

高潮避難シミュレータを用いた避難対策の検討と防災教育*

Study on Evacuation Measures and Disaster Education by using of Storm Surge Evacuation Simulator*

桑沢敬行**・片田敏孝***・境道男****・浅野和広*****

By Noriyuki KUWASAWA**・Toshitaka KATADA***・Michio SAKAI****・Kazuhiro ASANO*****

1. はじめに

近年、高潮災害の危険性が高まりつつある。IPCC 第4次評価報告書では、地球温暖化に基づく気候変動の影響により、環境の保全と経済の発展が地球規模で両立した場合においても21世紀末における海面は、最大38cm上昇すると報告されている。また、熱帯低気圧の総数は減少するものの、勢力の大きい低気圧は増加するという報告もあり、海面上昇や熱帯低気圧の強大化などにより、高潮の発生リスクは高まる傾向にある。また、海外では、ハリケーン・カトリーナ(2005)やハリケーン・グスタフ(2008)、サイクロン・ナルギス(2008)など、深刻な高潮被害が既に複数発生しており、わが国においてもいつ強大な台風の襲来による高潮被害が発生してもおかしくはない。

筆者らは、甚大な高潮災害の危険性の高まりを背景に、自治体や住民の視点から高潮災害への対応策を検討することを目的とした取り組みを実施している。本稿は、この取り組みの一部となる高潮災害時の住民避難に着目した課題の把握や対策の検討、住民を対象とした防災教育の成果について述べるものである。本研究の特徴は、超大型で非常に強い台風に伴う暴風や高潮氾濫といったハザード現象、警報や避難情報などの住民への伝達状況やこれらに基づく住民の避難状況、そして、人的被害の発生状況を表現する総合的なシミュレーション・システムを構築していること、現状の住民の行動意向を考慮した検討を実施していること、人的被害規模を指標として現状の課題や避難対策の効果を検討していること、そして構築したシミュレータを防災教育においても活用するとともに、住民の理解度や意識の変化から防災教育の効果を確認していることなどである。

*キーワード：台風、高潮、避難、シミュレーション、防災教育
**正員、博(工)、(株)IDA 社会技術研究所
(群馬県桐生市東久方町1-1-28 SUMI 2F、kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp)
***正員、工博、群馬大学大学院 社会環境デザイン工学専攻
(群馬県桐生市天神町1-5-1、t-katada@ce.gunma-u.ac.jp)
****正員、(社)中部建設協会
(愛知県名古屋市中区3-5-10 九の内ビル 8F、mi.sakai@ckk.or.jp)
*****非会員、国土交通省 木曾川下流河川事務所
(三重県桑名市大字福島 465、asano-k2rp@cbr.mlit.go.jp)

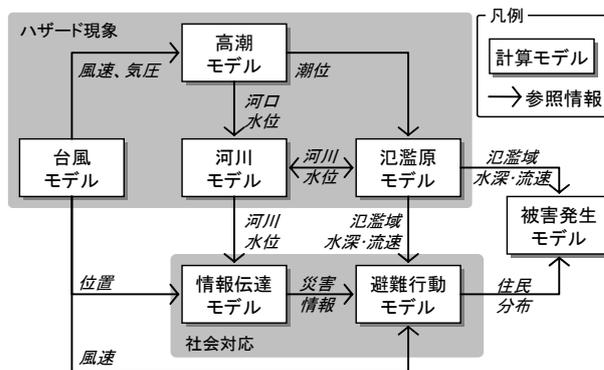


図-1 シミュレーションシステムの構成

2. 高潮避難を対象とした総合シミュレータ

(1) シミュレータの構成

避難対策の検討に向けて高潮災害とその状況下における住民の避難状況を表現するため、図-1に示す計算モデルで構成されるシミュレータを構築した。ハザード現象を表現するモデルは、台風による気圧や風の分布を表現する台風モデルと潮位変化を表現する高潮モデル、また河川の水位変化を表現する河川モデルと堤内地の氾濫状況を表現する氾濫原モデルで構成される。一方、社会的な対応を表現するモデルは、ハザードの状況に応じて行政が住民に災害情報を伝達する様子を表現する情報伝達モデルと災害情報の取得などから住民が避難を決意し、避難施設まで移動する様子を表現する避難行動モデルで構成される。そして、被害発生モデルは、両モデル群の出力結果から人的被害の規模を推計するものである。

(2) シミュレーションモデルの概要

台風モデルは、時間毎の台風中心部の位置、気圧、深度、移動速度から、台風域の気圧と風の分布の時間変化を推算する。気圧分布は、台風域内の気圧を同心円状と仮定したMyersの式⁹⁾を用いて求める。また、風の分布は、気圧差から大気が移動しようとする力とコリオリ力の釣り合いにより表現される傾向風と台風自体の移動に伴い発生する風を合成することにより求めている。

高潮モデルは、台風モデルによる時間毎の台風域内の気圧と風の分布から、高潮偏差を推算する。高潮の伝搬を表現する基礎式は、流体運動の一種として連続式と

表-1 風速に応じた避難行動条件

平均風速	移動速度の低減率	その他の付加条件
10 m/s ~ 20 m/s	徒歩：0% ~ 90% 車：0% (低減なし)	—
20 m/s ~ 25 m/s	徒歩：90% ~ 100% 車：0% ~ 90%	・新たに避難を始めない ・歩行避難者は最寄りの避難施設に緊急避難する
25 m/s 以上	徒歩：100% (停止) 車：90% ~ 100%	・避難車は最寄りの避難施設に緊急避難する

運動方程式を鉛直方向に積分することで求められる。本モデルでは、この計算を表層、中層、底層の3層に分割して実施する多層レベルモデルを用いている²⁾。この時、海面の境界条件として、台風モデルによる気圧と風の分布を利用し、台風による吹き寄せ及び吸い上げ効果を表現している。

河川モデルは、高潮モデルによる河口部の潮位を出発水位、また上流端に与えた流量のハイドログラフを境界条件として、河道内の水位や流量の時間的な変化を表現する。本モデルでは、台風や高潮の時間的な変化に基づく洪水状況の変化を表現するため、計算手法として一次元不定流計算を用いている。

氾濫原モデルは、堤内地に流入した氾濫流の挙動を直交座標系の二次元不定流計算により表現する。河川氾濫による破堤流量や越流量は、河川モデルによる水位と対応する氾濫原の計算メッシュの水位及び破堤敷高または堤防天端高との関係から本間の横越流公式によって算出する。また、高潮氾濫による海域からの氾濫流量は、高潮モデルによる潮位と堤内地の水位を用いて本間の正面越流公式により算出する。

情報伝達モデルは、避難勧告などの災害情報が防災行政無線などを通じて住民に伝達される様子を表現する。また、住民間の口伝えにより情報が拡まる様子を表現するため、住民間の伝達行動についても考慮している。このモデルの実装には、筆者ら既往研究において構築した災害情報伝達シミュレーションモデル³⁾を用いている。なお、本研究では、情報に内容を表す属性を持たせることによって、複数の情報が伝達される状況を表現できるよう改良している。また、各情報の発信タイミングは、台風の位置や、河川の洪水状況などを参照して設定する。

避難行動モデルは、住民が自宅から道路上を通過して避難先まで移動する様子を表現する。避難先や経路は、基本的に自宅から最も近い避難施設とその場所までの最短経路を利用する³⁾。水害時においては、一般的に徒歩による避難が求められるが、大規模な高潮災害の場合、広域的な避難の必要性から自動車の利用も止むを得ない状況となる。自動車による避難については、リンクへの進入時、もしくは走行中のリンクの交通量が変化した時に、Greenshieldsの式⁴⁾により走行速度を設定することで、交通量に応じた速度変化を表現している。なお、本モデルで

表-2 主なシミュレーション条件

分類 / 項目	設定条件等
想定台風	スーパー伊勢湾台風 (上陸時 910hPa) ⁶⁾
想定洪水	平常時 (上流端に基底流量を設定)
潮位	朔望平均満潮位 (T.P.+1.22m)
破堤箇所	海岸：3箇所、河川：6箇所
破堤幅	海岸：100m、河川：川幅より計算
破堤水位	海岸：計画潮位 河川：整備状況を考慮して設定
人口	全人口 (5,484世帯、15,832人)
住民 避難速度	徒歩：性年齢より設定、ただし、世帯員の中で再遅者に合わせる 車：道路種別、交通量より設定
屋外拡声器	設置数：34基、取得率：30%
戸別受信機	設置数：4,371台、取得率：85.6%
マスメディア	視聴率：83.4%
タイミング	避難勧告：台風上陸9時間前 ⁶⁾ 避難指示：台風上陸6時間前 ⁶⁾
施設数	桑名市の指定避難施設 (99箇所)
収容人数	浸水階は除く収容可能人数を設定
通過交通	平日 12時間交通量
橋梁通行止	河川水位桁下到達時
IC 進入禁止	風速 20m/s 到達時 ⁶⁾

は、モデルの簡略化のため車線や信号機の表現は省略しており、交差点においては直進車を優先している。また、強風による避難行動への影響を表現するため、気象庁が公表している風速に応じた人や車への影響を参考に表-1に示す条件を加え、風速の上昇に伴う避難速度の低下、強風に伴う避難の判断や緊急避難を表現している。

被害発生モデルは、高潮災害における人的被害規模の指標として、救助を要する人を表す要救助者の規模を算定する。ここで救助を要する状態とは、高潮氾濫によって屋外への避難が困難な状態を示す。大規模な高潮災害の場合、浸水が数日から一週間継続すること、浸水被害が広範囲に及び救助活動の難航が想定されること、そして氾濫流による家屋被害も想定されることから、浸水階よりも上階に居住する住民についても要救助者に含めることとした。なお、避難困難の判定には、流体力から歩行困難を判定する式⁵⁾を用いた。

3. 高潮避難対策のシナリオ分析

(1) 基本条件の設定

本研究では、高潮避難対策の検討地域として、伊勢湾台風(1959)により甚大な高潮被害を受けた三重県桑名市長島町を選定した。また、ハザード条件としては、東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会⁶⁾により想定されているスーパー伊勢湾台風を表現することとした。この台風は、既往最大である室戸台風級の台風が伊勢湾台風を基本とした経路で東海地方に襲来するものである。設定した主な条件を表-2、図-2にまとめる。

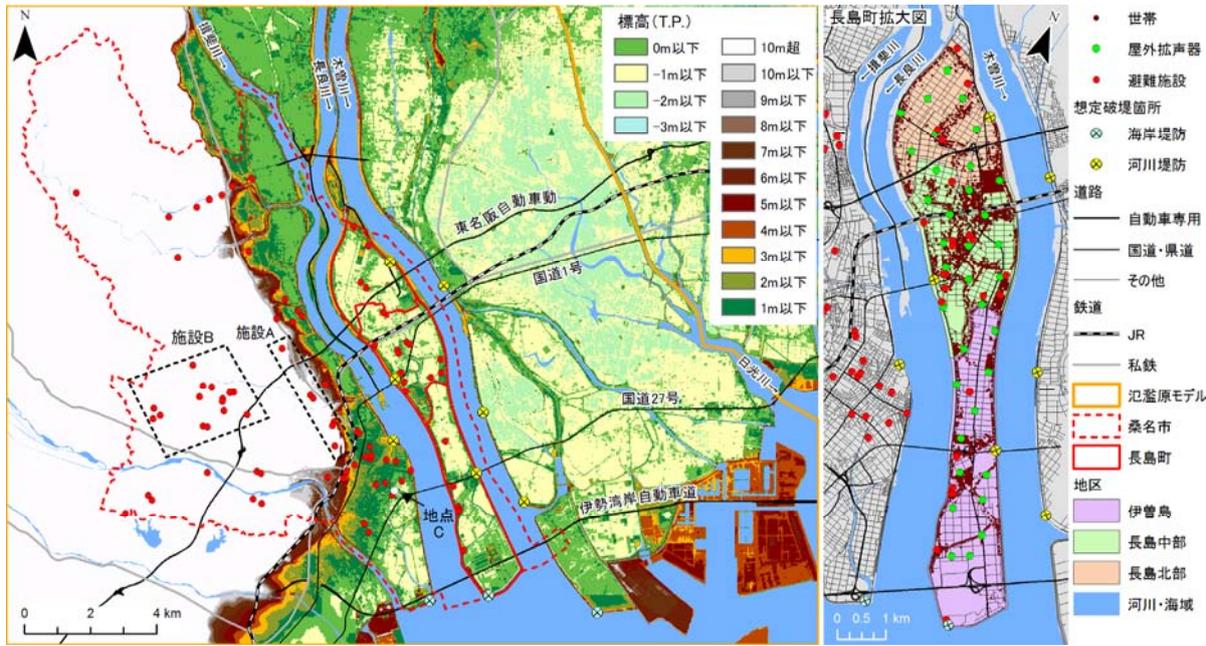


図-2 対象地域と施設配置

(2) 高潮避難に関する住民の意向と反映方法

本研究では、避難の意思決定、避難の開始タイミング、避難時の行動の3点において、長島町の住民を対象とした意識調査の結果から、現状の住民の行動意向を反映して表現することとした。調査概要を表-3に示す。避難行動モデルでは、世帯毎にこの調査の回答をランダムに選択させ、各問の回答に沿った行動を取らせた。

まず、避難の意思決定について、表-4に示した各情報の取得時点別の避難決意者の割合と避難の勧誘に応じた避難意向の結果を図-3にまとめる。避難行動モデルでは、取得した情報が、避難を決意すると回答した状況、またはそれ以降の状況を示す情報だった場合は、避難を決意する。また、既に避難を決意した住民から情報を受けた場合は、勧誘を受けたと見なし、勧誘を受けた際の避難意向に応じて避難を判断させることとした。

次に、避難の開始タイミングについて、台風の接近に応じた被害軽減行動と避難の準備行動に要する時間を図-4にまとめる。避難行動モデルでは、被害軽減行動と避難準備行動を考慮して避難の開始タイミングを決定する。被害軽減行動を実施しない場合は、避難の決意から避難準備行動に要する時間が経過した時点で避難を開始する。また、被害軽減行動を実施する場合は、被害軽減行動を実施している時に避難を決意した場合の対応についても調査しており、被害軽減行動の開始タイミングと所要時間、避難の決意状況、そしてこの間の回答を反映して避難行動の実施期間を定めた。

最後に避難先の意向については、67.5%が長島町内に避難する意向を示し、13.3%は長島町以外の桑名市内と回答した。また、市外では愛知県方面が9.1%であり、最も多い回答であった。また、町外に避難する人は、8

表-3 住民意識調査の概要

調査期間	2009年2月27日～4月14日
調査対象地域	三重県桑名市長島町
配布回収方法	自治会による配布・郵送回収
配布回収数(率)	4,618票、1,462票(31.7%)

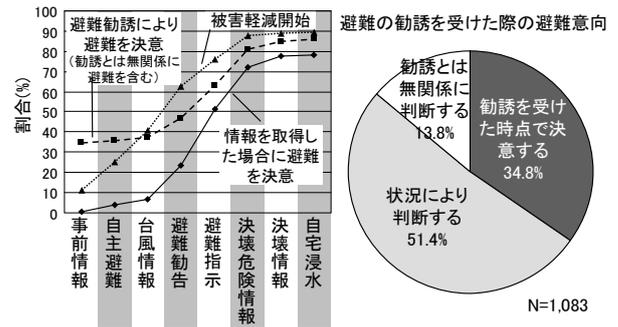


図-3 情報取得と避難の勧誘に応じた対応意向

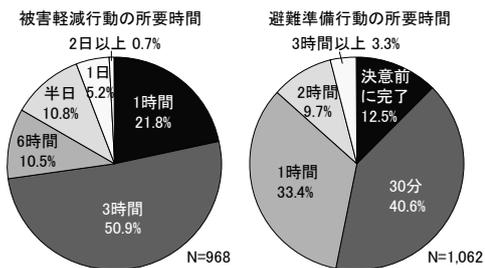


図-4 被害軽減行動と避難準備行動の所要時間

割以上が自動車を利用する意向を示した。避難行動モデルでは、これらの回答に基づいて避難先、自動車利用の有無を選択する。この時、町内避難の場合は、自宅から最も近い町内の避難施設を選択する。また、長島町以外の桑名市内に避難する場合は、高台に位置する施設(図-2AB)より最も近い場所を選択することとした。

その他、シミュレーションでは、調査より把握した自力避難が困難な世帯についても表現した。

表-4 災害情報の伝達時刻と調査票での表現

情報名称	発信時間	調査票における表現
事前情報	計算開始前	【状況 1】（上陸 1 日半前～1 日前）大規模な台風が紀伊半島に上陸する恐れがあり、 <u>東海地方の低平地に大規模な災害が発生する恐れがあるという情報</u> が伝達された。
自主避難	0 時間後 （上陸 15 時間前）	【状況 2】（上陸 1 日前～半日前）大規模な台風が上陸する恐れがあり、桑名市から <u>自主避難の呼びかけ</u> があった。
台風情報	3 時間後 （上陸 12 時間前）	【状況 3】（上陸半日前～9 時間前） <u>大規模な台風が上陸する恐れがあるという情報</u> が伝達された。
避難勧告	6 時間後 （上陸 9 時間前）	【状況 4】（上陸 9 時間前～6 時間前）大規模な台風が上陸する恐れがあり、桑名市から <u>避難勧告が発令</u> された。
避難指示	9 時間後 （上陸 6 時間前）	【状況 5】（上陸 6 時間前～直前）大規模な台風の上陸がほぼ確実と予測され、桑名市から <u>避難指示が発令</u> された。
決壊危険情報	15 時間後 （上陸時）	【状況 6】（台風が紀伊半島に上陸）高潮の影響により、長島町の <u>海岸や河川の堤防が決壊</u> しそうなことを知った。
決壊情報	16.5 時間後	【状況 7】高潮により <u>自宅付近の堤防が決壊</u> した。
自宅浸水	16.5 時間以降	【状況 8】 <u>自宅の周辺が浸水</u> し始めた。

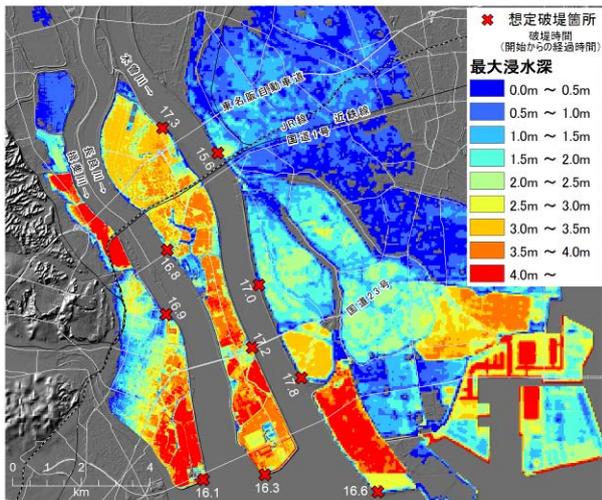
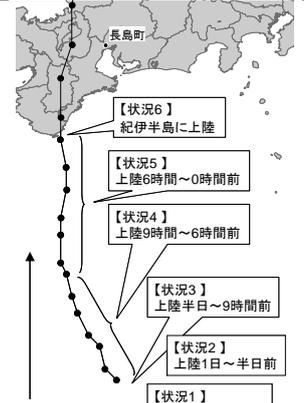


図-5 破堤時刻と最大浸水深

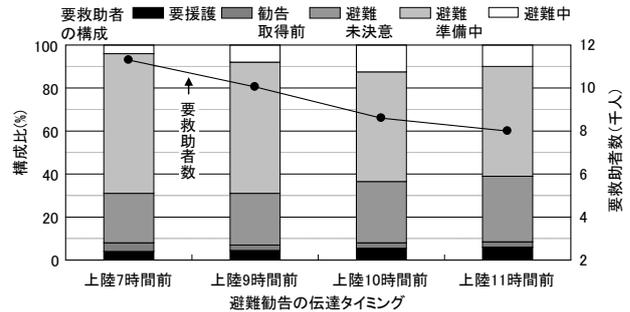


図-6 情報伝達タイミングによる要救助者の変化

表-5 住民の対応行動の改善シナリオ

No.	名称	改善内容
1	意思決定	少なくとも避難勧告で避難を決意する
2	避難準備	少なくとも意思決定後 30 分で避難を開始する
3	町外避難	町内避難者は高台の避難施設に車で避難する ※町外避難困難者は、バス輸送を行う
4	要援護者	制約付きで要援護者の避難を実施する
5	情報伝達	発表から 1 時間で全住民が情報を取得する

(3) シミュレーション分析

a) 現状の避難意向の再現シミュレーション

スーパー伊勢湾台風を想定したハザードシミュレーションによると、町内のほぼ全域が 3m 以上の深さで浸水し、大部分の住民が避難を要する事態となった（図-5 参照）。また、住民の行動意向までを表現した再現シミュレーションによると、今回想定した規模の高潮氾濫が生じた場合、適切に避難する住民は少なく、避難しない、または避難が遅れることによって、1 万人を超える要救助者が発生した（図-6 上陸 9 時間前参照）。これらの結果から、迅速な避難の実施が被害低減に向けて重要であること、また、避難先別の被害の発生状況などから、町外への避難が有効であることが確認された。

b) 情報伝達タイミングの迅速化による効果

再現シミュレーションの結果によると、要救助者の中で最も多くを占めたのは、避難準備中の住民であった。したがって、より早い時点における住民避難の開始を支援するための対策が重要となる。ここでは、避難勧告の発令タイミングを 9 時間前から、10 時間、11 時間と 1 時間ずつ早めた場合、また比較のため 2 時間遅らせ 7

時間前とした計 4 パターンのシナリオを設定した。なお、避難指示以前の情報についても避難勧告に合わせて相対的に時刻を移動させた。

4 パターンのシナリオによる結果（図-6 参照）によると、情報の伝達タイミングを早めることによって要救助者は減少するものの、2 時間早めたシナリオにおいても 8 千人程度の要救助者が発生しており、その多くの部分を未避難者が占めている。したがって、さらなる被害低減を実現するためには、住民の避難意向を改善するための対策をあわせて実施する必要があると言える。

c) 住民の対応行動の改善による効果

これまでの検討結果を参考に、表-5 に示す住民行動の改善シナリオによる被害の変化を把握する。なお、「町外避難」では町外への避難手段を持たない住民を対象に、町内の 10 箇所の避難施設を集合場所とし、避難勧告と同時に 2 台ずつのバスを向かわせて高台の避難施設まで風速が 20m/s に達するまで往復輸送した。また「要援護者」では、単独避難困難な世帯への避難支援が行わ

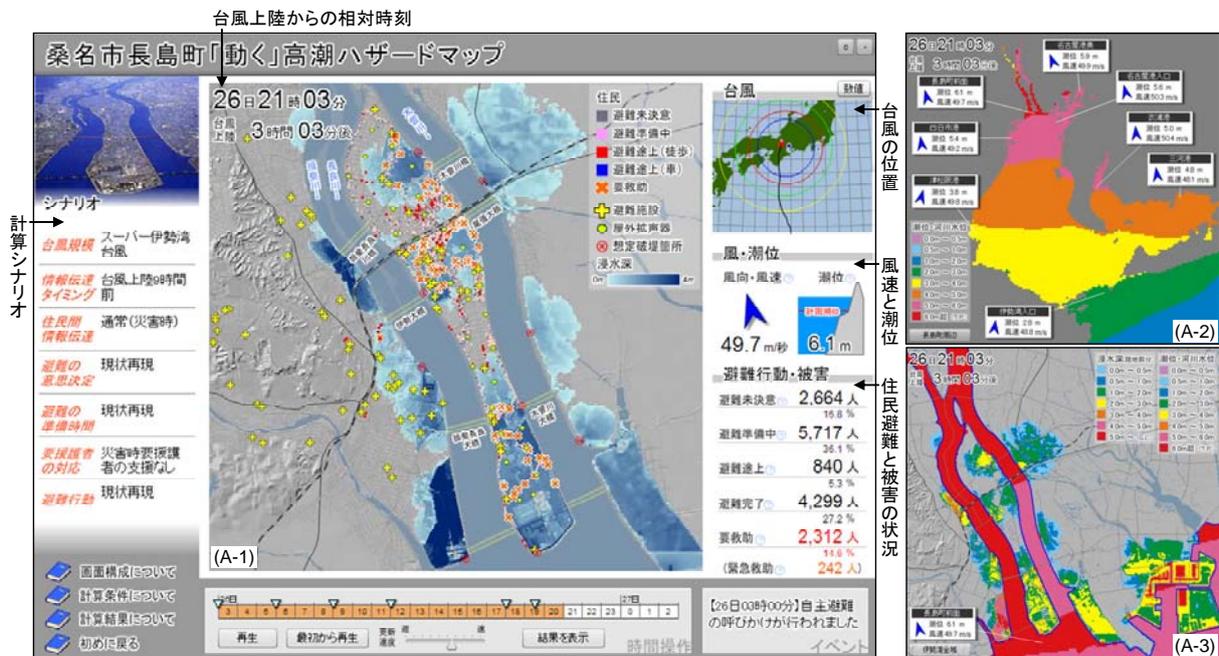


図-7 シミュレーション結果の表示システム

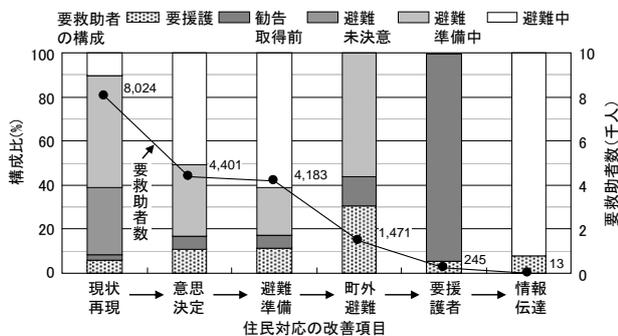


図-8 住民の対応行動改善による要救助者の変化

れた状況を想定し、避難準備に通常の倍の時間を要することを条件に要援護者世帯の避難を可能とした。

表-5に示す順番で改善シナリオを追加的に考慮した5パターンの計算を実施した。なお、情報伝達のタイミングは、上陸11時間前に避難勧告が発令されるシナリオを用いた。図-8に示した各シナリオパターンの結果より、早期の情報伝達と住民対応の改善により大幅に被害を低減することが可能であることが分かった。しかし、想定した全ての対策を実施したとしても十数人の要救助者が残る結果となった。この被害は、渋滞の発生に起因しており、地域別の避難経路や避難先の指示を考慮した追加的な分析結果から、渋滞対策を加えることで被害をゼロにまで低減することが可能であることが分かった。

4. 防災教育におけるシミュレータの活用

(1) シミュレータを利用した防災教育の実施

シナリオ分析の結果から、高潮災害における人的被害の低減に向けて、地域住民が適切な対応行動を取ることが重要であり、住民の意識改善が課題として位置づけ

られた。本研究では、この課題への対応として2009年に長島町の住民を対象とした防災講演会を6回実施した(参加者合計729人)。また、この内8月以降に実施した4回の講演会においては、要救助者数をゼロにするまでのシミュレーションを6つのシナリオに整理し、図-7に示すシステムを利用して段階的に説明した。このシステムは、1分毎に更新される台風の位置と連動して、シミュレータにより計算した風向・風速や住民の避難状況、潮位変化や氾濫の様子、そして人的被害の発生状況などを表示するものである。画面中央(A-1)には、住民の避難状況や人的被害の発生状況がアニメーション表示され、必要に応じて湾内の高潮の発生状況(A-2)や、河道内の水位や堤内地の氾濫状況(A-3)と切り替えて表示することができる。また、最終的な人的被害の発生状況を表示したり、2パターンの計算結果を比較したりする機能を備えており、台風の位置と風速の関係や、高潮氾濫の発生タイミングや地域別の浸水状況、そして住民の避難状況による被害の発生状況などの結果について視覚的に表現することが可能となっている。防災講演会では、このシステムを利用することによって、被害の発生要因や対策の必要性について高潮災害の進展や被害の発生過程を具体的に提示しながら説明した。

(2) 防災教育による意識変化

防災教育による意識変化を把握するため、最終講演会から約2ヶ月が経過した後に再度長島町民を対象とした意識調査を実施した(4,607配布、1,036回収)。

回答者のシミュレーションの閲覧状況を図-9左に示す。なお、講演会を実施した2009年は、伊勢湾台風から半世紀の節目に当たり、テレビなどにおいても本取り組み

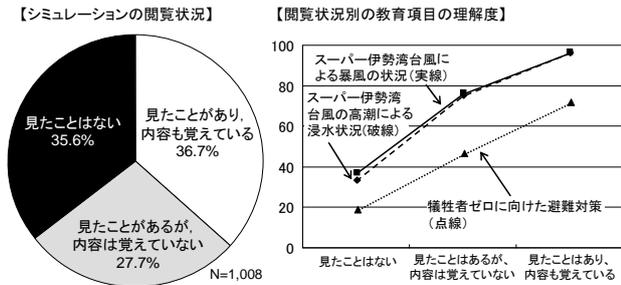


図-9 シミュレーションの閲覧状況と教育項目の理解度

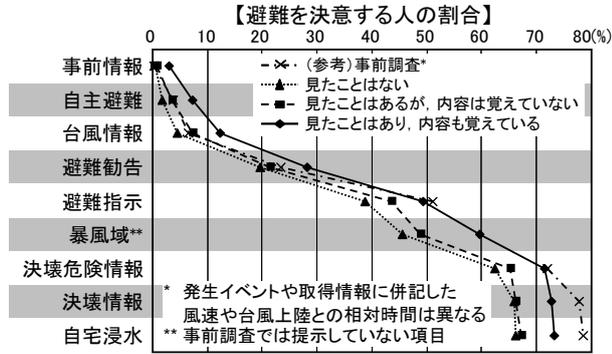


図-10 避難の意志決定タイミングの変化

を含む伊勢湾台風関連の報道が多くなされた。また、内容を記憶していると回答した人の37%は、前述した講演会のいずれにも参加しておらず、参加者やメディアなどから間接的に閲覧した人も少なくない。

図-9の右図は、スーパー伊勢湾台風の襲来を想定した場合の「暴風の状況」、「高潮による浸水状況」、「犠牲者ゼロに向けた避難対策」の3項目について、シミュレーションの閲覧状況別に「理解できている」または、「だいたい理解できている」と回答した人の割合の合計を示したものである。この結果によると、各項目ともにシミュレーションによる結果を閲覧した人、またその内容を記憶している人ほど、自己評価において理解度が高まっている様子が把握できる。

次に図-10は、閲覧状況別に災害の進展状況毎の避難意向について質問した結果である。提示した状況は基本的に表-4と同様としたが、シナリオ分析による適切な避難勧告の発令タイミングを反映して、事前調査での提示時刻よりも各状況ともに3時間早い時刻を併記している。また、状況の一つに「暴風域(風速25 m/s)に入った」を加えている。調査結果を見ると、提示条件が異なるため一概に比較することは出来ないが、シミュレーションの内容を記憶している回答者は、事前調査の結果よりも避難勧告が伝達される状況までの避難率が高く、暴風により屋外での行動が危険となる避難指示以降の避難率が低くなっており、より適切な行動意向を持つことが把握できる。また、避難先の意向について見ると(図-11参照)、シミュレーションを閲覧した人、またその内容を記憶している人ほど、町内避難の意向を持つ人が減少しており、適切な対策として提示した町外避難

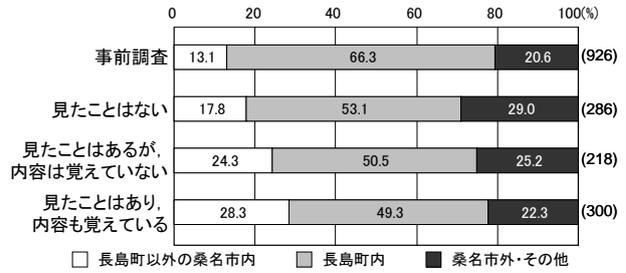


図-11 避難先の意向の変化

の意向を持つ人が増加している傾向が見られる。

以上より、スーパー伊勢湾台風による暴風や被害状況の理解、また避難の意志決定や避難先の意向について、シミュレーションを閲覧した人、またその内容を記憶している人ほど、適切な理解や行動意向を持つ傾向が把握された。防災教育を実施した期間は、前述の通り様々な関連イベントや報道がなされており、シミュレーションの閲覧状況とその他の情報の接触量は比例していると考えられることから、本取り組みだけの効果に限定することはできないが、講演会の参加者からは、シミュレーションによる理解促進について概ね肯定的な意見が得られており、適切な影響を与えたものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、超大型で非常に強い台風による高潮災害による犠牲者をゼロに抑えることを目指した対策の検討やそのための防災教育を支援することを目的としたシミュレータを構築し、実地域を対象とした具体的な対策検討や防災教育での活用を行った。今後は、シミュレータなどを利用した検討成果の普及啓発を進めるとともに、地域住民や自治体からのフィードバックを踏まえ改良することで、高潮災害の特性や地域の実態を反映したより具体的な対応策の検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) Myers V.A.: Characteristics of United States Hurricanes Pertinent to Levee Design for Lake Okeechobee, Florida, *Hydro-Meteorological Report of U.S. Weather Bureau*, No.32, pp.1-106, 1954.
- 2) 柴木秀之, 渡辺晃: 密度成層とWave Setupを考慮した多層高潮推算に関する研究, *土木学会論文集*, No.719/II-61, pp.47-66, 2002.
- 3) 桑沢敏行, 片田敏孝, 及川康, 児玉真: 洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用, *土木学会論文集D*, Vol.64, No.3, pp.354-366, 2008.
- 4) Greenshields, B.: A study of traffic capacity, *Proc. of Highway Research Board*, Vol.14, pp.448-494, 1934.
- 5) 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)に関する研究, *水工学論文集*, 39巻, pp.879-882, 1995.
- 6) 東海ネーデルランド高潮・洪水地域協議会: 危機管理行動計画(第二版), 2009.