

ポテンシャル場と Social Force モデルを用いた群衆避難行動の検討*

東北大学 大学院 牧野嶋 文泰
 東北大学 災害科学国際研究所 今村 文彦
 東北大学 災害科学国際研究所 安倍 祥

1. はじめに

津波避難シミュレーションは、災害の発生前に様々な避難シナリオのもとで住民の避難行動をシミュレートすることで、避難途中の潜在的リスクを発見することが可能である。さらに、様々な条件を変更して避難行動をシミュレートすることで、避難に係るリスクや対策効果を定量的に評価することも可能となる。適切な避難行動の評価には、避難者の行動特性をシミュレーションに取り入れることが必要と明らかになってきており¹⁾、そのために避難行動シミュレーション手法の一つであるポテンシャルモデル²⁾を用いた柔軟なモデリングが有用である³⁾。街路から海水浴場のようなあらゆる空間スケールに適用可能な避難シミュレーション開発のためには、個々の避難者の回避行動等、自然な歩行者の挙動や、他の避難者からの干渉から創発される混雑現象を表現できことが望ましいが、ポテンシャル法においては、そうした干渉を表現する際に工夫が必要であり、例えば、避難行動のポテンシャル場と干渉に関わるポテンシャル場を重ね合わせる必要がある。その際に、ポテンシャルモデルには、重ね合わせられる各ポテンシャル場の大きさの妥当性を検証するのが困難であるという問題がある。そこで、本研究では、人間の基本的な歩行運動を表現できる Social Force モデル⁴⁾とポテンシャル法を組み合わせた歩行者モデルを開発し、基礎的な検証を行う。

2. 開発モデルの概要

将来のモデルの適用対象として津波避難行動を考えた際、年齢、移動手段といった多様な属性を持つ個人をモデルで取り扱う事ができるのが望ましい。そこで、本研究では、避難者のモデル化として、エージェントベースド手法を用いた。各エージェントの移動は、一般的な Social Force モデルの運動方程式（式(1)）の時間発展を計算することで表現する。モデルの概念図を図-1 に示す。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{\mathbf{v}_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

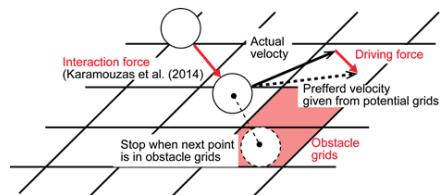


図-1 開発モデルの概念図

この式は、各エージェントをある半径を持つ質点と見なし、目的地へ向かおうとする力（右辺第1項）、他者

や壁などの障害物から受ける心理的な斥力（右辺第2、3項）を受ける運動方程式である。ここで、 m_i は各質点の質量、 \mathbf{v}_i は各エージェントの速度ベクトル、 \mathbf{v}_i^0 は各エージェントの希望速度、 $\mathbf{e}_i^0(t)$ はある時間 t における単位希望速度ベクトル、 $\sum_{j(\neq i)} f_{ij}$ は、周囲の他エージェントから受ける斥力、 $\sum_W f_{iW}$ は、壁や障害物から受ける斥力である。第一項の τ_i は緩和時間であり、現在の

*Study on crowd evacuation behavior using a model integrating Potential model and Social Force model by F. Makinoshima, F. Imamura and Y. Abe.

速度から希望速度に近づくために時間遅れがあることを表現している。

開発モデルでは、目的地へ向かう単位希望速度ベクトル $e_i^0(t)$ を、ポテンシャル場を参照して与えることで、ポテンシャルモデルによるエージェントの柔軟な経路モデリングを実現しながら、各エージェントとの干渉を従来のポテンシャルモデルの問題点を回避して計算可能である。Helbing ら⁴⁾が提案したモデルでは、斥力は、周囲のエージェントとの相対距離を説明変数とする力を仮定したが、本開発モデルでは、Karamouzas ら⁵⁾が実際の歩行者データの分析から提案した、線形衝突予測時間を説明変数とする斥力で与える。これは Karamouzas らにより、斥力の説明変数として各エージェント間との相対距離は十分でないと指摘されているためである。通常、Social Force ベースのモデルでは、壁や障害物に対しても式-(1)第 3 項の斥力を計算するが、本開発モデルでは、この項について計算を行わない。これは、柳沢ら⁶⁾によって指摘されている Social Force の力の均衡点でエージェントが静止してしまう問題を予め回避するためである。本開発モデルは、将来、著者らが既に取り組んでいる広域スケールの津波避難行動³⁾に応用することを考えており、複雑な街路に適用した際に上記の問題が発生することが容易に想像されること、また、複雑な地形における斥力計算による計算負荷増を懸念したためである。その代わり、エージェントの移動・干渉計算の結果、次ステップで障害物グリッドに移動してしまうと判定された場合は、その場に静止するという条件を加えた。

3. 開発モデルの基礎検証

開発モデルを広域に適用する前に、開発モデルが基本的な人間の歩行特性を再現できるか基礎的な検証を実施し、確認した。検証項目を表-1 に示す。最も基礎的な項目として 1 対 1 のエージェントが対面に接近して回避するケース、片方のエージェントがもう一方のエージェントを追い越すケースの挙動を確認した。次に、エージェント数を増やし、多数のエージェントが干渉する場合として、既往研究⁷⁾で報告され、よく確認される項目である、多数のエージェントが対面に交差するケース、垂直に交差するケース、狭窄部に集中するケース（ボトルネック）の 3 つのケースについて、エージェントの挙動を確認した。計算刻み幅は 0.01sec とし、人体円の半径を 0.3m とした。斥力計算に用いる固有のパラメータには、Karamouzas ら⁵⁾によって提案されたパラメータを使用した。モデル中の単位希望速度ベクトルを与えるポテンシャル場は、検証項目が確認できるような 1m メッシュの適当なポテンシャル場を作成・入力した。

1 対 1 のエージェントの検証を行った結果として、対面回避、追い越しの際のエージェントの挙動を軌跡として表現したものを図-2 にまとめて示す。図中の破線、実線はそれぞれ、異なるエージェントの時系列の軌跡を表している。

対面回避が発生するようなケースを設定し、計算した結果を図-2(a),(b)に示す。Karamouzas et al. のモデルで対面回避が起きるケースを計算したところ、希望速度ベクトルの向きが逆方向に完全に一致する場合に、エージェント同士に作用する力が均衡して、静止してしまう現象を確認した（図-2(a)）。そこで、我々のモデルでは、有川ら⁸⁾を参考に、エージェントの希望速度ベクトルに歩行挙動に影響がない程度の不確かさを与えた。 $\mu = 0$, $\sigma = 1^\circ$ の正規分布で与えられる不確かさを希望速度ベクトルに与えた場合のエージェントの挙動を図-2(b)に示している。

表-1 モデルの基礎検証項目

エージェント数	数値実験検証項目
1 vs 1	対面回避挙動
	追い越し挙動
200 vs 200	対面交差
200 vs 200	垂直交差
200	ボトルネックテスト

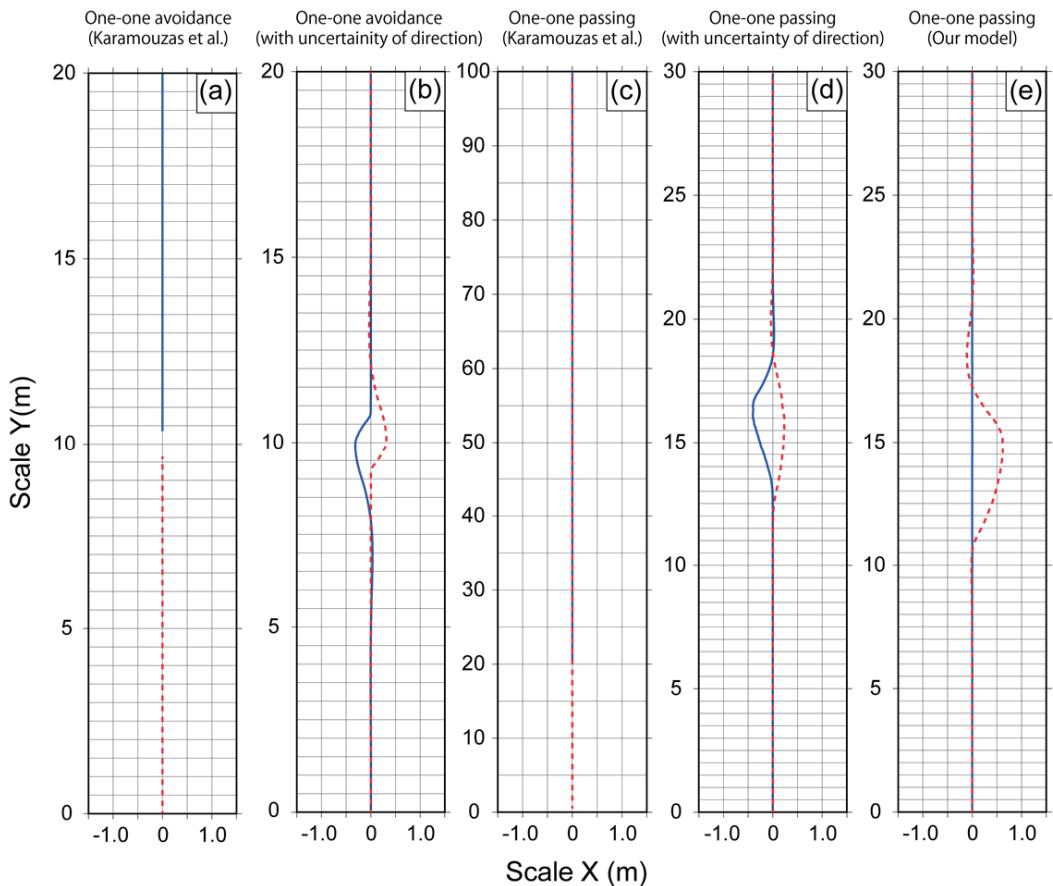


図-2 1vs1 の回避、追い越し挙動の検証結果

進行方向に不確かさを与えたことで、移動方向ベクトルが一致することがなくなり、自然な回避行動を再現することができた。

1対1のエージェント間で追い越ししが起きるようなケースを設定し、計算した結果を図-2(c),(d),(e)に示している。ここで、実線で示されるエージェントは初期位置で、破線で示されるエージェント前方に位置するが、やがて2倍の希望速度を持つ破線で表されるエージェントに追い越される。対面回避のケースと同様、Karamouzas et al.のモデルの計算結果で、エージェントの希望速度ベクトルの位置が順方向で完全に一致する場合に、早い速度を持つエージェント（図中破線）が、遅い速度を持つエージェント（図中実線）を追い越すことができず、追従してしまうという挙動を確認した（図-2(c)）。これも、対面回避のケースと同様、進行方向に不確かさを与えることで、追い越し挙動を再現することが可能になるが、追い越されるエージェントが後方のエージェントの接近に反応して避けるという、現実的でない挙動となる（図-2(d)）。そこで、我々は、Karamouzas et al.のモデルでは、斥力を計算するエージェントの探索範囲を半径7mの円としていたところを、エージェントの視野をイメージして、進行方向前方の半径7m、角度120°の扇形に変更した。その結果、広報から接近するエージェントは前方のエージェン

トを回避するが、追い越されるエージェントは、これまでの移動を続けるというより現実的な挙動を再現することができた(図-2(e))。ここで、回避、追い越し行動後にエージェントの軌道にゆらぎが見られるのは、前述した緩和係数 τ の影響によるものである。

1対1の基礎的な検証を終えたうえで、多数のエージェントが干渉するケースを計算し、既往研究で報告されている現実で見られる歩行者の挙動、また多くのSocial Forceベースのモデル⁷⁾で再現されている歩行者挙動が見られるかを確認した。ここで、以降の多数のエージェントが干渉するケースにおいては、斥力の計算範囲に、1対1の検証時に導入した扇形視野を採用せず、従来の円範囲を採用している。これは、群衆密度が非常に高い場合に視野範囲での斥力判定では、エージェント同士が回避できずに接触してしまうケースが確認されたためである。密度に応じて自然な回避行動ができるようモデルを改良することは今後の課題である。多数のエージェントが干渉する対面交差として、一定間隔で整列した200エージェントが上下から交差するケースを設定した。数値実験の概念図と、スナップショットの交錯部を切り出したものを図-3に示す。設定した初期条件のまま移動すると、赤色エージェントと灰色エージェントは衝突するが、それぞれのエージェントに回避行動が発生し、図-3のスナップショットに示したような進行方向に歩行者列が形成される。これは、Lane formationという現象であり、現実でも、幅の狭い通路で双方向交通がある場合等に観察される現象である⁹⁾。現実と既往のシミュレーションで確認されている現象を、ポテンシャルモデルを用いた本モデルの計算でも再現出来ることを確認した。

200対200のエージェントが垂直に交差する場合の検証テストの概念図と交錯部のスナップショットを切り出したものを図-4に示す。対面交差の時と同様、多数のエージェントの干渉の結果、交錯部に特定のパターンが形成される。これはStripe formationとして知られるパターンで、垂直に交差する通路等で現実にも確認されているパターンである¹⁰⁾。このパターンは、既往のシミュレーションでも再現されているもので、本モデルでも同様の現象が再現されることを確認した。

最後に、多数のエージェントが干渉するケースとして、海水浴場のような広域空間を想定して、200体のエージェントが、一箇所の開口部に集中するようなケースを設定した。検証テス

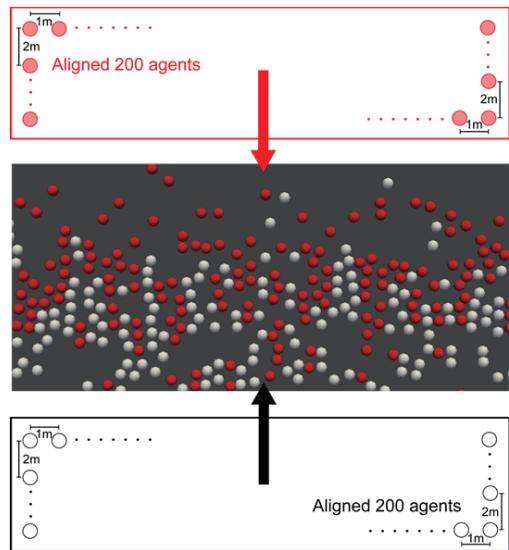


図-3 対面交差テストの概要図と
スナップショット

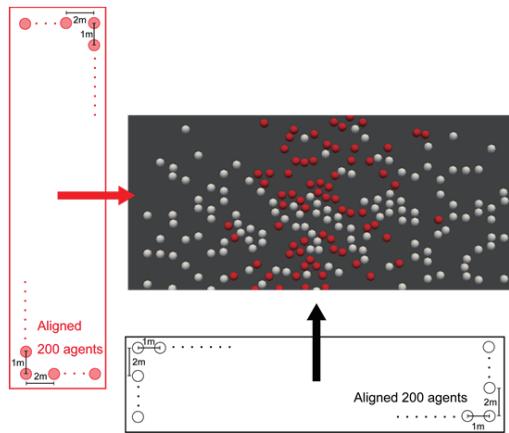


図-4 垂直交差テストの概要図と
スナップショット

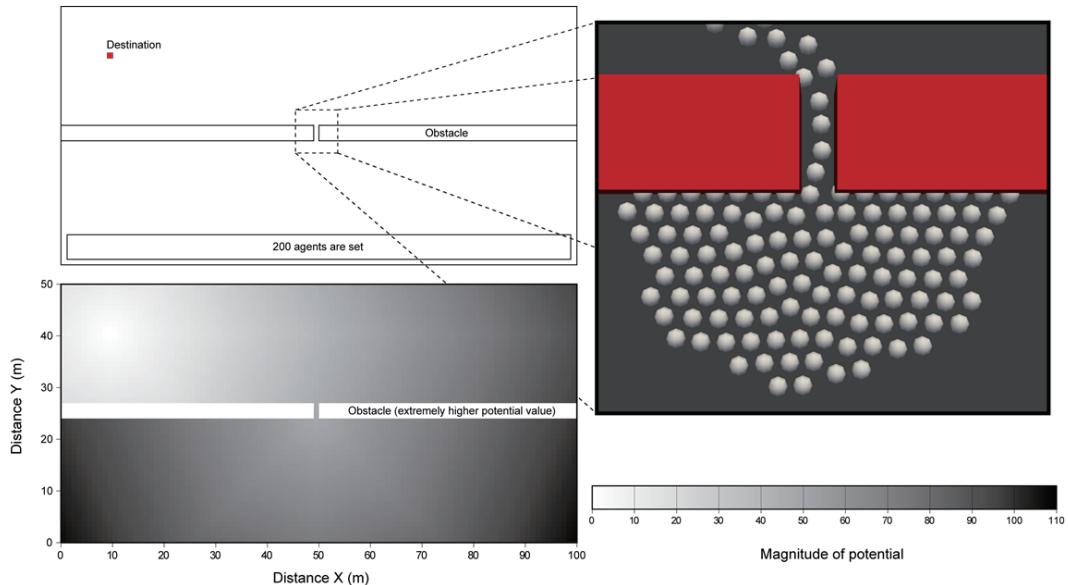


図-5 ボトルネックテストの概要図とスナップショット

トの地形の概要とポテンシャル場、開口部付近でのある時刻のスナップショットを図-5に示す。検証に用いた地形は、幅100 m、高さ50 mの領域で、中央に幅1 mの開口部がある。エージェントは、まず、開口部を通過し、その後、進行方向左側にある目的地へ向かうようなポテンシャル場である。図中のスナップショットは、エージェントが一斉に移動を開始し、ある程度時間が経過した後の開口部付近の状況を示している。狭窄部容量以上のエージェントが一斉に殺到したことにより、混雑が発生し、多くのエージェントが前方エージェントの狭窄部通過を待っている状況が再現された。ここで群衆の形状は開口部を中心に扇形の形状が再現された。これは、屋内の避難行動等において、狭い出口に避難者が殺到する場合に現実でも形成されるArching actionとして知られており、本開発モデルでは、障害物からの斥力を計算しない手法としたが、定性的には、障害物からの斥力を計算する手法と同様の結果を得られることを確認できた。ここで、エージェントは移動計算の結果、自身の中心位置が障害物グリッドに入る場合に停止としているため、壁際のエージェントは、最大で半径分の体積が無視されることになる。図-5において障害物近くのエージェントの一部が障害物と重なっているように見えるのはそのためである。しかし、本手法の適用を想定している市街地規模の津波避難シミュレーションの地形スケールを考えれば、現在のところ、この誤差が避難行動解析の結果に及ぼす影響は僅かであり、問題にならないと考えている。ボトルネックテストによって、障害物がある場合の群衆避難行動を検討する際にも、本手法の有効性を確認することが出来た。

4. おわりに

単位希望速度ベクトルをポテンシャル場から算出し、障害物付近での移動に単純な規則設けることで、ポテンシャル場とSocial Forceモデルを組み合わせた歩行者モデルを開発し、基礎的な検証を実施した。

メッシュで与えるポテンシャル場でエージェントに移動方向を与える場合に、干渉計算を行うエージェントの移動方向ベクトルが順、もしくは逆方向に一致する場合が良くあるが、そうした場合に、Social Force ベースの移動では、自然な回避、追い越し行動が再現されない問題が明らかとなった。そこで、移動方向に乱数を用いて進行方向に影響しない程度の不確かさを与え、斥力の計算判定に視野の概念を導入したこと、1対1のエージェントの基礎的な回避、追い越し行動の再現が可能となった。

次に多数のエージェントが干渉する場合の基礎的な検証として、対面交差、垂直交差、ボトルネックテストの3ケースを行った。いずれのケースにおいても、既往のシミュレーションや現実で観察される定性的な歩行者の挙動を良好に再現することが出来た。特にボトルネックテストにおいては、障害物に関して設定した単純な移動規則においても、狭窄部付近の歩行者の混雑の様子を良好に再現することが出来た。しかし、1対1で自然な回避行動のために導入した視野の概念により、多数のエージェントが干渉する高密度下では、不自然な挙動が確認されたため、多数のエージェントが干渉するケースでは、斥力計算を円の範囲で行った。エージェント周囲の状況に応じた斥力計算手法の改良は今後の課題である。今後、モデルを用いた解析の妥当性を高めるべく、今回の定性的検証に加え、既往研究で得られている実際の歩行者挙動と比較するといった定量的検証を行った後、本手法を筆者らが開発を進めている津波避難シミュレーション³⁾に組み込み、広域空間から複雑な街路まで様々なスケールでの避難行動解析に応用することを考えている。

参考文献

- (1) 後藤洋三・印南潤二・Muzailin Affan・Nur Fadli : スマトラ北部西方沖地震で生じたバンダアチェ住民の大規模避難行動の調査と分析、土木学会論文集 A1, 69(4), I_182-I_194, 2013.
- (2) 横山秀史・目黒公朗・片山恒雄 : 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用、土木学会論文集, No.513, pp.225-232, 1995.
- (3) 牧野嶋文泰・今村文彦・安倍祥 : 歩車混在を考慮した津波避難シミュレーションの開発-2011年東日本大震災での気仙沼市での検証-, 土木学会論文集 B2, 71(2), pp.1645-1650, 2015.
- (4) Helbing, D.・Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical review E*, 51, 4282-4286, 1995.
- (5) Karamouzas, I.・Skinner, B.・Guy, S. J.: Universal power law governing pedestrian interactions, *Phys. Rev. Lett.* 11, 238701, 2014.
- (6) 柳沢豊・山田辰美・平田圭二・佐藤哲司 : 視線に基づくサブゴール決定過程を取り入れた歩行者モデル、情報処理学会論文誌, 47(7), pp.2160-2167, 2006.
- (7) Helbing, D.・Buzna, L.・Johansson, A.・Werner, T.: Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations and design solutions, *Transportation science*, 39, pp.1-24, 2005.
- (8) 有川太郎・大家隆行 : 数値波動水槽と練成した避難シミュレータによる避難行動特性についての検討、土木学会論文集 B2, 71(2), pp.319-324, 2015.
- (9) Zhang, J.・Klingsch, W.・Schadschneider, A.・Seyfried, A.: Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram, *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, P02002, 2012.
- (10) Bamberger, J.・Geßler, A.L.・Heitzelmann, P.・Korn, S.・Kahlmeyer, R.・Lu, X.H.・Sang, Q.H.・Wang, Z.J.・Yuan, G.Z.・Gauß, M.・Kretz, T.: Crowd research at school: Crossing flows, *Traffic and Granular Flow '13*, pp.137-144, 2014.