

鉄道駅構内における混雑状況と旅客流動の関係に関する研究 *

A Study on Relation between Congestion and Passenger Flow in Railway Station *

中村 泰広**, 日比野 直彦***, 森地 茂****
By Yasuhiro NAKAMURA**, Naohiko HIBINO*** and Shigeru MORICHI****

1. はじめに

(1) 背景

わが国の都市鉄道は、大都市の発展と集積に伴い、輸送力増強や混雑緩和を目的に、新線建設、ネットワークの拡大、複々線化等の整備が進められてきた。その結果として輸送サービスは向上したが、想定以上の旅客の増加により駅の混雑が表面化しており、施設の老朽化と併せて駅の改良、更新が喫緊の課題となっている。しかしながら、立地に制約が多く地価の高い都市部での事業実施には莫大な費用がかかることが想定されるため、効率的な投資を行うために、どの駅でどのような改善を実施することがより効果的であるかを適切に評価し、優先順位を決定することが求められている。

国土交通省鉄道局においても、2007～2008年度にかけて都市部のターミナル駅における混雑解消を実現するための施策の検討を行っている¹⁾。この検討では、駅の混雑状況をホーム部、昇降部、コンコース部に分けて、できるだけ簡易な調査による各所の混雑指標およびこれらを統合した駅施設全体の混雑指標の確立を試みている。しかしながら、コンコースでは旅客流動や歩行挙動といった調査自体が困難な要因が、混雑の感じ方に影響を与えており的確な評価指標が確立できていない。

一方で、近年様々な分野の技術の進歩により、これまで取得が困難と思われていた多様なデータが取得可能となってきた。ビデオカメラ画像の解析技術向上により、近年設置箇所が増えている監視カメラ映像の旅客流動、挙動分析への活用や自動改札やICカードの普及による大量の交通データ取得等がその一例である。こうした技術の発展と、それに伴う調査手法の変化は、従来の人的な

調査では困難と思われた旅客流動や歩行挙動に関するデータ取得と分析を容易にする可能性を秘めている。

(2) 研究の目的

鉄道の混雑には、「車両内の混雑」、「線路上の列車の混雑」、「踏切における混雑」、「駅施設の混雑」の4つがある¹⁾。このうち「車両」、「線路」、「踏切」の混雑については、それぞれ「混雑率」、「運行本数」、「遮断時間」といった混雑指標が用いられているが、「駅施設」に関しては明確な指標が確立されていない。特に、鉄道駅コンコースではその空間の広さや幅員等の物理的な要素と併せて、人の流れといった流動的な要素が混雑の感じ方や快適性に影響を与えており評価が難しい。そこで、本研究では駅施設における混雑指標の精度向上のために、コンコースでの混雑状況と旅客流動の関係を明らかにし、その関係性を簡易に調査、分析ができる手法とその適用の可能性を検証することを目的とする。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

駅の混雑指標確立のために国土交通省鉄道局¹⁾では、ターミナル駅の混雑状況をホーム部、昇降部、コンコース部に分けて、6つの評価基準による指標化とその統合に関する研究を行っているが、コンコースについては簡易な調査手法という前提もあり完全な指標化に至っていない。駅構内の混雑や利便性については、このほかに財団法人運輸政策研究機構^{2),3)}による指標化提案がされている。また、身体的負荷に着目した乗換抵抗という観点では、日本鉄道建設公団⁴⁾や内山ら⁵⁾、大島ら⁶⁾の研究が挙げられるが、これらは旅客流動等の混雑状況に影響を受けにくい指標となっている。歩行者流動に関する研究としては、中⁷⁾による駅構内の交差流動に関する一般的構造の解明を始めとして、様々な観点からの研究⁸⁾が行われているが、多くは観測や調査が特定の場所に限定されており、一般的な評価手法の確立までには至っていない。

既往研究から、駅構内の評価については混雑状況を的確に反映した指標化には至っていないことが分かる。ま

* キーワード: 意識調査分析, 交通行動分析, 空間設計, ターミナル計画

** 非会員, 修士(開発政策), 鹿島建設株式会社 土木設計本部
(東京都港区赤坂六丁目五番三十号,
TEL: 03-6229-6732, E-mail: nakay@kajima.com)

*** 正会員, 博士(工学), 政策研究大学院大学

**** 名誉会員, 工学博士, 政策研究大学院大学

た、歩行者流動に関する研究では、群集の詳細な観察による分析や定量化が試みられているが、微視的な分析が故に汎用的に適用するのが難しくなっている。

国土交通省鉄道局で行っている検討¹⁾では、対象駅ごとに調査票の回収枚数が約500枚と大量のデータを取得しており、多様な切り口での分析の余地が残されている。本研究ではこのデータを利用し、旅客密度に応じた混雑の感じ方について複数の駅で時間帯ごとに分析を行っており、これほど多くのデータを用いて駅を評価・分析している研究は例がない。また、加速度センサを用いて歩行の分析、評価する手法は医学分野において散見されるが⁹⁾、健常者と傷病者の身体的な差異を検証するための挙動分析が主であり、本研究のように歩行環境が挙動に与える影響を分析する手法は見られない。そこで、本研究は、加速度データによる歩行挙動判別と旅客流動の分析により、駅の混雑指標の精度向上を行うものと位置付ける。

3. 鉄道駅構内における旅客流動の現状

(1) 駅構内の旅客の行動と混雑の種類

鉄道駅構内は、ホーム、昇降部、コンコース、改札の4つの空間に分類される。ホーム、昇降部、改札は面積や幅員といった制約による交通容量不足が混雑の要因となっており、比較的定量化しやすい空間であるといえる。一方で、コンコースは旅客流動の種類やそれに伴う交錯等が混雑に与える影響が大きく計測や定量化が難しい。福田ら¹⁰⁾は、前者を「物理的な移動抵抗」、後者を「流動的な移動抵抗」と表現しており、特に、「流動的な移動抵抗」の改善不足を指摘している。

(2) 鉄道駅コンコースの形態と旅客流動の種類

高柳ら¹¹⁾は、群集流動を流動の数、交差の有無により大きく5つに分類している。この群集流動の種類を基にいくつかの駅にてその発生の様子を観察した結果を表-1に示す。

コンコースでの旅客流動はその平面形状、昇降施設の数、それに伴う流動数等に影響を受ける。流動の数および交差・交錯が増えるに従い、旅客密度が低い段階で歩行が困難になることが観察結果から見て取れる。

(3) 旅客流動内における歩行挙動と混雑感

コンコースでの観察結果および実歩行から、コンコースでの混雑の感じ方(以下、混雑感と称す)は発生する群集流動とその特徴、交差や交錯による歩行速度低下や急停止、接触等による不快感に大きく影響されると推測される。従って、コンコースでの混雑を評価するためには旅客密度に加えて、旅客流動の種類とそこでの歩行

挙動を評価対象として考慮する必要があり、これらの歩行挙動を的確に捉えて指標化することが求められる。

表-1 群集流動の種類と特徴

群集流動の種類	旅客密度との関係	代表的なコンコース
一方向流 ↑	<ul style="list-style-type: none"> ・低密度では自由歩行可能 ・高密度になると群集の影響を受け全体的に歩行速度が低下 	高田馬場 (JR・西武線連絡通路)
対向流 ↑↓ 層流 ⇕	<ul style="list-style-type: none"> ・低密度では明瞭な群集形態が現れずに比較的歩行が可能だが、対向者を回避する際等に減速が発生 ・高密度になると明瞭な群集形態が現れ全体的に歩行速度が低下 ・異なる流れが接する箇所では、対向流の影響を受けやすく、交差や接触による減速が発生 ・一方向流より低密度で歩行困難 	新宿駅 (中央地下通路) 茅場町 (日比谷線中目黒方面)
交差流 ↗↘ 交錯流 ✳	<ul style="list-style-type: none"> ・低密度では明確な群集形態が現れずに自由歩行が可能だが、交差、交錯現象により歩行速度は不安定 ・密度が高まるにつれて急停止、急回避、接触等が発生し、対向流・層流よりも低い密度で歩行困難 	高田馬場 (JR早稲田口) 自由が丘

4. 鉄道駅コンコースにおける混雑感と旅客密度の関係

(1) 分析の目的

異なるコンコースにおける混雑感の違いを明らかにするために、旅客の意識調査と交通量、施設面積のデータを用いた分析を行う。交通量、施設面積のデータからコンコースの旅客密度(15分間集計値)を算出し、同時間帯の混雑感との関係について確認している。

(2) 分析データの概要

国土交通省鉄道局の検討¹⁾にて取得している各種調査の内、東京近郊のターミナル駅での旅客交通量、旅客意識調査のデータを用いる。この調査では、朝の通勤ラッシュ時(3時間)における15分単位のコンコース交通量や利用経路、時間帯・場所別の旅客の混雑感(非常に混雑/やや混雑/混雑していない)を抽出することができる。

表-2に調査対象の全8駅12コンコース(本研究にて利用したもの)を示す。「武蔵小杉」、「茅場町」、「高田馬場」では複数のコンコースを調査対象としており、それぞれを①~③の番号で示す。

表-2 調査対象コンコース

駅	調査対象コンコース
表参道	銀座線 半蔵門線 千代田線乗換
日本橋	銀座線 東西線乗換
自由が丘	東横線 大井町線乗換
松戸	JR 新京成乗換
武蔵小杉	①JR ②東急
茅場町	①日比谷線（北千住方面） ②日比谷線（中目黒方面）
高田馬場	①西武新宿線内 ②JR早稲田口 ③JR・西武線連絡通路
南浦和	武蔵野線 京浜東北線乗換

(3) 分析結果（混雑感と旅客密度）

旅客密度（人/m²・15分）と混雑感の関係を明らかにするため散布図を作成し回帰分析による近似曲線を求める。図-1に分析対象の全12コンコースの内、決定係数が0.5以上となった10コンコースの近似曲線を示す。分析対象コンコースの内、8割以上で旅客密度と混雑感に有意な関係があることが明らかになった。一方で、近似曲線の傾き、切片が各コンコースで異なることから、旅客密度と混雑感の関係が各々異なり、これが各コンコースの特徴を表していると考えられる。

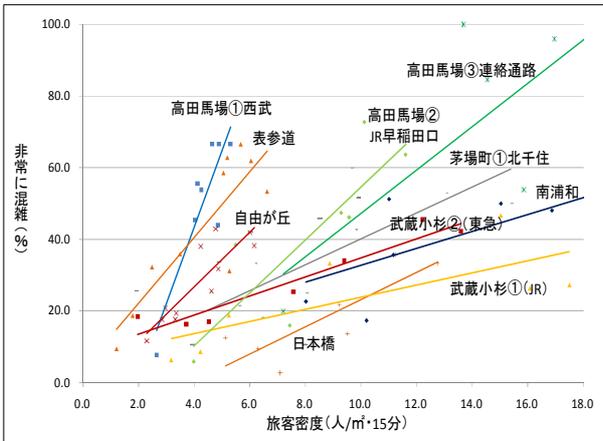


図-1 駅の旅客密度と混雑感（近似曲線）

(4) 旅客密度と混雑感の関係に関するまとめ

本調査では、15分間隔の交通量調査や約500サンプルの意識調査用いて混雑感と交通量（密度）に関する分析を行っている。その結果、コンコースの混雑感はその旅客密度により説明可能であるが、その関係性が各コンコースで異なることが判明している。旅客密度の変化に対して混雑感が敏感に反応するコンコースとして「高田馬場①」、「表参道」、「自由が丘」が、あまり敏感ではないものとして「武蔵小杉①」、「武蔵小杉②」、「南浦和」等が挙げられる。これらの差異を解明することが、各コンコースを横並びに比較評価する上で必要となるが、コンコース

の基本的な特徴を示す面積、利用者数、流入箇所数等からはその影響は見いだせない。そこで、旅客密度では説明困難な各コンコースの特徴を明らかにするために加速度に着目した歩行挙動分析を実施する。

5. 歩行挙動分析（加速度センサの適用可能性）

(1) 分析の目的

人の歩行挙動の調査、分析にはビデオデータ等の画像分析が多く見られる。しかしながら、これらの手法は一人一人の動きを画像から読み取る際の労力が大きいこと、自動判別等では検出誤差が大きいことが課題となっている。また、近年、個人情報保護の観点から公共空間でのビデオ撮影の可否についても条件が厳しくなっている。

そこで本研究では、新たな歩行挙動の取得手法として加速度センサを用いた調査を実施している。調査により取得した加速度波形の分析により、歩行区間内の旅客の速度変化や回避行動といった歩行挙動の抽出を行い、さらにはその挙動の要因となる旅客流動の種類を特定することが可能かを確認する。歩行挙動を外からの目視による調査ではなく、身体に固定したセンサから得られる数値データを分析することで、コンコース等の歩行空間をどの程度客観的に評価可能か明らかにする。

(2) 使用機器と調査手順

a) 使用機器

調査には、ワイヤレステクノロジー社製の加速度センサ「WAA-006」を用いる。この機器は3軸加速度センサと3軸ジャイロセンサを内蔵しており、加速度と角速度の計測が可能である。

b) 調査手順

加速度センサを調査員の腰部背中側に固定し、加速度データを取得する。歩行時の身体挙動が加速度へ与える影響度合いや個人差を確認するために、表-3の手順で調査を行っている。

表-3 調査手順

調査	概要
基礎歩行調査 その1	調査員個人および異なる調査員間の歩行時の身体挙動の差異を確認（調査員6名）。
基礎歩行調査 その2	駅構内での旅客流動を想定した身体挙動の加速度変化を確認（調査員2名）。
駅構内歩行調査 その1	基礎歩行調査その2の結果について、実際の駅構内の歩行挙動の中で確認（調査員2名）
駅構内歩行調査 その2	複数の駅にて加速度データを取得・分析し、それぞれの駅の特徴を確認（調査員名）

(3) 基礎歩行調査その1 (個人差の確認)

a) 調査方法と歩行の種類

歩行環境が一定の状況である学内にて基礎歩行調査を実施している。歩行の種類は4種類、調査員は学生6名であり、その概要を表-4、5に示す。

表-4 基礎歩行調査の種類

歩行の種類	概要
a) 自由歩行	調査員個人の通常の歩行 (速度は任意)
b) 速度制限	自由歩行の半分程度の速度で歩行
c) 歩行・停止	自由歩行を行い、3m毎に停止
d) 蛇行	幅1.5mの中で蛇行

表-5 調査員の特徴

調査員	性別	身長(cm)	靴
A	男性	166	運動靴
B	男性	175	運動靴
C	女性	166	ハイヒール
D	男性	175	革靴
E	女性	158	ブーツ
F	男性	172	運動靴

b) 調査結果 (個人差について)

取得した加速度波形の一部を表-6に示す。加速度の波形には個人差が認められるが、各種歩行における自由歩行からの変化については同様の傾向が見られる。以下に全調査員共通で見られる波形の特徴を示す。

- ・速度制限、停止時には自由歩行よりも波形の振幅が減少する。特に、上下成分、前後成分にて明確に判別可能である。
- ・蛇行の挙動は、回転成分の波形に明確に現れる。
- ・左右成分の波形には細かな重心の乱れが多く見られ、歩行挙動を判別するのが困難である。
- ・前後成分と回転成分の2つの波形が、歩行挙動の判別に有効である。

表-6 前後成分と回転成分の波形

調査員	前後成分		回転成分	
	自由歩行	速度制限	自由歩行	蛇行
A				
B				
C				

(4) 基礎歩行調査その2 (歩行挙動の判別)

a) 調査方法と歩行の種類

駅構内での旅客流動と歩行挙動を想定し、表-7に示す歩行調査を行った。実施場所はその1と同様で、調査員はその1の調査員A、Bの2名である。

表-7 基礎歩行調査の種類

歩行の種類	概要
a) 自由歩行	調査員個人の通常の歩行 (速度も任意)
b) 速度制限	自由歩行よりも半分程度の速度で歩行
c) 急停止	自由歩行から急停止し、再度通常歩行
d) 回避1(迂回)	対向者を余裕持って避けるように迂回
e) 回避2 (外向半身)	自由歩行から対向者を避けるように側方へ外向きに半身回避(dより対向者接近)
f) 回避3 (平行移動)	自由歩行から対向者を避けるように側方へ平行移動(eより対向者接近)
g) 回避4 (内向半身)	自由歩行から対向者を避けるように側方へ内向きに半身回避(fより対向者接近)
h) 接触	自由歩行から対向者と肩が接触

b) 調査結果 (歩行挙動と加速度波形)

外向半身、平行移動、内向半身といった回避行動の分類や接触の判別は困難であったが、速度制限と急停止、大きな分類としての回避行動の波形の特徴は2人の調査員とも共通であり、その違いを判別可能である。表-8に調査員Aの前後成分と回転成分の2つの波形を示す。歩行の特徴を示す波形を明確にするために1/100秒で計測した加速度データについて1/10秒単位で移動平均を行っている。

表-8 歩行別の加速度波形の特徴

歩行	成分	変化	波形
自由歩行	前後	規則的	
	回転	規則的	
速度制限	前後	振幅: 減 周期: 大	
	回転	振幅: 減 波形乱れ	
急停止	前後	マイナスにピーク	
	回転	波形乱れ	
回避2 外向半身	前後	振幅: 速度に依存	
	回転	振幅: 大 外向→内向	

(5) 駅構内歩行調査その1 (駅構内での歩行挙動判別)

a) 調査方法と歩行の種類

基礎歩行調査の結果を踏まえ、歩行環境が変化する駅の構内において、様々な旅客流動の中での歩行挙動の加速度変化を確認する。データ取得と同時にビデオ撮影を行い、波形から読み取れる情報を映像にて確認している。データ取得時の旅客流動を表-9に示す。

表-9 駅構内歩行調査の歩行種類

歩行の種類	概要
a) 自由歩行	混雑の無い状況での歩行
b) 追従歩行	混雑時に追従歩行 (混雑度合いに応じて複数回)
c) 逆流	対向流に対して逆流歩行 (同上)
d) 横断流	流れを横切るように歩行 (同上)
e) 追従+交差	交差が発生した追従歩行

b) 調査結果 (駅構内での歩行挙動と加速度波形)

駅構内歩行調査の波形についても基礎歩行調査と同様の傾向が見られた。図-2に示す追従歩行時には速度変化が前後成分の振幅の変化として表れ、図-3に示す交錯状態では、a~fの回避行動が回転成分の乱れとして表れている。

いずれも自由歩行からの相対的な評価であり、交錯時の細かい回避行動の組み合わせについてはその挙動を詳細に判別することは困難であるが、一歩行区間内での程度自由歩行が阻害されたのかを、波形の乱れの「発生回数」や「継続時間」といった指標によって行うことが可能である。

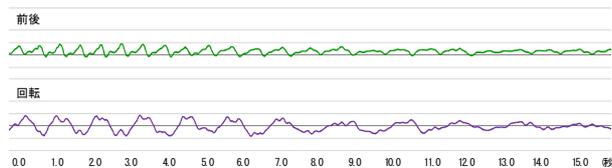


図-2 追従歩行減速時の加速度波形

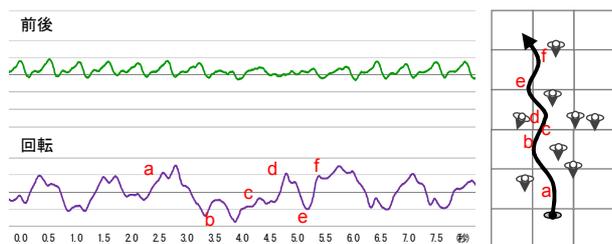


図-3 対向流回避時の加速度波形

(6) 駅構内歩行調査その2 (コンコースの特徴分析)

a) 調査方法

表-10に示す3駅6コンコースの代表的な経路を朝ピーク時間(8:00~9:00)に複数回歩行し、歩行挙動の加速度データを取得する。得られた加速度波形から自由歩行と比較して波形が乱れた回数をカウントし、歩行時間や混雑感との関係を確認する。

表-10 調査歩行経路

コンコース	歩行経路	調査日
表参道	千代田線 ⇄ 半蔵門・銀座線 (押上・浅草方面)	2010/3/3
茅場町①	東西線 ⇄ 日比谷線 (北千住方面)	2010/3/5
茅場町②	東西線 ⇄ 日比谷線 (中目黒方面)	
高田馬場①	西武新宿方面 ⇄ JR・西武連絡口	2010/3/2
高田馬場②	山手線 ⇄ 早稲田口改札	
高田馬場③	JR・西武連絡口 → 山手線	

b) 調査結果 (コンコースの特徴分析)

混雑していない状況を基準として歩行時間増加率を算出し、減速、回避発生回数(回/秒)との関係を図-4, 5に散布図として示す。減速、回避ともその発生回数は、歩行時間増加率の上昇に伴い増加する傾向にあるが、ある一定のレベルを超えると増加が止まるもしくは減少に転じることが明らかとなっている。この変化の表れ方は各コンコースで異なり、「茅場町①」は「表参道」と比較して歩行時間増加率に対する減速発生が少なくその変化量も小さい。すなわち、旅客密度が高くなるにつれて整流されやすいといえる。また、歩行時間増加率が低いときの回避発生が多いことから旅客密度が低い時に交錯が多い(密度が低い時には空間に余裕があり回避時に減速しないため)。茅場町①は旅客密度の変化量に対する混雑感の変化量が少ないが(図-1参照)、こうした空間の特徴が反映されているものと考えられる。

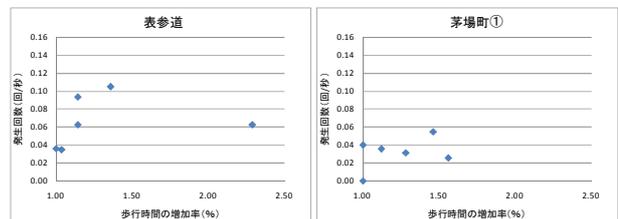


図-4 歩行時間増加率と減速発生回数

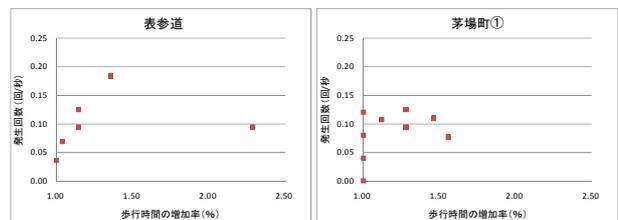


図-5 歩行時間増加率と回避発生回数

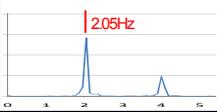
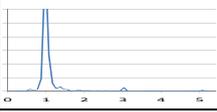
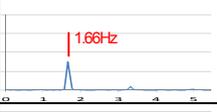
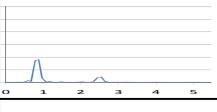
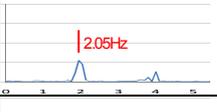
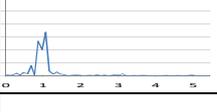
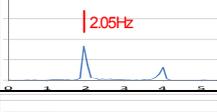
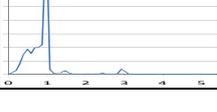
(7) 周波数分析

周期的な波形のデータは、フーリエ変換を行うことで、どのような周波数の波が含まれているかを明らかにすることができる。そこで、加速度波形のフーリエ変換により周波数成分を分析し、以下のことを明らかにする。

- I) 自由歩行時の周波数成分とその強さ
- II) 速度変化が周波数成分に与える影響
- III) 停止、回避等の特徴的な歩行挙動の周波数成分

基本歩行調査により取得した加速度波形をフーリエ変換して求めたパワースペクトル（以下、PS）と、ここから読み取れる事項を表-11に示す。

表-11 歩行別のパワースペクトルの特徴

歩行	成分	特徴	波形
自由歩行	前後	2.05HzにPSピーク →1秒間に2.05歩	
	回転	前後成分の半分の周期 (左右1歩ずつで1周期)	
速度制限	前後	PSピークが低周波側に移動し、強さも減少	
	回転	自由歩行と同じ傾向	
急停止	前後	PSピークの周波数は自由歩行と同じだが、強さが減少	
	回転	PSピークより低い周波数の波が増加 PSピークの強さ減少	
回避2 外向半身	前後	PSピークの周波数は自由歩行と同じだが、強さが減少	
	回転	PSピークより低い周波数の波が増加 PSピークの変化小	

駅構内歩行の加速度データについても、周波数分析を行ったが基礎歩行調査による周波と同様の傾向を示している。つまり、自由歩行時と比較して、一方向流で混雑発生による歩行速度低下時には前後成分のPSのピークが低周波側に移動すると共に強さが減少する。また、対向流等で回避行動をとると、回転成分が乱れることから回転成分のPSピークよりも低い周波数の波が顕著に多くなる。

PSピークの周波数、強さ、PSピークよりも低周波側の波の強さの変化から一歩行区間における歩行速度の変化、停止、回避の発生量を分析し、コンコースの特徴を数値的に捉えることが可能であると考えられる。

6. おわりに

近年、東京都市圏では、鉄道ネットワークの拡大および過密な運行に起因した鉄道駅の混雑の問題が顕在化しており、その早急な対応が求められている。しかしながら、鉄道駅、特にコンコースでの混雑状況を適切に評価するための基準が決まっておらず、改善が進んでいないのが現状である。本研究では、鉄道駅コンコースの混雑に関する評価指標を確立するために、混雑感と旅客流動、歩行挙動の関係性に着目し調査分析を実施している。

交通量調査と意識調査の分析の結果より、各コンコースの混雑感が旅客密度によって説明可能であることを明らかにしている。一方で、混雑感と旅客密度の関係が各コンコースによって異なり、この相違がコンコースの特徴を現すことを示唆している。そこで、コンコース歩行時の旅客流動や歩行挙動を加速度センサにより取得した加速度波形の分析によって判別可能か調査を実施している。その結果、加速度の波形、周波数分析から混雑状況での歩行挙動の変化を自由歩行からの差異として判別できることを明らかにしている。

しかしながら、本研究では歩行挙動の変化の判別に留まり、定量化、定式化までに至っていない。周波数分析から得られた数値（周波数、PSの強さ）については、データの蓄積、分析を進めることで定量的な評価につながると考える。また、本研究で検討した各調査手法の結果が4章で示した旅客密度と混雑感の関係にどのように影響するのかについても、今後調査データを増やして検証することが必須の課題である。

- 1) 鉄道局：ターミナル駅における混雑解消を実現するための施策の検討、2008.3、2009.3
- 2) 運輸政策研究機構：駅等施設改良事業の具体的事案、改良の可否に関する調査、2001.
- 3) 運輸政策研究機構：鉄道利用者等に対する情報提供の深度化に関する調査（乗換利便性の検討）、2001.
- 4) 日本鉄道建設公団：交通結節点のあり方に関する研究、1996.
- 5) 内山久雄、武藤雅威、桜井章生：鉄道の乗換抵抗に関する基礎的研究、土木計画学研究・講演集、No12、pp.229-234、1989.
- 6) 大島義、松橋貞雄、三浦秀一：鉄道駅における乗換抵抗に関する基礎的研究、土木計画学研究・講演集、No.19(2)、pp.701-704、1996.
- 7) 中祐一郎：交差流動の構造—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第258号、pp.93-101、1977.
- 8) 例えば、加藤邦夫ほか：群集対向流動の解析、日本建築学会論文報告集第289号、pp.119-128、1980.
- 9) 例えば、岡田哲：間欠性跛行を呈する腰部脊柱管狭窄症の歩行分析、京府医大誌108(2)、pp.261-270、1999.
- 10) 福田一太、山下良久、内山久雄：交差現象を考慮した歩行者シミュレーションモデルの構築、日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、pp.387-390、2006.
- 11) 高橋英明、佐野友紀、渡辺仁史：群集交差流動における歩行領域確保に関する研究—歩行領域モデルを用いた解析—、日本建築学会計画系論文集第549号、pp.185-191、2001