

## 銚子マリーナ周辺地域における津波に対する 避難行動シミュレーション

### Evacuation Behavior Simulation for Tsunami in Choshi Marina Area

熊倉 宏晃・山口 裕基・戸田 和之

Hiroaki KUMAKURA, Yuuki YAMAGUCHI and Kazuyuki TODA

東北地方太平洋沖地震に伴う津波では、東日本の沿岸部のみならず千葉県の銚子市にも被害をもたらした。銚子マリーナに隣接する千葉科学大学に於いても、海に面した立地条件が災いし大きな被害を受けた。このため、2014年度に新設された看護学部棟は、津波来襲時の一時避難場所としての活用も想定して設置された。大学関係者のみならず周辺地域からの避難者の利用も見込まれ、有効な避難経路を事前に調べておくことは有意であると考えられる。本研究は千葉科学大学を含む銚子マリーナ周辺地域を対象とし、津波に対する有効な避難経路を検討するものである。水理実験を用いた浸水予測とコンピュータシミュレーションによる避難行動予測を照らし合わせることで、大学キャンパスを避難経路として利用することの有効性を示す。

#### 1. 諸 言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、地震の規模が予想を大きく上回るMw 9.0であった。これは1900年以降に発生した地震では世界でも4番目の大きさであり、日本の観測史上では最大のものである。また、この地震の影響により大規模な津波が発生し、海岸から6 km内陸部まで浸水した。この地震における津波の高さは岩手県三陸南部、宮城県、福島県浜通りでは津波高が8 m～9 mに達し、最大遡上高が岩手県大船渡市で40.1 mを記録するなど、震源域に近い東北地方太平洋岸では地震による被害よりも津波が甚大な被害をもたらした。さらに、太平洋の広い範囲に津波が到達し、日本国内に留まらず太平洋に面している多くの沿岸地域で被害が発生した。

連絡先：戸田和之 ktoda@cis.ac.jp

1) 千葉科学大学危機管理学部工学技術危機管理学科

*Department of Engineering Technology for Risk and  
Crisis Management, Faculty of Risk and Crisis Man-  
agement, Chiba Institute of Science*

(2014年9月30日受付, 2015年01月13日受理)

千葉県における津波被害も無視できるものではなく、北東部に位置する銚子市もその例外ではなかった。気象庁の発表では銚子市の津波高は2.4 mとされているが、これは検潮儀が設置してある銚子漁港付近の値であり、千葉科学大学のある銚子マリーナ地区には4 m強の浸水高が観測された。このため、千葉科学大学のマリーナキャンパスに2014年度新設された3階建ての看護学部棟は、津波が発生した際の一時避難所としての活用も想定されており、銚子マリーナ周辺に高い建物が少ないことより、本学関係者のみならず、周辺地域からの避難者の利用も考えられる。しかし、キャンパス内の地形を知らない避難者がどのような経路で看護学部棟や高台へ向かうのか、行動予測の根拠となるデータはない。そこで本研究では津波に対する大学関係者、銚子マリーナを訪れる観光客、及び近隣の勤務者が、千葉科学大学のマリーナキャンパス内を避難経路として利用した場合とそうでない場合の人的被害を予測するものである。

まず、水理実験を実行し津波高に対する銚子マリーナ周辺地域の浸水状況を見積り、つづいて、コンピュータシミュレーションを利用して、避難者の行動予測を行う。これら2つの結果を照らし合わせることで、避難路としてのマリーナキャンパス利用の有効性を調べる。

## 2. 浸水予測実験

津波による浸水予測実験では、水槽内に銚子マリーナ周辺地形の模型を設置し、様々な津波高に対する各地点での浸水深の測定を行った。

### 2. 1 対象領域と模型縮尺の決定

模型の作製に先立ち、対象領域と模型の縮尺を決定する必要がある。銚子マリーナ地区は南西方向が海に面しており、海岸の北西端は屏風ヶ浦に接している。屏風ヶ浦は標高が十分に高いため、この場所が浸水する可能性は極めて低い。従って、標高が低く水深の浅い銚子マリーナ海水浴場の北西端にある突堤から、南東方向には千葉科学大学の本部キャンパスまでを対象領域とした。これにより北西－南東方向に実スケールで1207mが対象領域となった。この領域を水槽に入れる必要があるが、既定条件として水槽幅の1100 mmがある。模型の固定具を挿入する都合上、模型幅を1060 mmとしたため、水平方向の縮尺は1/1140となった。また、北東－南西方向は、裏山の高台（標高16 m）から銚子マリーナの防波堤が全て収まるよう水深5 m地点までとした。これにより、沖側は海底のため曲線となるが、実スケールで約1000 mが対象領域となった。本実験で対象とした領域を図1に示す。

鉛直方向の縮尺は、レイノルズ数の違いによる粘性効果の増大を抑えるために、限界値に近い1/100とした。このため、作製した模型は水平方向に対して鉛直方向が11.4倍大きな形状となった。

### 2. 2 形状データの作成

模型の作製に際しては、最近注目を浴びている熱溶解

積層方式の3Dプリンタを用いることとした。熱溶解積層方式のプリンタでは、マイナス角の斜面は形成できない。また、10 cm以上のモデルの造形は、縮小や反りが発生してしまい著しく形状精度が低下してしまう。これらを考慮し、建築物と地形は分けて作製することとした。

3Dプリンタを用いるには、STL形式の形状データが必要となる。建築物に対するSTLデータ作成には、3D-CADソフトであるSolid Worksを利用した。千葉科学大学内の建築物は大学が保有している建築図面を参考に3Dモデルを作製しSTL形式で出力した。大学周辺の工場や銚子マリーナ事務所に対しては詳細な設計図の入手が困難であったため、国土地理院が公開している基盤地図情報、Google Earth、及び実測を基に3Dモデルを作製した。

海底を含む地形データの作成では、地上部は国土地理院のホームページからダウンロードが可能な5 mメッシュ数値標高モデルを、海底部は海上保安庁の航海用海図を利用した。地形データの作成手順を以下にまとめる。

- ①オリジナルではGIS形式の5 mメッシュ数値標高データを、コンバーターを用いて経緯度と標高が並んだASCIIデータに変換する。
- ②デジタイザを用いて紙面媒体の海図から水深を読み取り（約500点）、経緯度と水深が並んだASCIIデータを作成する。
- ③対象領域に1000×1000点の経緯度メッシュを作成し、標高と水深の両データからメッシュ点位置の標高（水深はマイナス値として標高に統合）を線形内挿法により求める。
- ④経緯度を、GRS80楕円体を用いてデカルト座標系へと変換した後に、回転・並進移動を行い対象領域に一致させる。
- ⑤水平方向を1/1140倍に、鉛直方向を1/100倍に縮小させる。

これらの作業により、(x, y, 標高)のASCIIデータが作成されるが、この時点ではx-y方向が1060 mm×100 mmのデータであり、このままではSTL形式に変換してもサイズが大きすぎるため、3Dプリンタでは出力できない。また、模型の高さが210 mmとなるため浮力が増大してしまい水槽への強固な固定が必要となる。さらには、造形体積が大きいため多大な材料消費と膨大な造形時間を要してしまう。そこで、地形模型に関しては、x-y方向をそれぞれ10分割し（計100分割）、さらに、厚さ3 mmの表面のみを3Dプリンタで造形することとした。なお、上記手順の③～⑤、及び模型を100分割して厚さを3 mmにする一連の作業は、Fortran言語を用いてプログラムを作成し、自動で処理を行わせた。最後に、ASCIIデータをSTL形式に変換する必要があるが、これにはMicorAVSという可視化ソフトを利用した。

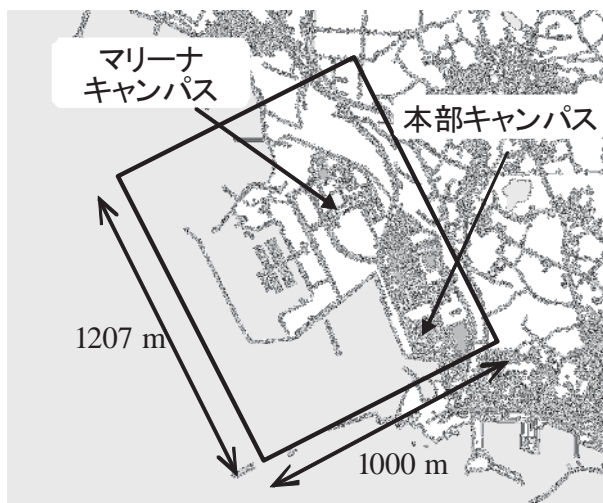


図1 実験対象領域

### 2. 3 模型の作製

前節で説明したSTL形式の形状データを3Dプリンタに読み込ませ、模型パーツを造形させた。建築物パーツが約50個、地形パーツが100個で、1個当たりの造形に3時間程度を要したため、全てのパーツを造形するには莫大な時間が必要となった。図2は100分割された地形のうち、防波堤付近を造形している様子である。マテリアル（熱溶解積層型プリンタの材料のこと）の積層厚を0.5 mmと設定したため、実スケールでの精度は水平方向に0.57 m、鉛直方向に0.05 mとなる。これは、航空レーザ測量による国土地理院の標高データの精度が水平方向に1 m、鉛直方向に0.3 mであることより、十分な精度が確保されていると考えられる。

全体模型の作製に際しては、まず、模型よりも左右に10 mm大きな木製合板を土台として用い、その上面に0.1 mm精度で長さを調節した塩化ビニル管を接着した。この管の上部に地形パーツを接着するが、模型を沈める際に管内に密閉された空気によって発生する浮力を抑えるため、管上端と下端の側面に空気抜き穴を開けた。各地形パーツが滑らかに繋がっていても、多くのパーツを

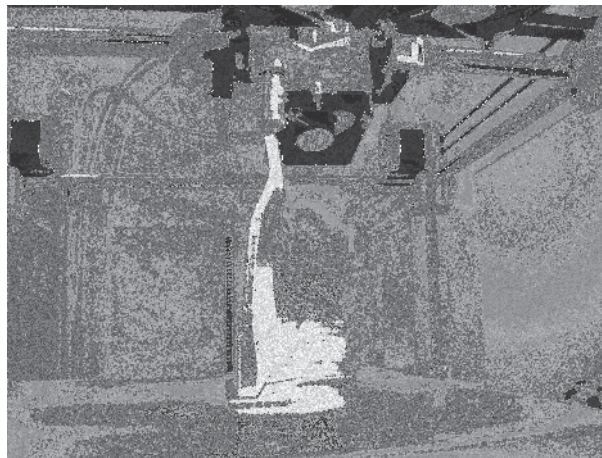


図2 3Dプリンタによる造形



図3 完成模型（マリーナ地区）

繋ぎ合わせるとひずみがどこかに溜まってしまい、その部分に隙間や段差が生じてしまう。また、地形データには建築物の部分にも起伏があるため、このままでは建築物が水平に設置できない。そこで、地形パーツ同士の接合面や建築物との接着面をハンドルータで研磨し、エポキシパテと樹脂粘度を用いて整形した。さらに、実験時に基準水位や水面の観察が容易になるよう、模型表面の陸域、水域、建築物には異なる色を塗装した。完成した模型を図3に示しておく。

### 2. 4 実験方法

実験装置の概略を図4に示す。津波を模した波によって模型が浸水する過程を3台のカメラで撮影し、画像解析により津波高と浸水データを取得することとした。

水槽内への模型の設置に先立ち、浸水深の計測位置に目盛りを振った細い柱を取り付けておく必要がある。計測位置は避難ルートと考えられる6箇所を選択した。

#### ポイント1. カフェマリーナ前

浸水が早く、海水浴場からの避難者が集中する可能性が高い。

#### ポイント2. 危機管理学部棟前

カフェマリーナからの距離は短いが高低差が4 mある。

#### ポイント3. 看護学部棟前

避難所として活用される可能性が高い。

#### ポイント4. マリーナキャンパス通用口前Y字路

本部キャンパスや大学周辺地域の避難者が通過する。

#### ポイント5. 本部キャンパス前

浸水が早く本部キャンパス内に多くの学生が存在する。

#### ポイント6. マリーナキャンパス裏の坂道の中腹

看護学部棟内を通過する新設予定の避難経路。

これら6つの計測ポイントを図5に示す。計測用の目盛の間隔は、動画から読み取ることを考慮して2 mmとした。鉛直方向のモデルの縮尺が1/100であるため、実スケールに換算した浸水深の測定精度は0.2 mということになる。

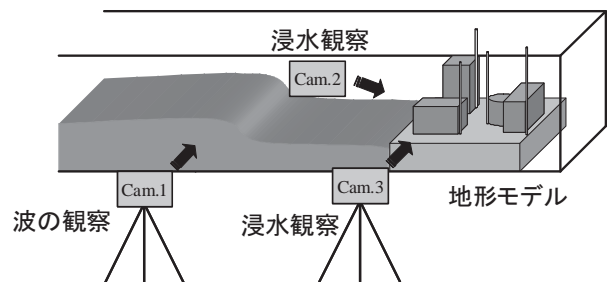


図4 実験装置模式図



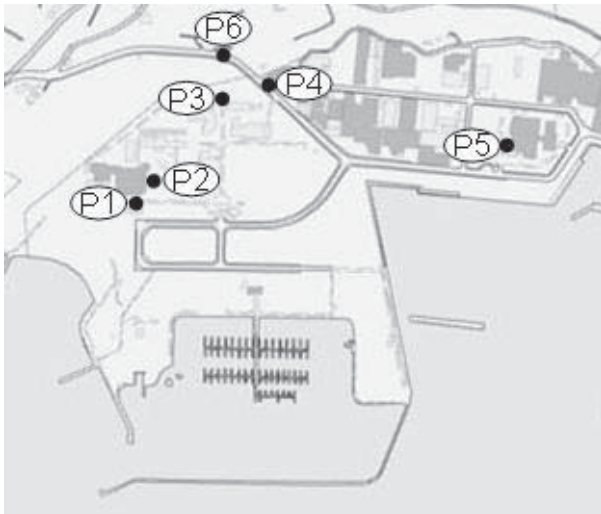


図5 計測ポイントの配置

つづいて、目盛りを配した模型を幅1.1 m×長さ16 m×高さ1.2 mの水槽内に設置した。このとき、波力や浮力によって模型が動かないように固定する必要がある。このため、土台上部の塩化ビニル管の隙間にブロックの錘を載せ、さらに左右10 mmの隙間に質量の大きな鉄板を置き、土台を水槽に押さえ付けた。土台として用いた木製合板の厚み15 mmを考慮して水槽底面から65 mmの水位まで注水し、さらに、計測を容易にするため、水を乳白色に着色した。

前述の6つの計測ポイントを撮影するには、2台のカメラが必要であった。ポイント1～3は水槽内の模型正面に設置したカメラで、ポイント4～6は模型の右側から水槽側面のアクリル窓越しに撮影した。これら2台のカメラの同期はライトの点灯で行った。波が防波堤に到達した時点でライトの照射を開始し、この時点をも0 sとして浸水時間を求めることとした。到達する波が津波として有意な波形となっているかを調べる目的で、到達前の波の測定用に単独のカメラをさらに1台用意した。水槽側面に格子状の目盛りを取り付け、波の高さと速度を計測した。なお、波の計測位置の水深は65 mmである。浸水深計測用の目盛りを解像するため、動画の画素数を1920×1080とした。フレームレートは30 frame/sで、これは実時間に換算すると3.8 s間隔のデータに相当するため、時間的にも十分な解像度を持つと考えられる。

## 2. 5 実験結果

浸水実験は様々な波高で計36回行った。これらの中から津波として有意な波を選定する必要がある。そこで、図6に示すように、本実験より得られた波速(波の位相速度)と波高の関係を、浅水長波理論より求まる式(1)と比較した。

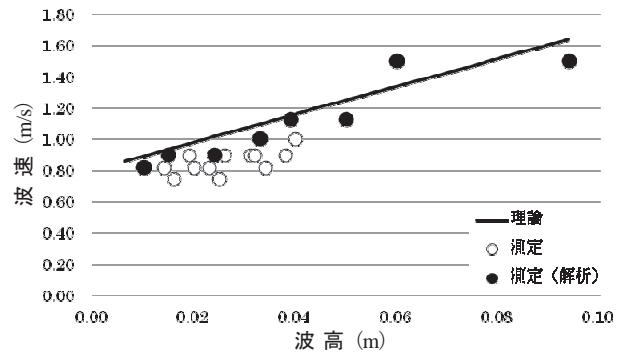


図6 波高と波速の測定値

$$C = \sqrt{g \left( 1 + \frac{H}{D} \right) \left( D + \frac{H}{2} \right)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C$ は波速、 $g$ は重力加速度、 $H$ と $D$ はそれぞれ波高と水深である。図より分かるように、黒丸で示したデータが比較的理论値に近い。そこで、これらの8ケースを有意データとみなし、画像解析データとして採用することとした。

解析を行うに際し、模型スケール(模型実験におけるスケール)と実スケールを、フルード数を用いて換算しておく必要がある。 $C$ 、 $Z$ 、 $T$ を模型スケールにおける波速(位相速度)、鉛直距離、時間とし、これらに対応する実スケールにおける値を $c$ 、 $z$ 、 $t$ とおくと、本実験における換算式は次の関係となる。

$$c = 10C \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$z = 100Z \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$t = 114T \quad \dots \dots \dots (4)$$

これらに加え、津波高の定義には異なった換算が必要となる。津波の高さは水深によって変化するため、来襲する津波高を示すには水深を規定する必要がある。気象庁では水深1 mにおける津波高を発表しているため、本実験でもこれに従うこととした。まず、実験における水深65 mmと、この位置で得られた津波高を、式(3)の関係を用いて実スケールに換算する。次に、グリーンの関係式(5)を用いることにより、実スケールにおける水深1 m地点の津波高が求められる。

$$\frac{h_2}{h_1} = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $h$ と $d$ は津波高と水深であり、添え字は水深の異なる2つの地点における値を表している。以降の実験結果は、これら実スケールにおける津波高と時間で表す

こととする。

有意データとして採用した実験結果のケース番号と津波高を表1にまとめる。

表1 有意データの津波高

| ケース番号   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 津波高 (m) | 1.6 | 2.4 | 3.8 | 5.3 | 6.2 | 8.0 | 9.6 | 15.0 |

これら8ケースに対して、撮影した動画を15フレーム毎(実スケールで0.95分)に目盛を読み、測定ポイントの浸水深と時間を読み取った。

津波高1.6 mのケース1では、局所的には若干の浸水が見られたものの、計測ポイントでの浸水が測定されなかった。このことより、銚子マリーナ地域では津波高1.6 m程度から浸水が開始すると考えられる。その他の7ケースの結果を図7にまとめる。ケース2の結果を見る

と、津波高2.4 mでカフェマリーナや本部キャンパスにおいて浸水深が30 cm以上に達しており、すでに避難が困難な状況にあることがわかる。さらに、多くの避難者が通過するであろうポイント4のY字路においても浸水が開始しており、安全な避難のためには、津波が到達してから3分以内にこの地点を通過する必要があると考えられる。ケース3の津波高3.8 mでは、まだマリーナキャンパス裏の坂道までは浸水していないが、ケース2で浸水が見られた3箇所の浸水深が急激に増加していることが分かる。本部キャンパスでは、津波到達後6分30秒で浸水深が1 m近くに達しており、この時点に至っては校舎2階への避難しか方法がない。また、マリーナキャンパスより東にいる避難者が全員通過するであろうY字路では、津波到達後4分で60 cmの浸水に達しており、避難路として通過することは完全に不可能である。標高6 mに建てられている危機管理学部棟が浸水を始めるのは、

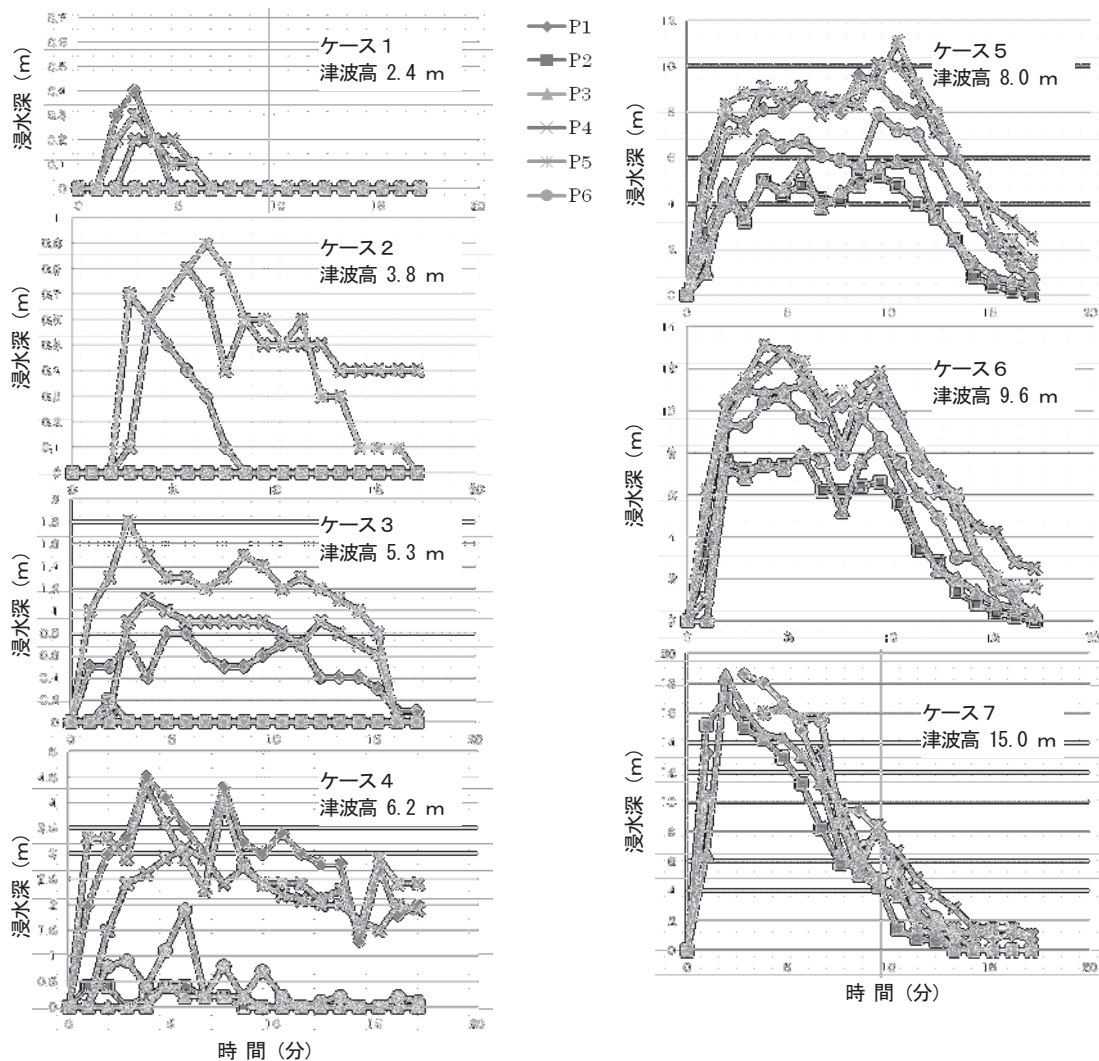


図7 浸水深の経時変化

ケース4の津波高5.3 mからであるが、浸水時間も量も小さいことより、避難や設備に支障をきたす程ではないと考えられる。ケース5の津波高6.2 mを超えると、マリーナキャンパス裏の坂にも3分以内に浸水深が80 cmに到達する。この時点で銚子マリーナ地区の全避難者は、高台への避難が不可能となり、マリーナキャンパス内のみが避難可能な場所となる。ただし、マリーナキャンパス内も場所によっては50 cmの浸水に達しており、移動には細心の注意が必要であろう。ケース6の津波高8.0 mを超えるとマリーナキャンパス内の移動も不可能となるが、看護学部棟の屋上は地面から約9 mの高さにあるため、この場所への避難は有効である。ケース7の津波高9.6 mでも看護学部棟の屋上は辛うじて浸水しないが、この辺りが限界値と考えられる。

### 3. 避難行動シミュレーション

水理実験によって、避難経路における浸水深と時間のデータは得られたが、実際にはどれほどの人数がどの経路を通り、何分程度で避難するかは不明なままで、現時点では被害予測を立てるには至らない。そこで、コンピュータシミュレーションを利用して、銚子マリーナ地区における津波避難者の行動予測を行うこととした。

シミュレーションソフトにはマルチエージェントシミュレーションが可能な構造学研究所のartisoc 3.0を使用した。このソフトは自律的に動作する複数の主体(エージェント)から構成されており、エージェント各々が外部環境を認識して自身の持つ行動条件に基づいて自律的に行動する。さらに、個々のエージェントが相互干渉することによって、群集がある秩序をもって行動する。すなわち、シミュレーションを実行するには、避難者の初期配置・目的地・障害物を規定し、さらに、障害物に接した場合や避難者同士の相互干渉を考慮した行動条件をプログラミングする必要がある。artisocはプログラムの実行結果をグラフや可視化で示してくれるソフトである。後節では、これらの設定条件に関して説明を行う。

#### 3. 1 シナリオ設定

本シミュレーションは津波来襲時に看護学部棟に避難して来る大学関係者、及び銚子マリーナ海水浴場付近等の本学周辺地域を対象としている。そこで、避難要因を津波、避難目的地を高台へと繋がる道と看護学部棟の2箇所とした。避難者の人数に関しては、①周辺の工場には作業員が存在、②大学における講義の有無、③銚子マリーナにおけるイベントの有無、④海水浴客の有無を考えた。さらに、観光客等の大学関係者以外の避難者が、誘導標識によりマリーナキャンパス内を避難路として利用する場合としない場合の2ケースを想定した。

#### 3. 2 人数調査

大学内の人数については、教務課より提供されたデータを基に、最も講義出席者の多い日程の出席者数と教職員数の合計値とした。海水浴客とイベントへの来客者数は銚子市観光協会からデータを頂いた。海水浴客は2012年シーズンの1日の平均利用者数を採用した。イベントとしては、最も来客者の多い「きんめだいまつり」を取り上げ、来客者が1時間滞在すると仮定して人数を導いた。さらに、周辺の勤務者に対しては、聞き取り調査により従業員数を教えて頂いた。これらの調査結果を表2にまとめる。なお、シミュレーションの実行においてはこれらの人数が初期条件となるが、図8に示すように、大学関係者や周辺勤務者は建物の出入口に、海水浴客や「きんめだいまつり」の来場者は開催領域内にランダムに配置させた。

表2 人数調査結果

|                    |        |
|--------------------|--------|
| 大学本部キャンパス (水1時限)   | 475 人  |
| 大学マリーナキャンパス (金2時限) | 498 人  |
| 海水浴場 (1日平均)        | 358 人  |
| きんめだいまつり (1時間平均)   | 6250 人 |
| 周辺勤務者 (従業員数)       | 400 人  |

#### 3. 3 行動条件の規定

避難者の進行方向の規定にはポテンシャルモデルを用いることとした。対象領域内に仮想のポテンシャルマップを用意し、避難者はポテンシャルの低い方向へと移動することになる。ポテンシャルマップの作成には式(6)で示されるラプラス方程式を用いた。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

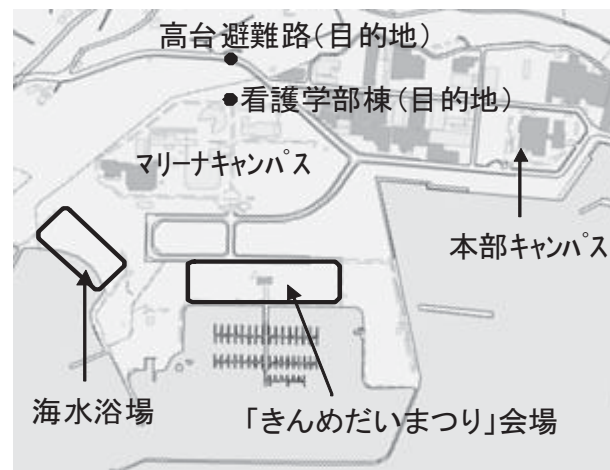


図8 避難者配置



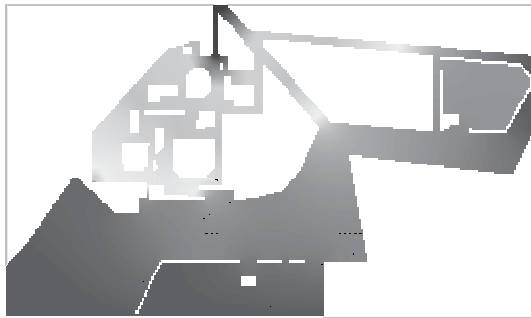


図9 ポテンシャルマップ

ここで、 $\phi$ はポテンシャル値、 $x$ と $y$ はデカルト座標系である。ポテンシャルマップ作成のための計算手順を以下に記載する。

- ①対象領域を一辺が2 mの正方形セルに分割する。
- ②避難要因である海に接するセルを高ポテンシャルに、看護学部棟入口と高台へと繋がる道（浸水実験におけるポイント6の地点に相当）を避難目的地とし、これら2箇所に相当するセルを低ポテンシャルに固定する。
- ③建物や塀等の通行できない場所を障害物とし、該当するセルを選定する。

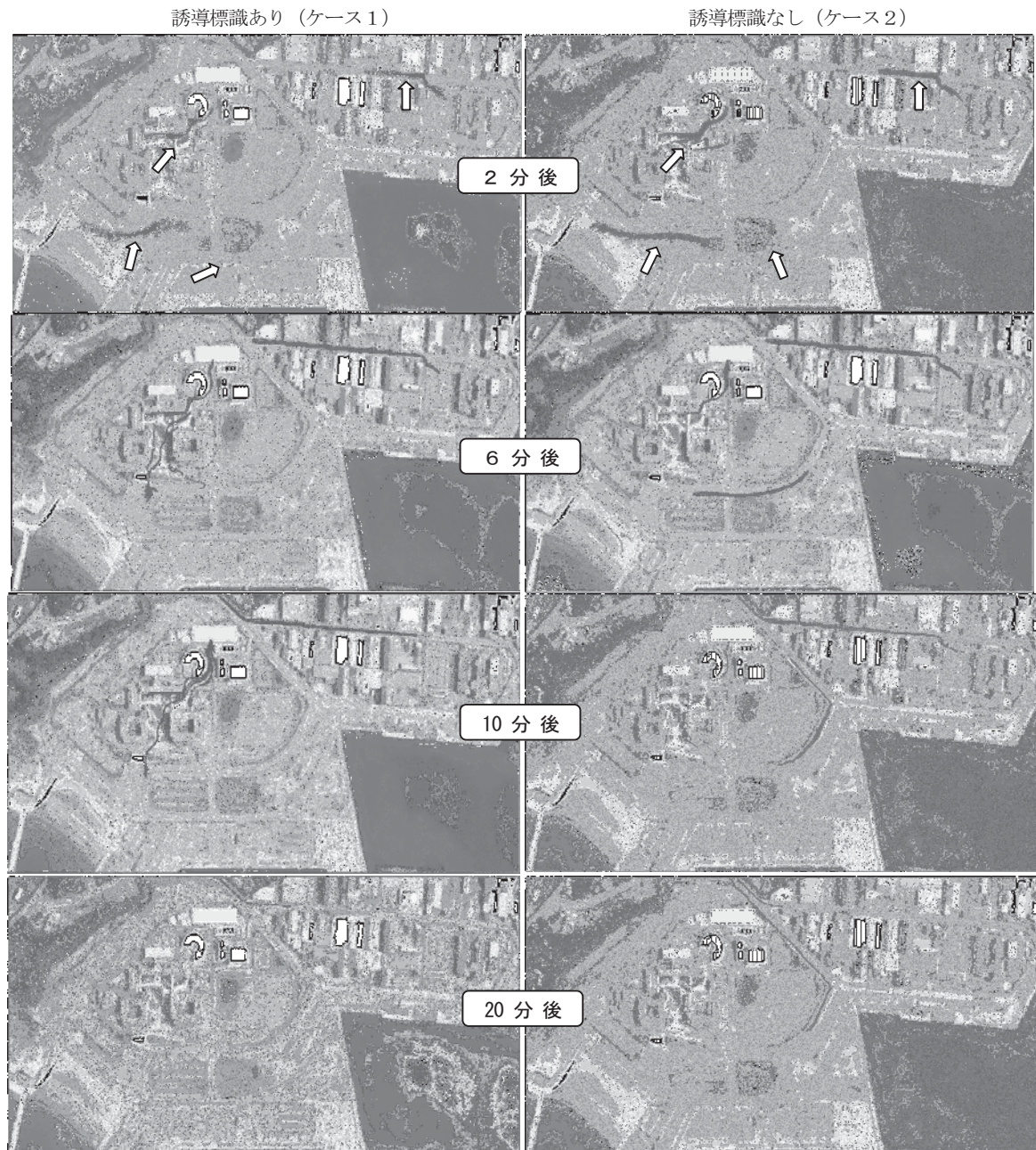


図10 避難者の行動比較（海水浴＋講義）

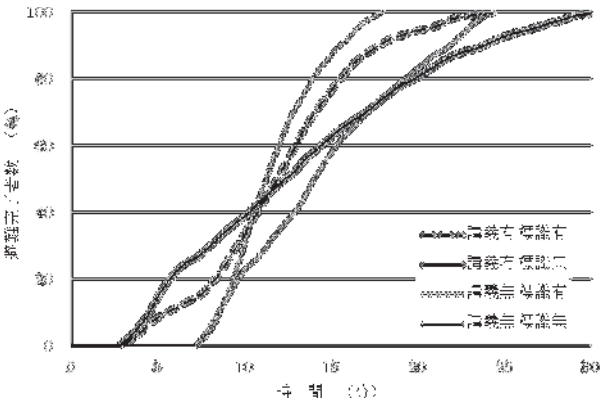


図11 避難完了者数の経時変化（海水浴）

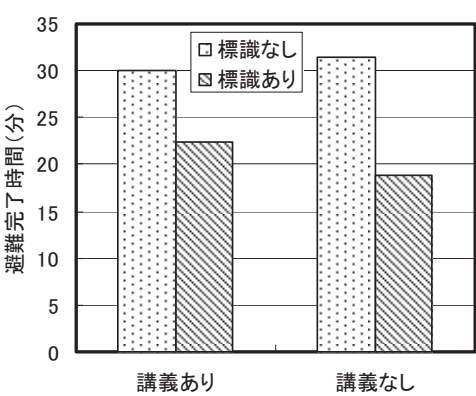


図12 避難完了時間の比較（海水浴）

④障害物セルは、隣接する計算セルと等しいポテンシャル値とする。

⑤式(6)をプログラミングし、④を境界条件としてこのプログラムを実行させる。

これらの操作により作製されたポテンシャルマップは、障害物と垂直方向には勾配を持たないため、避難者が障害物に遭遇すると、これに沿った方向に向きを変えることとなる。完成したポテンシャルマップは図9となった。避難要因である海岸から目的地方向へと滑らかな勾配が繋がっており、妥当な分布が得られたと考えられる。

ポテンシャルモデルは進行方向のみの規定であるため、更に進行速度も設定する必要がある。実際の成人が急いで歩行した場合は速く、老人や幼児は遅いかもしれない。さらには、歩行の遅い避難者を成人が補助することも考えられる。今回の計算手法でこれらを反映させるのはさほど難しくはないが、根拠資料に乏しいため、平均的な1 m/sを一律に与えることとした。ただし、避難者の間隔が近すぎるのは妥当性を損ねるため、避難者間隔は0.5 m以上と想定し、1辺が2 mのセル内に最大でも16人しか存在しないよう歩行速度を制限した。

3. 4 シミュレーション結果

3. 1節のシナリオに基づき、計8ケースの計算を行った。ただし、「きんめだいまつり」は休日に行われるため、ケース設定において講義は無いとして扱った。設定した条件とケース番号の対応を表3に示す。

表3 設定条件

| ケース番号 | 1   | 2 | 3   | 4 | 5 | 6 | 7 | 8   |
|-------|-----|---|-----|---|---|---|---|-----|
| 大学講義  |     | ○ |     | × |   | ○ |   | ×   |
| イベント等 | 海水浴 |   | 海水浴 |   |   | × |   | 金目祭 |
| 誘導標識  | ○   | × | ○   | × | ○ | × | ○ | ×   |

シミュレーション結果の一例として、海水浴シーズンに講義が行われている想定、ケース1と2を図10に示す。

避難者は黒点で示されており、2分後の図では矢印部分に分布している。図の左側が誘導標識により海水浴客がマリーナキャンパスを避難路として活用した場合（ケース1）、右側がマリーナキャンパスを避けて避難した場合（ケース2）である。6分後の分布から、誘導標識の有無により海水浴客の経路が明らかに異なっていることが分かる。誘導標識がある場合は、20分でほぼ全ての海水浴客の避難が完了しているが、マリーナキャンパスを避けて避難した場合は、未だ多くの避難者が高台へと向かっている。従って、このケースでは、誘導標識が有効であったと考えられる。

つづいて、これら2つのケースを含む、ケース1～4に対する避難完了率の経時変化を図11に示す。ケース1と2の比較により、誘導標識の設置により避難完了までの時間が早くなっていることが分かる。ただし、10分までの段階では、誘導標識が設置されていない方が、避難完了者が多い。この段階までに避難を完了させているのは、目的地に近いマリーナキャンパス内からの避難者である。本来であれば、マリーナキャンパス内の避難者は、誘導標識の有無に関わらず同じ経路を辿るので、差異は小さいはずである。違いが現れた原因は、誘導標識の有無でマリーナキャンパス内のポテンシャルマップが変化したためだと考えられる。実際に図10の2分後の結果を比較すると、キャンパス内からの避難者の分布が看護学部棟前で異なっている。どちらが正しいといった評価はできないが、混雑した場所がある場合には、多様な経路で目的地に向かう方が効率的であることが分かる。この意味においては、避難誘導のみを頼りにした行動は渋滞を誘発し、時として避難を遅らせると考えられる。これらのケースに対する誘導標識の効果は図12より確認できる。講義がある場合は避難完了時間が8分程度短縮されているが、ない場合には12分の短縮となる。こ



れは、海水浴客がマリーナキャンパス内を通過する際に、講義がない方が混雑が緩和するためである。

ケース5と6は、どちらもイベント等が開催されておらず、誘導標識に従う避難者は存在しないため、ほぼ同じ結果となるはずである。どちらも20分程度の避難時間を要したが、3%ほど誘導標識が無い方が避難完了までの時間が短くなるという結果を得た。これは前述と同様に、マリーナキャンパス内のポテンシャルマップが若干変化してしまったためであろう。これらのことより、標識の有無のみを考えると、本シミュレーションの誤差は3%程度と考えられる。

ケース7と8は「きんめだいまつり」参加者の避難である。避難完了までの時間は、誘導標識がない場合で1時間50分、ある場合には1時間38分と12分の短縮が見られた。ただし、これらのケースでは、塀に囲まれた会場から小さな通用口を通して大量の参加者が避難するため、通用口から列を成して避難する形となり、列の先の速度が落ちると、後方の避難者全ての速度が落ちてしまった。この秩序的な行動が通用口の混雑を助長させた。本来ならば、多少遠回りをしてでも人混みを避ける行動を取るであろうが、「混雑したら歩行速度を下げる」といった規定条件を課したことが、歩行速度が遅くなろうとも列を守って避難した原因である。現時点で定式化に対する妙案はないが、今後、「混雑が見えたらこれを避ける」といった条件も付加する必要があるであろう。これらのケースでは2時間近い避難時間を要しているが、実際にはこれよりも遥かに短いと考えられる。

#### 4. 被害予測

銚子を取り巻くプレート境界の位置を考えると、銚子に大津波が来襲するのは、早めに見積もっても警報発令後20分程度と考えられる。地域の観光客がマリーナキャンパスを通らなかった場合は図7のポイント4を必ず通過せねばならず、この地点が通行可能なのは、津波高3.8 mでは警報発令後27分まで、6.2 mでは22分までという結果が得られた。図12を見れば明らかなように、避難路としてマリーナキャンパスを通過しければ避難が間に合わない可能性がある。また、図11より、約15%の避難者に人的被害が予想できる。6 mを超える巨大津波に対しては看護学部棟への避難が有効であるが、これも9 m程度までである。銚子に來襲した巨大津波で記録に残っているものは、延宝地震津波や元禄地震津波であり、研究者によって差異はあるものの8 m程度であったと考えられている。この意味においては、看護学部棟への避難が有効といえる。ただし、実際には6 m以下の津波の可能性の方が高いため、マリーナキャンパスを避難路として活用することこそが重要であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、株式会社 構造計画研究所のご厚意により、artisoc 3.0の無償貸与により達成されたものである。謹んで感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 下迫健一郎, 水理模型実験, コンクリート工学, 39巻, 9号, pp. 134-137, 2001
- 2) 汪瑩, 2007年度千葉科学大学卒業研究論文, 2008
- 3) 国土交通省, 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書, 縮尺模型実験による再現性の検証, 第三部, pp. 164-194, 2012
- 4) 榎丸川設計事務所, 千葉科学大学設計図, 2013
- 5) 国土地理院, 基盤地図情報数値標高モデル, <http://fgd.gsi.go.jp/download/>, 最終閲覧2013
- 6) 海上保安庁, 那珂湊港名洗港, 航海用海, 2005
- 7) 榎構造計画研究所構造工学部, artisoc3.0 ユーザーマニュアル, 2013
- 8) 山影進, 人工社会構築指南ー artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門 (人口社会の可能性), 書籍工房早山, 2007
- 9) 気象庁, 地震・火山月報 (防災編), 2011
- 10) 消防庁国民保護防災部防災課, 津波避難対策推進マニュアル検討会報告書, 2013