市街地レイアウトを考慮した岡山市における津波到達前後の浸水範囲予測および避難時間の検討

赤穂良輔¹・前野詩朗²・高橋巧武³・工代健太⁴・吉田圭介⁵

¹正会員 岡山大学大学院助教 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail: akoh@okayama-u.ac.jp

²フェロー会員 岡山大学大学院教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

³学生会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

⁴学生会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

⁵正会員 岡山大学大学院准教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

岡山市南部の沿岸域は海拔 0 m 地帯が広がっており、また液状化危険度が非常に高いため、地震発生直後から堤防沈下による浸水が発生する可能性がある。また、避難計画の高度化には、最大浸水深だけでなく津波の到達時刻や氾濫経路を再現できる氾濫解析モデルの利用が有効である。そこで本研究では三角形格子を用いた津波解析モデルを用いて、市街地レイアウトおよび堤防沈下を考慮した南海トラフ地震津波の氾濫解析を行い、岡山市における津波到達前後の浸水特性を予測した。さらに、氾濫解析結果を用いて津波到達前の浸水状況下での避難経路および避難時間について検討した。浸水深と流速による歩行速度の低下を考慮することで、歩行速度が遅い高齢者の場合は、避難時間が平均 1.6 倍、最大で 28 分増加する結果となり、浸水を考慮した避難計画の重要性が示唆された。

Key Words: tsunami, numerical simulation, evacuation, Okayama city, Nankai Trough

1. はじめに

東日本大震災以降、政府や地方自治体によりハード面、ソフト面の両方から対策が講じられている。特に近い将来発生が予測されている日本近海の海底地震には東海地震、南海地震、東南海地震があり、西日本沿岸地域で大きな被害が予想されている。これらの地震は 90～150 年周期で発生しており、直近のものは 1946 年に発生した昭和南海地震である。この地震以降 70 年以上が経過しており、政府の地震調査委員会¹⁾は南海トラフを震源とする地震が今後 30 年以内で 60～70 % の確率で発生すると予測している。特にこの 3 つの地震が連動して起こる南海トラフ巨大地震が発生した場合、最大でマグニチュード 9.1 の巨大地震になると予測されており、この 3 連動地震を想定した津波被害予測および避難対策が急がれている。

本研究で対象とする岡山県岡山市は、児島湾を介して瀬戸内海に面しており、南海トラフからの距離は約 200 km である。しかし、岡山県が平成 25 年 3 月に公表した南海トラフ巨大地震発生時の津波シミュレーションでは、地震発生から約 2 時間 50 分後に第一波が到達し、最大津波高は約 2.6 m と想定されている²⁾。これに基づき、岡山市では平成 25 年 8 月に津波ハザードマップが作成され、193 箇所の津波避難場所が設定された。

岡山県南部地域は、江戸時代以降に開発された干拓地や戦後埋め立てによって作られた工業地帯が広がって

図-1 対象領域

おり、海岸より約 5 km の範囲にわたり海拔 0 m 地帯となっている (図-1)。さらに、岡山県危機管理課³⁾が公表している岡山県液状化危険度マップでは、同地域における液状化危険度を示す PL 値は 15 以上となっており、液状化による堤防を含む地盤の沈下が予想される。これらの地質的特徴より、同地域では、地震発生直後より海域または河川からの浸水の可能性があり、これらを踏まえた避難計画の策定が必要であると考えられる。工代ら⁴⁾は児島湾沿岸および各河川両岸の盛土堤防や児島湖締切堤防の沈下を想定した南海トラフ巨大地震発生時の岡山市における津波遡上解析を行い、堤防の沈下により

図-2 市街地レイアウトの再現領域

表-1 各学区(図-2)の年齢3区分別人口(平成26年)
(単位 上段:人, 下段:%)

	a	b	c	d	e	f
15歳未満	375 (17)	304 (18)	183 (22)	746 (17)	498 (17)	244 (18)
16~64歳	1,270 (58)	971 (58)	495 (58)	2,830 (64)	1,885 (65)	879 (63)
65歳以上	544 (25)	413 (24)	174 (20)	842 (19)	513 (18)	263 (19)
計	2,189	1,688	852	4,418	2,896	1,386

浸水範囲が約10倍に拡大する可能性があることや、長時間に渡り浸水域が拡大することを示している。

また、避難計画の高度化には、従来の津波による最大浸水深だけでなく、津波の到達時刻や氾濫経路を再現できる氾濫解析モデルの利用が有効である。赤穂ら⁵⁾は東北地方太平洋沖地震における釜石市を対象として市街地レイアウトを考慮した解析を行っている。三角形非構造格子を用いて建物を再現し、建物境界を半透過壁として取り扱うことで建物内への浸水による水の貯留の影響を考慮できるモデルを提案している。半透過壁を通過するフラックスの大きさは、災害時の映像や現地調査といった実際の浸水記録との照合により、再現性の高い透過係数の値を経験的に与えている。本モデルは、建物の影響を粗度で与える従来モデルと比較し、最大浸水深および氾濫過程の再現性土について精度が向上したことが示されている。

一方、近年は避難シミュレーションと津波シミュレーションを連成させた研究が行われており、有川ら⁶⁾はポテンシャル理論に基づく避難シミュレーターの歩行速度に、津波シミュレーションより得られた浸水深を反映させたモデルを構築し、岩手県釜石市及びチリ国イキケ市を対象とした避難シミュレーションを実施している。また、須賀ら⁷⁾や二瓶ら⁸⁾は水深あるいは流速による歩行速度への影響について水路を用いた水中歩行実験より検討しており、目黒ら⁹⁾は実験結果⁷⁾に基づく歩行速度減衰モデルを提案し、津波災害時の避難シミュレーションを実施している。ただし、市街地レイアウトまで考慮した津波シミュレーションと避難シミュレーションを組み合わせた研究については、まだ行われていない。

そこで本研究では、岡山市を対象として市街地レイアウトおよび堤防沈下を考慮した津波氾濫解析を行い、津

図-3 計算格子

波到達前後の浸水特性を予測するとともに、津波到達直前の浸水状況下での避難経路および避難時間について検討を行った。

2. 対象津波および対象領域の地形概要

(1) 対象津波

南海トラフの巨大地震モデル検討会(2012)¹⁰⁾では11の震源ケースが推定されている。本研究では工代ら⁴⁾と同様に岡山県山田港に到達する推定津波高が最も大きい四国沖に大すべり域を設定したケース④を対象地震としてシミュレーションを行った。

(2) 計算領域

計算領域は、図-1に示す児島湾および児島湖北部の沿岸域を含む範囲とした。児島湾には旭川、百間川、吉井川の三川が注いでおり、児島湾と児島湖は長さ1558m、幅30mの締切堤防により分断されている。また、海岸沿いには天端高T.P.3~4mの堤防が設置されている⁴⁾。

また、本解析では、浸水範囲だけでなく避難経路や避難時間を予測するために、旭川左岸側の河口付近東西4km、南北4kmの範囲(図-1白破線枠)の建物および主要な道路の配置を詳細に再現した。図-2に主要な道路および岡山市が設定している避難所を示す。また、表-1は、図-2の赤枠で示した各学区内の年齢3区分別人口を示している¹¹⁾。各学区ともに約20%が65歳以上となっており、特に西側海岸付近のd学区の人口密度が高くなっている。

3. 氾濫解析

(1) 計算モデル

浅水流方程式を基礎式として用い、三角形非構造格子を用いた有限体積法で離散化を行った。数値流束はGodunov系手法のRiemann解法の一つである修正型のRoe法¹²⁾により与えた。

本研究の計算領域は岩手県釜石市と比較し、建物密集度が低く範囲も広い⁵⁾ため、赤穂ら¹³⁾が提案した仮想的な透過壁をもつ建物ブロックモデルを採用した。本モデルでは、図-3のように主要な道路の側線と格子線を一致させ、次式よりフラックスを与える。

$$Q = \begin{cases} S_p V_p & \text{if } h_{out} > h_{in} \\ -S_p V_p & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{where} \begin{cases} S_p = C \times \frac{h_{in} + h_{out}}{2} B \\ V_p = \sqrt{2g|h_{out} - h_{in}|} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 S_p は透過面積、 V_p は透過速度、 h_{out} と h_{in} は

図-4 透過フラックス

図-5 建物占有率の概念図

それぞれ境界線の外側と内側の水深、 B は当該セル境界長さである（図-4）。また、 C は透過係数を表しており、図-5 のように道路側線で囲まれた閉曲線（建物ブロック）内の面積 V_g と含有する建物の面積の総和 V_b の比より得られる建物占有率 V_b/V_g を用いて次式より与える。

$$C = C_0 + C_V \cdot \left(1 - \frac{V_b}{V_g}\right) \quad (3)$$

ここに、 C_0 は基準の透過係数、 C_V は面積比に対する透過係数を表しており、本研究ではともに 0.01 を与えた。

(2) 計算条件

a) 地形および道路側線

計算領域の標高および粗度係数は内閣府が公開している 10 m 格子のデータをもとに作成した。ただし、建物再現エリアについては、国土交通省が示している手引き¹⁴⁾に示されている「その他(道路, 空地)」の粗度係数 $0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ と内閣府のデータを比較し、小さい方の値を採用した。さらに、岡山県の津波浸水想定²⁾では地震発生直後に堤防が 75% 沈下する条件で想定を行っており、本研究でもそれに従う。また、岡山県危機管理課が公開した液状化危険度マップ³⁾によると、旭川左岸両岸付近に位置する工業地帯は液状化危険性が非常に高い地域に分類されている。さらに、内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁵⁾では、旭川河口付近の液状化による地盤沈下量が約 0.3 m と推定されている。以上を踏まえ、盛土堤防の沈下に加え、工業地域の地盤を一律に 0.3 m 引き下げて解析を実施した。

道路側線および建物の輪郭線は、国土地理院が提供する基盤地図情報基本項目に含まれる道路線データを基盤地図情報ビューアよりシェープファイルに変換し、幅 3.5 m 以下の細い道を取り除いた主要道路（図-2）のみを解像した。道路側線で囲まれた建物ブロック毎に式(3)より算出した透過係数 C を与えた。図-6 に建物占有率の分布を示す。南部の建物占有率が高くなっているが、概ね 0.5 以下となっており空地等が多い領域となっている。また、北部は農地となっており、建物の影響は非常に小さいと考えられる。そこで、建物占有率が 0.2 以下の建物ブロックは排除し、粗度でのみ抵抗を考慮した。

b) 計算格子

計算格子は、前述の道路側線データを自動格子生成ソフトにより、格子線が各境界線に沿うように作

図-6 建物占有率の分布

図-7 湾口境界からの入力波形

成した。格子サイズは建物再現領域で約 5 m、その他の陸域は約 300 m、河道内は約 50 m、海域は約 70 m とした。格子数は 747,116 個である。

c) 初期条件および境界条件

児島湖の水位は通常約 T.P. -0.5 m になるように岡山県によって管理されているため、本研究での初期水位もこの値に設定した。一方、児島湾の初期水位は「平成 24 年気象潮位表」の山田港における年間最高潮位である T.P. 1.29 m とした。河川の初期水位も同じく T.P. 1.29 m とした。

湾口境界からの入力波形は、工代ら¹⁶⁾と同様の波源を含む広領域津波伝播解析を別途行い、図-1 に示す湾口境界線を四等分する三点の水位の平均値より求めた。また、計算時間は地震発生から 8 時間後までとした。図-7 に流入境界の入力波形を示す。地震発生から約 2 時間半後に第一波が到達し、同程度の津波が 5 回到達した。

(3) 計算結果および考察

a) 津波到達前の浸水深分布

図-8 に第 1 波到達直前となる地震発生から 150 分後までの浸水深分布の時間変化を示す。堤防沈下により海岸線あるいは河川から浸水し、各境界線より 1.5 km 程度の地点まで浸水域が到達している。浸水深は 0.5 m 以下の領域が多く、海岸付近では 1.5 m 程度に達する領域もあるため、歩行での避難が不可能あるいは可能ではあるものの避難速度は大きく低下すると考えられる。

b) 津波到達後の最大浸水深分布

図-10 に第 2 波から第 5 波到達後の最大浸水深の分布を示す。また、併せて堤防沈下を考慮しない最大浸水深分布を図-9 に示す。堤防沈下を考慮しない場合は、浸水域は海岸線より 2.5 km 程度で留まっており、浸水深も概ね 1 m 以下となった。一方、堤防沈下を考慮した場合は、深水域が海岸線から約 4 km の地点まで到達してお

図-8 津波到達前の浸水深分布の時間変化

図-9 津波到達後の最大浸水深分布
(堤防の沈下なし, 400 分後)

図-10 津波到達後の最大浸水深分布 (堤防沈下あり)

り、最大浸水深は東側で 2 m 以上に達した。また、図-7 が示すように、第 2 波から第 5 波のピーク水位は同程度であるが、浸水域は第 5 波到達以降も拡大した。これは、堤防沈下による影響は、最大浸水深の上昇による被害拡大だけでなく、被災時間の長期化を示唆している。

c) 計算モデルによる流況の違い

図-11 に建物の影響を粗度で考慮した従来モデルによる最大浸水深差の分布を示す。なお、従来モデルによる最大浸水深の分布は、岡山市による解析結果²⁾と概ね一致した。本解析結果は、東部での浸水深差が大きくなっているが最大で 2 cm 程度となった。本解析範囲では建物密集度が低いため、最大浸水深分布の差が生じていないと考えられる。ただし、図-12 に示す局所的な流況については、本解析モデルでは、氾濫水が道路に集中している様子が確認でき、従来モデルよりも再現性が高いと考えられる。

図-11 粗度モデルとの最大浸水深の差

図-12 粗度モデルとの局所的流況の比較

4. 避難時間の検討

(1) 検討方法

前章で示した氾濫解析結果を用いて、浸水を考慮した避難モデルによる避難時間の検討を行った。本研究では、避難時の歩行速度を以下に示す目黒ら⁹⁾の歩行速度減衰モデルより与えた。

$$U = U_{\max} \left| 1 - \frac{H}{H_{\max}} - \frac{V}{V_{\max}} \right| \quad (4)$$

ここで、 $H_{\max}$ は歩行限界水深、 $V_{\max}$ は歩行限界流速、 $U_{\max}$ は最大歩行速度を示す。また、 H は水深、 V は水の流速、 U は歩行速度を表している。

建物再現領域内の計 36 箇所の交差点を「始点」とし、図-2 に示した計 9 箇所の避難場所のうち、式(4)の歩行速度を用いて最短時間で到達できる避難場所を「終点」として検出した。以降、始点から終点に至るルートを「避難経路」、要した時間を「避難時間」と定義する。本研究では、 $H_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 、 $U_{\max}$ について表-2 に示す成人男性、成人女性、高齢者の 3 ケースについて検討した。また、

表-2 歩行速度減衰モデルに用いる係数の設定

	歩行限界水深 $H_{\max}$ (m)	歩行限界流速 $V_{\max}$ (m/s)	最大歩行速度 $U_{\max}$ (m/s)
成人男性	0.7	2.5	1.5
成人女性	0.5	2.0	1.3
高齢者	0.3	1.5	1.2

図-13 浸水による避難経路の変化のパターン：
(a)避難経路・場所の変化なし，(b)避難経路が変化，
(c)避難場所が変化

図-14 浸水による避難経路変化の分布図
(高齢者のケース)

道路上の水深および水の流速は、避難経路および避難時間の変化が最も顕著になる最悪の状況を想定し、第一波到達直前の地震発生から150分後の計算結果(図-8(c))を用いた。

(2) 検討結果

a) 避難経路

浸水の影響を考慮することにより、図-13に示す3パターンが発生する可能性がある。ここで、赤線は浸水を想定しない場合の避難経路A、黄線は浸水を想定した場合の避難経路Bを示す。(a)は浸水により避難時間は増加するが避難場所、避難経路ともに変化しない；(b)は浸水により避難場所は変化しないが避難経路が変化する；(c)は浸水により避難場所が変化することで、避難経路も変化する。

図-14は、歩行速度が最も遅く避難時間を要する高齢

図-15 避難時間の比較

表-3 学区ごとの避難時間の平均値および避難時間比
(単位 上, 中段:秒, 下段:-)

	a	b	c	d	e	f
浸水なし	339	235	532	485	517	361
浸水あり	530	235	694	746	1160	756
避難時間比	1.6	1.0	1.3	1.5	2.2	2.1

者を対象とした場合の浸水を考慮することによる避難経路変化の分布を示す。赤点は「(a)避難経路の変更なし」、黄点は「(b)避難場所は変化せず避難経路が変化」、青点は「(c)避難場所変更による避難経路が変化」を示している。また、灰点は浸水により「(d)避難不可能」になった始点を示している。図-2に示した学区と比較すると、特にe,f学区では、地震発生から150分後には、ほぼ全域で避難不可能になることが分かる。また、図-9よりf学区は、最大浸水深が2m以上となる領域であるため、迅速な避難行動が必要であると考えられる。

このように、市街地レイアウトを考慮した氾濫解析結果を用いることで、浸水による避難経路の変更について、より詳細な検討が可能となる。

b) 避難時間

図-15は、浸水を考慮することによる避難時間の比較を示している。避難場所が変化した場合に避難時間が大きく増加する傾向が確認できる。また、今回検討した始点の場合では、最大で約28分増加している。さらに、歩行速度が遅い高齢者の場合は、避難時間の増加率が高いだけでなく、避難場所の変更が必要な始点が増加することが明らかとなった。

図-2に示した学区ごとの避難時間の平均値および避難時間比を表-3に示す。ただし、避難時間の平均値は、表-1に示した年齢3区分人口に学区ごとの平均避難時間に乗じた値の平均値を示している。なお、男女比は全ての学区で1:1と仮定した。浸水を考慮しない経路Aによる避難時間は、占有面積が広く避難場所が1箇所のみであるc学区が最大となるが、浸水を考慮した経路Bの場合では、占有面積が狭く避難場所が2箇所あるe学区が最大となった。このことより、効果的な避難場所の設定には、占有面積に対する避難場所を増やすという従来の常識的な設定方法ではなく、上記の避難時間比を考慮することが有効であると考えられる。

今後、本解析モデルに基づく時間的な氾濫域の拡大を考慮に入れ、避難開始時刻の違いによる避難経路・避難時間について検討することで、より実用的な避難計画作成ツールの構築が可能になると考えられる。

5. 結論

本研究では、岡山市南部地域を対象に南海トラフ地震津波を想定した氾濫解析および避難時間の検討を行った。以下に、本研究より得られた主な結論を示す。

1. 液状化による堤防沈下を想定した氾濫解析を行ったところ、津波到達前までに海岸線より約 1.5 km の領域まで浸水することが明らかとなった。
2. 湾口での最大波高は 2.2 m 程度であるが、同等の津波が計 5 回到達することで、浸水領域は地震から 8 時間後まで拡大することが明らかとなり、岡山市では最大波高ではなく水位上昇の長期化による浸水被害を考慮した避難計画の立案が重要であることが示唆された。
3. 氾濫解析結果に基づく歩行速度減衰モデルにより、避難経路および避難時間について検討した結果、浸水によって避難時間が平均 1.6 倍、最大で 28 分増加することが明らかとなった。
4. 1 から 3 の結論より、本研究で用いた市街地レイアウトを考慮した氾濫解析モデルは、浸水を考慮した避難計画の検討に有効なツールであることが示された。

謝辞：本研究は八雲環境科学振興財団の環境研究助成(特定研究)を受け遂行した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版），2012。
- 2) 岡山市，津波ハザードマップについて【平成 25 年 8 月作成】，URL:http://www.city.okayama.jp/soumu/bousai/bousai_00180.html。
- 3) 岡山県危機管理課，南海トラフ巨大地震による震度分布図・液状化危険度分布図について，URL:<http://www.pref.okayama.jp/page/308887.html>。

- 4) 工代健太，吉田圭介，前野詩朗：南海トラフ巨大地震を想定した岡山市の津波遡上解析，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.70，No.2，I_289 - I_294，2014。
- 5) 赤穂良輔，石川忠晴，畠山峻一，小島崇，都丸真人，中村恭志：岩手県釜石市街地における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の氾濫解析，土木学会論文集 B1(水工学)，71(1)，16-27，2015。
- 6) 有川太郎，大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレータによる避難行動特性についての検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.71，No.2，I_319-I_324，2015。
- 7) 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，浜口憲一郎，陳志軒：水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討，水工学論文集，Vol.39，1995。
- 8) 水野力斗，二瓶泰雄：様々な環境条件下における水害避難時の歩行速度に関する実験的検討，土木学会論文集（水工学），Vol.72，No.4，2016。
- 9) 目黒公郎，織田浩平：津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発，生産研究（研究速報）57 巻 4 号，2005。
- 10) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について—，2012。
- 11) 岡山市，町丁別，男女・年齢別住民基本台帳(平成 28 年)，URL:http://www.city.okayama.jp/kikaku/kikaku_00304.html。
- 12) Roe, P. J. : Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, *J. Comput. Phys.*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981。
- 13) 赤穂良輔，石川忠晴，張秋松：半透過建物群モデルを用いた釜石市街地の津波氾濫解析，日本流体力学会年会，2015。
- 14) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室，国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：津波浸水想定設定の手引き，Ver.2.0，2012。
- 15) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編—液状化可能性，沈下量について—，2012。
- 16) 工代健太，前野詩朗，赤穂良輔，吉田圭介：南海トラフ地震下の鳴門・明石海峡部の津波波形を用いた岡山市に襲来する津波の予測モデルの検討，水工学論文集，第 60 巻，2016。

(2016.3.16 受付)

STUDY OF EVACUATION TIME CHARACTERISTICS COUPLED WITH NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI IN OKAYAMA CITY

Ryosuke AKOH, Shiro MAENO, Yoshitake TAKAHASHI,
Kenta KUDAI and Keisuke YOSHIDA

Southern part of Okayama city is a low elevation area and has a great risk of liquefaction. Therefore coastal dike may possible subside due to the Nankai Trough earthquake and inundation just after quake is supposed to occur. In this study, we predicted the process of inundation in Okayama city caused by the dike subsidence, using the tsunami simulator that reproduced the layout of the city area in detail. Furthermore, evacuation routes and time to designated evacuation sites were evaluated by using the walking speed under the flooding conditions. The results show that many evacuation routes are changed by the inundation on the roads and the evacuation time of senior person becomes 1.6 times on average. This suggests that it is important for the evacuation planning to consider the water depth and the flow speed on the road. The present model is useful to investigate the evacuation time characteristic under the inundation conditions.