

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～

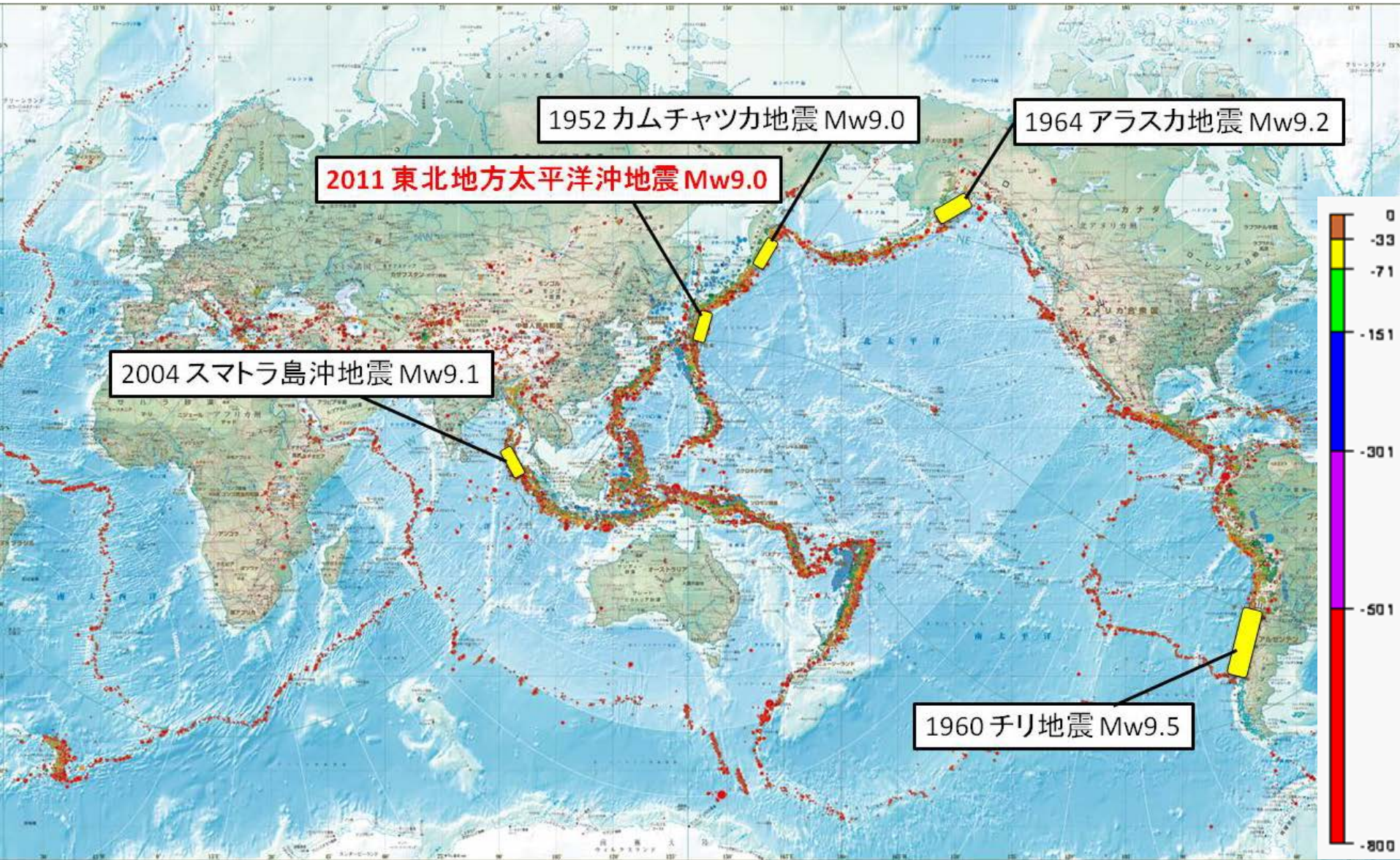
堀宗朗

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

深さ(km)



地震に関する学問

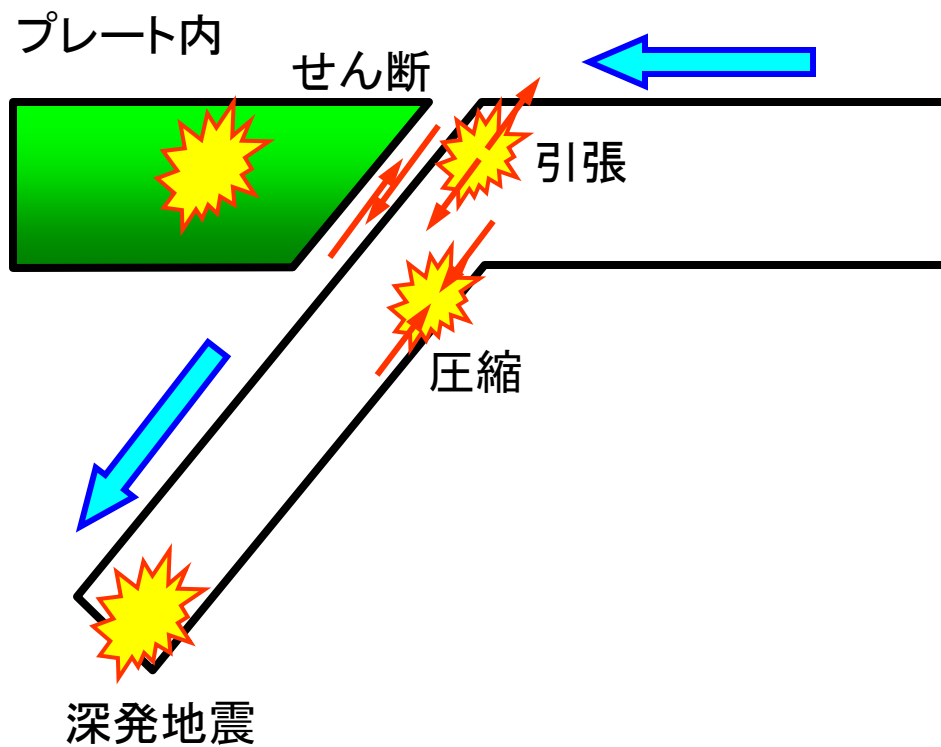
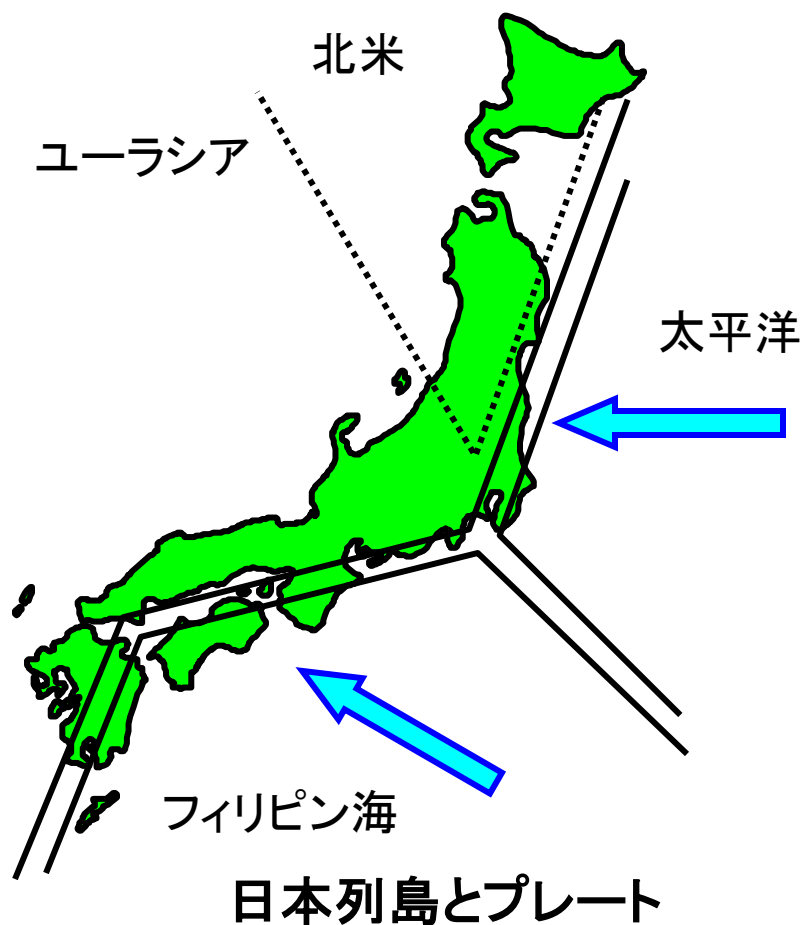
地震学
地震そのものを研究

地震の理学
プレートテクトニクス, 断層,
地震波, 地震観測

地震工学
地震の備えを研究・開発

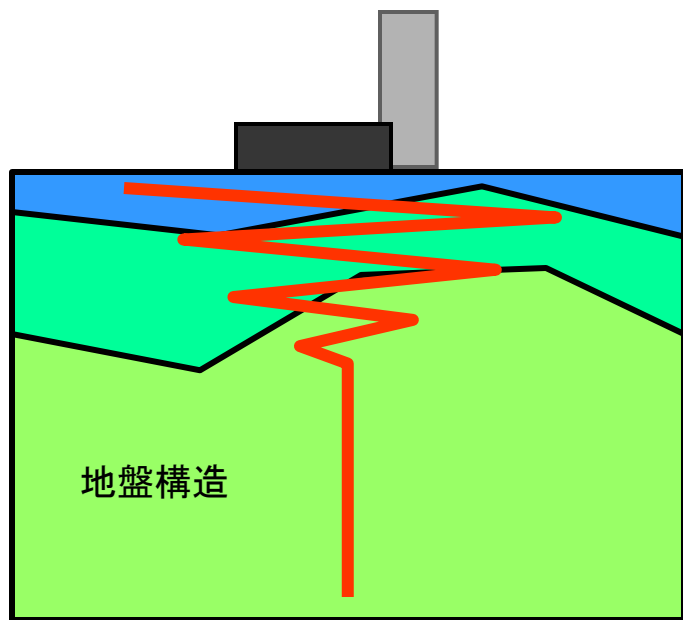
地震の工学
耐震設計(建築・土木構造物)
免震／制震, 危機管理, 地震
防災

エッセンス:地震学的視点



プレートの滑り込みと地震

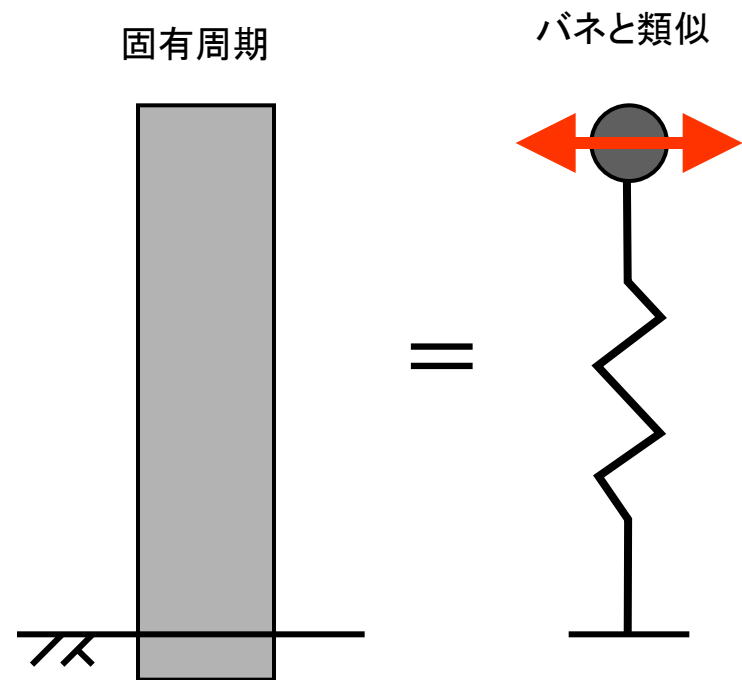
エッセンス：地震工学的視点



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

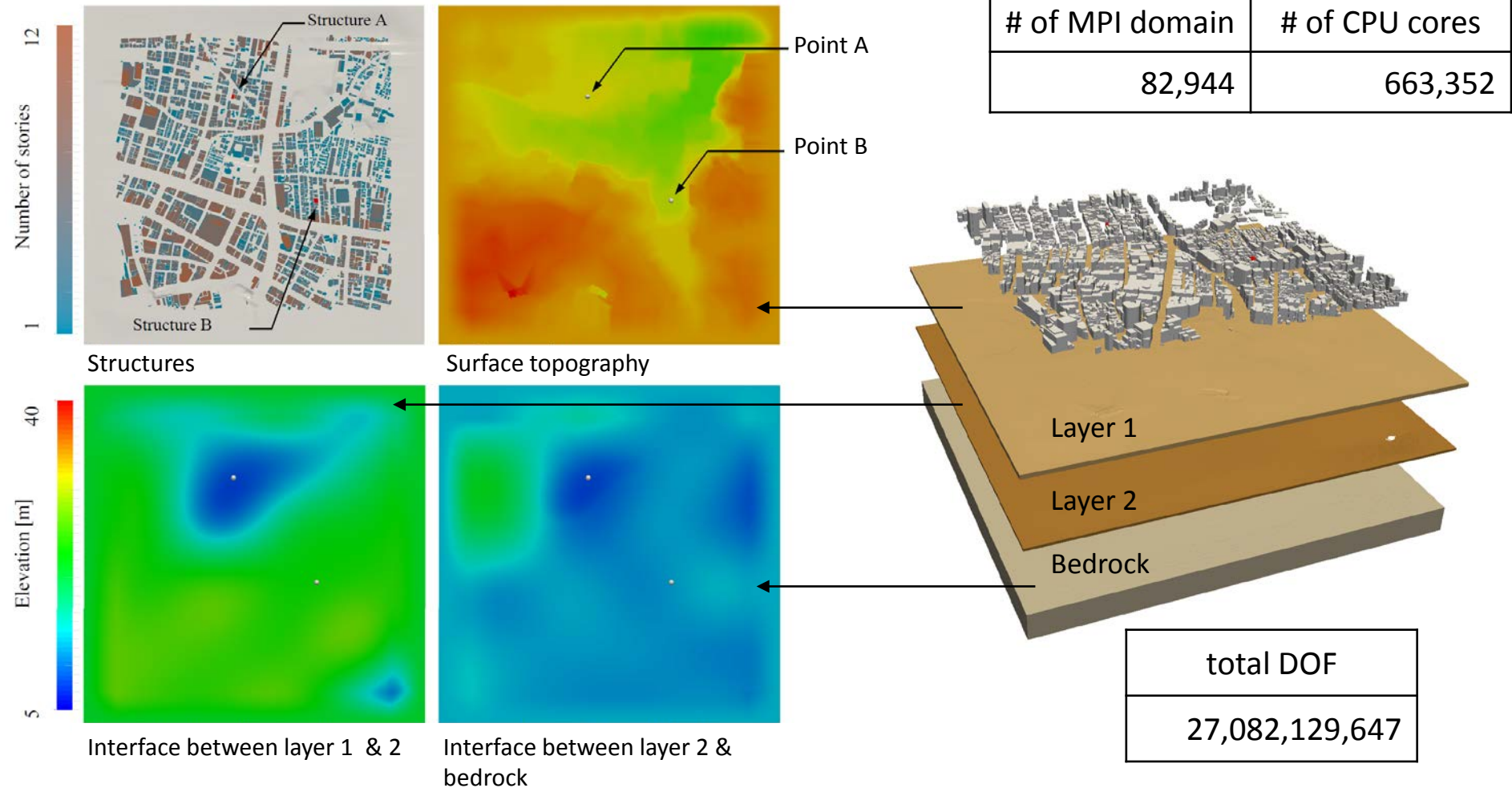
- 地盤は常に地盤として挙動
 - 地盤の材料定数から行列を決定することが可能

◆ 数理

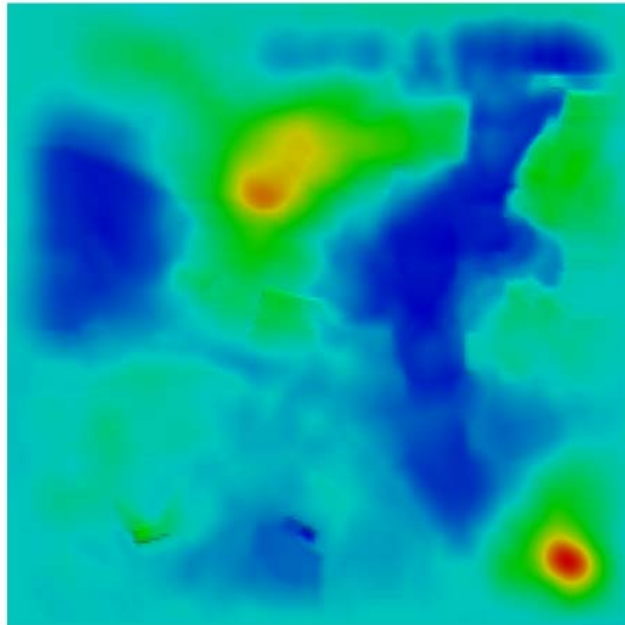
- 解の誤差を最少にしていくアルゴリズム
 - 連立方程式の解を高速で計算することが可能

都市のモデル

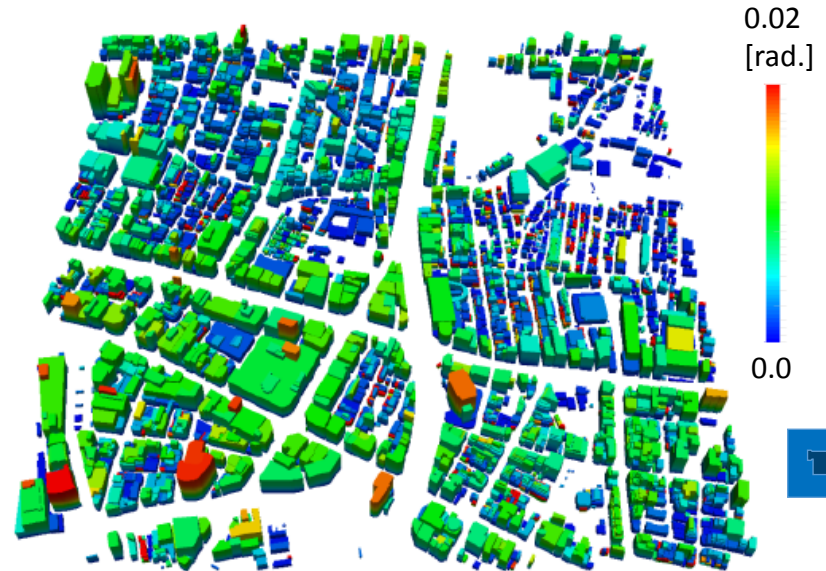
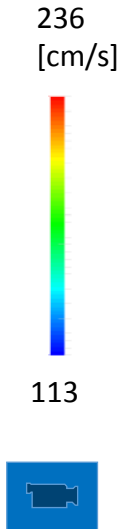
- 都市もニュートンの運動方程式を満たす
- 都市の運動方程式を連立方程式に変換する



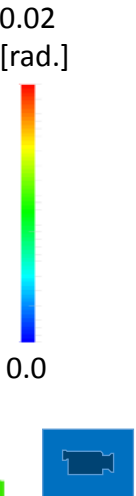
連立方程式の解



地盤の応答 (SI値)



構造物の応答 (層間変形角)

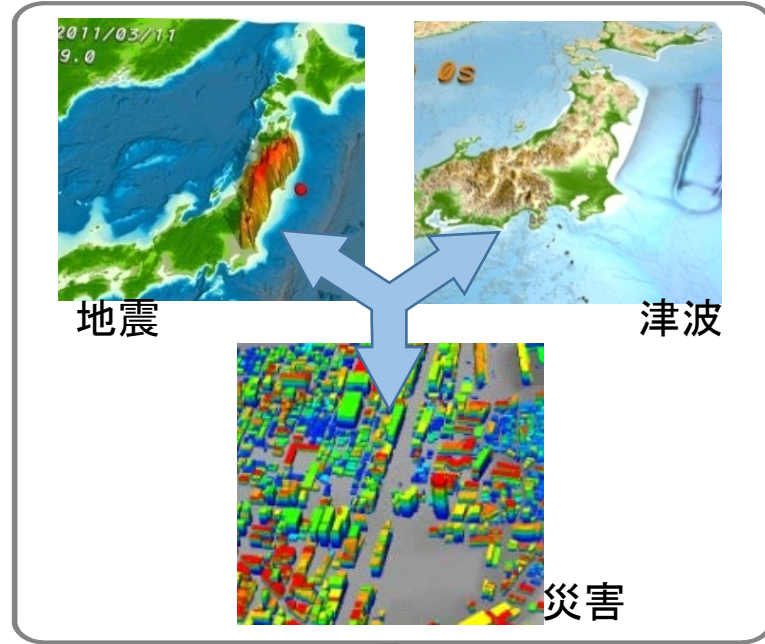
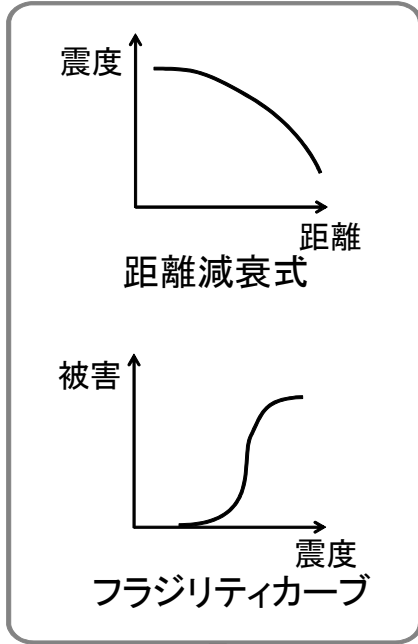


有限要素法
都市モデル

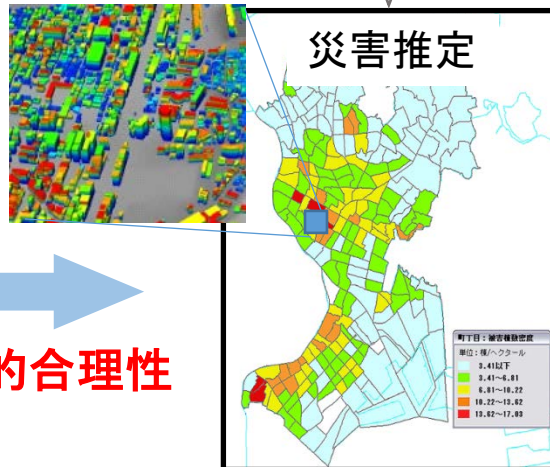
運動方程式を変換した連立方程式を解く解法
都市が満たす運動方程式を決めるモデル

巨大地震・津波による災害予測

現状
経験ベース

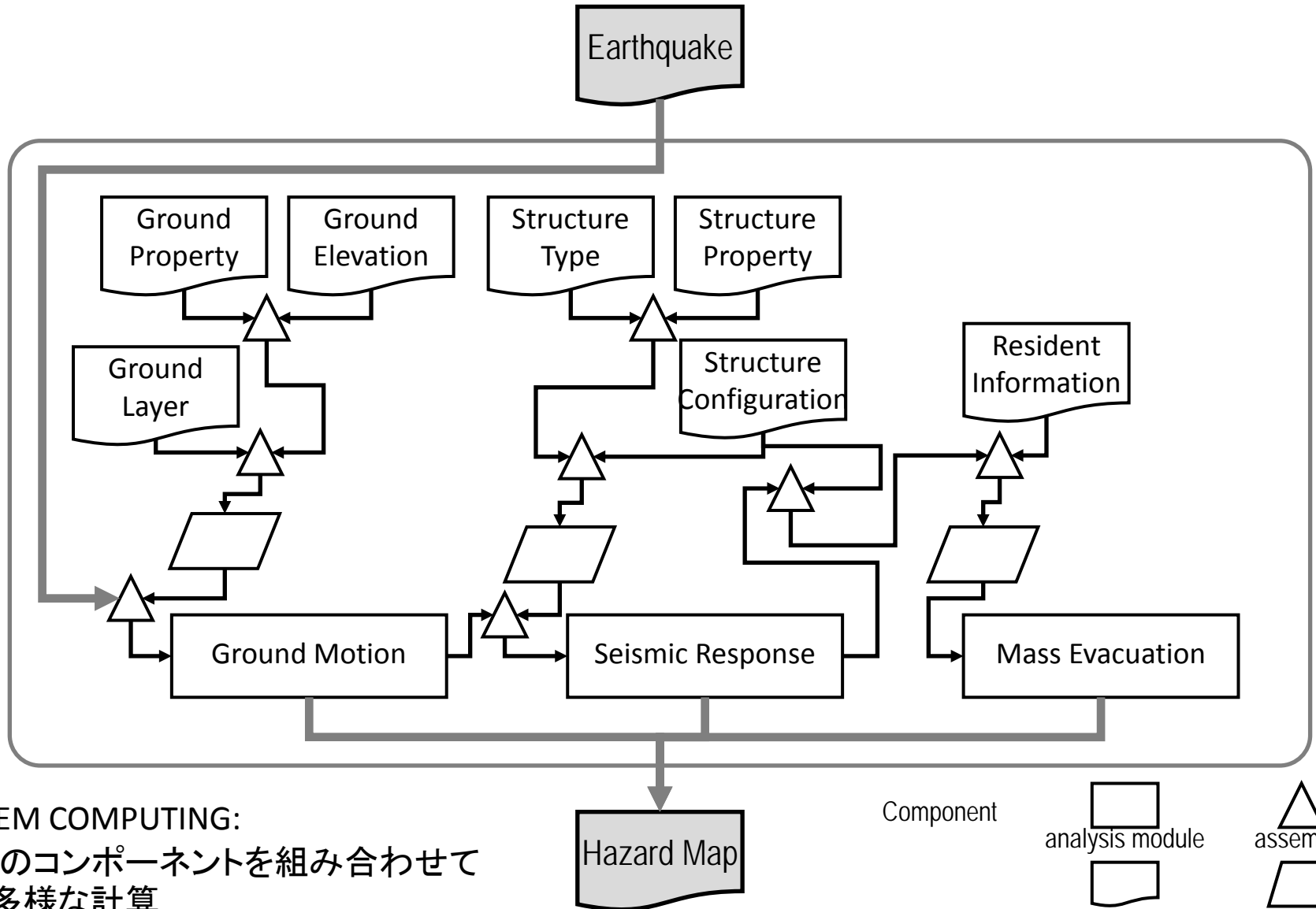


将来
計算ベース



科学的合理性

SYSTEM COMPUTING

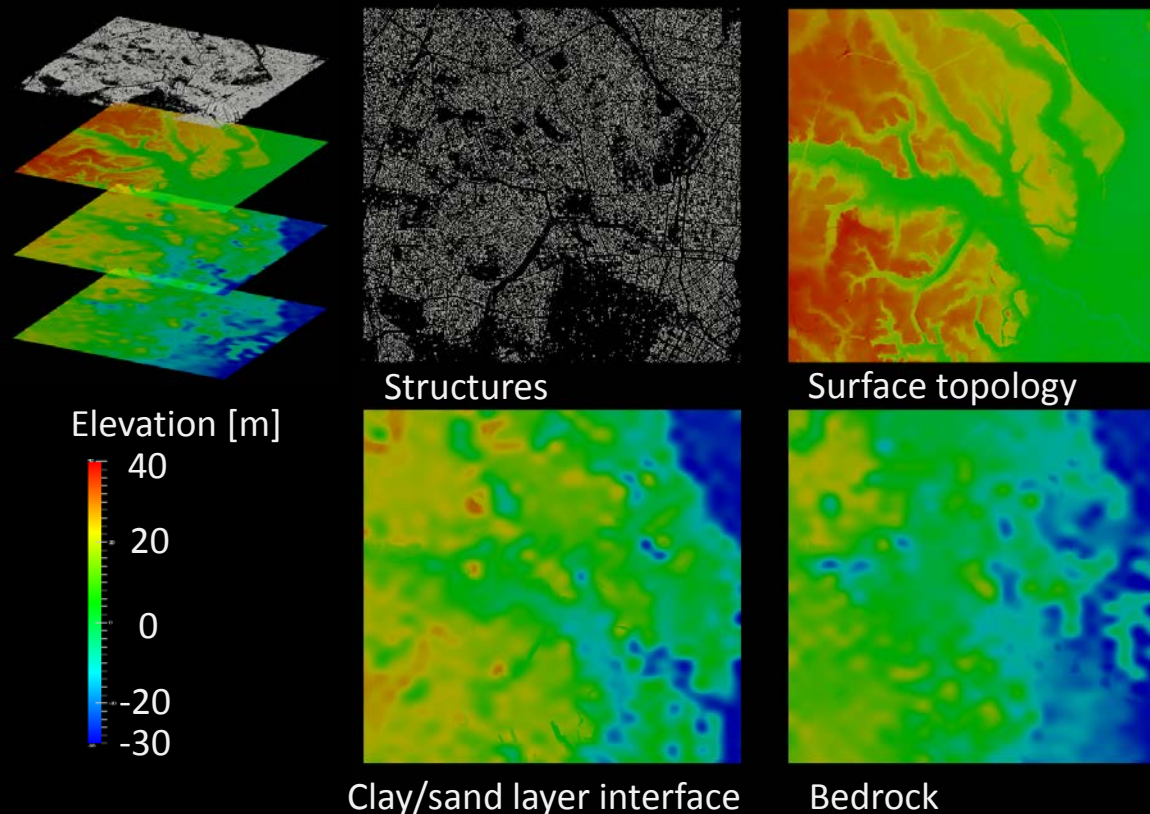


SYSTEM COMPUTING:

多数のコンポーネントを組み合わせて
使う多様な計算

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)

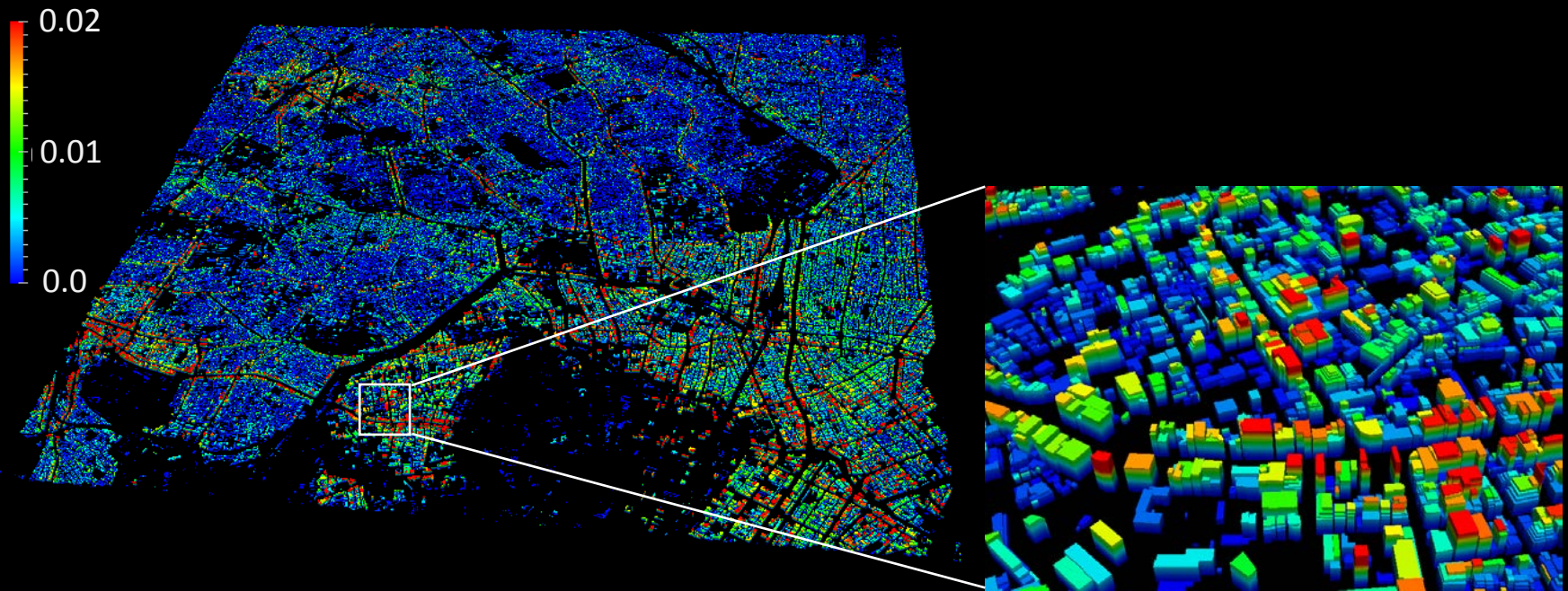


解析領域: 大きさ8.0 x 7.5km, 253,405棟

適用例

- 1,000ケースの建造物の応答を計算
 - 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建造物, 特定の地震に対して揺れる建造物などの把握
 - 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

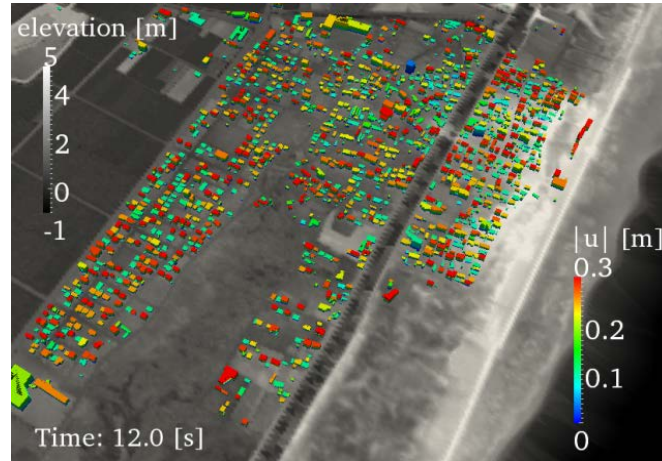
地震津波複合災害



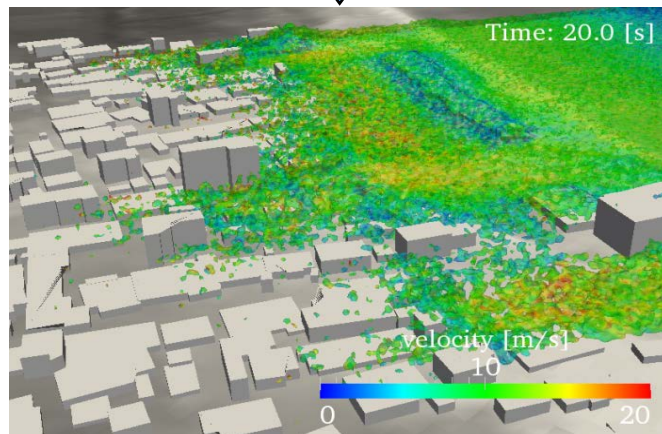
地震動・地震応答の解析モジュール
と津波の解析モジュールの利用



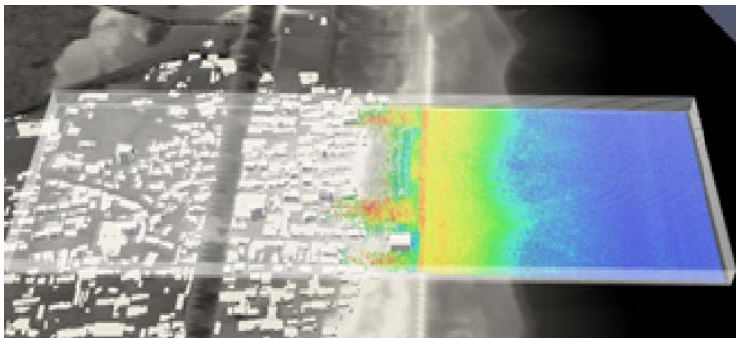
地盤・構造物の都市モデル



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



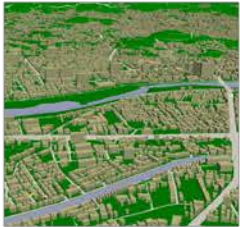
構造物被害を生
じた都市モデル
への津波の侵入



津波侵入の都市モデル

都市モデルの構築

1.



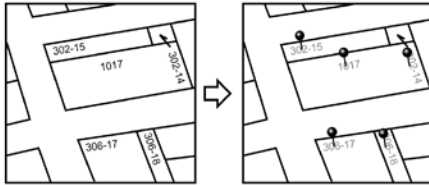
Input data 1



CAD polygon surfaces representing each building of a target city

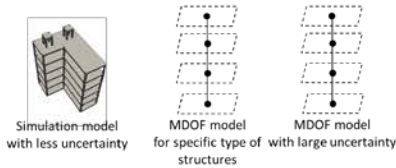
2.

Input data 2



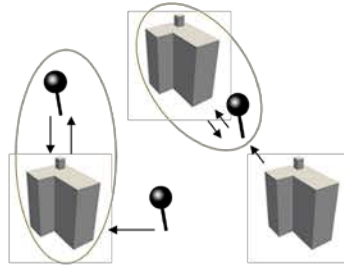
Extraction of position and attribute data from land lot maps relating to official building registry

6.



Sequential trial of model construction

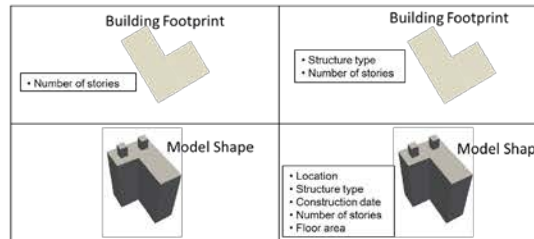
3.



→ Nearest neighbor
○ Success in matching

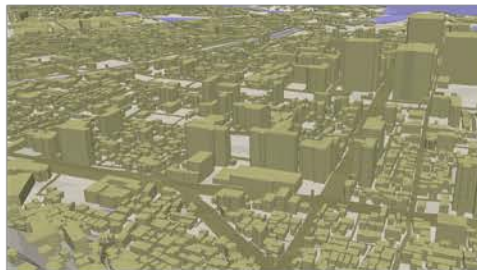
Matching of CAD polygon surfaces and attribute data

4.



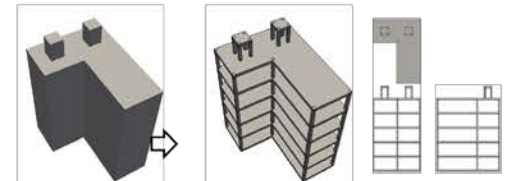
Automatically generated heterogeneous structure datasets of a target city

7.

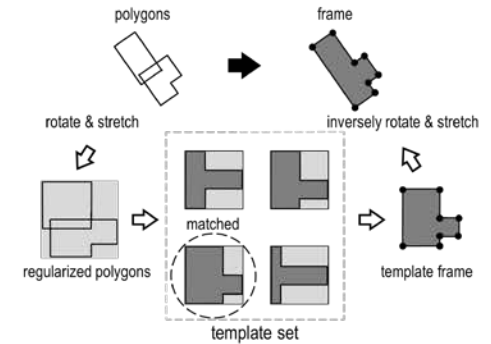


Structure models for urban earthquake simulation

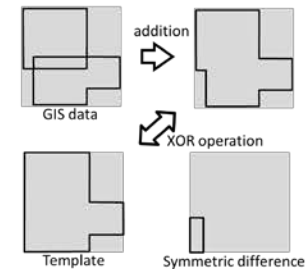
5.



Conversion of CAD polygon surfaces to 3D shapes with topological information making use of template fitting methodology



Schematic of template fitting

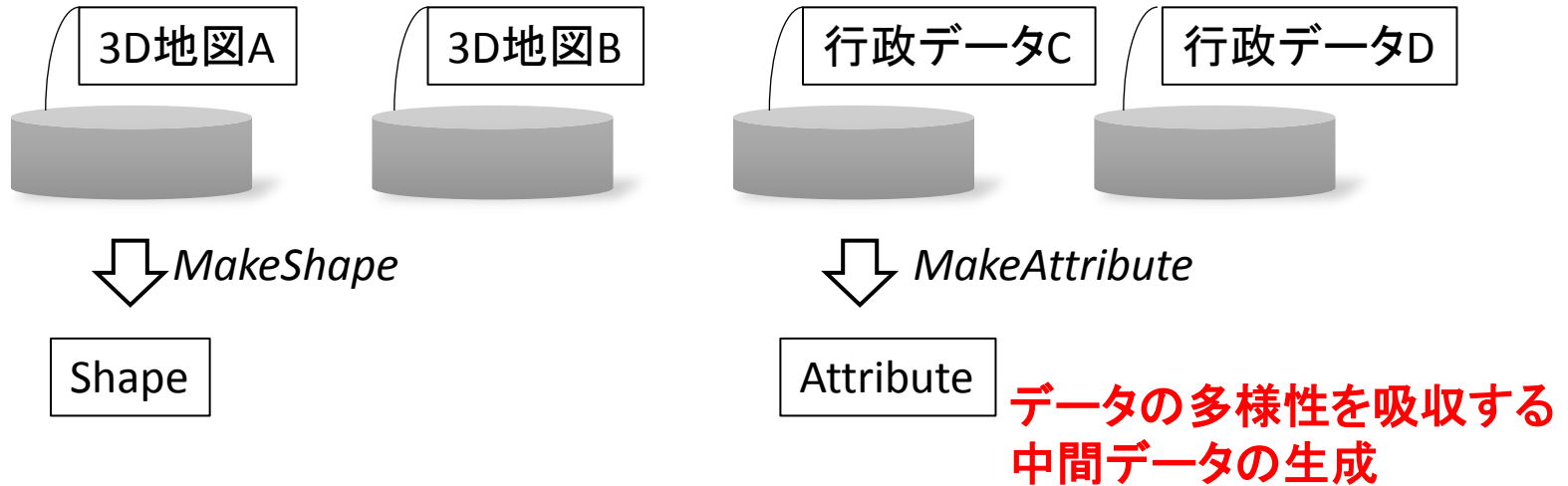


$$(R. D.) = \frac{(\text{symmetric difference area})}{(\text{template area})}$$

Evaluation of the relative difference between polygons

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 ) )
```

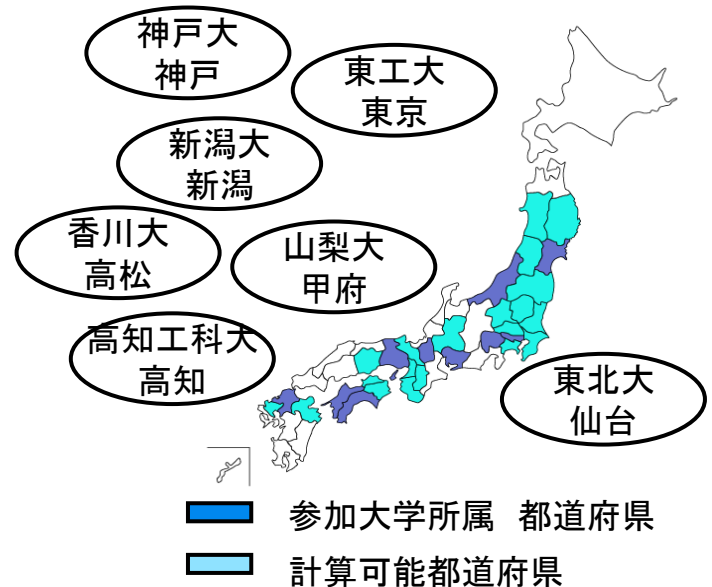



神戸市の例

- 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)



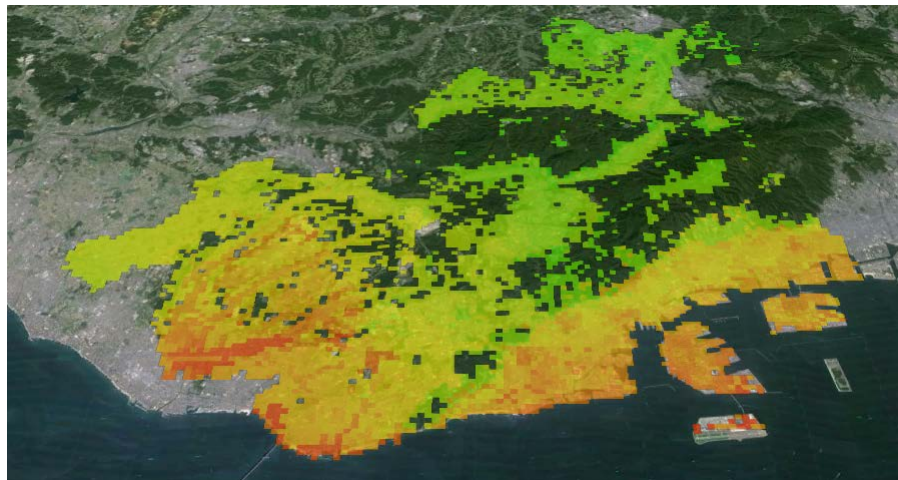
内閣府想定基本ケース

計測震度

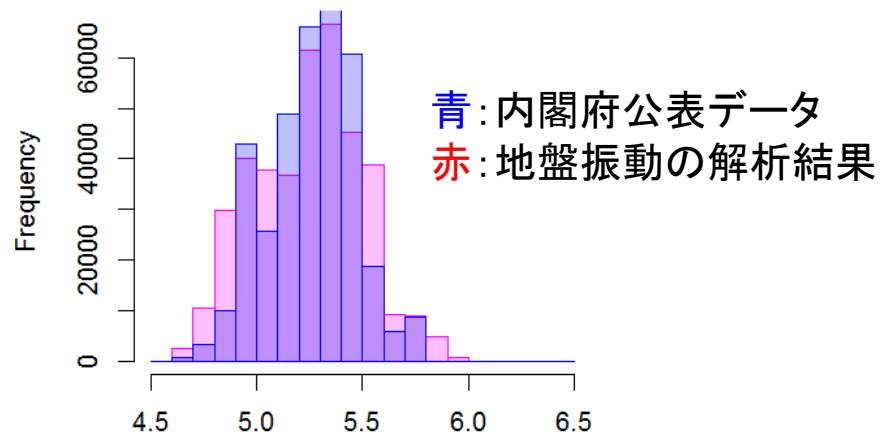
赤:6

黄:5

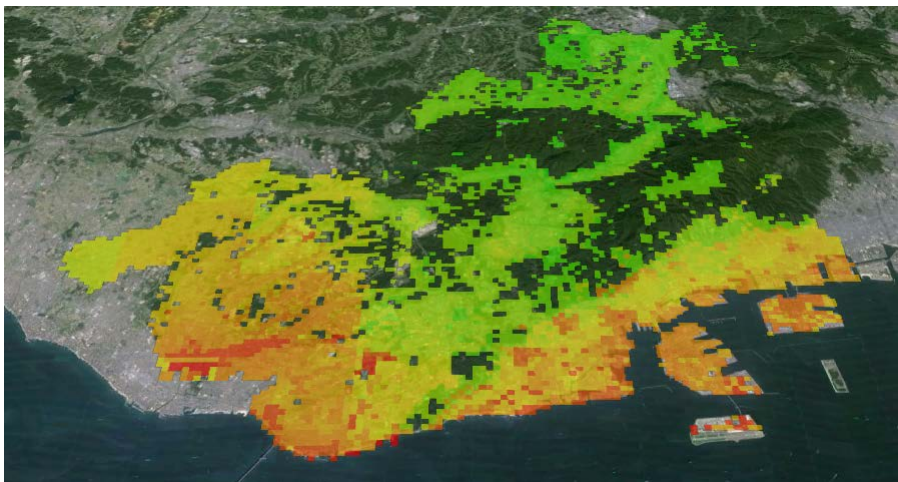
緑:4



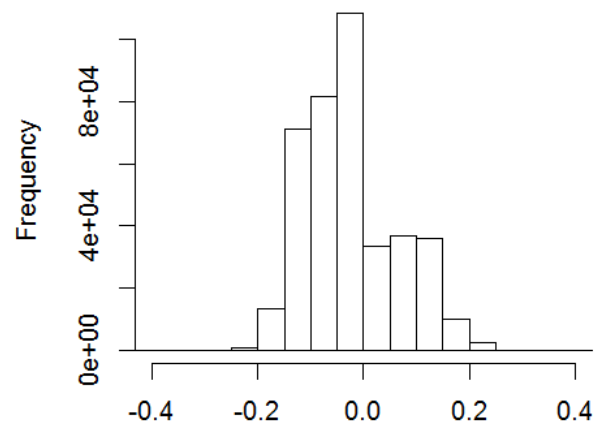
震度分布:内閣府公表資料



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

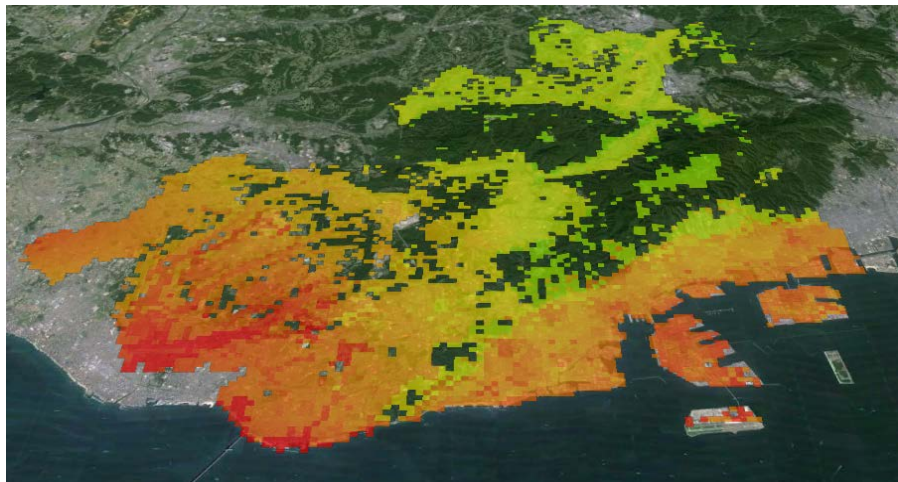
内閣府想定陸側ケース

計測震度

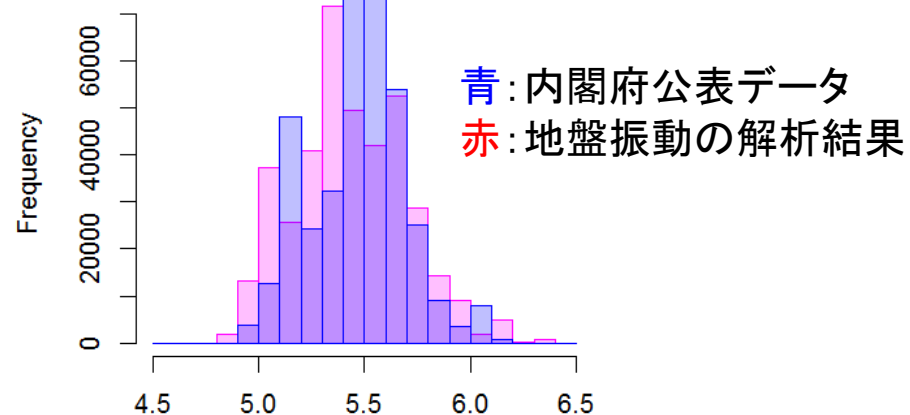
赤:6

黄:5

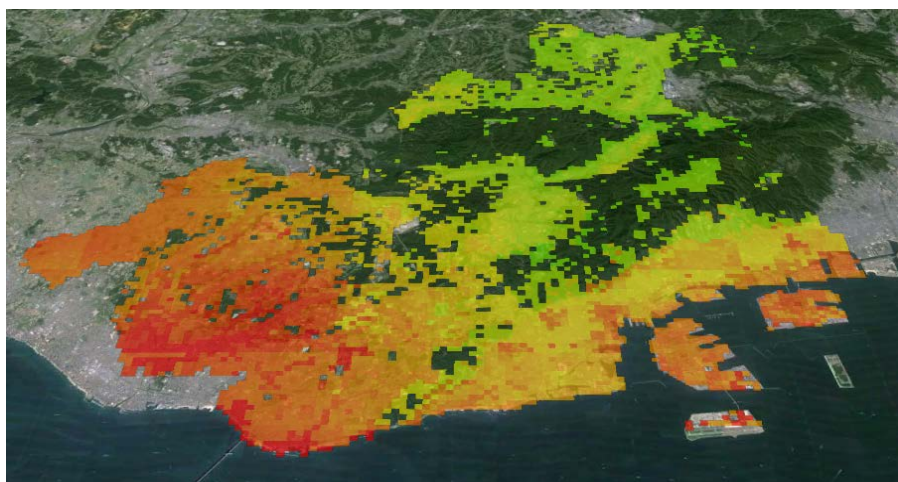
緑:4



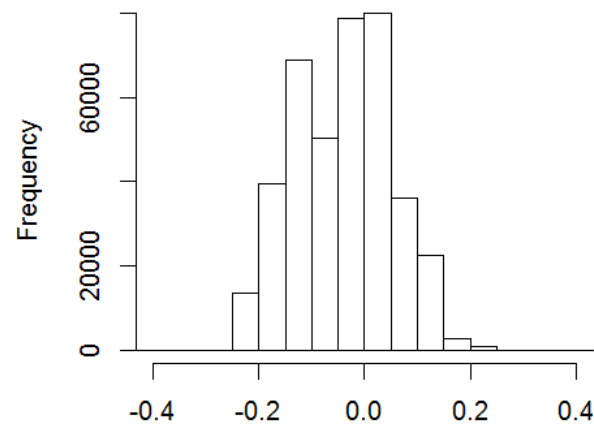
震度分布:内閣府公表資料



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

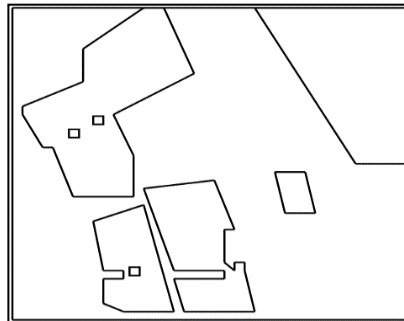
群集避難 Multi Agent System (MAS)

エージェント

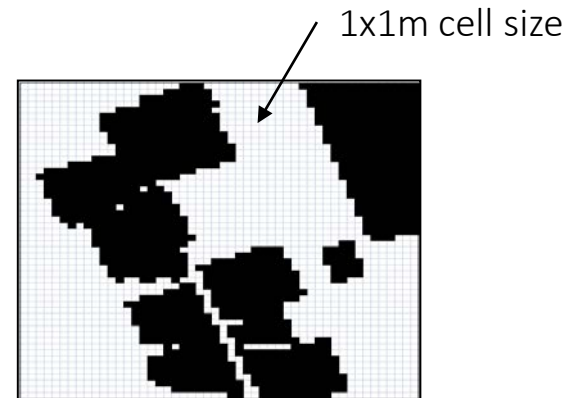
- 「見て」、「考えて」、「動く」機能
- 自律的
- エージェントの属性(能力・仕事・情報)は多様

エンバイロメント

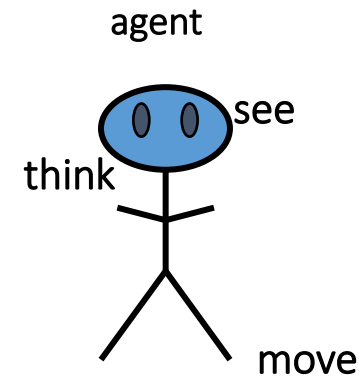
- 「グリッド」と「グラフ」の混合モデル
- GISデータから自動構築



GIS data



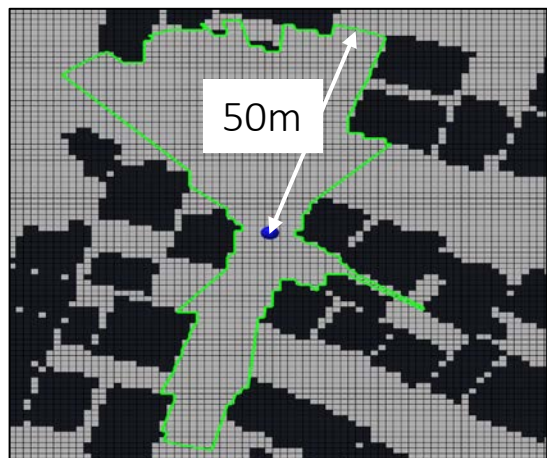
raster model for MAS



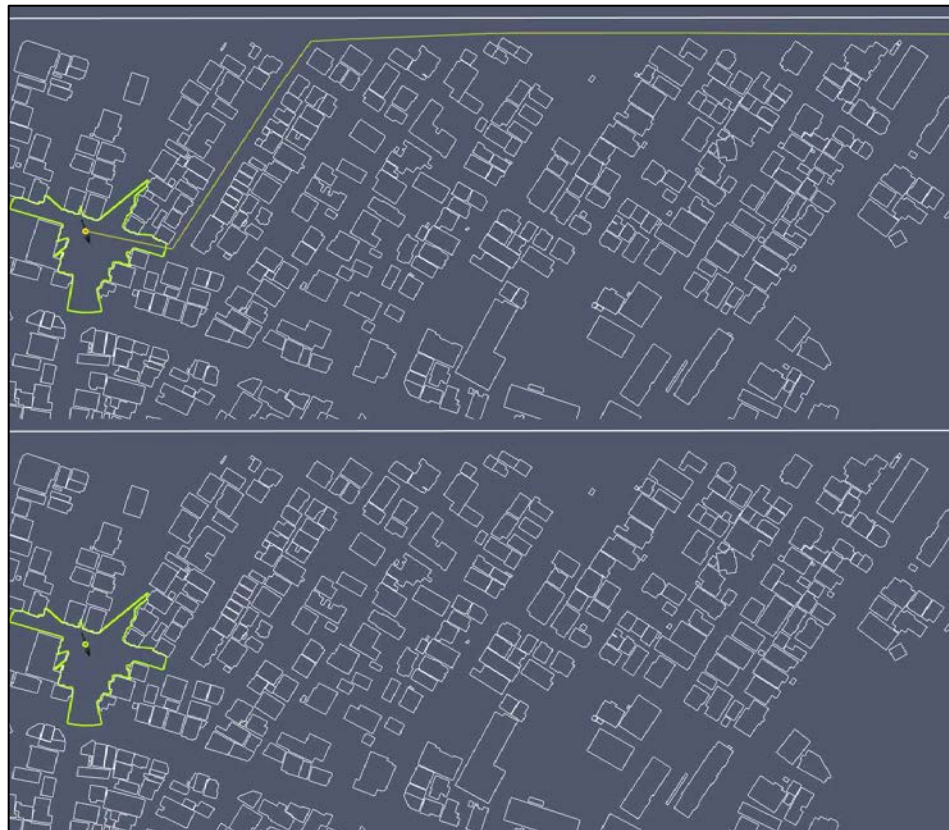
ナビゲーション

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



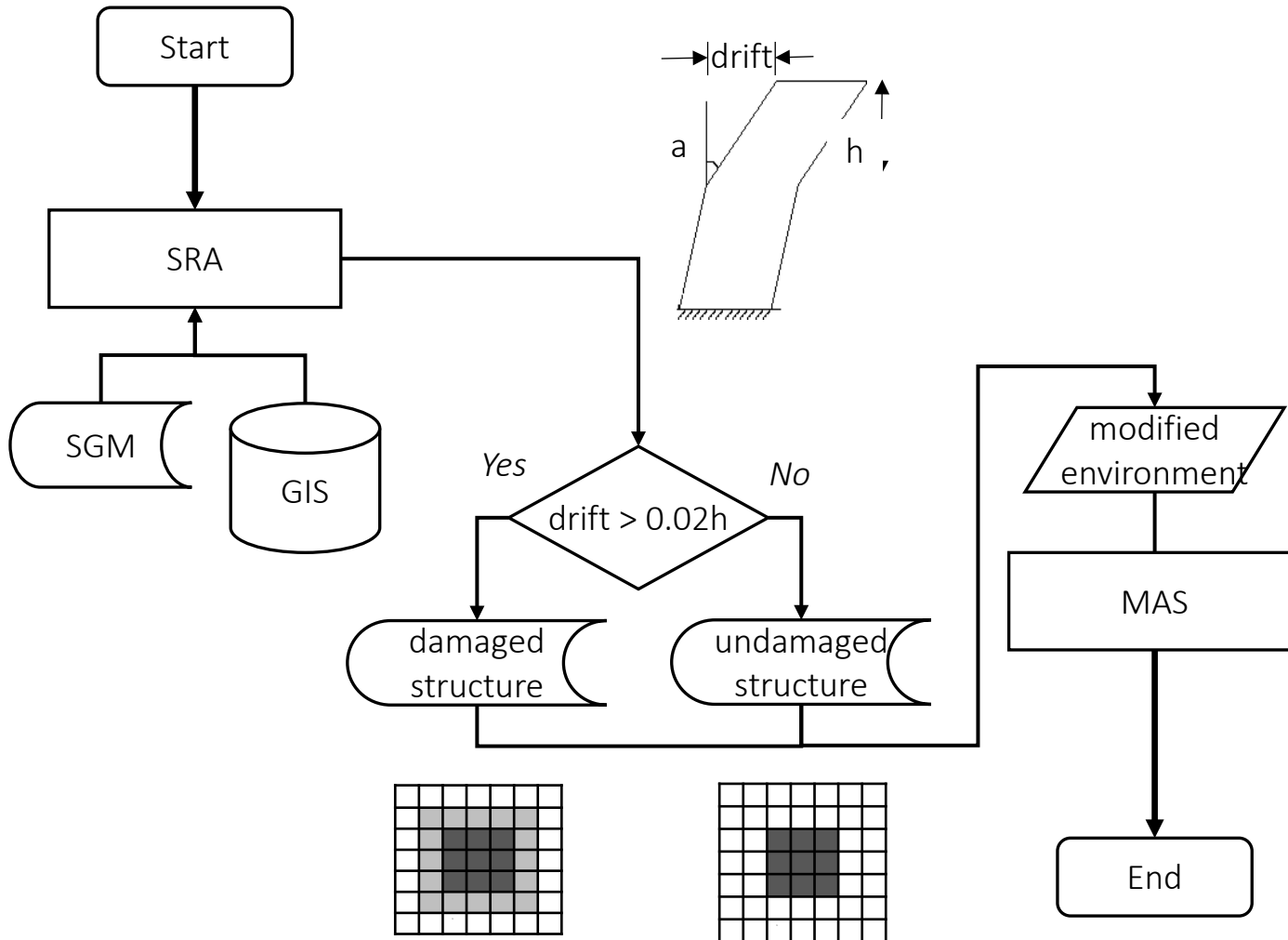
resident agent (pre-defined path)



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

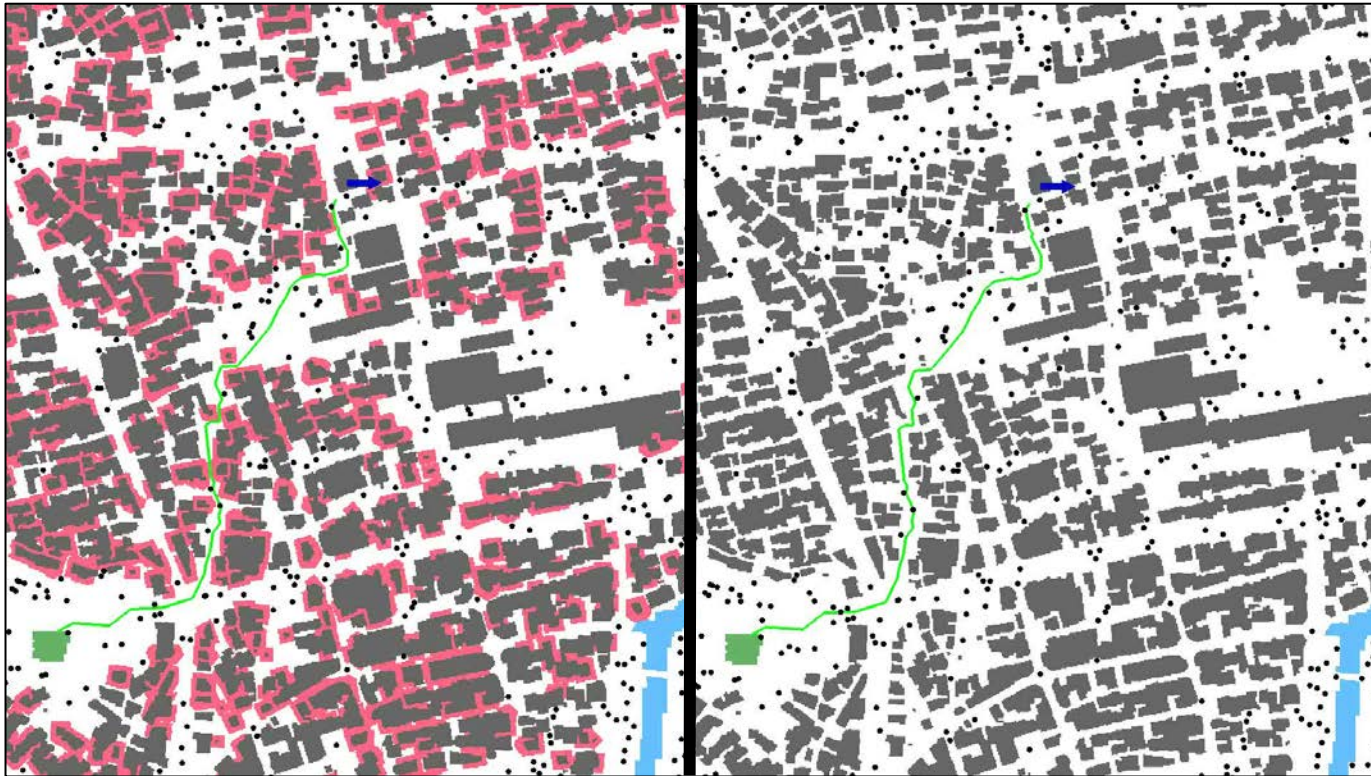


before earthquake



after earthquake

被災箇所でのナビゲーション



被災環境

無被災環境

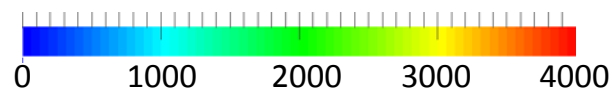
道路の使用状況



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)

道路使用度の平均



- 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

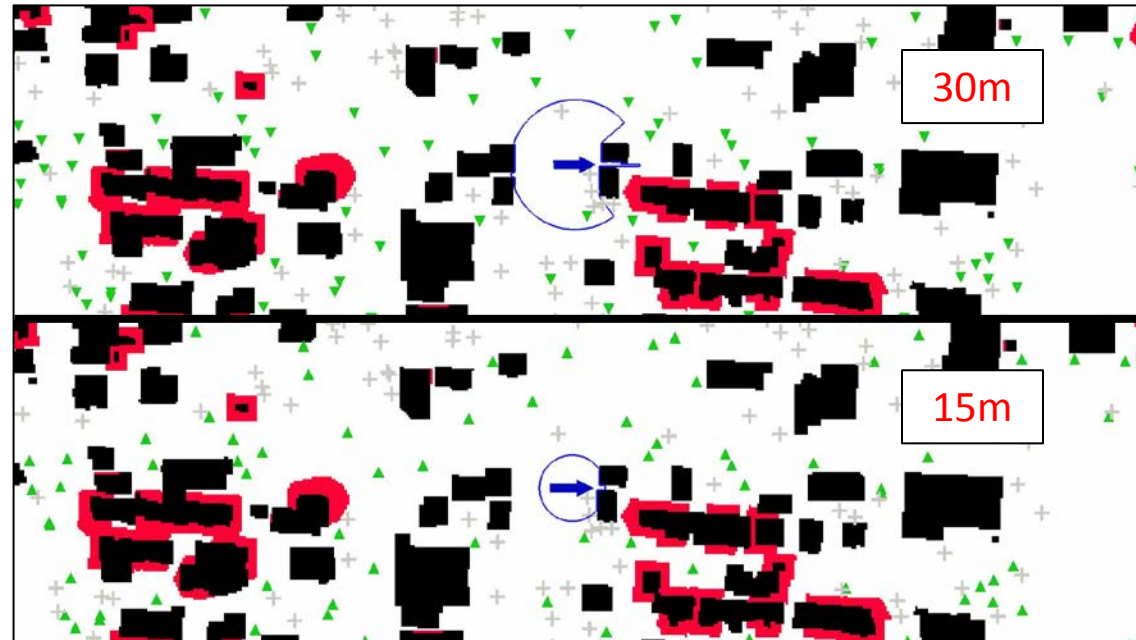
- 揺れ
- 満月時の停電
- 津波の侵入

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



+ visitor agent

➡ target visitor agent

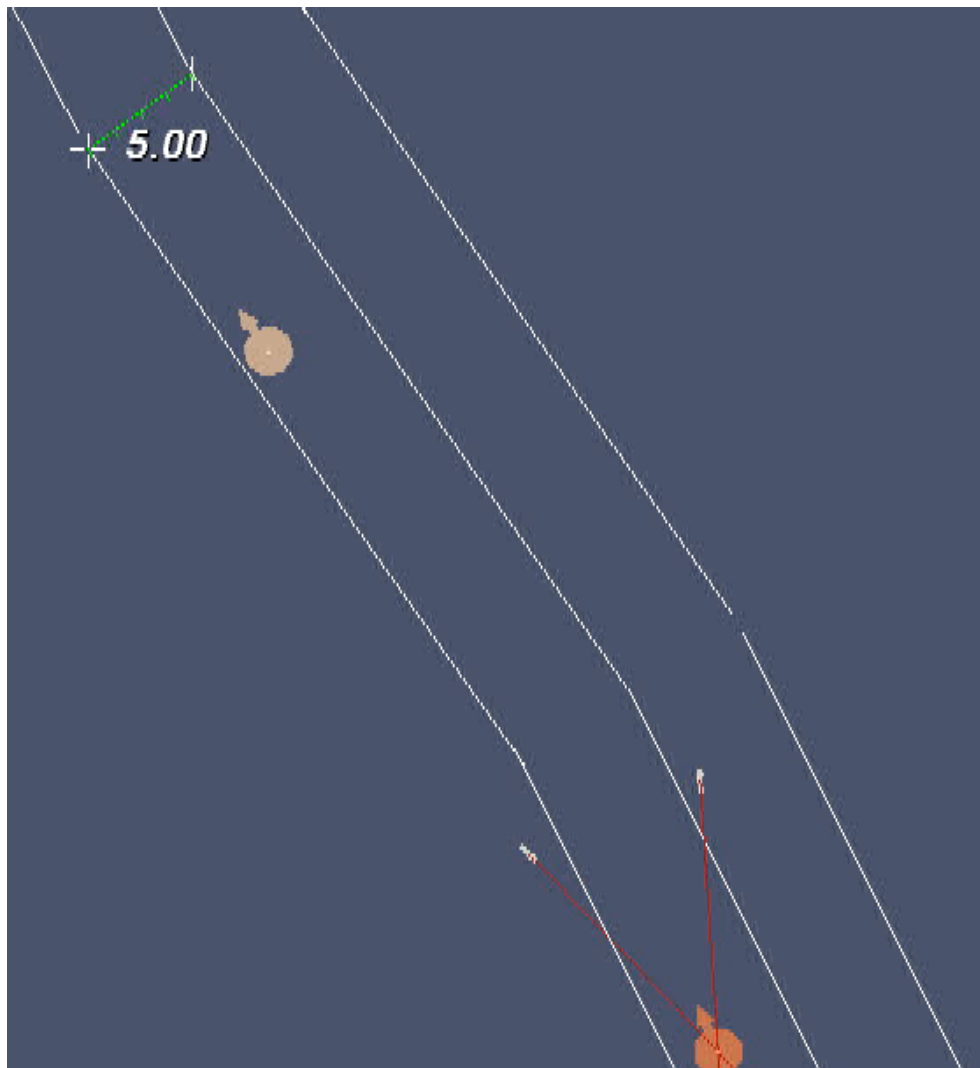
▲ resident

自動車

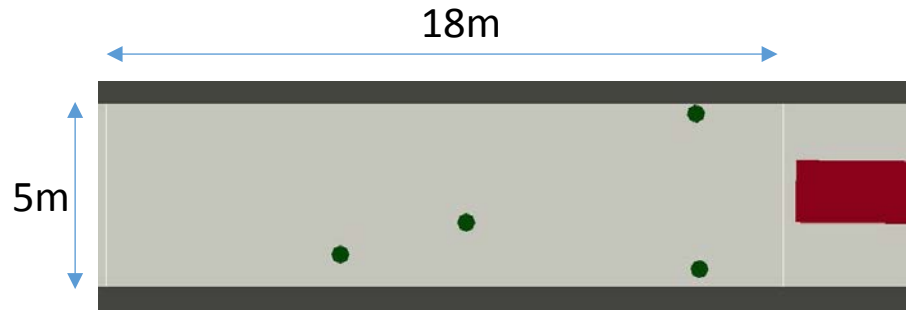
機能

- 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



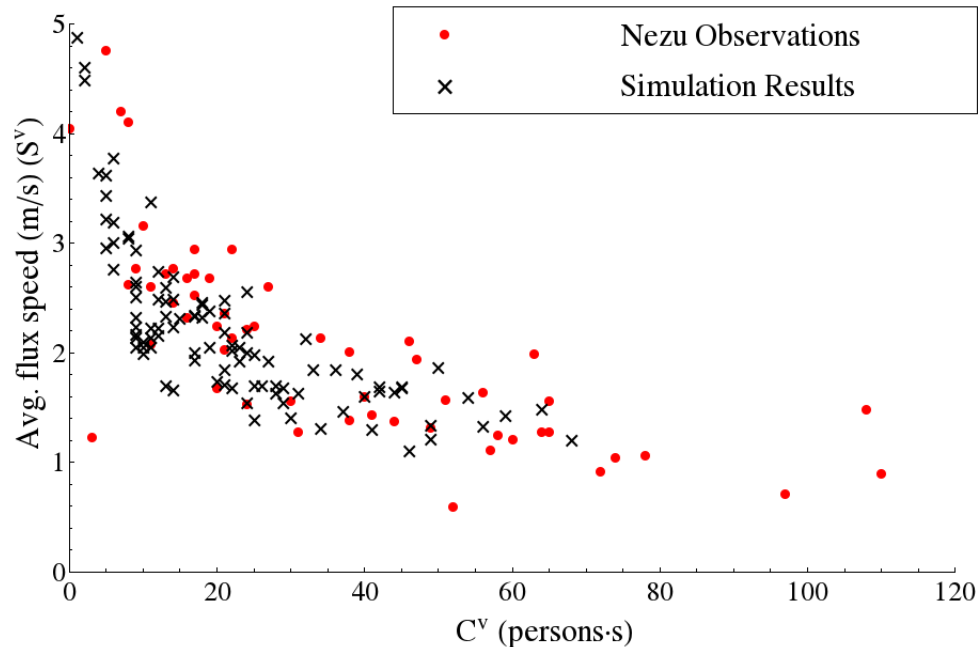
- 自動車
- 歩行者
- 計測に使う歩行者
- 計測に使う領域

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

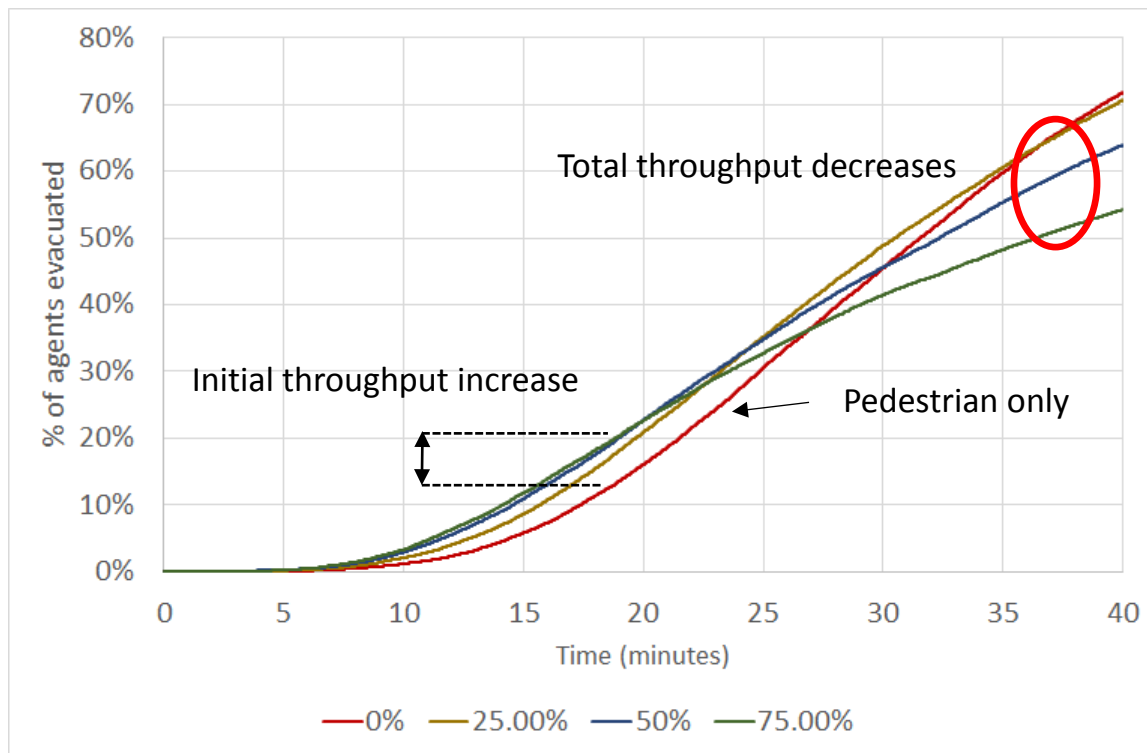
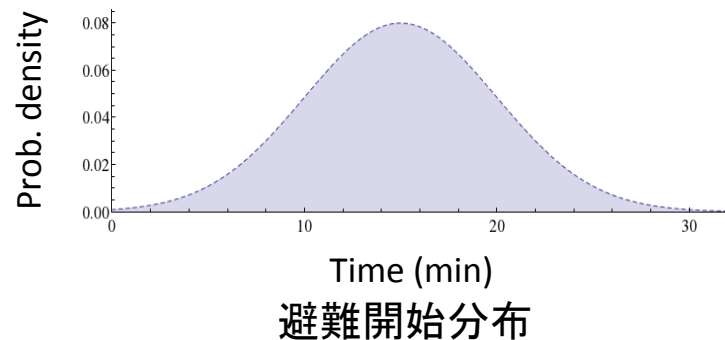
自動車利用を無制限

最悪と最善の避難状況

Minimum	54.26%
Maximum	71.80%

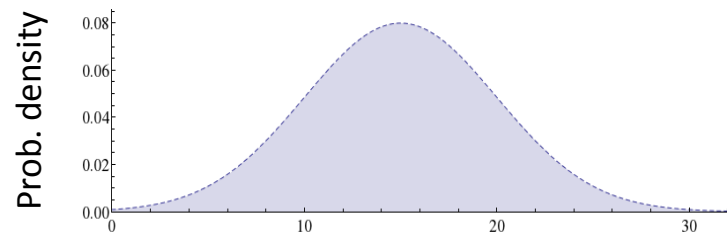
結果

- 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



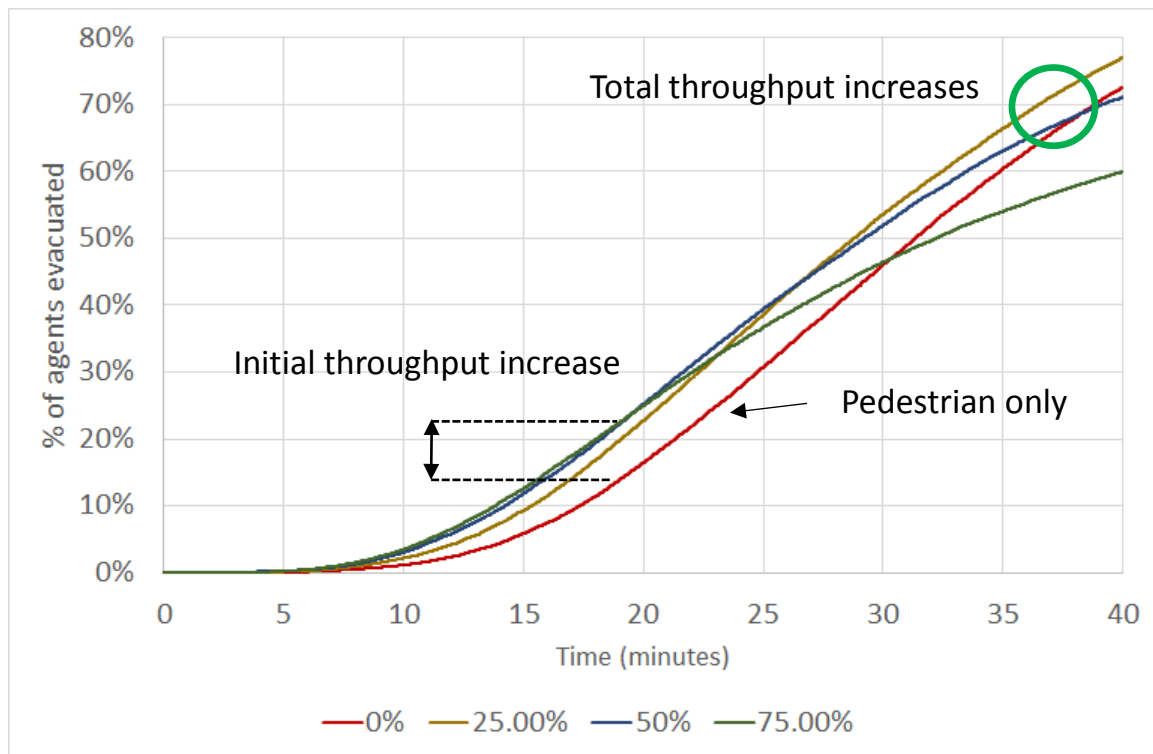
Time (min)
避難開始分布

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避難状況を悪化しない



City simulation



Image Landsat
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image IBCAO

Google earth

Visualized by CYBERNET SYSTEMS CO., LTD

City-to-social simulation



Visualized by Leonel Aguilar (University of Tokyo)

「京」からポスト「京」へ

◆「京」でできたこと

- 都市丸ごとの地震と被害のシミュレーション

◆ポスト「京」でできること

- 都市丸ごとの地震・被害・対応のシミュレーション

マルチエージェントシステムを交通・経済へ拡張

科学技術を伸ばし、支えるスーパーコンピュータ

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・公助の「防災投資」に