

歩行時回避行動の
画像処理による分析的研究

建部 謙治

論文要旨

本論文は、画像処理技術を応用して歩行行動を分析する手法を確立すると共に歩行者が進路上にある障害物を回避し始める地点の数理的判定方法を検討している。さらにこの判定基準に基づいて回避行動開始時の歩行者と障害物との距離を定量的に求め、障害物の種類による歩行行動への影響を統計的に検討している。また、この結果を利用して簡単な回避歩行モデルを提案し若干の考察を行っている。

本論文は大きく五章からなるが以下に各章ごとにその概要を述べる。

序論は、研究の目的とその意義、実験調査方法について述べている。

従来の建築空間・都市空間の設計においては、測定可能な指標を設計目標に据え、心理的な満足感やその反対の圧迫感というような質的な指標は測定が非常に困難であることを理由に切り捨てられてきた。しかし、種々の測定技術の向上により、主に心理的な影響を受ける量を測定できる状況が作られつつある現状では、人間が心理的に必要としている条件も合わせた空間設計を進めていくことが求められる。こうした状況にあって、歩行者の行動と歩行者を取りまく周辺環境の相互関係を明らかにする研究が進めば、心理量が歩行に及ぼす影響を独立に評価できるようになり、快適性等を考慮した歩行空間のあり方も明確になると考えられる。しかし、歩行行動の中でも直進する歩行に次いで基本的な回避行動ですら、既往の研究の中で周辺環境の歩行者に及ぼす影響が十分に明らかにされているとは言いがたい。この行動は心理的な影響を大きく受ける行動であるので、歩行の研究の進展には欠かせない対象となる。そこで本研究では単独歩行者の障害物回避行動に的をしぼり、障害物による歩行行動への影響について分析を行うものである。

単独歩行者への心理的な影響を指標化するにあたって、これを説明する有力な概念には歩行者の回りに形成される領域がある。この領域は意識や行動の動機付けとなるもので他者との距離を決定する上で重要な働きを持つものと考えられる。本研究ではこの領域の寸法、とりわけ歩行者前方の寸法を定量的に捉える必要があるとの判断から、まず回避を始める地点での歩行者と障害物の距離、前方回避距離を定量化することとした。この前方回避距離を障害物ごとに計測し、障害物の種類によってどのように歩行行動に影響を受けるのかを明らかにする。研究方法としては、フィールドにおける一般歩行者を対象とした調査を行い、いくつかの障害物に対する単独歩行者の前方回避距離を実測することにした。

第一章は、ビデオ映像として記録された歩行者の動きを画像処理し、かつ行動分析に利用できるようにデータを加工するための過程について検討している。

この過程は、画像の二値化により頭部だけを選択的に抽出し、その位置の時間変化を求める部分と、画像データおよびその処理作業に内包される雑音を取り除

いて、歩行者の動きの分析に用いることができるものに加工する部分の二つに分かれる。本章では主に後者の過程を扱い、録画されたビデオ映像から、画像処理装置を利用し、座標変換および歩行軌跡データのローパスフィルターによる処理を行うことによって、歩行における頭部の軌跡を自動的に一定の精度で計測する方法を構築した。

また、これに基づいて2種類の歩行実験・調査を対象にして歩行の軌跡・速度・加速度について解析した。街路歩行の特性の分析では、 x （前後）方向に2.0 Hz前後、 y （左右）方向に1.0 Hz前後の歩行特有の周期的な動きがある。L字型廊下での折れ曲がり歩行と街路歩行を比較すると、カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後のデータから求められる y 方向の最大加速度が、L字型廊下歩行では街路歩行の約1.4倍となることを明らかにした。

このように画像処理を応用することによって計測者に依存することなく、また大幅なデータ解析の作業量の軽減を図って歩行行動の分析が可能となる。

第二章は、歩行者が進路上に置かれた障害物を避ける行動を対象に、従来の測定者の主観的判断によるものではなく、数理的に回避行動開始点を判定する方法を検討している。

歩行調査は、通路上に障害物がある場合と、無い場合（自由歩行）について行い、両者の軌跡の比較から回避歩行が行われたと判断される歩行（回避歩行）軌跡を選定し、回避歩行の特性を明らかにした。回避歩行では障害物とのすれ違いまでに2つの曲がりがあり、進路を変更する回避行動開始点での「曲がりⅠ」と、すれ違い付近で進路を再修正する「曲がりⅡ」とからなることを示した。曲がりのための y 方向の最大加速度は曲がりⅠに比べて曲がりⅡの方が大きい。

こうした知見を踏まえ曲がりⅠの判定方法を検討した。判定基準は、① y 方向の変位量による方法、② y 方向の速度変化に着目した方法、③ y 方向の最大加速度による方法、④歩行軌跡の曲率による方法の4つとし、軌跡データを、a)カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後のもの、b)カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後さらに歩行者固有の y 方向の周期で移動平均したものの2種類について、それぞれの特性及び関係を分析した。この結果、回避行動開始点の判断基準として、カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後さらに歩行者固有の y 方向の周期で移動平均した軌跡データの曲率による方法が最も適当であるとの結論を得た。

第三章は、静止した障害物に対する回避行動の観測データの分析に基づいて前方回避距離を計測している。

実験調査は、静止した物体<モノ>と「ヒト」を障害物とした。ヒトの場合、さらにその身体の向きで<前向き>、<後ろ向き>、<横向き>の3種類とし、計4種類の障害物に対する回避行動を調査した。解析では回避行動開始点をカットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後さらに移動平均した軌跡データについて曲率の判定基準による方法で判定し、この判定位置と障害物との距離であ

る前方回避距離を求めた。解析の結果、歩行者は障害物の種類によって回避行動を開始する距離を決定していることが分かった。障害物がヒトの場合、身体の向きが歩行行動に影響する。前方回避距離は身体の向きが、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉、〈ヒト前向〉の順に大きくなり、それぞれの平均値は6.74m、6.82m、8.84mである。また、障害物が人間と同じ高さ、幅を持つ物体の前方回避距離の平均は7.34mで、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉より大きく、〈ヒト前向〉よりも小さい。さらに、同じ障害物であれば通路幅員などの歩行環境や調査時期が多少変化しても前方回避距離は変わらないことを他の実験調査結果との比較から明らかにしている。

第四章は、前章で行った静止した障害物に対して、移動する障害物を対象としてその前方回避距離を計測している。

実験は、障害物である静止したヒトが歩行者がある地点を通過した時点で移動を開始する方法とした。ヒトの向きは前向きと後ろ向きの2種類とし、前向きの場合には移動を開始する地点を3種類とした。障害物が移動する「前向のヒト」と「後向のヒト」の二つの実験ケースを解析した結果、以下のことが明らかになった。

歩行者の回避行動特性として、歩行速度は定速で推移し、歩行軌跡に関する全体的傾向は静止した障害物と同様な傾向を示す。前方回避距離は「前向のヒト」と「後向のヒト」のいずれも、障害物であるヒトが定速で移動していても、静止した障害物の場合の前方回避距離と変わらない。歩行者が回避行動を開始する距離は障害物が静止、移動にかかわらず前方回避距離の平均値が7m～9mになった場合である。この距離は、既往研究での他人の接近にともなう心理的・生理的影響が強くなる距離と一致している。

第五章は、第三章と第四章で得られた障害物別の前方回避距離とその知見に基づき簡単な回避歩行モデルをたて、その考察を行っている。

モデルは歩行者自身と障害物の領域の2つの大きさで前方回避距離が規定されると考えたものである。すなわち、歩行者は自分自身の領域を確保し、かつ対向者（障害物）の領域を必要以上に侵さないことで相互の心理的影響を軽減するために、領域の先端はいわゆるセンサーのような機能を持っていて、歩行者と対向者の領域の先端が触れることによって回避行動が開始されると考える。さらに、回避行動中には領域のセンサー機能（衝突領域）は必要なくなり、これに変わって群集歩行でも確保される基本領域がすれ違い地点の側方距離を決めることになるというものである。このモデルに基づく歩行者の領域の大きさは前方長さが4.4m、後方長さが2.4m、側方長さが2.3mである。障害物が物体の場合もヒトと同様に領域が存在するとし、今回使用した直方体（幅0.5m、高さ1.7m）の場合には領域の前方長さは2.9mで、歩行者の領域の側方長さおよび後方長さとはほぼ同じであった。

目次

論文要旨

目次

序 論

1. 研究の目的	1
(1)はじめに	1
(2)目的	3
2. 研究方法	4
3. 既往の研究	7
(1)回避行動を現象的に分析した研究	7
(2)パーソナル・スペースに関連する研究	9
(3)歩行モデルに関する研究	10
(4)まとめ	12
4. 調査方法の概要	13
(1)実験調査および分析の概要	13
(2)障害物の種類	16
(3)実験調査場所	16
(4)被調査者の概要	18
5. 論文の構成	19
6. 本論で使用する用語	23

第一章 歩行解析への画像処理の応用

1.1 目的	25
1.2 実験調査内容	26
1.3 画像処理装置	27
1.4 座標変換の方法	31
(1)変換式	31
(2)変換のための定数決定法	34
(3)座標変換の決定と誤差の検討	34
1.5 歩行軌跡データの扱い方	35
(1)座標軸と時間の設定方法	35
(2)歩行軌跡と速度・加速度の定義	35
(3)歩行軌跡のスペクトル解析	36
(4)変位のフーリエ振幅スペクトル	38
(5)ローパスフィルターによる処理	40

1.6	歩行実験・調査の解析	40
	(1)作業の省力化と再現性	40
	(2)ローパスフィルター処理後の軌跡と速度・加速度	43
1.7	まとめ	53
第二章	回避行動開始点の判定方法	
2.1	目的と調査および解析方法	54
2.2	回避歩行の特性	56
	(1)歩行軌跡	56
	(2)スペクトル解析	59
	(3)速度・加速度	61
	(4)曲がりにおける最大加速度	67
2.3	回避行動開始点の判定方法	69
2.4	判定方法ごとの結果の比較と考察	71
	(1)判定方法ごとの $ S_x $ の相対度数分布	71
	(2)移動平均しないデータとの比較	75
	(3)判定方法の違いによる判定位置の関係	75
2.5	まとめ	78
第三章	静止した障害物に対する回避行動	
3.1	目的と実験調査方法	79
3.2	実験調査結果の概要	81
	(1)歩行軌跡	81
	(2)障害物を避ける方向	84
	(3)すれ違い時の側方距離 K_y	87
	(4)歩行速度	87
3.3	分析結果	87
	(1)回避行動前の障害物による影響の検討	87
	(2)回避歩行の軌跡データの選定	89
	(3)回避行動開始時の S_y	92
	(4)前方回避距離 $ S_x $	92
	(5)回避行動開始点までの歩行状況の検討	92
	(6)回避方向による影響の検討	97
	(7)歩行軌跡の x 軸に対する対称性	102
	(8) $ S_x $ と S_y の関係	105
3.4	障害物による $ S_x $ の値の検討	106
3.5	$ S_x $ の再現性	106
	(1)歩行軌跡	107

(2)回避歩行の選定	107
(3)障害物<モノ>	107
(4)障害物<ヒト前向>	107
(5)障害物<ヒト後向後方回避>	113
(6)まとめ	115
3.6 まとめ	115

第四章 移動する障害物に対する回避行動

4.1 実験目的と方法	116
(1)障害物の種類と実験方法	116
(2)解析の手続き	120
4.2 障害物Bの位置と時間の関係式の検討	120
(1)実験ケース「前向き」	120
(2)実験ケース「後ろ向き」	122
4.3 実験ケース「前向き」	124
4.3.1 結果の概要と分析	124
(1)歩行軌跡と観測初期位置 E_y	124
(2)障害物を避ける方向	124
(3)回避歩行の軌跡データの選定	130
(4) S_y と回避行動開始点までの歩行状況の検討	130
(5)回避方向による影響の検討	134
(6)歩行軌跡のx軸に対する対称性	138
4.3.3 障害物による $ S_x $ の値の検討	139
(1)相対歩行軌跡による検討	139
(2) $ S_x $ の値の検討	139
4.3.4 まとめ	141
4.4 実験ケース「後ろ向き」	144
4.4.1 結果および分析の概要	144
4.4.2 障害物による $ S_x $ の値の検討と考察	150
4.4.3 まとめ	150
4.5 他の文献との比較	151
4.6 まとめ	152

第五章 $|S_x|$ についてのまとめと歩行モデルの提案

5.1 はじめに	153
5.2 回避歩行モデル	153
5.3 モデル式の検討	155
5.4 考察	157

(1)歩行者の領域の大きさ	157
(2)領域と回避歩行モデル	157
(3)既往研究と回避歩行モデル	160
(4)歩行者が歩行していないゾーン	161
5.5 まとめ	161
結論	162
謝辞	165
参考文献	167
資料	172

序 論

1. 研究の目的

(1) はじめに

人類の進化・発展は、人間が直立歩行という特有の能力を得たことから始まったと言っても過言ではない。この「歩行」という機能は、捕食、新陳代謝等に有利な位置へ移動できるという動物の持つ最も基本的な性質を具体化するものである。この歩行も現代技術文明の発展と共にその機能が疎んじられた時期もあったが、近年、技術偏重の反省から歩行者交通の重要性が再認識されている。こうした中において、建築や都市デザインの領域では歩行者の環境のあり方が重要な関心事になり、人間的な立場からの見直しが痛感され空間設計の技術的根拠の確立が求められている。しかし、その基礎としての歩行者の様々な特性や能力についての科学的な研究は世界的に見ても数少ない。

従来、建築や都市デザインにおいては、測定可能な指標を設計目標に据え、これが充足されればよいという命題のもとに必要最小限の物理的条件を満たす取り組みが行われてきた。この際、心理的な満足感やその反対の圧迫感というような質的な指標は測定が非常に困難であることを理由に切り捨てられてきた。しかし、種々の測定技術の向上により、主に心理的な影響を受ける量を測定できる状況が作られつつある現状では従来のリミット設計から脱却し、人間が心理的に必要としている条件も合わせた空間設計を進めていくことが可能となった。

建築の分野における歩行行動に関する既往研究は群集歩行と単独歩行を対象としたものに大別され、前者の研究が大半を占める。単独歩行者を対象とした研究が遅れている理由としては、主に以下の四点が考えられる。第一に群集流動に関するような応用的研究ではないこと（即設計に役立つものばかりではないことから基礎研究として後回しにされる）、第二に人間の適合性・順応性に期待することが多く問題意識が低いこと（歩行者自身の問題であるとする捉え方である）、第三に計測・解析技術による研究進展の限界があること（現象を一定精度で定量的に計測し膨大な計測値をいかに処理できるか）、第四に人間の心理・生理にも深く関連しているためその定量化やモデル化が難しいこと（歩行行動の要因が人

的要因および周辺環境要因を含めて多く複雑)、などが考えられる。

仮に話を簡単にするためだけに歩行行動を単純なものから並べていくと、第一は直進する歩行であり、第二がものを避ける回避行動となろう。直進する歩行については運動生理学等でかなり詳しい研究があるが、第二の回避行動については既往の研究の中で十分に明らかにされているとはいいがたい(文1~3など)。また、この行動は心理的な影響を大きく受ける行動であるので研究の進展には欠かせない対象である。

群集歩行における個々の歩行者では人口密度という物理的な条件によりその行動に拘束を受ける。これに対して単独歩行における歩行行動は物理的要因による拘束はきわめて弱くなり、歩行者の心理面の影響を受けた行動をとるものと判断される。こうした状況の歩行者の行動と歩行者を取りまく周辺環境の相互関係を明らかにする研究が進めば、心理量が歩行に及ぼす影響を独立に評価できるようになり、快適性等を考慮した歩行空間のあり方も明確になると考えられる。

そこで本研究では単独歩行者の障害物回避行動に的をしぼり、歩行行動への障害物の影響を分析することにした。

さて、歩行者の行動特性を考慮しこれを設計に結びつけるためにはその歩行行動をモデル化していくための指標を得る必要がある。従来の歩行モデルは、歩行者を質点と捉え質点に働く力を運動方程式で解くなどの方法がみられる(文4、5)。この方法では実際的な歩行行動を詳細に再現することが困難である。この理由として、扱う要因が限定され単純化されていることにもよるが、実際の歩行特性が不明であるのに働く力を磁力や引力に似たようなものとして扱っている点も見逃せない。心理的な影響を指標化できればより実際的なモデルの構築が可能となる。

歩行行動における心理的な影響の指標化に関しては歩行者の回りに形成される空間領域の概念も有力な指標の一つである。Sommerのパーソナルスペースの概念(注1)に代表されるように、この領域は意識や行動の動機付けとなる見えない空間で、他者との距離を決定する上で重要な働きを持つものと考えられる(文6~8)。しかし、こうした領域を定量化しようとした研究は極めて少ない。例えば、領域の主要寸法である前方長さを定量化するには、まず歩行者が進路上にある障害物に対して回避行動を開始する地点(以下、回避行動開始点と呼ぶ)と障害物との距離(以下、前方回避距離と呼ぶ)を計測することが不可欠となる。この回避行動開始点の判定には、主として、身体の動きの変化や歩行軌跡の変化、あるいは相対速度や相対加速度などが考えられる。既往研究にもこれらを手がかりに回避行動開始点と思われるものを判定しようとしたものがいくつか見られる。中村・吉岡らの1980年前後の一連の研究(文2、3、9)は、群集歩行における回避行動を観測し相対速度や相対加速度から回避行動特性を分析したものである。また、この研究では歩行者の領域の概念を導入しその定量化を試みた先駆的な研究である。しかし、領域(衝突領域)の定量化にあたって必要な回避行動開始点に相当

するものは判定者の主観的判断に依存しているものと推測される。その後歩行者の領域に関する既往研究は見られない。1980年代後半に入って、中ら（文10）は、交錯する歩行者は互いにある時間後にある距離に接近することが予想されたときに回避行動（方向変化・位置変化）を起こすとする仮説をたて、地下街広場の交錯歩行を観測し分析を行っている。しかし、この研究も調査・分析方法からみて対向者以外の周辺歩行者の影響も考えられることや回避行動を行っていない歩行軌跡に対する扱いが不明である。

こうしたことから単独歩行者において歩行者の歩行環境（ここでは障害物）から受ける心理的影響を指標化するには、まず実際の単独歩行者の歩行行動を観測し、それを一定精度で自動的に計測し解析する手法を確立することである。さらに、回避行動開始点を数理的に判定する方法を開発し、心理面の影響に対応する有力な物理量と考えられる前方回避距離を計測する必要がある。この際、障害物の種類が、物体と人間、人間の身体の向き、移動の有無などによってどのように影響を与えるかを把握することは、歩行行動を理解する上で重要なことである。

こうしたことから本研究はより安全で快適な歩行空間の実現に向けての基礎的な研究と位置づけされる。

（注1）

Sommerは、身体を取り囲むある特定の空間領域の存在を想定し、これを Personal Spaceと呼んだ。このPersonal Spaceは、侵入者が入れないようにその人の身体を取り囲む見えない石鹸の泡のような空間の領域であって、この中に他人が侵入してくると不快に感じる。Territoryとは異なり個人と共に移動し、様々な条件下で拡張され収縮されるものであるとした（文6）。

（2） 目的

本研究ではSommerらの提案した歩行者の領域の存在を仮定し、この定量化を目指すと共に、将来的にはこれを利用し、通路におけるすれ違い、障害物の回避などの行動を説明する歩行モデルを構築することを目指している。このため映像より得られる歩行軌跡データから回避行動開始点を特定し、前方回避距離の定量化を計ることによって障害物の歩行行動への影響を明らかにしようとするものである。

具体的には、本研究では画像処理を応用した歩行解析の方法を確立し、数理的に回避行動開始点を判定する方法を検討する。さらにこの判定方法に基づいて各障害物の前方回避距離を計測し、統計的な分析から障害物の歩行行動への影響を明らかにする。また、この結果を利用して簡単な回避歩行モデルを提案し若干の

考察を行う。

2. 研究方法

本研究では、回避行動を、歩行者が進行方向にある障害物に対して衝突や接触を避けて一旦進路を変更し、すれ違い後には再度進行方向に進路を修正し直すまでの行動であると定義する（図-0.2.1）。この回避行動を捉えるために、まず左右を建物もしくは車道により拘束され、進行方向が固定されているが幅員は十分にある通路での歩行特性を把握し、次にこの通路に障害物が存在することによって歩行行動がどのような影響を受けるかを明らかにする。ただし、観測範囲は撮影機器の性能から進行方向に約15mという制約を受けていて、この範囲の外

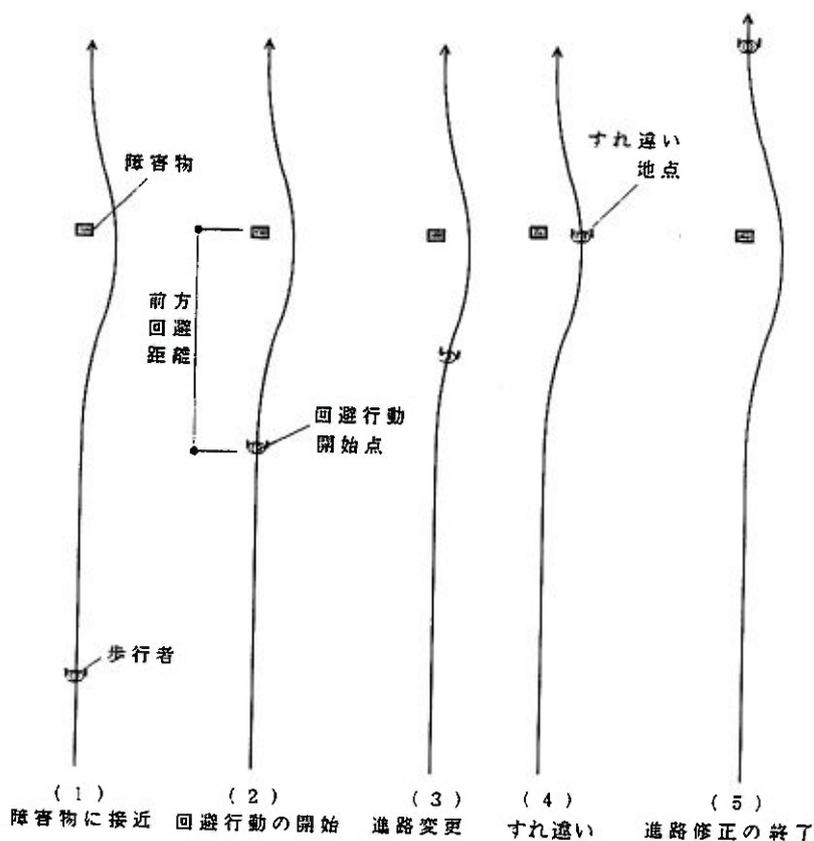


図-0.2.1 回避行動

は分析の対象外である。

研究の方法は以下の通りである（図-0.2.2）。

まず、実際の単独歩行者の歩行行動を捉えるためフィールド調査を行い、街路における歩行者の様子をビデオ映像として収録する。この映像を適切な「画像処理」をして歩行行動を解析できるようにする手法を開発する。ここで扱う歩行は進路上に障害物のない自由歩行とし、その特性を把握する（第一章）。次に障害物を

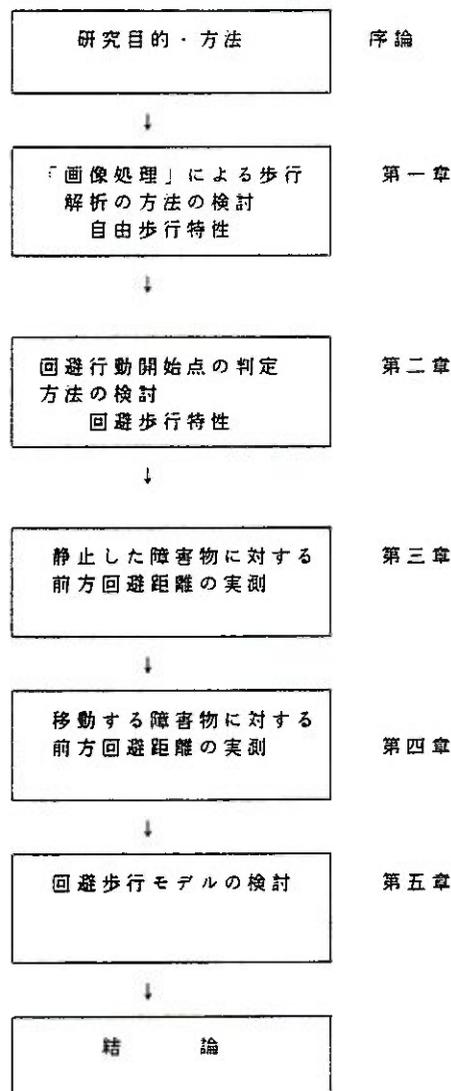


図-0.2.2 研究のフロー

回避する歩行行動を対象とし、自由歩行と回避歩行を比較することによって回避歩行の特性を明らかにする。さらにこの結果を利用して回避行動開始点の判定方法の検討を行い、歩行特性に基づいた判定基準を選定する（第二章）。この判定基準に基づいて回避行動開始点を特定し前方回避距離の定量化を計る。まず静止した障害物を対象にした前方回避距離を定量化をすることで、物体と人間、特に人間の身体の向きによって歩行行動への影響に違いがあるかを検討する（第三章）。さらに静止した障害物に対して、移動する障害物についても同様にその前方回避距離を計測する。ここでは障害物が静止したものと移動するものとの歩行行動への影響に違いがあるかについて検討を行う（第四章）。

また、これらの結果を用いて歩行者の領域を要因とする簡単な歩行モデルを提案する。これに基づいて歩行者の領域の大きさを類推し、このモデルの問題点についての考察を行う（第五章）。

3. 既往の研究

歩行に関する研究は、運動・生理、動作分析、群集流動、行動特性などを研究対象にして、医学、体育学、人間工学、建築・都市計画学、造園学、交通工学など幅広い分野で研究が行われている。

建築の分野における歩行研究を概観すると、前述したように最も研究が進展したのは人間の群集状態での性状を研究対象としたものである（文11～14）。

群集の研究は、群集の密度と速度の関係を数式化した木村の先駆的な研究に始まり（文16）、伊藤の一方向流の研究、小関、中らの交錯流へと発展し、その研究成果は駅ホーム幅や改札口等、施設の規模計画・配置計画に寄与した（文17～21）。また、戸川らによる避難計画、避難施設の研究などへと発展している（文22～26）。

歩行の人間工学的研究は昭和30年代に始まった。当初は住空間を対象としたもので、個々の歩行者の動作分析から適正な単位空間規模を算出している（文27、28）。その後、各種条件での歩行運動に着目した研究もみられた（文29～31）。また、中島のすれ違い歩行解析や、高木の建築内における経路選択などの人間個々の歩行特性に着目した研究もみられた（文32～34）。

本研究に関連する単独歩行者の歩行行動を扱った既往の研究には、

- ①回避行動を現象的に分析するもの、
- ②歩行者の領域をとらえようとするもの、
- ③回避行動をモデル化しようとするもの

のように三つに大別されるが、以下にその抄録を述べる。

(1) 回避行動を現象的に分析した研究

回避行動を現象的にとらえた研究には、実験室実験によるものと、実際の歩行者の動きをとらえようとしたフィールド調査がある。

清家、高浜（文28）は、狭い空間を歩いている人の行動を実験的に検討し幅員が狭くなるにつれて動作に歪が生じることを明らかにした。すなわち、通路が狭くなると、手を振って歩かなくなったり、腰を捻って歩くようになる。すれ違う場合も同様で、狭いと歩行速度が遅くなり、肩の動きにも歪が出る。

中島（文1）は、通路幅を変えた歩行実験を行い、歩行軌跡の分析からすれ違い動作の構造を検討した。歩行軌跡におおむね4つの変化がみられことから、すれ違い動作は動作意志決定地点、動作開始地点、壁体最接近地点、すれ違い終了地点からなるとした。対向者の相互距離が平均1.2mになるとすれ違い動作が開始され、この値は通路幅が小さいほど大きくなる。しかし、4つの変化点の判定は判定者の主観的判断に依存しており、すれ違い動作意志決定地点と動作開始地点と

の違いについても明確ではない。

実際の歩行を観測したものには群集歩行を研究対象にしたものが多いが、個々の歩行者に関連した研究に戸川（文33）や戸沼ら（文34）による対人、対物の側方距離の観測がある。

戸川によると、街角ですれ違う場面にとられる2者間の側方距離の観測では、かすって通る人は少なくかなり前から回避行動を始めるが、この判断については明かでない。

小西（文35）は、地下道の自然歩行の観測から、歩行者は左側通行と壁から離れて歩く傾向があることを現象的にとらえた。また、通路の幅員を変化させた実験から壁から離れて歩く傾向があることを検証している。通行位置の非対称性が生じる原因については歩行者が身体の右側に多くの空間を要求する空間維持要求に基づいていると考察している。

また、通路上にある障害物に対する回避行動をとらえたものに以下の研究がある。金澤（文36）は、道路空間の有効利用の観点から電柱による歩行行動への影響を、回避距離、歩行障害面積、歩行速度から解析している。解析では蛇行開始点と電柱との距離、蛇行開始点と蛇行の頂点との距離から歩行障害面積を算出しているが、蛇行開始点の定義については明記されていない。

月尾、赤塚ほか（文37）は、障害物（フラワーポット）が歩行者に与える影響を検討している。障害物を両側に避けることができる位置、左右どちらか一方にしか避けられない位置および置かないときの歩行パターンをメモーションカメラで撮影している。分析は各コマごとの歩行者の位置を2次元座標で記録して速度と経路を得ているが、座標変換の方法については明記されていない。

中村（文2）は、歩行者の回避行動を観測し、後述する中村・吉岡による数理モデル（文献39参照）に基づき解析を試みている。具体的には、出勤者が建物の2ヶ所の入り口に向かう途中の広場に円柱の障害物を設置し、これを回避する歩行者の様子を16mmシネカメラで撮影し、0.2秒間隔のデータを得ている。各経路における歩行軌跡の特徴や歩行速度と方向の変動過程などを分析し、物的環境要素が歩行行動にもたらす影響特性の定量化を図ることによって、モデルの要因（サブ特性と呼ばれている）を解釈しようとした。回避歩行は、障害物の手前10m付近で既に進路変更が開始され、3.5m手前までに回避行動の動作は終わり、直ちに目的地方向への復帰動作にかかるとしている。また、歩行者が歩行していないゾーンの存在を指摘し、これを障害物が持つ緩衝領域と判断している。個体が近傍者を持たず人的干渉を受けないとする定義には問題があるが、他の障害物、建物の空間構成など他の要因も含まれていることから、障害物のみの影響を受けた回避行動と言うより、広義の歩行者行動の研究と言える。

こうした研究は、次項(2)の研究も含めていずれも回避行動の映像を目視によって判断するもので、測定精度や再現性に乏しいものが多い。

(2) パーソナル・スペースに関連する研究

群集流動の中にいる歩行者は、周囲の歩行者とある間隔を保ちながら歩行する。これは、人間にはその周囲には見えない泡のような空間の領域があって、この中に他人が侵入してくると不快を感じるためである。このいわば個人のポータブルな領土というべき空間がパーソナル・スペース (Personal Space) と呼ばれるものである。パーソナル・スペースが心理学的概念であるのに対して、同じようなものを人間工学的、あるいは運動学的に衝突を避けるための余裕空間としてとらえたものにフルーインによる緩衝空間の概念がある (文11)。

こうした観点から歩行者の相互干渉をとらえようとした研究はきわめて少ない。

加藤、上原、中村、吉岡 (文3) は、二ヶ所の横断歩道上の群集対向流動を観測している。その観測データは16mmシネカメラで撮影し、歩行者頭部位置を予め写し込まれている基準点を用いて座標変換して1秒間隔の実座標を求めている。最短距離者との間に確保される相対位置は、異方向に進む者の間では密度が高くなると側方は接近して楕円状になるが、進行方向は常に約2m前後の間隔を確保し、対向者との衝突を避けようとしていた。同方向に進む者の間でも進行方向に約2mを保っており、密度が高まると前者に追従しやすいように前方を縮めた。また、一定の密度条件下で個人間の距離をできるだけ確保するように各歩行者が互い違いに位置する形になり、相対位置の分布は円形に近づく。一方向流、対向流の場合について群集の密度レベルに対応して相対位置を示してあるが、対向者に対する前方間隔は、そのデータの処理法からみて正面ではなく斜め前方の相対間隔と判断される。

吉岡、中村ら (文9) は、歩行者天国と横断歩道 (文献3の加藤、上原らの調査と同じもの) における歩行者間の回避行動と確保距離を観測し、歩行者間の確保間隔モデルを設定し観測データによる具体的推定から、歩行者間の相互干渉の特性を検討している。回避行動のデータ処理は、16mmシネカメラで撮影した映像を約0.8秒毎に実座標に変換し、各時刻での歩行者間の相対位置、相対速度、相対加速度を求め、全歩行者の平均値で分析している。また、歩行者が各個体のまわりに確保しようとする他者との間隔については、基本領域と衝突領域の異質な2種の領域の大きい方によって決まるとしている。対向者間における回避行動の特徴と、確保される距離の分析から、歩行者同士が対向する場合の行動は以下のように解釈される。確保したい間隔は前方4.5m、側方1.7m程度の紡錘状をした形態を持ち、実際の回避行動はこの間隔内に他者が入り込まないようになされる。両者の前方距離が10m前後になると回避行動を開始する。そして、双方が確保領域の前方先端部に達するころには回避の進路はほぼ一定方向に定まって、そのまま確保領域を侵すことなく進み、両者の前方距離が3m程度近づき互いの回避が確実になると進路を本来の目標方向に戻しつつすれ違うというものである。

この研究は、本論が目指す歩行研究に近いものであるが、主に以下の点で相違がある。第一に、調査の性質から周辺歩行者の干渉が予想され単独歩行者の回避行動とは言い難い。第二に、回避歩行の処理方法から考えて自由歩行的な歩行軌跡も含まれている。第三に、回避行動開始点については判定されていない。第四は位置座標値の計測や回避行動開始点に相当するものの判定では測定者の主観的判断に依存している。第五に、回避行動と確保される領域との関係が明かでない、ことが上げられる。

また、上記の2つの研究とは異なり、回避行動を心理的な面から扱ったものに染川の研究(文38)がある。染川は、障害物を自転車群として、予め撮影しておいたスライドを被験者に呈示し、障害物の視覚的な影響についてのアンケート調査を行っている。歩行者の進行方向と直交する方向の距離が大きくなる(障害物から遠くなる)につれて、「障害物と判断し始める点」と「障害物を避け始める点」の進行方向の距離はいずれも急激に短くなる。判断する点と避け始める点は4m～5mの差がある。また、道の通りやすさや快適さなどについては、心理評定の等評定値線を結ぶことによって通路上の障害物が及ぼす影響の範囲とその障害の程度を推定している。この研究では障害物の種類によってこの影響の範囲が変わるのか、あるいは歩行者側の行動が障害物の影響を受けてどう変わるのかについては考察されていない。

(3) 歩行モデルに関する研究

ここで扱う歩行モデルは、建築空間の平面形を一つのネットワークに抽象化して人間行動を調べるのではなく、平面的なひろがりをもつ建築空間の中に各歩行者の互いに相異なる質的な動きを時々刻々表そうとするものがある。この種の研究は極めて少ないが、実際の歩行を調査・解析したものに基づく研究とそうでないものに大別される。

中村、吉岡ほか(文39)は、歩行者の行動を規定する要因として、物理的環境因子、各個人の固有条件因子、他人の動きのかかわる因子を上げ、これらのサブ特性関数の線形結合として歩行状態を規定するモデルを提案している。サブ特性として「希望速さ性」「境界減速性」「目的地指向性」「境界回避性」「境界平行性」がある。この数理モデルは、各個体があたかも外力の場の中におかれた粒子のごとく運動すると考えたもので、外力の場はその個体の周囲の環境条件および自己の歩行目的等に対応して形成される。しかしこのモデルでは、ある歩行者が別の歩行者を追い越したり、回避したりする動きについては十分に表すことを対象としていない。

平井、西田(文4)による数学モデルは簡単な運動方程式である。群集の中の1個体に注目し、それを質量の質点とみなしたうえで、質点に5つの力が働き、あ

る抵抗を受けながら移動するモデルで歩行を表現している。5つの力とは、(1)進行方向に働く力で常に一定とされる前方推進力、(2)視野の範囲内にいてある距離以内に他の歩行者がいるとき働く反発力、(3)他の歩行者の進路を予測し、衝突を避けるための他個体回避力、(4)壁からの反発力、(5)大きな一定の目標に向かう力である。しかし、これらの力の計算の際に必要な定数は、実際の歩行を調査・解析したものによっていない。

また、岡崎(文5)のモデルは、磁気モデルと運動方程式を主体としたモデルである。このモデルは、先述の平井のモデルとは力の与え方が異なる。この場合は、歩行者に正の磁極を与え、壁や柱や手摺などの障害物に正の磁極を、歩行者の目指す目的地には負の磁荷を与えることにより、歩行者(質点)に働く磁力を合成し、位置、速度、加速度を得るものである。ただし、通路に平行なまっすぐの磁力線が特別に考えられている。また、回避を行うのは相対速度と身体の幅をもとに考えられた長方形の区間に限られる。シミュレーション結果では、すれ違い後も軌跡を元に戻すことなく壁に沿って歩行しており、実際の回避歩行との比較調査もまだ行われていない。

伊藤、柳田ほか(文40)は、シミュレーション空間をコンピューター上のディスプレイ上に表示することから、ピクセル単位でのメッシュで表し、メッシュ単位でポテンシャルを持つとしている。ポテンシャルとは、障害物が人間を排除しようとする力であり、数段階に分けられた等高線で空間を表している。目的地に向かう力および他の歩行者が持つ力も同様の考え方でポテンシャルを与え、これらを合成した等高線図で表された空間の中を歩行者は進む。移動の際のメッシュの選択は、(1)ポテンシャルの低いメッシュのうち目的地に近いものを選ぶ、(2)進んできた方向と選んだメッシュの方向が違う場合は、数回進行方向に進んだ後、選んだ方向に移動する、の順序で行われる。実際の回避行動との対応関係は考察されておらず、シミュレーション結果にとどまっている。

実際的な交錯歩行の観測から衝突回避行動の構造的な理解につなげようとするものに小塚、中の研究(文10)がある。交錯する歩行者は、互いにある時間後にある距離に接近することが予想されたときに回避行動(方向変化・位置変化)を起こすとする仮説をたてた。仮説の中の数値を測定するため地下街の広場での観測データから解析している。交錯歩行を「すれ違い」と「交差」の2パターンに分類し、交差歩行では、「歩行者は約2秒後に50cmの距離に接近すると予想したとき回避行動を起こす」としている。すれ違い歩行の場合、距離を変数としているがその性格から考えると多少無理がある。また、交差の場合、回避行動を開始したといえる現象と数値との関係についてはここでは明かにされていない。

歩行モデルに関する研究は、いずれも回避行動の構造を説明しようとするもので、その要因とするものは基本的には変わらない。

(4) まとめ

以上、歩行者の回避行動に関する既往研究を概観し問題点を指摘した。

今後の研究に求められるものは、単独歩行者の歩行環境から受ける心理的影響を指標化することである。このためにはまず実際の単独歩行者の歩行行動を観測し、それを一定精度で自動的に計測し解析する手法を確立することである。さらに、回避行動開始点を数理的に判定する方法を開発し、心理面の影響に対応する有力な物理量と考えられる前方回避距離を計測する必要がある。

こうした心理面の影響の指標化を行うことによって回避歩行のモデル化のための知見と基礎資料を得ることができると考えられる。

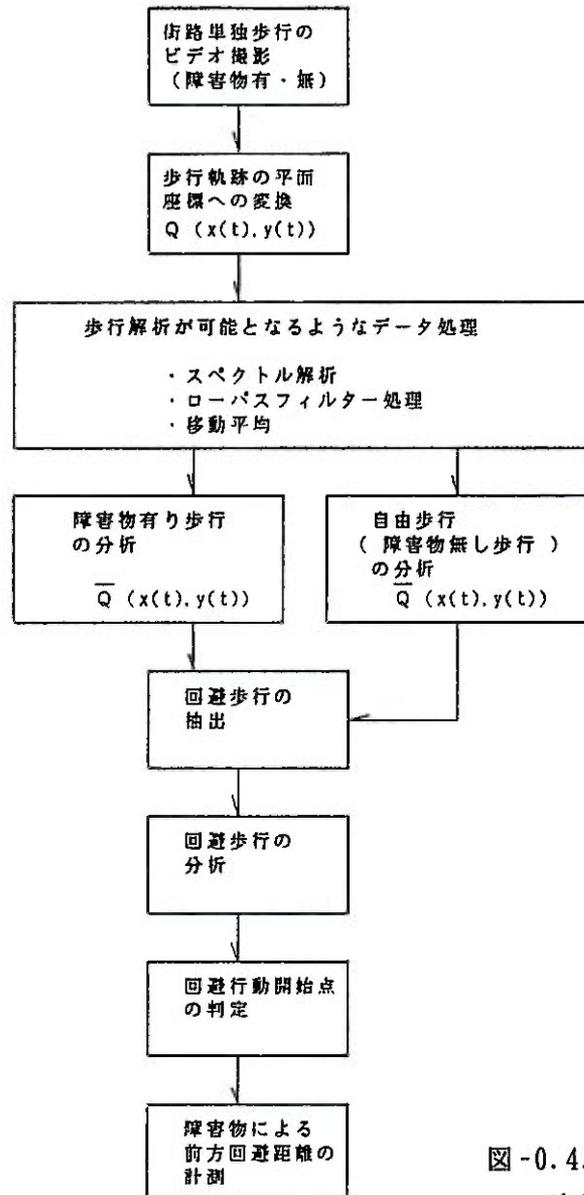


図-0.4.2

実験調査および分析の概要

4. 調査方法の概要

(1) 実験調査および分析の概要

実験調査では朝夕のラッシュ時を除く時間帯に、オフィス街の街路（歩道）に障害物を設置し、この障害物を回避する歩行者の行動を観察した（注2）。分析の対象とする歩行者は街路を一定方向に進行する単独歩行者で、歩行者の行動が障害物以外の歩行者から影響を受けない条件のもの（複数で歩行しているもの、別の対向者のいるものなどを除く）だけを採用し記録した。また、障害物を設置する際、街路の中央に置かず、若干どちらかの側に偏って設置したのは、歩行者の進路の延長線上に障害物がある割合を増やすためである（注3）。

こうした実験調査は障害物を変え1988年から1992年までに計4回（4シリーズ）実施した。

歩行者の回避行動は、VTRカメラで障害物を含め手前およそ15mの範囲を撮影した。カメラは歩道に面する建物側に頭上10m～20mに設置した（写真-0.4.1）。

実験調査およびこれに続く分析の概要を図-0.4.2に示す。平面座標は図-0.4.3に示すように便利のために障害物を原点とし、歩行者の進行方向（街路に平行）をx軸の正方向にとっている。y軸は進行方向の左手方向を正とする。時刻については歩行者が $E_x = -14m$ （観測範囲の限界）に達した時を $t=0$ とする。

なお、第一章では体育館内にT字廊下を製作し障害物を置かない歩行実験も行っている。

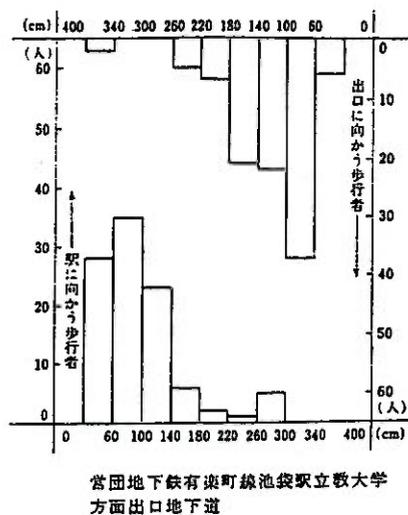
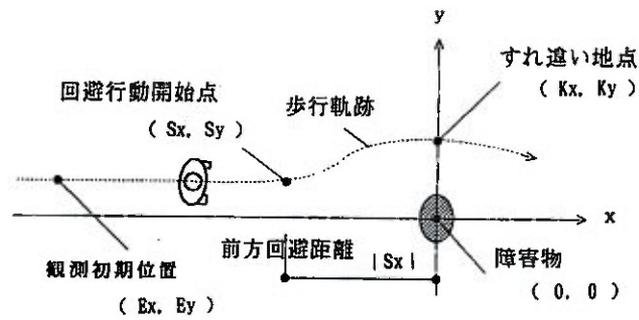


図-0.4.1 通行位置の分布（文献35による、幅員4m）



写真-0.4.1 街路歩行調査
 (街路とカメラ設置の状況、実験シリーズ3)



原則として、 $E_x = -14\text{m}$ 、 $K_x = 0\text{m}$

図-0.4.3 歩行者の回避行動開始点と障害物

(注2)

本研究ではフィールド調査によって歩行者の回避行動をとらえることを基本としている。戸川(文33)によれば、自然歩行と実験歩行とは全く別のものであるという。また、実際に唯一被験者を応募して体育館で行った実験シリーズ4の実験歩行でも非常に不自然な動きをする被験者が多く観察された。

実験調査場所の中には測定範囲に街路樹や街路灯などの点在するものがあるがこれらは歩道に一定間隔(断続的)に設置されているものである。このため、幅員が適度に広い場合、歩行者が受ける影響は比較的少ないと判断している。

(注3)

小西(文35)によれば、歩行者は通路の中央を歩かず左側を歩く傾向があることを観察調査や実験から明らかにしている。通路の幅員によって異なるが、図-0.4.1に示すように幅員が4 m程度であれば壁面から0.6~1.0mを歩く歩行者が最も多い。

(2)障害物の種類

障害物は<モノ>と<ヒト>に大別される。ヒトは歩行者に対する向きで3種類、動きの有無で2種類である(表-0.4.1)。ヒトについては体格の似た成人男子(着衣状態での身長170 cm、最大体幅53 cm、胸部厚(体厚)35 cm程度)が交替で障害物となった。

表-0.4.2は実験シリーズごとの障害物の組み合わせを、図-0.4.4は後述する実験調査場所を示す。

(3)実験調査場所

実験調査場所の選定にあたっては以下の内容を考慮した。

歩行者に気づかれずに自由歩行の状況下での回避行動を観測するため、

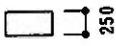
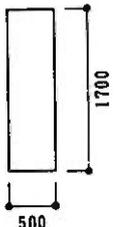
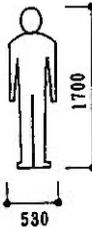
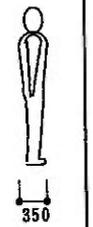
- ・単独歩行者を観測できる適度な通行量があること
 - ・回避行動をするための適度な有効幅員であること
 - ・歩行者に気づかれないようにVTRカメラを頭上の適度な高さに設置できること
- などの条件を満たす通路を選定した。

こうした条件に加えて画像処理に関連して以下に示すような条件もある。

- ・調査時間内に建物や木立によって日影ができないこと
- ・木立によって歩行者がかくれないこと

以上の条件をすべて満たす通路は極めて少なく、調査場所の選定にはカメラ設置

表-0.4.1 障害物の種類と大きさ

	モノ	ヒト	
平面図			
側面図			
向き		前向き 後向き	横向き
動き	無し	無し 有り	無し

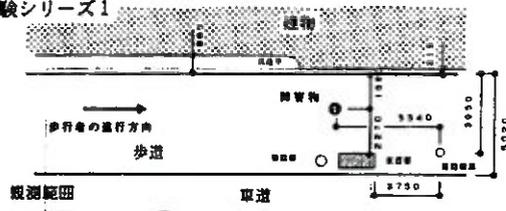
(単位: cm)

表-0.4.2 実験調査シリーズと障害物の組み合わせ

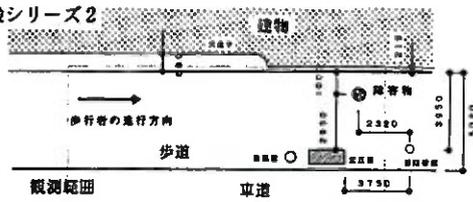
シリーズ No.	シリーズ 別呼び名	有無	障害物 動き	属性	向き	タイミング	通路形態	備考
1	自由歩行	無し	—	—	—	—	直線街路 A	幅0.5m、高さ1.7m
	モノ	有り	無し	物	—	—	直線街路 A	
	ヒト前向	有り	無し	人	前	—	直線街路 A	
	ヒト後向	有り	無し	人	後ろ	—	直線街路 A	
2	モノ	有り	無し	物	—	—	直線街路 A	幅0.5m、高さ1.7m
	前向静止	有り	無し	人	前	—	直線街路 A	
	4.5m移動	有り	有り	人	前	4.5m	直線街路 A	
	9m移動	有り	有り	人	前	9m	直線街路 A	
3	自由歩行	無し	—	—	—	—	直線街路 B	幅0.5m、高さ1.7m
	モノ	有り	無し	物	—	—	直線街路 B	
	後向静止	有り	無し	人	後ろ	—	直線街路 B	
	後向移動	有り	有り	人	後ろ	8m	直線街路 B	
4	L字型	無し	—	—	—	—	T字廊下	幅員1.84m、自由歩行
	L字型	無し	—	—	—	—	T字廊下	

注) タイミングとは障害物が動き出す時点での歩行者との距離。

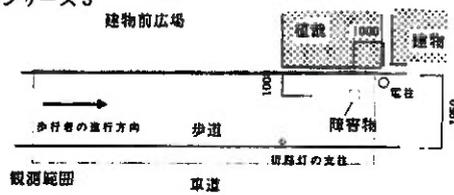
(1)実験シリーズ1



(2)実験シリーズ2



(3)実験シリーズ3



(4)実験シリーズ4

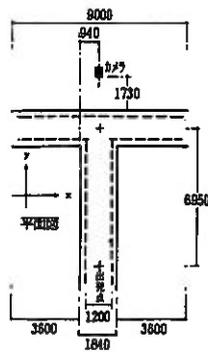


図-0.4.4 シリーズ別実験調査場所

の許可の問題と絡んで大変苦慮した。また調査時期によっては黒い服装の影響や歩行者の頭髪（はげ）の影響もある。本論で扱うデータはこうした条件に適合したものであることを付記したい。

(4)被調査者の概要

本研究で記録した単独歩行者の総数は4シリーズで10,000人以上あるが、この中から性別による影響をなくすため（注4）回避行動が完結した男性歩行者に限定して分析を行う。

被調査者数（注5）は種々の条件によって各障害物で異なるが平均約60人、総計約1000人である。

（注4）

文献8によれば、人が必要とする空間は男女差があり女性より男性の方がより広い空間を必要とする。

（注5）

小荷物を持っている場合、小荷物を持たない者と体幅（文献41）がほとんど変わらない者については回避行動も変わらないものと判断して被調査者に含む。

5. 論文の構成

本論文は、画像処理技術を応用して歩行行動を分析する手法を確立すると共に歩行者が進路上にある障害物を回避し始める地点の数理的判定方法を検討している。さらにこの判定基準に基づいて回避行動開始時の歩行者と障害物との距離を定量的に求め、障害物の種類による歩行行動への影響を統計的に検討している。また、この結果を利用して簡単な回避歩行モデルを提案し若干の考察を行っている。

本論文は大きく五章からなるが以下に各章ごとにその概要を述べる。

序論は、研究の目的とその意義、実験調査方法について述べている。

従来の建築空間・都市空間の設計においては、測定可能な指標を設計目標に据え、心理的な満足感やその反対の圧迫感というような質的な指標は測定が非常に困難であることを理由に切り捨てられてきた。しかし、種々の測定技術の向上により、主に心理的な影響を受ける量を測定できる状況が作られつつある現状では、人間が心理的に必要としている条件も合わせた空間設計を進めていくことが求められる。こうした状況にあって、歩行者の行動と歩行者を取りまく周辺環境の相互関係を明らかにする研究が進めば、心理量が歩行に及ぼす影響を独立に評価できるようになり、快適性等を考慮した歩行空間のあり方も明確になると考えられる。しかし、歩行行動の中でも直進する歩行に次いで基本的な回避行動ですら、既往の研究の中で周辺環境の歩行者に及ぼす影響が十分に明らかにされているとは言いがたい。この行動は心理的な影響を大きく受ける行動であるので、歩行の研究の進展には欠かせない対象となる。そこで本研究では単独歩行者の障害物回避行動に的をしぼり、障害物による歩行行動への影響について分析を行うものである。

単独歩行者への心理的な影響を指標化するにあたって、これを説明する有力な概念には歩行者の回りに形成される領域がある。この領域は意識や行動の動機付けとなるもので他者との距離を決定する上で重要な働きを持つものと考えられる。本研究ではこの領域の寸法、とりわけ歩行者前方の寸法を定量的に捉える必要があるとの判断から、まず回避を始める地点での歩行者と障害物の距離、前方回避距離を定量化することとした。この前方回避距離を障害物ごとに計測し、障害物の種類によってどのように歩行行動に影響を受けるのかを明らかにする。研究方法としては、フィールドにおける一般歩行者を対象とした調査を行い、いくつかの障害物に対する単独歩行者の前方回避距離を実測することにした。

第一章は、ビデオ映像として記録された歩行者の動きを画像処理し、かつ行動分析に利用できるようにデータを加工するための過程について検討している。

この過程は、画像の二値化により頭部だけを選択的に抽出し、その位置の時間

変化を求める部分と、画像データおよびその処理作業に内包される雑音を取り除いて、歩行者の動きの分析に用いることができるものに加工する部分の二つに分かれる。本章では主に後者の過程を扱い、録画されたビデオ映像から、画像処理装置を利用し、座標変換および歩行軌跡データのローパスフィルターによる処理を行うことによって、歩行における頭部の軌跡を自動的に一定の精度で計測する方法を構築した。

また、これに基づいて2種類の歩行実験・調査を対象にして歩行の軌跡・速度・加速度について解析した。街路歩行の特性の分析では、x（前後）方向に2.0 Hz前後、y（左右）方向に1.0 Hz前後の歩行特有の周期的な動きがある。L字型廊下での折れ曲がり歩行と街路歩行を比較すると、カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後のデータから求められるy方向の最大加速度が、L字型廊下歩行では街路歩行の約1.4倍となることを明らかにした。

このように画像処理を応用することによって計測者に依存することなく、また大幅なデータ解析の作業量の軽減を図って歩行行動の分析が可能となる。

第二章は、歩行者が進路上に置かれた障害物を避ける行動を対象に、従来の測定者の主観的判断によるものではなく、数理的に回避行動開始点を判定する方法を検討している。

歩行調査は、通路上に障害物がある場合と、無い場合（自由歩行）について行い、両者の軌跡の比較から回避歩行が行われたと判断される歩行（回避歩行）軌跡を選定し、回避歩行の特性を明らかにした。回避歩行では障害物とのすれ違いまでに2つの曲がりがあり、進路を変更する回避行動開始点での「曲がりⅠ」と、すれ違い付近で進路を再修正する「曲がりⅡ」とからなることを示した。曲がりのためのy方向の最大加速度は曲がりⅠに比べて曲がりⅡの方が大きい。

こうした知見を踏まえ回避行動開始点の判定基準は、① y方向の変位量による方法、② y方向の速度変化に着目した方法、③ y方向の最大加速度による方法、④ 歩行軌跡の曲率による方法の4つとし、軌跡データを、a) カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後のもの、b) カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後さらに歩行者固有のy方向の周期で移動平均したものの2種類について、それぞれの特性及び関係を分析した。

この結果、回避行動開始点の判断基準として、カットオフ振動数1.2 Hzのローパスフィルター処理後さらに歩行者固有のy方向の周期で移動平均した軌跡データの曲率による方法が最も適当であるとの結論を得た。

第三章は、静止した障害物に対する回避行動の観測データの分析に基づいて前方回避距離を計測している。

実験調査は、静止した物体<モノ>と「ヒト」を障害物とした。ヒトの場合、さらにその身体の向きで<前向き>、<後ろ向き>、<横向き>の3種類とし、

計4種類の障害物に対する回避行動を調査した。解析では回避行動開始点をカットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理後さらに移動平均した軌跡データについて曲率の判定基準による方法で判定し、この判定位置と障害物との距離である前方回避距離を求めた。

解析の結果、歩行者は障害物の種類によって回避行動を開始する距離を決定していることが分かった。障害物がヒトの場合、身体の向きが歩行行動に影響する。前方回避距離は身体の向きが、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉、〈ヒト前向〉の順に大きくなり、それぞれの平均値は6.74m、6.82m、8.84mである。また、障害物が人間と同じ高さ、幅を持つ物体の前方回避距離の平均は7.34mで、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉より大きく、〈ヒト前向〉よりも小さい。さらに、同じ障害物であれば通路幅員などの歩行環境や調査時期が多少変化しても前方回避距離は変わらないことを他の実験調査結果との比較から明らかにしている。

第四章は、前章で行った静止した障害物に対して、移動する障害物を対象としてその前方回避距離を計測している。

実験は、障害物である静止したヒトが歩行者がある地点を通過した時点で移動を開始する方法とした。ヒトの向きは前向きと後ろ向きの2種類とし、前向きの場合には移動を開始する地点を3種類とした。障害物が移動する「前向のヒト」と「後向のヒト」の二つの実験ケースを解析した結果、以下のことが明らかになった。

歩行者の回避行動特性として、歩行速度は定速で推移し、歩行軌跡に関する全体的傾向は静止した障害物と同様な傾向を示す。前方回避距離は「前向のヒト」と「後向のヒト」のいずれも、障害物であるヒトが定速で移動していても、静止した障害物の場合の前方回避距離と変わらない。歩行者が回避行動を開始する距離は障害物が静止、移動にかかわらず前方回避距離の平均値が7m～9mになった場合である。この距離は、既往研究での他人の接近にともなう心理的・生理的影響が強くなる距離と一致している。

第五章は、第三章と第四章で得られた障害物別の前方回避距離とその知見に基づき簡単な回避歩行モデルをたて、その考察を行っている。

モデルは歩行者自身と障害物の領域の2つの大きさを前方回避距離が規定されると考えたものである。すなわち、歩行者は自分自身の領域を確保し、かつ対向者（障害物）の領域を必要以上に侵さないことで相互の心理的影響を軽減するために、領域の先端はいわゆるセンサーのような機能を持っていて、歩行者と対向者の領域の先端が触れることによって回避行動が開始されると考える。さらに、回避行動中には領域のセンサー機能（衝突領域）は必要なくなり、これに変わって群集歩行でも確保される基本領域がすれ違い地点の側方距離を決めることになるというものである。

このモデルに基づく歩行者の領域の大きさは前方長さが4.4 m、後方長さが2.4 m、側方長さが2.3mである。障害物が物体の場合もヒトと同様に領域が存在するとし、今回使用した直方体（幅0.5m、高さ1.7m）の場合には領域の前方長さは2.9mで、歩行者の領域の側方長さおよび後方長さとはほぼ同じであった。

6. 本論で使用する用語

本論で使用する用語は次の通りである。

- ・ 回避行動

歩行者が進行方向にある障害物に対して衝突や接触を避けて一旦進路を変更し、すれ違い後には再度進行方向に進路を修正し直すまでの行動

- ・ 自由歩行

通路上に障害物がない場合の歩行

- ・ 回避歩行

通路上に障害物がある場合の歩行の中で、観測初期位置 E_y からさらに障害物に接近したりもしくは自由歩行と同等と見なされる歩行を除いた歩行

- ・ 歩行軌跡

歩行者頭部の座標を平均的な頭部の高さで、通路に平行な平面上の座標および時刻歴として示したもの

- ・ 歩行者の領域

人間工学的、あるいは運動学的に捉えた歩行者の身体を取り囲む特定の空間領域で、基本領域と衝突領域からなる。本論では特に断らない限り衝突領域をいう。この領域の先端に障害物の領域が触れると歩行者は回避行動を開始する。基本領域は衝突領域より小さく、群集密度が比較的高い条件でも確保される空間領域

解析にあたっては障害物を設置する位置を原点とし、通路に平行な軸を x 軸とし歩行者の進行方向を正とする。 x 軸に直交する軸を y 軸とし歩行者の左手側を正、右手側を負とする（図-0.4.3参照）。回避歩行における各位置は以下の座標で表される。ここで、時刻 t_i ($= i \cdot \Delta t$, $i = 0, 1, 2, \dots, N_r - 1$) における位置座標を $Q(x(t_i), y(t_i))$ 、歩行者が $E_x = -14\text{m}$ に達した時を $t_i = 0$ とする。

- ・ 観測初期位置 $E = (E_x, E_y)$ 、原則として $E_x = -14\text{m}$

- ・ 回避行動開始点 $S = (S_x, S_y)$

自由歩行から進路を変更し障害物に対して回避行動を始める地点

- ・ すれ違い点 $K = (K_x, K_y)$

歩行者の X 軸方向の座標軸で歩行者と障害物の座標値が一致する点、
 $K_x = 0$

- ・ 前方回避距離： $|S_x|$ (m)、回避行動開始時の障害物と歩行者の x 軸方向距離

- ・ スタート点：移動する障害物の実験で、実験者であるヒト（障害物）が $t_i = 0$ の時に立っている位置

- ・ Δt ：時刻歴データの間隔時間（基本的に $1/30\text{sec}$ ）

- ・ N_r ：時刻歴データの数

- i : i 番目の時刻歴を示す添字
- $V_x(t_i)$: x 方向速度 (m/sec)

$$V_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - X(t_{i-1})) / 2\Delta t$$
- $V_y(t_i)$: y 方向速度 (m/sec)

$$V_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - Y(t_{i-1})) / 2\Delta t$$
- $|V(t_i)|$: 歩行の速さ (m/sec)

$$|V(t_i)| = \sqrt{V_x(t_i)^2 + V_y(t_i)^2}$$
- $A_x(t_i)$: x 方向加速度 (m/sec²)

$$A_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - 2X(t_i) + X(t_{i-1})) / (\Delta t)^2$$
- $A_y(t_i)$: y 方向加速度 (m/sec²)

$$A_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - 2Y(t_i) + Y(t_{i-1})) / (\Delta t)^2$$
- $|A(t_i)|$: 加速度の大きさ (m/sec²)

$$|A(t_i)| = \sqrt{A_x(t_i)^2 + A_y(t_i)^2}$$
- $P(t_i)$: 歩行軌跡の曲率

$$P(t_i) = ((Y(t_{i+2}) - Y(t_i)) / (X(t_{i+2}) - X(t_i)) - (Y(t_i) - Y(t_{i-2})) / (X(t_i) - X(t_{i-2}))) / (X(t_{i+1}) - X(t_{i-1}))$$

第一章

歩行解析への画像処理の応用

1.1 目的

本章では、ビデオ映像として記録された歩行者の動きを画像処理し、かつ行動分析に利用できるようにデータを加工するための過程について検討している（注1）。この過程は、画像の二値化により頭部だけを選択的に抽出し、その位置の時間変化を求める部分と、画像処理作業に内包される雑音を取り除いて、歩行者の動きの分析に用いることができるものに加工する部分の二つに分かれる（図1.1.1）。第一の過程は1.3節に示されるもので、分析機器に組み込まれたソフトによる処理であるために変更できないものであり、第二の過程が本章で主に扱うものである。この過程では以下のような問題がある。

データは、ビデオ録画・再生装置の画面分解能の影響から、画像処理装置による二値化処理で歩行者の頭部の動きでは起こり得ない細かい振動を含んだものとなる。このため軌跡の定性的な分析には支障がないが、歩行の曲がりなど、動きの変化の判断材料となる加速度などの定量的な分析には不適切である。そこでローパスフィルターによる処理を行なうことで不必要な高振動数成分を除く方法を検討した。

また、分析の目的によっては歩行にともなう横ゆれを取り除いた方が分析上有効である場合がある。そこで、撮影したビデオ画像から歩行解析に有用なデータを得る方法を検討し、上述のような歩行者の頭部の軌跡を自動的にまた一定の精度で計測する方法を構築する。

（注1）

人間の歩行を写真やビデオなどの画像として記録することは容易であるが、その画像から歩行の解析に必要な数値データを一定の精度で自動的に収集することは容易ではない。従来、人間の歩行を8ミリ・16ミリフィルムやビデオに録画にして、その特性を調査することは行われてきた。しかし、位置データは、舗装コンクリートブロック等を利用して足の接地位置を目測で読みとったり、頭部を位置解析機により一コマずつ目視で計測するもので、そ

の精度・誤差にはあまりふれられていない。また、データ処理の時間間隔は、人間が一步踏み出すのにかかる約0.5秒ごとのものや、1/24~1/30秒ごとの画像が得られていてもデータ処理は約0.5~1.0秒間隔であり、歩行特有の前後左右のゆれなどの解析に有用なデータを得られていないものが多い（文1~4）。

1.2 実験調査内容

歩行実験・調査は、以下に述べるオフィス街の歩道上で行う歩行調査（以下、街路歩行と記す）と研究の初期に補足的に行った体育館にT字型廊下を仮設して行う歩行実験（以下、T字廊下歩行）の2種類がある。

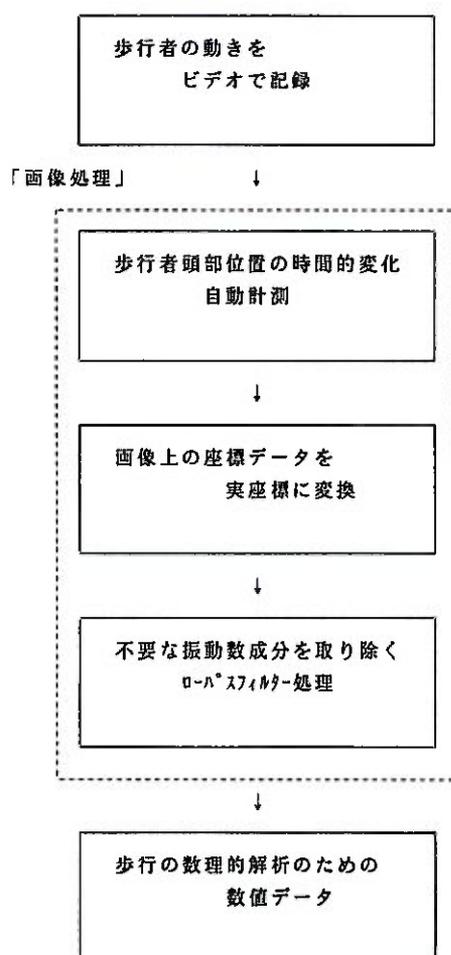


図-1.1.1 歩行解析に利用できる数値データを加工するための過程

a. 街路歩行調査（実験シリーズ1）

図-1.2.1に示すように、オフィス街の歩道（有効幅員約3.95m）で撮影に気付いていない一般の歩行者を対象としてその歩行の様子を頭上14.45mからビデオカメラで撮影した（写真-1.2.1）。被験者は成人男子42名である。位置を校正するための基準点は24点（高さ1.68m）を設定した。

b. T字廊下歩行実験（実験シリーズ4）

仮設した廊下を被験者がL字に曲がる様子を頭上8.5mからビデオカメラで撮影した（図-1.2.2、写真-1.2.2）。廊下内法幅を1.20mと1.84mの2種類とし、両側に高さ1.82mで壁を設け天井は設置していない。被験者は男子大学生で、年齢・身長・利き腕を実験前にアンケート調査した。被験者数は1.84m幅が38名、1.20m幅が40名である。位置の基準点は48点（24ヶ所各々に対し高さ1.65mと1.75mの二種類）を設定した。

1.3 画像処理装置

本章で用いた画像処理装置は、モニター上の画像を縦192ドット×横256ドットの画素に分割し、任意に指定できる輝度の閾値で各ドット（画素）を白と黒に2値化した画像として出力する（写真-1.3.1）。さらに、任意の位置に設定したウインド内に存在する黒（もしくは白）のドット群の重心を計算し常にその重心にウインドの中心を重ねることで目標物を自動追尾しながらその位置を計測できる。位置計測の最小時間間隔はウインド1個の場合は1/30秒、2個の場合は1/15秒である。この性質を利用して上方から歩行を撮影した画像を処理すると、頭髪部は身体の他の部分や通路に比べて輝度が低いことが多く、追尾している範囲に頭髪部より輝度の低い部分がなければ頭髪部の動きを容易に計測できる。なお、画像処理装置から出力される座標（縦と横方向）の最小単位は、装置の画像分解能（縦192×横256で単位はドット）の制約を受けている。装置のシステム構成を図-1.3.1に示す。

・画像処理装置 ： ㈱朋栄IV540

・録画と再生の機器

ビデオデッキ：一般的なVHSのビデオデッキ

ビデオカメラ：撮像素子インターライン転送方式CCDカメラ、有効画素数水平
510×垂直492、每秒像数30枚、レンズ：焦点距離8mm、
絞りF1.4～F360、自動絞り調節範囲30～100,000luxほか、一
般的なビデオカメラも使用

ビデオバッファ： ㈱朋栄FA-300

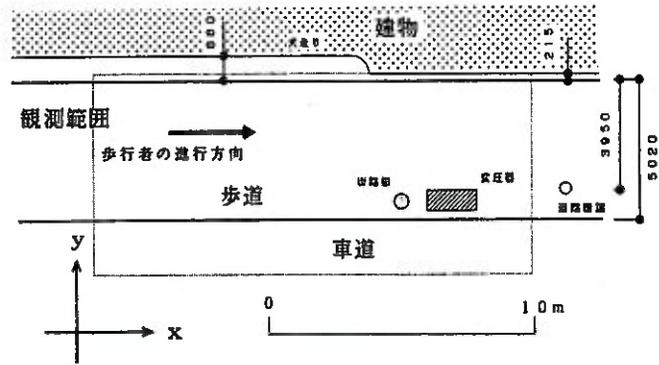


図-1.2.1 街路歩行調査の平面図（表-0.4.2のシリーズ1に対応）

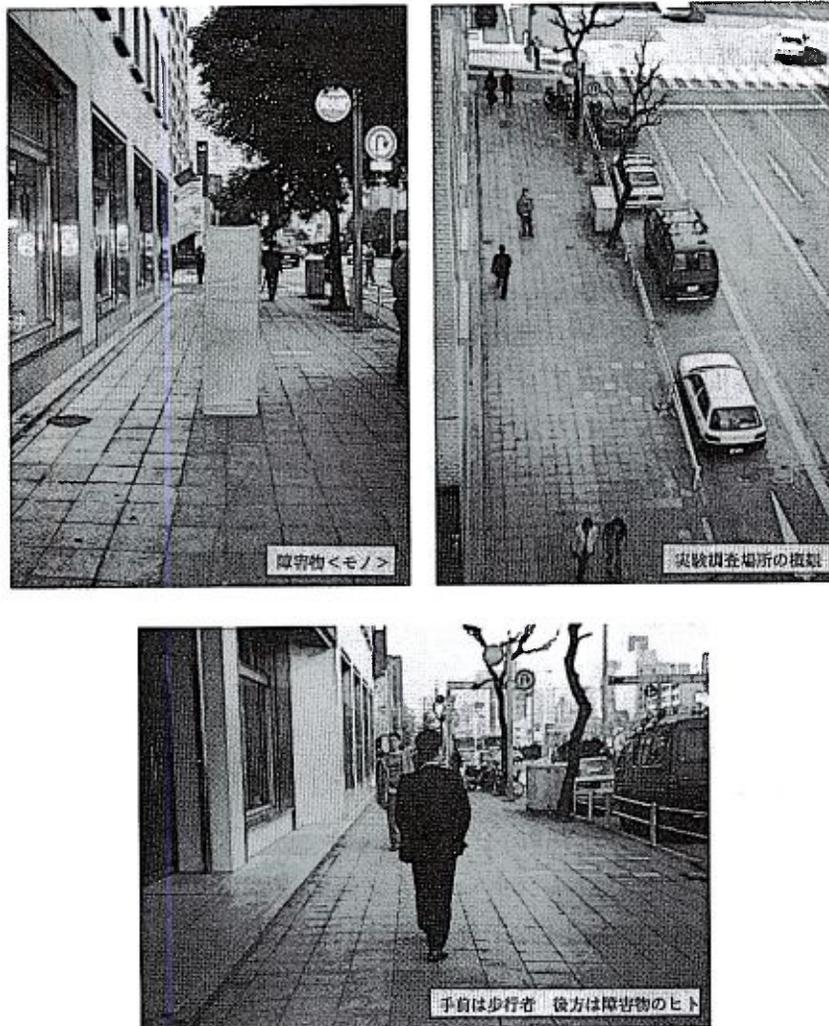


写真-1.2.1 街路歩行調査（実験シリーズ1）

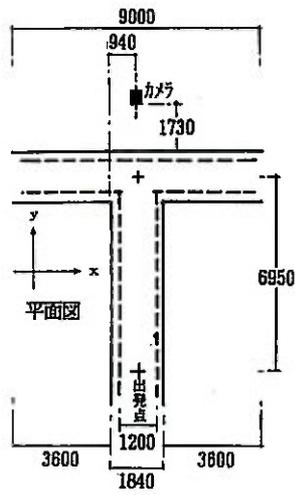


図-1.2.2 T字廊下歩行実験の平面図（実験シリーズ4）

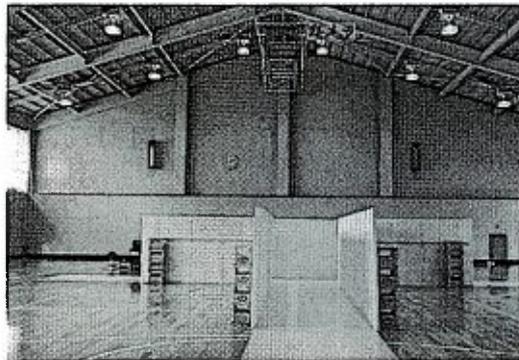


写真-1.2.2 T字廊下歩行実験
（実験シリーズ4、廊下とカメラ設置の状況）

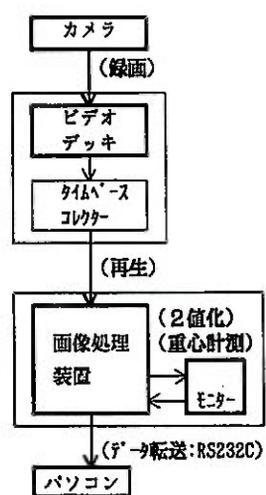
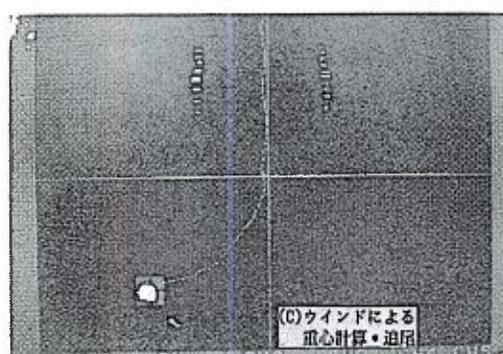
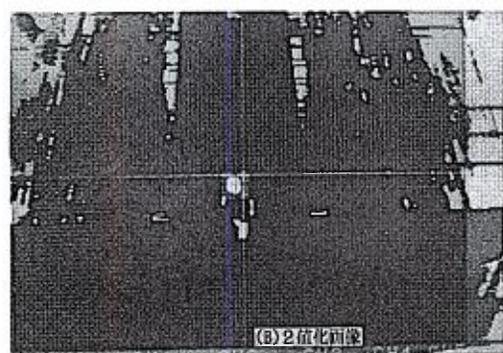
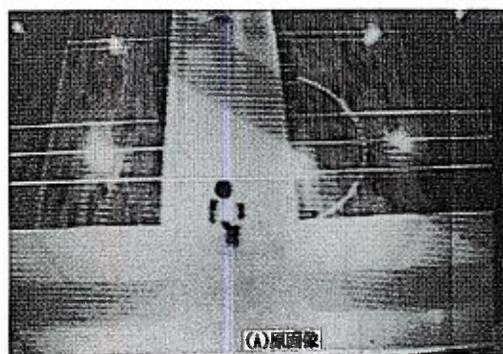


図-1.3.1 画像処理の概略フロー
(図-1.1.1の「第一の過程」)

写真-1.3.1 画像処理(2値化)と重心計算・追尾

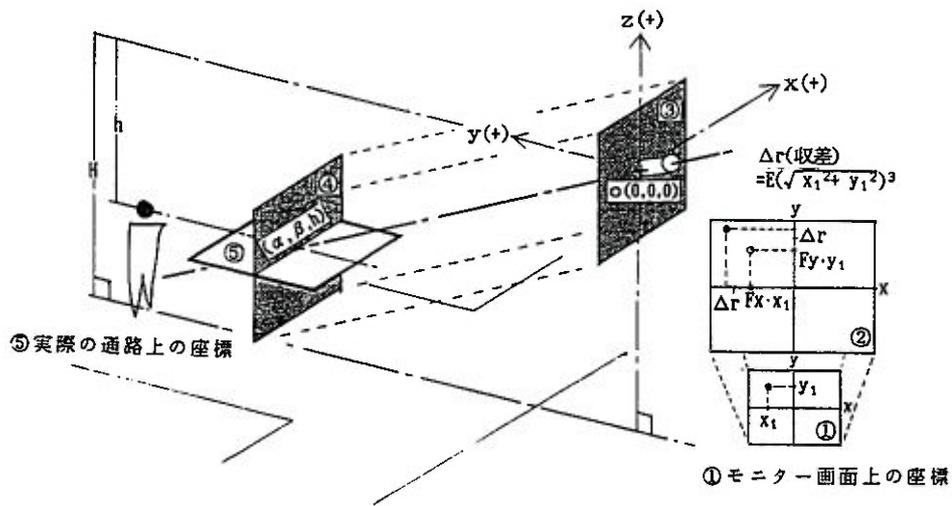


図-1.4.1 座標変換の模式図

表-1.4.1 変換係数の収束計算結果例

実験・調査	係数	スケール変換の係数		球面収差補正の比例定数	Wズ'中心軸回りの回転角	Wズ'中心軸と基準点高さγでの水平面との交点	
		F_x	F_y	E	ω (°/7°)	(x座標)	(y座標)
T字廊下	幅1.84 m	26.86	26.04	1.34×10^{-9}	-0.0182	62	4401
	幅1.20 m	26.84	25.96	1.34×10^{-9}	-0.0138	100	4396
街路歩行		37.50	38.30	1.0×10^{-10}	-0.0250	-21850	1760

1.4 座標変換の方法

モニター画面上の座標を歩行者が位置する実際の通路上の座標へ変換する方法を以下に説明する。ビデオカメラで撮影し2次元座標となった座標から人体頭部が移動する3次元座標を再現することは不可能であるが、ここでは頭部の上下動を無視し、基準とした水平面を移動するものとして変換を行っている。座標変換そのものは図学の基本理論に沿っており、本研究の目的とは直接関係ないが、既往の研究(文1~4)ではほとんど説明されていないこと、かつレンズの球面収差などの補正が必要なためここで記述する。

本報では、座標変換のため以下の4点を考慮した。

- a. スケール変換：モニター上の座標(単位ドット)を通路上の実寸(単位mm)に変換
- b. カメラ投影角：レンズの中心軸と通路面のなす角が垂直でないことの補正
- c. レンズの球面収差の補正
- d. レンズ感光素子の縦横比が1:1でないことの補正

(1) 変換式

図1.4.1に示すモニター上(画面①)の座標 (X_1, Y_1, Z_1) (ただし $Z_1=0$)から通路上(画面⑤)座標 (X_5, Y_5, Z_5) (ただし、 Z_5 は歩行者頭部の高さ)を得るため以下の画面②~④を仮定し、図学ならびに光学の基礎理論を用いて変換した。

画面②：画面①にレンズ収差の補正とスケール変換(ドットをmmに変換)をおこなった画面

画面③：レンズ中心軸に垂直でレンズ位置が原点となる画面

画面④：レンズ中心軸と画面⑤(歩行者頭部の高さでの水平面)の交点まで画面③を平行移動した画面

画面①→画面②：収差補正とスケール変換

$$X_2 = (1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^2) \times (h/\gamma) \times F_x \times X_1$$

$$Y_2 = (1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^2) \times (h/\gamma) \times F_y \times Y_1$$

$$Z_2 = Z_1 = 0$$

E：レンズの球面収差の補正係数

$(1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^2)$ は、レンズ収差を補正するため X_1 、 Y_1 に掛ける倍率である。レンズ中心軸近傍のガウス領域から発してレンズを通った光は入射角 $\theta \approx$

0であるから、

$$\sin \theta = \theta$$

と近似できる。しかし、ガウス領域以外ではサイデルの五収差の理論を用いてテ
ーラ展開の第2項までとり、

$$\sin \theta = \theta - (1/3) \theta^3$$

と近似できる範囲では、収差 Δr は、

$$\Delta r = e \cdot \theta^3 \quad (\text{ただし } e \text{ は収差の比例定数})$$

で求められる。レンズから像平面までの距離を L 、レンズ中心軸と像平面との交
点 O と (X_1, Y_1) との距離を r' 、 $r = \Delta r + r'$ 、屈折角を θ' とすると、
 $\theta \approx \theta'$ よって $\theta \approx (r' / L)$ と近似して、

$$\Delta r = E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3$$

$$E \text{ は比例定数} = e / L^3$$

よって、

$$\begin{aligned} r / r' &= \Delta r / r' + 1 \\ &= 1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^2 \end{aligned}$$

が得られる(文5)。

F_x, F_y : モニター上の X 方向と Y 方向のスケール変換係数

h : 歩行者頭部の Z 軸座標 $= H + (K - (c/2))$

K : 歩行者身長(自己申告値あるいは推定)

c : 頭高(既存文献(文6, 文7)から一定と判断し、平均値250mmを用いた。)

H : 通路面の Z 軸座標

γ : 基準点の Z 軸座標

h / γ : 基準点を基にして求めた各係数を歩行者身長に合わせて補正する係数

なお、 Z 軸座標 h, H, γ はレンズ位置を原点として与える(いずれも符号はマ
イナス)

画面② → 画面③

画面①(モニター上)の座標と通路上の座標を結び付けるため、レンズの位置
を原点とする Z, X, Y 軸まわりの回転をおこなう(文8)。行列式は下記となる。

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \omega & -\cos \phi \sin \omega & \sin \phi \cos \phi \\ +\sin \phi \sin \phi \sin \omega & -\sin \phi \sin \phi \sin \omega & \\ \cos \phi \sin \omega & \cos \phi \cos \omega & \sin \phi \\ \sin \phi \cos \omega & -\sin \phi \sin \omega & \cos \phi \cos \phi \\ -\cos \phi \sin \phi \sin \omega & +\cos \phi \sin \phi \cos \omega & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$

ϕ : X 軸まわりの回転角

$$= \sin^{-1}(\beta / (\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}))$$

ϕ : Y 軸まわりの回転角

$$= \sin^{-1}(\alpha / (\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}))$$

ω : レンズ中心軸まわりの回転角

X軸, Y軸まわりの回転角はレンズの中心軸の方向ベクトル(α, β, γ)のみで決まるが、Z軸まわりの回転角はレンズの中心軸まわりの回転も含むので方向ベクトルだけではなくレンズの設置方法によっても変化する。

画面③→画面④

$$\begin{pmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} + (h/\gamma) \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}$$

(α, β, γ) : レンズ中心軸と基準点高さでの水平面との交点のX、Y、Z座標

画面④→画面⑤

$$\begin{aligned} X_5 &= (h/Z_4) \times X_4 \\ Y_5 &= (h/Z_4) \times Y_4 \\ Z_5 &= Z_4 \end{aligned}$$

(2) 変換のための定数決定法

座標変換では、6つの係数 ($E, F_x, F_y, \omega, \alpha, \beta$) が未知であり、これらを求めるためには画面①および⑤上で最低6点の座標が既知である必要がある。そこで、通路上に基準点として合計24ヶ所 (直径140mmの黒球を通路面から一定の高さに設置) を実測して設置し録画した。そして、これらの基準点の実測値と変換値 (画面⑤上) の誤差の2乗総和が最小になるように係数を定めた。

(3) 座標変換の係数決定と誤差の検討

二種類の歩行実験・調査の係数を座標変換の方法を用いて決定した結果が表4.1である。

基準点ごとの誤差の平均 (誤差の2乗総和を基準点数で除した値の平方根) ならびに誤差の最大は、街路歩行調査の場合は、平均57mm (最大104mm)、またT字廊下歩行実験の場合は、廊下幅1.84mでは平均14mm (最大28mm)、廊下幅1.2mでは平均16mm (最大31mm) である (注2)。

(注2)

基準点の誤差の原因としては、測定機・実験装置・座標変換に関するものが考えられる。

①測定機に関する事項としては次のものが考えられる。

- ・光の方向による2値化レベルの変動。
- ・ビデオデッドの回転ヘッドの回転誤差。
- ・カメラ感光素子の感度のバラツキを無視。
- ・カメラ感光素子の配列のバラツキを無視。

これらの誤差は相対的に小さく全体の精度にはあまり影響しない。

- ・画面素子の分解能の低さ

は約22mmから63mmにもなり、誤差をその1/2以下にすることは不可能である。

②実験装置に関する事項は、壁の設置位置の誤差、カメラと調査・実験場所の位置関係の測定誤差などで約10mm程度であると判断される。

③座標変換に関する事項は、入射角の近似、カメラ中心軸を画面上の座標(0,0)とすることなどがある。

また、歩行者計測の誤差の原因としては人体寸法の近似に関するものがある。人体寸法は歩行中の動的寸法を使うべきであるが測定が難しいため、実験では静的寸法を、調査では一定値(平均身長168cm)としている。また、頭部の歩行時の上下動(約20~50mm程度)と頭部径の標本間の差(約10~30mm程度)を無視している。

1.5 歩行軌跡データの扱い方

(1) 座標軸と時間軸の設定方法

街路歩行調査の座標軸を設定するにあたっては、歩行者の動きに対して障害物を設置する固定位置を原点とした。ここで進行方向速度を正として扱えるように、通路に平行な軸をx軸とし、歩行者の進行方向側を正とする。また、x軸に直交する軸をy軸とし、歩行者の左手側を正、右手側を負とする(図-1.2.1、図-1.5.1参照)。時刻については歩行者が $E_x = -14m$ に達した時を $t=0$ とする。

(2) 歩行軌跡と速度・加速度の定義

本論では歩行者頭部の座標を平均的な頭部の高さで、通路に平行な平面上の座標 $Q(x(t_i), y(t_i))$ で表し、この座標の時刻歴として示したものを歩行軌跡と呼ぶことにする。

時刻 $t_i (= i \cdot \Delta t, i = 0, 1, 2, \dots, Nr-1)$ における歩行の速さ $|V(t_i)|$ 、速度成分 $V_x(t_i)$ 、 $V_y(t_i)$ と加速度の大きさ $|A(t_i)|$ 、加速度成分 $A_x(t_i)$ 、 $A_y(t_i)$ については(1.1)から(1.6)式に定義する。 Δt は時刻歴データの時間間隔、 Nr は時刻歴データの数である。

$$V_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - X(t_{i-1})) / 2\Delta t \quad (1.1)$$

$$V_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - Y(t_{i-1})) / 2\Delta t \quad (1.2)$$

$$|V(t_i)| = \sqrt{V_x(t_i)^2 + V_y(t_i)^2} \quad (1.3)$$

$$A_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - 2X(t_i) + X(t_{i-1})) / (\Delta t)^2 \quad (1.4)$$

$$A_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - 2Y(t_i) + Y(t_{i-1})) / (\Delta t)^2 \quad (1.5)$$

$$|A(t_i)| = \sqrt{A_x(t_i)^2 + A_y(t_i)^2} \quad (1.6)$$

ただし、

$V_x(t_i)$: x 方向の速度(m/sec)

$V_y(t_i)$: y 方向の速度(m/sec)

$|V(t_i)|$: 歩行の速さ(m/sec)

$A_x(t_i)$: x 方向の加速度(m/sec²)

$A_y(t_i)$: y 方向の加速度(m/sec²)

$|A(t_i)|$: 加速度の大きさ(m/sec²)

$i = 0, 1, 2, \dots, N_r - 1$

図-1.5.1は街路歩行調査での典型的な標本の歩行軌跡を示したものである。ただし、ここで用いるデータ $Q(x(t), y(t))$ は1.4節の座標変換処理をしたものである。このデータによる歩行軌跡を特に「原歩行軌跡」と呼ぶことにする。歩行者は図の左から右に進行し、通路縁が2本の実線で示されている。図-1.5.2は歩行速度と加速度の時刻歴を示したものである。計測システムの画面分解能の影響を受けて図のように軌跡は細かい振動を含んだものとなる。そこで加速度などの定量的分析に必要なデータを得るため、低域通過型のフィルター（ローパスフィルター）を用いて不必要な高振動数成分を除くこととした。

(3) 歩行軌跡のスペクトル解析

原歩行軌跡に含まれた歩行特有の振動数成分を検出し、速度・加速度の解析に不必要な高振動数成分を取り除くための基礎資料を得る目的から歩行軌跡のスペクトル解析を行った。歩行特有の振動数成分として考えられる主なものは、①2足歩行特有の動作にともなう前後・左右のゆれ、②回避行動などの①よりさらに低振動数と考えられる振動特性、の2つに分類できる。本論では、歩行速度や加速度などの定量的分析に不必要な高振動数成分を取り除くにあたって、主として①の横ゆれや前後の動きの低振動数成分を検出することを第一の目的とする。なお、②については後述するように時刻歴データの計測時間が10数秒程度で解析を行うには十分でないと判断される。

本項では、横ゆれや前後の動きに関連する振動数が比較的低い振動数であると考えられることから、低振動数付近のよく見える変位のフーリエ振幅スペクトル

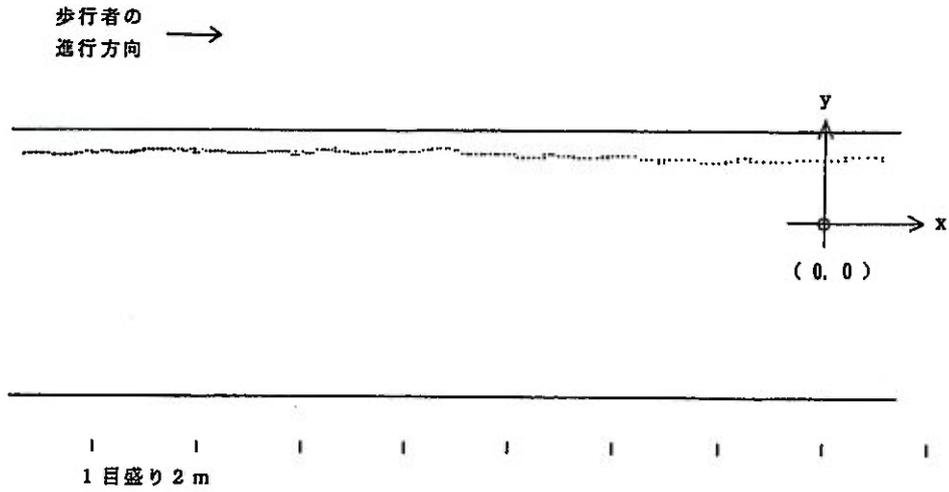


図-1.5.1 原歩行軌跡（街路歩行調査の標本、実験シリーズ1）

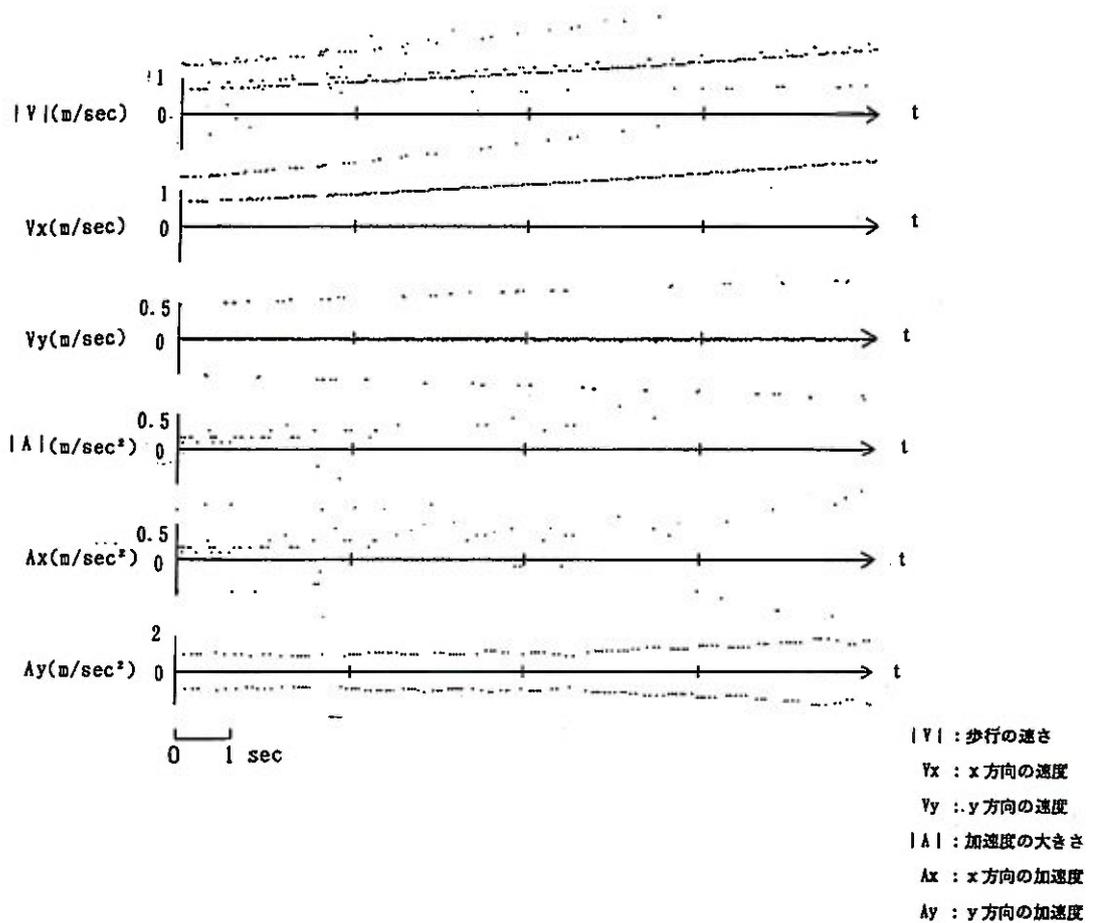


図-1.5.2 原歩行軌跡の速度・加速度の時刻歴（図-1.5.1と同一の標本）

でスペクトル特性を考察することとした。

x、y座標方向の変位 $U_x(t_i)$ 、 $U_y(t_i)$ については(1.7)から(1.8)式に定義する。すなわち、図-1.5.3に示すように各変位はスペクトル解析で使用するデータの初期値と終期値を結んだ直線を基準とした。

$$U_x(t_i) = X(t_i) - (X(t_0) + (i \cdot (X(t_{Nd-1}) - X(t_0))) / (Nd - 1)) \quad (1.7)$$

$$U_y(t_i) = Y(t_i) - (Y(t_0) + (i \cdot (Y(t_{Nd-1}) - Y(t_0))) / (Nd - 1)) \quad (1.8)$$

ただし、

$U_x(t_i)$: x方向の変位(m)、 $i = 0, 1, 2, \dots, Nd-1$

$U_y(t_i)$: y方向の変位(m)

Nd : スペクトル解析で使用するデータ数

時間関数 $U_x(t_i)$ 、 $U_y(t_i)$ について高速フーリエ変換(FFT)によるフーリエ振幅スペクトルを求めた(文10)。ただし、時刻歴データの時間間隔 Δt は $\Delta t = 1/30(\text{sec})$ 、時刻歴データの数 N_r は $N_r = 350 \sim 450$ であるため、スペクトル解析で使用するデータ数 N_d は、横ゆれや前後の動きの振動数成分を検出することが可能と判断された $N_d = 256 (= 2^8)$ とした。

このためスペクトル解析における計測時間 T は、次式

$$T = N_d \cdot \Delta t$$

より $T = 8.53$ (sec) である。

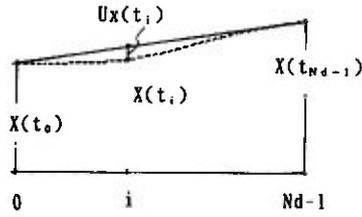
これより分析可能な最小振動数 f_{min} は

$$f_{min} = 1/T$$

より $f_{min} = 0.117$ (Hz) となる。

(4) 変位のフーリエ振幅スペクトル

図-1.5.4は図-1.5.1と同じ標本Aと他の標本Bのフーリエ振幅スペクトルを示したものである。x方向の変位 $U_x(t_i)$ の場合、いずれの標本も図-1.5.4に示すように、卓越振動数は2.0Hz付近と、それよりさらに低い振動数成分に見られる。一方、y方向の変位 $U_y(t_i)$ の場合、図-1.5.5に示すように、いずれの標本も卓越振動数は1.0Hz付近とそれよりさらに低い振動数成分に見られる。1.0Hz付近のピークは歩行に特有な横ゆれでありx方向の2.0Hz付近の振動と対応する。それより低い振動数成分のピーク(a)はゆるやかな曲がりと考えられる。



$$U_x(t_i) = X(t_i) - (X(t_0) + i \cdot (X(t_{Nd-1}) - X(t_0)) / (Nd - 1))$$

$$U_y(t_i) = Y(t_i) - (Y(t_0) + i \cdot (Y(t_{Nd-1}) - Y(t_0)) / (Nd - 1))$$

ただし、

$U_x(t_i)$: x 方向の変位(m)

$U_y(t_i)$: y 方向の変位(m)

Nd : スペクトル解析で使用するデータ数

$i = 0, 1, 2, \dots, Nd-1$

図-1.5.3 スペクトル解析における変位の模式図

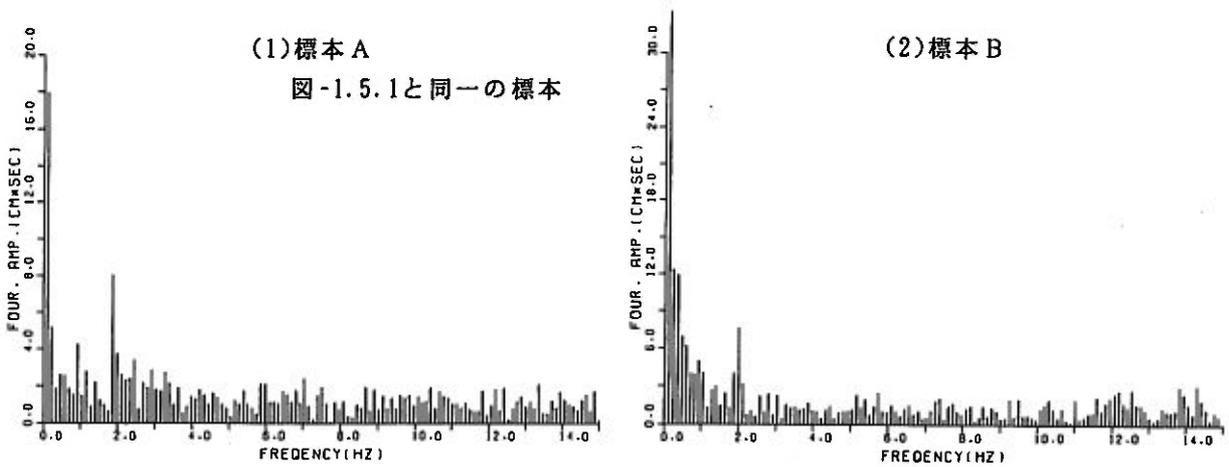


図-1.5.4 街路歩行における x 方向変位のフーリエ振幅スペクトル

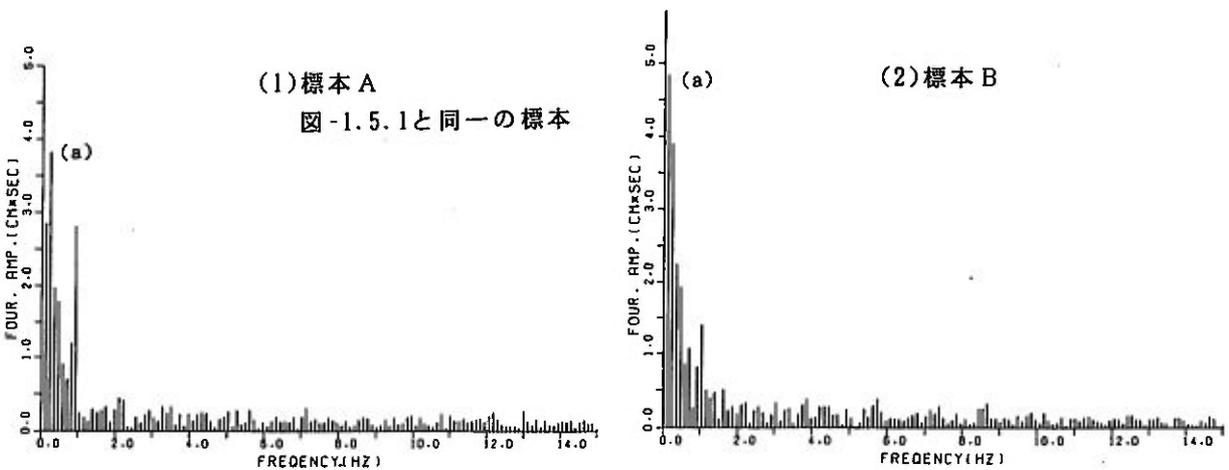


図-1.5.5 街路歩行における y 方向変位のフーリエ振幅スペクトル

図-1.5.6は街路歩行調査の標本集合($n=42$)における $U_y(t_i)$ での1.0Hz付近の卓越振動数の相対度数を示したものである。分布に若干の標本間の差はあるが1.0Hz前後にピークがある。 $U_x(t_i)$ における2.0Hz付近の卓越振動数と対応する歩行に特有な前後動作と横ゆれと判断されるのでこれらを残し、これ以上の高振動数成分については不必要なものとして取り除くこととした。

(5) ローパスフィルターによる処理

不必要な高振動数成分は、 x 方向については卓越振動数が2.0Hz前後であることから3.0Hz以上を取り除くこととした。さらに y 方向についても同様に、横ゆれによる1.0Hzを残し他を不必要な成分とみなして1.2Hz以上を取り除くこととした。

いくつかのデジタル・フィルターを検討した結果、直線位相特性を実現できるFIR型(Finite Impulse Response、非巡回型)のローパスフィルターを用いて処理することにした。窓関数はハミング窓とした。カットオフ振動数は、 x 方向の前後の動きを残すものとして3.0Hz、 x 方向の前後の動きを取り除き y 方向の横ゆれを残すものとして1.2Hzの2種類とした。

図-1.5.7は同じ標本でローパスフィルター処理前のデータ $Q(x(t_i), y(t_i))$ と処理後のデータ $\hat{Q}(x(t_i), y(t_i))$ を用いた歩行軌跡を示したものである。また、図-1.5.8、図-1.5.9は処理後のデータを用いた $U_x(t_i)$ および $U_y(t_i)$ のフーリエ振幅スペクトルを示したものである。カットオフ振動数3.0Hz、1.2Hzのいずれもカットオフ振動数以上の高振動数成分はほぼ取り除かれている。

なお、このフィルターの種類については目的に応じて選択すべきものと考えられる。本研究で用いた機器では、画面の分解能が高くないため速度等の算出においては単純に差分がとれず、データにフィルターをかけることになったが、画面の分解能が上げればこの問題は解決する。

1.6 歩行実験・調査の解析

1.3~1.5に述べた画像処理の手法を利用して、街路歩行調査とT字廊下歩行実験に関して歩行特性の基礎的な分析を行った。

(1) 作業の省力化と再現性

作業の省力化を具体的に示すと、T字廊下の歩行実験の場合では、延べ約5万回におよぶ膨大な頭部重心の計測とパソコンへのデータ転送の作業が2人1組で

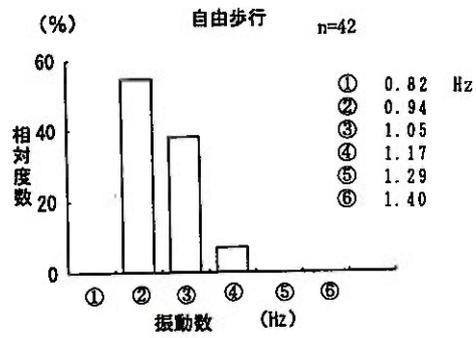


図-1.5.6 y 方向変位の 1.0Hz 付近の卓越振動数の相対度数分布 (街路歩行の標本集合)

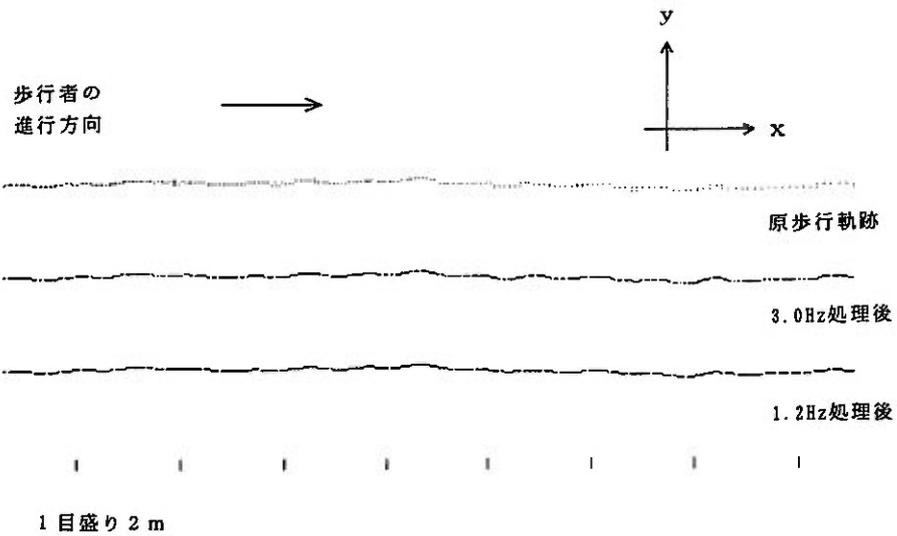


図-1.5.7 フィルター処理前後の歩行軌跡の標本 (図-1.5.1 と同一の標本)

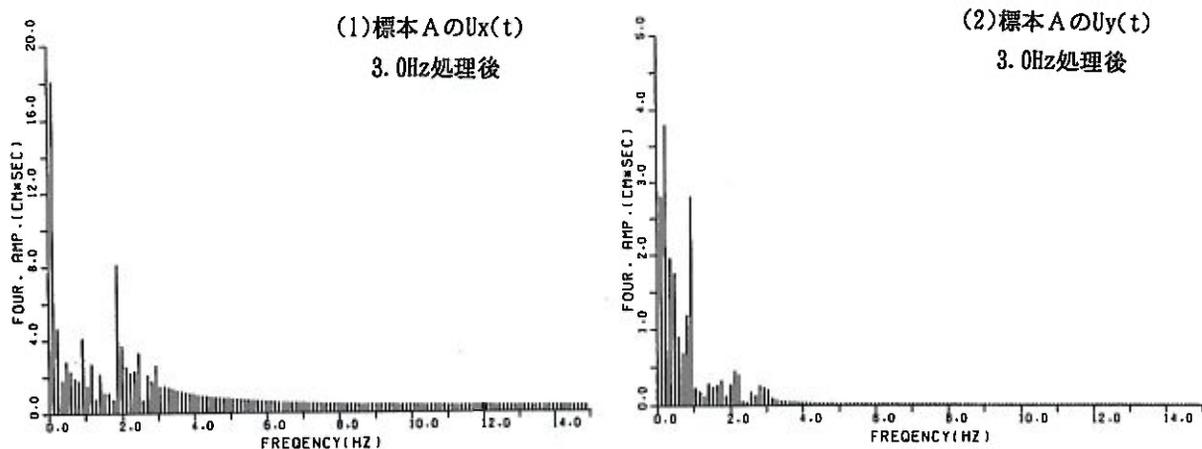


図-1.5.8 ローパスフィルター処理後のフーリエ振幅スペクトル
(カットオフ振動数 3.0Hz、図-1.5.1 と同一の標本)

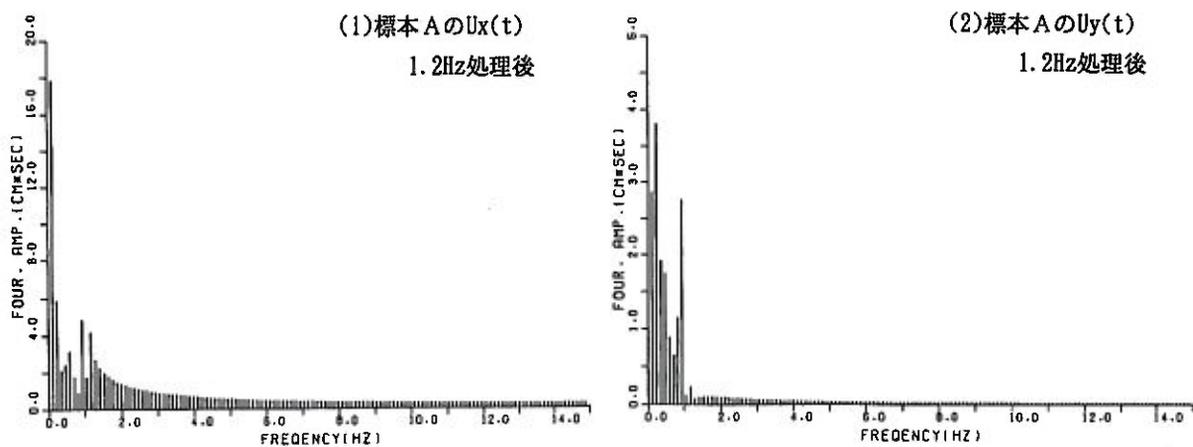


図-1.5.9 ローパスフィルター処理後のフーリエ振幅スペクトル
(カットオフ振動数 1.2Hz、図-1.5.1 と同一の標本)

一日程度で完了した。目視計測の場合では手動でのコマ送り操作ならびに画面上の目標物へのライトペン指示などの操作の繰り返しが伴うため、筆者らの過去の経験を基にすると少なくとも十倍以上の作業量を要する。

さらに追尾を開始する位置（ウインドを最初に置く位置）による計測値のばらつきは、街路歩行調査での実距離にして25mm以内であり満足できる再現性と判断される。なお、ここでいう計測値のばらつきは、ビデオ画像を処理するシステムに内在する誤差であり、基準位置等の測定誤差とは異なるものである。

(2) ローパスフィルター処理後の軌跡と速度・加速度

カットオフ振動数3.0Hzおよび1.2Hzのローパスフィルター処理後のデータ \hat{Q} 、 $(x(t_i), y(t_i))$ 、 $\hat{Q}_1(x(t_i), y(t_i))$ を用い、街路歩行とT字廊下歩行の歩行軌跡、歩行速度、加速度について分析した。ここで記号「 $\hat{\quad}$ 」はローパスフィルター処理後を、「 $\bar{\quad}$ 」はローパスフィルター処理後さらに移動平均したものを、添字「3」はカットオフ振動数3.0Hzを、「1」はカットオフ振動数1.2Hzを使用したことを示している。

また、ここでは前掲の(1.1)式から(1.6)式に定義したものを歩行速度、加速度と呼んでいる。以下の記述では時刻 t の添字 i は省略する。

a) 街路歩行調査における歩行特性

図-1.6.1と図-1.6.2は、図-1.5.1と同じ標本の速度・加速度の時刻歴を示したものである。

カットオフ振動数が3.0Hzの場合、 $\hat{V}_{x_3}(t)$ 、 $\hat{A}_{x_3}(t)$ の x 方向成分はほぼ2.0Hz前後の振動特性と判断される規則的な振動が見られる（図-1.6.1）。 $\hat{V}_{y_3}(t)$ 、 $\hat{A}_{y_3}(t)$ の y 方向成分については1.0Hz前後の振動特性と共に不必要と考えられる高振動数成分も含まれているため複雑な変動がみられる。 $|\hat{A}_3(t)|$ についても比較的高振動数ながら安定的に推移する。さらに $|\hat{V}_3(t)|$ の時刻歴は $\hat{V}_{x_3}(t)$ と相似形であることから、歩行速度は主に進行（ x 軸）方向速度成分に影響されると判断される。また、 $\hat{V}_{x_3}(t)$ の規則的な振動は認められるものの歩行者は定速で歩行しているものと判断される。

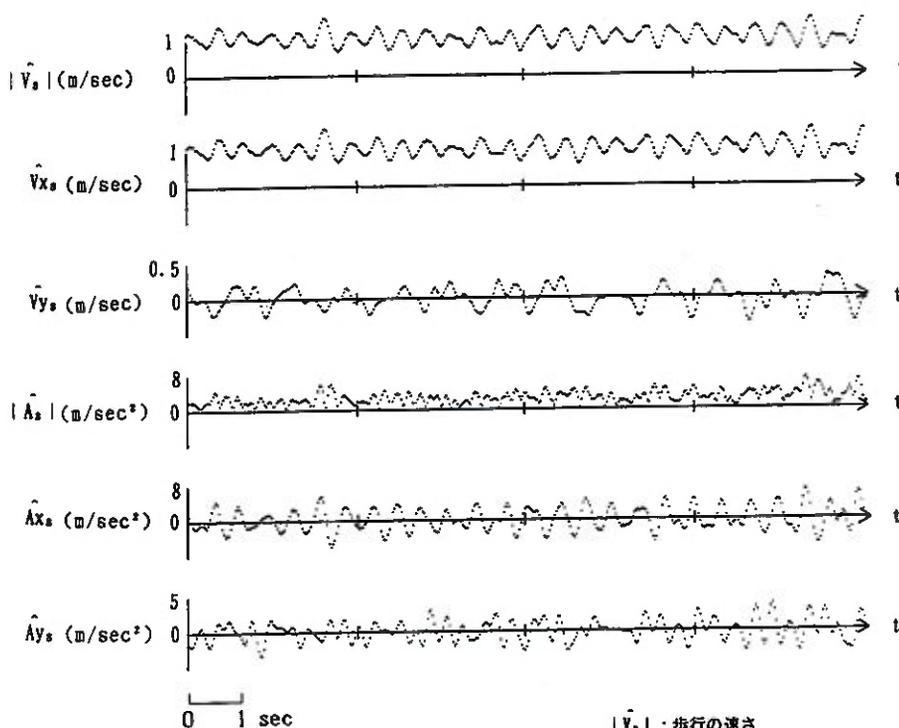
カットオフ振動数が1.2Hzの場合、3.0Hzと比べてさらに平滑化されることにより、 $|\hat{V}_1(t)|$ 、 $\hat{V}_{x_1}(t)$ の増減はあまり見られない（図-1.6.2）。 $\hat{V}_{y_1}(t)$ 、 $\hat{A}_{y_1}(t)$ の y 方向成分では1.0Hzの振動特性と判断される規則的な振動が見られる。 $\hat{A}_{x_1}(t)$

歩行者の
進行方向 \longrightarrow



a) 歩行軌跡

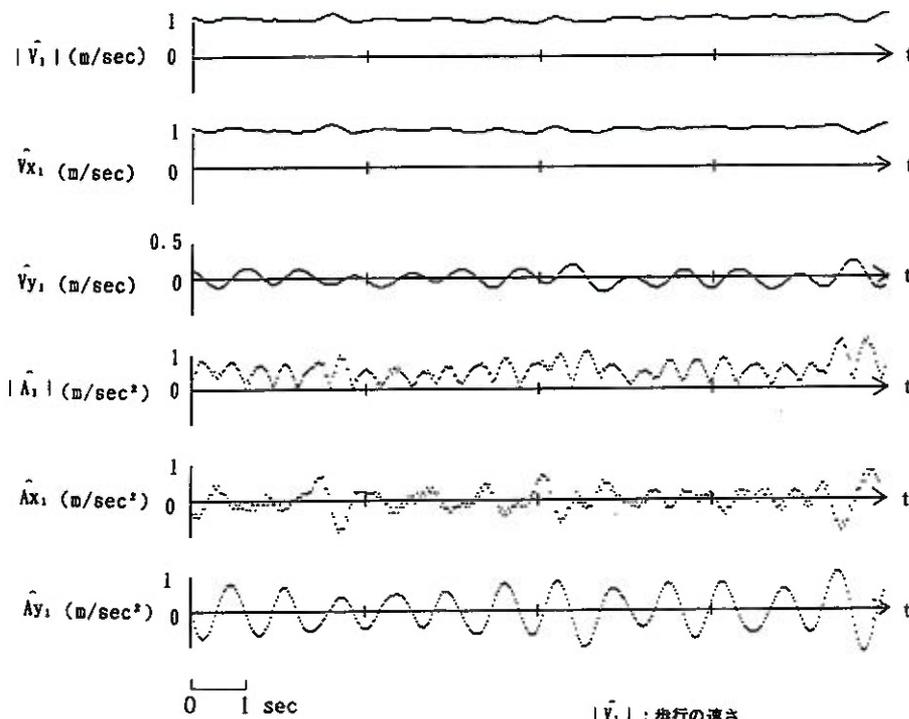
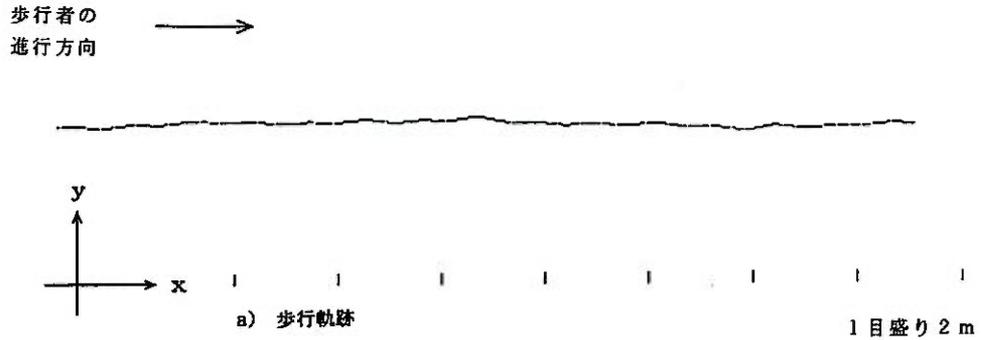
1目盛り2m



b) 速度・加速度の時刻歴

$| \hat{V}_s |$: 歩行の速さ
 \hat{V}_{x_s} : x方向の速度
 \hat{V}_{y_s} : y方向の速度
 $| \hat{A}_s |$: 加速度の大きさ
 \hat{A}_{x_s} : x方向の加速度
 \hat{A}_{y_s} : y方向の加速度
 $\hat{\quad}$: 0- π スリット処理後を示す記号
 $\hat{\quad}$: 3.0Hz処理後を示す添字

図-1.6.1 カットオフ振動数3.0Hz処理後の軌跡と速度・加速度の時刻歴
(図-1.5.1と同一の標本)



$|\hat{V}_1|$: 歩行の速さ
 \hat{V}_{x1} : x方向の速度
 \hat{V}_{y1} : y方向の速度
 $|\hat{A}_1|$: 加速度の大きさ
 \hat{A}_{x1} : x方向の加速度
 \hat{A}_{y1} : y方向の加速度
 $\hat{\quad}$: 0- π スフィア-処理後を示す記号
 1 : 1.2Hz処理後を示す添字

図-1.6.2 カットオフ振動数1.2Hz処理後の軌跡と速度・加速度の時刻歴
(図-1.5.1と同一の標本)

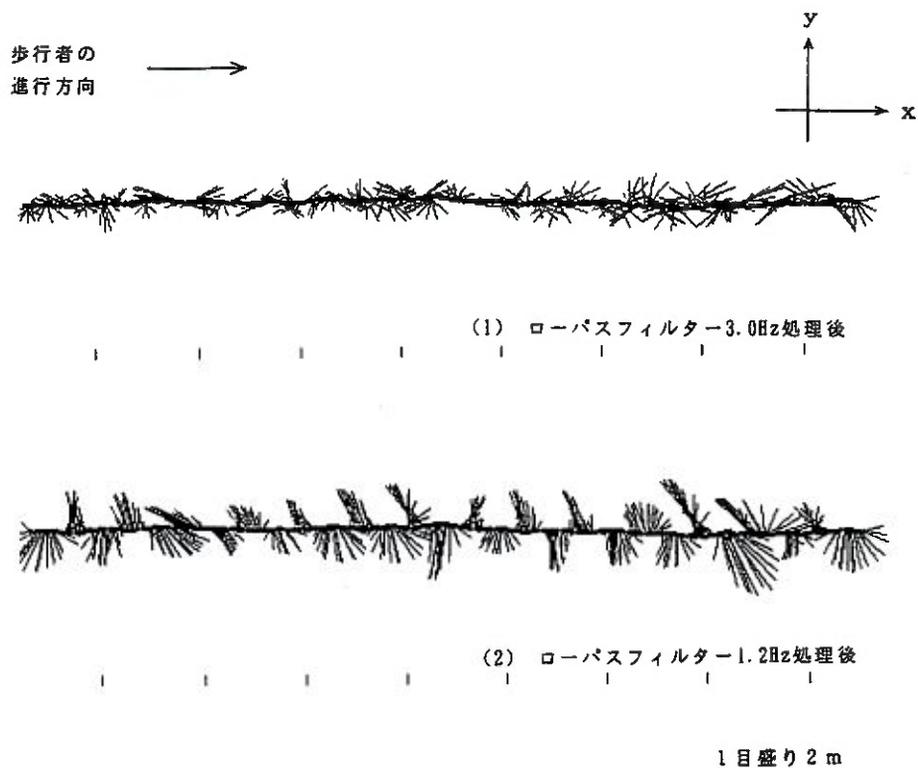


図-1.6.3 カットオフ振動数別の歩行軌跡と各点での加速度ベクトル
(図-1.5.1と同一の標本)

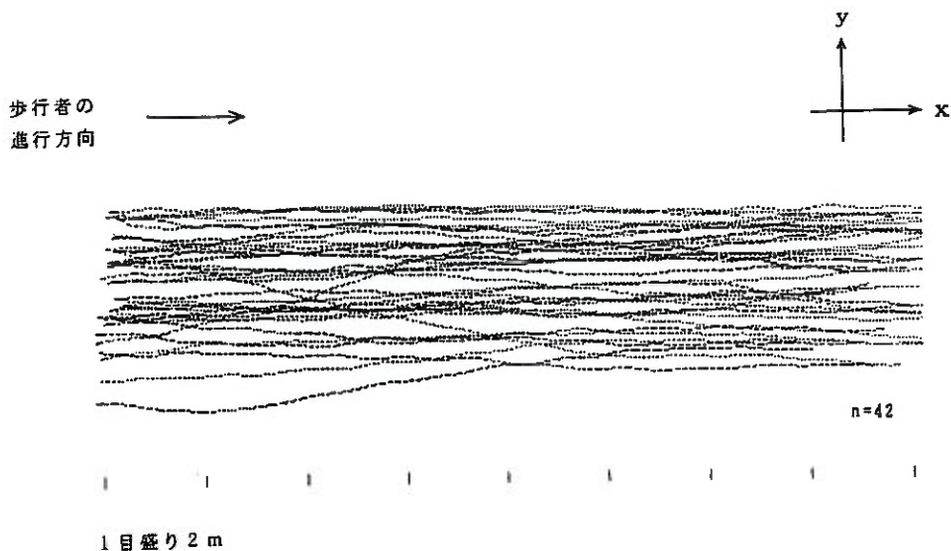


図-1.6.4 街路歩行における歩行軌跡の標本集合
(実験シリーズ1、自由歩行)

の場合、明確ではないが規則的に変動する傾向がある。

その他の主な傾向としては次の通りである。

- ・ 1.2Hz処理後の $\hat{A}x_1(t)$ と $\hat{A}y_1(t)$ の関係から判断して両者は逆位相である。
- ・ $\hat{V}y_1(t)$ と $\hat{A}y_1(t)$ とは $\pi/2$ の位相差がある。

また、図-1.6.3は図-1.5.1と同一の標本の歩行軌跡と各位置での加速度ベクトルを表示したものである。線分の長さが加速度の大きさを、歩行軌跡から飛び出る線分が加速度の方向を示している。カットオフ振動数が3.0Hzでは加速度ベクトルの方向に規則性はみられないが、1.2Hzでは多少のばらつきはあるものの左右交互に規則的に加速度が働く。ただし、カットオフ振動数が3.0Hzのものは1.2Hzのものに比べて加速度のレンジが6倍になっている。

街路歩行調査の場合、図-1.6.2の $\hat{A}y_1(t)$ と図-1.6.3(2)の加速度ベクトルの時刻歴から分かるように、歩行者は1.0Hz前後で規則的に左右に横ゆれし、加速・減速を繰り返しながら進行する。これは両脚の着床、蹴り出しの繰り返し（文11）に対応するものである。

図-1.6.4は歩行軌跡の標本集合を示したものである。歩行者が通路に平行に歩いているかどうかをみるため、さらにy方向の座標位置を一定区間（12m）について分析した。図-1.6.5は観測初期位置 E_y と観測終了位置 K_y との関係を示したものである。歩行者が通路に平行に歩行した場合、 $K_y = E_y$ となり、点線で示した直線上に位置する。標本集合（42名）の範囲では、この直線からの各標本の距離の平均は38.3cm（標準偏差42.6cm）で、相関係数は0.77と E_y と K_y の相関は高い。

この結果、歩行者は通路に平行に進行していると判断される。ただし、この測定のような場合、歩行者は必ずしも直線的に進行するわけではなく、わずかな曲がりを見せるものが多い。

またカットオフ振動数1.2Hz処理後の $|\hat{A}y_1(t)|$ の最大値（ $A_{y\max}$ ）は0.55～1.38m/sec²の範囲である（図-1.6.6）。

さらに横ゆれなどを除いた歩行の全体的な動きをとらえた方が有効である場合、移動平均をとれば良い。図-1.6.7、図-1.6.8はカットオフ振動数1.2Hzで処理したものをさらに歩行者（標本）固有のy方向の周期間隔で移動平均（注3）したデータ $\overline{Q}_1(x(t), y(t))$ を用いたものである。加速度ベクトルから分かるように、頭部の横ゆれが取り除かれて歩行者の重心による軌跡をとらえていると判断される。

（注3）

横ゆれを平均化し、頭のゆれではなく身体の重心の軌跡を求めるような意味で、歩行者（標本）ごとの固有の横ゆれ一周期分で移動平均した。方法は

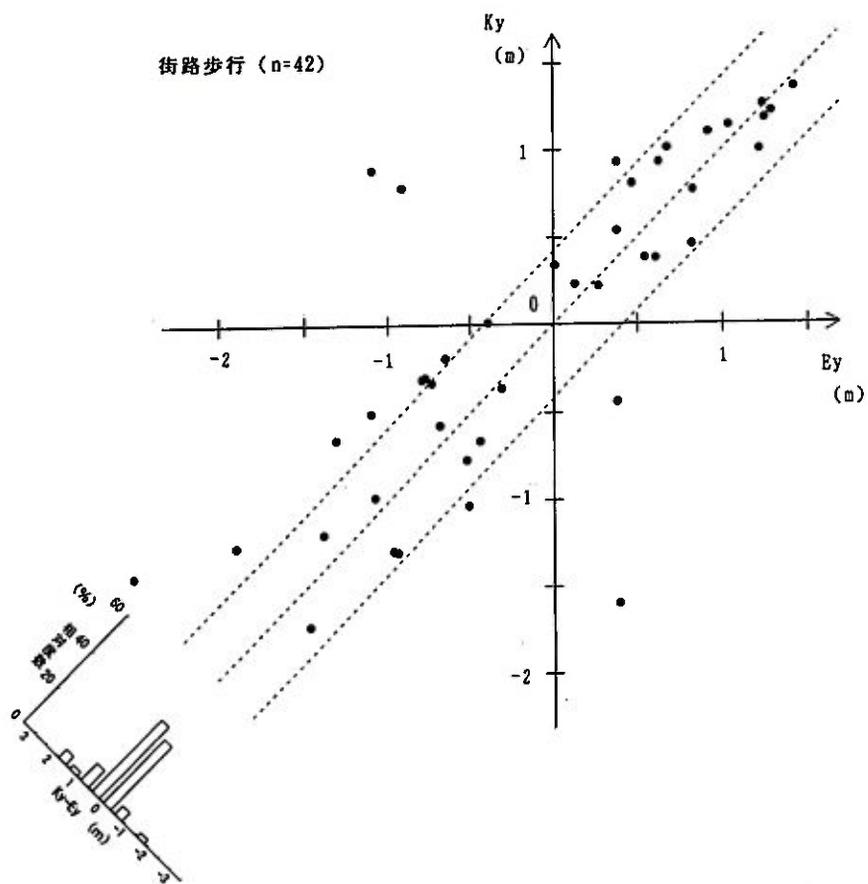


図-1.6.5 Ey と Ky の関係 (街路歩行の標本集合)

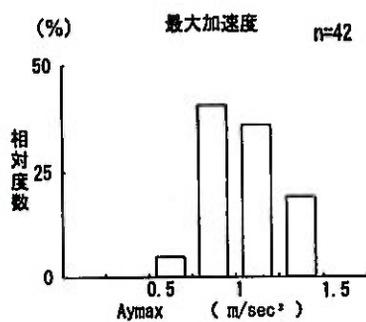


図-1.6.6 y方向の最大加速度の度数分布
(街路歩行の標本集合、カットオフ振動数1.2Hz処理後)

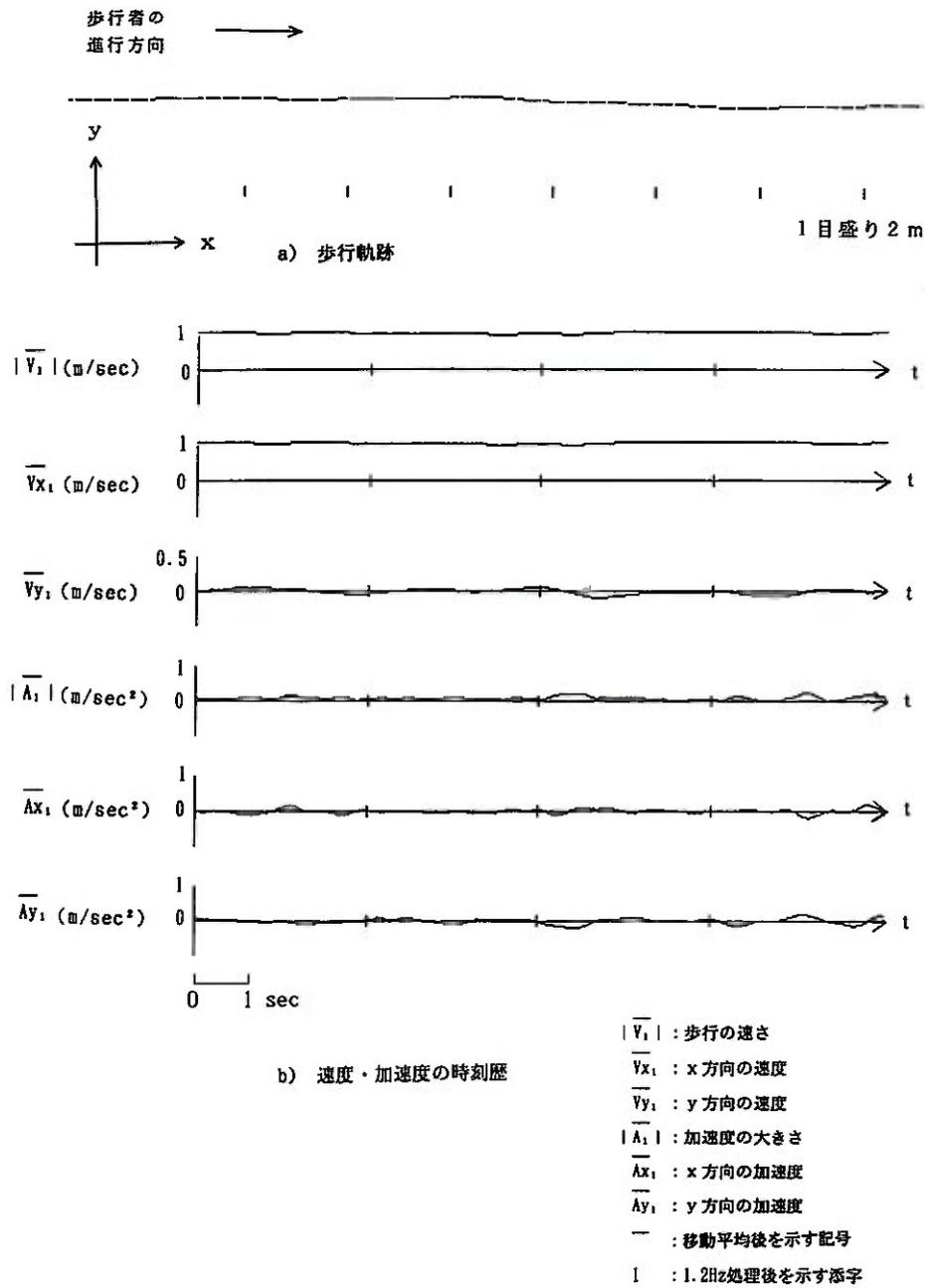


図-1.6.7 移動平均後の歩行軌跡と速度・加速度の時刻歴
(図-1.5.1と同一の標本)

$(M-1) \cdot \Delta t$ がスペクトル解析で得られた y 方向の一周期 T_m (sec) に最も近くなるように M (ただし奇数) を決めた。

b) T字廊下歩行実験における歩行特性

図-1.6.9は、T字廊下歩行実験における歩行軌跡データをカットオフ振動数1.2Hz処理後データ $\hat{Q}_1(x(t), y(t))$ を用いたの速度・加速度の時刻歴および歩行軌跡と各点での加速度ベクトルを示したものである。T字廊下歩行の測定例(幅1.84m、右回り38名の標本集合)の場合、この標本のように、図-1.6.3(2)の標本と同様、直線部で進行方向の左右に規則的に現れる加速度が曲線部では曲がるための加速度が大きいため曲がり方向だけになる傾向がある(標本集合の約60%)。またカットオフ振動数1.2Hz処理後の $|\hat{A}_{x_1}(t)|$ の最大値(注4)は同じ処理をした街路歩行調査の測定値に比べて約1.4倍となる。

T字廊下の幅員が曲がり方に及ぼす影響を検討しようとするれば、横ゆれを除くような処理を行えばよい。図-1.6.10は、カットオフ振動数1.2Hzで処理したものをさらに歩行者固有の周期間隔で移動平均したデータ $\overline{Q}_1(x(t), y(t))$ を用いたものである。横ゆれは除かれ曲がりだけの力の働きがよく分かる。

(注4)

T字廊下歩行の場合、歩行者の初期の進行方向が y 軸の正方向であるためここでは x 方向の最大加速度としている。

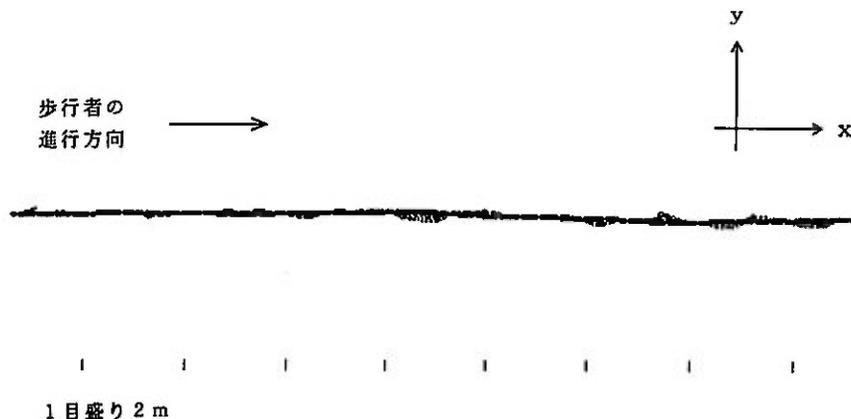


図-1.6.8 移動平均後の歩行軌跡と各点での加速度ベクトル
(図-1.5.1と同一の標本)

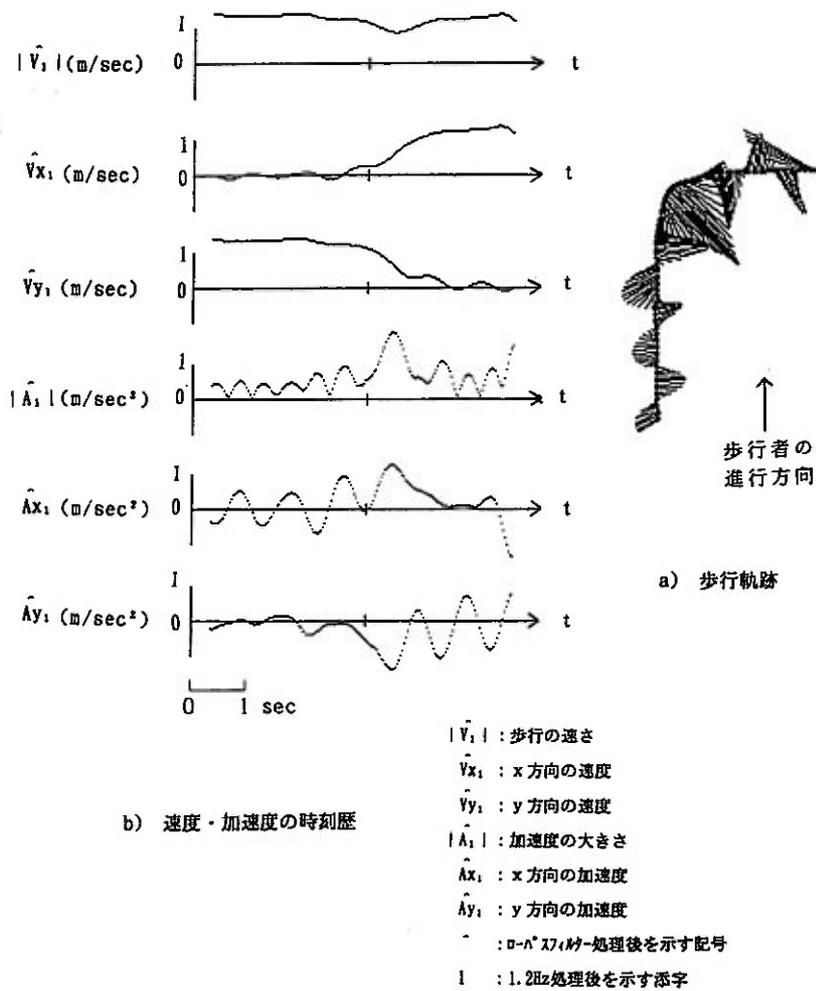


図-1.6.9 移動平均前のT字廊下歩行の速度・加速度の時刻歴および歩行軌跡と各点での加速度ベクトル (T字廊下歩行実験の標本、実験シリーズ4)

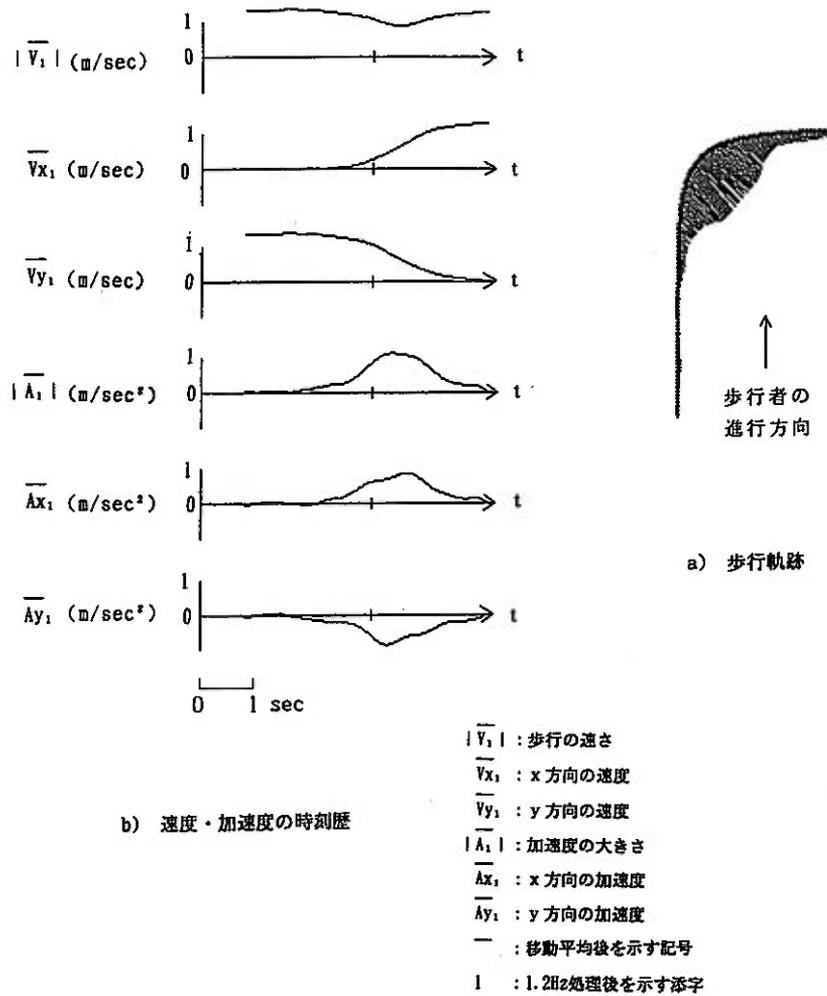


図-1.6.10 移動平均後のT字廊下歩行の速度・加速度の時刻歴および歩行軌跡と各点での加速度ベクトル
(図-1.6.9と同一の標本、実験シリーズ4)

1.7 まとめ

本章は、画像処理装置の精度の問題から、データをどう処理すれば歩行者の頭部の軌跡データを分析できるようになるかを検討したものである。

録画されたビデオ映像から、画像処理装置を利用し、座標変換および歩行軌跡データのローパスフィルターによる処理を行うことによって、歩行における頭部の軌跡を自動的に一定の精度で計測する方法を構築した。

また、これに基づいて2種類の歩行実験・調査を対象にして歩行の軌跡・速度・加速度について解析した。街路歩行の特性の分析では、x（前後）方向に2.0 Hz前後、y（左右）方向に1.0Hz前後の歩行特有の周期的な動きがある。また、L字型歩行での折れ曲がりではカットオフ振動数1.2Hz処理後の左右方向の最大加速度が同じ処理をした街路歩行調査の測定値に比べて約1.4倍であることを明らかにした。

従来、ビデオ画像などの視覚情報を定量的に処理する際に人間の主観に頼っていた部分を客観的・自動的に処理する方法の確立は、その応用する分野も広く新たな解析手法の一つになり得ると考える。

次章以降はこの画像処理技術を利用して回避行動の解析を行う。

第二章

回避行動開始点の判定方法

2.1 目的と調査および解析方法

前章では、ビデオ映像を画像処理することで歩行運動が2次元座標上を経時的に移動する点として計測し分析できることを確認した。

本章では、歩行者が進路上にある障害物を回避する行動を対象に、従来の測定者の主観的判断によるものではなく、数理的に回避行動を開始する地点（以下、回避行動開始点と記す）を判定する方法を検討する。

具体的には、障害物のある場合の歩行軌跡と前章の障害物を置かない場合の歩行（以下、自由歩行と呼ぶ）の軌跡の比較から回避行動が行われたと判断される歩行（以下、回避歩行と記す）軌跡を選別し、それらの速度、加速度の特性を解析し、回避歩行の特性を明らかにする。次にこれを踏まえて回避行動開始点の判定のための4つの基準を選定する。さらに各判定基準による回避行動開始点の相互比較を行い、回避行動をよく説明する判断基準を選択している。

本章で分析する調査は、通路上に障害物を置く歩行調査（以下、障害有り歩行調査）と、前章で述べた障害物を置かない歩行調査（以下、自由歩行調査）の2種類を実施（表-0.4.2でいえば実験シリーズ1の自由歩行とモノである）した。障害物は大きさが幅0.5m、奥行き0.25m、高さ1.7mの塩ビパイプの骨組にグレイの布を絡ませたものである。設置場所は障害物は通路中心からおよそ30cm建物寄りに設置した。分析した歩行データは、障害有り歩行調査が60例、自由歩行調査が42例である。

なお、ビデオ映像の画像処理ならびに不必要な高振動数成分を取り除く処理方法については前章と同様に行った。解析ではx、y座標系の原点を障害物の設置位置とし、歩行者の進行方向（通路に平行、注1）をx軸の正方向にとっている。y軸は進行方向の左手方向を正とする（図-2.1.1）。ただし、通路に障害物がある場合、回避方向には図-2.1.1のように障害物の右側へ回避する場合と、この逆に左側へ回避する場合の2種類が存在し、これを混在した状態で加速度の最大値等を分析すると回避方向による特性が誤って判断されることがあるため、以下の分析では回避方向による違いを分析する部分（2.2節の(1)）以外では右側回避の

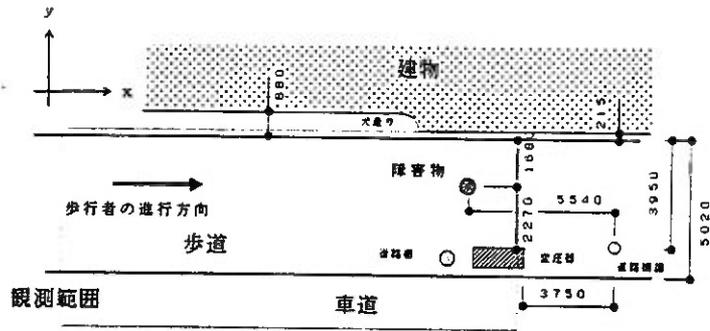


図-2.1.1 調査場所の平面図（実験シリーズ1）

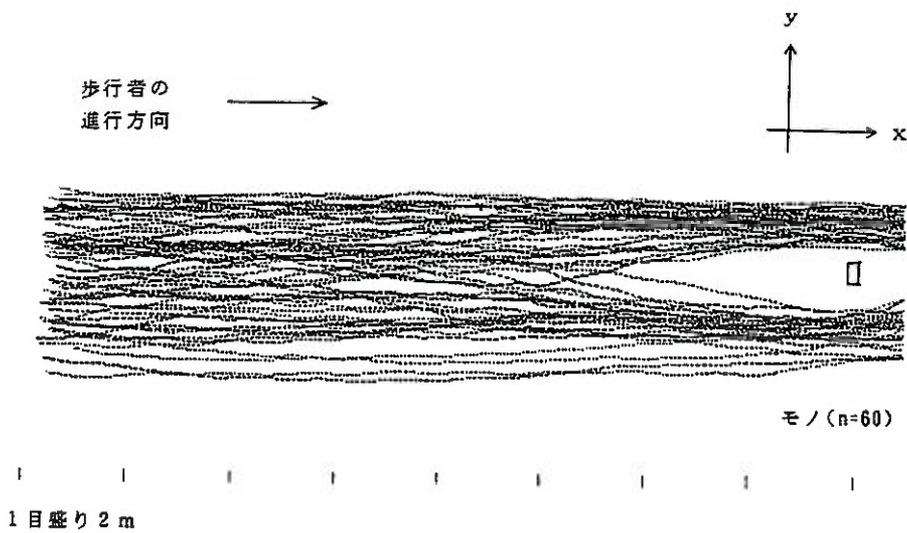


図-2.2.1 障害物有り歩行調査における歩行軌跡の標本集合（実験シリーズ1）

データは x 軸に対称に折り返した形で、左側回避のデータに併せて分析している。

(注1)

調査対象とする歩行者は進行方向を一定方向に限定している。

2.2 回避歩行の特性

(1) 歩行軌跡

回避歩行の特性を把握するには、歩行軌跡全体を見る方法と身体の微妙な動きを見る方法に大別できる。本項では全体的な見方の歩行軌跡の形態的な考察を行う。

図-2.2.1は障害有り歩行調査の歩行軌跡の標本集合である。各歩行軌跡は観測初期位置が x 軸に近いほど軌跡に大きな変化がみられるが、x 軸から離れるにしたがって直線的になる傾向がある。

そこで観測初期位置 E_y ($E_x = -14\text{m}$ の地点における y 座標値) による歩行軌跡への影響を見るため E_y で標本を分けし、分け別々の標本集合の平均軌跡(以下、平均軌跡と記す)を検討した。平均軌跡は E_y が小さいほど回避のための曲がりが生じるが、 E_y が大きくなるにしたがって直線的になる(図-2.2.2)。図-2.2.3は歩行軌跡の標本を示したもので、y 座標が歩行をすすめるにともなって大きく変化していることが読みとれる。すなわち、障害物を避けるために y 座標が大きく変化する部分と、軌跡を通路に平行にするため、y 座標の変化が抑えられる部分で2度の曲がりが生じている。本論では前者を「曲がりⅠ」、後者を「曲がりⅡ」と呼んで両者を区別する。

しかし、障害有り歩行調査での歩行軌跡にも直線的なものが少なくない。

図-2.2.4は直線的な歩行について検討するために、右側回避のデータを x 軸に折り返す前の状態での E_y を横軸に、 K_y ($K_x = 0\text{m}$ の地点における y 座標値) を縦軸にとって標本ごとにプロットしたものである。図中の3本の破線で示した直線の内中央の直線②は $E_y = K_y$ の直線であり、他の2本(①と③の直線)は前章で述べた障害物を置かない歩行調査で得られた各標本の $E_y = K_y$ 直線からの距離の $\pm 1\sigma$ 分 (σ は標準偏差)を示すものである。したがって①と③の直線に囲まれたゾーン内にプロットされた標本については自由歩行的に歩行しているものと判断した。また、左下(第3象限)の直線①より左側(網掛けのゾーン内)の2例については障害物に接近しているものとして除外した。

これ以外のゾーンにプロットされたものについては回避行動があったものとして「回避歩行」と判断した。

この結果、標本数60例中38.3% ($n=23$) が回避歩行で、残りの61.7% ($n=37$)

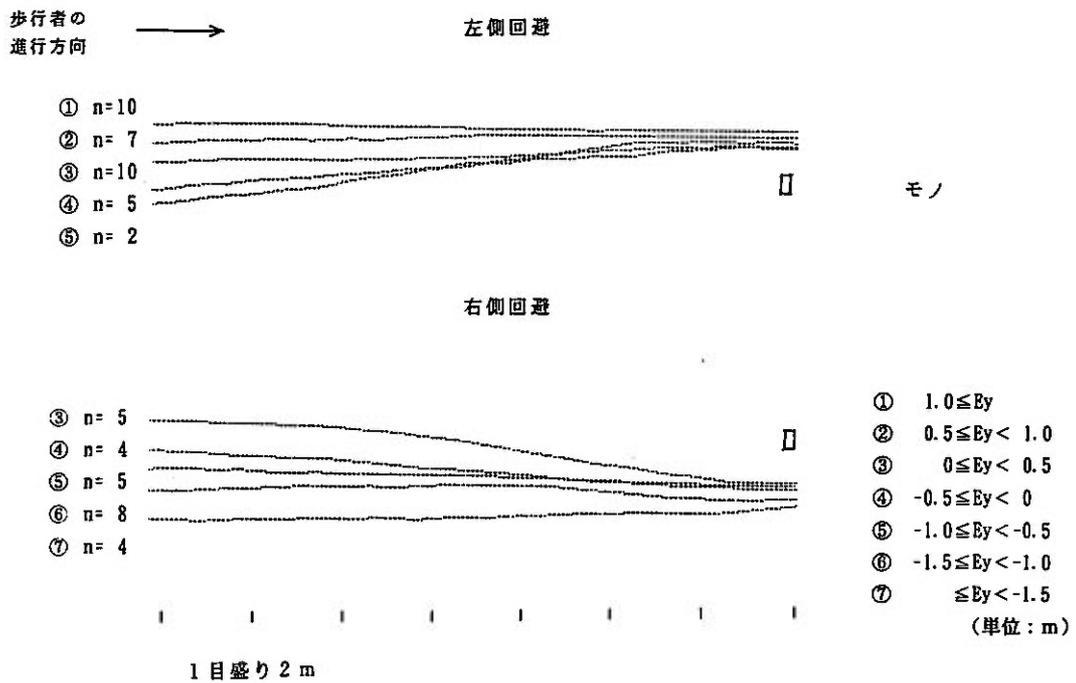


図-2.2.2 障害有り歩行調査における E_y 区分別集合平均軌跡 (実験シリーズ1)

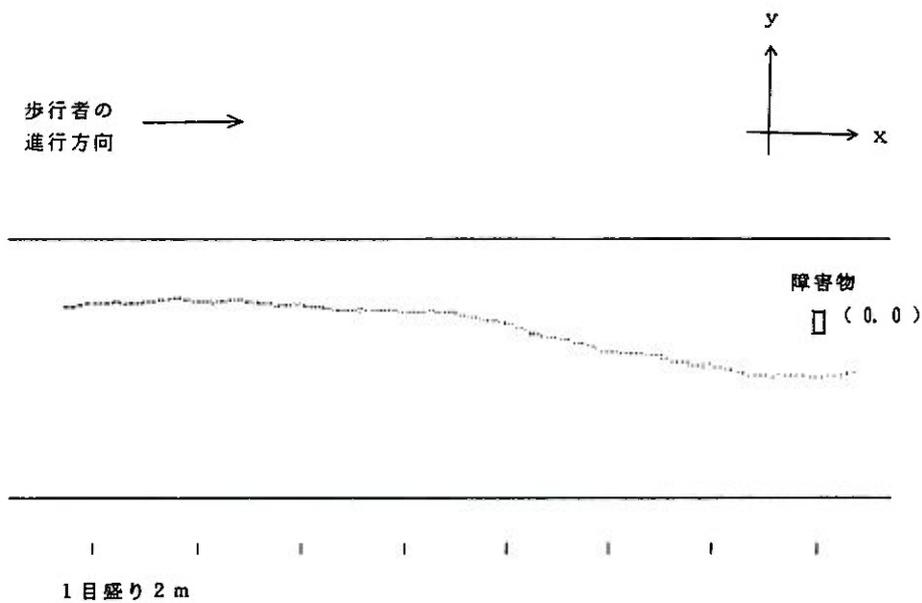


図-2.2.3 回避歩行の原歩行軌跡 (標本)

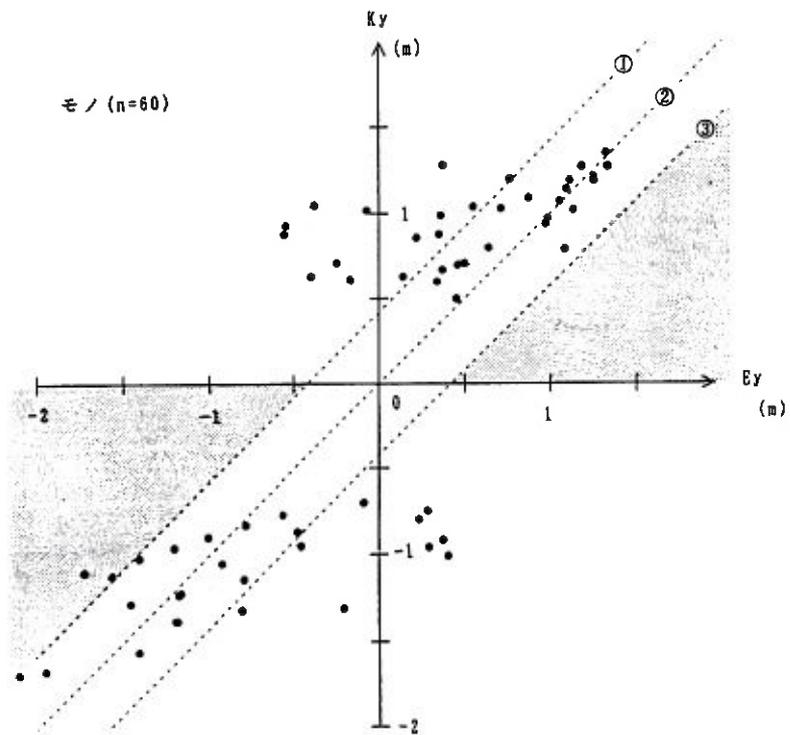
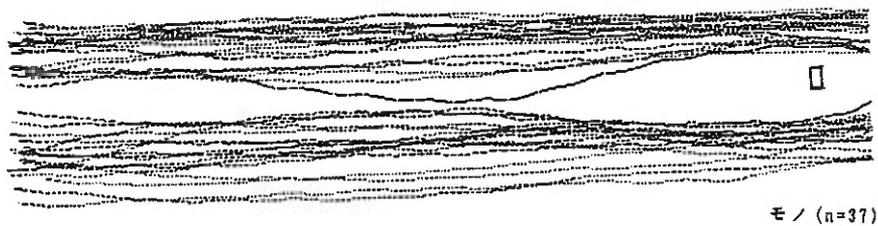


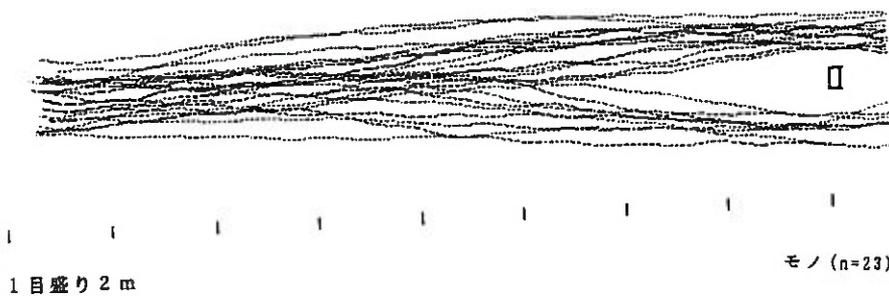
図-2.2.4 EyとKyの関係（障害有り歩行調査）

歩行者の
進行方向 →



モノ (n=37)

図-2.2.5 自由歩行的な歩行軌跡の標本集合（障害有り歩行調査）



モノ (n=23)

1目盛り 2m

図-2.2.6 回避歩行軌跡の標本集合（障害有り歩行調査）

が自由歩行的に歩行しているか障害物に接近したものと判断される。図-2.2.5に障害物あり歩行のうちで自由歩行的な歩行軌跡の標本集合を、図-2.2.6に回避歩行の軌跡の標本集合を示す。

(2) スペクトル解析

回避歩行はマクロ的にとらえると、通路に沿って自由歩行的に歩行している歩行者が障害物を確認し、進路を変えて障害物とすれ違い、再び進路を元に戻す行動である。このため、本項でのスペクトル解析では、自由歩行で検出した①歩行特有な頭部の動き（x方向については2.0Hz付近が、y方向については1.0Hz付近がピーク）を確認すると共に、②回避のためのy方向への曲がりがスペクトル解析に現れるかどうかについて考察を行う。

図-2.2.7は、前章1.5節の(1.8)式で定義したy方向の変位 $U_y(t_i)$ のフーリエ振幅スペクトルである。図-2.2.8はx方向成分の $U_x(t_i)$ のフーリエ振幅スペクトルを示したものである。ただし、ここで用いるデータ $Q(x(t_i), y(t_i))$ については前章1.4節の座標変換処理をしたもので、スペクトル解析におけるデータの扱いについては前章の1.5節の(3)と同様である。

$$U_x(t_i) = X(t_i) - (X(t_0) + (i \cdot (X(t_{Nd-1}) - X(t_0))) / (Nd - 1)) \quad (1.7)$$

$$U_y(t_i) = Y(t_i) - (Y(t_0) + (i \cdot (Y(t_{Nd-1}) - Y(t_0))) / (Nd - 1)) \quad (1.8)$$

ただし、

$U_x(t_i)$: x方向の変位(m)

$U_y(t_i)$: y方向の変位(m)

Nd : スペクトル解析で使用するデータ数

$i = 0, 1, 2, \dots, Nd-1$

変位のフーリエ振幅スペクトル図から、y方向については自由歩行と同様1.0Hz付近が、x方向については2.0Hz付近にピークがあることが確認された。

一方、y方向については1.0Hzよりさらに低い低振動数付近でもピークが見られ、このピークは自由歩行と比べて振幅が大きく顕著に現れる。これは特に②の回避行動による曲がりの影響と考えられるが、以下に述べる理由から曲がりそのものの振幅をとらえているとは言いがたい。

本論で扱う軌跡データは、前章でも述べたように計測時間が10秒程度で、図-2.2.3に示すように回避行動の始まりから終わりまでを一周期とする振動数の全容をとらえきれていない。②については、このように完結していない歩行軌跡のスペクトルを解析する場合、(a)スペクトル解析で用いるデータ数Ndの初期値と終期値を結んだ直線を基準とする方法、(b)x軸（進行方向軸）を基準とする方法、(c)

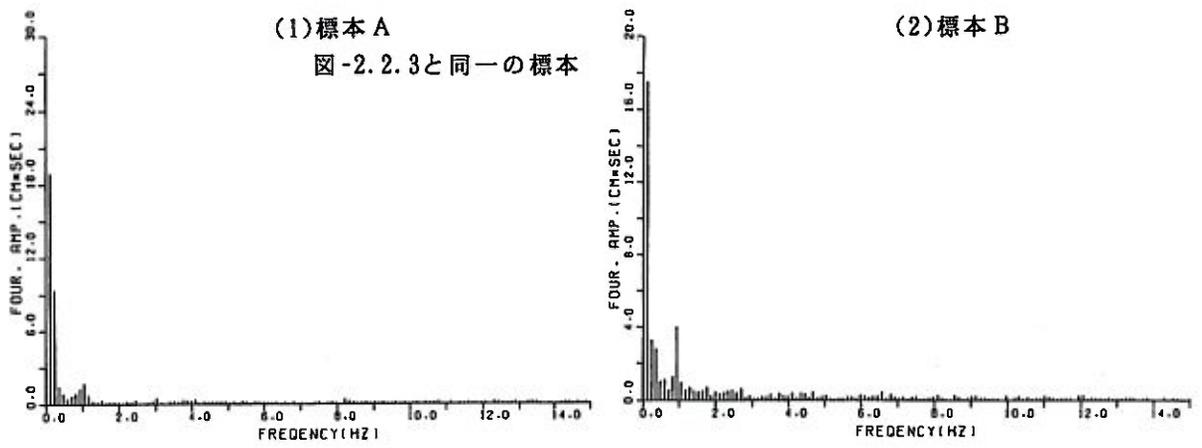


図-2.2.7 y 方向変位のフーリエ振幅スペクトル（回避歩行の標本）

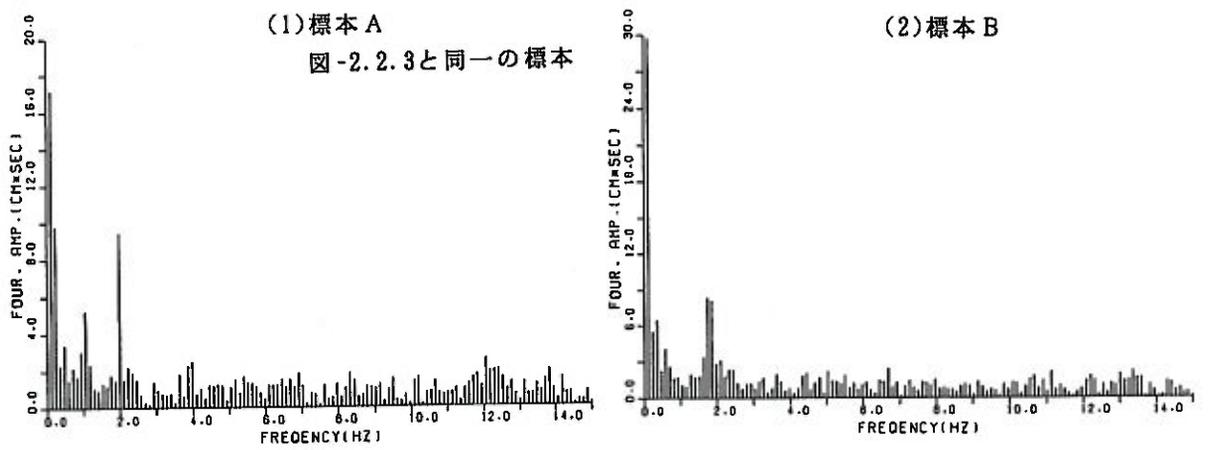


図-2.2.8 x 方向変位のフーリエ振幅スペクトル（回避歩行の標本）

データの後に適当なダミーの値を付加する方法などが考えられる。

図-2.2.7、図-2.2.8に示したような(a)の方法では、②の回避行動の全容をとらえたデータでないため、解析区間内の曲がりの振幅を求めているに過ぎない。(b)の方法も(a)と同様である。(c)の方法は、例えば、0を付加することによるインパルスの影響が考えられる。いずれの方法もそれぞれ長短があって②の回避行動の曲がりの振動数を特定できるような信頼性の高い値を求めることはできない。

なお、非定常のスペクトル解析によって回避行動開始点を特定することについても試みたが、本論で扱うような回避行動の一周期分に満たない軌跡データでは回避行動開始点を特定することは困難であると判断された。

(3) 速度・加速度

本項では以下の3つの処理を行った軌跡データについて解析を行う。ただし、以下の軌跡データ、各速度、加速度への添字1、3と、記号 $\hat{\quad}$ 、 $\overline{\quad}$ は1.6節の(2)の定義によるものと同等とする。

- ① 3.0Hz以上の高振動数成分を除いた移動平均前の軌跡データ $\hat{Q}_3(x(t_i), y(t_i))$ (以下、3.0Hz処理後の軌跡データと記す)
- ② 1.2Hz以上の高振動数成分を除いた移動平均前の軌跡データ $\hat{Q}_1(x(t_i), y(t_i))$ (以下、1.2Hz処理後の軌跡データと記す)
- ③ 1.2Hz以上の高振動数成分を除いた移動平均後の軌跡データ $\overline{Q}_1(x(t_i), y(t_i))$ (以下、移動平均後の軌跡データと記す)

①については頭部の前後左右の動きが残る軌跡データで、②については頭部の前後の動きを除き横ゆれを残した軌跡データである。また、③については横ゆれも除いて身体の重心の軌跡を求めるような意味の軌跡データである。

図-2.2.9は典型的な回避歩行軌跡の標本を原歩行軌跡と①、②、③の3つの方法で処理したもので、後のものほど滑らかな軌跡となっている。

図-2.2.10は①の3.0Hz処理後の歩行軌跡の $|\hat{V}_3(t_i)|$ 、 $\hat{V}_{x3}(t_i)$ 、 $\hat{V}_{y3}(t_i)$ 、 $|\hat{A}_3(t_i)|$ 、 $\hat{A}_{x3}(t_i)$ 、 $\hat{A}_{y3}(t_i)$ の時刻歴を示したものである。この図は、図-2.2.11、図-2.2.12と同様、右側回避のデータをx軸に対称に折り返す前の状態での速度、加速度を示すものである。

x方向成分のものは $\hat{V}_{x3}(t_i)$ 、 $\hat{A}_{x3}(t_i)$ とも2.0Hz前後の振動でほぼ規則的に変動することは自由歩行と同様である。 $|\hat{V}_3(t_i)|$ は $\hat{V}_{x3}(t_i)$ と相似形であると判断される。 $\hat{V}_{y3}(t_i)$ が進路の変更(曲がりI)にともなって負の値が増大し、すれ違い時のための再度の軌道修正(曲がりII)には正の値をとるようになる。また、曲

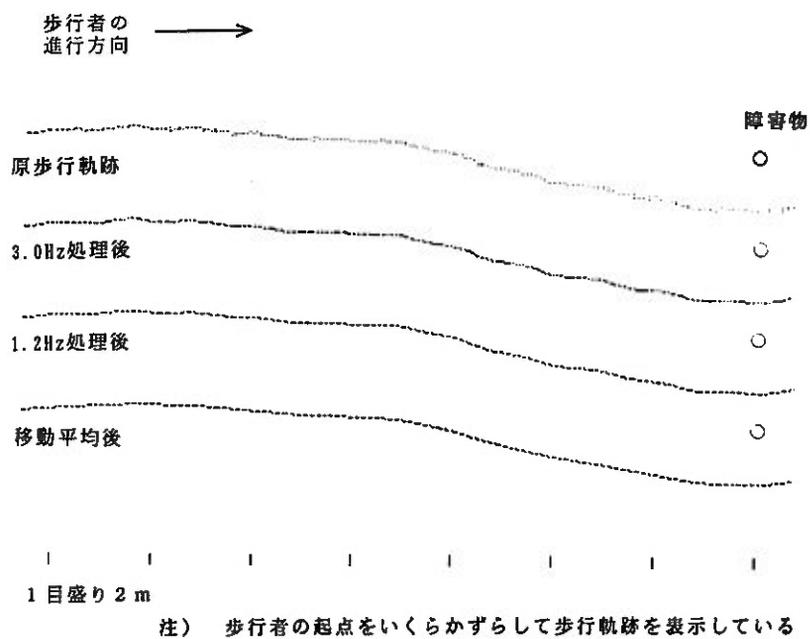


図-2.2.9 データ処理方法別歩行軌跡の標本（図-2.2.3と同一の標本）

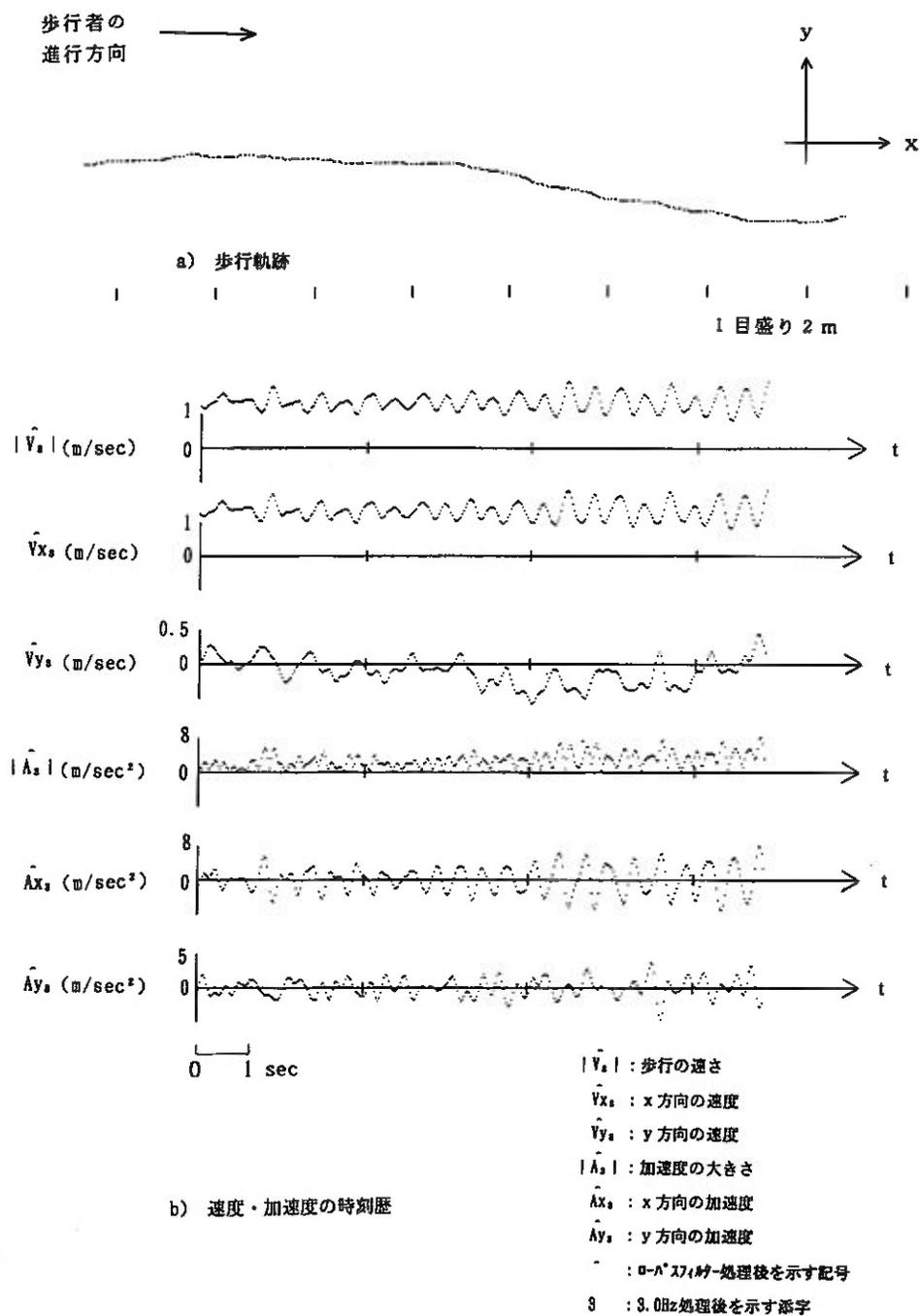


図-2.2.10 3.0Hz処理後の歩行軌跡と速度・加速度の時刻歴
(図-2.2.3と同一の標本)

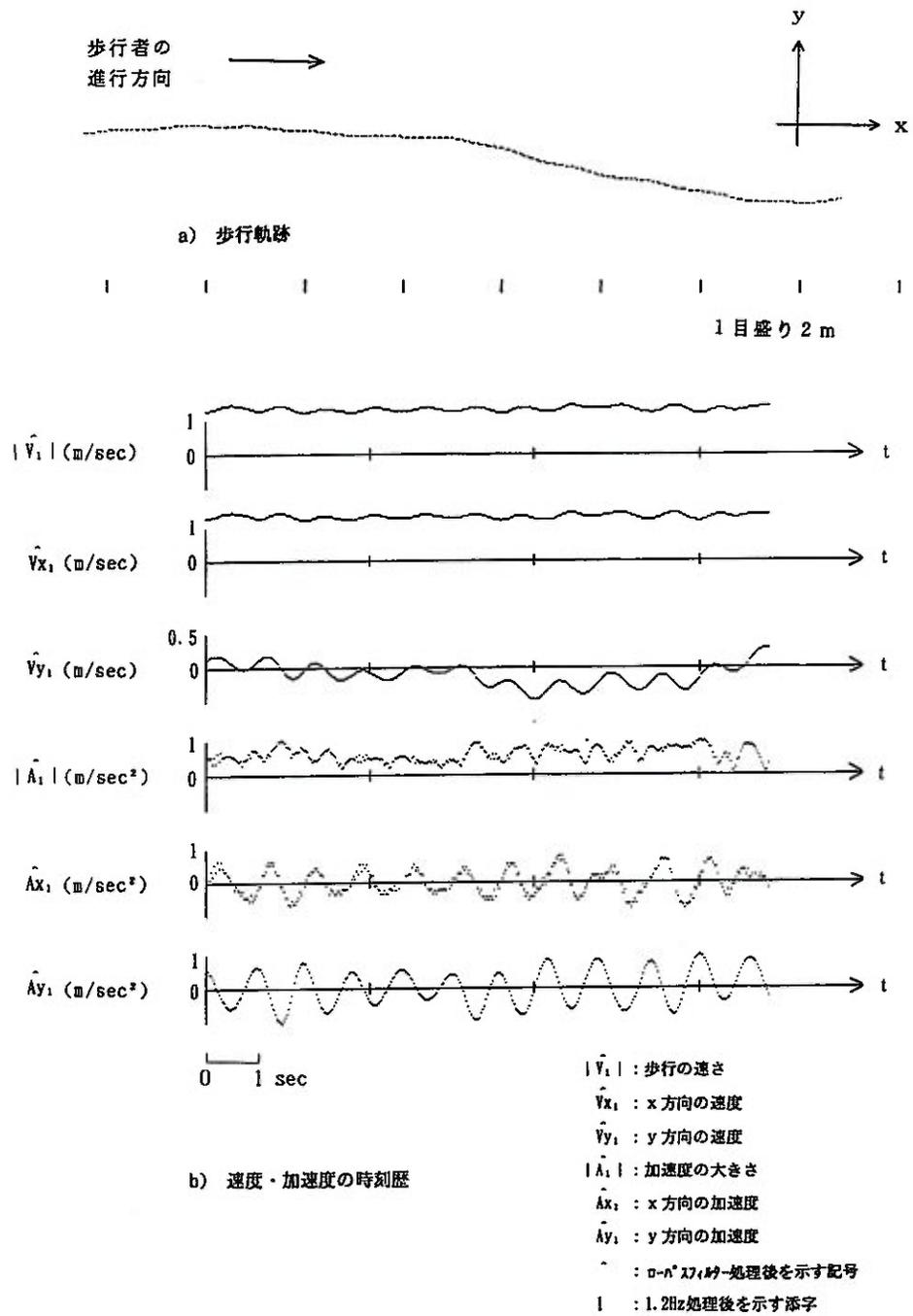


図-2.2.11 1.2Hz処理後の歩行軌跡と速度・加速度の時刻歴
 (図-2.2.3と同一の標本)

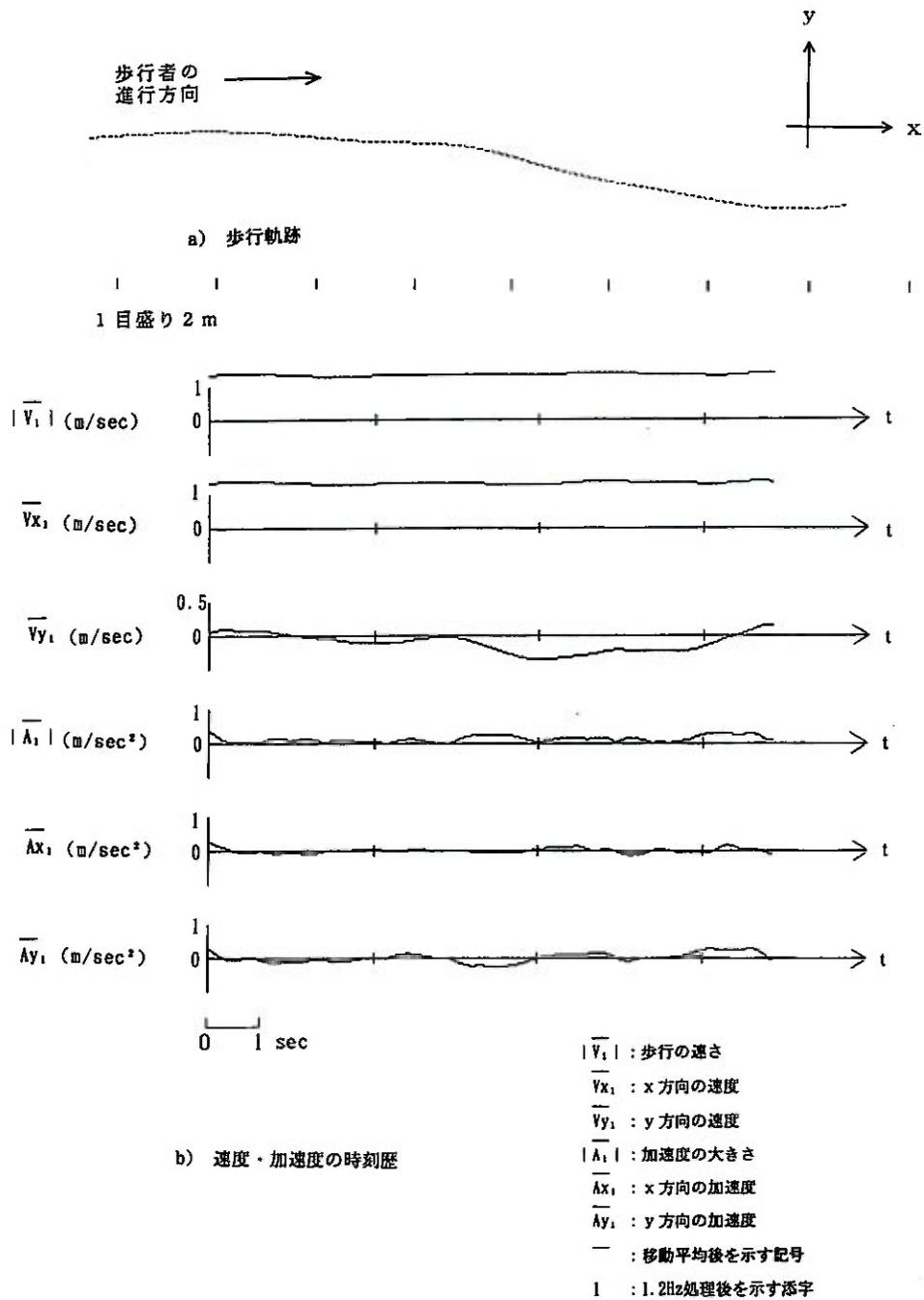


図-2.2.12 移動平均後の歩行軌跡と速度・加速度の時刻歴
 (図-2.2.3と同一の標本)

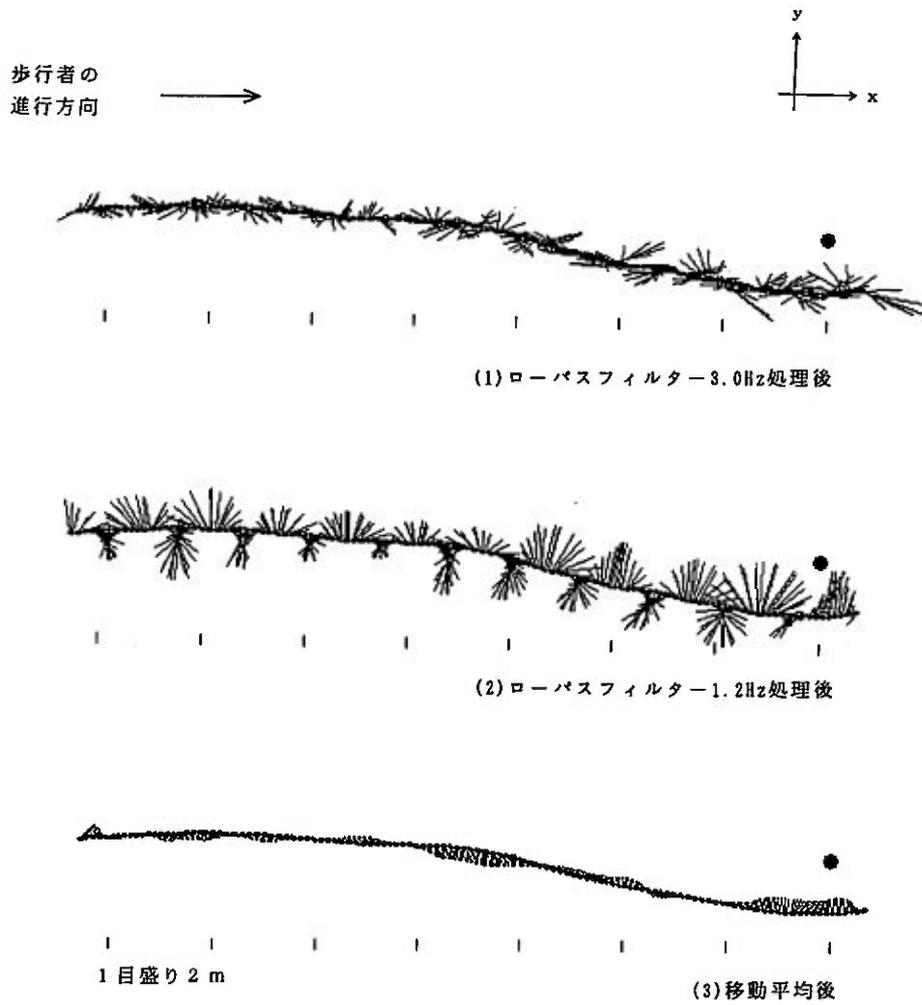


図-2.2.13 歩行軌跡と各点での加速度ベクトル (図-2.2.3と同一の標本)

がりⅠ、曲がりⅡにともなう $\hat{V}y_s(t_i)$ 以外の各値の変化は明確に判断できない。

②の1.2Hz処理後の歩行軌跡をみると当然のことではあるが、速度、加速度とも1.0Hz前後の振動で規則的に変動している(図-2.2.11)。 $\hat{V}y_1(t_i)$ は正と負の規則的な変動が曲がりにもなって負に転じる状況が、前述した3.0Hz処理後のものと比べてさらに明確になる。 $\hat{A}y_1(t_i)$ については1.0Hz前後の振動は横ゆれにともなう加速度と考えられるが、曲がりⅠ、曲がりⅡにともなう加速度の変化が現れているかどうかは3.0Hz処理の場合と比べて多少判断しやすい。

③の移動平均後の歩行軌跡の場合、横ゆれが取り除かれてさらに平滑化され、 $\overline{V}y_1(t_i)$ や $\overline{A}y_1(t_i)$ で曲がり容易に特定できる(図-2.2.12)。ただし、この場合、 $\overline{A}y_1(t)$ は加速度というよりは軌跡の曲率の大きさに相当するものと考えられる。

図-2.2.13(1)(2)(3)は各位置での加速度をベクトル表示したものである。①の3.0Hz処理後の歩行軌跡は明確な規則性はみられない。②の1.2Hz処理後の歩行軌跡では身体の横ゆれに対応して規則的に増減を繰り返し1.0Hz前後の振動特性を示す。また、③の移動平均後の歩行軌跡では曲がりⅠ、曲がりⅡに特長的な加速度がかかっていることが分かる。

(4) 曲がりにおける最大加速度

自由歩行と回避歩行の違いが曲がりにおける加速度の差として現れるのではな
いかと考え、以下の分析を行った。

まず、1.2Hz処理後の軌跡データ(\hat{Q}_1)によるy方向の最大加速度($A_{y\max}$)に着目すると、回避歩行($n=23$)と自由歩行($n=42$)の間には若干の差が認められ、回避歩行の方が大きい(図-2.2.14)。ところが回避歩行におけるy方向の最大加速度については、2.2節で定義したように2種類のものが考えられるため、回避歩行における曲がりⅠと曲がりⅡの $A_{y\max}$ をそれぞれ、Ⅰ $A_{y\max}$ 、Ⅱ $A_{y\max}$ とし、両者を区別して分析を行った。

この結果、回避歩行のⅠ $A_{y\max}$ とⅡ $A_{y\max}$ 、自由歩行の $A_{y\max}$ の3者には明確な差は認められない。図-2.2.14の回避歩行と自由歩行の $A_{y\max}$ に差があるように見えるのは、回避歩行のy方向の最大加速度がⅠ $A_{y\max}$ とⅡ $A_{y\max}$ の大きい方の値をとっていることによるためである。以上のことから、1.2Hz処理後の軌跡データにおけるⅠ $A_{y\max}$ では後で述べる曲がりⅠの判定基準にはなりにくいことが分かった。

次に、横ゆれを取り除く処理をする移動平均後の軌跡データ(\overline{Q}_1)では、曲がりⅡのⅡ $A_{y\max}$ は曲がりⅠのⅠ $A_{y\max}$ に比べて約1.4倍の加速度が働く傾向がある(図-2.2.15)。そこで移動平均後の軌跡データで、回避歩行における曲がりⅠのⅠ $A_{y\max}$ と自由歩行の $A_{y\max}$ を比較したところ(図-2.2.16)、やはり両者の間には

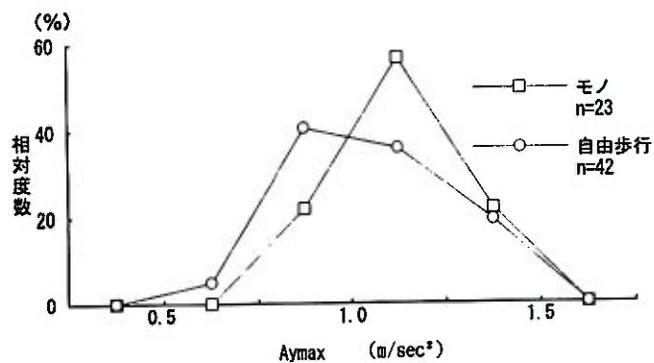


図-2.2.14 回避歩行と自由歩行の y 方向の最大加速度
(1.2Hz処理後、標本集合)

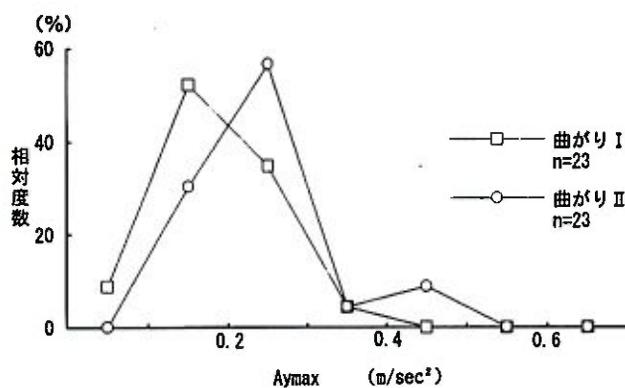


図-2.2.15 曲がり I と曲がり II の y 方向の最大加速度
(移動平均後、回避歩行の標本集合)

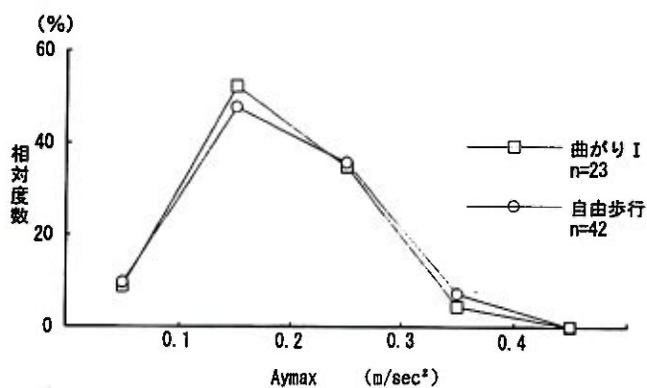


図-2.2.16 回避歩行と自由歩行の y 方向の最大加速度
(移動平均後、標本集合)

差はみられない。

以上のことから、回避行動を開始する地点の曲がりⅠの最大加速度が自由歩行時に働く最大加速度と区別できない程度のものであり、進路を再修正する曲がりⅡでは比較的急激な進路変更が行われていて、前章で述べたL字型歩行で現れる力が働いていると判断される。

2.3 回避行動開始点の判定方法

これまでの解析でも明らかなように、x方向については歩行者は定速で歩行していて、回避歩行の曲がり部分でも変わらないことが明らかとなった。このため回避行動開始点を検討するにあたってはy方向成分のみで検討が可能であると判断される。

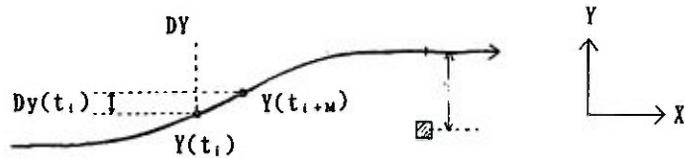
ところで、曲がりⅠは進路を変更するためのものであり、曲がりⅡは進路を再修正するためのものであることは既に触れた。本論で扱う回避行動開始点より生じる曲がり「曲がりⅠ」であるため、以後曲がりⅠに限定して検討を行うものとする。

そこで曲がりⅠに関する判定方法として、これまでの解析結果を踏まえて以下の判定基準について検討を行う。

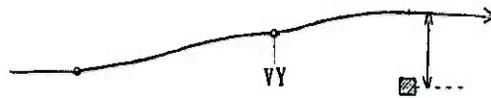
回避行動がゆるやかなS字曲線の軌跡になるとすれば、曲線の性質により回避行動開始点として以下の4つの判定基準が考えられる(図2.3.1)。

- ① 横ゆれ一周分先の点とのy方向の変位量 $Dy(t_i)$ が最大値をとる点として「DY」
ただし、 $Dy(t_i) = Y(t_{i+M}) - Y(t_i)$ 、Mは前章で述べたy方向の歩行者固有の周期に最も近い時間間隔に対応する整数を用いた。
- ② y方向の速度 $Vy(t_i)$ が負もしくは0から正になる点のうち障害物に最も近い点として「VY」
- ③ y方向の加速度 $Ay(t_i)$ が最大値をとる点として「AY」
- ④ 曲率 d^2y/dx^2 の絶対値が最大値をとる点として「P」
ただし、
$$P(t_i) = d^2y/dx^2$$
$$d^2y/dx^2 = ((Y(t_{i+2}) - Y(t_i)) / (X(t_{i+2}) - X(t_i)) - (Y(t_i) - Y(t_{i-2}))) / (X(t_i) - X(t_{i-2}))) / (X(t_{i+1}) - X(t_{i-1}))$$

- ① 横ゆれ一周期分先の点との y 方向の変位量 $Dy(t_i)$ が最大値をとる点として「DY」
 ただし、 $Dy(t_i) = Y(t_{i+M}) - Y(t_i)$ 、 M は前章で述べた y 方向の歩行者固有の周期に最も近い時間間隔に対応する整数を用いた。



- ② y 方向の速度 $Vy(t_i)$ が負もしくは 0 から正になる点のうち障害物に最も近い点として「VY」



- ③ y 方向の加速度 $Ay(t_i)$ が最大値をとる点として「AY」



- ④ 曲率 d^2y/dx^2 の絶対値が最大値をとる点として「P」
 ただし、

$$P(t_i) = d^2y/dx^2$$

$$d^2y/dx^2 = \frac{((Y(t_{i+2}) - Y(t_i)) / (X(t_{i+2}) - X(t_i)) - (Y(t_i) - Y(t_{i-2})) / (X(t_i) - X(t_{i-2}))) / (X(t_i) - X(t_{i-2})))}{(X(t_{i+1}) - X(t_{i-1}))}$$

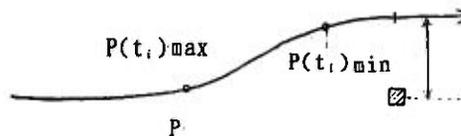


図-2.3.1 回避行動開始点の判定基準の模式図

①のDYによる判定方法は一周期先の位置座標との差が最大になる地点、すなわち、回避方向の移動量が大きくなる地点を回避行動開始点と考えるものである。②のVYによる判定方法は回避行動に入った後は曲がり I での $Vy(t_i)$ が負になることはないことに着目したものである。また、③のAYによる判定方法は曲がり I に最大の加速度が働いた点として、④のPによる判定方法は歩行軌跡の曲がり I の曲率が最大になる点との判断である。

2.4 判定方法ごとの結果の比較と考察

各判定基準による判定点を求め、それぞれの特長を障害物との x 軸方向距離（前方回避距離 $|Sx|$ ）との関係から分析する（図-0.4.3参照）。

なお、以下の記述では時刻 t の添字 i は省略する。

(1) 判定方法ごとの $|Sx|$ の相対度数分布

ここで扱う軌跡データの処理方法は、不必要な振動数を除くためにカットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルターで処理をした軌跡データ（以下、移動平均前と記す）と、これをさらに歩行者固有の周期で移動平均し、横ゆれを除く処理をした軌跡データ（以下、移動平均後）の2種類を採用する。

図-2.4.1は移動平均後の軌跡データによる回避行動開始点の判定方法の基準である $\overline{Dy_1(t)}$, $\overline{Vy_1(t)}$, $\overline{Ay_1(t)}$, $\overline{P_1(t)}$ を示したものである。 $\overline{Ay_1(t)}$ と $\overline{P_1(t)}$ はほぼ相似形で同様な変化を示す。 $\overline{Dy_1(t)}$ と $\overline{Vy_1(t)}$ についてはこの標本では比較的似た変化を示している。図-2.4.2は移動平均後の歩行軌跡（図-2.2.3と同じ標本Aと別の標本B）と各点の加速度ベクトルおよび各判定基準による判定位置を示したものである。標本Aにおける判定点は障害物に近づくにしがってまずVYが判定され、次いでAYとPが、障害物に一番近い位置でDYが判定されている。AYとPの判定位置が一致しているのは $\overline{Ay_1(t)}$ と $\overline{P_1(t)}$ の関係から当然の結果である。標本Bにおいては、標本Aとほぼ同様に、P、AY、DYが同じような地点で判定されている。しかし、VYについては障害物に一番近い位置で判定され、標本Aとは異なりを見せている。このようにVYによる判定方法では曲がり II（軌跡の再修正）以後に判定される例も見られる。

図-2.4.3はこうした移動平均後の各判定基準による標本集合($n=23$)の $|Sx|$ の相対度数分布を示したものである。 $|Sx|$ を2.5mごとに区分し、例えば $5.0\text{m} \leq < 7.5\text{m}$ のように表している。AY、Pによる判定方法で求められた $|Sx|$ については正規分布の形状を示す。しかし、DYとVYによる判定方法で求められた $|Sx|$ は二つ

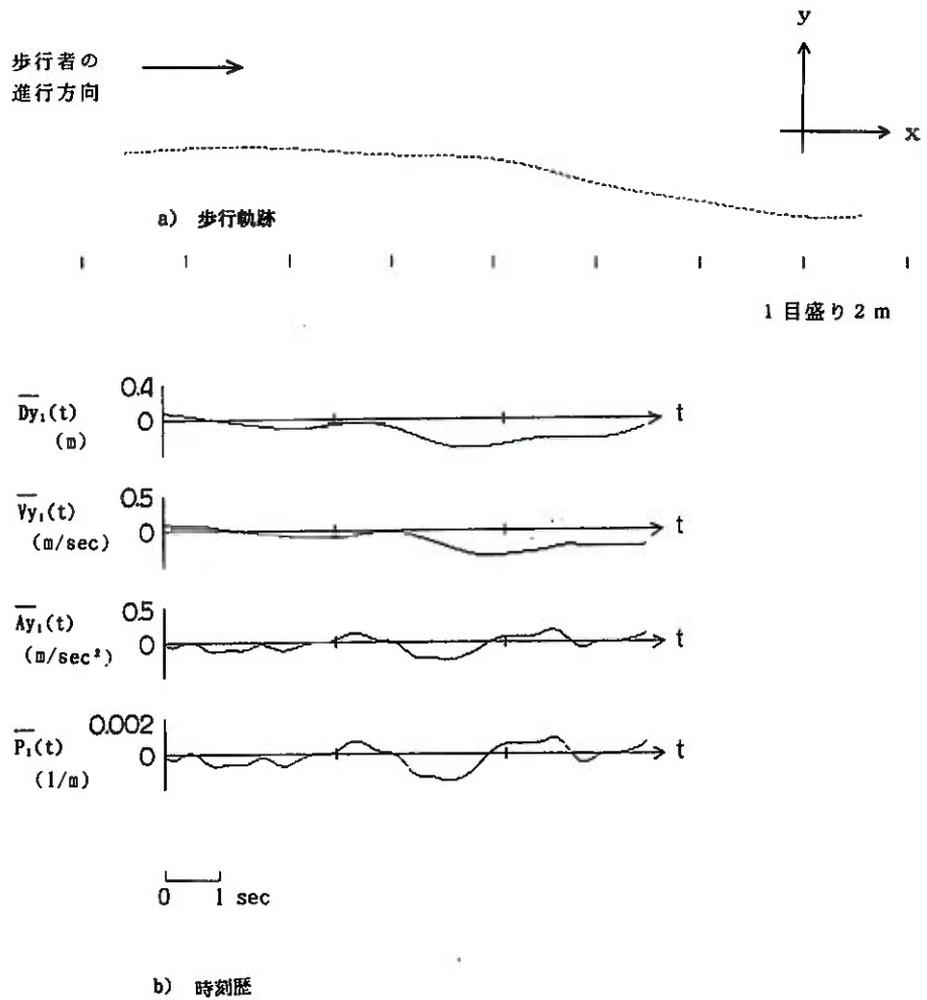


図-2.4.1 移動平均後の歩行軌跡と $\overline{Dy}_1(t)$, $\overline{Vy}_1(t)$, $\overline{Ay}_1(t)$, $\overline{P}_1(t)$ の時刻歴 (1.2Hz処理後移動平均、図-2.2.3と同一の標本)

のピークがみられる。また、VYによる判定が可能なのは $V_y(t)$ が常に正である10例を除いた13例である。

DY、VY、AY、Pの判定方法による $|S_x|$ の平均値は、それぞれ8.05m (1σ は3.74m、 $n=23$)、5.45m (4.16m、 $n=13$)、7.48m (3.55m、 $n=23$)、7.34m (3.41m、 $n=23$)で、VYを除く他の判定方法による $|S_x|$ の平均値はほぼ同じ値をとる。

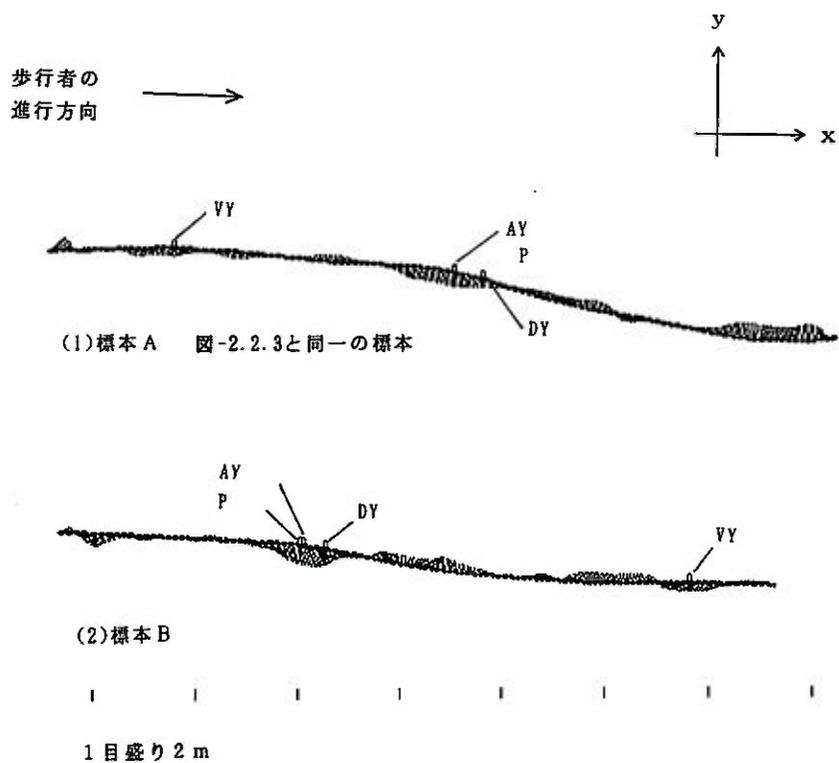


図-2.4.2 移動平均後の判定方法別回避行動開始点の判定位置
(1.2Hz処理後移動平均、標本)

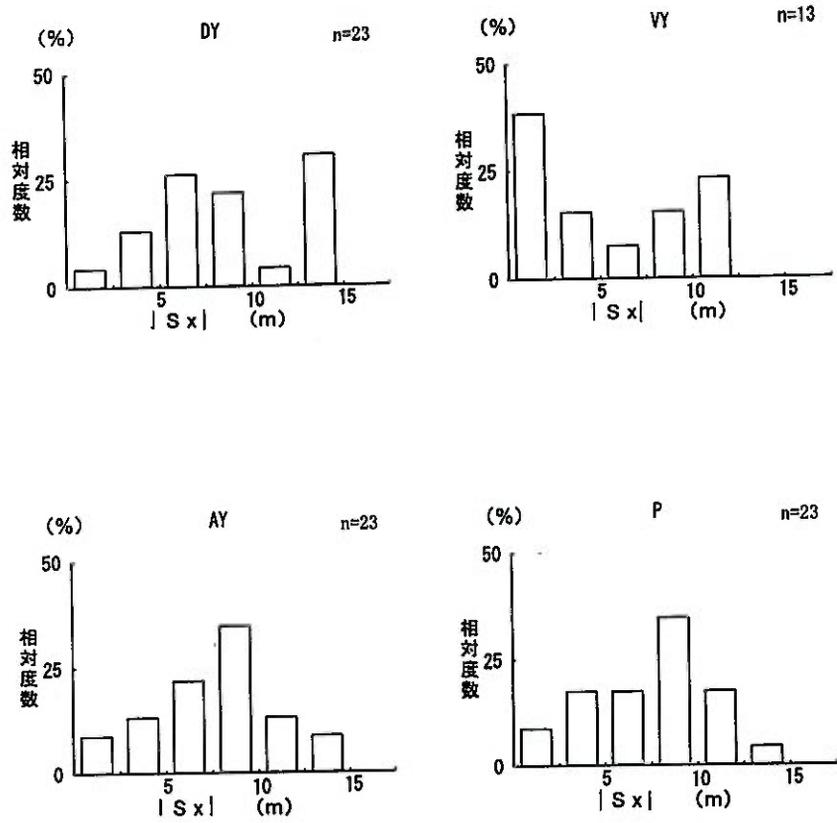


図-2.4.3 移動平均後の判定方法別の $|Sx|$ の相対度数分布
 (1.2Hz処理後移動平均、標本集合、ただしVYの移動平均後のみn=13)

(2) 移動平均しないデータとの比較

図-2.4.4は、各判定基準別の移動平均前の軌跡データによる $|Sx|$ の相対度数分布を比較したものである。移動平均前の軌跡データによるものは正規分布の形状にはならないものが多い。VYの判定方法による場合は障害物付近で判定される傾向が強い。

また、DY、VY、AY、Pの判定方法による $|Sx|$ の平均値は、それぞれ7.94m (1σ は3.85m、 $n=23$)、2.14m (1.77m、 $n=23$)、6.04m (3.67m、 $n=23$)、5.93m (3.55m、 $n=23$)である。移動平均前と移動平均後の軌跡データを用いた $|Sx|$ の平均値を比較すると、DYの判定方法によるものはあまり変わらない。しかし、他の判定方法によるものは両者の値に差があり、移動平均前の方がかなり小さな値をとる。この理由としては移動平均前の軌跡データではわずかな動きに判定結果が左右されるためと考えられる。

こうしたことから移動平均後の軌跡データを用いた方法は、移動平均前の軌跡データより安定した判定結果を得ることができると判断される。

(3) 判定方法の違いによる判定位置の関係

移動平均後の軌跡データによる $|Sx|$ の平均値は、判定基準がVY、P、AY、DYの順に大きくなる。前述したように、VYの判定方法による $|Sx|$ を除くと他の判定基準による $|Sx|$ の平均値はほとんど変わらない。特に、AYとPによる判定位置はほぼ一致する。

なお、3.0Hz以上の高振動数成分を除いてさらに移動平均後の軌跡データ (\bar{Q} 、 $(x(t), y(t))$) についても分析を行った。図-2.4.5は標本集合の $|Sx|$ の相対度数分布を判定基準別に示したものである。1.2Hz処理後移動平均の軌跡データのもの比べて分布形状にまとまりがみられない。DY、VY、AY、Pの判定方法による $|Sx|$ の平均値は、それぞれ 8.19m (1σ は3.58m、 $n=23$)、5.18m (4.05m、 $n=15$)、6.25m (3.68m、 $n=23$)、6.52m (3.68m、 $n=23$)である。 $|Sx|$ の平均値は、1.2Hz処理後移動平均の軌跡データと比べて、VYとDYによるものはほぼ変わらないが、AYとPによるものは異なりが見られる。

以上のことから、VYによる判定方法はデータが欠落したり、値が片寄ったりするなど安定した結果を得られない。DYによる判定方法は軌跡データの性格にかかわらず安定した結果を得ることができるが、判定者の主観的な判断とは若干の差がある。AYとPによる判定方法は優劣がつけ難いほどほぼ同じ判定結果を得ることができるが、移動平均の処理をして求めた軌跡データを用いた歩行軌跡の曲がりを見いだすという点では曲率Pによる判定方法が最も適当であると判断した。

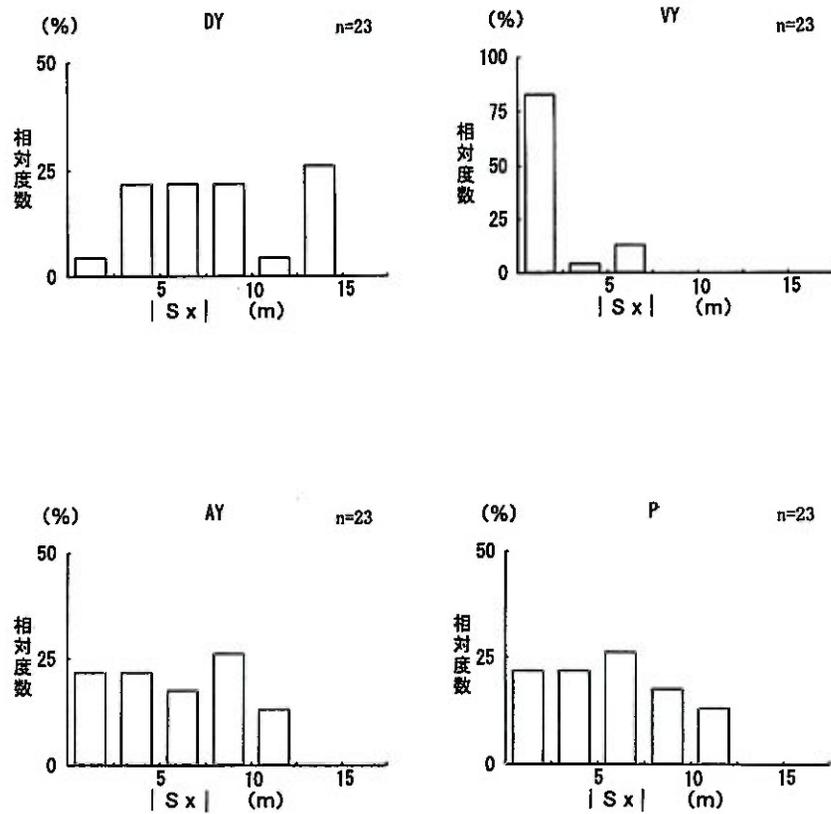


図-2.4.4 移動平均前の各判定基準による $|Sx|$ の相対度数分布 (1.2Hz処理後、標本集合)

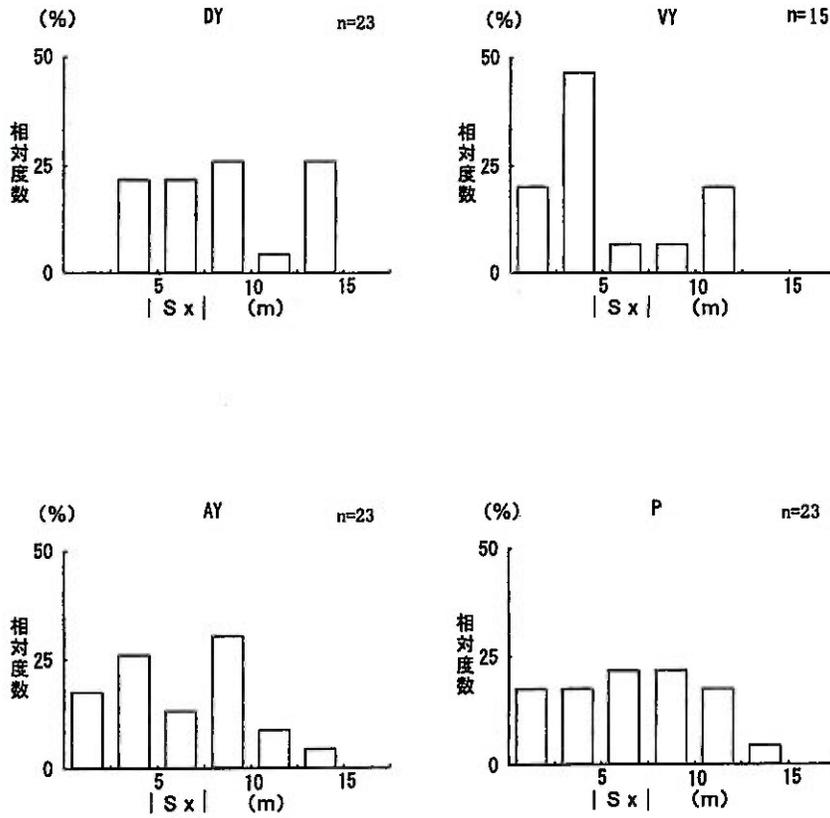


図-2.4.5 移動平均後の各判定基準による $|Sx|$ の相対度数分布
 (3.0Hz処理後移動平均、標本集合、ただし VYの移動平均後のみ $n=15$)

2.5 まとめ

歩行者が通路上に置かれた障害物を避けるために回避行動を開始する点（回避行動開始点）を、画像処理技術を応用することによって数理的に判定する方法を検討した。

歩行調査は、通路上に障害物がある場合と、無い場合（自由歩行）について行い、両者の軌跡を比較することから回避行動が行われたと判断される歩行（回避歩行）軌跡を選定し、回避歩行の特性を明らかにした。

回避歩行では障害物とのすれ違いまでに2つの曲がりがあり、進路を変更する回避行動開始点での「曲がりⅠ」と、すれ違い付近で進路を再修正する「曲がりⅡ」とからなることを示した。曲がりのためのy方向の加速度は曲がりⅠに比べて曲がりⅡの方が大きい。

こうした知見を踏まえ曲がりⅠに関する判定方法を検討した。判定基準は、①y方向の変位量による方法、②y方向の速度変化に着目した方法、③y方向の最大加速度による方法、④歩行軌跡の曲率による方法の4つとし、処理方法の異なる2種類の軌跡データについてそれぞれの特性及び関係を分析した。

この結果、回避行動開始点の判断基準として、カットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理後さらに歩行者固有のy方向の周期で移動平均した軌跡データの曲率による方法が最も適当であるとの結論を得た。

次章では、障害物の条件（性質、向きなど）を変化させ、曲率Pによる判定方法で前方回避距離を求めることにする。

第三章

静止した障害物に対する回避行動

3.1 目的と実験調査方法

歩行者の回避行動は、通路に置かれた物体や他の歩行者などが進路を塞ぎ歩行者の障害となるため、これを避けるために行われるものである。こうした障害物による回避行動への影響を考察するには、序論の目的で説明したように障害物に対する感覚（意識）調査や心拍数の計測などの歩行者の心理や生理を測定するアプローチもあるが、本章では前章で検討した回避行動開始点の判定方法を利用して回避行動の代表的な指標である前方回避距離 $|S_x|$ を定量的に求める。ここで、前方回避距離とは回避行動開始点と障害物との x 方向距離である。この前方回避距離を障害物の条件を変化させて計測することにより、障害物の性質による歩行者行動への影響の程度を定量的に把握できると考える。

歩行者への障害になるものには、その属性・形状・大きさ・動きの有無などによって分類できる。本論では人間を中心とした大きさのものに限定し、本章では静止した障害物を、また次章では移動する障害物を対象として実験調査を行うものである。

実験調査は、モノとヒトを障害物とした。障害物がヒトの場合、静止した状態とし、その向きを前向き、後向き、横向きの3種類とした。以後、障害物をそれぞれ、〈モノ〉、〈ヒト前向〉、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向〉と記す。標本数は〈モノ〉が60例、〈ヒト前向〉が66例、〈ヒト後向〉が70例、〈ヒト横向〉が64例である（表-3.1.1）。

実験調査場所は前章と同様でこれを「実験シリーズ1」と呼ぶことにする。

また、本章では実験シリーズ1と比較するため、実験調査時期を変えた「実験シリーズ2」と実験調査場所を変えた「実験シリーズ3」についても分析している（表-0.4.2参照）。シリーズ2とシリーズ3が基準とするシリーズ1と異なる点は主に障害物を通路のどの部分に置くかである。シリーズ1が通路の中心からおよそ0.3m左側寄りであるのに対し、シリーズ2では回避行動の出現をより鮮明にするため観測初期位置 E_y ($E_x = -14\text{m}$ の地点における y 座標値) の頻度が比較的高い位置（シリーズ1よりさらに0.68m左側寄り：図中上方）に配置した。またシリ

表-3.1.1 実験調査と標本数

障害物の種類	実験シリーズ		
	1	2	3
モノ	60	71	51
ヒト前向	66	72	-
ヒト後向	70	-	51
ヒト横向	64	-	-

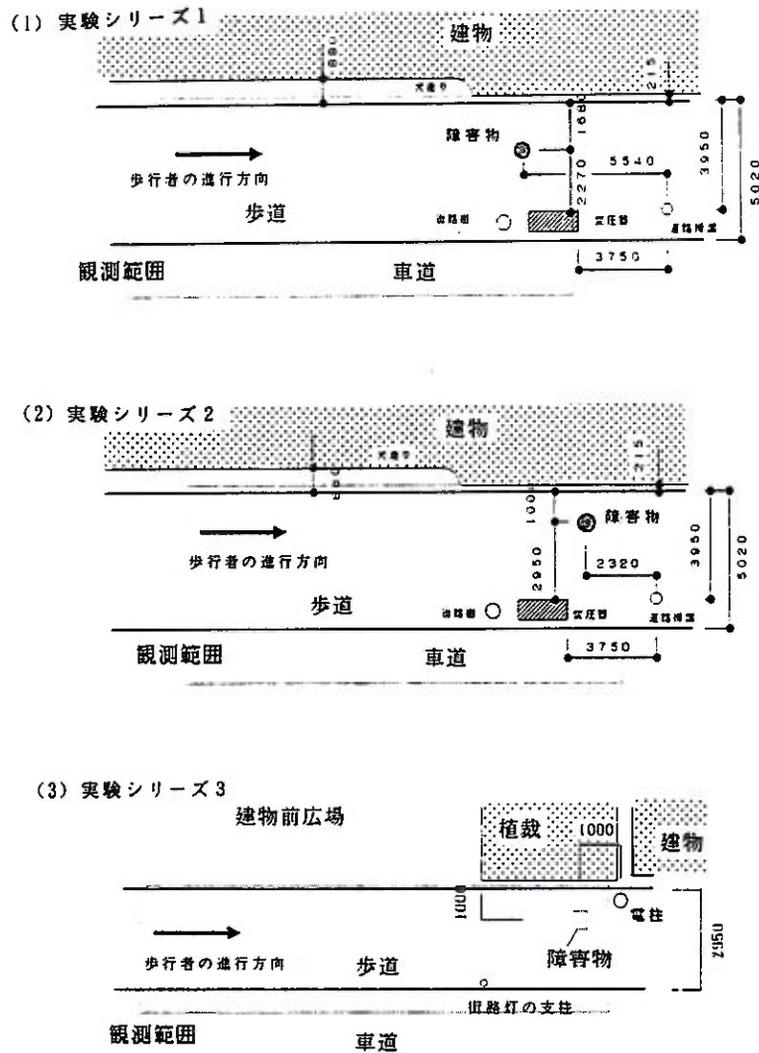


図-3.1.1(1)(2)(3) 実験調査場所

ーズ3では有効幅員が大きくないため障害物を片側（図中上方）に寄せた。このため歩行者の回避行動は右側回避（注1）のみに限定される。それぞれの実験場所を図-3.1.1に示す。いずれも障害物を原点として通路に平行な軸をx軸とし、歩行者の進行方向側を正とする。またx軸に直交する軸をy軸とし、歩行者の左手側を正、右手側を負とする。

なお、回避行動開始点の判定には、前章で検討したカットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理に加えて歩行者固有の周期で移動平均した軌跡データによる曲率 $P_1(t)$ の最大値Pによって判定する方法を用いる。解析方法については前章の方法と同様に回避方向による違いを分析する部分以外では右側回避のデータはx軸に対称に折り返した形で、左側回避のデータに併せて分析（例えば、 Sy' のように右肩に「'」の記号で表記）している。

（注1）

通路上に障害物がある場合、障害物の正面に対して右側を歩行したものを右側回避、左側を歩行したものを左側回避と分類する。

3.2 実験調査結果の概要

(1) 歩行軌跡

a. 障害物別歩行軌跡図の特性

図-3.2.1は実験シリーズ1で調査した障害物別の歩行軌跡の標本集合である。歩行軌跡は、いずれの障害物においても障害物に対して右側（図中下方）に比べ左側（図中上方）に集中する傾向がある。このように、歩行者が通路の中央を歩かず左側を歩く傾向があることは小西らの既往研究で報告されている（序論4の(1)、図-0.4.1参照）。

また、前章で述べたように、観測初期位置のy座標値 Ey が障害物の正面（x軸）から離れた歩行軌跡ほど直線的なものが多い。逆に観測初期位置が障害物の正面に近づくにしがって軌跡に曲がりが見られる。図-3.2.2は回避方向別に Ey の一定区間ごと（例えば Ey が $0.5\text{m} \leq < 1.0\text{m}$ の0.5m間隔）の平均軌跡（集合平均）を示したものである。この図より Ey が小さいほど軌跡の変化は大きくなり、歩行者は初期位置に応じた軌跡で歩行する傾向があることがうかがわれる。さらに、右側回避と左側回避の歩行軌跡の標本集合がx軸に対してほぼ対称であることが分かる。

ところで、図-3.2.1に示すように回避行動がゆるやかな方向変換によってなさ

歩行者の
進行方向



モノ (n=60)



ヒト前向 (n=66)



ヒト後向 (n=70)



1目盛り 2 m

ヒト横向 (n=64)

図-3.2.1 障害物別歩行軌跡の標本集合 (実験シリーズ1)

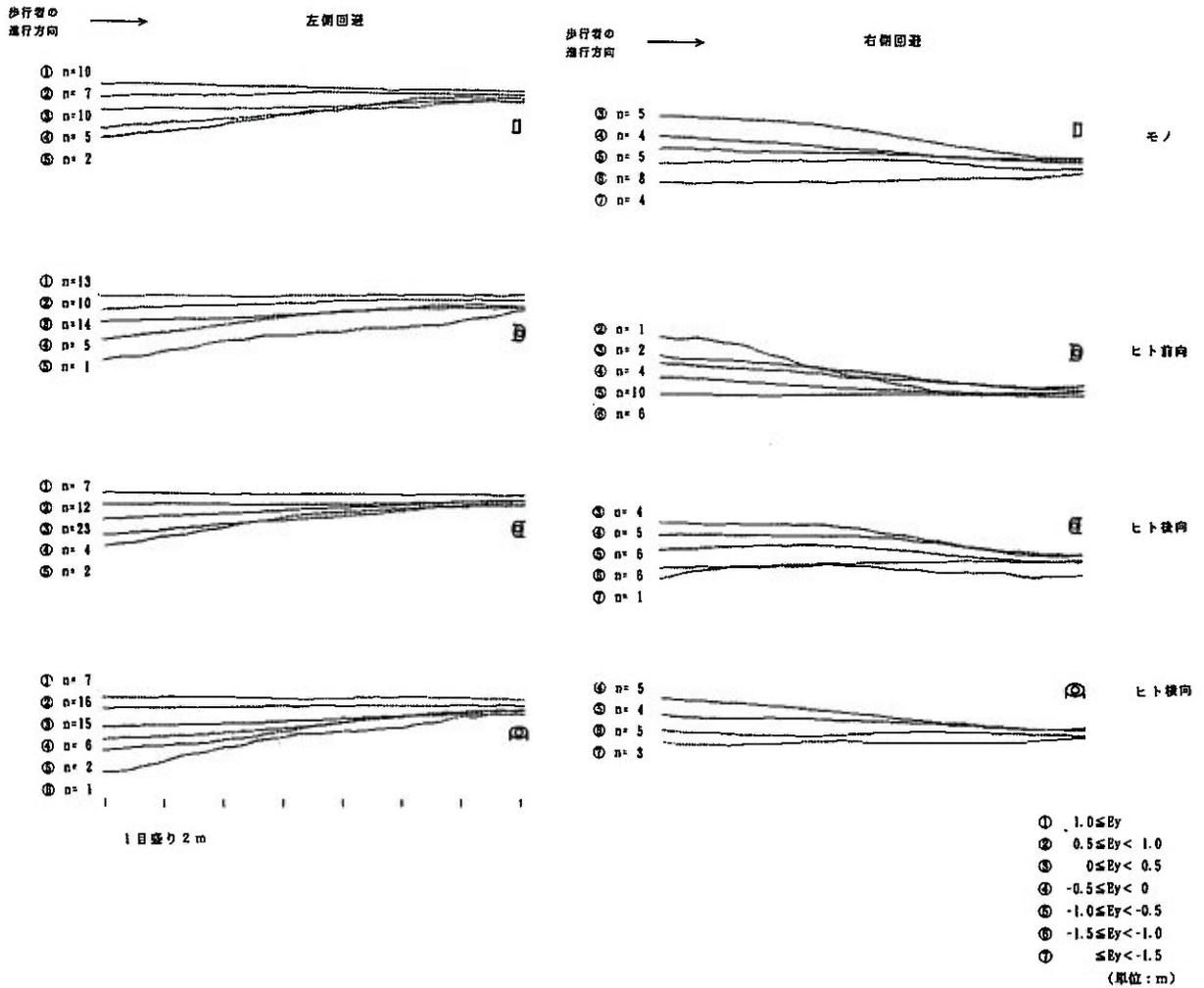


図-3.2.2 障害物別 E_y 区分による集合平均した歩行軌跡 (実験シリーズ1)

れるために障害物の周辺には、いずれの障害物においても歩行者が歩行していないゾーンがある。その大きさは障害物によって異なることから、障害物の歩行者に対する影響の度合いを表しているものと推察される。障害物前方のゾーンは、図-3.2.1から直観的に大きい方から<ヒト前向>、<ヒト横向>、<ヒト後向>で、<モノ>は<ヒト後向>と変わらないことが読みとれる。また、右へ回避するか左へ回避するかによる違いについては、<モノ>と<ヒト前向>の場合、両側の大きさが変わらないが、<ヒト後向>と<ヒト横向>の場合に違いがみられる。<ヒト後向>の場合にはy方向の正側と負側がx軸に対して対称であるとは認められない。これについては3.3節の(6)のcで分析する。<ヒト横向>の場合、障害物であるヒトの後方(y方向の正側)のゾーンが狭く、ヒトの前方(y方向の負側)が広いのは、身体の向きの影響が考えられる。

b. 観測初期位置 E_y

図-3.2.3は、右側回避のデータをx軸に対称に折り返す前の状態での標本集合の E_y の相対度数分布を障害物別に示したものである。 E_y は例えば、 $0.5 \leq < 1.0$ mのように0.5mごとに区分している。いずれも正規分布かそれに近い分布形状を示し、図中上側寄りに歩行する傾向がある(図-3.2.1参照)。

各障害物の標本集合の E_y の平均値は、図-3.2.4に示すように(矢印 $1\sigma : 1\sigma$ は標準偏差)、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>でそれぞれ、 $-0.05\text{m}(n=60)$ 、 $0.15\text{m}(n=66)$ 、 $0.08\text{m}(n=70)$ 、 $0.04\text{m}(n=64)$ で 1σ が0.8m前後とほとんど差はみられない。

(2) 障害物を避ける方向

図-3.2.5は、右側回避のデータを折り返す前の状態での E_y と K_y ($K_x=0$ でのy座標値)の関係の標本集合を示したものである。 E_y と K_y が共に正の場合(第1象限)、初期位置を障害物正面に対して左側(図中上側)であった歩行者がそのまま左側に避けたことを示す。 E_y と K_y が共に負の場合(第3象限)、歩行者は初期位置右側(図中下側)に対して右側に避けたことになる。また、第2象限の場合は右側に初期位置をとっていた歩行者がx軸を横切って左側に避けた(右→左)ものであり、第4象限の場合は初期位置左側からx軸を横切って右側に避けた(左→右)ものである。障害物を避ける方向を障害物正面に対して左側(図中上側)と右側(下側)に分けると、障害物がやや左側に寄っているにもかかわらずどの障害物でも7:3(モノのみ6:4)で左側に避ける割合が高い(注2)。3.3節の(2)で後述する回避歩行に限った場合でもこの傾向は変わらない。一方、右から左へ回避する(右→左)比率は障害物により16~28%で平均22%、逆の場合(左→右)

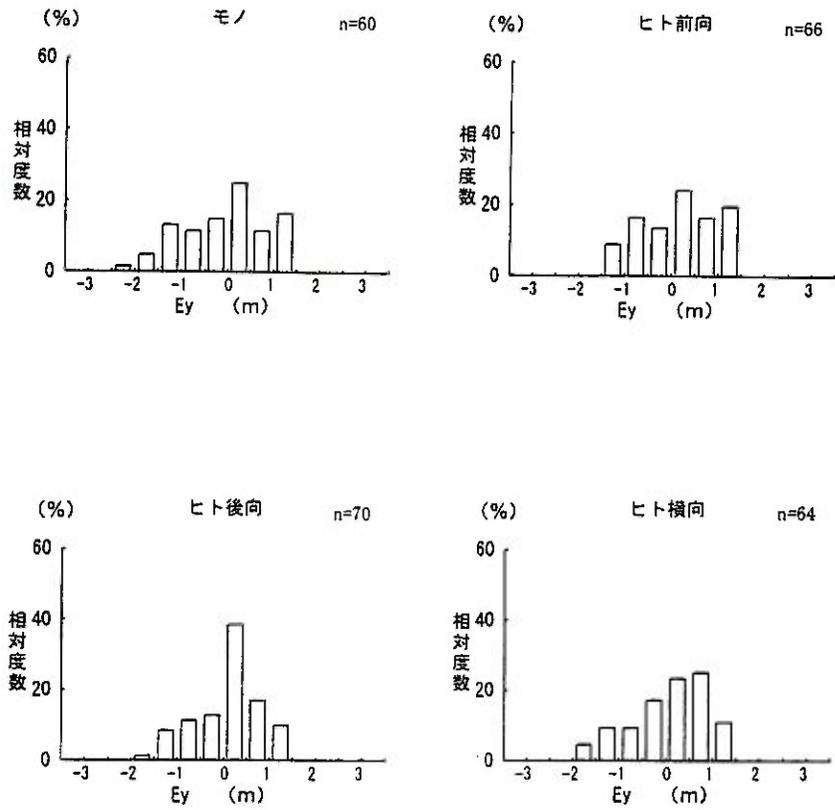
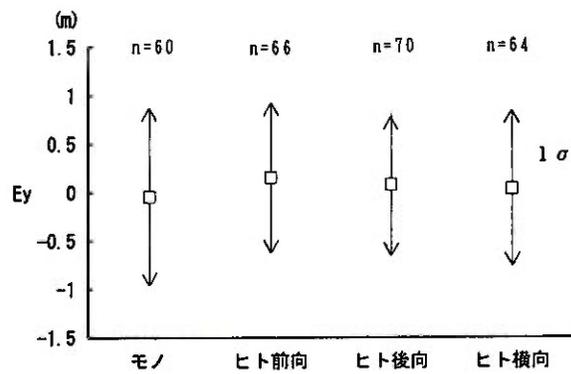


図-3.2.3 障害物別 E_y の相対度数分布（実験シリーズ1、標本集合）



矢印は 1σ (σ :標準偏差)

図-3.2.4 障害物別 E_y の平均値と分散（実験シリーズ1、標本集合）

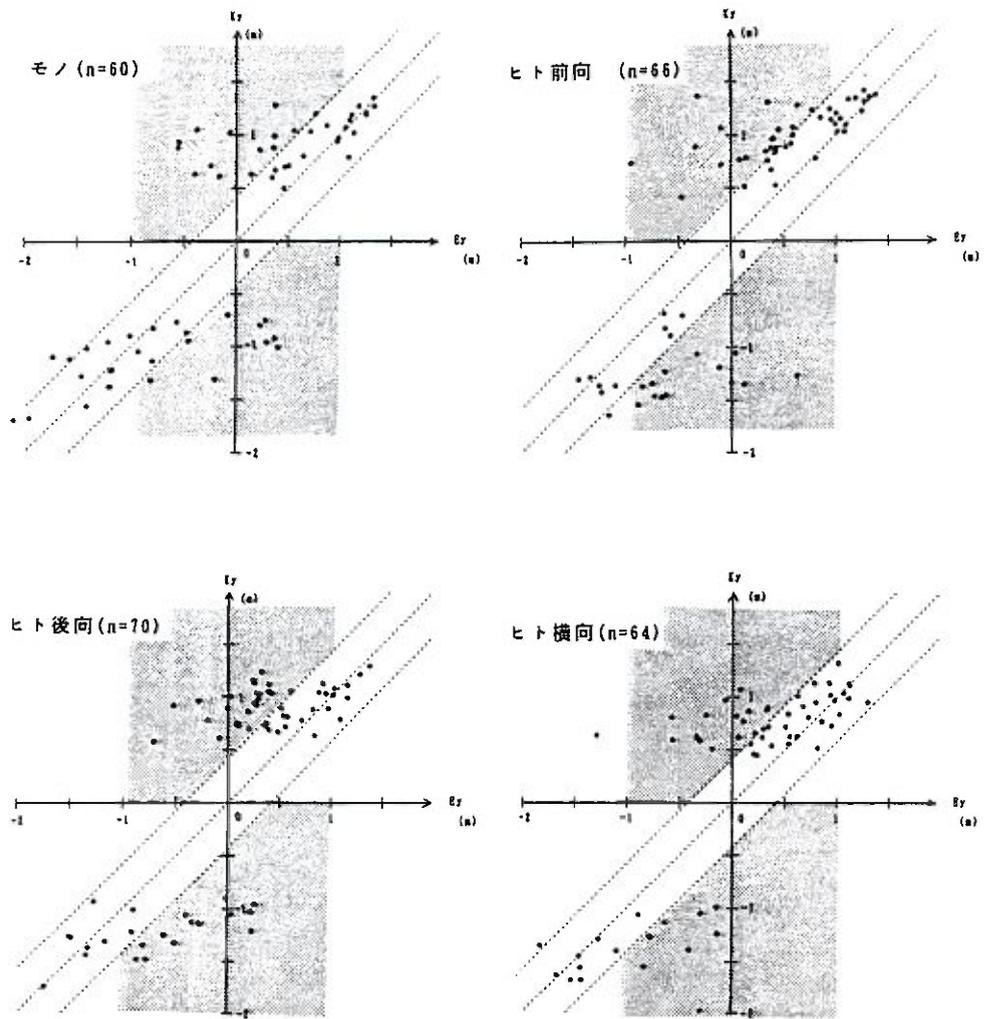


図-3.2.5 障害物別 E_y と K_y の関係（実験シリーズ1、標本集合）

は 0~28%で平均17%であった。すなわち、8割程度の歩行者は障害物正面に対して初期位置にいた方向へ回避するが、残りの約2割は回避前の初期位置からわざわざx軸を横切って反対方向に障害物を避けようとする行動がみられた。x軸を横切る行動の比率は右側回避より左側回避がやや高い。

(注2)

<ヒト横向>については、右側回避の場合、ヒトの前を通ることに対する歩行者のマナーの問題や道路側の危険性などの影響も予想されるが、こうした人の情緒や安全性に関連する要因についてはここでは考えないことにする。

(3) すれ違い時の側方距離 K_y

障害物とのすれ違い時の K_y' の標本集合は、図-3.2.6に示すように正規分布に近い分布形状を示す。 K_y' は例えば、 $0.5 \leq <1.0\text{m}>$ のように0.5mごとに区分している。また図-3.2.7に示すように平均値は<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>でそれぞれ、1.01m(n=60)、1.09m(n=66)、1.01m(n=70)、0.96m(n=64)で、いずれも1.0m程度(1 σ は0.23mから0.34m)でほぼ変わらない。すなわち歩行者は障害物にかかわらずほぼ二人分の体幅程度の間隔をおいてすれ違いを行っていて、人体側方に関しては障害物を大きく避けるような行動は見られない。

(4) 歩行速度

回避行動における歩行速度の平均は、いずれも1.4から1.5 m/sec程度で他の文献(文1、2)との比較から自由歩行速度と見ることができる。

3.3 分析結果

(1) 回避行動前の障害物による影響の検討

第一章では、障害物のない歩行(自由歩行と記す)では歩行者が直線的に歩行していると判断された。ここでは障害物の設置によってあるいは障害物の種類によって回避行動前に歩行者の行動が影響を受けているかどうかを検討した。

表-3.3.1は、自由歩行および各障害物の標本集合の E_y を障害物間でt検定したものである。いずれの障害物間にも有意差がみられないことから、観測初期位置

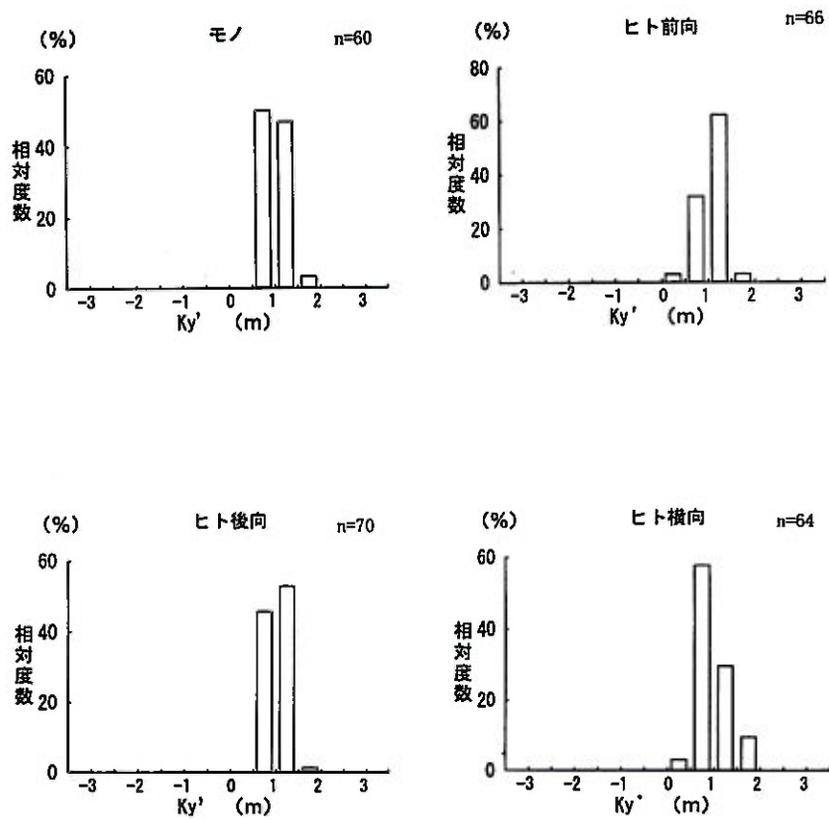
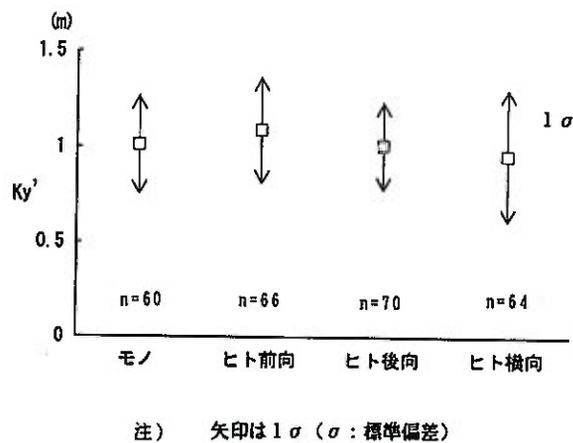


図-3.2.6 障害物別 Ky' の相対度数分布（実験シリーズ1、標本集合）



注) 矢印は 1σ (σ :標準偏差)

図-3.2.7 障害物別 Ky' の平均値と分散（実験シリーズ1、標本集合）

表-3.3.1 障害物別Eyの平均値の差の検定（実験シリーズ1、標本集合）

	自由歩行 n=42	モノ n=60	ヒト前向 n=66	ヒト後向 n=70	ヒト横向 n=64
自由歩行	—	C	C	C	C
モノ	—	—	C	C	C
ヒト前向	—	—	—	C	C
ヒト後向	—	—	—	—	C
ヒト横向	—	—	—	—	—

A: 危険率1%で有意差あり
 B: 危険率5%で有意差あり
 C: 有意差なし

において歩行者は障害物の種類に影響を受けていないと判断される。

(2) 回避歩行の軌跡データの選定

障害有り歩行調査での歩行軌跡にも自由歩行的なものが少なくない。そこで前章の2.2節の(1)と同様の方法で回避歩行の標本を選定した。

図-3.2.5の3本の破線で示した直線の中央は $E_y=K_y$ の直線であり、他の2本は自由歩行で得られた各標本の $E_y=K_y$ 直線からの距離の $\pm 1\sigma$ 分（ σ は標準偏差）を示すものである。したがって両端2本の直線に囲まれたゾーン内にプロットされた標本については自由歩行的に歩行しているものとし、他を回避歩行と判断した。

この結果、回避歩行と判断された歩行は〈モノ〉が60例中23、〈ヒト前向〉が66例中35、〈ヒト後向〉が70例中39、〈ヒト横向〉が64例中28（ただし、右側回避8例、左側回避20例）で、平均48.1%が回避歩行で、残りの51.9%が自由歩行的に歩行しているか障害物により接近したものと判断される。

また、回避歩行と判断されたものの E_y はほぼ $-1\text{ m} \leq E_y \leq 1\text{ m}$ に限定される（図中網掛けのゾーン）ことから、歩行者は障害物正面（x軸）から1m以上離れた歩行位置をとる場合は自由歩行的な歩行をしていることが分かる。

図-3.3.1に回避歩行の軌跡の障害物別標本集合を、図-3.3.2に自由歩行的な歩行軌跡の障害物別標本集合を示す。

以下の分析では特に断らない限り回避歩行について行う。

歩行者の
進行方向



モノ(n=23)



ヒト前向 (n=35)



ヒト後向(n=39)



ヒト横向(n=28)

1目盛り2m

図-3.3.1 回避歩行軌跡の標本集合

歩行者の
進行方向



モノ (n=37)



ヒト前向 (n=31)



ヒト後向 (n=31)



ヒト横向 (n=36)

1目盛り 2 m

図-3.3.2 自由歩行的な歩行軌跡の標本集合

(3) 回避行動開始時の S_y

図-3.3.3は回避歩行における標本集合の S_y' の相対度数分布を障害物別に示している。また、 S_y' は $0.5\text{m} \leq < 1.0\text{m}$ のように 0.5m ごとに区分している。 S_y' はいずれの障害物にあっても正規分布に近いもので -0.3m から 1.2m までにおおむね分布する。各障害物の S_y' の平均値は図-3.3.4に示すように<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>でそれぞれ、 $0.41\text{m}(n=23)$ 、 $0.55\text{m}(n=35)$ 、 $0.45\text{m}(n=39)$ 、 $0.44\text{m}(n=28)$ でほぼ変わらない。

(4) 前方回避距離 $|S_x|$

図-3.3.5は回避歩行における標本集合の $|S_x|$ の相対度数分布を障害物別に見たものである。ただし、 $|S_x|$ は例えば $5.0\text{m} \leq < 7.5\text{m}$ のように 2.5m ごとに区分している。分布はいずれも正規分布かそれに近い形状を示す。<ヒト横向>については2つのピークがみられる。図-3.3.6は $|S_x|$ の平均値とその分散を示したものである。障害物別の $|S_x|$ の平均値は、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>がそれぞれ、 7.34m (1σ は 3.41m 、 $n=23$)、 8.84m (3.03m 、 $n=35$)、 6.74m (2.76m 、 $n=39$)、 7.49m (3.41m 、 $n=28$)であった。分散は 3.0m 前後で歩行者の回避行動のパラツキを示すものである。

図-3.3.7は標本集合の $|S_x|$ の相対度数分布を回避方向別に示したものである。<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>における右側回避と左側回避の $|S_x|$ の平均値はそれぞれ、 $8.85\text{m}(n=9)$ と $6.37\text{m}(n=14)$ 、 $9.24\text{m}(n=14)$ と $8.57\text{m}(n=21)$ 、 $6.92\text{m}(n=13)$ と $6.65\text{m}(n=26)$ 、 $9.17\text{m}(n=8)$ と $6.82\text{m}(n=20)$ であった。

<モノ>と<ヒト横向>を除くと $|S_x|$ については回避方向による差はみられない。<モノ>と<ヒト横向>についてはいずれも差はあるが右側回避の標本数は10以下と少ないため差があるとは判断できない。

なお、<ヒト横向>の $|S_x|$ については<ヒト横向後方回避>と<ヒト横向前方回避>に区分して扱うことにする。

(5) 回避行動開始点までの歩行状況の検討

回避歩行を行う歩行者が、観測を開始してから回避行動開始点までの間をどのように歩いているかを検討した。図-3.3.8は回避歩行における標本集合の E_y' および S_y' の平均と分散の関係をみたものである。いずれの障害物についても S_y' の値は E_y' より大きく、その平均値の差は 0.2m から 0.4m である。

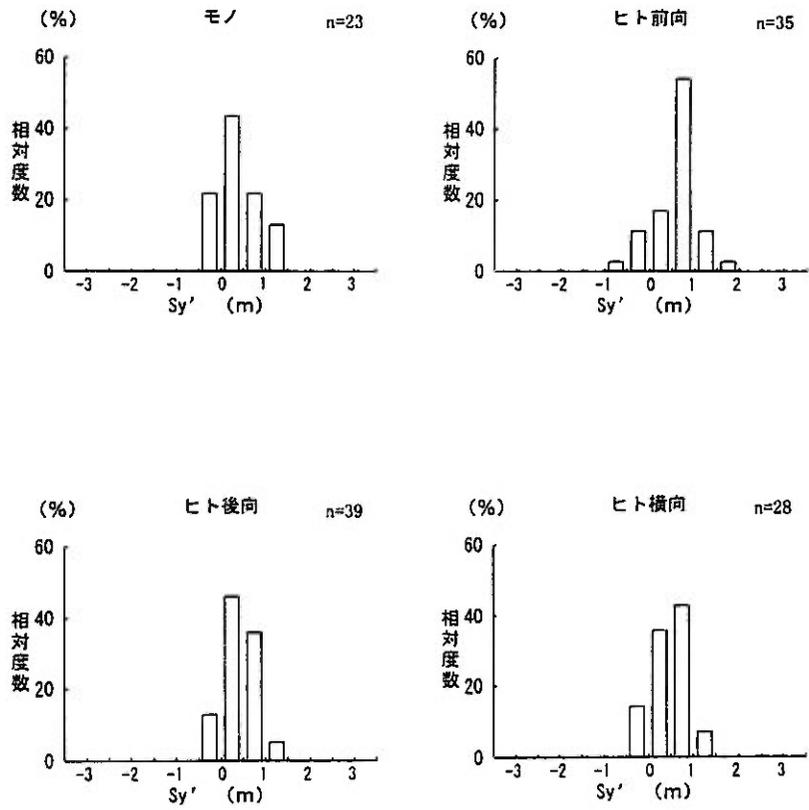


図-3.3.3 障害物別 Sy' の相対度数分布
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

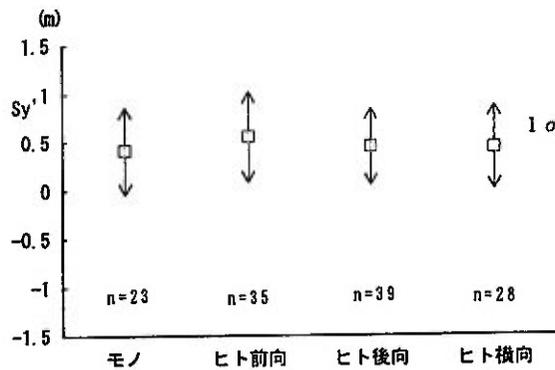


図-3.3.4 障害物別 Sy' の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

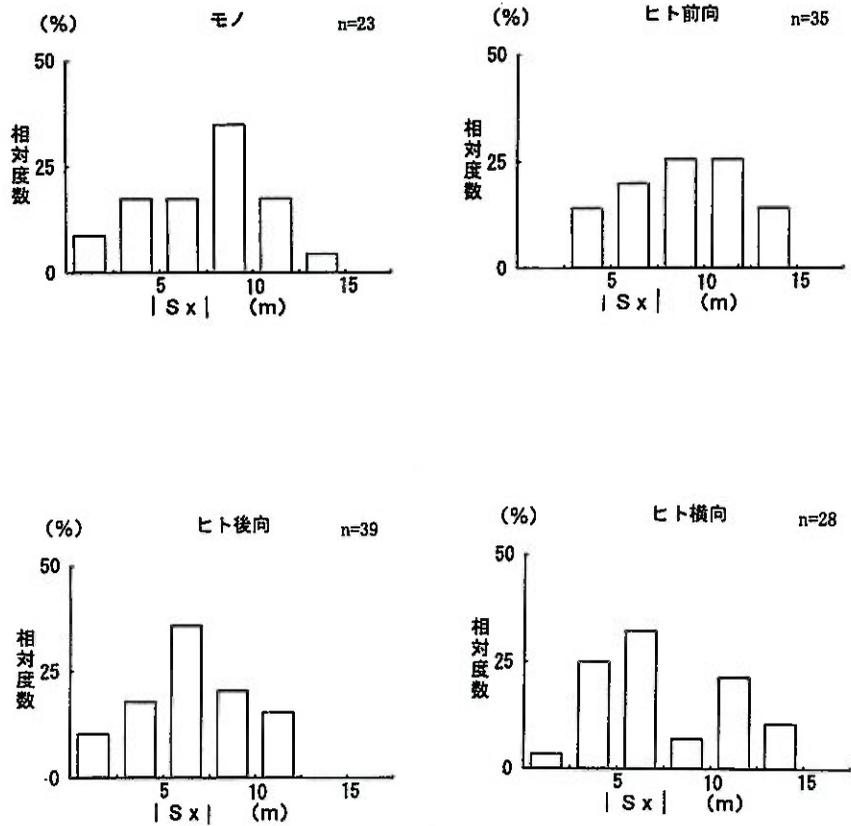


図-3.3.5 障害物別 $|Sx|$ の相対度数分布
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

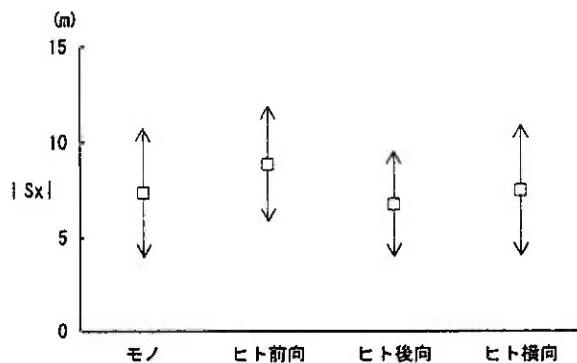


図-3.3.6 障害物別 $|Sx|$ の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

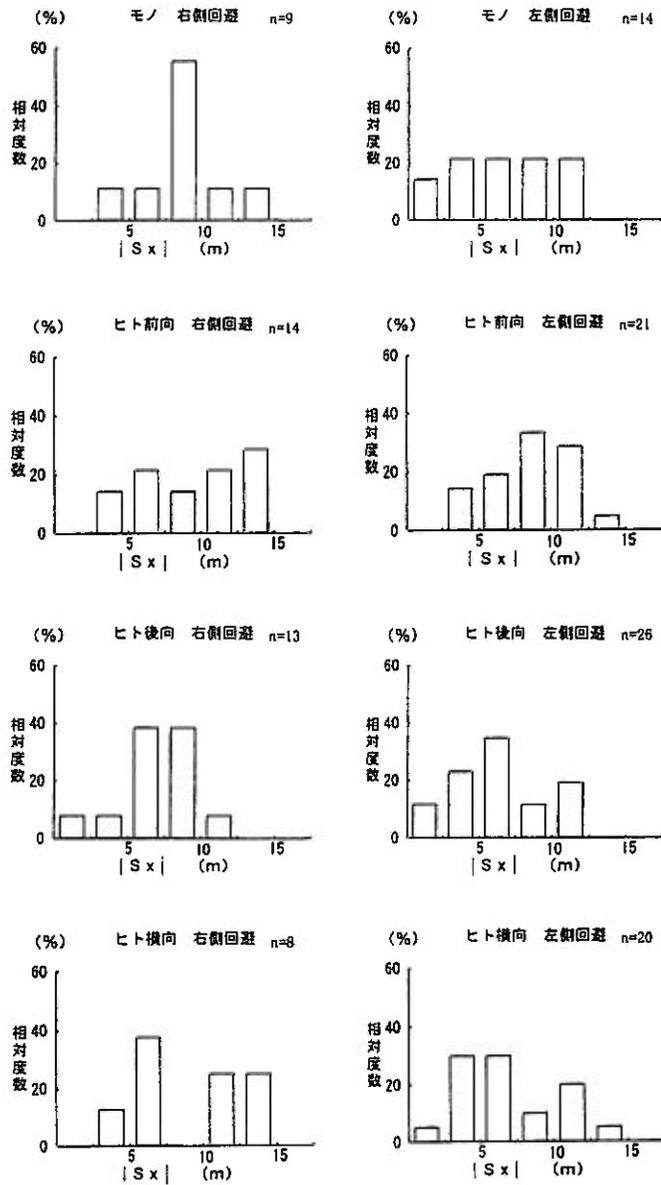


図-3.3.7 回避方向別 $|Sx|$ の相対度数分布
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

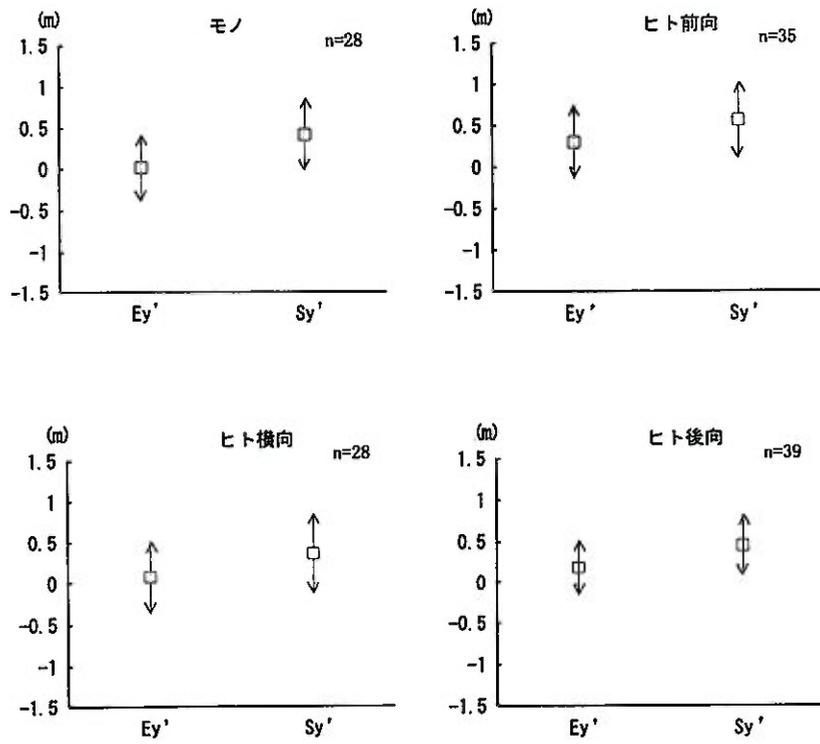


図-3.3.8 障害物別 Ey' および Sy' の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

こうした結果から歩行者は回避行動を開始するまで徐々にではあるが進路を回避方向へ変更していると判断される。

(6) 回避方向による影響の検討

本節では障害物を中心に回避方向が左か右かで Ey' 、 Sy' 、 Ky' に差があるかどうかを検定した。ここで扱う値は、3.1節でも定義したように左右の回避を平均値や分布形で比較する場合には右側回避のデータをx軸を対称軸に折り返した形で扱っている。

a. 観測初期の Ey

図-3.3.9は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の Ey の相対度数分布を回避方向別に示したものである。図中、黒く塗りつぶした部分は回避歩行と判断されたものである。分布形状の比較から左右の Ey はほぼ対称であることが分かる。

図-3.3.10は回避歩行における Ey' の平均値と分散を示したものである。 Ey' の平均値は、〈モノ〉、〈ヒト前向〉、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向〉の順に右側回避と左側回避でそれぞれ、0m(1 σ が0.39m, n=9)と0.03m(0.41m, n=14)、0.43m(0.46m, n=14)と0.20m(0.42m, n=21)、0.30m(0.39m, n=13)と0.12m(0.29m, n=26)、0.45m(0.25m, n=8)と-0.07m(0.42m, n=20)であった。回避方向別の Ey' の平均値の差の検定では、〈ヒト横向〉を除くと有意差はみられない(表-3.3.2)。〈ヒト横向〉については標本数が10以下と小さいため回避方向別の Ey' の値に有意差があるとは必ずしも断定できない。

b. 回避行動開始時の Sy

図-3.3.11は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の Sy の相対度数分布を回避方向別に示したものである。分布はほぼ正規分布に近い形状を示す。 Sy' の平均値については〈モノ〉、〈ヒト前向〉、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向〉の右側回避と左側回避がそれぞれ、0.18m(n=9)と0.55m(n=14)、0.70m(n=14)と0.46m(n=21)、0.38m(n=13)と0.48m(n=26)、0.63m(n=8)と0.25m(n=20)であった(図-3.3.12)。回避方向別の Sy' の平均値の差の検定を行った結果、〈モノ〉と〈ヒト横向〉を除くと回避方向による有意差がみられない(表-3.3.3)。〈モノ〉と〈ヒト横向〉については標本数がいずれも10以下と小さいため回避方向別の Sy' の値に有意差があるとは必ずしも断定できない。

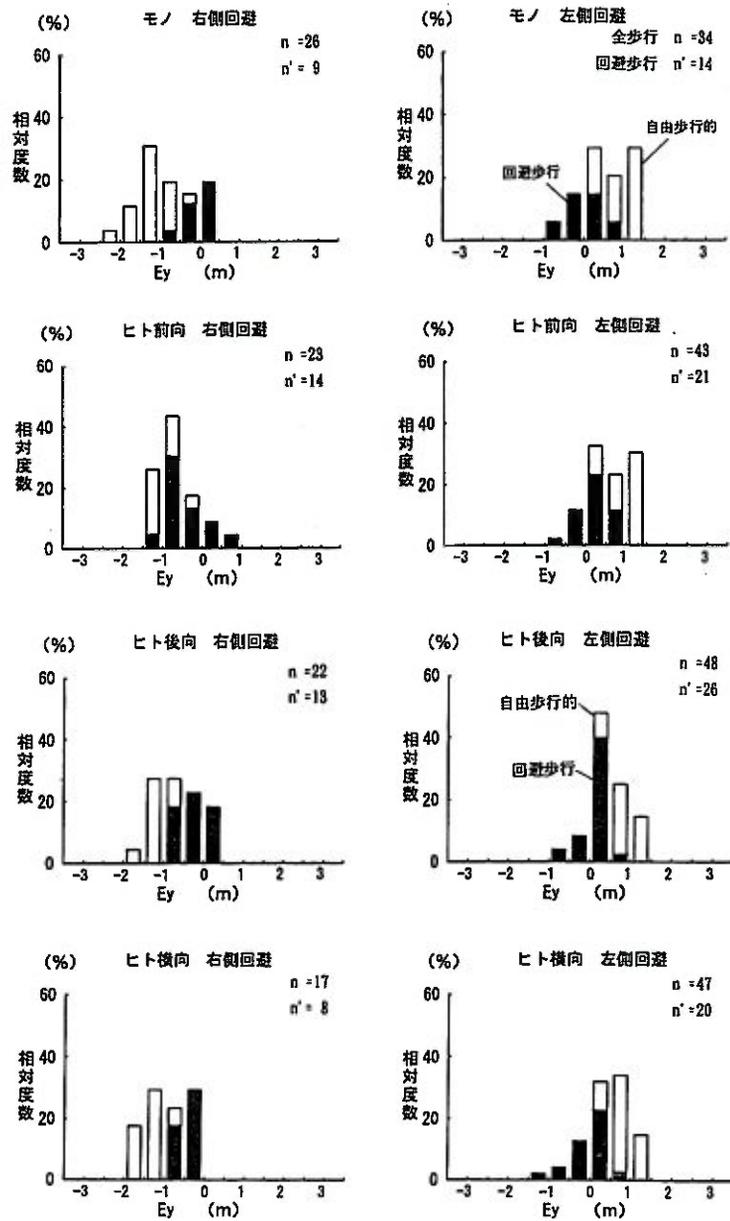


図-3.3.9 回避方向別 E_y の相対度数分布 (実験シリーズ1、標本集合)

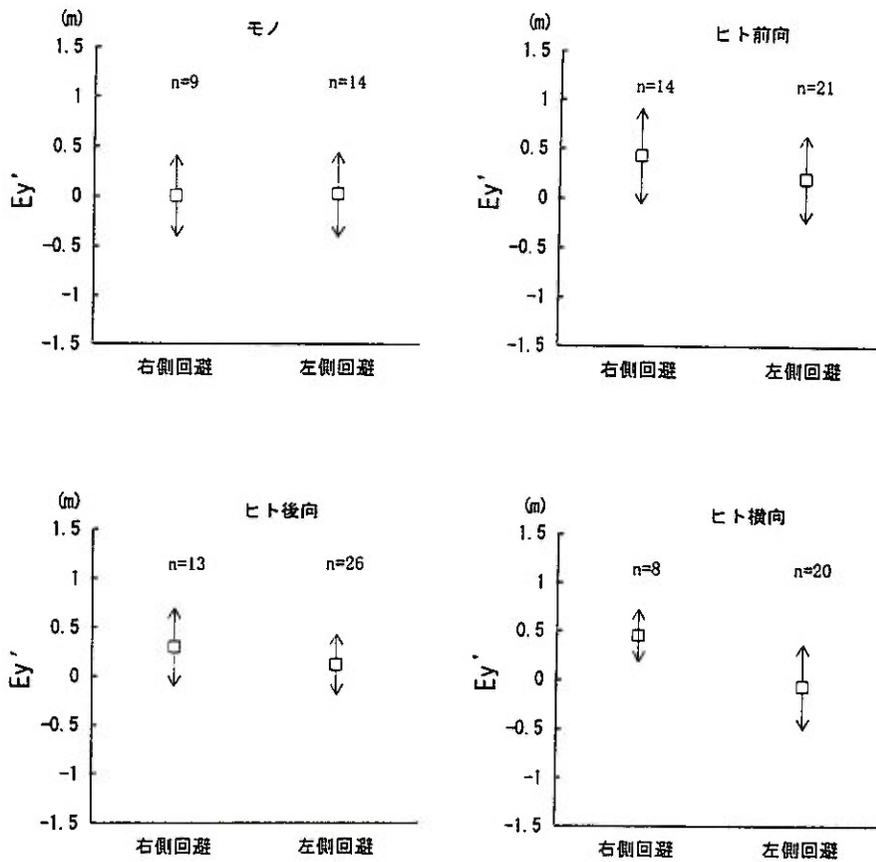


図-3.3.10 回避方向別Ey'の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

表-3.3.2 回避方向別Ey'の平均値の差の検定
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

	モノ		ヒト前向		ヒト後向		ヒト横向		A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
	R	L	R	L	R	L	R	L	
n	9	14	14	21	13	26	8	20	
判定	C		C		C		A		R: 右側回避 L: 左側回避

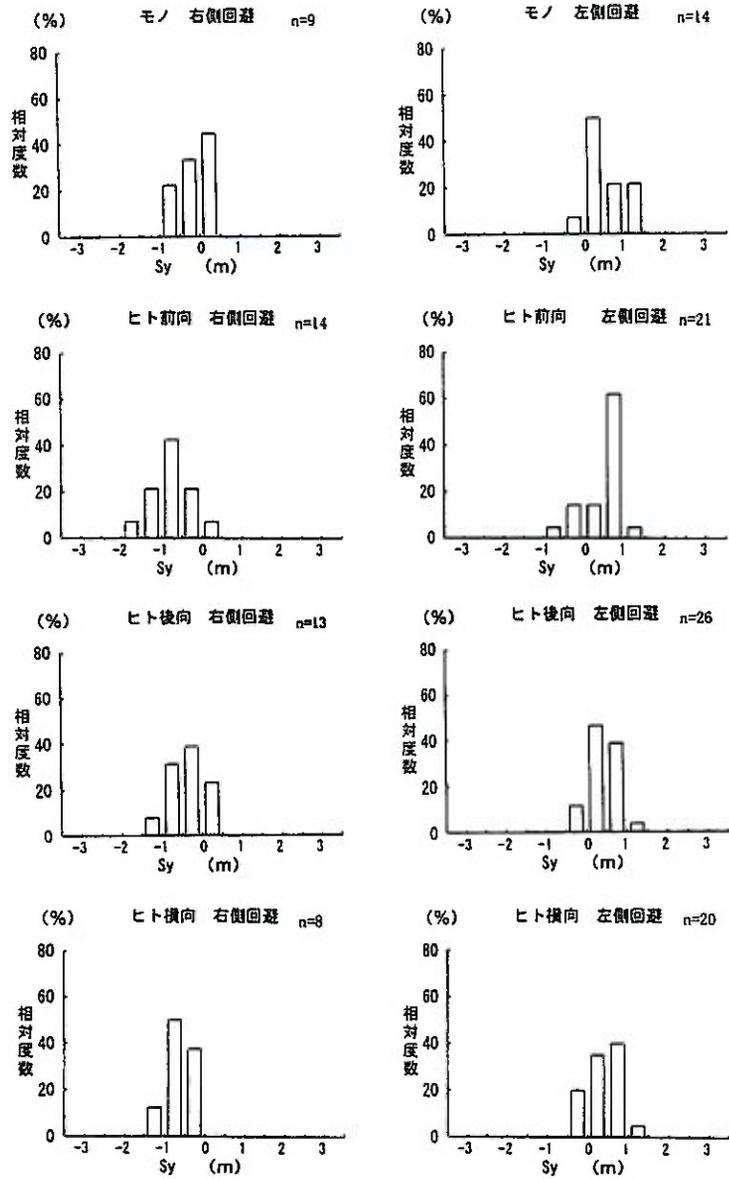


図-3.3.11 回避方向別 S_y の相対度数分布 (実験シリーズ1、標本集合)

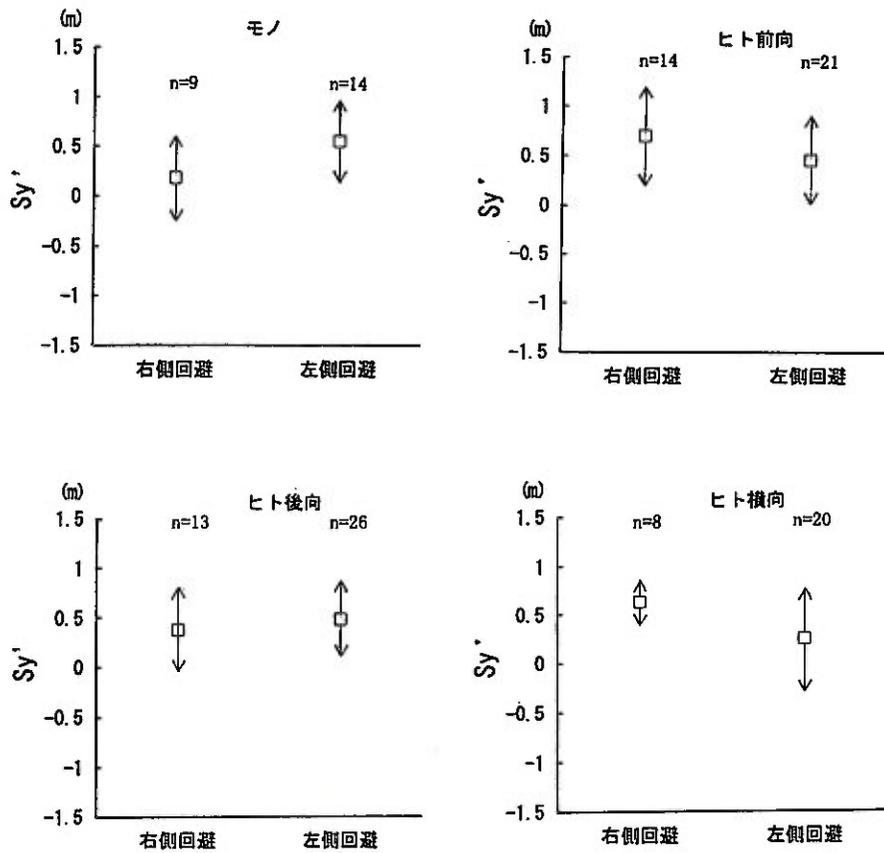


図-3.3.12 回避方向別 Sy' の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

表-3.3.3 回避方向別 Sy' の平均値の差の検定
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

	モノ		ヒト前向		ヒト後向		ヒト横向	
	R	L	R	L	R	L	R	L
n	9	14	14	21	13	26	8	20
判定	B		C		C		B	

A: 危険率1%で有意差あり
 B: 危険率5%で有意差あり
 C: 有意差なし
 R: 右側回避
 L: 左側回避

c. すれ違い時のKy

図-3.3.13は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合のKyの相対度数分布を回避方向別に示したものである。図中、黒く塗りつぶした部分は回避歩行と判断されたものである。y方向の頻度分布は、観測初期位置(Ey、図-3.3.9参照)や回避行動開始時(Sy、図-3.3.11参照)の分散に対して、すれ違い時(Ky)の分散は極めて小さい。すなわち、Kyの分布はEy、Syの分布が圧縮されたような形状となる。

図-3.3.14は回避歩行におけるEy'の平均値と分散を回避方向別に示したものである。Ky'の平均値は<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>の右側回避と左側回避でそれぞれ、0.96m(1σは0.20m, n=9)と0.91m(0.20m, n=14)、1.34m(0.16m, n=14)と0.95m(0.22m, n=21)、1.17m(0.17m, n=13)と0.91m(0.16m, n=26)、1.31m(0.30m, n=8)と0.76m(0.15m, n=20)である。右側回避のKy'は左側回避と比べて大きい値をとる。標準偏差は0.15mから0.30mまでと分散が小さく、歩行者はほぼ一定した間隔を保って障害物とすれ違っていることが分かる。回避方向別のKy'の平均値の差の検定を行った結果、<モノ>を除くと回避方向による有意差がみられる(表-3.3.4)。<ヒト横向>についてはヒトの身体の向き(前向きと後向き)の影響を受けて左右の回避行動は異なる障害物を対象としていると考えられることができるが、<ヒト前向>と<ヒト後向>については通路による影響が考えられる。

ただし、Kyの絶対値そのものが小さいということで、測定精度を考えると左右の差ということの後述の扱いのように差がないものと見なしても支障が生じないと判断する。

一方、障害物間のKy'を比較すると、左側回避の場合、<ヒト横向後方回避>を除くと障害物間に差がみられない。<ヒト横向後方回避>(左側回避)の0.76mについては他と比べて小さいもののy軸方向の人体寸法を考慮すればほぼ等しいものと言える。

(7) 歩行軌跡のx軸に対する対称性

3.2節の(1)ではEy区分による平均軌跡(集合平均)の解析から、右側回避と左側回避の歩行軌跡がx軸に対してほぼ対称形であることを述べた。また、前項(6)ではEy'、Sy'、Ky'について回避方向別の平均値の差を検討し、左右の平均値に差がないことが分かった。

この結果、<ヒト横向>を除いて歩行軌跡はx軸に対して左右対称であるとみなしてよいと判断される。以後、|Sx|の検討では<ヒト横向>を除いて左右方向を区別せず扱うことにする。

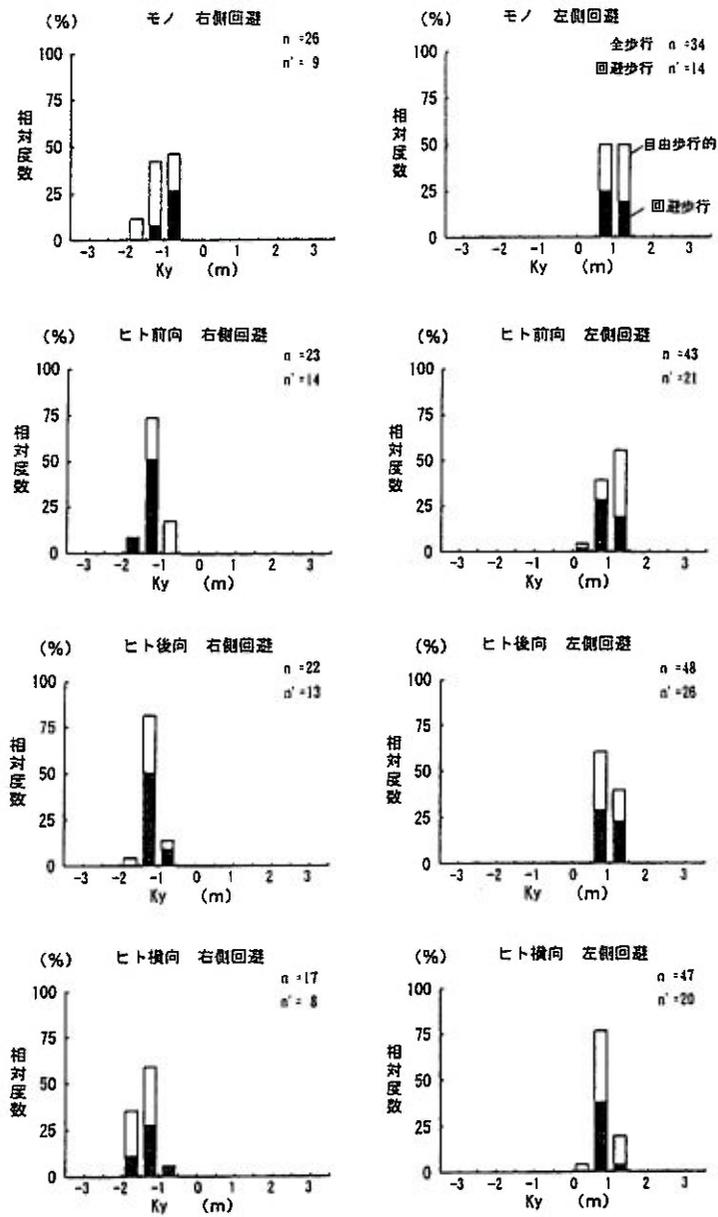


図-3.3.13 回避方向別Kyの相対度数分布（実験シリーズ1、標本集合）

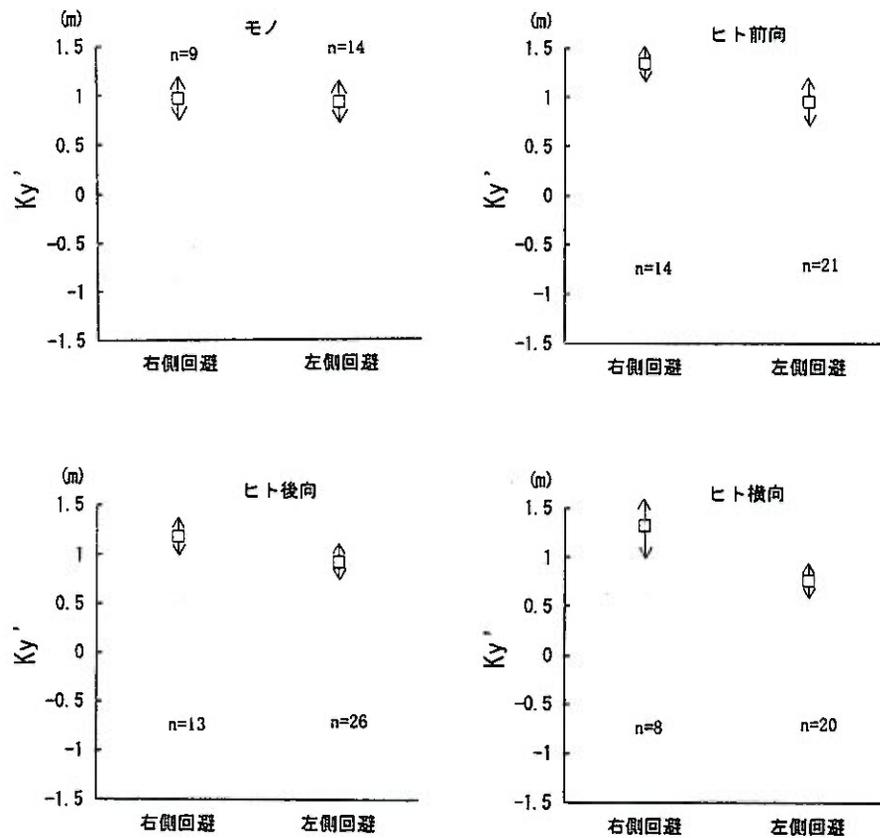


図-3.3.14 回避方向別 Ky' の平均値と分散（実験シリーズ1、標本集合）

表-3.3.4 回避方向別 Ky' の平均値の差の検定

（実験シリーズ1、回避歩行の標本集合）

	モノ		ヒト前向		ヒト後向		ヒト横向		A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
	R	L	R	L	R	L	R	L	
n	9	14	14	21	13	26	8	20	
判定	C		A		A		A		R: 右側回避 L: 左側回避

(8) $|S_x|$ と S_y の関係

図-3.3.15は $|S_x|$ と S_y の関係 (<ヒト後向>の標本集合) を示したものである。

$|S_x|$ と S_y の関係は一般に S_y が小さければ $|S_x|$ は大きくなる傾向がある。
 <モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向後方回避>の相関係数がそれぞれ、 $-0.54(n=23)$ 、 $-0.51(n=35)$ 、 $-0.50(n=39)$ 、 $-0.35(n=20)$ で、<ヒト横向後方回避>を除くと相関は高い。

この結果 $|S_x|$ と S_y は負の相関関係があると判断される。すなわち、障害物正面に位置する歩行者の $|S_x|$ に対して、初期位置が離れるほど (x 軸から遠いほど) $|S_x|$ は小さくなる傾向にあることを示している。

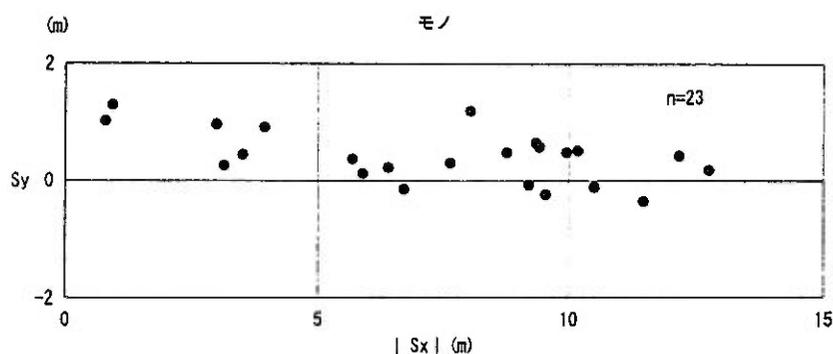


図-3.3.15 $|S_x|$ と S_y の関係 (実験シリーズ1、モノの回避歩行の標本集合)

表-3.4.1 回避方向別 $|S_x|$ の平均値の差の検定 (実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

	モノ n=23	ヒト前向 n=35	ヒト後向 n=39	ヒト横向 n=20	
モノ	-	C	C	C	A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし ヒト横向は後方回避
ヒト前向	-	-	A	B	
ヒト後向	-	-	-	C	
ヒト横向	-	-	-	-	

3.4 障害物による |Sx| の値の検討

これまでの分析から観測初期位置が障害物にかかわらず同様な分布性状を示し、歩行者はランダムに障害物に接近し歩行していること、さらに右側回避と左側回避では x 軸を中心として左右対称と判断されたことにより、以後の |Sx| の値の検討では平均値のみで行うこととする。

|Sx| の平均値は、〈モノ〉、〈ヒト前向〉、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉でそれぞれ、7.34m、8.84m、6.74m、6.82m（注3）となる。

|Sx| の平均値は〈モノ〉を基準にすると、これより大きいものが〈ヒト前向〉であり、小さいものは〈ヒト横向後方回避〉と〈ヒト後向〉となる。特に、〈ヒト前向〉と〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉とは平均で2 mあまりの差がある。

障害物別の |Sx| の平均値の差の検定では、表-3.4.1に示すように〈ヒト前向〉と〈ヒト後向〉、〈ヒト前向〉と〈ヒト横向後方回避〉とは有意差がみられる。

この結果障害物の種類によって |Sx| の値は異なるものと判断される。すなわち、人の身体の向きによって歩行者は影響を受け回避する距離を計っていると考えられる。このように身体の向きによって回避行動を開始する距離が変わることは直感的にもうなずけるところである。

（注3）

〈ヒト横向前方回避〉については標本数が少ないためここでは扱わない。

3.5 |Sx| の再現性

実験環境条件を変えた場合、同じ障害物であれば |Sx| に再現性があるかどうかを検討した。方法は障害物を変えずに、実験の時期や場所を変えて |Sx| を比較するものである。障害物は以下の3種類を対象とした。

- ①直方体の物体
- ②「前向き」の静止したヒト
- ③「後向き」の静止したヒト

①については実験シリーズ1とシリーズ2とシリーズ3を、②についてはシリーズ1とシリーズ2を、③についてはシリーズ1とシリーズ3を比較している。ここでシリーズ2とシリーズ3が基準とするシリーズ1と異なる点は主に障害物を通路のどの部分に置くかである。シリーズ1が通路の中心からおよそ0.3m左側寄りであるのに対しシリーズ2では回避行動の出現をより鮮明にするためEyの分布頻度が比較的高い位置（シリーズ1よりさらに0.68m左寄り：図-3.1.1(2)の図中上方）に配置している。またシリーズ3では有効幅員が大きくないため障害物

を図中上方に寄せた。このため歩行者の回避行動は右側回避のみに限定される。
以下に、歩行軌跡と $|Sx|$ と Sy の概要を示す。

(1) 歩行軌跡

実験シリーズ2の障害物別歩行軌跡の標本集合を図-3.5.1に、シリーズ3の障害物別歩行軌跡の標本集合を図-3.5.2に示す。

(2) 回避歩行の選定

回避歩行の選定は、これまでと同様に第一章1.6節の(2)に示した自由歩行で得られた各標本の $Ey = Ky$ 直線からの距離の $\pm 1\sigma$ 分 (σ は標準偏差) より大きなものとした。

この結果、実験シリーズ2の<モノ>が71例中48、<ヒト前向>が72例中43で平均64%、実験シリーズ3の<モノ>が51例中34、<ヒト後向>が51例中38で平均66%がそれぞれ回避歩行と判断された。

図-3.5.3にシリーズ2における回避歩行および自由歩行的な軌跡の障害物別標本集合を、図-3.5.4にシリーズ3における回避歩行および自由歩行的な歩行軌跡の標本集合を示す。

(3) 障害物<モノ>

図-3.5.5に標本集合の Sy' の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。ただし、 Sy' については3.3節の(6)と同様に処理している。図-3.5.6は $|Sx|$ の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。 $|Sx|$ の平均値は、「シリーズ1」では7.34m ($Sy' = 0.41m$, $n = 23$)、「シリーズ2」では7.21m ($Sy' = 0.46m$, $n = 48$)、「シリーズ3」では7.10m ($Sy' = 0.09m$, $n = 34$)となる。 $|Sx|$ は最大0.2mの差しかなく、3者の有意差を検定したところ、いずれも有意差はみられない(表-3.5.1)。

(4) 障害物<ヒト前向>

図-3.5.7に標本集合の Sy' の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。ただし、 Sy' については3.3節の(6)と同様に処理している。図-3.5.8は $|Sx|$ の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。 $|Sx|$ の平均値は、「シリーズ1」

歩行者の
進行方向 →



n=71 モノ



1目盛り2m

n=72 ヒト前向

図-3.5.1 実験シリーズ2の障害物別歩行軌跡の標本集合

歩行者の
進行方向 →



n=51 モノ



1目盛り2m

n=51 後向静止

図-3.5.2 実験シリーズ3の障害物別歩行軌跡の標本集合

歩行者の
進行方向



n=48 モノ回避歩行



n=23 モノ自由歩行的



n=43 ヒト前向回避歩行



n=29 ヒト前向自由歩行的

1目盛り2m

図-3.5.3 シリーズ2における回避歩行および自由歩行的な歩行軌跡の
標本集合

歩行者の
進行方向 →



モノ 回避歩行 n=34



モノ 自由歩行的な歩行 n=17



後向静止 回避歩行 n=38



後向静止 自由歩行的な歩行 n=13

1目盛り2m

図-3.5.4 シリーズ3における回避歩行および自由歩行的な歩行軌跡の
標本集合

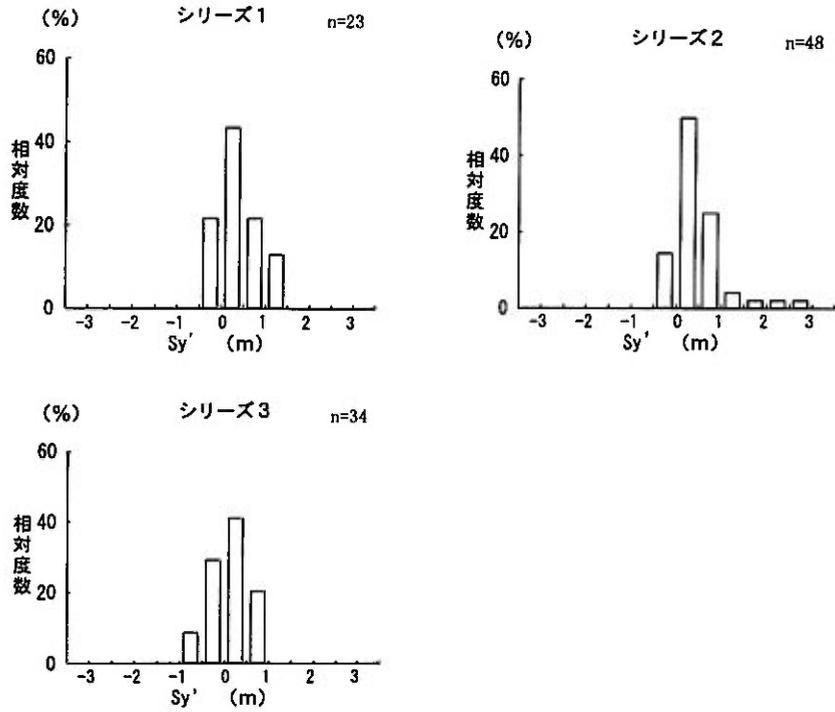


図-3.5.5 シリーズ別<モノ>の Sy' の相対度数分布 (回避歩行の標本集合)

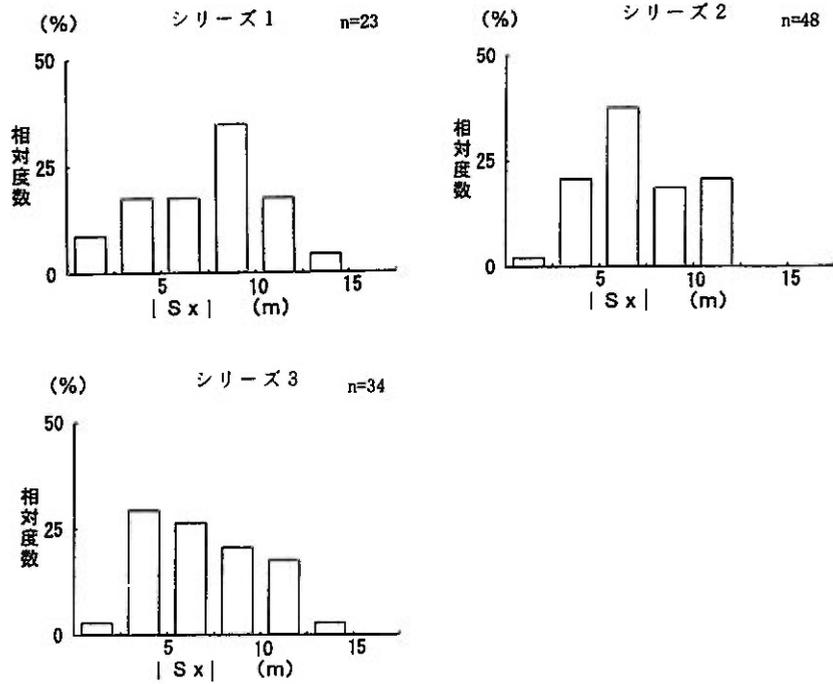


図-3.5.6 シリーズ別<モノ>の $|Sx|$ の相対度数分布 (回避歩行の標本集合)

表-3.5.1 シリーズ別<モノ>同士の $|Sx|$ の平均値の差の検定
(回避歩行の標本集合)

	モノ(1) n=23	モノ(2) n=48	モノ(3) n=34	A:危険率1%で有意差あり B:危険率5%で有意差あり C:有意差なし
モノ(1)	-	C	C	※()内はテスト名
モノ(3)	-	-	C	
モノ(4)	-	-	-	

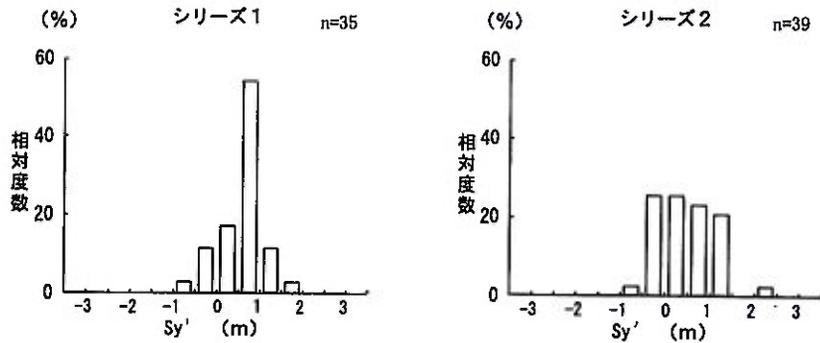


図-3.5.7 シリーズ別<ヒト前向>の Sy' の相対度数分布
(回避歩行の標本集合)

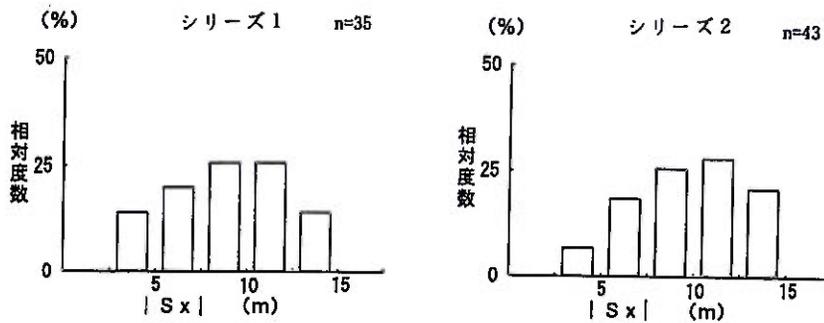


図-3.5.8 シリーズ別<ヒト前向>の $|Sx|$ の相対度数分布
(回避歩行の標本集合)

表-3.5.2 シリーズ別<ヒト前向>同士の|Sx|の平均値の差の検定
(回避歩行の標本集合)

	ヒト前向 (1) (2)		A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
n	35	43	※()内はシリーズ名
判定	C		

表-3.5.3 シリーズ別<ヒト後向>同士の|Sx|の平均値の差の検定
(回避歩行の標本集合)

	ヒト後向 (1) (3)		A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
n	39	38	※()内はシリーズ名
判定	C		

で8.84m ($Sy' = 0.55m$ 、 $n=35$)、「シリーズ2」では9.62 ($Sy' = 0.47m$ 、 $n=43$)で0.68mの差しかない。両者の有意差を検定したところ、やはり有意差はみられない(表-3.5.2)。

(5) 障害物<ヒト後向後方回避>

図-3.5.9に標本集合の Sy' の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。ただし、 Sy' については3.3節の(6)と同様に処理している。図-3.5.10は|Sx|の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。「シリーズ1」での|Sx|の平均値は6.74m ($Sy' = 0.45m$ 、 $n=39$)、「シリーズ3」で6.54m ($Sy' = -0.01m$ 、 $n=38$)で、やはり0.2mの差しかない。両者の有意差を検定したところ、やはり有意差はみられない(表-3.5.3)。

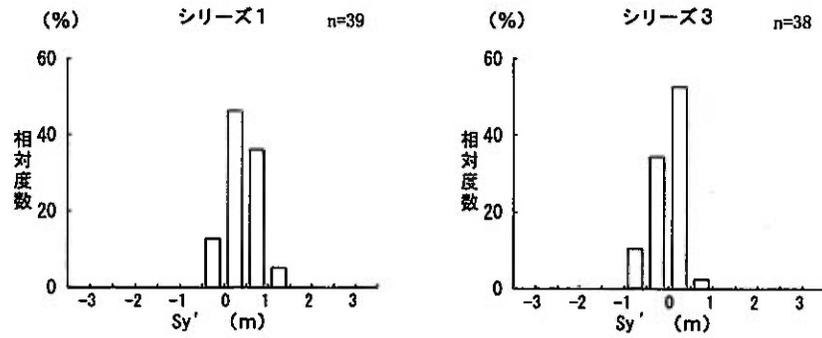


図-3.5.9 シリーズ別<ヒト後向>の Sy' の相対度数分布
(回避歩行の標本集合)

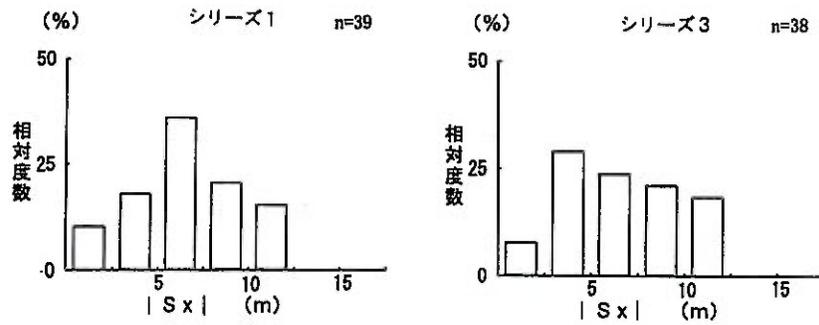


図-3.5.10 シリーズ別<ヒト後向>の $|Sx|$ の相対度数分布
(回避歩行の標本集合)

(6) まとめ

障害物を<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>の3種類について、それぞれ実験調査の環境条件を変えて $|Sx|$ を比較した。この結果、同じ障害物であれば $|Sx|$ の平均値は実験調査の環境条件が多少変化しても変わらないことが分かった。すなわち、実験調査における場の影響をこのように受けた変数があるにもかかわらず $|Sx|$ は安定している。こうしたことから、実験シリーズ1で得られた $|Sx|$ の信頼性は高いと考えられる。

なお、実験シリーズごとに障害物の違いによる $|Sx|$ の平均値を比較したところ、実験シリーズ2では<モノ>より<ヒト前向>の方が大きく、実験シリーズ3では<モノ>より<ヒト後向>の方が小さい。この結果は3.4節で述べた障害物による $|Sx|$ の値の検討を裏付けるものである。

3.6 まとめ

静止したいくつかの障害物に対する歩行者の回避行動を解析し障害物による回避行動への影響を検討した。解析では回避行動開始点をカットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理後さらに移動平均した軌跡データについて曲率の判定基準による方法で判定し、この判定位置と障害物との距離である前方回避距離を定量化した。

以下明らかになった主な点としては、

- ① 歩行者は障害物の種類によって回避行動を開始する距離（前方回避距離）を決定する。
- ② 障害物がヒトの場合、身体の向きが歩行行動に影響している。
- ③ 前方回避距離は身体の向きが、<ヒト後向>、<ヒト横向後方回避>、<ヒト前向>の順に大きくなり、それぞれの値は6.74m、6.82m、8.84mである。
- ④ 人間と同じ高さ、幅を持つ物体の前方回避距離は7.34mである。
- ⑤ 同じ障害物であれば通路の幅員などの歩行環境や調査時期が多少変化しても前方回避距離は変わらない。

第四章

移動する歩行者に対する回避行動

4.1 実験目的と方法

前章では、障害物の違いによって前方回避距離 $|S_x|$ への影響が異なることを明らかにした。すなわち、人間やあるいはそれと同程度の物体の障害物であれば歩行者はその種類によって回避行動を開始する距離に違いがみられた。障害物が静止した前向きの人 $|S_x|$ は静止した後向きの人 $|S_x|$ のものと比べて大きい。また、障害物が直方体の物体であれば $|S_x|$ はこの両者の中間的な値をとることが分かった。

本章では前章で行った静止した障害物に対して、移動する障害物を対象として $|S_x|$ を求めるいくつかの実験を行う。移動する障害物としては「人」とするが、動くという要素が加わることによって回避行動を開始する距離がどのように影響を受けるかを検討するものである。こうした移動する障害物に対する行動への影響を探るには本来フィールドでの一般歩行者同士の観測より求める方法が最もよい。しかし定点観測で周囲の歩行者等に影響を受けない単独歩行者同士のすれ違いや追い越し行動を数多く計測することは実際的には困難である。このため本実験では特定の場所で実験者が障害物となって一定の動きをすることで相手の歩行者の取る回避行動を調べることとした。

なお、本章でも前章と同様に、回避方向の違いを分析する部分以外では右側回避のデータは x 軸に対称に折り返した形で分析している。

(1) 障害物の種類と実験方法

実験は障害物 B となる人の体の向きによって、「前向き」と「後ろ向き」の二ケースの実験に大別される。「前向き」は実験シリーズ 2、「後ろ向き」は実験シリーズ 3 によるもので、二つの実験ケースと障害物の関係を表 4.1.1 に示す。

実験方法は、実験者 B が通路の所定の固定された位置（スタート点と呼ぶ、 $X=0$ m）に立っていて、歩行者 A が決められた地点 X_0 （実験ケースによって異なる）

表-4.1.1 実験ケースと障害物

実験ケース	障害物の種類	標本数	備考
前向き	前向静止	72	シリーズ 2
	4.5m 移動	51	
	9 m 移動	56	
	14 m 移動	48	
後ろ向き	後向静止	51	シリーズ 3
	後向移動	43	

まで到着した時に「一定速度で移動する」というものである（図-4.1.1、図-4.1.2）。この間の一連のAの様子をビデオにより撮影し前章と同様の手法で分析した。

なお、実験にあたっては、実験者Bが被実験者Aの動きに対して歩きだすタイミングおよび歩行状況が一定になるよう練習を行った。

(イ)実験ケース「前向き」

実験ケース「前向き」については、障害物Bが歩行者Aに向かって移動するもので、スタート点から X_0 までの距離 $|X_0|$ を4.5m、9m、14mの3種類とし（注1）、移動しない「静止」と共に計4種類の実験を行った。それぞれの実験名は<前向静止>（前章3.5節で触れた実験シリーズ2の<ヒト前向>と同一）、<4.5m 移動>、<9m 移動>、<14m 移動>と記す。Bが歩行を開始するタイミングについては目印を決めておきB自身の判断によるものとした。

実験場所については前章と同様の場所である。Bの立つ位置は前章3.5節で分析した実験シリーズ2と同様で、右側の幅員が左側と比べて約3倍広い（図-4.1.3）（注2）。Bは身長170cmの男子学生1名である。標本数は<前向静止>、<4.5m 移動>、<9m 移動>、<14m 移動>で、それぞれ72、51、56、48例である。

（注1）

<前向静止>の予備実験から、 $|S_x|$ の平均値がおよそ9mであることが分かった。このため X_0 を、大半の歩行者が回避行動を開始する前の距離として $X_0=-14m$ 、半数の歩行者が回避行動途中の距離として $X_0=-9m$ 、大半の歩行者が回避行動途中の距離として $X_0=-4.5m$ を採用した。

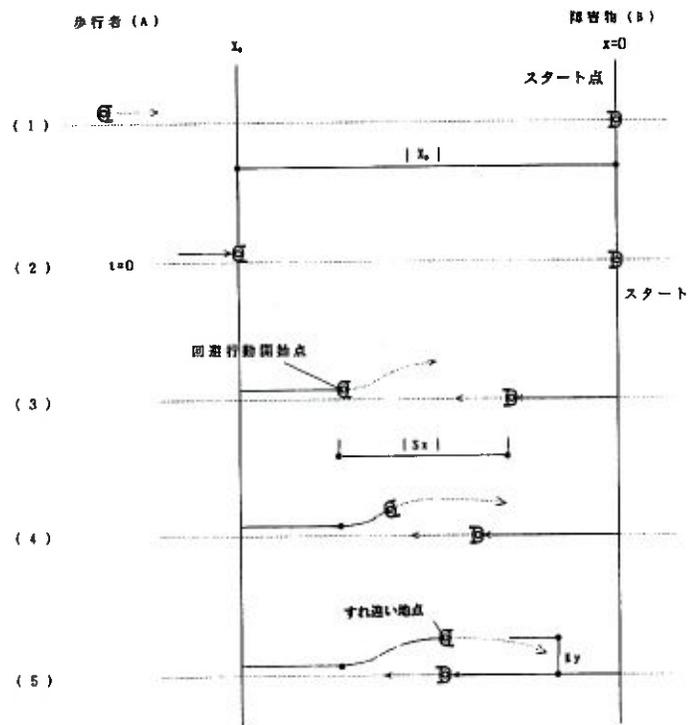


図-4.1.1 実験ケース「前向き」

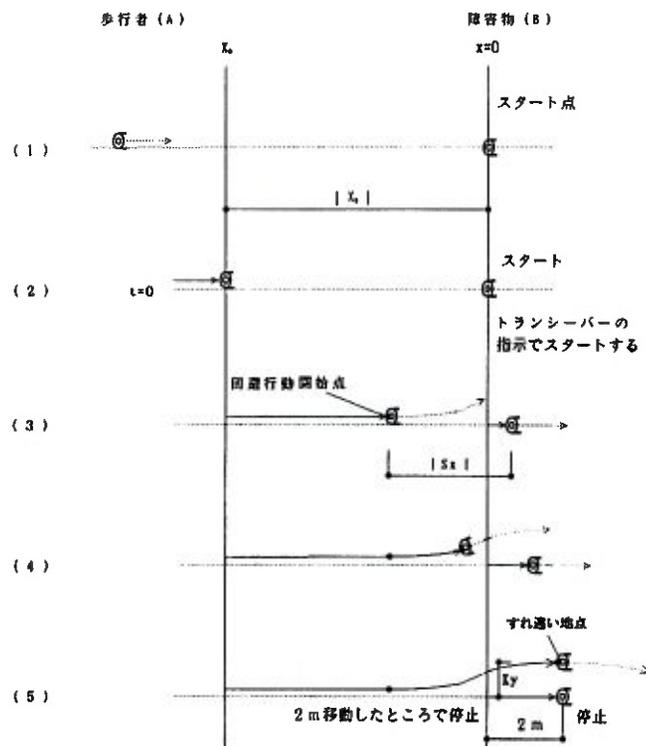


図-4.1.2 実験ケース「後ろ向き」

(注2)

障害物に対してできるだけ正面から接近する歩行者のデータを得るため、歩行者の通行の頻度が高い左側寄りに障害物を設置した。

(ロ)実験ケース「後ろ向き」

実験ケース「後ろ向き」については、BがAに先行する形で同方向に移動するもので、スタート点から X_0 までの距離 $|X_0|$ が8mの場合と、移動しない「静止」の場合の2種類の実験を行った。移動する実験名と移動しない実験名はそれぞれ<後向移動>、<後向静止>と記す。<後向移動>の場合は歩きだしてから2m進んで再び静止した。Bが歩行を開始するタイミングについては他の実験者の合図(注3)にしたがった。

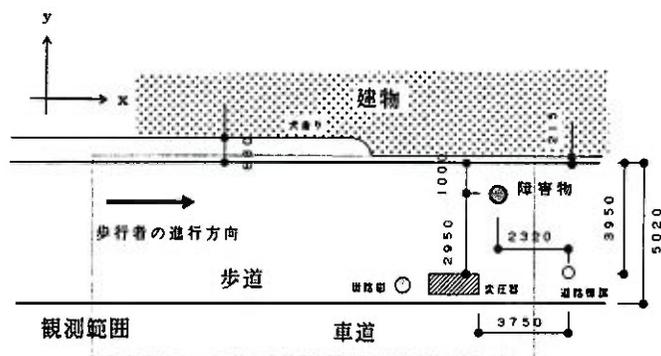


図-4.1.3 実験場所「前向き」(実験シリーズ2)

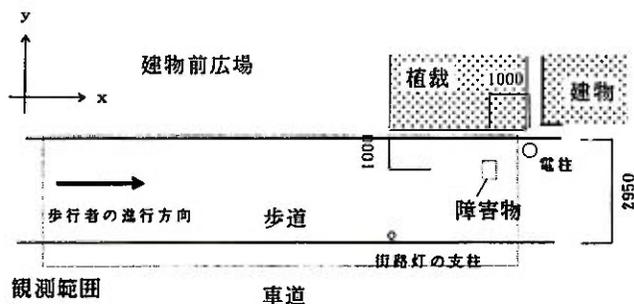


図-4.1.4 実験場所「後ろ向き」(実験シリーズ3)

実験場所については前章3.5節の実験シリーズ3（図-4.1.4）と同様の場所である。Bの立つ位置は左手側に片寄った（図中上方）位置で、Aの回避は右側だけが可能な実験条件になっている。Bには身長約170cm程度の男子学生2名が交替で障害物になった。標本数は<後向静止>（前章3.5節のシリーズ3の<ヒト後向>と同一）と<後向移動>でそれぞれ51、43例であった。

（注3）

歩行者に気づかれない位置にいる実験者が、障害物であるBに動くタイミングをトランシーバーで伝達した。

（2） 解析の手続き

障害物が移動する場合に、歩行者Aと障害物Bの相対的位置関係を知るにはAとBの位置座標の同時計測をする必要がある。しかし実験ではBの設定方法に問題がありBの頭部の動きを一部の標本でしか計測できなかった。このため両者のデータがとれる標本について解析し、Bの位置と時間の関係を示す式を求めた。

障害物を原点とした $|S_x|$ 、 S_y 、 K_y を求めるにあたっては、Bの動きが計測できなかった標本も含め全ての標本でこの関係式にしたがってBが動くものとして求めた。計測間隔時間については、Aだけを分析する場合は1/30secであるが、A・B2点の同時計測に限っては画像処理装置の性能から1/15secである。

また、いずれも障害物を原点として通路に平行な軸をx軸とし、歩行者の進行方向側を正とする。またx軸に直交する軸をy軸とし、歩行者の左手側を正、右手側を負とする。

なお、本章では座標変換やデータ処理の方法については前章と同様である。

4.2 障害物Bの位置と時間の関係式の検討

（1） 実験ケース「前向き」

図-4.2.1は<9m移動>の場合のAとBの歩行軌跡の標本である（注4）。また、図-4.2.2はある標本でのAとBの歩行の速さ $|V_a(t)|$ 、 $|V_b(t)|$ の時刻歴を示している。障害物であるBの歩行の速さ $|V_b(t)|$ は図に示すように動き出すとともにその値が増大する。ただし、すれ違い後に $|V_b(t)|$ が減少するのは実験後に実験者が立ち止まるためである。また、y方向の相対速度 $(V_{ay}(t)-V_{by}(t))$ はわずかに減少するが、すれ違い地点以降はほぼ $V_{ay}(t)-V_{by}(t)=0$ の値をとって推移する。これに対しすれ違い地点までのある区間のx方向の相対速度 $(V_{ax}(t)-V_{bx}(t))$

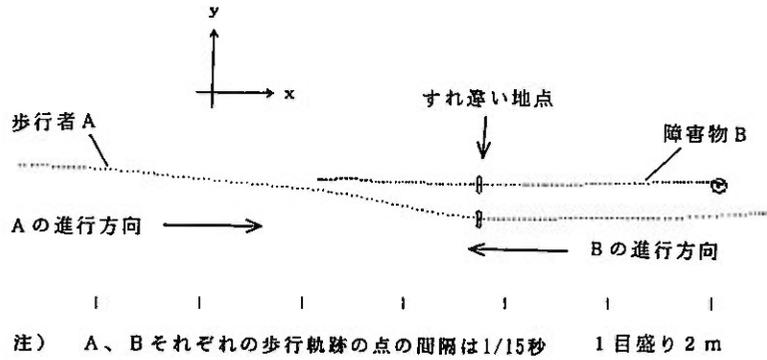


図-4.2.1 AとBの歩行軌跡（実験シリーズ2、<9m移動>の標本）

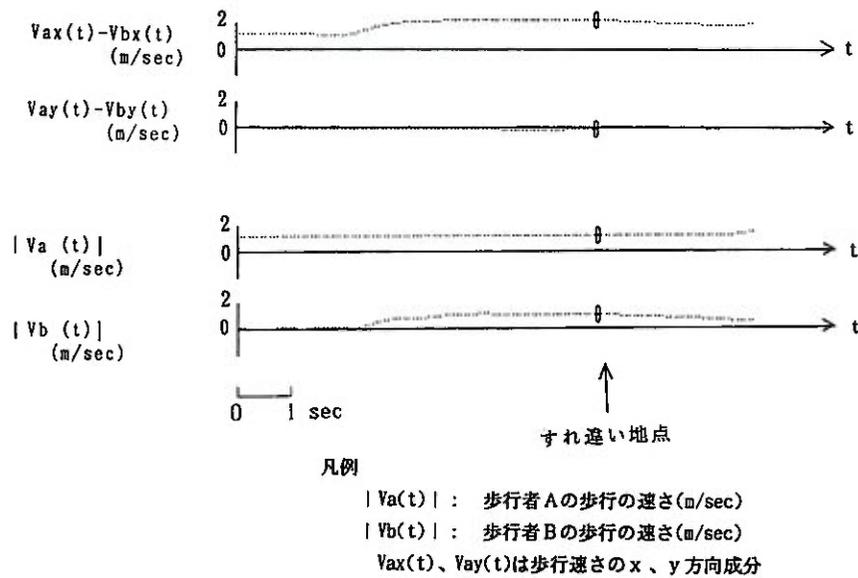


図-4.2.2 AとBの歩行速度の時刻歴（図-4.2.1と同じ標本）

(t)) はほとんど変化せず一定速度で推移する。

標本集合の平均歩行速度 V_B は1.29m/sec (1σ が0.12m/sec、 $n=16$) でややぼらつきがみられ、Aの平均歩行速度1.51m/sec (1σ が0.21m/sec、 $n=56$) に比べてやや遅い。

図-4.2.3は、Aが X_0 を通過した時刻 t_0 を $t=0$ として、横軸に時間 t (sec)、縦軸にBのスタート点からの距離 $X_B(t)$ とした場合の標本集合($n=16$)を示したものである。歩きだしてから定速歩行に移行するまでの所用時間は平均1.48sec (1σ が0.45sec)で、その間の移動距離は平均1.14m (1σ が0.28m)であった。また、予定通り歩き出しているかどうかのタイミングのズレ「 t_s-t_0 」(ただし、Bが歩きだす時刻 t_s を V_B の1割に達した時点、定速歩行にはいる時刻 t' を V_B の9割に達した時点とする)は-1.44sec (1σ が0.45sec)で、Bのスタートが予定よりかなり早い。そこでこれに基づいて時間と距離の関係を図-4.2.3に示したような関係式で表現した。以下この関係式にしたがって、Aの回避行動開始時におけるBの位置をAが X_0 を通過した時刻 t_0 との時間差から求めた。

(注4)

実験ケース<9m移動>の場合、A、B両者の頭部の動きを計測することのできたものは全体のおよそ3割(44例中16例)であった。また、<14m移動><4.5m移動>については少数例しかデータが得られなかった。そこで<9m移動>の16例についてBの位置と時間の関係を示す式を求め、他の実験ケースにおいてもこの関係式にしたがってBが動くものとした。

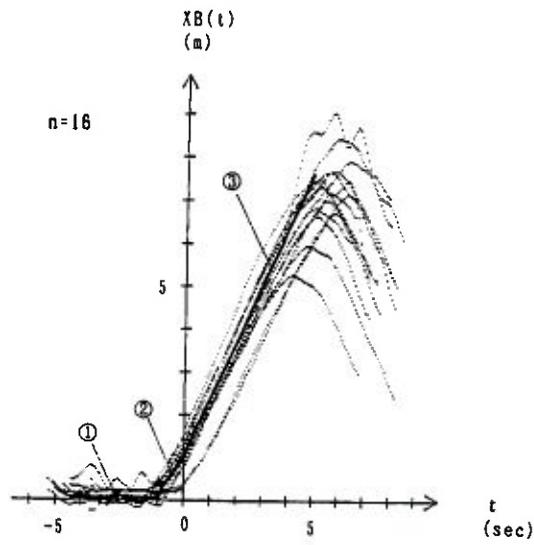
(2) 実験ケース「後ろ向き」

「後ろ向き」の場合、Bが予定通り歩き出しているかどうかのタイミングのズレ(t_s-t_0)は0.12sec (1σ が0.29sec、 $n=13$)で、ほぼ予定通り歩きだす。しかし、歩きだしてから2m進んで停止するまで(歩数にして3、4歩)の所要時間は、映像から実測できなかった(注5)。このため、改めて2m進んで停止する実験のみを行いこのデータを用いることとした。2名の被験者による10回ずつの実測では、所要時間は平均2.84sec (1σ が0.27sec、 $n=20$)であった。

この数値を用いてBの移動距離 $X_B(t)$ を近似的に表現することとした(図-4.2.4)。以下この関係式にしたがってBの位置を求めた。

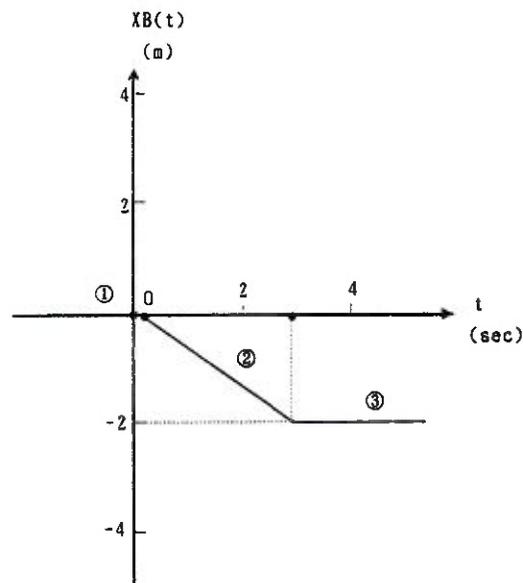
(注5)

この実験ケースでは<後向静止>と同様、障害物の手前の限定された範囲を同条件で撮影することにした。したがって障害物となるBが静止した状態から2m歩行し再度停止する状況が画面の中に収まらない結果になった。



- ① $t \leq -1.44$ では $XB(t)=0$
 ② $-1.44 < t \leq 0.04$ では $XB(t)=0.77t+1.11$
 ③ $0.04 < t$ では $XB(t)=1.29t+1.09$
 ただし、 $XB(t)$ はBのスタート点からの移動距離 (m)

図-4.2.3 Bの動き (実験ケース「前向き」、シリーズ2)



- ① $t \leq 0.12$ では $XB(t)=0$
 ② $0.12 < t \leq 2.98$ では $XB(t)=-0.70t+0.08$
 ③ $2.98 < t$ では $XB(t)=-2.0$
 ただし、 $XB(t)$ はBのスタート点からの移動距離 (m)

図-4.2.4 Bの動き (実験ケース「後ろ向き」、シリーズ3)

4.3 実験ケース「前向き」

ここでは前章と同様の手順で解析を進めるが、以下にその概要を述べる。

4.3.1 結果の概要と分析

(1) 歩行軌跡と観測初期位置 E_y

図4.3.1は、固定座標系における歩行軌跡の標本集合を障害物別に示したものである。前章で述べたように y 方向の観測初期位置が障害物正面(x 軸)から離れた歩行軌跡ほど直線的なものが多い。逆に初期位置が障害物正面に近づくと軌跡に大きな曲がりが見られる。図中に歩行者が歩行していないゾーンがあって、スタート点から X_0 までの距離 $|X_0|$ が大きいほど、このゾーンもスタート点から離れる傾向を読み取ることができる。

ここで歩行速度の平均値はいずれの障害物でも $1.4\sim 1.6\text{m/sec}$ 程度で、静止した障害物同様、自由歩行と同等とみることができる。

また、図4.3.2は右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の観測初期位置 E_y ($E_x=-14\text{m}$ の地点における y 座標値)の相対度数分布を障害物別に示したものである。ただし、 E_y は $0.5\leq < 1.0(\text{m})$ のように 0.5m ごとに区分している。いずれも正規分布に近い分布形状を示し図中上側寄りに歩行する傾向があるが、<前向静止>については E_y の平均値が他より小さく分布性状も多少異なる。<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>の E_y の平均値は、それぞれ -0.51m (1σ は 0.86m , $n=72$)、 -0.09m (0.56m , $n=51$)、 -0.06m (0.56m , $n=56$)、 -0.19m (0.63m , $n=48$)で、標準偏差 1σ が 0.6m 前後であるが<前向静止>のみ 0.86m と他より大きい(図4.3.3)。

障害物の設置によってあるいは障害物の種類によって回避行動前に歩行者の行動が影響を受けているかどうか検討するため、各障害物の E_y の平均値に差があるかどうかを検定したところ、移動する障害物間には有意差がみられなかった。しかし、<前向静止>については他のいずれとも有意差がみられた(表4.3.1)。

これについては、次項(3)で述べるように標本を回避歩行に限定すると、<前向静止>と<14m移動>、<前向静止>と<4.5m移動>では E_y の平均値に有意差がみられなくなった。<前向静止>の E_y の特異性については、実験シリーズ1で E_y が均質であったことからここでは考慮しないこととした。

(2) 障害物を避ける方向

図4.3.4は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の E_y と K_y (A

歩行者の
進行方向 \longrightarrow

障害物（ヒト）の
スタート点 \downarrow



$X_0=14\text{m}$ で障害物がスタート $n=48$



$X_0=9\text{m}$ で障害物がスタート $n=56$



$X_0=4.5\text{m}$ で障害物がスタート $n=51$



障害物のヒト 前向静止 $n=72$

1目盛り2m

図-4.3.1 障害物別歩行軌跡の標本集合（実験シリーズ2）

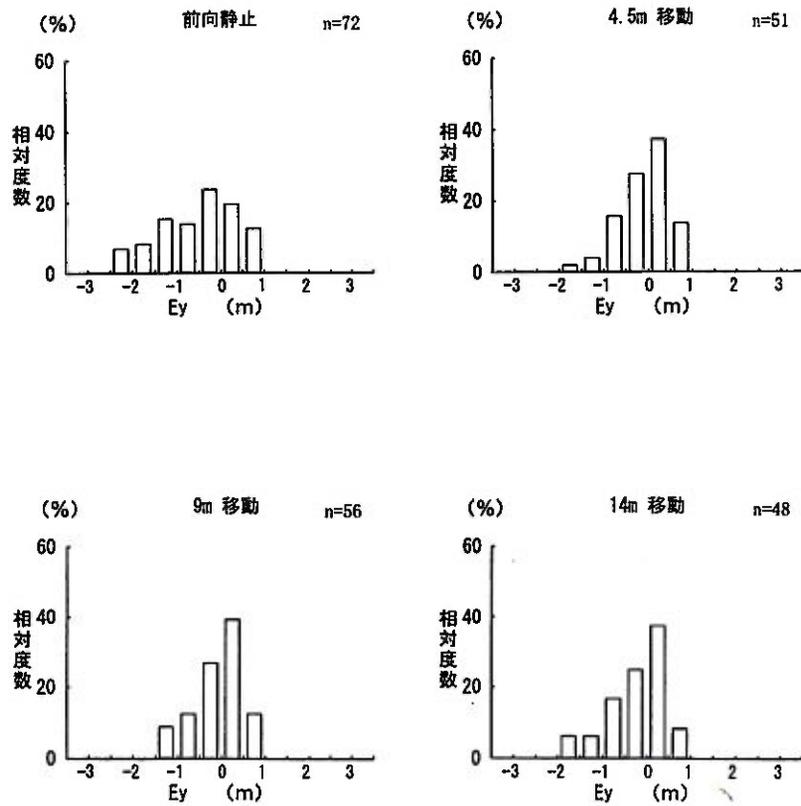
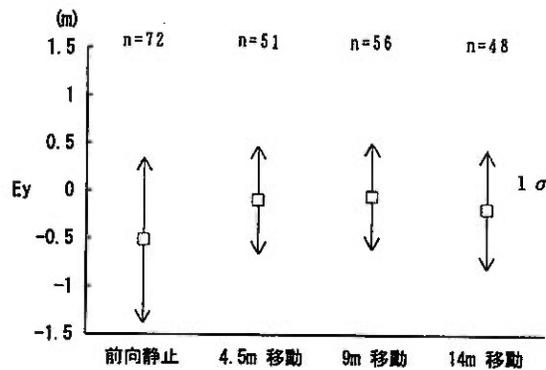


図-4.3.2 障害物別 E_y の相対度数分布 (実験シリーズ2、標本集合)



矢印は 1σ (σ : 標準偏差)

図-4.3.3 障害物別 E_y の平均値と分散 (実験シリーズ2、標本集合)

表-4.3.1 障害物別Eyの平均値の差の検定（実験シリーズ2、標本集合）

	前向静止 n=72	4.5m移動 n=51	9m移動 n=56	14m移動 n=48	
前向静止	-	A	A	A	A : 危険率1%で有意差あり B : 危険率5%で有意差あり C : 有意差なし
4.5m移動	-	-	C	C	
9m移動	-	-	-	C	
14m移動	-	-	-	-	

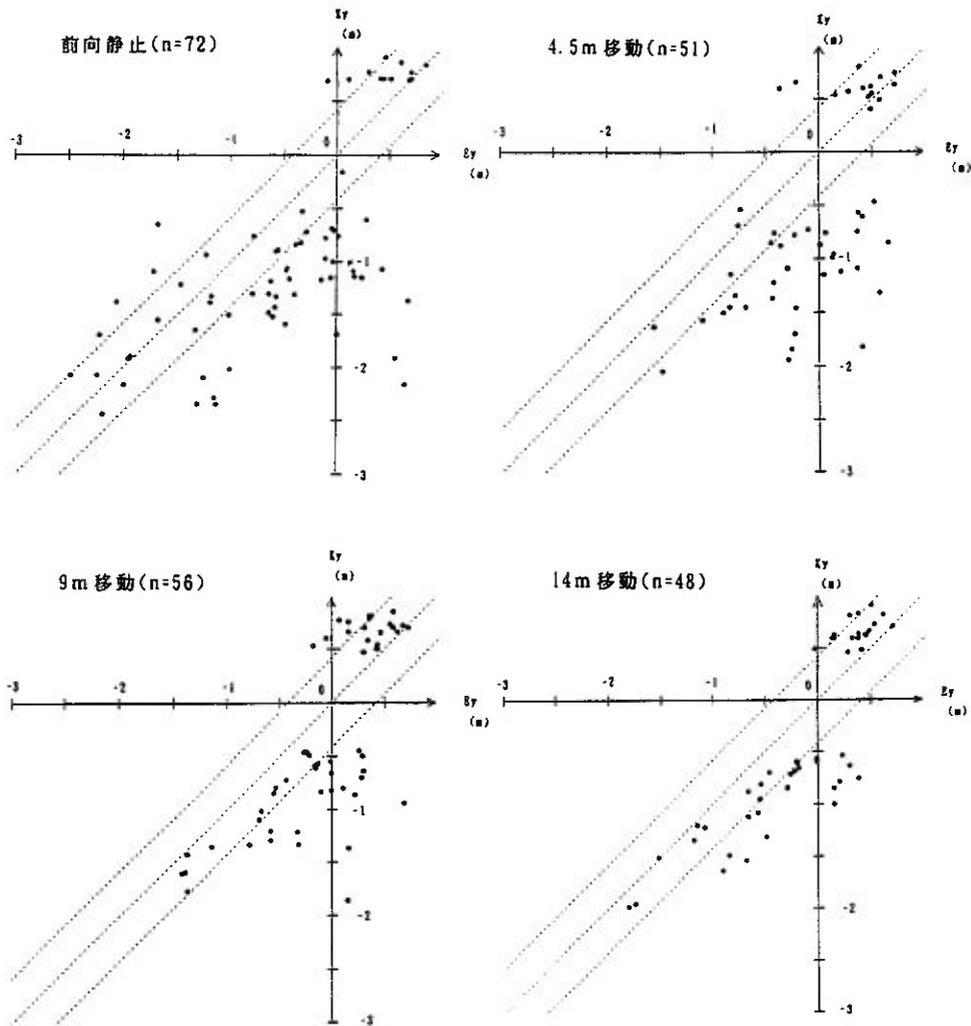


図-4.3.4 障害物別EyとKyの関係（実験シリーズ2、標本集合）

歩行者の
進行方向



14 m 移動 (n=28)



9 m 移動 (n=33)



4.5 m 移動 (n=35)



1 目盛り 2 m

前向静止 (n=43)

図-4.3.5 回避歩行の軌跡の標本集合 (実験シリーズ2)

歩行者の
進行方向



14 m 移動 (n=20)



9 m 移動 (n=23)



4.5 m 移動 (n=16)



前向静止 (n=29)

1 目盛り 2 m

図-4.3.6 自由歩行的な歩行軌跡の標本集合 (実験シリーズ2)

とBのすれ違い時 $Kx=0$ の y 座標値)の関係を障害物別に示したものである。 Ey と Ky が共に正の場合(第1象限)、初期位置が左側(図中上側)からそのまま左側に回避したことを示す。 Ey と Ky が共に負の場合(第3象限)、初期位置が右側(図中下側)からそのまま右側に回避したことになる。第2象限の場合は初期位置が右側から x 軸を横切って左側に回避した(右→左)ものであり、第4象限の場合は初期位置が左側から x 軸を横切って右側に回避した(左→右)ものである。障害物を避ける方向は、障害物正面に対して左右両方に避けていて、2~4:8~6の割合で右側(図中下側)に避ける傾向がある。次項(3)で述べる回避歩行に限定した場合、1~3:9~7の割合でさらに右側に避ける傾向が強くなる。また、左側の初期位置から右側に回避した(左→右)比率は17~31%で平均25%であった。この値は、実験シリーズ1の場合の17%と比べてやや高い(約8%)。逆の場合(右→左)の比率は0~11%、平均3%でシリーズ1の22%と比べて19%低い。さらに x 軸を横切る行動の比率はシリーズ1とは逆に左側回避より右側回避がかなり高くなる。いずれの結果も左側の通路幅員が右側に比べて狭いためその影響があったことがうかがわれる。

(3) 回避歩行の軌跡データの選定

回避歩行の選定については各標本の $Ey=Ky$ 直線からの距離が自由歩行時の $\pm 1\sigma$ 分(σ は第一章の自由歩行時で得られた標準偏差)より大きなものを回避歩行と判断した(図-4.3.4参照)。

この結果、<前向静止>が72例中43例、<4.5m移動>が51例中35、<9m移動>が56例中33、<14m移動>が48例中28で、平均63.1%が回避歩行と判断された。この数字は実験シリーズ1よりも15%程高くなっている。また、回避歩行の Ey は、シリーズ1と同様ほぼ $-1\text{m} \leq Ey \leq 1\text{m}$ に限定されることから、歩行者は障害物正面(x 軸)から1m以上ずれた歩行位置をとる場合は自由歩行的な歩行をしていると考えられる。図-4.3.5に回避歩行の軌跡の障害物別標本集合を、図-4.3.6に自由歩行的な歩行軌跡の障害物別標本集合を示す。回避歩行における左側回避では、<前向静止>が4例、<4.5m移動>が3例、<9m移動>が9例、<14m移動>が6例と極めて少ない。

以後、特に断らない限り回避歩行について分析を行う。

(4) Sy と回避行動開始点までの歩行状況の検討

回避歩行を行う歩行者が、観測を開始してから回避行動開始点までの間をどのように歩いているかを検討した。

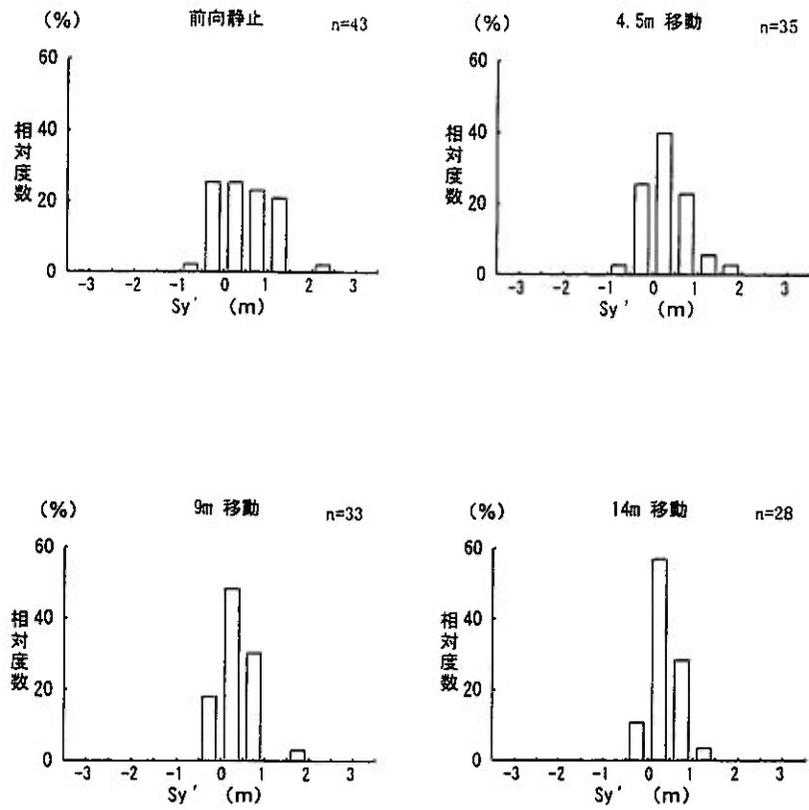


図-4.3.7 障害物別 Sy' の相対度数分布（実験シリーズ2、標本集合）

表-4.3.2 障害物別 Sy' の平均値の差の検定（実験シリーズ2、標本集合）

	前向静止 n=43	4.5m 移動 n=35	9m 移動 n=33	14m 移動 n=28	
前向静止	—	C	C	C	A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
4.5m 移動	—	—	C	C	
9m 移動	—	—	—	C	
14m 移動	—	—	—	—	

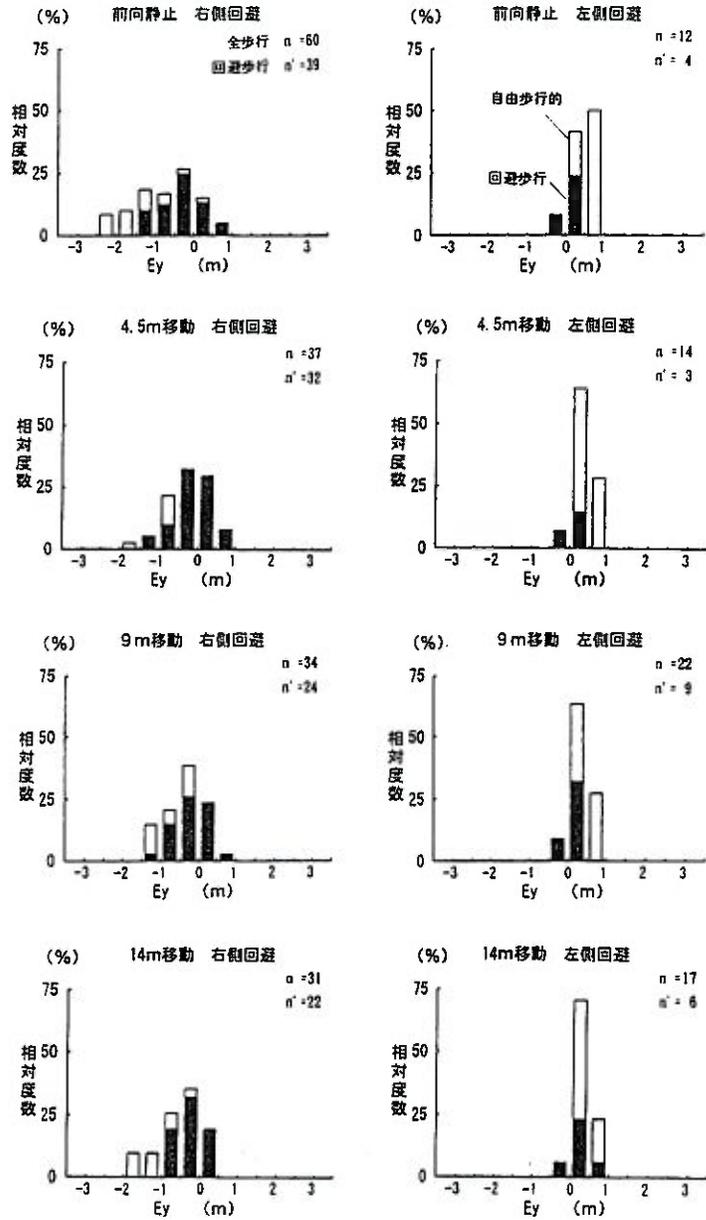


図-4.3.8 回避方向別 E_y の相対度数分布 (実験シリーズ2、標本集合)

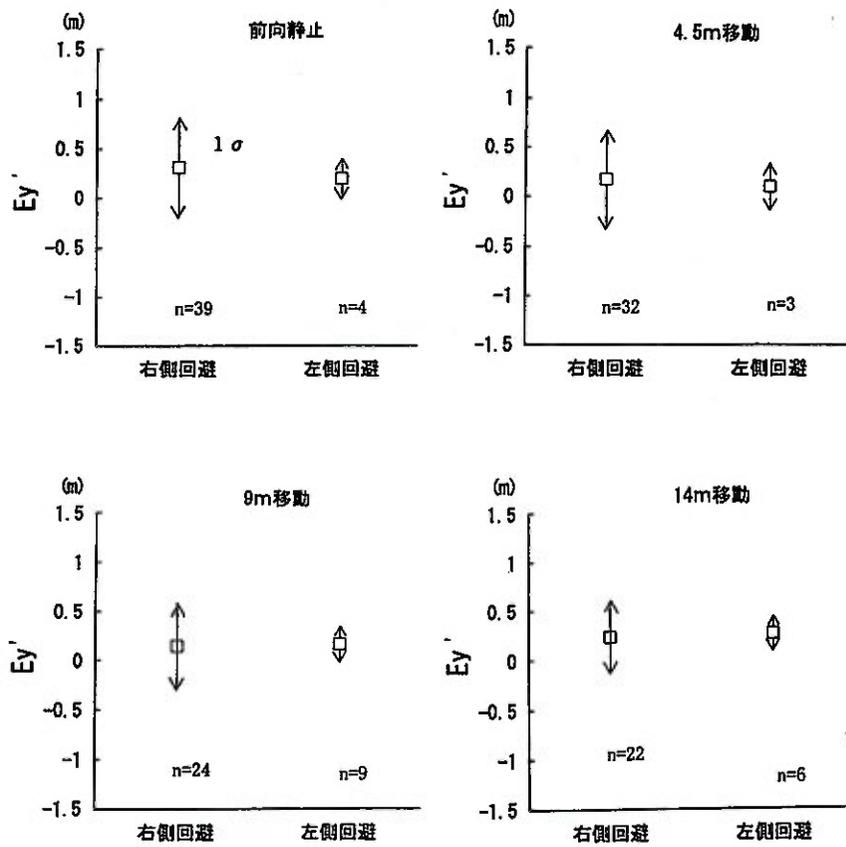


図-4.3.9 回避方向別 Ey' の平均値と分散
(実験シリーズ2、回避歩行の標本集合)

図-4.3.7は回避歩行における標本集合の Sy' の相対度数分布を障害物別に示したものである。また Sy' は $0.5 \leq < 1.0(m)$ のように0.5mごとに区分している。いずれの障害物も正規分布かそれに近い形状を示す。各障害物の Sy' の平均値は、<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>でそれぞれ0.47m(0.57m, n=43)、0.32m(0.53m, n=35)、0.34m(0.38m, n=33)、0.39m(1 σ は0.35m, n=28)であった。各障害物の Sy' の平均値に差があるかどうかを検定したところ、いずれも有意差がみられなかった(表-4.3.2)。

また、回避歩行における標本集合の Ey' および Sy' の平均値と分散の関係をみたところ、いずれの障害物についても Sy' の値は Ey' より大きく、その平均値の差は0.2m前後である。

こうした結果から歩行者は回避行動を開始するまでわずかに進路を回避方向へ変更しているが、障害物の違いによる影響は受けていないと判断される。

(5) 回避方向による影響の検討

回避した方向(左右)によって Ey' 、 Sy' 、 Ky' の値に差があるかを検討した。ここで扱う値は、4.1節でも定義したように左右の回避を平均値や分布形で比較する場合には右側回避のデータをx軸を対称軸に折り返した形で扱っている。

a. 観測初期の Ey

図-4.3.8は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の Ey の相対度数分布を回避方向別に示したものである。また、図中黒く塗りつぶした部分は回避歩行と判断されたものである。回避歩行における分布形状の比較から、左側回避では右側回避に比べて実験条件から分布形状が偏るものの、基本的にはx軸に対してほぼ対称であると見ることができる。

図-4.3.9は回避歩行における Ey' の平均値と分散を回避方向別に示したものである。 Ey' の平均値は、<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>の順に右側回避と左側回避でそれぞれ、0.31m(1 σ が0.52m, n=39)と0.20m(0.21m, n=4)、0.17m(0.50m, n=32)と0.10m(0.24m, n=3)、0.15m(0.45m, n=24)と0.17m(0.19m, n=9)、0.23m(0.37m, n=22)と0.27m(0.19m, n=6)であった。回避方向別の Ey' の平均値はいずれの障害物についてほとんど変わらない。

b. 回避行動開始時の Sy

図-4.3.10は、右側回避のデータを折り返す前の状態での回避歩行における標本集合の Sy の相対度数分布を回避方向別に示したものである。各障害物の Sy' の平均

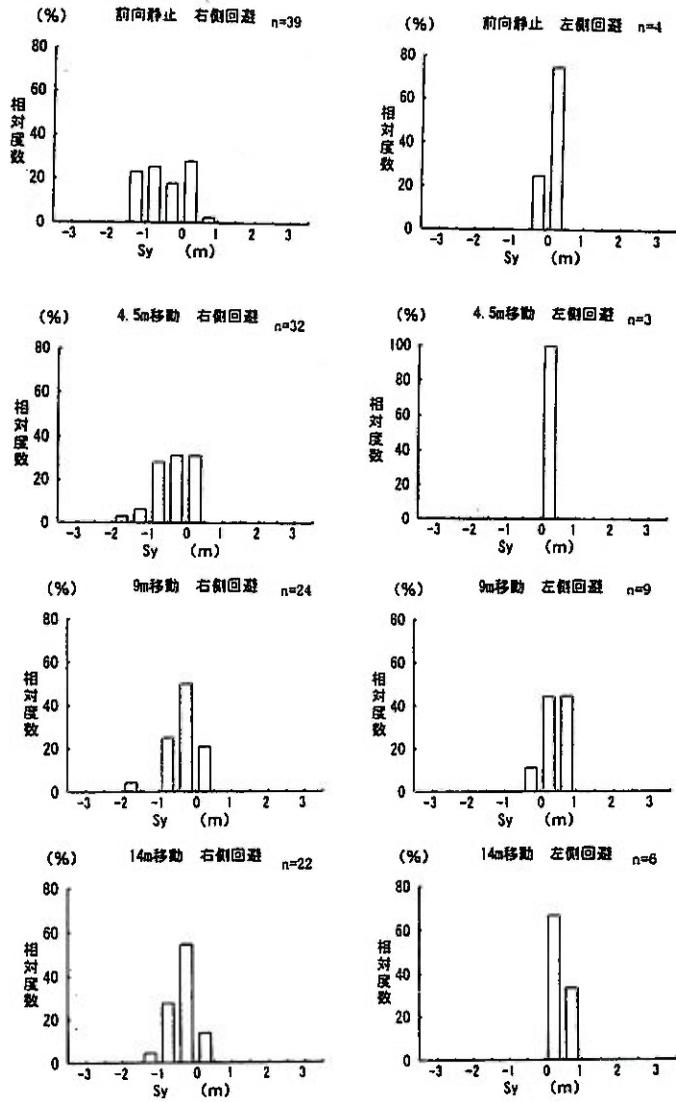


図-4.3.10 回避方向別 S_y の相対度数分布 (実験シリーズ2、標本集合)

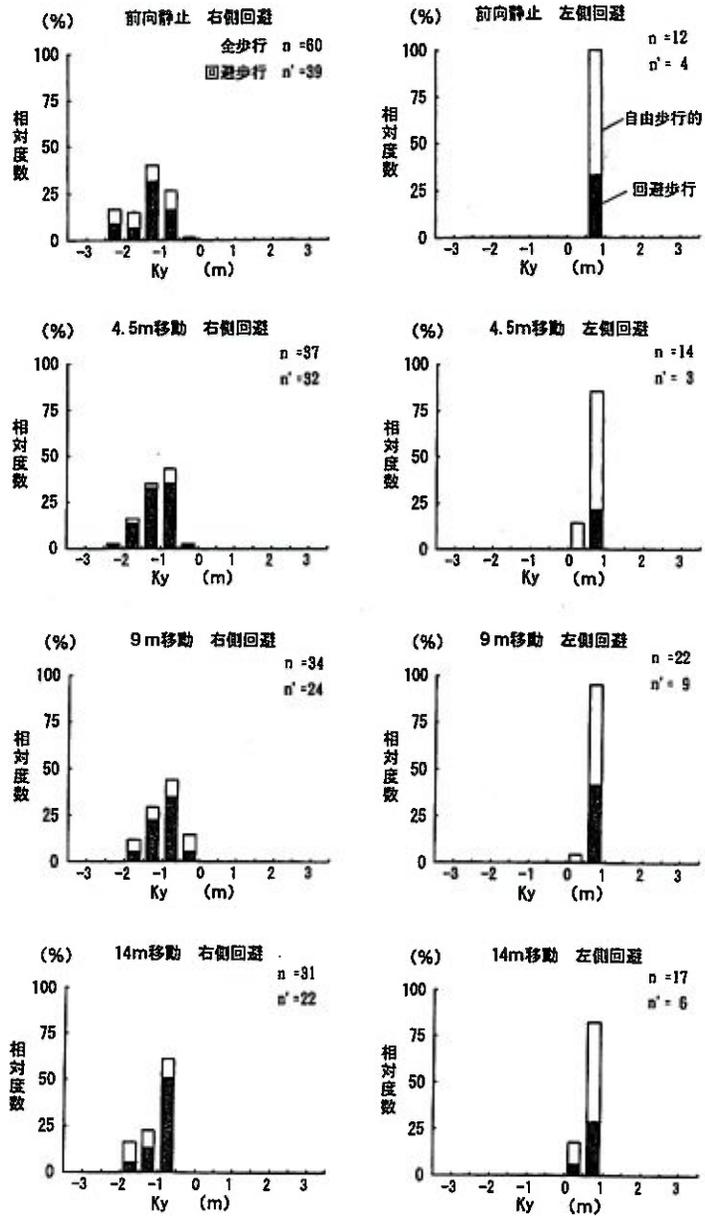


図-4.3.11 回避方向別 K_y の相対度数分布 (実験シリーズ2、標本集合)

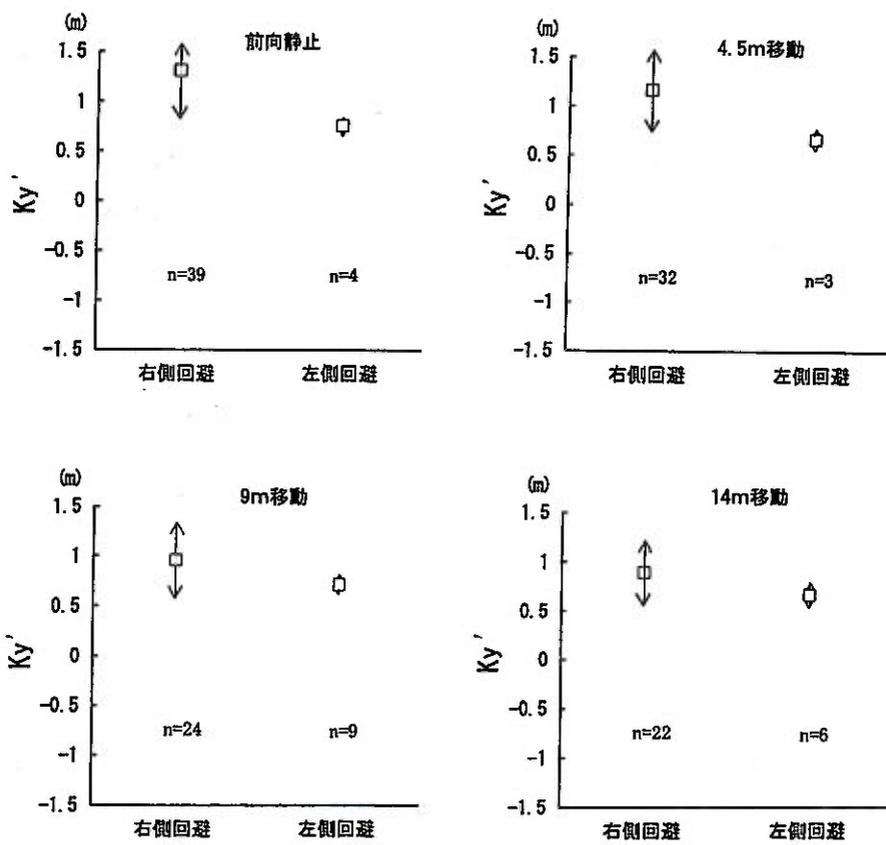


図-4.3.12 回避方向別 Ky' の平均値と分散(実験シリーズ2、標本集合)

値は<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>の順に右側回避と左側回避でそれぞれ、0.50m(n=39)と0.14m(n=4)、0.33m(n=32)と0.10m(n=3)、0.31m(n=24)と0.42m(n=9)、0.33m(n=22)と0.33m(n=6)である。回避方向別の Sy' の平均値は、<前向静止>を除いていずれの障害物に対してもほとんど変わらない。

c. すれ違い時の Ky

図-4.3.11は、右側回避のデータを折り返す前の状態での標本集合の Ky の相対度数分布を回避方向別に示したものである。また、図中黒く塗りつぶした部分は回避歩行と判断されたものである。ただし、 Ky はAとBのすれ違い時の y 方向距離を示したもので、 $0.5 \leq <1.0(m)>$ のように0.5mごとに区分している。いずれの障害物についても Ky は偏った分布の形状を示し、図-4.3.8に示す観測初期位置 Ey および、図-4.3.10の回避行動開始時の Sy の分布形状を平行移動し、さらにそれを圧縮したようなものになっている。

また、図-4.3.12は回避歩行における標本集合の Ky' の平均値と分散を回避方向別に示したものである。 Ky' の平均値は<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>の順に右側回避と左側回避でそれぞれ、1.31m(1σ は0.48m, n=39)と0.77m(0.09m, n=4)、1.17m(0.42m, n=32)と0.67m(0.11m, n=3)、0.96m(0.38m, n=24)と0.71m(0.09m, n=9)、0.89m(0.33m, n=22)と0.66m(0.13m, n=6)である。左側回避の Ky' の平均値は、右側回避と比べてかなり小さいが、これはすれ違い時に幅員の影響を受けていることから当然の結果である。

ところで幅員に余裕のある右側回避における<14m移動>の Ky' の平均値は、<前向静止>に比べて0.42m小さく、同じシリーズ2の<モノ>の Ky' の平均値の1.15m(1σ は0.51m, n=39)と比べても0.26m小さい。こうしたことから、歩行者は静止した障害物に比べて移動する障害物に対してはぎりぎりの距離を確保する程度ですれ違いを行っている」と推察される。

(6) 歩行軌跡の x 軸に対する対称性

右側回避と左側回避では、図-4.3.11に示すようにすれ違い時に幅員による影響が異なることは明かである。しかし、前項の Ey' 、 Sy' 、 Ky' の分布形状の比較や平均値の差の検定でも明らかなように、すれ違い時を除くと左右における歩行軌跡に差はみられない。このことから歩行軌跡は x 軸に対して対称形であると判断される。

以後、 $|Sx|$ の検討では左右方向を区別せず扱うことにする。

4.3.3 障害物による $|S_x|$ の値の検討

ここでは<14m移動>と<前向静止>の $|S_x|$ を中心に検討を行う。本章の目的は障害物が移動しない<前向静止>に対して、移動する障害物との回避行動をとらえることにある。<4.5m移動>や<9m移動>の実験方法の場合は歩行者が回避行動を行っている途中に障害物が動き出すことになる。これに対して<14m移動>の場合は大半の歩行者が回避行動を起こす前に障害物が移動していることから、歩行者同士の回避行動をとらえたものと言える。

(1) 相対歩行軌跡による検討

4.3.1の(1)では固定座標系における歩行軌跡群の中にも静止した障害物と同様、障害物回りに歩行者が歩行していないゾーンがあり、 $|X_0|$ が大きいほどこのゾーンがスタート点から離れて形成されることを述べた。この状態では歩行者Aの歩行速度の違いに影響されて移動する障害物と静止した障害物を比較できない。そこで障害物Bを原点とした相対座標系で歩行者Aの相対歩行軌跡を求めることにした(図-4.3.13)。ただし、障害物Bの動きは4.2節で決めたように定速で移動するものとする。この図からは障害物回りのゾーンの前方(x方向)長さは<14m移動>と<前向静止>については変わらないと判断される。

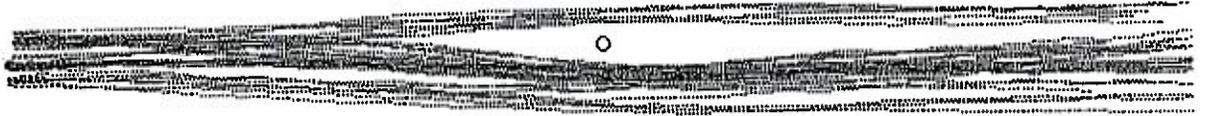
ところで、中村は文献1で、すれ違い時の相対的な進路変更と速度変更について、「歩行者は10m程度手前から減速しつつ回避し始め7~8m手前で加速に転じ、6m手前で回避方向を定めて直進し、3m手前で目的地方向への復帰の進路変更を開始する。」と述べている。しかし、4.2節で述べたようにx方向の相対歩行速度(図-4.2.2参照)は一定に推移し、中村の言うような回避行動に伴う加速・減速の速度変更については認められない。

(2) $|S_x|$ の値の検討

図-4.3.14は標本集合の $|S_x|$ の相対度数分布を障害物別に示したものである。ただし、 $|S_x|$ は $2.5 \leq <5.0(m)$ のように2.5mごとに区分している。<14m移動>と<前向静止>については正規分布の形状を示すが、<9m移動>と<4.5m移動>については正規分布とはみなせない。

$|S_x|$ の平均値は<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>でそれぞれ、9.62m(n=43)、9.17m(n=35)、8.22m(n=33)、8.37m(n=28)で、<9m移動>、<14m移動>、<4.5m移動>、<前向静止>の順に大きくなる。ただし、<前向静止>と比べて<4.5m移動>はほとんど差がないが、<9m移動>と<14m移動>はかなり小さい値を示す。<14m移動>と<前向静止>とは1.25mの差が

歩行者の
進行方向



$X_0=14\text{m}$ で障害物がスタート $n=28$



$X_0=9\text{m}$ で障害物がスタート $n=33$



$X_0=4.5\text{m}$ で障害物がスタート $n=35$



障害物のヒト 前向静止 $n=43$

1目盛り 2m



図-4.3.13 Bを原点にした相対歩行軌跡
(実験シリーズ2、回避歩行の標本集合)

ある。 $|Sx|$ の平均値の差を障害物間で検定したところ<前向静止>が<14m移動>と<9m移動>で危険率5%で有意差がみられた(表-4.3.3)。

一方、図-4.3.15は図-4.3.14の $|Sx|$ の相対度数分布を回避方向別に示したものである。右側回避の場合、 $|Sx|$ の平均値は<前向静止>、<4.5m移動>、<9m移動>、<14m移動>の順に右側回避と左側回避でそれぞれ、9.72m(1 σ は2.80m, n=39)と8.61m(2.71m, n=4)、9.07m(2.87m, n=32)と10.25m(1.06m, n=3)、8.90m(3.33m, n=24)と6.43m(3.62m, n=9)、8.29m(2.16m, n=22)と8.65m(2.26m, n=6)である。回避方向別 $|Sx|$ の平均値の差を検定したところいずれの障害物においても有意差がみられない(表-4.3.4)。

また、右側回避の $|Sx|$ に限定した場合、<前向静止>と<14m移動>の $|Sx|$ の平均値および両者の差は回避歩行の標本集合の場合と変わらない。

この結果、歩行者は14m手前から移動する障害物、すなわち歩行者同士のすれ違いに対しては、静止したヒトに対するよりも前方回避距離は小さくなると解釈できる。しかし直観的には動いているヒトを回避する場合、静止しているヒトに対して $|Sx|$ が小さくなるとは考えにくい。このため、本来は $|Sx|$ が同じくらいの距離に接近した時、歩行者が回避行動を開始するとする考え方も捨て難い。

<14m移動>と<前向静止>に有意差がみられた理由として以下のことが考えられる。今回実験者Bの位置と時間の関係式を用いてBを原点とする $|Sx|$ を求めた。この関係式は<9m移動>で得られた数少ない標本に基づいたもので、歩行者Aが X_0 に達する前に既に実験者Bが動き出しているというものであった。<14m移動>でもこの関係式にしたがって実験者が動き出しているとして $|Sx|$ の値を求めたが、今回この関係式の適用が妥当であるかどうかの検討は有効な標本が少ないため判断しがたい。

歩行軌跡の分析と合わせて総合的には、障害物が移動している場合と移動していない場合での歩行者の $|Sx|$ には違いがないと判断した。

4.3.4 まとめ

障害物であるヒトが「前向き」の場合、ヒトが移動する実験<14m移動>と移動しない実験<前向静止>の相対歩行軌跡と $|Sx|$ について検討した。この結果前向きのヒトが移動する場合と移動しない場合の $|Sx|$ に差があるかどうか、歩行軌跡の分析と $|Sx|$ の平均値の差の検定でそれぞれ判定が異なったが、総合的に判断して両者の $|Sx|$ には差がないと考えられる。

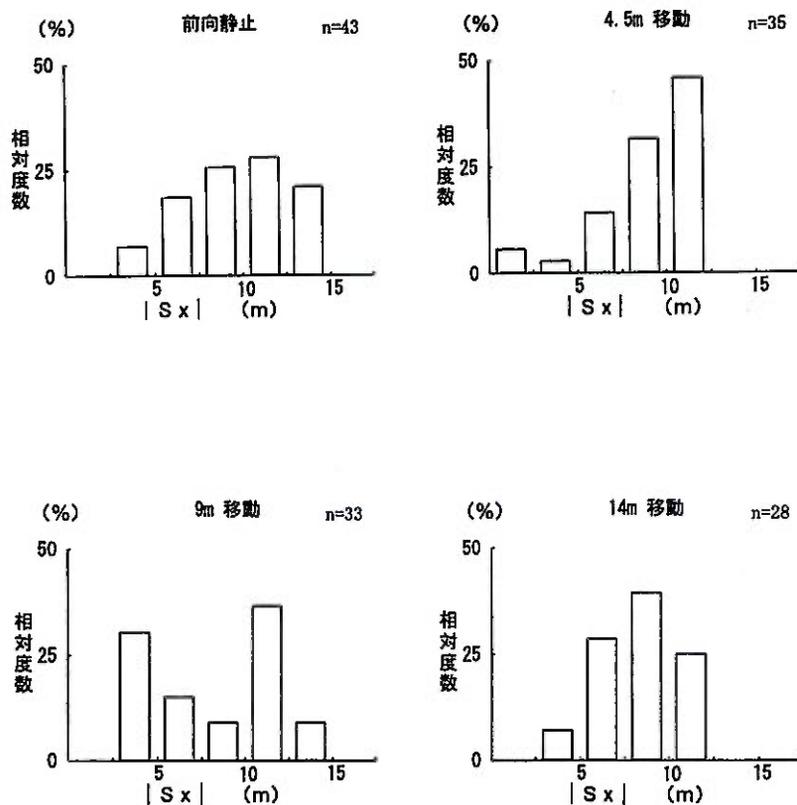


図-4.3.14 障害物別 $|Sx|$ の相対度数分布
(実験シリーズ2、回避歩行の標本集合)

表-4.3.3 障害物別 $|Sx|$ の平均値と差の検定
(実験シリーズ2、回避歩行の標本集合)

	前向静止 n=43	4.5m 移動 n=35	9m 移動 n=33	14m 移動 n=28	
前向静止	-	C	B	B	A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
4.5m 移動	-	-	C	C	
9m 移動	-	-	-	C	
14m 移動	-	-	-	-	

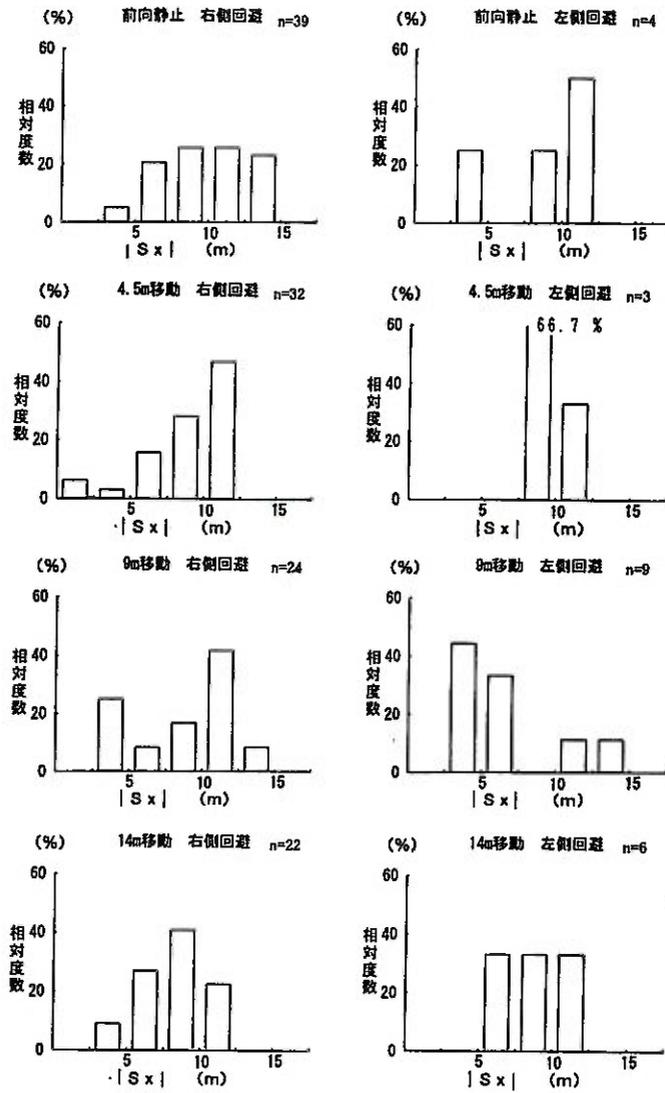


図-4.3.15 回避方向別 |Sx| の相対度数分布 (実験シリーズ2、回避歩行)

表-4.3.4 回避方向別 |Sx| の平均値と差の検定 (実験シリーズ2、回避歩行)

	前向静止		4.5m移動		9m移動		14m移動		A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
	R	L	R	L	R	L	R	L	
n	39	4	32	3	24	9	22	6	
判定	C		C		C		C		R: 右侧回避 L: 左侧回避

4.4 実験ケース「後ろ向き」

実験ケース「後ろ向き」についても、「前向き」と同様な手順で分析を進めた。

4.4.1 結果および分析の概要

図4.4.1は〈自由歩行〉と〈後向静止〉、〈後向移動〉の歩行軌跡の標本集合を示したものである。他の実験シリーズと同様、初期位置の分布は図中上側の方に偏る傾向がある。また、歩行軌跡の標本集合から〈後向移動〉は〈後向静止〉と比べて回避行動を開始する地点が異なる傾向があることが分かる。

図4.4.2は標本集合の観測初期位置 E_y ($E_x=-14\text{m}$ 地点での y 座標値)の相対度数分布を障害物別に示したものである。ただし E_y は $0.5 \leq < 1.0\text{m}$ で 0.5m ごとに区分している。〈自由歩行〉、〈後向静止〉、〈後向移動〉はいずれも正規分布に近い分布形状を示している。図4.4.3は E_y の平均値と分散を障害物別に示したものである。 E_y の平均値は〈自由歩行〉、〈後向静止〉、〈後向移動〉はそれぞれ 0.16m (1σ が 0.47m 、 $n=37$)、 0m (1σ が 0.51m 、 $n=51$)、 -0.08m (1σ が 0.58m 、 $n=43$)で変わらない。〈自由歩行〉、〈後向静止〉、〈後向移動〉の E_y の平均値に差があるかどうかを検定したところ、いずれも有意差がみられなかった(表4.4.1)。

この結果歩行者は回避行動を開始する以前に障害物からの影響は受けていないと判断された。

回避歩行の選定では、〈後向静止〉が51例中38、〈後向移動〉が43例中27で平均69%が回避歩行と判断された。これは実験シリーズ1の場合と比べて平均で20%程高くなっている。図4.4.4に回避歩行と自由歩行的な歩行軌跡の障害物別標本集合を示す。

S_y については、〈後向静止〉と〈後向移動〉でそれぞれ平均が -0.01m (1σ が 0.36m 、 $n=38$)と 0.04m (1σ が 0.35m 、 $n=27$)で差がなく、ほぼ正規分布に近い性状を示す(図4.4.5、図4.4.6)。各障害物の S_y の平均値に差があるかどうかを検定したところ、いずれも有意差がみられなかった(表4.4.2)。

歩行位置 E_y から回避行動開始点までの歩行状況をみるため障害物別標本集合の E_y と S_y の相関関係を検討したところ、〈後向静止〉と〈後向移動〉の相関係数はそれぞれ 0.85 ($n=38$)、 0.93 ($n=27$)で非常に高い相関関係にあることが分かった。自由歩行における E_y と K_y との相関係数 0.77 ($n=42$)と比べても高い値をとる。また、 E_y と S_y の平均値の差について検定を行ったところ〈後向静止〉については有意差がみられた(表4.4.3)。

この結果歩行者は観測初期位置から回避行動開始点までわずかに進路を回避方向へ変更しながら歩いているものと判断された。

図4.4.7は回避歩行における B を原点とした歩行軌跡の標本集合である。図か

歩行者の
進行方向



自由歩行 n=37



後向静止 n=51



後向移動 n=43

1目盛り 2 m

図-4.4.1 障害物別歩行軌跡の標本集合（実験シリーズ3）

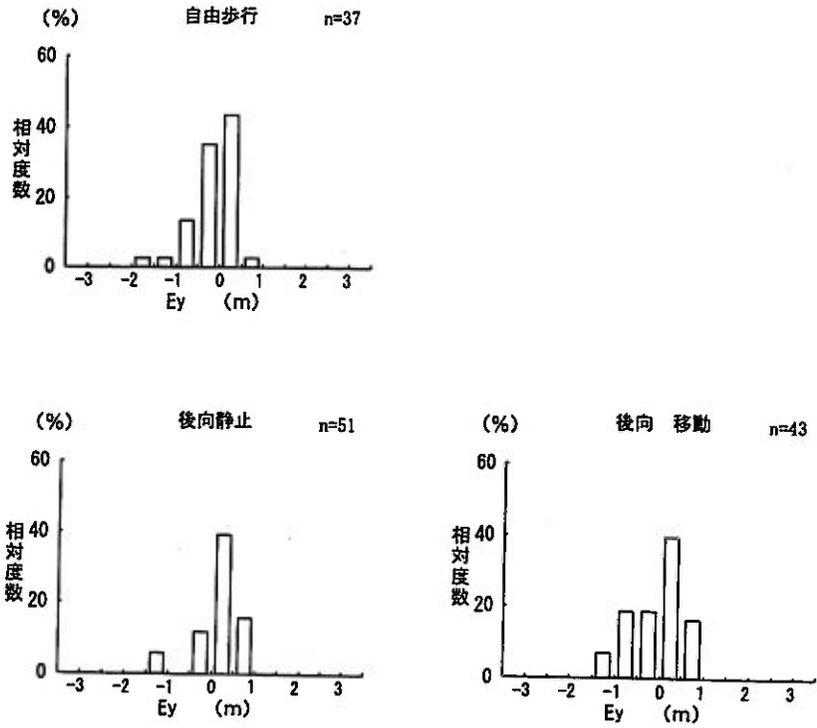


図-4.4.2 障害物別 E_y の相対度数分布 (実験シリーズ3、標本集合)

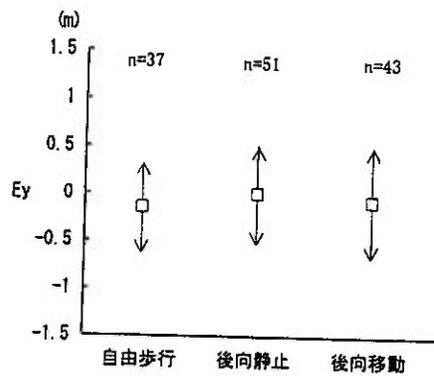


図-4.4.3 障害物別 E_y の平均値と分散 (実験シリーズ3、標本集合)

表-4.4.1 E_y の平均値と差の検定（実験シリーズ3、標本集合）

	自由歩行 n=37	後向静止 n=51	後向移動 n=43
自由歩行	-	C	C
後向静止	-	-	C
後向移動	-	-	-

A: 危険率1%で有意差あり
 B: 危険率5%で有意差あり
 C: 有意差なし
 R: 右側回避
 L: 左側回避

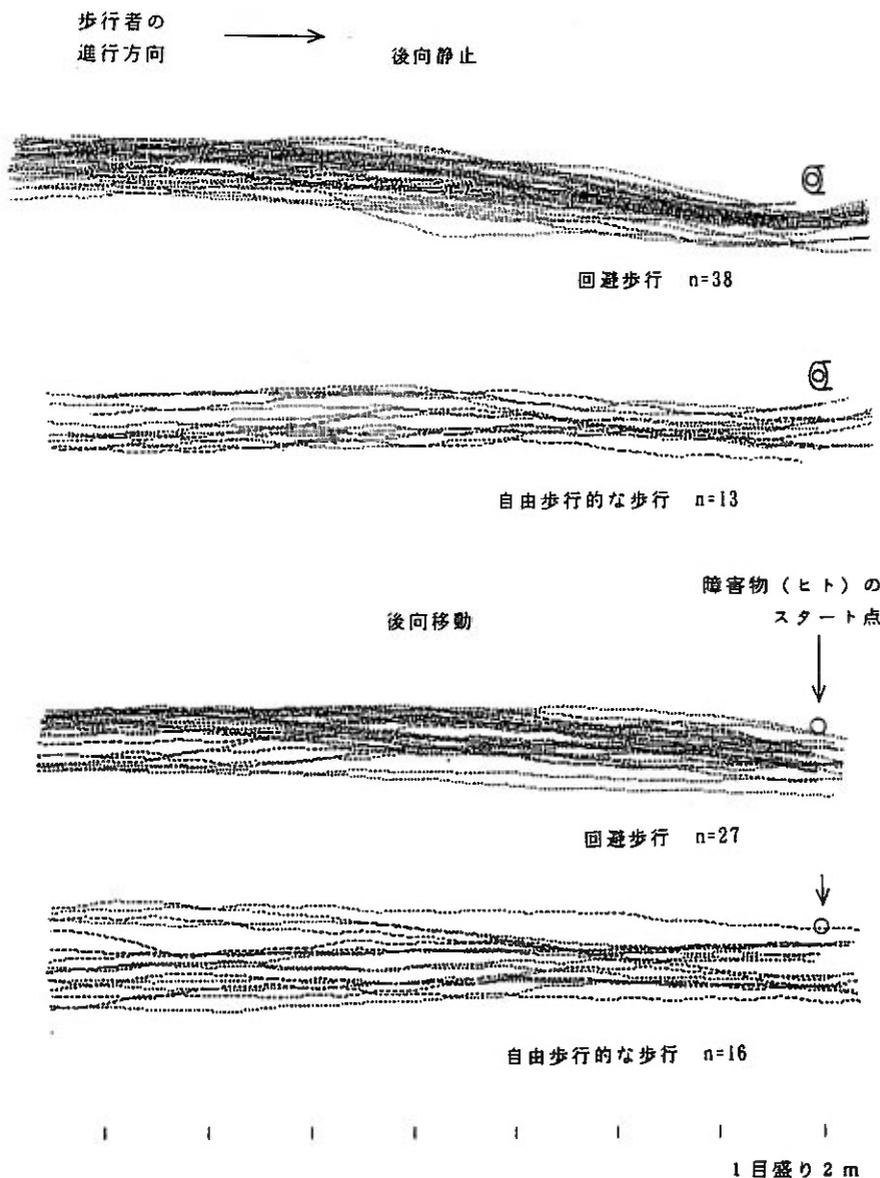


図-4.4.4 回避歩行および自由歩行的な歩行軌跡の標本集合（実験シリーズ3）

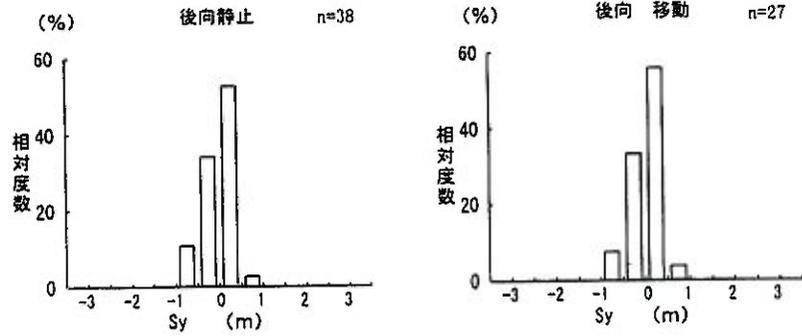


図-4.4.5 障害物別Syの相対度数分布
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

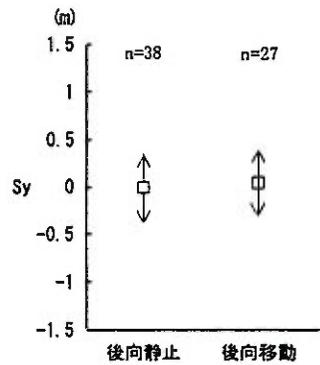


図-4.4.6 障害物別Syの平均値と分散
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

表-4.4.3 障害物別EyとSyの平均値の差の検定
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

表-4.4.2 Syの平均値と差の検定
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

	後向静止 n=38	後向移動 n=27
後向静止	-	C
後向移動	-	-

	後向静止	後向移動
n	38	27
Ey 平均値	24	20
Sy 平均値	-1	4
判定	A	C

A: 危険率1%で有意差あり
B: 危険率5%で有意差あり
C: 有意差なし

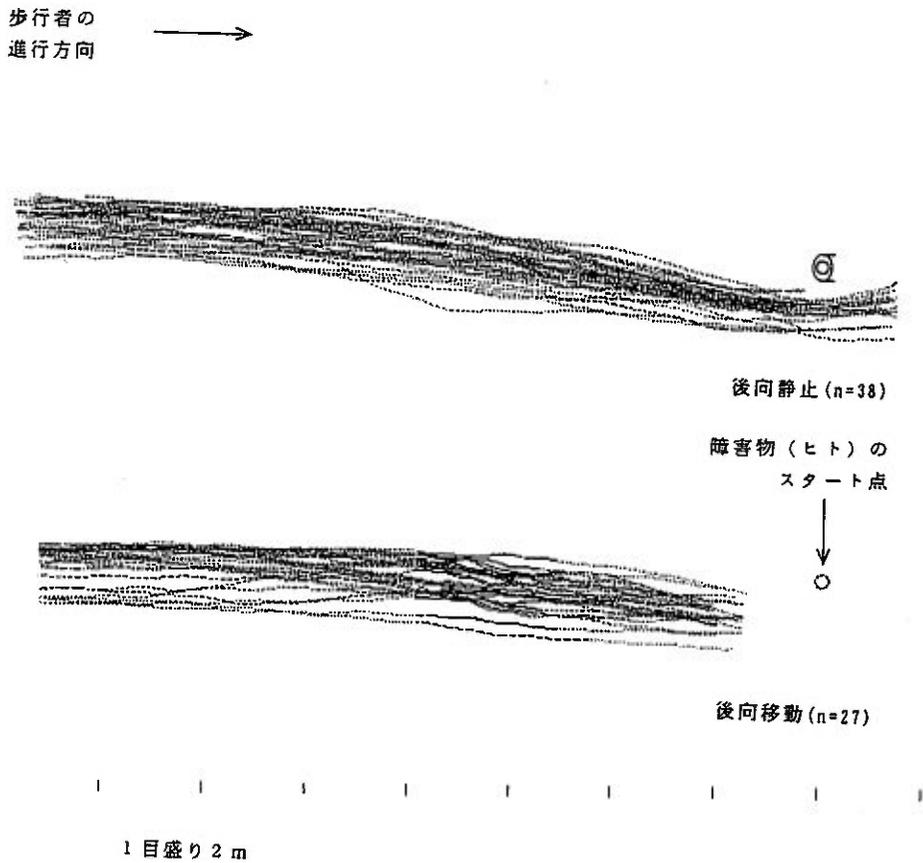


図-4.4.7 Bを原点にした相対歩行軌跡
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

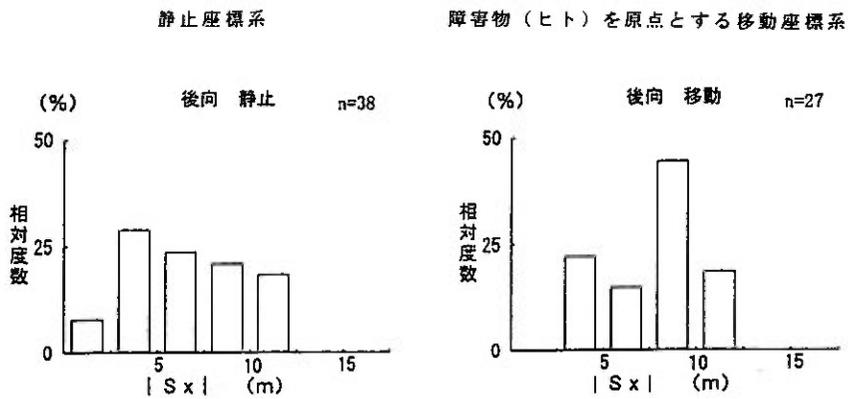


図-4.4.8 |Sx|の相対度数分布 (実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

表-4.4.4 障害物別 |Sx| の平均値と差の検定
(実験シリーズ3、回避歩行の標本集合)

	後向静止 n=38	後向移動 n=27	A: 危険率1%で有意差あり B: 危険率5%で有意差あり C: 有意差なし
後向静止	-	B	
後向移動	-	-	

ら回避行動はほぼ同じように行われている傾向がうかがわれる。

4.4.2 障害物による |Sx| の値の検討と考察

図-4.4.8は標本集合の |Sx| の相対度数分布を障害物別に示したものである。ただし、|Sx| は $2.5 \leq < 5.0(m)$ のように2.5mごとに区分している。いずれも正規分布に近い分布形状を示す。|Sx| の平均値は<後向静止>、<後向移動>がそれぞれ6.54m (1σが2.93m、n=38)、7.72m (1σが2.30m、n=27) で両者の平均値には1.18mの差(危険率5%で有意差あり)がある(表-4.4.4)。しかし、<後向移動>については|Sx| が0mから2mの間で回避行動が行われたものについては映像で捉えきれていない。このため、 $0m \leq < 2m$ の|Sx| が含まれるとすると、両者の|Sx| の平均値はほぼ同じになると判断される(注6)。

こうしたことから、|Sx| は障害物が移動しても移動しない場合と変わらないと判断される。

(注6)

この他にも、実験者Bが動き出す距離|X₀| は一部の歩行者が既に回避行動を開始している距離であることや、動き出してすぐに止まる(2m)という実験方法にも問題があると考えられる。

4.4.3 まとめ

障害物であるヒトが「後ろ向き」の場合、ヒトが移動する実験と移動しない実験を行いその|Sx|を検討した。この結果、<後向静止>と<後向移動>の|Sx|の平均値に差がみられたが、<後向移動>の実験条件を考慮するとほとんど差がないと判断される。また相対歩行軌跡ではほとんど差はない。こうしたこ

とから、両者の $|Sx|$ には差がないものと判断した。

4.5 他の文献との比較

本研究の実験方法は、障害物に接近する歩行者の対応行動をみるものである。今回得られた前方回避距離 $|Sx|$ の平均値は障害物の種類にかかわらず、7 m から 9 m の間に収まっている。この値の大きさがどういった意味を持つものなのか、類似の研究と比較して考察したい。

八重澤ら（文2）はパーソナル・スペースに関する被接近の実験を行い、心理量と生理反応の考察を行っている。心理量の場合、距離（接近距離20mから「目を反らしたい距離」までの6段階）の減少と評定値（7段階）が直線的な関係にあるが、生理反応の場合、心拍数がある距離段階から急激に変化することを指摘している。この距離段階は「接近距離8m」と「気詰まりを感じる」間に生じている。すなわち、対面する人間同士の間には8 m前後に生理的な変曲点があることを示している。

この研究が示すように、今回観測された歩行者が回避行動を開始する7～9 m という距離は、人間の接近による心理的・生理的な変化をもたらす距離と考えられる。

また、McBride（文3）によれば、実験者が正面から被験者に近づくと、皮膚電気反射（GSR）（注7）は最大（電気抵抗は最小）で、ついで横から近づくと大きくなり、後ろからは最も小さい。すなわち、身体の向きによって生理的反應の程度が異なることを指摘している。

柴川（文4）は障害物を避け始める地点と障害物との距離を心理的実験から求めている。この距離は障害物を自転車群とした場合、およそ7～8 mで、本研究の〈モノ〉の $|Sx|$ の平均値7.34mとほぼ一致する。

こうしたことから、人間は、人間と同程度の大きさの障害物に対して、7 m から 9 m に接近すると心理的・生理的に影響を受ける変曲点があると判断される。すなわち、人間の反応や行動は個体間の距離に影響され、個体間の距離が変われば反応も異なり行動を変えて対応するものと判断される。

人類学者のホール（文5）は、アメリカ人を対象として人間同士の間隔を4つの距離帯で区別して（注8）。7 m から 9 m はホールの公衆距離の近接相（3.6 m ～7.5 m、遠方相は7.5 m 以上）に相当するものである。この距離は、1.2 m ～3.6 m の社会距離に対して、身体全体がゆとりをもって見られ、他人に脅かされたとき逃げるか防ぐことができる距離である。

こうしたことから、回避行動を行うのは相手に対して自由な対応行動がとれる限界距離に入り、心理的・生理的にも強い影響を受けての行動と解釈できる。

(注7)

皮膚電気反射GSR (galvanic skin reflex) は、驚き、緊張、興奮などの情緒の程度を反映していると考えられるところから、交通機関の運転手の精神的作業負担の測定や教室における視聴覚教材の有効性の測定に用いられる。

(注8)

人類学者のHallは、個人的空間についての感覚が文化の型によって世界中異なることを見いだした。行動の観察から、人間どうしの距離のとり方はそれ自体がコミュニケーションとしての機能を持つと考え、距離をコミュニケーションと対応させて分類している。

4.6 まとめ

本章では歩行者の回避行動が静止した障害物と移動している障害物に対して違いがあるかどうかを検討するため、障害物が移動する「前向のヒト」と「後向のヒト」の二つの実験ケースを実施した。回避行動を解析した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 歩行者の回避行動時の歩行速度は定速で推移する。
- ② 歩行軌跡に関する全体的傾向は静止した障害物と同様な傾向を示す。
- ③ 前方回避距離は障害物であるヒトが定速で移動していても、静止した場合の前方回避距離と変わらない。
- ④ 歩行者が回避行動を開始する距離は障害物が静止、移動にかかわらず前方回避距離の平均値が7 m～9 mになった場合である。
- ⑤ この距離は、他人の接近にともなう心理的・生理的影響が強くなる距離と一致する。

第五章

| S x | についてのまとめと

歩行モデルの提案

5.1 はじめに

歩行者の領域の大きさを明らかにするため、第三章では静止した障害物の、また第四章では移動する障害物に対する前方回避距離を求めた。この結果、静止した障害物に対しては障害物の種類によって前方回避距離が異なり、人の場合身体の向きが影響することが分かった。すなわち、後向きの人に対しては前向きの人に対するより前方回避距離が小さいことや、物体ではその中間的な値をとることなどである。また、こうした前方回避距離の値は調査時期や場所が変わっても計測結果はほとんど変わらない。さらに、前方回避距離は障害物である人が静止していても移動していても変わらない。

本章では、こうした知見に基づき、歩行者の領域の大きさに規定されて回避行動が行われているとする簡単な回避歩行モデルをたて、その検討を行った。

5.2 回避歩行モデル

本研究でいう歩行者の領域とは、歩行者の行動を動機づける働きを持ち、歩行者と障害物の双方に形成される仮想の空間領域をさす。回避行動を行う歩行者は自身の領域と障害物の領域を確保するため、障害物との位置関係から回避行動を決定する。すなわち回避歩行モデルでは、「歩行者の領域 (Bp)」と「障害物の領域 (Bo)」の2つの大きさで回避行動が規定されると考えた (図-5.2.1)。

$$\text{回避行動} = f (Bp, Bo) \quad (1)$$

上述の二つの変数で回避行動を開始する時点での障害物と歩行者の距離 (前方回避距離: | Sx |) を説明できるとした (図-5.2.2)。| Sx | は、第一次近似と

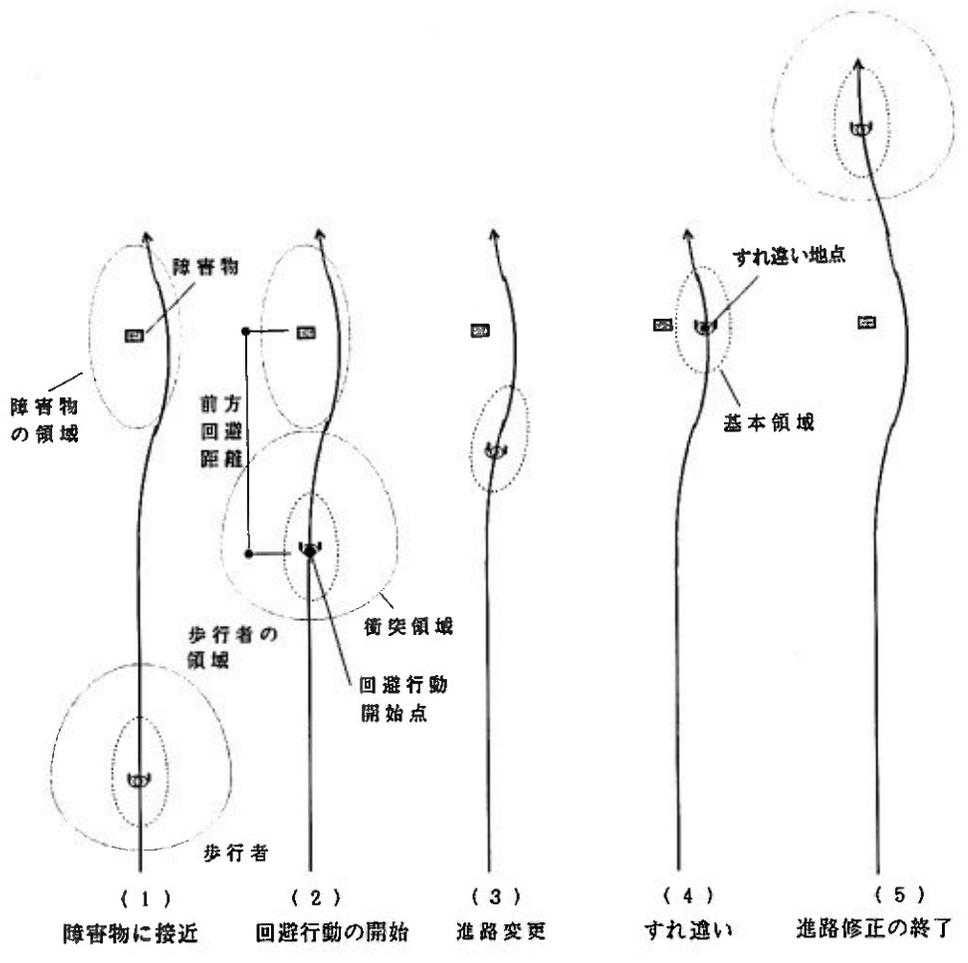


図-5.2.1 回避行動と歩行モデル

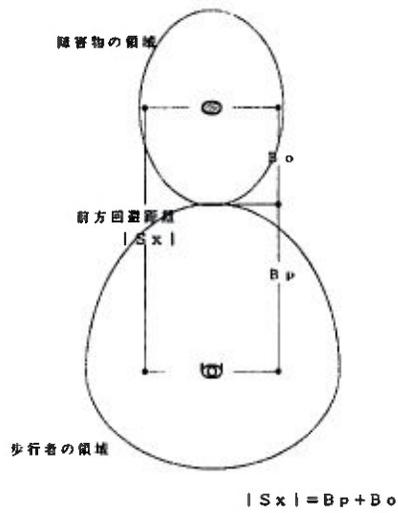


図-5.2.2 前方回避距離と歩行モデル

してBp、Boの和で表現できる。

$$|Sx| = Bp + Bo \quad (2)$$

ただし、

- |Sx| : 前方回避距離 (単位: m)
- Bp : 歩行者の領域長さ (単位: m)
- Bo : 障害物の領域長さ (単位: m)

ここで領域長さとは、歩行者の身体(障害物)の水平投影面積の中心から領域の淵までの寸法で、垂直方向の寸法については検討の対象としていない。

|Sx|は障害物の種類によって変化するものと考えられる。

ところで(2)式の変数の中では|Sx|のみが直接測定できるものであるが、以下のようなモデル化を行うことで障害物ごとの変数の値を決めることができる。このモデルでは回避行動が以下のように説明される。

- ① 障害物が静止した物体の場合、歩行者は $|Sx| = Bp + Bo$ の地点で回避行動をとる。
- ② 障害物が人の場合、障害物ヒトの領域は歩行者と同等の領域を持つ。すなわち歩行者は、対向するヒトの身体の向き(前向き・後向き・横向き)に応じて領域長さBon(nはヒト身体の向きを表す)を加味し、ヒトが移動していても静止していても、 $|Sx| = Bp + Bon$ の地点で回避行動をとる。

なお、上述のような過程で領域を規定すると、回避行動開始点以降、すれ違いまで、歩行者は領域を互いに重複させて行動せず、行動を起こす時にだけ意識する。その後のすれ違い時には、図-5.2.1にあるように一定の間隔を保っているが、これは領域から判断される距離よりもずっと小さいものであり、ここでは別の領域である基本領域によってすれ違いが行われる。この大きさについては詳細な検討にはいたっていない。

5.3 モデル式の検討

<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向後方回避>の|Sx|を|Sx₁|、|Sx₂|、|Sx₃|、|Sx₄|とすると

$$\begin{aligned} |Sx_1| &= 7.34\text{m} \\ |Sx_2| &= 8.84\text{m} \\ |Sx_3| &= 6.74\text{m} \\ |Sx_4| &= 6.82\text{m} \end{aligned}$$

モデル式(2)式より、

$$|Sx_1| = Bpf + Bo \quad (2.1)$$

$$|Sx_2| = Bpf + Boa \quad (2.2)$$

$$|Sx_3| = Bpf + Bob \quad (2.3)$$

$$|Sx_4| = Bpf + Boc \quad (2.4)$$

ただし、

Bpf : 歩行者の領域の前方長さ(m)

Bo : モノの領域長さ(m)

Boa : <ヒト前向>のヒトの領域長さ(m)

Bob : <ヒト後向>のヒトの領域長さ(m)

Boc : <ヒト横向>のヒトの領域長さ(m)

となる。なお、Bo の値についてはモノの種類によって変わるものと考えられる。

(2.2)、(2.3)、(2.4)式は障害物がヒトであることから、

$$Boa = Bpf \quad (2.5)$$

$$Bob = Bpf \quad (2.6)$$

$$Boc = Bpf \quad (2.7)$$

したがって

$$|Sx_1| = Bpf + Bo \quad (2.8)$$

$$|Sx_2| = 2Bpf \quad (2.9)$$

$$|Sx_3| = Bpf + Bpb \quad (2.10)$$

$$|Sx_4| = Bpf + Bps \quad (2.11)$$

ただし、

Bpb : 歩行者の領域の後方長さ(m)

Bps : 歩行者の領域の側方長さ(m)

となる。(2.9)式からまず、Bpfが求まる。

$$Bpf = 4.42 \text{ m}$$

さらにこの結果からBo、Bpb、Bps は

$$\begin{aligned} B_o &= 2.92 \text{ m} \\ B_{pb} &= 2.32 \text{ m} \\ B_{ps} &= 2.40 \text{ m} \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

以下得られた各数値から歩行者の領域の大きさが求められるため、各障害物の $|S_x|$ についての考察を行う。

5.4 考察

(1) 歩行者の領域の大きさ

自由歩行時の歩行者の領域は、前方長さがおよそ 4.4 m、後方長さがおよそ 2.3 m、側方長さがおよそ 2.4 m となる。前方が後方に比べて約 1.7 倍、前後長さが 6.7 m、側方の左右幅が 4.8 m の卵形に近い形態を持つものと推定される。

吉岡ら（文1）は対向する歩行者相互の間隔距離の観察から、前方 4.5 m、側方 1.7 m 程度の紡錘状の領域（注1）が存在することを示している。これを本研究の歩行者の領域と同質のものとして比較すると、前方長さがほぼ同じで側方長さが本研究の方が大きい。吉岡らの観測データは周辺に歩行者がいる歩行者天国での調査であるが、例え周辺に人がいても低密度であれば、歩行者の領域の前方長さは変わらないことになる。

（注1）

この文献では、領域の前方長さを求めるにあたって、本論で言うところの回避行動開始点や前方回避距離の求め方、相手の領域を想定しているかどうかについては明記されていない。

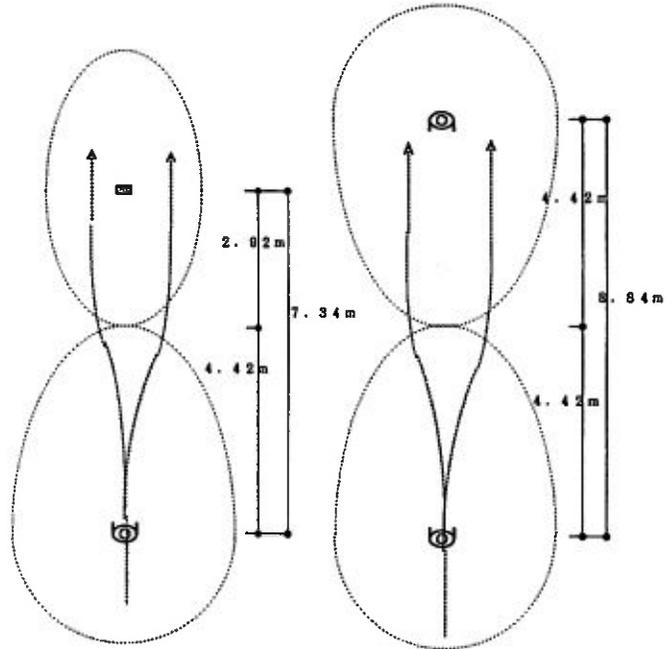
(2) 領域と回避歩行モデル

歩行者の領域に基づいて障害物別の回避行動を図示したのが図-5.4.1である。障害物がヒトの場合、障害物の領域は歩行者の領域と同じ形態を持ち、歩行者は両者の領域が接する地点を目標として回避行動を開始することが説明できる。〈モノ〉の場合、前方の領域はおよそ 2.9 m と、歩行者の領域の前方長さ 4.4 m より小さい。

また、歩行者の領域の側方長さの値と、モノの領域は 2.4 m と 2.9 m で 0.5 m の差しかなく、側方長さとは後方長さの各値は 2.4 m と 2.3 m でほぼ等しい。こうした結果は物体の領域の寸法と、人でも側方や後方の領域の寸法はほとんど変わらないと解

① 障害物 モノ

② 障害物 ヒト前向



③ 障害物 ヒト後向

④ 障害物 ヒト横向後方回避

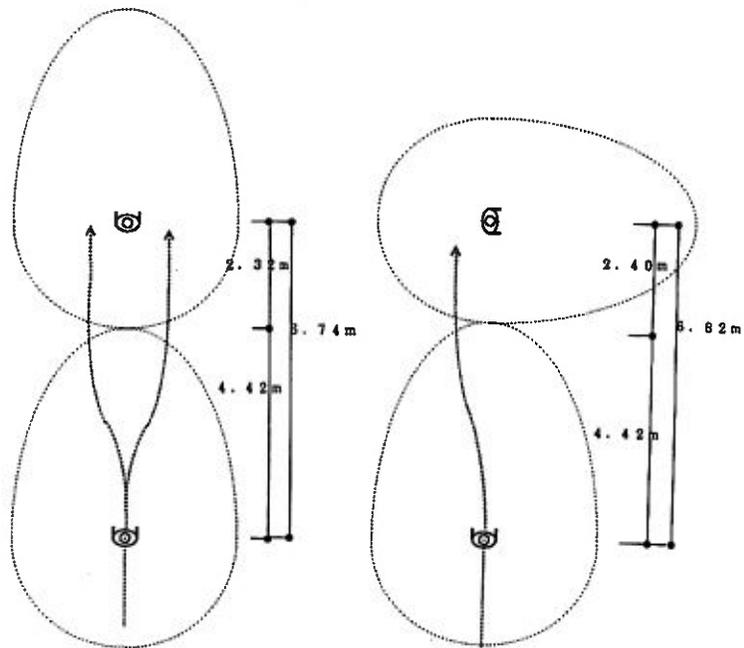


図-5.4.1 障害物別回避歩行と領域の大きさ

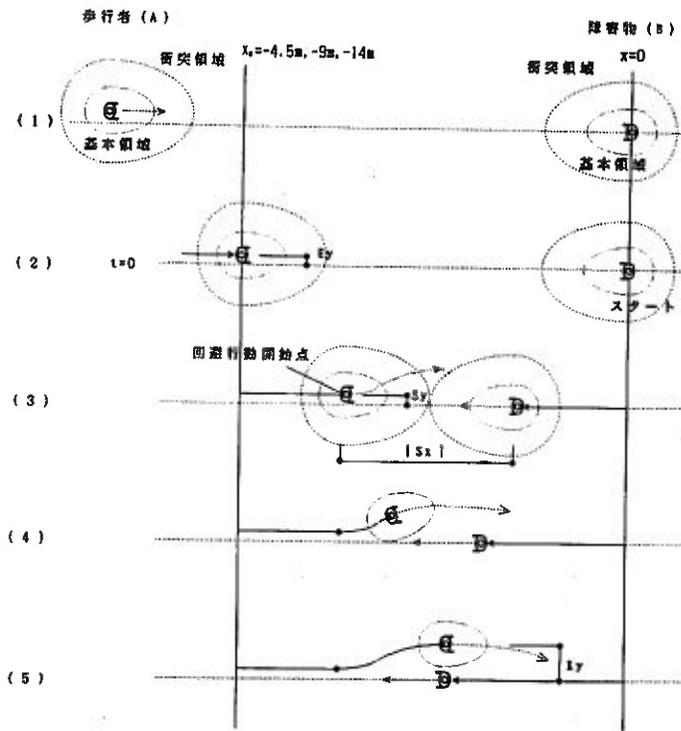


図-5.4.2 「前向き」の障害物に対する回避歩行モデル

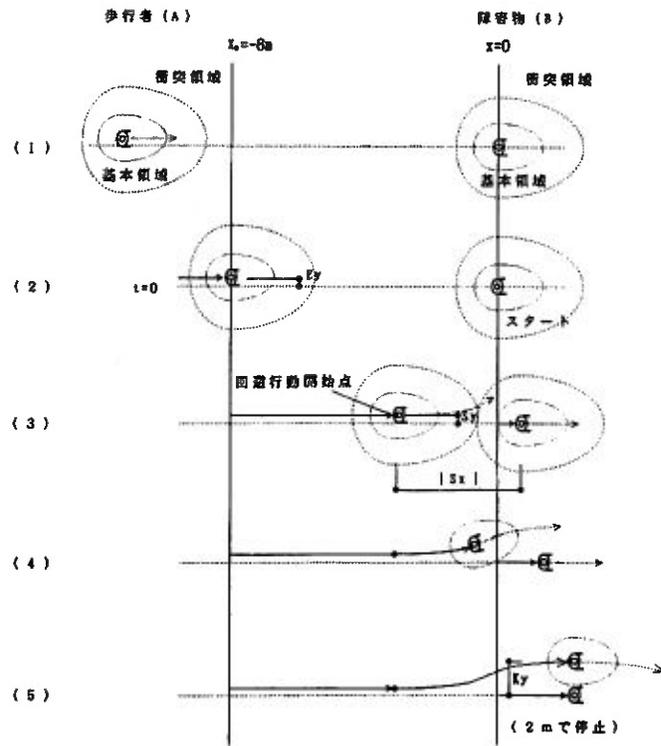


図-5.4.3 「後向き」の障害物に対する回避歩行モデル

積され興味深い。

Sommer (文2) によれば、個人的距離は絶対的なものではなく、人びとの間の関係、たとえばお互いの身体の向きによって違ったものになる。また、ある条件下では、人間が、他の人間を物体として、あるいは、背景の一部として、反応することもめずらしくない。本論の結果はこうしたことを実証するものとする。

(3) 既往研究と回避歩行モデル

本論の回避歩行モデルを用いて、回避行動は以下のように解釈される(図5.4.2、図5.4.3)。

歩行者は自分自身の領域を確保し、かつ対向者(障害物)の領域を必要以上に侵さないことで相互の心理的影響を軽減している。すなわち、領域の先端はいわゆるセンサーのような機能を持っていて、歩行者と対向者の領域の先端が触れることによって回避行動が開始される。回避行動が開始されてしまうと領域のセンサー機能(衝突領域)は必要なくなり、これに変わって群集歩行でも確保される基本領域がすれ違い地点の側方距離を決めることになる。こうした結果は第三章、第四章で示した前方回避距離 $|S_x|$ と側方距離 $|K_y|$ の値から裏付けられるものである。歩行者は、自由歩行のように領域を確保できる時には心理的・生理的に解放された状態になるように歩行をしているものと推察される。

本論では歩行者の心理的な面に立ち入るところまでは到底いたらないが、こうした研究につながる領域の存在を前提とした回避歩行モデルを提案した。

歩行者の領域に関連した研究にはこれまで大きさが数メートルの静的なものが多く、動的なものを扱った研究はほとんど見られない。吉岡ら(文1)は歩行者間で確保される距離からこの領域を推定し、領域の前方長さは4.5mと本論のものとはほぼ同じであった。吉岡らはこの前方長さと回避行動開始点との直接的な関係については言及していないがこの値を比較すると、領域の前方長さは群集密度が低い場合、自由歩行時のものと変わらないと解釈できる。しかし、この文献で相手の領域を想定していないとなるとこうした解釈はできないことになる。

本論では、歩行者の領域の大きさが周辺の状況如何で何十メートル、何百メートルになることもあるとする立場をとって、歩行者の領域と言う呼び方を用いた。今回は、その中の一つの直径7m程度の動的な領域を定量化したに過ぎない。しかし、こうした領域を定量化することによって一つの指標を得ることができる。例えば、動的でかつ集団的でない行動を行うような施設(劇場の通路、アトリウムの通路、美術館の回廊等)の場合、領域を指標として、部屋の空間規模をどうするかとかといったことが検討できると考える。

(4) 歩行者が歩行していないゾーン

静止した障害物（実験シリーズ1）であっても移動する障害物（実験シリーズ2）であっても、障害物回りには歩行者が歩行していないゾーンがあることを述べた。その形態は紡錘形に近いもので、実験シリーズ1の場合、その大きさは、前方（x方向）長さが4～8 m程度で障害物によって異なり、障害物の中で＜前向き＞が最も長く、＜モノ＞が最も小さい。側方長さは1～1.5mでほぼ一定である。中村ら（文3）も円柱（直径0.5m、高さ0.75m）を障害物とする歩行者の観察からこのゾーンの存在を指摘している。この大きさは前方長さが3.5m、側方幅が1.6mとしているが計測方法に関しては明記されていない。前方長さに本論のものと違いがみられるのは障害物の高さが影響しているためと考えられる。また、実験シリーズ2（ヒト前向き）の前方長さはおよそ5 mで、移動している場合も静止している場合も変わらない。側方幅はおよそ1～1.5mで、障害物が静止しているものより移動している方が多少小さい傾向がある。

このゾーンは、歩行者が障害物との物理的な衝突や接触を避け適度なクリアランスを確保するために進路を変更することによって、歩行者が通らない空間が障害物回りに残っている。本論の回避歩行モデルでは、このゾーンの前方長さは「歩行者の領域」と「障害物の領域」の一部を合わせたものから、側方長さは「歩行者の基本領域」から構成されていると解釈される。

5.5 まとめ

今回、歩行者と障害物の両方の領域により回避行動が規定されるとする単純な回避行動モデルを提案した。すなわち、歩行者は自分自身の領域を確保し、かつ対向者（障害物）の領域を必要以上に侵さず相互の心理的影響を軽減するために、領域の先端はいわゆるセンサーのような機能を持っていて、歩行者と対向者の領域の先端が触れることによって回避行動が開始されると考える。さらに、回避行動中には領域のセンサー機能（衝突領域）は必要なくなり、これに変わって群集歩行でも確保される基本領域がすれ違い地点の側方距離を決めることになるというものである。

このモデルに基づく歩行者の領域の大きさは前方長さが4.4 m、後方長さが2.4 m、側方長さが2.3mである。障害物が物体の場合もヒトと同様に領域が存在するとし、今回使用した直方体（幅0.5m、高さ1.7m）の場合にはその前方長さは2.9mで、歩行者の領域の側方長さおよび後方長さとはほぼ同じであった。

結論

本論文は、安全で快適な歩行空間の実現に向けての基礎的研究として、画像処理技術を応用して歩行行動を定量的に分析する手法を確立すると共に、いくつかの実験調査と統計的な解析から単独歩行者の回避行動には特徴的な傾向があることを明らかにした。本論分での成果は以下の通りである。

- ① 撮影したビデオ画像を「画像処理」することで、歩行者の頭部の軌跡を自動的にまた一定の精度で計測する方法を構築した。この結果、従来得られなかった精度で歩行者の速度、加速度などの数値データを計測できる。このように従来ビデオ画像など視覚情報を定量的に処理する際に人間の主観に頼っていた部分を客観的・自動的に処理することは、その応用する分野も広く新たな解析手法となり得ると考える。
- ② 歩行者が障害物を避けるために回避行動を開始する地点を、画像処理技術を応用することで数理的に判定する方法を構築した。この結果、回避行動解析に当たっては人間の主観に頼っていた部分をすべて自動的に・客観的に処理することができる。また、回避行動の開始地点を判定する基準はカットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理後さらに移動平均した軌跡データについて曲率の判定方法が有効であることが明らかになった。
- ③ 歩行行動の解析では以下の内容が明らかになった。
 - ・歩行軌跡の進行方向および左右方向の変位のフーリエ振幅スペクトルを解析したところ、進行方向では2.0Hz前後、左右方向では1.0Hz前後の振動特性があることが分かった。
 - ・左右方向に着目すると、歩行者は1.0Hz前後の規則的な横ゆれを伴って歩行している。
 - ・90度L字歩行では、曲がり時に曲がる方向への加速度が、自由歩行時の横ゆれのものよりもはっきり大きくなることが検出されるが、回避行動では横ゆれのレベルを越える加速度を検出できない。
 - ・回避歩行における軌跡には障害物との衝突や接触を避けるため進路を変更する曲がりⅠと、すれ違い前後に進路を修正する曲がりⅡがあるが、曲がりⅡの方

の曲率が大きい。

- ・回避行動は曲がり I においては急激な進路変更はみられず進行方向の速度変化もほとんどみられない。

④ 静止した障害物に対する歩行者の回避行動を解析し障害物による回避行動の特性を明らかにした。

- ・歩行者は障害物の種類によって回避行動を開始する距離を決定する。
- ・障害物がヒトの場合、身体の向きが影響している。
- ・回避行動を開始する時点における歩行者と障害物との距離（前方回避距離）は身体の向きが後ろ向き、横向き後方回避、前向きの順に大きくなり、それぞれの平均値は6.74m、6.82m、8.84mである。
- ・人間と同じ高さ、幅を持つ物体の前方回避距離の平均値は7.34mである。
- ・障害物が同じであれば通路幅員などの歩行環境や調査時期が多少違って前方回避距離は変わらない。

⑤ 歩行者が回避行動を開始する時期は、対向する人が自由歩行程度の速度で移動していても、静止している場合と変わらない。

- ・障害物が前向きの場合、静止と移動（14m）の前方回避距離はそれぞれ9.72mと8.37mで有意差検定では危険率5%で有意差はみられるものの、総合的にみて前方回避距離は変わらないと判断した。
- ・障害物が後ろ向きの場合、静止と移動の前方回避距離はそれぞれ6.54mと7.72mで有意差検定では有意差はみられるものの、総合的にみて前方回避距離は変わらないと判断した。

⑥ 歩行者が回避行動を開始する時期は、対向する人との距離が平均7mから9mになった場合である。

- ・この距離は他人の接近にともなう心理的・生理的影響が強くなるためと推察される。
- ・身体の向きによっても回避する距離は影響を受けるがこの差は「前向き」と「後ろ向き」の平均値で最大2m程度である。

⑦ 本論で提案した回避歩行モデルで歩行者の領域の各値を求めた。前方長さは4.4m、後方長さは2.3m、側方長さは2.4mであった。

⑧ 回避行動開始時の障害物と歩行者の距離が「歩行者の領域」と「障害物の領域」の和で表現できるとする単独歩行者の回避歩行モデルは、回避行動をうまく説明することが確認された。

今回、障害物が横向きの静止した人間でその前方を回避する歩行については充分検討できなかつた。また、移動する障害物についても実験方法に問題が残った。これらについては計測機器の問題と共に、周辺に影響を与える者がいない歩行者を対象に観測データを多数収集する難しさが背景としてある。こうしたことからさらなる実験計画の工夫を計る必要がある。

今後の課題としては、建物や車道による歩行行動への影響を考察する必要がある。また、モデルをより洗練させるためには観測データを蓄積して本論が提案したモデルを検証する必要がある。このためには実際の歩行者同士のすれ違い行動を観測すると共に、調査対象者を婦人や老人などにも広げ、性別・年齢などの影響についても明らかにする必要がある。

最後に、単独歩行者の行動と歩行者を取りまく周辺環境の相互関係に関する研究が進展すれば集団における人間行動の予測が可能になったり、あるいは安全性や快適性を考慮した歩行空間のあり方が明確になる。したがって研究成果は既往研究のテーマであった歩行空間の機能性や効率性の検討と共に、より安全で快適な歩行空間の設計や避難計画などにも利用できると思われる。

謝 辞

筆者がまがりなりにも研究が遂行できましたのはひとえに、名古屋大学建築学科辻本 誠助教授の6年間に亘る暖かいご指導の賜であり、ここに心より深謝の意を表します。

名古屋大学建築学科柳澤 忠教授には快く論文審査委員会の主査をお引き受けいただき、同 坂本 順教授、同中原信生教授には論文を審査していただき示唆に富んだ貴重なご意見を数多く頂戴いたしました。ここに深く感謝の意を表します。

日本大学志田弘二助手、中部大学奥宮正哉助教授には長年に亘り研究を側面から支援していただき、名古屋大学河野 守講師、同 福和伸夫助教授にはスペクトル解析に関して有益なご意見をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

筆者が歩行研究にかかわって早18年になります。当初、恩師中島 一先生（愛知工業大学名誉教授、現在彦根市長）の歩行実験のお手伝いで学会論文を清書したことがこの研究を始めるきっかけとなりました。そのうち筆者が実験計画を立て、卒業生と共に毎年実験を重ねることになりました。この間、学生と一緒に撮影した8ミリ映像を壁面に写し、歩行軌跡をトレースしたこともついでこの間の出来事のように思い出されます。中島先生との一連の歩行研究は、昭和53年の修士論文「人体動作分析による空間規模に関する研究、通路構成による歩行特性について」で一区切りをつける形になりました。

その後、筆者は従来の研究手法に対して、実際の歩行者を対象として統計的処理が可能な調査方法を心掛けると共に、歩行者の領域の概念を導入して歩行行動を解釈することを始めた頃に、辻本助教授と出会うことができました。当時、辻本助教授は志田助手と共に建築計画で遅れている解析手法に画像処理技術を持ち込むことを検討されていました。この研究に参加させてもらうことによって研究者としての姿勢を教示され、本論文が生まれたといっても過言ではありません。

また、このような研究の機会を与えていただいた愛知工業大学建築学科の諸先生方に謹んで感謝申し上げますと共に、多大なご協力、ご支援をいただいた中島先生を始め、林 金之助教授、松本壮一郎助教授、さらに卒業生各氏に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

最後に、筆者のわがまを許し研究生活を支えてくれた家族に対し心より感謝
致します。

1993年10月

建部 謙治

参考文献

序 論

- 1) 中島 一：人体動作分析による空間規模に関する研究、人間工学、Vol. 7、No. 2、pp. 89-96、1971. 4
- 2) 中村和男：歩行行動に対する物的環境の影響、(社)日本自動車工業会(編)、歩行行動に関する研究報告書、pp. 46-70、1977
- 3) 加藤邦夫、上原孝雄、中村和男、吉岡松太郎：群集対向流動の解析、日本建築学会論文報告集、No. 289、pp. 119-129、1980. 3
- 4) 平井一正、西田素之：歩行者の行動モデルとシミュレーション、人間工学、Vol. 13、No. 5、pp. 185-188、1977
- 5) 岡崎甚幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究、その1、磁気モデルの応用による歩行モデル、日本建築学会論文報告集、No. 283、pp. 111-117、1979. 9
- 6) R. Sommer、穉山貞登訳：人間の空間、デザインの行動的研究、鹿島出版、1972
- 7) E. T. Hall, The Hidden Dimension, Anchor Books, pp. 10-22, 1969
- 8) 渋谷昌三著：人と人との快適距離、パーソナル・スペースとは何か、日本放送出版協会、pp. 11、1990. 10
- 9) 吉岡松太郎、中村和男ほか：歩行者の相互干渉特性の分析、製品科学研究所研究報告、No. 96、pp. 39-47、1983
- 10) 小塚滋久、中祐一郎ほか：交錯する歩行者の衝突回避行動に関する観測と解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 563-564、1988. 10
- 11) Fruin著、長島正充訳：歩行者の空間、鹿島出版、1974. 12
- 12) 中村和男、小林実：交通環境における歩行行動、国際交通安全学会誌、Vol. 10、No. 5、pp. 6-19、1984. 12
- 13) 歩行行動研究会：歩行行動に関する研究報告書、(社)日本自動車工業会、pp. 6-19、1975
- 14) 中祐一郎：鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究、建築の分野における歩行研究、鉄道技術研究報告、No. 1079、pp. 5-6、115-117、1978. 3
- 15) 人間-環境系の計画理論のとらえ方(続)、日本建築学会建築計画委員会、設計方法小委員会、1992. 8
- 16) 木村幸一郎：建築物内における群集流動状態の観察、日本建築学会論文報告集、No. 5、1937
- 17) 伊藤 滋：省線電車駅における旅客施設の設計について、学位論文、1947
- 18) 小関・渡部：群集旅客流の交差、日本建築学会論文報告集号外、pp. 762、1967. 10

- 19) 中祐一郎：鉄道駅における交錯流をとりあつかう旅客流動シミュレーション、その1. シミュレーションモデル、鉄道技術研究報告、1975
- 20) 紙野桂人、舟橋他：ターミナル圏域の歩行施設計画に関する研究(1)~(8)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.905、1968
- 21) 池原義郎他：人間-空間系の研究I、II、空間における人間の分布パターンの解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、1973
- 22) 戸川喜久二：群集流の観測に基づく避難施設の研究、建築研究報告、1955
- 23) 堀内三郎他：梅田地下街における避難計画、日本建築学会大会学術講演梗概集、1970
- 24) 室崎益輝：大地震火災時の群集避難計画に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、1973
- 25) 岡田光正他：防災計画に関する基礎的研究、その3. 避難シミュレーションよりみた百貨店の危険性について、日本建築学会近畿支部研究報告集、1973
- 26) 吉田克之：空間の動的特性の研究、デパートにおける入店客の各階分布モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、1974
- 27) 青木志郎：住宅における行為と空間規模に関する研究、歩行について、日本建築学会支部研究報告集、No.54、1956
- 28) 清家清他：住空間に於ける動作の実験、すれちがいについて、日本建築学会論文報告集、No.57、pp.69-72、1957
- 29) 山田水城、後藤剛史：歩きやすさについて、足部軌跡および加速度による解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.361-362、1971
- 30) 建物内における人間の行動について、各種条件のちがいにみる走行性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、1971
- 31) 小島信男他：振動床上の人間の挙動について、その1. 人体各部に受ける加速度、日本建築学会大会学術講演梗概集、1971
- 32) 高木幹朗：建築内における経路選択傾向について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1974
- 33) 戸川喜久二：群衆の行動、大山正・乾正雄(編) 建築のための心理学、彰国社、pp.171-181、1969
- 34) 戸沼幸市、根岸賢之：歩行空間における人間行動(その1)、“人”“物”“場”の三項関係から観察した人間行動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.2127-2128、1983
- 35) 小西啓史：歩行時における行動特性に関する研究、歩行行動の非対称性についての検討、Japanese Journal of Applied Psychology、No.8、pp.25-33、1983
- 36) 金澤成保：電柱による歩行阻害の実態、ビデオを用いた軌跡解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.297-298、1985.10

- 37) 月尾嘉男、赤塚芳郎ほか：障害物の歩行者に対する影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.743-744、1985.9
- 38) 染川 浩：歩行者空間における障害物の及ぼす視覚的な影響についての研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.119-120、1988.10
- 39) 中村和男、吉岡松太郎ほか：歩行者流動モデルとそのシミュレーション、人間工学、Vol.10、No.3、pp.93-102、1974.6
- 40) 伊藤英信、柳田武ほか：ポテンシャル等高線図による歩行モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、計画系E、pp.767-768、1992.8
- 41) 岡田光正、吉田勝行、柏原士郎、辻 正矩著：建築と都市の人間工学、鹿島出版会、1977

第一章

- 1) 中祐一郎：交差流動流動の構造、鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究(1)、日本建築学会論文報告集、No.258、pp.93-102、1977
- 2) 加藤邦夫、上原孝雄、中村和男、吉岡松太郎：群集対向流動の解析、日本建築学会論文報告集、No.289、pp.119-129、1980.3
- 3) 吉岡松太郎、中村和男ほか：歩行者の相互干渉特性の分析、製品科学研究所研究報告、No.96、pp.39-47、1983
- 4) 建部謙治、中島一：静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動、歩行者の回避行動に関する研究（I）、日本建築学会計画系論文報告集、No.418、pp.51-57、1990.12
- 5) 久保田広：応用光学、岩波全書
- 6) 小原二郎ほか：建築室内人間工学、鹿島出版会
- 7) 日本建築学会編：建築設計資料集成3・単位空間I、丸善
- 8) 矢野健太郎ほか：線形代数、裳華房
- 9) 三谷政昭：デジタルフィルターデザイン、昭晃堂
- 10) 建部謙治、辻本誠、志田弘二：歩行のスペクトル解析、日本インテリア学会研究発表梗概集、No.3、pp.76-77、1991.11
- 11) 阿久津邦男著：歩行の科学、不味堂出版、pp.26-41、1975.5
- 12) 志田弘二、辻本誠、田中春彦ほか：画像処理を利用した建築空間内の人間行動の研究、T字型廊下での歩行実験、日本建築学会東海支部研究報告、pp.337-340、1989.2
- 13) 志田弘二、辻本誠ほか：画像処理を利用した建築空間内の歩行解析とシミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集E、pp.823-824、1989.10
- 14) 建部謙治、辻本誠、志田弘二、中島一：画像処理を利用した回避行動開始点の判定方法、日本建築学会東海支部研究報告、pp.465-468、1991.2

- 15) 建部謙治、辻本誠、志田弘二、中島一：画像処理を利用した歩行者の回避行動に関する研究、回避行動開始点の判定方法、日本建築学会大会学術講演梗概集E、pp.691-692、1991.9

第二章

- 1) 建部謙治、中島一：静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動、歩行者の回避行動に関する研究（I）、日本建築学会計画系論文報告集、No.418、pp.51-57、1990.12
- 2) 辻本誠、志田弘二、建部謙治：歩行解析への画像処理技術の応用に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.436、pp.41-47、1992.6
- 3) 建部謙治、辻本誠、志田弘二：歩行のスペクトル解析、日本インテリア学会研究発表梗概集No.3、pp.76-77、1991.11
- 4) 建部謙治、辻本誠、志田弘二ほか：画像処理を利用した回避行動開始点の判定方法、東海支部研究報告、pp.465-468、1991.2
- 5) 建部謙治、辻本誠、志田弘二、中島一：画像処理を利用した歩行者の回避行動に関する研究、回避行動開始点の判定方法、日本建築学会大会学術講演梗概集E、pp.691-692、1991.9
- 6) 阿久津邦男著：歩行の科学、不昧堂出版、1975.5

第三章

- 1) 阿久津邦男著：歩行の科学、不昧堂出版、pp.56-68、1975.5
- 2) 日本建築学会編：建築設計資料集成3・単位空間1、丸善、pp.29-31、1980.7

第四章

- 1) 中村和男、小林実：交通環境における歩行行動、国際交通安全学会誌、Vol.10、No.5、pp.6-19、1984.12
- 2) 八重澤敏男、吉田富士男：他者接近に対する生理・認知反応、心理学研究、Vol.52、No.3、pp.166-172、1981
- 3) McBride, G., King, M. G. and James, J. W., "Social Proximity Effects on GSR in Adult Humans," J. of Psychol., LXI. 153-57, 1965
- 4) 染川 浩：歩行者空間における障害物の及ぼす視覚的な影響についての研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.119-120、1988.10
- 5) E. T. Hall, The Hidden Dimension, Anchor Books, pp.10-22, 1969

第五章

- 1) 吉岡松太郎、中村和男ほか：歩行者の相互干渉特性の分析、製品科学研究所研究報告、No.96、pp.39-47、1983

- 2) R. Sommer、穂山貞登訳：人間の空間、デザインの行動的研究、鹿島出版、1972
- 3) 中村和男：歩行行動に対する物的環境の影響、(社)日本自動車工業会(編)、歩行行動に関する研究報告書、pp.46-70、1977
- 4) 建部謙治、中島一：静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動、歩行者の回避行動に関する研究(I)、日本建築学会計画系論文報告集、No.418、pp.51-57、1990.12
- 5) E. T. Hall、日高敏隆他訳：かくれた次元、みすず書房、1984
- 6) 加藤邦夫・上原孝雄他：群集対向流動の解析、日建築学会論文報告集、No.289、pp.119-129、1980.3
- 7) 渋谷昌三：パーソナル・スペースの形態に関する一考察、山梨医科大学紀要、No.2、pp.42-49、1985
- 8) Fruin著、長島正充訳：歩行者の空間、鹿島出版、1974

資料

〈各値の単純平均一覧表〉

(単位: cm)

実験シリーズ		標本集合	回避歩行	実験シリーズ		標本集合	回避歩行	実験シリーズ		標本集合	回避歩行
モノ	n	60	23	モノ	n	71	48	モノ	n	51	34
	Ey	-5 : 92	1 : 41		Ey	-6 : 60	-19 : 51		Ey	6 : 51	32 : 38
	Ky	101 : 26	93 : 20		Ky	96 : 46	106 : 50		Ky	67 : 22	65 : 22
	Sx	- : -	734 : 341		Sx	- : -	721 : 262		Sx	- : -	710 : 313
	Sy	- : -	27 : 54		Sy	- : -	-31 : 66		Sy	- : -	9 : 38
ヒト	n	66	35	前向	n	72	43	後向	n	51	38
前向	Ey	15 : 78	-5 : 54	静止	Ey	-51 : 86	-26 : 52	静止	Ey	0 : 52	24 : 30
	Ky	109 : 28	110 : 28		Ky	123 : 52	126 : 48		Ky	85 : 20	85 : 18
	Sx	- : -	884 : 308		Sx	- : -	962 : 281		Sx	- : -	654 : 293
	Sy	- : -	0 : 72		Sy	- : -	-44 : 59		Sy	- : -	-1 : 36
ヒト	n	70	39	4.5m	n	51	35	後向	n	43	27
後向	Ey	8 : 73	-2 : 38	移動	Ey	-9 : 56	-14 : 50	移動	Ey	-8 : 58	20 : 37
	Ky	101 : 23	100 : 21		Ky	99 : 43	112 : 42		Ky	- : -	- : -
	Sx	- : -	674 : 276		Sx	- : -	917 : 278		Sx	- : -	772 : 230
	Sy	- : -	20 : 55		Sy	- : -	-30 : 55		Sy	- : -	4 : 35
ヒト	n	64	20	9m	n	56	33	自由	n	37	
横向	Ey	4 : 81	-7 : 42	移動	Ey	-6 : 56	-6 : 42	歩行	Ey	-14 : 47	
後方	Ky	96 : 34	76 : 15		Ky	85 : 35	89 : 35				
回避	Sx	- : -	682 : 318		Sx	- : -	822 : 359				
	Sy	- : -	25 : 52		Sy	- : -	-11 : 50				
ヒト	n		8	14m	n	48	28				
横向	Ey		-45 : 25	移動	Ey	-19 : 63	-13 : 40				
前方	Ky		131 : 30		Ky	87 : 38	84 : 31				
回避	Sx		917 : 337		Sx	- : -	837 : 219				
	Sy		-63 : 23		Sy	- : -	-19 : 49				
自由	n	42									
歩行	Ey	-14 : 95									

注)
 ・左は平均値、右(網掛け部分)は標準偏差を示す
 ・Kyは|Ky|としている