

歩行者の全周異型回避領域の算出とその地域間差異に関する研究

A Study on Clarification of Pedestrian Omnidirectional Avoidance Area and Consideration on interregional Difference between Tokyo Metropolitan Area and Kansai Area

高柳英明*, 木原己人**

Hideaki Takayanagi*, Tatsuto Kihara**

要 旨

本研究は、大規模駅等のラチ外コンコース等で見られる混雑群衆の看取を通じ、全天球動画画像解析により得られた歩行者の全周に渡る異型回避領域の算出法を構築し、既報²⁾にて研究余地としていた関東圏・関西圏での追証データを元に、歩行者の流動性状別と属性別に、各異型回避領域の抽出と、両圏域での地域間差異の明示に至った。具体的には、全天球撮影対応型カメラを用い、群衆内を歩行移動する観測者の頭部位置より撮影した撮影動画画像から、他歩行者間と最接近つまり回避する相対極座標を画像解析により抽出し、移動個体を原点とした全周回避領域を算出した。主要な結果としては、A) 対向流同時では左偏りの「い」型を呈し、B) 直交交流動時では前方偏りの「い」型を、C) 同方向流動では総じて「逆八の字」を呈すること等が明らかになった。また、D) 調査対象地別・性別組み合わせパターン別では、それぞれ特徴的な異型楕円を呈し、特異な拡張・収縮が見られた。

キーワード: 画像解析、歩行者、回避領域、男女別、地域別

Summary

The pedestrian omni-directional avoidance area has been clarified through this study, by using super wide-angle video camera covering 360 degree in one shot. Continuous published paper has shown survey data only of the Kansai area, but this time Tokyo metropolitan area has also been selected as a survey target. So this paper targeted the above two areas, and derived the followings.

- A.) In case of opposite crowd flow the shape of avoidance area becomes “い” shifted to left
- B.) In case of 90 degree of angle of crowd flow the shape of avoidance area becomes “い” shifted forward
- C.) In the same flow avoidance area becomes funnel shape
- D.) Regional and gender differences appeared as detailed heteromorphic shape of avoidance area

Keywords: *Image Analysis, Pedestrian, Omni-directional Avoidance Area, Regional and Gender differences*

1. 研究の背景と目的

近年の市場経済を反映したかたちで、主要都市部での不動産再開発が活発に行われており、益々都市空間の高密度化・高機能複合化が進んでいる。特に大規模ターミナル駅の複合駅ビルでは、鉄道や交通機関の乗降拠点としてだけでなく、オフィスや商業テナント、公共サービス拠点やアミューズメント施設など、多様な施設要素にて、人の集まるアーバンコンプレックスとして再構成されつつある。これに併せて、土地に不慣れな訪日外国人旅行者^{注1)}や、キャリーバッグを携行する歩行者が増加したことなどから、歩行中の接触事故や混雑負荷が増大傾向にあり、歩行群衆の混雑様態も変容しつつあると言える。

一方、上記のような高密度・高機能なスペースの内部空間づくりでは、デジタルサイネージ機器といった、宣伝効果の高いデジタル映像広告の登場により、歩行時の注視力を低下させる視覚刺激に溢れており、安全に互いを避け合い通行する移動個体の回避様態にも、近年特に変容を看取することができる。混雑空間の安

全性担保の観点では、群衆流率・サーヴィス水準の根源的な見直しと、それに沿った歩行空間の整備がまず考えられるが、こうした一元的指標での群衆マネジメント法では、交差時の接触事故等を個別解決することは極めて困難であるとして、筆者らは既報¹⁾において、混雑群衆内での移動個体間の回避行動に対し、1) 交差角度、2) その時の局所群衆密度、3) 歩行領域干渉面積ごとに、特筆すべき4種の類別傾向を見出し、当該歩行領域が、既往研究の通りの、近似的な楕円形では説明がつかないことを示唆した。歩行領域を近似的な楕円と捉えていたのは、群衆流動シミュレーション等にて扱う人間行動モデルの構築において、回避・拮抗領域を速度ポテンシャル等にて記述・数理化を行う際の簡便性を部分的に考慮していたため^{注2)}とも言えるが、通常のカメラを用いた定点観測による解析からでは全周に渡ってモデル化することが不可能であったためである。また筆者らは既報²⁾において、同領域のかたちが近似楕円形ではなく、a) 流動性状別、b) 男女別に類別可能な、全周異型領域となることを明示した。ただし、この2種の

*東京都市大学 都市生活学部 准教授 博士 (工学) Tokyo City Univ. Dept. of Urban Life Studies A. Prof. (Dr., Eng.)
 **総合意匠企画きはら 修士 (環境科学) General Design Planning KIHARA (M., Env. Sc.)

類型においては、従前より指摘されていた関西圏（京都市・大阪市・米原市等）と関東圏（東京23区）での地域間差異とその有無の明示について、追証データを待って研究余地としてあったため、本報において明らかにするとした。

よって本研究は、歩行空間の安全性評価シミュレーションの性能向上を目標とし、大規模駅等の改札外コンコース等で見られる混雑群衆の全天球動画画像解析と、歩行者の全周異型回避領域の算出を行うこととする。また、関東圏・関西圏の追証データに基づき、地域間差異の有無を合わせて示唆するものとする。駅環境等、公共空間での歩行特性の地域間差異に関しては、関東圏では「歩行者右側通行・エスカレータ右側追抜き」、関東圏では「左側通行・左側追抜き」といった非常定傾向が体感的に捉えられているが、これを回避領域の差異として差分が認められるものかは、既往の研究において未だ明示されていない。よって本研究にて回避領域に地域差が見られるならば、群集流動シミュレーションへのモデル技術移転等を通じて、場に合った安全・サービス水準を示すことが期待される。

2. 近接移動個体の相対座標抽出

2.1 極座標グリッド法による同定基準ゲージ

本項以下2章にて説明する調査方法は、既報²⁾と同様の手法を用いるが、更なる観測誤差の低減を図るべく、本報では調査機器の変更とデータ採取時の基準ゲージ構築方法を改めたため、それらを踏まえ説明付けるものとする。本研究では、全天球撮影対応型カメラ（以下全天カメラとする）を用い、観測者（以下撮影個体とする）の頭部位置に据えたまま混雑空間を自由歩行させ、近接する他歩行者（以下移動個体とする）との回避様態を動画撮影し、最も近接した際の相対位置・相対速度を動画像中より同定・抽出する。この同定・抽出にあたっては、後の2.2節に示す方法により、事前実験空間に設置した極座標グリッドから、複数の漸近線に向かって曲座変換された全天球動画画像上の同定基準ゲージを対応付ける。

2.2 ゲージによる個体位置の把握

極座標グリッド画像を、移動個体の接近・回避事象が見られる動画像に重ねて平面展開し、 $\Delta t=0.5[\text{sec}]$ 刻みにノンリニア表示^{注3)}させながら、頭部位置を画像解析アプリケーション上にて点打する（図4）。図1のように、実空間の極座標グリッドは正確な直交関係を呈しないため、図4の同定基準ゲージもそれに合わせた形でB-スプライン曲線^{注4)}にて近似成形したが、この理由は、全天球カメラでは、球面収差のある光学採取した動画像に対し、電算的な曲座取差を与え全天球画像を得ているため、カメラ視野の周縁部では画像の歪みから正確な直交座標系を得られず、よって周縁部の歪み誤差を上記曲線により視覚近似し、極座標ゲージを構築した。図1中の水平罫線は最下段が $r=0.50[\text{m}]$ であり、 $\Delta r=0.50[\text{m}]$ 刻みに $r=2.0[\text{m}]$ まで現示されている。また垂直罫線の中央は $\theta=0[\text{deg}]$ を示し、 $\Delta\theta=10.0[\text{deg}]$ 刻みで右方向に正、左方向に負の θ 値を現示する。 Δt を $0.5[\text{sec}]$ としたのは、移動個体の平均的な自由歩行速度が $1.2\sim 1.25[\text{m/sec}]$ であること^{注5)}から、接近・回避・離隔の様態変化が観察できる最大時間刻みである点でその設定値を用いた^{注6)}。また本稿では個体位置を画像認識アルゴリズム等の自動読み取り方法でなく、人の目にて判定している。この点に配慮して「位置特定」とせず「位置同定」と語句の適用を行った。

これは、昨今高精度な画像認識アルゴリズム技術が開発されているが、一度に把握できる個体数に未だ制限があり、混雑状況下においては一度に20通り以上の回避事象を扱わなければならない、本研究においてはチェック手間も含めて考慮すると合理的な手法でないと考えたためである。 Δr 及び $\Delta\theta$ の刻み値策定にあたっては、 $\Delta r=0.4$ 以下の刻み値では、 $r=0.4[\text{m}]$ 付近の領域にて正しく同定できなかったため、計測最小範囲でもある 0.5 を採択した。これは、関西圏・関東圏どちらの抽出データにおいても、 r の値が $0.4[\text{m}]$ 以下のとき、 $\Delta\theta$ の実測メジアンに対して θ ゲージの最小目盛である $\pm 30[\text{deg}]$ を超える誤差範囲を示したためである。また r の最大値を $2.0[\text{m}]$ としたのは、これ以上離隔した個体間では、最接近時に速度ベクトル変位が観察されず、回避事象自体が発現しないためである。

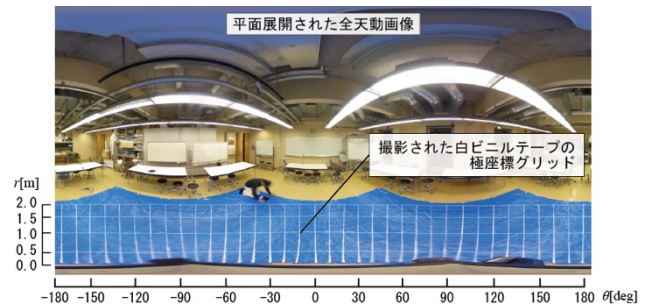


図1：極座標グリッドに基づく同定基準ゲージの策定

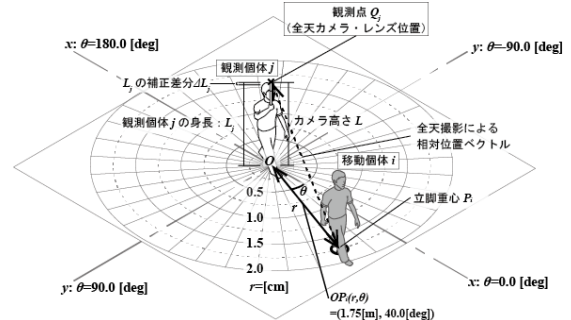


図2： $r\theta$ 極座標グリッドと移動個体の位置同定の概念図

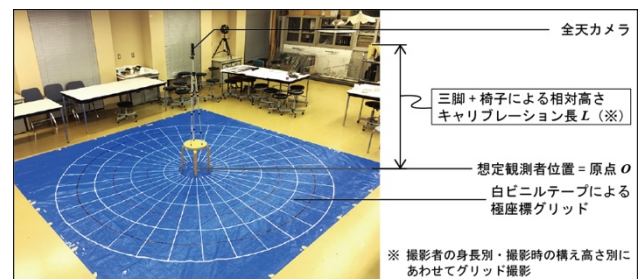


図3：実空間に設えた $r\theta$ 極座標グリッドと全天カメラ

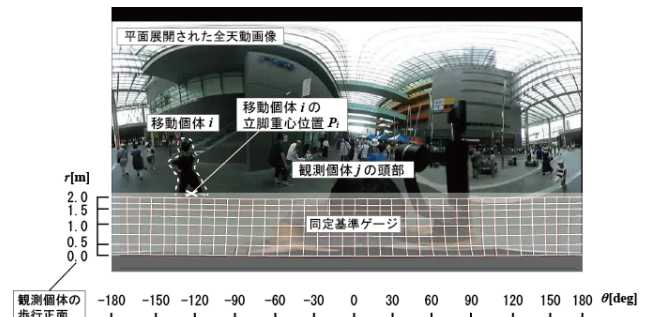


図4：同定基準ゲージを用いたノンリニア同定画面

3. 実群衆流調査と事象の抽出

3.1 調査対象地の概要（関西圏・関東圏）

同定基準ゲージの距離域が $r=0.5\sim 2.0$ [m]であることから考慮し、関西圏・関東圏の平均群衆密度 1.2 [人/m²]以下の空間を対象とし、全天カメラにて群衆流内を任意に移動しながら動画撮影を行った。この密度の値は、既報³⁾において筆者らが実施した、群衆流中にある移動個体の斜め横断可否の閾値であり、これより群衆密度が高いと回避事象が起こらないためである。従って、一定の混雑群衆流が観測される場所で、かつ、接近・回避の事象が連続的に起こりうる、都市部ターミナル駅ラチ外コンコース、及び駅ビル複合商業施設通路内の、計 8 か所を対象に選定し、それぞれ全天カメラによる調査をのべ 13 日・102 回分を行い、1918 通りの接近・回避事象を抽出した（表 1 及び図 5）。調査場所はすべて屋内・半屋外空間であるため、天候に左右されない場所ではあるが、傘の携行や、濡れた着衣での歩行による挙動バイアスを排除すべく、晴天時あるいは雨天でも小雨時のみの事象を抽出対象としてある。また表 1 中の、観測個体種別とは、観測者が男性か女性か、またはその両方かを示している。同じく撮影流動性状とは、接近・回避事象をきたす移動個体が各々属する 2 通りの主要群衆流の交差角度を示している。直交・対向・同方向流動とはそれぞれ、相互の流れが直交で $60\sim 120$ [deg]程度、対向で $120\sim 180$ [deg]、同方向で $0\sim 30$ [deg]程度によって交差するものと扱った。

このなす角の算出には、正確に流動重心ベクトルの法線解析を行ってはいないが、ある程度の目安として把握しておくことで、膨大かつ非定常な群衆流の性状から、目当ての回避事象をいち早く見つけ出し、多くのサンプル採取をする現場での目処立て指標として役立った。

3.2 動画撮影法の策定・回避事象の抽出

本研究では、観測者が全天カメラセットを手元に保持し撮影する形態をとるが、既報²⁾では持ち手延長棒を用いたため、歩行時の揺れ等に起因する手ぶれ動画像が多く採取された。よって本報では、延長棒の代替物として 3 軸補正式の電動ジンバルを用い、視点挙動を安定させた。この電動ジンバルは、水平・鉛直の軸まわりの回転ぶれを補正する機能を持つので、本報では、観測者に保持させる際に、左(右) 15 [deg]、前方 15 [deg]程度傾けさせた^{注7)}。表 2 にこれらの詳細な撮影法を示す。また本報では、男女別の全周異型回避領域の算出を行うべく、関東圏調査では身長 1.67 [m]の 20 代男性と、身長 1.62 [m]の 20 代女性の各 1 名を、関西圏調査では身長 1.77 [m]の 20 代男性と、身長 1.57 [m]の 20 代女性の各 1 名、全 4 名の観測者により調査を実施した^{注8)}。この 4 名は最大で 0.2 [m]の身長差があるが、4 者のカメラ固持高さを一定にしなかった理由としては、図 2 を用いて説明すると、a) 女性観測者の場合のカメラ高さ L_j の補正差分 ΔL_j の増大に伴う手ぶれ現象への懸念と、b) 腕を伸ばした撮影様態がもたらす他者への心理効果を懸念し、敢えてカメラ高さ L_j に差を持たせて敢行した。

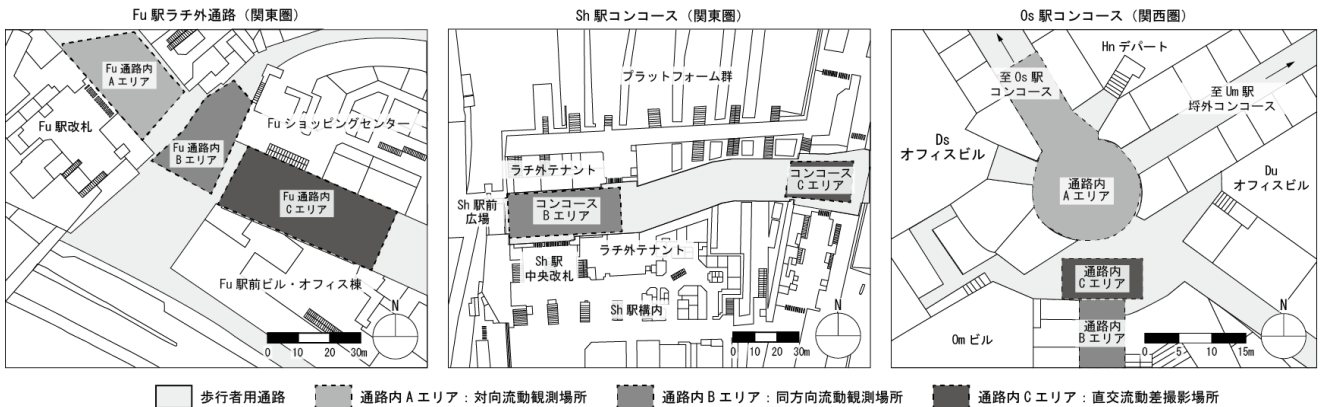


図 5：各調査対象場所周辺の説明図


表 1：関東圏・関西圏の調査対象場所と撮影時の群衆性状一覧（総サンプル数 1918）

	箇所No.	場所	調査日時・曜日	調査時間帯	天候	撮影者性別	撮影流動性状	サンプル数
関東圏 調査場所 (1334)	R#01	Fu駅ラチ外半屋外通路内A	2017年7月17日（月・祭日）	13:00-14:00	晴れ	男女各1名	対向・同方向流動	157
	R#02	Fu駅ラチ外半屋外通路内B	2017年7月24日（月曜日）	13:00-14:00	曇り	男女各1名	対向・同方向流動	136
	R#03	Fu駅ラチ外半屋外通路内C	2017年8月15日（火曜日）	13:00-14:00	晴れ	女性1名	対向・直交・同方向流動	133
	R#04	Sh駅ラチ外コンコースA	2017年8月18日（金曜日）	14:00-16:00	晴れ	女性1名	直交・同方向流動	173
	R#05	Sh駅ラチ外コンコースA	2017年9月12日（火曜日）	14:00-16:00	雨	女性1名	直交・同方向流動	197
	R#06	Sh駅ラチ外コンコースA	2017年9月14日（木曜日）	14:00-16:00	晴れ	女性1名	直交・同方向流動	185
	R#07	Sh駅ラチ外コンコースB	2017年9月19日（火曜日）	14:00-16:00	曇り	男女各1名	対向・直交・同方向流動	173
	R#08	Sh駅ラチ外コンコースB	2017年9月27日（水曜日）	14:00-16:00	曇り	男性1名	対向・直交・同方向流動	180
関西圏 調査場所 (584)	R#09	Os駅構内Um駅連絡通路内A	2016年11月11日（金曜日）	17:00-21:00	晴れ	男女各1名ずつ	対向流動	104
	R#10	Os駅構内Um駅連絡通路内A	2016年11月14日（月曜日）	17:00-21:00	雨	男女各1名ずつ	対向・直交流動	154
	R#11	Os駅構内Um駅連絡通路内B	2016年12月13日（火曜日）	17:00-21:00	雨	男女各1名ずつ	直交流動	170
	R#12	Os駅構内Um駅連絡通路内C	2016年12月17日（土曜日）	17:00-21:00	晴れ	女性1名	同方向・直交流動	86
	R#13	Os駅構内Um駅連絡通路内C	2016年12月18日（日曜日）	17:00-21:00	晴れ	男性1名	同方向・直交流動	70

加えて、c) 観測個体 j の立脚重心 O_j とレンズ位置 Q_j の Z 方向の差分 L_j を変えることによる撮影効率の変化をみることも、この理由に含まれている。また、対向・直交流動と、同方向流動の観測時においてもカメラ高さに差を持たせているが、これは同方向流動の観測にあつては、接近・回避距離が他のケースと比べて縮まる傾向にあり、 $r=0.5\sim 1.0$ [m] の領域において P_i 座標の判別と同定がしにくいいため、同方向流動の場合にのみその差を補正差分 ΔL_j として、男性観測者にて 0.15 [m]、女性観測者にて 0.20 [m] として、それぞれ高く保持させ撮影した。

以上の全天カメラによる動画撮影調査から、関西圏にて 584 件、関東圏にて 1,334 件の接近・回避事象が観察された。そこで、これらの各事象発現様態の定量化を行うべく、撮影個体 j と移動個体 i の最接近時刻 T を t とし、 t 、 $t-\Delta t$ 、 $t+\Delta t$ の各時刻における相対位置ベクトル OP_i を求め、最接近距離 d_i と相対速度ベクトル v_i の算定・抽出を行う。表 3 に事象発生前後を含めた算定プロセスを示す。 $T=t-\Delta t$ の時、移動個体 i が平面展開された同定基準ゲージの $r=2.0$ ラインを超えて観測個体 j に接近しているとす。この時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ の値をゲージから読み取りログ記録する。

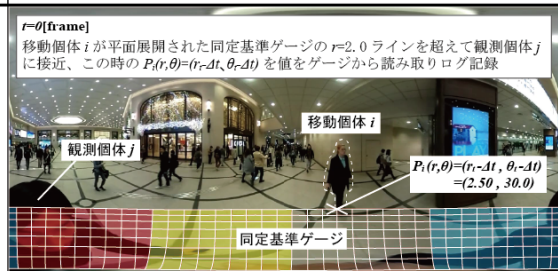


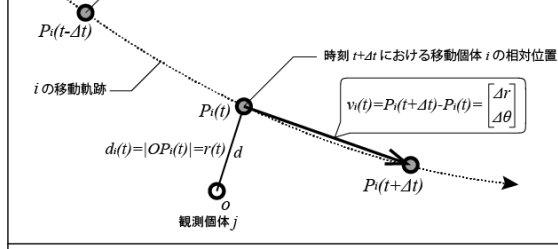
次に $T=t$ の時に最接近したとすると、その時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ を同じくゲージから読み取る。最後に $T=t+\Delta t$ の時に回避行動を終え j から離隔したとすると、その時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ もゲージから読み取る。

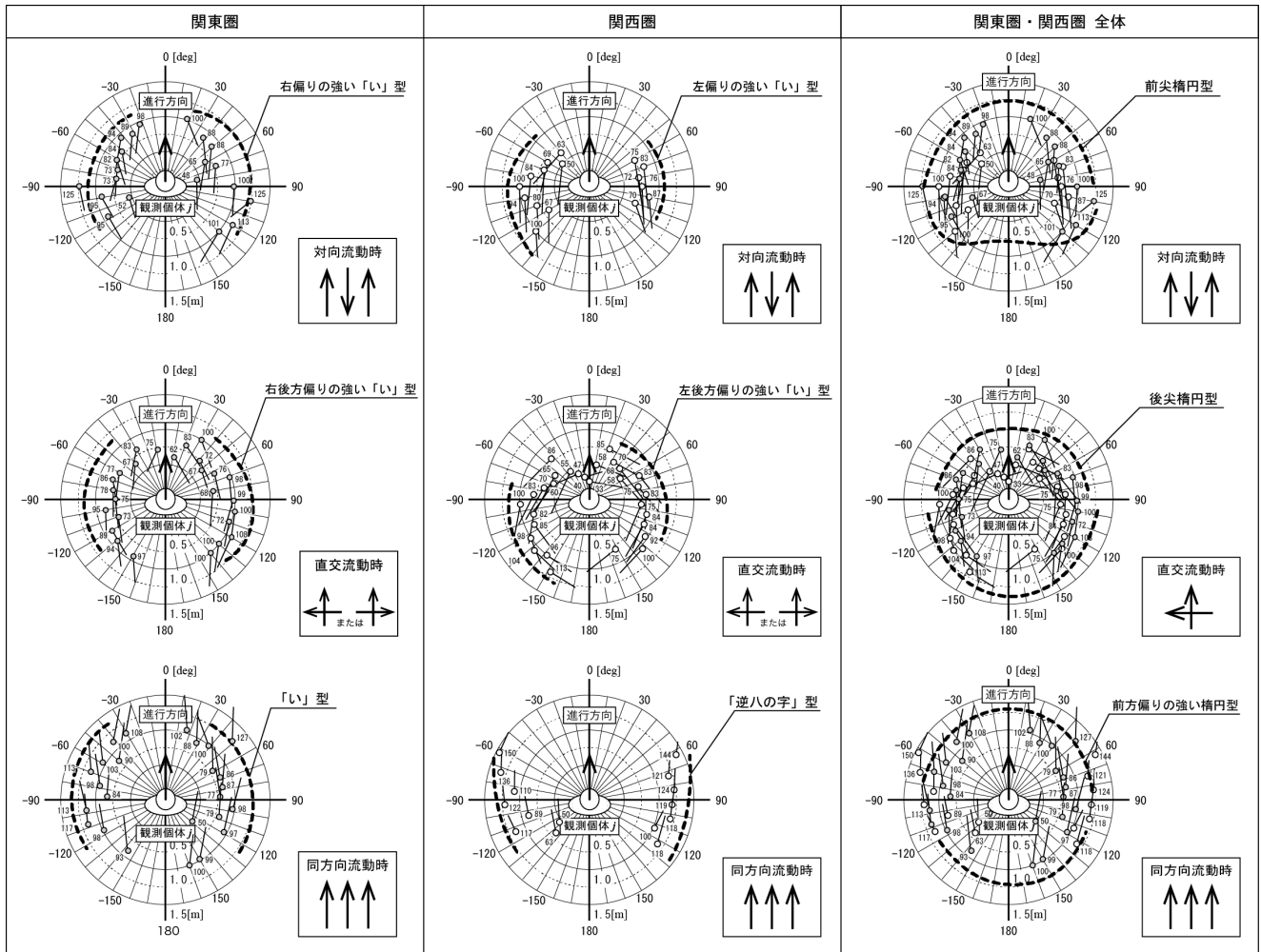
撮影機器の詳細	
	有効画素数：約1200万画素 レンズF値：F2.0 動画画像解像度：1920×1080 動画フレームレート：30fps ビットレート：16Mbps 撮影距離：約10cm～∞ 動画ISO：100～1600
	延長棒：FeiyuTech 伸縮延長ポール：20-75cm 電動ジンバル：FeiyuTech/SPG Live 33x19x5cm リチャージバッテリー駆動式
	装着カメラの水平・鉛直3軸の軸回転向きに挙動を安定させるべく機能する
関東圏調査時の保持方法	関西圏調査時の保持方法
	
観測者身長 l (男性/女性) = 1.67[m] / 1.62[m]	観測者身長 l (男性/女性) = 1.77[m] / 1.57[m]
対向・直交観測時 Q (男性/女性) = 1.75[m] / 1.70[m]	対向・直交観測時 Q (男性/女性) = 1.85[m] / 1.70[m]
同方向観測時 Q' (男性/女性) = 1.75[m] / 1.70[m]	同方向観測時 Q' (男性/女性) = 2.00[m] / 1.90[m]

4. 全周異型回避領域図の算出

3章で得られた時刻 t における最接近距離及び相対速度ベクトルの算定結果を加え、イ) データ整理番号、ロ) 関東及び関西圏の観測場所番号、ハ) 最接近距離 $r(t)$ 、ニ) 最接近時の相対速度ベクトル $v_i(t)$ 、ホ) 観測個体に対する流動性状類別 (対向・直交・同方向流動の3類別)、ヘ) 観測個体の性別、ト) 移動個体の性別の、7つのデータラベルを持つ算出ベースを準備した。このベースデータより、A) 流動性状別にみた全周異型回避接近領域図 (以下全周領域図とする)、B) 男性観測者の場合の全周領域図、C) 女性観測者の場合の全周領域図の3通りの算出を、関東圏および関西圏について行った。A) に関しては、筆者らの既往調査^{3) 7)}から、流動性状毎に相対する移動個体間では、それぞれ異なる接近・回避行動を呈することが分かっており、その詳細を把握すべく算出を行った。B) 及びC) に関しては、歩行者の体格や風貌等の外見を特徴付ける要素として男女差に着目している。この選定については、既報²⁾及び本報において、基礎的な差異を明示したのち、体格差や他なる外見要因が全周領域に変化をきたすものか否かを見極めるものとする。

表 3：事象発生時における d_i 及び v_i の算定プロセス

時刻 T	各時刻における平面展開動画と各プロット対象
$t-\Delta t$	 <p>$r=0$[frame] 移動個体 i が平面展開された同定基準ゲージの $r=2.0$ ラインを超えて観測個体 j に接近。この時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ の値をゲージから読み取りログ記録</p> <p>$P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ $= (2.50, 30.0)$</p>
t	 <p>$t=20$[frame] 移動個体 i が観測個体 j に最接近時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ を同じくゲージから読み取りログ記録</p> <p>$P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ $= (0.75, 110.0)$</p>
$t+\Delta t$	 <p>$t=37$[frame] 移動個体 i が観測個体 j から離隔することを確認しこの時の $P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ を同じくゲージから読み取りログ記録</p> <p>$P_i(r, \theta)=(r, \theta)$ $= (2.00, 160.0)$</p>
各ベクトル成分の算定数値モデル	 <p>時刻 $t+\Delta t$ における移動個体 i の相対位置 $P_i(t+\Delta t)$ 時刻 t における移動個体 i の相対位置 $P_i(t)$ 観測個体 j の立脚重心 O_j 相対速度ベクトル $v_i(t) = P_i(t+\Delta t) - P_i(t) = \begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta \theta \end{bmatrix}$ 最接近距離 $d_i(t) = OP_i(t) = r(t)$</p>
【算定時の数値基準】	<ul style="list-style-type: none"> ○ 観測刻み時間 Δt：本稿では 0.5[sec] とした ○ 最接近距離 $d_i(t)$：直交座標系で $OP_i(t)$ のスカラー量であるが本稿では $r(t)$ となる



4.1 流動性状別にみた全周領域図(関東圏・関西圏比較)

男算出ベースに基づいて、対向流動・直交流動・同方向流動の3つのケースに分け、関東圏および関西圏での全周領域図を明示した(図6)。関東圏と関西圏で分けて明示したのは、関西圏については既報²⁾において取り纏めたものであるが、関東圏のデータ採取は本報において行ったものであり、本報冒頭でもふれた、歩行特性の非定常な地域間差異をみるためでもある。また図中の明示方法は、観測個体 j を原点とした $r\theta$ 極座標上に、各接近・回避事象を来す時刻 t の移動個体 i の相対位置 $P_i(t)$ を白抜き丸印(関東圏はグレー丸印)にてプロットし、更なるその時の相対速度ベクトル $v_i(t)$ を実スカラー量にて棒矢印現示してある。また図中の破曲線は、B-スプライン曲線にて近似的に領域を表したものである。

○関東圏の全周領域図

まず対向流動時の $P_i(t)$ の分布を見ると、 $\theta=20\sim 120[\text{deg}]$ の範囲と、 $\theta=-25\sim -120[\text{deg}]$ の範囲において、右偏りの強い、ひらがなの「い」型に集中が見られ、左側・右側での側方回避距離に差異が生じている。局所的な分布の平均値をみると、左側-45[deg]で約0.9[m]、-90[deg]にて1.0[m]であり、右側45[deg]周辺で0.9[m]、90[deg]で1.1[m]のプロットサンプルから、左右側方で0.2[m]分の異型差異が観察された。またこれらの $v_i(t)$ はいずれも自由歩行速度同等であり、速度低下はなかった。

次に直交流動時では、 $\theta=40\sim 140[\text{deg}]$ の範囲と、 $\theta=-60\sim -140[\text{deg}]$ の範囲において、右後方に偏りが強い「い」型を呈した。この偏り傾向は、直交回避時において、相対する移動個体が前方か後方にて回り込み回避の際の接近距離の差異として現れている。具体的には、左前方の-40[deg]周辺で平均0.75[m]であるのに対し、右後方の140[deg]周辺では平均1.0[m]であった。また各 $v_i(t)$ 成分をみると、右後方よりも左前方回り込み時の方が速度低下が著しい。最後に、同方向流動時をしてみる。一般的には、同方向流動内での相対する移動個体間の接近・回避事象はあまり見受けられないが、本研究では観察個体 j を意図的に速度低下させ追い越される事象の採取を行った。 $P_i(t)$ の分布は左右の両側方におよそ対照的な「い」型を呈し、右側60[deg]周辺で平均0.98[m]、左側-60[deg]周辺で平均1.02[m]であった。

○関西圏の全周領域図

対向流動時の分布では、 $\theta=50\sim 110[\text{deg}]$ の範囲と、 $\theta=-40\sim -130[\text{deg}]$ の範囲において、左偏りの強い「い」型に集中が見られ、関東圏と同様に左側・右側での側方回避距離に差異が生じている。具体的には、左側-45[deg]で約0.6[m]、-90[deg]にて1.0[m]であり、右側60[deg]周辺で0.75[m]、90[deg]で0.76[m]のプロットサンプルから、左右側方で0.24[m]分の異型差異が観察された。またこれらの $v_i(t)$ はいずれも自由歩行速度同等であり、速度低下は見受け

られなかった。

次に直交流動時では、 $\theta=30\sim 150[\text{deg}]$ の範囲と、 $\theta=-90\sim -150[\text{deg}]$ の範囲において、左後方に偏りが強い「い」型を呈した。これは関東圏と同様に、直交回避時の接近距離の差異として現れており、右前方の $30[\text{deg}]$ 周辺で平均 $0.72[\text{m}]$ に対し、左後方の $-140[\text{deg}]$ 周辺では平均 $1.06[\text{m}]$ であった。また各 $v_i(t)$ 成分の現示から、後方よりも前方回り込み時の方が速度が低下する傾向にある。

最後に同方向流動時の分布では、左右の両側方におよそ対照的に現れ、後方に従って狭小となる「逆八の字」型を呈し、右側 $70[\text{deg}]$ 周辺で平均 $1.30[\text{m}]$ 、左側 $-70[\text{deg}]$ 周辺で平均 $1.32[\text{m}]$ であった。これも関東圏同様、観察個体 j を速度低下させ、追い越される事象を意図的に来たし、データ採取を行ったものである。

○関東圏・関西圏全体での全周領域図

対向流同時のものを見ると、前方 $0[\text{deg}]$ での切片を $0.99[\text{m}]$ 、左右 $90\cdot-90[\text{deg}]$ での切片を $1.12[\text{m}]$ とした、左右対称の前尖楕円型を呈した。これは従前から示されている、いわゆる卵型回避領域に近似したものになっている⁷⁾。直交流動時も左右対称の形状をなしているが、後方 $180[\text{deg}]$ での切片を $1.04[\text{m}]$ 、左右 $90\cdot-90[\text{deg}]$ での切片を $1.0[\text{m}]$ とした、左右対称の後尖楕円型を呈した。よって両地域の総体でみると、対向流同時と直交流動時で回避領域の形状に前尖り・後ろ尖りの差異が見られると分かった。

4.2 個体間の性別組合せと全周領域図(関東圏)

算出ベースに基づき、両地域の、全ての流動性状下の事象を対象に、移動個体 i が男性・女性の場合の2通りにおいて観測個体 j が男性・女性である場合の4パターンずつ、合計8パタンの全周領域図を算出した(表4)。前述の通り相対する個体間の男女差に着目したのは、各移動個体の外見を明示的に特徴付ける要素として取り扱ったためである。無論この他回避挙動に差異を及ぼす要因として、体格・風貌、着衣仕様・歩速等も考慮されるべきと考えられるが、既報²⁾及び本稿では男女差のみに着目し、その基礎的な差異を明示するものとした^{注6)}。

○関東圏4パタンの傾向

観測個体 j と移動個体 i の性別組み合わせを、便宜的にパターン1 (j 男- i 男)、パターン2 (j 男- i 女)、パターン3 (j 女- i 男)、パターン4 (j 女- i 女) とすると、最も顕著なのは、観測個体 j が男性であるパターン1及び2と、 j が女性であるパターン3及び4の比較において、前者の方が分布径が広い。また相対的にみて、パターン1及び4と2及び3では、前後・横方向に $0.3[\text{m}]$ の径差が見られるものの、前者2パターンは円形に近い異型楕円、後者2パターンは前後方向に長い異型楕円となった。

○パターン1 (j 男- i 男)

このパターンでは、表4の通り前後方向に約 $1.6[\text{m}]$ 、横方向に $1.8[\text{m}]$ に伸展した、左右方向に若干長い、円形に近い異型楕円形状を呈した。パターン4との比較では、男性のもつ全周領域は、女性のそれに比して前後方向で約 $0.1[\text{m}]$ 、横方向で約 $0.3[\text{m}]$ 分の伸展傾向があると言及できるが、既往研究で示唆されている著く尖った「卵型形状」ではない。

○パターン2 (j 男- i 女)

前後方向の切片長が約 $2.0[\text{m}]$ 、横方向が $1.7[\text{m}]$ に伸展した、前後方向に長い異型楕円形状を呈した^{注7)}。パターン1との比較では、進行方向の切片長が $0.2[\text{m}]$ 長い、 $v_i(t)$ 成分の顕著な差異は見られなかった。交差流動時・対向流動時とも、側方にて近い距離で回

避しているといえる。

○パターン3 (j 女- i 男)

前後に約 $1.7[\text{m}]$ 、左右に $1.7[\text{m}]$ の切片径をもつ異型楕円であり、著しい前方の尖りや「卵型形状」は確認されなかった。同様の性別組み合わせである関西圏のパターン3'と比較すると、前後方向で $0.2[\text{m}]$ 、横方向で $0.4[\text{m}]$ の径差が地域差異として見られた。

○パターン4 (j 女- i 女)

このパターンは女性個体間の事象にみられる全周領域を示しており、前後方向に約 $1.5[\text{m}]$ 、横方向に $1.5[\text{m}]$ 伸展した円形に近い異型楕円となっている。パターン3とほぼ同形状ながら、前後・左右それぞれの切片径にて $0.2[\text{m}]$ 分小さく、前方の尖りや「卵型形状」は確認できなかった。

4.3 個体間の性別組合せと全周領域図(関西圏)

○関西圏4パタンの傾向

関東圏の各パターンと同様に、観測個体 j と移動個体 i の4パタンの性別組み合わせを、便宜的にパターン1' (j 男- i 男)、パターン2' (j 男- i 女)、パターン3' (j 女- i 男)、パターン4' (j 女- i 女) とし、表4に図示した。顕著な傾向としては、 j と i の組合せが男性対男性の場合であるパターン1'において、 j と i の組合せが女性対女性の場合であるパターン4'に比して分布径が広く、左右に伸展した異型楕円の領域を呈している。具体的には、パターン1'では前後に約 $2.0[\text{m}]$ 、左右に $2.6[\text{m}]$ に渡る切片径内にサンプル分布が広がっている。またパターン4'では、同様な異型楕円状になっているが、パターン1に比して円形に近い。具体的には、前後に約 $1.4[\text{m}]$ 、左右に $2.1[\text{m}]$ の切片径をもつ異型楕円となっている。また次に顕著な傾向としては、パターン1'及び2'と、パターン3'及び4'はそれぞれほぼ同形状を呈したことである。

○パターン1' (j 男- i 男)

このパターンは、男性個体間の事象に表4の通り前後方向に約 $2.0[\text{m}]$ 、横方向に $2.6[\text{m}]$ に伸展した、つまり横方向に長い異型楕円形状の領域図になっている。パターン4との比較から、男性のもつ全周領域は、女性のそれに比して前後方向で約 $0.5[\text{m}]$ 、横方向で約 $0.5[\text{m}]$ 分の伸展傾向があることが言及できる。この横方向に長い異型楕円形状については、既往研究で長年示唆されてきた「歩行時の回避領域は前後に長く前方に尖った卵型である」ことに対する、新たな疑念の投げかけに通ずるといえる。筆者らの研究⁵⁾⁶⁾の歩行者定点観測データに基づくと、「前方の尖り」や「卵型形状」にはならず、むしろ横方向への伸展楕円であった。またこれは、相対する対向流個体間において顕著な傾向を持っており、パターン1'・2'に同様態を確認できた。

○パターン2' (j 男- i 女)

パターン1'同様、前後方向の切片長が約 $2.0[\text{m}]$ 、横方向が $2.6[\text{m}]$ に伸展した横方向に長い異型楕円形状を呈する^{注9)}。また $v_i(t)$ についても顕著な差異は見られなかった。パターン1'と異なるのは、進行方向の切片長が、パターン4'の全周領域の前方切片長と同等になっている事と、サンプル数は少ないものの、観測個体の後方に若干長めに、回り込み回避行動が見られる。

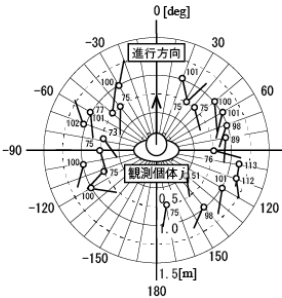
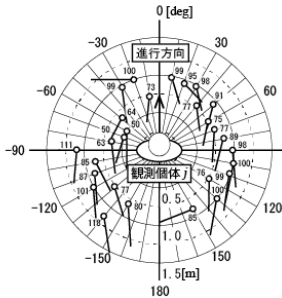
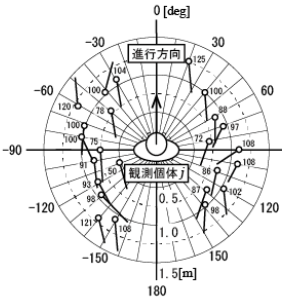
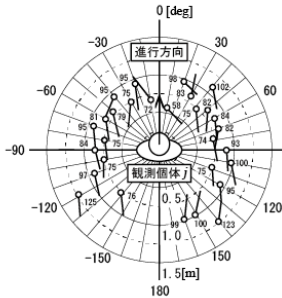
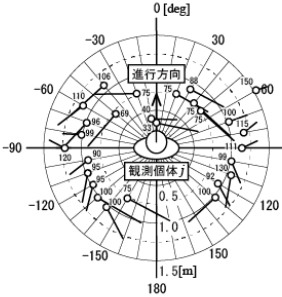
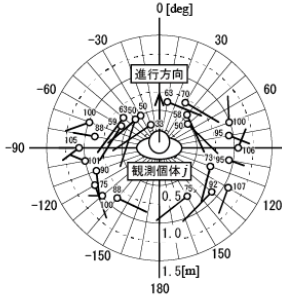
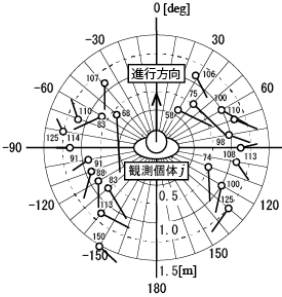
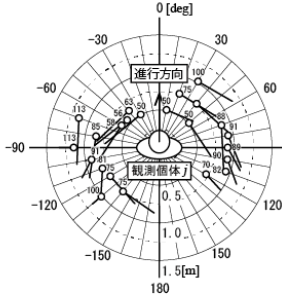
○パターン3' (j 女- i 男)

前後に約 $1.5[\text{m}]$ 、左右に $2.1[\text{m}]$ の切片径をもつ、つまり横方向に長い異型楕円を呈し、パターン1'同様「前方の尖り」や「卵型形状」は確認できなかった。パターン1・2に比べて切片径が小さいのは、女性の男性に対する体格差・平均身長差などの身体的特徴に関連していると考えられる^{注10)}。また、後述のパターン4'と異なるのは、事象数は少ないながら、領域前方において $r_i(t)$ が $0.5[\text{m}]$ 未満となる場合があった。

○パターン4' (j 女- i 女)

女性個体間の事象にみられる全周領域を示している。前後方向に約 $1.4[\text{m}]$ 、横方向に $2.1[\text{m}]$ に伸展した横長の異型楕円形状に

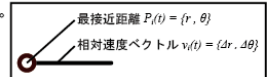
表 4：関東圏・関西圏での個体間の性別組み合わせと全周領域図

		観測個体 j の性別	
		男性の場合	女性の場合
関東圏における個体間の性別組み合わせと全周領域図	男性の場合	<p>パターン 1 (j 男-i 男)： 現示サンプル数 24</p>  <p>前後方向に約 1.6[m]、横方向に 1.8[m] 伸展した横方向に長い異型楕円形状。パターン 4 との比較から、前後方向で約 0.1[m]、横方向で約 0.3[m] 分の伸展傾向が見られる。「前方の尖り」や「卵型形状」は確認されず。各切片長は異なるが、パターン 1' と同等の形状を呈している。</p>	<p>パターン 3 (j 女-i 男)： 現示サンプル数 28</p>  <p>前後に約 1.7[m]、左右に 1.7[m] の切片径とする異型楕円形状で、「前方の尖り」および「卵型形状」が看取された。尚、領域前方の $r_f(t)$ 切片は 0.9[m] であり、パターン 3' と比較すると前方により伸展している。</p>
	女性の場合	<p>パターン 2 (j 男-i 女)： 現示サンプル数 24</p>  <p>前後方向の切片長が約 2.0[m]、横方向が 1.7[m] に伸展した前後方向に長い異型楕円形状。進行方向の切片長がパターン 4 との同等であった。またパターン 2' と比較すると、横方向に -0.9[m] 短縮されている。</p>	<p>パターン 4 (j 女-i 女)： 現示サンプル数 29</p>  <p>前後方向に約 1.5[m]、横方向に 1.5[m] 伸展した異型円形状を呈している。パターン 3 と比して前後切片径にて 0.2[m] 分小さい。「前尖り」や「卵型形状」は確認できず。またパターン 4' に対し、横方向に 0.6[m] の短縮が見られた。</p>
	男性の場合	<p>パターン 1' (j 男-i 男)： 現示サンプル数 27</p>  <p>前後方向に約 2.0[m]、横方向に 2.6[m] に伸展した横方向に長い異型楕円形状。パターン 4 との比較から、前後方向で約 0.5[m]、横方向で約 0.5[m] 分の伸展傾向がある。「前方の尖り」や「卵型形状」は確認できなかった。</p>	<p>パターン 3' (j 女-i 男)： 現示サンプル数 25</p>  <p>前後に約 1.5[m]、左右に 2.1[m] の切片径とする横方向に長い異型楕円、「前方の尖り」や「卵型形状」は確認できなかった。領域前方において $r_f(t)$ が 0.5[m] 未満となる。</p>
	女性の場合	<p>パターン 2' (j 男-i 女)： 現示サンプル数 23</p>  <p>前後方向の切片長が約 2.0[m]、横方向が 2.6[m] に伸展した横方向に長い異型楕円形状。進行方向の切片長がパターン 4 の前方切片長と同等。</p>	<p>パターン 4' (j 女-i 女)： 現示サンプル数 23</p>  <p>前後方向に約 1.4[m]、横方向に 2.1[m] に伸展した横長の異型楕円形状。パターン 3 と比して前後切片径にて 0.1[m] 分小さい。「前方の尖り」や「卵型形状」は確認できず。</p>

※上記の4つのグラフは全て観測個体 j の相対位置を原点とした極座標空間 (r, θ) のすなわち周方位にて θ 値を示し、半径の大きさを r 値として現示している。

※採取サンプルのうちプロット点が近く、かつ同様の複数成分は図の見やすさの観点から除いて図化している。

※各プロット点の数値ラベルは、 r 値を cm 単位に換算した値を付記している。



っている。パタン3'とほぼ同形状ながら、前後切片径にて0.1[m]分小さい。また、このパタンにおいても「前方の尖り」や「卵型形状」は確認できなかった。

5. まとめ・研究余地

本研究では、全天球撮影対応型カメラを用い、観測個体に固着し撮影した全天カメラ動画を解析することにより、移動個体の最近接距離と相対速度ベクトルの算出を経て、流動性・性別・男女別、更には関東圏と関西圏の地域別に全周回避領域の算定を行った。既往研究で長年定説とされている卵型歩行領域の実態的な形状を示唆した。本報の内容は、歩行者相互の非定常な現象のひとつとしての、回避行動の特性をみるべく、基礎的なデータ採取とその方策の提示を主眼としており、今後の展望としては、より多くの観測者にて固着撮影を実施し、事象データの任意性担保を図ることを研究余地とする。またこれらを成果にし、歩行空間の安全性評価のための、群衆流動シミュレーションの性能向上に向け、寄与していくとする。

注釈

- 注1) JNT0 (日本政府観光局) 推計に基づく、2018 年上半期の訪日外国人旅行者数は約1,873万人であり、前年比110.9%と増加傾向にあり、過去5年の実総数で見ると、1,036万人(2013年)、1,341万人(2014年)、1,974万人(2015年)、2,404万人(2016年)、2,869万人(2017年)からみても、純増の一向にあると言える。
- 注2) 定点カメラ画像の情報から歩行者位置同定を行う場合、画像上の頭部位置を直交座標系に写像変換するが、これには回転行列式を用いる。その際の分回定義域が180[deg.]に限定されるため、全周つまり定義域360[deg.]での解析が行えないためである。
- 注3) ここで言うノンリニア表示とは、PC上の動画メディアに対し、操作者が時間軸を自在に変化させながら閲覧することである。本研究では、任意の2個体の接近・回避事象を操作者が認識する必要があるため、動画を時間軸に沿った一方向再生すなわちリニア表示では判別が困難なため、ノンリニア表示による把握は不可欠と言える。
- 注4) B-スプライン曲線(B-spline curve)とは、図形幾何学において複数の制御点と屈曲点から定義付けられる近似多項式からなる曲線図形であり、Bezier curveと同等に、CAD・CAI等のデジタル・グラフィック環境で汎用性の高い描画図形である。
- 注5) 既報2すなわち関西圏での移動個体の平均自由歩行速度が1.22[m/sec]であったのに対し、本報の関東圏での事前調査では1.24[m/sec]であったため、これらの平均値である1.23[m/sec]を判断基準としてある。
- 注6) 本報での動画は29.97[フレーム/sec]のフレームレートを用いたため、すなわち約15フレーム毎の静止画像をノンリニア表示させながら脚部位置を同定したことになる。Δt=0.1とするならば、約3フレーム毎の静止画像を分析対象にするため精度は上がるがその分同定作業が増大するため

Δt=0.5としてある。

- 注7) 軸補正タイプのジンバルで安定した視点挙動を得るための、最も一般的な方法といえる。仮にこのジンバルを鉛直向きに立てて保持したとすると、観測者の歩行運動に起因する3軸平行ぶれを補正することができない。
- 注8) 本研究の調査形態から、観測個体jは特定人物にならざるを得ないため、全ての回避事象の任意性を完全に担保するものではない。仮に事象の任意性を担保するとすれば、複数の観測者によって追加調査を行うことが考えられるが、本報ではこの限りではない。
- 注9) プロットデータはすべて単独歩行中の女性であり、幼児連れ・ベビーカー携行者ではない。
- 注10) 自由歩行速度は男性とほぼ同等ながら、女性の歩幅は0.69[m](基準身長1.54[m]として0.45倍した値)、男性の歩幅は0.75[m](基準身長1.67[m]として0.45倍した値)、比率は0.92倍となっている他、男性肩幅0.46[m]に対し女性は0.41[m]である。

参考文献

- 1) Hideaki Takayanagi, Shogo Yamada, Shota Sugahara, So Koumei, Hiroko Shibahara: A Study on the Evaluation Method for Local Congestion in Pedestrian Spaces Using the Traj-Scalar Model, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.15, No.3, pp397-402, 2016.10
- 2) 高柳英明: 全天球動画画像解析による歩行者の全周異型回避領域の算出に関する研究, 日本インテリア学会論文報告集, 第28号, pp.71-76, 2018.3
- 3) Hideaki Takayanagi, Shougo Yamada, Hiroko Shibahara: A Study on Understanding Pedestrian Flow Using Intermittent Recording Images(PRI), Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.14, No.3, pp557-560, 2015.10
- 4) 高柳英明, 長山淳一, 渡辺仁史: 歩行者の最適速度保持行動を考慮した歩行行動モデル-追従相転移現象に基づく解析数理論-, 日本建築学会計画系論文集/AIJ Journal of Architecture and Planning No606, pp.63-70, 2006.8
- 5) 今西美音子, 佐野友紀: 歩行者主体で見た群集内での回避行動の解析 -短時間歩行パス分析をもちいた群集解析 その2-, 日本建築学会計画系論文集/AIJ Journal of Architecture and Planning No719, pp.57-64, 2016.1
- 6) 城明秀, 大宮喜文, 佐野友紀, 丹下学, 山口純一, 藤井皓介: 空間条件が群集歩行性状に与える影響に関する実験的研究 群集流に基づく流動係数の変化, 日本建築学会計画系論文集/AIJ Journal of Architecture and Planning No732, pp.291-298, 2017.2
- 7) 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, pp185-191, 2001.11
- 8) 佐野友紀, 高柳英明, 渡辺仁史: 空間-時間系モデルを用いた歩行者空間の混雑評価, 日本建築学会計画系論文集, 第555号, pp191-197, 2002.5
- 9) 山田昇吾, 高柳英明: 連続間欠記録式歩行群集流画像による群衆性状の把握, 第36回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp189-192, 2013.12

(2018年10月30日原稿受理, 2019年1月18日採用決定)