

高低差を考慮した津波災害時の群衆避難における経路選択に関する一検討

北原 武嗣¹・岸 祐介²・久保 幸奨³

¹正会員 関東学院大学教授 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E-mail: kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

²正会員 関東学院大学助手 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E-mail: kishi@kanto-gakuin.ac.jp

³学生会員 関東学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E-mail: m1145003@kanto-gakuin.ac.jp

首都圏直下地震の発生が懸念されている中、津波による浸水予測が大幅に厳しいものへと改訂されてきている。災害時の群衆行動を事前に検討しておくことは、被害軽減につながる重要な課題である。本研究では鎌倉市材木座沿岸部を対象に、津波災害を想定した避難シミュレーションモデルを作成し、各避難者の避難経路選択に関して高低差の考慮が、避難者全体の避難時間にどのような影響を及ぼすのかについて解析的に検討を行った。

シミュレーションは市街地を対象としたためネットワーク型モデルを採用し、避難経路に関してはダイクストラ法によって避難者が経路選択を行えるように設定した。また、鎌倉市が公表している避難地区、避難ビルと経路上にある海拔10m以上の地域を、最終目的地である避難場所として設定した。該当地域の人口を避難者数としてシミュレーションを行った結果、避難地域までの所要時間は、高い場所を目指そうとするよりも避難地区までの最短経路を通り避難する場合の方が、避難者全体の避難完了までの所要時間が短くなる傾向にあった。

Key Words : *Evacuation Simulations, Tsunami disaster, multi-agent simulation, crowd behavior*

1. はじめに

2004年12月に発生したスマトラ島沖地震¹⁾では、インド洋沿岸部の広範囲に渡り、津波による甚大な被害が生じた。この地震以降、津波災害に関する危険性が再認識されたが、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、宮城県や岩手県などの沿岸部が波高6m以上の津波に襲われ、高齢者などの災害弱者だけでなく避難誘導にあたった自治体や消防団などでも多くの人命が失われた²⁾。

近年、東海・東南海・南海地震のような海溝型巨大地震の発生が予想されている一方で、首都圏では直下型地震の発生も懸念されており、近郊に位置する沿岸部においては従来の地震対策だけでなく、津波への対策が喫緊の課題となっている。

神奈川県でも東日本大震災の影響を受け、2011年12月に最大規模の津波を想定した鎌倉市津波浸水予測図を公表し、2012年5月に公表された改訂版³⁾では、津波に

よる浸水の前想範囲がより広範囲に広がっている。

今後、関東地方における大規模な地震発生の際、沿岸部の地域においては事前に避難行動に関する知識を持っておくことが求められる。また、津波による海拔の低い地域一体の浸水が予想され、群衆避難に関する検討は各自治体における災害時の迅速な避難勧告や誘導に役立つものと考えられる。すなわち、群衆避難行動におけるシナリオの作成が、危機管理の上で重要になると考えられる。

一方、群衆行動に関する研究例は多数存在するが、多くは人間工学的な部分に着目した研究内容であり、実用性を目指す一方で具体的な検討をするには多くの課題が残されている。現実的には災害時の避難対策の策定は急務であり、策定にあたっては群衆避難の行動分析がなされている状態が望ましい。

これまで群衆避難行動に関しては、流体モデル⁴⁾⁵⁾や粒子モデル⁶⁾による検討が行われてきた。これらの研究は避難行動をとる群衆を一個の個体と捉えて検討を行う

ものであるが、実際の群衆行動においては避難者同士の情報伝達や周辺環境の変化に伴う避難行動の変化など、より多くの情報が介在する。

その問題を解決する方法として、近年ではマルチエージェントシミュレーションによる検討が増えてきている。マルチエージェントシステムの特徴として、エージェント間の相互作用効果が挙げられる。例えば、堀ら⁷⁾は損傷を受けた構造物内における避難シミュレーションを行っており、混雑によって群衆の歩行速度が低減する状況に関して検討している。また、近田ら⁸⁾は閉鎖空間内における避難行動シミュレーションをマルチエージェントシステムを用い、対象となる閉鎖空間をエリアフィールド型モデルとして、火災などの周辺状況に応じた避難行動に関する検討を行っている。

また津波避難に関しても、幾つかの検討^{9,10)}がなされてきており、粗密問題をはじめとする避難者同士の相互作用や経路選択問題などに関して、ポテンシャル法による検討方法などの多くの提案がなされている。しかし、沿岸地域の地形情報、特に避難場所までの高低差を考慮した避難行動に関しては十分に検討されていないのが現状である。

そこで本研究では、マルチエージェントシステムを用いて、神奈川県鎌倉市の材木座沿岸部を対象に、高低差の考慮が群衆避難における経路選択と避難時間に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。

2. シミュレーション概要

(1) 対象地域および避難地区の設定

神奈川県では、県内の各自治体が津波ハザードマップを作成するための資料として津波浸水予測図を公表しており、その作成にあたっては過去の地震データを元にその被害範囲から浸水予想範囲を求めている³⁾。その中から、本研究では明応型地震発生を想定した場合の、鎌倉市材木座における浸水予測図を元にシミュレーション範囲を決定した。図-1にシミュレーション範囲とした鎌倉市材木座沿岸部の地図を示す。

明応型地震は1498年に東海道沖で発生した地震で、推定震度5~6、鎌倉では大仏殿まで津波が届いたとの記録があり、この記録をもとに津波の高さは8~10mであったと推定されている。過去の地震被害において、対象地域では最大の津波被害が出たと考えられ、鎌倉市においても明応型地震による浸水予測図を元に避難場所の設定を行い公表している¹¹⁾。藤沢市、茅ヶ崎市などの臨海地域と比べて、凹状の湾となっている鎌倉市の沿岸部は、津波のエネルギーが集中することにより波高が高く、被害範囲が広がると予測されている。

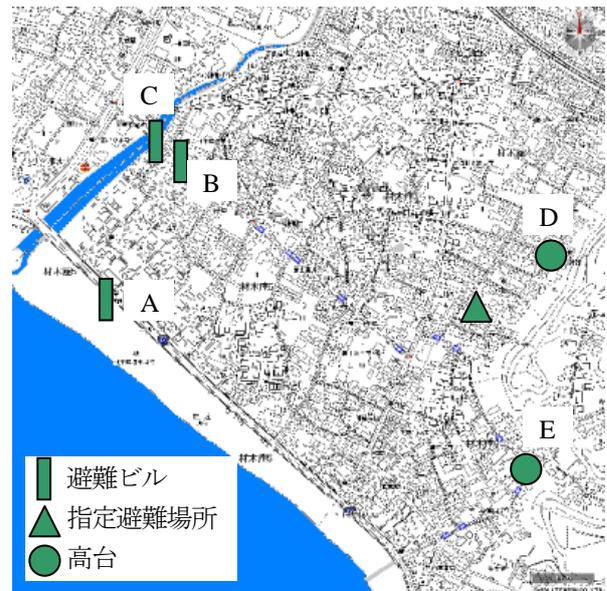


図-1 鎌倉市材木座沿岸部

また、津波からの避難において最終目的地となる避難場所の設定に関しては、該当地域上で鎌倉市が公表している指定避難場所、避難ビルおよび経路上の海拔10m以上となる高台を本シミュレーションにおける避難場所として設定した。該当箇所を図-1に示す。図中、A, B, Cは避難ビルを、D, Eは高台を▲は指定避難場所を示す。

(2) 解析条件および避難者に関する設定

本研究では、避難行動解析の実施に汎用マルチエージェントシミュレーションソフト *artisoc3.0* (構造計画研究所)を用いた。対象市街地のモデル化にあたってはネットワーク型モデルを用い、避難者の経路探索アルゴリズムとしてダイクストラ法¹²⁾によって避難場所までの距離および高低差によるコスト演算を行った。ノードは交差点や分岐路に配置し、それらを結ぶ道路、通路に合わせてリンクの配置を行った。避難者の歩行速度に関しては、性別および年代別に関して変動するパラメータとして扱うものとした。ただし、本論文では高低差考慮の影響のみに着目するため、佐藤ら¹³⁾のシミュレーションを参考に、群衆行動における平均的な歩行速度として1.4m/secとした。

また避難者の人数は、対象である材木座の人口¹⁴⁾を参考に4000人とした。本研究では4000人の避難者に対して、避難場所までの最短水平距離を優先する避難者と高低差を考慮した経路選択を行う避難者として区別し、その人数比を変化させ、各ケースにおける避難時間への影響について検討を行った。ただし、いずれの経路選択においても避難場所が最終目的地であり、全避難者が避難場所を認知していることと、避難場所へ至ることが前提条件となる。避難者の初期配置に関しては、対象地域上

表-1 水平距離と高低差の割合

	$\alpha : \beta$
水平距離優先	10 : 0
高低差考慮	1 : 9

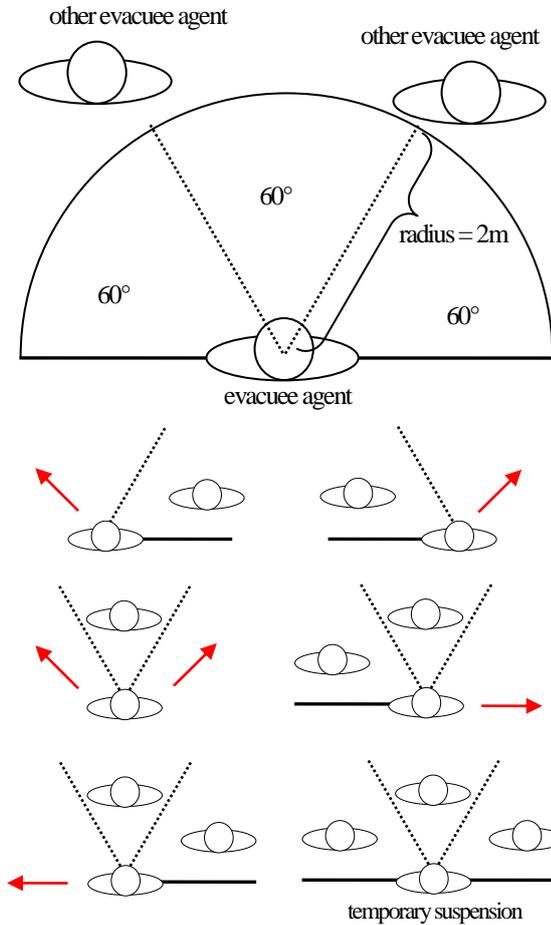


図-2 回避行動規則および認識範囲

にランダムに配置した。ただし、初期条件を合わせるため全ケースを通じて配置は固定している。

(3) 経路選択手法

本研究では、経路問題におけるダイクストラ法による各ノードのコスト計算に避難場所からの水平距離と高低差を用いている。このとき、高低差は3次元的な距離を算出するために用いるのではなく、水平距離との比を百分率で表し、その割合を変化させることによって避難地区までの最短水平距離を優先する避難者と高低差を考慮する避難者を区別するものとした。

$$C_{i,j} = \alpha \cdot h_{i,j} + \beta \frac{v_{\max} - v_{i,j}}{v_{\max}} h_{i,j} \quad (1)$$

ただし、

$$\alpha + \beta = 1.0 \quad (2)$$

ここで、 $C_{i,j}$: 各ノード間のコスト、 $h_{i,j}$: 各ノード間の

表-2 各経路選択手法の人数比と避難完了の時間

水平距離優先 (%)	高低差考慮 (%)	避難完了時間 (sec)
100	0	1631
90	10	1838
80	20	2076
70	30	2364
60	40	2672
50	50	2986
40	60	2931
30	70	3331
20	80	3459
10	90	4319
0	100	3680

水平距離、 $v_{i,j}$: 各ノード間の高低差、 v_{\max} : 最終目的地の標高、 α : 各ノード間の水平距離に対する係数、 β : 各ノード間の高低差に対する係数。

式(1)、式(2)の条件を元に、各ノードにおけるスパニングツリーの累積値が最小になるように演算を行い、各避難者はコストの小さいノードへ向かうように解析を行った。本研究では、避難地区までの水平距離を優先する避難者と高低差を考慮する避難者に関して、式(2)に示した係数に関して表-1 示す割合を設定した。

(4) 回避行動規則

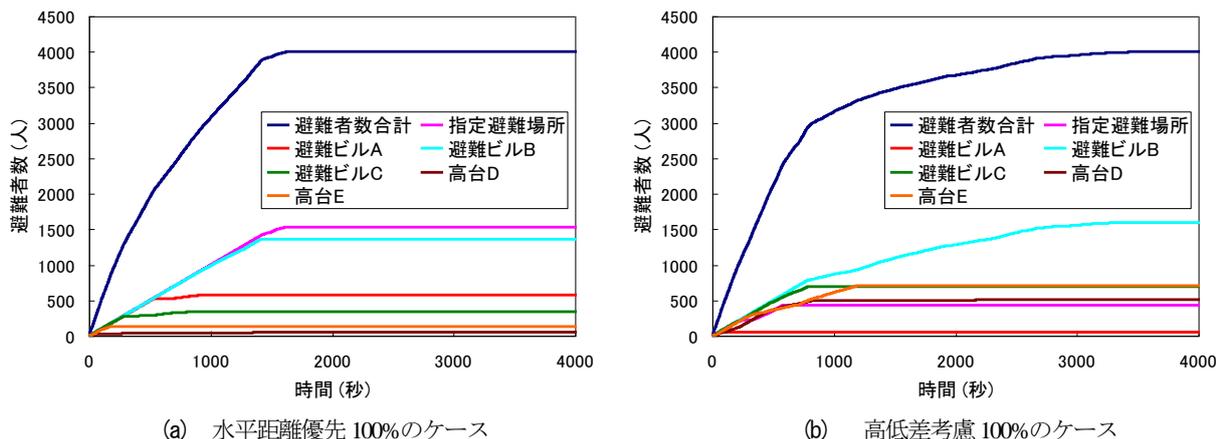
本研究では、避難者の回避行動規則に関して以下のような設定を行った。図-2 に示すように、まず避難者の進行方向に対し、前方 180°、人体を中心に半径 2m 以内を避難者のパーソナルスペースと定義し、その範囲内に他の避難者の存在が認められた場合は、回避行動を取るものとした。前方左側 60°に他者を認めた場合は右斜め 45°方向へ、前方右側 60°に他者を認めた場合は左斜め 45°方向へ回避行動を取る。また前方 60°の範囲に他者を認めた場合はランダムに左右斜め 45°方向へ回避行動を取り、前方 60°の範囲と左右いずれか 60°の範囲に他者を認めた場合には、左右のうち他者のいない方向へ 90°の回避行動を取る。さらに、前方および左右の 60°のいずれにも他者を認めた場合には、一時停止するというように回避規則を設けた。

以上より、シミュレーションの実施にあたってはいくつかの前提条件が存在し、それらを踏まえた上で群衆行動について検討を行った。

3. シミュレーション結果

(1) 人数比と避難時間との関係

表-2 に避難場所までの最短水平距離を優先する避難



(a) 水平距離優先 100%のケース (b) 高低差考慮 100%のケース

図-3 各避難場所への避難人数の推移

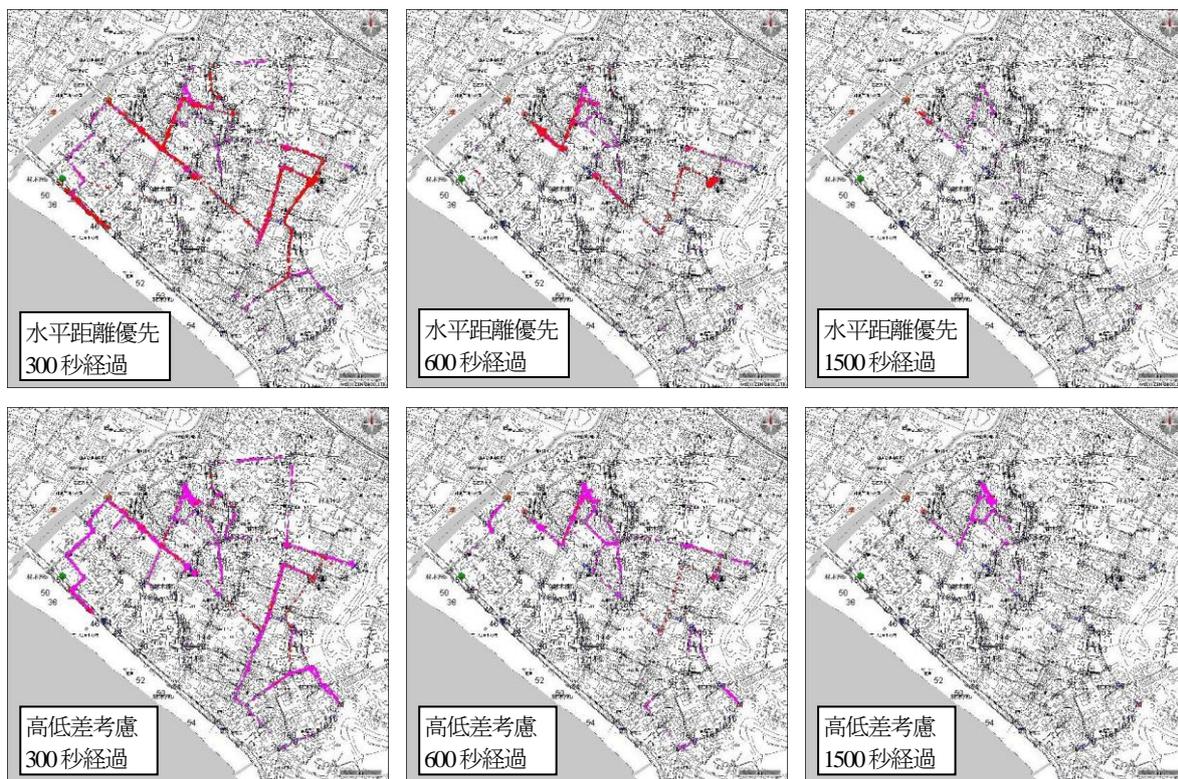


図-4 各避難場所への避難人数の推移

者と高低差を考慮した経路選択を行う避難者の人数比、および対象地域に配置した全避難者の避難完了までの時間を示している。全体的な傾向として、高低差を考慮した人数よりも避難場所までの最短距離を優先する人数が多いケースの方が、全避難者の避難完了までの時間が短くなる傾向が表れた。高低差を考慮する人数が90%のケースと100%のケースでは避難完了までの時間が逆転しており、90%のケースが最も長い避難時間となっている。これは回避規則に基づいた一部の避難者が特定の経路を辿り続けるという、設定上の問題が原因である。

避難完了時間が延長する原因としては、ボトルネック部分での滞留が考えられる。つまり、高低差を考慮して

標高の高い場所への移動を優先する人数が多いほど、本研究の対象地域では滞留が生じやすく、より長い待ち行列を形成することになると考えられる。

(2) 避難場所への避難人数の割合

図-3 に避難場所への最短水平距離を全避難者が優先した場合と、高低差を全避難者が考慮した場合における各避難場所への経過時間に伴う避難者数の推移を示す。両図を比較すると、経路選択方法の違いが避難場所への避難人数にも影響していることが確認できる。

また、図-4 には避難開始からの経過時間と避難者の避難状況を地図上に表している。図中の赤色もしくは桃

色が避難群集を表している。図-3と同様に経路選択方法の違いが避難状況の差として表れており、時間の経過とともにその差も明確になっていることが確認できる。

まず指定避難場所に着目すると、図-3では水平距離を優先する場合は最終的に1500人以上が避難しているのに対し、高低差を考慮した場合は500人未満となり、避難人数が1/3以下となっている。一方、海岸際にある避難ビルAに対しては、高低差を考慮した場合は殆どの避難者が避難先として選ばない状態となるが、水平距離を優先した場合は500人以上が避難している。また経過時間に着目すると、高低差を考慮した場合は避難開始から間もなく避難ビルAへの避難者数は増加しない状態となるが、水平距離を優先する場合は、避難開始後500秒辺りまで指定避難場所や避難ビルBと同じペースで避難者数が増え続け、その後も900秒辺りまで緩やかに増加している。ただし、津波の到達する時間について考えれば、地震発生などの後15分もの間、海岸沿いにある避難ビルに避難し続けることは困難であると考えられる。また、図-4からも600秒の時点でほとんどの避難者が避難ビルAへは移動していない状態になると判断できる。

また、高台への避難者数に関しても高低差を考慮するか否かで明確な人数差が表れており、高低差を考慮した場合は2箇所の高台へそれぞれ500人以上が避難しているが、水平距離を優先した場合はその半分以下の人数となっている。図-4の300秒経過時点での避難者の状態にも、経路選択方法の違いが避難場所への避難状況の差として表れており、避難場所への水平距離を優先した場合は300秒経過の時点ですでに高台Eへの経路を選択する避難者が途切れ始めている。一方、高低差を考慮する場合は同じ時間の経過時点でも、多くの避難者が高台Eへの経路を選択していることがわかる。

避難ビルBへの避難者数の推移について着目すると、最終的な避難者数の違いよりも、経過時間に伴う避難者数の違いに大きく変化が表れている。避難先への水平距離を優先した場合は、一定数の避難者が1500秒あたりまで避難し続けたが、高低差を考慮した場合は700～800秒辺りから避難する人数が減少している。他の避難場所への避難者数が増加していないことから、避難ビルBへの避難が全避難者の避難完了時間に大きく影響していることが考えられる。また、避難者数合計の推移にもその特徴が表れている。

前節にも述べているように、高低差を考慮した場合には避難ビルBへの避難経路において、図-4の1500秒経過時点に見られるようなボトルネック部分で長い待ち行列が形成されてしまい、避難完了時間が延長される結果となるものと考えられる。また、本研究では対象市街地より外側（内陸側など）への避難は考慮していない。

つまり、どのような経路を選択しようとも避難者は必ず避難場所に到達するように設定されており、このことも避難時間の延長に影響しているのではないかと考えられる。

4. まとめ

本研究では、マルチエージェントシステムを用いて、鎌倉市材木座沿岸部を対象に、高低差の考慮が群衆避難における経路選択と避難時間に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

避難場所までの最短水平距離を優先する避難者と高低差を考慮した経路選択を行う避難者の人数比を変化させて検討を行った結果、全体的な傾向として、高低差を考慮した人数よりも避難場所までの最短距離を優先する人数が多い方が、全避難者の避難完了までの時間が短くなった。

また各避難場所への避難者数の推移について、全避難者が最短距離を優先する場合と高低差を考慮する場合と比較した結果、特定の避難場所への避難者の集中とそのためにも生じるボトルネック部分での待ち行列が、避難完了時間の延長に影響していると考えられる。

今回は簡易なモデルを用いて経路選択方法の影響について検討を行ったが、現実的には人間の非常時の心理状態やそれに伴う行動の変化については検討方法自体に多くの課題が残されている。今後、性別や年代別、また観光客など地元の地理に明るくない防災弱者についての考慮を行うとともに、避難行動に影響すると考えられるパラメータの見直しを測り、シミュレーションの精度を詰めていく必要がある。

謝辞：本研究は平成23年度科研費（基盤研究(B)、課題番号：22310144、代表：伊津野和行）の助成を得た。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) International Tsunami Information Center, URL: <http://itic.ioc-unesco.org/index.php>.
- 2) 消防団員等公務災害補償等共済基金:東日本大震災に係る消防団員等の公務災害補償などの現状について, URL : <http://www.syouboukikin.jp/pdfs/higasinihondaisinnsai7.pdf>.
- 3) 神奈川県：津波浸水予測図, URL : <http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f360944/>.
- 4) 藤田隆史：大震災時における住民避難の最適化－避難群衆の流動シミュレーション－, 計画自動制御学会論文集, 12-4, pp.424-431, 1976.
- 5) 原文雄：大震災からの群衆避難のダイナミックモ

- デル, 計測と制御, Vol.19, No.7, pp.708-712, 1980.
- 6) 原田知弥, 殿最浩司, 五十里洋行: 粒子法を応用した避難シミュレーション, 電力土木, No.342, pp.51-55, 2009.
 - 7) 堀宗朗, 犬飼洋平, 小国健二, 市村強: 地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol.3, pp.138-145, 2005.
 - 8) 近田康夫, 濱政洋, 城戸隆良: マルチエージェントを用いた避難行動シミュレーション, 土木情報利用技術論文集, Vol.17, pp.29-38, 2008.
 - 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, Vol.57, pp.343-347, 2005.
 - 10) 源貴志・成行義文・藤原康寛・三神厚: 津波避難シミュレーションシステムの開発と地区の避難安全性評価への適用, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.
 - 11) 鎌倉市: ハザードマップ・防災マップ・海抜マップについて, URL: <http://www.city.kamakura.kanagawa.jp/sougoubousai/hazardmap.html>.
 - 12) Dijkstra, E. W. :A Note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp.269-271, 1959.
 - 13) 佐藤和希, 高橋徹, 山田隆志, 寺野隆雄: エージェント技術に基づく駅構内の群歩行シミュレーション, 情報処理学会研究報告, 2009-ICS-154(15), pp.81-86, 2009.
 - 14) 鎌倉市: 市政情報(統計), URL: <http://www.city.kamakura.kanagawa.jp/shisei/toukei/jinkou/index.html>.

(2012.?? 受付)

CROWD EVACUATION BEHAVIOR FROM TSUNAMI DISASTER WITH CONSIDERATION FOR DIFFERENCE IN HEIGHT

Takeshi Kitahara, Yusuke Kishi and Kousuke Kubo

Coast area in Japan exposure to the menaces of Tsunami disaster, so public agencies have to develop the evacuation manuals immediately, however, many agendas are remained for crowd behavior during disasters. Therefore, some evacuation simulations at the coast area in Kamakura city were calculated, and this paper discusses that the fundamental verification of the influence on the priorities between distance and height to the safety zones for crowd routing.

The target area was modeled network data model and the evacuee routing was calculated Dijkstra's algorithm. Furthermore, the evacuation area and buildings which publicized by Kamakura city and the upland which over 10 meter's above sea level were assumed the safety zones in the evacuation simulation. The analytical results show that the evacuation time of the routing with height consideration is longer than the case without height consideration.