

ホーム上旅客流動の変化を予測できる シミュレーションシステムの開発



加瀬 史朗*



佐藤 敏彦**



坂本 圭司*

駅ホーム上の各種設備改良（駅改良に伴う階段・ESCの新設や位置変更、ホームドア設置など）に伴い、混雑状況の変化が考えられる。その際、事前に混雑変化を予測し対策することが安全性・快適性の向上に繋がる。

本研究では、「駅改良計画の際に、旅客流動の変化を高い精度で検証可能なシミュレーションシステムの開発」をめざし、駅の実現象データにより、シミュレーションの再現性を最適化する技術を確認し、約7%の再現性向上を実現した。このシステムは、実プロジェクト（ホーム上仮囲い設置時の滞留解消時間予測による仮囲い設置方法検討）での混雑緩和対策でも使用された。これを受け、現在、シミュレーションシステムの実業務使用の際の最適な利用環境構築をめざし、実用化開発を進めている。

●キーワード：駅、マルチエージェントモデル、最適パラメータ値自動探索システム、OD*推計

1. はじめに

駅ホーム上に設備（階段、エスカレーター、ホームドアなど）を新設する際には、新たな混雑箇所が生じないようさまざまな検討を重ねて改良計画を進めている。

その際、旅客流動シミュレーションにより改良後の混雑度を予測する手法がある（図1参照）。しかし、これまではシミュレーションの精度を評価するための旅客流動（特に朝ラッシュ時）の実現象自体を定量的に把握する手法がほとんど無く、ビデオ測定結果とシミュレーション結果を比較する程度の確認しかできなかった。しかし、先行研究¹⁾により、朝ラッシュ時の旅客流動の実現象を定量的に把握することに初めて成功した。これを受け、朝ラッシュ時のホーム上旅客流動について、設備改良前後のシミュレーション結果を実現象と比較することが初めて可能になった。

本研究では、「駅改良計画の際に、旅客流動の変化を高い精度で検証可能なシミュレーションシステムの開発」をめざし、世界で初めて駅の実現象データにより、シミュレーションの再現性を最適化する技術を確認し、実プロジェクト（ホーム上仮囲い設置時の滞留解消時間予測による仮囲い設置方法検討）での混雑緩和対策で使用したほか、社員が操作できるグラフィックユーザーインターフェースの開発など、実務使用のための実用化開発を進めている。具体的には、図2のような開発のフローにより研究を進めた。

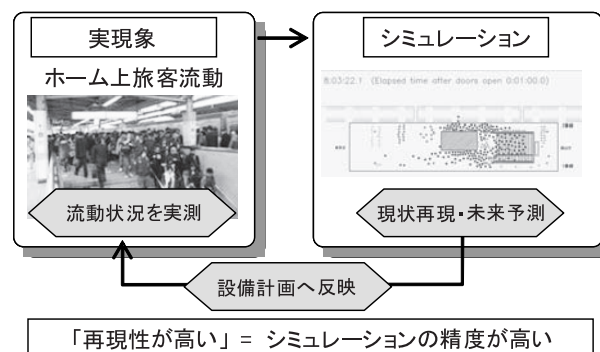


図1 旅客流動シミュレーションの利用イメージ

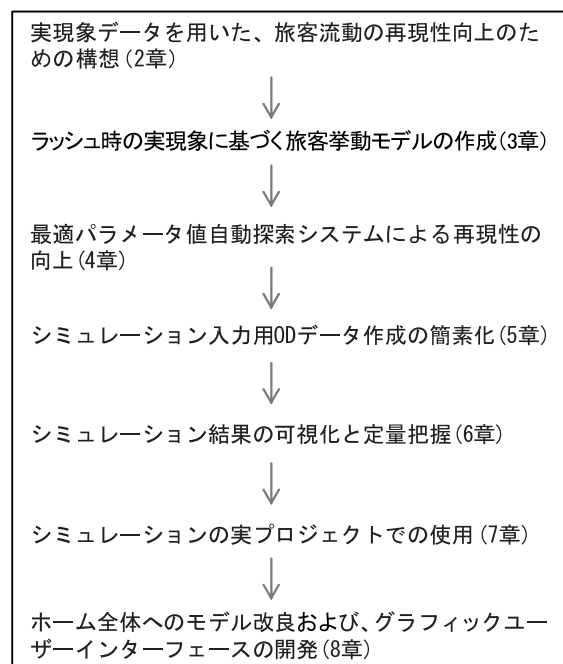


図2 シミュレーション開発のフロー

※ODとは、Origin(出発点)とDestination(到着点)を表す。

2. 実現現象データを用いた、旅客流動の再現性向上のための構想

前章で示したように、ホーム上旅客流動についてはこれまで、旅客挙動、旅客流動の実現象を定量的に把握するツール、手段が無かった。そのため、シミュレーションの出力結果の確からしさ(再現性の精度)を示す方法が確立されていなかった。

しかし、先行研究¹⁾により、ホーム上の旅客流動を定量的に把握する手法が開発された。具体的には、朝ラッシュ時のホーム上において、約1秒ごとに旅客の位置座標を検知することが可能になった。これとシミュレーション出力データを比較し、その誤差評価値(詳細は4章参照)を最小化させることで、シミュレーション結果を実現象に自動的に近づけ、最適化する技術の確立に挑戦し、最適パラメータ値自動探索システムの開発に成功した(特許出願中)。

図3に、実現現象データを用いた、旅客流動シミュレーションの再現性向上のための構想を示す。シミュレーションは、空間データ(ホーム形状、各設備)、旅客ODデータ、列車の発着タイミングなどのデータを入力すると、プログラムを回して出力データをアウトプットするという一連の流れがある。この出力結果を実現象測定データと比較することにより、パラメータ最適値の自動探索を行い、最適パラメータ値を実装するプロ

グラムを開発し、これまで以上に再現性を確保し、専門家で無くとも最適パラメータの設定が可能なホーム上旅客流動シミュレータの開発を行う構想とした。

3. ラッシュ時の実現現象に基づく旅客挙動モデルの作成

3.1 駅ホームに適した歩行モデル作成

本研究開発では、朝ラッシュ時などの各旅客の追従、衝突回避などの動きを精度よく再現できるマルチエージェントタイプのシミュレーションモデルを採用した。このモデルは複数の旅客(エージェント)とその周辺環境とで構成され、各旅客の挙動が環境やほかの旅客との相互作用によって決定されるモデルである。本研究開発では、各旅客の周辺環境として空間形状、旅客流動の起点終点、ホームドアなどの設備仕様、列車運行ダイヤ、列車待ち行列制御用の乗車口データを設定した。

開発したシステムでは、駅での各旅客の衝突回避などの動きを再現するため、図4に示す先読み探索機能を持つ歩行モデルを採用した。ホーム上扉前やエスカレーター(以下、エスカレーターをESCと表記する。)前での行列形成や、ホームドア設置有無での歩行ルートの違いなどをモデルに組み込んだほか、混雑箇所を回避するなど、駅に特化した歩行モデルを作成した(図5)。

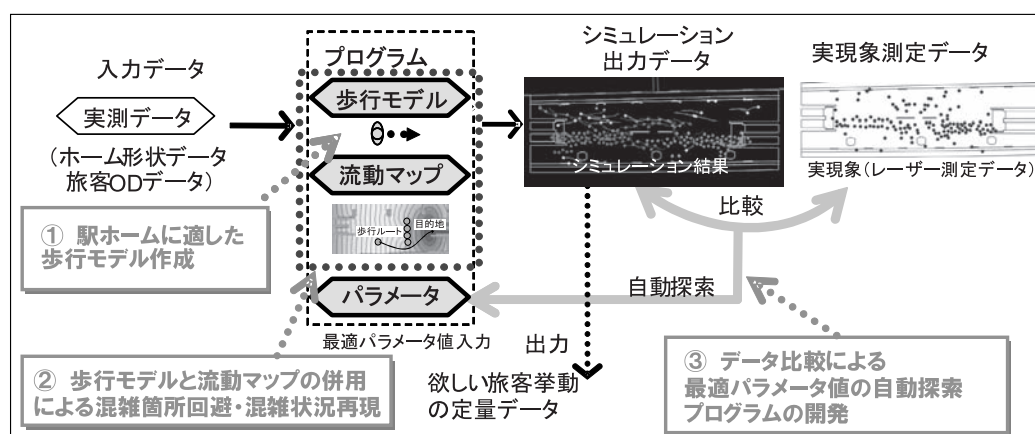


図3 実現現象データを用いた、旅客流動シミュレーションの再現性向上のための構想

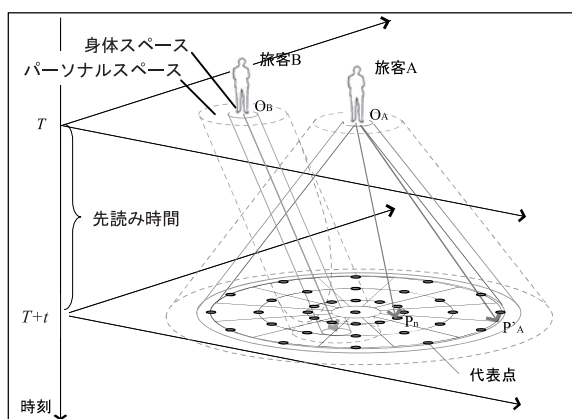


図4 先読み探索機能を持つ歩行モデルのイメージ

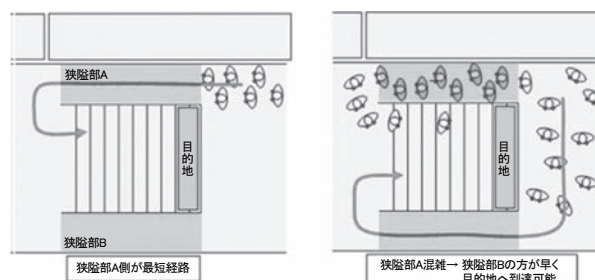


図5 駅に特化したシミュレーションモデル改良(一部)
(動的な経路選択機能)

3.2 歩行モデルと流動マップの併用による混雑箇所回避・再現に関するプログラムの作成

3.2.1 流動マップの自動生成による混雑箇所の回避挙動の再現

前項までの方法により、各ホーム上旅客の挙動を精度良く表現する準備は整った。しかし、朝ラッシュ時などの全旅客の衝突・追従判定を計算することは、その計算ボリュームからして現実的ではなく、実際の挙動に合わせた効率的な計算による計算速度の高速化が求められる。

これを解決するため、各旅客が行動する際の共通の歩行ルートなどを表現するため、各旅客の歩行モデルと併せ、流動マップを併用することとした。これは、一般的に、旅客は目的地までの最短経路を歩行する。しかし、多くの列車待ち旅客でホームが混雑している場合やESC前に滞留ができている場合は最短経路を歩きづらくなる。分析の結果、このような場合、旅客は乗車口の列車待ち行列を迂回してホーム端を歩いたり、ESC前の滞留を避けるように迂回したりすることが分かった。

本研究では、これらのホームの混雑状況による歩きやすさを反映して流動マップを数秒に1回更新することで、混雑箇所の回避挙動を再現できるモデルを作成した（図6参照）。

3.2.2 流動マップ生成手法の改良によるESC前の滞留の再現

列車到着時には、ホームに降りた降車客が一斉にESCに向かうため、ESCの乗り口付近には滞留が形成される。分析の結果、ESC前の滞留形状は、ESC乗り口を中心として同心円状に広がるのではなく、ESCに平行に列をなすように広がることがわかった。

本研究では、流動マップ生成に用いる拡散方程式を拡張することで、ESC前の滞留の様子を再現することに成功した（図7）。

その結果、図8に示すように、待ち行列が形成される様子や、列車到着時に旅客が降車する様子や、エスカレーター周辺に滞留が形成される様子、滞留が徐々に解消される様子などを再現することが可能になった。

3.3 ホーム上各旅客の歩行モデル改良の深度化

2011年度の開発では、各旅客（エージェント）のホーム上の動きをビデオ映像などにより観察して歩行モデルの改良を行った。図5に示すように、ラッシュ時の混雑（密集）箇所と低密度時での先読み行動の違いをモデルに組み込んだほか、混雑度に応じ対向する旅客のすり抜け挙動や衝突回避行動を表現すべく、約15種類のモデル改良・追加を行った。例えば、旅客同士の干渉判定に用いる身体スペース半径に

ついて、目的地が同じ場合と異なる場合の2つを設定できるようモデル改良した。また、扉回避後に階段などへ急ぐ旅客についても、歩行速度に関するパラメータの拡張を行うことにより対応・表現できるようモデルを改良した。

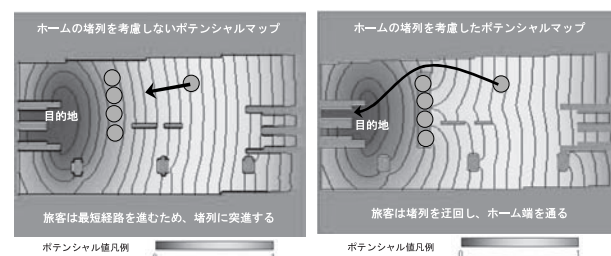


図6 流動マップ更新前（左）と更新後（右）の旅客の経路

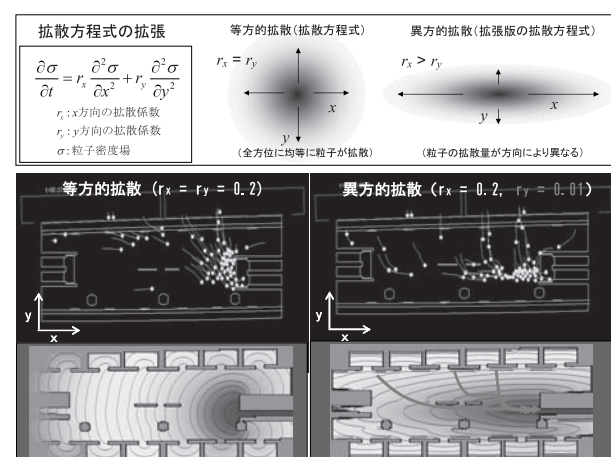


図7 流動マップ生成方法の改良

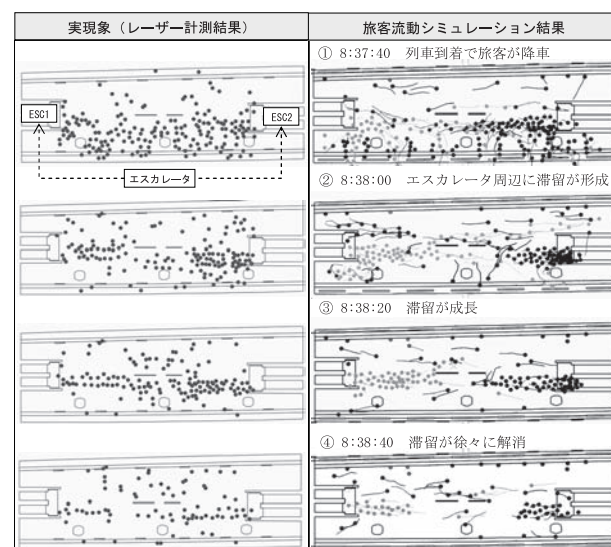


図8 実現象（左）とシミュレーション（右）の比較

4. 最適パラメータ値自動探索システムによる再現性の向上

4.1 誤差評価値と最適化方法

シミュレーション旅客データと実測データの誤差を評価するための方法としては各個人の位置情報の全時間での比較が考えられる。しかし朝ラッシュ時など、旅客数の多いホーム上の混雑度を評価する場合、微視的な量による評価では各旅客の位置の揺らぎが評価結果に現れることとなり定量的な評価が難しくなるため、各旅客の位置を平均化した巨視的な量を用いることが有効であると考えられる。したがって今回、ホーム空間を1m²メッシュのセルに分割し、各セルの混雑度を比較することとした。混雑度としては、以下に定義する人-人距離の逆数を用いた。

$$\text{人-人距離の逆数} = \frac{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4} + \frac{1}{d_5}}{5}$$

人-人距離とは、各セルに存在する旅客について、最も隣接する5人の旅客との距離の逆数を平均したものである。人の距離が近く密度が高くなるほど人-人距離の逆数が大きくなり、混雑度の指標になるものである。

以上定義した人-人距離の逆数について、実測データとシミュレーション結果の差をとり、全セル・全時間について足しあげた量はシミュレーション全体の誤差を表す。これを誤差評価値とし、この評価値を最小にするパラメータを探索するシステムを作成した。探索アルゴリズムとしてはパーティクルフィルタ法を用い、プログラムを実装した（図9参照）。併せて、2章で説明した実現象測定データ（レーザーデータ）に基づいたシミュレーションパラメータ最適化を行った。レーザーデータはホーム上の全旅客の全領域・全時刻の位置データを与えるものであり、豊富な情報量を持つ。このためシミュレータの全パラメータを補正パラメータとして最適値を決定することができた。

4.2 精度評価方法

図10の手法で精度評価を行った。その結果、94.4%の再現性を確認することができた（表1）。図11に場の人数の時間変化（E駅）を示す。レーザー実測結果（実現象）と開発したシミュレーションで、ほぼ同等の変化を示すことがわかる。

4.3 最適パラメータ値自動探索システムの簡素化

簡素化のため、階段部断面流動量でのパラメータ補正を検討し、最適化関数として以下の誤差評価値を用いた。各時刻の実測断面流動量とシミュレーションの断面流動量の差を取り、全時刻で足した量を誤差評価値とする。最適化探索アルゴリズムとしては4.1項同様パーティクルフィルタ法を用い、プログラムを実装した。図12に階段部断面流動量の時系列変化（C駅）を示す。断面流動量に対する精度は92.1%であり、最適化後のシミュレータと実際の旅客挙動がほぼ一

致したことが明らかになった。

$$\text{誤差評価値} = \sum_{\text{各時刻}} |\text{断面流動量(ビデオ)} - \text{断面流動量(シミュレーション)}|$$

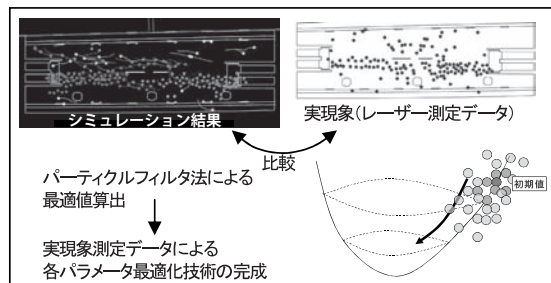


図9 パーティクルフィルタ法のイメージ

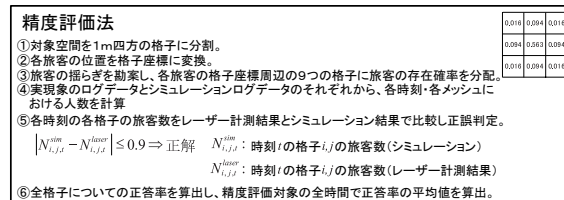


図10 精度評価方法

表1 精度評価結果（E駅）

	モデル改良前	モデル改良後
精度（人-人距離）	93.6%	94.4%
場の総人数の精度	90.5%	95.2%

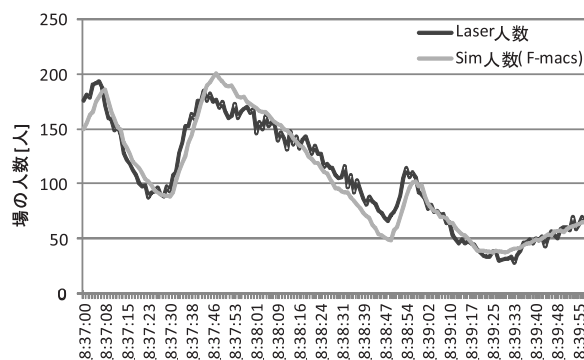


図11 場の人数の時間変化（E駅）

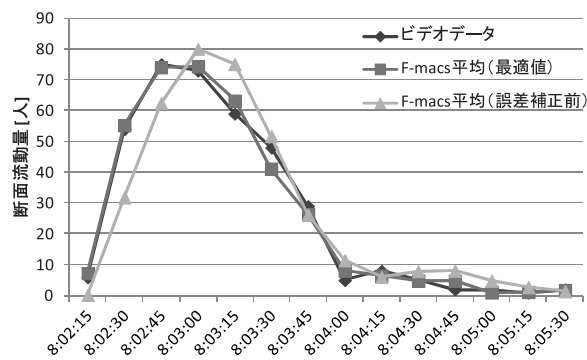


図12 階段部断面流動量の時系列変化（C駅）
（ビデオ実測データとシミュレーション結果の比較）

5. シミュレーション入力用 OD データ作成の簡素化

5.1 ODデータ取得の課題

ホーム上旅客流動シミュレーションにおいて、ODデータは①入力用データ②再現性向上のための精度検証用のデータとしての2つの役割を持つ。

本研究では当初、シミュレーションの入力ODデータの精度の精度向上のため、ビデオデータにより全旅客の挙動を追跡し、OD作成を行った（図13参照）。この手法により、前章に示す精度評価が可能となり、シミュレーションの精度向上に大きく寄与した。しかし、実務使用としては、実測およびデータ収集に多大な労力を要するこの手法はコスト、時間ともに負担が大きい。したがって、以下のODデータ取得の簡素化にも取組んだ。

5.2 開発した旅客ODデータ推計モデルと今後の展開

ODデータ取得の簡素化のため、どこまで実地での測定箇所を減らせるか検討を行った。具体的には、まずOD推計モデルとして列車の各扉から階段・エスカレーターまでの移動距離を考慮したモデルを作成した。そのうえで、①各扉・階段部の全断面流動量を測定した場合②一部断面のみの断面流動量を測定した場合の推計結果を比較し、精度評価を実施した。図14にOD推計の実施概要を、図15に推計モデルとOD推計結果を示す。その結果、断面流動量を既知とした推計モデル（①）では相関係数0.986程度と相関性が高く、図16に示すように、全旅客を追跡した場合と同等の結果が得られるため、シミュレーションへの入力データとして遜色なく使用できることが明らかになった。

6. シミュレーション結果の可視化と定量把握

図16に、実測データとOD推計結果のシミュレーション実施結果の結果比較のための4つの表示方法を示す。

定量評価の方法として、従来の粒子動画だけでなく、階段通過人数の時系列変化や滞留解消時間を表示できるよう工夫した。併せて、密度分布や混雑度出現率についても表示できるよう開発した。

これらの可視化により、各案（ケース）の滞留解消時間を定量的に比較できるようになったとともに、各箇所の混雑度が改良前後でどの程度変化するかを定量的に把握できるようになった。



図13 ビデオでの旅客追跡によるOD測定作業状況例

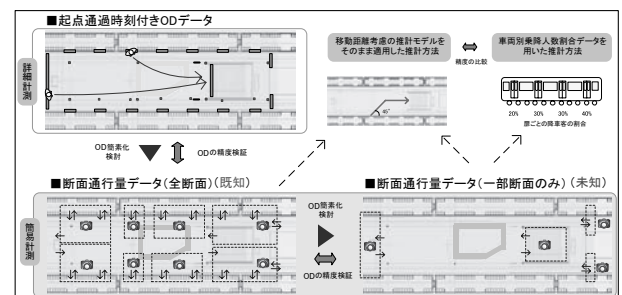


図14 測定箇所数の違いによるOD推計精度評価の実施概要

データの種類と推計モデル	2番線		1番線	
	相関係数	誤差人数 累積評価	相関係数	誤差人数 累積評価
（既知） 移動距離考慮の推計モデル	0.986	0.836	0.987	0.828
（未知） 車両別乗降割合データを適用	0.605	0.063	0.759	0.350
（未知） 移動距離考慮の推計モデル	0.863	0.514	0.866	0.534

2010年度研究・E駅対象（既知） 移動距離考慮の推計モデル	相関係数
	0.986

（既知）・・・列車扉の断面通行量データが既知の場合
（未知）・・・列車扉の断面通行量データが未知の場合（一部断面のみ）

（既知）の場合
移動距離考慮の推計モデル
（未知）の場合
移動距離考慮の推計モデル

$$N_{ij} = N_r \cdot N_{sj} \cdot A_i B_j \exp[-\lambda d_{ij}]$$

$$N_{ij} = N_{sj} \exp[-\lambda d_{ij}]$$

図15 推計モデルとOD推計結果

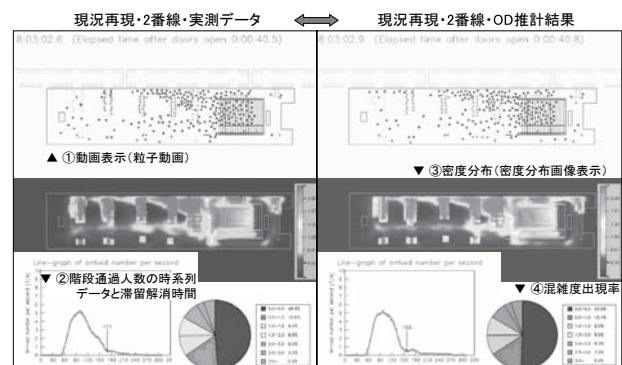


図16 実測データとOD推計結果のシミュレーション実施結果の結果比較のための4つの表示方法

7. シミュレーションの実プロジェクトでの使用

以下、開発したシステムの実務での使用状況を示す。

図17は、首都圏C駅の駅改良工事に伴い、階段脇に仮囲いを設置する場合、仮囲い設置後のお客さま混雑状況を検討した例である（図18：仮囲いサイズを示す）。階段脇約2mの箇所に仮囲いを設置する必要があるため、旅客流動シミュレーションにより詳細に朝ラッシュ時の旅客流動を予測・検証する必要がある。

まず、5章で論じたOD取得の方法により、改良前の朝ラッシュ時の階段部分の断面通過人数を実測した。このデータを基に、4章の簡素化したパラメータチューニングを実施した結果、図12のように現況再現において92.1%と、90%以上の再現性を確保できた。シミュレータの各パラメータの再現性を確認後、図19、図20のように各仮囲い設置案について、予測案の比較、検討を実施した。予測の結果、図19上側のタイプでは開扉から1分48秒後に滞留解消することが予測され、次列車が到着するまで（3分以内）に混雑が解消することが予測された（図20参照）。

仮囲い設置当日に測定の結果、実際には1分49秒後に滞留が解消され、精度よく予測できていたことが明らかになった。1番線ホームの予測結果についても2分15秒の予測に対し実際は2分21秒と6秒以内であったことから、実務で実際に利用できるレベルまでシミュレータの精度が向上したことが明らかになった。

8. ホーム全体へのモデル改良および、グラフィックユーザーインターフェースの開発

これまでの研究で、実務で使用するための再現性の精度検証および、予測結果を可視化するツールを作成できた。現在、これまでの成果を踏まえ、社員が実務で利用できることを念頭に、さらなる適用範囲の広範化（ホーム全体へのモデル改良）およびグラフィックユーザーインターフェースの開発、パラメータチューニングの計算速度の高速化に取り組んでおり、実務での使用をめざした実用化開発を進めている。

9. まとめと今後の展望

駅ホーム上の設備配置や配線変更する際のホーム上滞留解消時間や混雑状況を検証可能なシステムの構築に向け、実用化開発を進めている。これまでの開発で、実現象測定データとの比較による誤差自動補正によりシミュレーションの再現性向上を確認し、実務で利用できるレベルに達した。今後は適用事例を増やしつつ、実務に即したシステム構築に向けて実用化開発を進め、設備計画を行う際のさまざまなニーズに応えていきたいと考えている。



図17 C駅仮囲い設置箇所写真

本年度研究における未来予測シミュレーションにおける仮囲いの配置と寸法

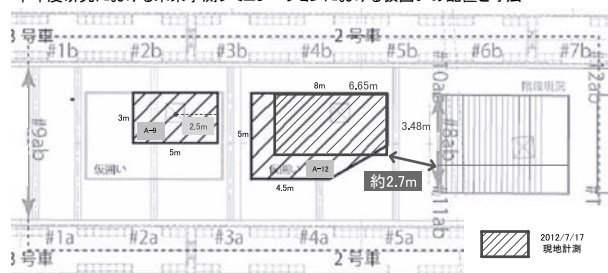


図18 C駅仮囲い設置案検討状況

8:03:22.1 (Elapsed time after doors open 0:01:00.0)

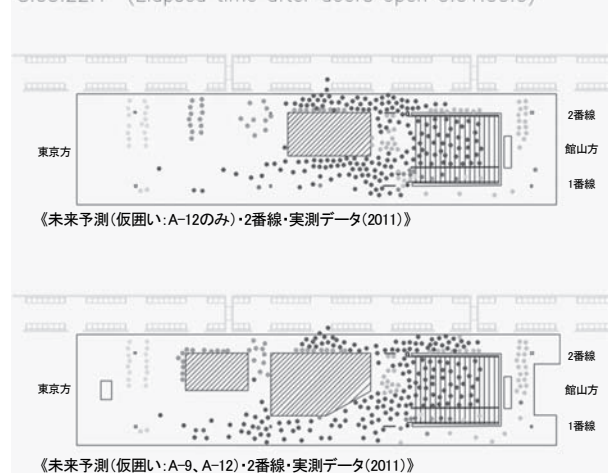


図19 C駅仮囲い設置案の将来予測状況

	2番線・現況再現	2番線・改良後予測 (仮囲いA-12のみ)	2番線・改良後予測 (仮囲いA-9と12)
a. 滞留解消時間	開扉から1分51秒後	開扉から1分48秒後	開扉から1分45秒後
b. 混雑度出現率 (①開扉から60秒間)	16.6%	16.7%	20.0%
b. 混雑度出現率 (②開扉から120秒間)	6.0%	10.6%	13.5%

* 混雑度出現率は2.0[人/m]以上の合計値を記載

図20 各案の滞留解消時間等の比較

参考文献

- 坂本 圭司、尾住 秀樹：「レーザー技術によるホームの旅客流動の調査研究」、フロンティアサービス研究所、2010
- 加瀬史朗、坂本圭司「ホーム上における再現性の高い旅客流動シミュレーションの開発」、鉄道建築ニュース 2012年3月号、pp. 27-29
- 加瀬史朗、坂本圭司、山田武志、中村仁也、大西 一聡、印南 潤二、石間 計夫 鉄道駅における旅客流動シミュレーションの精度確保に関する研究 その4～その6、日本建築学会学術講演梗概集 E-1、建築計画I、2012