



避難シミュレーションの精緻化と 大規模化の取り組み

大阪大学サイバーメディアセンター

安 福 健 祐

SS研究会 HPCフォーラム2015「計算科学の新潮流」
パネルディスカッション「拡がるHPC」
汐留シティセンター 2015.8.28

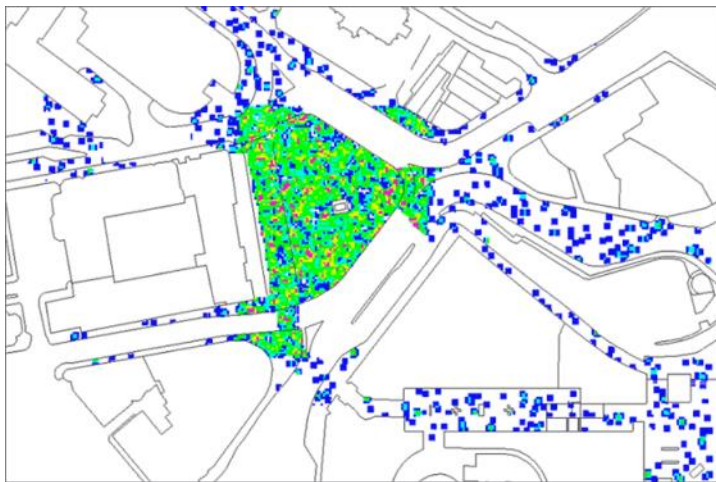
内 容

- 避難シミュレーションの現状
 - ▶ 建築・都市空間における防災計画への活用
 - ▶ 大規模災害時の避難計画への適用
- シミュレーションの精緻化と大規模化
 - ▶ 避難行動モデルの精緻化
 - ▶ 広域シミュレーション、大規模計算、可視化
- モデルの検証と妥当性の評価（V&V）
 - ▶ 観測結果との比較検証
 - ▶ 国際的な標準化の動き
- まとめ



避難シミュレーションの現状

- エージェントモデルによる避難シミュレーション
 - ▶ エージェント：自律的に意思決定・行動のできる最小単位
 - ▶ マルチエージェントシステム：複数のエージェントが協調するシステム
- 適用事例・応用事例
 - ▶ 建物の避難安全性の評価（避難計画）
 - ▶ 群集事故リスクの予測
 - ▶ 快適な歩行空間デザイン



エージェントモデルによる避難シミュレーション buildingEXODUS
<http://ftp.forum8.co.jp/forum8lib/pdf/EXODUS-201011.pdf>



建築基準法での避難シミュレーションの位置づけ

性能規定化された建築基準法における避難安全性の確保

仕様設計
(ルートA)

避難関係規定の
仕様基準に適合

簡易な性能設計
(ルートB)

告示による検証

- ・ 階避難安全検証法
- ・ 全館避難安全検証法

階避難安全性能：
避難施設（廊下の幅、階段までの歩行距離等）、排煙設備、内装制限の仕様の適用が除外される

高度な性能設計
(ルートC)


告示以外の方法による検証法

- ・ 国土交通大臣による認定が必要

全館避難安全性能：
上記に加えて、防火区画などの仕様の適用が除外される。

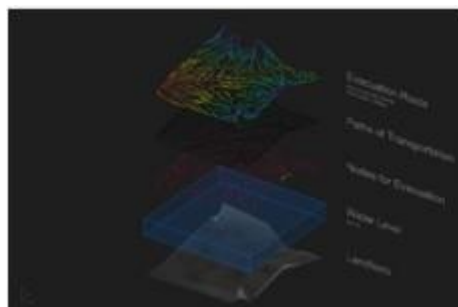


東京消防庁 優良防火対象物認定表示制度（「優マーク」）

	優良防火対象物認定表示制度	
概 要	防火対象物の管理権限者が申請する消防署が審査、検査し認定を行う認定を受けると、東京消防庁HPで公表建物の玄関、受付、ホームページ、パンフレットなどに「優マークを表示」	
審査項目	<p>【法令適合状況】</p> <ul style="list-style-type: none">・ 消防法令に適合しているか・ 建築法令に適合しているか <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none">・ 避難安全性が検証されているか・ 自衛消防隊の編成及び活動能力が適切に確保されているか・ 自主的、意欲的な各種防火対策を実施しているか・ 過去2年以内に消防法令等による命令又は警告等を受けたことがないか	

火災避難シミュレーション、階避難安全検証法（建基令第129条の2の2）、新・建築防災計画指針の計算手法等を活用し、各階において階避難完了時間が階避難限界時間を超えないことを確認

「避難地形時間地図」 (通称：逃げ地図)



- ▶ 大手設計事務所有志の震災復興ボランティアチームが、震災復興での街づくりにおける合意形成ツールとして開発
- ▶ 従来のハザードマップのように浸水エリアを領域として表現するのではなく、安全な場所までの避難時間を伴った距離を可視する
 - ▶ 後期高齢者が避難できる時間
 - ▶ 避難ビルの配置検討
- ▶ コンピューターによる評価検証を行うことで、より高度な合意形成に基づく街づくりを可能にしようという試み
 - ▶ 避難時間の算出には避難シミュレーション「SimTread」を利用

出典：「縮退時代における都市の記述法(ノーテーション)へ」
http://www.ozone.co.jp/event_seminar/event/detail/1275.html



エージェントモデルの避難行動

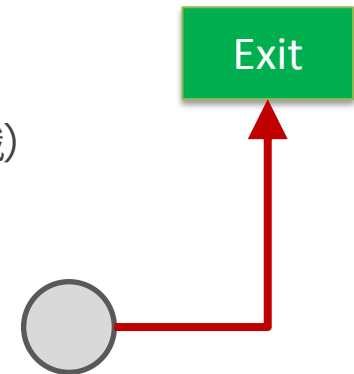
■ 大域的 (Macroscopic) 避難行動

- ▶ 経路選択モデル (最短距離経路、最短時間経路、誘導灯、標識)
- ▶ 集団行動モデル (グループ行動、介助行動)

AIモデル (探索アルゴリズム)

ルールベース

セルオートマトン



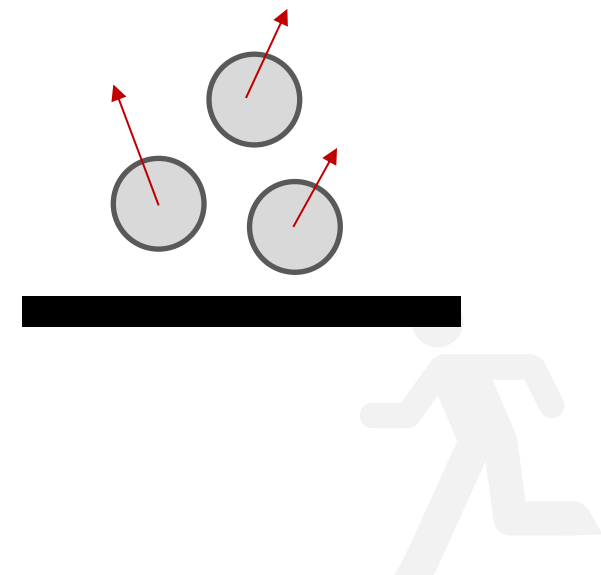
■ 局所的 (Microscopic) 避難行動

- ▶ 他のエージェントとのインタラクション
- ▶ 障害物とのインタラクション

力学モデル

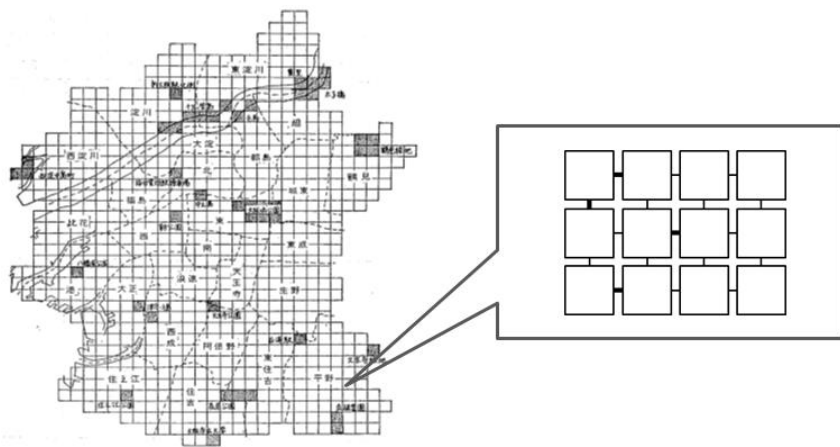
ルールベース

セルオートマトン

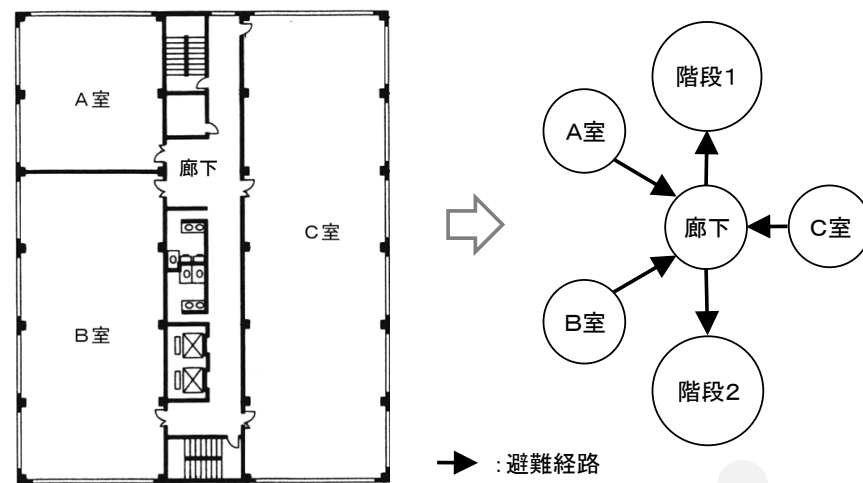


空間（環境）モデル — 粗モデル —

- 大きいメッシュ、ネットワークモデル
 - ▶ Coarse Network（粗ネットワーク）
 - ▶ 一つのノードに避難者が複数配置される
 - ▶ 空間の形状を反映できない



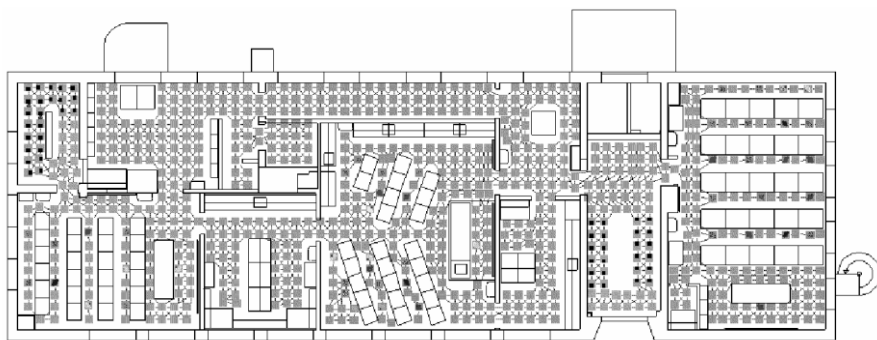
都市空間規模のモデル化



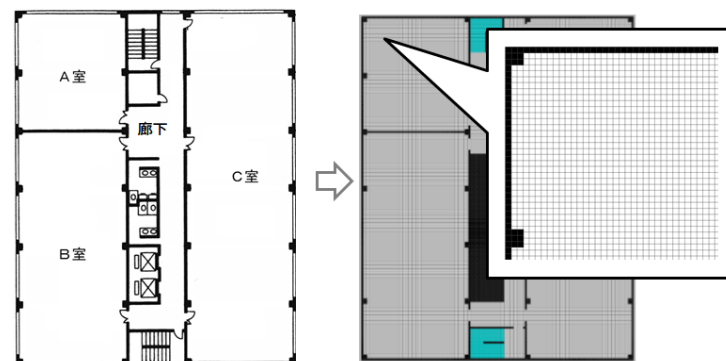
建築空間規模のモデル化

空間（環境）モデル — 微細モデル —

- 小さいメッシュ、ネットワーク
 - ▶ Fine Network（微細ネットワーク）
 - ▶ 一つのノードに避難者が一人（一部）配置される
 - ▶ 空間の形状を反映できる



50cm正方形ネットワーク

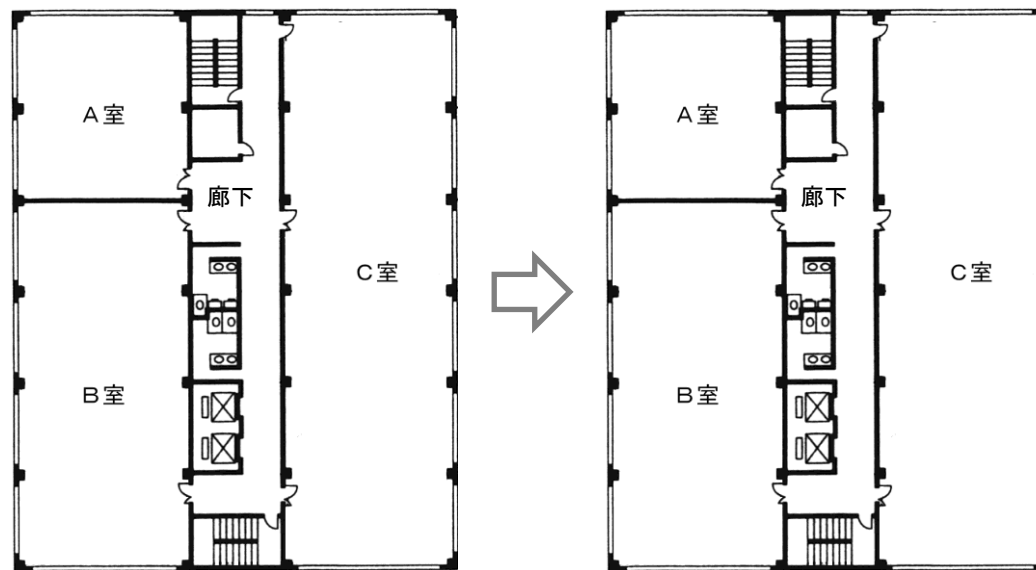


20cmメッシュ



空間（環境）モデル — 連続モデル —

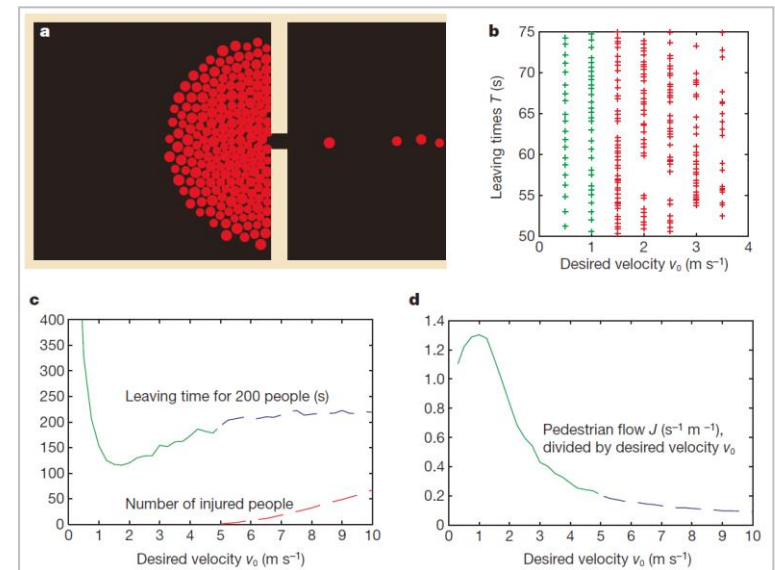
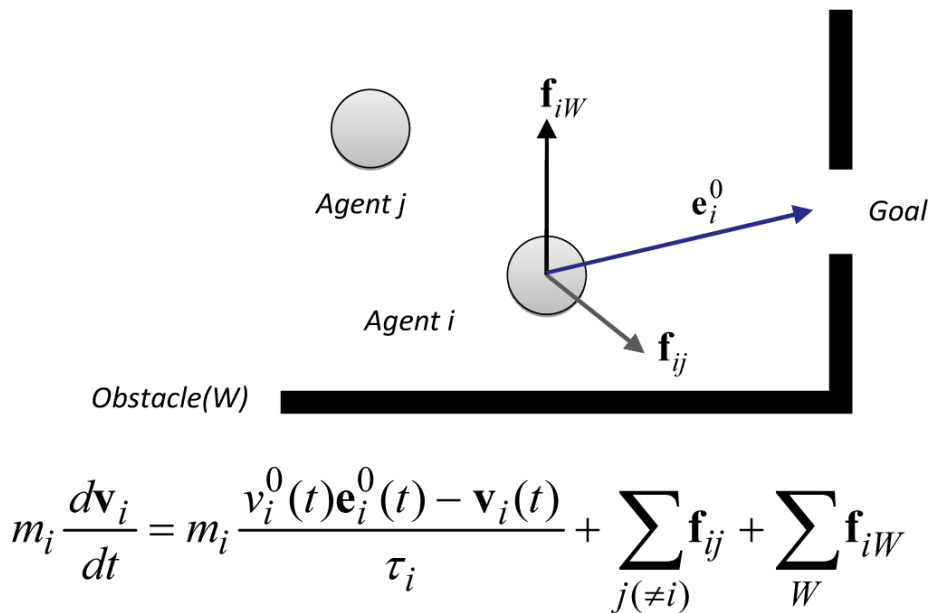
- 建物の形状をそのままモデル化
 - ▶ Continuous Network（連続ネットワーク）
 - ▶ エージェントが認識するための環境データが必要
 - ▶ ネットワーク、ナビゲーションメッシュ



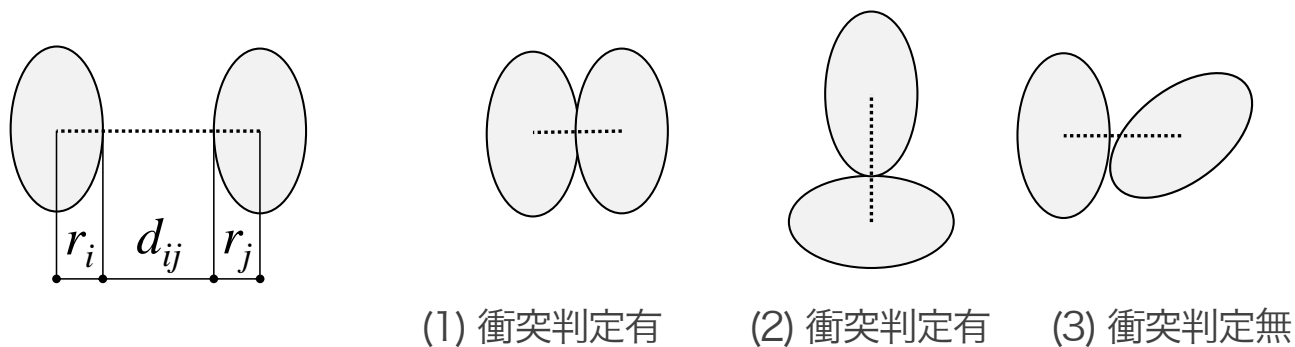
代表的な（局所的）避難行動モデル

■ Social Forceモデル

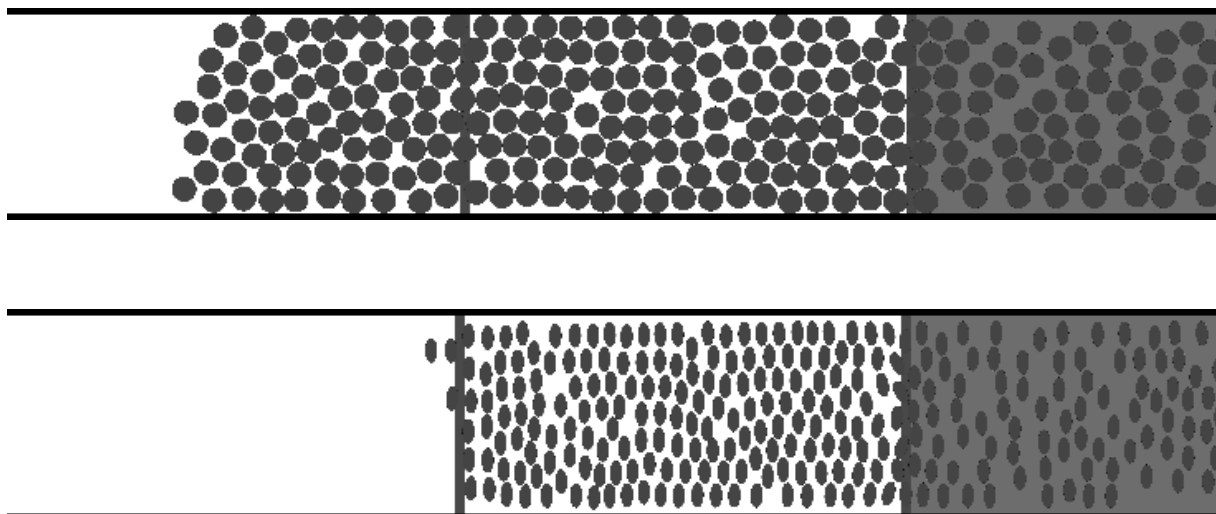
- ▶ 社会心理学的な要素と物理的な力を結びつけた力学モデル
- ▶ エージェントを一定の質量と大きさを持つ粒子で近似
- ▶ 他のエージェント、壁などの障害物、移動目標から受ける力の相互作用で運動方程式を解く



避難行動モデルの精緻化事例



楕円型衝突判定



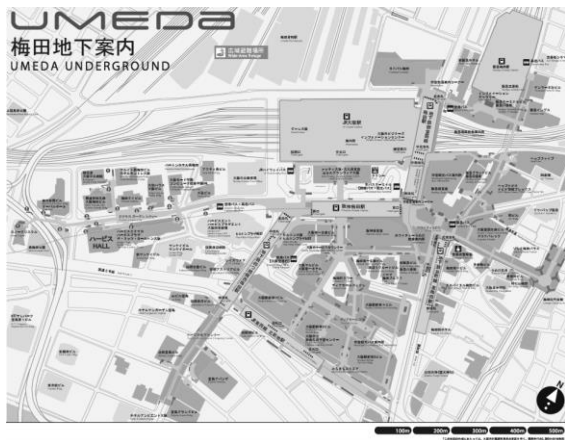
観測結果とシミュレーションの比較



- ▶ 行列内を人が移動している状態で、先頭の人が一時停止する状況を設定
- ▶ 高密度で静止している部分と低密度で歩行している部分に分かれる
- ▶ 時間経過とともに高密度部分が行列の後方に伝播していく (stop-and-go wave)



大型・複合型施設の避難・広域避難への適用



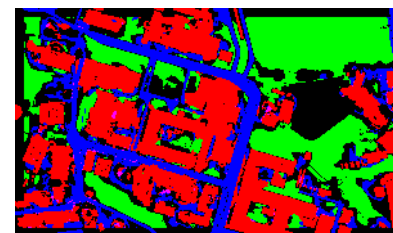
合田祥子, 谷口与史也, 吉中進, 瀧澤重志,
「大阪駅前地下街の津波避難計画に関する研究」
日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）
pp.147-148, 2014



地図データ



衛星写真データ



避難経路データ

地図データベースを利用した広域避難への適用

研究代表者 中澤篤志、研究分担者 安福健祐

「三次元データ認識による災害状況自動計測システムの研究開発」

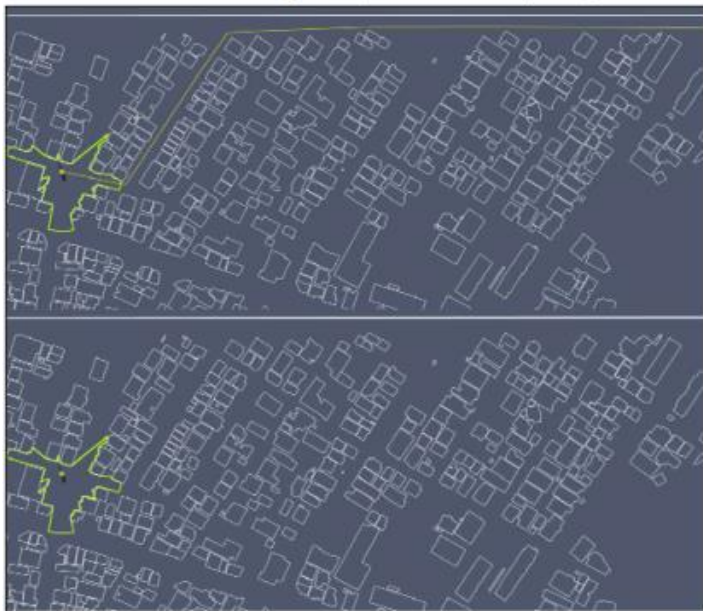
総務省SCOPE 若手ICT研究者育成型研究開発（ICT安心・安全技術）, H19~H21

▶ 避難シミュレーションの計算負荷の問題



京コンピュータを用いた避難シミュレーション

resident agent (pre-defined path)



visitor agent (no pre-defined path)



堀宗朗 「スパコンを使う地震のシミュレーション～「京」の中で都市を揺らす～」

マルチエージェントモデルによる避難行動のシミュレーション

高知市を舞台とし、20万のエージェントが一定の行動パターンで避難するようすを「京」で計算した。

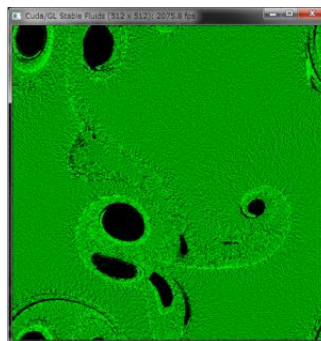
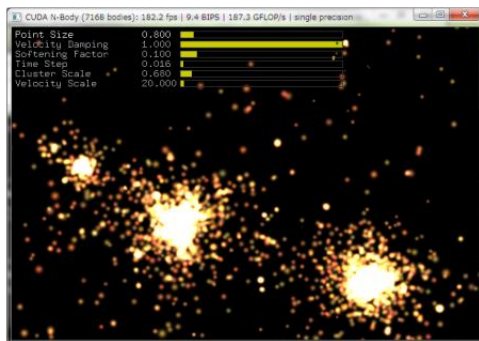
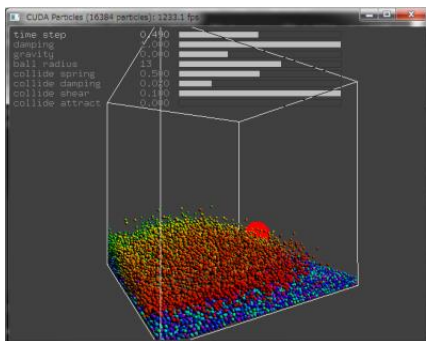
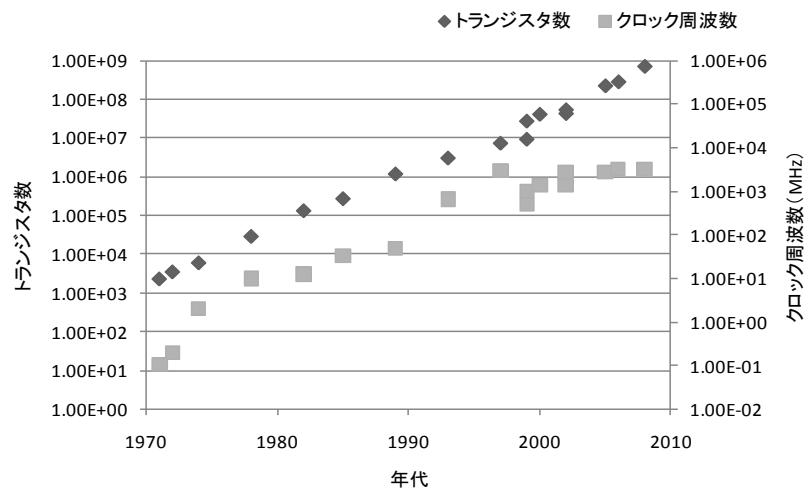
<http://www.aics.riken.jp/newsletter/201403/interview.html>

GPUコンピューティング技術

■ GPU Computing



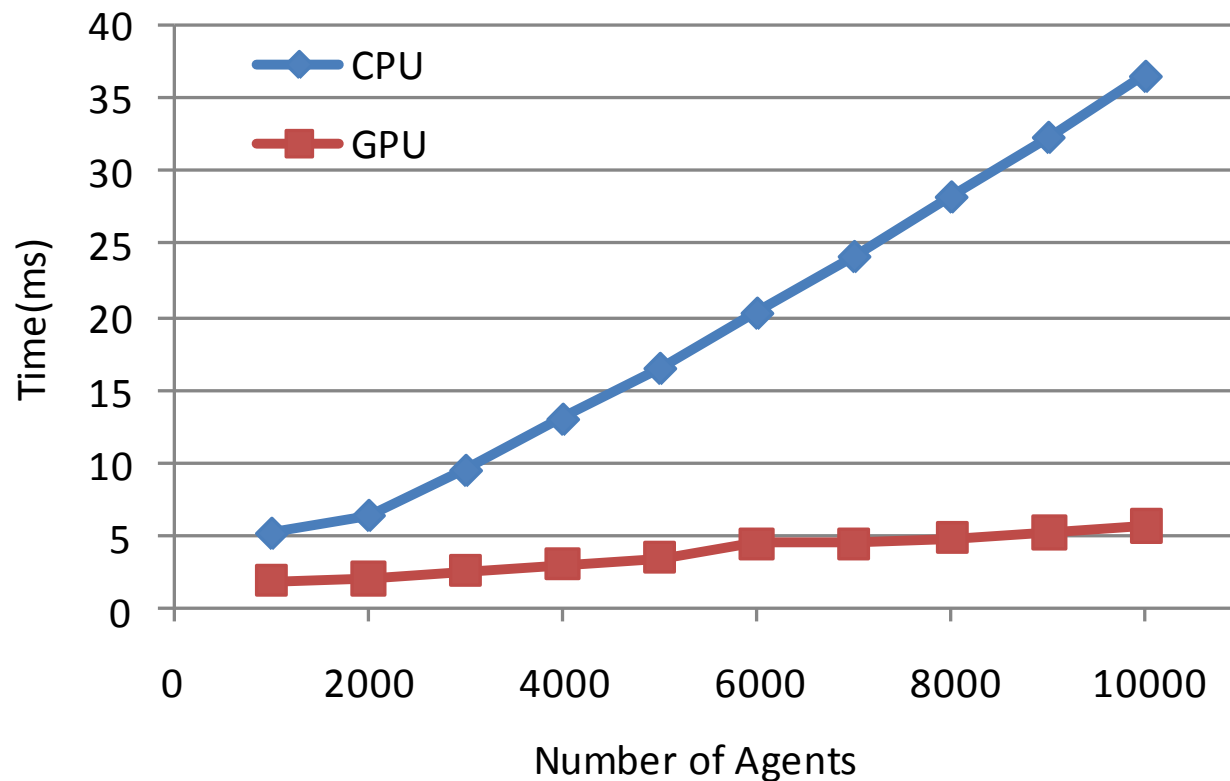
GPU



Parallel processing on GPU



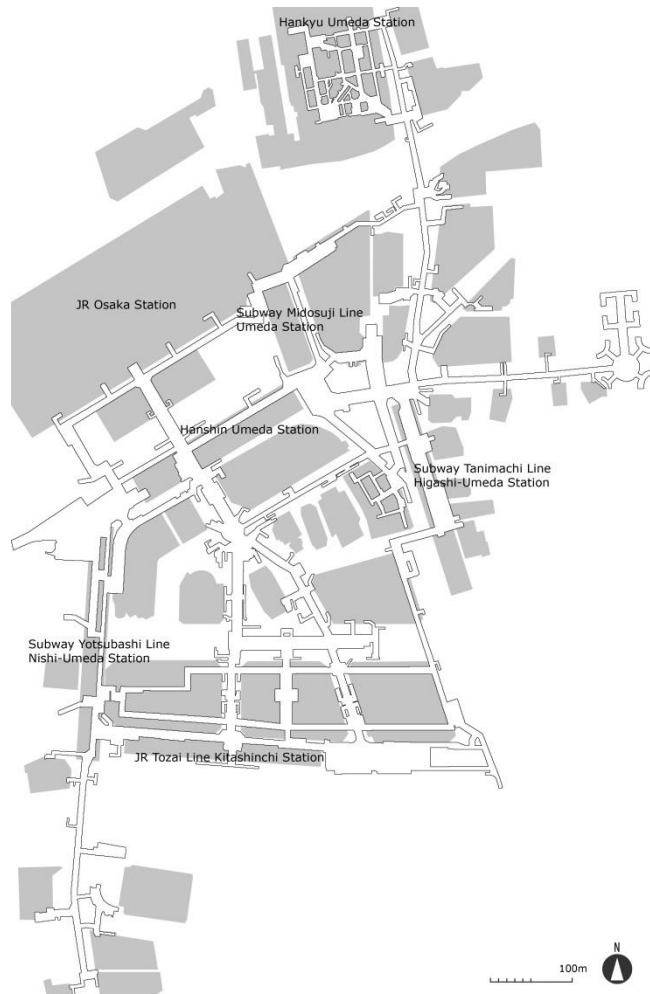
シミュレーションの性能評価 Performance Comparison



- ▶ スケーラビリティが向上
- ▶ エージェント 1 万：GPUのほうが約7倍高速



大規模地下街の避難シミュレーション



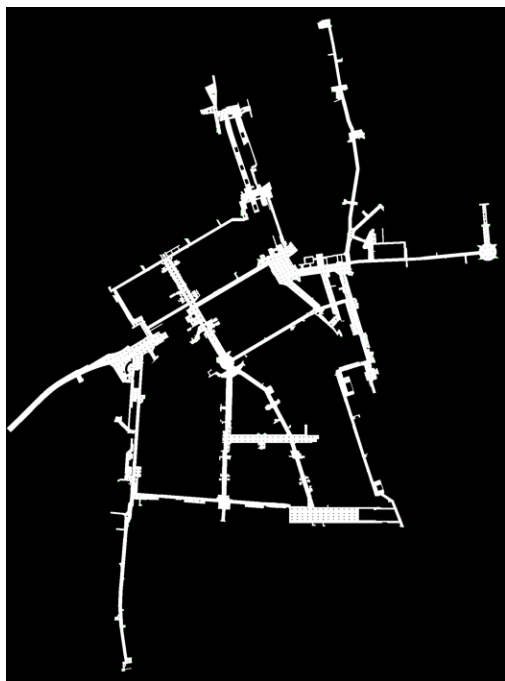
避難シミュレーションの設定

- ▶ 対象：大阪梅田地下街
 - ▶ 東西約1.1km, 南北約1.1km
 - ▶ 南海トラフ巨大地震が発生した場合に最大で2mの津波を想定されている
 - ▶ 津波災害を含め河川氾濫や内水氾濫等による浸水対策急務
- ▶ エージェント数：2万5000人
- ▶ シナリオ：一斉に最寄りの階段まで避難

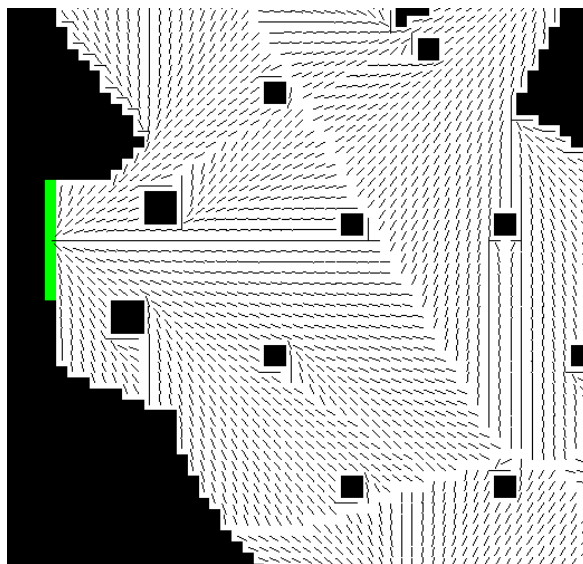


大規模地下街の避難シミュレーション

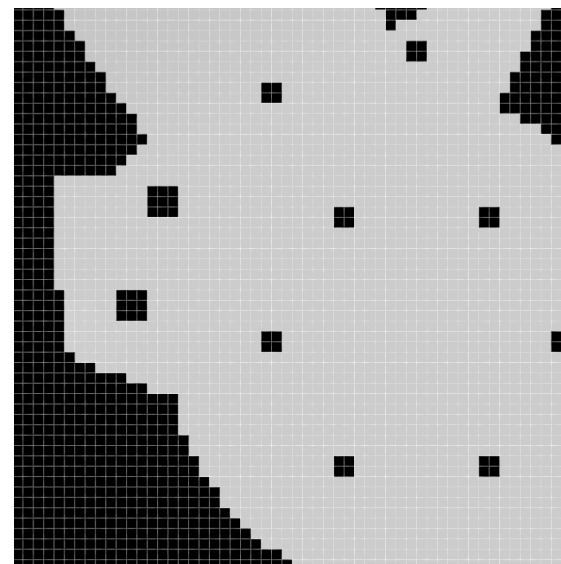
- ▶ 地下1階を一边50cmの格子状メッシュに分割
- ▶ 各メッシュに障害物、出口、移動方向ベクトルや高低差情報などを保持する



梅田地下街メッシュデータ

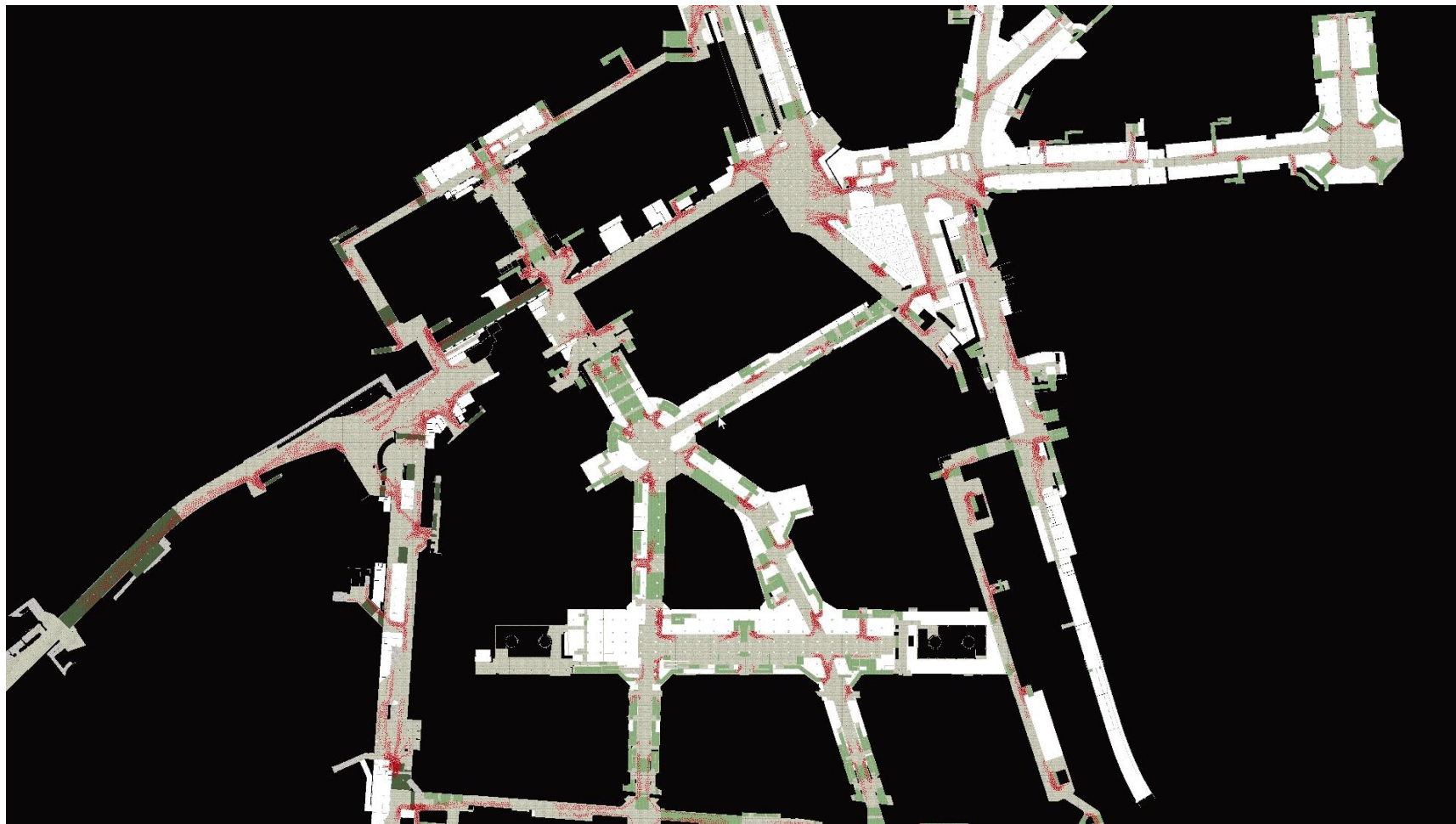


最短経路となる移動方向

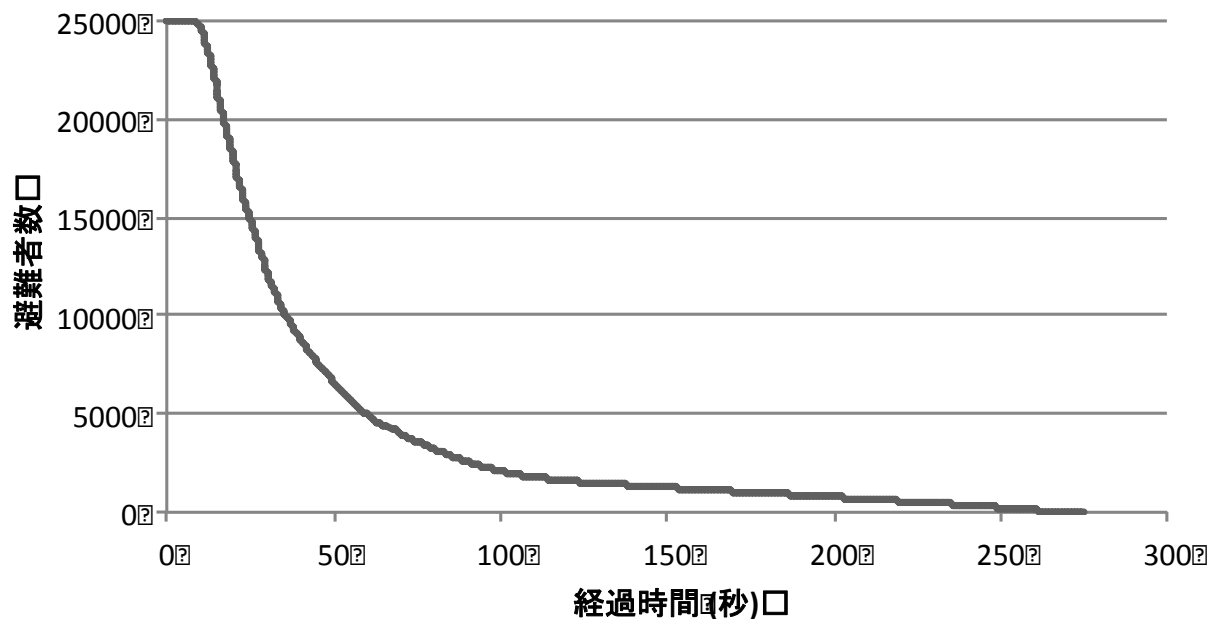


高低差情報
(グレースケール)

大規模地下街の避難シミュレーション結果



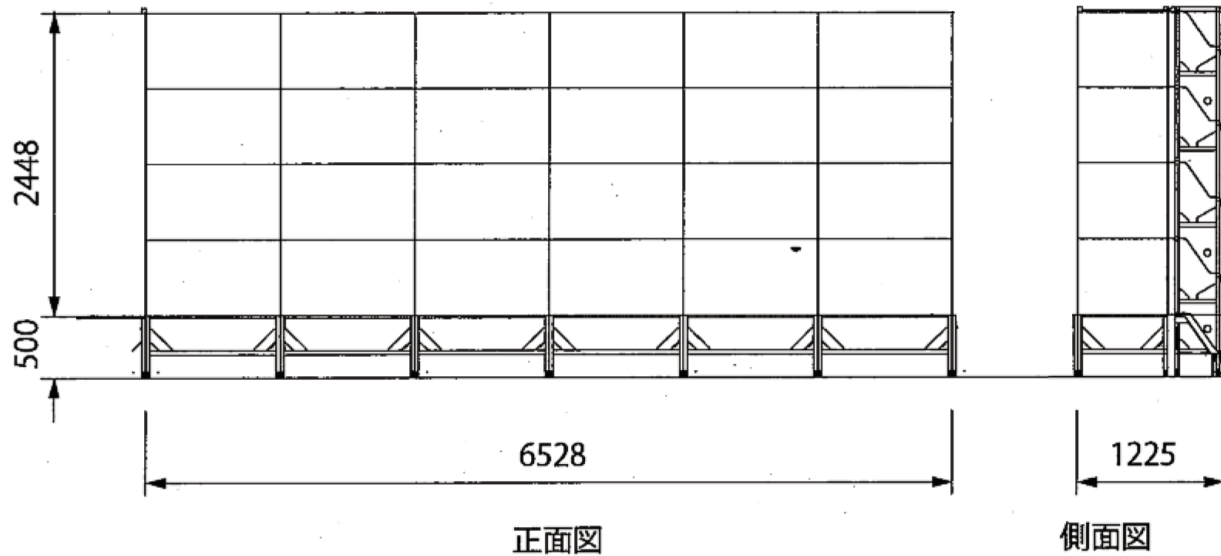
避難シミュレーション結果



- ▶ 約80%の避難者は避難開始約1分後には避難を完了
- ▶ 初期設定として、2万5千人のエージェントを一定密度で配置し、全員が一斉に最短経路で避難を開始（現実とは異なる）
- ▶ 地下空間の避難安全特性を分析するための一つの指標



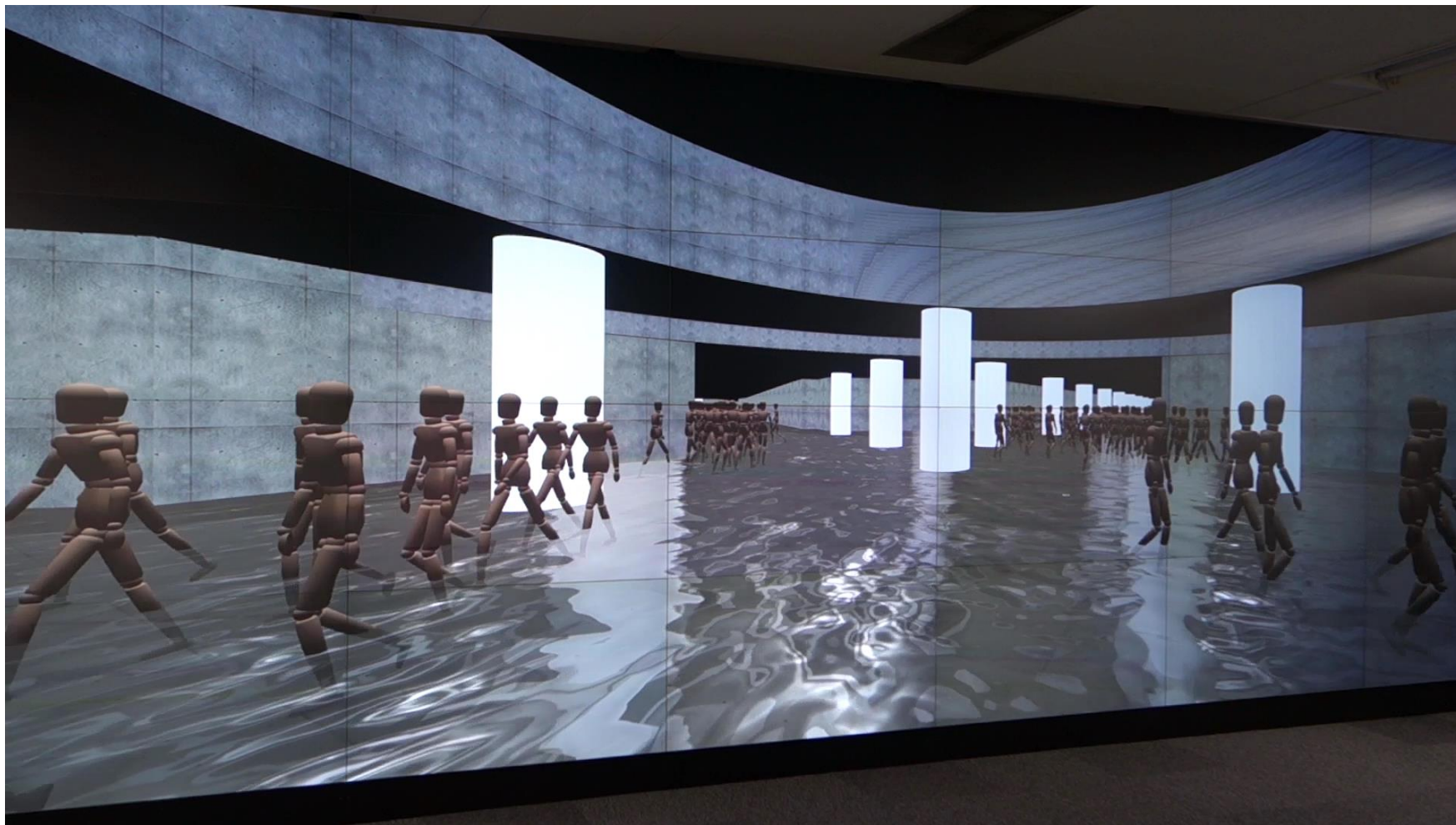
24面タイルディスプレイ@大阪大学サイバーメディアセンター



- ▶ 1920×1080の50インチプロジェクションモジュール×24
- ▶ 水平150度の広視野角
- ▶ 視覚限界に近い約5000万ピクセルの超高精細
- ▶ 研究結果の理解、新たな知見の創出
- ▶ 通常の会議のメインスクリーンとしても利用可能



大規模地下街避難の3次元可視化



安福健祐, 瀧澤重志, 高木尚哉, 谷口与史也, “高精細タイルドディスプレイを用いた大規模地下街避難の3次元可視化,” 日本図学会2014年度秋季大会 (東京) 学術講演論文集, ISSN:2189-0072, pp.139-142, 2014.11

精緻化・大規模化に伴うHPCの有用性と課題

- ▶ 広域避難・エージェント数の大規模化
 - ▶ エージェントの処理が並列化できれば高性能計算が有効
 - ▶ 並列計算に適した実装のコスト
- ▶ エージェントの精緻化の問題
 - ▶ 視界範囲に誘導灯があるか考慮 (S. Gwynne)
 - ▶ 周囲の状況によりフロアフィールドを動的に計算するモデル (Nishinari)
 - ▶ グループ行動、介助行動、etc.
- ▶ 逐次計算による実装、テスト後、並列化
- ▶ モデルの検証と妥当性の確認が困難



Verification and Validation (V&V) 検証と妥当性確認

■ 群集流動係数

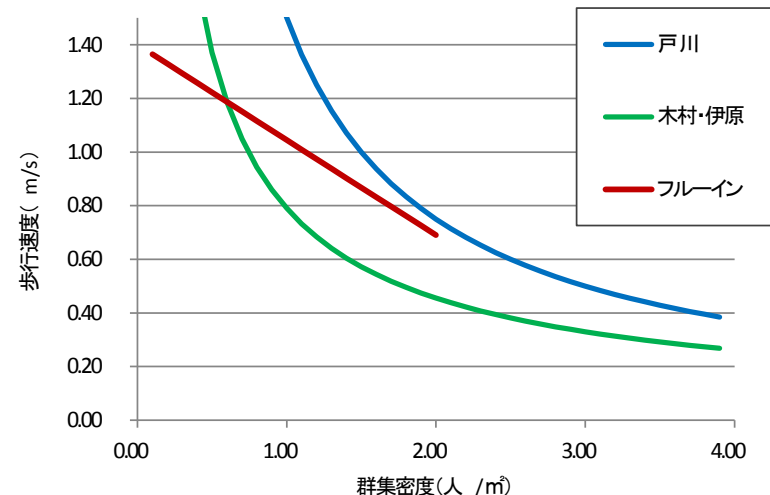
- ▶ 戸川喜久二氏「群衆流の観測にもとづく避難施設の研究」に基づく値
- ▶ 避難安全検証法での群集流動係数：1.5人/m・秒

■ 実測・実験に基づく歩行速度と群集密度の関係との比較

- ▶ 木村・伊原式（べき乗モデル）
- ▶ 戸川式（反比例モデル）
- ▶ フルーイン式（直線モデル）

群集の タイプ	場 所	群集流動係数(人/m・秒)			
		0.5	1.0	1.5	2.0
通勤群集	電 車 の 出 入 口			○	
	オフィスビルのエレベーター			○	
	駅 の 階 段		○		
	電車、バスの出入口		○		
一般群集	百貨店の出入口		○		
	階 段（終業時）		○		
	エレベーターのドア			○	
	映 画 館 の 出 口			○	
	公会堂の出口		○		

群集流動係数（戸川喜久二氏による）



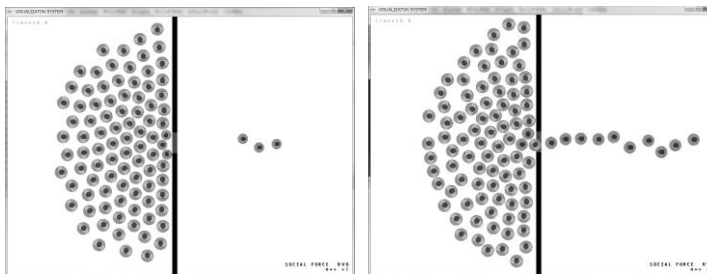
群集密度と歩行速度の関係



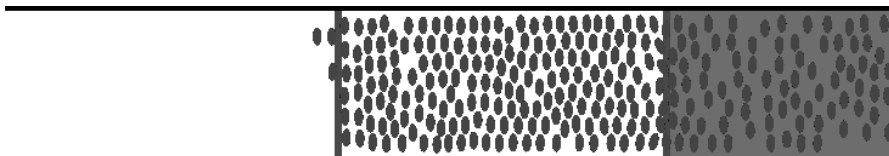
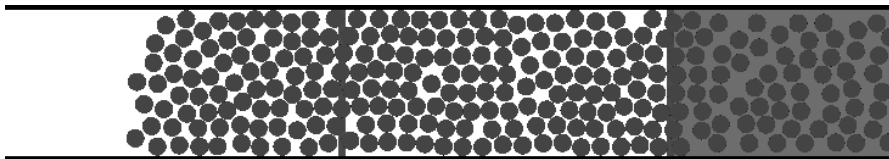
検証方法(V&V)

■ 各種避難行動モデルの比較分析

- ▶ Social Forceモデル
- ▶ RVOモデル
- ▶ 楕円型RVOモデル



安福健祐：避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性, 日本建築学会計画系論文集 第75巻 第655号, pp.2081-2088, 2010.9



安福健祐：楕円型RVOモデルを用いた高密度群集流動の再現, 日本建築学会技術報告集, 第17巻, 第35号, pp.187-190, 2011.2

国際海事機関（IMO）旅客船の避難解析ガイドライン

■ MSC/Circ. 1238

- ▶ 実際の緊急事態をシミュレーションするのではなく、ベンチマークシナリオを使った性能評価が目的
 - ▶ 避難者の密集地点、危険のエリアを特定する
 - ▶ 乗客・クルーの安全はあくまでオーナーの責任

■ Annex 3 : GUIDANCE ON VALIDATION/VERIFICATION OF EVACUATION SIMULATION TOOLS

- ▶ Component testing
- ▶ Functional verification
- ▶ Qualitative verification
- ▶ Quantitative verification

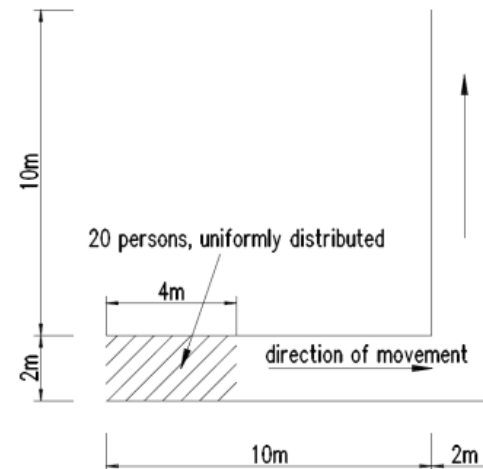
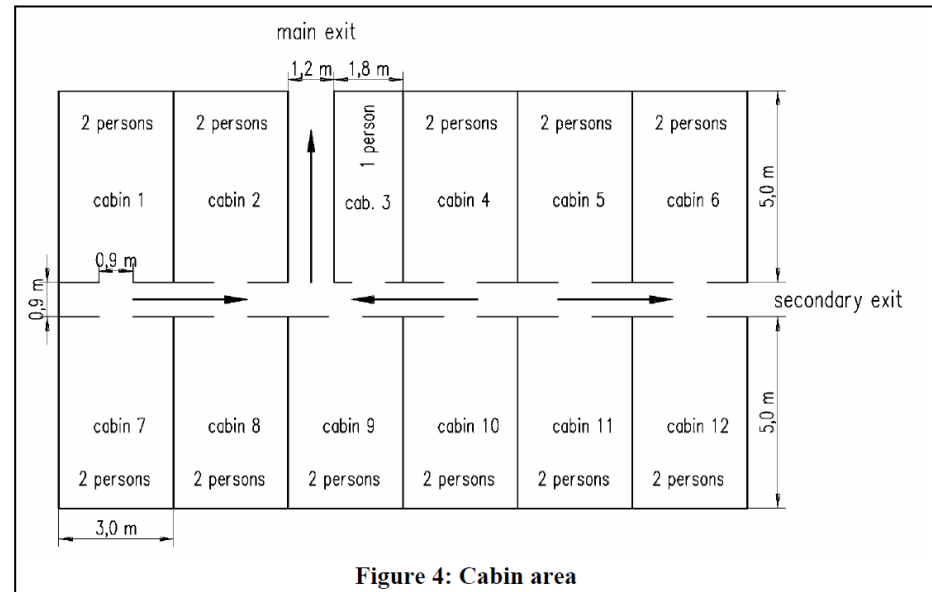
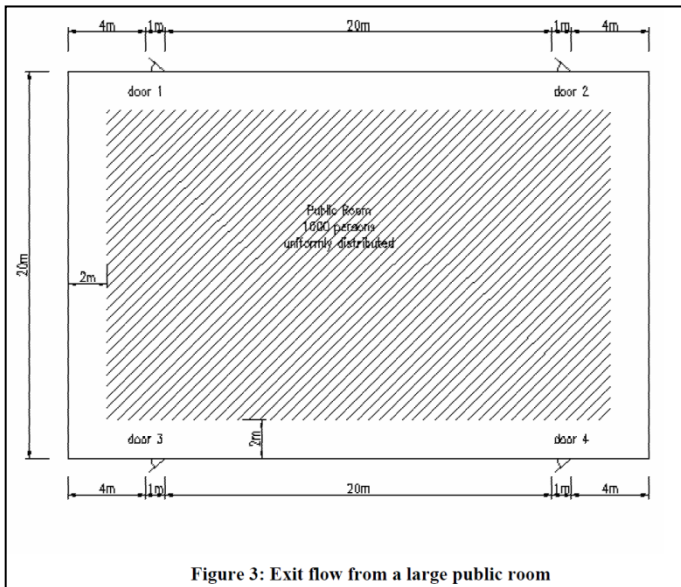
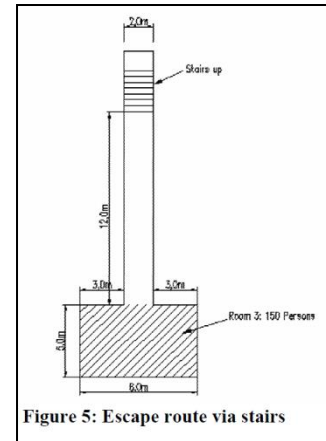
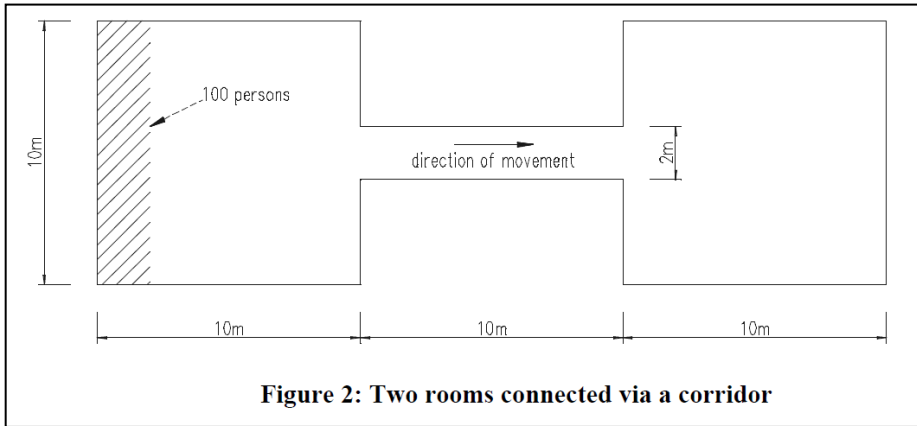


Figure 1: Transverse corridor

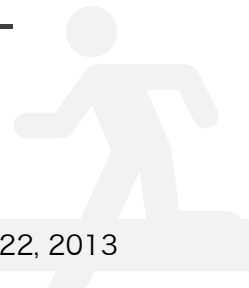


Qualitative verification



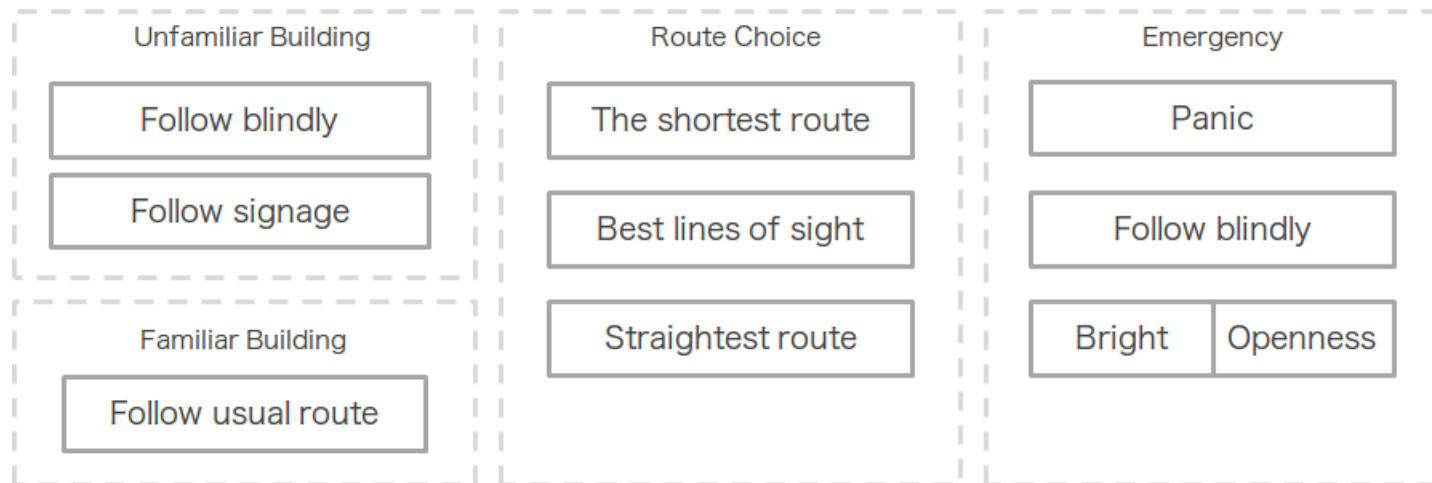
アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) technical Note 1822

- MSC/Circ. 1238を援用した検証 + α
- Uncertainty (不確定性)
 - ▶ model input uncertainty : モデル入力不確定性
(例) 入力パラメータ (歩行速度ばらつき)
 - ▶ measurement uncertainty : 測定不確定性
(例) 歩行速度観測
 - ▶ intrinsic uncertainty : 固有不確定性
(例) モデル自体 (数理モデル)
 - ▶ behavioral uncertainty
(例) 人間行動を再現するための確率的要素
(例) 単一実験ではあらゆる行動は再現されない問題
観測データは希少、ほとんどが単一のデータ (信頼してよいか)
- ▶ Towards an average predicted occupant evacuation time-curve



まとめと今後の課題

■ 避難シミュレーションの精緻化



▶ 検証と妥当性の評価のための基準整備が必要

■ 広域避難・エージェントの大規模

- ▶ 並列プログラミング対応の省力化
- ▶ フレームワーク活用の可能性 (Repast HPC, etc.)

