

駅における歩きにくさを可視化した 旅客流動シミュレーション

山本 昌和* 石突 光隆* 青木 俊幸**

A Passenger Flow Simulation to Evaluate Ease of Walking in Station

Masakazu YAMAMOTO Mitsutaka ISHIZUKI Toshiyuki AOKI

Since congestion is likely to occur regularly at rush-hour times in stations, consideration on a passenger flow is necessary in facility planning. We have so far made clear the passenger flow in the whole station precincts with help of simulation technology, but no technique has been available to evaluate ease of walking from a passenger point of view. To clarify a relationship between the congestion status and ease of walking as experienced by passengers, we repeated walking experiments using a station simulator and monitor-based evaluation tests. Then we have proposed a formula to evaluate ease of walking in stations, and have developed a passenger flow evaluation simulation technique.

キーワード：駅，旅客流動，歩きにくさ，シミュレーション

1. はじめに

駅のコルコースは、ホーム、改札および出札窓口・券売機等からの複数の動線が交わる箇所であり、大量の旅客流動による交錯が発生しやすい箇所でもある。近年では、ラチ内外を問わず駅と商業施設との複合化が進んでおり、駅における動線は益々多様化している。元来、駅施設では、特に朝夕ラッシュ時の流動量を許容するような規模計画がなされてきたが、今後は、ユニバーサルデザインの視点からも、より多くの旅客が利用しやすいと思えるような施設計画が望ましいと考えられる。

本研究では、旅客流動の観点から、混雑・移動性についての駅における歩きにくさを評価する基準を提案した。また、既存の旅客流動シミュレーションに、この評価指標を適用しシミュレーションの機能向上をはかった。

2. 旅客流動シミュレーションの概要

旅客流動シミュレーションとは、鉄道駅の旅客流動空間において、通勤旅客を対象とした交錯流動の実態調査に基づき開発¹⁾された、歩行者群を単位とするメッシュ型のシミュレーションモデルが基本となっている。このシミュレーションモデルにより、複数の旅客流動による相互的な影響を検討することも可能となり、滞留規模・滞留時間の評価も可能となった。

現行のシミュレーションプログラムは、その後の改良²⁾による入出力、計算範囲の拡大、新設備への対応、プレ

* 構造物技術研究部（建築）

** 研究開発推進室

ゼンテーションの機能拡張を経たものである。本研究では、この既存の旅客流動シミュレーションに適用することを前提に歩きにくさに対する評価基準を作成し、旅客流動評価シミュレーションの機能向上をはかった。

3. 駅における歩きにくさの評価指標の検討

3.1 コンコースにおける旅客流動評価

3.1.1 コンコースにおける旅客流動の特徴

歩行環境の評価指標に関する既往の研究としては、John J. Fruin のサービス水準³⁾を代表とするいくつかの研究例^{4)~6)}があり、群集流動の定量化手法や評価手法が提案されている。しかし、駅特有の動線の交錯を定量的に扱った研究や、実際に旅客が感じる歩きにくさを実験的に扱った研究は少ない。

駅のコルコースでの旅客流動の特徴として、定常的な人の流れが形成されやすいこと、施設の条件によっては複数の流れの交錯が避けられない場合があること、が挙げられる。また、旅客が感じる歩きにくさについては、日常のラッシュ時間帯のように旅客が一定の間隔と速度を保ち流動する場合、不快に感じるほどの負担がかかることは少なく、むしろ個々が速度の調整を余儀なくされる動線の交錯箇所において不快を感じやすい傾向があることから旅客流動が交錯する箇所に着目し、交錯状態を定量的に表現する指標の作成と、交錯状態と歩きにくさの評価との関係について検討した。

3.1.2 コンコースにおける歩きにくさの評価

旅客流動の交錯を、近傍にいる旅客同士の進行方向の相違と考えた場合、旅客毎の進行方向のばらつきを定量

特集：構造物技術

的に表現することで交錯の程度を定量化できると考えた。そこで、旅客の向きの相互関係を内積によって表現する方法を検討した。

図1のように、ある2旅客*i, j*のなす角度 θ_{ij} と方向単位ベクトル e_i, e_j の内積 δ_{ij} は、式(1)のように表せる。

ここで、駅構内のある領域内に*n*人の旅客がいる場合、この領域における δ_{ij} の平均 d を、領域における旅客群の交錯度とし、式(2)のように定義した。なお、 d の値は旅客の向きが均一になるほど $d=1$ に近づく特性がある。

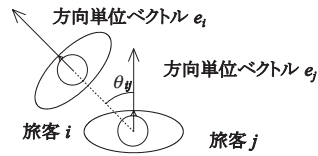


図1 2旅客の方向単位ベクトル

$$\delta_{ij} = e_i \cdot e_j = \cos \theta_{ij} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

$$d = \frac{\sum_{i,j=1}^n \delta_{ij}}{n(n-1)} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

この交錯度 d および同一領域内の旅客密度 ρ_1 と旅客の感じる歩きにくさとの関係を調べるため、被験者による交錯歩行実験を実施した(図2)。



図2 交錯歩行実験

被験者群を様々な角度で交錯させ、交錯度 d と旅客密度 ρ_1 を測定した。また被験者には交錯箇所を通過する際に感じた歩きにくさについてアンケート調査を実施した。被験者の感じた歩きにくさの評価は、下記のような質問と適・不適を明確にするため、4段階評価により調査した。

質問「歩きにくいと感じたか？」

- 回答 1. 全く感じない 2. ほとんど感じない
- 3. 少し感じた 4. 大いに感じた

実験の結果、正面からの交錯($\theta_{ij}=180^\circ$ 、以下対向流)の場合、層流が形成され、交錯時の負担が小さくなる傾向が見られたため、対向流とそうでない場合とに分類し、被験者が回答した歩きにくさ(E_1)を目的変数、その時の交錯度 d 、密度 ρ_1 を説明変数とした重回帰分析を行うことで式(3)および式(4)を作成し、これをコンコースでの評価式とした。

対向流でない場合

$$E_1 = -0.557d + 0.838\rho_1 + 2.072 \quad (3)$$

対向流の場合

$$E_1 = -0.390d + 0.687\rho_1 + 1.113 \quad (4)$$

E_1 : コンコースでの歩きにくさ ($1 \leq E_1 \leq 4$)

d : コンコースの交錯度 ($-1 \leq d \leq 1$)

ρ_1 : コンコースの密度 (人/m²)

3.1.3 駅シミュレータにおける交錯歩行実験

コンコースでの歩きにくさの評価式の検証を行うため、模擬駅舎(以下、駅シミュレータ)において模擬旅客による交錯歩行実験を実施した。駅シミュレータは、実物大の橋上駅舎で、改札や階段での流動実験が可能である。

(1) 実験条件

朝の駅構内を想定し、コンコース内の階段箇所数、階段から流入する旅客(降車客)と改札から流入する旅客(乗車客)の数を変化させて実験を行った(図3)。評価方法は前述の実験と同様とし、改札前の領域(4.2m×5.6m)を対象に評価させた。



図3 駅シミュレータでの交錯歩行実験

(2) シミュレーションによる結果との比較

実験において被験者の評価値の平均が最も高かった試番Aと最も低かった試番Bについて、シミュレーションとの比較を行った。試番Aはコンコースに階段が2箇所の想定で、試番Bは階段が4箇所の想定である。試番A, Bとも総被験者数は約100名であるが、交錯の仕方が異なる。

旅客流動シミュレーションにより試番A, Bを再現し、同一領域の評価を式(3)(4)で算定した。シミュレーションによる評価値を図4に示す。なお、シミュレーションでは1秒毎の旅客状態から評価値を算出し、評価箇所当たる複数のメッシュにおける評価の平均値とした。一方、実験では試番毎に評価を記入する方式のため、試番A, Bに対する総被験者の評価の平均値とした。

評価の適・不適を評価の中間値2.5で分けた場合、試番Aでは中間値より高い領域に分布するのに対し、試番Bでは中間値以下の領域に分布する傾向が確認できた。また、実験による評価値と比較した場合、特に試番Bで計算値との乖離が大きくなる傾向があった。原因としては、高密度の旅客流動用に設定されたシミュレーションモデルの特性が影響している可能性が高く、今後、シミュレーションへの適用方法の検討が必要である。

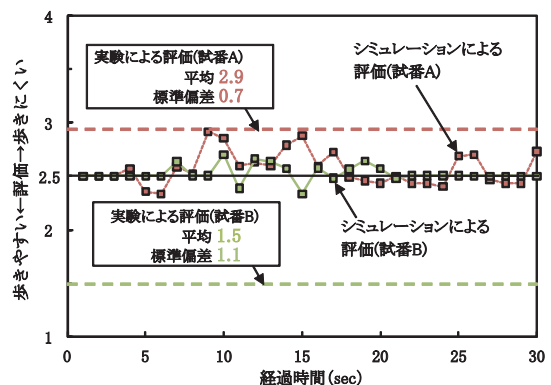


図4 シミュレーション評価値の比較

3.2 ホームにおける旅客流動評価

3.2.1 ホームにおける旅客流動の特徴

駅のホームでは、主たる目的が移動することよりも列車を待つことにあり、歩くよりも列を形成して立っている時間の方が長いことが特徴として挙げられる。したがって評価についても、旅客流動の交錯よりもホーム中央部で待ち旅客の中をすり抜ける際の負担や、やむを得ずホーム端部を歩行する際の負担が大きいと考えた。

3.2.2 ホームにおける歩行実験

ホームにおける歩きにくさの評価指標を作成するため、実際の模擬旅客を用いた歩行実験を実施した。

図5のように模擬ホーム上の20m,4ドア型の車両扉位置に相当する部分に5人2列の乗車待ち行列ができた場合を想定し、ホームの幅員・乗車待ち行列の形態を変えた条件で、模擬旅客を歩行させ、目的地とする乗車位置に達するまでに感じる歩きにくさを調査した。評価は、交錯歩行実験と同じ4段階評価とした。

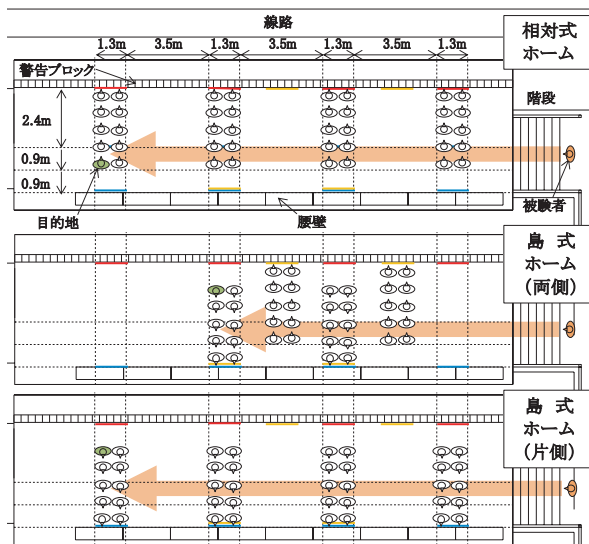


図5 模擬ホームでの実験の概要

ホーム上の混雑の程度すなわち旅客間隔を実際と近づけるため、実駅での調査および既往の調査結果⁷⁾から、一般的な5人2列の待ち行列の長さが2.4~4.2mの範囲にあることを確認した上で、その範囲内で3段階のホーム幅員(2.4m, 3.3m, 4.2m)を設定した。

また、ホーム形態として、「島式ホーム」「相対式ホーム」を想定し、島式ホームでは両側の線路に対して乗車待ち行列が形成される場合についても実施した。

3.2.3 ホームにおける歩きにくさの評価

ホームにおける歩行実験の結果から、図6に示す乗降口前における密度とホームの歩きにくさ評価との関係を得、ホームでの評価式を式(5)(6)(7)のように表した。

乗降口前とは、車両扉前の幅1.3m×ホーム幅(2.4~4.2m)の領域を指し、その領域での密度は、乗車待ち人数が同じの場合、ホーム幅が広がるほど低下する。

実験では、上記密度が高くなるほど、模擬旅客が通行可能な幅が狭くなり、立っている旅客の間をすり抜けるか、ホーム端部(線路側)を歩行せざるを得なくなる様子が確認できた。島式ホームで両側に乗車待ち行列が形成されている場合には、列を避けるようにクランク状に歩行する様子も見られ、総じて歩きにくいと感じる模擬旅客が多い結果となった。

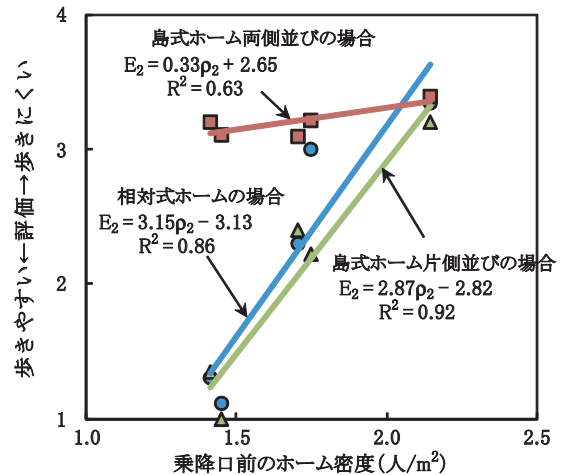


図6 ホームでの密度と評価の関係

島式ホーム片側並びの場合

$$E_2 = 2.87\rho_2 - 2.82 \quad (5)$$

島式ホーム両側並びの場合

$$E_2 = 0.33\rho_2 + 2.65 \quad (6)$$

相対式ホームの場合

$$E_2 = 3.15\rho_2 - 3.13 \quad (7)$$

E_2 : ホームでの歩きにくさ ($1 \leq E_2 \leq 4$)

ρ_2 : 乗降口前のホーム密度 (人/m²)

3.3 階段における旅客流動評価

3.3.1 階段における旅客流動の特徴

駅全体の流動上、駅の階段はボトルネックとなりやすく、混雑時には歩行行動が制限されやすいことや、生じる交錯は対向方向に限られることが特徴として挙げられる。そこで歩きにくさを感じる階段の状況として以下を想定した。

① 流動量が多く、自由な速度で歩けない状況

② 対向流動のすれ違いを意識しながら昇降する状況

実際には、階段が混雑する前に階段を通過する先頭集団の存在もあるが、これらはさしたる不快を感じていないものとし、歩行速度が制限されがちな中間の集団について、歩きにくさの評価方法を検討する。

3.3.2 階段における歩行実験

階段における歩きにくさの評価指標を作成するため、模擬旅客による歩行実験を実施した。駅シミュレータの階段において、歩行速度・すれ違いの有無・すれ違いの数を変え、模擬旅客約100名を昇降させた。(図7, 8)

歩行速度は、実駅(T駅, H駅)での流動調査より得ら

特集：構造物技術

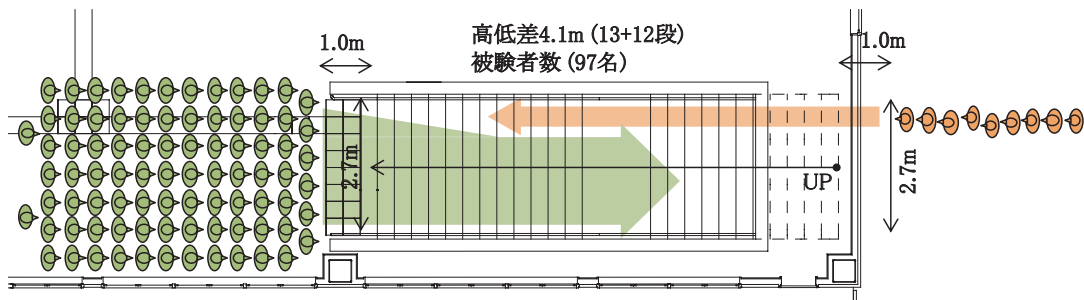


図7 駅シミュレータ階段の概要



図8 階段での流動実験

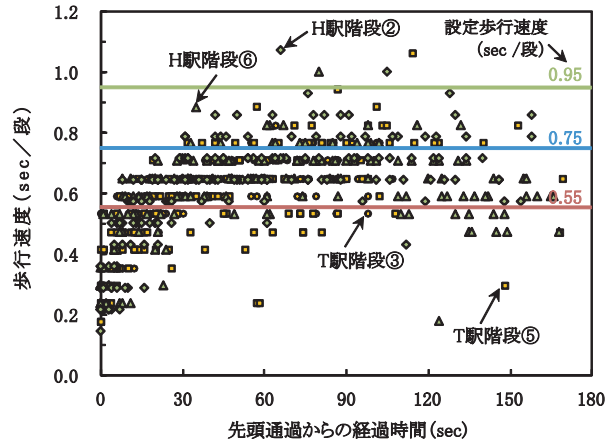


図9 歩行速度の設定

れた歩行速度を、図9のように1段毎の昇降にかかった時間 (sec) に換算した。この分布状態から3つの速度を設定し、先頭の模擬旅客には、指定された3種類の速度 (0.55, 0.75, 0.95 (sec/段) 図9中の赤, 青, 緑線) で歩行するように指示することで、模擬旅客全体の歩行速度を制御した。すれ違いは、少数のグループが、多数のグループと階段内ですれ違わしめた。なお、少数のグループについては歩行速度の指定はしていない。

歩きにくさの評価は、交錯による評価手法の場合と同じ4段階評価とし、評価は1回の昇降毎に回答させた。

3.3.3 階段における歩きにくさの評価

階段における歩行実験の結果から、変化させた条件のうち階段での歩きにくさの評価に影響を与えたと考えられる6つの条件について、歩きにくさへの影響度を調べた。模擬旅客が感じた歩きにくさの評価値1~4を従属変数、歩きにくさに影響したと考えられる要因(アイテム)を独立変数として数量化I類を行い、各アイテムと評価値との関連の強さを偏相関係数で表した(図10)。

「すれ違いの有無」「整列位置(前後)」「階段内の歩行速度」の順に偏相関係数が高くなっており、階段内の歩行速度が歩きにくさの評価に最も影響している。

次に相関が高い整列位置との関係(図11)については、列の前半後半での評価に隔たりがあることから、全15列中、より歩きにくいと回答した8列目から前の位置で歩行した被験者サンプルに限定して被験者の位置による影響を少なくし、歩行速度の水平成分(水平歩行速度)と歩きにくさの関係式(8),(9)を導いた(図12)。

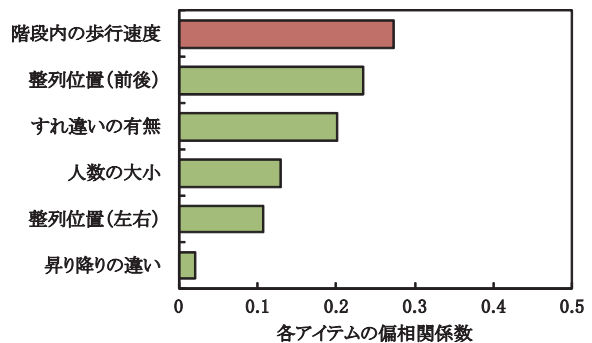


図10 各アイテムと階段内評価との相関

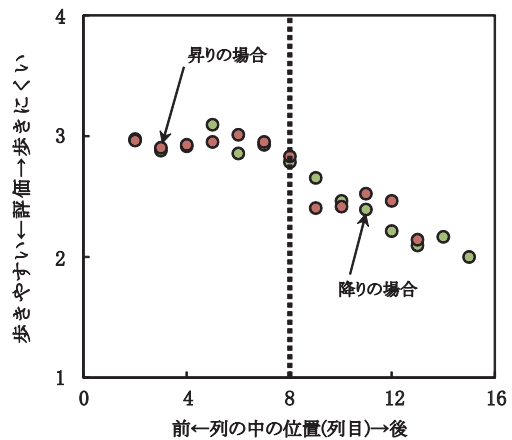


図11 整列位置と階段内評価の関係

すれ違いがない場合

$$E_3 = -5.53V_h + 5.40 \quad (8)$$

すれ違いがある場合

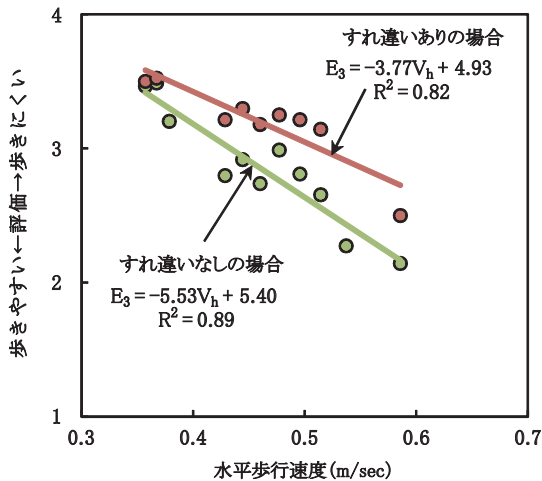


図12 歩行速度と階段評価の関係

$$E_3 = -3.77V_h + 4.93 \quad (9)$$

E_3 ：階段での歩きにくさ ($1 \leq E_3 \leq 4$)

V_h ：階段内の水平歩行速度 (m/sec)

3.3.4 実駅での階段歩行実験

実際に混雑した階段での歩きにくさを調べるため、実駅 (K 駅) での歩行実験を実施した。

(1) 実験の概要

この駅は路線の終端としての機能を持つ橋上駅で、朝ラッシュ時間帯における降車旅客数の多いことが特徴である。終端となるホームでは、全ての乗客が降車し、階段を利用するため、階段での混雑が解消するのに約2分近くかかり、列車の到着頻度も高いことから混雑は定常的に発生している (図13)。

図14のような幅員約3m (昇り部分約2.2m) の階段に、1車両分 (約20m) 離れた場所から被験者を1人ずつ送り込み、周囲の人の流れに合わせて階段を歩行させたのち、階段を昇る際に感じた歩きにくさの評価を記録させた。評価の方法は、駅シミュレータでの実験と同様の4段階評価とした。

被験者 (5名×2組) を送り込むタイミングは、到着した列車の扉が開いた直後から5秒間隔で被験者をスタートさせ、5名の被験者全員を階段内の旅客群の中に送り込むことができた。なお、この階段では、中間柵によって昇降客が分離されており、すれ違いの影響はない。これらの手順で朝ラッシュのピーク時間帯にあたる



図13 階段前の状況

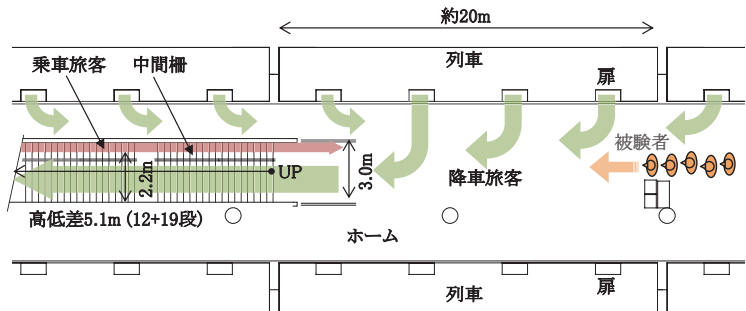


図14 実駅の階段周辺の概要

7:30～8:30の間に計22回、繰り返し実施した。

同じ時間帯の、階段を昇る降車旅客の歩行速度を調べたところ、先頭の通過後約30 (sec) 付近から歩行速度が収束するという傾向が見られ、階段の流動量が階段容量の上限に達していることがわかる。また、駅シミュレータでの実験で設定した歩行速度の範囲にも当てはまっていることがわかる (図15)。

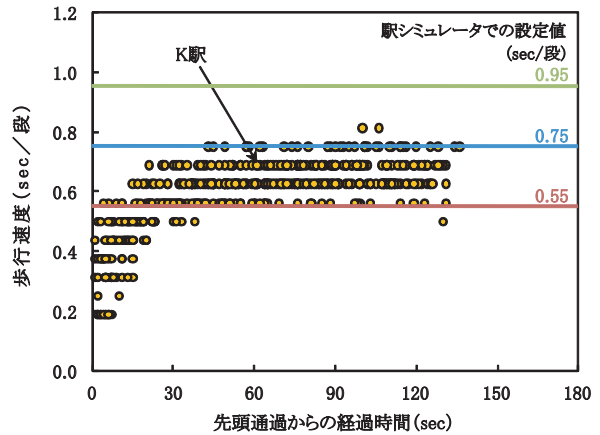


図15 K駅の階段での歩行速度

(2) 歩きにくさの評価

ここで、駅シミュレータでの実験で得た階段における歩きにくさの評価式のうち、すれ違いがない場合の評価式 (式(8)) を適用し、この階段での評価値を算定した。

この予測値と被験者による評価値と比較した結果が図16である。縦軸は、計算による階段での歩きにくさ評価値 (予測値) を表し、横軸は、被験者が回答した評価値の平均値 (実験値) を表している。

プロットした点が図中の対角線に近いほど、予測値と実験値が一致していることを意味している。今回の検証では、予測値を実験値が概ね一致する傾向が見られたことで、階段内の歩行速度によって階段における歩きにくさの評価を予測できることがわかった。

4. 評価手法のシミュレーションへの適用

4.1 適用する評価指標

コンコース、ホームおよび階段における歩きにくさの

特集：構造物技術

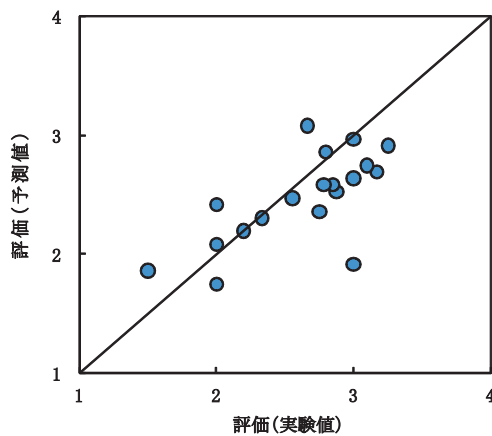


図 16 階段内評価の比較

評価は、それぞれ交錯度、乗車口前の密度および歩行速度により概ね説明することができることがわかった。

今回の評価指標を適用する旅客流動シミュレーションプログラムは、メッシュ内の旅客群の移動方向と密度および歩行速度を時刻毎に算出する仕組みとなっているため、その特性に応じ、評価式として、前述の式(3)～(9)を適用した。

4.2 旅客流動シミュレーションへの適用

評価機能を付加した旅客流動シミュレーションにより、仮定の駅平面での旅客流動の評価を試行した。出力図例を図17に示す。歩きにくい箇所ほど赤い色で出力される仕組みになっており、ホームから階段、コンコースにかけて駅構内の評価の状況を俯瞰的に見ることで、旅客流動上問題のある箇所が把握しやすくなっている。また、近年エスカレータでの歩行も多く見られるが、基本的に旅客の負担を軽減する設備のため評価対象としていない。

この旅客流動評価シミュレーションによって、施設の形状や階段位置を変更した場合や、旅客の流動量や列車到着の間隔が変わった場合など、様々なケースに応じて、変更前と変更後の駅構内全体の流動状況を、相対的に評価することが可能となる。

5. まとめ

(1) コンコースにおける旅客流動評価手法を提案し、歩

行実験との比較により有効性を確認した。

- (2) ホームと階段における歩行実験から、ホームと階段における流動評価手法を提案した。階段の評価手法は、実際の駅でも検証を行い、良好な結果を得た。
- (3) 歩きにくさの評価指標を旅客流動シミュレーションに適用し、駅全体の流動状況を相対的に評価できる旅客流動評価シミュレーションを作成した。

6. おわりに

今回の実験では、群集内での旅客位置など、旅客個別の条件が歩きにくさの評価に影響することもわかった。この点を考慮するには、今回の旅客群を扱うシミュレーションモデルではなく、旅客個々の動きを扱うシミュレーションモデルを用いる必要がある。今後、この点も含め検討し、様々な形態の駅に対し旅客流動評価を実施し、精度検証を行う必要があると考える。

文 献

- 1) 中祐一郎:交錯流動のシミュレーションモデル 鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究 (2), 日本建築学会論文報告集, 第 267 号, 1978
- 2) 安藤恵一郎, 青木俊幸, 大戸広道:旅客流動シミュレーションシステムの改良, 鉄道総研報告, Vol.5, No.8, 1991
- 3) John J. Fruin: 歩行者の空間, 鹿島出版会, 1974
- 4) 佐野友紀, 渡辺仁史: 歩行者流動の定量的分類に関する研究空間-時間系歩行軌跡モデルを用いた歩行軌跡の可視化 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 1998
- 5) 佐野友紀, 志田弘二, 建部謙治: 物理的指標からみた交錯についての実験的研究 群集流動横断時の歩行特性に関する研究その1, 日本建築学会計画系論文集第 546 号, 2001
- 6) 建部謙治, 佐野友紀: フィールド調査にもとづく通過しにくさの解析 群集流動横断時の歩行特性に関する研究その2, 日本建築学会計画系論文集第 554 号, 2002
- 7) 金尾正哉, 森田孝夫: 待ち行列の線密度と個体間距離の実態について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp721-722, 1992

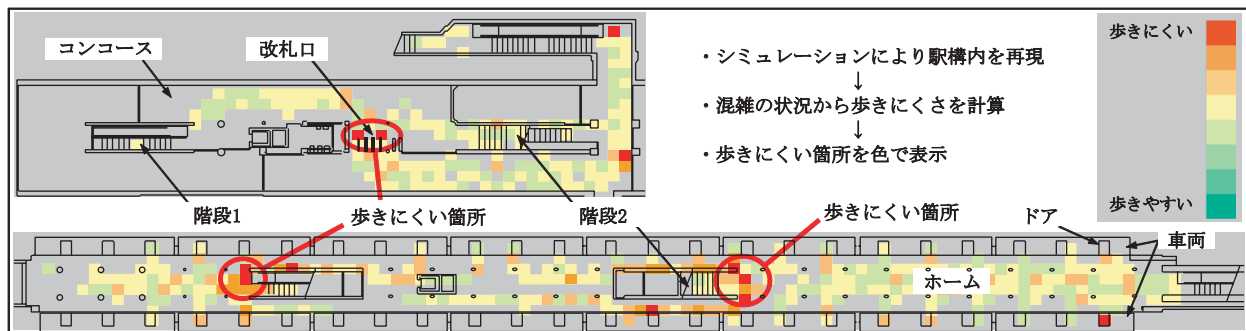


図 17 旅客流動評価シミュレーション