂良輔，石川忠晴，畠山峻一，小島崇，都丸真人，中村恭志：岩手県釜石市街地における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の氾濫解析，土木学会論文集，Vol.71，No.1，16-27，2015。
- 4) 高知県：高知県沿岸における津波浸水想定説明資料，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kaasenkakai/bunkakai/dai49kai/dai49kai_siryou2-5.pdf（2017 年 1 月 5 日参照）。
- 5) TOSHITAKA BABA, NARUMI TAKAHASHI, YOSHIYUKI KANEDA, KAZUTO ANDO, DAISUKE MATSUOKA, and TOSHIHIRO KATO : Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp.3455-3472, 2015.
- 6) YOSHIMITSU OKADA : INTERNAL DEFORMATION

DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No.2, pp.1018-1040, April 1992.

pdf/20120829_2nd_report01.pdf (2017年1月5日参照) .

- 7) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>

(2017.9.1受付)

INFLUENCE OF MODELING PRECISION OF BUILDING AND EMBANKMENT HEIGHT ON TSUNAMI RUN UP SIMULATION BY 2D FINITE DIFFERENCE METHOD

Naoki NAKAYA, Mitsuteru ASAI and Toshihiko BABA, Shota MASAGAKI

It is important to grasp the safety and danger to the coastal area by the tsunami in the disaster prevention plan against the huge tsunami that is concerned about future occurrence, and a method that can estimate the flooded area accurately is necessary. In the practical work, the tsunami simulation from the tsunami propagation to the run up is carried out by 2D simulation, but it is pointed out that the error to the problem to be handled as a 3D problem can not be ignored. However, in the existing state, it is necessary to use a large computer such as a super computer and it is difficult to apply directly to practical use. Therefore, in this research, by keeping the spatial resolution as it is in the category of 2D simulation, we model the buildings such as houses as precisely as possible and compared with the calculation result using the conventional roughness coefficient, I decided to discuss the accuracy of the tsunami run up simulation.