

個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の 避難シミュレーション

後藤 仁志*・原田 英治**・久保有 希***・酒井 哲郎****

本稿では、個別要素法型粒子コードを基に、ヒューマンスケールの既往の群衆モデルで考慮された群衆の駆動力を加味して、群衆避難行動のシミュレーターを構築し、津波避難階段を対象とした基礎的な検討を実施した。シミュレーションの実施例として、階段の部分的改造による避難効率の向上の検討と年齢差や性差など個々の人間要素の特性の相違が存在する場合の検討を実施した。踊り場面積の増加は群衆の登坂速度の増加にほとんど効果を示さないが、手摺りを設置して通行帯を設けると登坂の迅速化に効果がある。異なる特性を有する人間要素の混合状態では、均質な人間要素による登坂と比較して、7%程度効率が低下する。

1. はじめに

最近の活発なマスコミ報道に後押しされて、東南海・南海地震による津波の脅威に対する市民の意識は急速な高まりを見せている。特に、津波の直撃を受ける地域の住民にとっては迅速な避難が生存のための必須要件であり、安全な避難路の確保が急務となっている。例えば、和歌山県南部では地震の発生から津波の到達まで僅か15分程度と短く、高台への迅速な避難ルートの整備に、各自治体が努力している。

避難ルートの鍵は、短時間に高台まで如何に登坂するかと言う点にあり、急傾斜地での避難階段の設置（和歌山県・太地町；静岡県・沼津市など）や避難用の建物の建設（徳島県・海部町の人工地盤；三重県・紀勢町の避難タワーなど）が実施されている。特に避難階段の整備は比較的低コストであることから、既存の整備例も他と比較して多く存在する。

ところで、階段の整備にあたっては、適正な勾配や踊り場面積・形状、踊り場設置間隔、通行帯の設置など階段の幾何的形態について、避難が最も容易な設計を如何に行うかという技術的課題が存在する。避難行動の素過程に忠実なモデルの構成には、行動主体である人間のスケールで群衆避難を扱うことが不可欠であるが、既往の避難行動のシミュレーションでは、この種のモデルは比較的少ない。ヒューマンスケールのモデルとしては、個別要素法に基づく清野ら（1996）のモデル、磁場における電荷の運動とのアナロジーを想定した岡崎（1979）および平井・樽井（1977）のモデルが挙げられる。

本研究では、従来から著者らが漂砂力学の諸課題に適用してきた個別要素法型粒子コード（Gotoh・Sakai, 1997；後藤ら, 2001）を基に、ヒューマンスケールの既往のモデルで考慮された群衆の駆動力を導入して、群衆避難行動のシミュレーターを構築し、津波避難階段を対

象とした基礎的な検討を実施する。

2. シミュレーションモデル

例えば、個別要素法型の数値移動床（流砂・漂砂過程を扱う場合）において水流により駆動される土砂粒子群の運動を追跡するように、通常の粒状体解析に用いる個別要素法では、個々の要素が場の駆動力の下に受動的に運動する。これに対して、群衆行動のシミュレーターでは要素が人間であるので、要素自体が自ら取得した場の情報に基づいて自ら判断し、主体的に行動する。このような要素特性の相違を如何に扱うかが、モデリングの鍵となる。

（1）要素の運動方程式

現実の避難階段は3次元場であるが、階段部における運動負荷の増加に伴う要素の移動速度の低下を考慮し、個々人の身長などの体格差が群衆運動に及ぼす影響を除外すれば、群衆の昇段運動は平面2次元場で解析可能である。本稿では、計算は平面2次元場で実施する。

群衆を構成する要素（人間）の運動方程式は、並進および回転について

$$M_{hi} \frac{d\mathbf{u}_{hi}}{dt} = \mathbf{F}_{hint} + \mathbf{F}_{aw} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{hi} \frac{d\omega_{hi}}{dt} = T_{hi} \dots\dots\dots (2)$$

と記述する。ここに、 $\mathbf{F}_{hint}$ ：要素間（人間/人間および人間/壁）の作用力ベクトル、 $\mathbf{F}_{aw}$ ：人間要素の自律歩行力（推進力）ベクトル、 $\mathbf{u}_h$ ：人間要素の移動速度ベクトル、 T_h ：人間要素に作用するトルク、 ω_h ：人間要素の回転速度であり、人間要素の質量 M_h および慣性モーメント I_h については、シリンダー形状を仮定して、

$$M_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^2}{4}; I_{hi} = \frac{\varepsilon_h \sigma_h \pi d_{hi}^4}{32} \dots\dots\dots (3)$$

と与えた。ここに、 σ_h ：人間要素の比重（=0.98）、 ε_h ：シリンダーの体積と人間の実質体積の差を表す係数、 d_h ：人間要素径である。

人間要素径については、Fruin・長島（1974）による人

* 正 会 員 工博 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻
** 正 会 員 工博 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科
*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
**** フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻

体積円の断面積と等価な断面積を有する円の直径 $d_h = 0.52$ m を用いた。なお、この要素径に対して、 $M_h = 60$ (体重 60 kg の成年男子) を想定して逆算すると、 $\epsilon_h = 0.178$ となる。要素間作用力ベクトルおよびトルクについては、

$$\mathbf{F}_{hnt} = \begin{bmatrix} \sum_j \{-f_{hn} \cos \alpha_{ij} + f_{hs} \sin \alpha_{ij}\}_j \\ \sum_j \{-f_{hn} \sin \alpha_{ij} + f_{hs} \cos \alpha_{ij}\}_j \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (4)$$

$$T_{hi} = \frac{d_{hi}}{2} \cdot \sum_j \{f_{hs}\}_j \quad \cdots \cdots (5)$$

と記述する。ここに、 f_{hn} , f_{hs} : 人間要素 i , j 間の法線 (n) および接線 (s) 方向の作用力、 α_{ij} : 人間要素 i , j の接触角 (人間要素 i , j の共通接線の x 軸と成す角; 反時計回りを正) である。

(2) 要素間作用力

通常の個別要素法では、要素が接触しない限り要素間作用力は発現しないが、人間は周辺状況 (他の人間および障害物の存在位置) を認識し、衝突を未然に回避しようとする。そこで、図-1 に示すように、人間要素の正面の視野 ($\pm \pi/3$) を考慮した要素間作用力の発現領域を設定した。

$$|\mathbf{r}_{hij}| \leq \begin{cases} \Lambda_h & \text{for } -\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{d_{hi} + d_{hj}}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\mathbf{r}_{hij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i; |\mathbf{r}_{hij}| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad \cdots (7)$$

$$\theta_{dij} = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{u}_{hi} \cdot \mathbf{r}_{hij}}{|\mathbf{u}_{hi}| |\mathbf{r}_{hij}|} \right) \quad \cdots \cdots (8)$$

ここに、 $\mathbf{r}_i$: 人間要素 i の位置ベクトル、 θ_{dij} : 人間要素 i の正面 (進行方向) と人間要素 j の存在方向の成す角である。人間相互の心理的平衡距離 Λ_h については、清野ら (1996) が交差点の信号待ちに際しての人間相互の平衡距離を実測して求めた値 $\Lambda_h = 0.976$ m を用いた。

上述の相互作用領域内の要素間には、法線および接線方向に弾性スプリング (バネ定数 k_{hn} , k_{hs}) および粘性ダッシュポット (粘性定数 c_{hn} , c_{hs}) を配置して、相互作用を表現する。人間要素 i , j 間の法線および接線方向の作用力は、

$$\left. \begin{aligned} f_{hn}(t) &= e_{hn}(t) + d_{hn}(t) \\ e_{hn}(t) &= e_{hn}(t - \Delta t) + \beta_{hk} k_{hn} \cdot \Delta \xi_{hi} \\ d_{hn}(t) &= c_{hn} \cdot \Delta \xi_{hi} / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{hs}(t) &= e_{hs}(t) + d_{hs}(t) \\ e_{hs}(t) &= e_{hs}(t - \Delta t) + \beta_{hk} k_{hs} \cdot \Delta \eta_{hi} \\ d_{hs}(t) &= c_{hs} \cdot \Delta \eta_{hi} / \Delta t \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\beta_{hk} = \exp\{-5.0(|\mathbf{r}_{hij}| - d_{hi})\} \quad \cdots \cdots (11)$$

と書ける。ここに、 e_{hn} , e_{hs} : 法線および接線方向のバネ

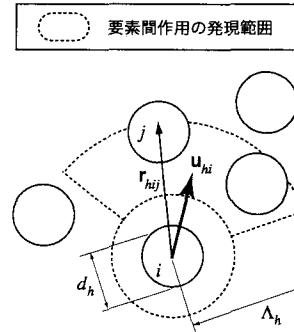


図-1 要素間作用力の発現領域

による抗力、 d_{hn} , d_{hs} : 法線および接線方向のダッシュポットによる抗力、 $\Delta \xi_h$, $\Delta \eta_h$: 時間 Δt 間の法線および接線方向変位、 β_{hk} : 要素間距離を考慮したバネ定数の重み関数 (要素間距離の増大に伴う反発力の低減効果の表現) である。

今回のシミュレーションでは、人間要素間には引張抵抗 (手繋ぎの効果) を考慮せず、一般的な個別要素法と同様に、法線方向に引っ張りに抵抗しないジョイント、接線方向に一定の限界を超える力が作用すると活動するジョイントをそれぞれ配置した。

(3) 自律歩行のモデル化

人間要素は周囲からの影響を受けない状態では、固有の平衡速度 (避難行動においては運動能力の限界付近) で移動するはずである。平井・樽井 (1977) は、この平衡速度に達するまでの加速過程を等加速度運動として、自律歩行の駆動力を

$$\mathbf{F}_{aw} = M_{hi} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (12)$$

と記述した。ここに、 a_x , a_y : 加速度の x 軸および y 軸方向成分である。本稿でも同様の等加速度運動を想定するが、平衡速度に関しては、視野内の他の人間要素の数密度 c_h (人/m²) に依存する表式を採用し、駆動力を

$$F_{awx} = \begin{cases} M_{hi} a_x & \text{when } |u_h| \leq u_{limit} - r_{dv} c_h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \cdots (13)$$

$$F_{awy} = \begin{cases} M_{hi} a_y & \text{when } |v_h| \leq u_{limit} - r_{dv} c_h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \cdots (14)$$

と与えた。ここに、 u_{limit} : 単独歩行時の平衡速度、 r_{dv} : 視野範囲の混雑状況と個体の減速効果に関するパラメータ ($r_{dv} = 0.426$) である。視野内の他の人間要素の数密度は、要素間作用力と同様の視野角の範囲内で、対象要素との距離が要素径の 4 倍以内位置に存在する人間要素を対象として考慮し、

$$c_h = \frac{4}{21\pi d_h^2} \sum_j w_{vfi}(j) \quad \cdots \cdots (15)$$

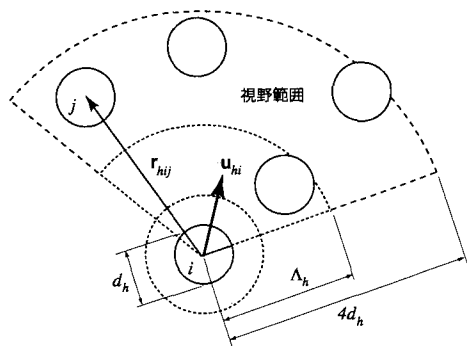


図-2 人間要素数密度の算定域

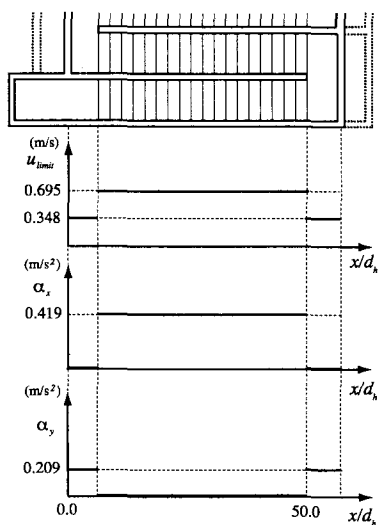


図-3 パラメータの設定

$$w_{vfi}(j) = \begin{cases} 1 & \text{for } |r_{hij}| \leq 4d_h \text{ and } -\frac{\pi}{3} \leq \theta_{dij} \leq \frac{\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (16)$$

によって算定した(図-2参照)。これらの式中のパラメーターについては、清野ら(1996)の観測を参考に、図-3に示すように設定した。踊り場においては人間要素の急旋回に伴う減速効果を考え、 u_{limit} を0.5倍して与えた。

3. 群衆の階段避難過程

(1) 計算条件

本稿では急傾斜を折り返しつつ登坂するタイプの仮想的な避難階段を対象とした。階段の標準設定の概略を図-4に示す。合計8ヶ所の踊り場で折り返しを反復して、約28mの標高差を登坂する状態を想定し、階段部の勾配を1/6.7(=0.15)とした。階段・踊り場の長さスケ-

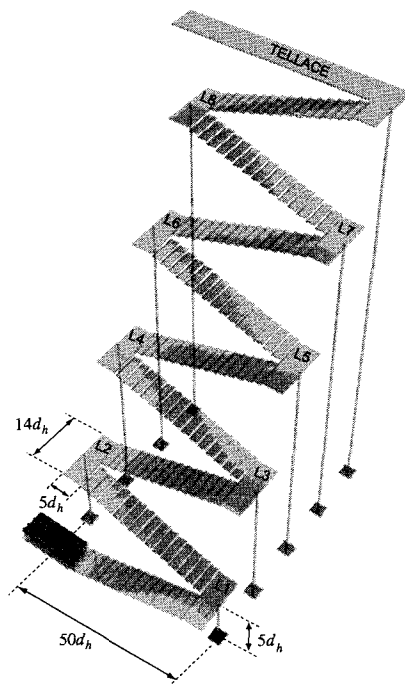


図-4 階段の標準設定

ルは要素径 d_h を基準に設定したが、階段部1ユニットの水平距離は20.0mとなっている。また、踊り場の奥行きは約3.6mであり、建物に設置される屋内階段の標準的なスペックと対応している。登坂過程の追跡は、上り口前の広場(図中に群衆が集合している地点)から、階段を登り切ったテラスまで実施した。個別要素法のモデル定数はパッキング時の安定性を考慮して、 $k_{hn}=3.56 \times 10^3 \text{ N/m}$, $k_{hs}=1.37 \times 10^3 \text{ N/m}$, $c_{hn}=2.08 \times 10^4 \text{ Ns/m}$, $c_{hs}=1.29 \times 10^4 \text{ Ns/m}$, $\Delta t=2.0 \times 10^{-3} \text{ s}$ と設定した。

この設定下における群衆挙動の妥当性を検証するため、小関・渡部(1967)が7m幅員の道路で実施した群衆歩行観測から得た群衆密度と歩行速度の関係と本稿のシミュレーターによる計算の比較を図-5に示す。両者には概ね良好な対応が得られ、本稿のシミュレーターが群衆歩行の基本的特性を再現していることが確認できた。また、群衆歩行の観測が平坦部で実施されていることから、歩行観測との比較計算には図-3に示した階段部での速度の2倍の値を用いた(建設省告示1442号・全館避難計算によれば、屋内階段昇段時の歩行速度を平坦部の約45%に設定する歩行速度指標が示されている)。

(2) 均質な個体から成る群衆避難

本稿のシミュレーターを用いれば、既設階段における避難シミュレーションを実行することが可能であるが、ここでは、一般的な状況を想定し、特定の既設階段を対

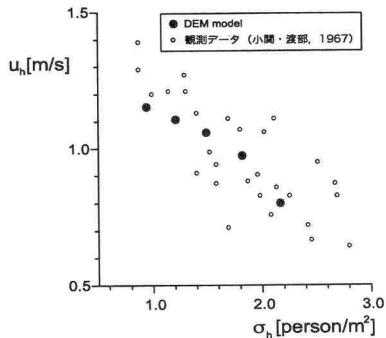


図-5 群衆歩行観測データとの比較

象とはしない。なお、計算に用いた階段モデルの標高差、勾配などは既設の避難階段の状況を参考にした。

既設階段の機能の確認から一步踏み込んだ適用例として、階段の部分的改造による避難効率の向上の検討が想定される。図-6は、避難階段の踊場手前で生じる渋滞を解消するための改良検討過程の例を示している。なお、踊場の構造様式の相違の影響のみを抽出するため、全ての要素の運動能力を均一に設定した場合の結果を図示する。図中には、(a) 標準型、(b) 踊場奥行きを2倍にした場合、(c) 踊場奥行きを2倍にし、かつ階段途中から中央手摺によって通行帯を設定した場合を比較している。シミュレーション結果は、群衆の動態を感覚的に把握しやすいように、POV-Rayを用いて3Dグラフィックスデータを生成するポストプロセッシングを行っている。

踊場奥行きを2倍にただけの場合には、個々人が最短距離を移動しようとして踊場を内回りするので、広くなった踊場が効果的に活用されず、渋滞はほとんど解消されない。これに対して、階段途中から中央手摺によって通行帯を設定すると、外側のレーンに振り分けが生じて踊場全体を有効に活用した通行が行われるようになる。これにより群衆末尾の踊場通過時間が約10%向上した。

(3) 個体の運動能力差の影響

年齢差や性差など個々の人間要素の特性の相違が存在する場合の計算例を図-7に示す。運動能力の相違は、平衡速度の相違として簡単にモデル化した。成年男性、成年女性、老人男性、老人女性・小児を想定して、4種のカテゴリーを導入し、標準平衡速度 u_{limit0} に対して、成年男性 $1.4u_{limit0}$ 、成年女性 $1.2u_{limit0}$ 、老人男性 u_{limit0} 、老人女性・小児 $0.9u_{limit0}$ と設定した。また、個々のカテゴリーの構成人数は、日本の年齢別人口比率を参考に、成年男性36名、成年女性37名、老人男性18名、老人女性・小児25名とした。図中には、登坂開始後50秒と登坂完了直前の900秒の時点のスナップショットを示している。

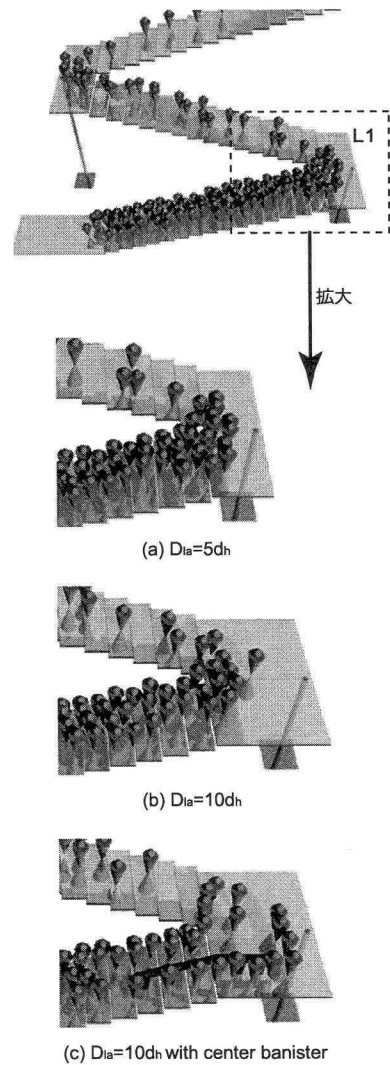


図-6 階段の部分的改造

現実の避難行動においては、世代間の助け合いが存在するが、ここでは、それぞれの人間要素が、個別に最善を尽くした場合の状況を対象とした。例えば、大人が幼児と手を繋いで登坂するなどの状況は、人間要素間の引張抵抗を考慮することで模擬可能ではあるが、ここでは、第一段階の検討として、最も単純な個々の要素の単独行動を対象とした。初期状態では、各カテゴリーは均質に混合されているが、登坂開始後50秒の時点で既に5名の成年男性が先頭を登坂している。一方、登坂完了直前の900秒の時点で登坂を完了していないのは、老人男性、老人女性・小児の一部である。同一の人間要素数で実施した均質要素（平衡速度は混合の場合の荷重平均）の場合と比較すると、登坂完了時間が7%増加した。運動能力の高い要素が他の要素を追い抜く際の要素間干渉による

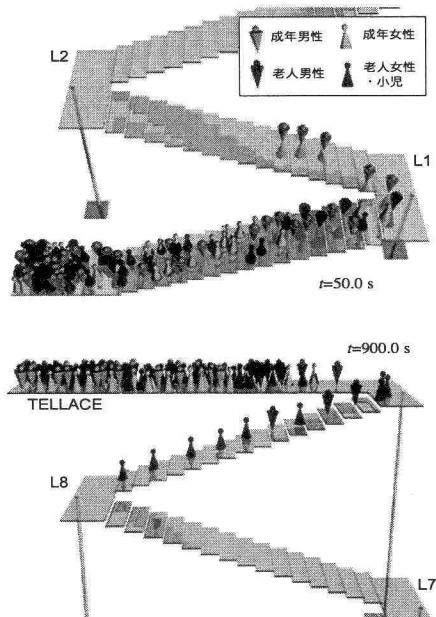


図-7 異種混合状態での登坂

エネルギーロス（速度減少）の存在が、群衆としての移動抵抗を増大させた結果と考えられる。

4. おわりに

本稿では、個別要素法型粒子コードを基に、ヒューマンスケールの既往のモデルで考慮された群衆の駆動力を導入して群衆避難行動のシミュレーターを構築し、津波避難階段を対象とした基礎的な検討を実施した。

シミュレーションの実施例として、階段の部分的改造による避難効率の向上の検討を行った。踊り場面積の増加のみでは踊り場通過効率の向上に有効性を示さないが、踊り場手前に階段を仕切る手摺りを設置して2つの通行帯を設けた場合、踊り場通過効率が10%程度向上することが確認できた。年齢差や性差など個々の人間要素の特性の相違が存在する場合の検討では、運動能力の高

い要素による追い抜きの存在が群衆全体としての移動抵抗を増大させ、登坂完了の遅延をもたらすことが確認された。

今回のシミュレーションでは比較的少数の人間要素を対象としたが、現実の避難シミュレーションでは数百から数千人規模が対象となると考えられる。この場合、階段だけでなく階段下の広場での群衆移動も対象としたシミュレーションが必要となるだろう。さらに、個々の要素の運動に関しても、世代間の助け合い・励まし合いなどのモデル化にも課題を残している。モデルのディテールを洗練すると同時に、大規模計算の準備も平行して進めたい。

最後に、シミュレーションモデルの開発段階で、京都大学工学研究科都市社会工学専攻・清野純史助教授から、津波避難施設整備の現状など本研究の動機付けの段階で、京都大学工学研究科都市社会工学専攻・柄谷友香助手から、それぞれ有益な助言を頂いたことを記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 岡崎甚幸 (1979): 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究その1 磁気モデルの応用による歩行モデル, 日本建築学会論文報告集, 第283号, pp. 111-117.
- 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一 (1996): 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 233-244.
- 小関憲章・渡部貞清 (1967): 群集旅客流の交差, 日本建築学会論文報告集号外, p. 762.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2001): 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程, 土木学会論文集, 第691号/II-57, pp. 133-142.
- 平井一正, 樽井賢治 (1977): パニック時の群衆の行動とそのシミュレーション, システムと制御, Vol. 21, No. 6, pp. 332-338.
- Fruin J., 長島正充 (1974): 歩行者の空間, 鹿島出版社, 206 p.
- Gotoh, H. and Sakai, T. (1997): Numerical Simulation of Sheetflow as Granular Material, Jour. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 329-336.