高潮浸水を考慮した避難行動シミュレーションに基づく 避難場所の評価に関する研究†

久保 栞* 和田 光真* 吉田 秀典**

堀 宗朗*** 市村 強*** M.L.L. Wijerathne***

Study on Establishment of Evacuation Spot Based on Evacuation Simulation Considering Storm Surge Flooding

by

Shiori KUBO*, Mitsumasa WADA*, Hidenori YOSHIDA**,
Muneo HORI***, Tsuyoshi ICHIMURA*** and M.L.L. WIJERATHNE***

It is necessary to examine the establishment of new evacuation spot so as to minimize the human toll of flooding occurred by a storm surge. Thus, to begin with, two types of evacuation simulations which reflect the result of a storm surge analysis are conducted; one is conducted under the current evacuation planning and the other is done under the combination plan of an additional evacuation spots and the current plan. Secondly, the effect of the additional evacuation spots and the amount of time required for an evacuation completion are seized, and the proper location of an evacuation spot and the reasonable evacuation route are discussed. The additional evacuation spot removes the jam of agents around the evacuation spot and encourage the quick escape from their house to the evacuation spots around which the flooding occurs. Thereby, the completion rate of evacuation under the combination plan increases by 20% compared to that under the current evacuation plan, and 90% of agents could finish evacuating in a final stage. Therefore, it is found that the additional evacuation spot with considering the flooding occurred by a storm surge has a major effect on an evacuation behavior.

Key words:

Storm surge, OpenFOAM, Evacuation simulation, Multi-agent system

1 緒 言

2004年に発生した台風16号が中国地方に、また、23号が四国地方に上陸した際、高松市は高潮による浸水等、多大な被害を受けた。同年8月に発生した台風16号接近時、高松市では死者が2名、床上浸水が5,877棟、床下浸水が10,088棟と、それまでにない高潮被害がもたらされた¹⁾。このとき、避難勧告が発令された地域では、指定避難所が浸水したことによって避難が制限され、適切な避難行動が取れず、自宅で待機する住民が続出し²⁾、また、その後に大きな被害を出した地域においては避難勧告が発令されず、同様に、多くの住民が逃げ遅れた。このような状態を引き起こした原因として、台風16号が四国地方を通過した時間帯と大潮の満潮時刻、さらに激しい雨の時間帯が重なったため急激に潮位が上昇し、これによって、高松市沿岸地域一帯が短時間で浸水したことが挙げられる。しかし、このような状況でも、自宅等から離れたエリアでの避難状況や被害状況等を把握し、避難の判断を各自が迅速に行い、避難開始時間を早めて適切な避難行動を取っていれば、被害を最小限に抑えることができる。そのため、高潮が発生

した際には、沿岸部で浸水が始まってからどの程度の時間で自宅等まで浸水がせまって来るのかを知る必要があるほか、その際の避難行動の取り方についても再考の余地がある。実際、前述した台風16号接近時には、高松市において避難場所が浸水し、避難行動が制限されている。高松市における指定避難場所は、学校やコミュニティセンターといった既存の建物が大半を占めているが、指定にあたっては、過去の水災害に関する記録、地形、そして標高というようなデータを基にしていない。そのため避難場所であるにも関わらず浸水し、避難できない住民が発生するといった状況が散見される。このような状況を改善するために、近年では、東北地方太平洋沖地震による大災害などを踏まえ、避難場所の選定や避難経路の提示に関する研究がこれまで以上になされている。高橋らは避難場所に到達するまでの安全な避難経路を選定するシステムを構築し、適切な一時避難場所の選定を行っている³⁾。このシステムにおいては、一時避難場所の選定にあたって、地形や地盤特性などを考慮しているが、地震による建物倒壊や水災害による浸水といった障害を考慮しておらず、適切な避難場所を選

† 原稿受理 平成29年7月10日 Received July 10, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 香川大学大学院工学研究科 〒761-0396 高松市林町
Graduate school of Engineering, Kagawa University, Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396.

** 正会員 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町
Faculty of Engineering, Kagawa University, Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396.

*** 東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032.

定と安全な避難経路の提示がなされているとは言い難い。また、南らは任意の位置から第一避難場所へ最短距離となる避難経路を容易に表示できる津波避難計画の支援システムを開発しているが⁴⁾、時々刻々と変化する浸水をシステムに反映していない。したがって、浸水によって道路が使用不可となった場合の避難経路の変更や、それによる避難の遅れに関して触れられておらず、このシステムによって提示された避難経路は災害時に使用できない恐れがある。そこで本研究では、高潮発生時における浸水解析を行い、得られた浸水状況を考慮に入れた避難行動シミュレーションを行う。その際、複数の避難場所を新たに設けたシミュレーションを加え、それによる避難経路の相違や避難完了に要する時間等を把握することで、適切な避難場所の配置や避難経路等を検討することを目的とする。

2 基礎理論

2.1 高潮浸水解析

高潮による浸水解析では、3次元流体力学ツールであるOpenFOAMを用いる。解析では、interFoamと称されるVOF法を用いた混相流解析ソルバに造波ソースを追加したihFoamを使用する。このソルバは、非圧縮性・非定常・等温の流体を対象としており、基礎方程式は以下のNavier-Stokes方程式、連続式、そして移流方程式である。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \mathbf{v}) + \nabla((1-\alpha)\alpha \mathbf{v}_c) = 0 \quad (3)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{v}$ は速度ベクトル、 p は圧力、 μ は粘性係数、 $\mathbf{F}$ は外力ベクトル、 t は時間、 $\mathbf{v}_c$ は液相と気相の相対速度ベクトル、そして α は体積分率である。また、高潮解析では前述の通りihFoamというソルバを使用して波を発生させるが、このとき造られる波による水面上昇高さ η と速度 $V(u,v,w)$ は以下の式によって定義される。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + k \frac{H^2}{4} \frac{3 - \sigma^2}{4\sigma^3} \cos 2\theta \quad (4)$$

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kz)} \cos \theta + \frac{3H^2 \omega k \cosh(2kz)}{4 \sinh^4(kh)} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$v = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kz)} \cos \theta + \frac{3H^2 \omega k \cosh(2kz)}{4 \sinh^4(kh)} \sin 2\theta \quad (6)$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(kz)}{\sinh(kz)} \cos \theta + \frac{3H^2 \omega k \sinh(2kz)}{4 \sinh^4(kh)} \sin 2\theta \quad (7)$$

ここで、 H は波高、 h は造波境界面における水深、 θ は波の位相、 u 、 v 、 w はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の流速を示す。 k は波の係数で、 $k = 2\pi/L$ である。このとき、 L は波長である。加えて $\sigma = \tanh(kh)$ とする。

2.2 避難行動シミュレーション

本研究では、避難行動シミュレーションについては、著者らの一部が開発した、避難行動シミュレータ⁵⁾を使用する。このシミュレータは、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, MAS)を採用している。MASでは個々の要素間相互作用のみをルール化することで、複雑な現象を再現することができる⁶⁾。例えば、避難時には、群集の集中による混雑が予想される。その際、エ

ージェントの歩行速度が遅くなることによって発生する追い越しや停止を表現するため、歩行速度といった運動能力のデータや、追い越しや停止の判断基準といった知性のデータを有するエージェントを用いる。

さらに、エージェントの種類としては、その土地をよく知る住民で、自ら避難場所へ避難するResident(住民)を使用する。エージェントは都市モデル内に乱数で配置しており、その全エージェントに平均速度を与え、さらに任意の標準偏差を用いることで、様々な歩行速度のエージェントを発生させる。このとき、対象地域における年齢・男女別人口データ⁷⁾を参考に、エージェントを年齢・性別で分類し、それぞれに対して異なった歩行速度を与えることで、解析対象エリアの地域特性を反映する。

また、使用する都市モデルに関しては、構造物等がある箇所はもとより、浸水解析によって得られた浸水深が一定値以上である区域も避難不可能区域としており、それ以外のエリアにおいてエージェントは避難行動が可能となる。なお、エージェントは初期配置から最も近い避難場所へ最短ルートを通って避難するよう設定しているが、構造物などの壁にぶつかった場合にはそれらに沿って移動し、浸水によって避難経路が塞がれている場合は浸水避けるように迂回して避難場所へ移動する。

3 高潮浸水時の浸水解析

3.1 解析対象エリアと解析メッシュ

本研究では、高松市木太町北部のうち、Fig. 1に示す2つの枠のうち外側の黒枠内における浸水解析を行う。解析領域において、2004年に発生した台風16号ならびに23号によって本エリア内で確認された最大浸水深が3.1mであったことから⁹⁾、解析領域の上面を下面(地表面)から10.0mの高さに統一する。解析領域の下面となる地表面については、細かな地形の起伏を再現し、解析の精度を向上させるために、国土地理院が提供している5.0m間隔の数値標高データを採用する。数値標高データのない海底面に関しては、高松港港湾計画図¹⁰⁾を参考に設定している。本データにおいて、地形を構成するための5.0m間隔で構成される東西・南北位置を示す座標を、メッシュを生成するためのノード(節点)とし、以下の式に示されるクーラン数 Co が0.3を上回らない

Fig. 1 Hazard map produced by Takamatsu city⁸⁾.

Fig. 2 Analysis area.

Liquid phase	Dynamic coefficient of viscosity (m ² /s)	1.00 × 10 ⁻⁶
	Density (kg/m ³)	1000
Gas phase	Dynamic coefficient of viscosity (m ² /s)	1.48 × 10 ⁻⁵
	Density (kg/m ³)	1
Surface tension coefficient (kg/s ²)		0.07
Acceleration of gravity (m/s ²)		9.81
Turbulence model		Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) model ⁽¹²⁾

Table 1 Analysis condition.

Fig. 3 Altitude in analysis area.

ように、 δt を自動調整する¹¹⁾。これによって、本解析ではおおむね5.0m×5.0m×1.0mの立体メッシュが構成されることとなる。

$$Co = \frac{\delta t |U|}{\delta x} \quad (8)$$

ここで、 δt は時間刻み、 $|U|$ はセルを通る流速の大きさ、 δx は流速方向のセルのサイズである。また、本解析では、上述した地表面（下面）と上面を有するような3次元の解析領域を用意して解析を行う（Fig. 2）。なお、高さが約1.0mを超える堤防は解析メッシュに反映している。また、本解析において対象とする液相、気相に関する諸条件や使用するモデルをTable 1に示す。さらに、解析領域の標高を、Fig. 3に示す。標高図と高潮浸水想定区域図を比較すると、浸水が予想されるエリアと標高の低いエリアが類似していることから、標高に依存して浸水が広がるのではないかと推測できる。

3.2 境界条件

各側面の境界条件については、数値標高モデルを反映させた下面は非流出境界面、上面は大気側境界面、そして海側にある北境界面は造波境界面、陸側にある南境界面は、流出境界面とする。このとき、造波境界面においては、あらかじめ入力する波の波高と周期、位相を設定する必要が

Fig. 4 Condition in flood (Time=2100s, 2700s).

ある。そこで本研究では、2004年に発生した台風16号接近時の状況を参考にする。台風16号接近時には8月30日22時過ぎに海面がT.P.2.00mとなり浸水が始まった¹³⁾。同日22時40分前後に最高潮位であるT.P.2.46mが確認され、その後は徐々に浸水範囲が拡大した¹³⁾。そこで本研究では、初期の海面高さをT.P.2.00mとして、60分間の浸水解析を行う。なお、波高（振幅）と周期は高松市における記載がないため、香川県の東部に位置する引田地区で観測された値を用い、それぞれ1.47m、11.50sとする¹⁴⁾。

3.3 高潮浸水解析の結果および考察

浸水解析結果のうち、浸水開始から2100秒後、2700秒後の浸水状況をFig. 4に示す。浸水開始から2100秒が経過した時点で、広範囲にわたって α 値が0.2を超えており、大半が浅い浸水である地域であることがわかる（Fig. 4, 左）。このとき、エリア中央部に周囲よりも α 値が低い区域があるが、こちらには避難場所1, 2があり、標高図（Fig. 3）からもわかる通り、周囲よりも標高がわずかに高くなっているため、このように周囲よりも浸水していない状態となっている。さらに、2700秒が経過すると、2100秒時点で浸水していた区域において、より α 値が高くなっており、浸水が増していることがわかる。先ほどと同様に、避難場所1, 2付近は周囲よりも浸水していないことがFig. 4（右）より見てとれるが、四方が浸水していることから、浸水開始から2700秒が経過した時点において、この避難場所へ避難することは困難となることが予想される。また、2700秒が経過した時点において木太海浜緑地周辺はさらに南側に位置する避難場所1, 2付近よりも、浸水が浅いことがわかる。これは、標高図（Fig. 3）より、木太海浜緑地を含む台形エリアはその南側よりも、標高が2.0～3.0m高いことから、標高の高い木太海浜緑地が防波堤のような役割を果たし、北側から流入した海水が、詰田川や春日川へ分散して流入した結果、堤防の低い詰田川や東西を流れる河川から陸側へ浸水し、このような浸水状況となったのではないかと考える。また、本解析結果と高潮浸水想定区域図（Fig. 1）を比較すると、概ね一致している。

4 避難行動シミュレーション

4.1 解析対象エリアと解析条件

避難行動シミュレーションは、前章のFig. 1における

内側の黒枠内について行う。本解析における避難場所は、指定避難場所に指定されている構造物として計 4 ヶ所を選定した（前章，Fig. 1 黒丸地点）。

次に、本解析では、前述の通り Resident（住民）タイプのエージェントを、都市モデル内に 1500 人ランダムに配置する⁷⁾。このとき、エージェントは性別・年齢によって 6 つの種類に分類され、Table 2 に示すように、それぞれ異なる歩行速度を設ける¹⁵⁾。Table 2 において、各エージェントタイプの欄に記載している括弧内の割合は、高松市木太町における年齢・男女別人口データ⁷⁾であり、本解析でもこの値を各エージェントに用いている。また、災害時には群集行動をとることが予測されるため¹⁶⁾、歩行速度の標準偏差をそれぞれ Table 2 に示すように設定する。こうすることで、各エージェントに異なった歩行速度を与え、追いつきなどを適切に表現することが可能となる。なお、上述した通り、本解析においては、エージェントとして Resident を採用していることから、エージェントは初期配置から最も近い避難場所へ、最短ルートを通り、避難することとする。

また、本解析においては 2100、2400、2700 秒時点の浸水状況を避難行動シミュレーションの時間に対応するよう解析に反映させる。浸水状況を反映させるにあたっては、成人女性が歩行困難となる浸水深 0.5m を通行不可能となる基準とする¹⁷⁾。このとき、前章の浸水解析においてはメッシュ高さを 1.0m としているため、浸水解析結果において、液相の体積率である α 値が 0.5 以上の区域を通行不可とする。エージェントが浸水域に直面した場合、エージェントはその地点から最も近い避難場所へ最短ルートを通って避難する。その際、途中で浸水域があるかどうかは把握していないため、最短ルートを通って移動するものの、途中で再度浸水域に遭遇した場合、そこから最も近い避難場所へ最短ルートによる避難行動をとるものとする。

4.2 避難行動シミュレーションの解析結果および考察

避難行動シミュレーション結果のうち、避難開始から 1500 秒後、2400 秒後、3300 秒後の避難状況を Fig. 5, 6, 7 に示す。図において、通行可能箇所は薄い灰色、通行不可能箇所は濃い灰色、避難場所は白色、そして浸水している箇所は黒色とする。ここで、各図において、避難場所 1, 2 付近を約 2 倍に拡大した図をそれぞれ全体図の右側に示す。さらに、時間経過に伴う避難完了率を Fig. 8 に示す。なお、本解析に対してエージェントの配置のみを変えて解析を行ったところ、本解析と同様の結果が得られたため、本論文においては、そのうちの一例を記載している。本エリアは避難場所が 4 ヶ所あるにも関わらず、各避難場所が

Fig. 5 Evacuation condition (Time=1500s).

Fig. 6 Evacuation condition (Time=2400s).

Fig. 7 Evacuation condition (Time=3300s).

Fig. 8 Completion of evacuation v.s. time.

隣接していることから、避難場所は実質 2 ヶ所となり、それら 2 つの避難場所がある避難区域へエージェントがそれぞれ避難している。そのため、避難開始から 1500 秒が経過すると、避難場所付近では、エージェントが集中していることが Fig. 5 よりわかる。また、Fig. 6 より、避難開始から 2400 秒が経過すると急激に浸水が広がり、避難場所 1, 2 付近の道路の大部分が浸水し、約 180 人のエージェントがその浸水に巻き込まれて移動できない状態となっていることがわかる。Fig. 6 からは、避難場所 1, 2 へ避難しようとしたエージェントのうち、浸水に巻き込まれなかったが、移動を制限されたエージェントは、避難場所 3, 4 へ向かうために、新たな避難経路へ進み、それが浸水によって行き止まりになっていた場合には来た道を戻り、再度、異な

Table 2 Walking speed and standard deviation of agent.

	Average walking speed(m/s)	Standard deviation (m/s)
Boy (12%)	1.351	0.133
Girl (12%)	1.239	0.175
Adult male (26%)	1.328	0.098
Adult female (27%)	1.247	0.144
Elderly male (10%)	1.182	0.154
Elderly female (12%)	1.113	0.125

る避難経路を選択するという行動を繰り返していることもわかる。その後、避難開始から 3300 秒が経過すると、避難場所 1, 2 を中心とした半径約 120m の区域が浸水しており、2400 秒が経過した時点で未だそれらの避難場所付近にいたエージェントの大半は、浸水に巻き込まれ、移動できない状態となっている (Fig. 7)。このように、避難場所 1, 2 付近では、広範囲にわたって浸水することで、避難しようと移動してきたエージェントの大半が、その途中で浸水に巻き込まれてしまうという状態となっている。一方で、その南にある避難場所 3, 4 においては、河川の近くであるにもかかわらず、周囲はほとんど浸水していない。そのため、避難開始から 3300 秒が経過した時点においても、避難場所 1, 2 に避難できなかった一部のエージェントが避難場所 3, 4 へ移動していることがわかる。しかしながら、避難場所 1, 2 付近で浸水に巻き込まれたエージェントが非常に多いことから、開始から 9000 秒が経過した時点における避難完了率は 70%を下回っており、浸水がない場合では 6000 秒が経過した時点でほぼ全エージェントが避難を完了している点をふまえると、非常に低い避難完了率となっていることがわかる。

4.3 避難場所を新たに追加した場合における避難行動シミュレーションの解析結果および考察

上記の結果を踏まえ、Fig. 1 において示している A と B 地点に、新たに 2 ヶ所の避難場所を設け、避難行動シミュレーションを行う。1 ヶ所目は解析エリア北西部に位置し、津波避難ビルに指定されている商業施設 (以降、避難場所 A とする) である。高潮発生時には、避難勧告が発令されてから浸水が収まるまでに長い時間を要することから、前節のシミュレーションにおいては、被災する危険性がほぼ無くなるまで滞在が可能な場所として自治体が高潮に対して指定している箇所のみを避難場所とした。しかし、前節でも述べた通り、高潮に対して指定された避難場所だけでは避難できないエージェントが多数発生したことから、津波発生時に使用する津波避難ビルを高潮発生時にも使用することを想定し、本シミュレーションにおいて避難場所として選定した。さらに、避難場所 A は河川から非常に近い場所にあるが、前章における浸水解析において周囲よりも浸水がわずかであったことや、避難場所 1, 2 に北側から避難していたエージェントが浸水に巻き込まれていたことをふまえて設定する。さらに、2 ヶ所目は解析エリア中央部に位置する駅 (以降避難場所 B とする) である。前章において、避難場所 A と同様、避難場所 B 付近も避難場所 1, 2 と比較すると浸水していないことや、避難場所 1, 2 に南側から避難しようとしていたエージェントが多数存在したことを踏まえて設定する。なお、エージェントの初期配置や歩行速度などはすべて前節同様のものとする。

本研究においては、避難場所 A のみ、避難場所 B のみ、そして避難場所 A, B の両方を設けた場合の計 3 パターンのシミュレーションを行っているが、紙面も限られていることから、避難場所 A, B の両方を設けた場合のシミュレーション結果のみ以下に示す。避難場所を設けた場合のシ

Fig. 9 Evacuation condition
(Time=1500s, add two evacuation areas).

Fig. 10 Evacuation condition
(Time=2400s, add two evacuation areas).

Fig. 11 Evacuation condition
(Time=3300s, add two evacuation areas).

ミュレーション結果のうち、避難開始から 1500 秒後、2400 秒後、3300 秒後の避難状況を Fig. 9, 10, 11 に示す。先ほどと同様に、各図において避難場所 1, 2 付近を約 2 倍に拡大した図をそれぞれ全体図の右側に示す。さらに、本節における時間経過に伴う避難完了率は前節の Fig. 8 に併せて示す。避難場所を 2 ヶ所設けたことにより、避難場所追加前と比較すると、エージェントが分散して避難していることがわかる (Fig. 9)。また、避難開始から 2400 秒が経過すると、避難場所 1, 2 の周辺では広範囲にわたって浸水することから、避難場所追加前は多くのエージェントが身動きの取れない状態であったが、避難場所を新たに設けることで、避難場所 1, 2 へ西側から避難していたエージェントは避難場所 A へ、南東部からは避難場所 B へ避難することで、大半のエージェントが浸水に巻き込まれずに避難行動を取っている (Fig. 10)。さらに、避難場所追加前において、避難場所 1, 2 へ西側から避難し、浸水に巻き込まれたエージェントは避難場所追加後には浸水に巻き込まれることなく避難できている。そして避難開始から 3300

秒が経過しても、避難場所 A 付近は未だ浸水していないことから、この時点で避難し終えていないエージェントも徐々に避難場所 A へ避難している (Fig. 11). 避難場所 B 付近においても同様であり、その結果、9000 秒が経過した時点で避難できなかったエージェントは避難場所を追加していない場合と比較すると、約 300 人減少している。なお、避難場所 A と B のどちらか一方を設け、同様のシミュレーションを行った結果、避難完了率については非常に類似した推移が得られ、避難開始から 9000 秒後には避難場所を追加していないものと比較して約 10% 上昇した (Fig. 8). つまり、これらの避難場所は避難完了率に対して同程度の効果を有しているため、両避難場所を設けることで、追加しない場合と比較すると、浸水があるにも関わらず避難完了率は約 20% 上昇し、最終的に 90% 以上の避難完了率となった。以上のことから、浸水状況を考慮して選定したこれら 2 つの避難場所は、本解析対象エリアにおける避難行動に大きな影響を与えることが判明した。

5 結 言

高潮発生時には、適切な避難行動をとるために、浸水到達時刻やその範囲を予測する必要がある。さらに、浸水によって多くの犠牲者が発生することが判明した場合には、新たな避難場所の設置を検討する必要がある。そこで本研究では、まず、高潮浸水解析を行い、その結果を反映させた避難行動シミュレーションを行った。次に、浸水解析結果を考慮して新たに避難場所を追加し、前者と同様の避難行動シミュレーションを行った。

高潮浸水解析においては、浸水が標高に依存するため、沿岸部よりも標高の低い内陸部が存在する場合、そこではより深い浸水深となることが判明した。また、標高の低い内陸部においては、浸水が開始するとその後急激に浸水域が広がり、広範囲にわたって歩行不可能な状態となることが判明した。

避難行動シミュレーションにおいては、標高が低く、浸水しやすいエリアに避難場所が存在したため、多くのエージェントが避難場所の 100~200m 手前で浸水に巻き込まれた。また、本解析で対象としたエリアにおいては、避難場所が隣接していることに起因して、エージェントが密集し、混雑することで避難に時間を要するだけでなく、多くのエージェントが高潮に巻き込まれてしまうことが判明した。そこで、浸水状況を考慮して新たに避難場所を 2ヶ所追加し、同様のシミュレーションを定義した。その結果、避難完了率は避難場所を追加する以前と比較すると大幅に上昇した。このことから、避難場所の追加設置は有効であることが判明した。しかしながら、本解析は Resident という単一エージェントで行っているため、今後は災害弱者や自家用車利用者といった複数のエージェントを用いてシミュレーションを行う必要がある。

参 考 文 献

1) Kagawa prefecture, "The historical records of inundation: The flooding damage caused by storm surge which is generated by

typhoon No.0416", http://www.pref.kagawa.lg.jp/kasensabo/kasen/02_suigai/index.html (accessed 2017-10-19).

2) T. Suzuki, "Damage and restoration of houses and public utilities in Takamatsu caused by storm surge inundation of typhoon No.0416", Technical note of national institute for land and infrastructure management, No.268, pp.1-6 (2005).

3) M. Takahashi, H. Imanishi, K. Abe, "A study on the selection of refuge facilities using GIS in local plan for disaster prevention", Papers of the 32th Tohoku Branch of Japan Society of Civil Engineering, CD-ROM, IV-53 (2013), Japan Society of Civil Engineering.

4) M. Minami, A. Ando, R. Akatani, "Tsunami disaster evacuation planning considering with vertical drop of the evacuation route", Papers of the 32th Research Meeting on Civil Engineering Planning, 216, (2005), Japan Society of Civil Engineering.

5) M. Hori, Y. Inukai, K. Oguni, T. Ichimura, "Study on developing simulation method for prediction of evacuation process after earthquake", Sociotechnica, Vol.3, pp.138-145 (2005).

6) K. Wadanabe, A. Kondo, "Development of tsunami evacuation simulation model to support community planning for tsunami disaster mitigation", Journal of architecture, planning and environmental engineering, Vol.71, No.637, pp.627-634 (2009).

7) Takamatsu city, "Population classified by age and sex", <https://www.city.takamatsu.kagawa.jp/7729.html> (accessed 2017-10-19).

8) Takamatsu city, "An area expected to be flooded by storm surge in Takamatsu", <http://www.city.takamatsu.kagawa.jp/takamatsu-bosai/pdfmap/takasio.pdf> (accessed 2017-10-19).

9) T. Tomita, K. Honda, H. Kawai, T. Kakinuma, "Damage in Takamatsu by storm surge inundation of typhoon No.0416", Proceedings of Coastal Engineering, Vol.52, pp.1326-1330 (2005).

10) Kagawa prefecture, "Port planning map in Takamatsu", http://www.pref.kagawa.jp/kowan/ports/map/big/01_takamatsu.pdf (accessed 2017-10-19).

11) D. Tomihara, Y. Takagi, "Analysis of milk crown formation by using the adaptive mesh refinement of OpenFOAM", Proceedings of the 25th symposium on computational fluid dynamics, Vol.31, pp.175-179 (2012).

12) Y. Kawasaki, H. Nakao, K. Izuno, "Multi-phase flow analysis of tsunami forces and associated pressures on a rectangular-section bridge girder", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A1, Vol.71, No.2, pp.199-207 (2015).

13) Y. Oikawa, M. Mukaitani, "Characteristics of Human Behavior in High Tide Disaster by Typhoon 0416 and 0418", Papers of Research Meeting on Civil Engineering Planning, Vol.31, CD-ROM, 179, (2005).

14) F. Kato, S. Inagaki, K. Noguchi, M. Hukuhama, "Coastal disaster in 2004", Technical note of national institute for land and infrastructure management, No.273, pp.9-10 (2005).

15) Oberg, T. Karsznia A, Oberg. K, "Basic gait parameters: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age, Journal of Rehabilitation Research and Development" Vol.30, No. 2, pp.210-223 (1993).

16) J. Kiyono, F. Miura, K. Takimoto, "Simulation of emergency evacuation behaviour during disaster by using distinct element method", Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.537, pp.233-244 (1996).

17) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Guide to making figure of expected inland inundation area", pp.11-12 (2015).