

非構造部材の散乱を考慮した 3次元避難シミュレータの開発

Development of a 3D evacuation simulator considering the scattering of nonstructural members

山崎晃一¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Koichi Yamazaki and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s2420903@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In order to evacuate swiftly in the event of an earthquake, it is necessary to take earthquake-proofing measures and prevent furniture from toppling over, but these are unlikely to be sufficiently implemented. In this study, we developed an evacuation simulator by applying Social Force Model to behavioral patterns of agents in three-dimensional space full of scattered furniture. We demonstrated the effectiveness of the earthquake-proofing measures by comparing the difference in evacuation time with and without them. The behavior of furniture during an earthquake is reproduced using the ASI-Gauss code, and the room with scattered furniture is used to verify the three-dimensional evacuation simulator.

Key Words : ASI-Gauss code, Social Force Model, 3D evacuation simulator

1. はじめに

建物内で地震が発生した際は素早く避難することが重要であるが、家具の転倒や天井の脱落などにより避難経路が塞がれてしまうと避難時間が増加してしまう。そのため、家具や天井の耐震対策は重要である。しかし、実際の対策は進んでいないのが現状である。そのため、耐震対策の有無が避難時間に与える影響を明らかにし、対策の必要性を定量的に示すためには、非構造部材の散乱を考慮可能な避難シミュレータの開発が必要となっている。

先行研究においては様々な避難シミュレータが開発されている[1]が、多くの既存のシミュレータにおいて人が障害物の上を乗り越えるといった3次元的な避難行動は考慮されていない。しかし、実際の避難行動においては、避難者が障害物の乗り越えるといった3次元的な行動を起こす場合があるため、より現実的に即した避難シミュレーションにはこうした3次元的な行動の考慮が必要である。また、避難者による3次元的な行動の有無は地震時における障害物の位置に依存するため、非構造部材の地震応答を適切に再現することが重要である。

障害物の挙動を解析する手法にはASI-Gauss法[2]の使用が効果的である。この手法は家具の挙動解析や天井の脱落挙動を高精度に再現できる点で有用である。

これらのことを踏まえて本研究では、非構造部材の散乱を考慮した3次元マルチエージェント避難シミュレータの開発を目的とする。そして、これを達成するため、Social Force Model (以後SFMと呼ぶ) と人の3次元的な行動アルゴリズムを組み合わせた避難シミュレータの開発と非構造部材を含んだ建物への地震応答解析を行い、後者

の結果を利用した避難シミュレーションを実施する。

2. Social Force Model (SFM)の概要

SFMとは、歩行者などに見立てたエージェント(以後Aと呼ぶ) が複数集まった状況に対し、Aの行動パターンを外力に変換し、その変換した複数の外力の合力をAに加え、動きをシミュレートするモデルである。Aの1つである A_i は質量 m_i をもち、 A_i の速度は運動方程式である以下の式(1)によって決定する。

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_i^0 + \sum_N \vec{f}_{ij} + \sum_M \vec{f}_{i\omega} \quad (1)$$

\vec{v}_i は A_i の速度ベクトルである。 \vec{f}_i^0 , \vec{f}_{ij} , $\vec{f}_{i\omega}$ はそれぞれ目標地点0へ向かうための修正力、他のAである A_j から受ける斥力、障害物 ω から受ける斥力である。 N はAの総数から1を引いた数であり、 M は障害物の総数である。なお本研究では障害物は線分として表す。

\vec{f}_i^0 は以下の式(2)で定義する。

$$\vec{f}_i^0(t) = m_i \frac{v_i^0 \vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

v_i^0 は目標地点0へ向かうときの目標移動速さであり、 \vec{e}_i^0 は A_i から目標地点0方向の単位ベクトルである。 τ_i は A_i の反応時間である。

\vec{f}_{ij} は以下の式(3)で定義する。

$$\vec{f}_{ij} = g(\phi_{ij} - \phi) \vec{f}_{ij}^{int} + g(l_{ij}) \vec{f}_{ij}^{ph} \quad (3)$$

\vec{f}_{ij}^{int} , \vec{f}_{ij}^{ph} はそれぞれ視野内に A_j が存在する場合に A_i が受ける斥力, 接触時に発生する力である。 A_i は \vec{v}_i 方向を中心に 2ϕ の視野を持つと仮定する。 ϕ_{ij} は \vec{v}_i 方向と A_i の中心点から A_j の中心点方向のなす角度である。 l_{ij} は A_i と A_j の表面間距離であり, A_i と A_j が接触している場合に正, 非接触の場合に負の値となる。 $g(x)$ は $x \leq 0$ のとき1, $x > 0$ のとき0となる関数である。 $g(\phi_{ij} - \phi)$, $g(l_{ij})$ によって A_j が A_i の視野内に存在するか, もしくは A_i と A_j が接触しているかを判定する。

\vec{f}_{ij}^{int} は以下の式(4)で定義する。

$$\vec{f}_{ij}^{int} = -C \exp\left(-\frac{l_{ij}}{\sigma}\right) \vec{n}_{ij} \quad (4)$$

C は \vec{f}_{ij}^{int} の斥力に関する係数 [N], σ は斥力が C/e となる範囲 [m], \vec{n}_{ij} は A_i の中心点から A_j の中心点方向の単位ベクトルである。

\vec{f}_{ij}^{ph} は以下の式(5)で定義する。

$$\vec{f}_{ij}^{ph} = \kappa_n l_{ij} \vec{n}_{ij} + \kappa_t l_{ij} \left((\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot \vec{t}_{ij} \right) \vec{t}_{ij} \quad (5)$$

κ_n は \vec{f}_{ij}^{ph} の斥力に関する係数 $[kg/s^2]$, κ_t は \vec{f}_{ij}^{ph} の摩擦力に関する係数 $[kg/(m \cdot s^2)]$, \vec{t}_{ij} は接線方向の単位ベクトルである。右辺第1項は斥力成分であり, 右辺第2項は摩擦力成分である。 $(\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot \vec{t}_{ij}$ は相対速度 $\vec{v}_i - \vec{v}_j$ の接線方向成分である。

$\vec{f}_{i\omega}$ は障害物 ω の両端を結んだ辺と A_i の中心点によって成す両端を結んだ辺の内角がどちらも鋭角の場合のみ発生する力である。発生する場合は, そのベクトルは式(3)により決定する。

3. 中間地点作成アルゴリズムの概要

SFM において A と目標地点の間に障害物が存在する場合, A にかかる外力がつり合うことで静止してしまう可能性がある。この問題は A が目標地点の前に通過する中間地点を適切な位置に設定することで解決することができる。中間地点を適切な位置に設定するための中間地点作成アルゴリズムは以下の通りである。

- ① A の中心点と目標地点もしくは中間地点を結ぶ線分の間に障害物が存在する場合, 障害物の辺の延長線上に中間地点候補点を設置する。
- ② A の中心点と目標地点, 中間地点候補点それぞれを全て線分で連結し, A がそれらの線分上を移動するのに要する時間 t_{sg} を算出する。線分上に障害物が存在しない場合は以下の式(6), A が昇降可能な障害物が存在する場合は以下の式(7), 昇降不可能な障害物が存在する場合は通過不可能として巨大数を用いて時間を設定する。

$$t_{sg} = \frac{d_{sg}}{v_i^0} \quad (6)$$

$$t_{sg} = \frac{d_{sg} - d_{obs}}{v_i^0} + \frac{d_{obs}}{v_i^{obs}} + t_i^{up} + t_i^{down} \quad (7)$$

d_{sg} は線分全体の長さ, d_{obs} は障害物上の長さ, v_i^{obs} は A_i の障害物上での移動速さ, t_i^{up} は A_i が障害物を昇るためにかかる時間, t_i^{down} は A_i が障害物を降りるためにかかる時間である。

- ③ ②で求めた移動時間をもとに, ダイクストラ法[3]により A の中心点から目標地点への最小時間経路を求め, 当該経路上に含まれる中間地点候補点のうち, 最も早く到達する中間地点候補点を中間地点とする。このアルゴリズムによる計算は時間増分 Δt [s]ごとに行い, A が中間地点に一定距離以内まで接近した場合, A は中間地点に到達したものとみなす。

4. 昇降時間計測実験

(1) 実験概要

障害物の昇降時間 t_i^{up} , t_i^{down} はその高さによって変化すると考えられる。そこで, その関係性を調べるための実験を行った。図-1 に実験の概要図を示す。被験者が1.2[m]の距離を障害物を乗り越えて移動し, その全体の時間と障害物上(0.80[m])を移動する時間をそれぞれ計測する。障害物の高さ h_{obs} [m]は0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.0の8パターンを設定し, それぞれの条件で3回ずつ測定を行う。被験者データを表-1 に示す。図-2 に実験の様子を示す。

(2) 実験結果

昇降時間(昇り+降り) $t_i^{up} + t_i^{down}$ と障害物高さの関係を表した図が図-3である。 $t_i^{up} + t_i^{down}$ の値は被験者が障害物を乗り越えて移動する全体の時間の平均値から障害物上(0.80[m])の移動時間の平均値を引くことによって算出した。図-3における曲線と直線は, 実験により得られた高さごとの最大値と最小値の近似曲線および近似直線であり, 以下の式(8), 式(9)で表される。

$$t_i^{up} + t_i^{down} = 25.6h_{obs}^3 + 30.2h_{obs}^2 + 13.7h_{obs} - 4.79 \times 10^{-2} \quad (8)$$

$$t_i^{up} + t_i^{down} = 2.03h_{obs} - 1.17 \times 10^{-2} \quad (9)$$

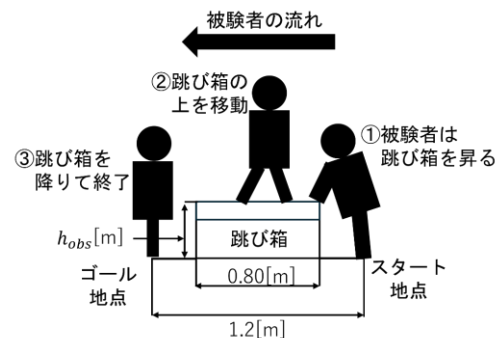


図-1 実験の概要図

表-1 被験者のデータ

	性別	身長[cm]	年齢[歳]
被験者1	男	175	21
被験者2	男	178	23
被験者3	男	182	23
被験者4	男	160	22
被験者5	男	181	21
被験者6	男	172	22
被験者7	男	172	21
被験者8	男	170	21
被験者9	男	171	21
被験者10	男	171	21



図-2 実験の様子

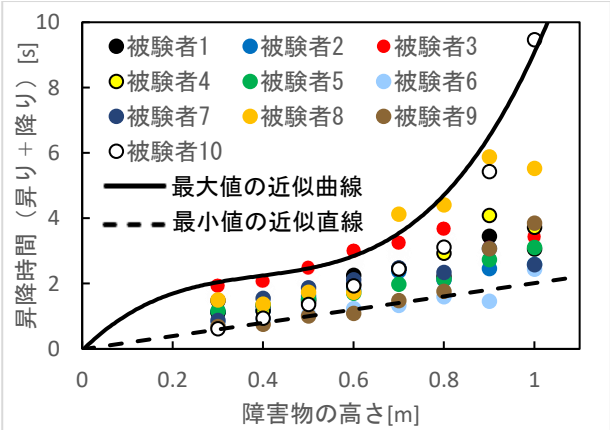


図-3 障害物の高さ上昇時間

5. 避難行動の数値解析

(1) 解析モデルおよびパラメータの設定

昇降動作および家具の散乱が避難経路に及ぼす影響を評価するため、以下の3通りの解析を実施し、避難時間の比較を行う。

- ① 地震後の家具が散乱した配置による解析(昇降動作を考慮)
- ② 地震後の家具が散乱した配置による解析(昇降動作を考慮せず)
- ③ 地震前の初期状態における家具の配置を用いた解析

①、②には先行研究[4]の解析結果の一部に出口を付け足したモデルを用いる。③には同じく先行研究[4]の解析結果の初期状態の一部に同様の出口を付け足したモデルを

用いる。①、②のモデルを図-4、③のモデルを図-5に示す。③は耐震対策を行い家具が初期状態から移動しなかった場合を想定した解析である。①、②においてAと目標地点を配置したモデルを図-6、③においてAと目標地点を配置したモデルを図-7に示す。A₁とA₂の2つを配置し、それぞれの座標を(1.5,2.0)、(3.5,2.0)とし、目標地点を両者とも(4.5,3.5)とする。避難時間の比較には、Aが出口を通過するまでの時間を用いる。Aの目標地点0へ向かうときの目標移動速さ v_i^0 は先行研究[5]より非混雑時の人の平均移動速度である1.40 [m/s]とし、家具の上での移動速度 v_i^{obs} は、Aが家具上では四足歩行で移動すると仮定し、先行研究[6]から0.73 [m/s]とする。Aが昇降可能な高さは1.1 [m]とする。家具の昇降時間 t_i^{up} 、 t_i^{down} の値は等しいと仮定する。それらの値の最大値、最小値をそれぞれ昇降する家具の高さ h_{obs} を式(8)および式(9)に代入して得られる値の半分とし、その範囲内でランダムに決定する。時間増分は0.01 [s]とする。その他のパラメータとして、 $m_i = 80$ [kg]、 $\tau_i = 0.50$ [s]、 $C = 2 \times 10^3$ [N]、 $\sigma = 0.08$ [m]、 $\kappa_n = 1.2 \times 10^5$ [kg/s²]、 $\kappa_t = 2.4 \times 10^5$ [kg/m · s²]を先行研究[7]より設定する。

(1) 解析結果

①の解析結果を図-8、②の解析結果を図-9、③の解析結果を図-10に示す。黒い四角錐がA₁、赤い四角錐がA₂である。①のA₁、A₂が出口を通過するまでに要した時間

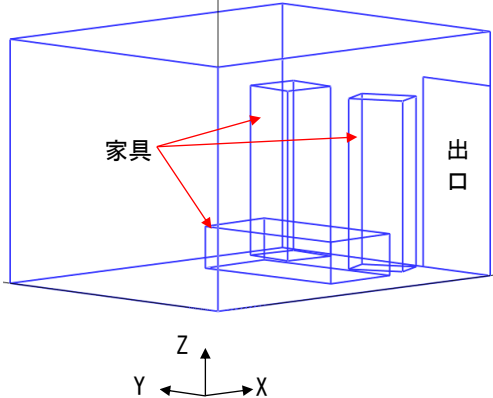


図-4 地震応答解析結果[4]の一部に出口を付け足したモデル

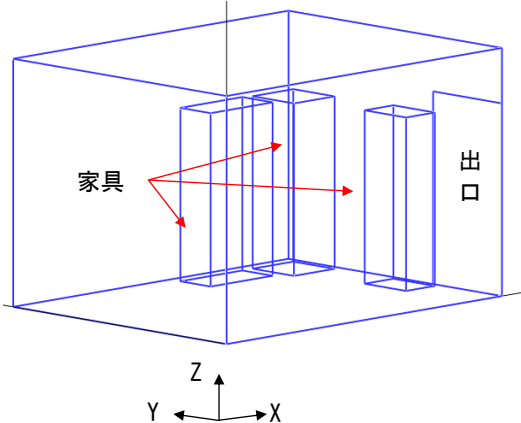


図-5 地震応答解析結果[4]の初期状態の一部に出口を付け足したモデル

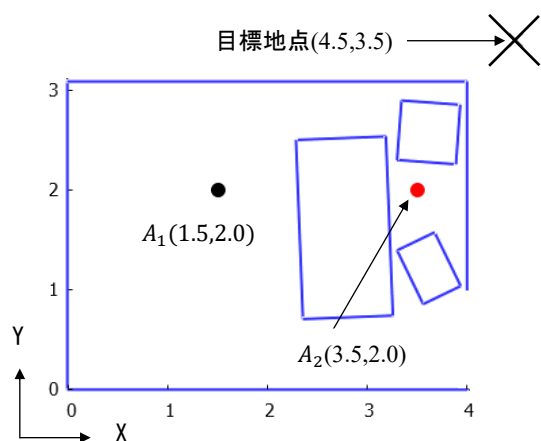


図-6 家具が散乱したモデルにAと目標地点を配置した平面図

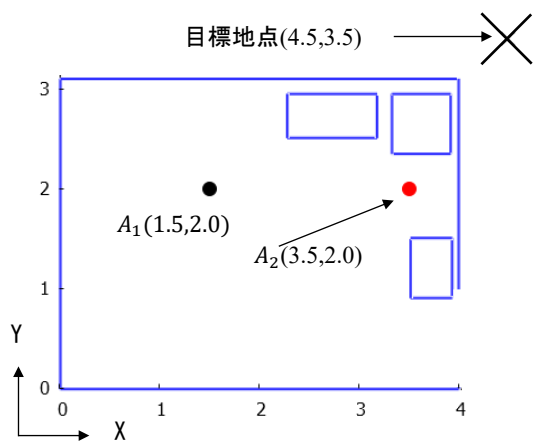


図-7 初期状態のモデルにAと目標地点を配置した場合の平面図

はそれぞれ3.8 [s], 6.5 [s], ②の A_1 が出口を通過するまでに要した時間は3.8 [s]であり, A_2 は出口を通過することができなかった. ③の A_1 , A_2 が出口を通過するまでに要した時間はそれぞれ3.7 [s], 2.8 [s]である. ②の A_2 が出口を通過することができなかった要因は昇降動作を考慮していないため, 壁と家具に囲まれた空間において移動経路が遮断されたためである. よって, このような状況でも現実 に即した避難行動を再現するためには, 昇降動作を考慮することが不可欠である.

また, ①の A_2 は初期位置において壁と家具に囲まれており, 出口を通過するには家具を昇降する必要があるため, 家具の昇降時間や通常より移動速度が遅くなる家具の上を移動する必要があるため, ③の A_2 との通過時間の差が大きくなっており, 家具の位置により避難時間に大きな影響を与えることを示している. しかし, A_1 の通過時間は①, ②において家具の転倒により直線的に動作できなかったにもかかわらず, ③と大きな差は見られない. これは③の場合では A_2 の存在により減速する必要が出たのに対し, ①, ②では A_2 の動作が家具により遅れたため A_1 は A_2 の影響を受けずに移動できたことが要因として考えられる.

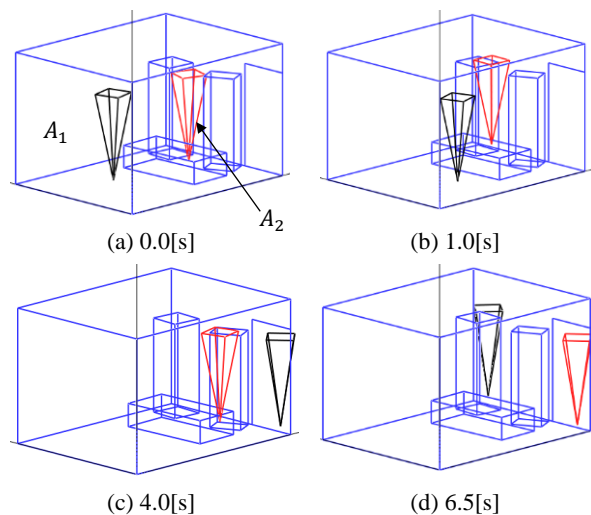


図-8 地震後の家具が散乱した配置による解析 (昇降動作を考慮)

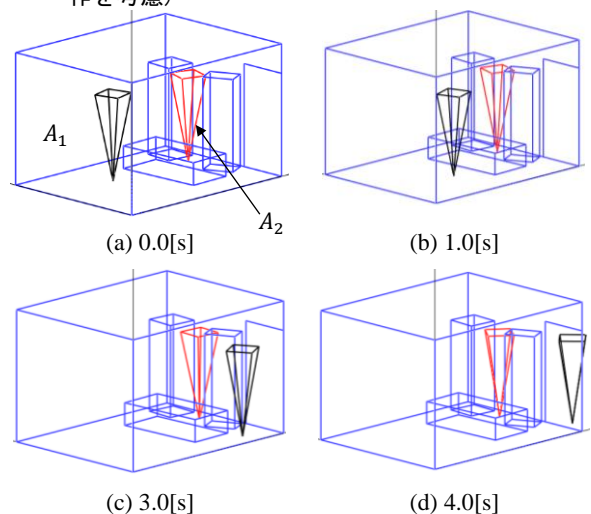


図-9 地震後の家具が散乱した配置による解析 (昇降動作を考慮せず)

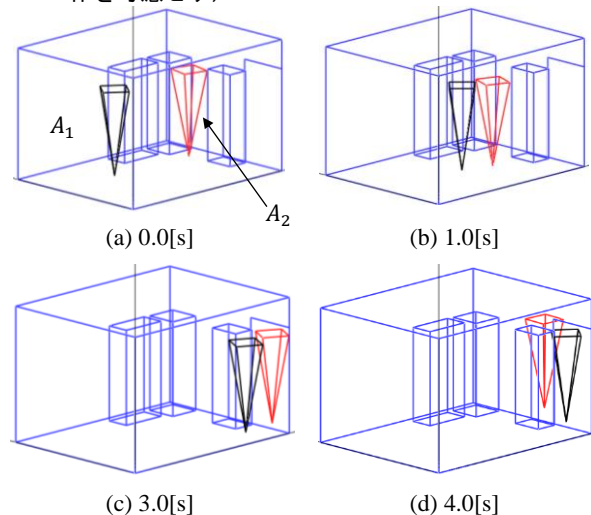


図-10 地震前の初期状態における家具の配置を用いた解析

6. 結論

本研究では, SFMを用いた3次元マルチエージェント避難シミュレータの開発を行い, ASI-Gauss法を用いた建物-非構造部材モデルによる地震応答解析の結果を基に, 検

証を行った。この検証により，昇降動作を考慮する重要性和地震時に発生する家具の散乱が避難時間に及ぼす影響を確認し，耐震対策の重要性を示すことができた。

参考文献

- [1] M. Li, *et al.*: The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China, *Safety Science*, Vol.79, 243-253, 2015.
- [2] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学 建物の崩壊 解析からロボット機構の制御まで Fortran90・C++ソースコード付，丸善出版，ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.
- [3] E. W. Dijkstra: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, Vol.1, 269–271, 1959.
- [4] D. Isobe, Q. Yang: An integrated finite element analysis and virtual reality system for structural and indoor nonstructural components of buildings under seismic excitations, *Journal of Building Engineering*, Vol.98, 111320, 2024.
- [5] 堀宗朗，宮嶋宙，犬飼洋平，小国健二：地震避難行動予測のためのエージェントシミュレーション，土木学会 A, Vol.64, No.4, 1017-1036, 2008.
- [6] R. Nagai, *et al.*: Experiment and simulation for counterflow of people going on all fours, *Physica A*, Vol.358, 516–528, 2005.
- [7] D. Helbing, *et al.*: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol.407, 487-490, 2000.