

# 火災発生時における駅構内の 避難安全性検証システムの提案

石突 光隆\* 山本 昌和\*

## Proposal of Evaluation System for Evacuation Safety in Case of Station Fire

Mitsutaka ISHIZUKI Masakazu YAMAMOTO

It is necessary to ensure high evacuation safety at stations used by an unspecified number of people. However, station concourse section is not subject to the Building Standard Act of Japan, and therefore the evacuation safety may not be perfect. In order to solve this problem, we developed a system that can evaluate the evacuation safety of a station by comparing the evacuation time and the smoke filling time for fire scenario which may occur in the station yard. In the system, the evacuation time is calculated using the equation for estimating the number of evacuees at station concourse based on the examination in the station. With regard to evacuation guidance by voice broadcasting using a large number of broadcasting facilities already installed at the station, the evacuation induction success rate by subject experiment can be introduced to the proposed system as the evacuation guidance effect. Therefore, the proposed system has made it possible to support evacuation planning such as shortening evacuation time.

キーワード：鉄道駅、火災、避難、在館者密度、煙降下時間、避難誘導

### 1. はじめに

駅の火災時における避難安全性は、一般建築と同様に建築基準法の仕様規定（避難口までの距離の制限等）を適用することで、担保されている例が多い。一方で、駅のコンコースについては建築基準法の対象外であり、避難口までの距離が長い場合や、避難口を何処に設定するか（外気に開放されているホーム階を避難階に設定するか）など、コンコース部分の安全性の評価方法については明確な規定がなく、各事業者で個別の対応を行っている。また、駅構内は列車の発着により不特定多数の人が移動や滞留する、一般建築とは異なる特徴を有しており、近年の駅構内店舗の大規模化や外国人観光客等の増加により、駅構内の旅客流動状況はより複雑になってきている。そのため、これらの駅の特徴を考慮した避難安全性の検証を行う必要があると考えられる。

駅構内の避難に関する既往の研究<sup>1)</sup>では、在館者密度0.25人/m<sup>2</sup>としてコンコースの避難者数を見積り、屋外及び地上改札階に接続する階段を避難口として、シミュレーションモデル SimTread による避難状況のケーススタディを実施している。この事例では、コンコースの在館者密度を建設省告示<sup>2)</sup>の中で示されている、居室の用途毎の設定値（表1）のうち、「百貨店又は物品販売業を営む店舗の、売場に附属する通路の部分」として準用している。また、東京消防庁が実施している火災予防審議会のターミナル駅の避難検討<sup>3)</sup>においても同様の0.25人/m<sup>2</sup>をコ

\* 構造物技術研究部 建築研究室

ンコースの在館者密度として利用している。

これらの状況に鑑み、本研究では、駅構内の更なる安全性の向上を目的として、駅構内の流動の主要部分であるコンコースに対して、その避難者数の推定式を提案し、旅客の避難状況と煙の降下時間を比較することで、避難安全性の検証を行うシステムを開発した。以下システムの概要について報告する。

表1 一般建築における在館者密度の例

居室の種類	在館者密度 (人/m <sup>2</sup> )	その他これに 類するものの例	
住宅の居室	0.06	寄宿舎の居室	
事務室・会議室・その他	0.125	飲食店の厨房、 応接室	
教室	0.7	小規模の会議室、 研修室	
百貨店又は 物品販売業 を営む店舗	売場の部分	0.5	マーケット
	売場に附属 する通路の 部分	0.25	ショッピングモール の通路部分
飲食室	0.7	料理店、カフェ、 コーヒージョップ	

### 2. 駅コンコースの避難者数の推定

#### 2.1 避難者数について

駅構内の避難安全性の検証で重要となる、旅客の避難時間については、旅客数（避難者数）により大きく変化するため、検証の対象となる時間において、どの程度の旅客がどの辺りに存在しているかを把握する必要がある。

一般建築において避難者数を設定する場合には、既出

特集：防災技術

の告示(表1)を利用することになるが、駅のコンコースにおける適切な値として、どれを用いるかについては判断が難しいと考えられる。また、地下駅については、地上空間よりも火災時のリスクが高いことから、2003年の韓国大邱における地下鉄の放火火災を契機に、出火場所に対応した照査対象者(表2)が、地下駅等の火災対策基準<sup>4)</sup>(以下、火災対策基準)の中で示されている。具体的な避難者数については、列車とホーム待ちの旅客数が列車の乗車率(%)で設定されている。

表2より、いずれの出火場所においてもコンコース部分については対象外となっていることがわかる。これについては、火災対策基準の中で「一般的に、コンコース階から地上への階段幅は、ホーム階段および改札口の幅に比べて広く、さらにホーム階旅客のコンコース階までの避難時間も考慮すれば、コンコース階旅客が、ホーム階旅客の避難時間に影響を与えることが少ないため」と理由が示されている。つまり、地下という空間的な制約により、ホーム数が少なく、コンコースが比較的小さい傾向にある地下駅においては、避難時間が旅客数の多いホーム階で決まるため、コンコースの人数を考慮しなくてもよいものとしている。

一方で、橋上駅や地上駅のターミナル駅等においては、コンコース部分の面積は十分に大きい場合が多く、ホーム数も多いことから、ホーム側の避難者数と併せてコンコース部分の避難者数も考慮する必要があるが、そのためには大規模な流動調査等を実施して避難者数を把握しなくてはならず、現状では積極的な避難安全性の検証はなされていない。

2.2 推定式の提案

コンコース部分における避難者数を推定するために、実駅におけるコンコースの密度計測を実施した。調査対象駅を表3に示す。計測は各駅の朝ラッシュ時の混雑のピーク時間30分間について行い、各駅のコンコース部分(5箇所/駅)の2m×2m内にいる人数を5秒毎に計測した。

調査結果を基に、駅コンコース部分の避難者数を予測するための推定式を作成した。推定式では、駅の旅客流動に関連する要素として考えられる「駅利用者数、動線数、コンコース面積、対象となる場所(改札付近か否か)、

$$\rho_{con} = 0.128 \times N_{sta} + 0.022 \times R_{con} - 0.007 \times A_{con} + 0.223 \times P_{gate} - 0.113 \times P_{con} + 0.582 \quad (1)$$

$\rho_{con}$	: 対象となるコンコースの場所の密度 [人/m <sup>2</sup> ]
$N_{sta}$	: 駅の利用者数[千人]の偏差(改札データ5分間の累計人数-1.822)
$R_{con}$	: コンコースの動線数の偏差(動線数-7.09)
$A_{con}$	: 駅のコンコース面積[百m <sup>2</sup> ]の偏差(面積-9.12)
$P_{gate}$	: 対象となるコンコースの場所が「改札」のとき「1」 その他は「0」
$P_{con}$	: 対象となるコンコースの場所が「改札」以外のとき「1」 その他は「0」

列車本数」(表4)を対象とし、最も密度との相関が高い説明変数の組み合わせとなった、列車本数以外を用いた式(1)を採用した。推定式は、カテゴリーデータと数量データの両方を扱う拡張型数量化1類による回帰分析で求めている。

計測した密度(5分平均)の値と推定式から求めた密度の関係を図1に示す。また、A駅について実施した、在館者数の調査結果(旅客流動シミュレーション<sup>6)</sup>による再現)と推定式による在館者数の比較を図2に示す。

表2 地下駅の避難安全性の照査対象者

出火場所		避難安全性の照査対象者			
		列車運行	列車乗客	駅旅客	
車両	駅間	停止	○	×	×
	駅	駅	次駅まで走行	○	×
停止		○	○	×	
ホーム売店	ホーム売店	○	○	×	
	コンコース売店	×	○	×	
	居室	×	×	×	
トンネル(ケーブル)	停止	○	×	×	
	次駅まで走行	×	×	×	

表3 流動調査駅の概要

	一日の乗車客数 <sup>5)</sup>	ホーム数	コンコース面積(m <sup>2</sup> )
A駅	1万人~5万人	2	450
B駅	10万人~15万人	4	700
C駅	5万人~10万人	6	1800
D駅	1万人~5万人	4	1700
E駅	20万人~25万人	10	4000

表4 コンコース密度推定のためのパラメータ

駅の利用者数	改札機から得ることが出来るデータの最小単位幅が5分間であることから、5分間の累積利用者数。
コンコース面積	駅のコンコース全体の床面積
対象となる場所	改札付近は密度が高い傾向にあるため、改札付近か否かを判断。
列車本数	5分間に発着する列車の本数。
動線数	下図に示す動線数を各対象エリアについて使用している。コンコース間のエリア分けは、動線数の変化部分を境目としている。

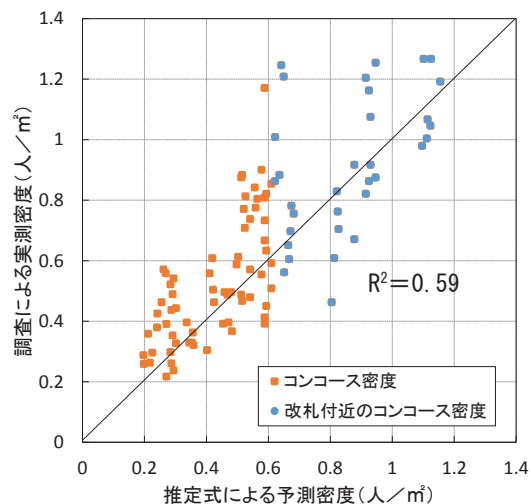
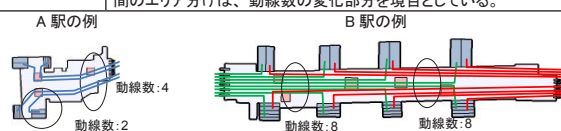


図1 実測値と推定式の密度

密度の計測箇所が局所的ではあるものの、図2では告示の値として代用されているコンコースの密度0.25人/m<sup>2</sup>よりも値が高く、コンコース内の空いている箇所と混んでいる箇所、在館者が偏在している可能性があることがわかる。

推定式に用いた説明変数は固定値（床面積や動線数など）が多い一方で、実際の密度は列車の発着による波動があるため、図1では両者間の関係にばらつきがでる結果となっているが、図2に示す駅全体の在館者で比較すると、推定式では、コンコース部分の最少人数に近い値を表現できていることが分かる。推定式による在館者数に一列車からの降車人数（60人）を足した値を見ると、実際の在館者数（旅客流動シミュレーションの結果）をほぼ包含できていることから、降車を見込まないコンコース部分の在館者密度の予測として本推定式が利用可能であることが確認できた。

### 3. 避難安全性検証システム

#### 3.1 システムの概要

避難安全検証システムでは、前章のコンコースにおける避難者数の推定式を利用した避難時間（全旅客が各改札を出るまでの時間）を計算し、火災発生による煙の拡散状況（以下、煙降下時間）と比較することで、駅の安全性を評価している（図3）。また、避難時間よりも煙降下時間の方が早い場合には、避難誘導を行い、避難時間の短縮が可能かを検討できる機能を有している。

これらの計算を行うために、汎用の衝突回避モデルRVO<sup>7)</sup> (Reciprocal Velocity Obstacle) をベースとし、既出の旅客流動シミュレーションの行動特性を反映させたマルチエージェントタイプの避難シミュレーションを作成した（図4）。避難シミュレーションでは、使用者の検証時の作業負担を軽減するために、昨今導入が進むBIM (Building Information Modeling) の共通入出力形式であるIFC (Industry Foundation Classes) をインプットデータとすることで、容積等の空間条件や、避難者数算定のための床面積データを自動で設定できる仕組みとしている。

#### 3.2 避難時間の計算

##### 3.2.1 最短経路避難

旅客が避難する際の経路については、改札方向へ向かう最短経路をポテンシャルマップとして与えている。ポテンシャルマップでは、対象平面を300mm単位のメッシュに分割し、改札地点のポテンシャルを最も低い値である0とし、各隣接メッシュに対して改札地点から+1ずつ単純増加するポテンシャルを与えている。

最短経路避難では、現在位置のポテンシャルよりも低

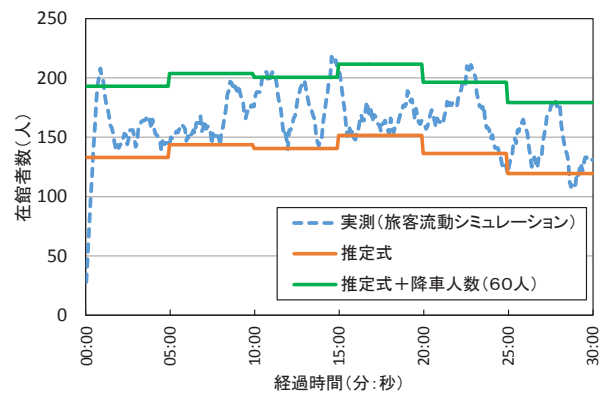


図2 再現流動と推定値の比較（A駅）

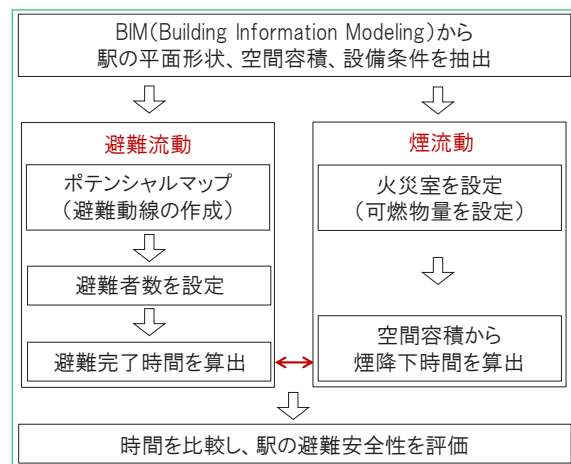


図3 避難計画支援システムのフロー

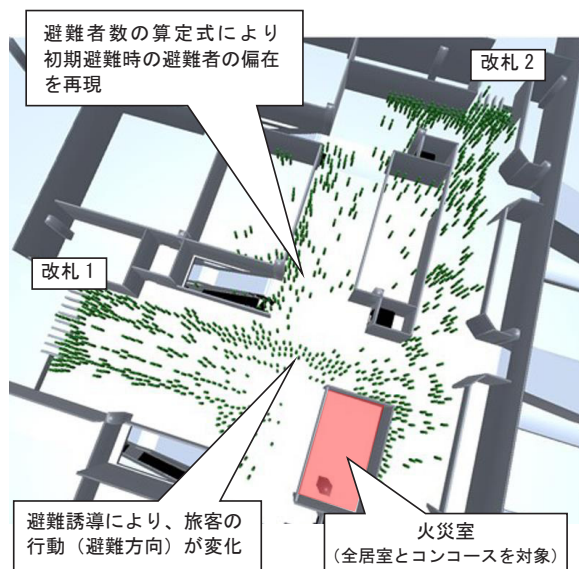


図4 避難シミュレーションの出力例

い側のポテンシャルへ移動することを基本としており、目的のメッシュが混んでいる場合には、周辺の密度と歩行速度の関係から、自身の前方180度の範囲内で最も移動速度が速くなるメッシュに移動する計算を実行している。

特集：防災技術

3.2.2 音声放送による避難誘導

駅には多くの放送設備が設置されているため、これらを利用した音声放送による避難誘導を実施することで、より効率的に避難を行える可能性がある。そこで、どのように旅客を誘導すればよいかの基礎的知見を得るために、音声放送による二放送間の音量差と放送内容、また、案内サインの提示条件を変化させた場合の避難行動についての被験者実験を行った。

被験者実験は、視力・聴力に問題の無い20代の男性30名で実施した。避難誘導の実験では図5に示すVRを用い、被験者が装着するヘッドマウントディスプレイ(HMD)に仮想の駅コンコースと案内サインの視覚情報を与えている。音声放送による誘導は、図6(a)に示すように、駅で録音したコンコース構内の雑踏音(約70dB)を流しながら、避難誘導放送となる放送A:「火災が発生しました、〇〇へ避難してください」と、その逆方向の内容(もしくはホーム番線や、避難方向とは異なる内容)の放送Bを65dB~80dBの間で変化させ、図7に示す案内サインと組み合わせて実施した。

実験結果を図6(b)に示す。避難誘導をしている放送とその他の放送の音量差が大きくなるほど、避難誘導に従う割合が高くなっていることがわかる。二放送間に5dB程度の音圧レベル差がある場合に、約75%の人が正解の避難放送(指示された避難方向)に従う結果が得られた。



図5 VRを用いた避難誘導実験概要

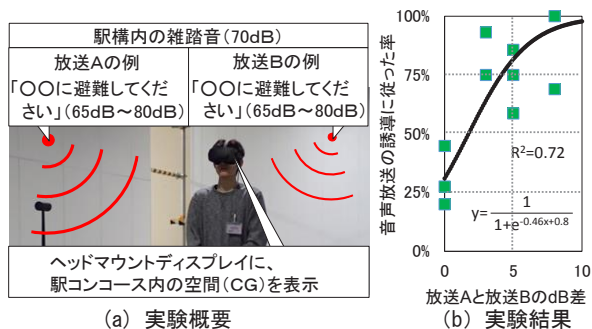


図6 避難誘導に関する被験者実験

3.3 煙降下時間の計算

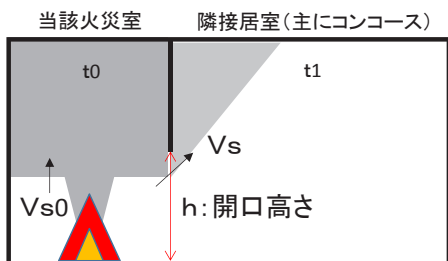
火災が発生している居室およびコンコースの煙降下時間の計算には、建設省告示1441号の階避難安全検証法<sup>3)</sup>の方法を準用した(図8)。BIMデータの中には、空間の容積や使用する内装材などの情報が含まれており、これを基に、煙降下時間の計算を半自動で実行している。

煙降下時間については、床上1.8mの高さまで煙が到達する時間としているが、火災対策基準では2.0mとしており、駅の高い安全性を確保する観点から、本システムでも地下駅と同等の2.0mを採用している。

煙の発生量の計算で必要となる居室の可燃物量については、告示で示されている計算方法を通常火災時の可燃物量として利用している。また、火災対策基準の中で示されている大火源火災(ガソリン4リットルによる放



図7 案内サインの图案の例



$$\text{煙降下時間}(\sum t_s) \text{の算定} = \sum \frac{A_{\text{room}}(H_{\text{room}} - H_{\text{lim}})}{\text{Max}(V_s - V_e, 0.01)}$$

- $A_{\text{room}}$ : 居室の床面積
- $H_{\text{room}}$ : 居室の平均天井高
- $H_{\text{lim}}$ : 限界煙層高さ(2.0m)
- $V_e$ : 排煙量
- $A_{\text{op}}$ : 開口部面積( $h \times$  開口幅)
- $af$ : 積載可燃物の火災成長率
- $V_s$ : 煙発生量(以下の防煙性能より選択)
- 二号扉、二号適合シャッター:  $0.2A_{\text{op}}$
- 一号扉:  $2A_{\text{op}}$
- その他:  $V_s0 - V_e$
- $V_s0$ :  $9 \{ (af + am) A_{\text{room}} \}^{1/3} (H_{\text{room}}^{5/3} + H_{\text{lim}}^{5/3})$
- $am$ : 内装の火災成長率

図8 煙降下時間の計算モデル

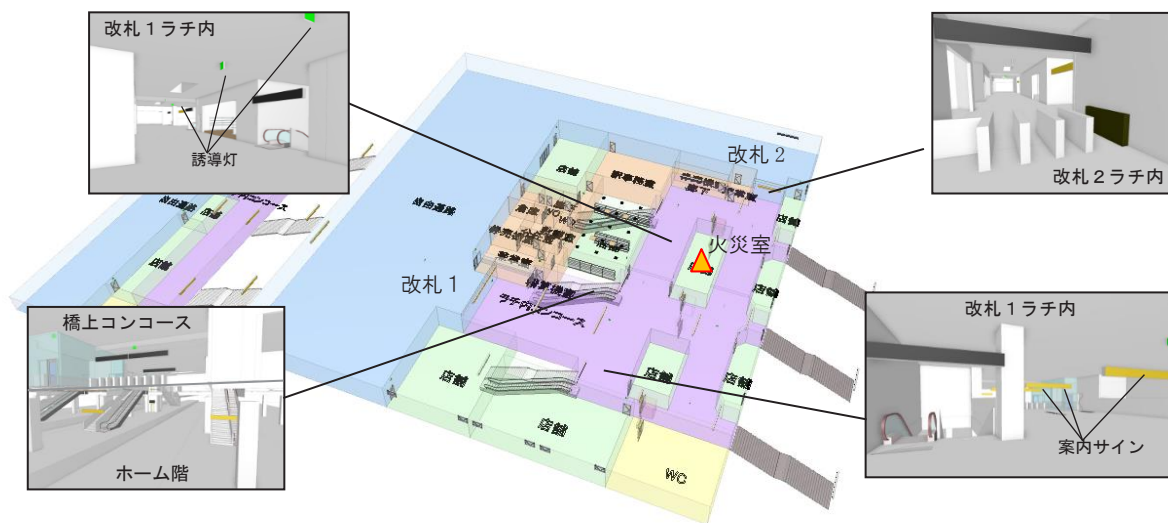


図9 BIMで作成した駅モデルと設定した火災室

火)についても検証が可能のように、火源を通常と大火源のいずれかで選択できるようにしている(大火源火災については、煙の発生量(Vs0)を火災対策基準と同じ300m<sup>3</sup>/分として計算を実行)。

得られた各改札の利用者数を避難時間で除した流量(人/秒)を利用し、この流量が各改札で同値となるように避難者数の分配を行っている。1回目の最短経路避難で

### 3.4 システムを用いた検証例

BIMで作成した駅(図9)に対して、解析を実行した例を示す。火災室は図9に示したコンコース中心付近の店舗としている。本システムの解析フローを図10に示す。

本システムでは、BIMからエクスポートされたIFCを読み込むと、各エリア(BIMで設定されたエリア)の避難者数の設定画面が表示される。2.2節で提案した推定式による密度を入力することで、各エリアの面積から避難者数が設定され、エリア内に設定された避難者数がランダムで配置される。避難者の配置が終わると、1回目の計算が開始され、全ての旅客が最短経路で避難する場合のポテンシャルマップ(図11)に従い、各改札の避難時間(旅客が改札を通過し終わるまでの時間)が計算される。これと同時に、火災室とその隣接空間への煙の拡散の計算を実行し、居室の煙降下時間と隣接空間の煙降下時間を計算している。

この計算結果を用いて、居室から旅客等が避難する時間と居室の煙降下時間を比較し、次に各改札の避難時間と隣接空間の煙降下時間を比較している。いずれかにおいて、煙降下時間の方が早い場合には、安全性が確保されていないことを示しているため、システム上の避難時間表示箇所に警告が表示され、2回目の計算(避難誘導を実施した場合)が実行される。

2回目の計算は、避難誘導を行った場合の避難時間の短縮効果を検討するものであり、各改札の容量(大きさ)に合わせて避難者を誘導した場合の避難シミュレーションが実行される。避難誘導には、1回目の計算結果より

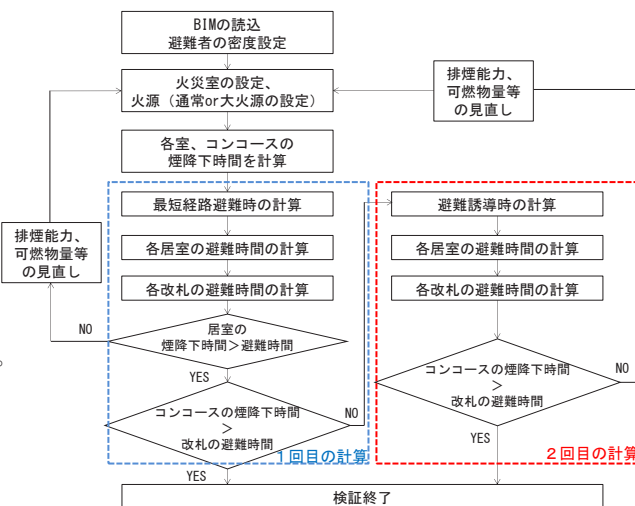


図10 避難安全性検証の解析フロー

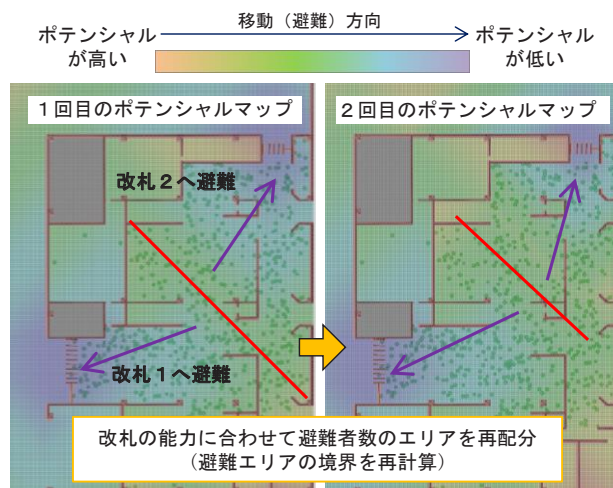


図11 避難計算時のポテンシャルマップ

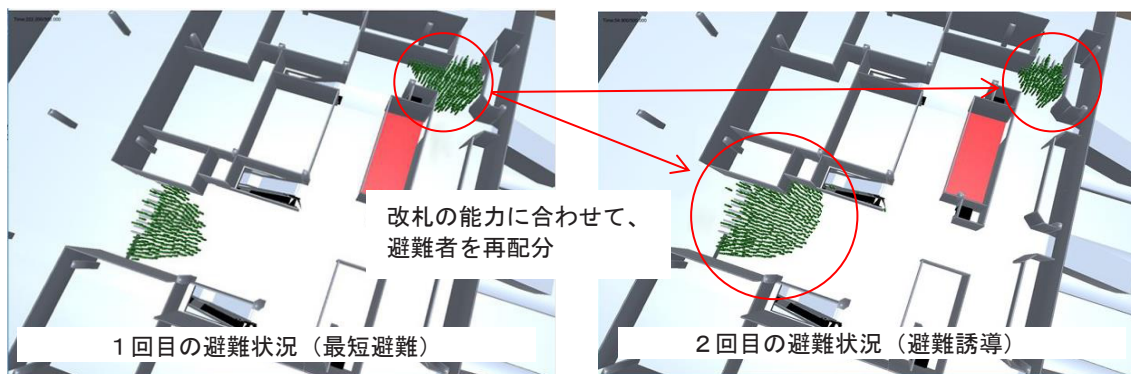


図 12 避難誘導による旅客の分散例

は、各改札から等距離の位置が、各改札利用者の境界となるが、2回目の計算では、改札からのポテンシャルの増加量を各改札の流量の逆数とすることで、避難誘導時のポテンシャルマップを作成している(図11)。また、2回目の計算で、避難誘導時のポテンシャルマップに従う避難者は、駅構内の各放送設備間で音声放送の音圧レベル差が5dB確保できた場合を想定して、被験者実験より得られた75%の人としており、その他の避難者は最短経路避難時のポテンシャルを利用して避難を行っている。

これにより、改札の容量以上に避難者が集まっている場合については、余力のある改札に旅客を再配分することで各改札間の避難時間の差を平準化し、駅全体としての避難時間の短縮が可能かを検証している(図12, 13)。なお、2回目の計算後にも、煙降下時間の方が避難時間よりも早い場合については、避難誘導によるソフト対策だけでは対応が難しいことを示しており、火災室やコンコースの排煙能力を強化するほか、可燃物量を減らすといった対策を行う必要がある。

#### 4. おわりに

本研究では、駅の避難安全性の向上を図ることを目的として、駅のコンコースを対象とした避難安全性の検証システムを開発した。本システムの特徴を以下に示す。

- (1) CADデータよりも多くの情報(床面積や設備配置等)を格納することが可能なBIMを解析の入力として用いることで、煙降下時間の計算に必要な設定値を自動で抽出するなど、避難安全性の検証負荷を軽減したシミュレーションの実行環境を構築した。
- (2) 最短経路避難時の避難状況と併せて、避難誘導を実行した場合の避難状況についても、被験者実験で得られた避難誘導効果を反映させることで検証が可能なマルチエージェントタイプのシステムを作成した。

今後は、避難シミュレーションで用いた一方向流の旅客流動解析を拡張し、複雑な交錯流動が再現可能な旅客流動シミュレーションへの適用を進める。

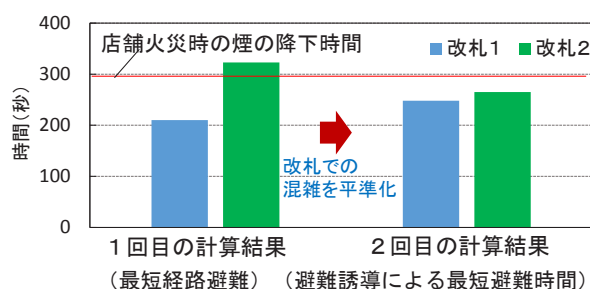


図 13 避難誘導による避難時間の短縮効果

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

#### 文献

- 1) 藤井皓介他：階順次避難における避難開始時間の差異が混雑状況及び階避難完了時間に与える影響—大規模鉄道駅の火災避難時における利用者の避難経路選択方略に関する研究 その2—, 日本建築学会大会(北海道) 学術講演梗概集, pp.375-376, 2013
- 2) 階避難安全検証法：平成12年建設省告示1441号
- 3) 東京消防庁 火災予防審議会 人命安全対策部会(第19期) 複合化するターミナル施設の防火安全対策のあり方：<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-yobouka/fukugouterminalanzen/index.html> (参照日：2019年6月3日)
- 4) 土木関係技術基準調査研究会編：解説鉄道に関する技術基準(土木編)第三版, 国土交通省鉄道局監修, 2014
- 5) JR東日本 各駅の乗車人員：<https://www.jreast.co.jp/passenger/> (参照日：2019年6月3日)
- 6) 安藤恵一郎他：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, pp.375-376, 1991
- 7) Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation：<http://gamma.cs.unc.edu/RVO/> (参照日：2019年6月3日)