

エージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーションの試み—湘南海岸における事例—

石橋 健一, 藤岡 正樹

1. はじめに

1976年に地震予知連絡協議会で東海地震発生の可能性が発表されて以来、様々な地震に対する研究がなされ、それに基づく防災対策が行われてきた。その中でも津波対策は、防波堤や防潮堤の設置といった構造的対策と津波発生時の避難対策（例えば、既存建築物の避難施設指定）や、高地移転（住民の高台への移転）といった非構造的対策が行われてきた（神尾[9]、間瀬・高山・河田[14]、消防科学総合センター[22]、山下[23]）。

1993年7月に発生した北海道南西沖地震では、北海道奥尻島に津波が来襲し、自動車で避難途中の住民の多くが犠牲となっている。津波警報が発令された場合、どのような手段で避難をすべきか？ また、どこに避難すべきか？ といったことを住民全てが知っていたならば、より安全に避難できたはずである。一方、避難指示を出す行政は、どこに避難場所を設定すれば、より多くの住民を安全に避難させることが可能になるのか？ といったことを明らかにするために防災計画を立案しているが、実際には、避難者がどのような経路を通過して避難をするのか？ 避難経路毎の道路容量は混雑を発生させることなく住民を避難させることが可能なのか といった点が反映されているとは言い難い。本来、津波避難計画立案に際しては、津波警報発令以降、避難対象となる住民がどのように行動するかを予測することが必要であるが、津波警報発令後、経過時間毎に住民一人一人の行動をシミュレートすることは不可能である。そもそも、屋外避難シミュレーションモデルは、対象領域が広いこと、対象者数が多いこと、と相まって、シミュレーションを実現するため

には膨大な計算量とそれを可能にする計算資源が必要であることが、熊谷[12]によって指摘されていた。

そのため、防災計画立案では避難経路への避難者数を与件とし、これを基にして避難計画の評価が行われていた。よって、評価の前提である外生変数（上記の例では、避難経路への避難者数）が大きく変化した場合、避難経路の事前評価は当てはまらなくなってしまう。

そこで、本論文では、津波警報発令後の経過時間に従った住民の避難行動をシミュレート可能なモデルの構築を行うと同時に、住民の情報受発信機能を組み込むこととする。このモデルを利用することによって、これまで与件として扱われてきた避難経路への避難者数を、住民の情報の受発信機能を考慮した避難行動を、経過時間に従ってシミュレートすることが可能となり、その結果から避難者数を推計することが可能となる。これにより、より効果的な避難計画を立案することが可能になると考える。

2. ねらいと目的

2.1 問題の設定

今回研究対象とする神奈川県藤沢市の南部は片瀬海岸、鵜沼海岸、辻堂海岸から構成されており、地震による津波の危険性に直面している。藤沢市でも海岸沿いに津波からの避難を目的として高層マンションなどを避難建物として指定をしている。これら避難建物による計画収容可能人数は77,217人となっているが、実際には避難建物への案内板の破損や避難建物の出入り口が見つげづらい等の状況が調査によって明らかにされており（實政[18]）、避難建物の指定という津波対策計画が機能するかどうかの検証を行うことが必要である。

そもそも、時間の経過に従って避難者の位置は、随時変化する。この避難者の位置を避難建物について集計したものが避難者の数であり、危険地帯にいた人の人数を集計したものが津波による被災者となる。つま

いしばし けんいち

慶應義塾大学 総合政策学部

〒252-8520 藤沢市遠藤 5322

ふじおか まさき

慶應義塾大学大学院

〒252-8520 藤沢市遠藤 5322

り、津波による被災者を減少させるための避難計画を評価するには、経過時間に従って住民の位置を予測することが必要である。しかし、避難警報発令後の経過時間に従って、避難経路決定等の意思決定を行っていることを考慮すると、経過時間による避難者の避難行動は複雑になると考えられる。そこで、本論文では、避難者の意思決定の要因の一つである情報獲得行動を考慮した避難行動予測を行うことを問題とする。

2.2 ねらいと目的

避難者の行動を考えてみると、これまでに指摘されているように(李[13])、自発的に避難行動ができる人、追従的に避難行動を発生させる人の2つに区分できる。この場合、追従的に避難行動を発生させている人は、情報(例えば避難所の位置や避難方向など)がないために追従的行動を発生させているとするならば、情報をやり取りすることによって、自発的避難行動へ移行することが可能であると考えられる。いずれにせよ、避難者が情報を受信し、それを理解し、さらに発信するという一連の情報処理プロセスをモデル化することによって、より現実に近い避難行動モデルを構築することが可能であると考えられる。そこで、本論文のねらいは、災害発生時の避難行動において、避難者の情報取得活動や情報発信活動に着目した、避難時の行動を記述可能とするモデルの構築をねらいとする。

そもそも避難行動における避難者と情報との関係は、情報獲得行動(他人からの情報獲得、環境からの情報獲得)、獲得した情報の理解、さらには、理解した情報を発信する活動、の3つに分類できる。避難者は、避難行動の開始、避難先の決定、避難経路の決定、といった避難行動の全ての段階において、いずれかの情報の取得、処理といった一連のプロセスを行って、行動を発生させている。

これに対し、既に、林・橋本・渡辺・友利[6]、糸井川・梶[7]、李[13]らによって、火災や水害といった状況下での避難モデルの開発が行われている。これらの研究は、群集歩行モデルや追従モデルを構築することによって避難行動を記述していた。これらのモデルは、避難者は何らかの情報を受け取り、それに従って避難行動を行うことを前提としている。すなわち、情報を受け取った人は全ての情報を理解でき、かつ、他人への情報発信を行わない、との仮定がなされている。しかし、実際には、気象条件によっては避難警報が聞こえないケースや他人へ避難経路などを教えるケースなど、が発生すると考えられる。そこで、本研究

では、津波警報発令時における避難者の情報受発信行動に着目した避難モデルの構築を行い、実際に、藤沢市湘南海岸において、避難者の行動をシミュレートすることを目的とする。加えて、津波による被災者を減少させるために、避難建物への避難制限時間の設定という避難計画が有効であるかどうかについて、検証を行う。

3. エージェントモデルによる災害時避難行動モデル

3.1 避難行動モデル

避難行動モデルのサーベイは熊谷[12]、李[13]らによって行われている。李[13]によれば、避難行動は、群集歩行、追従モデルの2つに区分でき、それぞれの特徴は以下の通りである。

群集歩行では、群集密度によって群集歩行速度が決定され、群集密度が1.5人/m²以上になると、群集内で追い越しが不可能となる。この場合の歩行速度は集団的条件によって決まるとされている。また、追従モデルは、避難者が前を行く先行避難者に追従する形で歩行し、先行者との相対関係によって速度が決定されるモデルとなっている。追従モデルでは、先行者との間隔、歩行速度差、自分の歩行速度などをインプットの情報として、自分が先行者を追い抜かないようにしたものである。

これらのモデルは、情報を受信することをモデルの中に含んでいるものもある。ただし、これらのモデルは全ての人を受け取った情報を理解することができるかと仮定をしている。しかし、現実には、全ての人を受け取った情報を理解できるわけではない。そこで、より現実に近いモデルを構築するためには、受け取った情報を理解できるかどうか、といった項目について追加を行う必要がある。

3.2 エージェント型行動モデル

近年、エージェント技術を用いたモデル構築が様々な分野において、多数行われている(Kohler and Gumerman[10]、藤田・鐘ヶ江[5]、オペレーションズ・リサーチ学会[16]、組織学会[19]、日本建築学会[15])。

エージェントモデルについての詳細はRussell and Norvig(古川監訳)[17]に譲るが、エージェントの基本的な特性として、1) 自立性(エージェントは人間などの直接的介入なしに動作し、自分の行動や内部状態を制御可能なこと)、2) 社会性(何らかの言語を

介して他のエージェントや人間と情報交換が可能なこと), 3) 反応性 (エージェント自身が自分自身の置かれた環境を認識し, その変化に対して適切に应答すること), 4) 自発性 (外部環境に対して単純な反応だけではなく, 目標を持った自発的な行動を起こすことが可能なこと), の4つがあげられる (日本建築学会 [15]).

すなわち, エージェントモデルでは, エージェント自身が環境を認知し, 自律的に自分自身を環境に対応させるように変化し, 加えて, 他のエージェントとも情報交換を行い, 目標を達成するためによりよい行動を自分自身で計画し, 実現することができる, という特性を持っている. このようなエージェントの行動を構成する機能的要素は, 観測, 環境デザイン, 計画立案, 行為, の4つである (日本建築学会 [15]). つまり, 環境を観測することによって得られる何らかの情報をインプットとし, これをエージェントが理解した結果, アウトプットとして観測されるのが行為である. よって, エージェントモデルを用いることの最大の利点は, 個人の問題解決行動を homogeneous な行動として扱うのではなく, heterogeneous な行動として扱うことが可能となっており, より人間社会に近いモデルを構築することが可能になっている.

3.3 エージェント型避難行動モデル

既に, 人工生命とファジィ推論を組み合わせることによって, 避難者と誘導者という異なる役割を導入することが可能になるとともに, 避難者の危険意識を避難行動に組み込んだ避難モデルの開発が行われている (香川 [8]). また, 街路や地区の認知構造をベースにして避難経路を選択するモデル (北村・鈴木・今村 [11], 鈴木・今村 [20, 21]) の開発も行われている. いずれにせよ, これまで避難モデルで課題としてあげられてきた避難者の心理的要因や避難地域の認知といった問題の解決が始まっている.

本研究では, 避難行動をマルチエージェントモデルを用いてモデル化を行う. まず, 今回のモデルではエージェントの特性として, 1) 歩行速度, 2) 情報受信能力, 3) 情報発信能力, 4) 行動決定能力, 5) 自立性, 6) 依存性, を持つものとする. これらのうち, 獲得した情報を総合的に判断して行動を決定することができるのか (行動決定能力), 行動を起こす際に自分自身の考えに基づき行動できるかどうか (自立性), 周囲の行動に依存して自分自身の行動を決定する (依存性), といった能力を持つこととする. その構造を,

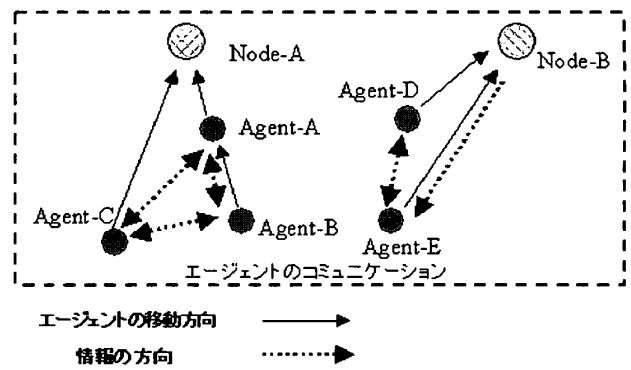


図1 エージェント間の情報・行動関係図

図1に示す.

単純なケースは, 図1の右に示した部分である. ここでは, エージェントD, エージェントEは直接ノードBの情報を獲得することができるため, 獲得したノードBの安全性に関して評価をした結果, ノードBが安全だと判断すると, それぞれ最短距離となる経路を辿ってノードBへ移動を行う.

一方, 図1の左では, ノードAの情報を獲得できるのは, エージェントAとエージェントCのみで, エージェントBは, ノードAの情報を獲得できない. しかし, エージェントBは, エージェントAとエージェントCが発するノードAの情報を獲得することによって, ノードAの情報を持つことが可能となる. よって, エージェントBはノードAへ移動することを決定するが, その場合, 最短距離となる経路を選択するため, エージェントAがいた場所へ移動し, 次にノードAへ移動することとなる.

4. 湘南海岸における避難モデルの適用

4.1 シミュレーション対象地域

今回のシミュレーションでは, 神奈川県藤沢市鵠沼海岸1~2丁目, 片瀬海岸3丁目にいたる地域を対象にして, 津波避難モデルの構築を行う (図2参照). この地域は, 海岸線が約2kmにわたって続き, 夏には海水浴客でにぎわっている. この地域は, 東西に走る国道134号と海岸線が並行しているが, 国道134号の北部に位置する鵠沼地区は, 図2からもわかるように, 細い街路が迷路のように走っている. そのため, 避難経路を見失う可能性も多いと考えられるため, 適切な避難建物への誘導標識の設定や, 避難経路の設定, 誘導方法が必要な地域である.

4.2 シミュレーションケース設定

Fujioka et al.[2]では, 津波が発生した場合におい

て、避難者の収容可能性について、仮想空間上におけるマルチエージェントモデルを用いた数値シミュレーションを行っていた。その結果、避難建物の数と収容人数が多くなると、津波による死者の数は減少することが明らかになったが、死者の数がゼロになるという結果にはならなかった（シミュレーションシステムの詳細については、Fujioka et al.[2]を参照されたい）。

現実には、道路幅員が一定でないため避難者の殺到や、交差点における異方向からの避難者の流動によって混雑が発生したり、道路ネットワークが複雑になっていることによって避難路を見失うなどの状況が発生すると想定される。これら避難者を行動能力別に分類すると、自力で避難行動可能な避難者と介護が必要な要介護避難者に分類できる。

例えば、避難警報発令後、避難者が全て自由避難を行ったとすると、避難建物へは身体能力の高い避難者が最初に避難することとなり、要介護避難者は、海岸からより遠い避難建物へ避難をせざるを得ない。結果、要介護避難者は遠くへ避難することができないため、津波の犠牲になると想定される。

今回は、避難建物への避難¹に関して、一定時間の避難制限を設けることにより、避難者の数の変化を調べ、その効果を明らかにする。その意味は、以下である。避難建物への避難開始を300秒後とすることによって、避難警報発令後300秒間は、自力避難行動が可能な避難者は海岸近くの避難建物へ避難が不可能となり遠くへ避難することとなる。300秒後には海岸近くには要介護者を中心とした避難者が位置することとな

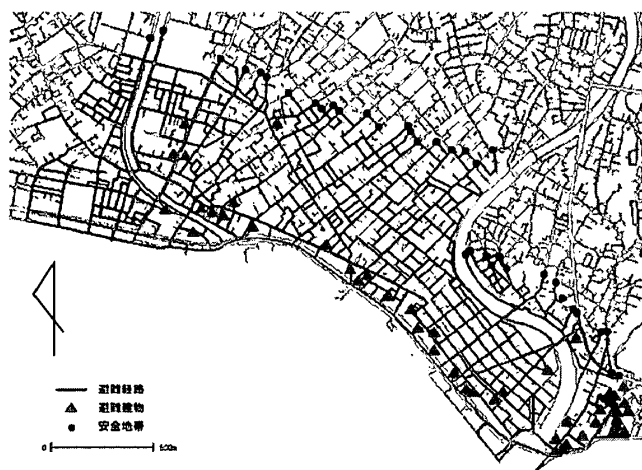


図2 藤沢市湘南海岸地図

り、海岸近くの避難建物への要介護避難者の避難は行いやすくなると想定される。これを具体化したものが表1に示したシミュレーションのケース設定である。

なお、実際のシミュレーションは図3にあるように、画面上で1秒ごとに避難者が避難していく様子を図示し、避難建物へ収容された避難者の数と安全地帯へ到達をした避難者の数を計測している。

4.3 シミュレーション結果の考察

表1のケース設定に従って、シミュレーションを行った結果を、表2に示す（表2は、10回の避難行動シミュレーションを行った結果の平均値を表している）。

まず、300秒までは、ケース1だけが避難警報発令後直後から避難建物への避難が許可されているため、1,771人と多くの避難完了者がいることがわかる。一方、ケース2では300秒間は避難建物への避難が制限されているため、避難建物への収容者は0であるが²、安全地帯への避難を完了した避難完了者が918人いることがわかる。明らかに、避難警報発令後300秒後までは、ケース1がケース2の約4.3倍の避難完了者がいるが、それ以降は、ケース2の避難完了者が急速に

表1 シミュレーションケース設定

	ケース1	ケース2
警報発令後避難建物開放時間	0	300

単位：秒

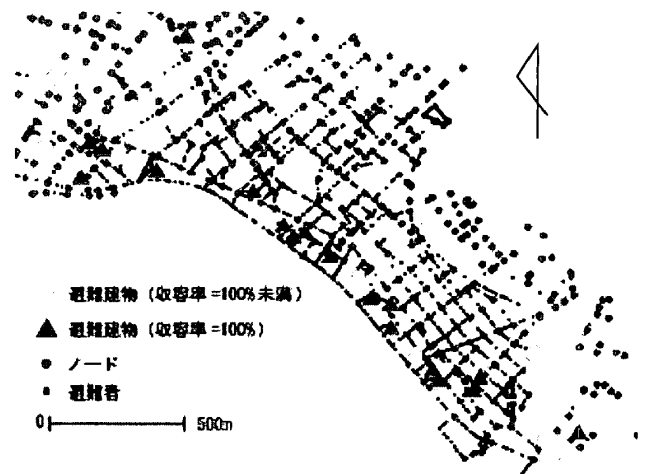


図3 シミュレーション経過 (1,200秒後)

² ただし、本シミュレーションでは、津波は海岸から500メートルまでしか到達しないと仮定をしているため、海岸線から500メートル以上離れた所へ避難を行うことによって安全を確保することができるとしている。

¹ 今回は、対象地区の海岸にいる10,000人が避難を行うと仮定をしている。

増加し、約 800 秒後にはケース 2 の避難完了者がケース 1 を上回ることがわかる。

表 2 から、避難警報発令後 1,800 秒後には、ケース 1 では累積避難完了者数は 7,804 人であったのに対して、ケース 2 では 8,194 人が避難完了をしていることがわかる。この結果より、津波警報発令後の避難完了者数を増加させるには、一定時間、避難建物への避難を制限することが有効であることがわかる。

5. おわりに

本論文では、津波避難という限定された条件の下での避難行動を、避難者の情報受発信に着目し、マルチエージェントモデルによってモデル化を行った。このモデルを藤沢市湘南海岸で適用し、避難者の行動をシミュレートするとともに、避難建物への避難制限時間を設けることにより避難完了者数の変化をシミュレーションによって予測した。その結果、避難制限を設けることによって、避難能力の高い避難者を海岸線より遠くへ避難させる一方、避難能力が低い避難者を海岸線近くに設置されている避難建物への避難を容易にさせることが可能となった。よって、避難完了者を増加させるためには、避難建物への避難制限 (300 秒) という避難の建物運用が有効であることを明らかにすることができた。しかし、今回のシミュレーションで対象としている避難者 10,000 人のうち助かったのは最

大でも 8,194 人であり、残りの約 2,000 人は津波による犠牲者となると予測される。これら被災者数を減少させるためには、様々な津波避難対策の効果を事前に予測し、可能なかぎり被災者を減らすことが必要である。

今後の課題として、次の 3 つがあげられる。1) 今回は、湘南海岸への観光客を対象として避難シミュレーションを行ったが、実際には、避難対象地区の住民も避難しなくてはならない。この場合、避難者数が増加するため、避難経路上での混雑や追い抜きといった現象の発生が想定される。より現実の避難状況を再現するためには、これらの状況のモデル化を行うことが必要である³。2) 今回は、避難完了者を増加させるための手法として避難建物への避難制限時間を設定したが、リアルタイム情報処理システムと連動させた避難誘導手法や情報受発信システムなどのモデル化があげられる⁴。3) 現在、個人が発信する情報は全て「真」であるとの仮定の下でシミュレーションを行っているが、避難者が「偽」の情報を出した場合などの、情報の質に関してもモデル化を行う必要がある。4) 本モデルでは、避難対象者である観光客はグロスで 10,000 人としてシミュレーションを実行しているが、実際には、様々な属性の観光客が湘南海岸を訪れていることを考慮すると、属性 (性別・年齢別等) 別の観光客数を予測し、それをシミュレーションのインプットとして用いることが必要である。また、避難警報が発令された時点において、避難対象者がどこにいるのかといった位置情報を正確に予測することが必要である。

謝辞 本論文をまとめるにあたり、地形図データを提供していただいた藤沢市都市計画課様、ならびに、様々な有意義なコメントをいただいた慶應義塾大学梶秀樹教授、塚越功教授にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Fujioka, M., Ishibashi, K., Kaji, H. and I. Tsukagoshi: "Multi-Agent Based Simulation Model for Evacuees Escaping from Tsunami Disaster, -To evaluate the evacuees escaping program in Fujisawa city, Japan.-", Paper Presented at SeoulSim 2001, in Seoul, Korea, Collected Papers of SeoulSim 2001, pp. 306-312 (2001).
- [2] Fujioka, M., K. Ishibashi, I. Tsukagoshi, and H.

表 2 シミュレーション結果比較

経過時間	ケース 1 累積避難完了者数	ケース 2 累積避難完了者数
150	1,771	18
300	3,905	918
450	4,990	3,974
600	5,699	5,306
750	6,256	6,179
900	6,613	6,729
1,050	6,907	7,140
1,200	7,145	7,453
1,350	7,343	7,688
1,500	7,519	7,886
1,650	7,664	8,049
1,800	7,804	8,194

³ 混雑と追い抜きに関して、その一部は藤岡・石橋・梶・塚越[3, 4]によってモデル化が行われている。

⁴ 完全情報を持つ誘導員による避難誘導については藤岡・石橋・梶・塚越[3]がモデル化を行っている。

- Kaji: "A Research of the Multi-Agent Simulation Model for Evacuees Escaping from Tsunami Disaster", Paper presented at Sixth inter University Seminar on Asian Megacities in Taipei, Taiwan, Proceedings of the sixth inter University seminar on Asian Megacities (in Printing) (2001).
- [3] 藤岡正樹・石橋健一・梶秀樹・塚越功: "津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価", 日本建築学会・計画系論文集, 投稿中 (2002).
- [4] 藤岡正樹・石橋健一・梶秀樹・塚越功: "マルチエージェント型避難モデルの特性評価", 地域安全学会論文集, 投稿中 (2002).
- [5] 藤田紀行・鐘ヶ江秀彦: "適応エージェントによる商業地の回遊行動シミュレーションに関する研究", 日本シミュレーション&ゲーミング学会・Gaming-simulation Generating Game 研究部会, pp. 94-102 (2002).
- [6] 林亜夫・橋本昭洋・渡辺伸明・友利廣: "避難シミュレーターによる避難施設整備計画の評価", 日本都市計画学会論文集, Vol. 17, pp. 565-570 (1982).
- [7] 糸井川栄一・梶秀樹: "延焼シミュレーションと群集避難誘導", オペレーションズ・リサーチ, Vol. 38, No. 1, pp. 12-16 (1993).
- [8] 香川秀樹: "人工生命的手法とファジイ推論を用いた避難行動に関する研究", 修士論文, 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (2001).
- [9] 神尾久: "津波避難ビル指定要因に関する研究", 筑波大学社会工学類都市計画専攻・卒業論文 (2002).
- [10] Kohler, A. T. and G. J. Gumerman: "Dynamics in Human and Primate Societies", N. Y., Oxford U. P. (2000).
- [11] 北村省悟・鈴木介・今村文彦: "仙台港周辺地域における避難シミュレーション", 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai2/shibu/13/kitamura/shibu-kitamura.html> (2001).
- [12] 熊谷良雄: "避難モデル論", 都市計画, Vol. 89, pp. 40-50 (1976).
- [13] 李載吉: "誘導群集の歩行動態ならびに広域群集の避難勧告支援モデルの開発", 学位論文, 筑波大学大学院社会工学研究科 (1992).
- [14] 間瀬肇・高山知司・河田恵昭: "津波・高潮・津鹿波対策", pp. 297-303, "防災学ハンドブック", 京都大学防災研究所編, 朝倉書店 (2001).
- [15] 日本建築学会編: "知的システムによる建築・都市の創造", 技報堂出版 (1998).
- [16] オペレーションズ・リサーチ学会編: "特集・マルチエージェント実験経済学", オペレーションズ・リサーチ, Vol. 46, No. 10, pp. 530-575 (2001).
- [17] Russell, S. and P. Norvig (古川康一監訳): "エージェントアプローチ・人工知能", 共立出版 (1997).
- [18] 實政道之: "藤沢市の津波対策—避難対策は万全か—", 卒業論文, 慶應義塾大学総合政策学部 (2000).
- [19] 組織学会編: "特集・エージェントベースアプローチ", 組織科学, Vol. 34, No. 2, pp. 2-79 (2000).
- [20] 鈴木介・今村文彦: "住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル", 土木学会東北支部講演概要 http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai2/staff-students/suzuki/tasuku_shibu00/suzuki.html (2001).
- [21] 鈴木介・今村文彦: "港湾地区での従業員を対象とした津波避難について", 土木学会東北支部講演概要, <http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai2/shibu/13/suzuki/tasuku.html> (2002).
- [22] 消防科学総合センター編: "地域防災データ総覧—地域避難編—", 財団法人消防科学総合センター (1987).
- [23] 山下隆男: "地震津波", pp. 143-152, "防災学ハンドブック", 京都大学防災研究所編, 朝倉書店 (2001).