

# 歩行空間評価を目指した歩行加速度の性状把握と 歩きやすさとの連関に関する基礎的研究

山田昇吾

## Study on Walking Acceleration Characteristics and Its Relationship with Psychological Ease of Walking for Evaluating Pedestrian Space

Shogo Yamada

### Abstract

In urban stations and commercial complexes, it is becoming difficult to ensure the ease of walking because of high density and complicated flow lines. In the flow planning of buildings, crowd density and the flow coefficient are used as indicators. Using these indicators, the crowd flow condition can be observed but the walking condition of each pedestrian cannot be evaluated. Therefore, in this study, to enable a safe and unconstrained congestion management of large-scale complex facilities/customer spaces, we analyze walking conditions by focusing on the walking acceleration. The relationship between walking acceleration and psychological ease of walking is clarified. Subsequently, a new graphic representation to visualize walking acceleration is created, and it is shown that the ease of walking can be evaluated by the strength and direction of the walking acceleration vector.

### 概要

都市部の駅や商業施設において高密度化や動線の複雑化を一因として歩きやすさを担保することが困難となってきている。従前の動線計画では群集密度や歩行速度が指標に用いられるが、これらは歩行者が交錯するような状況における詳細な回避挙動や、回避によって生じる物理的な身体への負荷を評価できない。そこで本研究は、歩行者の回避挙動を歩行加速度に着目して分析し、心理的歩きやすさとの関連を明らかにすることを目的とする。本研究ではまず、モーションキャプチャ施設内で交錯再現実験を行い、同時に歩きやすさに関するアンケート調査を行った。取得した被験者の位置座標から歩行加速度を算出し、アンケート調査による歩きやすさ(心理値)と歩行加速度をもとにした歩きやすさ指標(物理値)との相関分析を行った。結果、歩行加速度を可視化する新たな図表現を作成し、歩きやすさを歩行加速度ベクトルの大きさと方向で評価できる可能性を示した。

### 1. はじめに

日本は都市部への人口一極集中化が進んでおり、駅や複合商業施設などの人が集まる歩行空間は、高密度化や動線の複雑化を一因として歩きやすさを担保することが難しくなってきている。歩行空間の評価は、従来、J.フルーインが提唱したサービス水準<sup>1)</sup>に代表されるように密度や歩行速度(速度ベクトルを含む)といった指標で評価されてきた。しかし、密度はある空間内の人数で評価しており、歩行者の移動軌跡に着目していないため交差状況の評価できない。歩行速度は歩行者一人一人の移動軌跡に着目しているが、従来の歩行速度評価の多くは平均歩行速度の大きさや方向のみで評価しており、歩行速度の変化(=歩行加速度)といった歩行者の詳細な挙動は考慮されていない。ここで、運動方程式  $F = ma$  より、歩行加速度  $a$  は歩行により生じる力  $F$  と密接な関係にある。歩行者が感じる歩きやすさの要因は複合的ではあるものの、その要因の一つに移動軌跡を変更する際に生じる力が挙げられると筆者は考える。

一方で、近年の計測技術等の進歩により、実験空間においては1/100sのオーダーで歩行者の位置座標の計測が可能になった。これにより、歩行速度より一段階詳細な歩行加速度の計測が可能と考えられる。歩行空間以外の分野(例えば、エレベータや自動車)においては加速度や躍度(単位時間あたりの加速度の変化率)によって機械制御がされており、こうした値の制御が乗り心地を左右するとされている。歩行空間においても歩行加速度に着目することでより実態に近い歩きやすさの評価が可能と考えられる。

歩行者の移動軌跡に着目した既往研究では高柳ら<sup>2)</sup>が歩行者間距離の時間変化に着目した混雑評価を試みている。また、山本ら<sup>3)</sup>は、交差時の歩行者の速度ベクトルの内積を用いて歩きにくさを評価している。しかしこれらは先に述べた歩行挙動の変化による物理的負荷の評価に踏み込むには至っていない。よって本研究は、歩きやすさの物理的指標として加速度に着目するとともに、それと心理的指標の関連を明らかにすることを目的とする。本研究により、歩行加速度という物理的指標で歩き

やすさを評価できれば、将来的に人流シミュレーションを用いた、歩きやすさを考慮した歩行空間設計が可能となる。

本報では初めに歩行加速度を取得するための歩行実験について述べる。次に実験結果から歩行により生じる加速度(物理的指標)の分析を行う。また歩きやすさ(心理指標)に関するアンケート調査も行い、結果より両指標の関係を評価した。

## 2. 交錯流再現実験

### 2.1 実験概要

交錯時の歩行者の加速度データを取得するために、交錯流を実験空間に再現した。加速度データの取得には加速度計を被験者に装着して計る方法と、何らかの方法で取得した位置座標データから加速度を算出する方法がある。前者の方法では加速度データを直接取得できるため簡便であり、この方法で中村ら<sup>4)</sup>は鉄道駅構内における歩行挙動の把握を試みている。但し、歩行者に加速度計を付けられない実空間調査には向いていない。一方後者は、位置座標データから加速度を算出するため、補正等の手間がかかる。しかし、近年急速に高精度化が進んでいるビデオカメラやレーザーセンサー等を用いた計測技術により、非接触でデータが取得できるため、実空間でのデータ取得に向いている。そこで本研究では実空間調査を見越して、位置座標データから加速度を算出する方法を採用する。

### 2.2 計測概要

本実験は東京都市大学総合研究所にて2019年11月18日に実施した。天井に吊るした計30台のモーションセンサーカメラ(床面高さ2614mm)により、被験者の頭上(底付きキャップ)に取り付けられた複数の反射マーカをトラッキングして、マーカ重心位置を歩行者の位置座標データとして取得する(Fig. 1)。予め各被験者のマーカの配置と重心位置を登録しているため、マーカの一部が計測できていなくても、3点のマーカが計測できていれば元の重心位置が計測可能となる。取得間隔は1/120s、計測誤差は±1mmである。実験の様子をPhoto 1に示す。

### 2.3 実験条件と実験の流れ

**2.3.1 実験条件** Table 1に交錯流再現実験の概要を示す。本実験は、駅や複合商業施設などの雑踏空間を想定して様々な歩行軌跡を得るために、2つの低密度下における直交型、斜交型の歩行パターンと、中密度、高密度下における直交型の歩行パターン、そして自由歩行の計7つの歩行パターンを実施した。なお自由歩行は計測範囲長手方向の直線を被験者単独で歩行してもらい計測した。本実験で定めた密度は各被験者が直線移動した場合に生じる交差領域の密度であり、J.フルーインのサービ

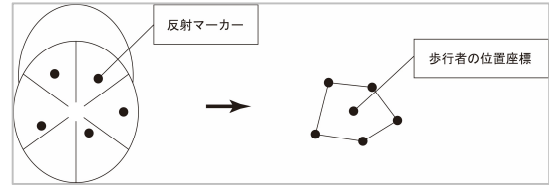
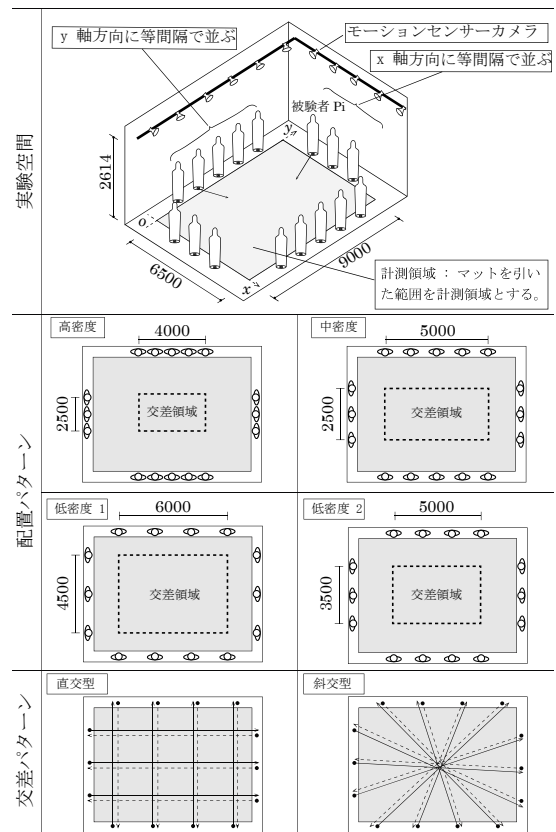


Fig. 1 反射マーカによる歩行者位置座標の取得  
Acquisition of Pedestrian Position Coordinates using Reflective Markers



Photo 1 モーションセンサーによる交錯流再現実験  
Avoidance Behavior Experiment with Motion Sensor

Table 1 交錯流再現実験の概要  
Conceptual Diagram of Avoidance Behavior Experiment



ス水準を元に低～高密度を定義した。また20代男女の計16名を被験者とした。被験者の概要をTable 2の左に示す。

**2.3.2 実験の流れ** 実験の流れをTable 3に示す。まず被験者を計測範囲四方の所定の位置に配置する。試行開始と同時に被験者は所定の終了位置まで一斉に歩行する。この時被験者には「通勤または通学時に駅の通路を移動しているイメージで、自然に回避をしてください。」と教示をした。また各試行終了直後に歩きやすさに関するアンケート調査を行った。詳細については4章にて説明をする。以上の試行をTable 2の右に示す通り、計40回行った。

**3. 歩行加速度の分析**

**3.1 加速度の算出**

得られた位置座標から加速度を算出した。但しこの時、データの特徴を明瞭にするため、位置座標、速度、加速度の各処理段階で1秒間の移動平均処理を施した。また、得られた絶対座標系の加速度ベクトル( $\alpha_x, \alpha_y$ )を被験者の進行方向をv軸、進行方向と垂直方向をu軸とした相対座標系の加速度ベクトル( $\alpha_u, \alpha_v$ )に座標変換する(以後、相対加速度と呼ぶ)。単独での自由歩行時と回避行動時それぞれの加速度の絶対値の時系列グラフの1例をFig. 2に示す。なお以下では加速度の絶対値を加速度と、向きと大きさを考慮した場合は加速度ベクトルと表す。

**3.2 分析範囲の定義**

Fig. 2に示した通り、加速度は歩行開始時と終了時に大きくなる。その間で自由歩行時には定常状態 $0[m/s^2]$ に近い値となり、回避行動時には回避挙動が加速度の変化として現れる。そこで、回避行動と無関係な開始・終了時の加速度上昇を分析範囲外とするために、開始時加速度上昇の直後及び終了時加速度上昇の直前の極小値を基点としてその範囲内を分析範囲と定めた。

**3.3 歩行加速度分析を目的とした新たなグラフ表現**

**3.3.1 軌跡-加速度ベクトル図** 歩行による加速度の遷移を視覚的に把握するため、軌跡-加速度ベクトル図を作成した(Fig. 3)。図中の水色の線が歩行者の歩行軌跡、赤矢印が加速度ベクトル、白丸が0.5s毎の位置座標、黒丸が4.4節で説明する区間を分ける基点をそれぞれ示している。軌跡-加速度ベクトル図は加速度の状態を軌跡と合わせ時系列に確認できる特徴を持つ。Fig. 3の例では歩行軌跡は一見すると直線に近く見えるが、加速度ベクトルは様々な方向に変化しており、複雑な挙動をしていることが分かる。このように通常の歩行軌跡(=歩行速度)を示した図より回避挙動を把握しやすくなる。

**3.3.2 相対加速度極座標図** 相対加速度ベクトル( $\alpha_u, \alpha_v$ )を用いて、相対加速度極座標図を作成した。1例をFig. 4左に、同条件同被験者の軌跡-加速度ベクトル図をFig. 4右に示す。本図は被験者の進行方向に対し加速

Table 2 被験者概要(左)と試行回数(右)

Subject Overview (Left)			and Number of Trial (Right)	
被験者No.	性別	身長[cm]	実験条件 (密度 歩行パターン)	試行回数
P1	女性	160	自由歩行	1回
P2	女性	160	高直交	8回
P3	女性	160	中直交	8回
P4	女性	155	低1直交	4回*
P5	男性	173	低1斜交	8回*
P6	女性	154	低2直交	4回*
P7	女性	150	低2斜交	8回*
P8	女性	162		
P9	男性	176		
P10	男性	174		
P11	男性	167		
P12	男性	172		
P13	男性	169		
P14	男性	179		
P15	男性	177		
P16	男性	168		

\*被験者15, 16は未実施

Table 3 実験の流れ

Trial Flow		
	被験者配置	試行の流れ
試行開始前		指定した歩行開始位置に被験者が移動
試行中		開始位置から指定した終了位置まで一斉に歩行
試行終了後		試行終了後、アンケート記入 次回の試行は現状の位置から開始

\*中密度-直交型の実験を例とする

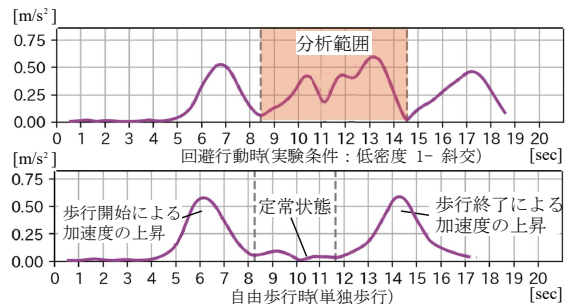


Fig. 2 加速度の絶対値の時系列グラフ例  
Example of Time Series Graph of Absolute Value of Acceleration

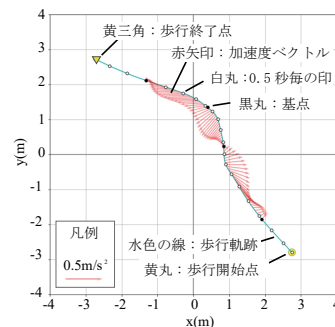


Fig. 3 軌跡-加速度ベクトル図  
Trajectory - Acceleration Vector Diagram

度がどの方向及び大きさで発生しているかを把握できる特徴を持つ。この図は移動個体  $i$  を中心に4つの領域に分かれ、この領域を跨ぐことは加速度方向の正負の反転を意味する。図の例では、計測開始時点で領域3に微弱な加速度が生じており、領域4へと遷移する。図中記号Aの時点で領域4から領域1へと遷移しており、この時、減速から加速へ切り替わる。Bの時点で領域2に入り、右迂回から左迂回に切り替わる。Cの時点で加速から減速へと切り替わる。この様に、図の例では加速度の大きさをあまり変えずにスムーズに迂回にて回避をしているため相対加速度極座標図は綺麗な円となる。一章で示した通り、加速度は力と密接な関係にある。そのため本図を用いて、歩行者にかかる力の遷移を直感的に把握できる点で、歩きやすさの分析において従来の分析方法に比べ優位であるといえる。

### 3.4 極小値による加速度遷移の区分

Fig. 5に加速度遷移の区分の一例を示す。本実験では複数歩行者が存在する雑踏空間を再現している。そのため、回避行動は単一ではなく、いくつかの回避行動が複合して加速度遷移として表れていると考えられる。そこで、加速度の時系列グラフでみられる極小値を基点として区分することで回避行動の区間とした。

区間の意味を理解するため、軌跡-加速度ベクトル図とトラッキングした動画を見比べる(Fig. 6)。区間1では他歩行者との距離はまだ近くないが、先の回避行動を見据えて減速しながら右に移動している。区間2では左に迂回して回避行動をとっている。区間3では回避が終わり加速に転じている。このように極小値で区分することで、各区間で行動の意味が読み取れる。

### 3.5 歩きやすさの物理指標の検討

3.5.1 加速度の大きさに着目した物理指標 加速度を用いた歩きやすさの指標を検討するため、各区間における最大加速度 $\alpha_k$ に着目し、一連の加速度遷移が $n$ 個の区間に分かれるとき、

$$A_s = \sum_{k=1}^n \alpha_k \quad (1)$$

上記の式で算出される値 $A_s$ を歩きやすさの物理指標と定めた。

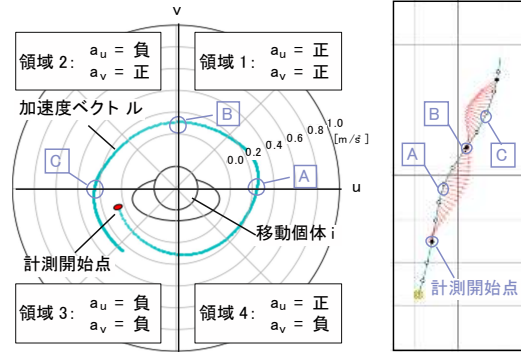


Fig. 4 相対加速度極座標図(左)及び対応する軌跡-加速度ベクトル図(右)  
Polar Diagram of Relative Acceleration (Left) and Trajectory - Acceleration Vector Diagram (Right)

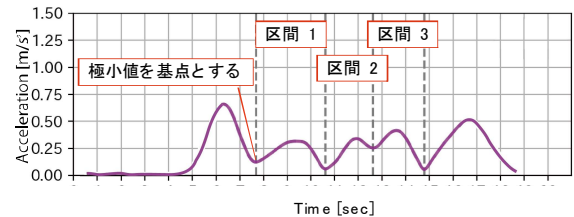


Fig. 5 極小値による加速度遷移の区分  
Classification of Acceleration Transition by Minimum Value

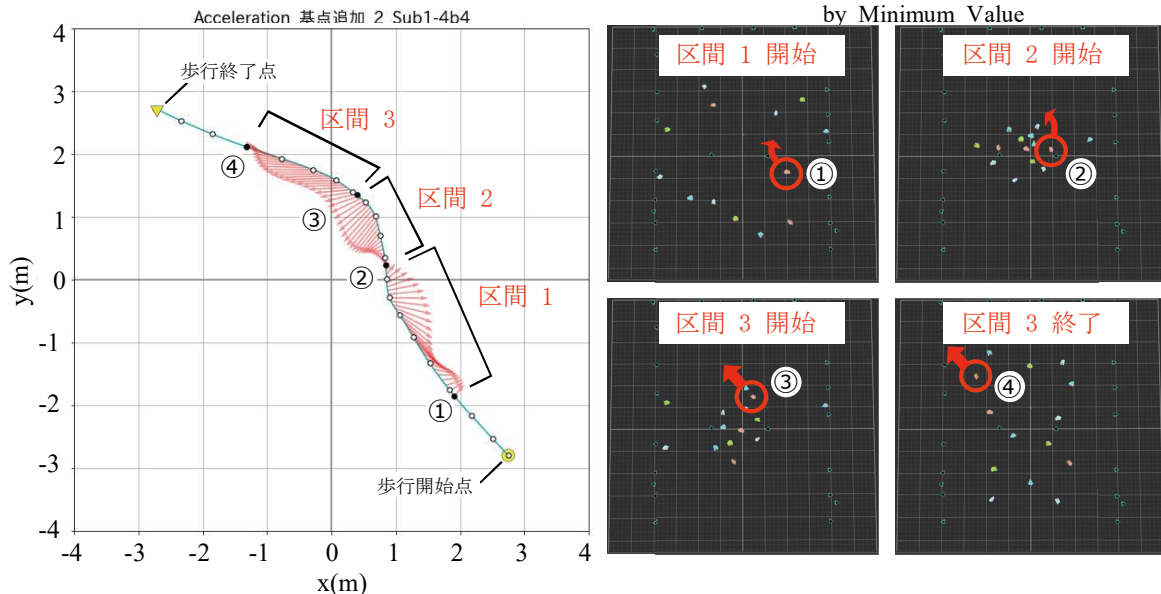


Fig. 6 区間毎の行動の意味  
Meaning of Actions in Each Phase



3.5.2 加速度方向に着目した物理指標 加速度遷移の特徴を定量的な物理値として取得するため、(1)加速度方向の正負の反転が生じた回数 $N_1$ 、(2)相対加速度極座標図における回転方向が反転した回数 $N_2$ を算出した。一例をFig. 7に示す。

#### 4. 加速度と心理的歩きやすさの連関分析

##### 4.1 アンケート調査による歩きやすさ評価

交錯流再現実験で行ったアンケート調査では、各試行における歩きやすさを、自由歩行時を最も歩きやすいとして10段階評価(10が最も歩きやすい評価)とした。全試行におけるアンケート調査結果をFig. 8に示す。被験者ごとに回答のばらつきが大きかったため、データ $X$ に対して下記式に基づき正規化して分析に用いた。ただし、 $x_{max}$ はデータの最大値、 $x_{min}$ はデータの最小値である。

$$Y = \frac{X - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

##### 4.2 物理指標 $A_s, N_1, N_2$ と心理的歩きやすさの相関分析

3章にて定めた物理指標 $A_s$ および、1回の歩行中の最大加速度 $A_{max}$ 、最小速度 $V_{min}$ とアンケートによる心理的歩きやすさについて相関分析を行った。結果をFig. 9およびTable 4に示す。3つの値とも心理的歩きやすさと相関がみられ、最小速度 < 最大加速度 < 物理指標 $A_s$ の順で相関が強く、特に物理指標 $A_s$ は相関係数  $r = -0.7$  と強い負の相関がみられた。また、3つの値とも有意水準5%で有意と判定された。次に物理指標 $N_1, N_2$ と心理的歩きやすさについて相関分析を行った。Fig. 9およびTable 4に示す通り、 $N_1$ では相関係数  $r = -0.52$  と負の相関がみられ、有意水準5%で有意の判定が出たが、 $N_2$ については $p = 0.23$  と有意ではない判定となった。

##### 4.3 心理的歩きやすさに関する加速度遷移の考察

心理的歩きやすさと加速度遷移の関係をみるために、アンケートで各被験者に最も歩きづらいと評価された歩行時の相対加速度極座標図の形状について考察をした。Fig. 10に最低評価(歩きにくい)及び最高評価(歩きやすい)時の形状の例を示す。最低評価時の形状は様々であったものの、共通して複雑なものとなっていた。一方で最高評価時の形状は、シンプルな物が多かった。このことから加速度遷移のふるまいの複雑さが歩きやすさに関係すると推察される。

#### 5. まとめ

本研究では新たな歩行空間歩きやすさ評価法の確立を目指すべく、歩行時の歩行加速度に着目し分析を行い、歩きやすさとの連関について明らかにした。本研究により得られた成果、及び知見を以下に示す。

- 軌跡-加速度ベクトル図、及び相対加速度極座標図を作成し、歩行加速度の可視化を行った。

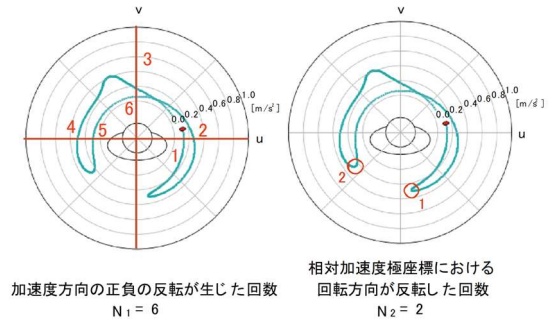


Fig. 7  $N_1, N_2$  の算出例  
Example of Calculating  $N_1$  and  $N_2$

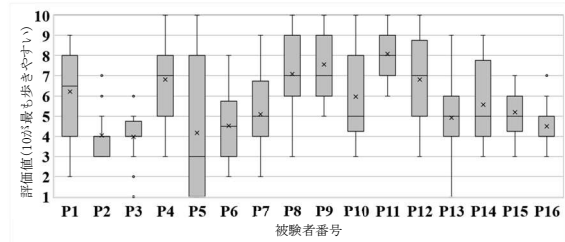


Fig. 8 歩きやすさのアンケート結果  
Questionnaire Results of Well-Tempered Locomotion

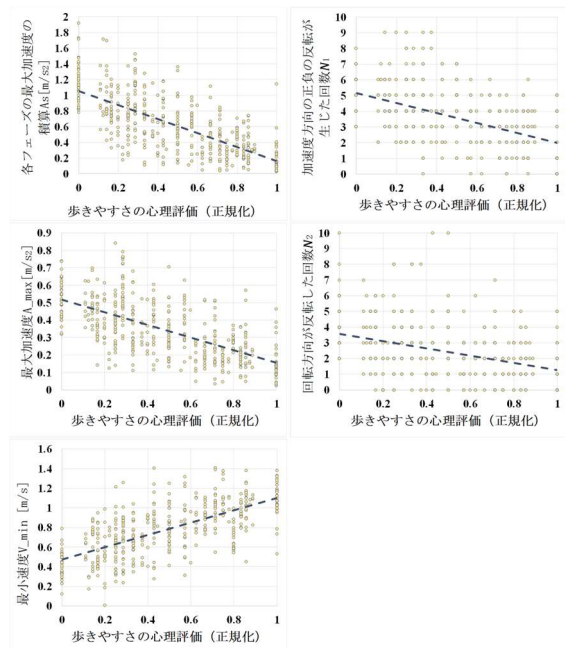


Fig. 9 各物理指標と歩きやすさの相関図  
Correlation diagram between Psychological Ease of Walking and each Physical Index

Table 4 各物理指標と歩きやすさの相関表  
Correlation table between Psychological Ease of Walking and each Physical Index

	$A_s$	$A_{max}$	$V_{min}$	$N_1$	$N_2$
相関係数	-0.701	-0.647	0.605	-0.521	-0.375
p値	0.011	0.023	0.016	0.043	0.229
サンプル数	592	592	592	592	592

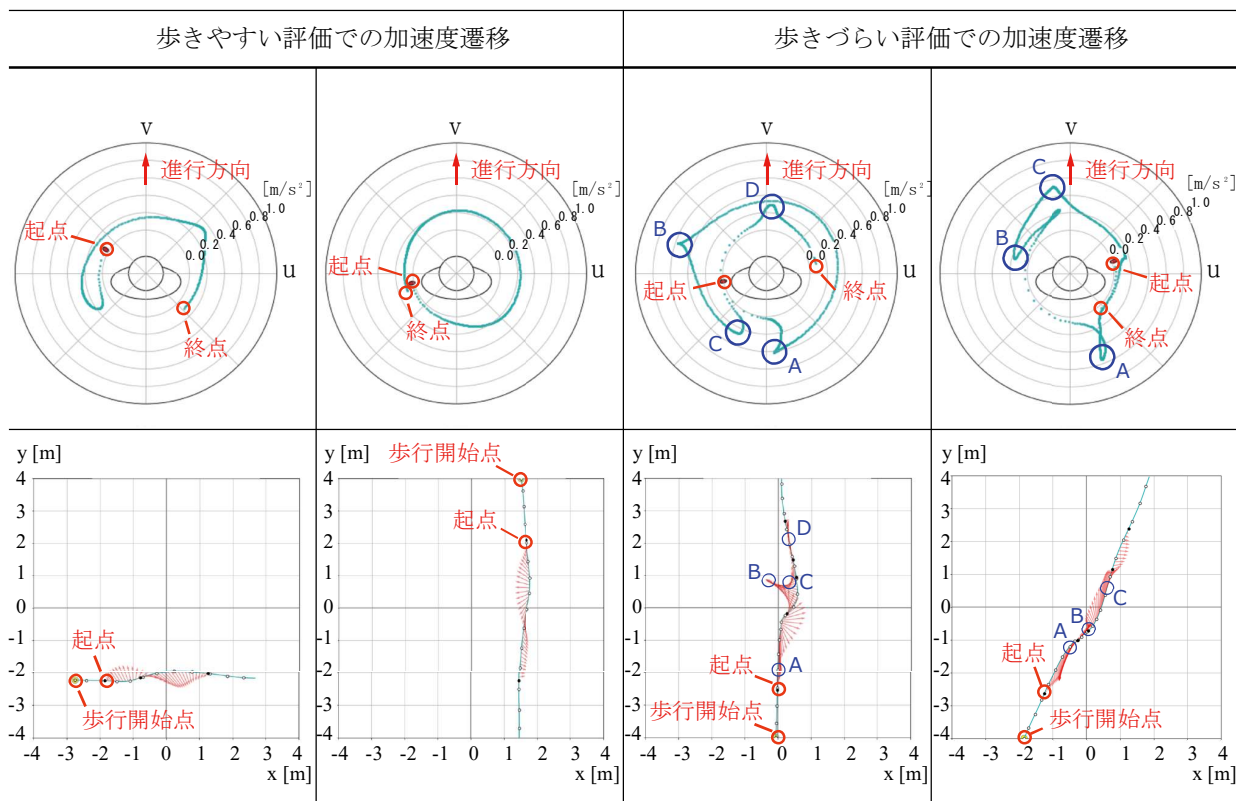


Fig. 10 歩きやすさ低評価と高評価の加速度遷移例

Examples of Acceleration Transitions with Low and High Psychological Ease of Walking Levels

- ・ 歩行加速度を極小値を基点として加速度遷移を区分することにより、加速度を用いた歩行性状の解釈が容易となる。
- ・ 一連の歩行における歩きやすさは加速度遷移の区分数と各区間の最大加速度を用いた値と強い負の相関関係にある。
- ・ 加速度方向の正負の反転が生じた回数と歩きやすさには負の相関関係がある。

本研究により、歩きやすさを歩行加速度ベクトルの大きさと方向で評価できる可能性が示唆された。しかし、本研究では加速度方向の正負や回転をカウントして指標を定めたが、この方法では詳細な加速度遷移は十分に評価に反映されないため、相対加速度極座標図における形状そのものを歩きやすさと紐づけて分類することが課題となる。今後、交差角度や他歩行者との距離と歩行加速度遷移の発生頻度や大きさの変化との連関を明らかにするとともに、歩行加速度による歩きやすさの評価法の構築を目指す。

なお、本研究で行った歩行者実験は東京都市大学倫理審査を経て実施された。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、東京都市大学の高柳英明教授よりご協力および貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) ジョン・J・フルーイン：歩行者の空間，鹿島出版社，東京，1974
- 2) 高柳英明，渡辺仁史：群衆交差流動における歩行領域確保に関する研究-歩行領域モデルを用いた解析-，日本建築学会計画系論文集，No. 549，pp. 185-191，2001
- 3) 山本昌和，石突光隆，青木俊幸：駅における歩きにくさを可視化した旅客流動シミュレーション，鉄道総研報告23(12)，pp. 59-65，2009.12
- 4) 中村泰広，日比野直彦，森地茂：鉄道駅構内における混雑状況と旅客流動に関する研究，土木学会論文集D3(土木計画学)，Vol. 67，No. 5，pp. 705-713，2011