

歩行者交通流におけるエントロピー増大傾向の検証*

A verification of the pedestrian's property of increasing the entropy*

谷上正晃**・吉井稔雄***

By Masaaki TANIGAMI**・Toshio YOSHII***

1. はじめに

日本では、1960年代中頃にモータリゼーションが急速に進行し、広く自動車が普及した¹⁾。自動車の普及に伴って交通渋滞が発生し、騒音・振動に加え、自動車からの排出ガスは温暖化や酸性雨などの環境問題を引き起こした。さらに、多くの人々が自動車で郊外の大型ショッピングセンターに足を運ぶようになり、中心市街地の賑わいが低下すると社会現象を引き起こしている。そこで、自動車優先の社会から歩行者を優先した社会への転換に目が向けられ、2001年7月に多くの被害者をもたらした明石歩道橋事故を契機に、安全・快適な歩行空間の確保に注目が集まるようになり、歩行空間を整備するための計画を立案する手段として歩行者交通流解析が重要性を増している。自動車と比較して、車線を持たない歩行者は、2次元空間において多様な挙動をとり得る。そのため、個々の歩行者の動きから創発される歩行者交通流もまた多様となる。例えば、横断歩行のような対面交通において、高密度状況下で生じることが観測されている歩行者の集団化現象²⁾は歩行者交通流に特徴的な現象である。歩行者の交通流解析では、個々の歩行者挙動をモデル化し、シミュレーション^{3)4)他}を用いた解析が行われている。これらの解析では、歩行者は、例えば周辺に位置する他の歩行者や障害物の影響を受けて移動方向を決定しているが、多数の歩行者が交錯する交通流内においては、快適な歩行を実現するために、周辺に位置する歩行者だけでなくより広範なエリアの歩行者を考慮している可能性があると考えられる。

そこで本研究では、歩行者が個々の歩行者の挙動の総体である交通流全体の状態から強い影響を受けて随時移動方向を決定していると仮定した。この交通流全体の状態を歩行エリア内での個々の歩行者の分布形状から読み取り、分布の偏在度を観測するための指標として情報理論で用いられるエントロピー指標を用いて、仮定の検証

*キーワード：歩行者・自転車交通計画、道路計画

**学生員，京都大学大学院都市社会工学専攻

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1-2，
TEL075-383-3242，FAX075-383-3241)

***正会員，工博，京都大学都市社会工学専攻 准教授

を行う。

2. エントロピーを用いた歩行者交通流解析

2.1 仮説の指定

2.1.1 歩行者交通流におけるエントロピーの定義

本研究では、情報理論におけるエントロピー量を用いて歩行者交通流におけるエントロピーを以下にて定義する。

エントロピーは予め設定したエリア単位で算定する。最初にエントロピーを算定するエリアを設定し、設定したエリアを同じ大きさを持つ複数のメッシュに分割する(図1)。このとき、以下の値Sを歩行者交通流におけるエントロピーと定義する。

$$S = - \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N} \log_2 \frac{n_k}{N} \quad (1)$$

m：メッシュ数

N：設定エリア内の全歩行者数

n_k：k番目のメッシュ内に存在する歩行者数

なお、上記エントロピーは、エリア内の歩行者の分布が偏在していると小さな値をとる。

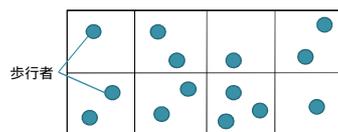


図1 測定エリアを8つのメッシュに区切った例

2.1.2 仮説の指定

2.1.1で定義した歩行者交通流におけるエントロピーを用いて以下の仮説を指定する。

仮説) 歩行者は、歩行者交通流全体のエントロピーが増大する方向に随時進路変更する性向を持つ。

つまり、歩行者はエリア内の全歩行者の分布が均一になるよう移動方向を随時修正していると仮定する。

2.2 歩行者交通流におけるエントロピー計算法

2.2.1 慣性位置と実現位置

歩行者は、一般に目的地を持って移動していることから、常にエントロピーが増大する方向に移動するとは限

らない．そこで本稿では，以下で述べる慣性位置への移動が希望方向，つまり目的地への移動を表現していると仮定し，希望方向への移動という要因を取り除いてエントロピー変化を解析する．

図2に示すように，ある時刻 t において，歩行者 i が x - y 平面内の座標

$$i(t) = (x_i(t), y_i(t)) \quad (2)$$

に位置するとき，同瞬間の速度ベクトルを保持したまま Δt 秒間移動すると，

$$\begin{aligned} \hat{i}(t + \Delta t) &= (\hat{x}_i(t + \Delta t), \hat{y}_i(t + \Delta t)) \\ &= (x_i(t) + \Delta t \cdot \&_x(t), y_i(t) + \Delta t \cdot \&_y(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

へ移動する．ただし，

$$\&_x(t) = \frac{dx_i(t)}{dt}, \&_y(t) = \frac{dy_i(t)}{dt} \quad (4)$$

この位置 $\hat{i}(t + \Delta t)$ を慣性位置， Δt を経過時間と定義する．

一方で，同経過時間 Δt 秒後に実際に位置した座標

$$i(t + \Delta t) = (x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t)) \quad (5)$$

を実現位置と定義する．

ただし，慣性位置を求めるにあたり，時刻 t における歩行者の速度ベクトルを

$$\&(t) = \frac{(t) - (t - dt)}{dt} \quad (6)$$

として算定する．

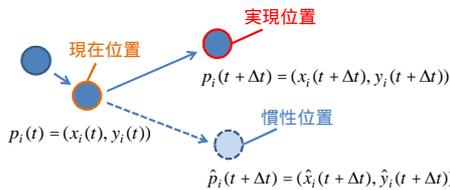


図2 歩行者の現在位置・慣性位置・実現位置

2.2.2 人体円を考慮したエントロピー計算

先行研究⁵⁾では，歩行者は位置座標のみを持った点として取り扱った．対する本研究では，歩行者を面積を持った円として扱うことで，メッシュにまたがる歩行者のエントロピーをより連続的に計算することを試みた．すなわち，図3のように，複数のメッシュにまたがって歩行者が存在する場合は，それぞれのメッシュに存在する人体円面積の人体円面積全体に対する割合をそれぞれのメッシュに振り分けた．なお，人体円の半径 r は30cmとした．このことにより，歩行者の微少な移動に対するエントロピー変化を計算することができる．

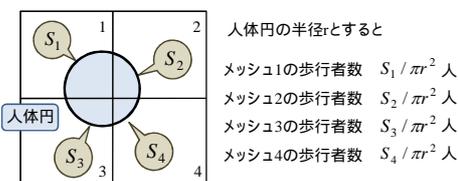


図3 人体円を考慮したエントロピー計算

2.2.3 エントロピー差分の定義

先行研究⁵⁾では，全歩行者が慣性位置に移動した場合と実現位置に移動した場合のエントロピー変化量を計算することにより，歩行者交通流全体としてのエントロピー差分を求めている．対する本研究では，歩行者1人の差分に着目し，次の瞬間に他の歩行者が移動する場所に，1) 単純予測ケース 2) 正確予測ケースの2つのケースを想定してエントロピー差分を計算した．以下，エントロピー変化の影響を調べる対象となる歩行者を対象歩行者と呼ぶ．

1) 単純予測ケース

対象歩行者以外の全歩行者は慣性位置に移動すると仮定し，対象歩行者が実現位置に移動した場合と慣性位置に移動した場合の交通流全体のエントロピー変化量を計算(図4)．

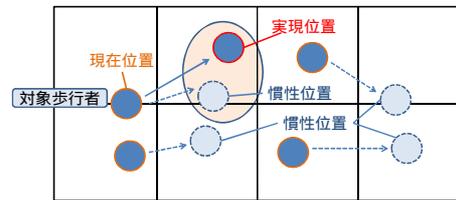


図4 単純予測ケース

2) 正確予測ケース

対象歩行者以外の全歩行者は実現位置に移動すると仮定し，対象歩行者が実現位置に移動した場合と慣性位置に移動した場合の交通流全体のエントロピーの変化量を計算(図5)．

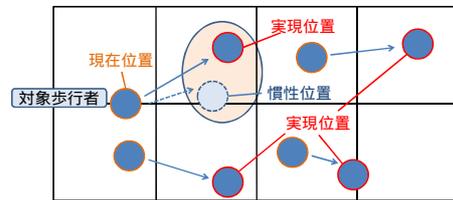


図5 正確予測ケース

単純予測ケースと正確予測ケースそれぞれについて，対象歩行者が実現位置に移動した場合の歩行者交通流全体のエントロピーと慣性位置に移動した場合の歩行者交通流全体のエントロピーの差分に着目し，実現位置によるエントロピーから慣性位置によるエントロピーを差し引いた値(式(7))をエントロピー差分と定義する．

$$D_i(t + \Delta t) = S(t + \Delta t | P_i(t + \Delta t)) - \hat{S}(t + \Delta t | \hat{P}_i(t + \Delta t)) \quad (7)$$

$D_i(t)$: 時刻 t におけるエントロピー差分

$S(t | P_i(t))$: 時刻 t の対象歩行者実現位置によるエントロピー

$\hat{S}(t | \hat{P}_i(t))$: 時刻 t の対象歩行者慣性位置によるエントロピー

3. 仮説の検証

3.1 歩行者流動実験

エントロピーを用いた歩行者交通流解析を行うにあた

っては、以下による歩行者流動実験データを用いた。

実験⁶⁾は、2006年5月23日、東京大学生産技術研究所A棟前で行われた。赤白の帽子をかぶった被験者93名(うち女性17名、大半は20～30代前半の学生)に、通学・通勤時の状況を想定して幅3m、長さ6mの歩行空間(図6)を歩くように要請した。用いるデータは、全被験者が同一方向に進行するケース(一方通行実験、図7左) 歩行区間の両側から被験者が進入し、それぞれ対向して進行するケース(対面通行実験、図7右)の2ケースである。被験者の位置は、区間上方より撮影したビデオ画像(図7)から0.2秒ごとに読み取った。

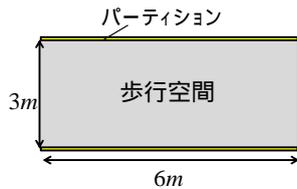


図6 歩行空間



図7 ビデオ画像(左：一方通行実験，右：対面通行実験)

3.2 実験データを用いたエントロピー計算方法

エントロピーの計算を行うに当たり、メッシュサイズと経過時間を決定する必要がある。

メッシュサイズに関して、先行研究⁹⁾において、異なるメッシュサイズで全歩行者が実現位置に移動した場合と慣性位置に移動した場合のエントロピー差分を計算し、幅1m、長さ1mのメッシュサイズでエントロピー差分の平均値が最大値になることを示した。そこで、メッシュサイズは幅1m、長さ1mとする。

経過時間に関して、異なる経過時間でエントロピー差分を計算し、経過時間を0.8秒以上に設定した場合にエントロピー差分が有効に計算されることを示した。そこで、本研究では経過時間を0.8秒として計算を行う。

一方通行実験・対面通行実験それぞれについて2.2.3で述べた単純予測ケース、正確予測ケースそれぞれについてエントロピー差分を計算した。なお対面通行実験においては、歩行者交通流全体のエントロピー差分と、方向別交通流のエントロピー差分をそれぞれ計算した。

3.3 計算結果

計算対象時間は、一人目の歩行者が図8に示す5m×3mのエントロピー計算エリアから流出してから、最後の歩行者が計算エリアに流入するまでの時間とした。

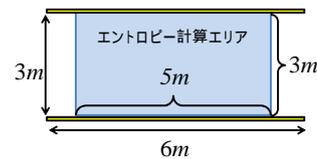


図8 エントロピー計算エリア

速度ベクトルを求める際に用いるパラメータ dt は、1フレーム分の時間(0.2秒)として計算を行った。

・一方通行実験

図9に、一方通行実験における歩行者交通流全体のエントロピー量の時間変化を示す。図よりエントロピーは常に増大しているわけではなく、時間によって変動していることが分かる。この点をふまえて、2.2で示した慣性位置・実現位置を用いて個々の歩行者が、エントロピーが増大する方向に移動する傾向があることを検証する。

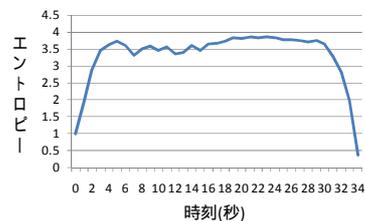


図9 エントロピー量の時間変化

表1にケース別エントロピー差分の平均と標準偏差を、図10・図11に頻度分布を示す。エントロピー差分の計算にあたっては、計算対象時間内にエントロピー計算エリアに存在する全歩行者について、両ケース別にエントロピー差分を計算し、単純平均をとったものを平均としている。グラフの横軸はエントロピー差分値の区間を表し、縦軸はそれぞれの範囲内におけるエントロピー差分の相対度数を表している。

エントロピー差分の値は、単純予測ケース、正確予測ケースでほぼ同程度であった。また、図10、図11より、広い範囲に散らばっていることが読み取れる。“平均が0である”との帰無仮説を措定し検定統計量 $t = \frac{\mu}{S/\sqrt{n-1}}$ を

用いて、危険率1%で片側検定を行った結果、両ケースともに平均値が0であるとはいえないとの結果が得られた。すなわち、両ケース共にエントロピー差分の期待値が正值をとることが統計的に支持された。すなわち、歩行者がエントロピーの増大する方向に進路変更する性向を持つとの仮説を支持する結果が得られた。

表1 一方通行実験のエントロピー差分

	μ		t値	n
単純予測ケース	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$19 \cdot 10^{-3}$	6.71**	1347
正確予測ケース	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$	6.11**	1347

(μ : 標本平均, S : 標本標準偏差, n : サンプル数, **は1%有意)

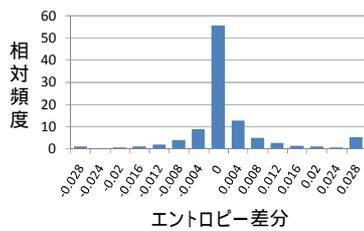


図10 一方通行・単純予測ケースのエントロピー差分

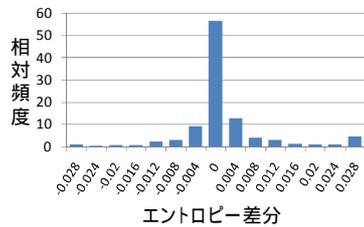


図11 一方通行・正確予測ケースのエントロピー差分

・対面通行実験

表2にケース別エントロピー差分値の平均を、図12・図13に方向1, 方向2それぞれのエントロピー差分の頻度分布を示す。ただし、エントロピー計算エリアに右・左から流入する歩行者群をそれぞれ方向1・方向2と表す。

対面通行実験のケースでは、単純予測、正確予測の両ケース間でエントロピー差分値に若干の差異が認められた。さらに、「平均が0である」との仮説検定を行った結果、全歩行者、方向1は両ケースともに平均値が正值であるとの結果が得られた。対して、方向2に関しては、統計的に有意な値を得ることができなかった。

表2 対面通行実験のエントロピー差分

		μ	σ	t値	n
単純予測ケース	全歩行者	0.51×10^{-3}	7.9×10^{-3}	2.99**	2163
	方向1	3.1×10^{-3}	16×10^{-3}	6.45**	1099
	方向2	0.21×10^{-3}	21×10^{-3}	0.32	1057
正確予測ケース	全歩行者	0.62×10^{-3}	7.7×10^{-3}	3.76**	2163
	方向1	3.4×10^{-3}	16×10^{-3}	6.99**	1099
	方向2	-0.14×10^{-3}	22×10^{-3}	-0.21	1057

(μ : 標本平均, σ : 標本標準偏差, n: サンプル数, **は1%有意)

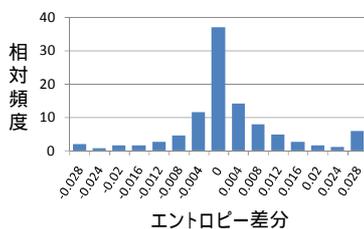


図12 対面通行・方向1・単純予測ケースのエントロピー差分

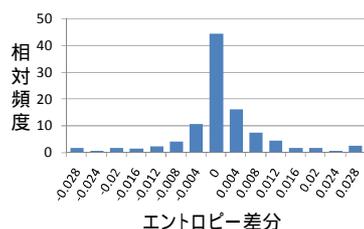


図13 対面通行・方向2・単純予測ケースのエントロピー差分

3.4 結果の考察

3.3の計算結果から、一方通行の歩行者流において、エントロピーの増大する方向に力を受けて移動するとの歩行者性向があることが示された。しかしながら、単純予測ケースと正確予測ケースの差異が小さかったことから、歩行者が他の歩行者の動きをどのように捉えて移動方向を決定しているかについては今後の研究課題だが、いずれのケースでも、エントロピーが増大する方向に力を受けて移動する傾向があることが示された。ただし対面通行においては、全歩行者と方向1ではエントロピー差分が有意に正值であるとの結果が得られたのに対し、方向2では有意な差が得られなかった。この理由に関しても今後の研究課題であるが、対面交通実験では、歩行者がほぼ停止する状況が出現しており、歩行が大きく制約される場合にはエントロピーによる影響が歩行の制約との比較上小さくなる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究による解析結果から、歩行者には交通流全体のエントロピーが増大する方向に進路変更する傾向があることが示された。本研究による解析では、歩行者の希望する移動方向に瞬間の進行方向を仮定したが、今後は、希望方向速度ベクトルを考慮した上で、エントロピーが歩行者の進路に与える影響について分析を行う予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、東京大学生産技術研究所桑原研究室より貴重な歩行者流動実験データを頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 天野光三, 中川大 編: 都市の交通を考える, 技報堂出版, 1992.
- 2) 西坂秀博: 歩道幅員に関する研究, 交通工学vol.10, No.5, pp.23-34, 1975.
- 3) Helbing, D. et al.; "Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations", Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.21-58, 2002
- 4) 浅野美帆, 井料隆雅, 桑原雅夫: 交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル, 交通工学, vol.43, No.4, pp.80-89, 2008.
- 5) 森田勝也, 吉井稔雄, 北村隆一: エントロピーを用いた歩行者交通流解析, 交通工学投稿中
- 6) 浅野美帆, 桑原雅夫, 田中伸治: 混雑時におけるマイクロ歩行者流動モデルの構築, 第5回ITS シンポジウム, pp.419-424, 2006.