

空間制限を考慮した大規模群集シミュレーションのための スポット・リンク型モデルの歩行パフォーマンス評価

The spot link model's performance evaluation for large-scale crowd simulation that
considers space limitation

○崔 青林¹, 谷口 仁士¹, 兼田 敏之²
Qing-Lin CUI¹ Hitoshi TANIGUCHI¹ and Toshiyuki KANEDA²

¹立命館大学歴史都市防災センター

Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage, Ritsumeikan University

²名古屋工業大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

During seismic disaster, a large population stays in the base stations of earthquake area. How to alleviate this phenomenon is an important issue concerned by local government and railway companies. The spot link model with raised abstraction level is a useful tool to analyze this kind of phenomenon. However, in case of raised abstraction level of space limit, it is necessary to investigate how the expression of walking position is affected. In this paper, space spot in the spot link model is simulated by cell type model, the expression of crowd behavior based on three elements, namely, movement distance, inside density of spot, and outflow coefficient, are analyzed, and some findings are presented.

Keywords Large-scale crowd simulation, Performance evaluation, Crowd behavior modeling, Spot-Link type model, Cell type model

1. 研究の背景と目的

地震災害の際に、被災地域の拠点駅に大量の帰宅困難者が発生し、自治体および鉄道会社は地域特徴に対応できる滞留者対策が求められる。特に日本政府に予知可能な地震に指定された東海地震の場合は「注意情報」の段階での一斉帰宅者の大量流入により、群集流の交錯が生じることが考えられ、群集事故の予防対策および乗換駅の処理効果・帰宅困難者の滞留状態の検討も必要である。

名古屋市は東海地震予知情報の発令した場合を想定して、滞留者支援の一環として、名古屋駅での滞留者推定に関する調査研究を行ったが、空間・時間的な制限は考慮していない問題点がある。そこで、作者らはこのような大規模の群集流をシミュレートするために、実空間の抽象度を上げて、空間的制限・時間的制限を考慮したスポット・リンク型モデルを開発し、最大で 18 万人規模に対応できるエージェント・シミュレーション実験が可能となった。

しかし、空間制限の抽象度を上げた場合、スポット内の群集行動は移動距離・スポット内の密度およびスポット間の流動係数で決まることとなる。単純化された群集行動の制約条件はどこまでリアルな歩行状態を表現できるかという疑問が残った。そこで、本研究はスポット・リンク型モデルの改良のために、特徴的な空間スポットを抽出し、移動距離・スポット内の密度およびスポット間の流動係数の三つの条件について、群集歩行の表現パフォーマンスを評価することで、既存モデルの問題点を把握することを目的とする。

2. 既存研究と評価方法

(1) 既存研究

平成 14 年度名古屋市の委託研究で、電車の運搬能力、

利用者の人数および乗換え状況を考慮した数理モデル¹⁾による分析が行われた。しかし、空間・時間的制限は考慮されていなかった。崔ら(2008)²⁾はボトルネックとなりうる駅構内乗換通路を対象としたセル型モデルを開発し、電車到着時刻を考慮したシミュレーション分析を行ったが、6000 人程度しか対応できなかったため、10 万人規模に上る滞留者マネジメントのためのシミュレーション分析には向いていない。そのために、CUIら(2009, 2010)³⁾は空間の抽象度を上げて、大規模乗換駅の周辺地区を対象としたスポット・リンク型モデルを開発し、名古屋駅エリアの滞留者評価を試みた。なお、各シミュレーションモデルの特徴を表 1 にまとめた。

表 1 : 各種シミュレーション分析の特徴

分析手法	数理モデル	セル型モデル	スポット・リンクモデル
移動速度	考慮しない	パターン固定	ステップごとに $\rho-v$ 式で算出
時間	3時間	1時間	1時間
空間表現	考慮しない	セル分割	スポット空間近似
人数実績	無制限	6000人程度	18万人程度
対象	名古屋駅	JR名古屋駅北通路	名古屋駅周辺各空間
事項	設定事項および評価の基準	乗換通路における群集シミュレーション分析	名古屋駅周辺における大規模群集シミュレーション分析

(2) 評価方法

本研究では、開発したスポット・リンク型モデルの一部の構成空間を対象として、セル型モデルの群集流入実験を行う。双方の歩行アルゴリズムを比較しながら、移動距離・スポット内の密度およびスポット間の流動係数の三つの制約条件を使ったスポット・リンク型モデルの群集歩行のパフォーマンス評価と問題点の抽出を試みる。

3. 各モデルの概要と歩行アルゴリズム

(1) スポット・リンクモデル

スポット・リンク型モデルは最大で帰宅通勤者約 10 万人、乗換利用者約 7 万人を扱うことができる。このモデルでは名古屋駅周辺地区の空間を、列車を表す 5 スポット、各駅のプラットフォームを表す 5 スポット、地区外部流入を表す 9 スポット、ならびに内部空間を表す 30 スポットに区分した (図 1)。

図 2 のように、基本行動としては、歩行者エージェントは出発時点と目的地により、各ノードにて、最短距離の経路を選択し、目的地へ進み、目的地へ到着した時点で外部へ流出する。最短経路判定については後述する。歩行行動をスポット間移動とスポット内移動の二段階に分けて行う。歩行を制御する量としては、移動距離・スポット内の密度およびスポット間の流動係数の三つである。

歩行者エージェントはスポット S_m に入った時点で、スポット S_m の L_m 値を読み取る。移動距離 L を 0 にする。毎ステップの移動距離 ΔL を式 (1) で表せる。

$$\Delta L = V \cdot T \quad \text{--- (1)}$$

ただし、 T : 時間/ステップ (秒/ステップ)

ΔL : 移動距離/ステップ (m/ステップ)

V : 速度 (m/秒)

歩行速度に及ぼす各種の要因のうち、最も影響の大きい要因のひとつは密度とされる。本研究では二方向流の実測実験⁹⁾で計測された直線モデルおよび二方向流の歩行速度の推定式を空間スポット型モデルに組み込む。

$$V = a \cdot \rho + V_0 \quad \text{--- (2)}$$

ただし、 V : 歩行速度 (m/秒)

ρ : 密度 (人/m²)

V_0 : 基準歩行速度

a : パラメーター

式 (2) を式 (1) に代入して、毎ステップごとの移動距離は式 (3) で求める。

$$\Delta L = (a \cdot \rho + V_0) \cdot T \quad \text{--- (3)}$$

すでに移動しているスポット内距離 L にこの ΔL を加える。 $L \geq L_m$ になった場合、スポット内移動は終了する。

V_0 と a の設定値は一方向流・二方向流の違いによって異なる。また二方向流では対向人数の倍率によって異なる (表 2)。本研究では、一方向流と二方向流の 1 倍と 2 倍を実装する。また、人数比は四捨五入とし、1 倍未満は片方向流、2 倍以上は 2 倍とする。

また、滞留の原因としては、歩行者が止まるか減速することによって生じるものと幅員差のある場所 (縮小のみ) によって生じるものがある。本研究では歩行者がむやみに群集の流れを阻害する行為をとらないものとして、幅員の縮小による滞留だけ考慮する。隣接するスポット S_m と S_m' の幅員 W_m と W_m' を比較し、幅員の小さい側への流入上限を適用する。その場合、もし $W_m \leq W_m'$ なら、流入上限 Q は

$$Q = k \times W_m \times T \quad \text{--- (4)}$$

ただし Q : 流入上限

k : 流動係数 (=1.5 人/m・s)

T : 時間 (s) / 毎ステップ

Q 以上のエージェントは滞留し、元のスポットに留まる。また、通路と改札口の扱いについては表 3 にまとめた。

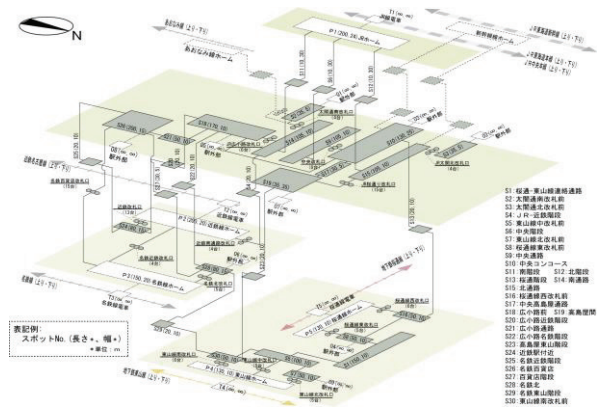


図 1: スポット・リンクモデル構成図 (名古屋駅)

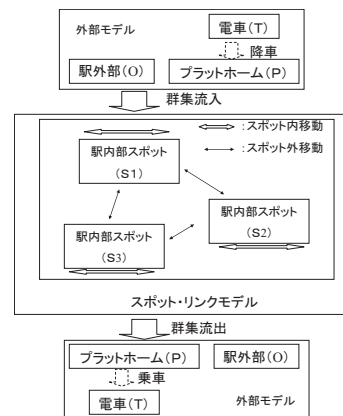


図 2: スポット・リンクモデルのフレームワーク

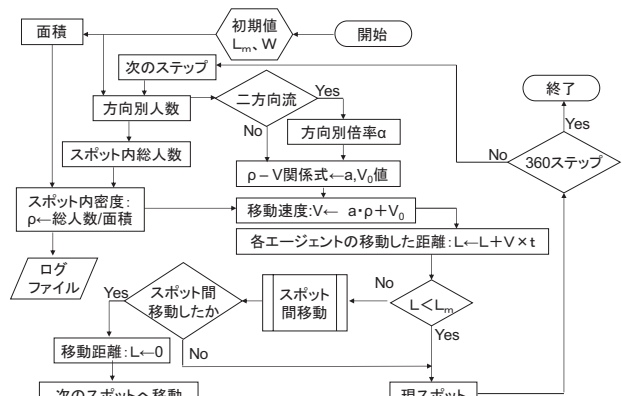


図 3: スポット内移動のアルゴリズム

表 2: 群集流表現の係数設定

群集流種類	対向流の群集倍率 (α)	群集流	a	V ₀
一方向流	-	全	-0.28	1.48
	1倍	全	-0.275	1.605
対向流	2倍	人数の多い	-0.285	1.675
		人数の少ない	-0.39	1.958

表 3: リンクのタイプ

タイプ	幅の有効率	通過人数のカウント方法
通路	1	二方向別
改札口	0.5	二方向合計

(2) セル型モデル

セル型モデルは JR 名古屋駅の北通路を対象に、楕円空間モデルを構築した (図 4)。楕円通路空間は 1 番通路 (北)、1 番通路 (南)、2~6 番通路 (幅 11 セル×長さ 45 セル) と東西通路 (幅 17 セル×235 セル) で構成される。総面積は 1196.32 m² (7477 セル) である。ただし、階段の段差は捨象している。楕円空間モデルには A から Q まで 17 か所の局所密度の測定区域を設定してある。各々の区域は 9 セル×9 セル (12.96 m²) からなり、歩行者エージェントの数から、群集密度を算出する。

シミュレーションのアルゴリズムを図 5 に示す。1 ステップ=1/3 秒の時間スケールと単純化された行動ルールの組み合わせにより、比較的簡単に最大速度 1.2m/s の行動パターンを作ることができる。1 秒あたりに表現できる歩行行動エリアを図 6 に示す。本研究は冷静な行動のみを扱い、パニック行動を考慮しない。

人体幅とセルの設定より、1 セルには最大 2 人まで入ることができるため、理論測定密度の最大値は 12.5 (人/m²) である。

歩行者の流入にはエージェント発生スポットを用いる。発生スポットあたり毎ステップ 20% の確率でエージェントを発生させると流動係数は 0.2 (人/step) × 3 (step/s) ÷ 0.4 (m) = 1.5 (人/m・s) となり、これは避難計画基準値 (一方向流) に相当するため、これを流入可能な最大流動係数とする。流入する歩行者エージェントにはそれぞれ目的地一か所を設定する。

目的地は改札口、プラットフォーム 1~6 で、計 7 か所の中で、OD 確率行列で設定する。

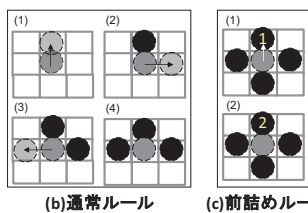
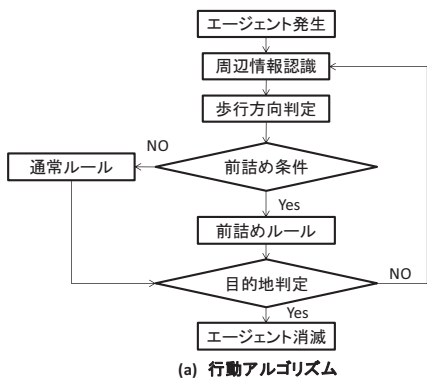
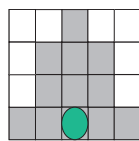


図 5 : セル型モデルの歩行行動アルゴリズム



■ 歩行範囲(1秒間)

図 6 : 実現できる歩行パタンの範囲

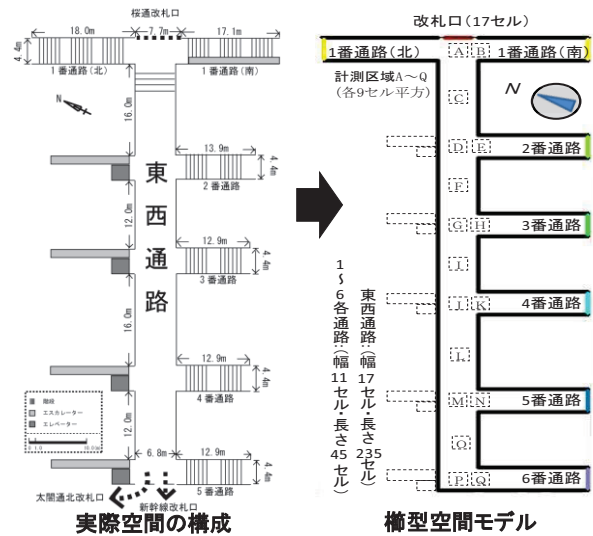


図 4 : 評価空間として抽出した JR 北通路エリア

4. 歩行パフォーマンス評価

(1) 評価空間での両モデルの比較

a) 距離

セル型モデルでは、出発地点から目的地までの各ルートの距離は実距離に従って、設定している。スポット・リンク型モデルでは、各階段の長さは実距離だが、東西通路は各ルートの距離の平均値で近似的に設定している。

b) 密度の計測

セル型モデルでは、空間内の局所密度の計測ができる。スポット・リンク型モデルでは、各階段および東西通路のようなスポット単位での計測しかできない。

c) 流動係数

機能設計の構造上では、どちらも最大流動係数を 1.5 人/m・s と設定しているが、セル型モデルではエージェントの生成人数をコントロールするための係数である。スポット・リンク型モデルでは、スポット間の通過人数のコントロールを行うために使う係数である。

d) 移動速度

セル型モデルは行動パターンを定義し、他のエージェントを回避したり、通過できないなどで、移動速度の変化につながる。スポット・リンク型モデルは直接速度と密度の関係式で、スポットの密度変化に対して、速度も変化する。

(2) 東海地震注意情報を想定したシミュレーション

東海地震注意情報が発令されたが、改札口も階段側も流入制限なしの想定でシミュレーションを行った。午後 2 時になると、改札口および階段側の流動係数は 0.5 人/m・s から 1.5 人/m・s になる。改札口側の流入人数合計は通常状態の 3 倍の 36720 人。北通路の利用率は全降車人数の 1/2 と高く設定し、到着ホームより、電車の到着時刻から約 20 秒間の継続流入となる。そこで、対象空間全体の密度の最大値は約 1.7 人/m² である。(図 7)

(3) パフォーマンス評価のためのシミュレーション

特に駅構内でよく見られる電車の到着などによる群集の集中的流入と流入停止の繰り返し現象の再現を通じて、内部総人数の変化および各局部計測区域の密度変化特徴について分析する。シミュレーションを群集の流れ込み段階 (流入段階) と流れ込み停止段階 (流出段階) の二段階に分ける。また、乗り場側は (2) よりも厳しい同時流入を設定している。また、流入段階は (1) の電車

到着による流入時間と同じで 20 秒間の継続流入とする。

(4) スポット内の総人数変化

滞留者数の変化(図 8)は流動係数が高いほど、急激になり、流入時間にはほぼ比例し、流入終了時刻では全体の密度の最大値がくることが確認できた。ケース 1 とケース 2 では各流入口での流動係数が 1.5 人/m・s でも一方向流であるため、流出時間には影響がなかった。東西通路では対向流になる場合でも、各流入口での流動係数が 0.75 人/m・s のケース 4 では、流出時間には影響がなかった。各流入口での流入係数が 1.5 人/m・s のケース 5 では、流出時間がケース 4 の 2 倍以上に時間がかかった。ケース 2 の目的地設定を OD 確率設定にしたとケース 3 では、対向流が生じることで、流出時間が 2 倍程度になる。ケース 5 以外の全体密度は 3 人/m²を超えなかった。

(5) スポット内の局部密度の分布

各ケースにおいて、各測定区域で密度を表すために、最大密度測定値・密度測定値の平均値とモデル空間内に滞留者数最大時の測定値を表 5 に示した。流動係数と OD 確率の違いは密度の違いにつながる事が分かった。

各ケースにおいて、すべての場所で、平均値は 3.0 人/m²を超えなかったことから、電車の乗り換えエリアのような連続流入ではないところが、局部空間の密度の平均値は混雑状態を表せないことが分かった。

全体の密度が 3 人/m²を越えなくても、局部密度が 3 人/m²を超える場合がある。全体密度が 3 人/m²を超えた場合は、ケース 5 のように、スポット内の局部空間の密度は 7 人/m²程度まで跳ね上がる。9 人/m²以上になるところもある。

5. 結論

本研究はスポット・リンク型モデルの改良のために、特徴的な空間スポットを抽出し、移動距離・スポット内の密度およびスポット間の流動係数の三つの条件についてスポット・リック型モデルの群集歩行の表現パフォーマンスを評価を行った。主な問題点を以下にまとめる。

1. スポット内の距離の近似方法の改良。
2. 全体の密度が 3 人/m²を越えなくても、局部密度が 3 人/m²を超える場合があるため、 $v-\rho$ 関係式による歩行表現の改良。
3. ケース 5 のような特殊な条件では、スポット全体の密度が 20 秒で 3 人/m²を超える危険な状態への対応。

謝辞

本研究は構造計画研究所(株)と東京工業大学知能情報システム出口研究室のソフトウェアの無償提供をいただいたことについて、深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 建設技術研究所 「名古屋駅前滞留者支援対策調査研究業務」報告書 平成 14 年度 pp.80-123
- 2) 崔 青林、谷口 仁士、兼田 敏之、東海地震注意情報発令時におけるターミナル駅乗換え通路の群集シミュレーション、地域安全学会論文集、No.10 2008.11 pp.153-159
- 3) Qing-Lin CUI, Manabu ICHIKAWA, Toshiyuki KANEDA and Hiroshi DEGUCHI, Large Scale Crowd Simulation of Terminal Station Area when Tokai

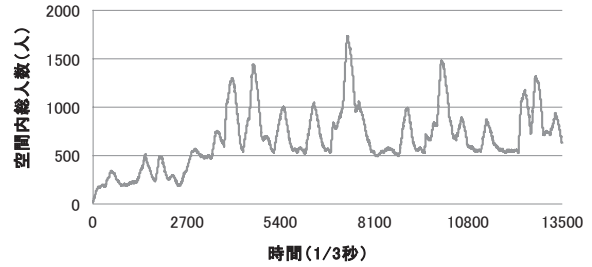


図 7: 注意情報を想定した対象空間の総人数の変化

表 4: ケースの設定

ケース	発生交通量			
	改札口から		乗り場から	
	流動係数 (人/m・秒)	目的地設定	流動係数 (人/m・秒)	目的地設定
1	1.5	OD確率	0	—
2	0	—	1.5	改札口
3	0	—	1.5	OD確率
4	0.75	OD確率	0.75	OD確率
5	1.5	OD確率	1.5	OD確率

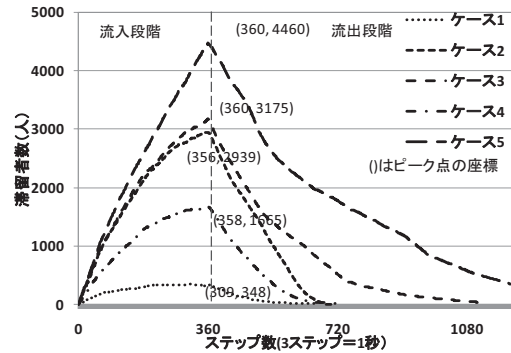


図 8: シミュレーション結果

表 5: 内部計測スポットの計測結果

測定区域	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
ケース1	最大値	1.9	1.2	1.3	1.3	0.9	1.0	1.2	0.9	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	
	平均値	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
	測定値*	1.6	0.6	1.0	0.5	0.2	0.2	1.0	0.6	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
ケース2	最大値	5.3	3.7	6.0	6.0	6.3	6.0	6.0	6.2	6.0	5.2	6.3	4.0	2.6	4.7	1.3	0.8	3.3
	平均値	2.6	1.9	2.8	2.7	3.0	2.6	2.5	2.8	2.2	1.8	2.5	1.3	0.8	1.9	0.3	0.1	1.3
	測定値*	4.3	3.3	4.9	5.0	6.2	4.3	4.3	6.0	4.5	4.0	6.1	3.3	1.6	3.7	0.2	0.5	2.7
ケース3	最大値	4.4	3.4	5.3	5.3	4.3	5.3	4.5	4.9	5.5	4.9	5.7	5.7	2.8	4.7	1.6	0.9	3.0
	平均値	1.7	1.3	1.9	1.9	1.7	1.7	2.0	1.9	1.5	1.7	2.0	1.4	0.8	1.5	0.3	0.1	1.0
	測定値*	3.5	3.3	4.7	3.7	3.6	4.0	4.1	3.6	2.6	4.0	5.1	2.8	2.4	3.1	0.9	0.2	2.3
ケース4	最大値	4.6	2.7	3.3	3.9	3.2	3.2	4.3	3.7	2.9	2.7	3.5	1.5	1.1	2.6	0.7	0.5	2.0
	平均値	1.7	1.2	1.4	1.4	1.2	1.1	1.6	1.5	0.8	0.9	1.3	0.4	0.3	1.0	0.1	0.1	0.6
	測定値*	4.3	1.5	3.1	2.6	1.9	2.3	3.5	2.6	2.0	2.0	2.9	0.8	0.5	1.6	0.3	0.1	0.9
ケース5	最大値	6.0	4.3	6.7	6.9	7.3	6.4	9.3	9.7	6.5	7.7	8.4	5.8	3.5	5.0	1.6	1.2	3.1
	平均値	1.6	0.9	1.6	1.5	1.6	1.2	2.5	2.0	1.8	1.5	1.5	1.0	0.6	0.9	0.3	0.1	0.6
	測定値*	5.2	4.3	6.6	6.9	6.8	5.1	7.2	9.3	6.0	4.7	6.7	3.8	2.7	3.7	0.9	0.5	2.4

*: 空間内滞留者数が最も多い時の密度測定値。

(単位: 人/m²)

3.0未満

3.0以上5.0未満

5.0以上7.0未満

7.0以上9.0未満

9.0以上

Earthquake Advisory Information is Announced Officially. The Sixth International Workshop on Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems. (AESCS2009) November 2009. pp. 44-53

4) Qing-Lin CUI, Manabu ICHIKAWA, Toshiyuki KANEDA and Hiroshi DEGUCHI, A Dynamic Simulation on Crowd Congestion in Large-Scale Terminal Station Complex in an Official Announcement Advisory Information. The 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. (PED 2010) March 8-10, 2010. pp.47