

沿岸過疎地域の浸水災害を対象とした避難シミュレーション開発

Development of Evacuation Simulation for Inundation Disaster in Coastal Rural Areas

松見 吉晴¹・蘆田 哲也²

Yoshiharu MATSUMI and Tetsuya ASHIDA

A hard disaster prevention policy in coastal areas under the condition of the depopulation is unable to be expected sufficiently because of local financial difficulties. Therefore, a soft one, with respect to storm surges and or tsunamis, is necessary to establish a self-evacuation management that residents can independently evacuate with the awareness of the vulnerability in routes. In this study, an evacuation simulation model is developed to investigate individual situations at desired times based on evacuation scenarios at coastal towns in Tottori. The simulation results quantitatively clarify the time required to the evacuation sites and the safety problems in routes for a individual. This simulation model will be used to educate the citizen for a disaster prevention with the visualization.

1. はじめに

人口減少で高齢化が進む過疎地域では、財政縮小化も伴って行政による十分なハード施策が期待できなくなってきた。そのため過疎地域での防災施策の方向は、住民がハザードマップに代表されるように地域の危険レベルを把握し、災害発生時に自主的に避難する自助管理体制を行政と住民の合意の上に創りあげていくソフト防災を活用する必要がある。その際の支援ツールの1つとしては避難行動シミュレーションがあげられる。

避難行動シミュレーションのメリットとして、バーチャルな避難訓練を介した行政と住民の情報交換により、住民の意見が生かされたボトムアップ的な地域防災施策が実施できる。また、避難経路の安全性の検証により地域の防災上の脆弱性を見出し、ハードおよびソフト面での改善施策の検討に利用できる。このような避難行動シミュレーションの効用は、住民の防災意識を高めると共に、住民の意見を地域防災計画に反映させることにより、最終的に地域の防災力の向上が期待できる。

本研究は、鳥取県沿岸陸域における高潮、津波による浸水災害時の避難行動を対象に、避難所要時間に及ばず住民の防災意識の影響や避難経路上の問題点を把握し、最終的にハード・ソフト両面から地域の防災機能を高めるための防災施策について考察するための避難行動シミュレーションモデルを開発するものである。

2. 避難行動シミュレーションの基本的考え方

1 正会員 工博 鳥取大学教授大学院工学研究科社会基盤工学専攻

2 正会員 修(工) (株)ライテック

人の行動は、その必要性を自ら認識しなければ行動を起こさないと考えられる。また、危機認識の度合いには個々の防災意識の高さが深く関与し、防災意識が高いほど避難行動の意思決定に結びつきやすいと考えられる。このような避難行動のモデル化として、数多くの意思を持つ独立体の動きを表現できるマルチエージェントシステムを用いた方法が挙げられる。このシステムにおけるエージェントは、自身の持つルールに基づいて周辺環境を知覚して自律的に環境に対応させるように行動を選択する。また、エージェント同士は互いに認識可能であり、相互に影響を及ぼし合うことにより行動を変化させる。

本研究では、今村ら(2001)による避難行動シミュレーションの分類を参考に、まず広範囲におけるシミュレーションを効率良く実行できるように道路網の交差点と道路をノードとリンクで表現し、避難場所に指定されたノードを目指すネットワーク型モデルを採用している。また、個人属性の相違による意思決定や行動の違いを表現するトランザクション型モデルを容易に構築できるマルチエージェントシステムを用いると共に、他の地域への拡張性を考慮して内生型モデルで構築することにした。なお、避難シミュレーションの開発ソフトウェアには構造化計画研究所のマルチエージェントシミュレータ(山影, 2007)を利用した。

3. 避難行動モデル

(1) 避難経路選択シナリオ

本研究では、避難経路の選択アルゴリズムとして「避難場所までの最短経路を通る」、「標高のより高いノードを逐次選択する」、「避難場所の方角に伸びる経路を逐次選択する」、「被災のしやすさを数値化した危険度ポテンシャルで移動方向を決定する」などの従来の方法(鈴木ら, 2005)

を参考に以下のような経路選択モデルを考えた。

避難場所までの経路距離は、避難所要時間に関して重要な判断指標である。また道路幅は、広いほど建物崩壊による道路閉塞の発生確率が低く、避難群衆効果による避難歩行速度の減少も発生しにくいことから、避難者はより広い道路幅の経路を選択する傾向が強いと推測される。一方、高潮浸水や津波来襲時には海岸に近いほど被災リスクが高まることは明白である。そこで避難行動としては、避難場所までの最短経路を迂回してでも、まずは海から離れるような経路を選択すると考えられる。

このように周辺環境と避難行動の関係から、本研究における避難経路選択に関するシナリオとしては、海岸の近くに存在する住民は海岸から離れることを優先する経路選択をとり、海岸から離れるに伴ってその傾向が弱くなり、最終的に道路幅を考慮しつつ避難場所までの最短経路を選択するものとした。なお経路選択において、標高は重要な項目であるが、本研究では対象地域の空間的広がり(2km×2km程度)に対する標高差が数メートルと小さいことから標高を導入していない。

(2) 最短経路選択の評価式

避難経路選択の評価式については、「避難場所までの最短距離」を中心的な指標にとり、「道路幅の広い道路を目指す」、「海岸から遠ざかる選好」の項目を含めて、危険度ポテンシャルの考え方(外谷ら, 2005)を適用することにより導出した。また、道路ネットワーク上の避難場所ノードから他のノードまでの最短経路を算出する手法には、道路長といった物理的距離だけでなく、時間距離やコスト等も取り扱えるダイクストラ法(Dijkstra, 1959)を用いている。

避難場所ノードから各ノードまでの最小総リンクコストについては、次式に示すようにあるノードから次のノードまでのリンク長を道路幅で補正したリンクコスト c を用いて導出することにする。

$$c = d \left(1 + \alpha_1 \frac{(\beta - w_r)}{\beta} \right), \quad w_r < \beta \quad (1)$$

$$c = d, \quad w_r \geq \beta$$

ここに、 d は道路長、 w_r は道路幅、 β は道路幅に対してリンクコストの補正を行うかどうかを判定する基準値、 α_1 は各エージェントの道路幅に対する選好の度合いを表す重みパラメータ($0 \leq \alpha_1 \leq 1$)である。なお、 β の基準値には、阪神・淡路大震災直後の道路被害調査結果(塚口ら, 1997)を参考に4mを設定している。式(1)は、あるリンクの道路幅が β 未満である場合、そのリンクコストが増大することで避難者が道路幅の狭い道路を避けるという意味を表現している。

次に、海岸から遠ざかるようとする選好は、各ノードに対する海岸からの距離により評価している。すなわち、避難

者は現在いるノードに接続されるノードの中から、危険度ポテンシャル p_i が最も低くなるノード i を次に進むノードとして選択するとし、これを式(2)で表す。

$$p_i = C_i + \frac{\alpha_2}{s_i} \quad (2)$$

ここに、 C_i は式(1)により導出される避難者が現在のノードからノード i を経由して避難場所ノードに到達するのに要する最小総リンクコスト、 s_i はノード i における海岸からの距離、 α_2 は各エージェントの海岸からの距離に対する重みパラメータである。なお、式(2)を用いた評価では、局所的に危険度ポテンシャルが低くなるノードが発生し、避難者が避難場所ノードに到達できないケースが発生する可能性がある。そこで、避難者は次善の経路を選択することで、局所的に危険度ポテンシャルが低くなるノードから脱出するようなアルゴリズムにしている。

本避難行動シミュレーションでは、全てのエージェントが徒歩で避難するものと仮定すると共に、時間ステップを現実の1秒に設定している。

(3) 避難時の歩行速度

本研究では、各エージェントを家族単位として、その属性に家族の構成人数を与えている。また各エージェントの避難速度は、家族内の最も遅い者の歩行速度としている。群集密度が大きくなった場合、歩行速度は単独歩行時の自由歩行速度から群集歩行速度へ減速すると共に、歩行速度の個人差も小さくなる。従来、群集密度と歩行速度の関係式はいくつか提案されているが、それらの関数は群集の平均歩行速度を表すもので、個人差のある自由歩行速度から群集移動速度への遷移を扱ったものはない。日本建築学会(2003)では、群集密度が1人/m²を越えると追い抜きが困難になり、群集密度が4人/m²以上になると停止もであると指摘している。本研究では、群集密度に依存する減速率で群集による歩行速度の低下を表現し、避難歩行速度 V を次式で与えることにする。

$$V = \min \left(V_0, V_0 \left(\frac{4 - \rho_c}{3} \right) \right), \quad \rho_c < 4 \quad (3)$$

$$V = 0, \quad \rho_c \geq 4$$

$$\rho_c = n/lw_r \quad (4)$$

ここに、 V_0 はエージェントの自由歩行速度、 ρ_c は群集密度、 l はリンク内のエージェント前方の群集密度を求めするための前方の距離、 n は範囲内の人数である。 l に対する適切な値は一概には決定できないが、ここでは1秒当たりの歩行に影響を与える距離として $l = 3\text{m}$ としている。

(4) 氾濫流による人的被害の発生評価式

津波・高潮氾濫流による人的被害評価は、従来、次式で示すモリソン式が用いられている。

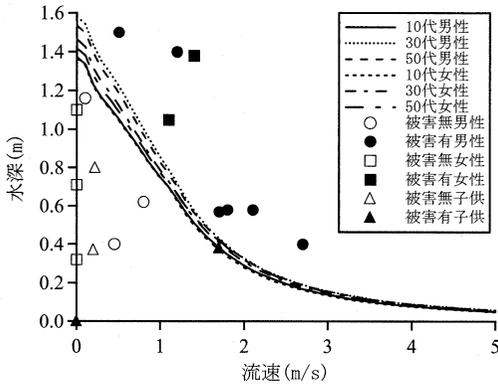


図-1 人的被害の発生限界水深と流速の関係

$$f(mg - w) \leq \alpha \int 0.5\rho C_D u^2 dS + \int \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} dV \quad (5)$$

ここに、 C_D 、 C_M は抗力係数、付加質量係数であり、人体を円柱で近似した場合、 $C_D=1.0$ 、 $C_M=2.0$ である。 f は歩行面における静止摩擦係数、 m は人体の質量、 g は重力加速度、 w は流水中の人体に作用する浮力、 ρ は海水の密度、 u は流速、 t は時間、 S は人体の流れに対する投影面積、 V は人体の浸水体積である。 α は歩行者の体力と流れに対する感じ方を考慮した安全係数である。

本研究では、人体の各部分の測定データを用いて人体を円柱の組み合わせによりモデル化すると共に、氾濫流の加速度をゼロと見なして式(5)の右辺第2項を除外している。

図-1は、避難者が静止状態($\alpha=0$)における年齢別、性別の人的被害の発生限界水深 h_c と流速の関係を示したものである。同図には、越村ら(2002)によるスマトラ沖地震津波映像から判定された人的被害の有無の結果も併記している。この図より、図中の人的被害発生境界を表す曲線群は越村らの結果を明確に区別化していることから、本研究で導出している安全領域境界線の妥当性が確認できる。

本研究では、これらの安全領域境界線に対する近似式として、切片を男女別、年代別の平均身長 a で固定し、最小二乗法で指数関数の減衰パラメータを推計した結果、減衰パラメータは男女、年代による差が小さかった。そこで、減衰パラメータには男女、年代ごとに算出した値の平均値を共通で用いることにし、発生限界水深 h_c に関する近似式を次式で表している。

$$h_c = ae^{-0.735u} \quad (6)$$

(5) 津波遡上シミュレーション

本研究では、津波遡上シミュレーションをCADMAS-SURF(磯部ら, 2001)を用いて断面二次元モデルで第1波の押し波のみを計算した。造波方法は、図-2に示すように貯留水境界を急激に取り除くダム破壊法(高橋ら,

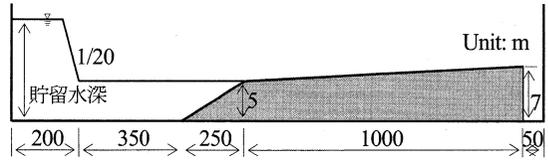


図-2 段波計算の水槽モデル図

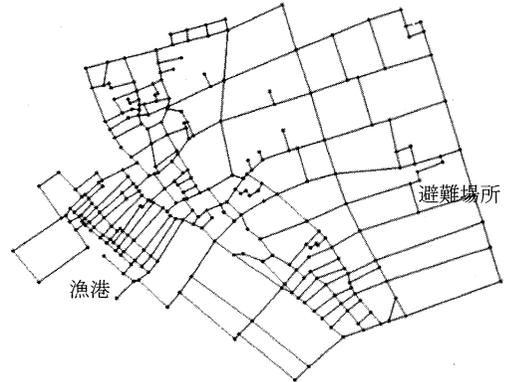


図-3 対象地域の道路ネットワーク構成図

2001)を採用し、貯留水深は6m一定である。避難シミュレーションでは、津波遡上が対象地域の海境界線に対して直角方向に同時にと始めるとし、陸上部を10m間隔のメッシュに分割した各グリッドにおける海岸線からの距離に対応した浸水深と流速の時系列データから式(6)を用いて人的被災を判定している。

4. 地域の避難行動上の脆弱性分析

(1) 対象地域の物理的特性

本研究で対象とする地区の総世帯数は、アパート1棟4世帯、集合住宅1棟10世帯を含めて計797世帯である。世帯当たりの人数は、平成17年国勢調査や町丁字等別男女別人口および世帯数より平均世帯人員は3.05人/世帯である。これらを基にエージェント当たりの人数を1~5人で20%ずつ与えた。各世帯の避難を開始する初期位置はゼンリン住宅地図より各世帯位置から最も近いノードに設定している。

家族で避難する際の歩行速度は、鈴木ら(2005)によると0.95~1.10m/sとなり、約89%の避難者の歩行速度が0.95m/sと指摘している。本計算では、住民の年齢構成に関する資料が得られなかったことから、各エージェントの自由歩行速度を1.0±0.1m/sとした。

道路ネットワーク作成に当たっては1/1000縮尺の道路台帳地図で確認できる道路のみを抽出し、ノードの座標およびリンク長はゼンリン電子地図帳から道路網の交差点の座標を読み取ると共に、各ノード座標からユークリッド距離で与えた。なお、湾曲が顕著な道路は補間点ノードを与え、

複数リンクにより道路の湾曲を近似している。この結果、計算対象地域の道路ネットワークは、図-3に示すように287ノード、424リンクにより構成された。なお、図-3の左側が海であり、この地区の避難場所は海岸から約1kmの位置にある。

避難シミュレーションにおける初期パラメータとして、各エージェントの道路幅に対する重みパラメータ α_1 には0.25~0.75、海岸からの距離に対する重みパラメータ α_2 には50000~150000を一樣分布に従ってランダムに与えている。なお、 α_2 の値は海岸からの距離に換算して200m~400mになり、避難者がこの範囲を越えると海岸から離れようとする選好意識が弱くなるように与えている。

(2) 避難所要時間に及ぼす住民の防災意識の影響

渡部ら(2005)による津波常襲地域住民を対象とした防災意識調査のなかで、「災害発生時に備えて物資などを準備しているか」という質問に対して、約7割以上の人があるも準備していない結果がある。また、片田ら(2004)による津波警報と住民の避難意向に関する調査結果において、避難の意志決定は津波災害に関わる危機意識の影響を大きく受けると指摘されている。そこで本研究では、防災意識の高い住民ほど日頃から持ち出し物資を準備し、かつ避難の意志決定も早いと考え、この防災意識の高さの違いが避難開始時間に影響を与えるものと仮定した。

ここでは、防災意識の高いグループと低いグループの割合を変化させた場合の避難所要時間を調べる。計算方法は、各グループの避難勧告後の避難開始時間を便宜的に以下に示す平均値 μ と標準偏差 σ をもつ正規分布に従う乱数で与えている。防災意識の高いグループの場合は $\mu=3$ 分、 $\sigma=1$ 分、防災意識の低いグループの場合は $\mu=20$ 分、 $\sigma=6$ 分40秒と設定している。エージェントのグループ分けは、防災意識の高いグループと低いグループの割合に基づいてランダムに設定している。なお、ここでは津波遡上データとのリンクを行わず、避難所要時間に及ぼす住民の防災意識の影響のみを計算対象にしている。

図-4は防災意識の高いグループの割合を0.1ずつ変化した場合の時間経過と避難が完了していないエージェント数の関係の1例を示したものである。また、5ケースの計算結果より全エージェントの平均避難所要時間を図-5に示す。これらの図から明らかなように、この地域は20分程度でほとんどの住民が避難完了できるが、防災意識が高まるほど避難完了に要する時間が短くなり、また平均避難所要時間も短くなることが確認できる。この結果、当然のことではあるが、避難所要時間の短縮化には住民が高い防災意識を持つことが不可欠となる。

(3) 避難行動に及ぼす道路閉塞の影響

ここでは、家屋倒壊による道路閉塞に伴う避難時間の増加、避難完了率、津波による人的被害発生確率について、

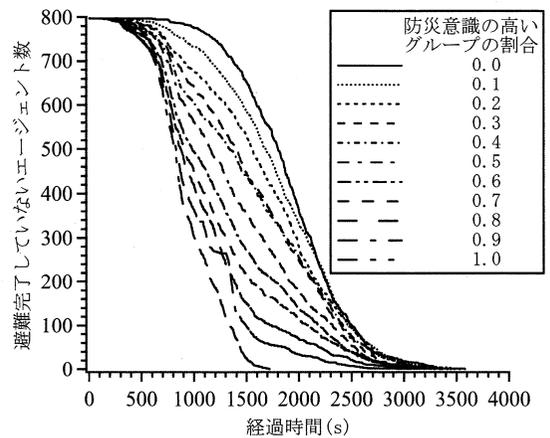


図-4 防災意識の違いによる避難完了者数の時間変化

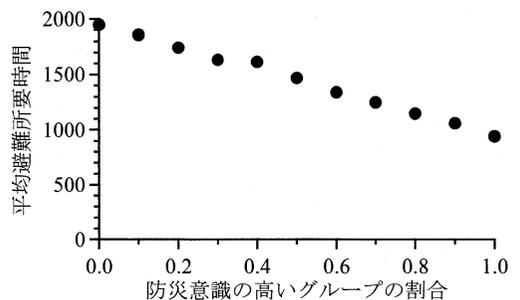


図-5 防災意識の違いによる平均避難所要時間

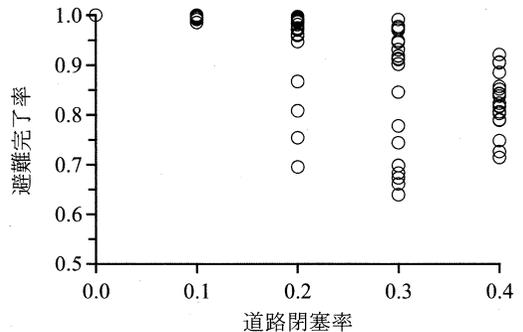


図-6 各道路閉塞確率における避難完了率のバラツキ

道路幅4m未満のリンクをある確率でランダムに切断することにより考察する。シミュレーションでは、避難者が道路閉塞を認識できるものと仮定し、道路閉塞が発生したリンクを道路ネットワークから除外して最適経路を再計算している。ここでは防災意識の高いグループの割合は0.5に固定している。津波遡上に伴う人的被害発生判別には、各エージェントを成人男性として式(6)の身長 a に1.7mを設定している。なお、4m未満のリンク数は全リンクの75.5%を占めており、そのリンク延長は道路ネットワークの総リンク長の68.5%である。

まず、図-6は津波遡上を考慮しない場合の道路閉塞箇

所の組合せをランダムに20回変化させたときの各道路閉塞確率値における避難完了率を示したものである。閉塞確率が0.2以上になると同じ閉塞確率でも避難完了率のバラツキが大きいため、道路閉塞箇所との組合せによっては避難行動に大きく支障をきたすことがわかる。

次に、避難勧告の50分後に津波来襲を想定して、防災意識の高いグループの割合を0.5の条件で各道路閉塞確率に対する5回のシミュレーションから得られた避難完了率を図-7に示すと共に、図-8に津波による人的被害発生確率を示す。これらの図より、道路閉塞確率が0.1の場合は避難完了率が100%となっており、道路閉塞による避難行動への影響がないことがわかる。しかし道路閉塞確率が高くなると、避難完了率が減少し、津波による人的被害の発生確率も増加する。また道路閉塞確率が0.2以上の場合、同じ閉塞確率であっても避難完了率、津波による人的被害の発生確率にバラツキが生じている。したがって、この計算で行ったような避難勧告50分後に津波が来襲する場合、この地区の避難経路ネットワークが確実に機能を発揮するには、道路閉塞確率を0.1以下に抑えることが必要となる。そのためには家屋の耐震補強や道路幅の拡張等のハード的な防災対策を施すことが望まれる。

5. まとめ

本研究では、過疎沿岸地区の浸水災害に対するハードおよびソフト的な地域防災力の向上化を目指して、鳥取県の沿岸域のある地区を対象に避難シミュレーションを開発した。以下に得られた知見と今後の課題を示す。

まず、最短経路、道路幅、海岸からの距離を経路選択の項目として取り上げ、経路選択の評価モデルを導出した。また、避難時の歩行に関する考察、津波による人的被害発生の判別式の適合性が確認できた。次に、地区の避難行動上の脆弱性に関する基礎的な分析を行った結果、住民の防災意識の違いは避難所要時間に大きく影響すること、また住民の避難開始時間が早い場合、道路幅の狭い道路において群衆密度が高まり歩行速度が減速するケースも現れることが分かった。さらに地震による家屋倒壊に伴う道路閉塞が発生した場合、道路幅4m未満の道路閉塞確率を0.1以下に抑えることにより、道路閉塞が避難行動に及ぼす影響をほとんど無視できることを確認できた。今後、現実的な避難シミュレーションを目指して、世帯数、家族構成人数、年齢構成や道路閉塞に関わる家屋の状態等に関する詳細な調査データを取り込んでいく予定である。

最後に、CADMAS-SURFによる津波遡上計算では、防衛大学の藤間功司教授から貴重なご助言を戴いたことを記して感謝します。また本研究は、持続的過疎社会形成研究プロジェクト(研究代表者:鳥取大学大学院 細井由彦教授)の補助によることを記して謝意を表す。

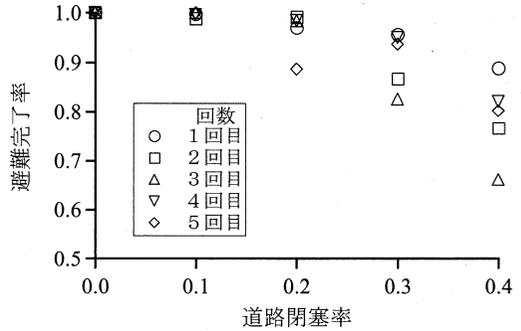


図-7 津波遡上の場合の避難完了率と道路閉塞確率の関係

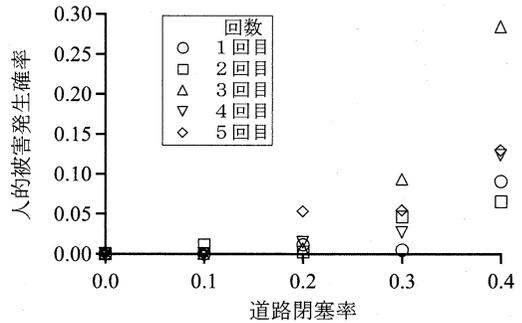


図-8 各道路閉塞における津波による人的被害発生確率

参考文献

磯部雅彦他(2001): 数値波動水路の研究・開発(CADMAS-SURF), 財団法人沿岸開発技術研究センター, 296p.
 今村文彦・鈴木介・谷口将彦(2001): 津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用, 自然災害科学, 第20巻, 第2号, pp.183-195.
 片田敏孝・桑沢敬行・金井昌信・児玉真(2004): 津波防災の実態にみる安全・安心に関わる社会技術に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol.2, pp.191-198.
 越村俊一・H. Mofjeld・片田敏孝・河田恵昭(2002): 津波の市街地氾濫による人的被害に関する一評価法 - 米国シアトルウォーターフロントにおけるケーススタディー, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1441-1445.
 鈴木介・今村文彦(2005): 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, 自然災害科学, 第23巻, 第4号, pp.521-538.
 外谷滋比古・今村文彦(2005): 危険度ポテンシャルを導入した津波避難シミュレーションの改良, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp.288-289.
 高橋俊彦・藤間功司・朝倉良助・池谷毅(2001): 数値波動水路の段波実験への適用, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.281-286.
 塚口博司・戸谷哲男・中辻清恵(1997): 阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究, 土木計画学研究委員会 阪神・淡路大震災調査研究論文集, pp.377-388.
 日本建築学会(2003): 建築設計資料集成一人間, 丸善, pp.128.
 濱田洋平・近藤光男・渡部次次郎・竹内光生・山口満(2005): 津波常襲地域住民の防災意識の基づく避難場所の配置計画, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, no.2, pp.315-323.
 山影進(2007): 人工社会構築指南artisoによるマルチエージェント・シミュレーション入門, 書籍工房早山, 446p.
 Dijkstra, E. W. (1959): A Note on Two problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, vol.1, pp.269-271.