混雑回避のための出口選択行動を伴う セルオートマトン法による 歩行者シミュレーションの精緻化

森本　陽
慶應義塾大学大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻
オープンシステムマネジメント専修 栗田研究室 所属

災害避難シミュレーションの既存研究

非常に多くの既存研究
事前に避難状況を正確に予測する.

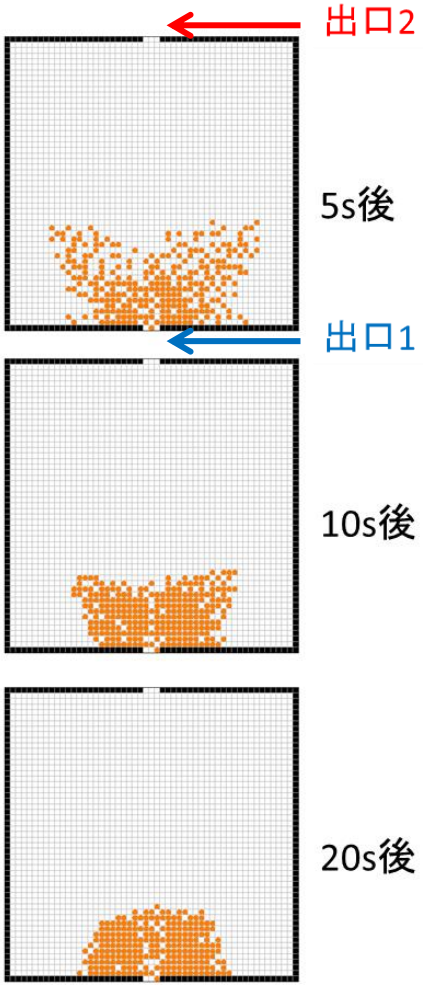
多くの研究における問題点

歩行者は混雑に関係なく最寄りにある出口を避難先として選択（例.林ら（2011），北島ら（2011），Nishinari（2008））

現実の歩行者との違い

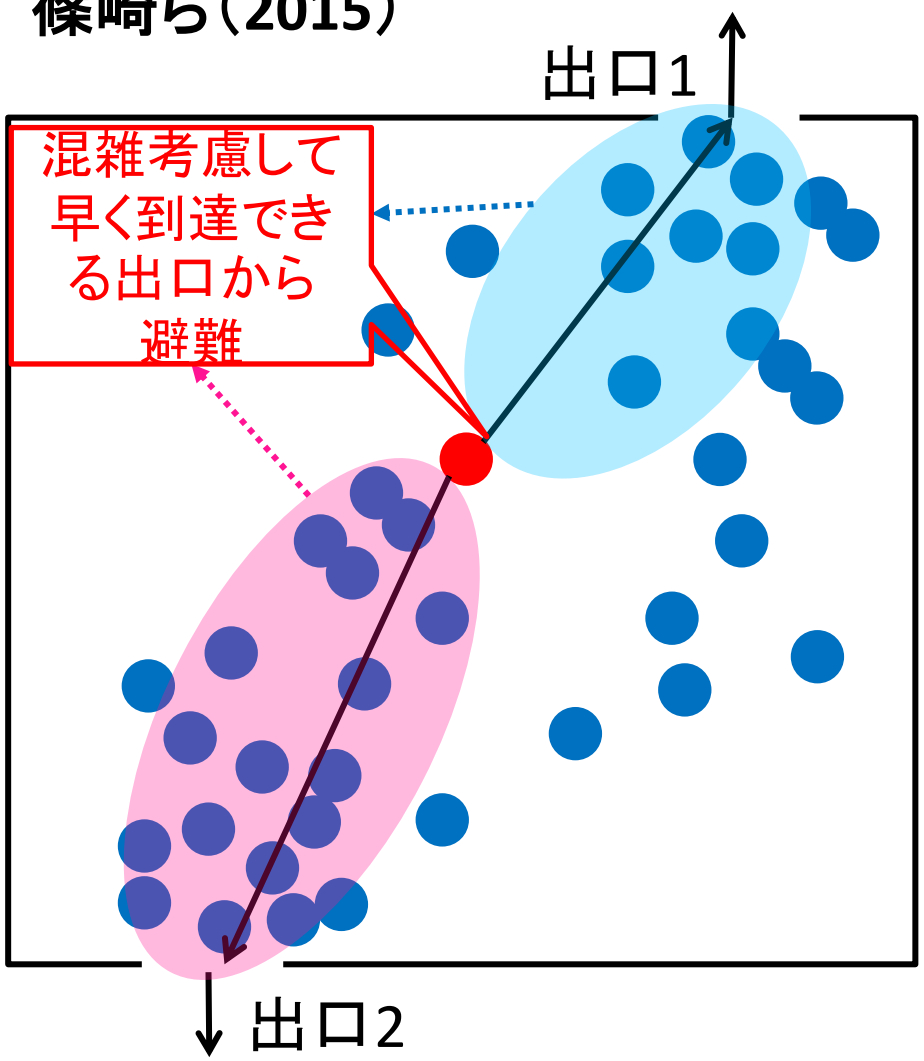
最寄りにないが混雑していない出口から早く避難したいと考える.

300人が室内から避難する様子



混雑を考慮した出口選択を行う歩行者モデル

篠崎ら（2015）



問題点1

- 周囲状況に関して不自然にまで正確な把握
  - ・室内にいる他者数
  - ・逐次脱出する他者数

問題点2

- 全体を見渡せない複雑な構造には適用不可

問題点3

詳細な分析は行わず，シミュレーションに導入

本研究の目的

第一の目的

混雑を考慮して出口選択する歩行者モデルの構築

- 歩行者の行動として自然
- 場所に関係なく適用可能

第二の目的

混雑を考慮して出口を選択することが避難効率に与える影響を分析

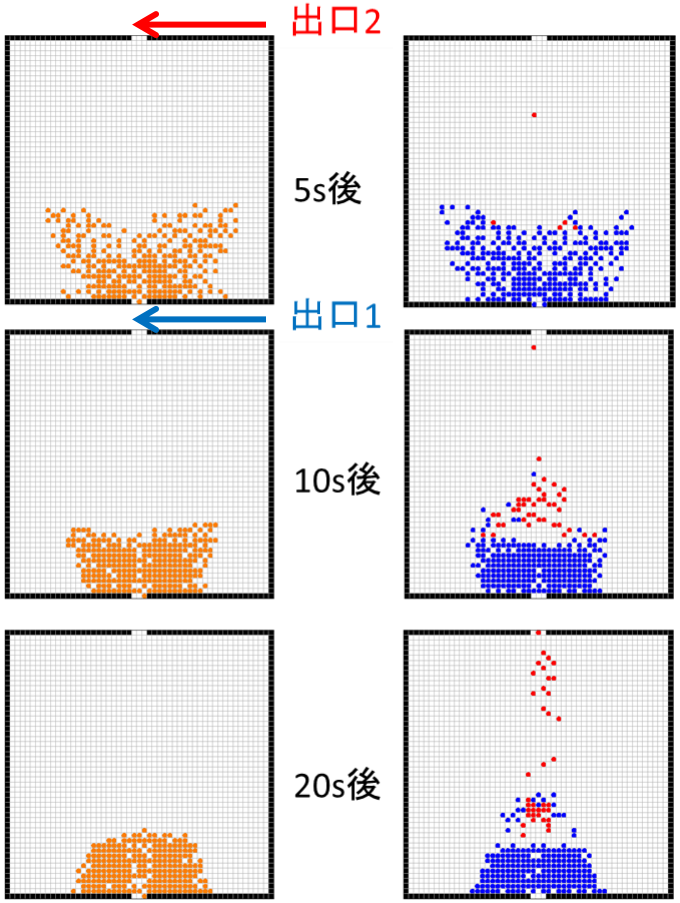
第三の目的

提案モデルを用いた避難計画立案への応用方法の提案

- 現実に存在する地下鉄をモデルにした空間からの避難

提案モデルによる災害避難シミュレーション

300人が室内から避難する様子



(a) 最寄りの出口を選択　(b) 混雑を考慮して出口を選択

出口2から歩行者が避難するようになる.

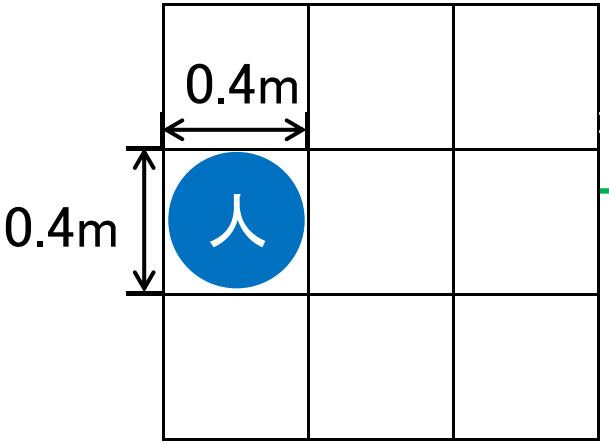
- artisoc 3.0利用（構造計画研究所開発）

モデル｜概要

モデル化手法：セルオートマトン法

空間モデル

- 時間経過：離散的なステップ数
  （0.1s=1ステップ）
- 空間の表現（右図）



歩行者モデル

性質：セル間の移動・方向・情報認識範囲・衝突時の対応

行動

混雑を考慮した出口選択

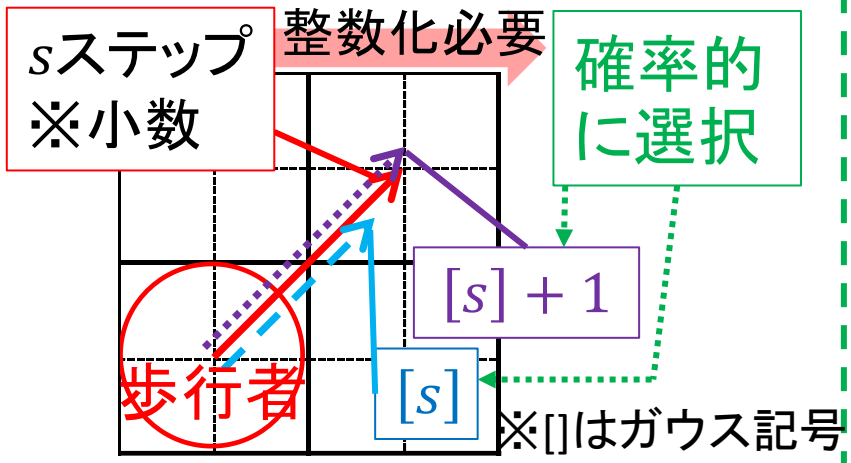
↓

移動先セルの選択

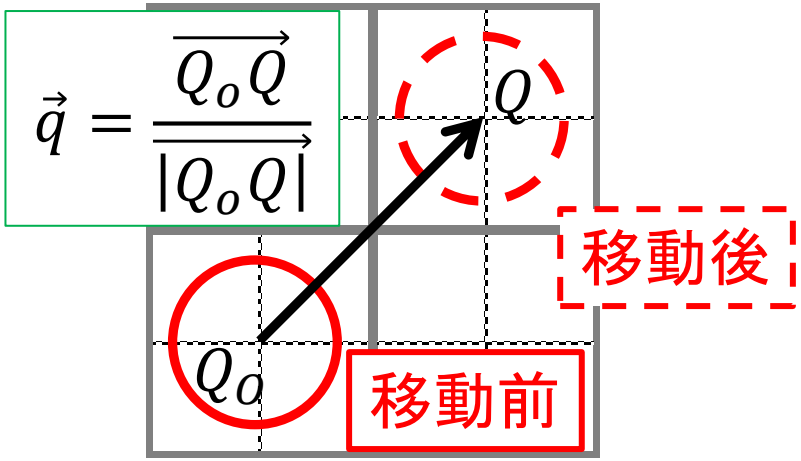
歩行者モデル｜性質

参考：大鋳ら（2008），横川ら（2013）

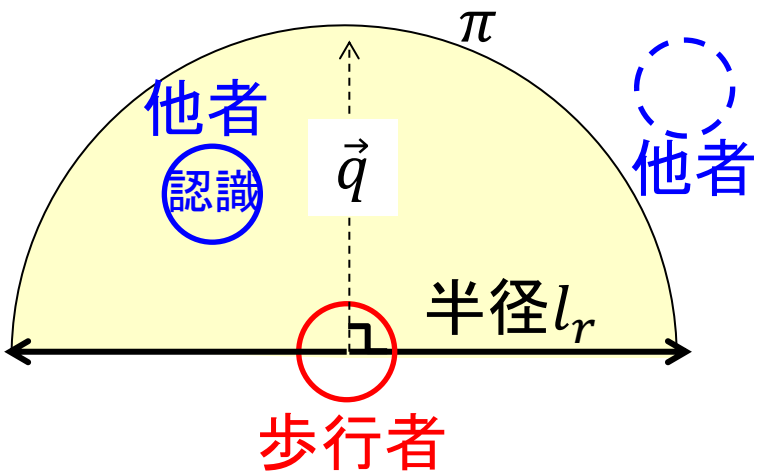
セル間移動（1ステップ=0.1s）



方向（単位ベクトル$\vec{q}$）

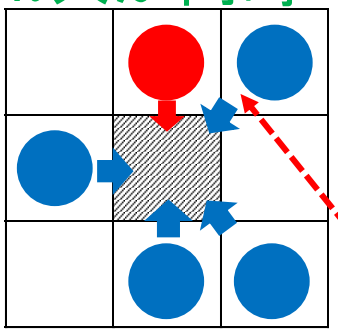


情報認識範囲（色付き）



衝突時（同時に同一のセル）

k人が同時



$\mu = 0.5$が妥当

確率$1-\mu$で
$k-1$人が
移動続行しない

確率μで移動続行

移動実現

歩行者モデル｜移動先セルの選択

歩行者モデル

性質：セル間の移動・方向・情報認識範囲・衝突時の対応

行動

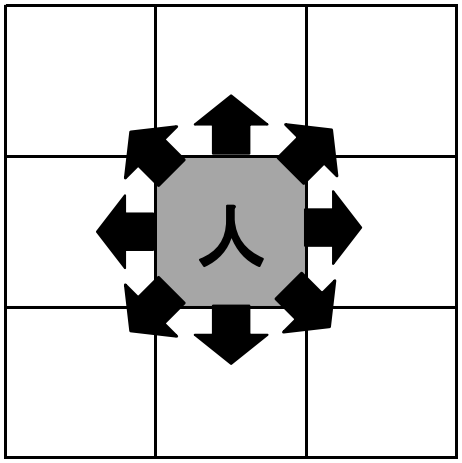
混雑を考慮した出口選択

↓

移動先セルの選択※参考論文：江崎ら（2011）,柳沢ら（2006）

- 移動候補セルの集合：ムーア近傍

現在位置
＋
隣接する8セル



セルごとに異なる魅力度

- 出口までの距離
- 他者との距離

etc…

歩行者モデル｜移動先セル(i,j)の選択

個人差を表現：非集計ロジットモデル適用

$C_{i,j}$ ：出口まで短い距離で到達できることが魅力的	$D_{i,j}$ ：他者が移動する方向にあるセルが魅力的	$P_{i,j}$ ：混雑していないセルが魅力的
$\times k_c$	$\times k_d$	$\times k_p$

移動効用関数$V_{i,j}$

$$V_{i,j} = -k_c C_{i,j} + k_d D_{i,j} - k_p P_{i,j}$$

移動選択確率$p_{i,j}$

$$p_{i,j} = \frac{e^{V_{i,j}}}{\sum_{(x,y)\in M} e^{V_{x,y}}}$$

M：ムーア近傍

(x,y):ムーア近傍のセル

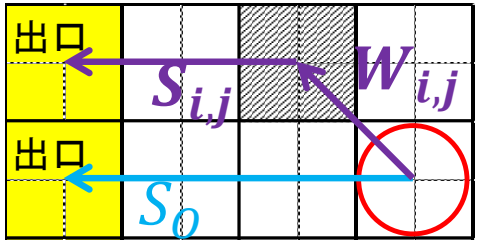
歩行者モデル｜移動先セル(i,j)の選択

※ 当該歩行者 他者 セル(i,j) $\boldsymbol{U} = \{\boldsymbol{u}|$情報認識範囲内$\boldsymbol{u}$番目他者$\}$

$C_{i,j}$：出口への移動に余分な距離

- 移動距離が最短に近いほど魅力的

$$C_{i,j} = W_{i,j} + S_{i,j} - \boxed{S_O}$$



$D_{i,j}$：他者への追従に関する状態量

L_u:当該歩行者と他者間の最短距離

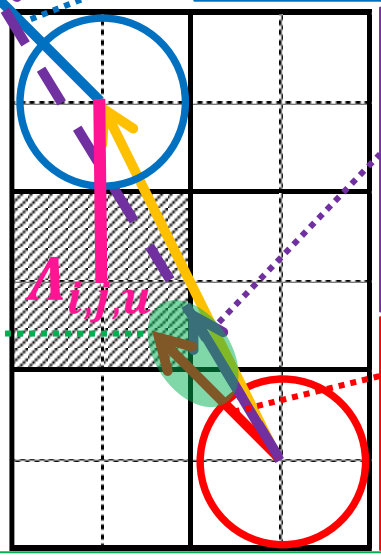
$$D_{i,j} = \sum_{u \in U} \frac{\text{内積}}{L_u}$$

ずれが小さいほど魅力的

$P_{i,j}$：混雑度合いに関する状態量

- 混雑してないほど魅力的

$$P_{i,j} = \sum_{u \in U} \frac{1}{\Lambda_{i,j,u}}$$



他者の方向ベクトル

相対的位置を考慮した他者の方向ベクトル

当該歩行者の方向ベクトル

歩行者モデル｜妥当性検証

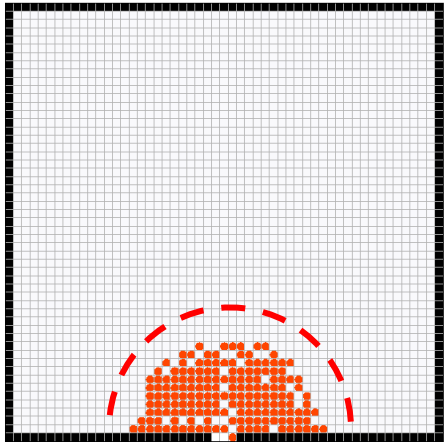
参考論文：Nishinariら(2008)，郷古ら(2015)

現実に観察される2つの現象を再現することを妥当性の要件

$$k_c = 40[1/距離],\ k_d = 2[距離/人],\ k_p = 2[距離/人]$$

アーチ現象

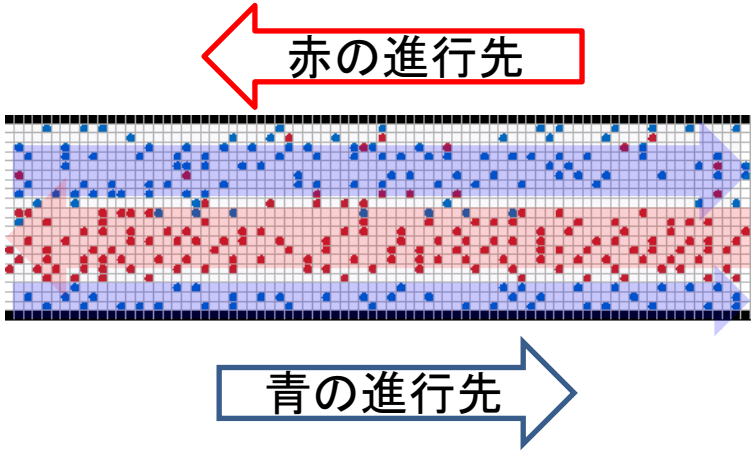
- 出口に人がアーチ型に押し寄せる現象



出口

隊列化現象

- 2方向に行き交う人の流れが方向ごとに隊列をなす現象



歩行者モデル｜混雑を考慮した出口選択

歩行者モデル

性質：セル間の移動・方向・情報認識範囲・衝突時の対応

行動

混雑を考慮した出口選択

現在地から各出口rまでの，

歩行者密度を想定

↓

移動速度v_rを想定

↓

移動時間T_rを想定

↓

想定移動時間が最短の出口を選択

L_r：現在地から出口rまでの最短距離

$$T_r = \frac{L_r}{v_r}$$

↓

移動先セルの選択

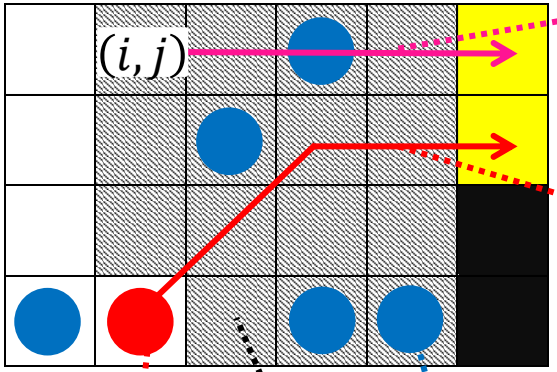
歩行者モデル｜混雑を考慮した出口選択

現在地から出口rまでの歩行者密度

想定

情報認識範囲内の出口r方向の歩行者密度ρ_r

$V = \{(i,j) | (i,j)$は情報認識範囲内のセルの位置$\}$



情報認識範囲内，
かつ歩行者よりも
出口rに近いセル

$L_{i,j,r}$:セル(i,j)から出口rまでの最短距離

$\wedge$

L_r : 現在地から出口rまでの最短距離

ρ_rを計算する際の対象領域内のセル(i,j)

個数×0.16（セル1つ分の面積）

ρ_rを計算する際の対象領域の面積

存在する他者の人数

$$\rho_r = \frac{N_r}{S_r}$$

歩行者モデル｜混雑を考慮した出口選択

現在地から出口rまでの歩行者密度ρ_r^m

想定

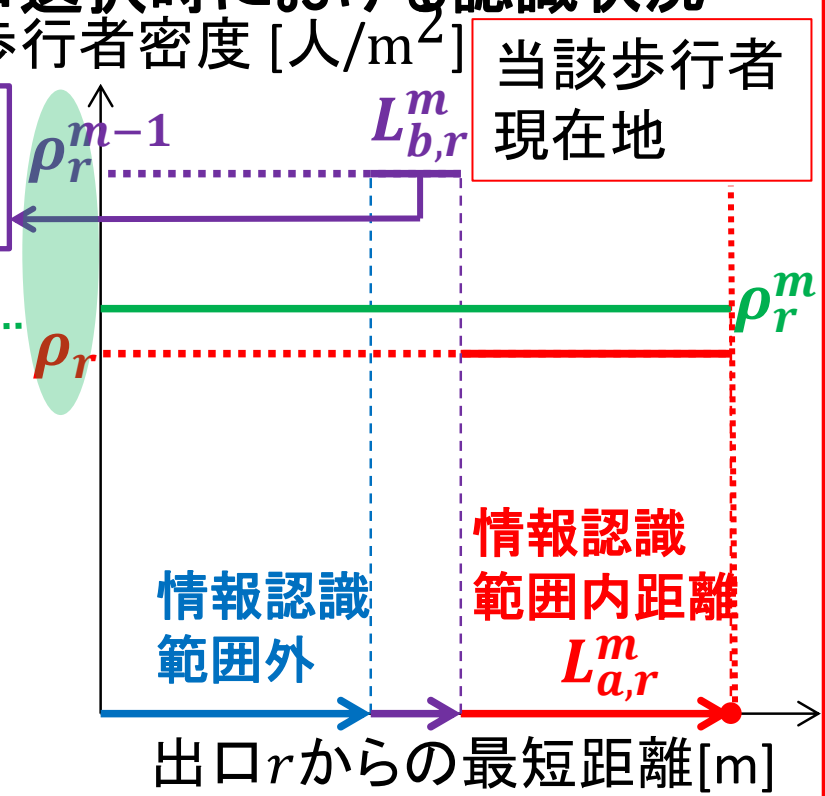
情報認識範囲内の出口r方向の歩行者密度ρ_r

（避難開始時から）m回目の出口選択時における認識状況

過去に認識したことがある範囲
※$m-1$回目にも推定

占める距離による加重平均

$$\rho_r^m = \frac{L_{b,r}^m \rho_r^{m-1} + L_{a,r}^m \rho_r}{L_{a,r}^m + L_{b,r}^m}$$



歩行者モデル｜混雑を考慮した出口選択

ρ_r^m ＝ (現在地から出口rまでの歩行者密度)
※避難を開始からm回目の出口選択.

現在地から出口rへ移動する際の速度v_rの想定

戸川式（1955）利用（理由：災害避難実験に基づく）

$$v_r = \begin{cases} v & (\rho_r^m \leq N/v) \\ N/\rho_r^m & (\rho_r^m > N/v) \end{cases}$$

歩行速度vを超えないよう修正

1sに1mあたり通過できる人数

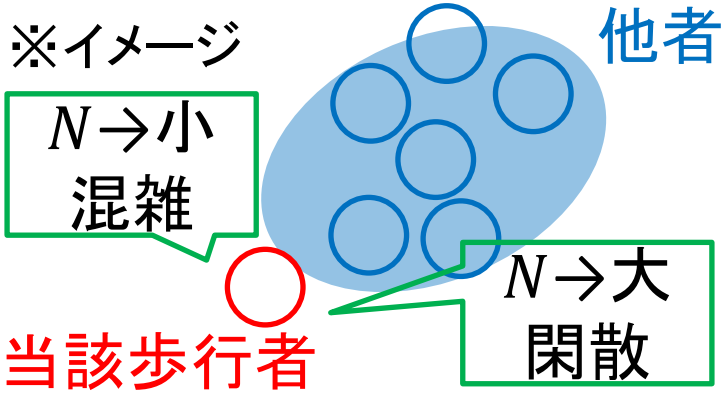
小

混雑を大きく見積もる

大

混雑を小さく見積もる

※イメージ



シミュレーション｜概要

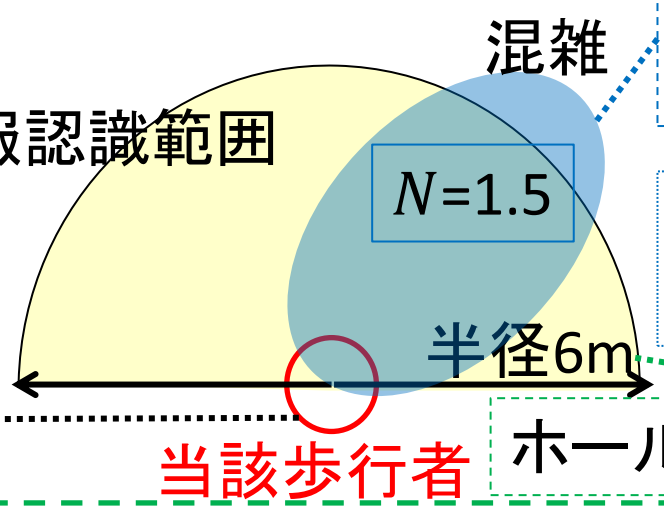
目的

- 混雑を考慮して出口を選択することが避難効率に与える影響を分析

居室1：単純な構造の室内

居室2：映画館（複雑な構造）

基本設定



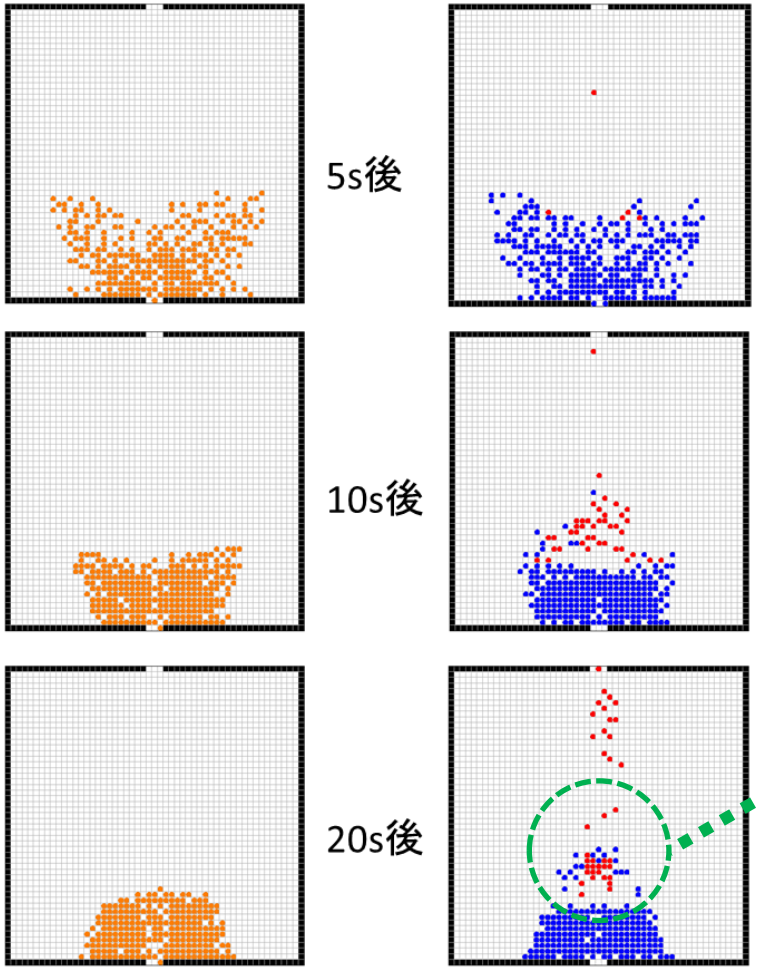
戸川（1955）の実測結果を参考

過去の経験から身に付く値

すべての出口までの経路を把握

ホール（1970）の研究を参考

シミュレーション｜居室1（単純な構造）



(a) 最寄りの出口を選択　(b) 混雑を考慮して出口を選択

シミュレーション条件

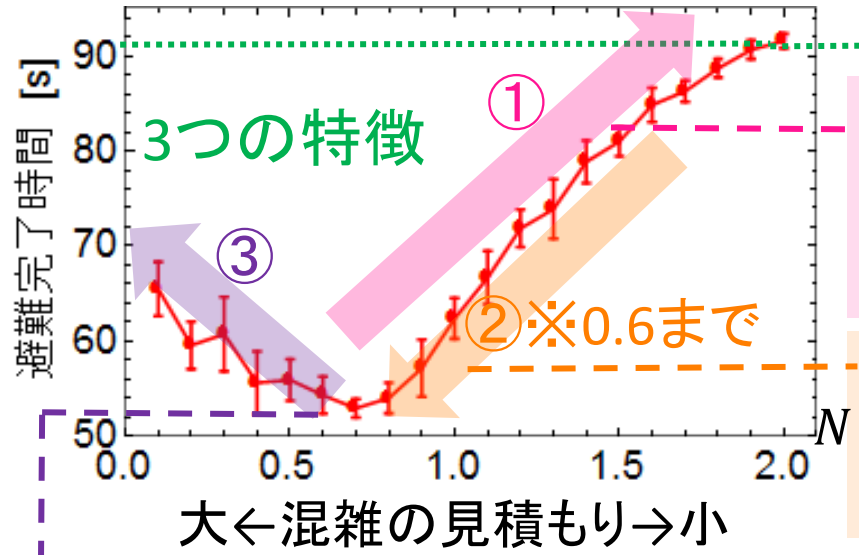
名称	数値
避難者数	300名
歩行速度	1.00m/s
群衆流動係数N	0.1～2.0を0.1刻み
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m

頻繁に混雑を考慮して出口選択する歩行者

↓

他の歩行者から遅れて避難

シミュレーション｜居室1（単純な構造）



90.57s（最寄りの出口から避難）

混雑の見積もり小さくなる

妥当性

最寄の出口を選択しやすくなる

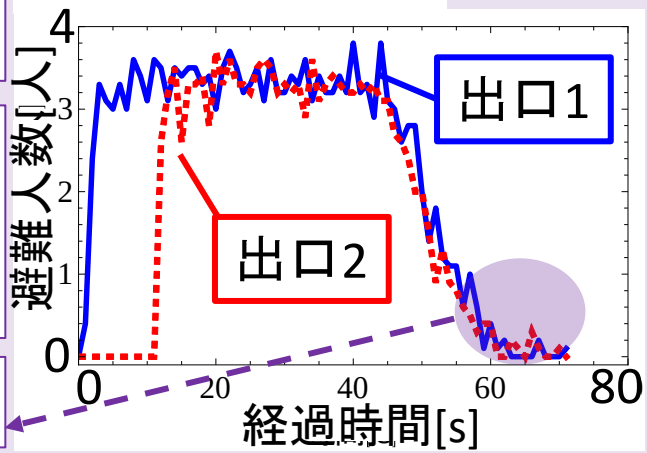
出口2へ歩行者が分散

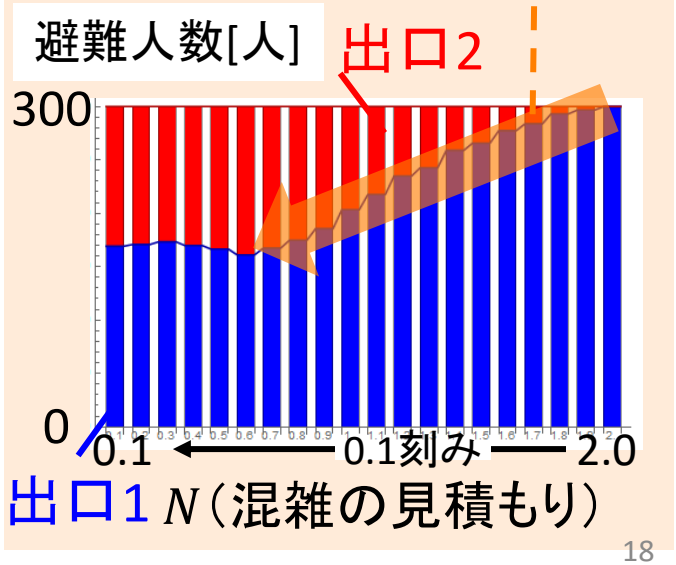
混雑を感じやすくなる

長時間出口に近づかない歩行者

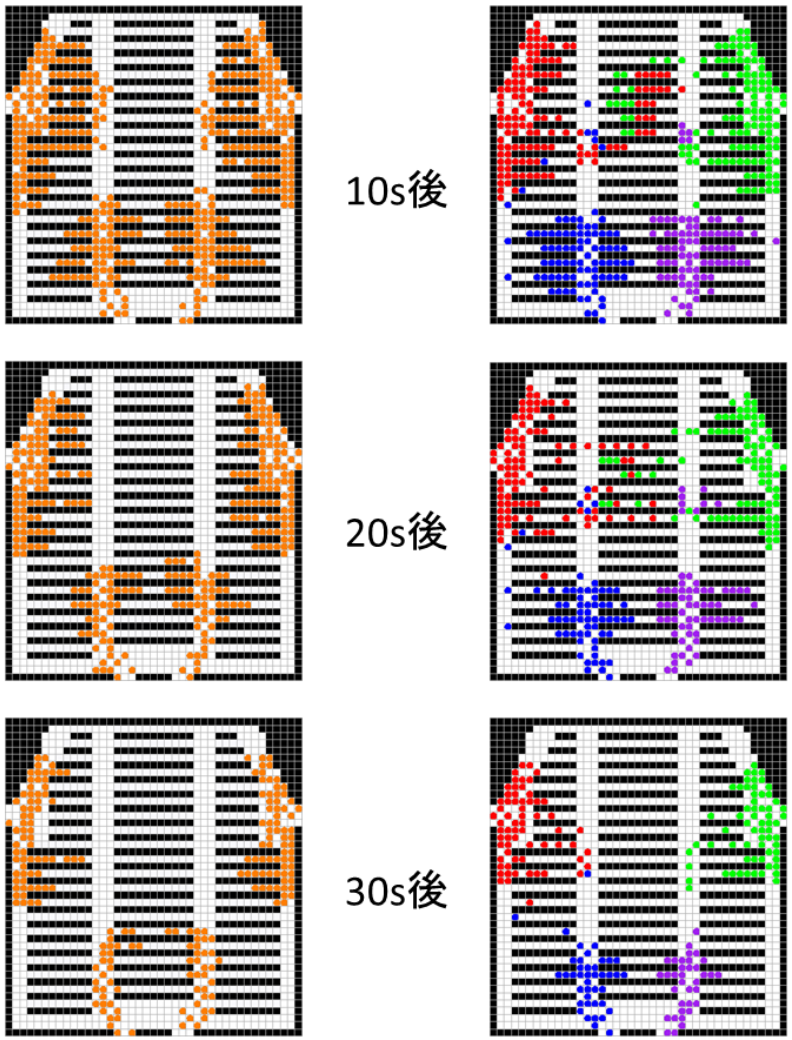
遅れて避難

$N = 0.1$の場合





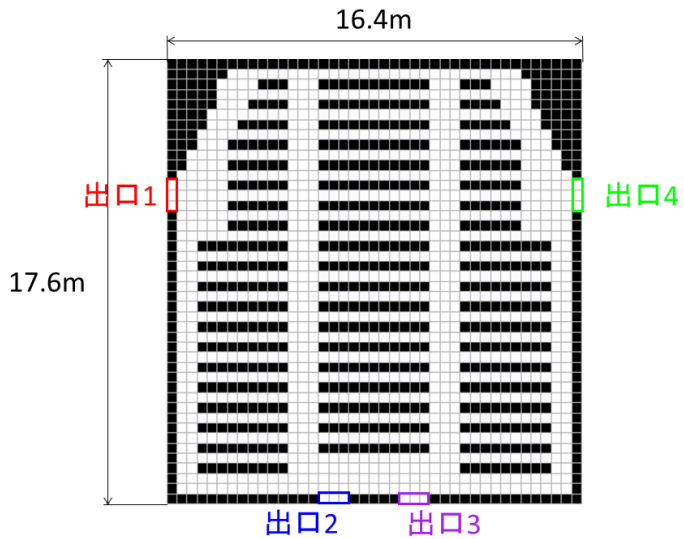
シミュレーション｜居室2：映画館（複雑な構造）



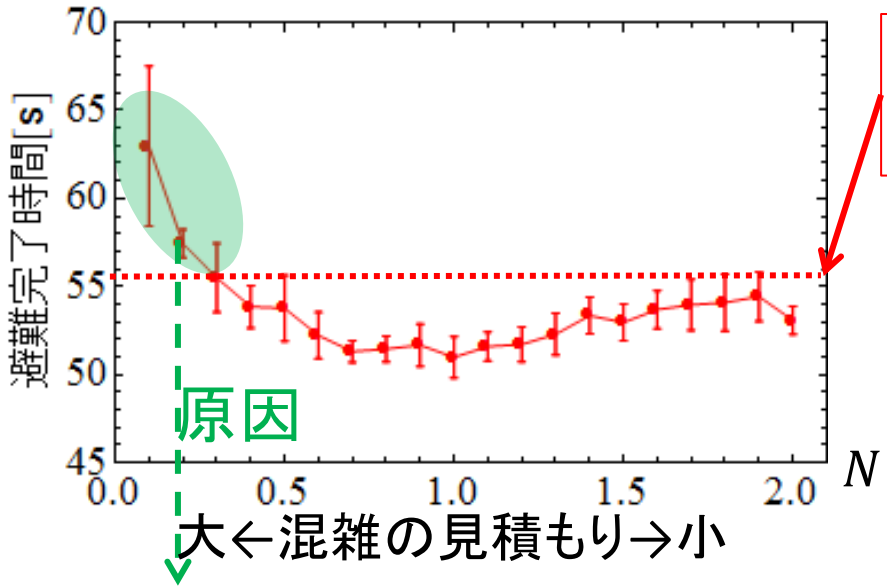
(a) 最寄りの出口を選択　(b) 混雑を考慮して出口を選択

シミュレーション条件

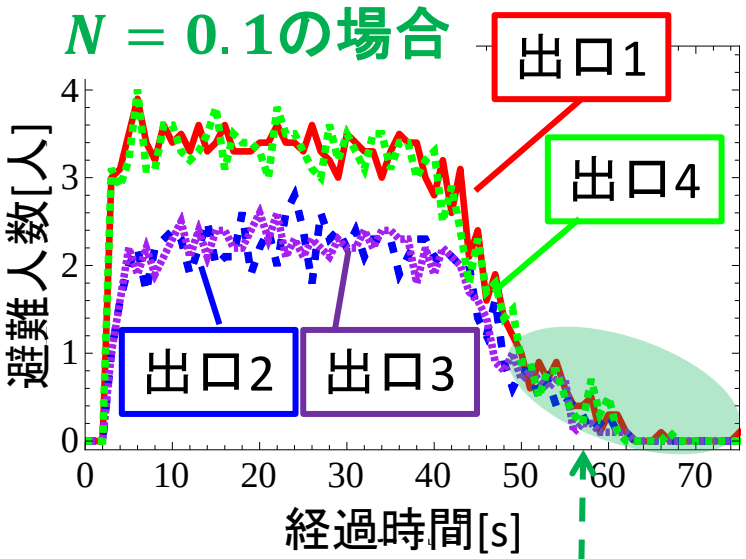
名称	数値
避難者数	509名
歩行速度	1.00m/s
群衆流動係数N	0.1～2.0を0.1刻み
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m



シミュレーション｜居室2：映画館（複雑な構造）



55.84s:最寄りの出口を選択する場合



混雑の見積もり大

相乗効果

複雑な構造により混雑を感じやすい

避難完了間近まで出口に近づかない歩行者の存在

数人の歩行者が遅れて避難

- **避難完了時間が長くなる**
- **標準偏差が大きくなる**

提案モデルから避難計画立案への応用

混雑を考慮した出口選択行動が避難効率に与える影響

1.混雑からの影響を見積る大きさが変化

2.避難先出口を頻繁に変更

3.混雑を感じやすい複雑な構造

相乗効果

出口に近づかずうろつき，遅れて避難する歩行者の存在

避難完了時間が大幅に変動

避難完了時間が長くなる傾向

防災避難計画の上での示唆

- 個々の判断にゆだねないよう避難指示を与える必要性

避難計画立案｜概要

各出口からの距離に重みづけして室内をボロノイ分割

- 領域にしたがって歩行者を各出口へ指示
- 重みw_r[m]だけ各出口rからの距離が短いように感知させる.

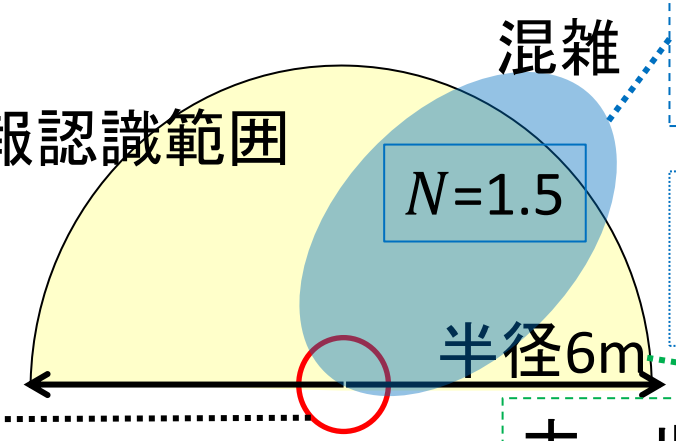
居室1

居室2：映画館

全館：地下鉄

避難計画の有効性について検討する.

基本設定



戸川（1955）の実測結果を参考

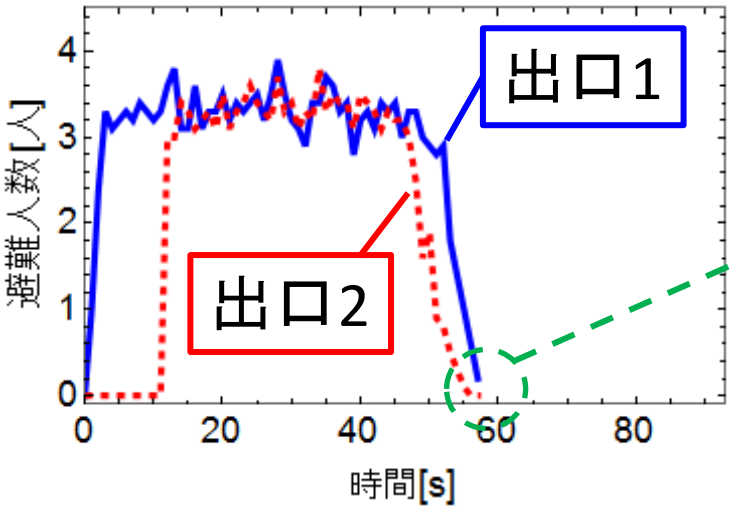
過去の経験から身に付く値

すべての出口までの経路を把握

ホール（1970）の研究を参考

避難計画立案｜居室1（単純な室内）

避難完了時間が
最短53.97sの場合（$w_2 = 8.0$）



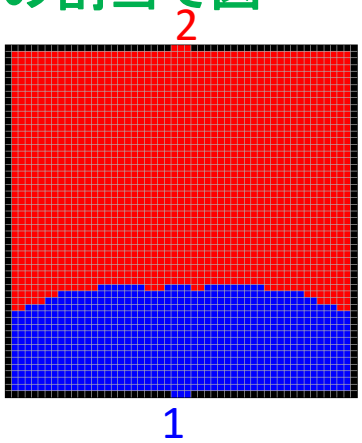
※w_2[m]だけ,出口2を近くにあるように設定.

※最寄の出口から歩行者が避難する場合の避難完了時間は90.57s

- 両出口から最後の歩行者が避難する時間が近い.

- 適切に歩行者を各出口へ配分

出口の割当て図



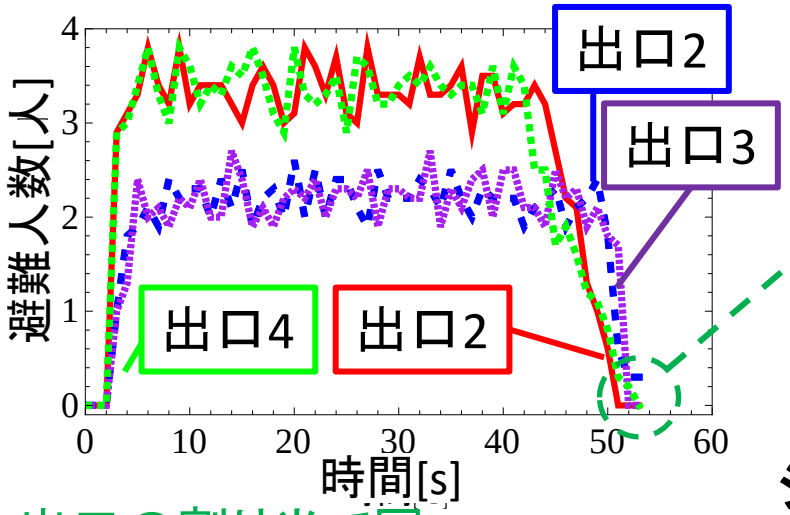
色と指示
青：出口1
赤：出口2

シミュレーション条件

名称	数値
避難者数	300名
歩行速度	1.00m/s
重みw_2[m]	0～20.4を1.6刻み
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m

避難計画立案｜居室2:映画館(複雑な構造)

避難完了時間が最短51.19sの場合($w_2 = w_3 = 1.6$)



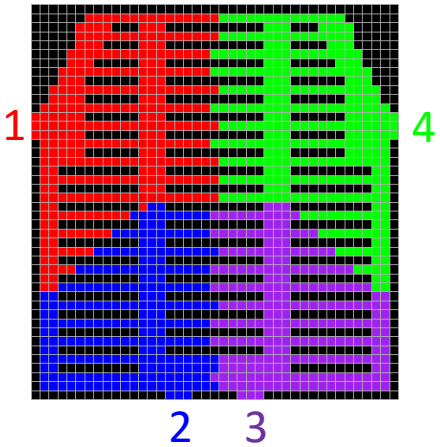
※w_2[m](またはw_3)だけ,出口2(または出口3)を近くにあるように設定する.

※最寄の出口から歩行者が避難する場合の避難時間は55.84s

- 全出口から最後の歩行者が避難する時間が近い.

- 適切に歩行者を各出口へ配分

出口の割り当て図



色と指示

赤:出口1

青:出口2

紫:出口3

緑:出口4

シミュレーション条件

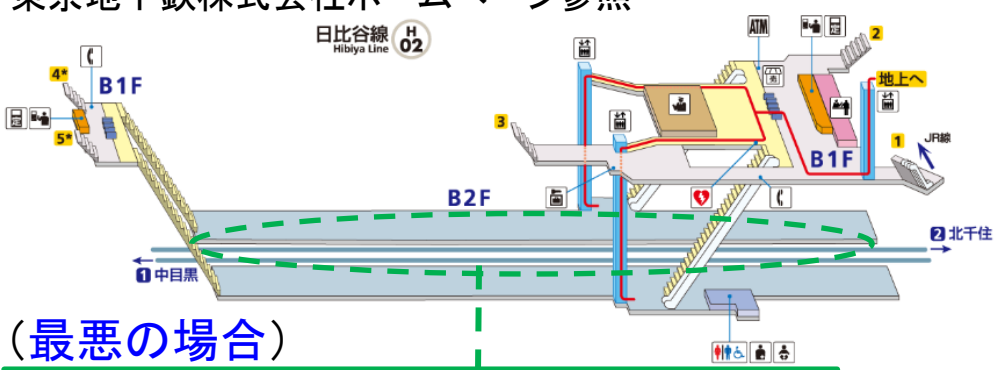
名称	数値
避難者数	509名
歩行速度	1.00m/s
重みw_3(w_4)[m]	0～14.4を1.6刻み
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m

避難計画立案｜全館：地下鉄

地下鉄からの避難（より現実的な例）→日比谷線恵比寿駅
- 地下2階の比較的複雑な構造
- 1日の乗降客数が多い

日比谷線恵比寿駅（以下，H線E駅）モデル化
- 東京地下鉄株式会社から許可をいただいた範囲で調査
- 構内図の利用，歩数による推定（2014年10月9日）

東京地下鉄株式会社ホームページ参照



（最悪の場合）

上下線2つの電車が同時に到着
（乗車率100%で1587人乗車）

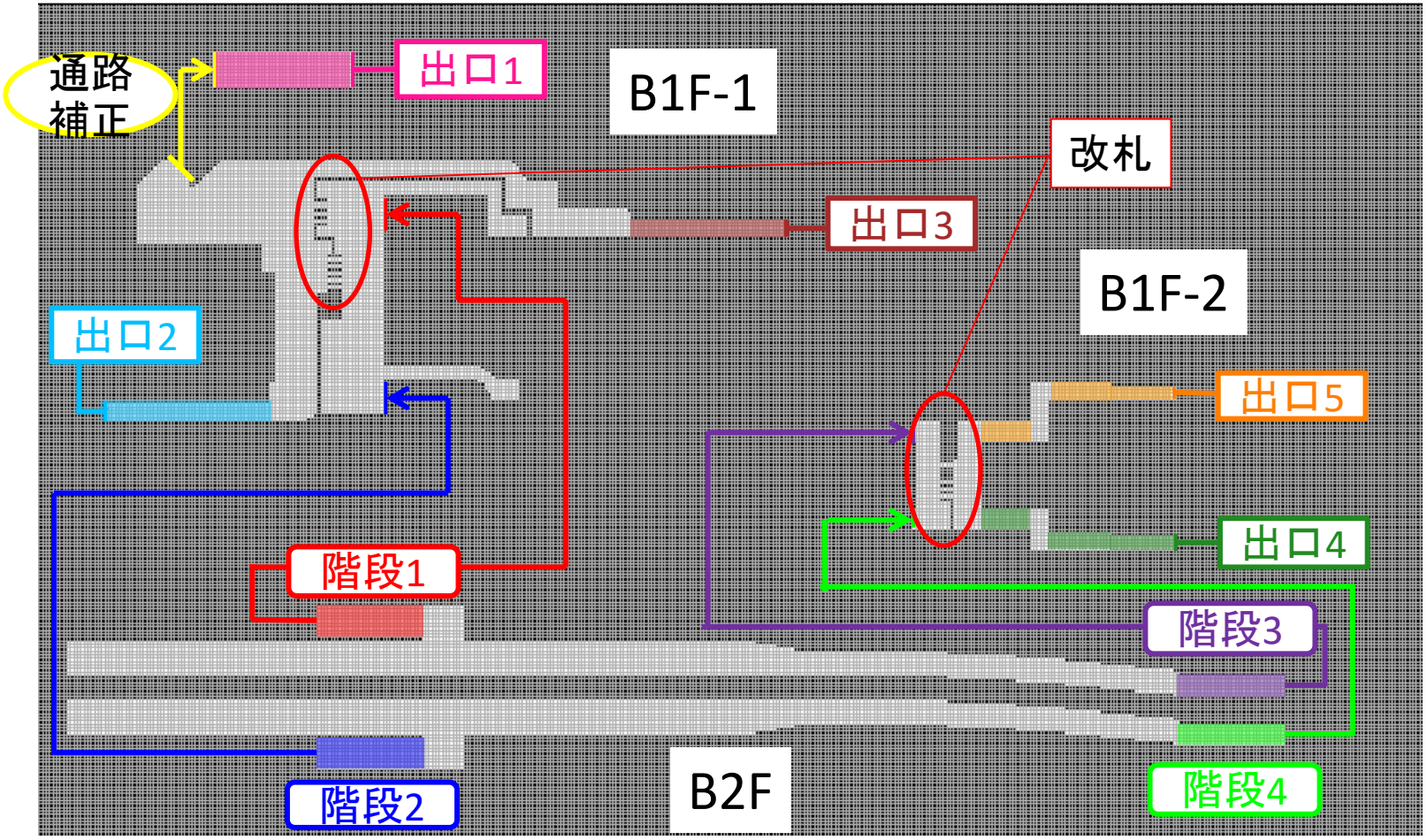
災害発生

およそ3000名くらいがホームに降り立つ.
→周囲の状況を確認するためホームに散らばる
→B2Fに歩行者3000名がランダムに初期配置

シミュレーション

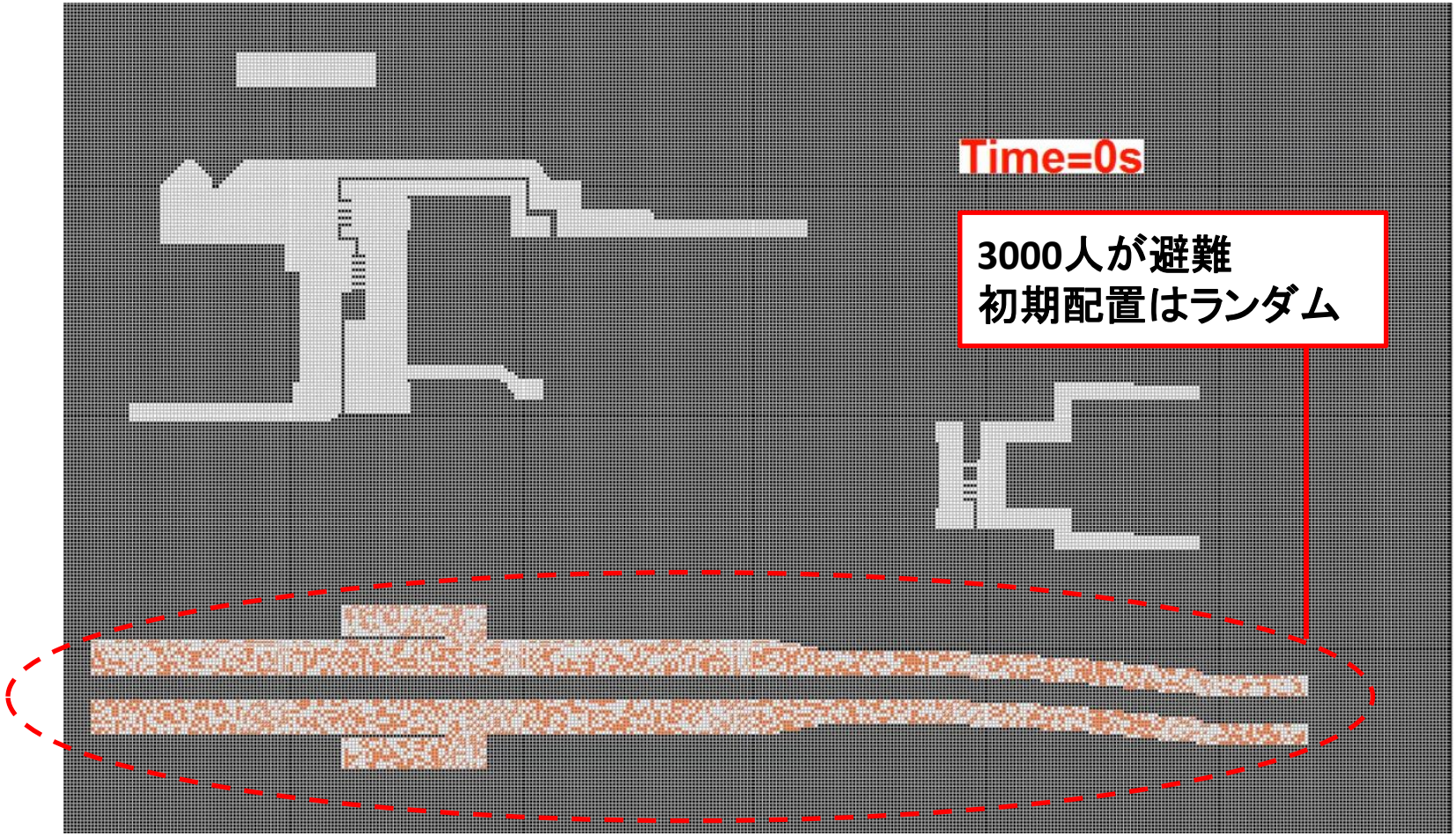
避難計画立案｜全館:地下鉄

H線E駅モデル化※薄い配色は階段部（速度減少）



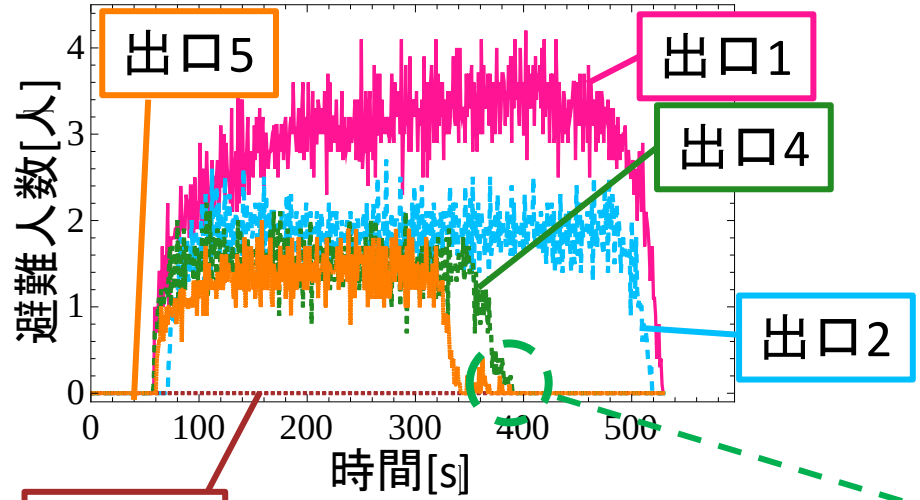
避難計画立案｜全館：地下鉄

シミュレーション（最寄りの出口を目的とする場合）



避難計画立案｜全館:地下鉄

経過時間ごとの避難人数($N = 1.5$)



シミュレーション条件

名称	数値
避難者数	3000名
歩行速度	1.00m/s
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m

出口3から避難する歩行者0

出口4と5からの避難者が早めに0になる.

避難計画の方針

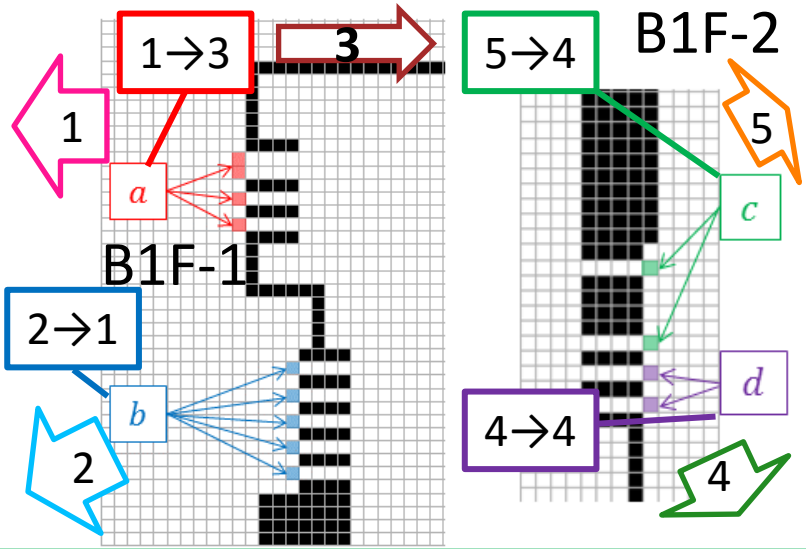
出口3に避難するよう歩行者に指定（B1Fで出口指定）

出口1，2，3と出口4，5に歩行者を適切に配分（B2Fで出口指定）

避難計画立案｜全館：地下鉄

方法1※左図，番号は出口を示す

- 改札を出た直後のセル（左図 a~d）で避難先出口指定.
- 一定間隔ごとに歩行者へ指定する出口が変化（**a命令:1→3**）
- 標識などでうまく振り分けられた場合を仮定



方法2

- B2Fにおいて，重み付けボロノイ分割で出口4と5へ移動する歩行者を増加させる
- 右図の重み分だけ出口4と5が近いと感じさせる.

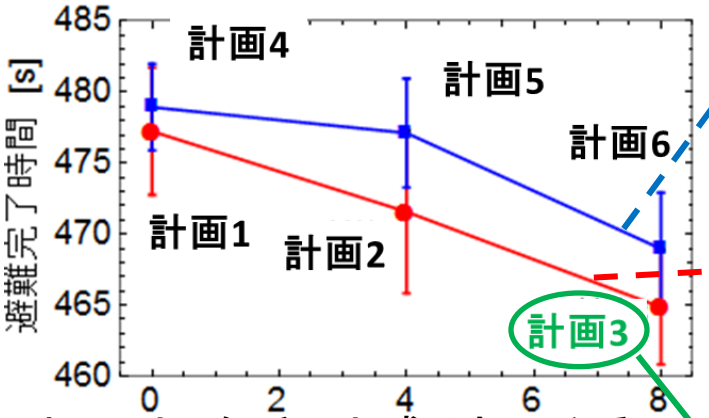
番号	重み [m]	指示の変更間隔[s]
計画1	0	10
計画2	4	10
計画3	8	10
計画4	0	20
計画5	4	20
計画6	8	20

出口4と5へ，より多くの歩行者を避難指示

同じ出口への命令時間が長くなる

避難計画立案｜全館：地下鉄

避難完了時間（計画無）：521.25s



指示切り替え20sごと

指示切り替え10sごと

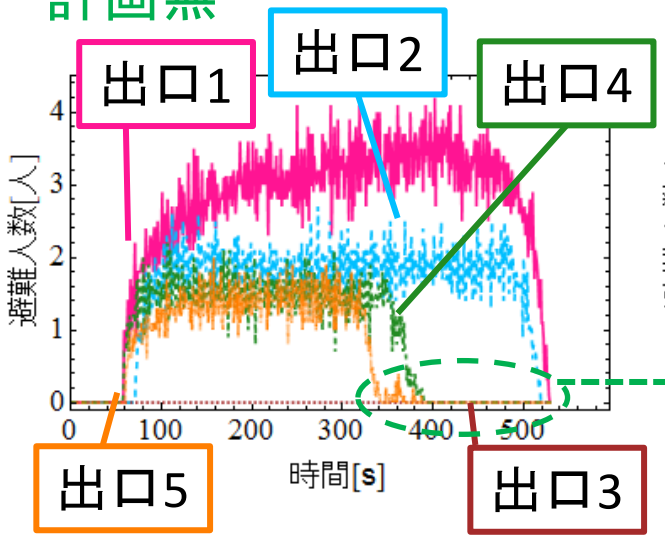
出口4と5を近いと感じさせる重み[m]

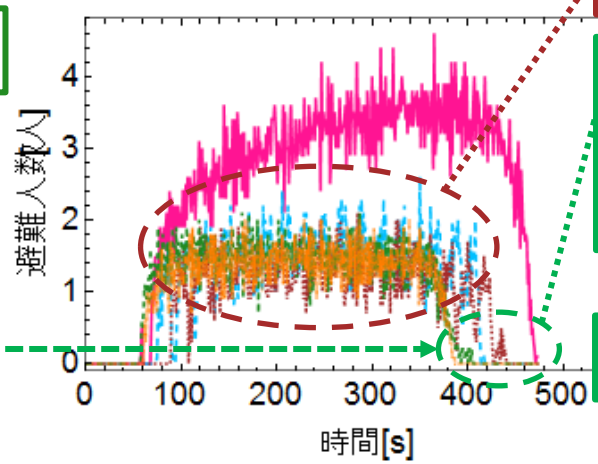
計画無

計画3

シミュレーション条件

名称	数値
避難者数	3000名
歩行速度	1.00m/s
シミュレーション回数	10回
情報認識範囲	6m
群集流動係数N	1.5





出口3からの避難者

＋

全出口から最後の歩行者が避難する時間が近い

適切な配分の実現

結論と今後の展望

結論1
混雑を考慮して出口選択する歩行者モデルの構築に成功

結論2
混雑を見積もる大きさに避難効率は大きく依存することが判明

結論3
避難先を指定するという避難計画の有効性

今後の展望
火災や浸水といった環境の変化を取り入れたより現実的な状況下でのシミュレーション

参考文献

1) 江崎貴裕, 西成活裕(2011): 群集運動におけるパーソナルスペースの獲得過程, 応用力学研究所研究集会報告,No.22AO-S8, pp. 202-207

2) 郷古学, 大塚一路(2015)：局所領域の情報からの予測に基づく歩行者モデル,日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌,Vol.58, pp.56-69.

3)林恵子,糸井川栄一,梅本通孝(2011)：豪雨による地下鉄駅浸水時の避難安全性評価,地域安全学会論文集,No.15,pp.427-435.

4) 篠崎喜彦(2015)：セルオートマトンによる二階層の複雑系モデルを用いた建築物の避難安全評価方法の開発,横浜国立大学大学院環境学府博士論文（未公刊）

5) 北島徹也,伊津野和行,八木康夫,大窪健之(2011):大学の講義棟における災害時避難に関する一考察,日本地震工学会,第11巻,第1号,pp.72-80.

6) Nishinari.K, Y.Suma, D. Yanagisawa, A. Tomoeda,A. Kimura and R. Nishi (2008): Toward smooth move-ment of crowds, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 293-308.

7) 大鑄忠男, 小野木基裕(2008): セルオートマトン法による避難流動シミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol. 51, pp. 93-111.

8) 戸川喜久二(1955): 群衆流の観測に基づく避難施設の研究, 建築研究所報告, No.14, pp. 1-29.

9) 横川京平, 谷賢太朗, 荻原さなえ, 小西孝史, 前田義信(2013): セルオートマトンを用いた出口位置を考慮した避難行動シミュレーション, 電子情報通信学会信学技報,Vol. 113, No.278, pp. 87-90.

10) 東京地下鉄株式会社，http://www.tokyometro.jp/station/ebisu/yardmap/index.html(2015年12月28日最終閲覧)