

2017年3月、関西大学審査学位論文

建物倒壊および災害がれきを考慮した
津波被害予測手法に関する研究

社会安全研究科 防災・減災専攻

14D7502 小園 裕司

指導教員 高橋智幸

建物倒壊および災害がれきを考慮した津波被害予測手法に関する研究

社会安全研究科 防災・減災専攻 14D7502 小園 裕司

1. 背景と目的

2011年東北津波では浸水被害に加え、車両、船舶の漂流、建物の倒壊や、それにとともなう大量の災害がれきが発生した。陸上に集積した災害がれきは、発災直後の人命救助や都市の復旧・復興の妨げとなり、津波の引き波によって海洋流出した災害がれきは、広域にわたって海洋環境に様々な影響を及ぼした。今後の津波対策は、浸水のみならず、建物被害やがれき被害などを想定して、事前事後における十分な防災・減災対策を講じておくことが重要である。事前対策の方法として、数値計算を活用した浸水予測が挙げられる。しかしながら、従来の浸水予測モデルでは、市街地の建物形状や倒壊の影響、がれきの取り扱いは考慮されていない。津波による流れや建物被害、災害がれきの発生・集積という現象は、相互に影響しあうため、これらの現象を包括的に考慮する必要があると考えられる。

本研究は宮城県気仙沼市を対象に、建物の形状や倒壊、災害がれきを考慮した津波浸水予測モデルを構築して、これらの影響を明らかにし、有用な津波被害予測手法について研究を行ったものである。

2. 本研究の内容

2.1 東北地方太平洋沖地震津波の概要と被害状況の整理（2章）

本研究の検討対象となる気仙沼市には、10m程度の津波が来襲して甚大な津波被害が生じた。市街地における建物はRC造やS造と比べて木造家屋が支配的であった。建物の被害状況については、木造家屋のほとんどが倒壊・流失しているのにも関わらず、RC造、S造の倒壊・流失は少なかった。このことからRC造、S造構造物は木造構造物と比較して津波に対して耐力を有していること、木造家屋は津波の遡上に対して大きな抵抗とならなかったことを確認した。

2.2 従来手法と建物地物モデルの津波浸水シミュレーションモデルの再現性の検討（3章）

建物の流れに対する抵抗を相当粗度で評価した従来の手法の津波浸水モデルを用いて気仙沼市街地を対象に再現計算を実施した。これに加えて、建物の形状・高さを地物として表現して流れの抵抗を評価したモデル（以下、建物地物モデル）についても検討した。なお、建物地物モデルでは、震災前のすべての建物を対象

としたケースと、震災後に残存した建物を対象としたケースを実施した。これらの検討結果から、建物の影響を相当粗度で扱ったケースよりも建物を地物としたケースの方が実績被害の傾向を再現できること、建物の津波による流れに対する抵抗を動的に取り扱う必要があることを明らかにした。

2.3 建物倒壊を考慮した津波浸水シミュレーションモデルの構築（4章）

建物の影響を動的に扱うため建物倒壊を考慮した津波浸水シミュレーションモデルを構築した。建物の影響は市街地流れを良好に再現できる建物地物モデルを採用して、津波の波力に応じて倒壊を考慮した。建物倒壊に至る波力のしきい値は、3章で実施した再現計算における建物に作用した推定波力と実績被害の関係から建物倒壊に至った波力とした。同モデルによる再現計算の結果から、従来手法や建物地物モデルよりも実績の浸水を良好に再現できること、建物の倒壊被害を再現可能であることを示した。

2.4 災害がれきの移動予測モデルの構築（5章）

災害がれきは、船・車両や建物倒壊に伴う木くずなど多種多様であり、漂流、底面移動など様々な移動形態をとる。また、災害がれき同士あるいは災害がれきと流体との相互干渉が生じる。本研究では、このような災害がれきの移動特性や相互干渉を考慮したモデルの構築を行った。次に、津波遡上によるブロックの底面移動に関する既往実験との比較や数値実験の検証により、災害がれきの基本的な移動予測に関する検討を行った。さらに、津波遡上による複数の木片群の移動に関する実験と比較検証し、木片群の移動や流体と木片群、木片群同士の相互干渉について再現性を確認した。

2.5 建物倒壊および災害がれき移動予測モデルの実地への適用（6章）

最後に4章で構築した建物倒壊および災害がれきの移動予測モデル（4章、5章のモデルの統合）を実地へ適用した。その結果、災害がれきの予測には、津波流れによって大きく結果が変わるため建物の影響を無視できないこと、市街地における災害がれきの影響は津波流れの抵抗となることを明らかにした。

3. 結論

本研究は、建物の倒壊と災害がれきを考慮した津波被害予測モデルの構築を行い、モデルの検証と実地へ適用を行った。その結果、津波流れ、建物の倒壊、災害がれきの挙動は相互作用が大きいため、詳細な被害予測にはこれらの影響を考慮することが重要であることを明らかにした。

第 1 章 序論	1.1
1.1. 研究背景	1.1
1.2. 既往研究	1.3
1.2.1. 建物の影響を考慮した津波浸水予測モデルに関する既往研究	1.3
1.2.2. 漂流物予測に関する既往研究	1.10
1.3. 本研究の目的	1.20
1.4. 本研究の流れ	1.22
第 2 章 東北地方太平洋沖地震津波の概要と被害状況の整理	2.1
2.1. 東日本大震災の被害概要	2.1
2.1.1. 震度分布の概要	2.2
2.1.2. 津波被害の概況	2.3
2.1.3. 地殻変動量	2.5
2.2. 検討対象地域（気仙沼市鹿折地区）の被災概要	2.6
2.2.1. 津波被害の概要	2.7
2.2.2. 建物の被災状況	2.10
2.2.3. 漂流物被害	2.13
2.2.4. 災害がれきの発生状況	2.15
2.3. 本章のまとめ	2.18
第 3 章 東北津波を対象とした従来手法および建物地形化モデルによる津波浸水シミュレーションの再現性の検討	3.1
3.1. 本章の目的と概要	3.1
3.2. 津波浸水シミュレーションモデルの概要	3.2
3.2.1. 基礎方程式	3.2

3.2.2. 数値計算法	3.4
3.2.3. 境界条件および初期条件の設定方法	3.8
3.3. 計算条件	3.14
3.3.1. 検討ケース	3.14
3.3.2. 地形データ等の作成	3.15
3.3.3. 波源・断層モデルの設定	3.29
3.3.4. 初期潮位の設定	3.31
3.3.5. 計算条件の一覧	3.34
3.4. 再現計算の実施	3.35
3.4.1. 東北沖における津波波形の比較	3.35
3.4.2. 市街地における津波浸水シミュレーションの結果	3.37
3.5. 本章のまとめ	3.44
第 4 章 建物倒壊を考慮した津波解析モデルの検討	4.1
4.1. 建物倒壊を考慮した津波解析モデルの構築	4.1
4.1.1. 建物倒壊モデルの構築の流れ	4.1
4.1.2. 建物に作用する波力算定式の選定	4.3
4.2. 建物倒壊・流出および残存建物に作用した津波波力の推定	4.8
4.2.1. 建物に作用した波力と倒壊基準の設定	4.8
4.3. 建物倒壊を考慮した津波シミュレーションの実施	4.13
4.3.1. 数値計算上における建物倒壊の取り扱い方法	4.13
4.3.2. 解析条件	4.16
4.3.3. 検討ケース	4.17
4.3.4. シミュレーション結果	4.18
4.4. 本章のまとめ	4.25
第 5 章 災害がれき移動被害予測モデルの検討	5.1

5.1. 災害がれき被害予測モデルの構築	5.1
5.1.1. 基礎方程式	5.1
5.1.2. 数値計算法	5.3
5.1.3. 地形勾配・摩擦係数の扱い	5.4
5.2. 災害がれきの諸元の取り扱い方法	5.6
5.3. 水路実験に基づいたがれき移動予測モデルの検証	5.11
5.3.1. 底面移動を対象としたがれき移動実験に基づく検証	5.11
5.3.2. 漂流移動および底面移動に関する数値実験	5.17
5.3.3. 複数のがれき群を対象とした移動に関する実験に基づく検証	5.21
5.4. 本章のまとめ	5.33
第 6 章 災害がれき移動予測モデルの実地への適用に関する検討	6.1
6.1. 災害がれきの取り扱い	6.1
6.1.1. 対象とする災害がれきの選定	6.1
6.1.2. 災害がれきの諸元の設定	6.2
6.2. 災害がれきを考慮した津波浸水シミュレーションの実施	6.4
6.2.1. 解析条件	6.4
6.2.2. 再現計算結果	6.6
6.3. 災害がれきの集積状況が異なる陸前高田市への適用	6.10
6.3.1. 陸前高田の建物の構造種別と被災状況	6.11
6.3.2. 地形データの作成	6.13
6.3.3. 計算条件	6.15
6.3.4. 解析結果	6.17
6.4. 本章のまとめ	6.20
第 7 章 結論	7.1

参考文献

変数一覧表

謝辞

第1章 序論

1.1. 研究背景

2011年東北地方太平洋沖地震津波によって東北沿岸各地に甚大な被害が生じた。同津波では浸水被害にとどまらず、海岸堤防等の破壊や、車両・船舶・コンテナの漂流を引き起こした。また、陸上を遡上した津波が工場、一般住居等の建物を破壊し、それに伴う多くの災害がれきが発生した。陸上に集積した災害がれきは、発災直後の人命救助や、都市の復旧・復興の妨げとなり、また、津波の引き波によって海洋流出した災害がれきは、広域にわたって海洋環境に様々な影響を及ぼした。さらに、集積したがれきや流出した重油に引火することで火災が発生するなど二次被害も発生した。図 1.1は気仙沼市における建物被害や火災被害事例の一例である。これらの背景を踏まえると、今後の津波被害の防災・減災には、事前に想定しうる被害を精度よく予測し、十分な対策を講じておく必要がある。



図 1.1 津波による被害事例（左：気仙沼市の建物倒壊，右：火災被害）^{1),2)}

事前対策として防潮堤や防波堤等の海岸保全施設の整備や、災害後の避難行動計画や災害対応計画の策定等が挙げられる。これらの策定には数値シミュレーションの結果が活用されることが多い。津波浸水予測計算によって事前に浸水範囲と浸水高を把握し、その結果に基づき、沿岸域では海岸保全施設の計画を行い、市街地では建物被害や災害がれきの発生量を事前に想定しておくというものである。この際、浸水予測の精度が重要になるが、その精度は計算格子幅や標高データの精度の依存が大きい。従来 of 市街地における津波浸水予測

計算では、計算格子間隔を10～50m程度を基本とし、建物の影響を相当粗度で取り扱うことが一般的である。一方で、コンピュータの飛躍的な進歩やデータの高精度化に伴い、建物の形状を考慮した3次元計算や、格子間隔を数m程度のオーダーの2次元計算が検討され、シミュレーション結果の高精度化が図られている(ファムら, 2012³⁾; 今井ら, 2013⁴⁾). しかしながら、市街地における氾濫流れは、建物の影響を受け街路に沿って浸水が拡大するだけではなく、建物の倒壊を伴うことがある。この場合、建物の倒壊、残存状況によっては、津波の流れは変化する。そのため、詳細な浸水・被害予測の精度向上においては、データの高精度化のみならず、刻々と変化する浸水深、流速、波力等の物理量に基づいた建物倒壊の影響を考慮する必要もある。このような観点から、建物倒壊を考慮した研究がいくつか報告されている。林ら(2014)⁵⁾は、10mの計算格子を用い、メッシュ内の建物の影響を合成等価粗度で表現し、津波の流況に応じて等価粗度を修正することにより建物倒壊の影響の反映を試みているが、ファムらや今井らの様に建物の形状等を考慮した詳細な浸水計算での検討は行われていない。本来、建物群と津波の遡上浸水は相互に影響しあう関係であると考えられ、より精度のよい被害想定を行うためにも、建物の形状、倒壊等の影響を考慮したシミュレーションは不可欠である。また、建物の倒壊等によって発生する災害がれきは、市街地における氾濫流の流れの抵抗となると考えられるが、この影響を明らかにした報告事例は多くない。より詳細な津波浸水予測、建物被害想定や災害がれき予測を行うためには、これらの現象の影響を明らかにする必要がある。

この様な社会的、技術的背景から、今後の津波対策に資する精度の高い津波被害予測モデルの必要性が高まっている。

1.2. 既往研究

本節では、本研究に関連する既往研究について示す。本研究に関連する研究は大きく大別して、市街地の建物の影響を考慮した津波浸水モデルに関する研究、漂流物に関する研究および津波石の移動予測に関する研究が挙げられる。

1.2.1. 建物の影響を考慮した津波浸水予測モデルに関する既往研究

建物の影響を考慮した津波浸水モデルに関する研究として、建物の影響を地物と粗度で取り扱っている今井ら(2013)⁴⁾や、合成粗度係数で建物を表現し、流況に応じて建物破壊を考慮した林ら(2014)⁵⁾が挙げられる。

(1) 今井ら⁴⁾による実用的な津波浸水予測手法に関する既往研究

今井ら⁴⁾は建物の影響を考慮するため、地形と粗度の合成地形モデルを提案している。数値実験と実地への適用結果から、市街地における複雑な流況の予測に、提案モデルが有効であることを示している。以下では、合成地形モデルの概要と検討の内容を示す。

A) 合成地形モデルの概要

建物の影響は、図 1.2 に示すように計算格子と建物の形状を比較して、完全に建物の形状に含まれるメッシュを地物として扱い、街路と建物が混合する計算格子は建物の影響を相当粗度として取り扱っている。

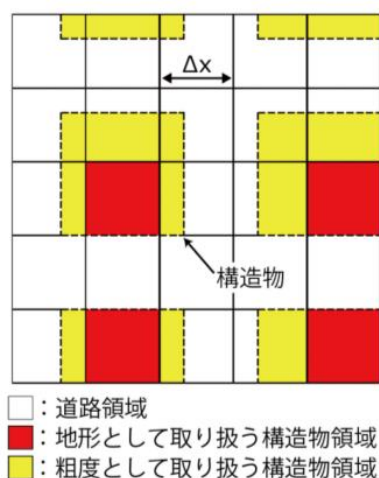


図 1.2 合成地形モデルの概念(今井ら, 2013)⁴⁾

B) 数値実験におけるモデルの妥当性の検証

数値実験を行い，合成地形モデルの妥当性について検証を行っている．数値実験の検討内容は，図 1.3 に示す地形条件下で沖側から正弦波を入射させ陸上構造物の取り扱い方法の違いによる結果について検討している．

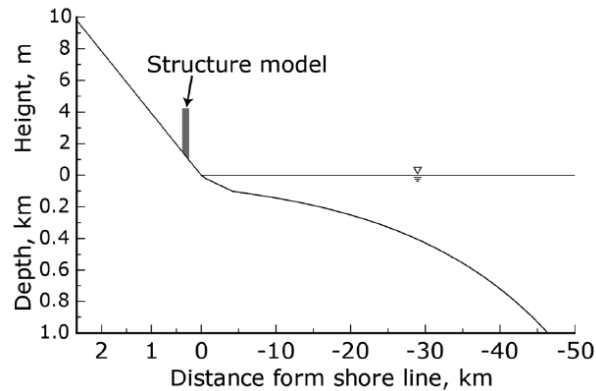


図 1.3 数値実験に用いた地形条件(今井ら，2013)⁴⁾

構造物の取り扱い方法については，表 1.1 に示す様に計算格子幅を細かくし，建物の影響を直接地形で表現したケース（ケース 0）を真値として，計算格子を粗くし地形，合成粗度，相当粗度を組み合わせたケース（ケース 1～4）の比較を行っている．

表 1.1 数値実験ケース一覧(今井ら，2013)⁴⁾

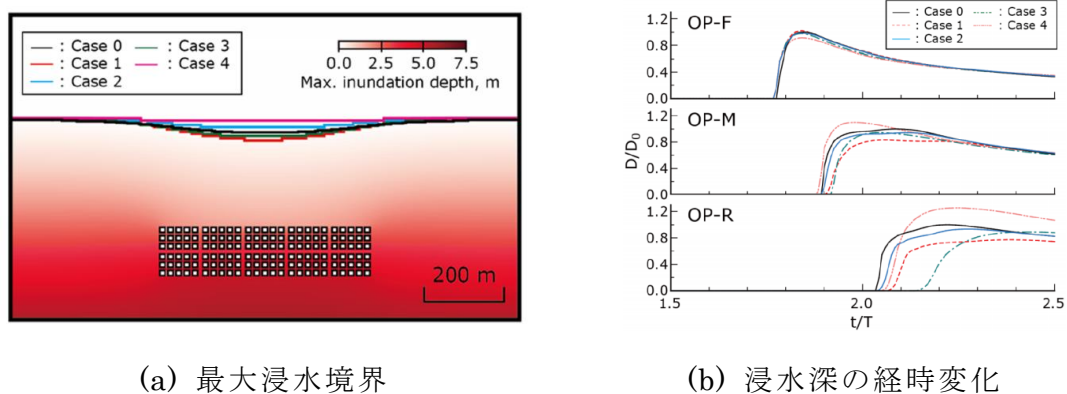
Case	Δx , m	構造物の取り扱い	各種係数		入力津波波高, m	入力津波周期 T , 分
			C_D	相当粗度		
0	50/27	起伏地形のみ	無し	無し	4.5, 6.0, 9.0	20, 30, 40
1	50/9	起伏地形と合成等価粗度	3.0	無し	4.5, 6.0, 9.0	20, 30, 40
2	50/9	起伏地形と相当粗度	無し	0.06	4.5, 6.0, 9.0	20, 30, 40
3	50/9	合成等価粗度	3.0	無し	4.5, 6.0, 9.0	20, 30, 40
4	50/9	相当粗度	無し	0.06	4.5, 6.0, 9.0	20, 30, 40

また，合成粗度係数は式(1.1)に示すように，建物の占有率と抗力を考慮した相当粗度を算定している．

$$n_{im} = \sqrt{\frac{100-\theta_k}{100} \times n_0^2 + \frac{C_D}{2gB} \times \frac{\theta_k}{100} \times D^{4/3}} \quad (1.1)$$

ここで， n_0 ：底面粗度係数 ($m^{-1/3} \cdot s$)， g ：重力加速度 (m/s^2)， D ：全水深 (m)， B ：家屋幅 (m)， θ_k ：家屋占有率 (%)， C_D ：抗力係数である．

図 1.4 は数値実験の結果の一例を示したものである．この結果から，構造物を地形と相当粗度で表現することが望ましいことを明らかにしている．



(a) 最大浸水境界

(b) 浸水深の経時変化

図 1.4 各ケースの比較 (今井ら，2013)⁴⁾

さらに今井らは実地に適用を行い，従来の粗度モデルと合成地形モデルの違いについて明らかにしている．図 1.5 はその適用結果の一例となる．

この結果から市街地における複雑な流況の予測に，提案モデルが有効であることを示している．

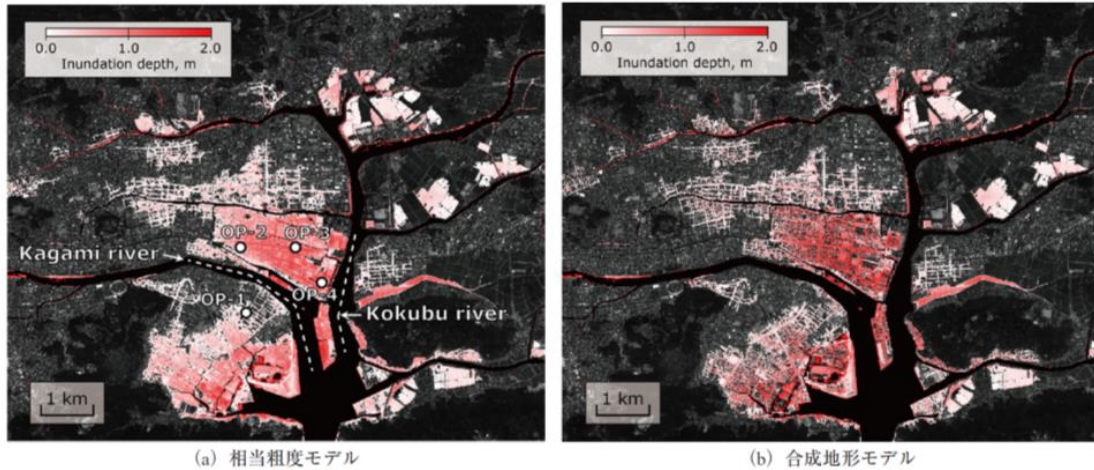


図 1.5 粗度モデルと合成地形モデルの比較(今井ら, 2013)⁴⁾

(2) 林ら⁵⁾による建物破壊を考慮した陸域遡上モデルの開発に関する研究

林ら(2014)⁵⁾は、陸上域の最終計算格子間隔を 10 m として、2011 年東北地方太平洋地震津波を対象として、陸域遡上計算条件が異なる複数のシナリオ下で再現計算を行い、津波遡上速度・流速を算定し、実測値を用いて現行の津波数値計算における流況再現性を評価し、解析に望ましい遡上条件および抵抗則について検討を行っている。数値解析については、一般的な津波浸水予測モデルを用いており、建物の影響を合成粗度モデルで評価を行っている。また震災前後における粗度条件で再現計算を実施した後、建物破壊を考慮した遡上モデルの検証を行っている。

A) 合成等価粗度モデルの概要

合成粗度モデルは、構造物による抵抗をそれと等価な Manning 粗度係数で置き換える手法である。油屋・今村(2002)⁶⁾の合成等価粗度 n_{ab} は、Morison 式にならい、流水に作用する力が底面摩擦力と家屋抵抗力の合力であるとして、式(1.2)のように導かれる。

$$n_{ab} = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_D}{2gB} \times \frac{\theta_k}{100 - \theta_k} \times D^{4/3}} \quad (1.2)$$

ここで、 n_0 : 底面粗度係数 ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) , g : 重力加速度 (m/s^2) , D : 全水深 (m) , B : 家屋幅 (m) , θ_k : 家屋占有率 (%) , C_D : 抗力係数である。同

研究では、小谷ら（1998）を参考にして、底面粗度係数 n_0 を設定している。しかし、家屋占有率 θ_k が大きい場合や $\theta_k = 100\%$ の場合は、式(1.2)を適用することができない。そこで、今井ら（2013）は合成等価粗度モデルの汎用性向上のため、新しい合成等価粗度係数 n_{im} として式(1.3)を示した。

$$n_{im} = \sqrt{\frac{100 - \theta_k}{100} n_0^2 + \frac{C_D}{2gB} \times \frac{\theta_k}{100} \times D^{4/3}} \quad (1.3)$$

ここで、各パラメータの諸元は式(1.1)と同様である。

同研究では、油屋・今村（2002）⁶⁾ および今井ら（2013）⁴⁾ の抵抗則を用いて数値解析を実施し、各々の流況整合性を比較することで、陸上流速の再現に望ましい粗度係数付与手法を明らかにしている。

B) 時間発展型合成等価粗度モデルの概要

時間発展型合成等価粗度モデルは、津波の浸水状況に応じて建物や防潮林を流失させることで、より実現象に近い抵抗則を逐次設定する手法である。流出の対象としたものは、防潮林、木造建物、鉄骨造、RC 構造物としている。また、流出限界棟数を算定して各計算ステップにおける流出限界を算出し、建物等の流出数を設定している。以下にその概要を示す。

【流出限界棟数の算定】

時間発展型合成等価粗度モデルでは、各計算ステップにおいて流失させる建物の限界棟数を決定している。まず、各計算ステップで得た浸水深分布と、浸水深に関連した地域別の津波被害関数を照合することで、浸水深 1m ごとの浸水棟数、およびその浸水深に対する建物流失率を算定する。そして、条件付き確率の考えに基づいて、同時に流失する可能性の高い棟数を算出し、これを流失させるべき建物棟数の限界値としている。

【防潮林の流出限界】

防潮林の津波に対する効果と限界に関しては、直径 10 cm 以下の樹木は浸水深が 4.0 m に到達すると倒伏・折損することが示されている。同モデルでは、浸水深が 4.0m となった際に防潮林を流失させている。

【木造建築物の流出限界】

国土交通省都市局(2011)⁷⁾による現地調査結果から、左岸（仙台市）では浸水深が 3.5 m 以上、右岸（名取市）では浸水深 2.0 m 以上にて流失棟数が急激に上昇していることから、浸水深を閾値として流失対象建物の選定を行い、抗力の降順に流失させている。

【鉄骨造建築物，RC 造建築物の流出限界】

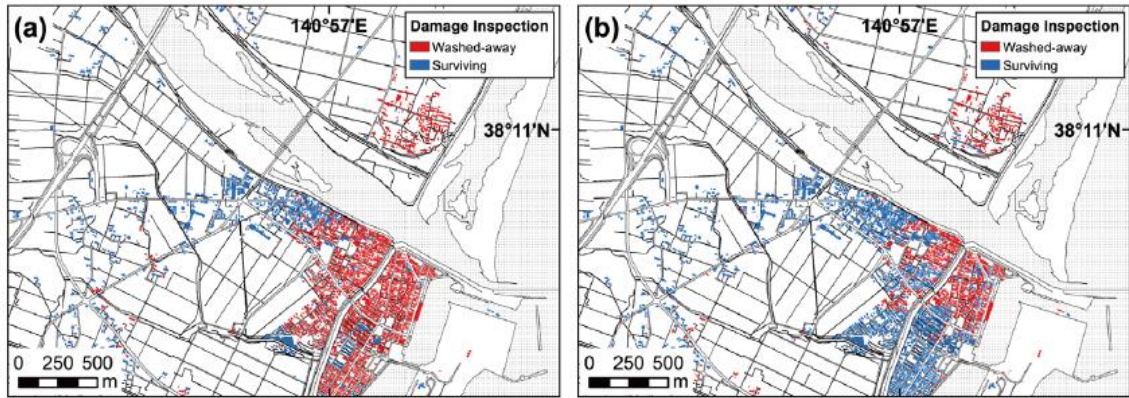
鉄骨造と RC 造の流出基準として、浸水縦断面積と浸水深の関連性から以下の被害限界式(1.4)を用いている。

$$A_c=6.8 \times h_{inun} \quad (1.4)$$

ここで、 A_c ：津波氾濫方向の浸水縦断面積（ m^2 ）、 h_{inun} ：浸水深（m）である。この式から、構造物が移動・転倒しないためには、6.8 m 以上の奥行きが必要であることが確認されており、浸水縦断面積 A_c に関連づけられた式(1.4)を流失基準と定め、抗力の降順に流失させている。

C) 時間発展型合成粗度モデルの実地形への適用

林らは、上述の条件で時間発展型合成等価粗度モデルを構築し、実地へ適用を行っている。時間発展型合成等価粗度モデルによる結果は、流失建物の分布（図 1.6）に関しては、実現象と解析結果が概ね一致していることが確認されている。しかし、一部の地域では、被害実態と解析結果に大きな乖離が生じている。特に、内陸部の小塚原地区において推定された流失建物分布は、実現象と概ね整合することが明らかになった一方、沿岸部の閑上地区（密集住宅街）において推定された流失建物は、被害実態に反して名取川河口付近にのみ集中した。被害推定が不十分であった結果は、密集市街地における津波氾濫流況の特性、および倒壊家屋から発生した漂流がれきの影響を考慮する必要性を示唆している。



(a) 実績の建物流失分布

(b) 計算における建物流失分布

図 1.6 実績と時間発展型合成粗度モデルの結果の比較(林ら, 2014)5)

1.2.2. 漂流物予測に関する既往研究

漂流物の予測に関する研究として津波による木材の流出について検討した後藤ら(1983)⁸⁾の研究, 船舶群を対象として実験と計算の比較検証を行った許ら(2015)⁹⁾, 漂流物と氾濫流の相互作用について実験と数値計算の比較検証を行った田島ら(2015)¹⁰⁾などが挙げられる. 以下に研究の詳細を示す.

(1) 後藤ら⁸⁾による木材を対象にした漂流物計算に関する既往研究

津波来襲に伴う木材流出の記録としては, チリ地震津波の時に, 宮古湾に集積されていた木材が流出し, 船舶などに被害を与えた. また, 十勝沖地震津波の際に, 宮古湾に貯木されていた中から 3700 本流出し, 湾央から湾奥一体に広がった例がある. これらをもとに後藤(1983)は, 津波が来襲した際, 木材がどのように移動し, 海域に流出するかを把握するために, 津波を外力とした木材移動モデルを提案した. 木材の移動に関する運動方程式, 座標算定式および抗力係数算定式, 質量係数等を式(1.5)~(1.9)に示す.

$$\rho_t V_t \frac{d\mathbf{u}_t}{dt} = \rho V_t \frac{d\mathbf{u}_f}{dt} + \rho(C_M - 1) V_t \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_t}{dt} \right) \quad (1.5)$$

$$- \frac{1}{2} \rho C_D V_t (\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_f) |\mathbf{u}_t - \mathbf{u}_f|$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \int_0^t \mathbf{u}_t dt + \sum_{k=0}^n \sqrt{24\kappa_0 \Delta t} \left(\xi_k - \frac{1}{2} \right) \quad (1.6)$$

$$C_D = [0.91 + 32.5 R_e^{-1/2}]^2 + 0.1 F_r^{0.25} \quad (1.7)$$

$$C_M = 1.78 \quad (1.8)$$

$$\frac{\kappa_0}{u_* D} = 0.032 \quad (1.9)$$

ここで ρ_t , ρ はそれぞれ木材および水の密度, \mathbf{u}_t , \mathbf{u}_f はそれぞれ木材および水粒子の速度, V_t は木材の体積, A_t は木材の接水投影面積, C_M , C_D はそれぞれ木材の付加質量係数および抗力係数である. X_0 と X は, それぞれ流木の初期位置と Δt 秒後の流木の位置, κ_0 は拡散係数, ξ は(0,1)間の一様乱数である. R_e , F_r は

それぞれレイノルズ数およびフルード数， u_* は水流速を対数分布と考えた場合の摩擦速度， D は全水深である．レイノルズ数およびフルード数は以下の様に定義される．

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu_{visc}} \quad (1.10)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (1.11)$$

ここで ρ は水の密度， μ_{visc} は粘性係数， U は代表流速， L は代表長さ， g は重力加速度， h は静水深となる．ただし，既往文献には代表流速，代表長さ等が記載されておらず詳細は不明であるが，一般的には代表長さに木材の長さを代表速度に津波の流速を与えているものと考えられる．

(2) 津波による船舶群の漂流・座礁に関する水理実験と数値モデルに関する既往研究

許ら (2015)⁹⁾は、船舶群が津波により漂流・座礁する水理実験を行い、漂流現象の傾向を分析するとともに、剛体モデルに基づく再現計算から漂流に関する各種モデルパラメータの影響や、船舶群の拡散範囲の再現精度について検証を行っている。

A) 船舶群の挙動を予測する数値モデル

数値解析における船体の挙動予測には剛体モデルを採用しており、形状を直方体として仮定し、並進方向と回転の運動方程式を解くことで物体の位置と角度を求めている。式(1.12)～式(1.14)に運動方程式を示す。

$$m \frac{dv_x}{dt} = F_{flowx} + F_{fricx} \quad (1.12)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = F_{flowy} + F_{fricy} \quad (1.13)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_z \quad (1.14)$$

ここで、 m ：物体の質量、 v_x 、 v_y ：物体の x 、 y 方向の速度、 I ： z 軸まわりの慣性モーメント、 ω ： z 軸まわりの角速度、 M_z ：物体が流体から受ける力であり鉛直軸回りのトルクである。また、並進方向の運動方程式中、右辺の第 1 項は流体力、第 2 項は底面摩擦力を表している。底面摩擦は物体が床面に接する際に生じる力であるため、水深が喫水を上回る場合は 0 になる。上記の運動方程式は、初期条件として水理実験での船舶の初期位置、初期角度を与え、4 次精度 Runge-Kutta 法により時間発展させることで数値解を求めている。また、流体力のモデル化には、モリソン式を用いており次式(1.15)～(1.17)となる。

$$F_{flowx} = \frac{\rho C_D}{2} \int U|U|dA_m + C_M \rho V_m \frac{dU_G}{dt} \quad (1.15)$$

$$F_{flowy} = \frac{\rho C_D}{2} \int V|V|dA_t + C_M \rho V_m \frac{dV_G}{dt} \quad (1.16)$$

$$M_z = \frac{\rho C_D}{2} \int V|V|l_x dA_t + \frac{\rho C_D}{2} \int U|U|l_y dA_m \quad (1.17)$$

ここで、 ρ ：水の密度， U, V ：漂流物に対する流体の x, y 方向の相対速度， C_D ：抗力係数， C_M ：付加質量係数， l_x, l_y ：物体重心位置からの距離， A_m ：流れの向きに対する物体没水部分の投影面積， V_m ：物体没水部分の体積である．添字 G は物体の重心位置を表す．流体の格子間隔が漂流物のスケールよりも小さい場合，流速の空間分布を考慮することができる．抗力係数は 1.5，慣性力係数は 0.75 としている．

$$F_{fricx} = -\mu_{dyn} g(m - \rho V_m) \frac{U_G}{\sqrt{U_G^2 + V_G^2}} \quad (1.18)$$

$$F_{fricy} = -\mu_{dyn} g(m - \rho V_m) \frac{V_G}{\sqrt{U_G^2 + V_G^2}} \quad (1.19)$$

ここで、 μ_{dyn} ：動摩擦係数であり，設計便覧から摩擦面が木（湿）の場合を参照し， $\mu_{dyn} = 0.2$ としている．水位の変化により浮力が変化することで底面摩擦力も変化する．

B) 実験に基づく数値モデルの検証

実験水槽は，図 1.7 に示す長さ 11m，幅 7m の平面水槽を用いており，構造物や湾形状については，防波堤の模型を設置し湾の幅は岸側に向かうにしたがい徐々に狭くしている．模型縮尺は 1/100 としている．津波は周期 20 秒，波高 3cm の押し初動の正弦波を 1 波を造波している．実験条件として，座礁の可能性がない場合を想定し岸側の水深を 5.5cm に設定した場合と，座礁の可能性が存在する場合を想定し岸側の水深を 0cm に設定した場合の 2 種類を

想定している。

図 1.8 は実験で得られた船舶群の軌跡と剛体モデルによる数値計算結果の比較を行っているものである。本実験と計算の比較から剛体モデルの有用性を示している。

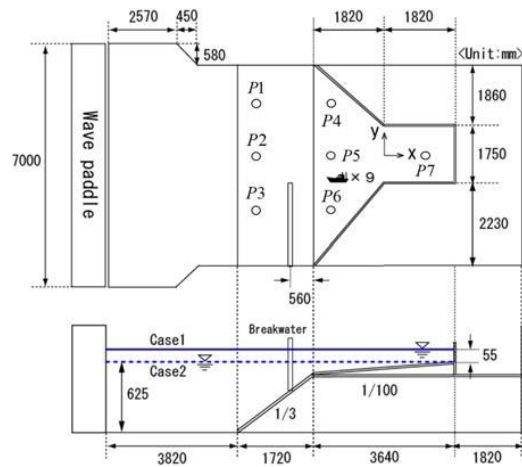


図 1.7 実験水槽の概要

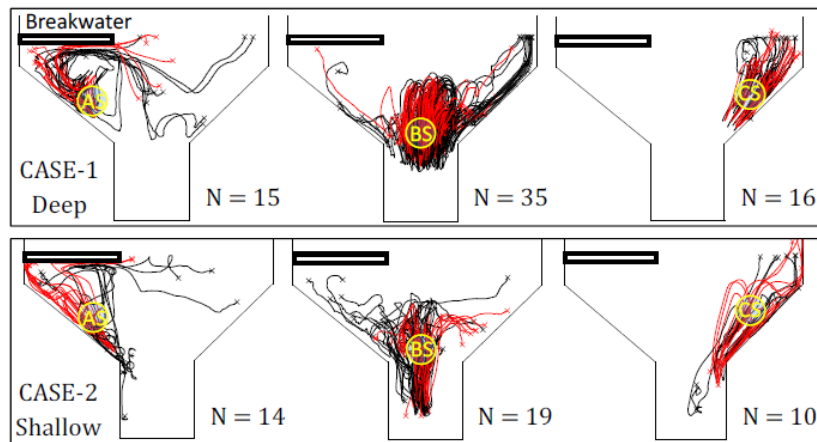


図 1.8 実験と数値計算の比較（赤：計算，黒：実験）

(3) 田島ら¹⁰⁾による漂流物と氾濫流の相互作用に関する既往研究

田島ら(2016)¹⁰⁾は陸上の氾濫流と漂流物群との相互作用について実験を実施，構築した数値解析モデルとの比較検証を行っている．さらに数値実験を実施し，漂流物の種々のモデルパラメータの影響を明らかにしている．

A) 実験概要

実験に用いられた水槽は幅 60cm，水槽左端から 10m の位置に開閉ゲートを設置し，ゲート急開によって段波を発生させている．ゲートからの距離を $x(m)$ と定義すると $x=4m$ から斜面を設置し，斜面の勾配は一様勾配ではなく地点によって異なり， $x=6.3$ で 10cm， $x=9m$ で 19cm， $x=12m$ で 29cm となる勾配となっている．ゲート右側には $h_2=10cm$ の初期水深を設定し，汀線付近から立方体の木片 850 個をランダムに配置している．図 1.9 に実験水路の概要図を示す．

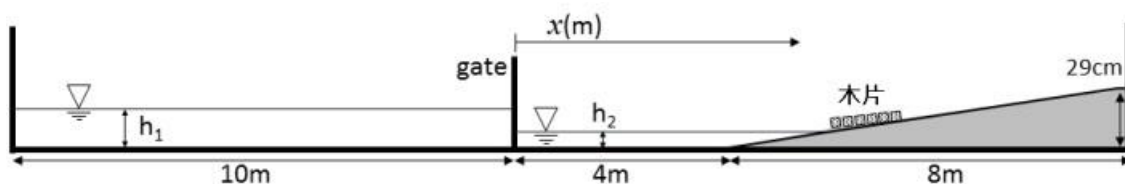


図 1.9 断面 2 次元水槽における実験の概要¹⁰⁾

実験ケースについては，ゲート左端の水槽内で貯水した h_1 の高さや，木片の有無，底面粗度の大きさなどについて変化を加えた複数のケースを実施している．実験ケースの一覧を図 1.10 に示す．また図 1.11 に実験における木片の移動状況を示す．

case	$h_1(cm)$	$h_2(cm)$	木片(850個)	人工芝マット
1-1	20	10	なし	なし
1-2			$6.3m < x < 7.1m$	
1-3			$6.6m < x < 7.7m$	
1-4			$6.3m < x < 7.1m$	
2-1	30		なし	なし
2-2			$6.3m < x < 7.1m$	

図 1.10 実験ケース一覧¹⁰⁾

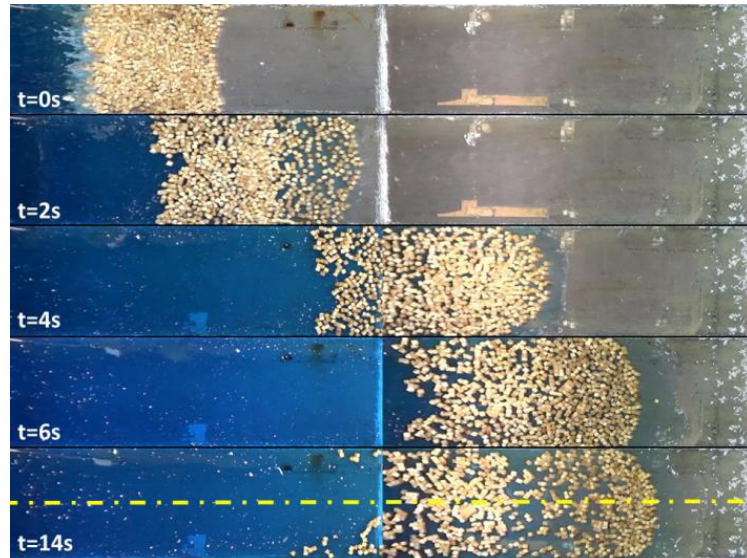


図 1.11 木片の移動状況¹⁰⁾

B) 数値モデルの概要

田島らは数値モデルを構築し，実験結果に基づいて検証を行っている．数値モデルについては，段波の伝播および遡上を再現する流体モデルと流体による個々の木片群の挙動を再現する木片運動モデルから構成されている．木片群の運動には，個別要素法を適用して個々の木片に対して運動方程式(1.20)を解いている．

$$s\rho V_d \frac{\partial \mathbf{u}_d}{\partial t} = \mathbf{F}_{cd} + \mathbf{F}_{cm} + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_k \quad (1.21)$$

ここで ρ は水の密度， s は木片の比重($s=0.6$)， V_d は木片の体積， \mathbf{u}_d は木材群の速度， \mathbf{F}_{cd} は流体による抗力， \mathbf{F}_{cm} は慣性力， \mathbf{F}_b は底面摩擦力， \mathbf{F}_k は漂流物群の衝突による斥力である．抗力慣性力は，モリソン式に倣い設定している．底面摩擦力については喫水深を求め，底面に接地している場合について静止摩擦および底面摩擦力が作用するように設定している．また斥力については，木片を球体近似し，ばねモデルを適用している．周辺木片との重心間の距離が辺の長さより小さい場合，重心間距離と木片長さの差分に比例して斥力を与えている．

一方，流体の遡上传播モデルは分散項を加えた非線形長波方程式を用いており，個々の木片に作用する流体力である抗力と慣性力の反作用力としての応力を方程式の外力項として考慮している．

C) 数値モデルと実験との比較

田島らは数値モデルの妥当性を実験結果に基づき検討している。

図 1.12 は木片群の有無における水位の比較結果である。漂流物群を対象として、移動状況、実験水位を良好に再現可能としている。

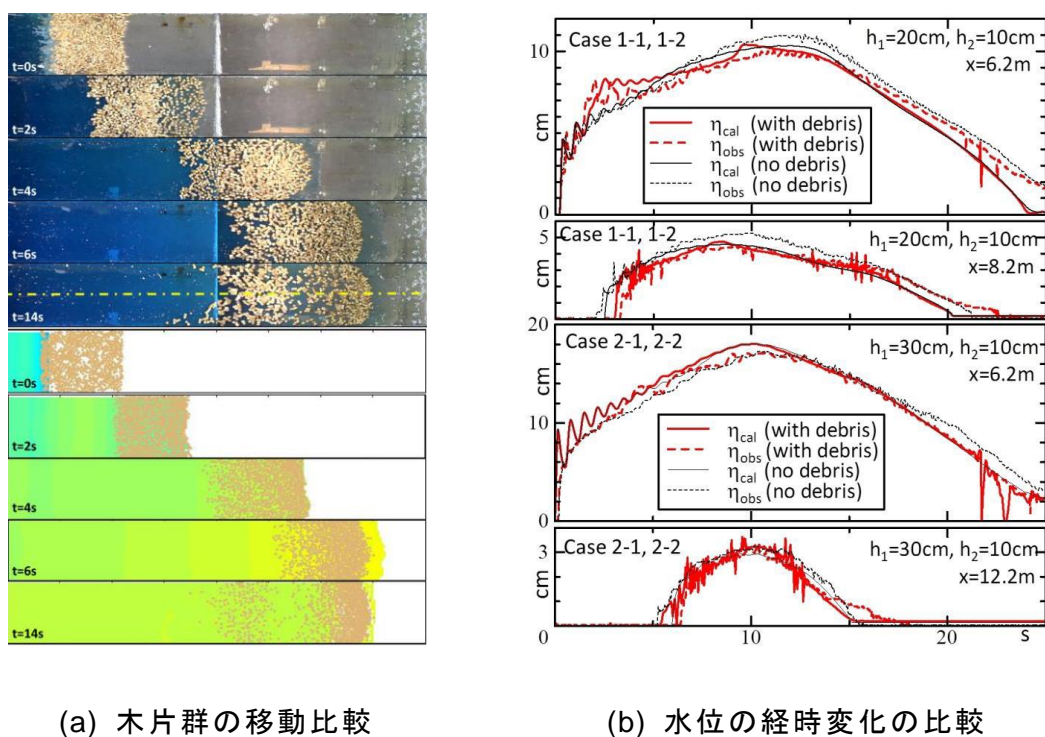


図 1.12 実験と数値計算結果の比較(田島ら, 2016)¹⁰⁾

(4) 津波石の移動予測に関する既往研究

過去に発生した地震規模やその発生周期から確率論的な地震予知を行い、その結果を防災に役立てている。したがって過去に発生した歴史地震や歴史津波を把握することは津波防災上重要である。多くの場合、我々は古人が残した文献を基に歴史地震や歴史津波を知る。しかしこの方法で得られる地震やその津波は一部であり、すべてを把握することは困難である。したがって、文献以外から地震や津波の情報を得る方法は重要であると言える。

そこで野路ら (1993) ¹¹⁾では、津波の流体力に関する検討を行い、その応用として、津波により海から陸に移動した岩塊 (津波石) を取り上げ、その移動を再現できる 1 次元数値モデルを提案した。また、大窪ら (2004) ¹²⁾はその 1 次元数値計算モデルを 2 次元数値計算モデルに拡張し、実験結果との比較を行ってモデルの妥当性を検証した。津波石の運動方程式を式(1.22),(1.23)に示す。

$$\begin{aligned} \rho_s LHW \ddot{X} = & \frac{1}{2} \rho_f C_D (U - \dot{X}) \sqrt{(U - \dot{X})^2 + (V - \dot{Y})^2} HW \\ & + \rho_f C_M \dot{U} LHW - \rho_f (C_M - 1) \dot{X} LHW - F_{bx} - F_{gx} \end{aligned} \quad (1.22)$$

$$\begin{aligned} \rho_s LHW \ddot{Y} = & \frac{1}{2} \rho_f C_D (V - \dot{Y}) \sqrt{(U - \dot{X})^2 + (V - \dot{Y})^2} HW \\ & + \rho_f C_M \dot{V} LHW - \rho_f (C_M - 1) \dot{Y} LHW - F_{by} - F_{gy} \end{aligned} \quad (1.23)$$

ここで、 ρ は密度、 U 、 V はそれぞれ x および y 方向の流速、 X 、 Y はそれぞれ津波石の x および y の移動距離、 H, L, W はそれぞれ津波石の高さ、長さおよび幅、 F_b は底面摩擦、 F_g は重力の斜面成分である。 C_D は抗力係数、 C_M は付加質量係数であり、添字の f と s はそれぞれ水粒子および津波石に関する量であることを示す。抗力係数と付加質量係数は時間的に変化する。このことを踏まえて、野路ら (1993) では水理実験を行い、その結果より抗力係数と付加質量係数は以下のように表された。

$$\log C_D = \begin{cases} 0.25 - 1.6 \log F_r & \text{for } h_{inun}/H < 1.2 \\ 0.55 - 0.25 h_{inun}/H - 1.6 \log F_r & \text{for } 1.2 < h_{inun}/H < 2.0 \\ 0.05 - 1.6 \log F_r & \text{for } 2.0 < h_{inun}/H \end{cases} \quad (1.24)$$

$$C_M = 1.15 + 1.15 \tan h_{inun} \{(-2.0 + 2.5 h_{inun}/H)\pi\} \quad (1.25)$$

ここで、 Fr 、 h_{inun}/H はそれぞれフルード数および津波石の相対水深である。

1.3. 本研究の目的

本研究の目的は、東日本大震災の実績被害の状況やこれまでの津波被害予測に関する既往研究を踏まえ、より実現象を考慮した津波被害予測手法の検討を目的としている。ここでは、津波被害評価で一般的に用いられている従来の津波浸水シミュレーション技術に着目し津波被害予測モデルの開発を行った。はじめに、2011年東北地方太平洋沖地震津波から抽出された課題点を整理し、その課題から得られた結果を踏まえ、津波浸水シミュレーション技術の高度化を行った。特に、従来の津波浸水シミュレーションで取扱っていなかった建物の影響や、災害がれきの影響、災害がれきの集積箇所の予測などの現象に着目し研究を行った。

既往研究では、津波浸水計算では建物の形状を考慮した今井ら(2013)⁴⁾の検討事例や、林ら(2014)⁵⁾などの建物倒壊について検討した事例が報告されている。また、漂流物や津波石移動に関しては、漂流移動あるいは底面移動等の個別の現象を取扱っており、これらの移動現象を同時に取り扱えるモデルの検討事例はない。また、本来であれば津波浸水や建物の被害、漂流および災害がれきの影響は相互に影響するため、より詳細な津波被害予測を行うためには、これらの現象を包括的に取り扱う津波浸水計算・災害がれき移動予測を評価可能なモデルが必要であると考えられる。

以上の研究目的や既往研究を踏まえ、本研究では、建物倒壊の影響を考慮した津波浸水予測モデルの構築を行い、その影響について明らかにする。さらに、災害がれきの複数の移動形態を考慮した、がれき発生・移動予測モデルを構築し、既往実験との比較および数値実験に基づき、モデルの基本性能の確認を行い、同モデルを東北津波で甚大な被害が生じた気仙沼市に適用し、モデルの再現性について検証を行った。

なお、環境省の定義では、災害がれき（災害廃棄物）は、地震、津波、火災被害によって発生した廃棄物のことを指しているが、本研究における災害がれきや津波漂流物の取り扱い範囲については、津波の遡上・浸水によって発生する廃棄物だけを検討対象としている。環境省との定義と混在し無いために、本

研究での災害がれきと津波漂流物を以下の通り定義する.

【本研究における津波漂流物と災害がれきの定義】

災害がれき：津波遡上によって倒壊した建物より発生した混合ゴミ（可燃・不燃物，金属・コンクリート・アスファルトがら）．漂流物も含む．

津波漂流物：上記の災害がれきのうち，自動車，船舶，コンテナ等，形状をとどめたまま津波被害によって発生するもの．

1.4. 本研究の流れ

本研究では、先述した社会的背景・目的と既往の研究を踏まえ、より実用的な津波被害予測モデルの構築を目指すものである。そのためには、従来の津波浸水シミュレーションにおける建物の取り扱いと建物の倒壊および災害がれきの発生・移動予測という現象の相互作用を考慮したモデルを構築し、その影響を明らかにする。

図 1.13 は本研究の流れとなっている。第 1 章では本研究の社会背景、既往研究を整理した。さらに、第 2 章では、東日本大震災における地震・津波・火災被害について取りまとめており、本研究で対象とする気仙沼市街地の被害状況について整理した。次に第 3 章において、従来手法および建物地形化モデルによる津波浸水シミュレーションを実施し、結果の考察を行った後その課題点を整理した。この結果を踏まえ、第 4 章では建物倒壊を考慮した津波浸水シミュレーションモデルの構築とモデルの検証を行い、第 5 章では、災害がれきの移動予測モデルの構築について検証した。第 6 章では、建物倒壊と災害がれきの影響を考慮した津波浸水シミュレーションを実地に適用しその影響を明らかにした。最後に第 7 章にて本研究の成果と課題について言及した。

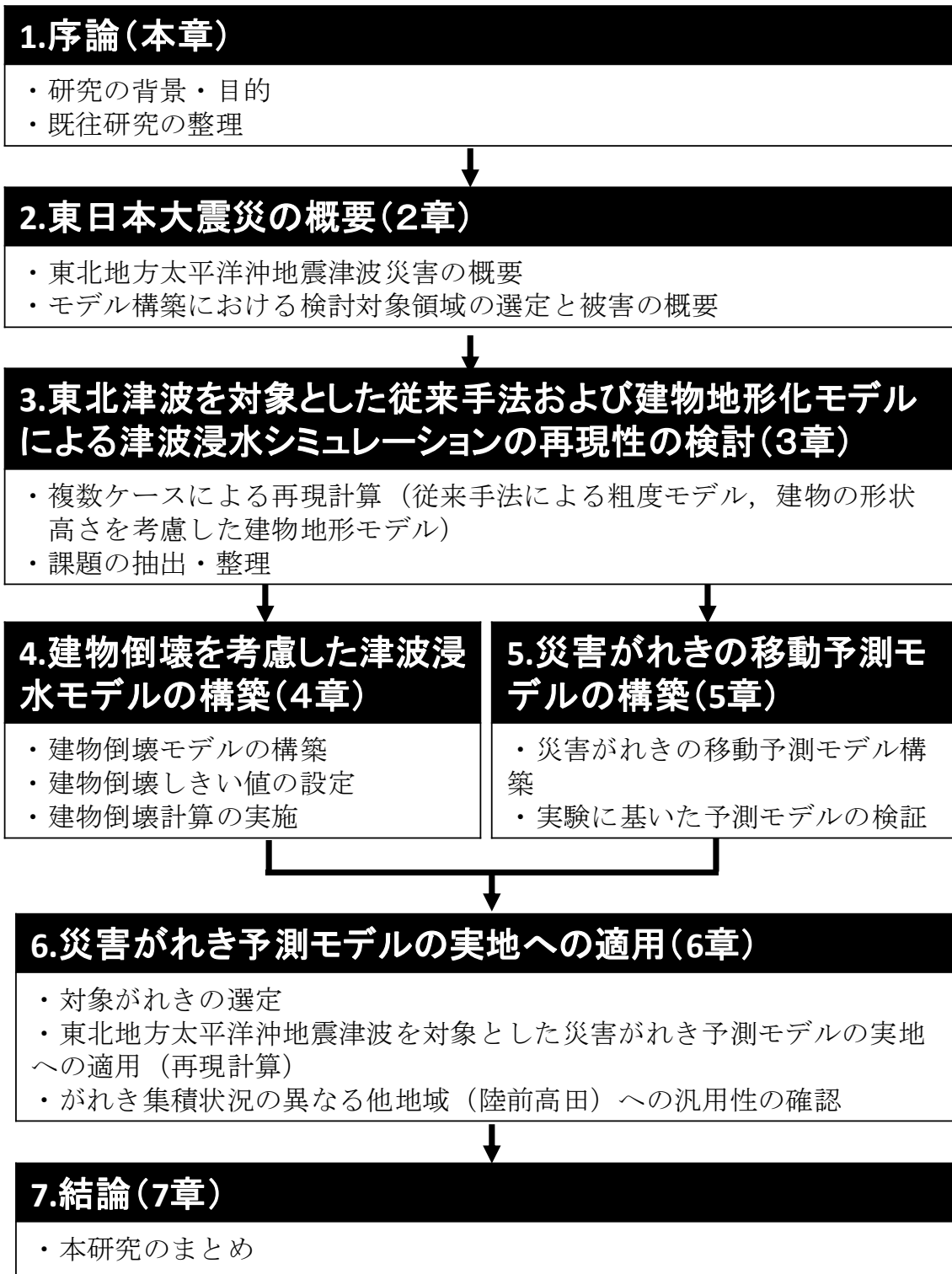


図 1.13 本研究のフロー

第2章 東北地方太平洋沖地震津波の概要と被害状況の整理

2.1. 東日本大震災の被害概要

東北地方太平洋沖地震は、2011年3月11日の14時46分ごろ、三陸沖（北緯38度06.2分，東経142度51.6分，深さ24km）に発生した地震であり，これに伴う津波が発生し，東北沿岸に甚大な津波被害が発生した。

表 2.1 は東北地方太平洋沖地震津波によって生じた東日本大震災と阪神淡路大震災の被害を比較したものである（内閣府，2012）¹²⁾。阪神淡路大震災は，局所的な地震被害のみであったのに対して東日本大震災では，地震に加え津波被害も発生していて，死者の数が3倍近くとなっている。さらに地震・津波被害にとどまらず，火災被害も一部で確認できる。

この結果から，東北地方太平洋沖地震津波による被害は，地震のみならず津波被害や火災被害を広域で引き起こしたものであったことがわかる。次節では東北地方太平洋沖地震津波がもたらした様々な被害・影響について記述する。

表 2.1 東日本大震災と阪神淡路大震災の比較（内閣府，2011）¹²⁾

	東日本大震災	阪神・淡路大震災
発生日時	平成23年3月11日 14時46分	平成7年1月17日 5時46分
マグニチュード	9.0	7.3
最大震度	震度7（宮城県栗原）	震度7（神戸市他）
震源地の深さ（km）	24	14
死者（人）	18,455	6,434
行方不明者（人）	3,276	3
負傷者（人）	6,023	43,792
住家被害（戸）	1,054,202	639,686
床上・床下浸水（戸）	35,935	-
焼損棟数（戸）	281	7,574
避難者数（人）	約47万	約32万
被害総額（兆円）	（推計）16～25	9.9

2.1.1. 震度分布の概要

図 2.1 に、気象庁が公表した東北地方太平洋沖地震時の震度分布を示す。東北地方太平洋沖地震は、地震の規模を示すマグニチュードは 9.0 で、東北地方沿岸に大きな地震をもたらし、特に震央から近い宮城県栗原市では最大震度 7 を観測し、その周辺では最大震度 6 強または震度 6 弱となっている。

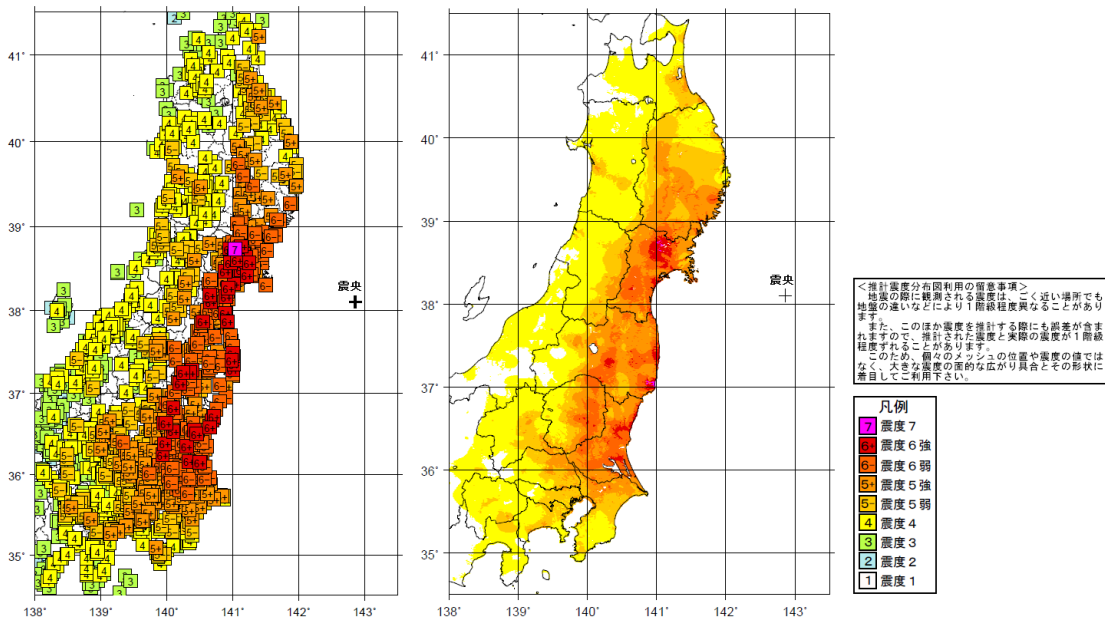


図 2.1 東北地方太平洋沖地震時の震度分布(気象庁, 2011)¹⁴⁾

2.1.2. 津波被害の概況

東北地方太平洋沖地震津波によって、青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県の沿岸に巨大津波が来襲し、甚大な被害が発生した。日本気象協会の既往報告¹⁵⁾によると各地の津波の高さは、福島県相馬市で 9.3m 以上、岩手県宮古市で 8.5m 以上、同県大船渡市で 8.0m 以上、宮城県石巻市鮎川で 7.6m 以上などが観測（気象庁 検潮所）されたほか、宮城県女川漁港で 14.8m の津波痕跡も確認されている（図 2.2 参照）。また、遡上高では、国内観測史上最大となる 40.5m が観測された（津波合同調査グループ，2011）¹⁶⁾。

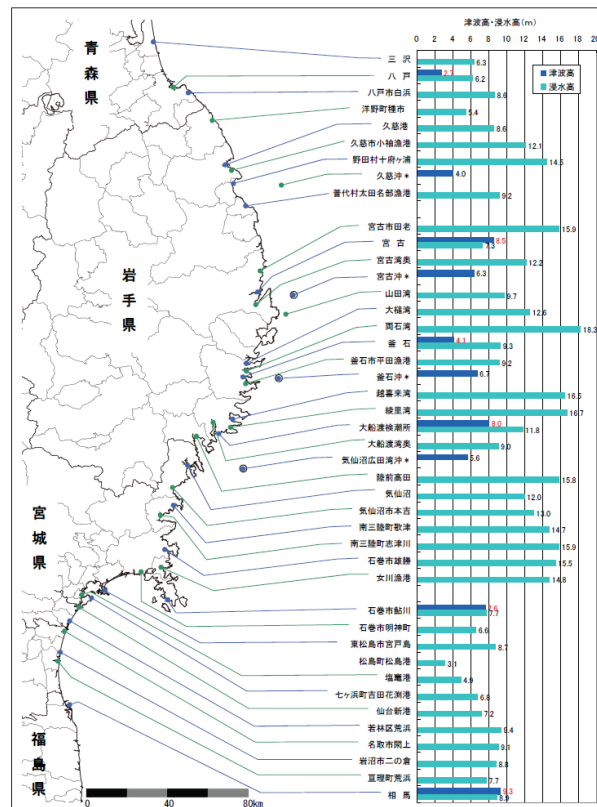


図 2.2 東北地方太平洋沖地震時の津波高と浸水高(日本気象協会，2011)¹⁵⁾

また浸水範囲については、岩手県、宮城県、福島県の3県では、(気象庁 HP より)海沿いの集落が軒並み水没したのをはじめ、仙台平野などの平野部では海岸線から数 km もの内陸にわたる広範囲が水没、河川沿岸では遡上した津波によりかなり内陸に入ったところまで没した。国土地理院の写真判読による

分析（図 2.3 参照）では、津波により浸水した範囲は、青森県，岩手県，宮城県，福島県，茨城県，千葉県 の 6 県 62 市町村で 561 k m² の面積に及んだ。

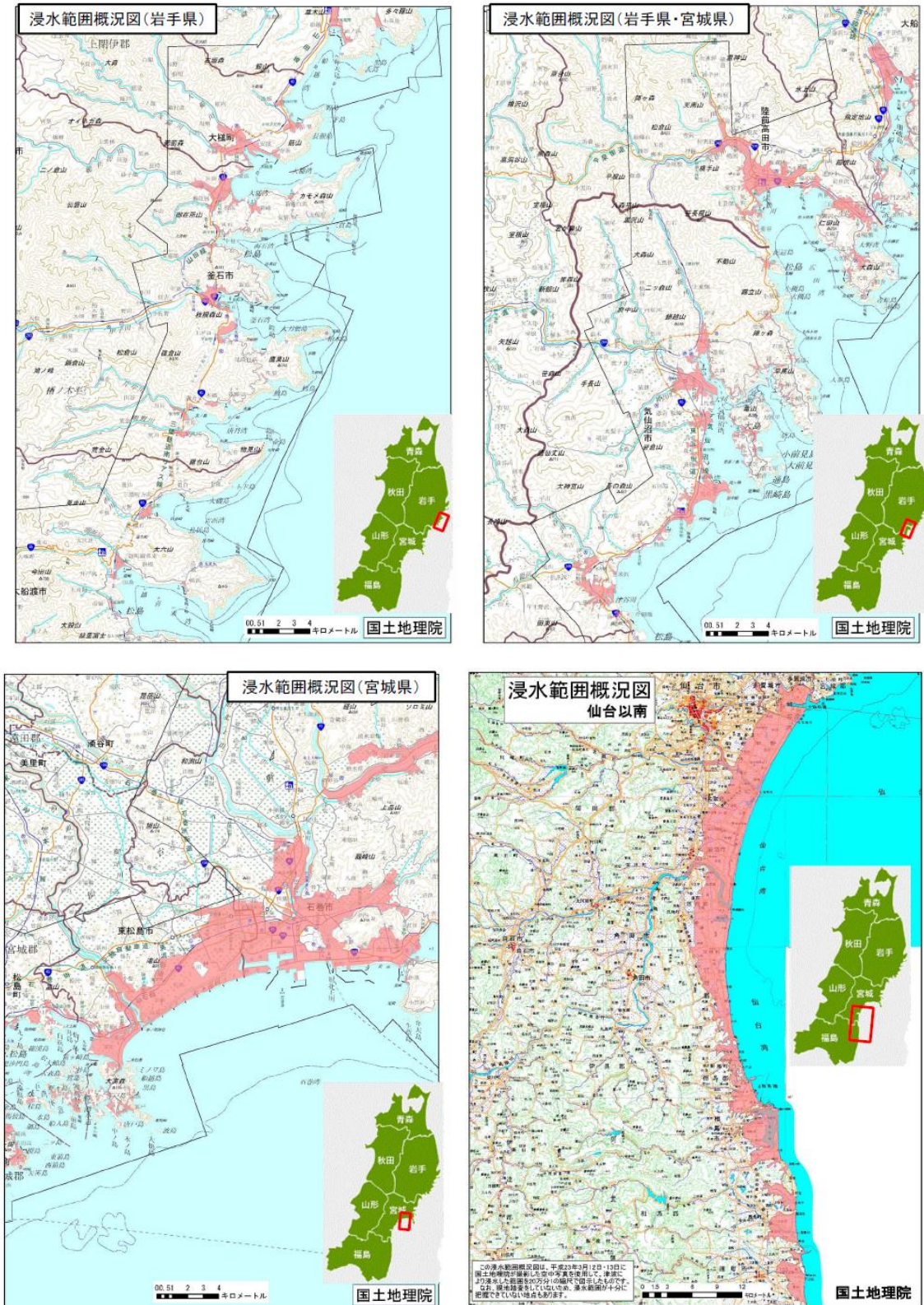
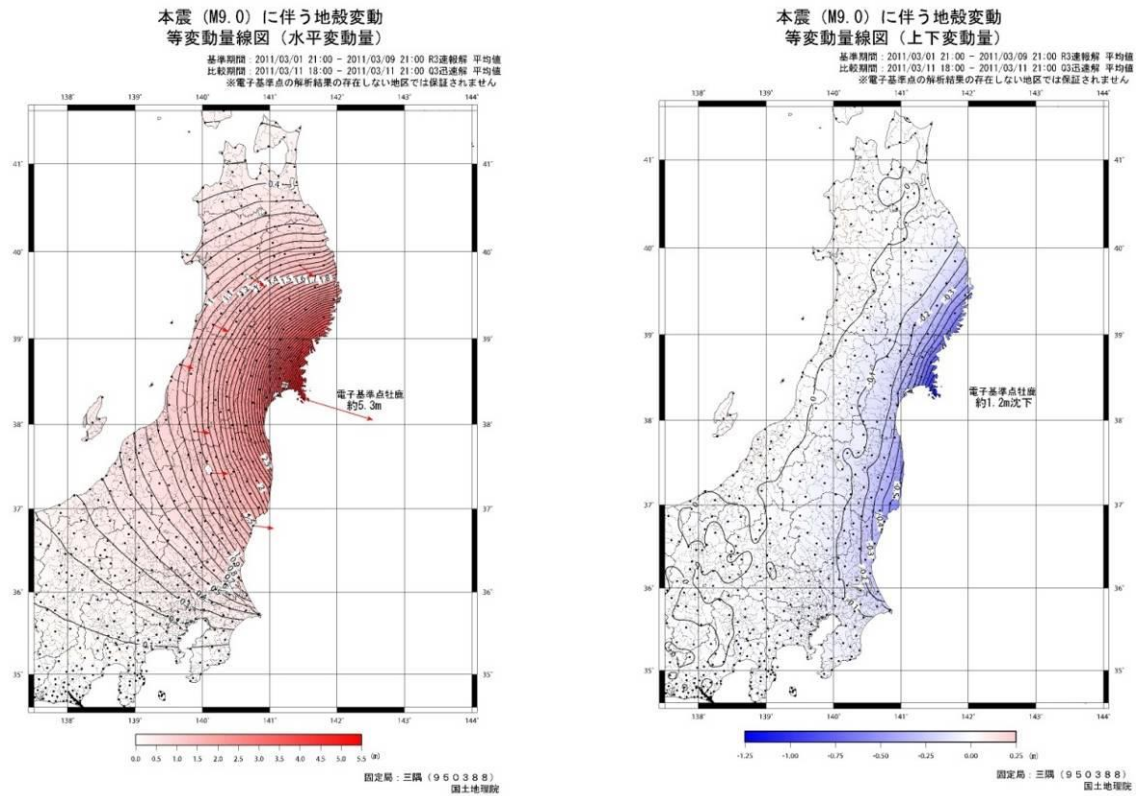


図 2.3 写真判読による浸水範囲（国土地理院，2011）¹⁷⁾

2.1.3. 地殻変動量

図 2.4 に、国土地理院（2011）¹⁸⁾が公表した東北地方太平洋沖地震によって生じた水平変動量及び鉛直変動量を示す。水平変動は最大で約 5.3m，鉛直変動は最大で約 1.2m となっている。特に鉛直変動は主に地盤沈下を表しており，浸水被害を増大もしくは長期化させる一因となった。



(a) 水平変位

(b) 鉛直変位

図 2.4 東北地方太平洋沖地震時の等変動量線図 (国土地理院, 2011) ¹⁸⁾

2.2. 検討対象地域（気仙沼市鹿折地区）の被災概要

本研究では、津波被害予測モデルの構築を行うにあたり、その再現性について検証を行う必要がある。東北地方太平洋沖地震津波では東北沿岸各地で被災が発生したが、その中でも、建物の残存状況やがれきの発生状況において豊富にデータが蓄積されており、なおかつ DSM、DEM 等の高精度標高データが整備されている、宮城県北東端の太平洋沿岸に位置する気仙沼市の鹿折地区とした。

気仙沼の鹿折地区は、気仙沼湾に面し水産加工場が集積し、その北側は住・商・工が混在する地区である。

図 2.5 は国土地理院の電子地図¹⁾で公表している被災前と被災後の空中写真の比較となる。この比較図から、気仙沼市の鹿折地区は浸水被害や建物倒壊被害、船舶などの漂流などが確認できる。また、倒壊・流失した重油タンクから漏れ出た油に引火し海上火災が発生し、火災は鹿折地区の市街地まで及んだことが報告されている。

以下では本研究の検討中心となる気仙沼市街地の被災状況について整理を行ったものである。



図 2.5 気仙沼市鹿折地区の被災前後の空中写真¹⁾

2.2.1. 津波被害の概要

本節では、甚大な浸水被害が生じた気仙沼市鹿折地区の津波痕跡水位と浸水範囲について整理を行った。地震発生から津波浸水の時系列についても整理した。

図 2.6 は国土地理院が公表している浸水図になる。この公表資料に基づき本研究で算定した鹿折地区の浸水面積は、 1.23km^2 (気仙沼市全体で 18.65km^2) であり平地部におけるほとんどの市街地で浸水被害が生じている。

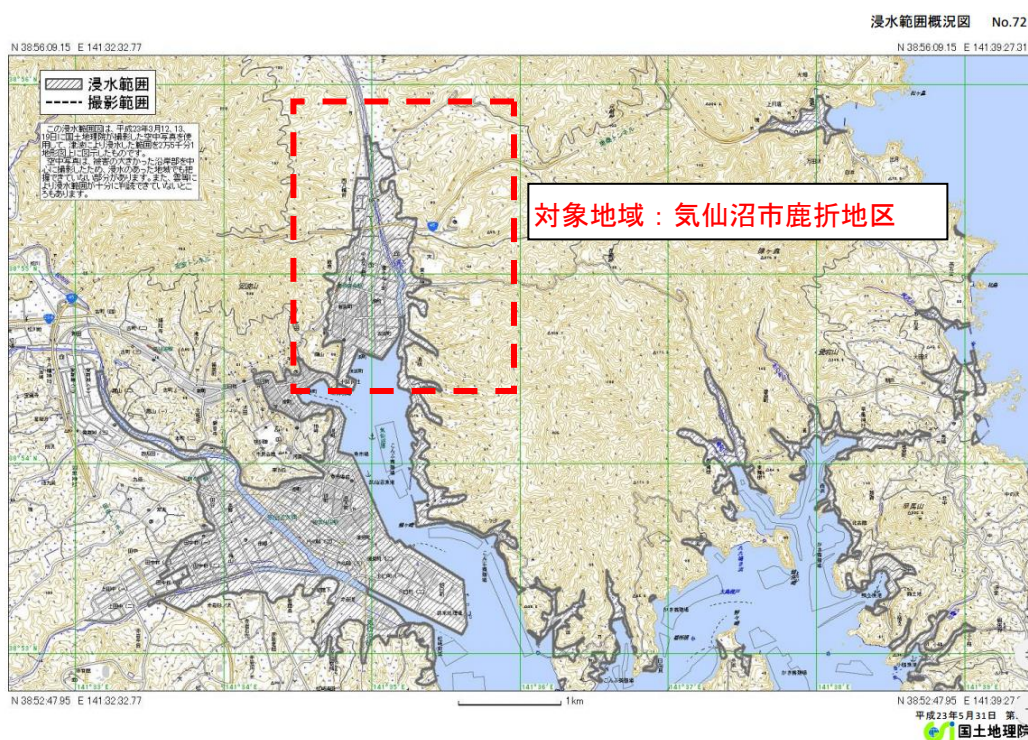


図 2.6 気仙沼市鹿折地区の浸水範囲¹⁶⁾

図 2.7 は津波合同調査(2011)¹⁶⁾より整理した気仙沼市鹿折地区における痕跡水位となる。痕跡津波は平均で約 T.P.+ 6.2m、最大で T.P.+ 9.4m(地点2)であったことが確認された。また、これらの結果から、津波高は沿岸ほど高く内陸ほど津波痕跡値が小さくなる傾向が確認できる。

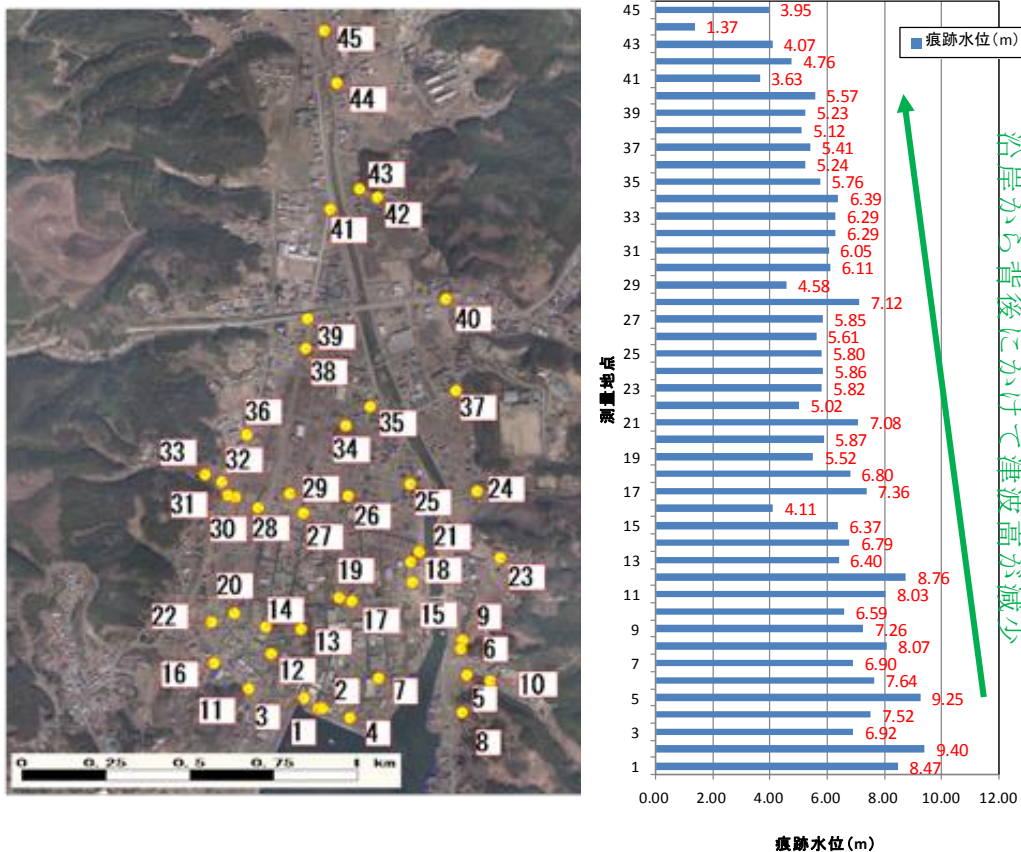


図 2.7 気仙沼市鹿折地区の痕跡津波高

津波来襲状況については、気仙沼市に設置しているライブ映像を基に作成した資料¹⁹⁾が気仙沼市で取りまとめている。表 2.2 は地震発生後から津波来襲、来襲後の被害状況に整理されている。この結果から、地震発生後 41 分までは魚町 2 丁目周辺（地点 A）で引波が確認でき、ほぼ同時刻の地震発生後 43 分で魚市場（B 地点）に津波の第一波が来襲し、陸上遡上を開始し 52 分後には魚町（C 地点）で浸水被害が発生していた。これらの結果を踏まえると、鹿折地区では、地震発生から 40 分程度では周辺で引波が発生しており、その後 40 分から 50 分にかけて陸上遡上を開始したと考えられる。

表 2.2 地震発生から津波到達までの時系列 ¹⁹⁾

	
<p>15 時 27 分(地震発生から 41 分後) 引波が確認される (地点 A)</p>	<p>15 時 29 分(地震発生から 43 分後) 第一波到達 (地点 B)</p>
	
<p>15 時 38 分(地震発生から 52 分後) 陸上遡上 (地点 B)</p>	<p>15 時 38 分(地震発生から 52 分後) 陸上で浸水被害 (地点 C)</p>
	
<p>15 時 43 分(地震発生から 57 分後) 陸上で浸水被害 (地点 D)</p>	<p>地点の詳細</p>

2.2.2. 建物の被災状況

気仙沼市鹿折地区の平地部では、ほとんど浸水被害が発生し、建物も損傷を受けた。図 2.8 に気仙沼市鹿折地区の建物の構造種別と被災区分を示す。なお、データは国土交通省都市局⁷⁾より提供頂いたものとなる。

また、表 2.3 と図 2.9 に気仙沼市鹿折地区の構造種別ごとの被災区分数を示す。この結果から、気仙沼市では大部分が木造家屋であり RC 造や S 造の割合は少ない。また、木造家屋の大部分が全壊（流失）しているのに対して、RC 造や S 造は全壊（流失）に至ったものは少ないことがわかった。この結果から、当然のことながら、木造と比較して鉄骨造やコンクリート造が津波に対してある程度の耐力を保有し、津波来襲時においても抵抗となったこと、また逆に、流出した木造住宅はほとんど流れの抵抗にならなかったことが考えられる。

本研究は、建物被害区分を残存と流出で再区分を行った。再区分を行った図を図 2.10 に示す。

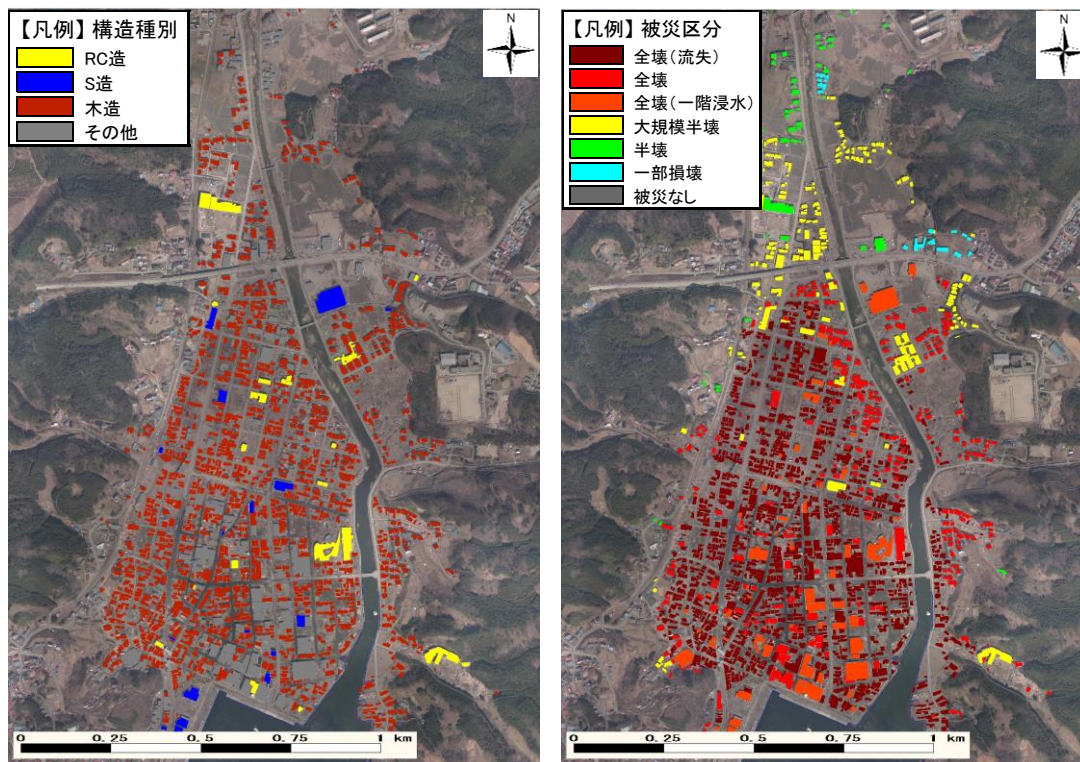


図 2.8 気仙沼市鹿折地区の建物構造と被災区分

表 2.3 構造種別ごとの被災区分数

	被災家屋数			
	鉄筋コンクリート造	鉄骨造	木造	その他
被災なし	0	0	0	74
一部損壊	0	0	10	11
半壊	1	0	37	27
大規模半壊	12	3	123	36
全壊(1階浸水)	10	10	13	40
全壊	8	4	279	75
全壊(流出)	0	1	1152	176

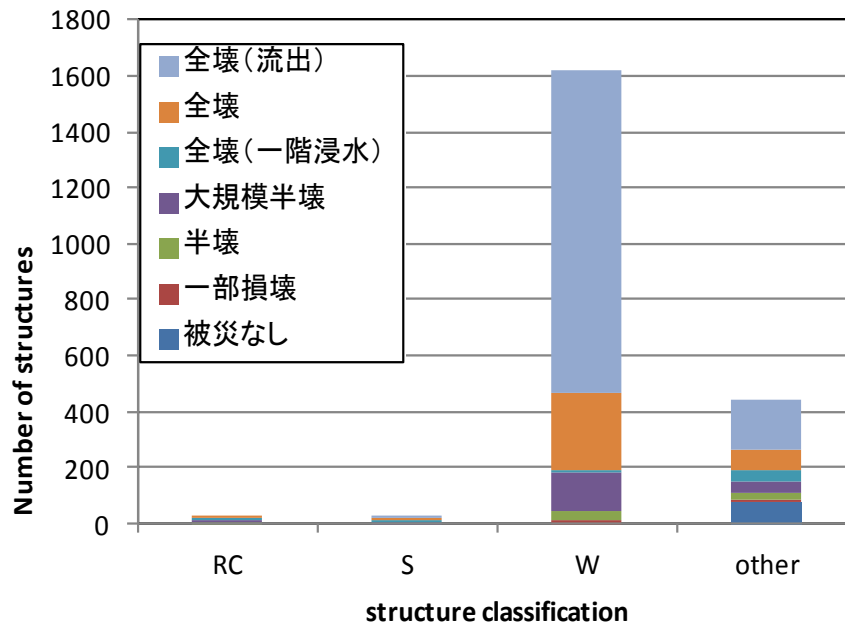


図 2.9 気仙沼市鹿折地区の構造種別と被災区分数

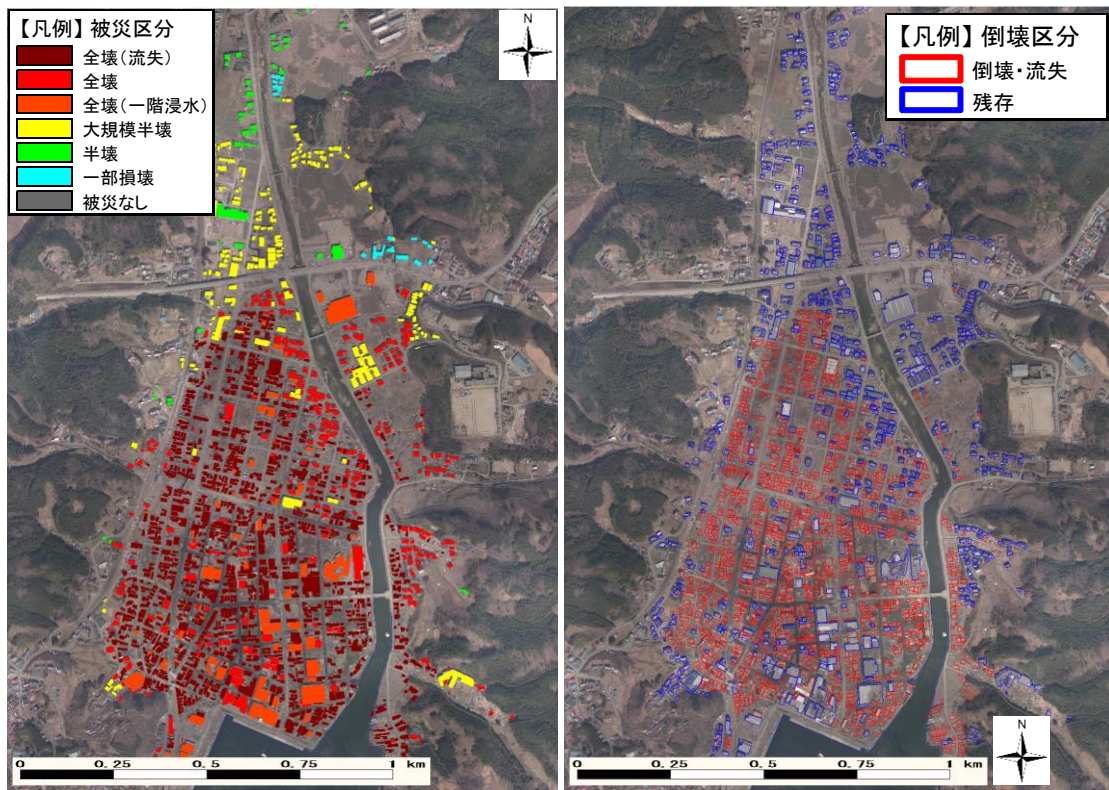


図 2.10 建物被害の再区分

2.2.3. 漂流物被害

東北地方太平洋沖地震津波によって、多くの車両や船舶が漂流した。図 2.11 は気仙沼市鹿折地区の内陸に打ち上げられた漁船・大型船舶である。港湾空港技術研究所の研究チームの報告によれば「波が到達したより高い場所でも建物が大きく損壊しており、船舶などの漂流物によって破壊されたと予想される」との報告事例もあることから、津波被害を想定する際には、漂流物の影響を考慮することは重要であると考えられる。しかしながら、津波による、浸水被害や火災等の被災状況は整理されているものの、漂流物の軌跡・集積箇所、衝突被害などの報告事例は少ない。

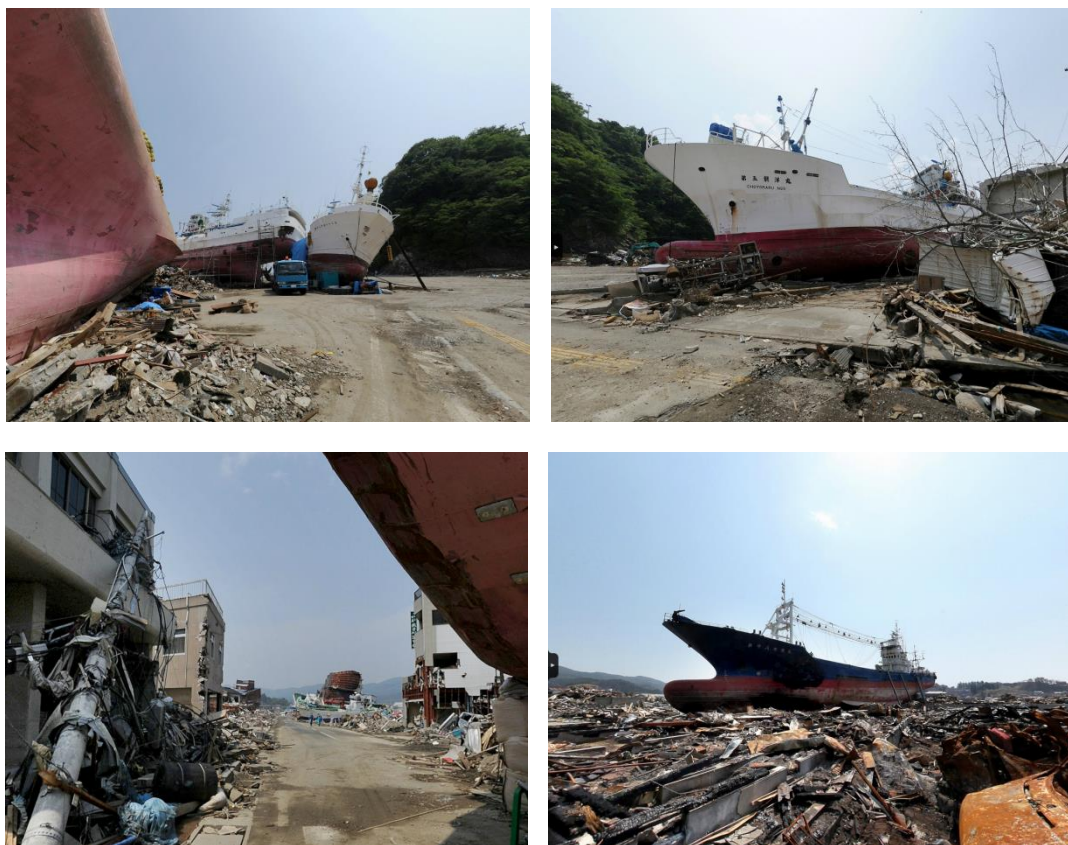


図 2.11 気仙沼市街地に漂着した大型船舶²⁰⁾

そこで本研究では震災後の空中写真の判読により、比較的重量があり衝突時に建物やインフラに損傷させる可能性がある車、船舶等の漂流物の最終漂着位

置を整理した。空中写真は国土交通省国土地理院応用地理部²¹⁾撮影時期が震災直後（平成23年3月13日）のものを用いた。図2.12に空中写真より整理した車両・船舶の最終漂着位置を示す。また、図中には浸水範囲を赤線で示している。この結果から、船舶は鹿折川や、鹿折地区の魚町周辺に集積していること、車両については、津波先端部で集積している傾向が確認された。

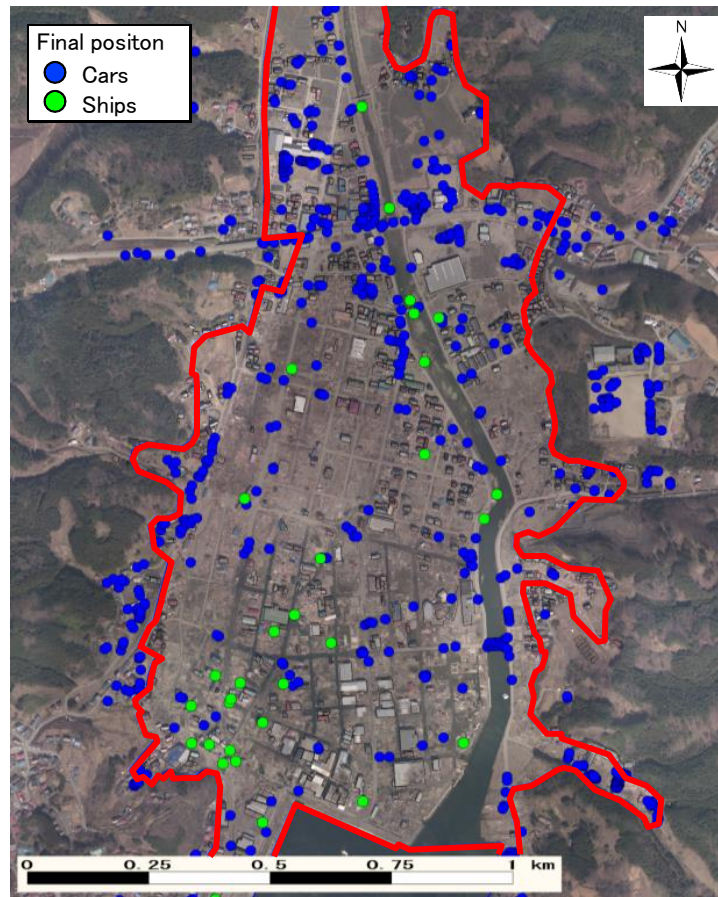


図 2.12 空中判読より整理した車両・船舶の最終位置

2.2.4. 災害がれきの発生状況

気仙沼市では、沿岸部の住宅や工場などが津波による直接浸水被害に加えて、海洋に流出した重油や散乱したがれきに引火することで火災による被害も発生した。また、市街地に散乱した災害がれきは、早期の救助や復旧の妨げになった。

図 2.13 に宮城県で公表されている、気仙沼市街地で発生したと算定された災害がれきの構成と総量を示したものである。災害がれきの内訳は、可燃物（木くず，廃プラスチック，紙等）や不燃物（コンクリートがら，金属くず等）が混ざった混合廃棄物と，津波によって海底から打ち上げられた土砂が主体となっている。総計は気仙沼市全体で 172 万トンとされており，鹿折地区では，浸水面積割合で計算すると，11.3 万トン（ $172 \times 1.23 \text{km}^2 / 18.65 \text{km}^2$ ）発生している事になる。

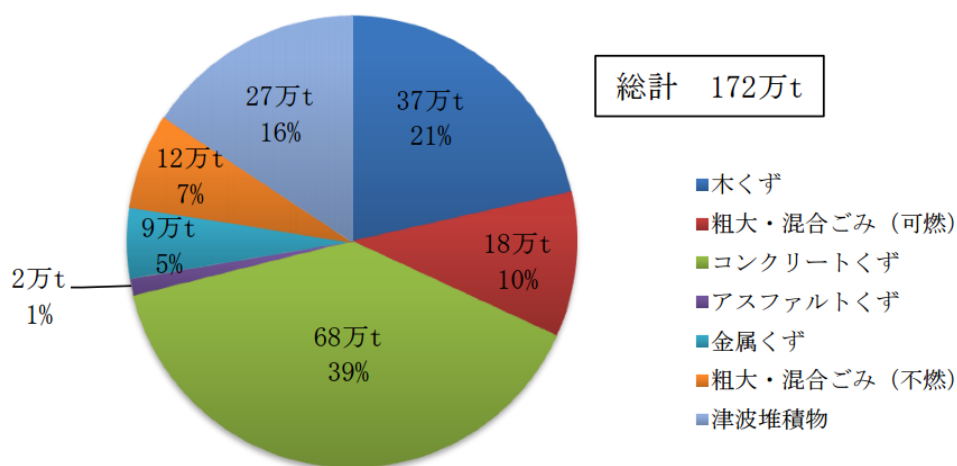


図 2.13 気仙沼市における災害がれきの発生状況 ²²⁾

次に、鹿折地区における災害がれきの集積状況を航空測量データより算定を試みた。図 2.14 は、震災前の航空測量データ（地盤高データ）と、震災後の航空測量データ（がれきの集積した高さを含む）の差分を示したものである。図中には、残存した建物の形状も合わせて示している。また、これらの結果を

参考にがれきの集積度合いを区分分けした結果を図 2.15 に示す（レベル 0 で集積なし，レベル 1 で 10～30%程度の軽微な集積，レベル 2 で 50%前後の集積，レベル 3 で大部分が集積）。この結果から，気仙沼市街地の鹿折地区における災害がれきの集積は，地区全体的に集積しているものの，津波先端部や残存した建物の背後に集積している傾向が確認できる。

津波先端部における集積は，津波の押し波によりがれきが先端部に運ばれ集積したと考えられる。また，建物の背後地については，津波の引波時に残存した建物が引波の阻害となることで災害がれきが集積しやすくなったのではないかと考えられる。

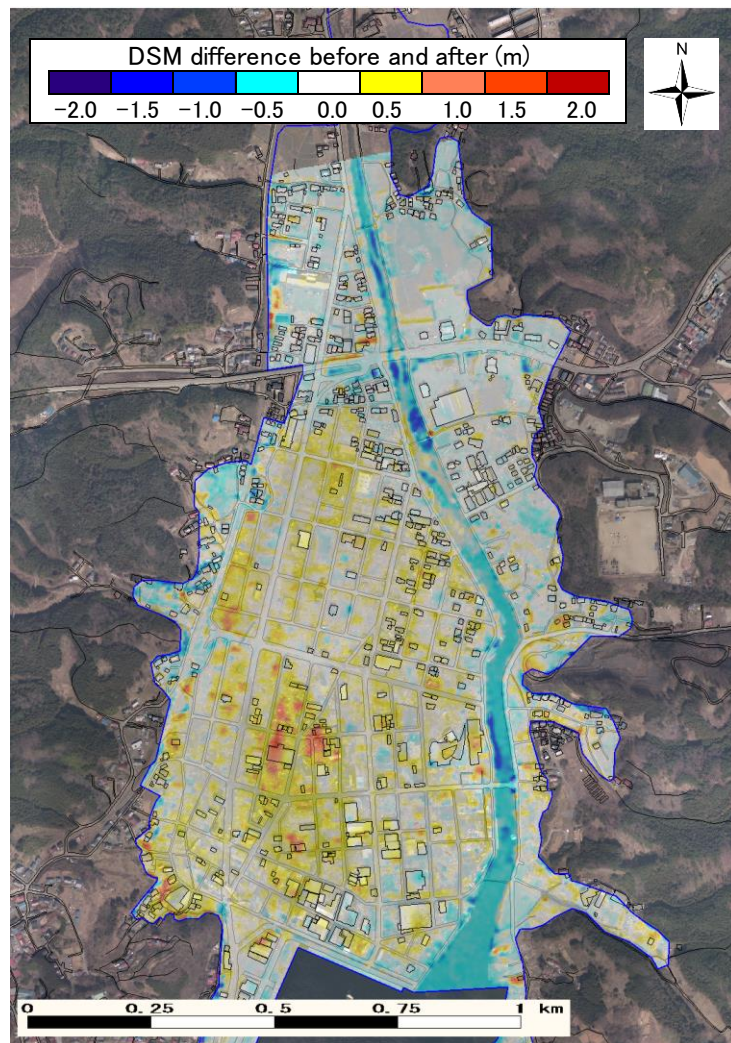


図 2.14 気仙沼市街地における災害がれきの発生状況

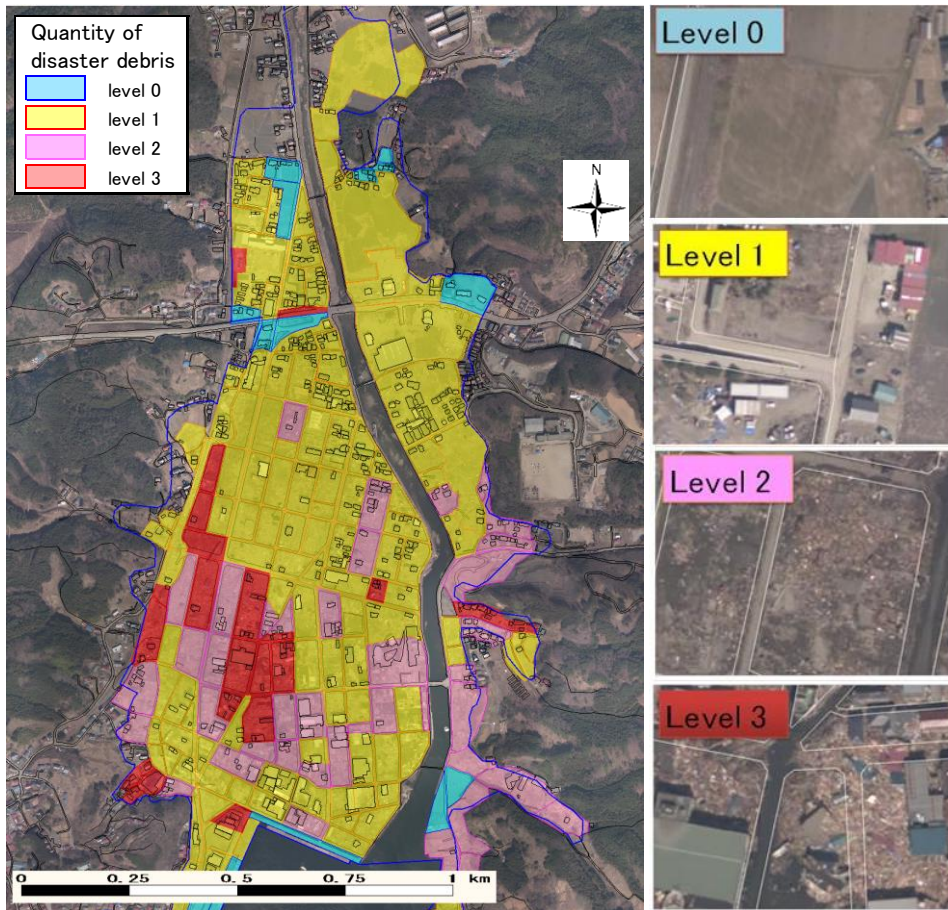


図 2.15 気仙沼市街地における災害がれきの発生状況（レベル区分）

2.3. 本章のまとめ

本章では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波および、本研究の検討対象となる気仙沼市における被害概要について整理した。今次地震津波における気仙沼市における被害としては、津波被害、建物被害、漂流被害、災害がれきの発生状況に分けて整理した。その結果、東北地方太平洋沖地震では、マグニチュード9.0、宮城県栗原市で最大震度7を観測された。津波による最大遡上高は40.5mとなっており、東北地方沿岸各地で津波浸水被害が発生した。

気仙沼市鹿折地区においては、最大10m弱の津波が襲来しており、地区全体が浸水する結果となった。浸水被害の傾向として、沿岸部では7.0mから10.0m程度の津波高であったが、沿岸から離れるにつれて津波高は減少しており、背後地では4.0～5.0m程度となっており、津波の周期にもよるが、建物や災害がれきの影響（遡上に対する抵抗）もあると考えられる。また、気仙沼市鹿折地区はほとんどが木造家屋で占められており、そのほとんどが全壊（流失）となっていることが明らかになった。一方でRC造やS造も存在していたが全壊（流失）に至ったものは少ない。このことから、木造に対してRC造やS造は津波に対してある程度の耐力を有していることがわかる。また、建物の影響は津波遡上に大きく影響されるため建物倒壊などの取り扱いが必要であると考えられる。一方、漂流被害や災害がれきの発生状況では、市街地全体で車両や船舶などの漂流物や、建物倒壊に伴う災害がれきの発生が生じていた。特に、津波浸水外縁部付近や残存した建物の周辺に集積している傾向が確認された。本章にも詳細を記述しているが、津波の引波時に残存した建物が引波の阻害となることで災害がれきが集積しやすくなったのではないかと考えられる。このことより、災害がれきの集積予測には、津波の流況に依存するのみならず、建物の残存状況も影響を及ぼすものと考えられる。また、津波の流況は建物の残存状況に依存することや、建物の被害は津波の流況に依存するなど、相互依存の関係にあると言える。

以上の結果から、詳細な津波浸水予測、建物被害、災害がれきの予測等を行う際には、相互の影響を考慮する必要があると考えられる。

第3章 東北津波を対象とした従来手法および建物地形化モデルによる津波浸水シミュレーションの再現性の検討

3.1. 本章の目的と概要

本章では、2011年東北地方太平洋沖地震津波によって甚大な被害が発生した気仙沼市を対象に従来手法による津波浸水シミュレーションを実施し、その再現性について検証を行った。また近年整備されつつある高解像度のDSMデータ（建物や樹木等の高さ情報を含む表層データ）やDEM（建物や樹木等の高さ情報を含まない標高データ）などの航空測量データを用いて、建物の形状や高さを直接地形として取扱った場合についても再現性の検証を行った。この手法による津波浸水シミュレーションを実施・比較することで、従来モデルや直接地形モデルの課題の整理を行うことを目的とした。なお、従来手法における津波浸水シミュレーションは地形モデルをDEMデータで作成し、建物による抵抗を粗度係数という抵抗値で評価を行っている。

次節以降では、本研究で用いた津波浸水シミュレーションの概要と計算条件および計算結果と考察について示す。

3.2. 津波浸水シミュレーションモデルの概要

3.2.1. 基礎方程式

一般的に津波の波長は数 km から数百 km と、海域の水深（数 m～1 km 程度，平均水深 3.8km），に対して非常に長い．例えば，気象庁（2011）の報告によれば，2011 年東北地方太平洋沖地震津波の津波波源域は南北方向に 550km，東西方向に 200km であり，海域の平均水深と比べて非常に長かったことがわかる．

このように水深に対して波長の長い波の運動は非線形長波理論によって表すことができる．非線形長波理論では，波高と波長の比，及び，水深と波長の比がいずれも小さいものとして導かれる（長波近似）．このとき，圧力は静水圧分布となり，水平流速は鉛直方向には一様に分布する．海底から水面までを鉛直方向に積分した非線形長波理論式は次のようになる．

【 連続の式 】

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

【 運動方程式 】

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3.3)$$

ここに， x, y ：水平座標， η ：静水面からの水位， g ：重力加速度， D ：全水深（＝静水深 h +水位 η ）， n ：マンニングの粗度係数， M, N ： x, y 方向の単位幅当りの流量（＝水平流速 u, v ×全水深 D ）

なお，式(3.2),(3.3)の中の非線形項（第 2, 3 項）は差分式で表した場合にも運動量が保存されるように，保存系表示をとっている．

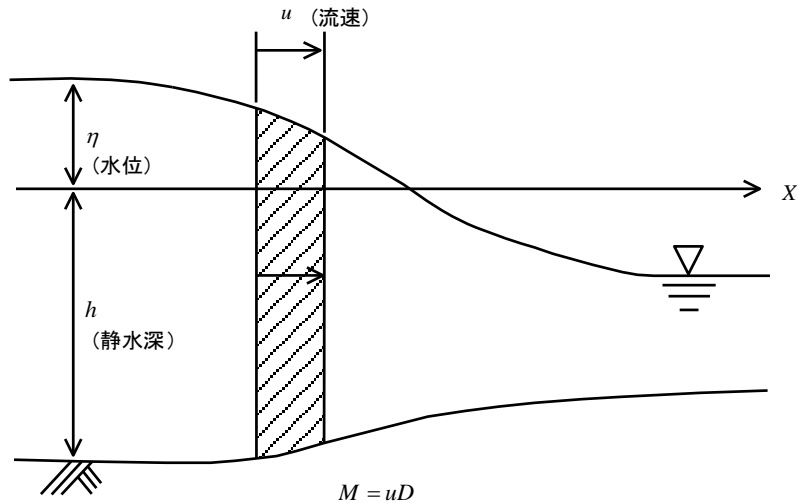


図 3.1 記号の説明

ただし、同式は、海底から水面までを鉛直方向に積分したモデルであり、流速は平均流速を、圧力は静水圧として仮定している。そのため、鉛直流れや鉛直方向の流速分布、また、動圧等を求めることはできず、これらに起因する現象（例えば 3 次元的な流れが卓越する場合）を対象とすることはできない。

市街地の津波流れは現象として 3 次元的な流れが生じることもあり、本来であれば 3 次元計算をする必要がある。しかしその現象（3 次元性）は局所的であり、本研究が対象とする広域から市街地における津波伝播や遡上浸水による浸水範囲や津波高を算定して比較する場合においては、2 次元の計算で十分であると考えられる。

3.2.2. 数値計算法

前節で述べた基礎方程式を，時間方向については Leap-frog 法のスキームを用いて，空間方向についてはスタガード格子を用いて差分化する．Leap-frog 法では，下式に示すように水位 η ，流量 M ， N の計算点を空間，時間的に $1/2$ 格子分ずらして配置する（図 3.2，図 3.3 参照）．以下の差分式の表示では，座標 (x, y, t) に対応する離散化量を表す添字として (i, j, k) を用いる．連続の式(3.1)の差分式を考えると中央差分を用いて式(3.4)～(3.6)のようになる．

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (\eta_{ij}^{k+1} - \eta_{ij}^k) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} (N_{i,j+1/2}^{k+1/2} - N_{i,j-1/2}^{k+1/2}) \quad (3.6)$$

k 時点での水位， $k+1/2$ 時点での線流量 M ， N が既知であるとする，次に求めるべき $k+1$ 時点での水位は式(3.7)のようになる．

$$\eta_{ij}^{k+1} = \eta_{ij}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{i+1/2,j}^{k+1/2} - M_{i-1/2,j}^{k+1/2}) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (N_{i+1/2,j}^{k+1/2} - N_{i-1/2,j}^{k+1/2}) \quad (3.7)$$

次に， x 方向の線形長波の運動方程式(3.2)については，点 $(i+1/2, j, k)$ を中心に考えると， $k-1/2$ 時点での線流量 $M^{k-1/2}$ ， k 時点での水位 η^k より，次に求める $k+1/2$ 時点での線流量 $M^{k+1/2}$ は式(3.8)のようになる．

$$M_{i+1/2,j}^{k+1/2} = M_{i+1/2,j}^{k-1/2} - gD_{i+1/2,j}^k \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k) \quad (3.8)$$

ここで，全水深 D は，水深 h ，水位 η より，

$$D_{i+1/2,j}^k = h_{i+1/2,j} + \frac{1}{2}(\eta_{i+1,j}^k + \eta_{i,j}^k) \quad (3.9)$$

同様に，y 方向の運動方程式(3.3)は，

$$N_{i+1/2,j}^{k+1/2} = N_{i+1/2,j}^{k-1/2} - g D_{i+1/2,j}^k \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k) \quad (3.10)$$

$$D_{i,j+1/2}^k = h_{i,j+1/2} + \frac{1}{2}(\eta_{i,j+1}^k + \eta_{i,j}^k) \quad (3.11)$$

Leap-frog 法では式(3.7)，(3.8)及び(3.10)を時間ステップ Δt 毎に交互に解くことにより，線形長波の計算を行う。

非線形長波理論式においては，計算の安定性を確保するために移流項（式(3.2)，(3.3)の第 2 項，第 3 項）の取り扱いに風上差分を用い，運動方程式の差分式は次のように表される。

$$\begin{aligned}
M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} &= M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{\left(M_{i+\frac{3}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i+\frac{3}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{21} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{31} \frac{\left(M_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i-\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\beta_{11} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k-\frac{1}{2}}} + \beta_{21} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}}} \right. \\
&\quad \left. + \beta_{31} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i+\frac{1}{2},j-1}^{k-\frac{1}{2}}} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} g D_{i+\frac{1}{2},j}^k (H_{i+1,j}^k - H_{i,j}^k) \\
&\quad - \Delta t \frac{gn^2}{\left(D_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^{7/3}} \frac{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{2} \sqrt{\left(M_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} &= N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\lambda_{12} \frac{\left(M_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{\left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{\left(M_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \cdot N_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{D_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] \\
&\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\beta_{12} \frac{\left(N_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{3}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{22} \frac{\left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} + \lambda_{32} \frac{\left(N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}{D_{i,j-\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}}} \right] - \frac{\Delta t}{\Delta x} g D_{i,j+\frac{1}{2}}^k (H_{i,j+1}^k - H_{i,j}^k) \\
&\quad - \Delta t \frac{gn^2}{\left(D_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^{7/3}} \frac{\left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} + M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)}{2} \sqrt{\left(M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \right)^2}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \beta_{11}=1, \beta_{21}=-1, \beta_{31}=0 \quad M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \lambda_{11}=1, \lambda_{21}=-1, \lambda_{31}=0$$

$$N_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0, \quad \beta_{11}=1, \beta_{21}=1, \beta_{31}=-1 \quad M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \lambda_{11}=0, \lambda_{21}=1, \lambda_{31}=-1$$

$$N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \beta_{12}=1, \beta_{22}=-1, \beta_{32}=0 \quad M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \lambda_{12}=1, \lambda_{22}=-1, \lambda_{32}=0$$

$$N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} \geq 0, \quad \beta_{12}=0, \beta_{22}=1, \beta_{32}=-1 \quad M_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} < 0, \quad \lambda_{12}=0, \lambda_{22}=1, \lambda_{32}=-1$$

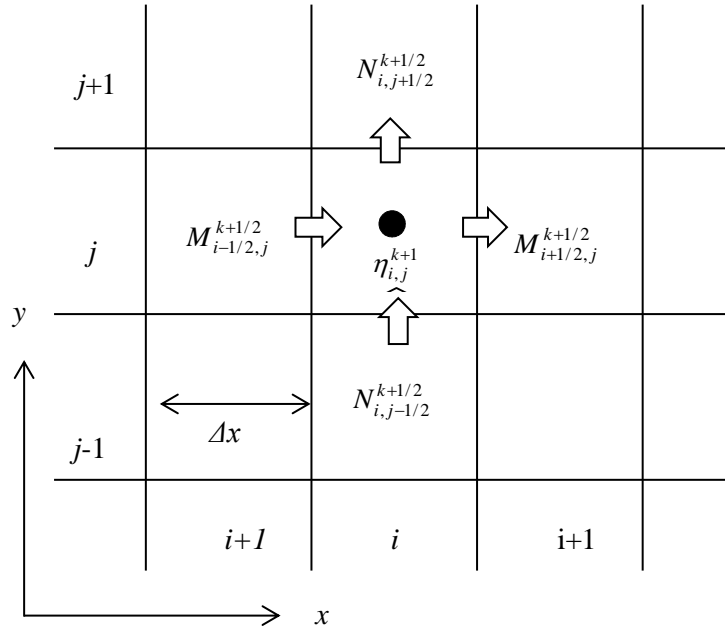


図 3.2 空間における変数配置

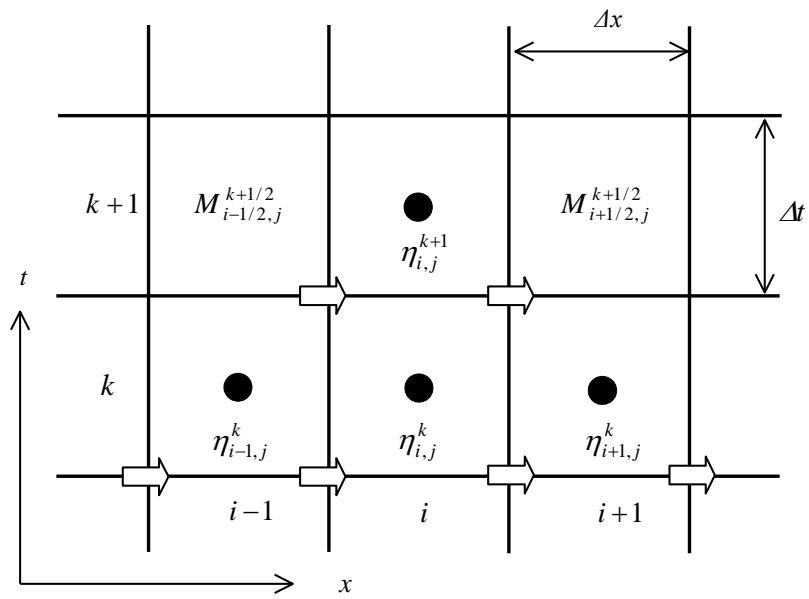


図 3.3 時空間における変数配置

3.2.3. 境界条件および初期条件の設定方法

(1) 境界条件の取り扱い

【沖側境界条件】

津波浸水シミュレーションでは,有限の計算領域縁に到達した波が反射することなく透過させる必要がある. 図 3.2 の空間配置で示した通り, 領域端では線流量 Q を設定する必要がある. そこで, 進行性の長波の速度 \sqrt{gh} とすると境界における流量は次式で求めることができる.

$$Q = \sqrt{M^2 + N^2} = \pm \sqrt{gh} \eta \quad (3.14)$$

上記の η は, 沖側境界の 1 個内側であり, 符号は波の進行方向に応じて設定している. 式(3.14)で算定した線流量を境界端の線流量として与えることで, 波が透過する様に計算する. なお, 本計算では, 津波のみを対象として, 風向・潮汐は本計算時間内には変動しないものとした.

【越流条件】

越流条件とは, 堤防等における越流量の算出方法のことである. 越流条件については, 一般的に本間の越流公式が使用されている. 図 3.4 に越流公式とその概念図を示す.

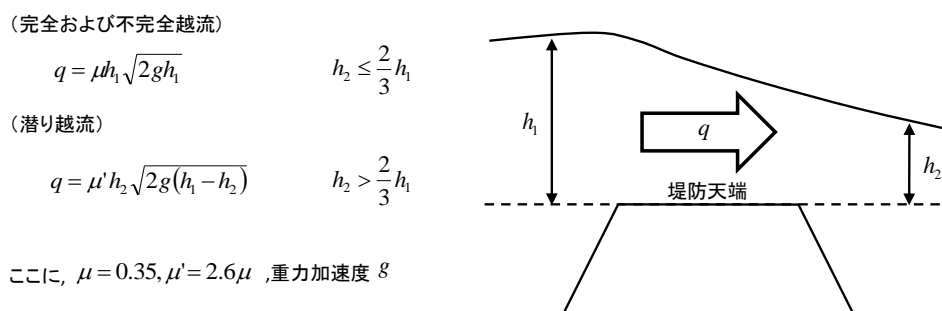


図 3.4 越流公式と概念図

【陸上遡上境界】

陸上への遡上を扱う場合には、岩崎・真野（1979）²³⁾の方法を用いた。これは、図 3.5 に示すように、津波先端部での地形を格子間隔幅の階段状に近似し、計算過程で時刻ステップ毎に階段上に水があるか否かを判別する方法である。計算の具体的な要点は次のとおりである。

- 津波の先端は、水位と格子境界（4 辺）での最大静水深の和が正の格子とゼロまたは負の格子の境界にある。
- 線流量を計算するための格子境界での全水深は、両側の格子の高い方の水位と格子境界での静水深の和として求める。
- 水のない格子中点とその背後格子の水位を結ぶ直線が水面勾配の一次近似であるとして線流量を計算する。全水深がゼロまたは負の場合には線流量をゼロとする。
- 全水深がゼロに近づいた場合には移流項を省略する。

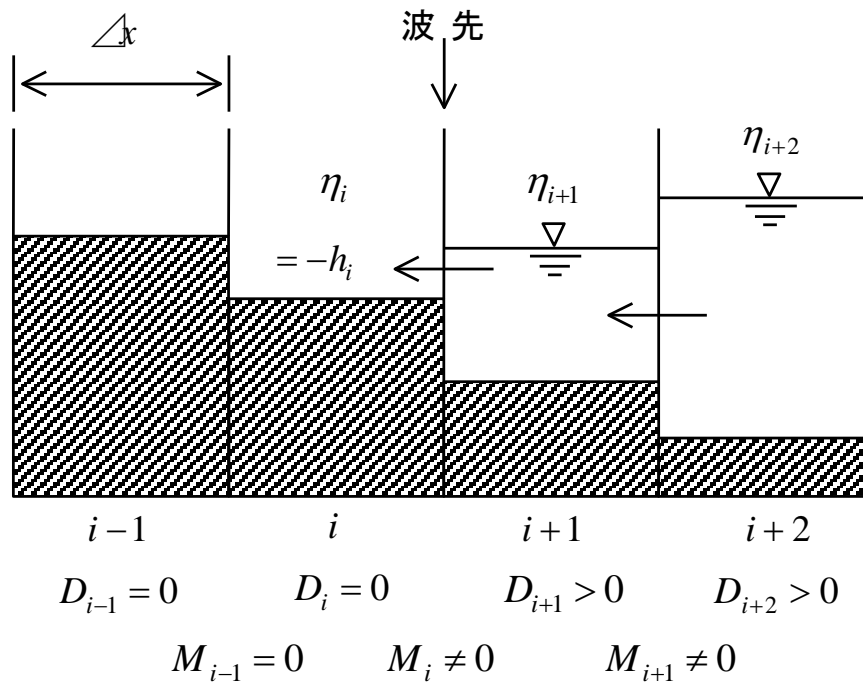
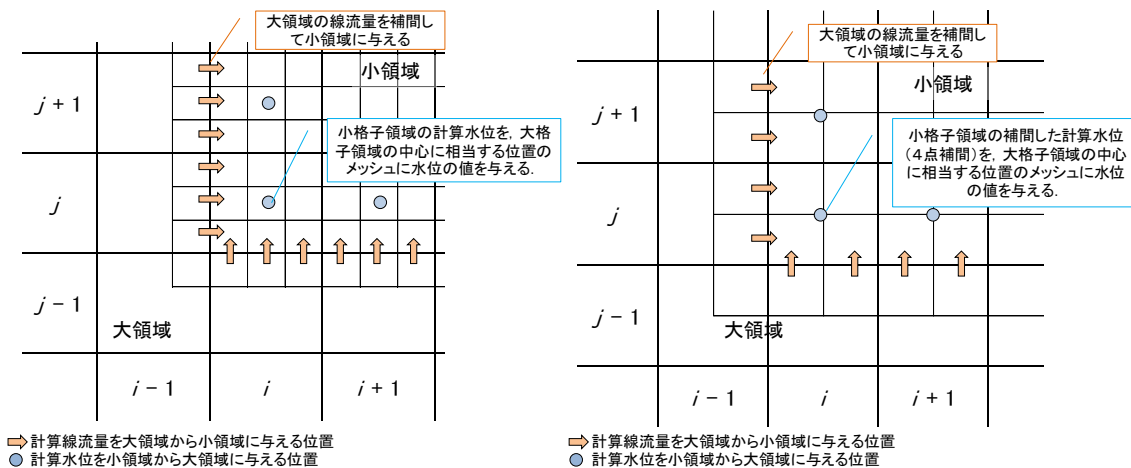


図 3.5 遡上境界条件

(2) 計算領域の接続方法

広域で発生した津波を沿岸域で高精度に計算を行うためには、計算格子を細かく配置することが望ましい。しかし、効率や精度の観点から、すべての計算対象領域に計算格子を細かく配置することは現実的ではない。通常津波計算では、計算を効率的に行うため、広域では大きい格子を配置し、沿岸域に細かい格子の配置を行い、計算格子間隔の異なる領域を接続する「ネスティング手法」を用いて計算を行う。以下では「ネスティング手法」の概要について示す（図 3.6 参照）。

- 大格子領域で計算された流量を補間して小領域に与える。
- 小格子領域で計算された水位のうち、大格子領域の中心に相当する位置の値をそのまま大格子に与える。厳密に値が一致しない場合（図(b)の様に 2 分割の場合）は補間により与える。
- 大小領域間の補間値を与える格子点として、図 3.6 のように、小領域では 1 格子余分に設定する。



(a) 1/3 ネスティングの場合

(b) 1/2 ネスティングの場合

図 3.6 領域接続の格子点配置

(3) 初期水位の設定方法

津波数値計算の初期条件としては、地震断層モデルを用いて計算される海底地殻変動の鉛直成分を海上面に与える方法を用いた。

地殻内部に蓄積された歪みが、ある限界に達すると亀裂（断層）が生じ、これに沿って両側の地殻が急激にずれる。この現象が断層運動であり、断層面が食い違う際に地震動が生じる。海底下で断層運動が起こると海底に鉛直方向の隆起・沈降が生じ津波の原因となる。断層運動自体は非常に複雑な過程を持つが、断層運動全体を巨視的に見ると簡単なモデルで表現することができる。図 3.7 は断層運動をモデル化したものである。長さ L_{fau} 、幅 W_{fau} の矩形の断層面が平面的に U_{fau} すべり量（食い違い量）だけ互いにずれるものとする。典型的なものとしては、図 3.8 から図 3.9 に示すように、水平方向にずれる横ずれ断層（右ずれ・左ずれ）や鉛直方向にずれる縦ずれ断層（正・逆断層）がある。断層の幾何学的特性は、すべり方向 λ_{fau} 、断層の走向 φ_{fau} 、断層面の傾斜角 δ_{fau} によって表される。以上の 6 個が最も簡単な断層パラメータで、地震波解析により推定される。これらに断層の位置情報を加えた断層モデルのパラメータ一覧を表 3-1 に示す。

断層パラメータから断層近傍における地表面の鉛直分布は、弾性論を基礎と Mansinha and Smylie (1971)²⁴⁾の方法や Okada(1992)²⁵⁾の方法により計算することができる。図 3.7 に例を示す。海底における地殻の鉛直変位が海面に即時に伝わると仮定すると、鉛直地殻変動量が津波の初期波形となる。

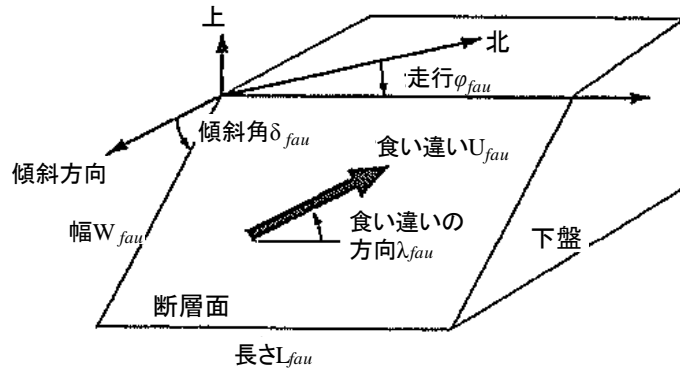


図 3.7 断層モデルとパラメータの概要²⁶⁾

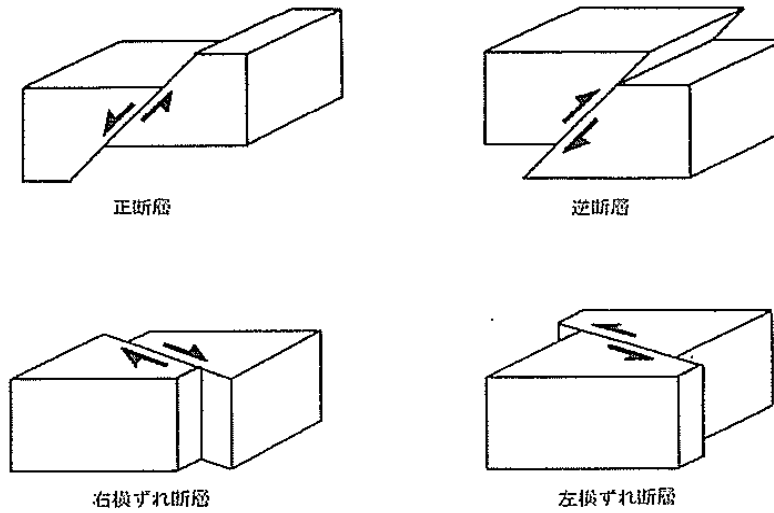


図 3.8 断層のタイプ²⁶⁾

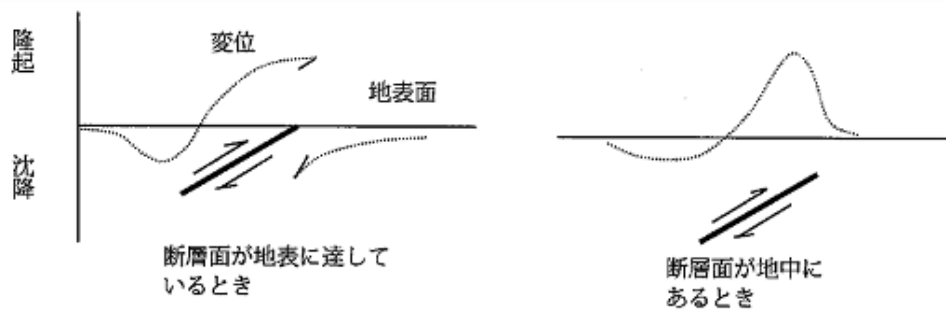


図 3.9 断層運動と地表変位の概念図

表 3-1 断層モデルのパラメータ

基準点位置：緯度 N , 経度 E	断層面の位置を示す。断層面の位置を手前に傾き下がるように置いた場合，左上に位置する端点を断層基準点と定め，その緯度 N , 経度 E , 深さ d_{fau} を示す。
断層面上縁深さ： d_{fau}	
断層長さ： L_{fau}	断層面の大きさを示す。
断層幅： W_{fau}	
すべり量： U_{fau}	
走向： φ_{fau} 断層が水平方向でどの方角に伸びているかを示す。	断層面の向きを示す。
傾斜角： δ_{fau} 断層が水平方向でどの方角に伸びているかを示す。	
すべり角： λ_{fau} 断層がどの方向に動いたかをしめす。	

3.3. 計算条件

3.3.1. 検討ケース

本研究では、津波浸水予測によって再現計算を行い、その再現性と課題について整理する。また、建物の取り扱いを従来手法の粗度とした場合と建物を地物として形状を考慮した場合の検討を行った。また、建物の地物化は震災前の建物と震災後に残存した建物とした。計算ケース一覧と建物の表現方法の概要を表 3.2, 図 3.10 に示す。ケース 1 が従来手法となり、建物の影響を粗度係数で表現する場合、ケース 2 が震災前の建物を地物化、ケース 3 が震災後に残存した場合のケースとなる。各ケースの粗度係数については、「3.2.2 の地形データ等の作成」で詳細を示すが、ケース 1 では、建物の影響を粗度として取り扱い、ケース 2, 3 は街路やさら地を想定して設定を行っている。

表 3.2 再現計算のケース一覧

ケース	建物(使用した標高データの種類)	倒壊有無
1	従来通り粗度で評価 (DEM データで作成)	倒壊なし
2	震災前の全ての建物を地形 (DSM データで作成)	
3	震災後の残存した建物を地形 (DSM データで作成)	

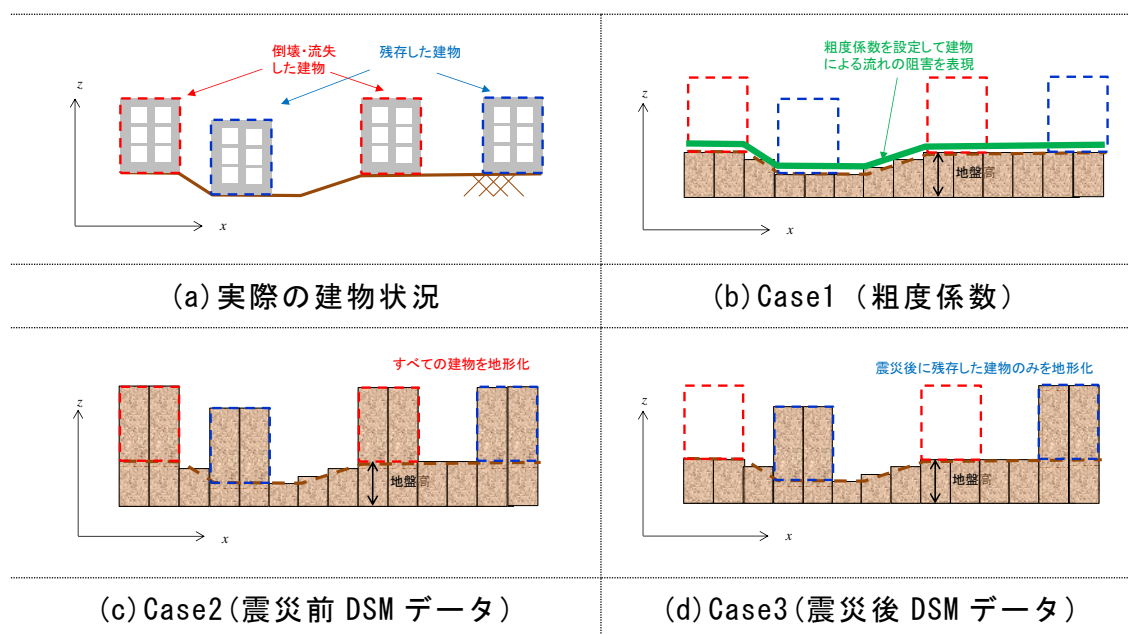


図 3.10 実際の建物状況と各ケースの建物の表現方法

3.3.2. 地形データ等の作成

(1) 計算領域・計算格子間隔の設定

津波浸水シミュレーションの検討対象とする領域は、津波の波源域から沿岸・市街地となる。沿岸域や市街地を詳細に計算するためには、より細かいメッシュを作成する必要があるが、広域においても同一の格子幅で計算を行うことは、計算負荷・計算効率の観点から現実的ではない。通常の津波浸水シミュレーションでは、広域では粗い格子幅で、沿岸・市街地では細かい格子幅を採用し、領域接続を行うのが一般的である。本研究でも、広域から沿岸・市街地までに複数の計算領域と格子幅を設定し、計算領域間は接続計算を行うものとした。

計算格子幅は内閣府のデータ²⁷⁾を参考に 1350m (領域 1) ,450m (領域 2) ,150m (領域 3) ,50m (領域 4) とした。さらに気仙沼市街地を詳細に計算する目的で 10m (領域 5) ,2m (領域 6) の格子幅を採用した。沖側境界を設定する格子幅 1350m(領域 1)の計算領域は、内閣府(2006)²⁵⁾に基づき設定を行ったが、規模が大きい津波を計算する場合に沖側境界で波が反射する場合がある。予備計算を踏まえ計算領域の拡大を行っている。また、気仙沼市街地における計算領域 6 は、東北地方太平洋沖地震津波時の浸水範囲が包括できる範囲とした。本研究で設定した領域の概要、範囲を表 3.3 および図 3.11 に示す。

表 3.3 計算領域の概要

No.	格子幅 (分割数)	領域南西端の座標 (平面直角座標第 10 系)	
		x	y
領域 1	1350m (840 ×1020)	x= -49950.0	y =-992250.0
領域 2	450m (386 ×479)	x = -2250.0	y = -261450.0
領域 3	150m (710×150)	x = 33000.0	y = -206400.0
領域 4	50m (362×497)	x = 56300.0	y = -133750.0
領域 5	10m (462 ×727)	x = 62670.0	y = -125480.0
領域 6	2m (652 ×1447)	x = 64524.0	y= -121396.0

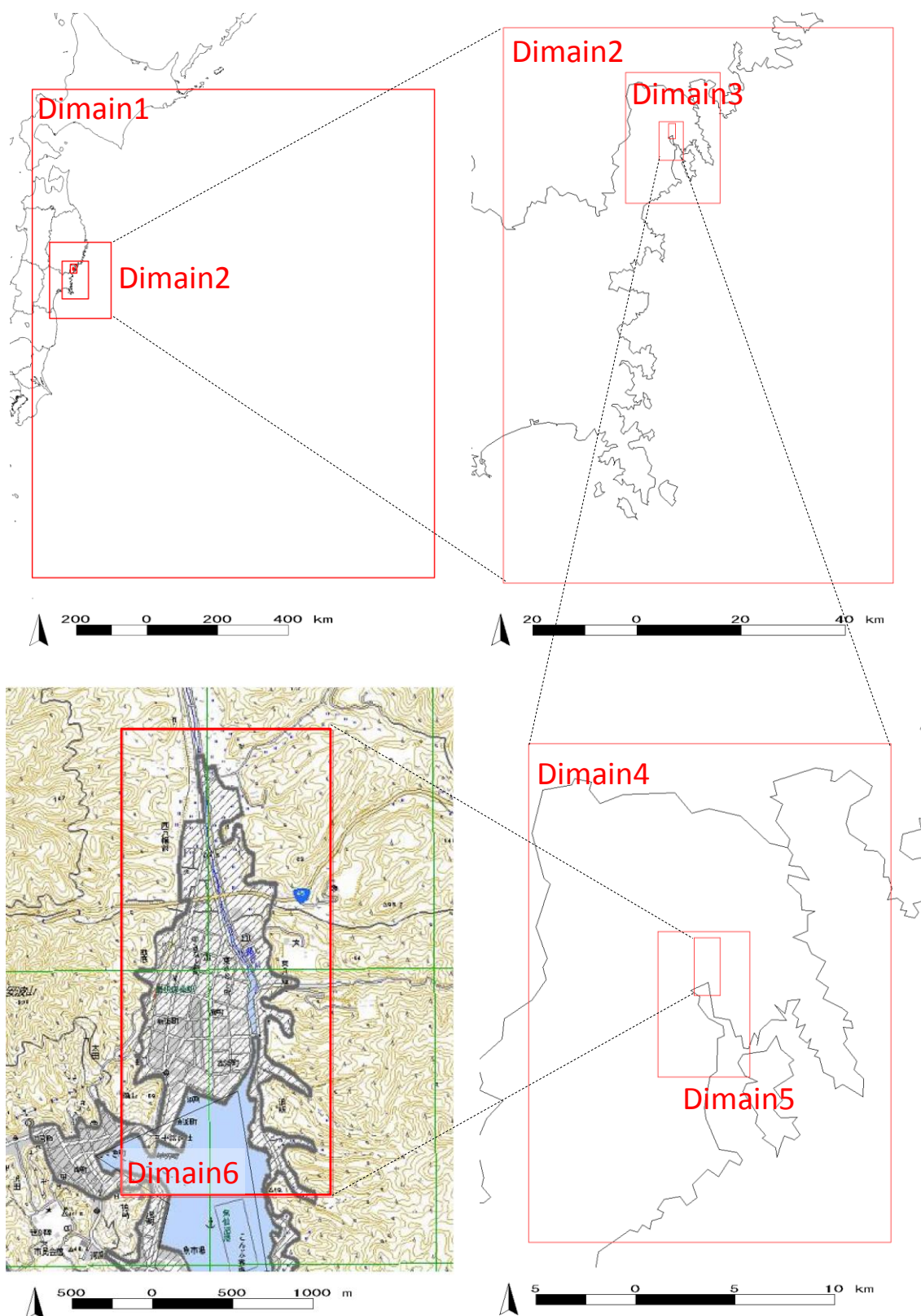


図 3.11 計算領域の設定 (1350, 450m, 50m, 10m)

(2) 水深・地盤高の設定

本節では、津波浸水シミュレーションのメッシュデータを作成する際に用いた水深・地盤高データと作成方法を示す。

津波浸水シミュレーションを精度よく予測するためには、計算格子幅も重要であるが、計算格子に設定する水深・地盤高データも重要となる。広域、沿岸・市街地などのスケールや、陸域、海域、河川域などの管理域の関係により、作成時に適用するデータが異なり、適切にデータを適用する必要がある。

本研究で収集した水深・標高に関するデータと適用先を表 3.4 に示す。

表 3.4 地形モデル作成に用いた水深・標高データ一覧

id	データ名	出典	適用先
1	日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震の検討会データ	内閣府中央防災会議 (2006) ²⁷⁾	広域 (領域 1~4) の陸海域
2	ETOPO1	NOAA	同上
3	海底地形デジタルデータ (M7000)	日本水路協会	詳細域 (領域 5~6) の海域
4	航空レーザー測量による標高データ (2m メッシュ)	国土交通省国土地理院 ²¹⁾	詳細域 (領域 5~6) の陸域
5	大川, 鹿折川の復旧計画平面, 縦断, 横断図	気仙沼土木事務所ウェブサイト ²⁹⁾	詳細域 (領域 5~6) の河川

【海域のメッシュデータ】

広域の領域(領域1~4)の水深値は内閣府データに基づき設定した。ただし、領域1についてのみ内閣府よりも広い範囲を設定しているため、領域拡大部分に、NATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL INFORMATIONで取得したETOPO1(1分(約1.8km)間隔のメッシュデータ)を用いた。沿岸・市街地領域(領域5,6)の水深値は、日本水路協会の海底地形デジタルデータを用いた。なお、海底地形デジタルデータは東北津波の震災前のデータであったため、実績の地殻変動量を考慮し水深値の修正を行った。図3.12に示す通り使用した海底地形データは等深線データとなっているため、2m間隔の点群データに変換し、TIN補間でメッシュデータを作成した。

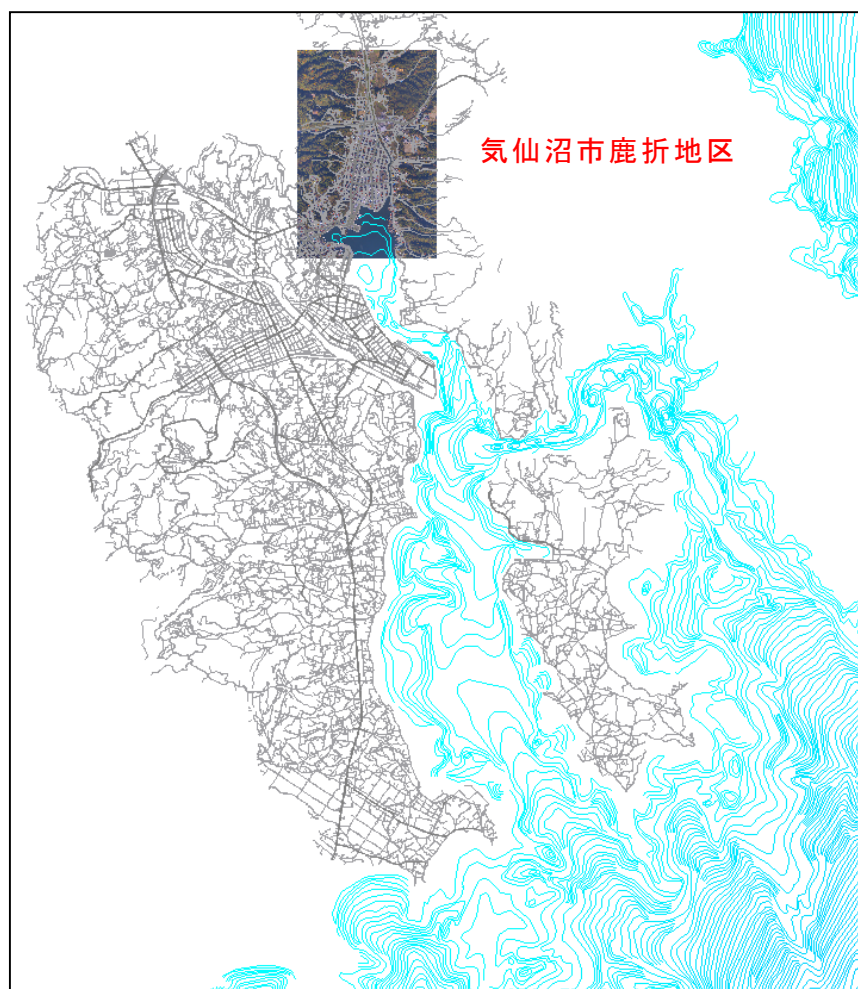


図 3.12 海底地形デジタルデータの一例

【陸域のメッシュデータ】

広域の領域(領域 1~4)における標高データ, 海域データの作成方法と同様に内閣府データと ETOPO1 を用いた. 沿岸・市街地(領域 5,6)における陸域は, 震災後の航空測量データ (2m グリッド) を用いた. なお, 震災後に測量されたデータとなるため, 地殻変動による補正は行っていない. データの補間方法については, メッシュ内に含まれる標高・水深値を平均しメッシュに与えている.

また, 建物を地物化として取り扱うケースの場合建物の形状と高さ情報が必要となる. 本研究では建物の影響を地形の高さで表現するにあたり, 建物の高さを整理し, 計算格子に反映させた. 反映させる計算格子の判別は, 図 3.13 に示すように格子の重心が建物の外郭の内側にある計算メッシュに建物の高さを付与した. なお, 建物の外郭ポリゴンは国土地理院基盤地図情報²¹⁾を用いた.

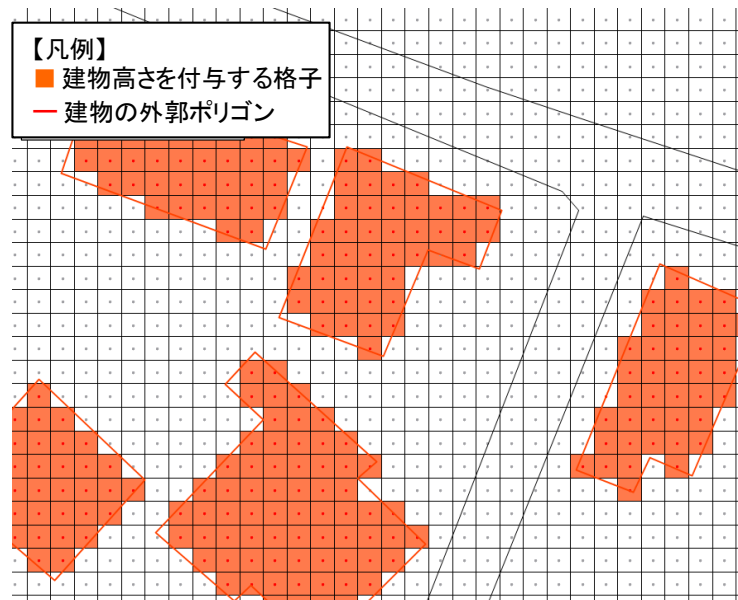


図 3.13 建物の高さを与えるメッシュの定義

また, 建物の高さ情報については, 建物の外郭ポリゴン内の DSM データ (航空測量データの建物や樹林等の情報を除去する前のデータ) と DEM データ (建物や樹林等の情報を除去したデータ) の平均値の差分を整理して設定した.



図 3.14 建物の高さ情報の取得（一部加筆）²⁹⁾

【河川域のメッシュデータ】

沿岸・市街地（領域 5,6）における鹿折川の河床高は，宮城県気仙沼土木事務所のウェブサイト²⁸⁾より取得した，鹿折川復旧計画より整理した．収集した計画図の一例を図 3.15 に示す．同データからは鹿折川の 4 断面の河床高が取得可能となっており，断面間の河床高は一次線形補間を行って設定した．

以上の手順によって作成した各領域の地形データの一例を図 3.16 に示す．

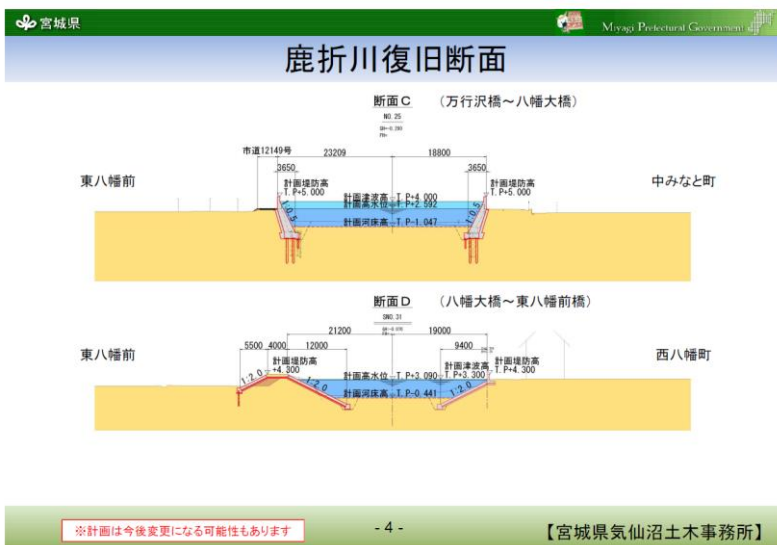
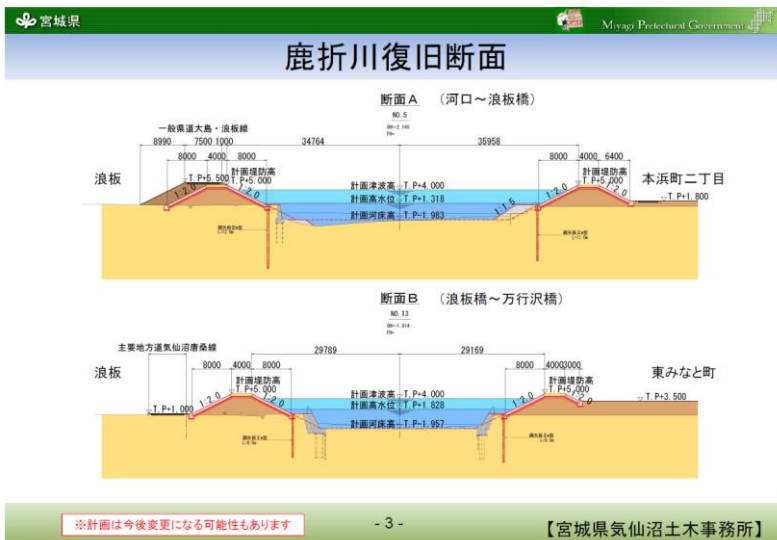
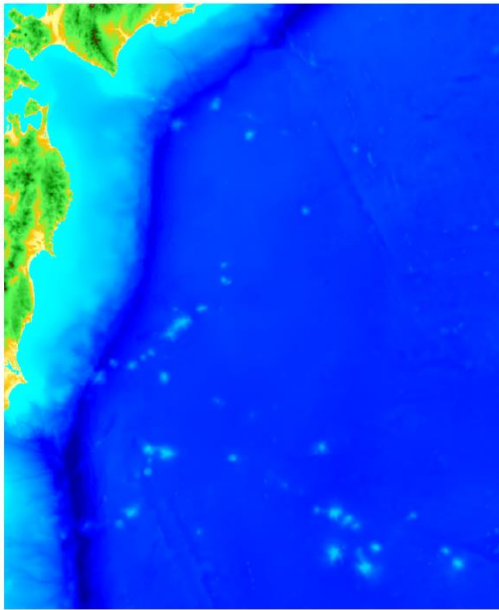
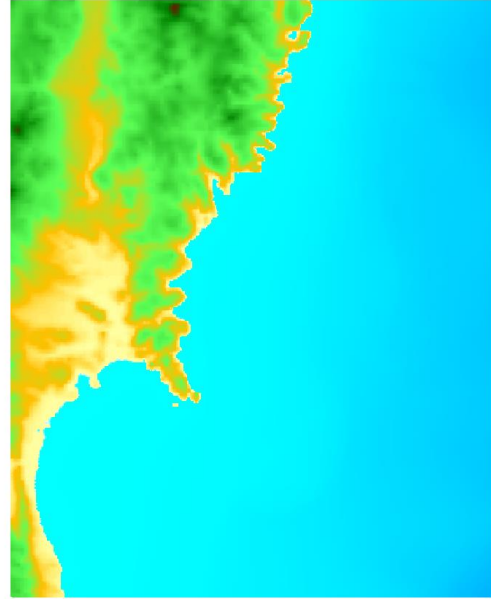


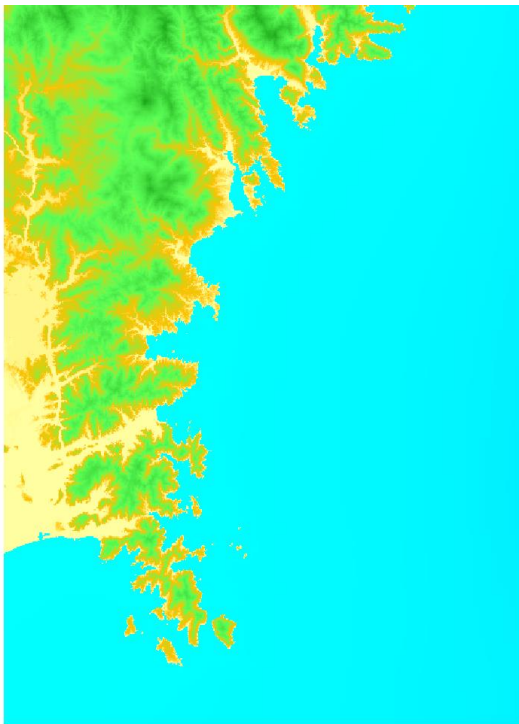
図 3.15 鹿折川の河床高²⁷⁾



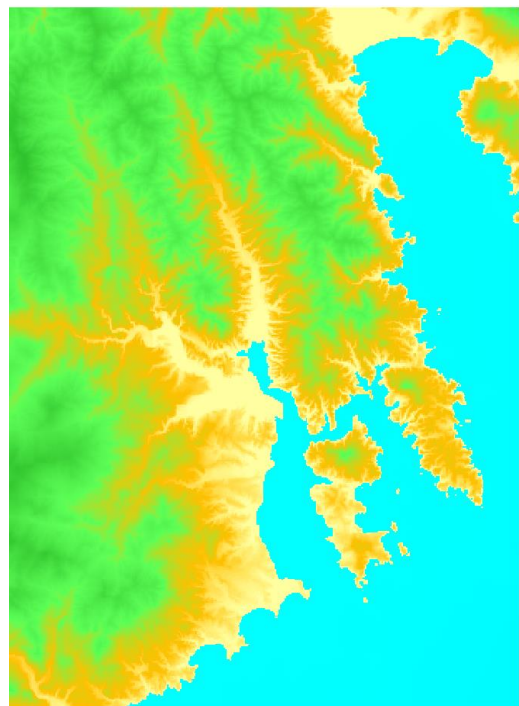
(a)領域 1 : 格子幅 1350m



(b)領域 2 : 格子幅 450m



(c)領域 3 : 格子幅 150m



(d)領域 4 : 格子幅 50m

図 3.16 作成した地形データ (領域 1~領域 4)

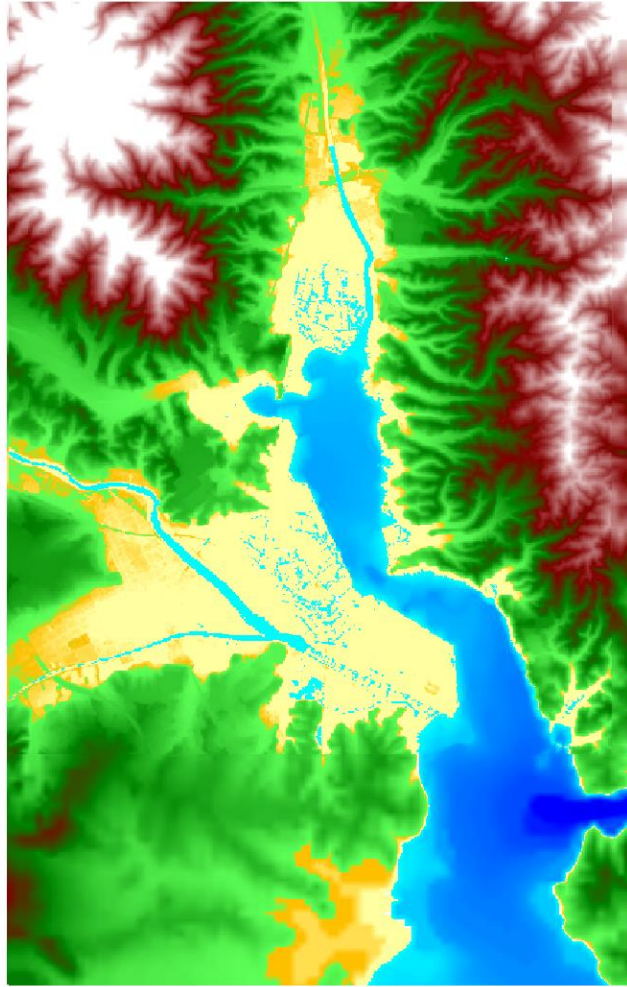
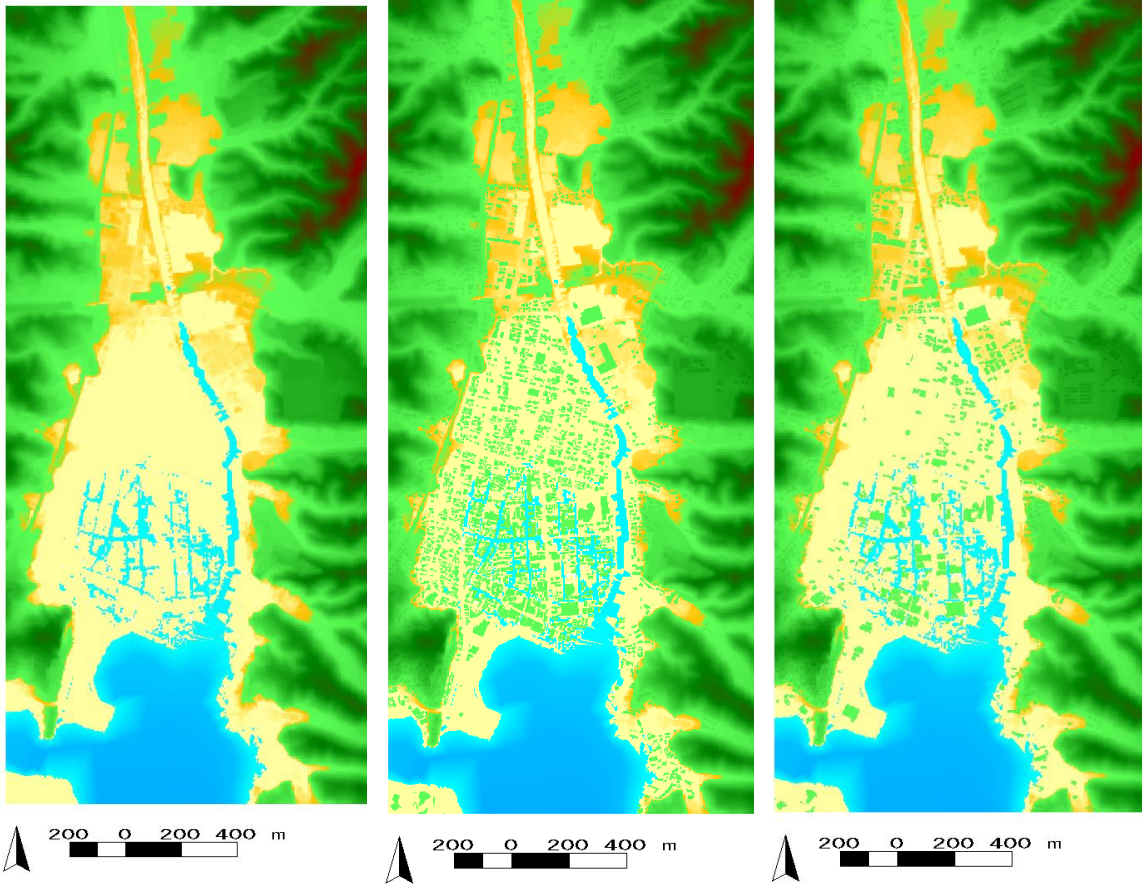


図 3.17 作成した地形データ（領域 5，格子幅 10m）



ケース 1 (DEM)

ケース 2(震災前 DSM)

ケース 3(震災後 DSM)

図 3.18 作成した地形データ (領域 6, 格子幅 2m)

(3) 粗度係数の設定

津波浸水予測計算で対象とする波源域から市街地において、様々な流れの障害物が存在する。例えば、市街地の建物や山地の森林等が挙げられる。一般的には、この様な抵抗となるものを粗度係数を設定し、数値計算上で流れの抵抗を取り扱う。また、土地利用形態と粗度係数の関係については、小谷ら(1998)³⁰⁾の研究成果が活用されている。表 3.5 に土地利用形態と粗度係数の設定例を示す。

本章では計算ケースに応じて設定した。ケース 1 については従来の手法に従い、市街地の影響を粗度係数で設定した。土地利用形態は、国土数値情報などに整理されているが、ここでは内閣府の成果を活用した。設定した粗度係数の一例を示す。この図より、気仙沼市街地では 0.04 が設定されていることがわかる。また、ケース 2, 3 については、建物の影響を直接地物で扱うため、ここでは、街路や建物倒壊を想定して、0.025 とした。各ケースの設定した粗度係数一覧を表 3.6 に示す。

表 3.5 土地利用形態と粗度係数の設定例

土地利用形態	粗度係数 ($m^{\frac{1}{3}} \cdot s$)
住宅地 (高密度)	0.080
住宅地 (中密度)	0.060
住宅地 (低密度)	0.040
工業地等	0.040
農地	0.020
真値	0.030
水域	0.025
その他 (空き地, 緑地)	0.025

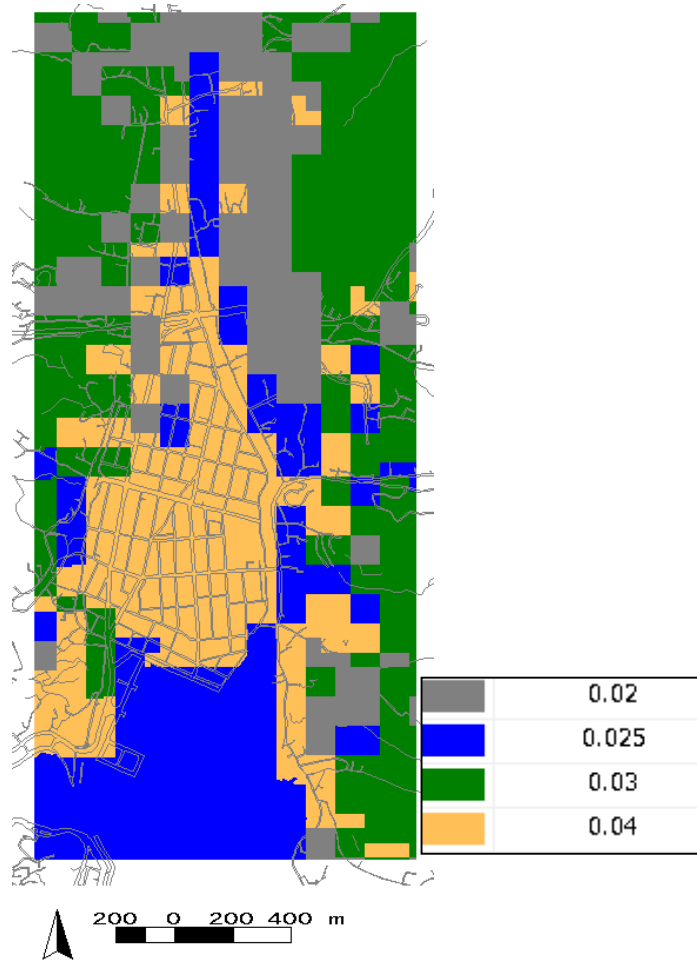


図 3.19 設定した粗度係数の分布

表 3.6 各ケースの市街地における粗度係数一覧

ケース	粗度係数	建物
1	市街地 : 0.02~0.04 その他 : 0.025~0.04	無し
2	市街地 : 0.025	震災前の全ての建物を地形
3	その他 : ケース 1 と同様	震災後の残存した建物を地形

(4) 線構造物データの設定

津波浸水シミュレーションでは地形の起伏の影響を地盤高・水深値を設定することが基本となるが、海岸堤防や河川堤防など計算格子幅未満となる場合や、越流破堤条件を設定する場合などは、図 3.20 右図のように線構造物によって構造物の位置や高さを表現する。

東日本大震災時では、検討対象とする気仙沼市街地のほとんどの構造物が加配されていたことから、構造物の越流破堤条件を適用するため、構造物の位置と高さを線構造物で設定した。構造物の位置と高さは内閣府のデータに参考に詳細メッシュ領域に新たに設定した。

本検討で設定した線構造物の設定状況を図 3.21 に示す。

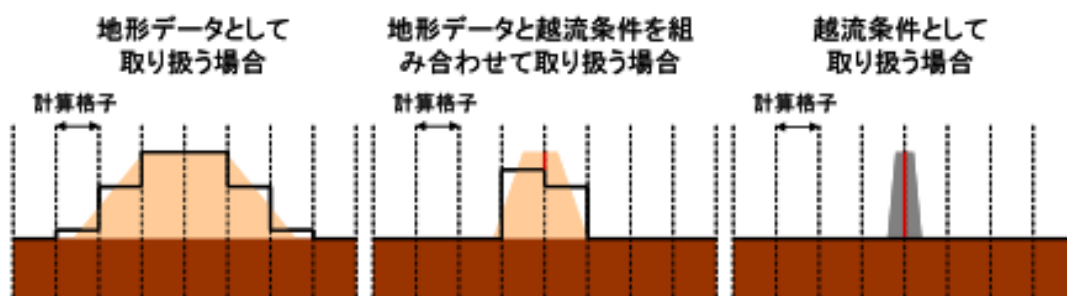


図 3.20 津波浸水シミュレーションにおける構造物の取り扱いの例³¹⁾

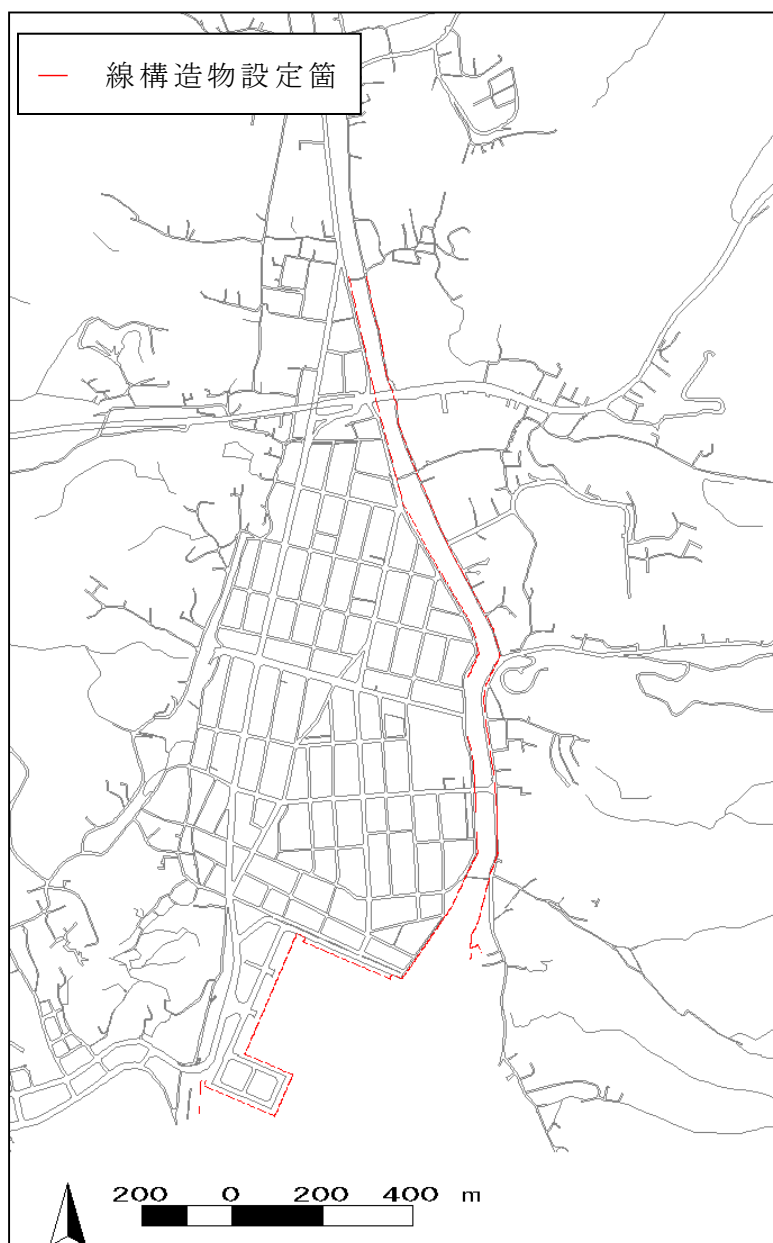


図 3.21 線構造物設定箇所

(5) 線構造物の破堤条件の設定

東日本大震災時の気仙沼における構造物はそのほとんどが、破壊されている。構造物の破壊の原因として、地震、津波による滑動・越流による洗掘、漂流物の衝突などが考えられるが、最も破堤条件として考えられるのが越流時の破堤であると考えられる。本研究では、津波が越流した段階で即時破堤として取扱った。

3.3.3. 波源・断層モデルの設定

東北地方太平洋沖地震津波の後, 様々な研究機関から断層モデルが提案された. 特に国内では東北大モデル³²⁾と藤井・佐竹モデル^{33),34)}が代表的な断層モデルになる. 東北大モデルは浸水域や痕跡値に着目して断層モデルのパラメータを設定しており, 藤井・佐竹モデルは検潮所と沖合の津波計, 及び DART における津波波形を用いて, インバージョンによるパラメータ設定を行っている.

本研究では市街地に来襲する津波波形が建物に対して大きな影響をもたらすと考え, 藤井・佐竹モデル Ver. 8.0 を採用した. 藤井・佐竹モデル Ver. 8.0 は伝播破壊が考慮されており, 津波の初期波形が時間発展する. 本研究でも断層の伝播破壊を考慮した. 藤井・佐竹モデルの概要 (小断層位置・すべり量) を図 3.22 に示す. この図より, 震央および海溝沿いに大きなすべり量が設定されていることがわかる.

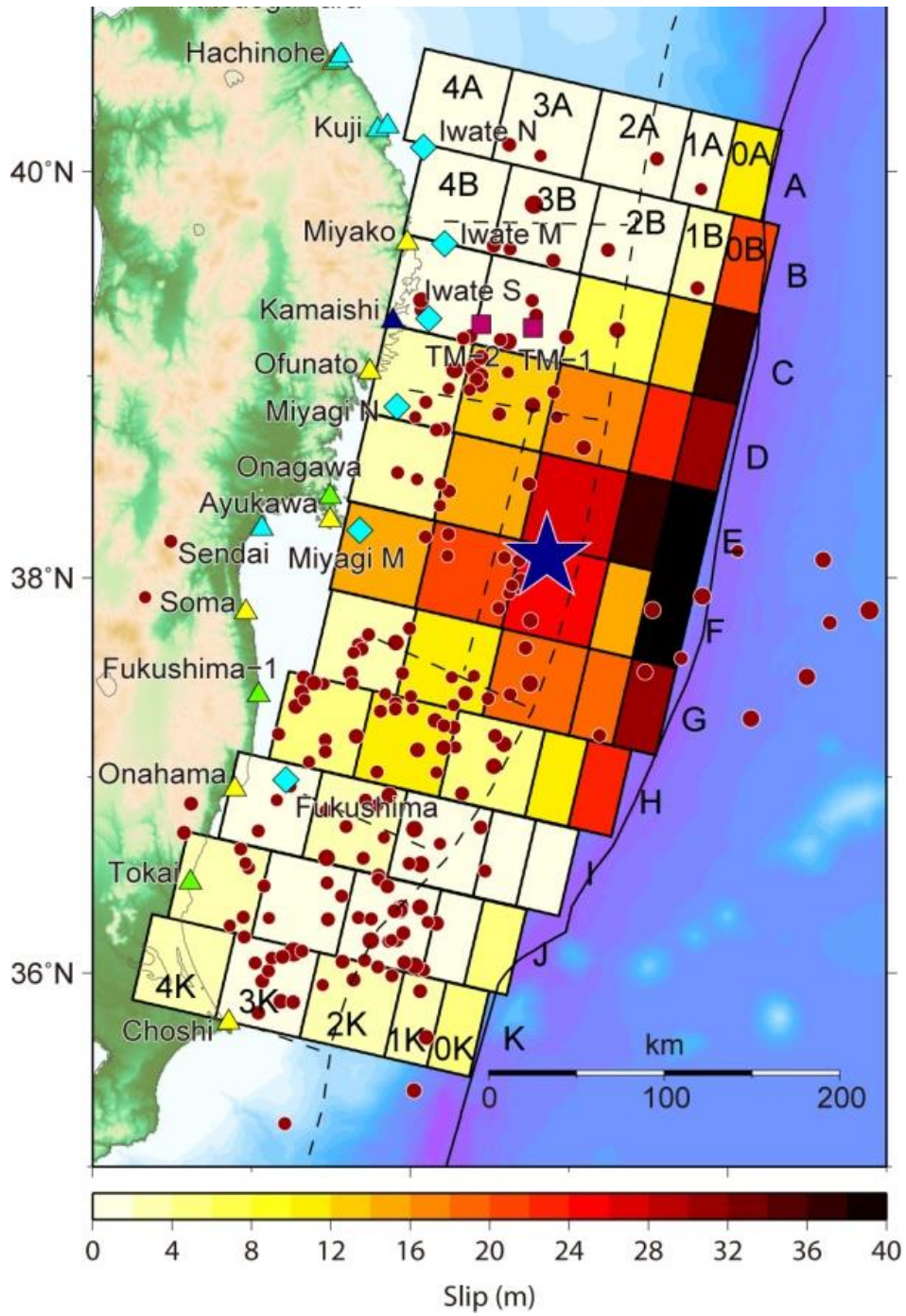


図 3.22 藤井佐竹モデル Ver8.0 のすべり量³⁴⁾

3.3.4. 初期潮位の設定

本研究では、東北津波太平洋沖地震津波の断層モデルとして、藤井・佐竹モデルを採用した。同モデルは、10秒間隔で伝播破壊が考慮されており、地震発生から100秒かけて海底が隆起・沈降する。本研究でもこれに倣い、津波の伝播破壊を考慮して初期水位を設定した。

図 3.24 は各 10 秒間の津波初期水位（鉛直地殻変動量）を示したものである。この結果から地震発生直後に大きく隆起・沈降したわけではなく、30-60 秒にかけて震央付近で大きく隆起・沈降している。その後、南北に伝播破壊しながら徐々に隆起・沈降が小さくなる。

また、断層モデルから地殻変動量を算定し、津波の初期波形を算定した。算定した各タイム区間における波形を図 3.24 に示す。また、各タイム区間の波形を積分した津波の初期波形を図 3.25 に示す。

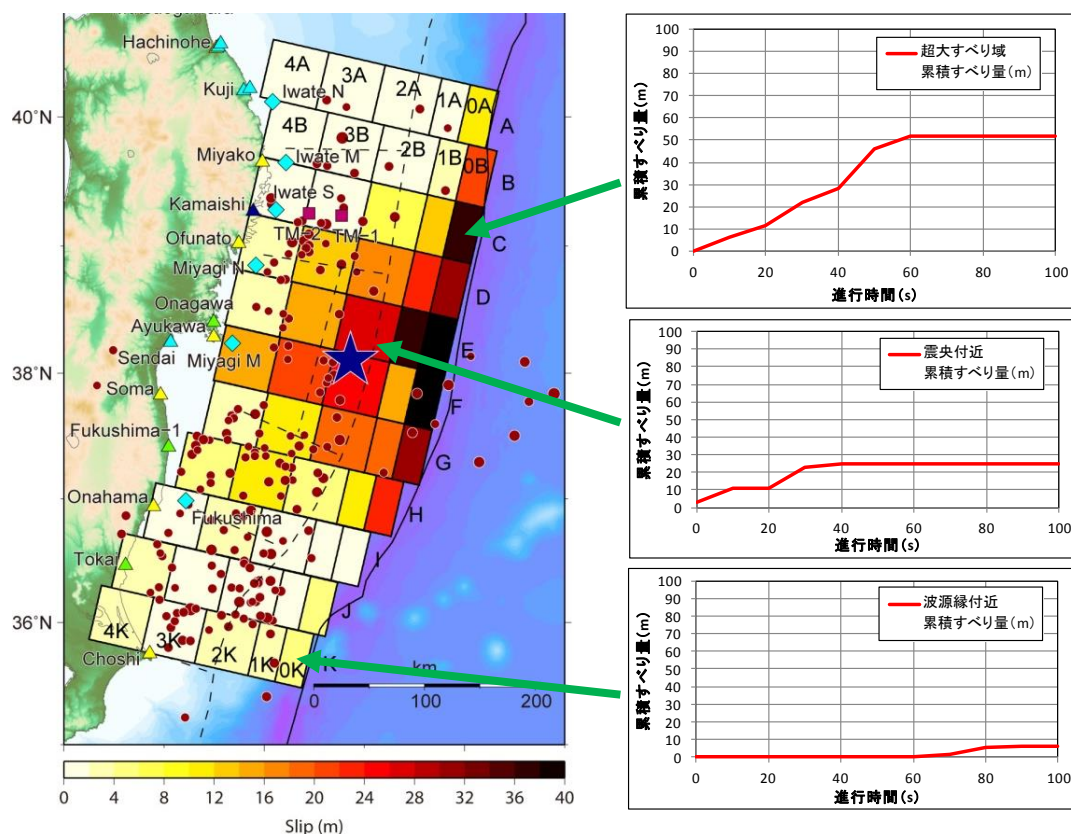


図 3.23 藤井佐竹モデル Ver8.0 のすべり量の時系列変化

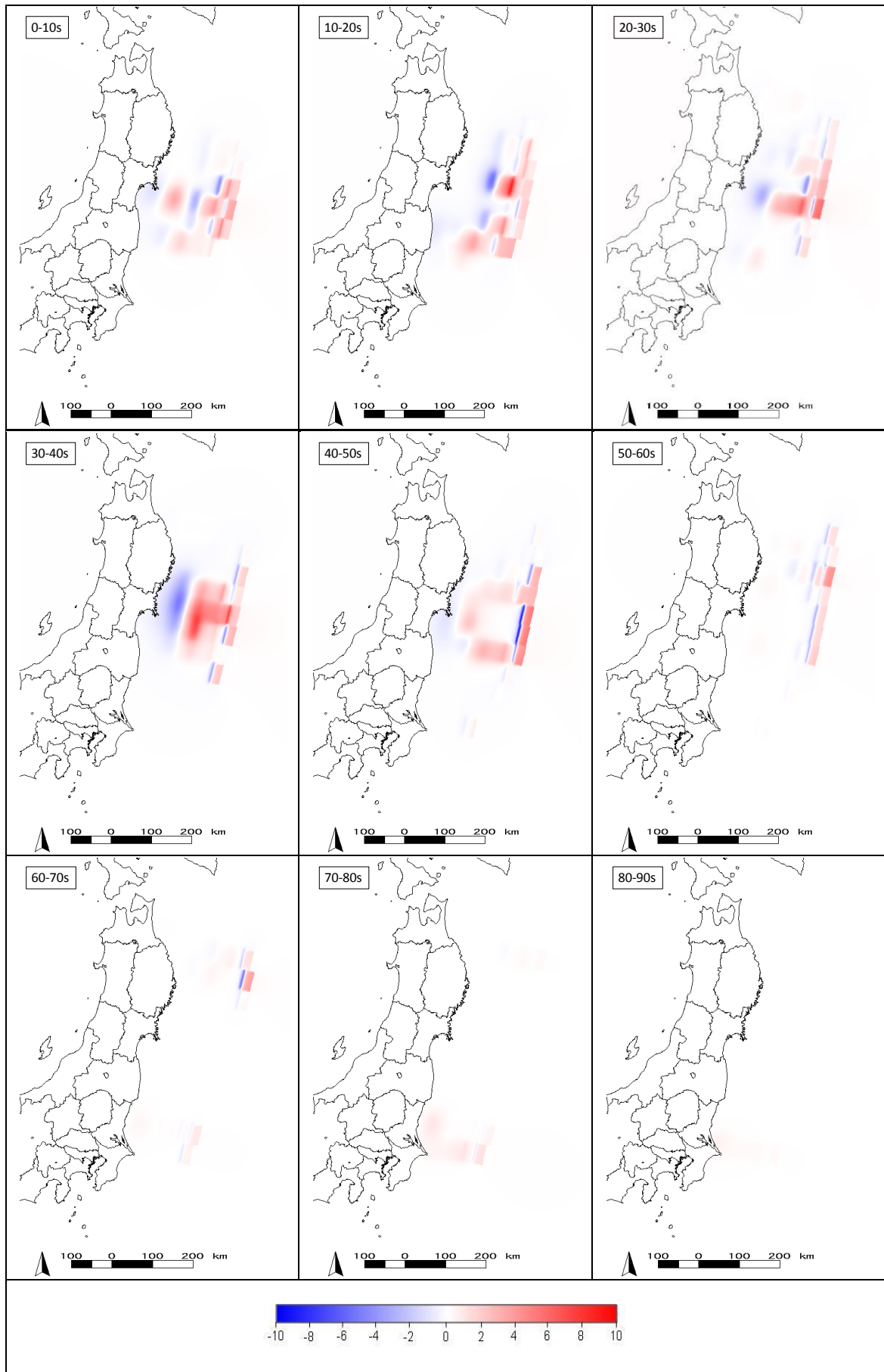


図 3.24 各タイム区間における津波初期水位

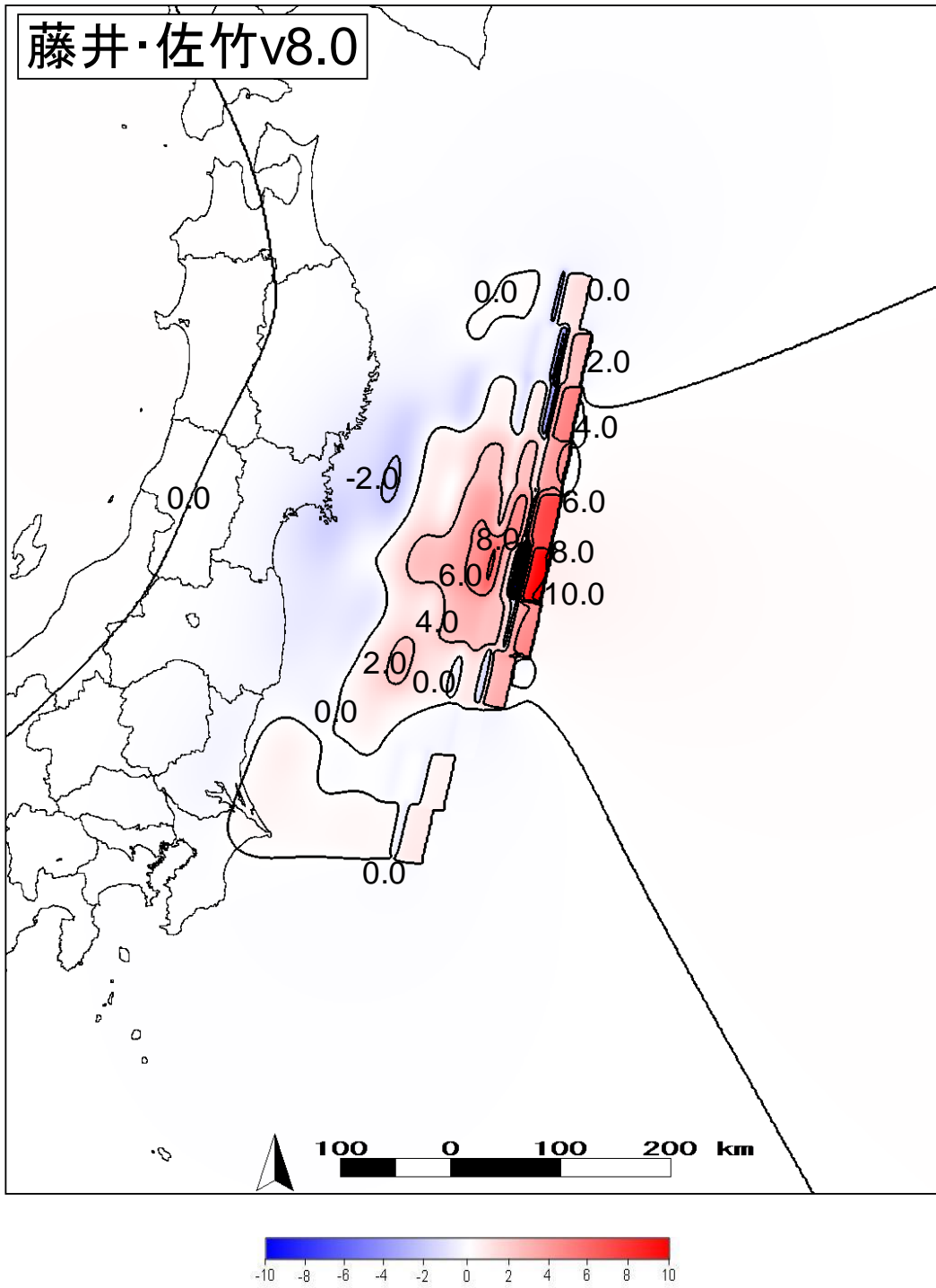


図 3.25 積分した津波初期水位の分布

3.3.5. 計算条件の一覧

本研究で設定した計算条件一覧を表 3.7 に示す。

表 3.7 再現計算における計算条件一覧

#	項目	条件
計算手法	基礎式	非線形長波理論式
	差分スキーム	【空間差分】スタaggerド格子法
		【時間差分】リーブ・フロッグ法
越流公式	本間公式	
計算条件	計算領域	本章 3.2.2 の通り
	計算格子間隔	1350m→450m→150m→50m→10m→2m
	計算領域数	Domain 1 (1350m メッシュ) Domain 2 (450m メッシュ) Domain 3 (150m メッシュ) Domain 4 (50m メッシュ) Domain 5 (10m メッシュ) Domain 6 (2m メッシュ)
	波源(断層)モデル	藤井・佐竹モデル ver.8.0
	初期潮位	T.P.0.5m (第一波到達時刻の天文潮位)
	粗度係数	地形モデルのケースに応じて 0.025~0.04
	陸域境界	Domain 1~4 は完全反射 Domain 5~6 は遡上境界
	計算間隔	dt = 0.05s(CFL 条件は満足する)

3.4. 再現計算の実施

3.4.1. 東北沖における津波波形の比較

本研究では、気仙沼市街地に来襲する津波波形について、実測と計算の比較を行った。実測波形について気仙沼市街地に近い岩手県南部，宮城県北部，宮城県南部の GPS 波浪計を用いた。図 3.26 に波浪計の位置を示す。

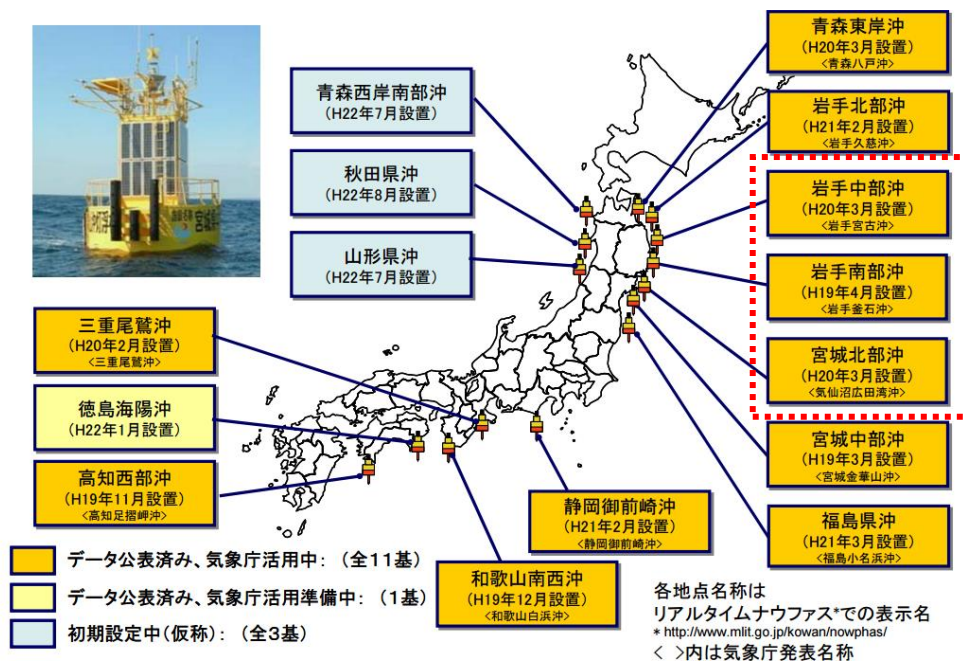
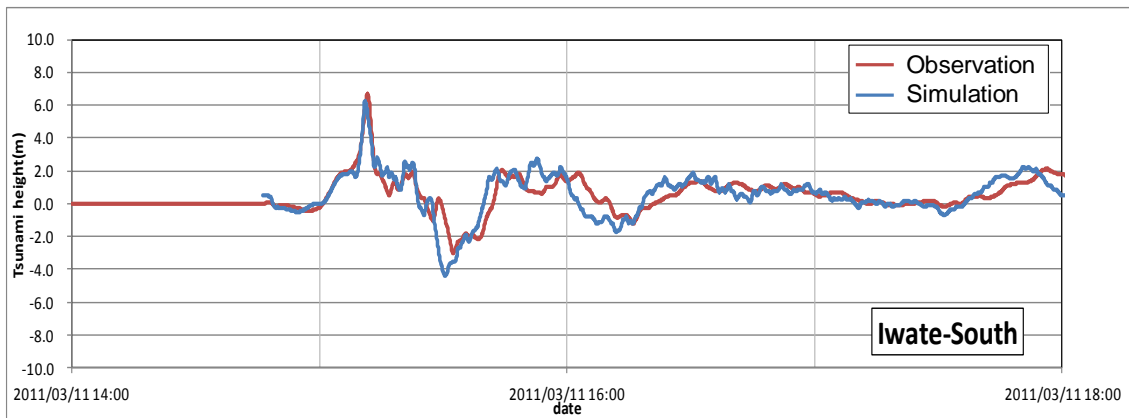
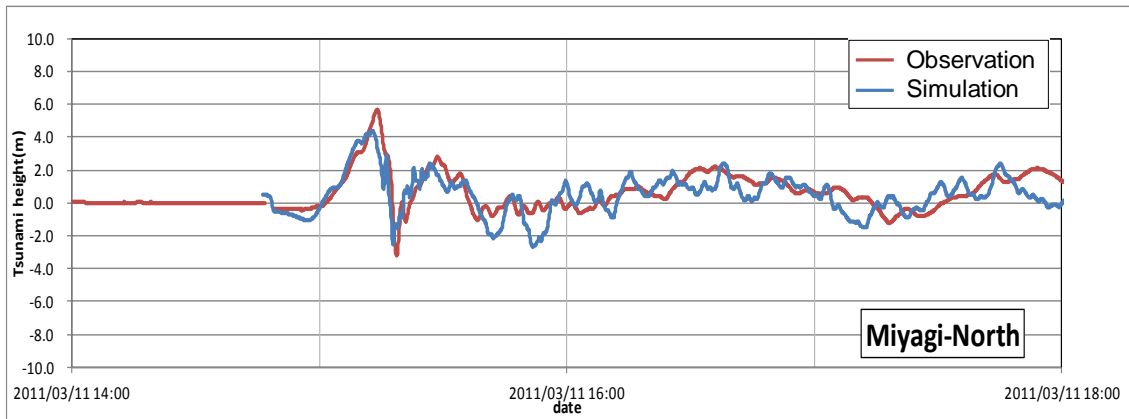


図 3.26 東北沖における GPS 波浪計位置 ³⁵⁾

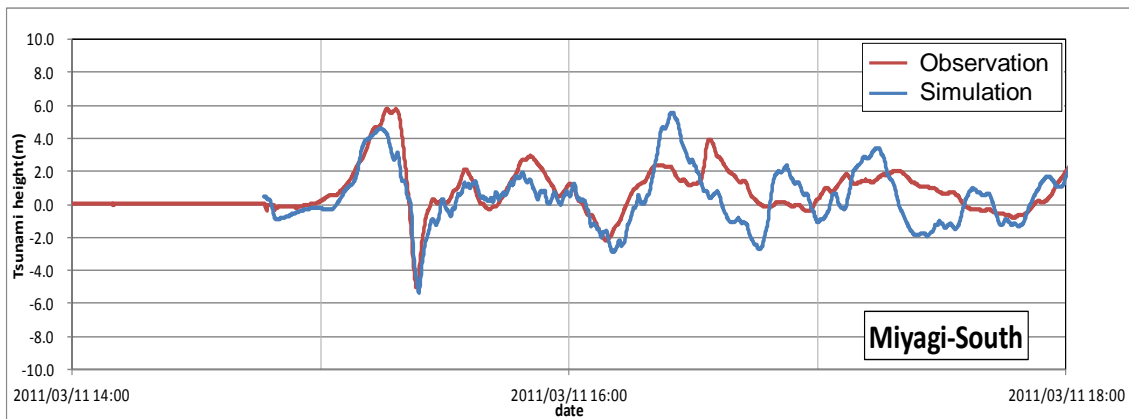
図 3.27 は実測の水位偏差と計算波形の比較を行ったものである。これらの結果から、計算水位は実測の波形と概ね一致しており、概ね良好な再現結果であることを確認した。



(a) 岩手県南部



(b) 宮城県北部



(c) 宮城県南部

図 3.27 東北沖における津波波形の検証

3.4.2. 市街地における津波浸水シミュレーションの結果

図 3.28～図 3.30 に本解析結果より得られた各ケースの浸水プロセスを示す。いずれのケースにおいても、これらの結果より津波発生後 40 分程度（3 月 11 日 15 時 26 時ごろ）で沿岸に到達、その 2 分後には遡上浸水していることがわかる。各ケースにおける遡上プロセスについては、粗度モデルが、海岸から並行して遡上していくのに対して、震災前の建物を地形で考慮したケース 2 では、海岸と河川から街路を通じて遡上していくことがわかった。また、震災後の建物を地形としたケース 3 ではケース 1 とケース 2 の中間的な遡上結果となっている。また、各ケースの遡上中の水位を比較してみると、ケース 1 では、遡上にともない背後が高くなる傾向にあるが、建物モデルでは沿岸部で高くなるが、背後地では沿岸より大きくなる傾向が得られた。この結果の妥当性については、最大津波水位の平面分布と痕跡値の比較で後述する。

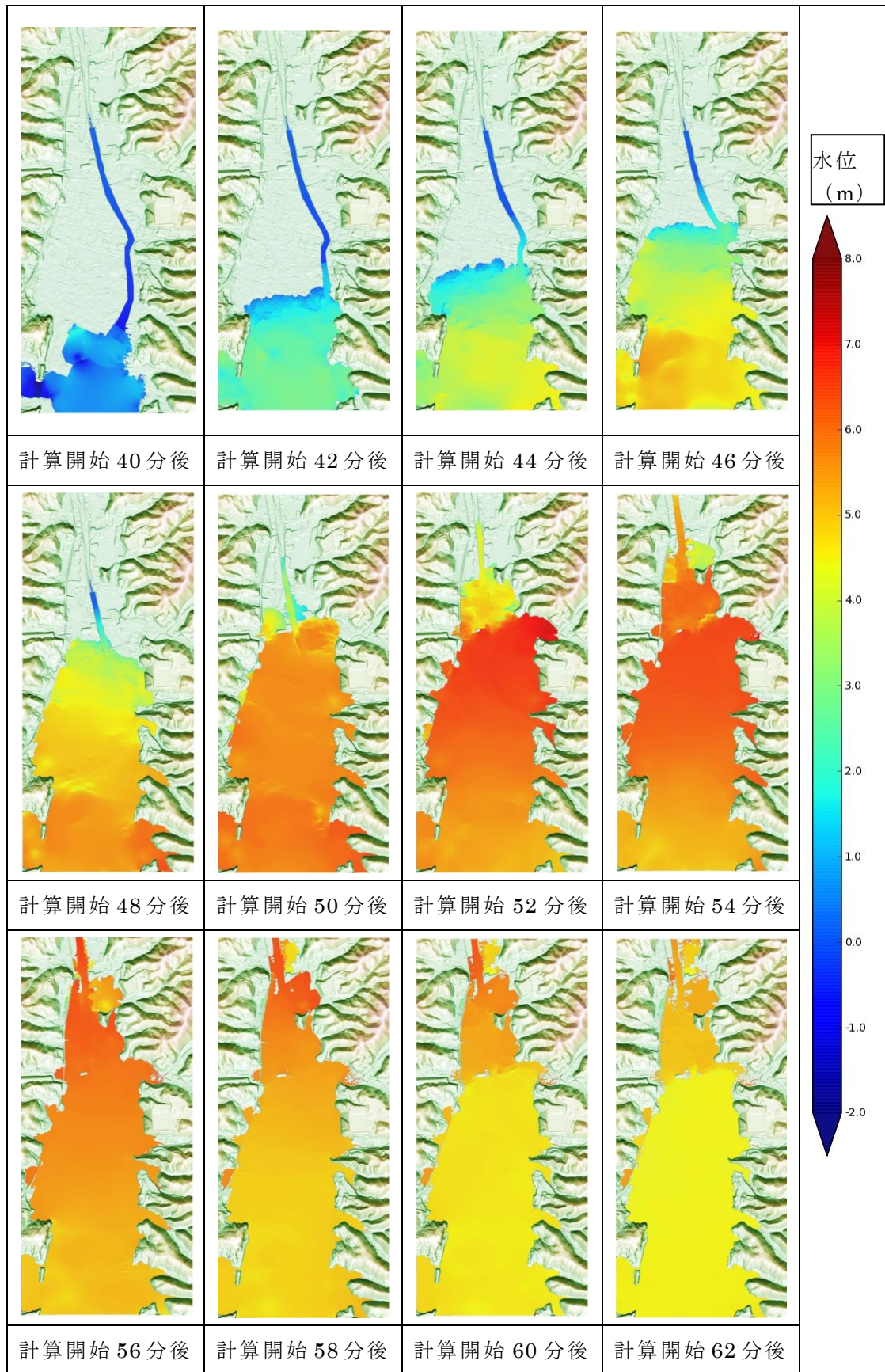


図 3.28 浸水プロセス (ケース 1 : 粗度モデル)

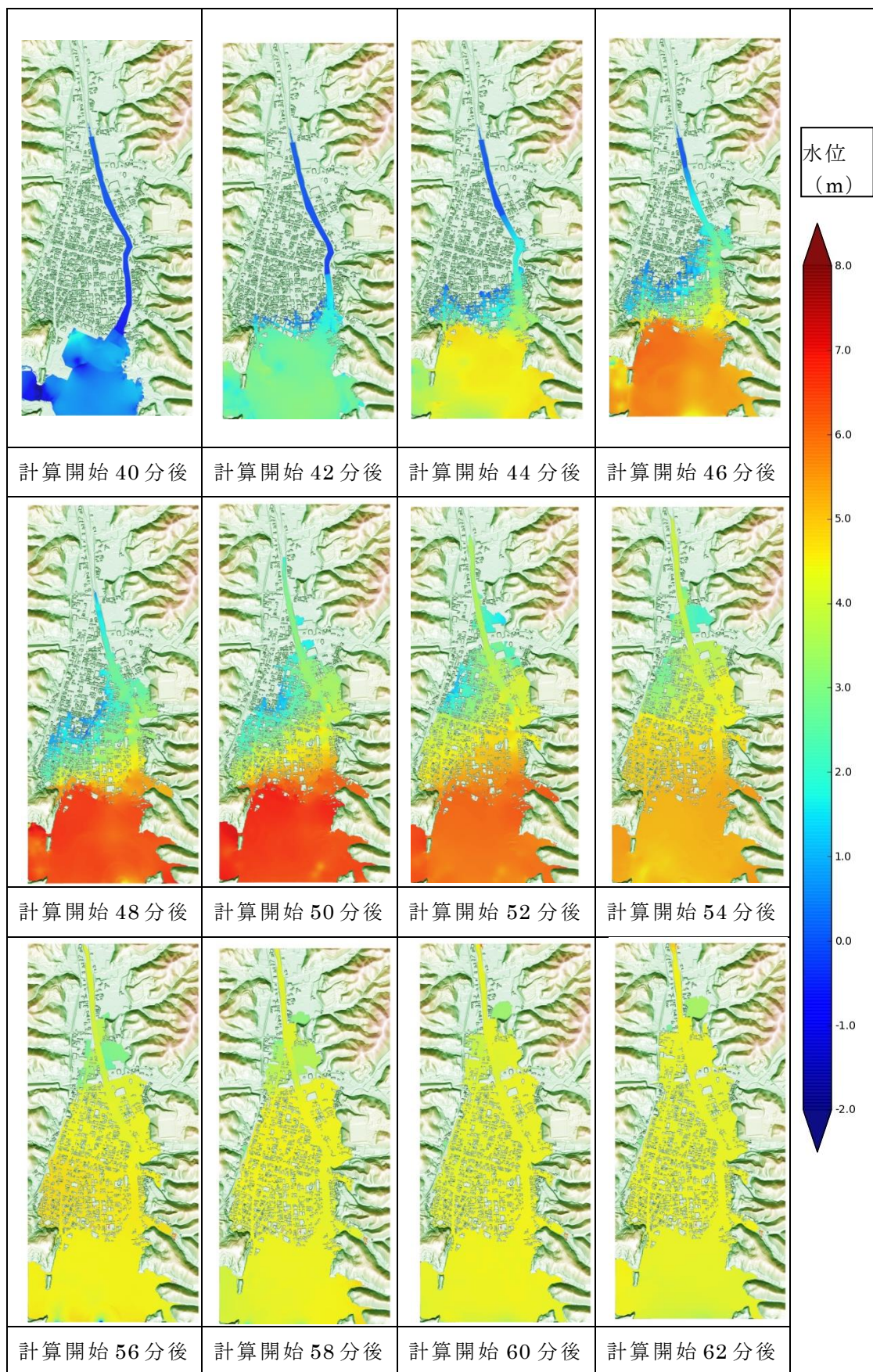


図 3.29 浸水プロセス（ケース 2：震災前の建物を地物化）

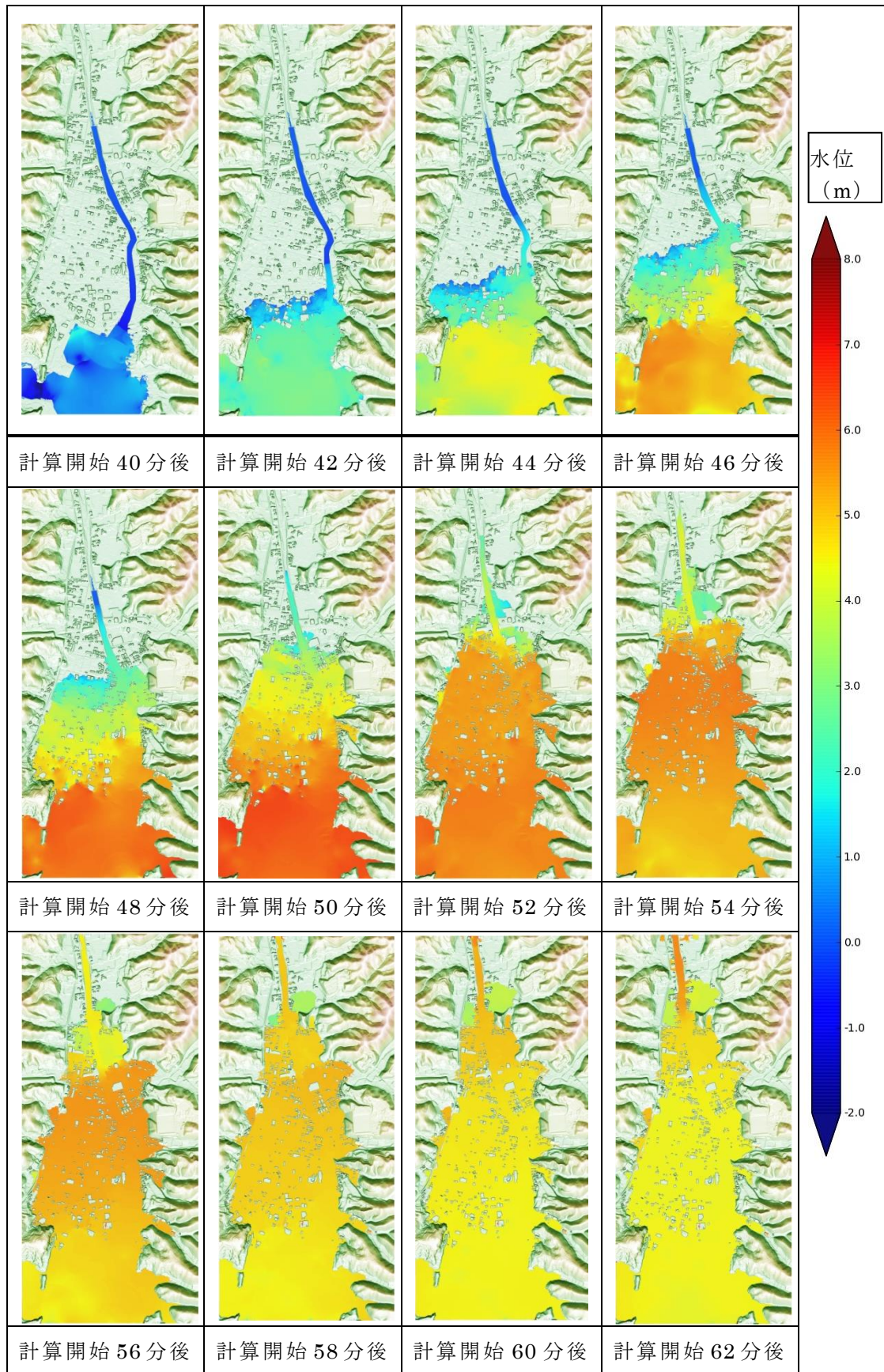
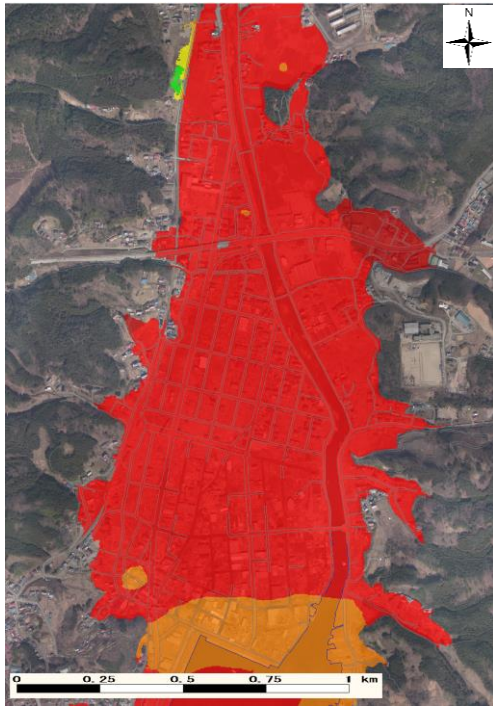


図 3.30 浸水プロセス（ケース 3：震災後の建物を地物化）

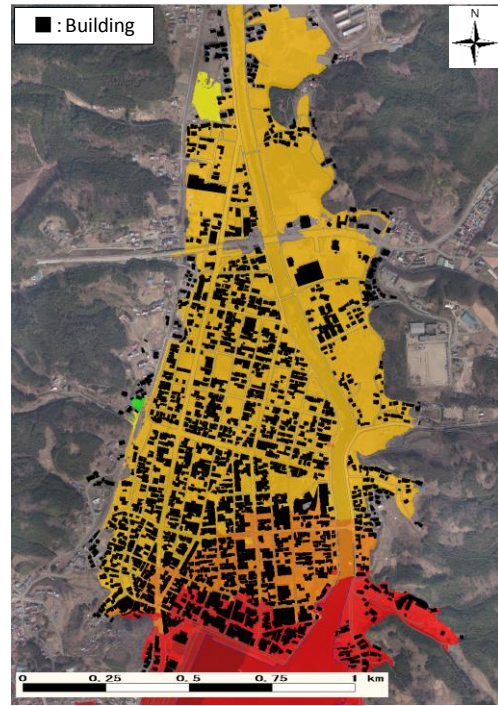
図 3.31 に本解析結果より得られたケース 1, 2, 3 の最大津波水位の平面分布を示す。また、図 3.32 および図 3.33 に痕跡と計算水位の比較箇所とその結果を示す。なお、沿岸部における痕跡値は 6m~9m とバラツキがあるが、沿岸部に実際に来襲した津波水位は下限値である 5m~7m 程度であり、建物前面で生じたせり上がりにより、局所的に大きな値 (8m~9m) が痕跡値として記録されたと考えられる。本検討では、細かい格子幅 (2m) で建物を地形 (ケース 2,3) として扱っているため市街地スケールにおける建物のせり上がりは考慮されるが、このような局所的なせり上がりまでは再現は困難であると考えている。そのため、沿岸部の痕跡値ではなく、来襲した津波水位を再現できていれば再現性が高いと判断した。

本解析結果より、抵抗則(マニングの粗度係数)で建物の影響を考慮したケース 1 では、建物によるせり上りを考慮できないため、市街地全体で水位がフラットとなっており、沿岸部では過小評価、背後地では過大評価となることが確認された。また、震災前の全建物を考慮したケース 2 では、沿岸域周辺で建物によるせき上げの影響で水位上昇が生じ、痕跡値の再現性がやや高い。しかしながら、沿岸から離れた背後地では、建物の抵抗の影響が大きくなるため、水位が過少評価となる。一方、震災後の残存した建物のみを考慮したケース 3 では、ケース 2 と比較して沿岸部での水位上昇が劣るものの、背後地では、ケース 1 とケース 2 の中間的な結果となっていることが確認された。また、図中には、津波痕跡高と計算値の空間的な適合度を示す指標³⁶⁾である K および κ も合わせて示しているが、一般的に K, κ は $0.95 < K < 1.05, \kappa < 1.45$ であると計算値が津波痕跡高とよく対応していることを表しており、 K が 1.0 に近いほど、 κ の値が小さいほど再現性は高い。これらの結果から、いずれのケースも κ の条件は満たしているものの、 K を満足させているのはケース 3 のみである。このことから、全体的な再現率はケース 3 が最も高いことがわかる。しかしながら、沿岸部だけに着目するとケース 3 はケース 2 より過少評価していることから、ケース 2, ケース 3 の中間的な条件で計算をする必要があると考えられる。

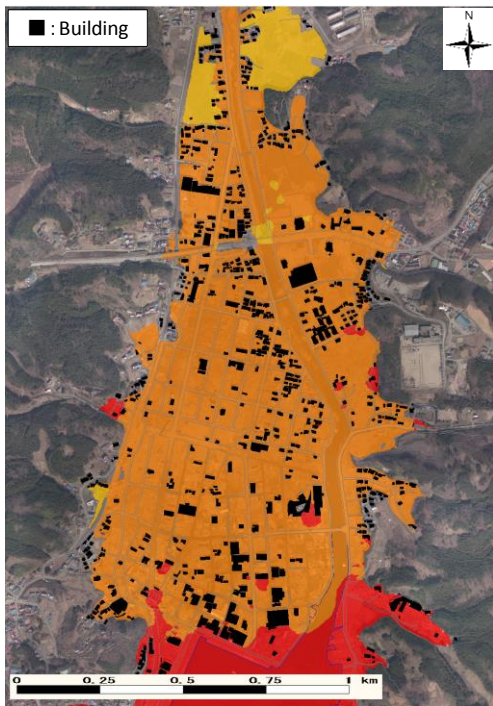
以上のことから、正確な津波浸水・被害予測には建物の形状を考慮し、さらに建物の倒壊を考慮する必要があると考えられる。



(a) ケース 1 : 粗度モデル



(b) ケース 2 : 震災前の建物



(c) ケース 3 : 震災後の建物

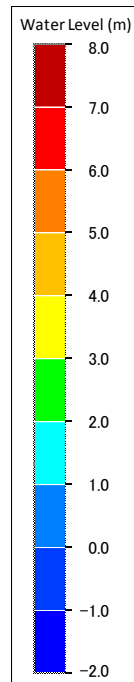


図 3.31 各ケースの最大津波水位の平面分布結果の比較

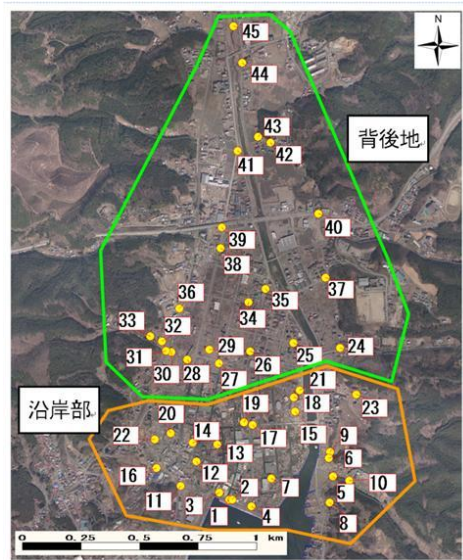


図 3.32 気仙沼市街地における痕跡比較箇所

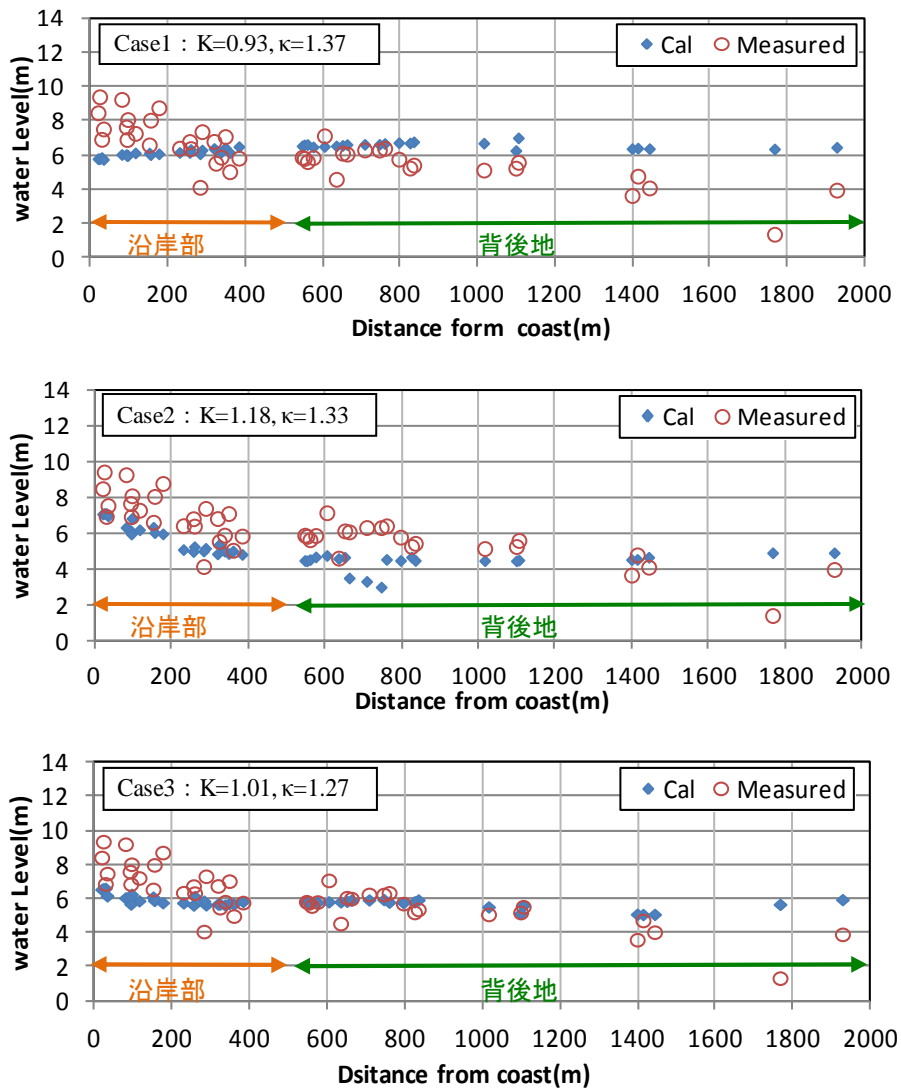


図 3.33 痕跡水位と計算水位の比較結果

3.5. 本章のまとめ

本章では、従来の津波浸水シミュレーション（粗度モデル）によって気仙沼市街地における再現計算を実施した。また、建物を地形として扱った場合について再現性と各ケースの違いについて検討した。その結果、いずれのケースにおいても浸水範囲は概ね一致しているものの、遡上中や最大津波高の平面的な分布が異なる傾向を示すことを明らかにした。

痕跡値と比較した結果、痕跡値が沿岸から背後地にかけて小さくなるのに対して、従来手法の粗度モデル（ケース1）では、沿岸から背後にかけてほぼフラットとなり、また若干ではあるが沿岸より背後の方が津波高が大きくなるなど、実績とは異なる傾向を示した。一方、建物を地形として扱った場合、沿岸から背後地にかけて水位が小さくなるという傾向は実績値と良好に一致した。しかしながら、震災前の建物条件だと、沿岸域における抵抗が大きすぎるため、背後地を過少評価し、震災後の建物条件だと背後地は良好に再現できるが、沿岸域でより過少評価となる。

これらの結果から、建物の影響を動的に扱うことでより精度の高い津波浸水シミュレーション予測ができると考えられる。建物倒壊を考慮した津波浸水モデルの検討を次章で行う。

第4章 建物倒壊を考慮した津波解析モデルの検討

4.1. 建物倒壊を考慮した津波解析モデルの構築

4.1.1. 建物倒壊モデルの構築の流れ

市街地に来襲した津波は建物による反射や回り込みを行いながら、街路に沿って遡上する。また、津波の諸量（津波高、流速）によっては建物が倒壊しながら遡上する場合もある。そのため、市街地においては建物の流れに対する抵抗は常に変化する。本章では、このような現象を忠実に再現することができる、建物形状や倒壊の影響を考慮した津波シミュレーションモデルの構築を検討した。

津波と建物被害について、いくつかの報告事例が挙げられる。代表的なものとして、松富・首藤(1994)³⁷⁾、飯塚・松富(2000)³⁸⁾など、浸水深や氾濫流速と建物の被害程度を関連付けたものが挙げられる。この既往報告では浸水深が2.0m以上、流速が4.9m/sで木造家屋が大破すると報告されている。また、松富ら(2013)³⁹⁾は鉄骨造の倒壊条件として構造物に作用する浸水断面積と関連付けて倒壊条件を整理している。

一方で、津波浸水シミュレーション技術においては、以下の報告事例が挙げられる。市街地の形状を考慮した津波シミュレーションは、2次元計算において建物の影響を地形と合成粗度係数を組み合わせた今井ら(2012)⁴⁾や、3次元計算でのフックら(2012)³⁾などの研究例があげられる。また、建物の倒壊の影響を考慮した研究例として、建物の影響を時間発展型の合成粗度係数で取扱った林ら(2014)⁵⁾の研究例があげられる。いずれの手法も限定した現象を取扱っており、上述した建物形状や建物倒壊の現象を限定的に扱っている。そこで本研究では、建物を地物として扱い、倒壊を考慮した津波シミュレーションを構築する。

建物倒壊を考慮した津波浸水予測モデルでは、建物の形状を地物として扱い、津波の流況に応じて建物の高さを地盤高に修正する方法とする。また、建物倒壊のしきい値については、既往の研究例ではよく浸水深と被害率が関係づけられているが、建物に作用する津波の流体力は浸水深のみでは決まらず流速に起

因する動圧も考慮する必要がある。

本研究では、建物に作用する波力を倒壊のしきい値として設定する。また、倒壊に至ったしきい値については、3章で実施した再現計算の結果から建物に作用した波力を整理し、推定作用波力と被害率について整理を行い、構造種別毎に建物倒壊に至る波力を整理した。

4.1.2. 建物に作用する波力算定式の選定

建物倒壊の判定を行うにしきい値の設定を行う必要がある。建物の倒壊基準として、国土交通省都市局「東日本大震災による被災現況調査結果について(第2次報告)」では、2011年東北地方太平洋沖地震津波によって被災した建物と浸水深の関係を整理している(下図参照)。

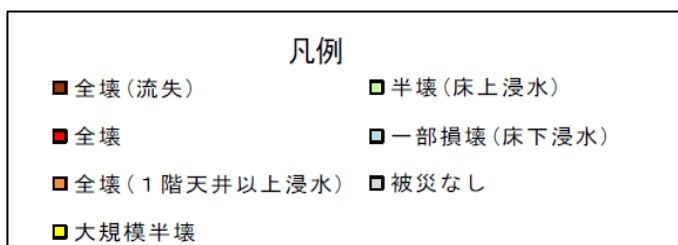
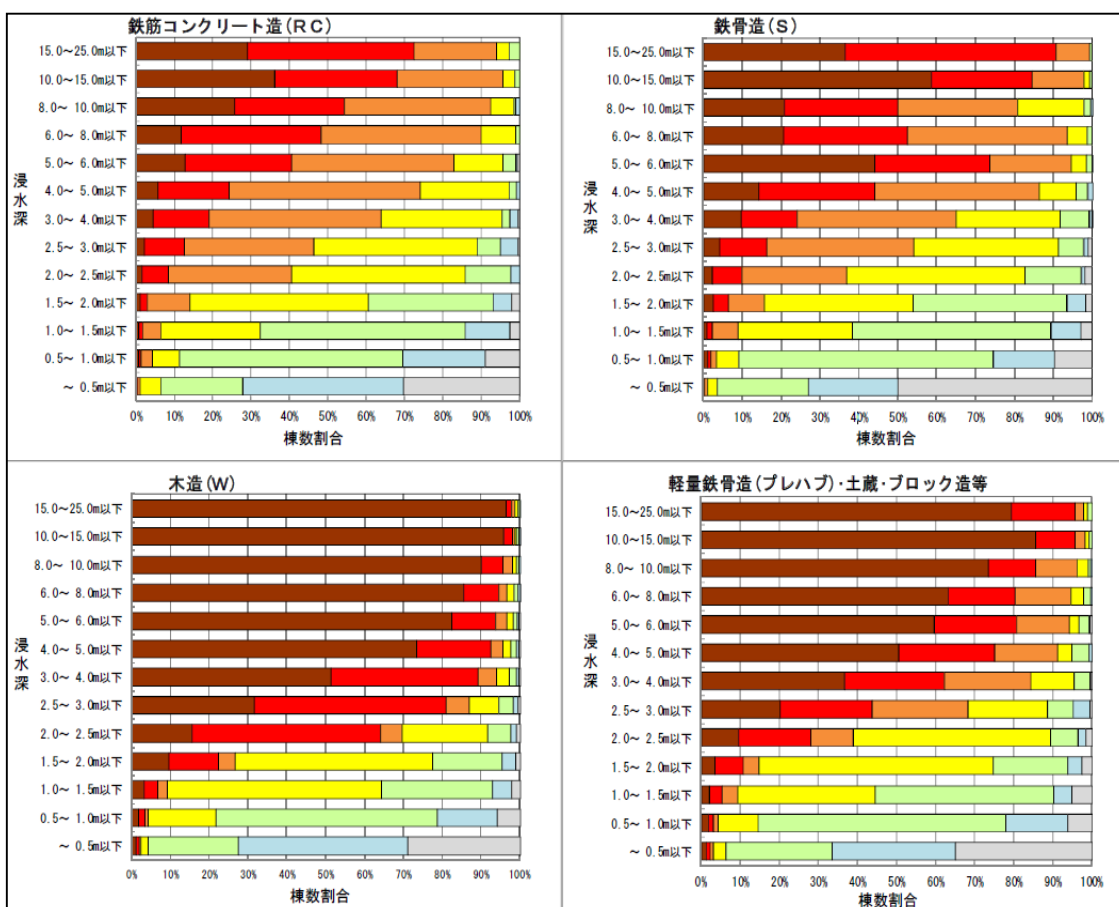


図 4.1 建物被害と浸水深の関係(国土交通省都市局、2011)⁷⁾

浸水深と建物被害の関係を整理した報告例は多くあるが、建物に作用する力、すなわち流体力は、浸水深に基づく静水圧のみならず、流速に基づく動圧も考

慮すべきである。しかしながら、実際のところ津波来襲時に流速が観測された事例は極めて少なく浸水深・流速と建物被害を関係づけることは難しい。そこで本研究では、数値計算から得られる浸水深と流速から波力を算定し、建物被害と波力の関係の整理を行うこととした。

波圧算定式については、これまでの多くの手法が提案されてきているが、対象とする建造物の違いや、用いる津波諸量によって異なる。表 4.1 にこれまで代表的な津波波圧算定式を示す。代表的な式として、進行波（建造物なし）を対象とした朝倉ら⁴⁰⁾の算定式が挙げられるが、同式は浸水深に水深係数を乗じた形で静水圧を算定する式となっている。水深係数は、実験で複数のケースを実施し浸水深と最大波圧の包絡線から決定している。すなわち、いかなる流速の場合でも、ある浸水深における最大波圧を算定する式となる。そのため、流速がほとんどない場合は、生じる力は静水圧のみとなり、朝倉らの式は過大評価となりやすい。

実際の津波波力は、浸水深における静水圧と流速に起因する動圧からなる。動圧として評価できるようにするため近年では、浸水深のみならず流速にも着目した波圧算定式（有光ら⁴¹⁾、高畠・木原ら⁴²⁾）が提案されてきている。

表 4.1 代表的な波力算定式の概要

波圧式	対象構造物	算定に用いる 水理諸量	陸上構造物の 有無	備考
朝倉ら(2000) ⁴⁰⁾	2次元構造物	最大浸水深	無し	ソリトン分裂 考慮
飯塚・松富(2000)	3次元構造物	浸水深	有り	
Asakura et al. (2002)	2次元・3次元 構造物	最大浸水深・ 流速	無し	
内閣府(2005)	3次元構造物	最大浸水深	無し	
榊山(2012)	2次元構造物	最大浸水深・ 流速	無し	
有光ら(2012) ⁴¹⁾	2次元・3次元 構造物	浸水深・流速 の経時変化	有り	
国交省(2012)	3次元構造物	最大浸水深	無し	
高島・木原ら (2013) ⁴²⁾	3次元構造物	浸水深・流速 の経時変化	有り	

本研究では、建物（構造物）を配置した状態で波力を算定することから、波力算定式として高島・木原ら(2013)⁴²⁾の式を採用した。式(4.1)、式(4.2)に算定式を示す。同式は、流入境界から構造物前面までの区間で、比エネルギーが保存されると仮定して、ベルヌーイの式から導出されたものとなる。

$$p_i = \rho g(\alpha_i h_{inun} - z_b) \quad (4.1)$$

$$\alpha_i = 1 + \frac{1}{2} Fr_i^2 \quad (4.2)$$

ここで、 p_i : 津波による任意の高さにおける波圧(N/m²)、 h_{inun} : 浸水深(m)、 z_b : 地盤高からの高さ(m)となる。

同式は建築物の任意の高さにおける波圧算定式のため、地盤高面($z_b=0$)から波圧作用高さ ($z_b=\alpha_i h_{inun}$) まで鉛直方向に積分を行い単位幅当たりの式(4.3)として結果を整理した。

$$f_p = \frac{1}{2} \rho g h_{inun}^2 (1 + Fr^2 + 1/4 Fr^4) \quad (4.3)$$

ここで、 f_p : 単位幅あたりの波力(N/m)、 ρ : 水の密度(kg/m³)、 g : 重力加速度(m/s²)、 h_{inun} : 浸水深(m)、 Fr : フルード数である。

既往の研究における波力算定式は、通過波を対象としたものが多い。しかしながら先述した通り、高島・木原ら⁴²⁾の式は建物を配置した状態で適用することが可能である。ただし適用条件として、建物による反射の影響が小さい上流側の浸水深と流速を用いる必要がある。高島・木原らの報告によると浸水深の5倍程度上流側の浸水深と流速を用いれば、建物による反射の影響が小さく、精度よく波力を算定できると示している。そこで本研究では、対象とする気仙沼市に來襲した津波高さ（浸水深：数 m）や市街地における計算メッシュ幅 2m を考慮して、建物から 3～5 メッシュ程度上流側で波力の算定を行った。図 4.2 は波力算定位置の一例を示したものである。ただし実際には、沿岸域周辺の建物では適用可能であるものの、背後地の建物が密集する地点では建物の反射の影響は避けることができない。今後、背後地の波力算定方法については 3 次元計算で直接算定するなどの検討が必要であると考えられる。

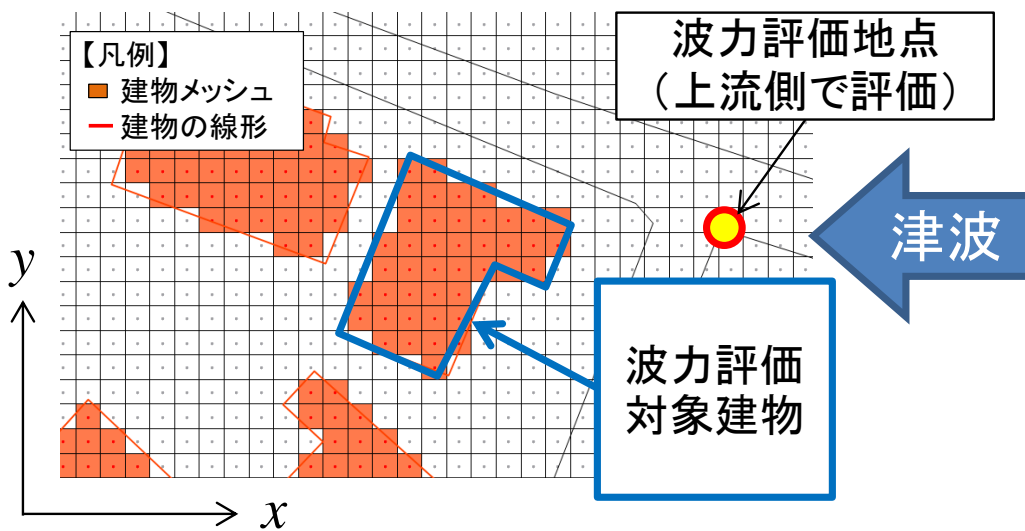


図 4.2 波力算定位置の一例

4.2. 建物倒壊・流出および残存建物に作用した津波波力の推定

4.2.1. 建物に作用した波力と倒壊基準の設定

本節では、建物に作用した津波波力について整理した。津波波力は建物の前面で浸水深とフルード数に基づき算定した。なお、建物被害率と建物に作用した波力の関係は、表 4.2 に示す通りである。被災区分は国土交通省都市局の調査で区分された内容であり、本研究ではその区分に基づき被害レベルの設定を行った。

表 4.2 建物被害区分と被害レベル

被災区分	被害レベル	備考
被災なし	0	—
一部損壊	1	—
半壊	2	—
大規模半壊	3	—
全壊（1階浸水）	4	1階部分が浸水
全壊	5	建物自体は残存修繕不可能な状態
全壊（流失）	6	完全に倒壊・流失

図 4.3～図 4.7 に第 3 章で実施した、再現計算におけるケース 2、ケース 1 の各種構造物の推定波力と被害区分を整理した結果を示す。また最小 2 乗法より求めた回帰曲線も合わせて示す。なお、全構造物における被害レベル 0（被災なし）においては、作用波力は限りなく 0 であった。そのため、原点を通る回帰曲線としている。また、一部の構造物や計算ケース条件によっては、被害レベルと作用波力が逆転するなどが確認された。これはデータ数の充分でないためであると考えられる。そこで本研究では、最も単純な回帰式として直線とした。回帰曲線は震災前の建物を考慮したケース 2 と震災後の建物を考慮したケース 3 では建物に作用した波力の傾向がやや異なり、ケース 3 の方が全体的に大きめに算定されている。これは、津波浸水予測計算において、ケース

2 に比べケース 3 では遡上しやすく、市街地全体では、水位が大きくなる結果であったため、推定波力も大きくでているのであると考えられる。津波浸水予測計算の結果では、沿岸部ではケース 2 が、背後地ではケース 3 の方が再現性は高かった。このため、実際に作用した波力は、ケース 2 とケース 3 の間にあると考えられる。また建物は、被害レベル 5 (全壊) ~ レベル 6 (全壊 (流失)) に遷移する過程で倒壊・流失しており、先述した、震災前後におけるケースの間にあることを考慮すると、各種構造物に作用した推定波力はそれぞれ鉄筋コンクリート造 : 80~140kN/m, 鉄骨造 : 140~189kN/m, 木造 : 77~126kN/m, その他 88~133kN/m 程度であったと考えられる。ただし、RC 造, S 造の建物については、十分なデータが得られなかったため、倒壊・流失に至った波力の信頼度は十分ではないと考えられる。

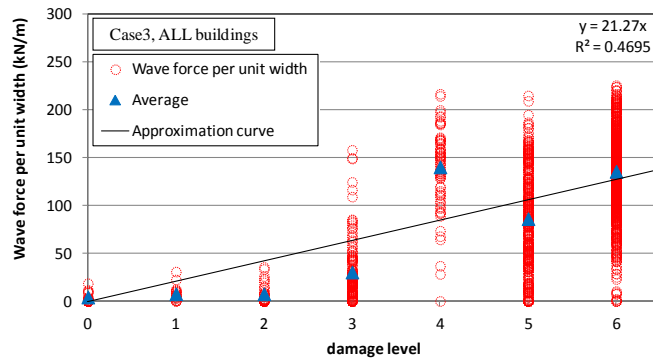
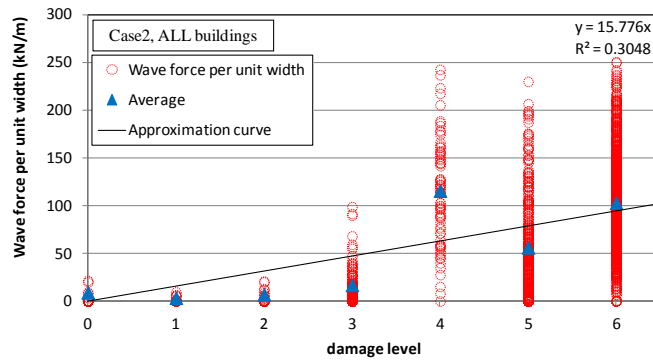


図 4.3 すべての建物における推定波力と被害区分

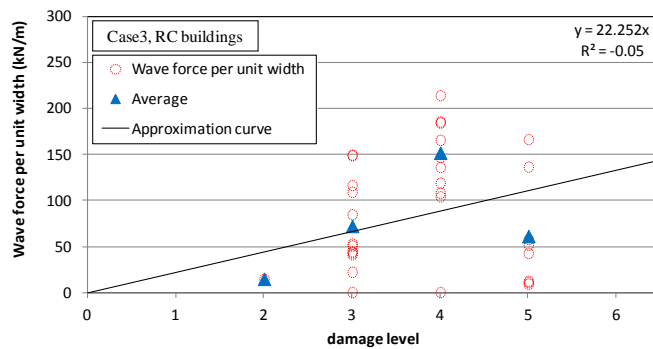
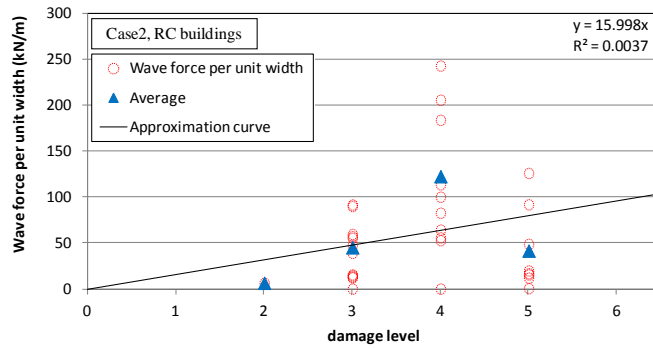


図 4.4 鉄筋コンクリート造建物における推定波力と被害区分

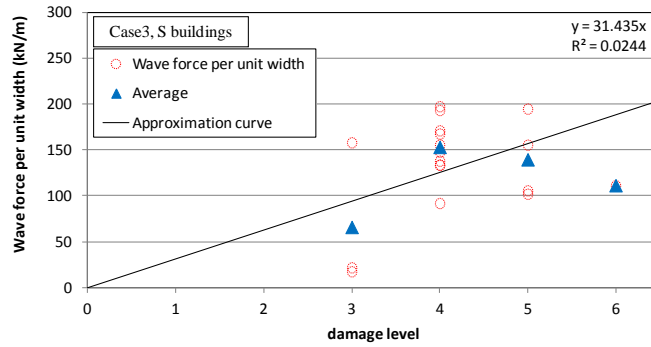
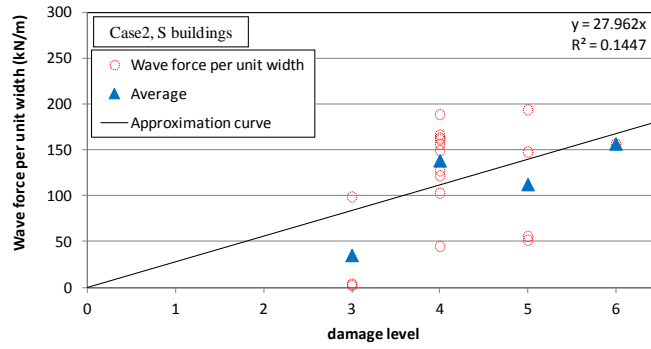


図 4.5 鉄骨造建物における推定波力と被害区分

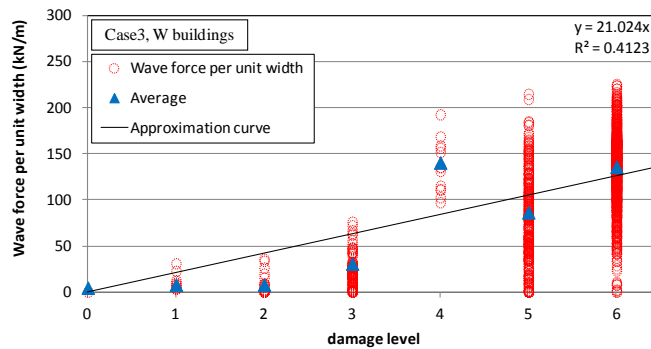
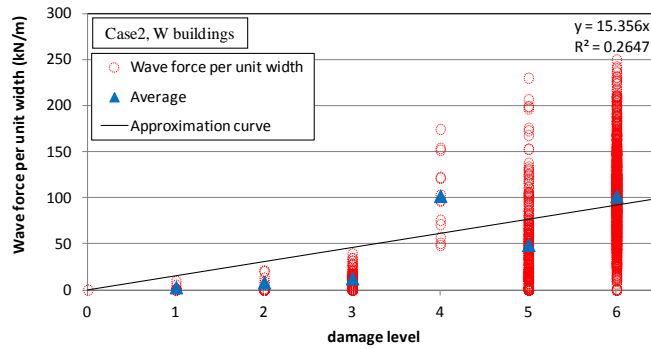


図 4.6 木造造建物における推定波力と被害区分

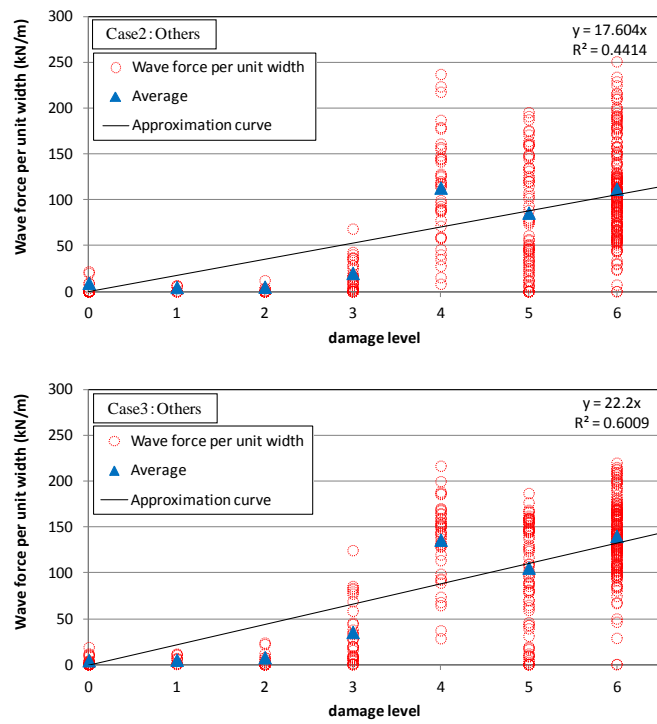


図 4.7 その他の建物における推定波力と被害区分

4.3. 建物倒壊を考慮した津波シミュレーションの実施

4.3.1. 数値計算上における建物倒壊の取り扱い方法

本解析では、津波の流況に応じて建物倒壊判定を行った。倒壊と判定された建物の地形は、**図 4.8** に示す様に地盤高に修正することで建物の倒壊を表現した。

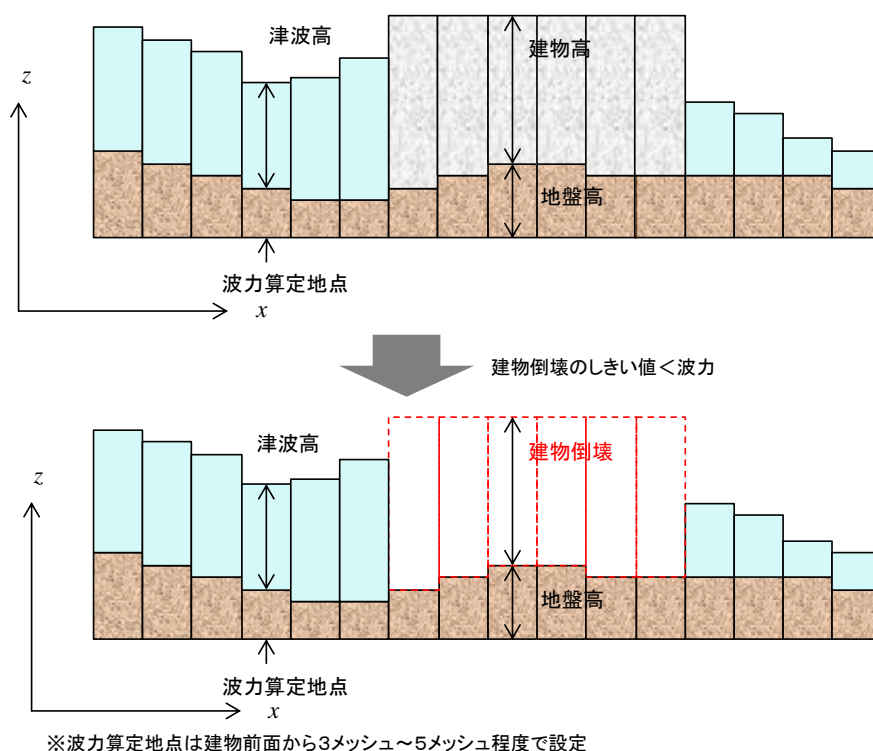


図 4.8 建物倒壊の概念図

ただし、図に示す方法をそのまま適用すると、倒壊した建物とその周辺のメッシュでは水位が不連続となり、計算の不安定を発生させやすい。建物倒壊後のメッシュとその周辺におけるメッシュ間で水面形を連続的にすることで、安定した計算を行うことができる。そこで本研究では、倒壊した建物倒壊後のメッシュと周辺のメッシュにおける水位を平滑化することによって、建物倒壊後の計算時における数値的な不安定を解消することとした。ただし、平滑化範囲を大きくしすぎると計算自体の結果が変わってきってしまうため、数値的な安定となる限界範囲を、トライアル計算により算定した。その結果、

建物倒壊後のメッシュの境界から前後3メッシュの範囲を対象に平滑化すれば安定して計算できることが明らかになった。図 4.9 に平滑化処理を考慮した計算の概念・手順を示す。青枠内は倒壊直後、緑枠が平滑化処理中、赤枠内が最終的な水面形を示している。平滑化の処理方法は建物メッシュの境界から前後3メッシュを対象に隣接するメッシュ同士の全水深の平均値を与えている（緑枠の処理）。さらに上記の処理（緑枠内の処理）を3回繰り返す事によって建物倒壊後のメッシュに平滑化した水位を与えている。なお本手法は、2mメッシュで検討したものであり、粗いメッシュ等については別途検討する必要がある。一般的には、メッシュサイズが大きくなるほど、同じ水位であっても水面勾配は小さくなる傾向にあるため平滑化範囲は小さくなるものと考えられる。

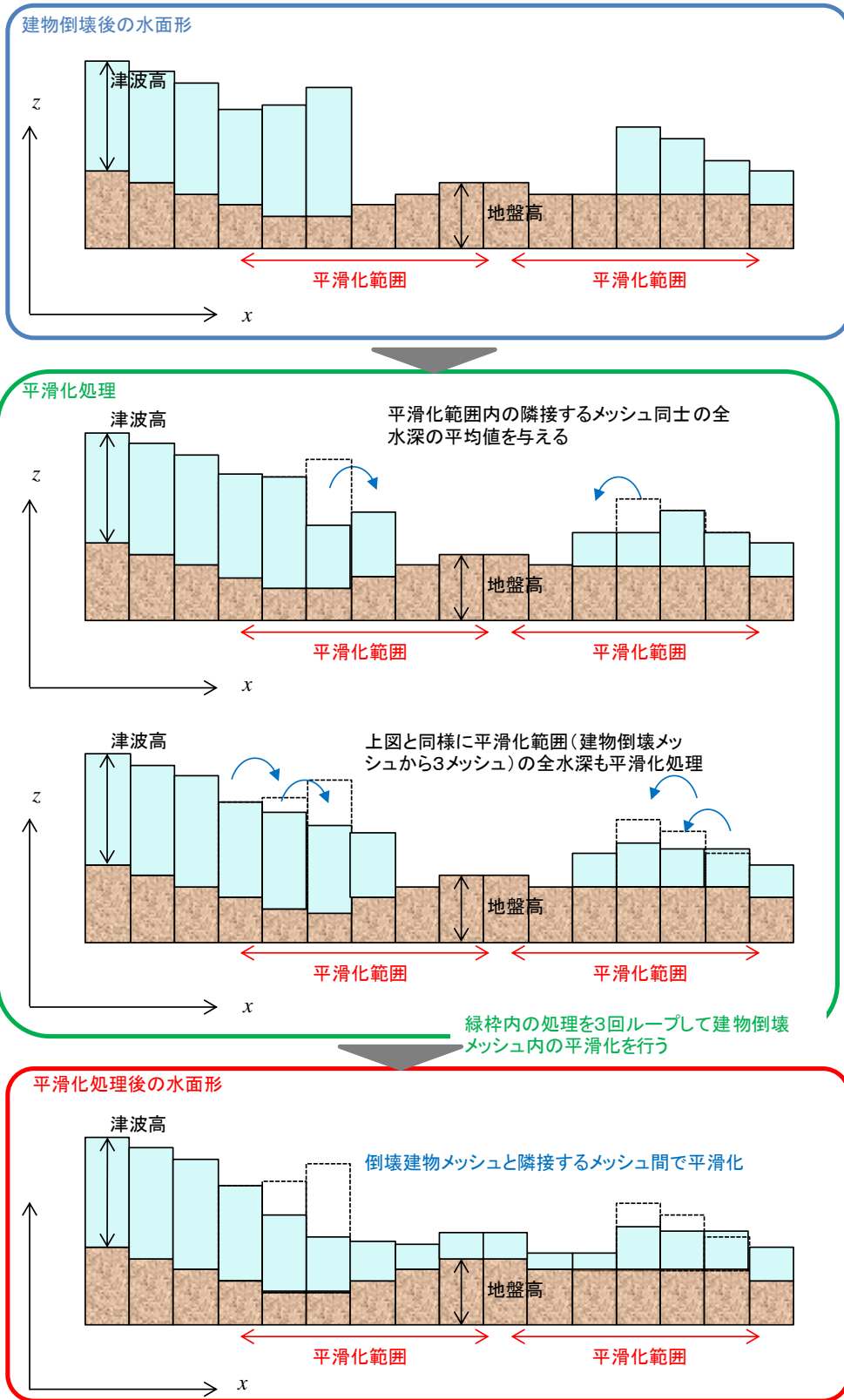


図 4.9 倒壊後の数値計算上の処理の概念

4.3.2. 解析条件

表 4.3 に計算条件一覧を示す。基本的には再現計算と同様であるが、気仙沼市鹿折地区の地形条件は、震災前の建物の形状を考慮した地形（3章再現計算のケース2と同様）とした。また、建物の影響を地形として表現しているため、粗度係数については 0.025 とした。

表 4.3 計算条件一覧(3章の再現計算と同様の条件)

	項目	条件
計算手法	基礎式	非線形長波理論式
	差分スキーム	【空間差分】スタaggerド格子法
		【時間差分】リーブ・フロッグ法
	越流公式	本間公式
計算条件	計算領域	3章の再現計算と同様の条件
	計算格子間隔	1350m→450m→150m→50m→10m→2m
	計算領域数	Domain 1 (1350m メッシュ) Domain 2 (450m メッシュ) Domain 3 (150m メッシュ) Domain 4 (50m メッシュ) Domain 5 (10m メッシュ) Domain 6 (2m メッシュ) ※震災前 (3章の再現計算ケース2) の地形条件
	波源 (断層) モデル	藤井・佐竹モデル ver.8.0
	初期潮位	T.P.0.5m (第一波到達時刻の天文潮位)
	粗度係数	市街地 : 0.025 その他の土地利用形態 : 0.025~0.04
	陸域境界	Domain 1~4 は完全反射 Domain 5~6 は遡上境界
	計算間隔	dt=0.05s(CFL 条件は満足する)

4.3.3. 検討ケース

建物倒壊を考慮したシミュレーションでは、今回対象としている気仙沼市は大部分が木造家屋で占められていることや、震災前後の結果間で推定単位幅あたりの波力(77~126kN/m)にばらつきがあるため、木造家屋を対象に複数の倒壊条件(ケース 4-a ~4-f)を設定した(3章の再現ケースと区別するためケース4とする)。ケース設定においては、上下限に幅をもたせ、50~130kN/mのうち、感度分析も含めて16kN/mずつ変化させた。建物の倒壊・流失を考慮した場合に用いた建物の倒壊・流失条件を表4.4に示す

表 4.4 建物倒壊を考慮した計算ケース

ケース	建物倒壊の単位幅あたりの波力(kN/m)			
	RC造	S造	木造	その他
4-a	110	165	50	110
4-b			66	
4-c			82	
4-d			98	
4-e			114	
4-f			130	

4.3.4. シミュレーション結果

(1) 建物倒壊予測

図 4.10 に本解析結果より得られたケース-a~f における木造建物の倒壊または残存した建物の再現率(=(倒壊または残存が計算と実績で一致した建物の数)/対象とした建物数×100)を示す。これらの結果から、ケース 4-a, b の順で再現率が向上し、しきい値を 82kN/m にしたケース 4-c が最も良好な結果を示した。それ以降については、シミュレーションの倒壊率が上がるため、再現率は低下する傾向が見られた。

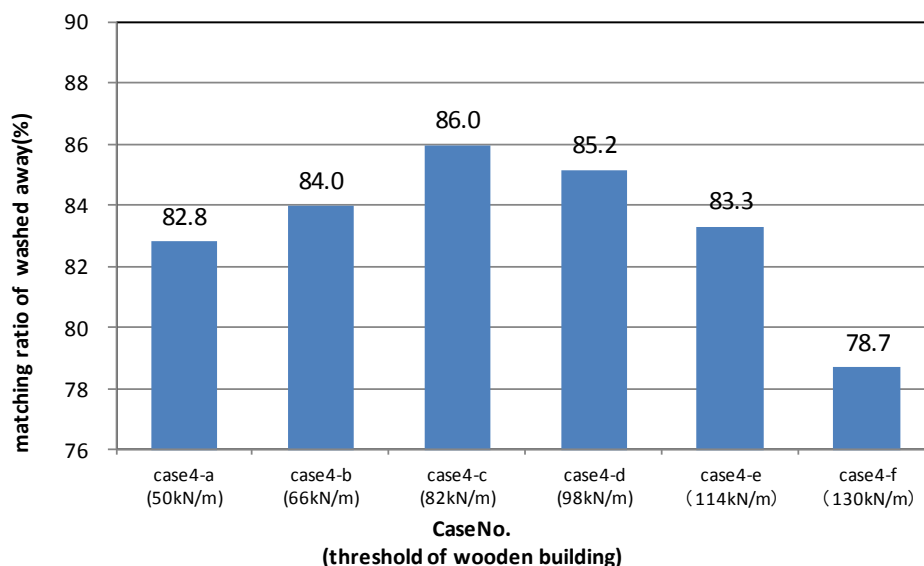
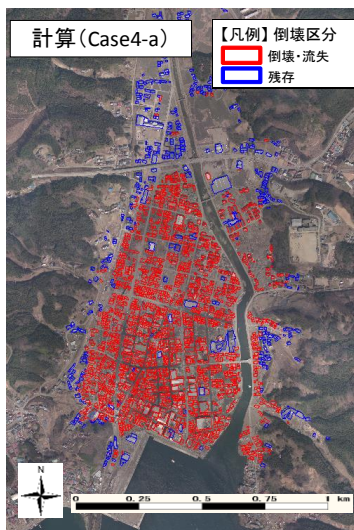
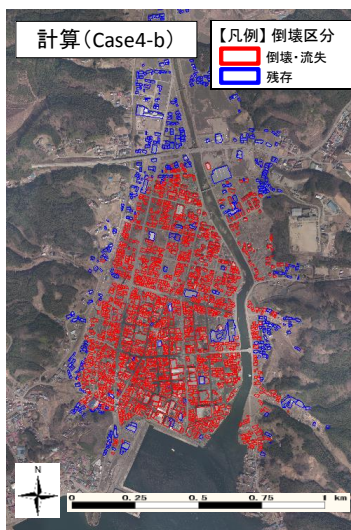


図 4.10 各ケースの建物倒壊および残存再現率

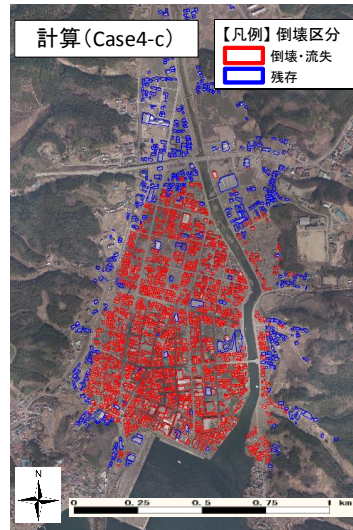
図 4.11 に本解析結果より得られた各ケースの倒壊・流失および残存した建物の平面分布の比較を示す。また、実績と計算の相関分布の結果も合わせて示す。これらの結果からいずれのケースも建物倒壊は同様の傾向を示しており、沿岸域で倒壊が大きくなり、木造家屋の倒壊条件を倒壊しにくい条件(ケース 4-a からケース 4-f)になるに従い背後地の残存が増えていることが確認できる。また、各ケースの計算結果と実績の相関値は再現率と同様に、ケース 4-a, b, c の順で相関が高くなり、それ以上は相関値が下がる結果となった。



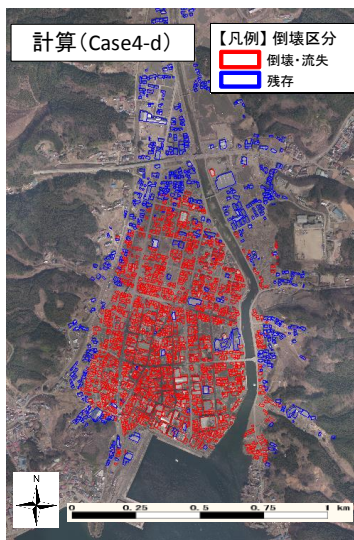
(a) case4-a



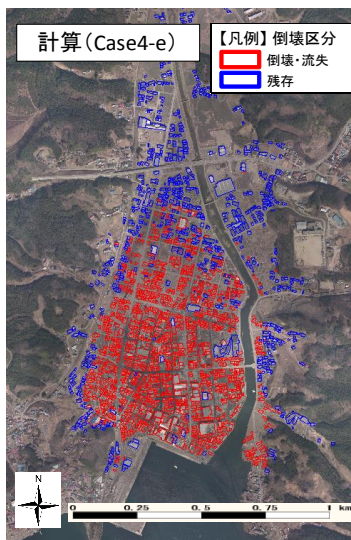
(b) case4-b



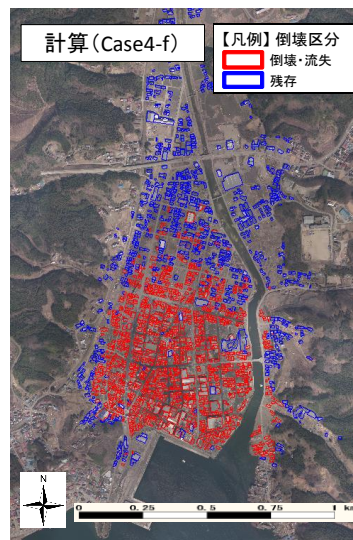
(c) case4-c



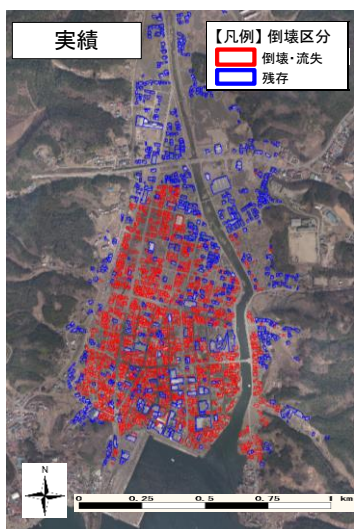
(d) case4-d



(e) case4-e



(f) case4-f



(g) 実績

各ケースの相関値

case4-a	case4-b	case4-c
0.62	0.64	0.67
case4-d	case4-e	case4-f
0.65	0.63	0.58

図 4.11 建物倒壊予測結果（上 2 段：計算，下段：実績）

次に、図 4.12 に示す地区区分ごとに相関係数の算定を行った。地区区分は気仙沼市の横断する鹿折川と、鹿折地区を横断する国道で境界となる 4 区分とした。地区区分ごとの相関係数を表 4.5 に示す。表中は相関が高いケースに青色を低いケースを赤色で着色している。これらの結果より、地区 1 ではいづれのケースもほとんど変わらず、地区 2 ではケース 4-c が高い。しかしながら、背後地の地区 3,4 では倒壊条件によって相関が極端に低下する等の傾向が確認された。また、地区 4 では case4-d が最も高く、地区ごとに分析すると良好に再現できる倒壊条件は異なることが確認された。

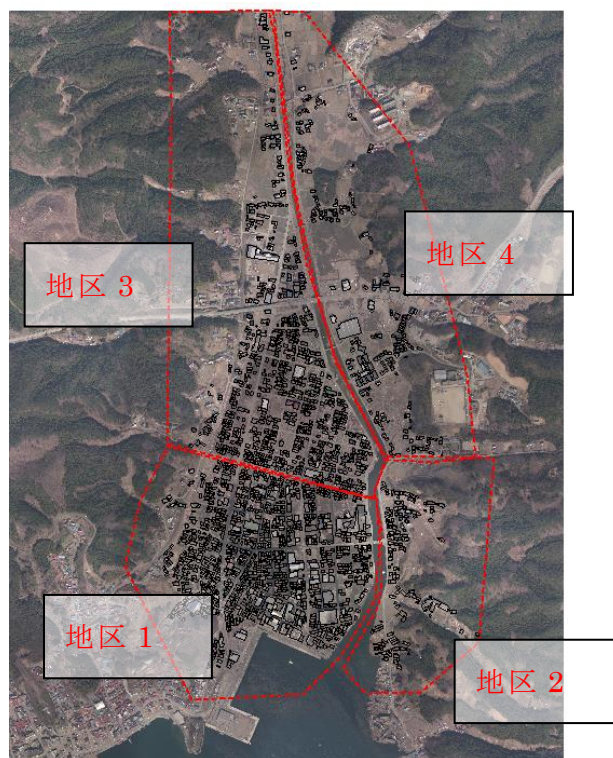


図 4.12 相関係数算出用の地区区分

表 4.5 地区ごとの相関係数

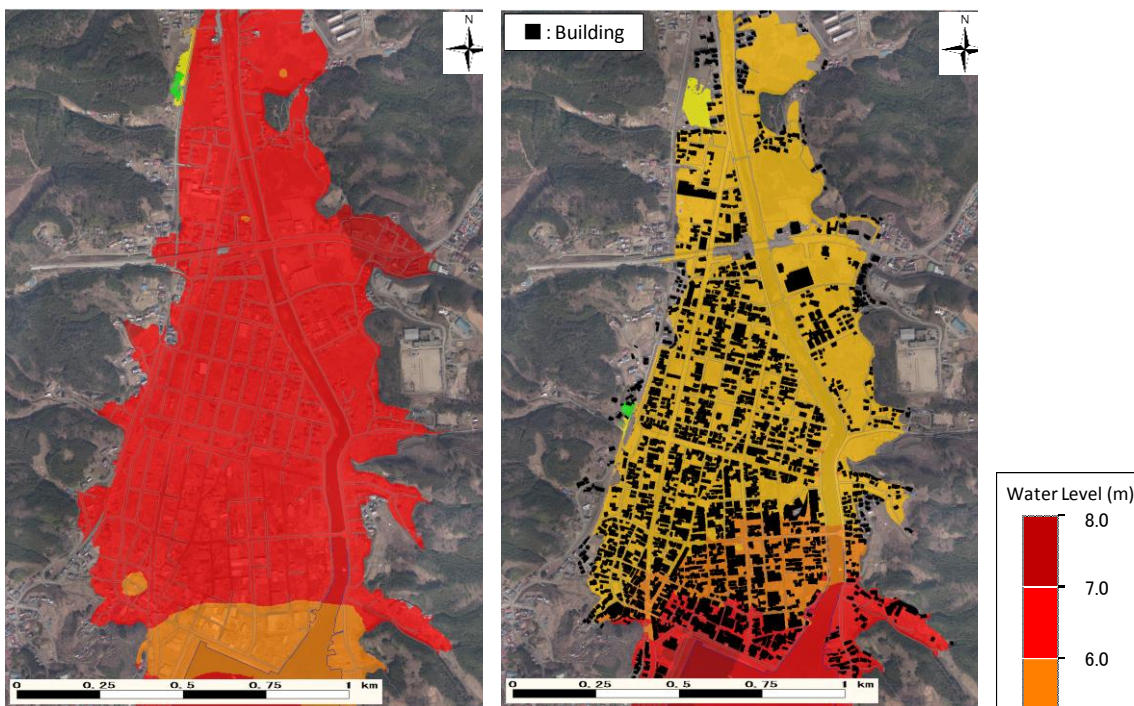
	case4-a	case4-b	case4-c	case4-d	case4-e	case4-f
地区 1	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.53
地区 2	0.68	0.67	0.77	0.69	0.67	0.61
地区 3	0.59	0.62	0.63	0.58	0.37	0.16
地区 4	0.29	0.40	0.50	0.52	0.32	0.25

本検討では、建物の倒壊被害について検討を行い建物の残存・倒壊率で評価を行った。その結果、木造家屋の倒壊しきい値を 82kN/m とすることで 86%の再現率を示し、相関も高いケースとなった。ただし、地区ごとに分析した結果、沿岸部と背後地で相関が逆転するなどが確認された。

(2) 浸水プロセスおよび痕跡水位の比較

図 4.13 に、本解析より得られた最大津波水位の平面分布の結果を示す。3章で実施した再現計算の結果もあわせて示す。建物倒壊を考慮した津波浸水予測モデルの結果は、建物を震災前後の地形としたケース 2,3 と中間的な結果となっていることが確認された。建物倒壊を考慮することで、沿岸および背後地のどちらかに水位分布が偏ることがなくなっている。

また、図 4.14 に計算水位と痕跡水位の比較した結果を示す。こちらも従来手法による再現計算結果をあわせて示す。建物を考慮した計算結果は、最大津波水位と比較して同様の傾向となっており、ケース 2 と 3 の中間的な結果となっている。ただし、ケース 2 よりも沿岸では過少評価となっており、再現性の向上には建物倒壊の条件や災害がれきの影響等を考慮する必要があると考えられる。

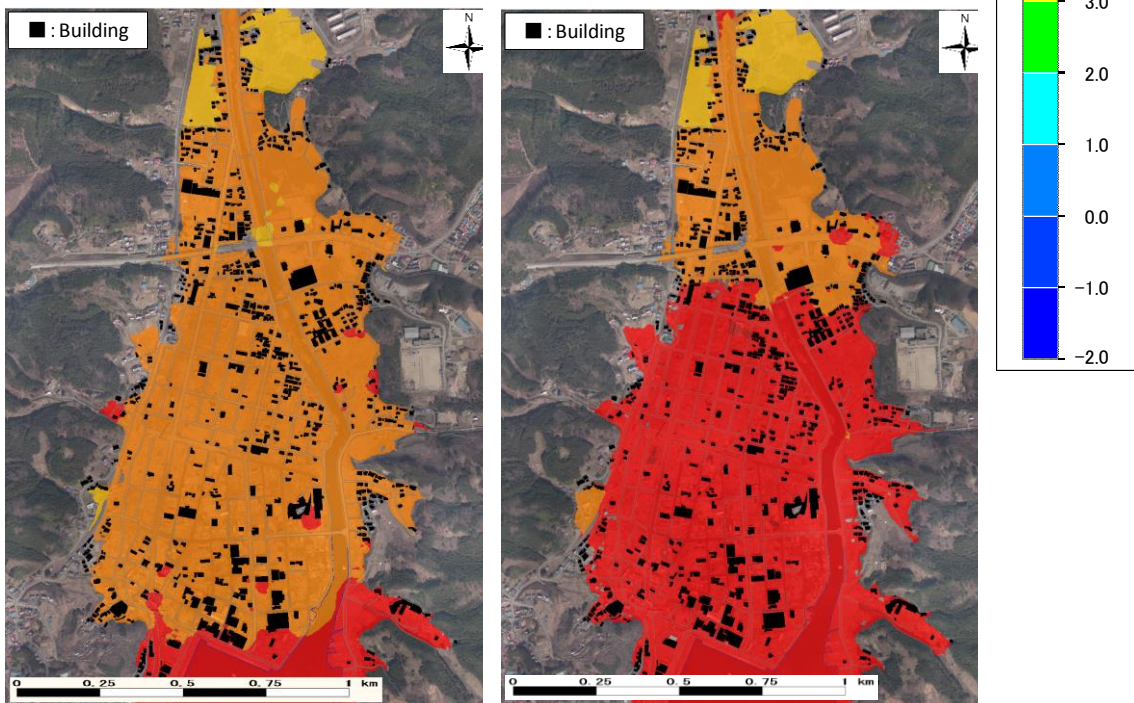


(a) ケース 1 (粗度モデル)

倒壊なし

(b) ケース 2 : 震災前の地形

倒壊なし



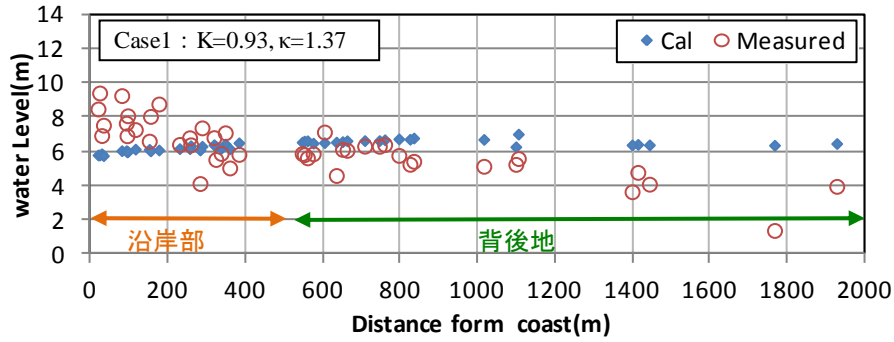
(c) ケース 3 : 震災後の地形

倒壊なし

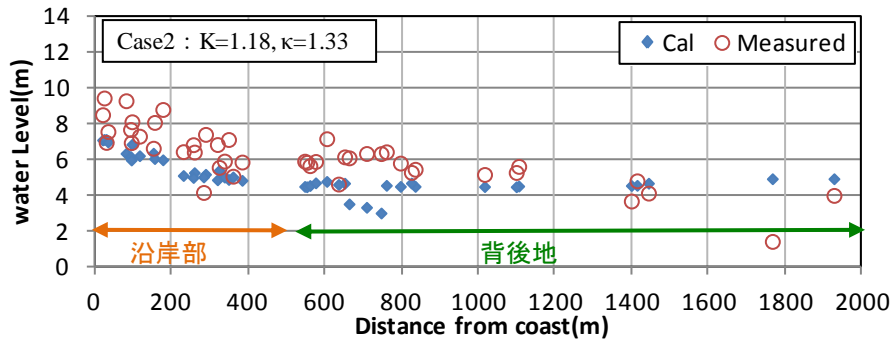
(d) ケース 4-c : 震災前の地形

倒壊有り

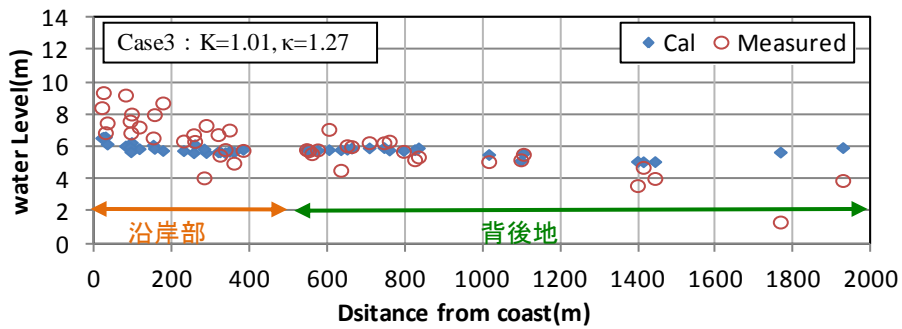
図 4.13 各ケースの最大津波水位の比較



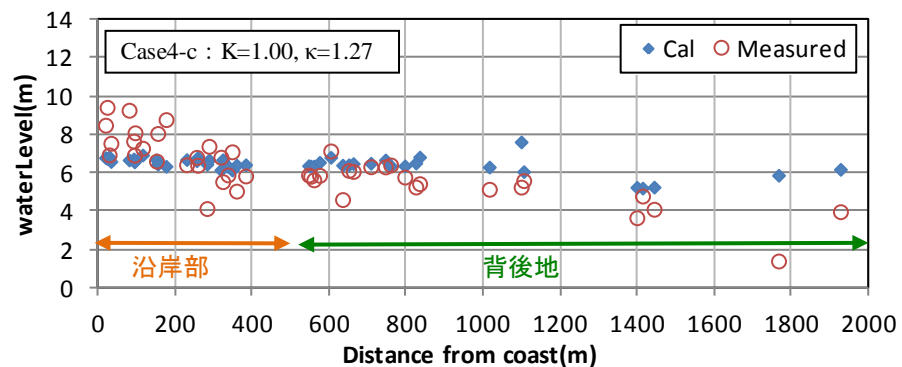
(a) 従来手法



(b) 震災前の地形，倒壊なし



(c) 震災後の地形，倒壊なし



(d) 震災前の地形，倒壊あり（本解析結果）

図 4.14 痕跡水位と計算水位の比較

4.4. 本章のまとめ

本章では、波力に基づく建物の倒壊・流失を考慮した場合の津波シミュレーションモデルを構築し、再現性について検討した。その結果、従来の手法の地形と震災前後の建物を考慮した地形で計算した結果、正確な浸水予測には建物の形状や高さを考慮した場合に加え、建物の倒壊を考慮することで一定の再現性が確認された。また、波力に基づく建物の倒壊・流失を考慮した計算（ケース 4-a ～f）を実施した結果、実績の建物倒壊状況を概ね再現可能であることを確認した。さらに、東北津波時の気仙沼市における木造建物の倒壊・流失条件として 82kN/m 前後と推定した。

以上の結果より、建物倒壊を考慮した津波解析は一定の再現性を有していると考えられる。ただし、沿岸部においては、震災前の地形条件で実施したケース 2 よりも再現性が低下しており、建物倒壊の条件や災害がれき等の影響を考慮する必要があると考えられる。

第5章 災害がれき移動被害予測モデルの検討

本章では災害がれきの移動予測モデルの構築について示す。流水中のがれきには様々な力が働く。図 5.1 にその概念図を示すが、津波による流体力や浮力、底面からの摩擦力、斜面中であれば斜面方向の重力、物体同士の斥力などが考えられる。これらの力を適切にモデル化することが重要である。

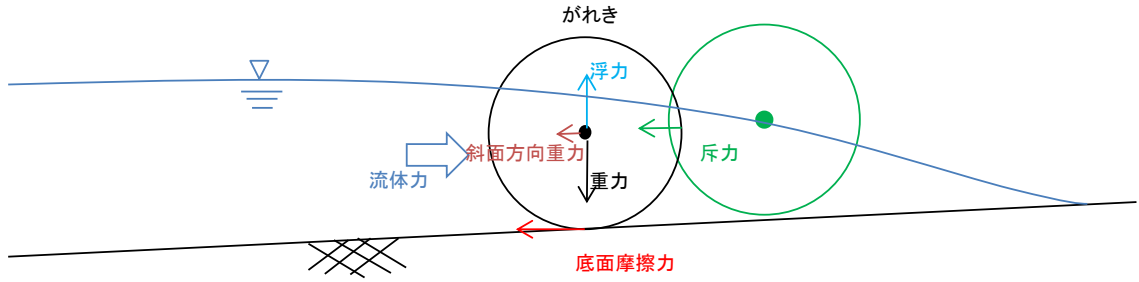


図 5.1 流水中の物体に働く力の概念

また、災害がれきの移動形態には、水とがれきの密度の関係により、漂流移動や底面移動（滑動・転動・跳動）が考えられる。これらの移動形態を包括的に取り扱えるようにモデル化を行った。また、災害がれきを取り扱う上で必要な現象を踏まえた実験との比較や、数値実験を実施した、以下ではその詳細について示す。

5.1. 災害がれき被害予測モデルの構築

5.1.1. 基礎方程式

本研究で構築した災害がれきの移動予測モデルの概要を示す。がれきの挙動予測モデルの運動方程式を示す。

$$\rho_{deb} V_{deb} \frac{d\mathbf{u}_{deb}}{dt} = \rho V_{deb} \frac{d\mathbf{u}_f}{dt} + \rho(C_M - 1)V_{deb} \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_{deb}}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho C_D A_{deb} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_{deb}) |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_{deb}| - \mathbf{f}_{debb} - \mathbf{f}_{debg} - \mathbf{f}_{debk} \quad (5.1)$$

ここで \mathbf{u}_{dev} , \mathbf{u}_f はがれきの速度, 水の流速, ρ_{deb} , ρ は, がれきの見かけの密度, 水の密度, V_{deb} は没水部分のがれきの体積, A_{deb} は流水方向に対する没水部分のがれきの投影面積 C_M, C_D は付加質量係数および抗力係数を示す. また \mathbf{f}_{debb} , \mathbf{f}_{debg} , \mathbf{f}_{debk} はがれきを受ける底面摩擦, 重力成分, がれき同士の斥力である. 底面摩擦力と重力成分は以下の式(5.2), (5.3)となる.

$$\mathbf{f}_{debb} = \mu_{deb} (\rho_{deb} - \rho) V_{deb} g \cos \theta_b \frac{\mathbf{u}_{deb}}{|\mathbf{u}_{deb}|} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{f}_{debg} = (\rho_{deb} - \rho) V_{deb} g \sin \theta_b \quad (5.3)$$

ここで, μ_{deb} はがれきに作用する摩擦係数, g は重力加速度, θ_b は地形勾配を示す.

抗力係数と付加質量係数は, 大窪ら (2004) ¹¹⁾ の既往成果を参考にし, 以下の通り設定した.

$$\log C_D = \begin{cases} 0.25 - 1.6 \log F_r & \text{for } h_{inun}/H < 1.2 \\ 0.55 - 0.25 h_{inun}/H - 1.6 \log F_r & \text{for } 1.2 < h_{inun}/H < 2.0 \\ 0.05 - 1.6 \log F_r & \text{for } 2.0 < h_{inun}/H \end{cases} \quad (5.4)$$

$$C_M = 1.15 + 1.15 \tanh h_{inun} \{(-2.0 + 2.5 h_{inun}/H) \pi\} \quad (5.5)$$

また, がれき同士の斥力については, ばねモデルを適用しがれきの辺の長さとかれき間の重心の差分にバネ定数を乗じた力を斥力とし, すべてのがれきの斥力の和を \mathbf{f}_{debk} とした. モデルの概念図を図 5.2 に示す.

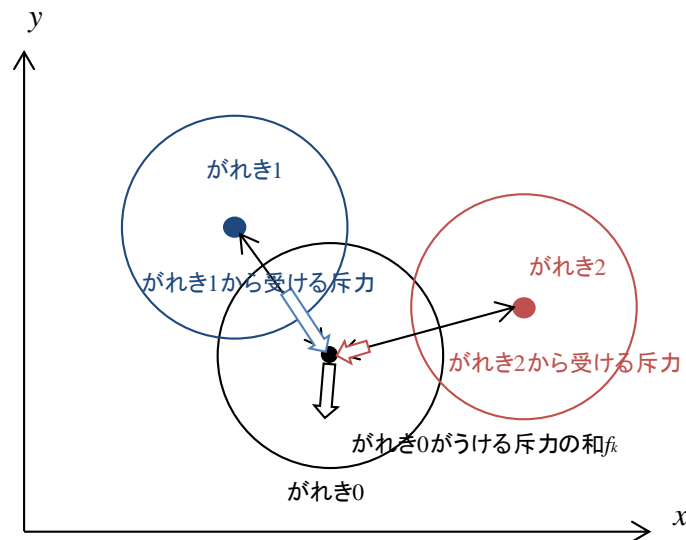


図 5.2 斥力の算定概念図

5.1.2. 数値計算法

がれきの拡散によるずれは，拡散係数 κ_0 を満足する散らばりとなるように(0,1)間の一様乱数 ξ を用いて定める．もし，時刻 $t = 0$ に座標 X_0 に存在していたがれきが座標 X に移動したものとすると式(5.6)のように計算できる．

$$X_{deb} = X_{deb0} + \int_0^t \mathbf{u}_{deb} dt + \sum_{k=0}^n \sqrt{24\kappa_0 \Delta t} \left(\xi_k - \frac{1}{2} \right) \quad (5.6)$$

ここで X_{deb}, X_{deb0} $t=n\Delta t$ である．計算は運動方程式とがれきの座標算定式を差分化して行う．式(5.1)，(5.6)の差分式は， k を時間ステップ， j をがれきにつけた番号とすると

$$u_{deb,j}^{k+1} = \frac{I}{I+\mu} \left[(I-\mu)u_{deb,j}^{k-1} + 2\Delta t \alpha \left(\frac{du}{dt} \right)_j^k + 2\mu u_j^k + \gamma \right] \quad (5.7)$$

$$X_j^{k+1} = X_j^k + \Delta t u_{deb,j}^k + \sqrt{24\kappa \Delta t} \left(\xi_j^k - \frac{1}{2} \right) \quad (5.8)$$

ここで， $\mu, \alpha, \beta, \gamma$ はそれぞれ，

$$\mu = \beta \Delta t C_D \frac{A_{deb}}{V_{deb}} |u_{deb} - u_A|, \quad \alpha = \frac{C_M}{\rho_{deb}/\rho + C_M - 1}, \quad \beta = \frac{1}{2(\rho_{deb}/\rho + C_M - 1)}, \quad \gamma = -4\beta \Delta t \frac{f_{debb} + f_{debg} + f_{debk}}{\rho V_{deb}}$$

である．

5.1.3. 地形勾配・摩擦係数の扱い

(1) 地形勾配

災害がれきの運動方程式（式 5.1～式 5.3）における底面摩擦と重力成分の地形勾配 θ_b は、がれき位置座標とメッシュの水深・標高値より算定した。

図 5.3 に算定の概念図を示す。x 方向の勾配を求める際には、x 方向の計算格子のうち近傍の 2 メッシュの値から算定した。がれき位置（黒星印）が i メッシュに含まれている場合、がれき位置が i-1 寄りであれば i と i+1 のメッシュより算定し、i+1 寄りであれば i と i+1 のメッシュで算定を行っている。また y 方向についても同様に近傍の 2 メッシュの標高・水深値から地形の勾配を算定している。

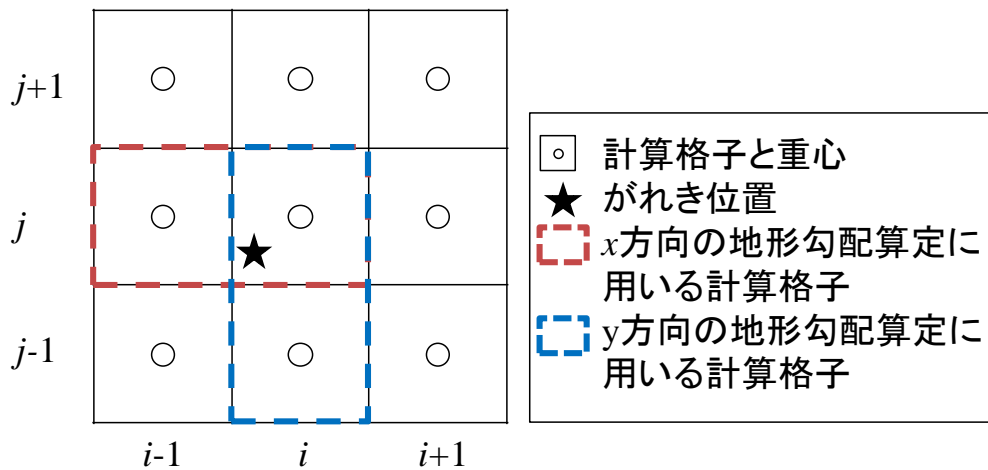


図 5.3 勾配算出の概要

(2) 静止・動摩擦係数

通常流水中の物体は、図 5.4 に示すとおり流れが大きくなるに従って、底面を滑る様に移動する滑動から回転しながら移動する転動、転動から水中を跳ねるように移動する跳動というように移動形態が変化する。静止時は静止摩擦係数を、滑動時は動摩擦係数を与える。地面との接地時間が短くなる転動や跳動については、流速の関数で表現する方法が考えられる。

本モデルでは、式(5.2)の底面摩擦項の摩擦係数 μ_{deb} は、流況に応じて変化する滑動、転動、跳動等の移動形態を表現するために、流速の関数となる次式(5.10)で示される。同式は菅原ら⁴²⁾の研究報告に基づき設定した。

$$\mu_{deb} = \mu_{dyn} \frac{2.2}{\beta_0^2 + 2.2} \quad (5.9)$$

$$\beta_0^2 = \frac{u_{deb}^2}{(1 - \rho/\rho_{deb})gH} \quad (5.10)$$

ここで、 μ_{dyn} は動摩擦係数、 H はがれきの代表スケール(本研究ではがれきの高さとしている)を示す。

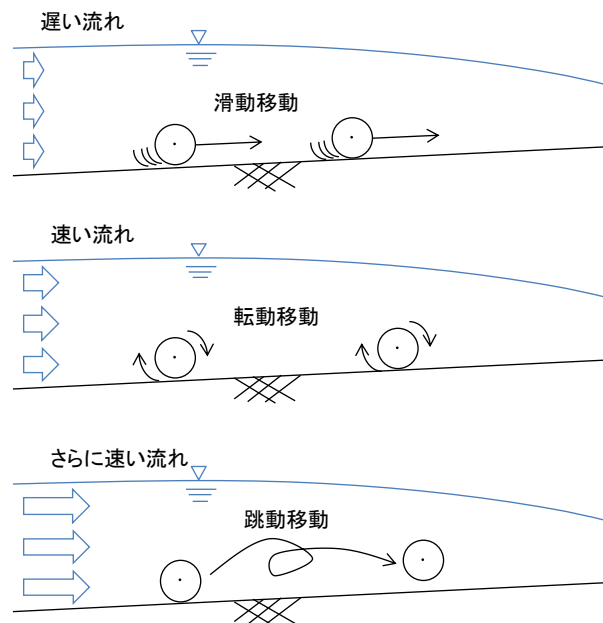


図 5.4 流速と移動形態の概念図

5.2. 災害がれきの諸元の取り扱い方法

水中における物体は浮力の関係で、水の密度よりも小さいと喫水深よりも水位があれば浮き、さらに流水中ともなれば、漂流する。一方、水の密度よりも大きな密度を持った物体ならば、浮くことは無いが、流体力が上昇すれば、底面摩擦や重力成分との大小関係により、浮かずとも底面移動（滑動・転動・跳動）する可能性がある。

本研究で取り扱う災害がれきは、車両・船舶、金属、コンクリートくず、木材など多種多様なものに適用可能とすることを想定している。これらの移動形態は先述した通り、水とがれきの密度の関係、浸水深と喫水深の関係、流体力と抵抗力（底面摩擦力と重力成分との関係により様々な移動形態を考慮する必要がある。図 5.5 にこれらの関係と移動形態のフローを示したものを、表 5.1 に各移動形態に至るパターン毎の状態図と条件を示す。

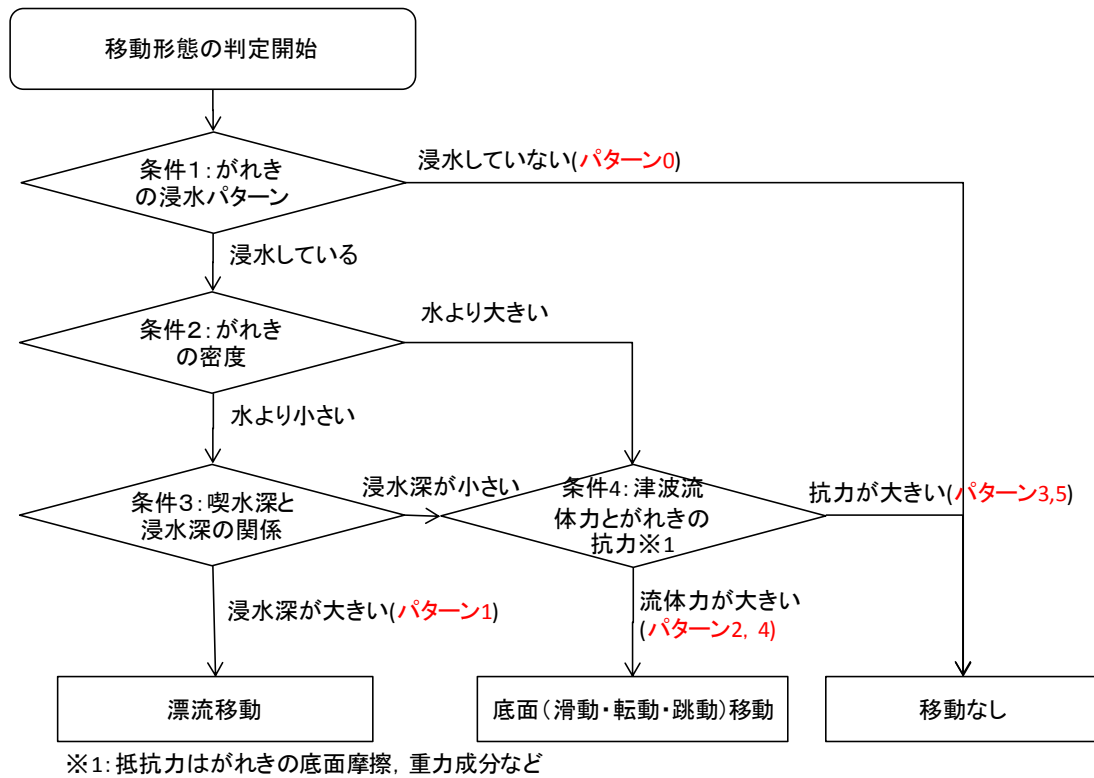

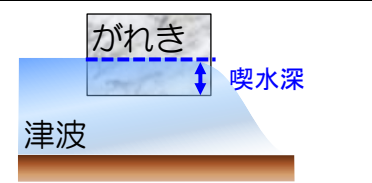
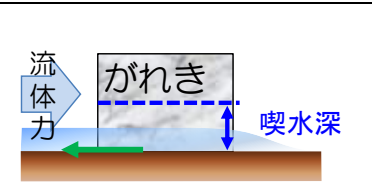
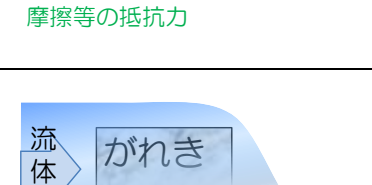
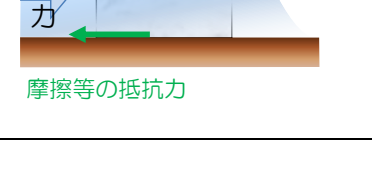



図 5.5 がれき諸量・水理諸量の関係における移動形態

表 5.1 がれき諸量・水理諸量の状態別における移動形態の模式図

パターン	状態図	条件 1 (浸水有無)	条件 2 (水の密度とがれきの密度)	条件 3 (喫水深と浸水深)	条件 4 (流体力と抗力)	移動形態	
0		浸水なし	-	-	-	移動なし	
1		浸水あり	水の密度 > がれきの密度	浸水深 > 喫水深	漂流中の摩擦等の抗力なし	漂流移動	
2				喫水深 > 浸水深 ※浸水深に応じて浮力が作用	津波流体力 > 摩擦力, 重力	底面移動	
3				摩擦力, 重力 > 津波流体力	移動なし		
4				がれきの密度 > 水の密度	喫水深なし ※浸水深に応じて浮力が作用	津波流体力 > 摩擦力, 重力	底面移動
5				摩擦力, 重力 > 津波流体力	移動なし		

従来の漂流計算および津波石移動計算などの移動予測計算では、面積・体積・密度は没水状態あるいは完全水没状態の仮定に基づき一定値として取り扱われる。例えば漂流移動計算では、あらかじめ漂流物の喫水深を算定しておき、没水部分における面積や体積から流体力の計算を行っている^{8), 10)}。また、底面移動のみを扱った津波石移動モデルでは物体が完全水没した状態を仮定し流体力の計算を行っている¹¹⁾。ただし、津波の非定常な現象を完全に取扱っているわけではない。先に示した通り水理条件や災害がれきの密度等の条件によっては様々な移動形態を示す。例えば、災害がれきの密度が水の密度より小さい場合かつ浸水深が喫水深より小さい場合において、底面摩擦や重力が流体力を上回れば移動しない(図 5.5, 表 5.2 のパターン 3 の状態)ことが考えられる。浸水深が増大すれば浮力が大きくなり、底面摩擦や重力の影響が次第に小さくなり底面移動が生じると考えられる(図 5.5, 表 5.2 のパターン 2 の状態)。さらに浸水深が増大し、喫水深を上回れば、がれきは浮き上がり漂流移動となる(図 5.5, 表 5.2 のパターン 1 の状態)。

本研究では、この様な災害がれきの複数の移動形態の包括的な取り扱いや、移動形態の連続的な遷移を取り扱うため、がれきの面積・体積は浸水深や喫水深に応じて作用高さとした。また、面積・体積を浸水深に応じて変動させるにともない見かけの密度を導入した。見かけの密度は次式(5.11)で算定を行っている。

$$\rho_{deb} = \rho_{org} \quad (H/H_t) \quad (5.11)$$

ここで、 ρ_{org} は元のがれきの密度、 H はがれきの高さ、 H_t はがれきに作用する浸水深あるいは喫水深を示す。

表 5.2 は実際の移動状態と計算上の取り扱いの一例を示したものである。図中の左側が実際の現象における移動状態を示しており、右側が計算における各移動状態におけるがれき諸元の取り扱いの概要を示している。水よりも密度が小さく、浸水深が喫水深以上の場合(パターン 1)は、がれきの津波作用高さは喫水深となり、計算上の面積・体積は没水部分となる。この場合がれきの密

度は水の密度として取り扱う ($\rho_{deb}=\rho$)。また、がれきの密度が水の密度より小さいかつ浸水深が喫水深に達していない場合(パターン 2)は、計算上のがれきの面積・体積は没水部分に応じた値とする。さらに、がれき密度が水の密度より大きな場合(パターン 4)では、元のがれきの高さを上限値に非水没・完全水没状態における津波作用高さに応じた面積・体積を計算上で取り扱う。前述した2つの底面移動形態(パターン 2,4)では、底面摩擦力や重力成分の影響を考慮するが、底面摩擦力や重力成分の式(5.2), (5.3)は水と見かけの密度との相対値で算定している。すなわち、浸水深が増大すれば式(5.11)によりがれきの見かけの密度が小さくなり底面摩擦力の影響は小さくなる。これは物理的には浮力を考慮していることを示している。さららがれきの密度が水の密度より小さいかつ浸水深が喫水深に達していない場合(パターン 2)の場合、浸水深が増大し喫水深以上となると式(5.2),式(5.3)は0となり底面摩擦力や重力成分の影響はゼロとなり、漂流移動状態を表現できる。このようながれきの諸元である面積や体積を変動として取り扱う事で、底面移動形態(喫水深未満の浸水深の場合)から漂流移動形態(喫水深以上の浸水深の場合)を連続的に取り扱うことを可能としている。また、同モデルでは、がれきの影響を流れの抵抗としての相互干渉を考慮して質量力および抗力を流体の運動方程式(3.2),(3.3)に付加している。

$$\mathbf{F}_d = \left[V_{deb} \frac{d\mathbf{u}_f}{dt} + (C_M - 1) V_{deb} \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_{deb}}{dt} \right) + \frac{1}{2} C_{DA_{deb}} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_{deb}) |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_{deb}| \right] / dx dy \quad (5.12)$$

ここで、 \mathbf{F}_d は流体に作用するがれきの抵抗力を示す。

表 5.2 実現象と計算上の災害がれきの諸元の扱い

パターン	実現象	計算上
<p>1 (漂流移動)</p>	<p>H: がれきの高さ 喫水深</p>	<p>H_i: 計算上の がれき高さ = 喫水深</p>
<p>2 (底面移動・ 非水没)</p>	<p>H: がれきの高さ 喫水深</p> <p>摩擦等の抵抗力</p>	<p>喫水深 H_i: 計算上の がれき高さ</p> <p>摩擦等の抵抗力</p>
<p>4 (底面移動・完 全水没)</p>	<p>H: がれきの高さ</p> <p>摩擦等の抵抗力</p>	<p>H_i: 計算上の がれき高さ</p> <p>摩擦等の抵抗力</p>

5.3. 水路実験に基づいたがれき移動予測モデルの検証

5.3.1. 底面移動を対象としたがれき移動実験に基づく検証

(1) 実験概要と計算条件

数値モデル検証には、大窪ら(2004)¹²⁾が実施した底面移動を対象とした津波石移動実験と比較した。大窪らの提案モデルでも十分な再現性を有していたが、本モデルとはがれきの諸元の取り扱いが異なるため、本提案モデルでも同様以上の再現性を有しているか検証の位置づけで検討した。

図 5.6 に既往実験の概要を示す。実験は、長さ 9.1m 幅 1m の水槽にゲートで仕切ったタンクに水を貯め、ゲート開閉によって段波を発生させ、スロープ手前に設置した津波石にみたてたブロックの押し波・引き波による最大移動位置、最終移動位置を整理している。

タンク内の初期水深は 15, 20, 25, 30cm の複数条件で実施しており、実験は 5 回実施しており、それぞれの位置の平均とばらつきを整理している。なお、本研究で比較対象としたブロックは一辺の長さが 3.2cm の立方体であり密度は 1.55g/cm^3 である。

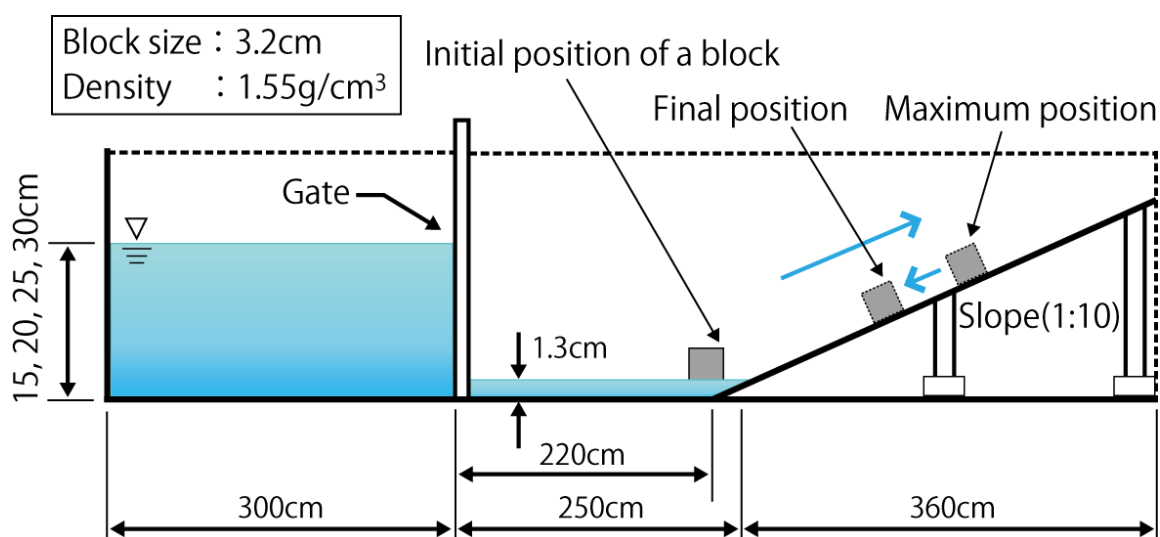


図 5.6 実験概要

数値解析の条件については表 5.3 に示す通りである。計算格子幅は 2cm とし、総計算格子数は 25000 メッシュとなる。造波条件と地形条件は既往実験に用いられた条件に従い設定した。図 5.7 は作成した水路地形条件の一例である。また、実施ケースについては、本モデルで提案しているがれきの諸元を変動とした場合と従来モデル（がれきの諸元を一定とする）の場合の 2 通りを実施し、それぞれ実験値と比較検討した。

表 5.3 計算条件の一覧

計算条件	項目
地形条件	水路条件を再現
計算格子間隔	2cm
計算メッシュ数	x 方向：500 y 方向：50
計算時間	15s
計算時間間隔	0.0025s
造波条件	水槽内初期水位を設定 (15, 20, 25, 30cm)
ブロック諸元	一辺が 3.2cm の立方体、密度は 1.55g/cm ³
静止・動摩擦係数	それぞれ 0.8, 0.6
実施モデル	従来モデル（面積・体積・密度を固定） 本モデル（面積・体積・密度を浸水深に応じて変動）

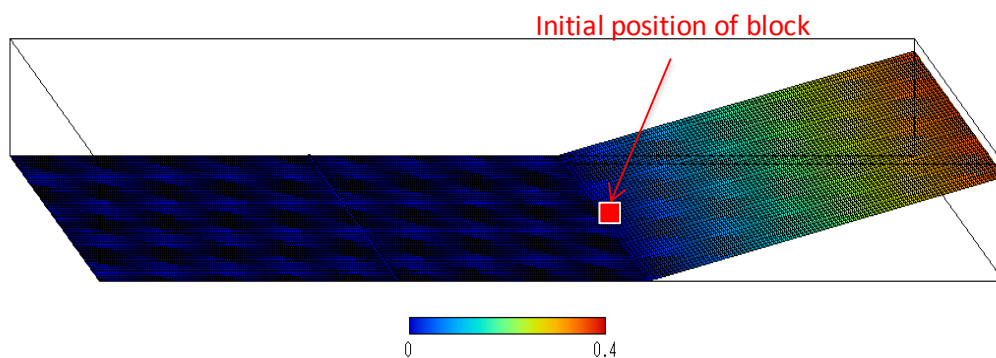


図 5.7 作成した実験水路の地形条件の一例

(2) 既往実験と計算結果の比較

図 5.8 に本解析より得られた、ブロック移動解析のプロセスを示す。ケースはブロックの面積・体積・密度を変化させた場合の、最も計算と実験の結果と良好に一致した初期水深 15cm のものである。初期水深 15cm の場合であるが、段波は初期水深ゲート解放後 2 秒でブロックの位置に到達し、押し波によって流される。また 5 秒ほどで最大到達位置に到達する。さらに、引波が生じると若干ではあるもの沖側に移動し、7 秒で最終移動位置に漂着することが確認された。

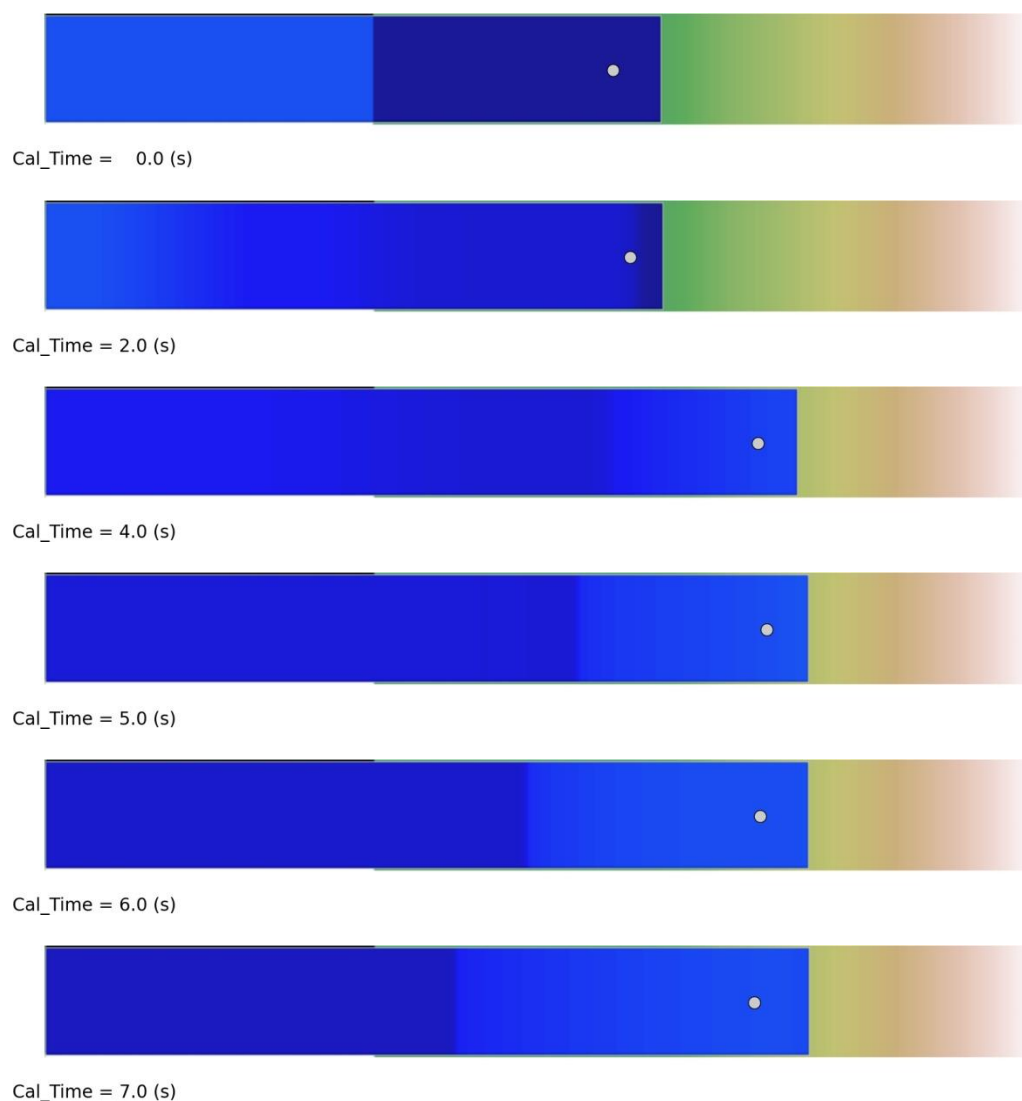


図 5.8 ブロックの移動プロセスの一例（タンク内初期水深 15cm）

次に図 5.9～図 5.10に初期水深毎の最大移動位置，最終移動位置について比較を行ったものを示す。本結果より，押し波によって生じる最大移動位置については，良好に再現できていることを確認した。特に実験のばらつきが小さい初期水深15cm～25cmでは，数値計算の結果は，ばらつきの範囲内に収まっている。しかしながら，実験のばらつきが大きい，30cmのケースでは数値計算の結果がやや過少評価となった。一方，引き波による最終移動位置については，いずれの初期水深のケースでも実験のバラツキの範囲の傾向を再現しているが，実験では初期水深に比例して増加傾向にあるが，計算では初期水深が大きくなるケースほど，実験と比べて汀線側に近い位置で停止し過大評価となる。図 5.11に段波条件30cmのケースにおけるブロックから上流側100cm地点の計算流速の経時変化を示す。また，既往実験の流速の経時変化の図も合わせて示す。これらの比較結果より計算流速は押し波時では最大150cm/sを良好に再現しているものの，引波時では，実験で最大-50cm/s程度であるのに対して計算では，-80cmとなっている。また，引き波の時間も実験と比べて計算の方が長いことがわかる。この結果から，流体解析モデルにおいて，引き波を過大評価すること，初期水深が大きなケースほど，引き波の流速や作用時間が長くなることが考えられる。その為ブロックの最終移動位置について段波条件が大きいケースほど過大評価の影響が大きくなっているものと考えられる。この点については，流体解析の精度を向上させることでブロックの移動予測精度を向上させることができると思われる。

また，従来モデルと変動モデル（本モデル）を比較した場合，最大移動位置や最終移動位置の結果に大きな違いが生じないことを確認した。このことから，本モデルは，ブロックの諸元を変動として扱っても，底面移動に関して適切に評価可能であることが確認された。ただし，本実験は底面移動を対象とした実験であるため，漂流・底面移動を包括的に扱えることを示したわけではない。この点については，次節の数値実験でモデルの性能を明らかにする。

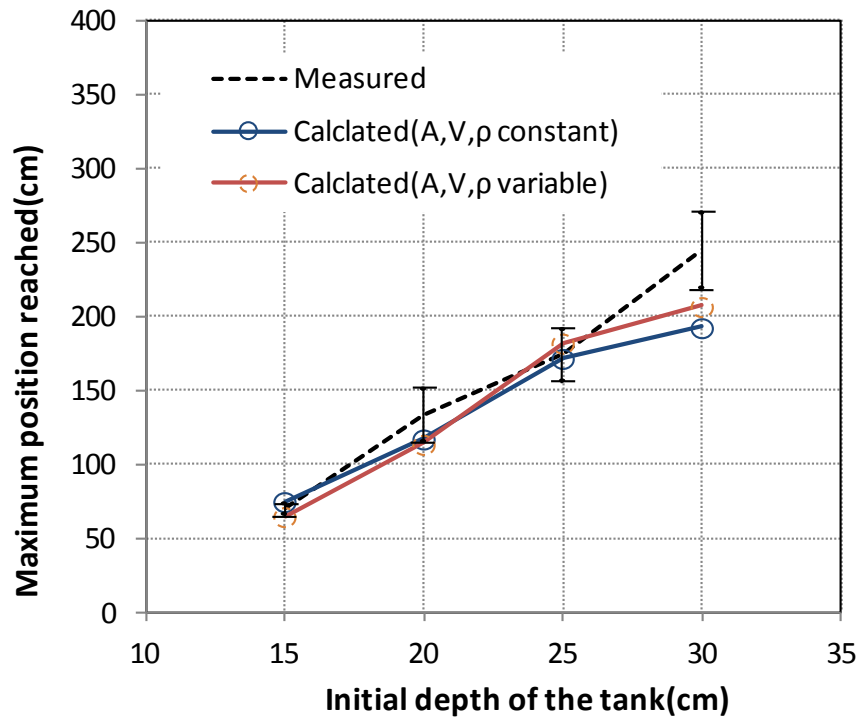


図 5.9 初期水深ごとのブロックの最大移動位置の比較

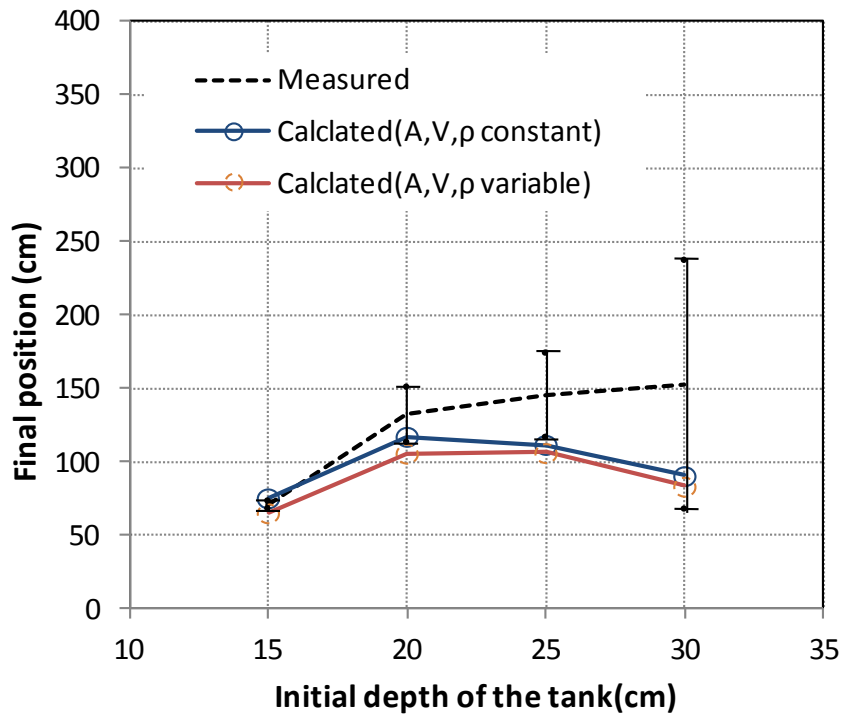


図 5.10 初期水深ごとのブロックの最終移動位置の比較

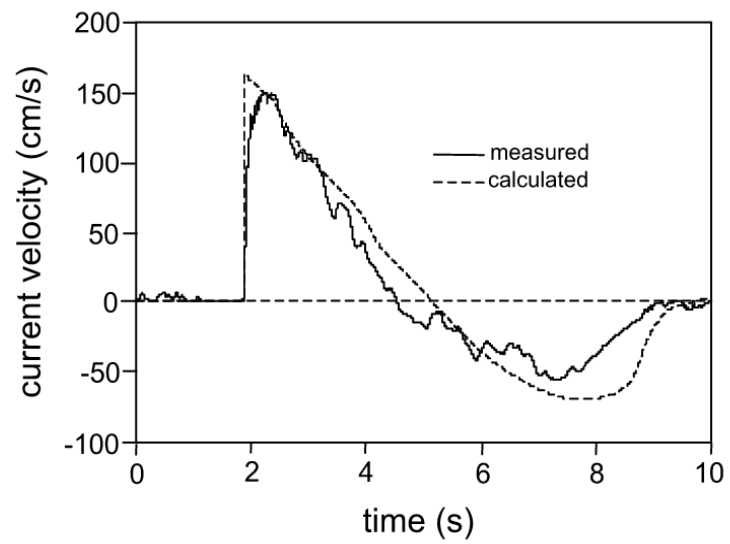
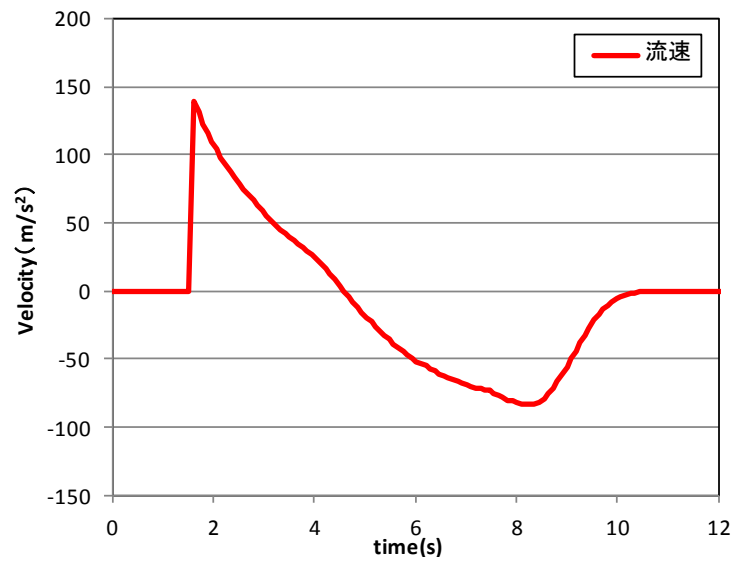


図 5.11 初期水深 30cm における流速の比較 (上 : 本研究, 下 : 既往検討¹²⁾)

5.3.2. 漂流移動および底面移動に関する数値実験

(1) 数値解析の概要と数値実験条件

本研究で構築したがれき移動モデルは、大窪ら(2004)¹²⁾の底面移動を対象とした実験との比較検証を行い、底面移動に関して良好な結果を得た。しかしながら、がれきの複数の移動を考慮するためには、底面移動および漂流移動を包括かつ連続的に取り扱う必要がある。

そこで本節では、先ほどの数値解析と大窪ら実験の比較を行った場合の数値解析条件をベースに数値実験を行った。基本的に水路条件、造波条件などは既往実験との比較時の数値解析条件とし、ブロックの密度を変化させて最大移動位置について検証した。

表 5.4 計算条件一覧（数値実験）

計算条件	項目
地形条件	水路条件を再現
計算格子間隔	2cm
計算メッシュ数	x 方向：500 y 方向：50
計算時間	15s
造波条件	水槽内初期水位を設定 (15, 20, 25, 30cm)
ブロック諸元	一辺の長さが 3.2cm の立方体、密度 0.3~4.2g/cm ³ の間から 0.2 刻みで設定(木材から金属までを想定)
静止・動摩擦係数	それぞれ 0.8, 0.6
実施モデル	本モデル（面積・体積・密度を水深に応じて変動）

(2) 数値実験の検証結果

図 5.12 に密度 0.3g/cm^3 (赤丸), 1.2g/cm^3 (緑丸), 2.4g/cm^3 (白丸) の移動について比較を行ったものを示す. 段波条件は初期水深 15cm のケースとなる. 同様の段波条件であるためゲート開放後の段波の遡上挙動は同じである.

ブロックの挙動については, いずれの密度の場合についても, 段波到達と同時に動き出す. しかし, 密度が最も大きい 2.4g/cm^3 (白丸) はすぐ移動が終わる. これは, 流体力より底面摩擦力が上回っているためである. 次に, 密度 0.3g/cm^3 (赤丸), 1.2g/cm^3 (緑丸) についても, 段波が到達してから動き出すが, 1.2g/cm^3 (緑丸) の方は 4 秒後には水路内に漂着し, 引波によっても移動は生じなかった. 一方, 密度 0.3g/cm^3 (赤丸) については, 喫水深が小さいことや底面摩擦力も小さいことも関係し, 引波によって戻されていく様子が確認された.

これらの結果から, 本モデルが密度の違いによる挙動の違いについて妥当性を確認した.

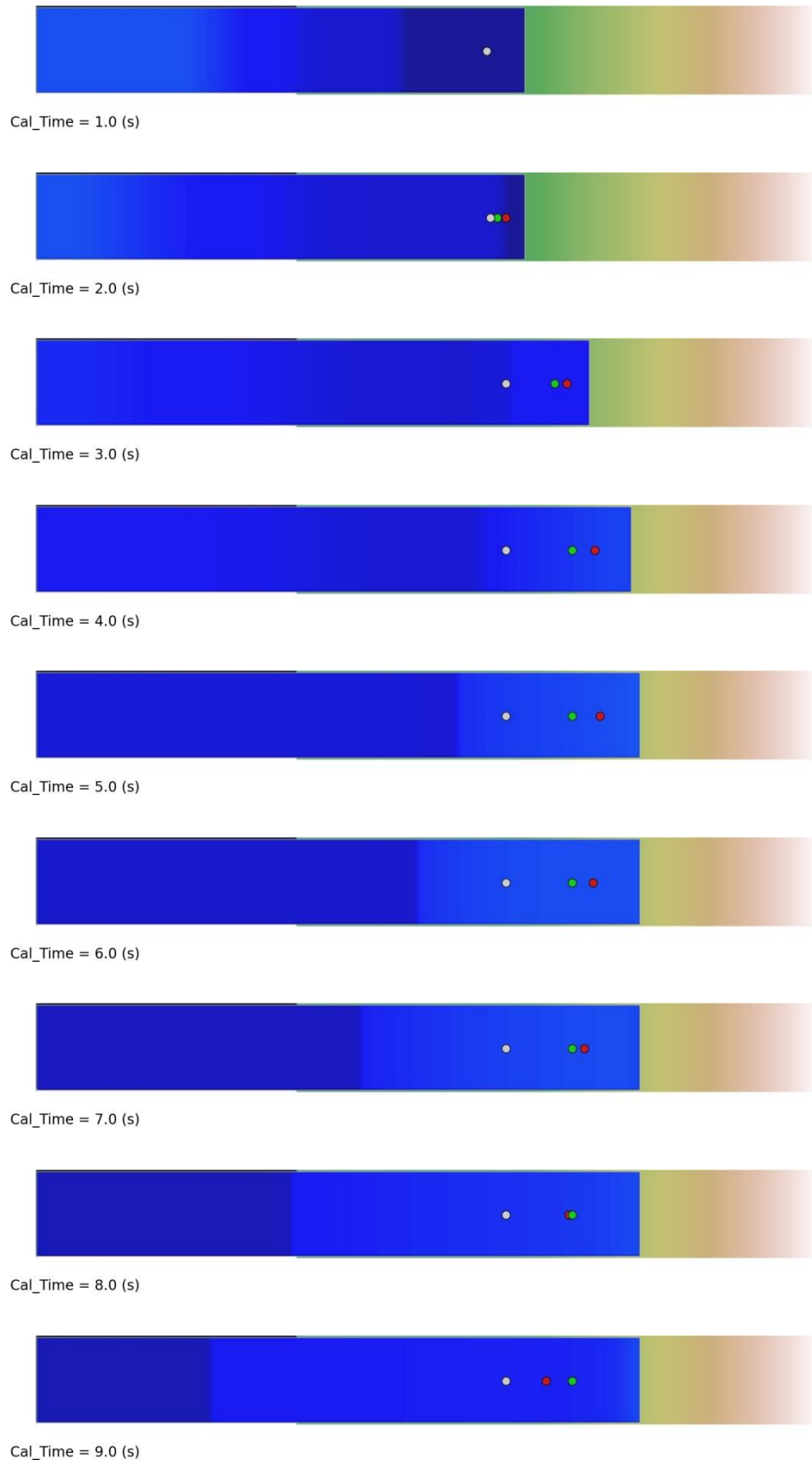


図 5.12 密度の違いによるブロックの移動プロセスの一例（タンク内初期水深 15cm，赤丸：密度 0.3g/cm^3 ，緑丸： 1.2g/cm^3 ，白丸： 2.4g/cm^3 ）

次に、図 5.13 は初期水深毎の各ブロックの密度と最大移動距離の関係を示したものである。本検討ではブロックの密度が 1.0g/cm^3 未満かつ喫水深未満の場合は底面からの摩擦を考慮した底面移動形態をとり、喫水深以上となると漂流移動となる。このことから密度が小さいほど摩擦の影響が小さく、底面移動から滑動移動への遷移が早くなり最大遡上位置は大きくなると考えられる。数値実験の結果では、一部のケースにおいて若干比例関係となっていないケースもあるが全体の傾向としては比例関係となっていることが確認された。また、ブロックの密度が 1.0g/cm^3 以上の場合は、底面移動のみとなるが密度が大きいほど摩擦が大きくなり、移動量が小さくなると考えられる。数値実験結果においても当然ながら密度と移動量は比例関係となっている。また、これらの移動形態の境である密度 1.0g/cm^3 で移動量が滑らかに接続することは本モデルが漂流・底面移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えるということを示唆している。

以上の数値実験の検討から、本モデルが、移動に関する基本的な性能を有しつつ、複数の移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えることを確認した。

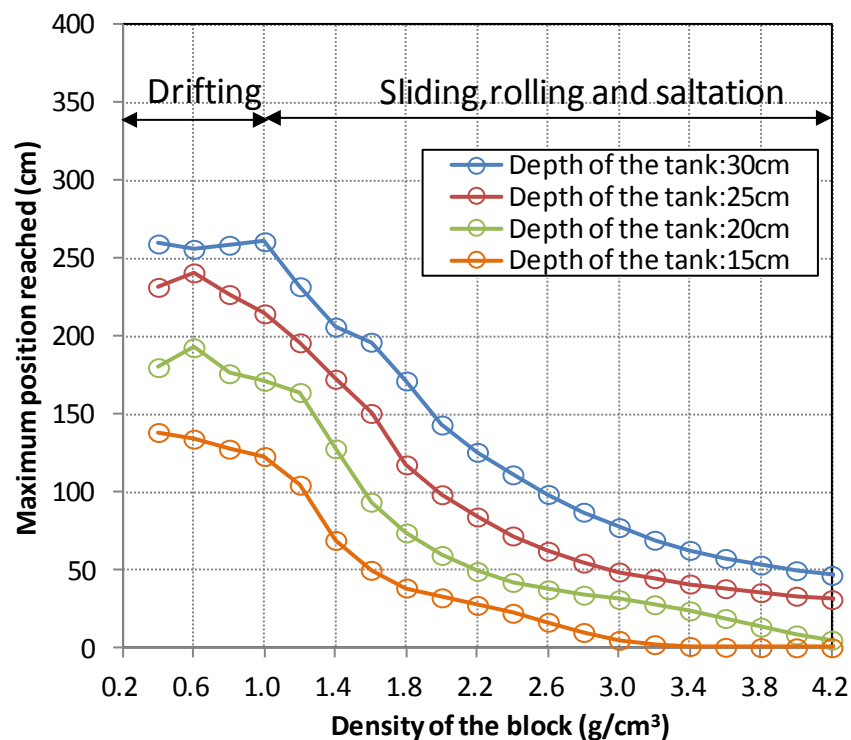


図 5.13 各段波条件およびブロック密度の違いによる移動量

5.3.3. 複数のがれき群を対象とした移動に関する実験に基づく検証

これまでの実験との比較検証および数値実験は個々の移動実験に着目してモデルの再現性や妥当性について確認を行った。本節では複数の漂流物群に対する挙動の確認を行う目的で実施した。検討内容と結果の詳細を次節に示す。

(1) 実験概要と数値解析条件

本実験は田島ら（2016）¹⁰⁾が実施した，漂流物群と氾濫流の相互作用について検証を行ったものである。

実験概要は，水槽は幅 60cm，水槽左端から 10m の位置に開閉ゲートを設置し，ゲート急開によって段波を発生させる。ゲートからの距離を起点とすると $x=4\text{m}$ から斜面を設置し，斜面の勾配は $x=6.3$ で 10cm， $x=9\text{m}$ で 19cm， $x=12\text{m}$ で 29cm となっており一様勾配ではない。ゲート右側には $h_2=10\text{cm}$ の初期水深を設定し，汀線付近から立方体の木片 850 個をランダムに配置している。図 5.14 に実験水路の概要図を示す。

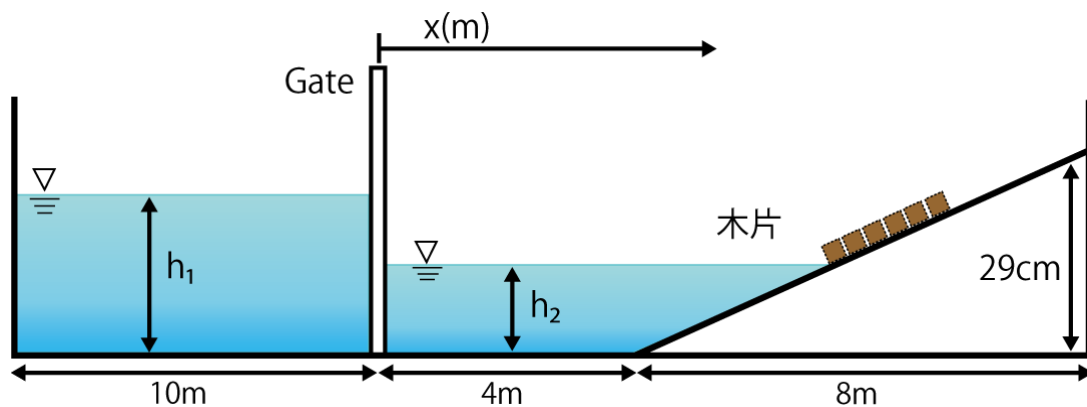


図 5.14 断面 2 次元水槽における実験の概要

実験ケースについては、ゲート左端の水槽内で貯水した h_1 の高さや、木片の有無、底面粗度の大きさなどについて変化を加えた複数のケースを実施している。本解析モデルの検証の対象とした実験ケースを表 5.5 に示す。ケース 1-1 は木片群がない場合、ケース 1-2 は木片群が有りのケースとなる。

表 5.5 実験ケース一覧（一部抜粋）

case	$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	木片 850 個
1-1	20	10	なし
1-2			$6.3\text{m} < x < 7.1\text{m}$

数値解析の条件は表 5.6 に示す通りである。計算格子幅は 2cm とし、総計算格子数は 33000 メッシュとなる。木材の斥力となるバネ定数は次節に示す感度分析と既往文献を参考に 0.2kN と設定した。造波条件と地形条件は既往実験に用いられた条件に従い設定した。木片の条件は、大きさと密度は実験と同様に設定し、設置箇所は $6.3\text{m} < x < 7.1\text{m}$ の範囲に 850 個の木片をランダムに設置した。

表 5.6 計算条件の一覧

計算条件	項目
地形条件	水路条件を再現
計算格子間隔	2cm
計算メッシュ数	x 方向 : 1100, y 方向 : 30
計算時間	30s
時間刻み幅	0.001s
造波条件	水槽内初期水位 20cm を設定
木片諸元	1 片が 1.8cm, 密度は 0.6g/cm ³
静止・動摩擦係数	それぞれ 0.8, 0.6
ばね定数	0.2 kN/m
木片設置条件	6.3m<x<7.1m に 850 個ランダムに配置

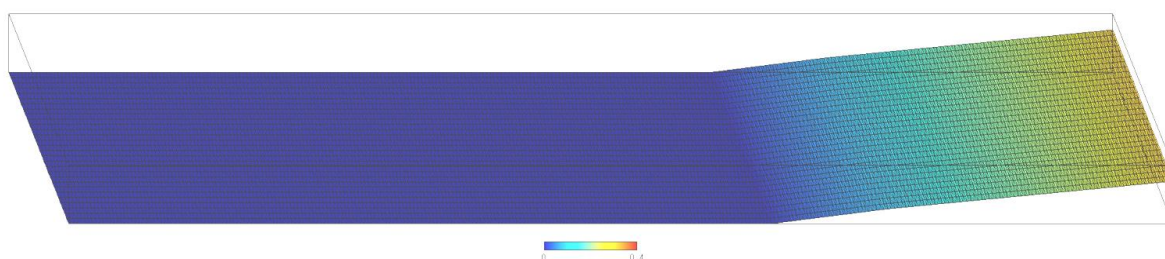


図 5.15 数値解析における水路条件の一例

(2) 実験と計算結果の比較

図 5.18 は本解析結果より得られた段波の遡上状況と木片群の移動の状況を示したものである（段波が木材に到達した時点を 0 秒とする）。これらの結果から、段波が木片に到達後 6 秒程度で木片群を先端まで輸送している様子が確認できる。実験では粘性による水路壁面付近の影響により遡上先端部では木材群が丸みを帯びていることが確認されているが、計算では壁面からの影響を無視しているため再現できていない。この点に関しては今後改善していく必要があると考えられる。また、木材群が遡上先端まで運ばれた後については、先端からまばらに下流側へと移動している様子が確認された。この挙動は、図 5.17 に示す既往実験の木片群の移動の状況を再現しており、定性的ではあるものの木片群に対する挙動に本モデルの妥当性が確認された。

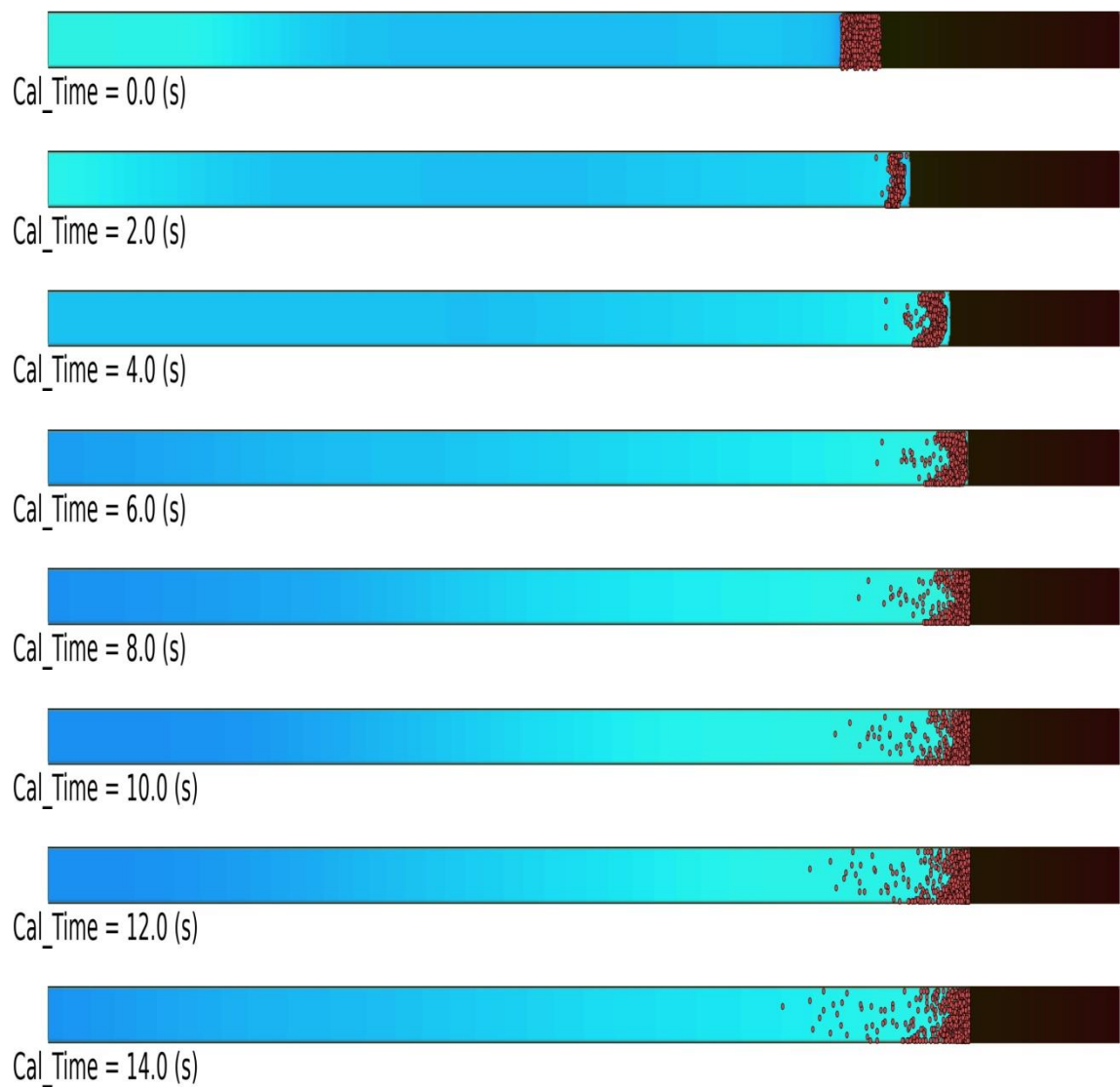


図 5.16 本解析結果より得られた木材群の漂流軌跡（0-14 秒）

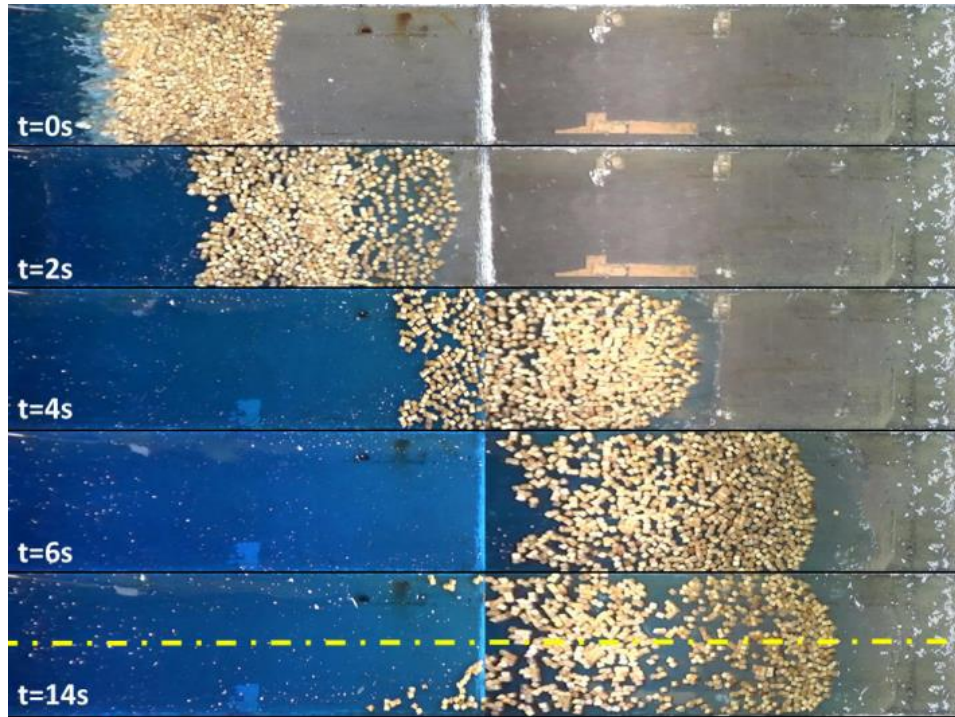
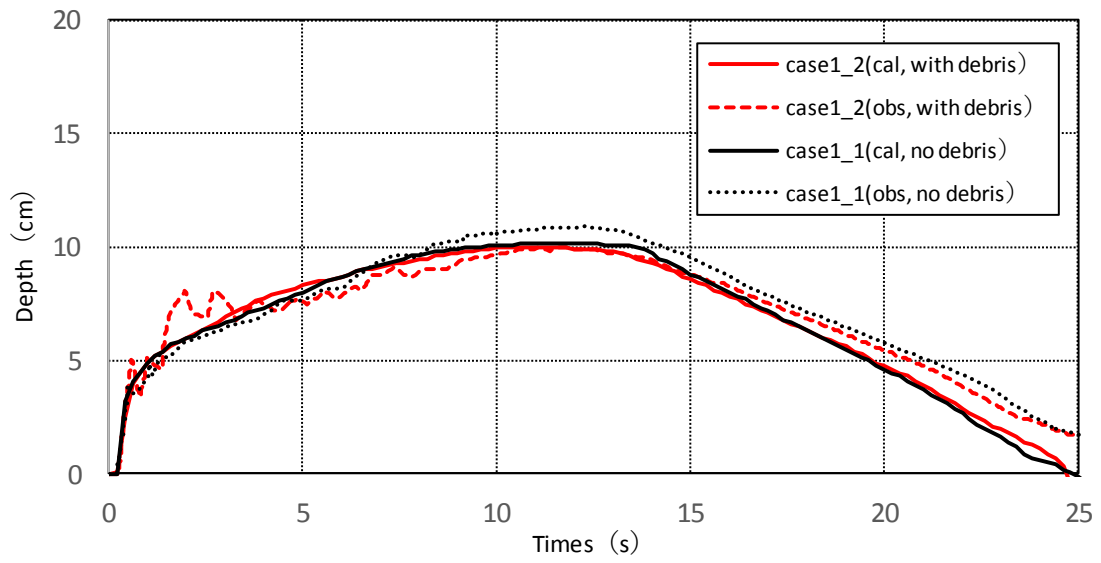


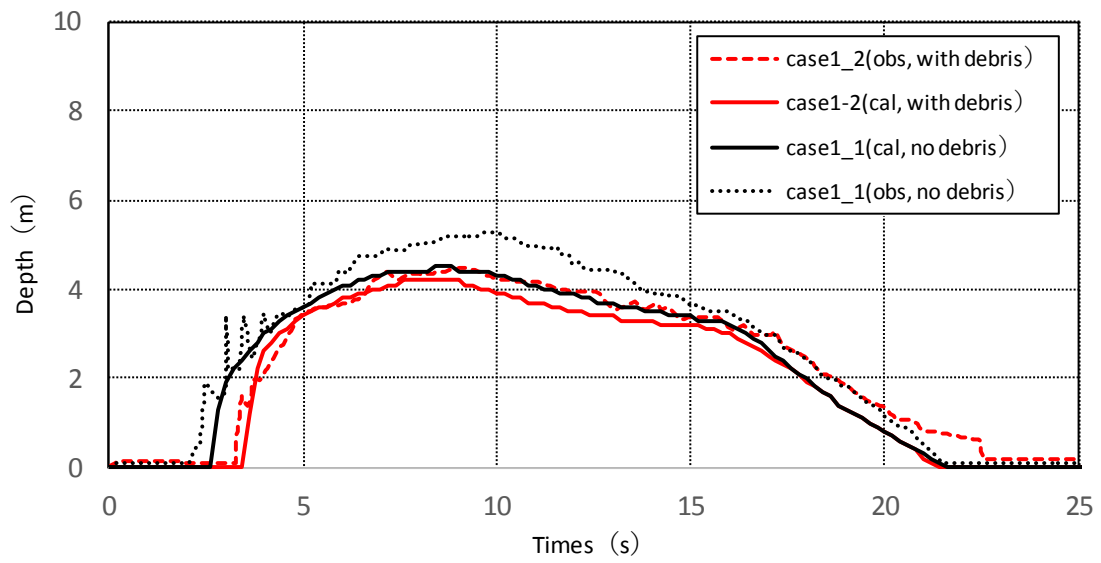
図 5.17 既往実験における木片の移動状況(田島ら, 2016)¹⁰⁾

次に、木片群がある場合とない場合における水位の比較を行った。図 5.18 は case1-1 (木片群なし)、case1-2 (木片群あり) の水位について比較を行ったものである。既往の実験結果は、 $x=6.2\text{m}$ 地点における水位は木片群があるケースでは水位が上昇していること、 $x=8.2\text{m}$ 地点では津波先端の到達が遅れていることが特徴的である。一方本解析結果は、 $x=6.2\text{m}$ 地点では木片群を考慮しているケースでは木片群なしのケースと比べて、水位が上昇し、全体の波形も実験と良好に一致している。ただし、実験の先端部分の乱れに近い波形は再現できていない。実験では木片への衝突によって水位が乱れていると考えられる。また、 $x=8.2\text{m}$ 地点では、木片群有りのケースでは段波の到達時間が実験と一致しており、木片群の抵抗を適切に評価していると考えられる。また、波形についても、概ね良好に一致している。

以上の結果から、本解析モデルが木片群を対象とした検証においても良好に再現可能であることを示した。



(a) $x=6.2\text{m}$ 地点の浸水深の比較



(b) $x=8.2\text{m}$ 地点の浸水深の比較

図 5.18 実験と計算の水位変化の比較

(3) バネ定数の感度分析

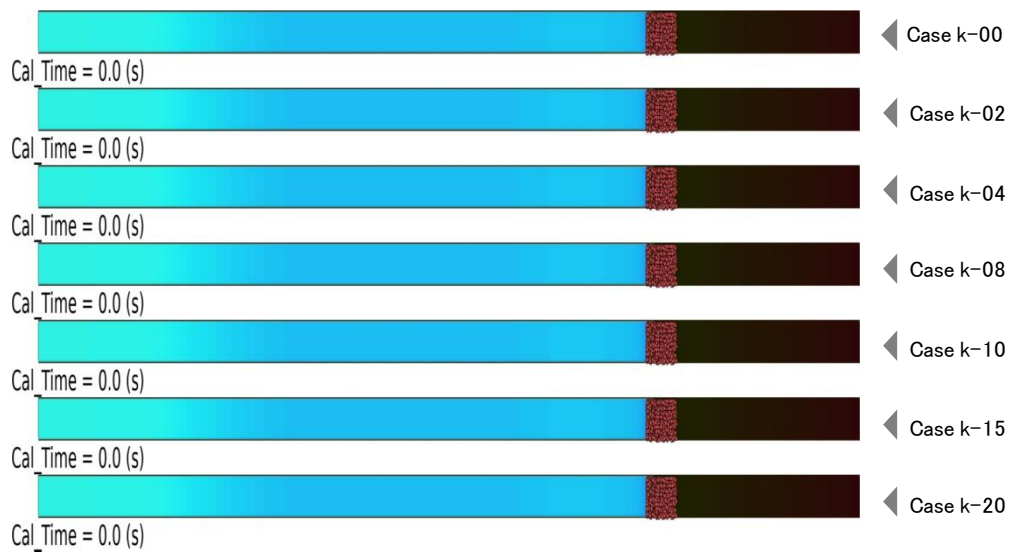
斥力モデルの影響を確認するため、バネ定数に関する感度分析を行った。数値条件は表 5.5 (木材群ありのケース 1), 表 5.6 と同様に実施した。なお、バネ定数が 0.0 (斥力なし) のケースも実施するため、木材群と流体の相互作用は考慮しないものとした。これは、後の計算結果でも示すが、木材群の相互干渉がないため木材群が遡上先端に集中し、流体に作用する質量力が大きくなり計算が不安定になってしまうからである。

表 5.7 計算条件の一覧

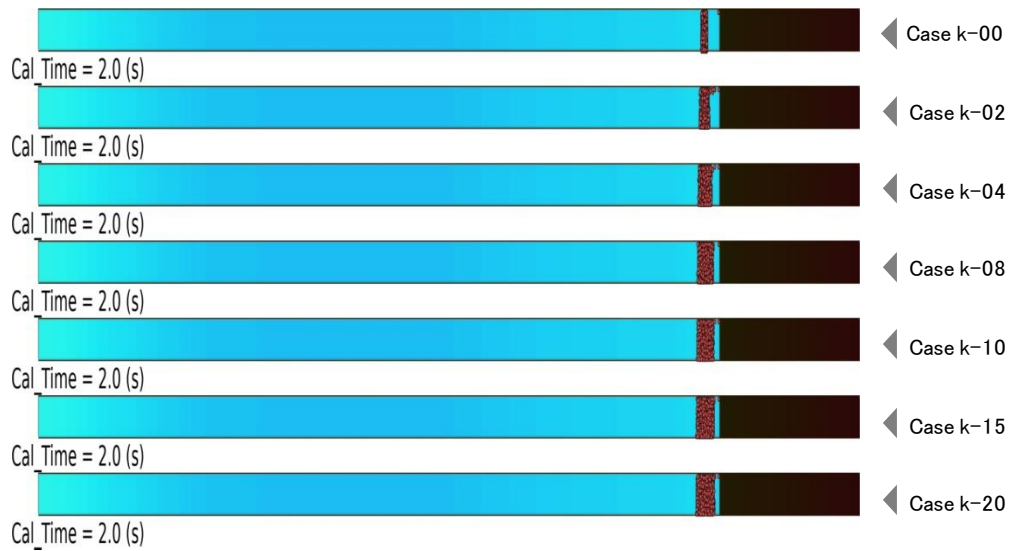
Case	バネ定数(kN)	備考
k-00	0.0	斥力なし
k-02	0.2	-
k-04	0.4	-
k-08	0.8	-
k-10	1.0	-
k-15	1.5	-
k-20	2.0	-

図 5.19 から図 5.21 にバネ定数に関するケーススタディの結果を示す。図は段波が木材群に到達した時間から 2 秒間隔の水位変化・木材群の移動状況を示したものである。ただし、木材群と流体の相互干渉は考慮していないため、再現計算とはやや異なる結果となる事に留意されたい。本解析結果から、バネ定数が 0.0kN (斥力なし) の場合、木材群の相互干渉がないため、高密度に密集しながら上流へ運ばれていくことが確認された。また、0.0~0.8 のケースについては、バネ定数の値に比例して木材群が密に集積していることがわかる。バネ定数が大きくなるほど斥力は大きくなるため、遡上した段階での集積状況は異なってくる。しかしながら、バネ定数 1.0kN を超えると木材群の密集はほとんど変わらなくなる。以上の結果から、バネ定数が異なる場合、遡上

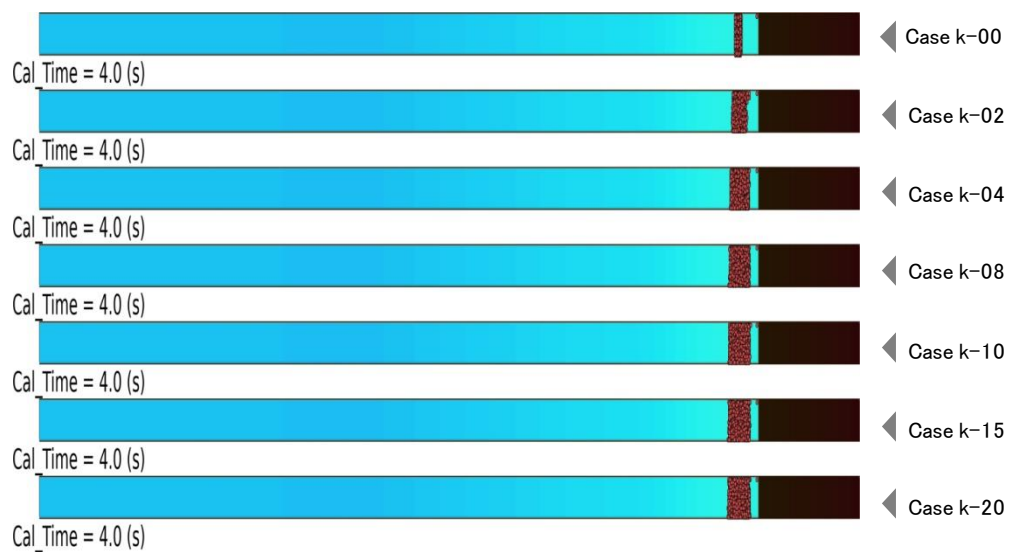
先端に到達時の木材の集積状況が異なることが考えられる。ただし、今回のケースでは 1.0kN を境に遡上先端での集積状況に変化があったが、段波条件が異なれば、その境界は異なってくる場合があると考えられる。



(a) 段波到達直前

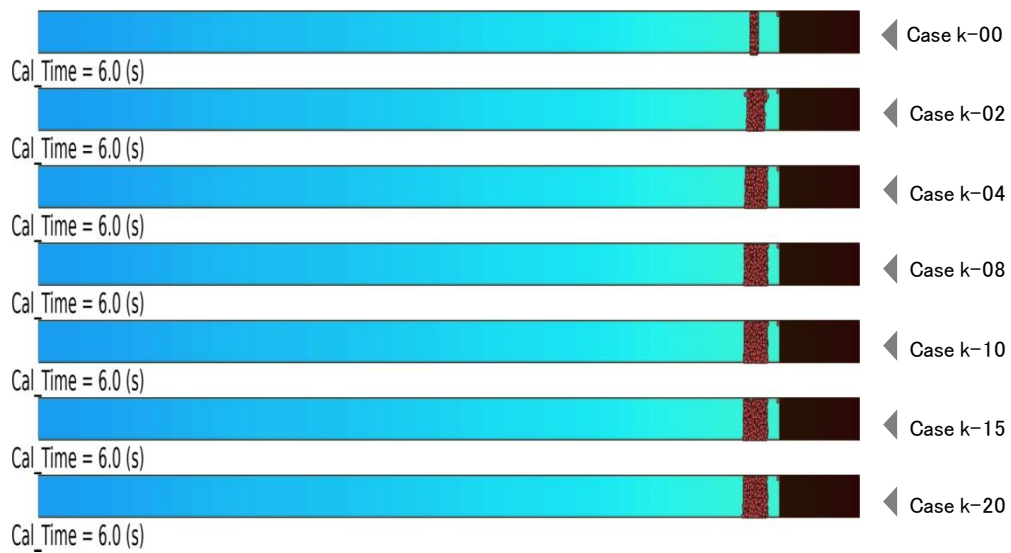


(b) 段波到達 2 秒後

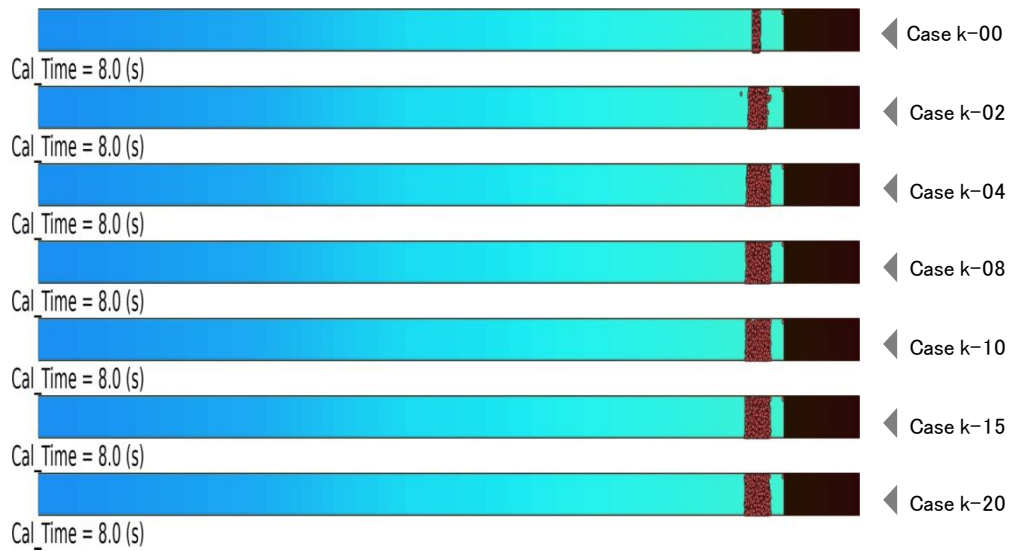


(c) 段波到達 4 秒後

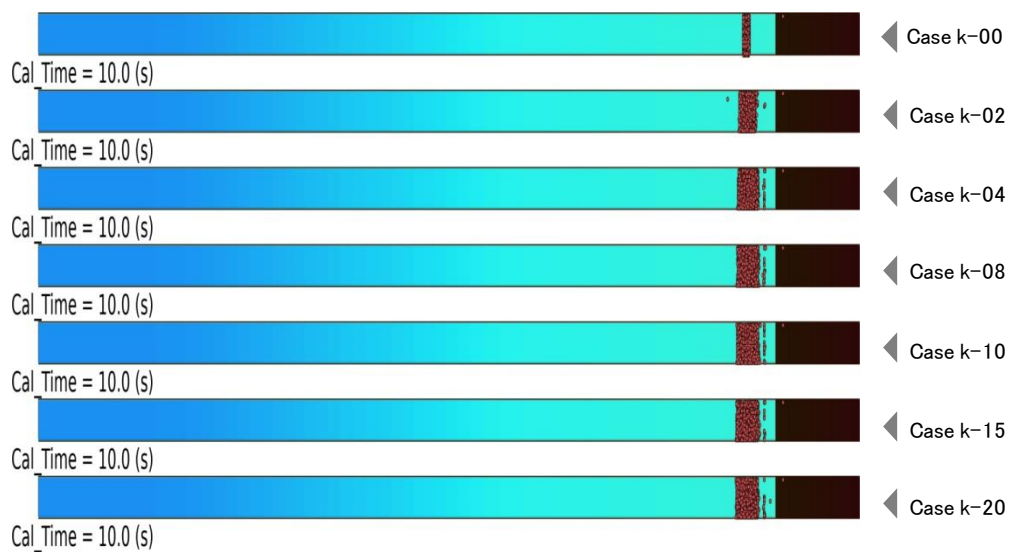
図 5.19 バネ定数の違いによる木材群の移動状況(段波到達直前から 4 秒後)



(a) 段波到達 6 秒

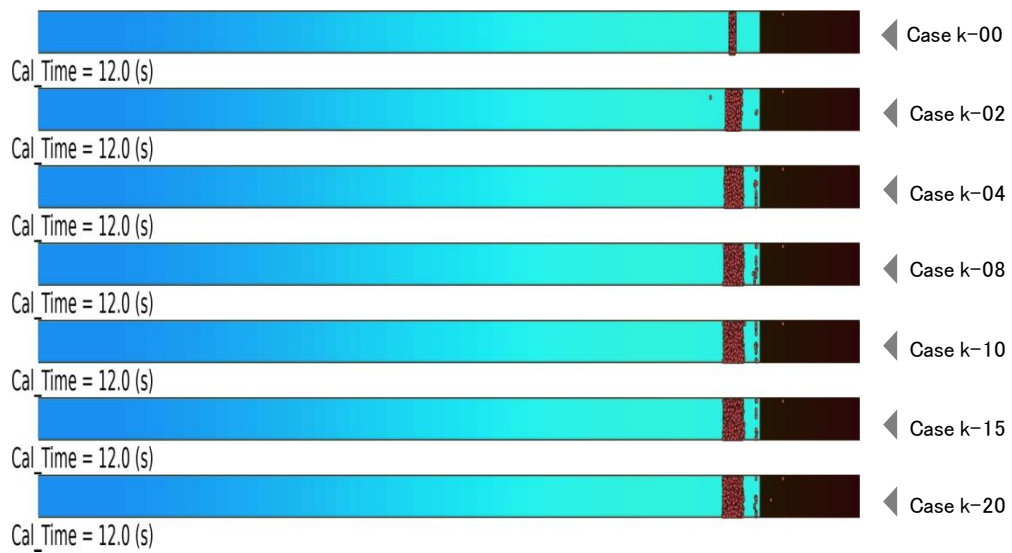


(b) 段波到達 8 秒

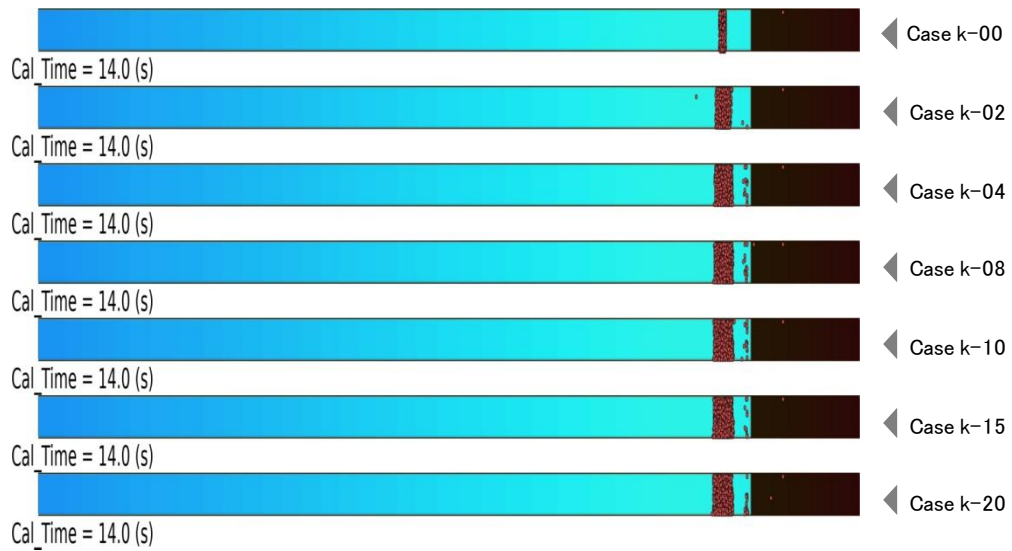


(c) 段波到達 10 秒

図 5.20 バネ定数の違いによる木材群の移動状況(段波到達4秒から10秒後)



(a) 段波到達 12 秒



(b) 段波到達 14 秒

図 5.21 バネ定数の違いによる木材群の移動状況(段波到達 10 秒から 14 秒後)

5.4. 本章のまとめ

本章では、災害がれきの移動に関する基本的な移動現象について整理を行い、災害がれきの移動予測モデルを構築した。また構築したモデルを用いて、大窪らの底面移動を対象とした移動実験との比較を行い、従来の移動予測モデルとの再現性に大きな違いは生じないことを確認した。次に数値実験を行い、本モデルが密度や流況の違いから生じる漂流、底面移動等の複数の移動形態を包括的に取り扱えることを確認した。最後に、田島らが実施した既往実験との比較を行い、がれき群と流体の相互作用について十分な再現性を有していることを確認した。

以上の結果より、本研究で構築した災害がれきの移動予測モデルは、移動に関する基本的な性能を有しつつ、漂流および底面移動などの複数の移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えることを確認した。また、漂流物群においても流体との相互作用についても良好な再現性を確認した。次章では、構築した災害がれき移動予測モデルを実地に適用する。

第6章 災害がれき移動予測モデルの実地への適用に関する検討

本章では、5章で構築・検証した災害がれき予測モデルを東北地方太平洋沖地震津波で甚大な被害が発生した気仙沼市鹿折地区へ適用した。適用にあたっては対象とするがれきの選定およびがれきの諸元等を整理した。また災害がれきの移動・集積の再現計算を実施し再現性の確認を行った。また、災害がれきの集積状況が異なる陸前高田市への適用を行いその再現性について確認した。

6.1. 災害がれきの取り扱い

6.1.1. 対象とする災害がれきの選定

東北地方太平洋沖地震津波多くの災害がれきが発生した。気仙沼市でも同様に車両、船舶、コンテナなどの漂流物に加え、可燃物、不燃物、金属、木材コンクリートがら、アスファルトがらや津波堆積物など多種多様であった（図6.1参照）。

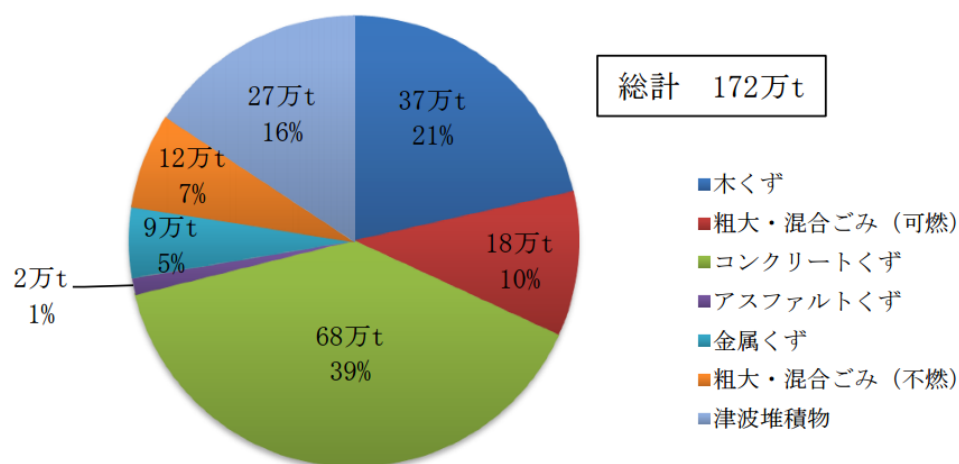


図 6.1 気仙沼市における災害がれきの発生状況(宮城県, 2011)²²⁾

本研究では、比較的重量があり衝突すれば建物やインフラに損傷を与える、あるいは、氾濫流の相互作用に無視できないものを対象とすることとした。特に前者の場合は、大型から小型船舶と車両を、また、後者の方は建物倒壊など

によって発生した混合ゴミを対象とした。

車両や船舶は比較的その形状を維持して漂流移動するが、混合ゴミの場合は種々の材が混合された状態となっており、これらの形状や密度を個々に扱うことは困難である。そこで本研究では、混合ゴミを一つの塊として取り扱い、代表寸法、代表密度を与えることで計算上取扱った。

6.1.2. 災害がれきの諸元の設定

災害がれきの移動予測モデルには、対象物の面積・体積・密度および喫水深が必要となる。車両・船舶における面積・体積等については、野島ら(2014)⁴⁴⁾を参考に諸元の整理を行った。この方法は、対象物の諸元表より多角柱を近似し体積と面積を求める方法である。密度については、総重量を体積で除して求めた。喫水深については、浮力=重力となる水深を求めた。なお、車両については代表的な車として一車種⁴⁵⁾設定した。

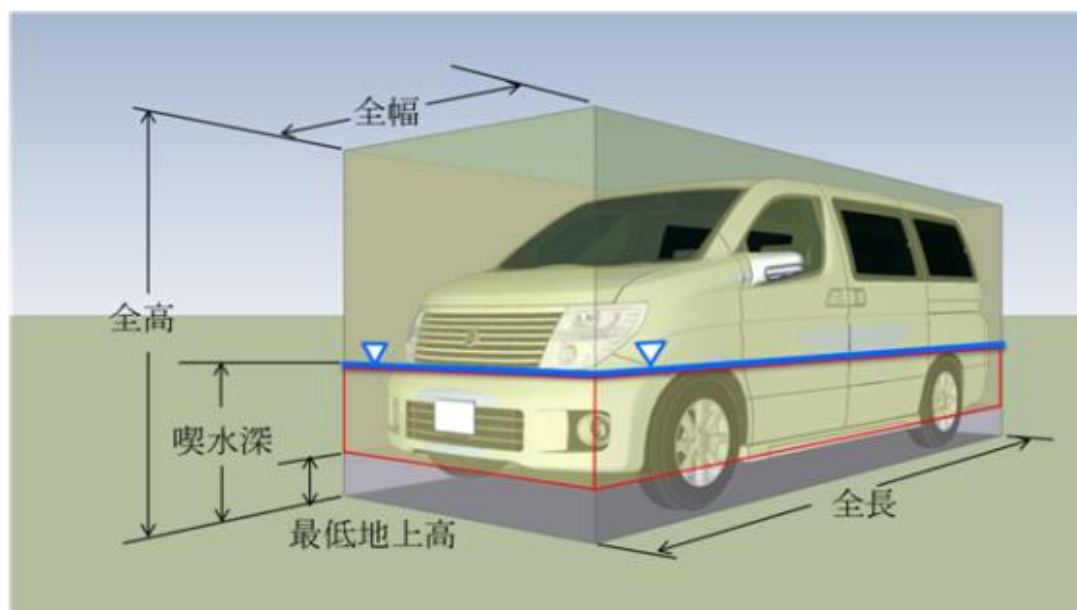


図 6.2 モデルパラメータの算定の概念図(野島ら, 2013)⁴⁴⁾

次に混合ゴミについては、代表寸法として 0.5m とした。また、混合ゴミの密度については、国立環境研究所(2011)⁴⁶⁾の既往成果から整理した。図 6.3 は国立環境研究所が公表した災害廃棄物の発生原単位である。がれき、混合ごみ

(木造家屋系), 木くずで取りまとめられている. 本研究で対象とする建物倒壊に伴う災害がれきは, 主に木造家屋の倒壊により発生するものであることから, 公表値の混合ごみ(木造家屋系)のかさ比重を用いることとした. 災害がれきの通常時, 水害時, 仮置き時および搬出・処分時の嵩比重の平均 0.75t/m^3 とした.

災害廃棄物種ごとの見かけ比重および重量容積変換係数

		がれき		混合ごみ (木造家屋系)		木くず	
		代表値	既報の範囲	代表値	既報の範囲	代表値	既報の範囲
発生 時	通常 (乾燥)			0.59 t/m ³ (1.7 m ³ /t)	0.1-1.2 t/m ³ (0.83-10 m ³ /t)	0.2 t/m ³ (5.0 m ³ /t)	0.1-0.25 t/m ³ (4-10 m ³ /t)
	水害ごみ	1.4 t/m ³ (0.71 m ³ /t)		1.0 t/m ³ (1.0 m ³ /t)		0.5 t/m ³ (2.0 m ³ /t)	
仮置き時		1.2 t/m ³ (0.83 m ³ /t)	1.1-1.5 t/m ³ (0.67-0.91 m ³ /t)	0.79 t/m ³ (1.3 m ³ /t)		0.26 t/m ³ (3.8 m ³ /t)	
搬出・処分時 (破碎等含)		2.0 t/m ³ (0.5 m ³ /t)	1.6-2.5 t/m ³ (0.4-0.63 m ³ /t)	0.73 t/m ³ (1.4 m ³ /t)	0.6-2.5 t/m ³ (0.4-1.7m ³ /t)	0.23 t/m ³ (4.3 m ³ /t)	
備考		能登半島沖・阪神淡路での実績 + 埼玉県災害廃棄物処理指針 + 関東建設廃棄物協同組合 + 長崎大水害(最適値)		阪神淡路での調査 + 長崎大水害(最適値)		能登半島沖・阪神淡路での実績 + 建設混合廃棄物性状 + 福井大水害(最適値)	

図 6.3 災害がれきのかさ比重(国立環境研究所,2011)⁴⁶⁾

6.2. 災害がれきを考慮した津波浸水シミュレーションの実施

6.2.1. 解析条件

津波浸水シミュレーションにおける計算条件は、表 6.1 に示す通りとなっている。基本的には、再現計算と同様となっているが、建物と災害がれきの相互作用の影響を確認するため、従来の津波計算手法（粗度）による場合と、建物の倒壊を考慮した手法（4章の提案モデル）で実施した場合の2ケースを実施した（表 6.2 参照）。

表 6.1 計算条件一覧

#	項目	条件
計算手法	基礎式	非線形長波理論式
	差分スキーム	【空間差分】スタaggerド格子法
		【時間差分】リーブ・フロッグ法
	越流公式	本間公式
計算条件	計算領域	3章で実施した再現計算と同様
	計算格子間隔	1350m→450m→150m→50m→10m→2m
	計算領域数	Domain 1（1350m メッシュ） Domain 2（450m メッシュ） Domain 3（150m メッシュ） Domain 4（50m メッシュ） Domain 5（10m メッシュ） Domain 6（2m メッシュ）
	波源（断層）モデル	藤井・佐竹モデル ver.8.0
	初期潮位	T.P.0.5m（第一波到達時刻の天文潮位）
	粗度係数	市街地：0.025 その他の土地利用形態：0.025～0.04
	陸域境界	Domain 1～4 は完全反射 Domain 5～6 は遡上境界
	計算間隔	dt = 0.05s(CFL 条件は満足する)

表 6.2 計算ケース

計算ケース	条件
ケース 1	建物の影響を粗度で設定
ケース 2	建物の影響を地形，倒壊あり

災害がれきの移動予測モデルにおけるがれきの初期位置については航空写真の判読により設定した。図 6.4 に設定した災害がれきの初期配置を示す。車両・船舶については、撮影時期の航空写真の判読から得られたものとなるため震災時の配置とは異なる可能性がある。しかし、個々の漂流物を局所的な検討ではなく、市街地全体における氾濫流との相互作用の影響を確認する。すなわちマクロスケールでの影響を確認するには十分検討する意義があると考えられる。

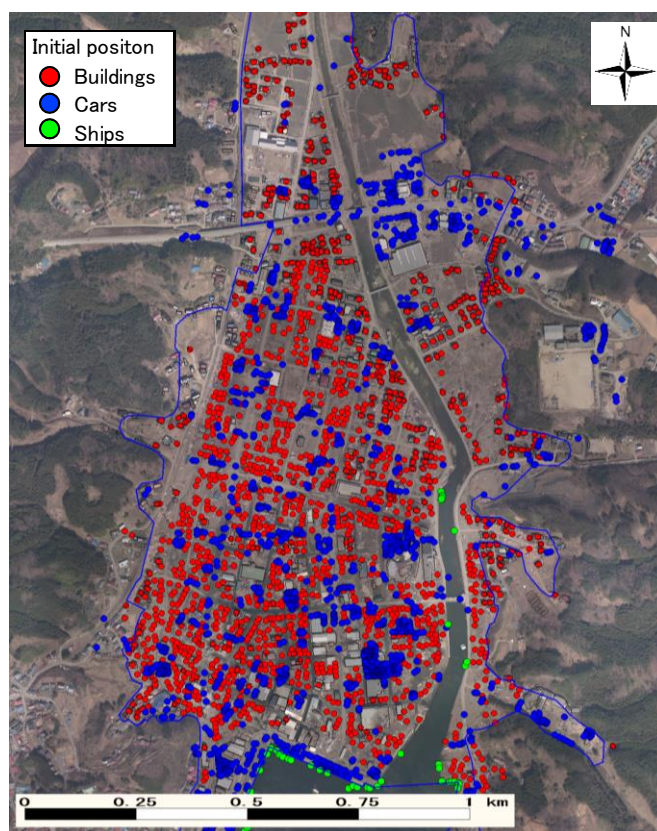


図 6.4 計算における災害がれきの初期位置

6.2.2. 再現計算結果

(1) 災害がれきの集積の再現計算結果

本解析結果より得られた災害がれき移動予測計算より、災害がれきの最終集積箇所について検証を行った。図 6.5 はケース 2（建物倒壊モデル）における車両・船舶の最終集積箇所を示したものである。図中には実績の集積箇所もあわせて示している。本結果から、船舶については、鹿折南地区や、川沿い（図中の黄色枠）に集積しており、実績の傾向を再現している。一方、車両については、市街地全体に集積しており、浸水域の先端に集積する実績とは異なる傾向を示した。船舶においては、漁港や港に停泊・係留されているのが通常であり、実際に津波が来襲した時の状況と大きく異なることに対して、車両については、避難行動に用いられたため計算の初期条件と大きく異なることが考えられる。車両、船舶については、初期分布に依存していることから、今後可能な限り、津波来襲時の分布等を収集・整理して再現性を向上していく必要がある。

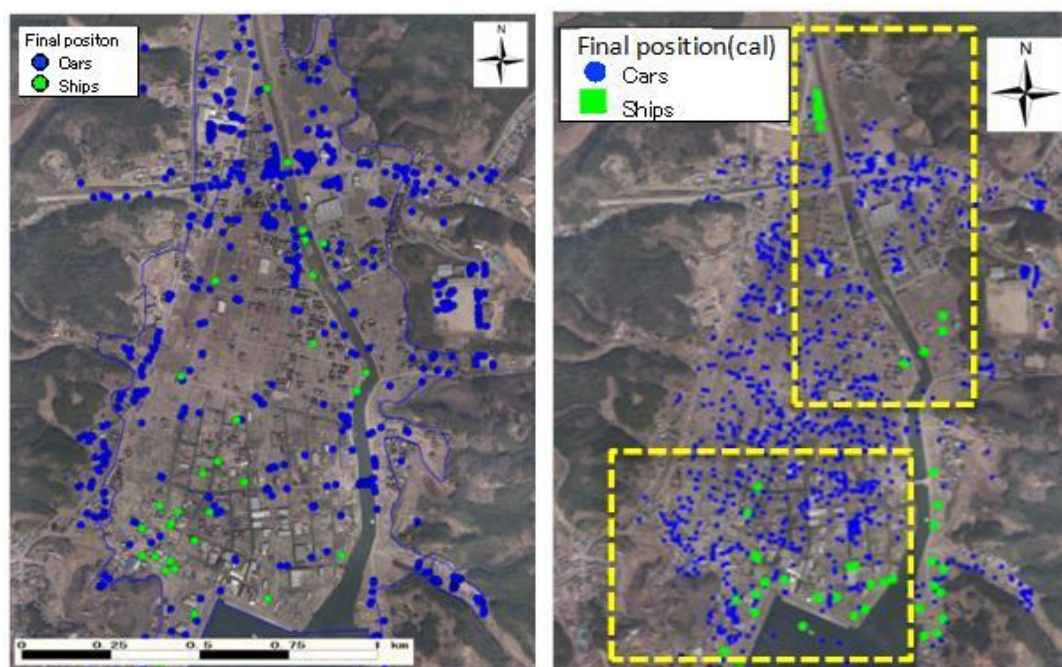


図 6.5 車両・船舶の最終集積箇所の比較（左：実績，右：車両）

図 6.6 はがれきの集積状況について実績と計算の比較を行ったものである。なお、計算の集積状況については 50m 間隔のグリッドを作成し、各グリッド内に含まれているがれき粒子の総数を算定している。建物がれきについては、ケース-1、ケース-2 のいずれの結果も市街地全体で集積しているが、建物の形状・倒壊を考慮した結果 (Case-2) は、残存した建物の背面 (図中黄色枠) で集積しやすく、緑枠の範囲で集積していないなどの実績の傾向を再現している。建物の形状を考慮することにより、より実現象に近い水位・流速分布が再現でき、建物背後地における集積状況の向上が図れたと考えられる。また、表 6.3 はケース 1,2 における実績と計算の相関係数を示したものである。地区区分は、建物倒壊計算時に設定した区分 (図 4.12) と同様である。これらの結果から、市街地全体ではケース-1 で 0.36、ケース-2 で 0.40 となり、全体では適合度は高くない。地区ごとでは地区 1 がもっとも高く、次に地区 3 が 0.5 以上となり、地区 4 を除けばいずれの地区もケース 2 が高い。なお、どちらのケースも地区 2 については実績で集積が多いのにも関わらず計算では少ないため再現性が悪く、他の地区と比較して相関係数が小さくなっている。全体地区の相関係数も相対的に低くなっている。地区 2 を除いて相関を算定したところ両ケースとも 0.5 以上となることから極端に地区 2 の再現性が悪いことが確認された。建物倒壊の計算では同地区が最も再現率が高かったが、災害がれきの集積状況では、再現率が最も悪い。2 章で整理した通りがれきは浸水域外縁部 (浸水、非浸水の境界) や残存した建物周辺で補足され集積し易いが、同地区は、海岸から浸水域外縁部まで範囲が小さいことや、浸水域内に残存建物が無いことから再現性が低いと考えられる。同地区における再現性の向上が全体の相関を向上させることは必須であると考えられる。

ただし、市街地の大部分 (地区 1,3) は相関が高いため、広域的な再現性は高いと言える。

以上の結果から、計算結果は実績の傾向を再現しているものであると考えられる。

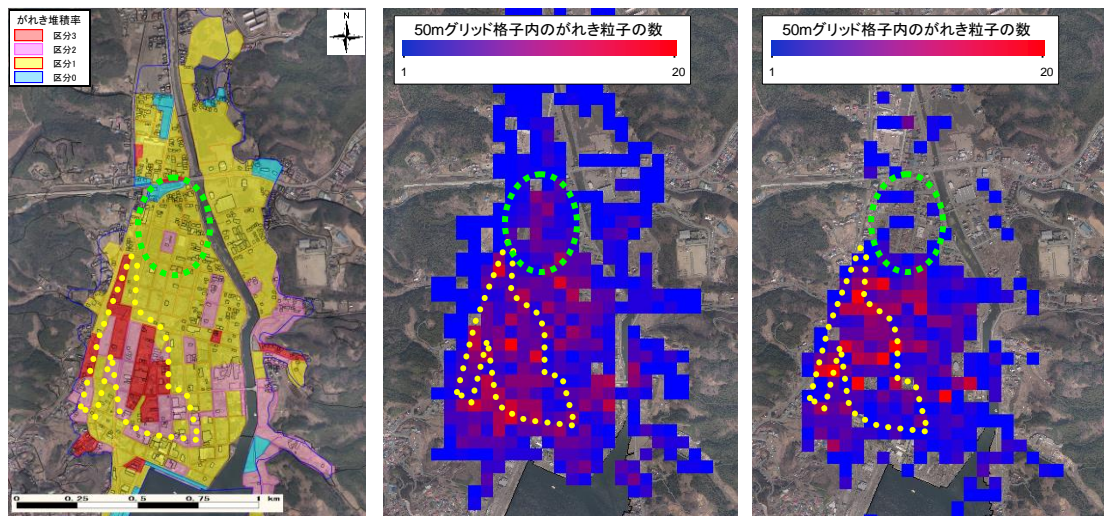


図 6.6 建物がれきの集積状況の比較
 (左：実績，中央：計算 Case-1，右：計算 Case-2)

表 6.3 各地区における相関係数

	全体	地区1	地区2	地区3	地区4
ケース1	0.36	0.64	0.34	0.51	0.53
ケース2	0.40	0.66	0.37	0.55	0.48

(2) 痕跡水位と計算水位の比較

建物倒壊および災害がれきを考慮した津波浸水予測モデルと痕跡水位の比較を行った。本解析結果から、災害がれきを考慮した粗度モデル（ケース1）よりも建物倒壊と災害がれきを考慮した場合（ケース2）では、より高い精度再現できることが確認された。

以上の結果から、より詳細な津波浸水予測には、建物の影響と災害がれきの影響を考慮する必要があることが確認された。

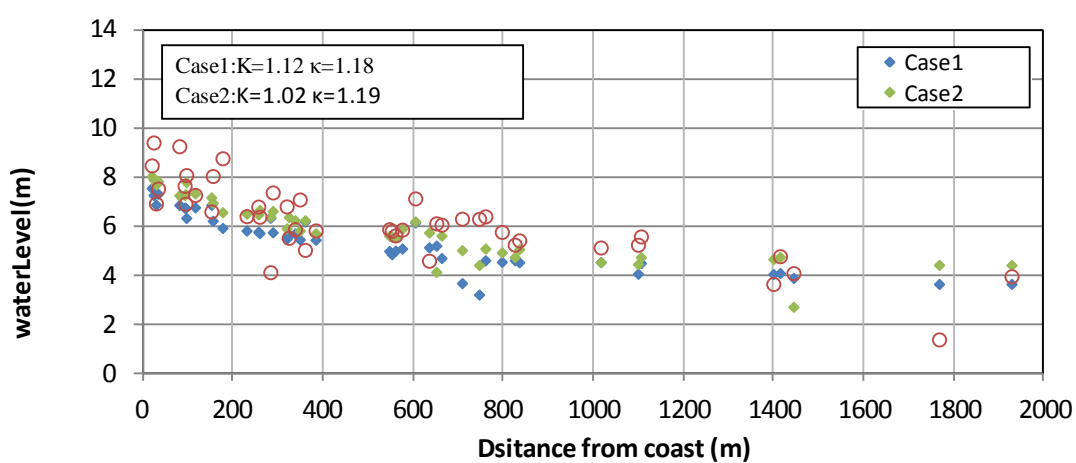


図 6.7 痕跡水位と計算水位の比較

6.3. 災害がれきの集積状況が異なる陸前高田市への適用

本節では、災害がれきの集積状況が気仙沼市と異なる陸前高田市での再現性について検討を行った。陸前高田市は気仙沼市と異なる傾向でがれきが集積している。

図 6.8 は国土技術政策総合研究所(2016)⁴⁷⁾が取りまとめた、東日本大震災における津波漂流物の漂着範囲を示したものである。

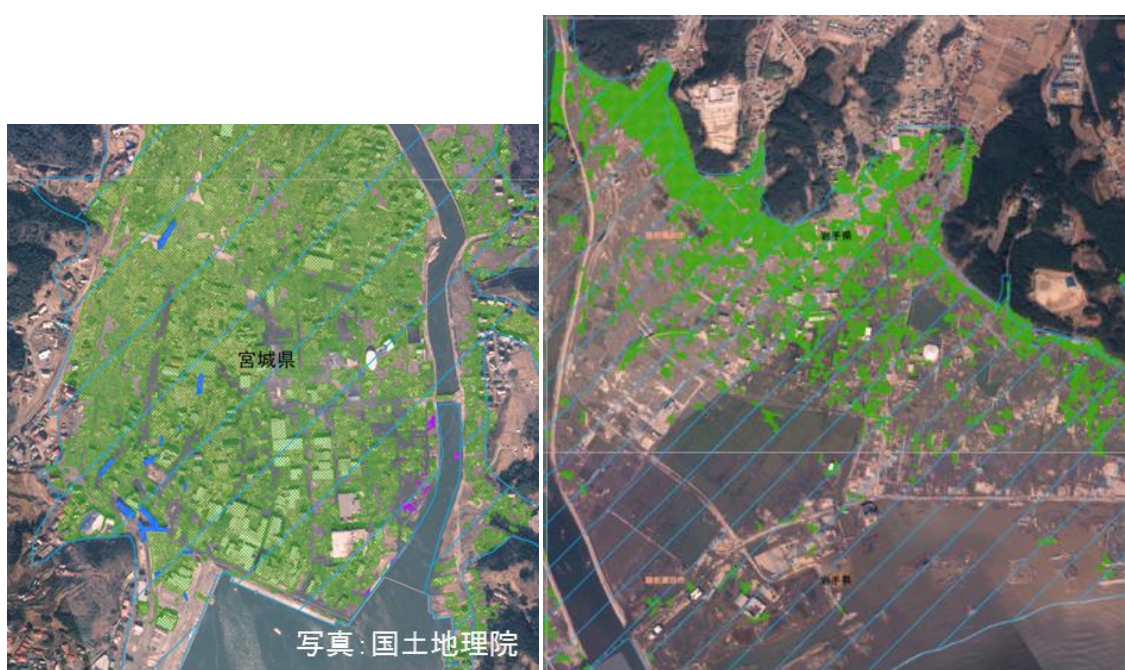


図 6.8 がれきの集積範囲（左：気仙沼市，右：陸前高田市）(国総研,2015)⁴⁷⁾

本研究でも整理した通り気仙沼市街地は市街地全体に災害がれきが集積していた。一方、気仙沼市から数キロ離れた陸前高田市では、災害がれきが広範囲に集積せず、平地と山地の境界付近に集積する傾向が報告されている。この傾向は、本研究で対象としている気仙沼市と異なる傾向を示している。

そこで本研究では、提案モデルを陸前高田市に適用し、モデルの汎用性を確認した。

6.3.1. 陸前高田の建物の構造種別と被災状況

図 6.9 および図 6.10 に陸前高田市の建物の構造種別と被災区分を示す。また気仙沼市と同様に被災状況から倒壊・残存した建物の整理を行った。倒壊・残存区分の整理を行った結果を図 6.11 に示す。これらの結果から、ほとんどの建物が倒壊・流失していることが確認された。

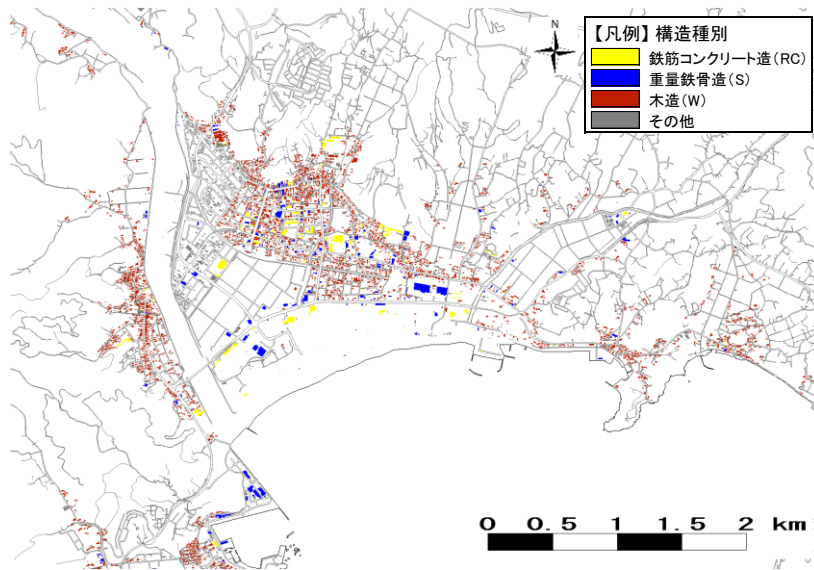


図 6.9 陸前高田市の建物種別

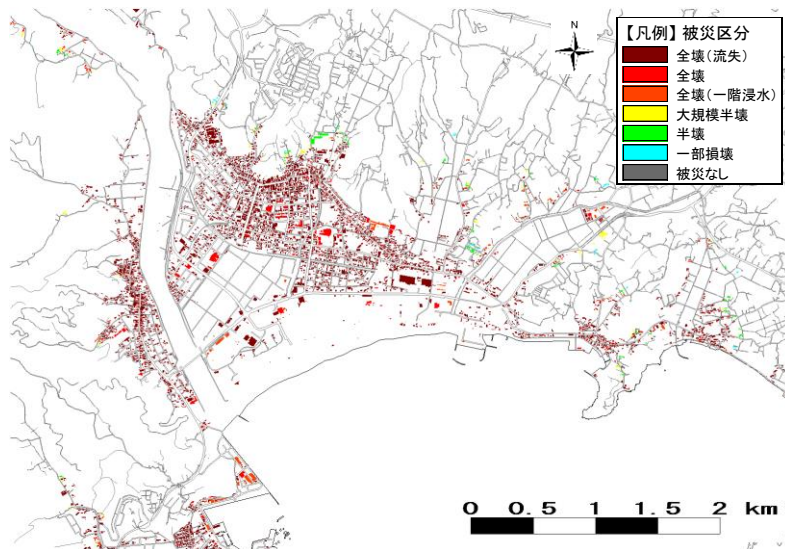


図 6.10 陸前高田市の建物被災状況

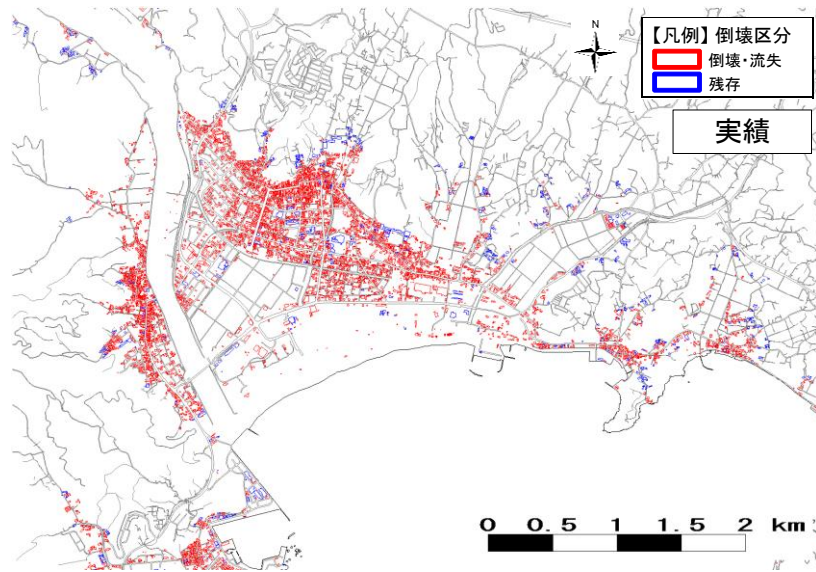


図 6.11 倒壊区分の判定

6.3.2. 地形データの作成

陸前高田市における地形データの作成における使用したデータおよび作成方法は、基本的には気仙沼市と同様となっている。

計算領域の詳細を表 6.4, 図 6.12 に示す。また作成した地形データの一例を図 6.13 示す。

表 6.4 計算領域の概要

No.	格子幅 (分割数)	領域南西端の座標 (平面直角座標第 10 系)	
		x	y
Domain 1	1350m (840 × 1020)	x= -49950.0	y= -992250.0
Domain 2	450m (386 × 479)	x= -2250.0	y= -261450.0
Domain 3	150m (494 × 710)	x= 33000.0	y= -206400.0
Domain 4	50m (422 × 530)	x= 60650.0	y= -12775.0
Domain 5	10m (1137 × 1152)	x= 64170.0	y= -116180.0
Domain 6	2m (2462 × 1732)	x= 67004.0	y= -111456.0

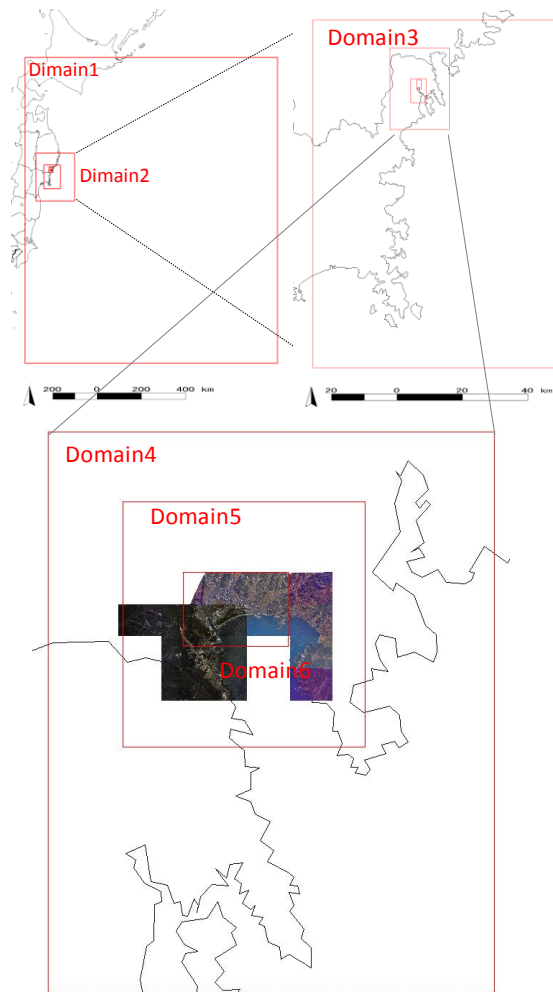


図 6.12 計算領域



図 6.13 作成した地形データの一例（領域 6, 2m メッシュ）

6.3.3. 計算条件

津波浸水シミュレーションにおける計算条件は、表 6.5 に示す通りとなっている。基本的には、気仙沼市の再現計算と同様となっている。

表 6.5 計算条件一覧

#	項目	条件
計算手法	基礎式	非線形長波理論式
	差分スキーム	【空間差分】スタッガード格子法
		【時間差分】リーブ・フロッグ法
	越流公式	本間公式
計算条件	計算領域	図 6.12 参照
	計算格子間隔	1350m→450m→150m→50m→10m→2m
	計算領域数	Domain 1 (1350m メッシュ) Domain 2 (450m メッシュ) Domain 3 (150m メッシュ) Domain 4 (50m メッシュ) Domain 5 (10m メッシュ) Domain 6 (2m メッシュ)
	波源(断層)モデル	藤井・佐竹モデル ver.8.0(2012)
	初期潮位	T.P.0.5m (第一波到達時刻の天文潮位)
	粗度係数	市街地：0.025 その他の土地利用形態：0.025～0.04
	陸域境界	Domain 1～4 は完全反射 Domain 5～6 は遡上境界
	計算間隔	dt = 0.05 s (CFL 条件は満足する)

災害がれきの移動予測モデルにおけるがれきの初期位置については気仙沼市と同様に航空写真の判読により設定した. 設定した津波漂流物と災害がれきの初期配置を図 6.14 に示す.



図 6.14 災害がれきの初期配置

6.3.4. 解析結果

本解析結果より得られたがれきの移動状況を図 6.15 に示す。結果は津波が到達する直前である地震発生から 30 分から示している。これらの結果から津波は 30 分程度で到達し、40 分には陸上を遡上している。およそ 50 分で市街地全体が浸水し、60 分以降では引波となり水位が低下する。一方災害がれきの方は、津波の遡上と合わせて陸上の奥の方に運ばれていき、50 分ほどで山地部と平野部の境界付近で集積する。その後、引波と同時に海域に流出している。

図 6.16 に解析結果より得られたがれきの最終集積箇所を示す。図中には浜口ら(2016)が整理した実績のがれき集積箇所も合わせて示している。これらの結果から災害がれきは、一部山地部と平野部の境界付近（青色点線枠）に集積しているものの、大部分は海域（黄色点線枠）に流出していることがわかる。この要因として陸前高田市は津波によって沿岸地域の堤防の破壊や樹林群が消失しているため、震災前後で大きく沿岸状況が異なる。そのため、市街地における流況が実際とは異なるため、がれきの集積が再現できなかったものと考えられる。今後、地形変化も考慮することで災害がれきの集積予測を向上できる可能性がある。

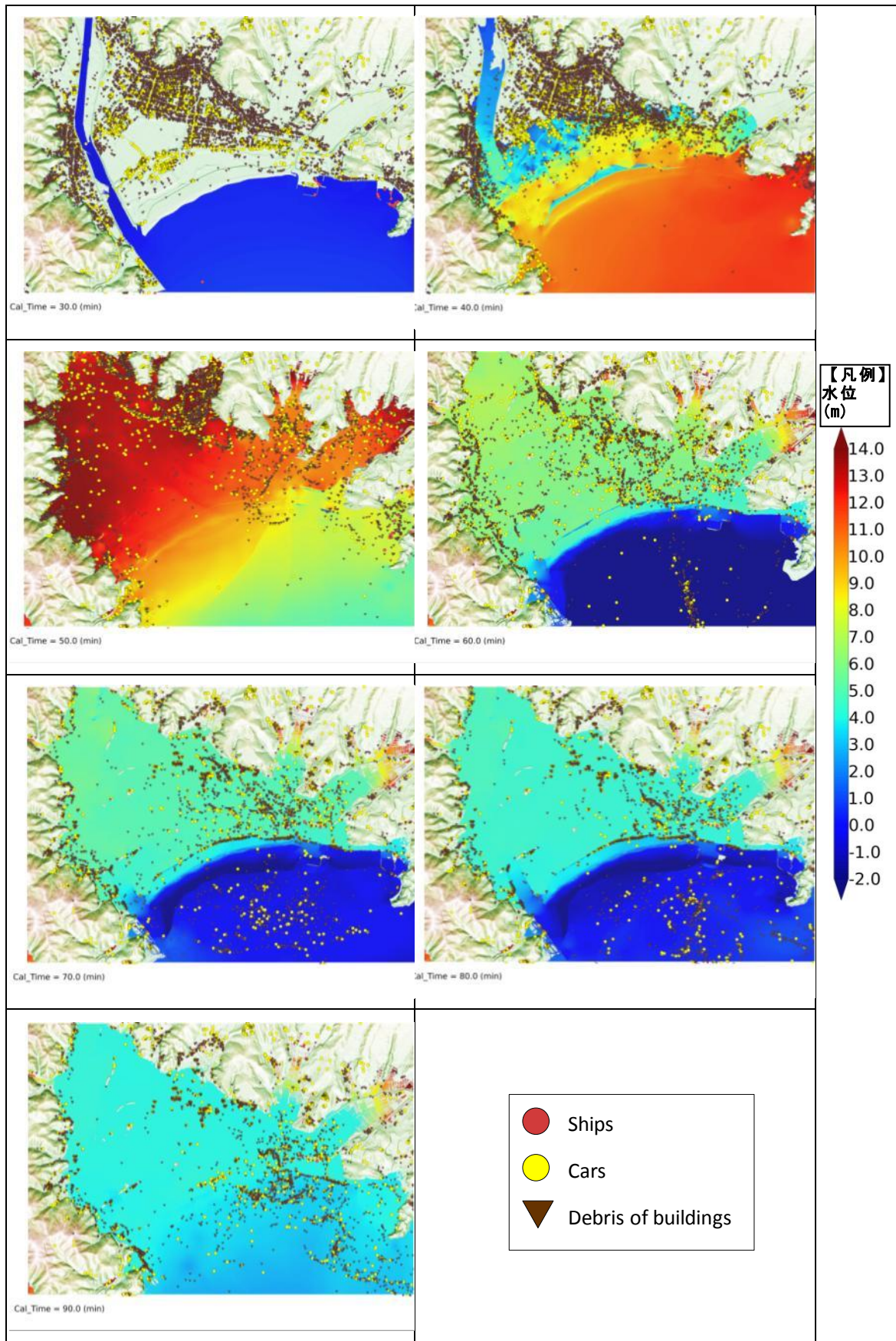


図 6.15 漂流物およびがれきの移動状況

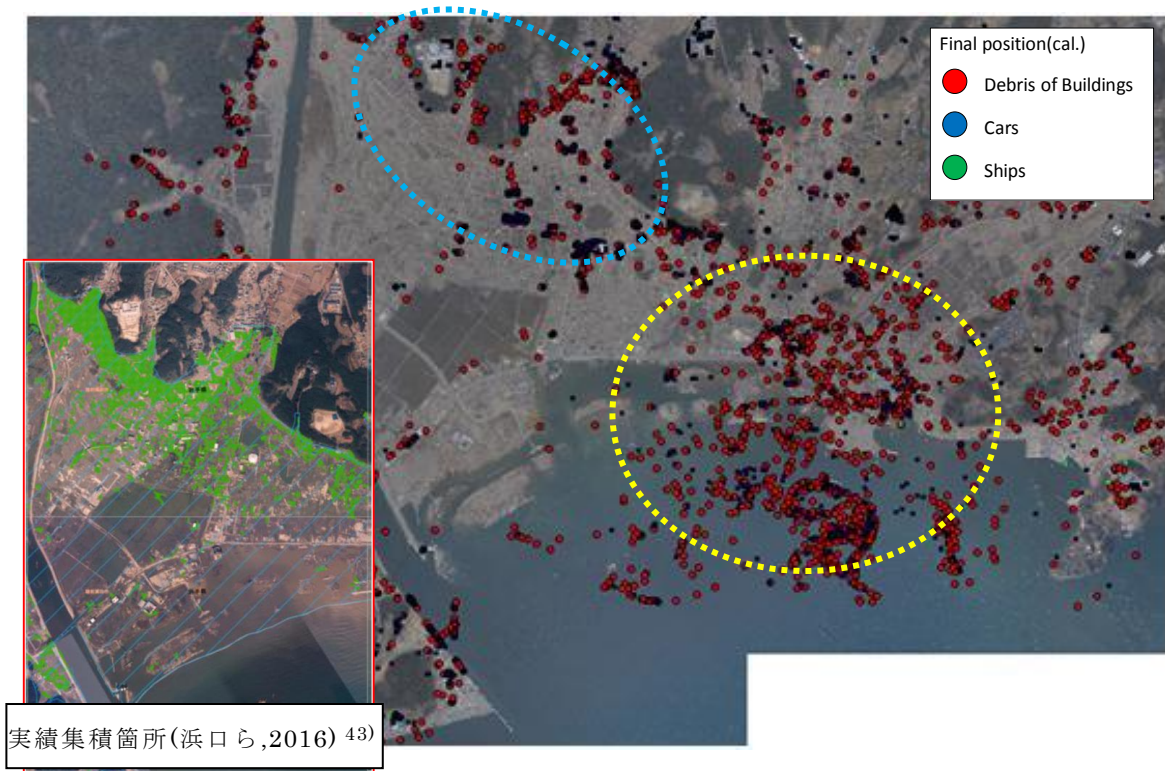


図 6.16 災害がれきの最終集積箇所

6.4. 本章のまとめ

本章では, 本研究で構築した建物倒壊および災害がれきの移動予測モデルを気仙沼市と陸前高田市に適用し, その再現性について確認した. はじめにモデルを適用するにあたり, 対象とする災害がれきの選定を行い, 諸元の求め方, 初期位置の設定方法, 建物倒壊に伴うがれきの発生方法について示した. 次に, 気仙沼市を対象にモデルを適用し, モデルの性能を確認した. 実施ケースは従来の粗度モデルと, 本研究で構築した建物倒壊モデルの2ケース検討した. これらの検討結果から, 災害がれきの集積予測には建物の影響が大きいことが確認された. また, 災害がれきを津波流れに対して考慮することで, 計算水位の再現性の向上が確認された. さらに災害がれきの集積傾向が異なる陸前高田市に対してモデルの適用を行った. その結果, 一部の災害がれきは再現できたものの大部分のがれきは海に流失し実績の傾向とは異なる結果となり, 検討に余地を残した.

第7章 結論

2011年東北地方太平洋沖地震津波によって甚大な被害が生じた。同津波災害では浸水被害にとどまらず、建物の倒壊や、災害がれきの発生・集積などの被害も生じた。この様な、現象は個々に発生するものではなく相互に影響し合うものである。しかしながら、従来の津波浸水予測手法や漂流物の予測手法などでは、これらの現象を限定的に取扱ってきた。

本研究では、東北地方太平洋沖地震津波による被害や現象を整理し、より実現象に近い形で津波被害予測手法の開発を目指し、モデルの開発・検証を行った。各章より得られた結論を以下に示す。

【東北地方太平洋沖地震津波による被害概要（第2章）】

第2章では、2011年東北地方太平洋沖地震津波の被害の概要について整理を行った。また、検討対象とする気仙沼市街地の被害概要について整理した。その結果、気仙沼市では10m程度の津波が来襲したのにもかかわらず、気仙沼市で倒壊したほとんどの建物が木造家屋であり、鉄骨造や鉄筋コンクリート造は、津波に対するある程度の耐力があることが確認された。

【東北地方太平洋沖地震津波の再現計算（第3章）】

第3章では、従来の津波浸水予測モデル（粗度モデル）によって気仙沼市街地における再現計算を実施した。また、建物を地形として取扱った場合について再現性と各ケースの違いについて検討した。その結果、いずれのケースにおいても浸水範囲は概ね一致しているものの、遡上中や最大津波高の平面的な分布が異なる傾向を示すことを明らかにした。

痕跡値と比較した結果、痕跡値が沿岸から背後地にかけて小さくなるのに対して、従来手法の粗度モデルでは、沿岸から背後にかけてほぼフラットとなり、また若干ではあるが沿岸より背後の方が津波高は大きくなるなど、実績とは異なる傾向を示した。一方、建物を地形として取扱った場合、沿岸から背後地にかけて水位が小さくなるという傾向は実績値と良好に一致した。しかしながら、震災前の建物条件だと、沿岸域における抵抗が大きすぎるため、背後地を過少

評価し、震災後の建物条件だと背後地は良好に再現できるが、沿岸域でより過少評価となる。以上の結果から建物の倒壊を考慮する必要があることを明らかにした。

【建物倒壊の影響を考慮した津波シミュレーションモデルの構築（第4章）】

第4章では、波力に基づく建物の倒壊・流失を考慮した場合の津波シミュレーションモデルを構築し、再現性について検討した。その結果、従来の手法の地形と震災前後の建物を考慮した地形で計算した結果、正確な浸水予測には建物の形状や高さを考慮した場合に加え、建物の倒壊を考慮することで一定の再現性が確認された。また、波力に基づく建物の倒壊・流失を考慮した計算を実施した結果、実績の建物倒壊状況を概ね再現可能であることを確認した。以上から、建物倒壊を考慮した津波解析は一定の再現性を有していることを示した。

【災害がれきの移動予測モデルの構築（第5章）】

第5章では、災害がれきの移動に関する基本的な移動現象について整理を行い、災害がれきの移動予測モデルを構築した。また構築したモデルを用いて、底面移動を対象とした既往の移動実験との比較を行い、従来の移動予測モデルとの再現性に大きな違いは生じないことを確認した。次に数値実験を行い、本モデルが密度や流況の違いから生じる漂流、底面移動等の複数の移動形態を包括的に取り扱えることを確認した。最後に、漂流物群を対象とした既往の移動実験との比較を行い、がれき群と流体の相互作用について十分な再現性を有していることを確認した。これらのことから、本研究で構築した災害がれきの移動予測モデルは、移動に関する基本的な性能を有しつつ、漂流および底面移動などの複数の移動形態を包括的かつ連続的に取り扱えることを確認した。また、漂流物群においても流体との相互作用についても良好な再現性を確認した。

【災害がれきの移動予測モデルの実地への適用（第6章）】

第6章では、本研究で構築した建物倒壊および災害がれきの移動予測モデルを気仙沼市と陸前高田市に適用し、その再現性について確認した。はじめに

モデルを適用するにあたり、対象とする災害がれきの選定を行い、諸元の求め方、初期位置の設定方法、建物倒壊に伴うがれきの発生方法について示した。次に、気仙沼市を対象にモデルを適用し、モデルの性能を確認した。実施ケースは従来の粗度モデルと、本研究で構築した建物倒壊モデルの2ケース検討した。これらの検討結果から、災害がれきの集積予測には建物の影響が大きいことが確認された。また、災害がれきを津波流れに対して考慮することで、計算水位の再現性の向上が確認された。さらに実際のがれきの集積状況が異なる陸前高田市にモデルの適用を行った。その結果、一部は再現できたものの若干実績とは異なる傾向を示し、検討の余地を残した。今後地形データやがれきの密度といった要因について検討を重ねていく次第である。

【本研究から得られた知見と今後の展望】

以上の結果を踏まえると、建物と氾濫流、建物の残存と災害がれきの集積箇所、災害がれき群と氾濫流はそれぞれ密接に影響しあう現象であるため、より詳細な被害予測にはこれらの現象の相互関係を考慮する事が重要である。しかしながら、本モデルは市街地スケールの影響把握のため、建物の倒壊に関して倒壊過程を簡略化し、流況に応じて即時破壊として簡易的に取扱った。また、建物倒壊にともない発生する災害がれきの密度や、形状には不確かさが含まれているものの、代表的なパラメータを付与することで、がれきの影響を確認した。より詳細な氾濫流と災害がれきの予測のためには、建物の破壊過程やがれきの不確かさの影響を踏まえた検討を行うことで、さらなる高度化が行えると考えられる。がれきの移動モデルについては、室内実験を通してモデル検証を行えたが実地への適用の際には、車両・船舶などの初期値について実際とは異なる配置で検証せざるをえなく、実地レベルでの検証が十分とはいえないと考えている。

今後この様な実地レベルでの検証データが集積されていくことで、モデル性能の向上に期待できると考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省国土地理院: 地理院地図,<http://maps.gsi.go.jp/>, 参照 2016-03-01.
- 2) 東北防衛局提供写真: http://memory.ever.jp/tsunami/shogen_kesenuma.html, 参照 2016-03-01.
- 3) ファムバンブック, 長谷部雅伸, 高橋郁夫: VOF 法を用いた 3 次元津波解析に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No.2, pp.I_71-I_75, 2012.
- 4) 今井健太郎, 今村 文彦, 岩間 俊二: 市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_311-I_315, 2013.
- 5) 林里美, Bruno Adriano, Erick Mas, 越村俊一: 建物破壊を考慮した陸域遡上モデルの構築による津波数値計算手法の高精度化, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, I_346-I_350, 2014.
- 6) 油屋貴子, 今村文彦: 合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.276-280, 2002.
- 7) 国土交通省都市局都市計画課・市街地整備課: 東日本大震災の津波被災現況調査結果(第 2 次報告), http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi07_hh_000056.html, 参照 2015-03-01.
- 8) 後藤智明: 津波による木材の流出に関する計算, 海岸工学講演会論文集, vol.30, pp.594-597, 1983.
- 9) 許 松, 嶋原 良典, 多田 毅, 林 建二郎: 津波による船舶群の漂流・座礁に関する水理実験と数値モデルの検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71 ,No. 2, p. I_277-I_282, 2015.
- 10) 田島芳満, 桐ヶ谷直也, 櫻澤崇史: 漂流物群と氾濫流の相互作用に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 72, No. 2, p. I_205-I_210, 2016.
- 11) 野路正浩, 今村文彦, 首藤伸夫: 津波石移動計算手法の開発, 海岸工学論文集, vol. 40, pp.176-180, 1993.
- 12) 大窪慈生, 菅原正宏, 今村文彦: 移動特性を考慮した津波石の水理実験と数値解析手法の改良, 海岸工学研究報告, vol.21, pp.41-47, 2004.
- 13) 内閣府: 平成 23 年版防衛白書, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h23/index.htm>, 参照 2016-03-01.
- 14) 国土交通省気象庁: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震 ～The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake～, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/, 参照 2016-03-01.
- 15) 一般財団法人 日本気象協会: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震津波の概要(第

- 3 報) , <https://www.jwa.or.jp/news/docs/tsunamigaiyou3.pdf>, 2011 年 4 月 22 日.
- 16) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：東北地方太平洋沖地震津波情報,
<http://www.coastal.jp/tjt/>, 参照 2015-03-01.
 - 17) 国土交通省国土地理院：2 万 5 千分 1 浸水範囲概況図 , 参照 2015-03-01.
 - 18) 国土交通省国土地理院：GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻動, <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>, 参照 2015-03-01.
 - 19) 気仙沼市：東日本大震災 写真で伝える -市民が撮った気仙沼-, 浜ライン, 出版日不明.
 - 20) 産経フォト Web：http://www.sankei.com/photo/panorama/newslist/pnr_disaster-n1.html, , 参照 2016-03-01.
 - 21) 国土交通省国土地理院応用地理部：提供データ(航空測量による標高データ他).
 - 22) 宮城県循環型社会推進課：災害廃棄物処理業務の記録,
<http://www.pref.miyagi.jp/site/ej-earthquake/gyoumukiroku.html>, 参照 2016-03-01.
 - 23) 岩崎敏夫, 真野明:オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会
論文集, 土木学会, 70-74,1979.
 - 24) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the
Seismological Society of America*, Vol.61, No.5, 1433-1440, 1971.
 - 25) Okada, Y.: 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, 1992.
 - 26) 佐藤良輔編著: 日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
 - 27) 内閣府中央防災会議：提供データ（日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震）,2006.
 - 28) 気仙沼土木事務所：鹿折川災害復旧事業等の事業説明会 ,,
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/ks-doboku/>, H24.
 - 29) 中日本航空株式会社 Web: 数値標高モデル（DSM：Digital Surface
Model）,<http://www.nnk.co.jp/research/product/dem.html>, 参照 2015-03-01.
 - 30) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp356-360., 1998.
 - 31) 国土交通省水管理・国土保全局 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室: 津波浸水
想定の設定の手引 Ver.2.00, 平成 24 年 10 月.
 - 32) 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Ver.1.0, 2011.
 - 33) Fujii, Y, K Satake, S. Sakai, M. Shinohara and T. Kanazawa: Tsunami source of the 2011 off the Pacific

- coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space ,Vol.63,pp.815-820, 2011.
- 34) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya Y.: Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bull. Seismol. Soc. Am., in print, 2013.
 - 35) 国土交通省港湾空港技術研究所, <http://www.pari.go.jp/files/items/3527/File/ichiran.pdf>, <http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328pari.html>
 - 36) 相田勇: 三陸沖の古い津波シミュレーション, 地震研究彙集, Vol.52, pp.71- 101, 1977.
 - 37) 松富英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 246 – 250, 1994.
 - 38) 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 381 – 385, 2000.
 - 39) 松富英夫, 山口枝里子, 直江和典, 原田賢治: 東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート造建物と海岸黒松の被害条件, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) ,Vol.68, No.2, pp.I_351-I_355, 2012.
 - 40) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷 毅, 高尾 誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 911 – 915, 2000.
 - 41) 有光剛, 大江一也, 川崎浩司: 陸上構造物前面の浸水深を用いた津波波圧算定式の提案, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 68, No. 2 p. I_13-I_18, 2012.
 - 42) 高島大輔, 木原直人, 田中伸和: 陸上構造物前面に作用する津波波圧に関する数値実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, pp.I_851-I_855, 2013.
 - 43) 菅原正宏, 大窪慈生, 菅原大助, 箕浦幸治, 今村文彦: 津波により一様斜面上を移動する土砂および津波石に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 47 巻,pp.266 - 270,2003.
 - 44) 野島和也, 櫻庭雅明, 小園裕司: 水没を考慮した実務的な津波漂流物による被害リスク算定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No.2, pp.I_261-I_265, 2014.
 - 45) トヨタ自動車株式会社 Web : 主要諸元表 , http://toyota.jp/pages/contents/prius/004_p_001/pdf/spec/prius_spec_201512.pdf, 参照 2016-03-01.
 - 46) 国立環境研究所: 災害廃棄物の発生原単位について , http://www.nies.go.jp/shinsai/genntanni_no1_110628.pdf, 参照 2016-03-01.
 - 47) 浜口耕平,原野崇,二階堂竜司,中園大介,原文宏,諏訪義雄: 東日本大震災における津波漂流物の範囲と量の推定, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 72, No. 2, p. I_193-I_198, 2016.

変数一覧表（既出順）

表-1 本研究で使用している変数一覧

変数	概要	単位
n_{im}	合成粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$
n_o	底面粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$
g	重力加速度	m/s^2
D	全水深	m
B	家屋幅	m
θ_k	家屋占有率	%
C_D	抗力係数	-
n_{ab}	合成等価粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$
A_c	津波氾濫方向の浸水縦断面積	m^2
h_{inun}	浸水深	m
ρ	水の密度	kg/m^3
ρ_t	木材の密度	kg/m^3
u_f	水の速度	m/s
u_t	木材の速度	m/s
V_t	木材の体積	m^3
A_t	木材の接水投影面積	m^2
C_M	付加質量係数	-
X_0	流木の初期位置	m
X	Δt 秒後の流木の位置	m
κ_0	拡散係数	-
ξ_k	(0,1)間の一様乱数	-
Re	レイノルズ数	-
Fr	フルード数	-
u_*	摩擦速度	m/s
μ_{visc}	粘性係数	$kg/(m \cdot s)$
m	物体の質量	kg

表-2 本研究で使用している変数一覧

v_x, v_y	物体の x, y 方向の速度	m/s
I	z 軸まわりの慣性モーメント	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
ω	z 軸まわりの角速度	rad/s
M_z	物体が流体から受ける力(鉛直軸回りのトルク)	$\text{N} \cdot \text{m}$
F_{flowx}, F_{flowy}	x 方向, y 方向の流体力	N
F_{fricx}, F_{fricy}	x 方向, y 方向の底面摩擦力	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
U, V	漂流物に対する流体の x, y 方向の相対速度	m/s
l_x, l_y	x 方向, y 方向における物体重心位置からの距離	m
A_m	流れの向きに対する物体没水部分の投影面積	m^2
V_m	物体没水部分の体積	m^3
G	物体の重心位置を示す添字	—
μ_{dyn}	動摩擦係数	—
s	木片の比重	—
V_d	木片の体積	m^3
u_d	木材群の速度	m/s
F_{cd}	流体による抗力	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
F_{cm}	慣性力	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
F_b	底面摩擦力	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
F_k	木材群の衝突による斥力	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
X, Y	x および y の津波石の移動距離	m
H, L, W	津波石の高さ, 長さおよび幅	m
F_g	重力の斜面成分	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$

表-3 本研究で使用している変数一覧

x, y, z	x, y 方向の水平座標, 鉛直座標	m
η	静水面からの水位	m
h	水深	m
n	マンニングの粗度係数	$m^{-1/3} \cdot s$
M, N	x, y 方向の単位幅当りの流量	m^2/s
u, v	x, y 方向の水平平均流速	m/s
Q	領域端での線流量	m^2/s
E, N	経度, 緯度	度
p_i	津波による任意の高さにおける波圧	N/m^2
z_b	地盤高からの高さ	m
f_p	単位幅あたりの波力	N/m
ρ_{deb}	がれきの見かけの密度	kg/m^3
V_{deb}	没水部分のがれきの体積	m^3
A_{deb}	没水部分のがれきの投影面積	m^2
$f_{debb}, f_{debg}, f_{debk}$	底面摩擦力, 重力成分, がれき同士の斥力	$kg \cdot m/s^2$
μ_{deb}	はがれきに作用する摩擦係数	—
θ_b	地形勾配	—
X_{deb0}	がれきの初期位置	m
X_{deb}	Δt 秒後の流木の位置	m
H	がれきの高さ	m
ρ_{org}	がれきの元の密度	kg/m^3
H_t	がれきに作用する浸水深あるいは喫水深	m
F_d	流体に作用するがれきの抵抗力	N

謝辞

本論文は著者が社会人と並行して、関西大学に在学中に研究・執筆したものとなり、研究を遂行するにあたり、多くの方のご指導、ご支援を頂きました。

はじめに、本研究を進めるうえで、終始にわたり懇切丁寧なご指導、ご助言を賜りました関西大学社会安全学部教授の高橋智幸先生に深く御礼申し上げます。高橋先生には著者が社会人としての立場をご理解していただきつつ、研究面においても実務面においても熱心にご指導頂きました。

また、本研究の執筆を行うにあたり、副査をお引き受け頂けいただいた防衛大学校の嶋原先生、関西大学の川口先生に深く御礼申し上げます。嶋原先生からは、津波工学の見地から重要なお意見をいただきました。また、本論文を取りまとめるにあたり、よりわかりやすい構成等について、貴重なご意見を頂きました。また、川口先生からは機械工学の見地から、研究の発展性に関するご助言を頂きました。両副査には本論文を完成させるにあたり貴重なご意見を頂いたことをここに深く御礼申し上げます。

さらに、著者の入学を推薦していただくとともに、研究面において貴重なご助言頂いた日本工営株式会社中央研究所の櫻庭雅明博士、野島和也副博士に深く御礼申し上げます。また、著者の入学・在学に多大なるご理解を頂いた日本工営株式会社 吉田保 旧技術本部長、田中弘 旧技術本部長、小野寺勝 現中央研究所所長、総合技術開発部 中村茂部長に心より感謝申し上げます。

本研究を遂行にあたり、関西大学社会安全学部水災害研究室の学生の皆様には様々な観点からご意見、ご指摘を頂きました。特に門廻充侍氏、岡本萌氏、藤原 岳大氏には、本研究に関連する研究資料の収集や学内研究報告会の補助の面で大変お世話になりました。心より深く御礼申し上げます。

最後に著者のこれまでの研究生活を含め様々なご支援をいただいた両親と家族に感謝いたします。

平成 28 年 11 月