

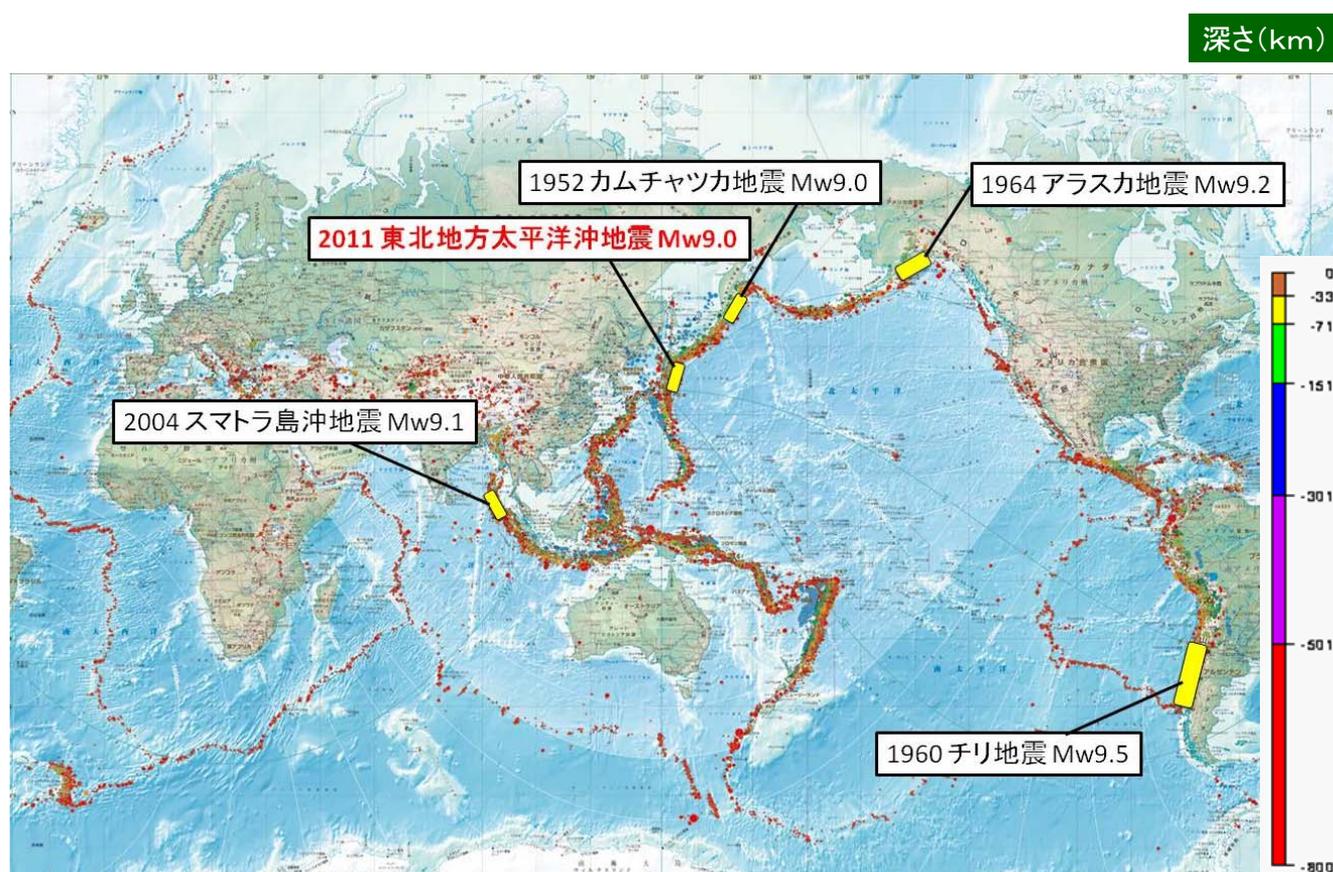
防災・減災のための地震シミュレーション ～スパコンで都市を丸ごと揺らす～

堀宗朗

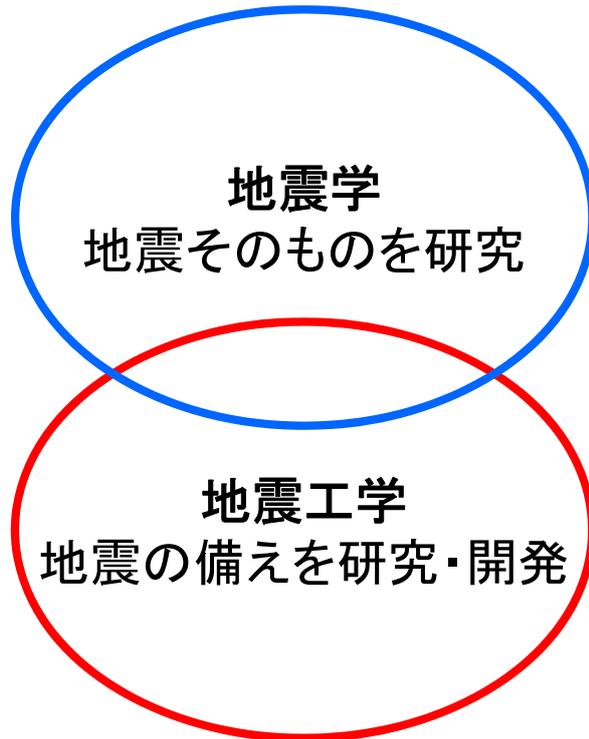
総合防災・減災研究ユニット (RIKEN AICS)

東京大学地震研究所

世界の地震



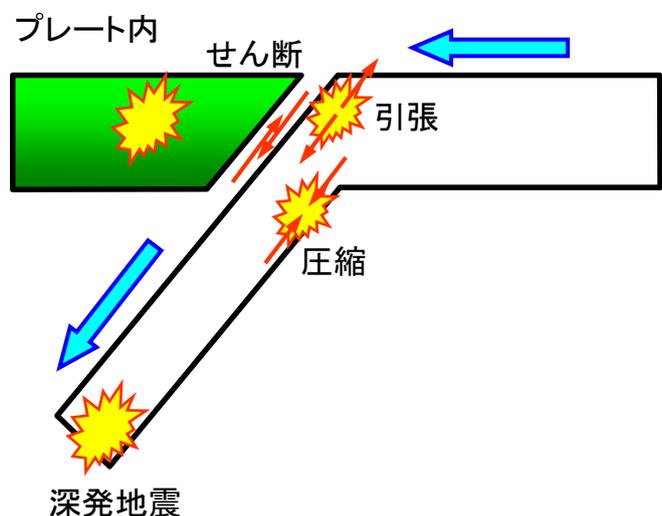
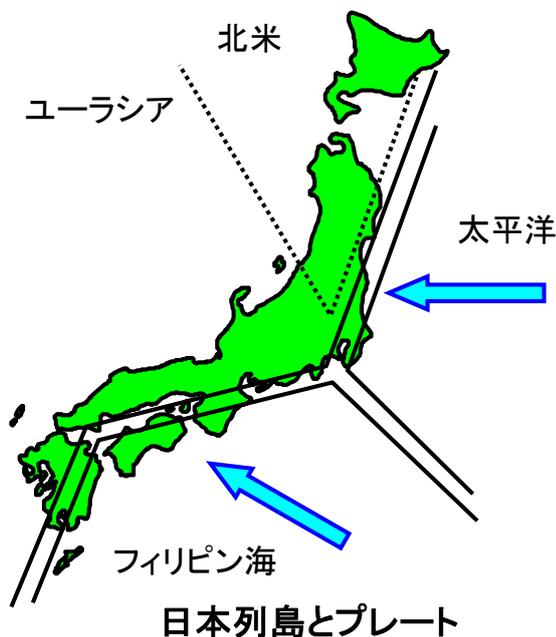
地震に関する学問



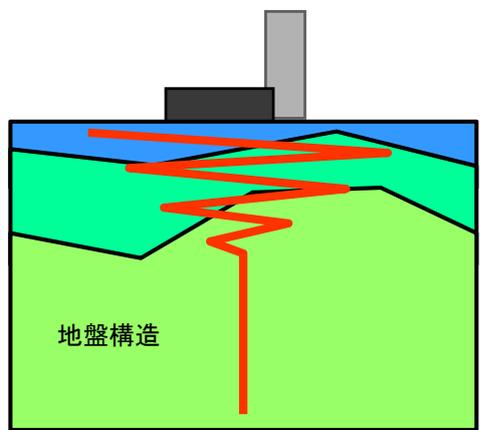
地震の理学
プレートテクトニクス, 断層,
地震波, 地震観測

地震の工学
耐震設計(建築・土木構造物)
免震/制震, 危機管理, 地震
防災

エッセンス:地震学的視点



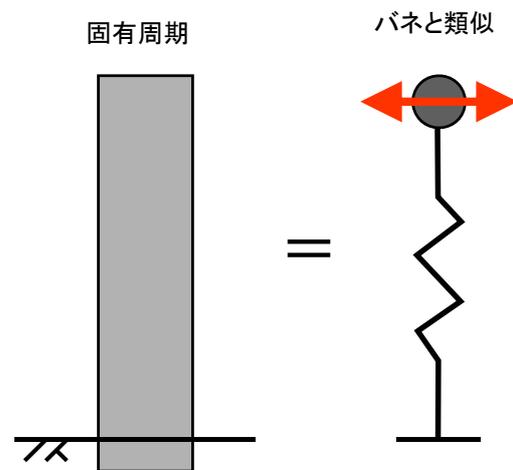
エッセンス:地震工学的視点



増幅・非線形性
液状化

強震動

軟らかい地盤は大きく揺れる



建物の揺れ

一定の間隔の揺れが卓越する

地震の計算

◆有限要素法 (Finite Element Method, FEM) の開発

- 非線形波動方程式の汎用数値解析手法
0.1T自由度, 100K step
- 適用 地殻・地盤の地震波動伝播
重要構造物の地震応答

◆都市シミュレーション手法の開発

- 都市での災害・被害・被害対応の連成解析手法
- 適用 地震・津波の災害・被害過程
住民等の避難過程

有限要素法

ニュートンの運動方程式を、巨大な連立方程式に変換して計算する

◆物理

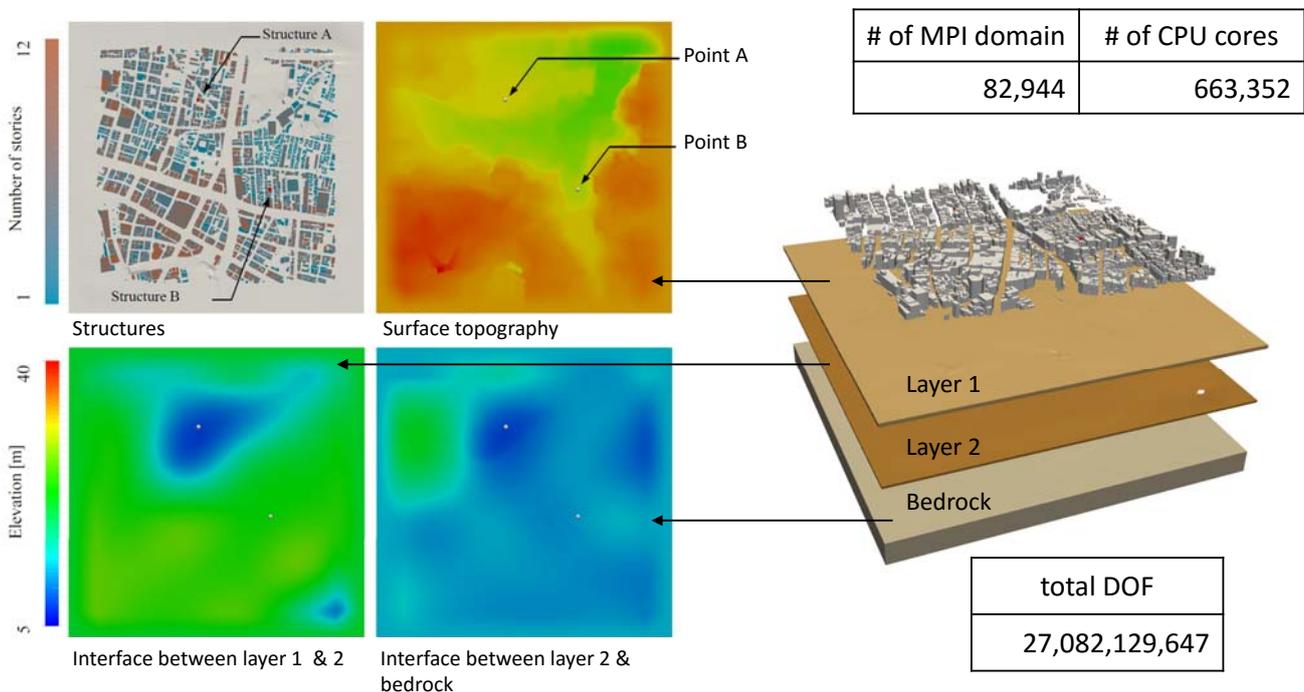
- 地盤は常に地盤として挙動
→ 地盤の材料定数から行列を決定することが可能

◆数理

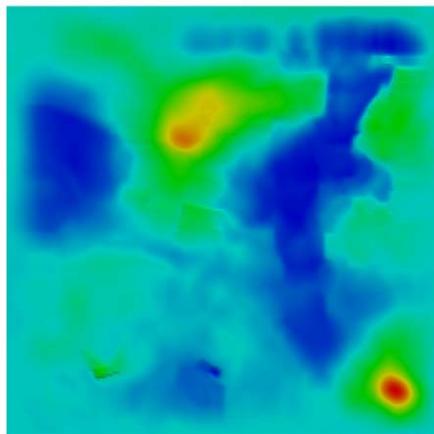
- 解の誤差を最少にしていくアルゴリズム
→ 連立方程式の解を高速で計算することが可能

都市のモデル

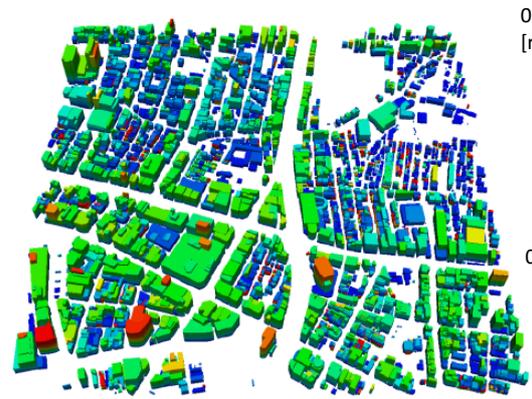
- 都市もニュートンの運動方程式を満たす
- 都市の運動方程式を連立方程式に変換する



連立方程式の解



地盤の応答 (SI値)



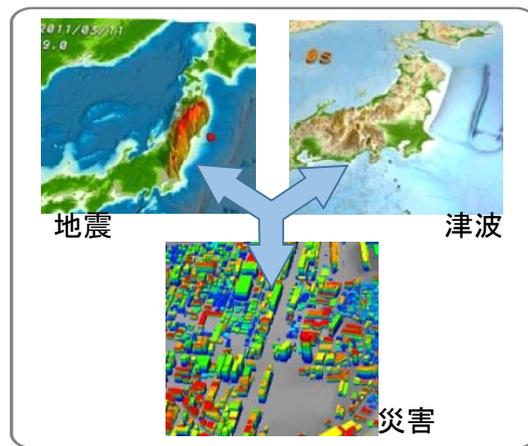
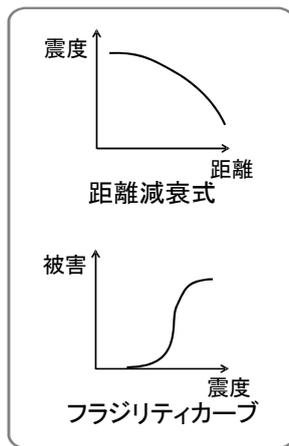
構造物の応答 (層間変形角)



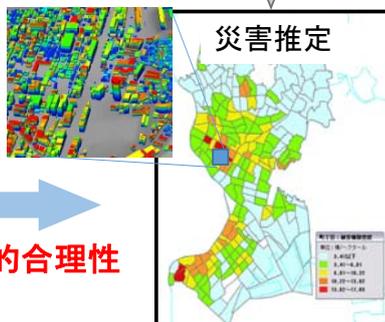
有限要素法 都市モデル 運動方程式を変換した連立方程式を解く解法
都市が満たす運動方程式を決めるモデル

巨大地震・津波による災害予測

現状
経験ベース

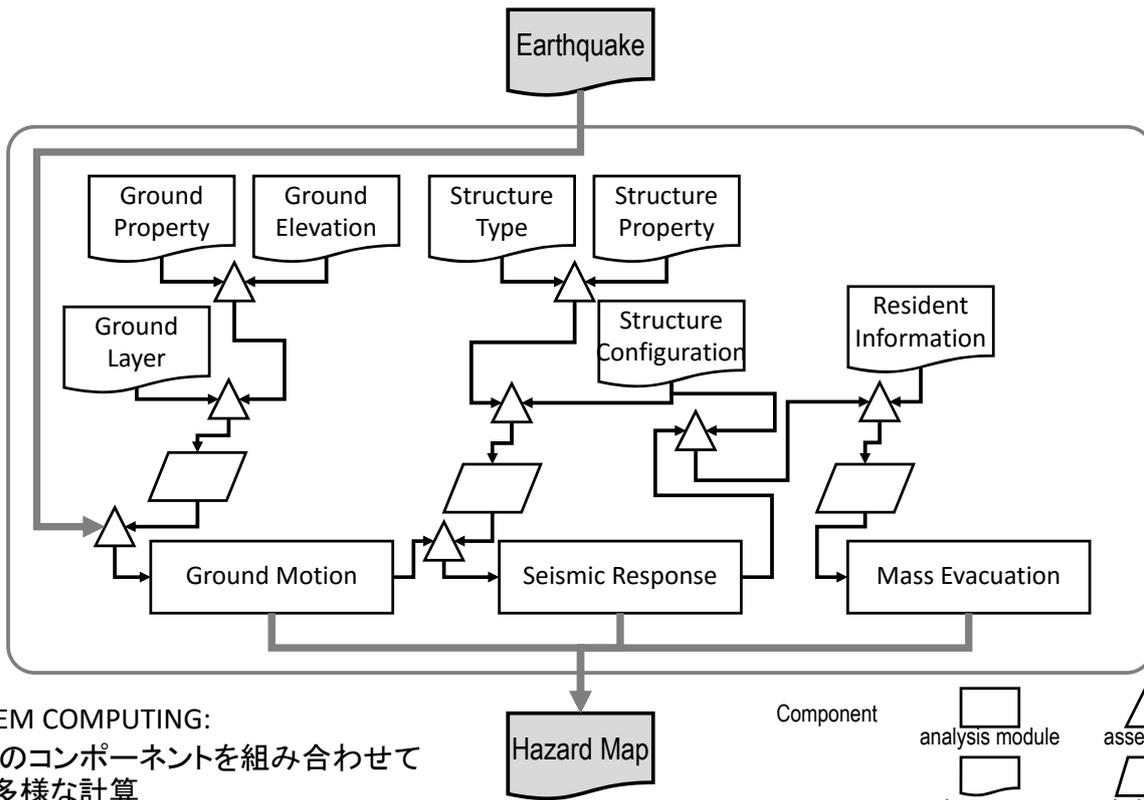


将来
計算ベース



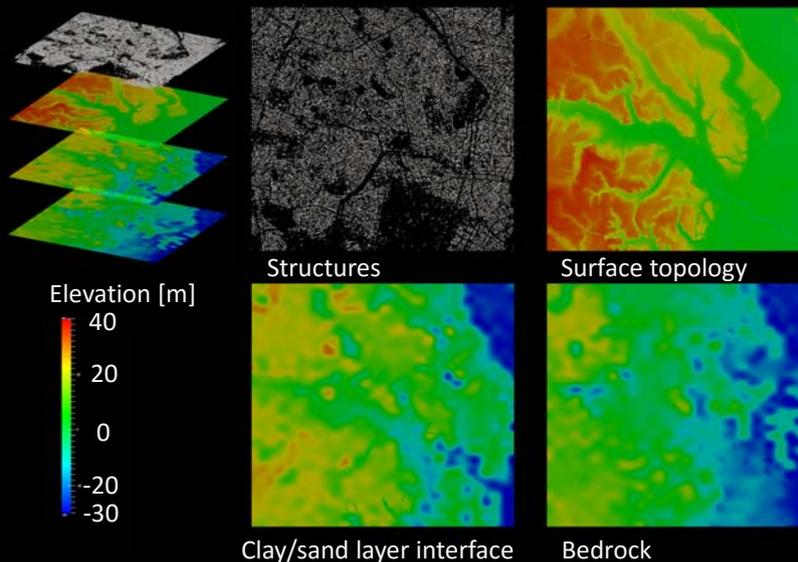
科学的合理性

SYSTEM COMPUTING



適用例

- KiK-netにて観測された1,000波を工学的基盤層に入力し、地盤・構造物の応答を計算
- 地盤工学会の全国電子地盤図をもとに作成した3層地盤モデルを使用
 - 物性値: $V_s = 115\text{m/s}$ (clay), $V_s = 260\text{m/s}$ (sand), $V_s = 500\text{m/s}$ (bedrock)
- 京コンピュータ160,000プロセス(20,000ノード)を使って計算(計算時間3,446s)

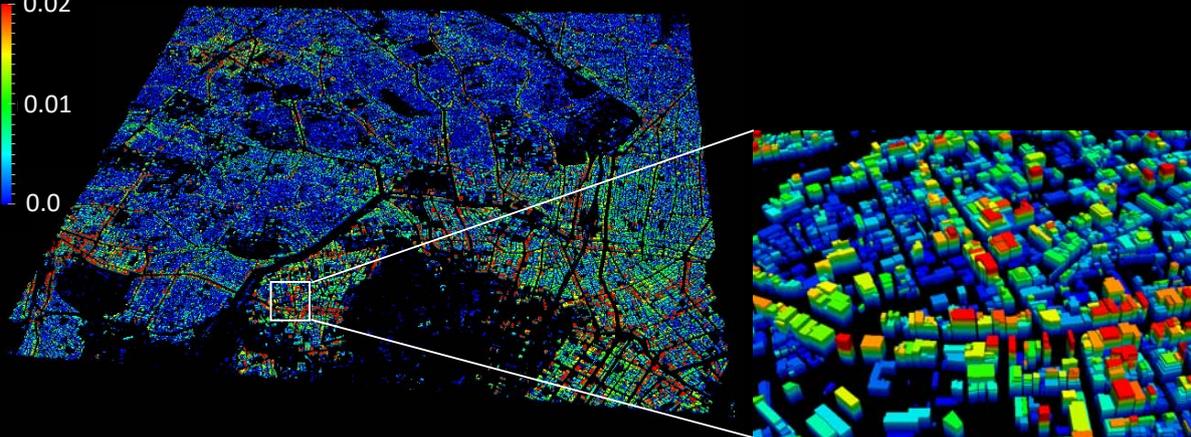
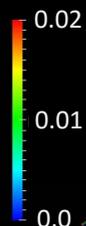


解析領域: 大きさ8.0 x 7.5km, 253,405棟

適用例

- 1,000ケースの構造物の応答を計算
 - 各ケースの最大値, 平均値, 分散などの統計量を求めることができる
 - 多くの地震に対して揺れる構造物, 特定の地震に対して揺れる構造物などの把握
 - 防災対策の優先度を定めることで, 効率的な対策につながる可能性

Mean displacement [m]



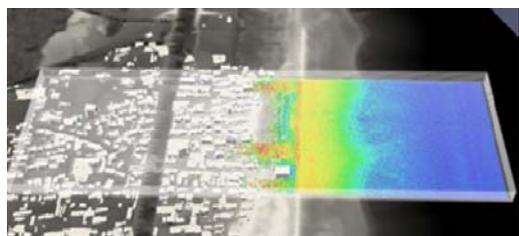
1,000ケースの時系列最大変位の平均値

地震津波複合災害

地震動・地震応答の解析モジュール
と津波の解析モジュールの利用



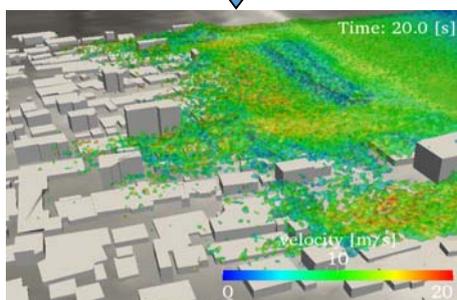
地盤・構造物の都市モデル



津波侵入の都市モデル

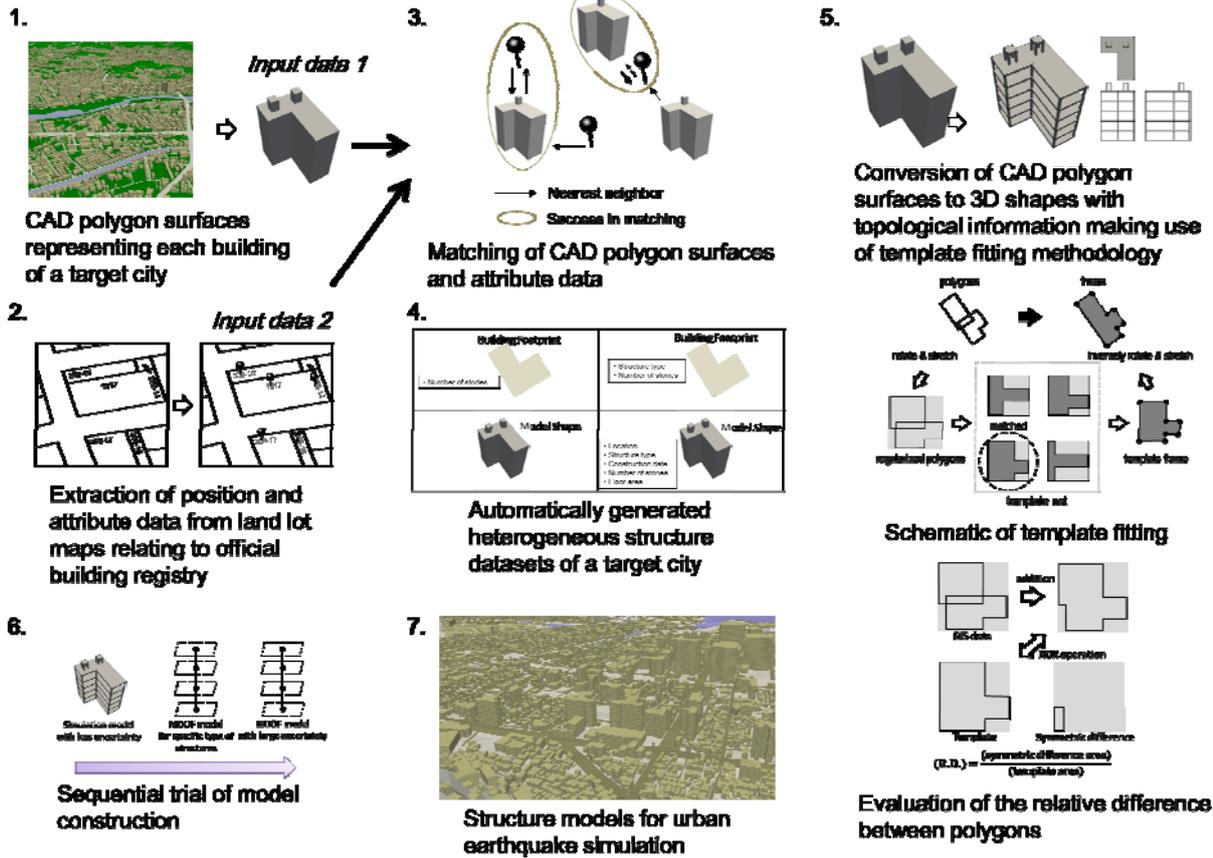


構造物一棟一棟
の被害の有無を
都市モデルを使っ
て推定



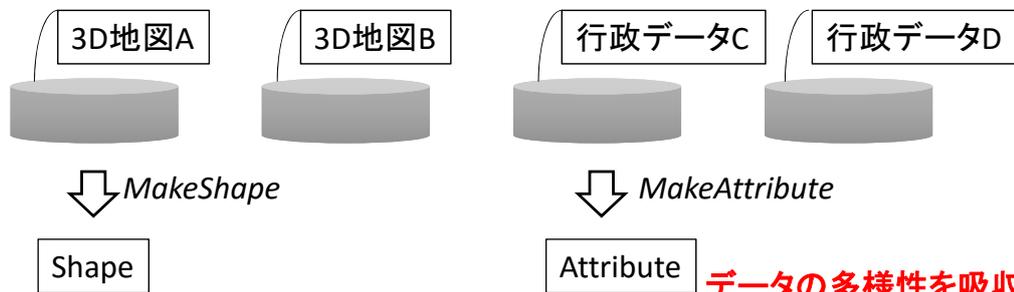
構造物被害を生
じた都市モデル
への津波の侵入

都市モデルの構築



モデル自動構築

- データのサイロ問題の解決
 - 個別整備される都市情報のデータは多様
 - 都市情報のデータを効率処理し、モデル構築を普遍化



- 中間データの自動生成
中間データの管理が不要となり、データ処理が簡略

ターゲットデータ

モデル構築処理の記述

Input of Program P



`MakeInputForP (MakeShape(地図データA), MakeAttribute(行政データB))`

`MakeInputForP (MakeShape(地図データC))`



神戸市の例

- 神戸大との共同研究
- 行政データを利用した, 高度な都市モデルを構築

IESは全国各都市に展開中

IESはトルコのイスタンブールでも開発中(技術移植)



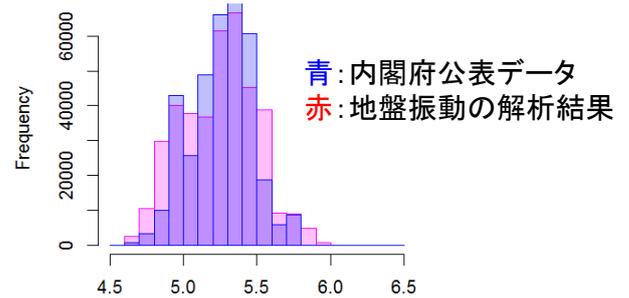
計測震度

- 赤: 6
- 黄: 5
- 緑: 4

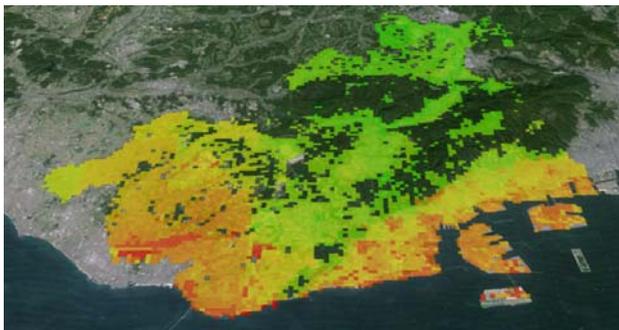
内閣府想定基本ケース



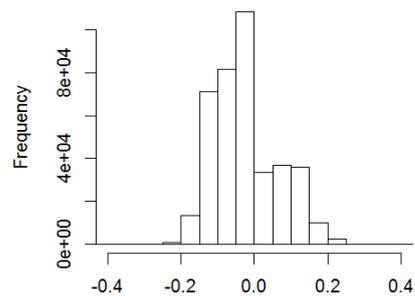
震度分布: 内閣府公表資料



暴露震度ごとの構造物分布



震度分布: 地盤振動解析の結果



構造物の分布でみた計算と経験式の震度差

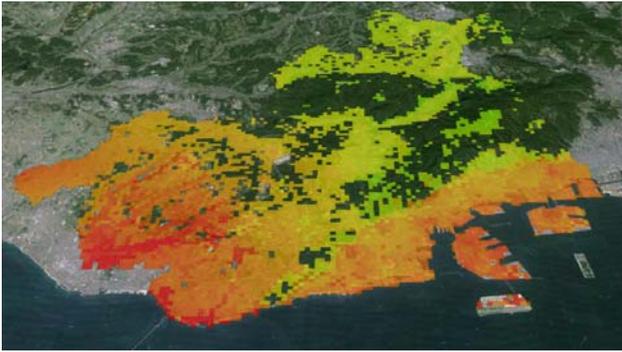
計測震度

赤:6

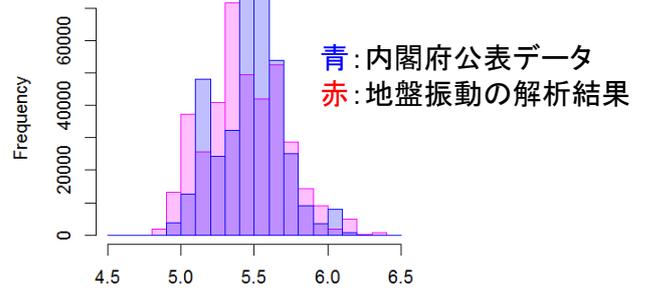
黄:5

緑:4

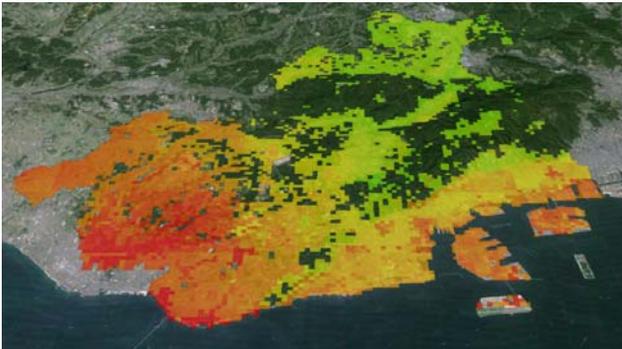
内閣府想定陸側ケース



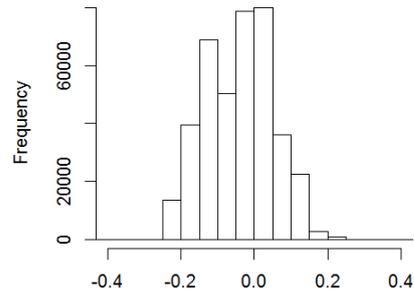
震度分布:内閣府公表資料



暴露震度ごとの構造物分布



震度分布:地盤振動解析の結果

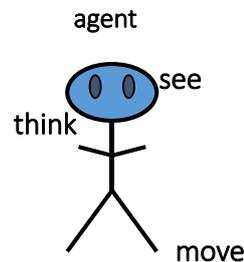


構造物の分布でみた計算と経験式の震度差

群集避難 Multi Agent System (MAS)

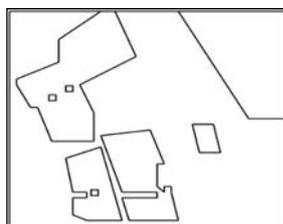
エージェント

- 「見て」、「考えて」、「動く」機能
- 自律的
- エージェントの属性(能力・仕事・情報)は多様

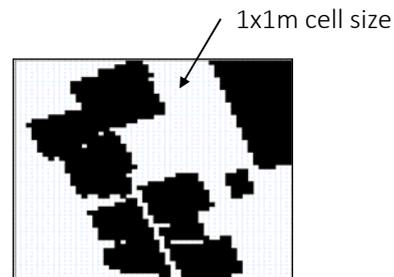


エンバィロメント

- 「グリッド」と「グラフ」の混合モデル
- GISデータから自動構築



GIS data

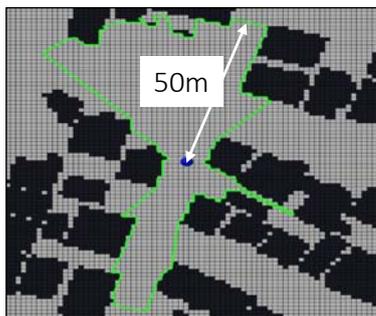


raster model for MAS

ナビゲーション

レーダー型スキャンにより、視野の範囲を同定し、地物の情報を抽出

- エージェントは自動的にナビゲーションを行う
- 住民エージェントは地図データを持ち、最適経路を判定
- 旅行者エージェントは高所を捜し、グループに追随



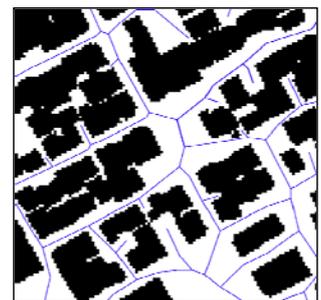
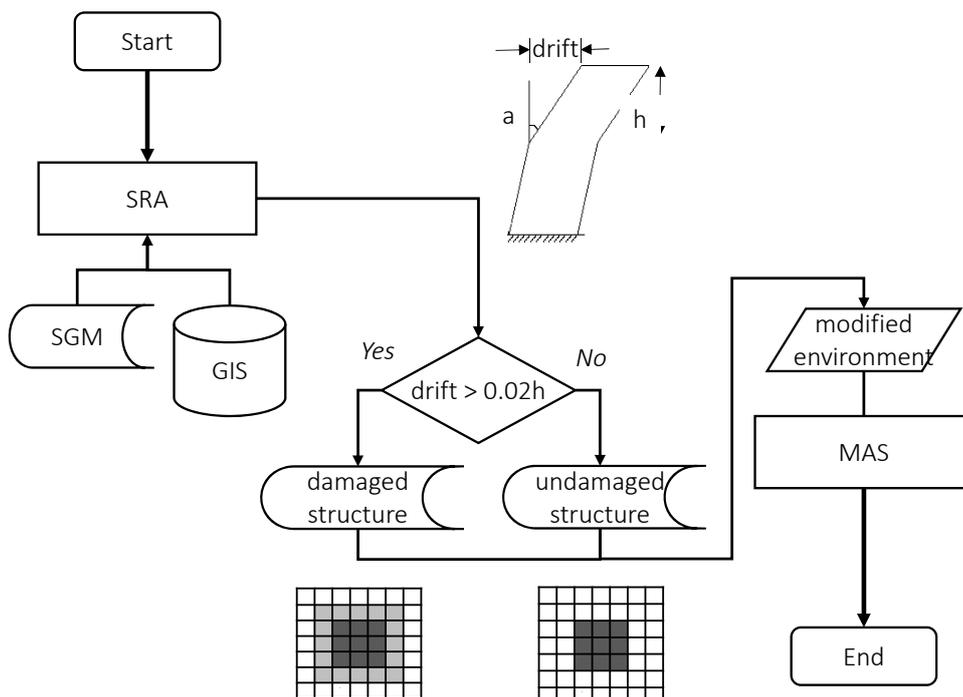
resident agent (pre-defined path)



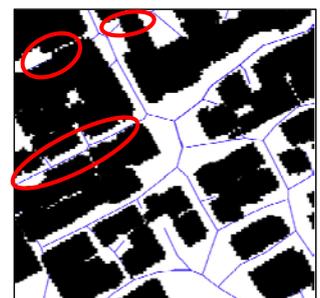
visitor agent (no pre-defined path)

地震応答と群集避難の連成

SRA 構造物の地震応答
MAS エージェントの避難

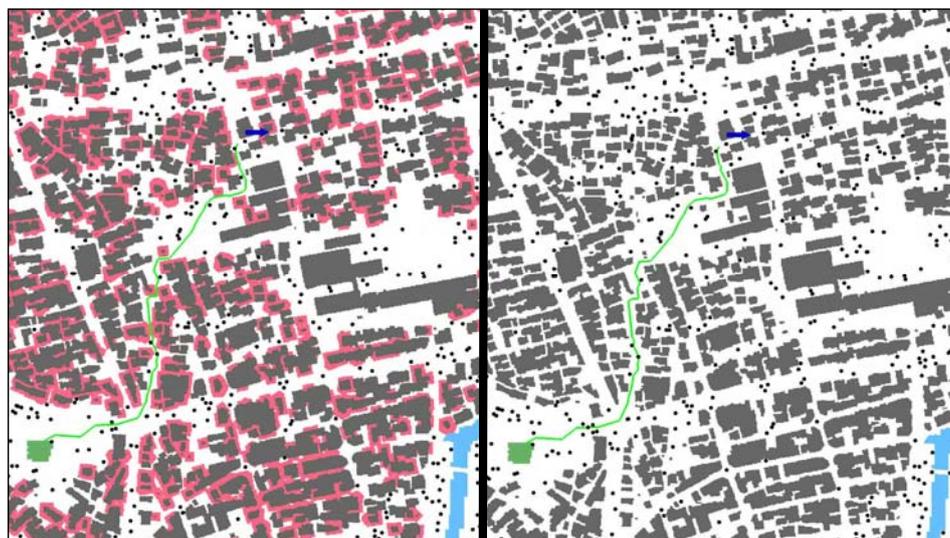


before earthquake



after earthquake

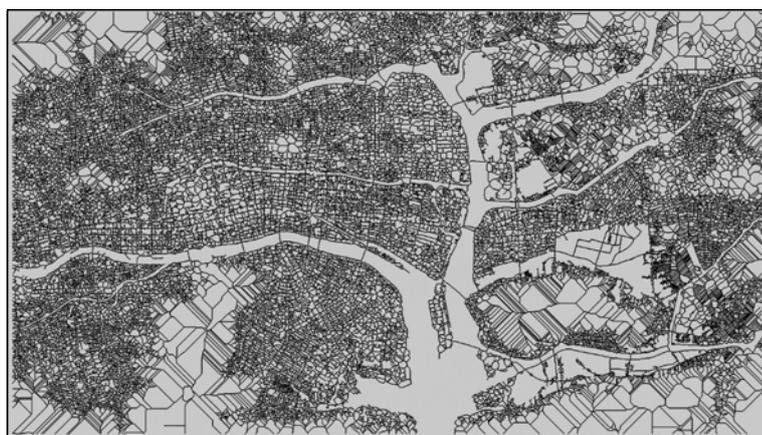
被災箇所でのナビゲーション



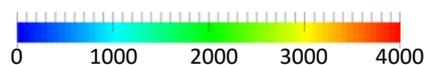
被災環境

無被災環境

道路の使用状況



道路使用度の平均



防災計画立案の際に、耐震補強等の優先づけに利用

- 避難状況の概要
- 道路の利用状況の概要
- 重要道路の抽出 (使用度 > 500)

- 1,000回のモンテカルロシミュレーション
- 平均使用度が500を超えた道路が重要道路

道路照明の影響

災害シナリオのオプション

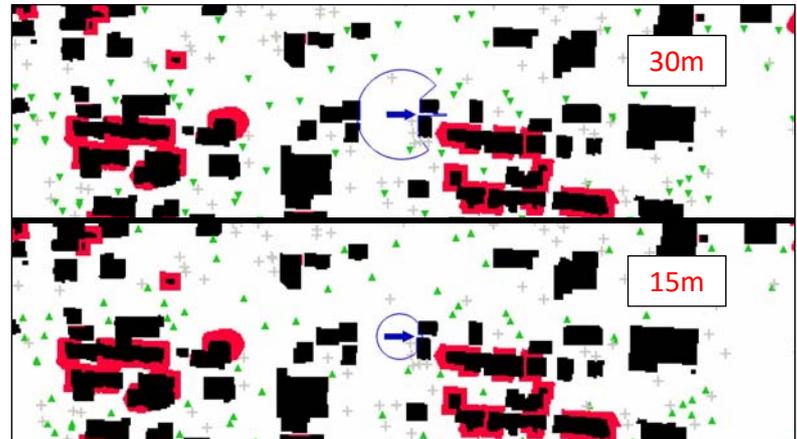
- 揺れ
- 満月時の停電
- 津波の侵入

設定

- 視野は15m (0.2 lux)
- 旅行者エージェントは住民エージェントを追従
- 遅延のない避難

比較

- 緊急照明 (15 lux, 視野30 m) の導入

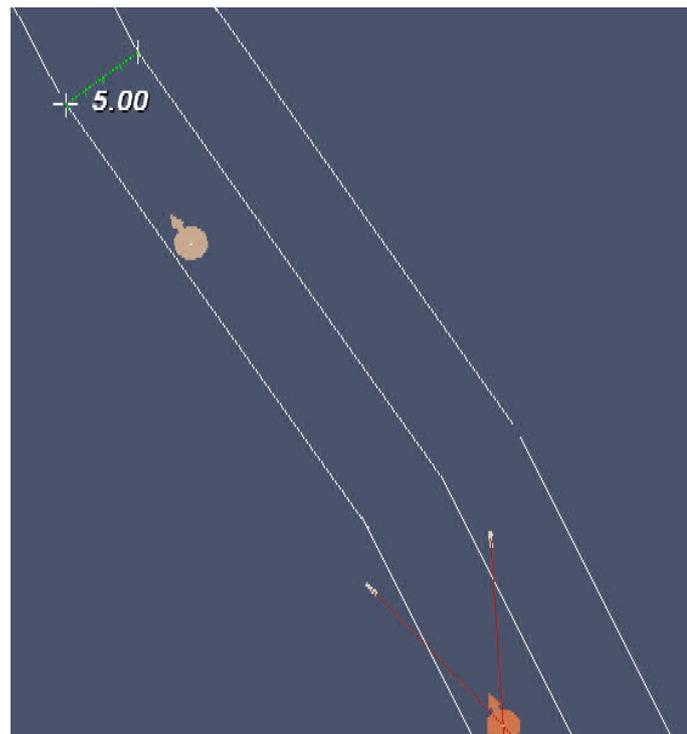


自動車

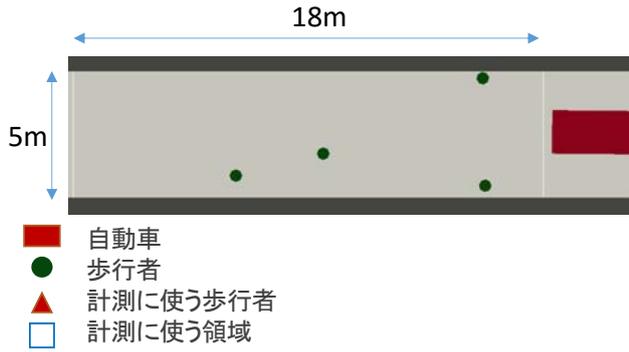
機能

- 衝突を避けるための、他の自動車・歩行者との相互作用 (相互作用の標準的モデルの採用)
- 歩行者重視
- 現実的な操舵
- 路肩走行の禁止

路線変更は未実装



自動車-歩行者の相互作用

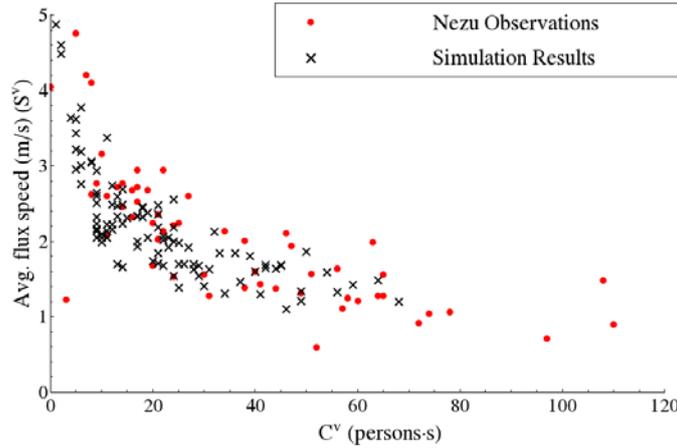


一方通行路線

- 4 m 幅員 (+ 両側に0.5 m 幅員の路肩)
- 18 m 視野

モンテカルロシミュレーション

- エージェントの密度は固定
- 初期配置はランダム



自動車-歩行者の混在避難

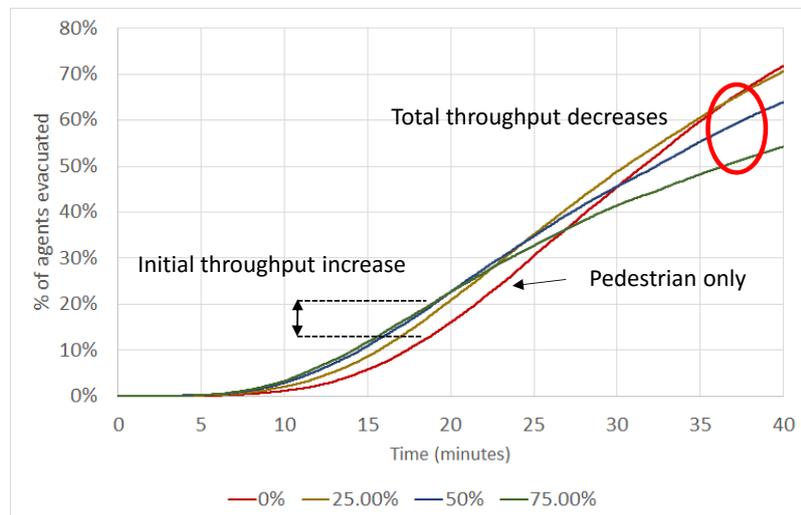
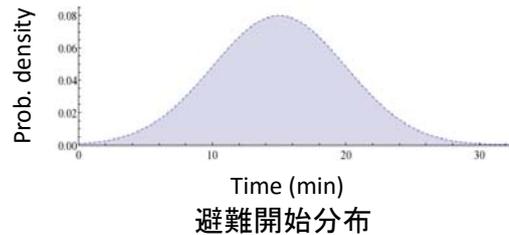
自動車利用を無制限

最悪と最善の避難状況

Minimum	54.26%
Maximum	71.80%

結果

- 自動車の利用は初期の避難状況を改善
- 自動車利用の増加に伴い、道路が飽和し避難状況を悪化
→最悪の場合、17%悪化



自動車-歩行者の混在避難

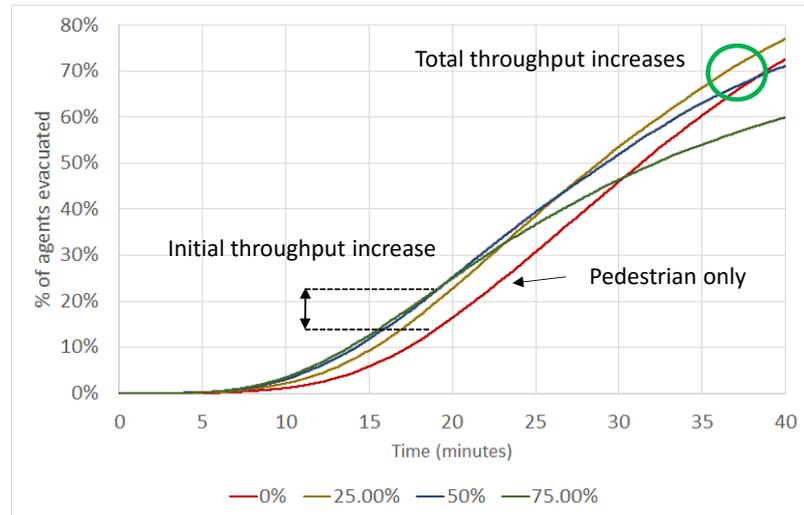
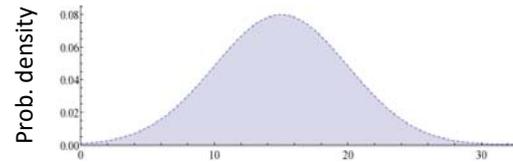
自動車利用を制限

最悪と最善の避難状況

Minimum	59.97%
Maximum	77.06%

結果

- 自動車利用を適切に制限することで5.2%の避難状況の改善
- 対象地域では、相当量の自動車を利用しても避難状況を悪化しない



おわりに

◆地震と津波のシミュレーション

- スパコンを使ってニュートンの運動方程式を解く
- 理学・工学・社会科学の解析手法を統合する

◆シミュレーションの防災・減災利用

- 想定外をなくす, 科学的な災害・被害想定が必要
- 大規模数値シミュレーションは重要なツール

より効果的な, 自・共・公の「防災投資」に