

卒業研究論文

マリーナキャンパス及び
周辺地域の津波襲来時に
おける避難行動シミュレ
ーション

平成 25 年度

(平成 26 年 3 月 7 日提出)

千葉科学大学危機管理学部

航空・輸送安全学科

熊倉 宏晃

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 背景	1
1.2 研究の目的および概要	2
第 2 章 避難行動シミュレーション	3
2.1 アーティソックとは	3
2.2 避難者の行動設定	3
2.2-1 ポテンシャルモデル	4
2.2-2 ポテンシャル設定	5
2.2-3 人の行動設定	7
2.3 シミュレーション条件	8
2.4 シミュレーション結果の時間差について	14
2.5 シミュレーション結果	16
第 3 章 水理実験	17
3.1 模型製作	17
3.1-1 模型製作について	17
3.1-2 模型製作範囲	18
3.1-3 水理実験における模型の縮尺	19
3.1-4 模型スケール	20
3.1-5 模型製作手順	20
3.2 実験装置	23
3.3 実験の測定方法	23
3.4 実験の解析結果	26

第4章 被害予測	40
4.1 被害予測	40
4.2 被害予測に対する提案	41
4.3 結果と考察	41
第5章 結論	43
参考文献	44
謝辞	45

第 1 章

緒論

1.1 背景

平成 23 年度（2011 年）3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震が発生した。本地震の最大震度は宮城県栗原市で観測した震度 7 であり地震の規模を示すマグニチュードは **Mw9.0** であった。震源は日本の太平洋三陸沖であり震源の深さは海底約 24km を震源として発生した。これは 1900 年以降に発生した地震では世界で 4 番目の大きさであり日本の観測史上最大のものである。またこの地震の影響により大規模な津波が発生し、最大で海岸から内陸部 6km まで浸水した。ところで津波には遡上高と津波高があり遡上高とは、陸に押し寄せた波が海拔高度何メートルの高さまで達したか（津波の痕跡）を示す到達高度の値である。津波がない場合の潮位（平常潮位）から、津波によって海面が上昇した高さ（極地）の差である。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の高さが 8m～9m に達し、最大遡上高 40.1m（岩手県大船渡市）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高い津波が甚大な被害をもたらした。

また、太平洋の広い範囲に津波が到達したため、日本国外でも建造物や人的被害が発生した。ハワイ諸島ではハワイ島西岸に津波が浸水、アメリカカリフォルニア州のクレセントシティやサンタクルーズでは港湾が損壊し、停泊していた船舶の損壊、特にクレセントシティにおいては 5 人が太平洋を渡った津波にさらわれ、うち一人が犠牲者になった。その他にもチリでは数十の住宅が損壊、インドネシアでもパプア州にあるヨーファ湾沿岸の複数の村が損壊する等の被害が発生するなど日本国内に限らず太平洋に面している広い範囲で被害が起きた。

千葉県でも津波の被害にあっており浸水面積に関しては 17 km²の範囲で被害にあっており、千葉県の北東部海岸地域である銚子市も例外ではなく浸水した。

気象庁の発表では銚子市は 2.4m の津波被害と発表されているが、本学に至っては海の目の前ということもありカフェマリーナの被害の様子から実際には約 4m といった大きな被害を受けている。このため、来年度完成する看護学部棟は、津波が発生した際の津波避難ビルとして活用されることが予定されている。津波避難ビルとは、原則として建築物の 3 階又は地上高 4m 以上の場所のうち、あらかじめ指定された範囲においてのみ、避難者を受け入れることができるビルであり、いつ発生するか分からない津波から避難者の生命の安全を図るため、一時的に緊急避難する場所のことである。そのため、本学関係者はもちろんのこと、近隣地域からの避難者の利用も考えられる。しかし、避難者がどのように看護学部棟へ避難してくるのか、何名避難してくるのかといった避難行動予測の根拠となるデータがない。

1.2 研究の目的及び概要

そこで本研究では津波に対する本学関係者と千葉科学大学マリーナキャンパス周辺地域を訪れる観光客及び工場勤務の方々が新しく建設されている看護学部棟へ避難する際の避難行動予測をする。またその結果に基づいて、看護学部棟への避難経路上に標識等の設置等を提案した被害予測を最終目的としている。

そのためにまず、本学関係者及び本学周辺地域の避難者がどのように避難目的地である看護学部とへと避難するのかを避難行動シミュレーターを使用してシミュレーションし避難行動予測を立てる。

つぎに、避難目的地の看護学部棟を含むマリーナキャンパス及び本部キャンパスを含んだ範囲の模型を製作して、水理実験を行う。その際に動画撮影を行い、どのように津波が本学及び周辺地域に浸水していくのかを撮影、動画データを取得し、その動画データを解析していき浸水状況を得る。

そして避難行動予測と浸水状況の結果を考慮して、看護学部棟への避難に対する避難誘導標識等の受け入れ態勢といった被害予測を立てていく。

第 2 章 避難行動シミュレーション

本章では、まず本研究で使用する避難行動シミュレーションソフトの概要について説明する。

避難行動については構造学研究所のマルチエージェントシミュレーションソフト、artisoc を使用した。

2.1 アーティソックとは

アーティソックとは複数の自律的に動作する主体（エージェント）から構成されており、エージェント各々が周囲の状況といった外部環境を認識し、自身の持つ行動条件の設定に基づいて自律的に行動する。そして、個々の属性のエージェント間で相互に関係し合うことによって、モデル全体がひとつの秩序を形成する。それにより現実世界に近い環境をコンピュータ上で再現することが可能である。要は今回の場合、初期設定として避難目的地である看護学部棟、避難要因や障害といったものを設定し、そこに避難者である人の行動条件を設定したプログラムを組むことにより避難行動やグラフを可視化してくれるソフトのことである。

本研究では避難行動シミュレーションに(株)構造学研究のマルチシミュレーションソフト、artisoc を使用して津波襲来時における避難者の避難行動をシミュレートしていく。

2.2 避難者の行動設定

本研究は看護学部棟に避難してくる本学関係者及び、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。本学の人数については千葉科学大学教務課にお願いして時間割毎のマリーナキャンパス及び本部キャンパスにいる人数データをいただいた。銚子マリーナ海水浴場に関しては銚子市観光商会から頂いた資料、7 月 20 日から 8 月 25 日までの 37 日間における累計利用者数と平均人数などのデータをいただいた。また、本学周辺地域で一番人数が集まると思われるイベント、「きんめだいまつり」のイベント参加者数も同時にいただいた。

その上で本学の人数設定に関しては本部キャンパスとマリーナキャンパスを合わせて一番人数の多い火曜日の 1 時限を設定している。設定人数は本部キャンパスに 475 人、マリーナキャンパスに 498 人と設定した。同様に銚子マリーナ海水浴場は 1 日の平均人数である 358 人と設定。きんめだいまつりにはイベントが開かれている 4 時間の累計来場者数の 25000 人を来場者が 1 時間イベントに滞在すると仮定してその平均の 6250 人と設定した。本学周辺の工場等に関してはそれぞれ直接従業員数を聞き取り調査したうえで、400 人と設定している。

この設定した人数を調査した場所の敷地内にランダムに配置してシミュレーションを実行している。例えば本部キャンパスならば本部キャンパスの敷地内であるフェンスの内側の範囲にランダムで配置したうえでシミュレーションを実行している。

表 1 人数調査結果

①大学			
キャンパス別 最大人数			
本部キャンパス	475人	水曜1時限	
マリーナキャンパス	498人	金曜2時限	
時間別 最大人数			
本部キャンパス	471人	火曜1時限	
マリーナキャンパス	308人		
②海水浴場			
銚子マリーナ海水浴場	最大(1日合計)	1300人	8月12日(月)
	平均	358人	7月20日～8月25日
③イベント			
きんめだいまつり	来場者数	25000人	
	平均	6250人	9:30～13:30

2.2-1 ポテンシャルモデル

避難者の行動設定についてはポテンシャルモデルを使用した。ポテンシャルモデルとは、避難者の避難方向を決定する手法の一つであり、図 1 のように示す

勾配のついたモデルのことをいう。ポテンシャルの高い山の部分は、地震、火災、津波などの災害と言った避難要因や柱、壁などの障害物のある場所であり、逆にポテンシャルの低い谷の部分は出口や避難誘導灯などといった避難目標物のある目的地の場所である。このようにポテンシャルモデルでは、災害要因や障害物の影響をポテンシャルモデルの山、避難目標物の影響をポテンシャルの谷と表現する。各避難者は、ポテンシャルの山があればそれを避け、ポテンシャルの低い方へと避難するモデルのことを言う。

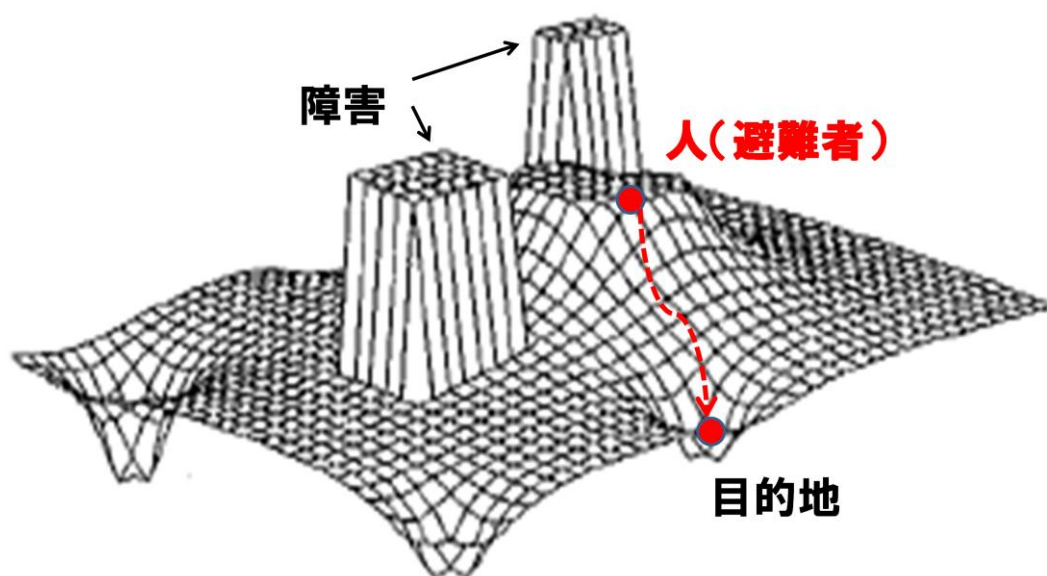


図 1 ポテンシャルモデル

2. 2-2 ポテンシャル設定

ポテンシャル分布を設定するうえでラプラス方程式を使用した。

ラプラス方程式とは次の形で表される 2 階線型の偏微分方程式である。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}$$

ここで、 ϕ は x, y, z を変数とする関数である。

2 階の偏微分を表すラプラス演算子 Δ を使うと次のように極めてシンプルに表現される。

$$\Delta \phi = 0$$

要するに、ラプラス演算子を適用すると境界の値が与えられた時に、その内部を滑らかに補間するような関数を求める方程式である。

このラプラス方程式をしようしてポテンシャル分布を作製した。今回の場合ですとポテンシャルの設定値としてまず、目的地である看護学部棟及び、看護学部棟へ避難せず自力で高台に避難する人のことを考慮してマリーナキャンパス裏の坂道の 2 点に目的地とを設定しポテンシャルの低い値を設定した。避難要因である津波が襲来する海岸部にはポテンシャルの高い値を設定している。その他壁や建物と言った通りぬけることができない場所には通り抜けられないよう設定した。黒い部分は壁や建物と言った通り抜けられない場所であり白い部分は道や空き地と言った通り抜けられる部分と設定している。設定した壁を図 2 ポテンシャル分布と壁を設定した図を重ね合わせたもの図 3 に示す。

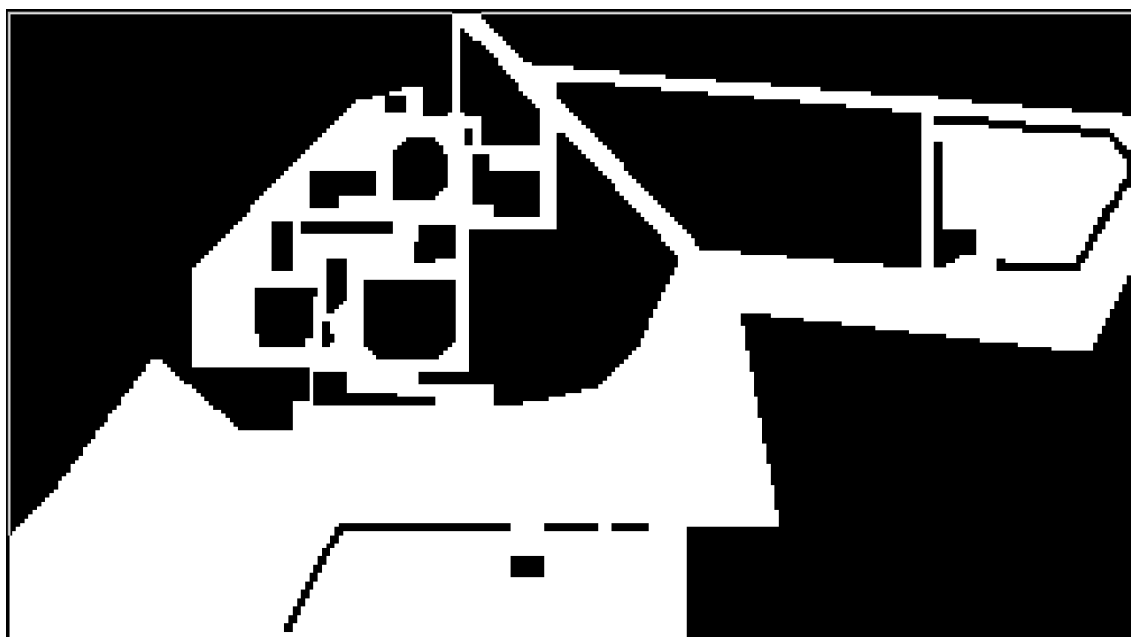


図 2 : 壁の設定（白＝道や空き地 黒＝壁、建物、障害物）



図 3：作成したポテンシャル分布と壁を重ね合わせた図

2. 2-3 人の行動設定

人の行動設定に関しては上記のポテンシャル分布を読むことにより避難目的地への方向を決定するようにプログラムを組んでいる。またポテンシャル分布を読み込んで避難するだけでは不十分なので壁の設定を読み込むことにより壁を認識して回避するようになっている。人の歩行速度については消防庁国民保護・防災部防災課の津波避難対策推進マニュアル検討会報告書に記載されていた、歩行速度及び東日本大震災時の平均避難速度を基に 1m毎秒と設定している。またシミュレーション実行時に人が自分の範囲、半径 0.125 セルに人エージェントがいた場合、その場に立ち止まるというプログラムを組んだ。

今回、シミュレーションに必要となる看護学部棟が広域避難ビルであるという認識の有無の条件については、本学関係者であれば看護学部棟が広域避難ビルであると認知しているものとして一般の避難者のみが看護学部棟へ避難できないように設定した。設定方法として津波発生時に、マリーナキャンパスの内部を通り抜けて裏口通用門から高台への坂道に行くことができることを知らないと仮定してマリーナキャンパスに入れないよう設定した。

2.3 シミュレーション条件

シミュレーションの条件としてまず夏季の海水浴シーズン、つまり銚子マリーナ海水浴場の利用があり、かつ本学も平日の講義があるケース①。次に同じ条件下であるが本学関係者以外がマリーナキャンパスの看護学部棟が広域避難ビルと設定されていることを知らないという条件のケース②。海水浴シーズンではあるが大学が夏季休校であるという条件のケース③。同条件で看護学部棟が広域避難ビルと知らないケース④。海水浴シーズンではなく平日の本学の講義がある条件のケース⑤と同条件で看護学部棟への避難を知らないケース⑥。そして、きんめだいまつりが開催される条件下で看護学部棟への避難の認知の可否のケース⑦と⑧のそれぞれ、合計 8 ケースを想定してシミュレーションを実行した。シミュレーション条件とシミュレーションの結果を次の図 4 と表 2、また海水浴シーズンに講義があるケース①の設定条件でのシミュレーションの様子（2 分毎）を図 5 に示す。

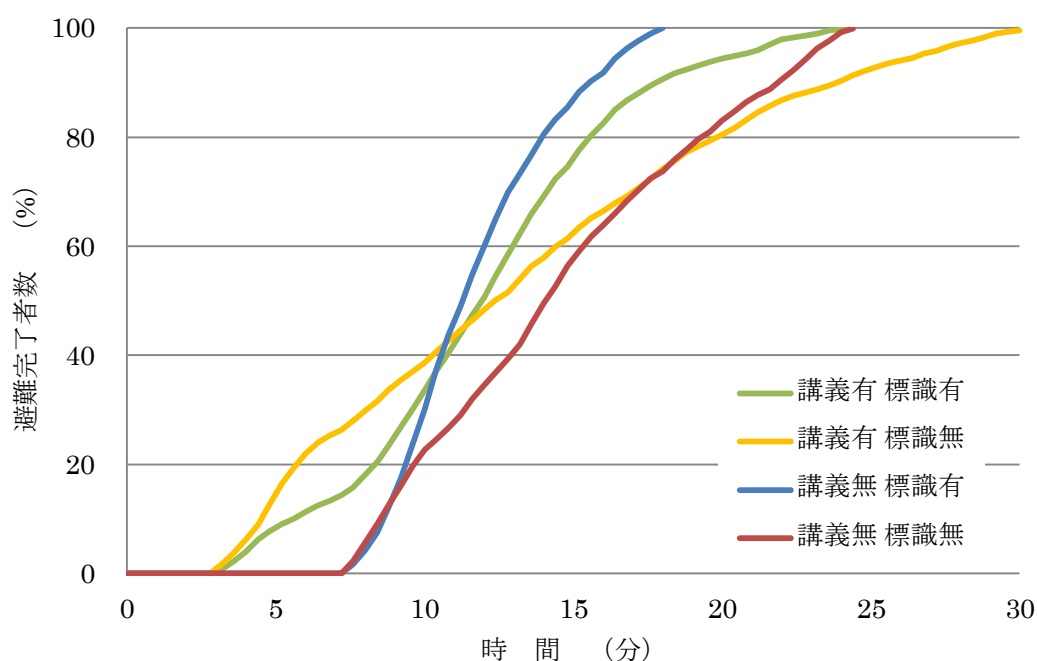


図 4：海水浴シーズンにおける避難状況

表 2：シミュレーション結果

	Case1	Case2	Case3	Case4
大学の授業日／休日	平日 授業あり		休日（夏季休業）	
その他イベント等	海水浴シーズン		海水浴シーズン	
津波避難誘導標識の有無	標識なし	標識あり	標識なし	標識あり
初期配置人数の合計（人）	1565		537	
避難完了時間	30分02秒	22分24秒	31分28秒	18分54秒

	Case5	Case6	Case7	Case8
大学の授業日／休日	平日 授業あり		休日	
その他イベント等	なし		きんめだいまつり	
津波避難誘導標識の有無	標識なし	標識あり	標識なし	標識あり
初期配置人数の合計（人）	908		6250	
避難完了時間	19分16秒	20分00秒	1時間50分	1時間38分



標識あり 2 分後



標識なし 2 分後



標識あり 4 分後



標識なし 4 分後



標識あり 6 分後



標識なし 6 分後



標識あり 8 分後



標識なし 8 分後

図 5 : シミュレーションの様子



標識あり 10 分後



標識なし 10 分後



標識あり 12 分後



標識なし 12 分後



標識あり 14 分後



標識なし 14 分後



標識あり 16 分後



標識なし 16 分後

図 5: シミュレーションの様子



標識あり 18 分後



標識なし 18 分後



標識あり 20 分後



標識なし 20 分後



標識あり 22 分後



標識なし 22 分後



標識あり 24 分後



標識なし 24 分後

図 5：シミュレーションの様子



標識なし 26 分後



標識なし 28 分後



標識なし 30 分後

図 5 : シミュレーションの様子

2.4 シミュレーション結果の時間差について

ケース 1 と 2 を比べた場合、ほかの条件と同じく避難完了までの時間が標識の設置有無では標識が設置されている方が、早くなっていることが分かる。しかし、避難を完了するまでのグラフを見てみると、経過時間 10 分の段階までは避難誘導標識が設置されている場合よりも、設置されていない方がより多くの避難者が避難を完了させていることが分かる。本来であれば、被災時にマリーナキャンパス内にいた避難者に関しては、避難誘導標識の有無にかかわらず、同じ行動設定のもと避難するはずなので、ランダム配置といった微小なズレの結果以上にはならないはずである。しかし、今回の場合はその微小なズレ以上の誤差が生じている。

これは避難誘導標識がないと設定してマリーナキャンパスへ侵入できないように壁を新たにマリーナキャンパス入口とカフェマリーナ横の通路に設定してしまったことにより、ポテンシャル分布が変化してしまったことが原因であると考察できる。そのため図 5 のシミュレーション状況を見ると標識がある場合にはグラウンド方面に抜けて避難していないのに対して、標識なしの場合にはグラウンド方面へと抜けている。また喫茶棟前の様子も標識ありの方は列を形成しているのに対して標識なしの方は分散して避難している。そのため、ポテンシャル値が東側に傾いているような避難行動をとっているのがわかる。これによりシミュレーション状況の 2 分～4 分後の写真を見比べてみると、標識ありの方は一見、列を組んで秩序ある避難行動をしているため、避難もスムーズに行っているような印象がある。これに対して標識なしの方は一部薬学部棟横から抜けて避難しているが大多数が厚生棟横から避難しており、人が分散して行動しているので混雑しているように感じる。しかし実際には標識ありの方は一列に並んで避難してしまっているため、行動設定に書き込んでいる「自分の前のセルに一定以上の人がいる場合は立ち止まるという行動条件」に従って、ある種の順番待ちをする行列のような避難の方法になってしまっている。これに対して標識がない方は、一見混雑しているように見えるが、実際は避難ルート幅を最大限に活用して避難しているので、避難時間の短縮につながっていると考えられる。

また、ケース 5 とケース 6 の避難誘導標識の有無で避難完了までの時間がほ

かのケースと比べても差がないことについては、避難者の配置条件に銚子マリーナ海水浴場の利用者がおらず、かつ周辺地域でイベントが行われていないという条件のもとシミュレーションをしたこともあり、もともとマリーナキャンパスに居た避難者以外がそもそもマリーナキャンパスへ進入して避難することがない。そのため誘導標識の有無で避難するルートに変化がないので避難完了までの時間的差がない。よってケース 5 と 6 の時間差はシミュレーションをする上での誤差の値となっている。

また看護学部棟への避難とマリーナキャンパス裏の坂上への避難を比べてみると、イベント時であれば避難を開始する場所やマリーナキャンパスへの進入口の関係もあり看護学部棟への最後の避難が銚子マリーナ海水浴場やイベント参加者であったため坂裏よりも後に避難を完了する。そのため誘導標識の有無で避難完了までの時間に差が付いていた。しかしケース⑥の条件では最後に避難を完了するイベント参加者や利用者がいないため、マリーナキャンパス裏の坂上よりも先に看護学部棟への避難が完了するシミュレーション結果になった。

さらに、ケース 7 とケース 8 のきんめだいまつりのイベント時のシミュレーション結果については、避難開始時の場所設定をイベント会場である銚子マリーナ事務所の敷地内にランダムで配置するように設定している。そのため、避難する時にイベント会場敷地内から避難することになるが、図 5 を見てもらうとわかるとおり敷地内からの避難個所が 3 か所と少ない設計になっている。避難できる 3 か所に対して避難者数が 6250 人に設定しているため避難をイベント会場出口から出るのに避難者が集中してしまうこと、そしてポテンシャル値を参照して避難させているため一点の出口に集中してしまうことがある。そのため会場の外に出るのに時間がかかりすぎてしまう点がある。また人の行動設定に壁を超えられないように設定しているため、実際に津波が襲来している状況下の避難時であればイベント会場の塀を乗り越えて避難する人も出てくると考えられる。そのためケース 7 とケース 8 に関してはシミュレーションをした結果よりも比較的早く避難が完了するものと考えられる。しかし、避難データを作る際には最善であるデータよりも、最悪であるデータを考慮した方が実際の被害は少なくできる。

2.5 シミュレーション結果

シミュレーションの結果、ケース 6 を除いて看護学部棟への避難誘導があった方が圧倒的に早い時間で避難できるということが下記の図の結果からわかる。どのケースにおいてもだいたい 7 分 30 秒から 12 分 30 秒、避難者全員が避難する時間が早くなることが分かる。このように避難完了までの時間に差がついてしまった理由として、まず避難誘導標識が設置されていない場合、避難時にマリーナキャンパス内へ進入して避難することができないと想定しているため、本学関係者以外の避難者は、唯一の避難目的地であるマリーナキャンパス裏の坂上に避難することになる。そのために、わざわざマリーナキャンパスを迂回して避難することになるため、避難完了まで迂回した分、余計に時間がかかってしまう結果になった。

シミュレーションの結果から看護学部棟への避難は周辺地域の避難者の避難完了時間を大幅に短縮できると考えられるので、本学関係者以外の避難者に看護学部棟が広域避難ビルであるということを認知してもらうためにも津波避難誘導標識の設置は有効であるということが分かる。

第 3 章 水理実験

本章では、まず、本研究で使用する水理実験用模型の概要について説明する。次に模型を使用して水理実験を行いその結果に基づいて被害予測に必要なデータを得る。

3.1 模型実験

3.1-1 模型制作について

今回の実験ではなるべく詳細なデータを入手する必要があるため、模型制作も誤差をできるだけなくすために、人力での作成ではなく精巧に作成することのできる機械での製作が良いと判断した。そこで、模型の製作には 3D プリンタを使用することにした。

3.1-2 模型製作範囲

本研究では、平成 25 年度に千葉科学大学に建設される看護学部棟への本学関係者ならびに周辺地域の避難者の避難行動を目的としており、下記の理由により本大学とその周辺地域を対象に模型を作製した。まず看護学部棟が建設されるマリーナキャンパスと周囲に高台がない本部キャンパス、次に一般避難者が避難してくることを考慮する必要があるので一般者が増えるだろう夏の海開きのことを考慮して銚子マリーナ海水浴場、そして最も大学付近の人口が増えるイベント「金眼鯛祭り」のイベント会場でもある銚子マリーナを含む範囲にする必要があるため、上記の施設を含むように 1207m×1000m の範囲に設定した。実験対象範囲を図 6 に示す。



図 6：模型作製範囲

3.1-3 水理模型実験における縮尺

水中にある物体に作用する主な力としては、物体の質量と加速度の積で表される慣性力，地球の引力による重力，流体の摩擦に相当する粘性力があり，それぞれ以下のように表される．

$$\text{慣性力} : F_1 (= m \alpha)$$

$$\text{重 力} : F_g (= mg)$$

$$\text{粘性力} : F_v (= \rho \nu \frac{dv}{dl} l^2)$$

ここに、 m は質量， α は加速度， g は重力加速度， ρ は流体の密度， ν は粘性力の大きさを表す水の動粘性係数， v は速度， l は物体の長さを表す量である．

模型と実物を相似にするためには，これらの力の縮尺を同じにする必要がある．すなわち，

$$\frac{(F_I)_m}{(F_I)_p} = \frac{(F_G)_m}{(F_G)_p} = \frac{(F_V)_m}{(F_V)_p}$$

ここで、活字の m, p はそれぞれ模型及び実物での値を示している。

しかしながら、模型と実物で同じ試験材料(水理実験では水)を使って模型実験を行う場合には、同時に相似にできるのは2つまでである。水理模型実験の場合、水の動きを問題にするので、慣性力については必ず相似にする必要がある。したがって、あと1つを、重力と粘性力のどちらか重要なほうを選ぶことによって相似則が変わってくる。重力を選んだ場合の相似則をフルード則、粘性力を選んだ場合の相似則をレイノルズ則と呼ぶ。構造物に作用する波力に関する実験の場合、粘性力よりも重力が卓越するため、フルード相似則が用いられる。

水理模型を使用した実験において縮尺を決める場合、まず最大縮尺を考慮する必要がある。最大縮尺は、実験水槽および実験装置の大きさで決まる。また、あまり水深が低くなると、底面摩擦や表面張力等の影響が大きくなるため、問題が生じてしまう。したがって、実験の制度を考えた場合、できるだけ大きい縮尺が望ましいが、あまり模型が大きくなると製作費用等が高くなり、実験する水槽や実験装置も限られてくる。そのため一般的には水槽の大きさから寸法が決まる場合が多い。

そのため大学建物及び大学周辺の工場や銚子マリーナ事務所のスケールは本学の実験装置である水槽内に入る大きさに製作する必要があるので水平方向に1/1138.5倍、垂直方向に1/100倍している。垂直方向に関しては縮尺模型を使用しての水理実験の場合、水の粘性を考慮したときに精確な実験データを得ることができる縮尺限界値が1/100倍と言われている。そのため横幅と高さ方向の比率が約1:10になっているため、

3.1-4 模型スケール

まず、模型の作成方法として模型の制度を出すために3Dプリンタを使用する。3Dプリンタで模型を作製するに当たり、作成する模型のSTLファイル形式のデータが必要である。STLファイルの作成にはSolid WorksのCAD機能を使用して作成した。本学の本部キャンパス及びマリーナキャンパスの建築設計図面

は本学庶務部企画課に保管されていた株式会社丸川設計事務所の建築図面を用いて作成している。本学周辺の工場や銚子マリーナの事務所に関しては残念ながら詳細な設計図が入手できなかったため、Google Earth の地図機能と実際の目視にておおよその大きさを割り出し、そちらを使用した。

また、本学及び周辺地域の地形に関しては国土地理院の標高座標を基に、海底面に関しては海上保安庁の航海用海図名洗港の海図を参考にしている。

3.1-5 模型作製手順

- ・模型を作製するため建築設計図を入手した。建築図面は千葉科学大学に保管されていた丸川建設設計事務所のものである。
- ・大学周辺地域の地形に関しては国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルを使用している。海底面に関しては海上保安庁の航海用海図名洗港の海図を参考に作成した。

地形、海底模型の作成についてはまず国土地理院のコンバーターを用いて GIS 形式のファイルから ID, 緯度, 経度, 標高のデータファイルに変換をかける。次にデジタイザーを用いて航海用海図(名洗港)から座標と水深を読み取り経度, 緯度, 水深(合計 500 点)を読み取った。そして変換した陸域と海域の経度、緯度、高さ情報を、Fortran を使用して統合した。次に統合したデータを、再度 Fortran を使用して経度と緯度を X 軸情報, Y 軸情報, 高さ情報の XYZ ファイルに変換する。さらにこのままでは模型を作る際に水槽に対して斜めになっているため一次変換をおこない回転させる。この作成したデータを、Fortran を用いてプリントできるサイズに分割する(100 分割)。そして最後に MicroAVS を用いて変換をかけて stl 形式でファイル出力する。この出力した stl ファイルを、3D プリンタを使用してプリントする。

- ・Solid Works を使用して 3D プリンタで建物模型を出力するために必要な模型設計図を作成、これを STL 形式で作成した。

なお模型の製作に関して、縮尺比は水槽幅の 1100mm に入るよう調整する必要があるため縮尺は 1/1138.5 倍とする。ただし、高さ方向に関しては水の粘性を考慮する必要があるため 1/100 倍とする。そのため出力する模型は実際の縮尺比から高さ方向に約 10 倍の大きさとなるため高層ビルのような形状

になってしまう。

製作した模型の全体の大きさは幅 1060mm 長さ 1000mm となった。

- ・3D プリンタによる出力においては一度に作成できる大きさに限界があるため、本学建物や周辺地域の建造物を 1 個ずつ製作している。なお一部の模型に関しては 3D プリンタの仕様から作成が困難であるため上下に分割して出力、出力後接着剤にて貼り付けをした。
- ・地形に関しては当初は 5×5 の 25 等分での製作を予定していたが、製作範囲があまりにも大きすぎ、出力している途中で台座に張り付けるために必要な糊が乾いてしまうこともありうまく作成できなかった。そのため最終的に地形の模型範囲を 10×10 の 100 等分にして出力した。また、標高の高い地形がある場合その厚みを出すだけで材料費が増えるのと同時に、3D プリンタの出力に時間がかかってしまうので地形の厚みを 3mm の地形に沿った形で作成し、高さ調整については模型の一部に同じ高さの部分を作りその部分に塩化ビニル管を使用して高さを調整する。
- ・塩化ビニル管には模型を浸水させた際になるべく浮力を与えたくないため塩化ビニル管内に空気が溜まらないように上下に 1 つずつ、計 2 つの穴をあける。
- ・また地形モデルを 100 等分にして作成しているため、地形パーツの接着部分にそれぞれ若干のずれや山が出来ていること、基盤地図情報のデータを基に地形モデルを作成しているため、建築物は考慮されていないため本来であれば建築物が立つ場所にも盛り上がり等があるので、それらを製作した建築モデルを建てるために削りだし、またはエポキシシルパテや樹脂粘土を使用して平らにして固定している。
- ・製作した模型を波浪水槽に固定するため、厚さ 15mm 幅 1080mm 長さ 900mm の板と厚さ 15mm 幅 1080mm 長さ 100mm の板二枚をつなぎ合わせ、その上に製作した模型に接着剤を使用して固定した。
また、津波が来る海側にはなるべく波を阻害させないために角を削り落とし斜面としている。
- ・固定した模型に水を張った際、土台にしている木板の浮力で浮いてしまわないように作成した模型の下中央部に重りを乗せ、模型前面の側面部には上か

ら鉄板で押さえつけるように固定した。模型の後部に関しては大きな波力の津波を発生させた場合、その波力で模型の位置が動かないように人力で固定している。

- ・作成した水利実験用模型は、水理実験の際に波のデータを入手しやすいように、完成した模型に水面下はマリンブルー、陸地はグラウンドオーカー、建物はレッドブラウンの3色で塗装する。
- ・また波を起こした際に、水が無職透明だと目盛を読み取ることが困難であることを考慮して水理実験用に水に着色している。

以上の通り作成した水理実験用の本学及び周辺地域模型を図7に示す。

- ・また実験機材である波浪水槽の亚克力板に多数の汚れと傷が付いており、測定用のメモリを撮影する際に撮影する動画が不鮮明になり。実験結果に支障が出ると判断して亚克力板を洗浄、研磨して撮影動画が鮮明になるようにした。



図7：完成した模型

3.2 実験装置

波浪水槽（幅 1.1m×長さ 16m×高さ 1.2m）の中に完成した水理実験用の模型を固定して、水深を 6.5cm に設定した。この模型に対して人工式造波装置により波長の水面波を発生させて模型までに来る津波の速度と時間、浸水測定用のメモリへの浸水水位を測定して、浸水状況のデータを得る。

3.3 実験の測定方法

波浪水槽に模型を固定し、まず最初に浸水する可能性が高く、海水浴場等からの避難が集中するであろうカフェマリーナ前をポイント 1、次にカフェマリーナ前から避難してきた場合、短い距離であるが高低差があるので危機管理学部棟前をポイント 2、今回の実験目的である新設される看護学部棟前をポイント 3、本部キャンパスや大学周辺地域の避難者が自力で避難する場合に通過するマリーナキャンパス裏口通用門前の Y 字路をポイント 4、本学学生も実験の対象としていることから本部キャンパスをポイント 5、そして看護学部棟の裏から現在新たに設置される予定である坂上への直接の避難経路であるマリーナキャンパス裏の坂上をポイント 6 とした。合計 6 か所の計測ポイントを設定し、それぞれのポイントに津波襲来時から浸水までの時間と浸水高を計測する。設定したポイントを図 8 に示す。計測ポイントには浸水水位を図るために竹串に 0.2 cm 間隔でメモリを振ったものを作成した。カフェマリーナ正面と危機管理学部棟前、そして看護学部棟の計測ポイント 1～3 の浸水量を計測するために、模型の正面にデジタルカメラを一台設置している。さらに本部キャンパスおよびマリーナキャンパス裏口通用門前の Y 字路、そして高台への避難ルートであるマリーナキャンパス裏手の坂上の計測ポイント 4～6 の浸水量を計測するために模型側面からアクリル板を通して撮影するため、水槽の外にもう一台デジタルカメラを設置した。さらに水槽側面に縦 1 cm 横 5 cm の間隔で波の波高と波速を測定するためのメモリを書いたアクリル板（波高板を作製）を貼り付け、ビデオカメラで撮影することにより津波の波高と速度を測定した。実験状況を以下の図 9～図 11 に示す

また、実験の際にはカメラ 1 とカメラ 2 の測定ポイントまでの浸水時間を同期させるために、測定用カメラ 2 台の撮影できる場所に、津波の第一波が銚子マ

リーナ事務所前の防波堤に襲来したときに光を当て、その時間を測定時間 0 秒として同期させるために同期用の光を映しながら撮影している。

次に撮影した動画をスロー再生、コマ送りや拡大機能を駆使して 50 フレームおきに、つまり 0.5 秒おきに浸水測定用のメモリを読み取り測定ポイントへの浸水深と浸水時間を読み取っていく。



図 8 設定したポイント

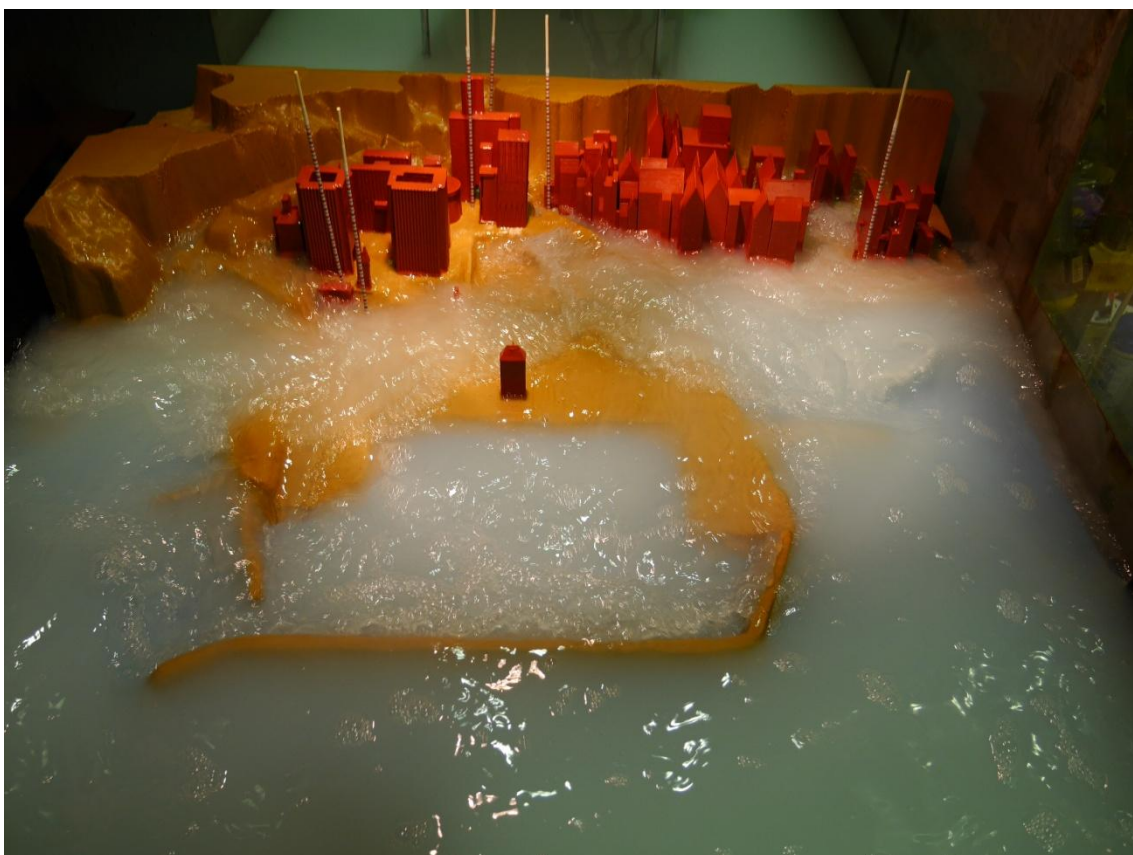


図 9（上）水槽に固定した模型 図 10（下）実験中の様子



図 1.1 設置したカメラからの実験時の映像

3.4 津波の解析（実験結果）

今回の実験に際して 36 ケースの実験を行い、その中でも波高と波速が運動量保存則の理論値に近い 8 ケースを使用して解析した。なお、この運動量保存則は摩擦に関しては考慮していないものとする。

実験を行った 36 ケースの波高と波速結果の表を 3、グラフを図 1.2 に示す。

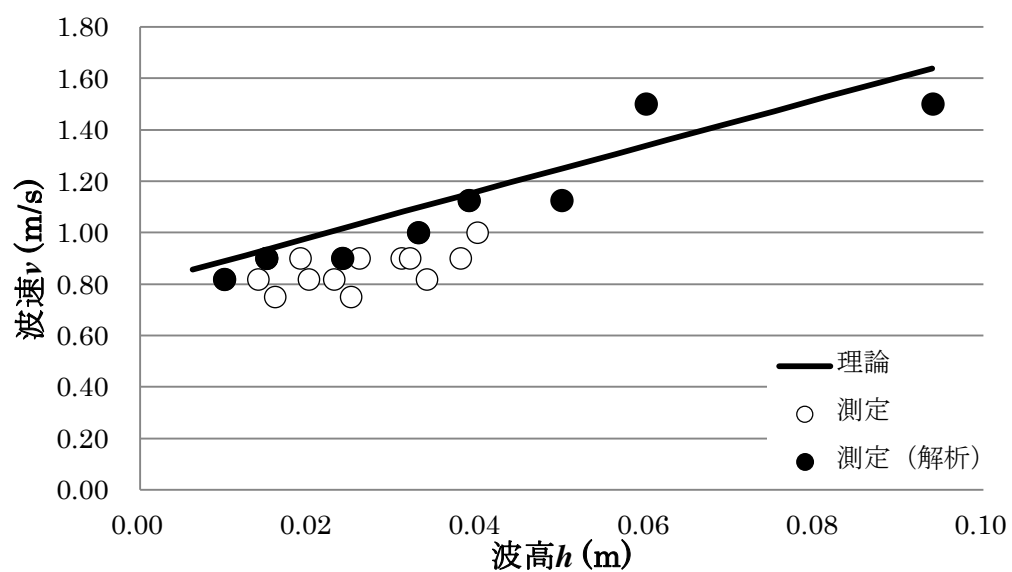


図 1.2 波高と波速のグラフ

表 3 : 計測した波高と波速

	波速 v (m/s)	波高 h (m)	実スケール 波高(m)		波速 v (m/s)	波高 h (m)	実スケール 波高(m)
case 1	0.9	0.024	0.038	case 19	1	0.041	6.547
case 2	0.75	0.025	0.040	case 20	1	0.038	6.068
case 3	0.8181	0.01	0.016	case 21	1	0.04	6.387
case 4	0.9	0.015	0.024	case 22	1	0.045	7.185
case 5	0.75	0.016	0.026	case 23	1	0.034	5.429
case 6	0.9	0.015	0.024	case 24	1.125	0.048	7.664
case 7	0.8181	0.02	0.032	case 25	1	0.038	6.068
case 8	1	0.033	0.053	case 26	1.125	0.047	7.505
case 9	0.8181	0.014	0.022	case 27	1	0.037	5.908
case 10	0.9	0.019	0.030	case 28	1.125	0.05	7.984
case 11	0.8181	0.023	0.037	case 29	1.125	0.054	8.622
case 12	0.9	0.031	0.049	case 30	1.125	0.058	9.261
case 13	0.9	0.026	0.042	case 31	1.125	0.07	11.177
case 14	0.9	0.032	0.051	case 32	1.5	0.06	9.580
case 15	0.8181	0.034	0.054	case 33	1	0.036	5.748
case 16	1.125	0.039	0.062	case 34	1	0.037	5.908
case 17	0.9	0.038	0.061	case 35	1	0.028	4.471
case 18	1	0.04	0.064	case 36	1.5	0.094	15.009

採用ケース			
case 3	0.818182	0.01	0.016
case 6	0.9	0.015	0.024
case 1	0.9	0.024	0.038
case 8	1	0.033	0.053
case 16	1.125	0.039	0.062
case 28	1.125	0.05	0.080
case 32	1.5	0.06	0.096
case 36	1.5	0.094	0.150

津波の速度は水深だけに依存するので、海岸に近づくと(水深が浅くなると)速度が遅くなって後ろの波が追いつき、波が増幅するという現象が起きる。だから沖合で高さ数 cm の津波でも湾口で数 m にもなることがある。

これに関して“グリーンの法則”と呼ばれる公式がある。これは、水深 h_1 の沖合での津波の高さを H_1 、水深 h_2 の沿岸での津波の高さを H_2 としたとき、

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{4}}$$

という関係が成り立つもので、気象庁では $h_2=1\text{m}$ として沿岸での津波の高さに変換している。

例えば水深 2000m で高さ 50cm の津波は沿岸で高さ約 3.34m になる。さらに波が湾内に進入して湾の幅が狭くなると、エネルギーの集中が生じて急激に波高を増大する。三陸沿岸のようなリアス式海岸で湾の平面形状が V 字形になっているところでは増幅率が大になる。U 字形の湾ではそれほどの増幅はない。これを考慮したグリーンの法則は次のように表される。

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{4}} \times \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

b_1 は湾奥の幅、 b_2 は湾口の幅を表す。例えば湾奥が湾口の 4 倍になっていれば、先程の例で津波は高さ 6.7m にも達する。

本実験の波の波高、測定場所への浸水水位はこのグリーンの定理を用いて計算する。実験を行った 36 ケース中運動量保存則の理論値に近い、採用した 8 ケースの結果を表 4～12、図 13～20 でまとめた。

表 4：波高 1.6mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	1.6 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2.85	0	0	0	0	0	0
3.8	0	0	0	0	0	0
4.75	0	0	0	0	0	0
5.7	0	0	0	0	0	0
6.65	0	0	0	0	0	0
7.6	0	0	0	0	0	0
8.55	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0
10.45	0	0	0	0	0	0
11.4	0	0	0	0	0	0
12.35	0	0	0	0	0	0
13.3	0	0	0	0	0	0
14.25	0	0	0	0	0	0
15.2	0	0	0	0	0	0
16.15	0	0	0	0	0	0
17.1	0	0	0	0	0	0

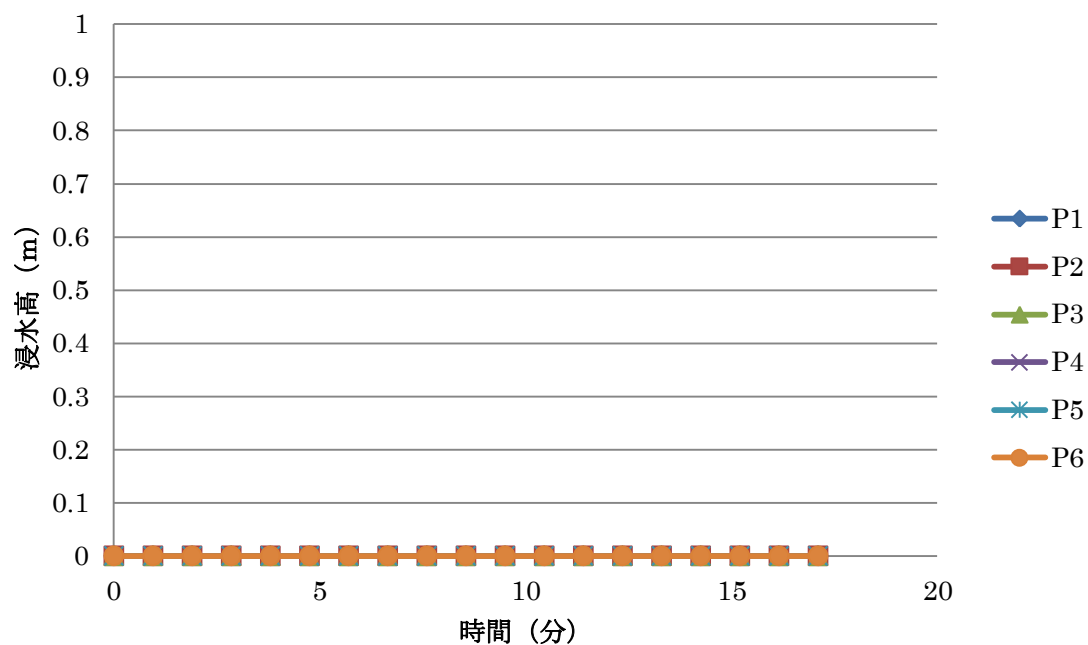


図 1 3：波高 1.6mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 5：波高 2.4mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	2.4 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	0	0	0	0	0	0
1.9	0.3	0	0	0	0.2	0
2.85	0.4	0	0	0.2	0.3	0
3.8	0.2	0	0	0.2	0.2	0
4.75	0	0	0	0.2	0.1	0
5.7	0	0	0	0.1	0.1	0
6.65	0	0	0	0	0	0
7.6	0	0	0	0	0	0
8.55	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0
10.45	0	0	0	0	0	0
11.4	0	0	0	0	0	0
12.35	0	0	0	0	0	0
13.3	0	0	0	0	0	0
14.25	0	0	0	0	0	0
15.2	0	0	0	0	0	0
16.15	0	0	0	0	0	0
17.1	0	0	0	0	0	0

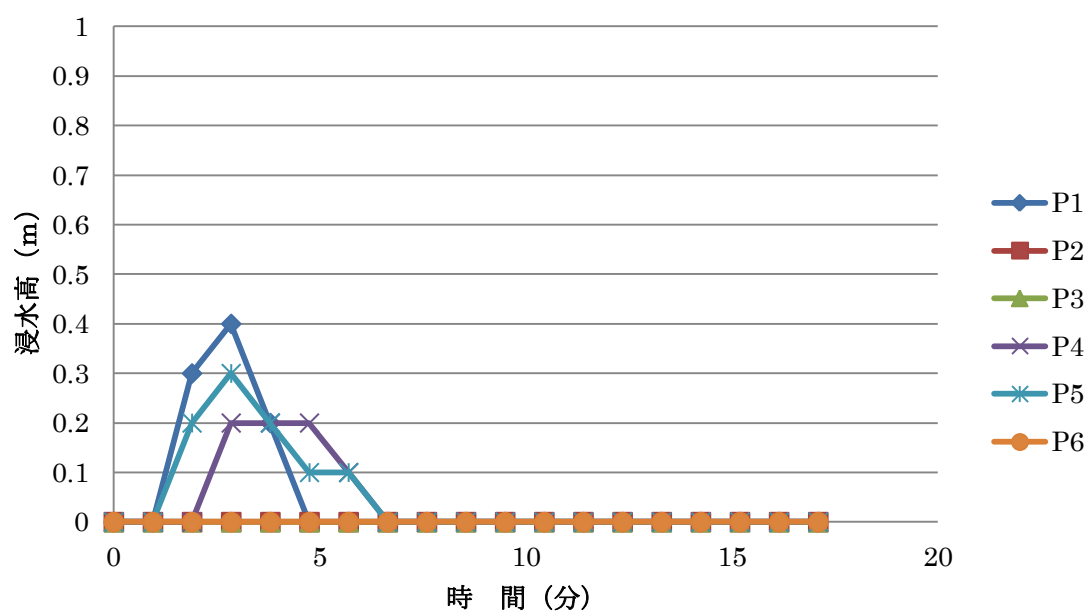


図 14：波高 2.4mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 6：波高 3.8mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	3.8 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2.85	0.7	0	0	0.1	0.7	0
3.8	0.6	0	0	0.6	0.6	0
4.75	0.5	0	0	0.7	0.7	0
5.7	0.4	0	0	0.8	0.8	0
6.65	0.3	0	0	0.7	0.9	0
7.6	0.1	0	0	0.4	0.8	0
8.55	0	0	0	0.6	0.6	0
9.5	0	0	0	0.5	0.6	0
10.45	0	0	0	0.5	0.5	0
11.4	0	0	0	0.5	0.6	0
12.35	0	0	0	0.5	0.3	0
13.3	0	0	0	0.4	0.3	0
14.25	0	0	0	0.4	0.1	0
15.2	0	0	0	0.4	0.1	0
16.15	0	0	0	0.4	0.1	0
17.1	0	0	0	0.4	0	0

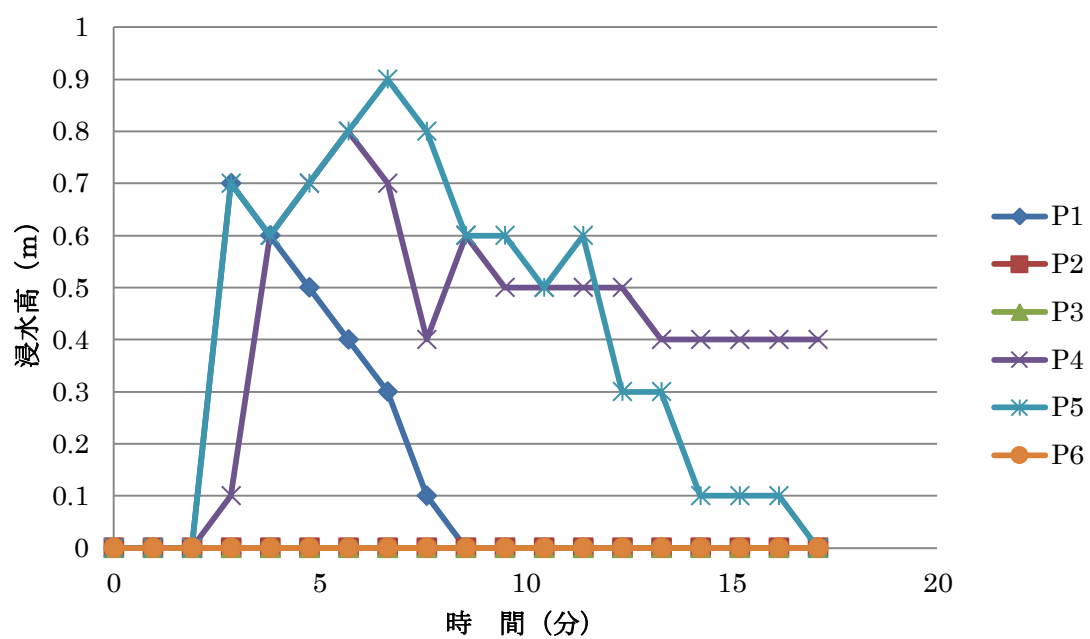


図 15 波高 3.8mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 7：波高 5.3mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	5.3 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	0.5	0	0	0	1	0
1.9	0.5	0.2	0	0.1	1.3	0
2.85	0.7	0	0	0.9	1.8	0
3.8	0.4	0	0	1.1	1.5	0
4.75	0.8	0	0	1	1.3	0
5.7	0.8	0	0	0.9	1.3	0
6.65	0.6	0	0	0.9	1.2	0
7.6	0.5	0	0	0.9	1.3	0
8.55	0.5	0	0	0.9	1.5	0
9.5	0.6	0	0	0.9	1.4	0
10.45	0.7	0	0	0.8	1.2	0
11.4	0.7	0	0	0.7	1.3	0
12.35	0.4	0	0	0.9	1.2	0
13.3	0.4	0	0	0.8	1.1	0
14.25	0.4	0	0	0.7	1	0
15.2	0.3	0	0	0.6	0.8	0
16.15	0.1	0	0	0	0	0
17.1	0.1	0	0	0	0	0

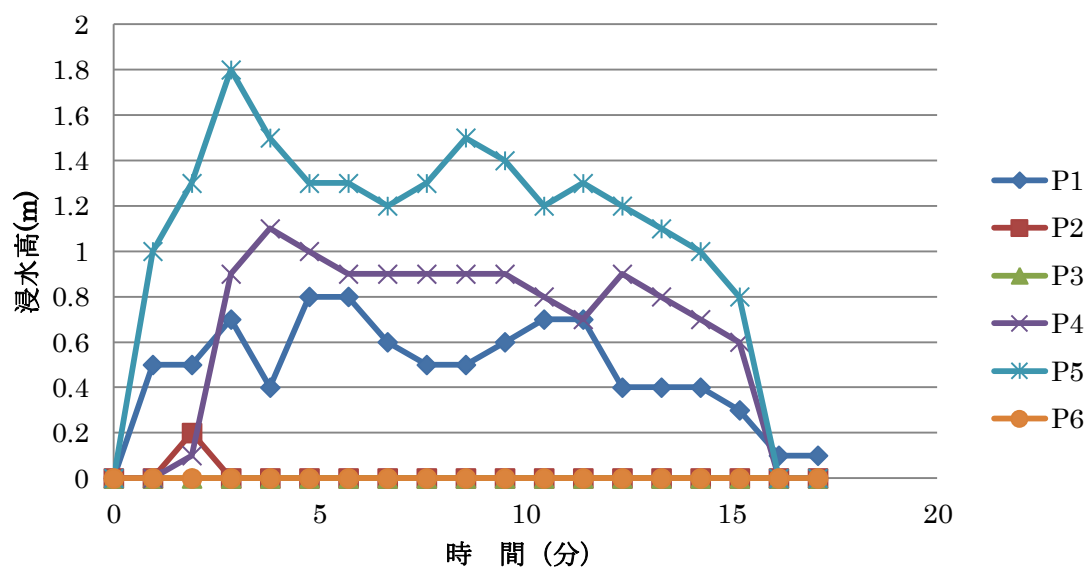


図 16 波高 5.3mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 8：波高 6.2mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	6.2 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	2	0.4	0	0	3.3	0
1.9	3	0.4	0	1.5	3.3	0.8
2.85	3.3	0	0	2.4	2.9	0.9
3.8	4.5	0.2	0	2.6	4.3	0.4
4.75	4.1	0.4	0.4	2.9	3.6	1.1
5.7	3.5	0.4	0.2	3.1	2.9	1.9
6.65	3	0.2	0.2	2.9	2.3	0.2
7.6	4.3	0.2	0.2	2.4	4	0.8
8.55	3.2	0	0.2	2.7	2.8	0.2
9.5	3	0	0	2.4	2.4	0.7
10.45	3.4	0	0	2.2	2.4	0.2
11.4	3	0	0	2.1	2.4	0
12.35	2.8	0	0	2	2.1	0.1
13.3	2.8	0	0	2	2.3	0.2
14.25	1.3	0	0	1.7	1.5	0
15.2	2.7	0	0	1.5	2.9	0
16.15	1.8	0	0	2	2.4	0.2
17.1	2	0	0	1.9	2.4	0.1

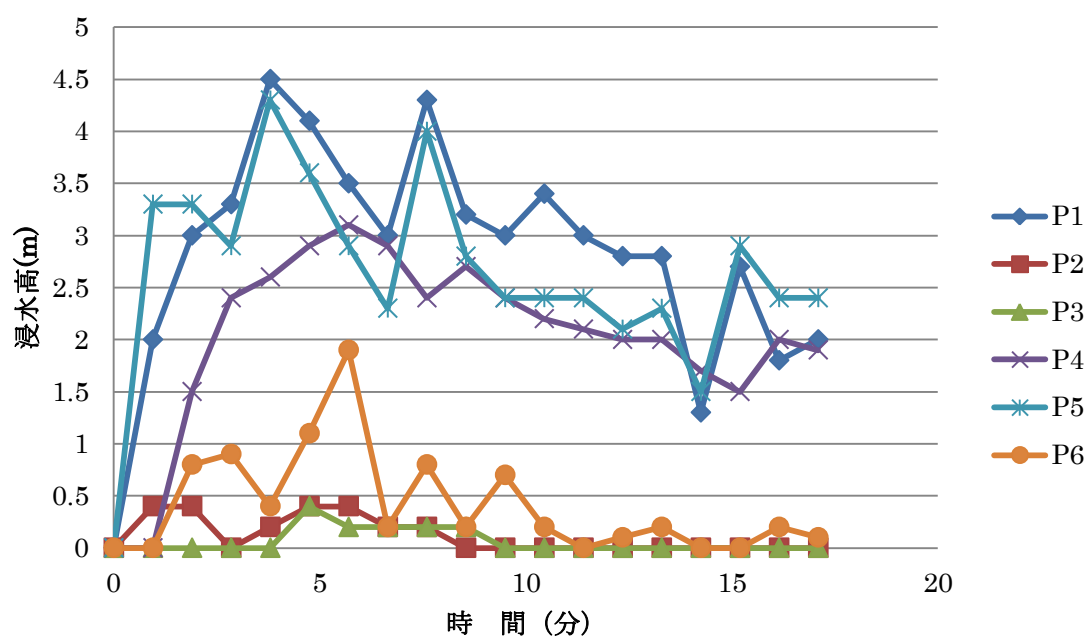


図 17：波高 6.2mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 9：波高 8.0mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	8.0 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	6	2.8	1	4.1	5.5	2
1.9	7.9	4.4	4.8	7.1	8.3	3.9
2.85	7.5	3.2	3.4	7.2	8.8	5.9
3.8	8.1	5	5	9.1	8.9	6.9
4.75	8	4.4	4.6	8.3	8.8	6.5
5.7	8.7	4.8	5.7	9.1	8.7	6.7
6.65	8.5	4.2	3.8	7.9	8.6	6.1
7.6	8	4.2	4.5	8.4	8.5	5.9
8.55	9.6	5.4	4.8	8.3	9	5.6
9.5	9.3	5.2	5.6	10.1	9.3	7.9
10.45	8.4	4.8	5.8	10	11.1	7.2
11.4	8	4	5.6	8.9	9.3	7
12.35	7.8	3.6	3.4	7.1	8	5.7
13.3	6	2.4	2.4	6.1	6.3	4.2
14.25	5	0.8	1.4	4.9	5.1	3.1
15.2	2.8	0.4	0.8	3.8	2.7	2.2
16.15	1.8	0.2	0.6	3.2	2.4	1.3
17.1	1.4	0	0.4	2.5	1.5	0.7

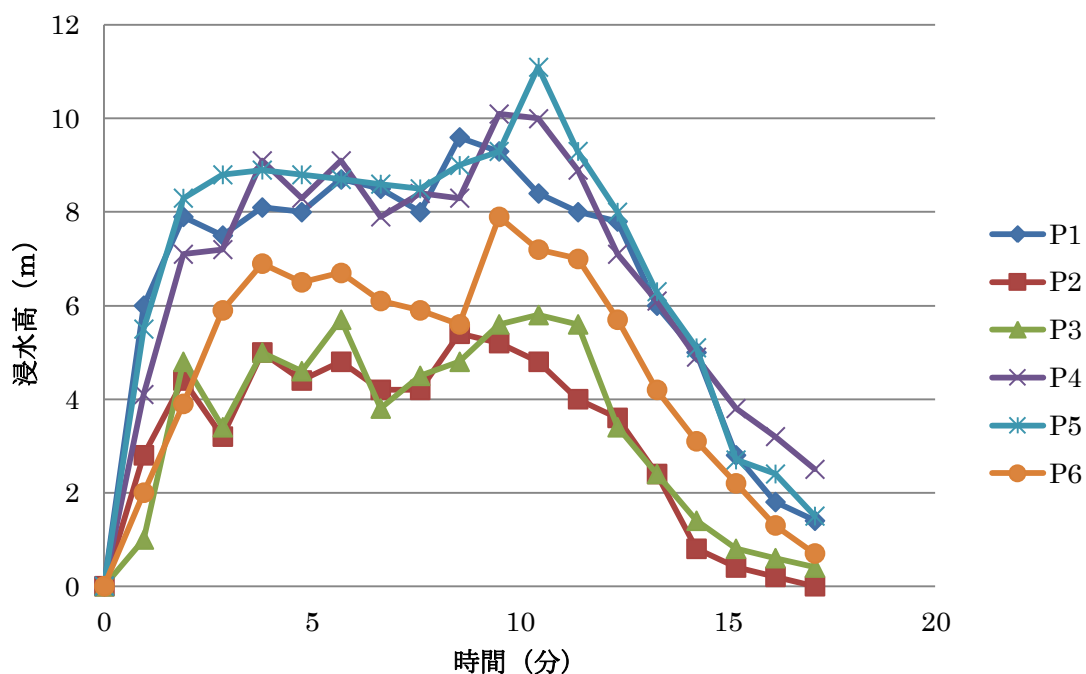
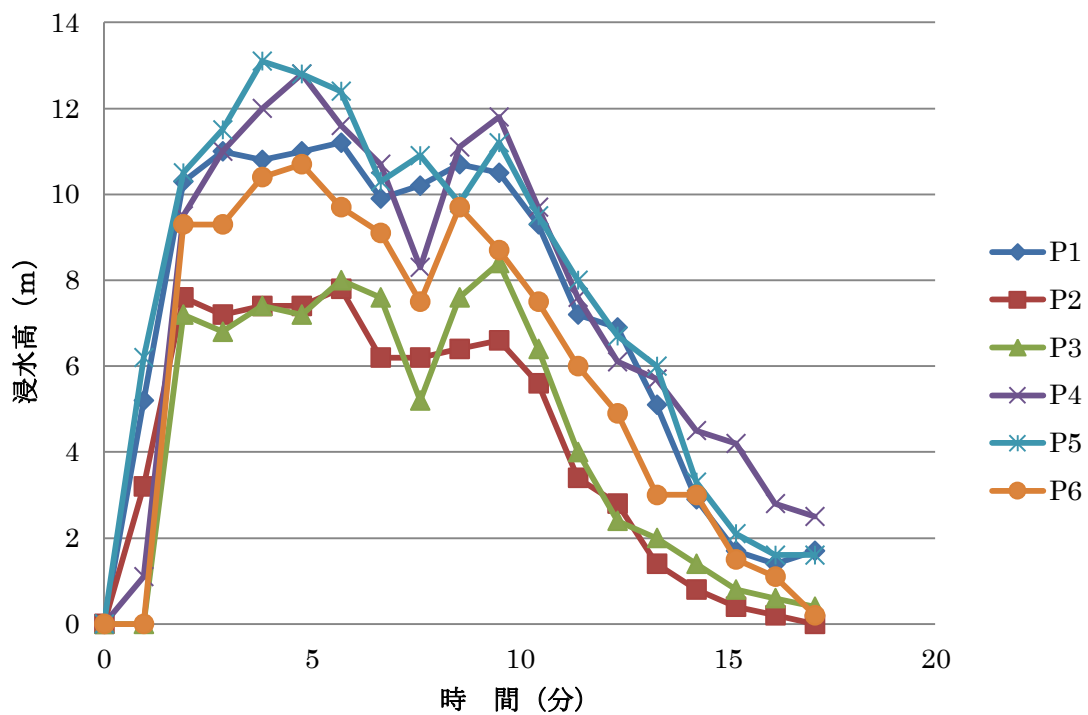


図 18：波高 8.0mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 10：波高 9.6mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	9.6 m					
	カフェマリ	危機管理棟	看護学部棟	Y字路	本部棟	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	5.2	3.2	0	1.1	6.2	0
1.9	10.3	7.6	7.2	9.5	10.5	9.3
2.85	11	7.2	6.8	11	11.5	9.3
3.8	10.8	7.4	7.4	12	13.1	10.4
4.75	11	7.4	7.2	12.8	12.8	10.7
5.7	11.2	7.8	8	11.6	12.4	9.7
6.65	9.9	6.2	7.6	10.7	10.3	9.1
7.6	10.2	6.2	5.2	8.3	10.9	7.5
8.55	10.7	6.4	7.6	11.1	9.8	9.7
9.5	10.5	6.6	8.4	11.8	11.2	8.7
10.45	9.3	5.6	6.4	9.7	9.5	7.5
11.4	7.2	3.4	4	7.6	8	6
12.35	6.9	2.8	2.4	6.1	6.7	4.9
13.3	5.1	1.4	2	5.7	6	3
14.25	2.9	0.8	1.4	4.5	3.3	3
15.2	1.7	0.4	0.8	4.2	2.1	1.5
16.15	1.4	0.2	0.6	2.8	1.6	1.1
17.1	1.7	0	0.4	2.5	1.6	0.2



図：19 波高 9.6mにおける各ポイントへの時間と浸水深

表 1 1 : 波高 15.0mにおける各ポイントへの時間と浸水深

実スケール 津波高	15.0 m					
	カフェマリ	危機	看護	Y字路	本部警備	坂上
Time(min)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0	0	0	0	0	0	0
0.95	13.3	15.2	6.5		10.4	
1.9		17	18.5			
2.85	18.6	15	16.2			
3.8	18	14.2	14.5		16	
4.75	16.7	13	14.3		16.4	
5.7	14.8	11.2	13.1		15.6	
6.65	11.7	8.2	11.3	13.4	15.6	15.5
7.6	9.5	5.8	6.7	9.8	8.6	8.6
8.55	9.4	5.6	5.1	7	5.4	6.4
9.5	8.1	4.6	4.3	7.7	8.4	4.8
10.45	4.3	1.4	3.7	6.6	5.6	5.3
11.4	1.4	0.8	2.3	4.8	2.6	3.4
12.35	1.1	0.6	1.3	3.7	1.5	2.2
13.3	1.1	0.2	0	2.8	1.4	1
14.25	1.3	0	0	1.5	1	0.2
15.2	0.8	0	0	1.5	1.4	0
16.15	1.1	0	0	1.5	1.4	0
17.1	0.7	0	0	1	1	0

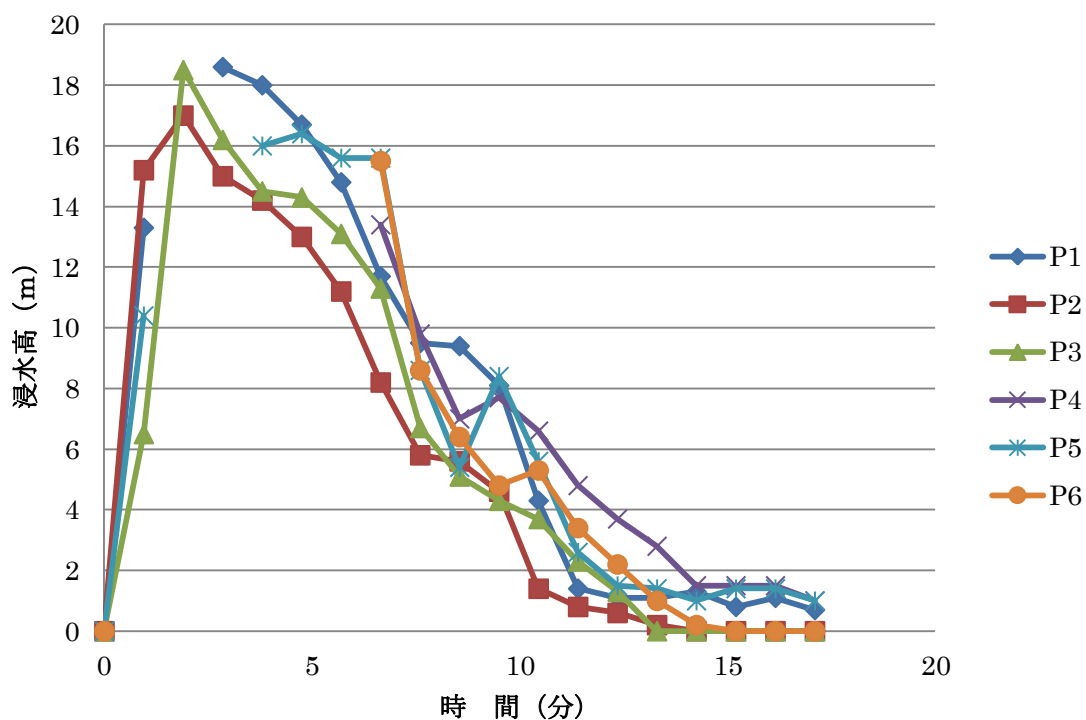


図 20 : 波高 15.0mにおける各ポイントへの時間と浸水深

まず採用ケースの中で最も津波高が低かったケース 3 について。なおケース 3 の津波高は 1.6m である。ケース 3 を見てもわかるとおり津波高 1.6m の波ではどの場所の測定ポイントも浸水していないことが分かる。※ただし測定ポイントでは浸水していないが実験中には若干ながらも測定ポイントよりも海岸部に近い場所、低い標高には浸水していたため津波高 1.6m だと津波の被害にあわないわけではない。

次に津波高 2.4m のケース 6 について。2.4m の津波高の波ではカフェマリーナ前、本部キャンパス、マリーナキャンパス裏口通用門前の Y 字路に浸水していることが分かる。特にカフェマリーナ前については津波襲来から約 2 分で 40cm の高さの浸水深を記録している。

続いて津波高 3.8m のケース 1 について。津波高 3.8m の場合ではまだマリーナキャンパス裏の坂上までは浸水していないが、ケース 6 の段階から浸水しているポイントにはケース 6 と比べてみても急激に高い浸水深を示していることが分かる。本部棟に関しては津波襲来から 6 分 30 秒の段階で約 1m 近くも浸水している。

ケース 8 の津波高 5.3m に関しては、津波到達した直後にカフェマリーナ前と本部キャンパスが浸水している。本部キャンパスでは津波到達 1 分後では 1m もの高さの浸水深になっており、看護学部棟もしくは高台に避難するための分岐点である Y 字路にも津波到達 3 分後には 10cm、その 1 分後には 90cm になっており、最高浸水深の高さは 1.1m になっていることから津波到達時に本部キャンパスに留まっていた場合は無理に避難するよりも本部棟 2 階へ避難した方がまだ安全であるということがわかる。

津波高 6.2m のケース 16 に関しては津波到達直後からカフェマリーナ前、本部キャンパスに浸水しており、津波到達 1 分後にはカフェマリーナ前で 2m、本部キャンパスに至っては 3.3m もの高さの津波になっていることがわかる。またその 2 分後にはカフェマリーナ前で 4.5m、本部キャンパスで 4.3m という最高浸水深を記録している。津波高 6.2m になってマリーナキャンパス裏の坂上と看護学部棟前への浸水が始まった。特にマリーナキャンパス裏の坂上に関しては、看護学部棟前よりも早い段階で浸水しており、最高浸水深が 1.9m であることから、避難時間があまりない場合は坂上に避難するよりもマリーナキャンパス

内の建物の 2 階以上に避難した方が比較的安全であるということが分かった。また、津波到達 5 分後の時点で看護学部棟も浸水しているが、これらの避難者は津波到達から 5 分と時間があることから既に、避難、たとえ津波にあったとして浸水深も浅い看護学棟付近に到達していると思うので、致命的な被害からは逃れられると予想される。

津波高 8m のケース 28 に関しては津波到達直後から最低浸水深である看護学部棟前で 1m、最高浸水深であるマリーナキャンパス前では 6m の浸水深となった。その他のポイントでも 2～5.5m の浸水深となっており、津波高 8m の場合では津波が到達した時点で標高の高い位置に避難をしていないと津波にのまれてしまうことになる。また、本部キャンパスに関しては津波高 6.2m の場合だと最高浸水深の高さが 4.3m であり本部棟 2 階に避難しておけばギリギリ津波から避難できるのに対して、津波高 8m の場合だと津波と到達 2 分後には 8.3m、11 分後には 11.1m の高さまで浸水しており、本部キャンパスに踏みとどまるのは危険であるということが分かった。また、危機管理学部棟前で 5.4m、看護学部棟前で高さ 5.8m と最高浸水深を記録していることからマリーナキャンパス内に踏みとどまるにしても建物の 3 階以上に避難しておくのが望ましいことがわかった。

津波高 9.6m のケース 32 ではケース 28 と比較してみた結果、危機管理学部棟で 7.8m、看護学部棟で 8.4m の浸水深となっており、津波高 8m の場合であればマリーナキャンパス内の建物の 3 階に避難すれば安全であったが、津波高 9.6m の場合だと浸水までギリギリの高さであり津波高 8m の時と比較してみると必ずしも安全とは言えない結果になった。

最後に津波高 15m のケース 36 について。ケース 36 については設置したカメラの位置等の関係から津波を発生させたときに、測定ポイントが完全に水没もしくは測定用のメモリを超えてしまったため測定不能になった部分が出てしまっている。津波高 15m のケースでは看護学部棟を含むすべてのポイントが浸水しているため、津波高 15m の場合ではマリーナキャンパス裏の坂上から避難を完了、できるだけ高い場所に津波到達時まで避難を完了させてないと津波にのまれてしまうことがわかった。なお津波高 15m に関しては東北地方太平洋沖地震の発生時に襲来した津波が、気象庁の痕跡などから推定した津波の高さか

ら岩手県大船渡市で 16.7m の津波による被害を受けていたとの調査結果が出ている。そのため、銚子市にも 15m 級の津波が襲来する可能性は十分にあるということが判断できる。

第 4 章 被害予測、考察

本章では第 2 章と第 3 章の結果から看護学部棟への避難者の受け入れ態勢の提案等について示す。

4.1 被害予測

まず、過去に行われたコンピュータシミュレーションの結果によると、房総半島で発生した津波が千葉科学大学のある潮見町までに襲来する時間が約 30 分という結果になっているのでそれを参考にする。津波襲来までに 30 分と想定した場合、まず避難行動シミュレーションの結果からわかるとおり避難誘導標識があった場合では余裕をもって避難を完了させられるのに対して、避難誘導標識がないということからマリーナキャンパス内に進入して避難できないため、避難を完了するまでに早くても 30 分とギリギリの時間であるということがわかる。また今回の避難行動シミュレーションの場合、人の行動設定条件の関係から津波警報発令時に避難者全員が瞬時に避難を開始するような設定になってしまっている。さらにシミュレーションに速度変化の条件設定を組み込んでいないため、人が常時同じ速度で避難をできることになっている。ただし、人の歩行速度については消防庁国民保護・防災部防災課の津波避難対策推進マニュアル検討会報告書に記載されている東日本大震災時における人の避難歩行速度を参考にしている。実際の避難ではこのような条件での避難はできないと考えられるので、実際の避難完了までの時間はシミュレーション結果よりも遅くなることが予想できる。水理実験の結果から津波高 2.4m の場合には津波が到達してから 2 分後にカフェマリーナや本部警備室、Y 字路においては最高浸水深が 20cm から 40cm であるが、津波高 3.8m の場合には上記 3 ポイントに同じく津波到来から 2 分後に最高浸水深が 70cm から 90cm と 1m 近くにもなってもなっている。そのため避難誘導標識がなく、マリーナキャンパスを迂回して避難する場合、津波にのまれる可能性が大いにあるため、少なからず人的被害が出てしまうことになる。人的被害を出さないためにも避難時間の短縮が必要である。

4.2 被害予測に対する提案

被害を出さないためにはまず避難行動予測の結果からもわかるように、避難時間を短縮するためにマリーナキャンパスへの避難誘導標識の設置を提案する。避難誘導標識があることによって、看護学部棟への一時避難もできることから避難完了までの時間を約 7 分 30 秒から約 12 分 30 秒早く避難を完了することができるようになる。また浸水結果を見てわかるとおり、危機管理学部や看護学部棟と言ったマリーナキャンパス内の浸水については、ほかの地点よりも低い高さの浸水深になっている。そのためマリーナキャンパス内へ進入して避難した方が比較的安全であり、浸水までの時間を考慮しても他よりも数分遅いことが分かるので、その分避難に余裕を持つことができる。よって避難誘導標識は有効であると判断できる。

また津波警報発令時に本部キャンパスにいた避難者に関しては津波警報発令時に、すぐにでも避難を開始しないと避難が間に合わないことになる。本部キャンパスの場合、看護学部棟もしくは坂上といった高台に避難する場合必ず Y 字路を通る必要がある。しかし、Y 字路は津波到達した直後から浸水するポイントの一つであるため、津波が到達した時点で坂上か看護学部棟へ避難しておく必要がある。そうでなければ、津波高にもよるが無理に高台へ向けて避難するのではなく本部棟 2 階や屋上に避難した方が安全であるといえる。ただし、本部キャンパスに残るのは津波高が 6.2m 以下の高さの津波の場合のみである。

4.3 結果と考察

避難行動シミュレーションでは、図 4 の結果から本部キャンパス、マリーナキャンパス、銚子マリーナ、マリーナ海水浴場といった各地点からの避難者がどのようなルートを辿って看護学部棟に避難するか、また、その所要時間も明らかになった。その結果、避難誘導標識が設置してある場合の方が設置していない場合よりも避難完了時間が大幅に短縮された。

浸水予測の実験では、表 4～11、図 13～20 の結果から従来の避難ルートであるマリーナキャンパス通用門付近の浸水が比較的早い段階浸水しており、避難ルートとして不適切であることが分かる。看護学部棟の設置に伴い修正される新たな避難ルートの有効性が確認できる結果となった。

津波発生から襲来までの時間を分と 30 分と想定した場合、避難行動予測の結果から避難誘導標識がない場合だと避難にギリギリの時間であるということが分かる。さらに水理実験の結果からもわかるとおり坂上にも比較的早い段階で浸水高が 7.5 cm となっている。対して看護学部棟へは襲来してから 5 分後の段階まで浸水していないことを考慮すると時間的余裕がない場合、表を見てわかるとおり坂上に避難するよりも看護学部棟へ避難する方が比較的安全であるという結果が分かった。そのため看護学部棟への避難誘導標識の設置が望ましい。

第 5 章 結論

本研究では千葉科学大学とその周辺地域における水理実験と避難行動シミュレーションを行った。その結果から被害予測をたてた。

本研究で得られた主な結論を以下にまとめる。

- 避難行動シミュレーションの結果から津波襲来までの時間を 30 分と仮定した場合、避難時に大学を迂回しルートで避難すると、避難完了までに津波にのまれる可能性が高い。

しかし、避難誘導標識を設置することによりマリーナキャンパスへ進入させて避難させることにより迂回するルートよりも最低でも避難完了までに 7 分 30 秒もの時間短縮が可能である。

- 水理実験の結果から津波到達直後から比較的早い段階でカフェマリーナ前、本部キャンパス、Y 字路が浸水する事が分かった。そのため時間的余裕がない場合、マリーナキャンパス内に避難しておいた方が比較的安全である。また津波高が高い場合マリーナキャンパ裏の坂上へも比較的早い段階から浸水しており、その浸水深も高いので無理に坂上へ避難するよりもマリーナキャンパス内の建物に避難した方が安全である。

ただし、東北地方太平洋沖地震の際の福島県に被災した 15m 以上の津波高の場合、看護学部棟屋上へも浸水することから、早い段階で高台へ避難することが望ましい。

- 本学関係者以外の銚子マリーナ海水浴場や本学周辺のイベント時におけるイベント参加者等にむけた避難誘導標識を設置することにより避難時間を比較的短縮することができる
- 銚子に 6m 以上の大津波が来襲する場合、誘導標識がないと犠牲者が出るという予測結果となった。一方、誘導標識により大学内を避難路として利用した場合は、講義がある場合にのみ数%の逃げ遅れが見積もられた。ただし、これらの避難者は既に、浸水開始が 5 分程度遅れ、浸水深も浅い看護学棟付近に到達しており、致命的な被害からは逃れられると予想される。

参考文献

1. 下迫健一郎：水理模型実験「構造物に作用する力を調べる実験」
2. 汪瑩：2007 年度千葉科学大学卒業研究論文
3. 国土交通省：縮尺模型実験による再現性の検証（第Ⅲ部）
4. ㈱丸川設計事務所：千葉科学大学設計図
5. 国土地理院：基盤地図情報数値標高モデル
6. 海上保安庁：航海用海図名洗港(2013)
7. ㈱構造計画研究所：artisoc3.0 ユーザーマニュアル
8. 人工社会構築指南 artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション
入門
9. 気象庁：津波と伝播の仕組み
気象統計情報平成 23 年 3 月 地震・火山月報（防災編）
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

謝辞

本研究を行うにあたって、指導担当教員である戸田和之准教授による指導の下研究面におけるアドバイスや、実験の手助けと言った様々なことをご教示いただきました。

また、本学の図面などに関して、本学の庶務部企画課の米倉さんに設計図面の貸出に関する体制を敷いていただいたことや設計図面の用意をしていただいたこと、また教務課の皆様には曜日と時間割別に本学にいる教員と学生の人数データをいただきました。

銚子マリーナ海水浴場の入場者数データときんめだいまつりのイベント入場者数データを銚子市役所観光商工課からいただきました。

本研究をするうえで重要である避難行動をシミュレートするために避難行動シミュレーションソフトの **artisoc** を株式会社 構造計画研究所のご厚意により無償でお借りし、使用させていただいたことに感謝申し上げます。

そして本研究を行うにあたって、ご協力をいただいた全ての皆様にこの場をお借りして、感謝を申し上げます。