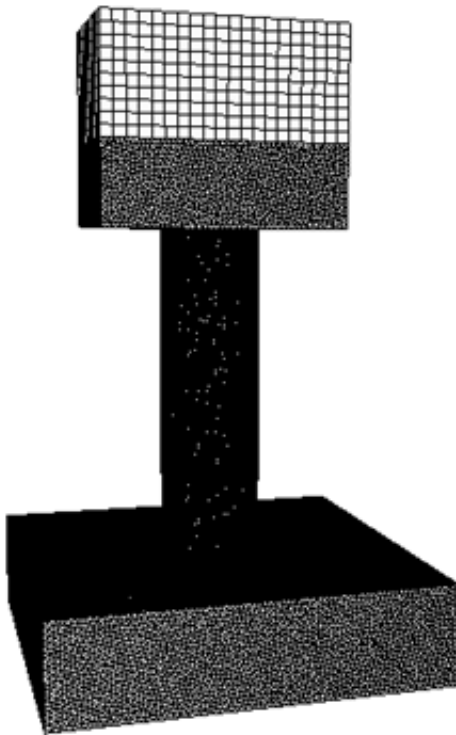


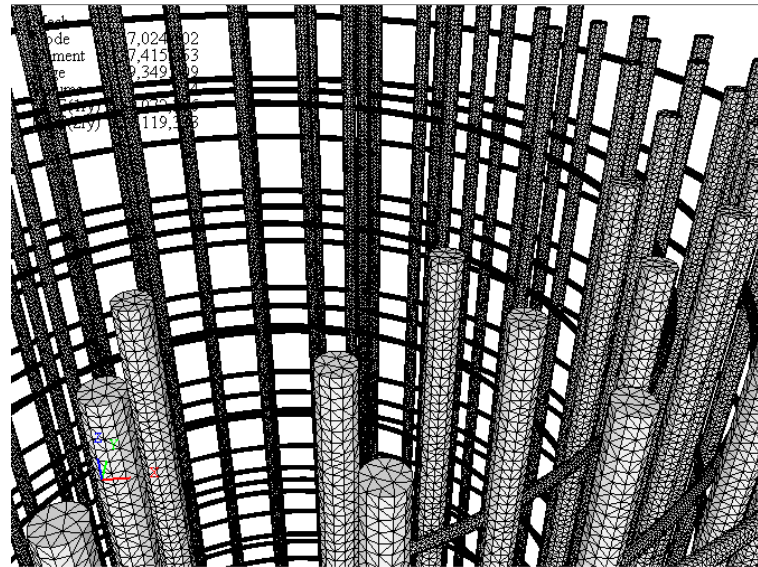
HPCを利用した構造と都市の 地震応答シミュレーション

堀宗朗
東京大学地震研究所

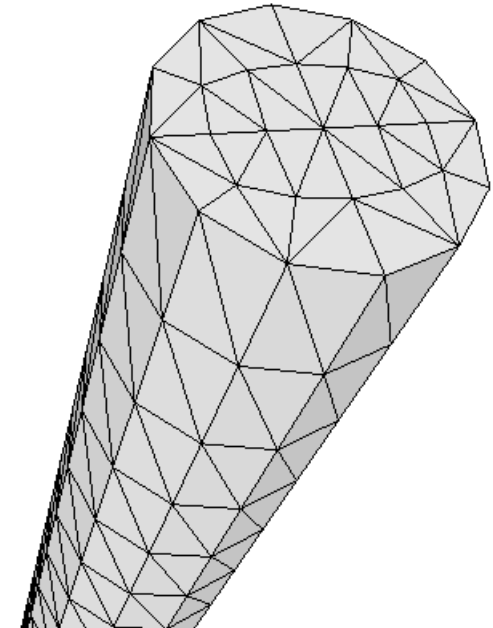
構造物：耐震設計用



a) RC橋脚



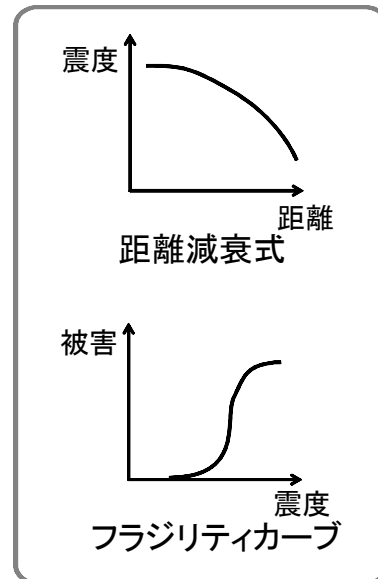
b) 配筋の様子



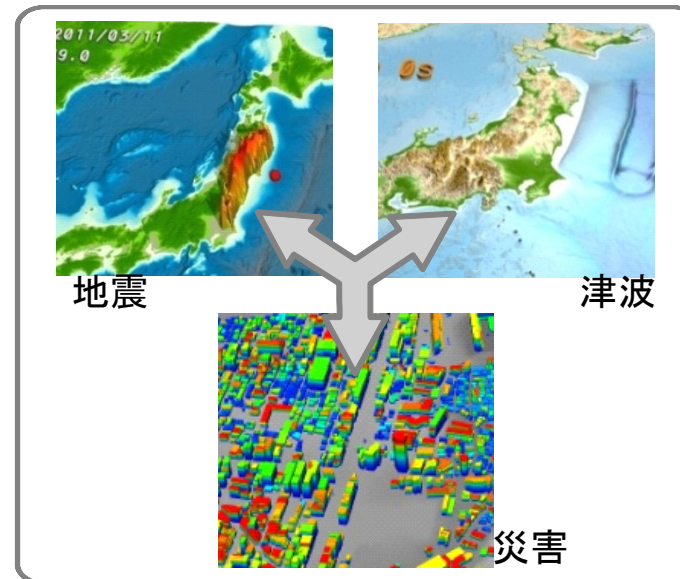
c) 鉄筋のモデル化. 要素寸法は 15 ~ 7 mm程度.

都市：被害想定用

現状
経験ベース



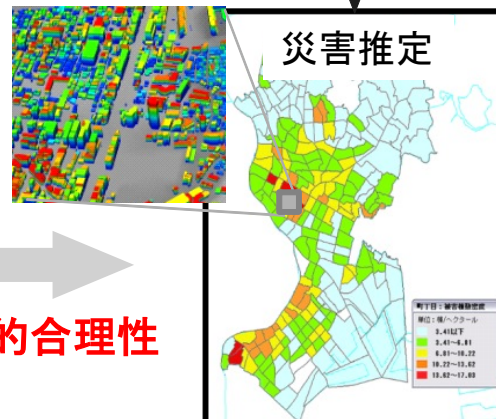
将来
計算ベース



過去のデータの統計解析を基に、各領域での地震動と被害を計算する。経験ベースであるため信頼度は決して高くない。他に代替がなかったため、経験ベースの予測に頼らざるを得なかった。



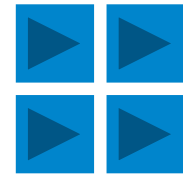
科学的合理性



地震・津波の物理過程のシミュレーションと構造物一棟一棟の応答シミュレーションから、災害を予測する。信頼度は大きく改善されることが期待できる。計算科学の進歩を最大限利用した計算ベースの予測は高い科学的合理性を持つからである。

地震応答シミュレーション

◆鉄筋コンクリート構造物の大規模解析



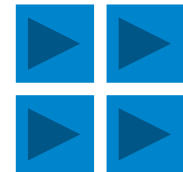
◆GPGPUを使った高速ソルバの開発



◆ライフラインネットワークの解析



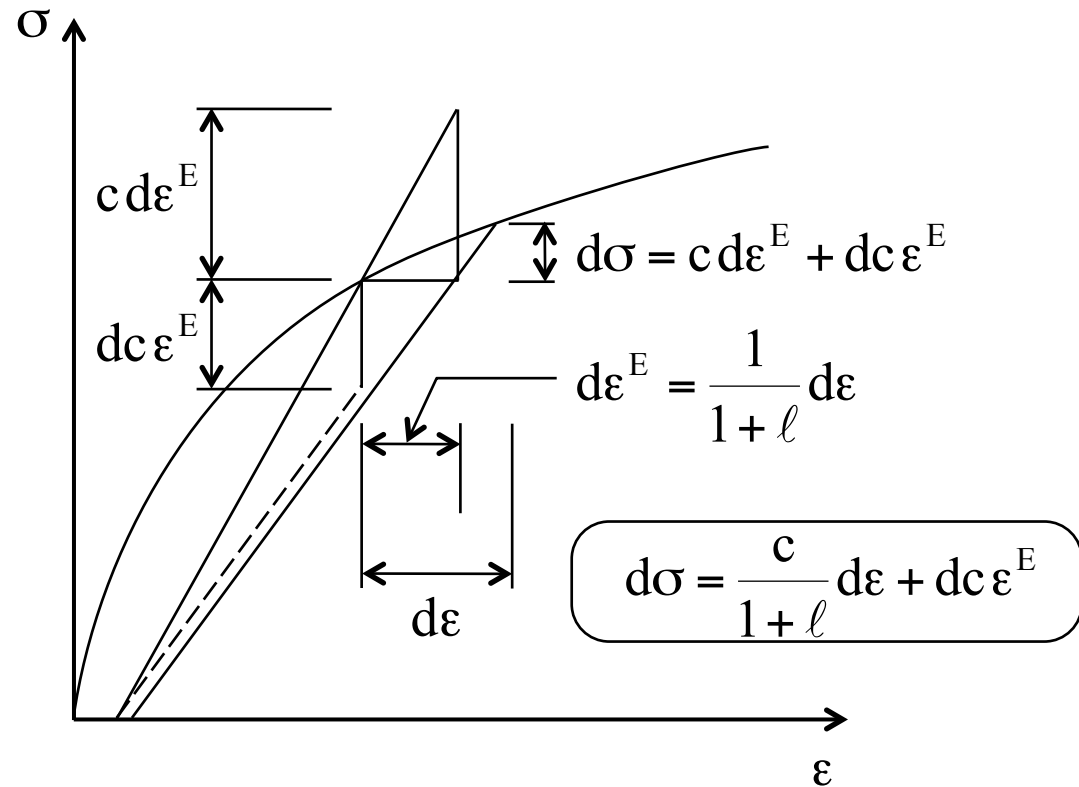
◆統合地震シミュレーション



コンクリートの弾塑性構成則

$$\sigma = c \varepsilon^E$$
$$d\varepsilon^P = \ell d\varepsilon^E$$

coefficients, c and ℓ , are function of elastic strain, although form is quite complicated



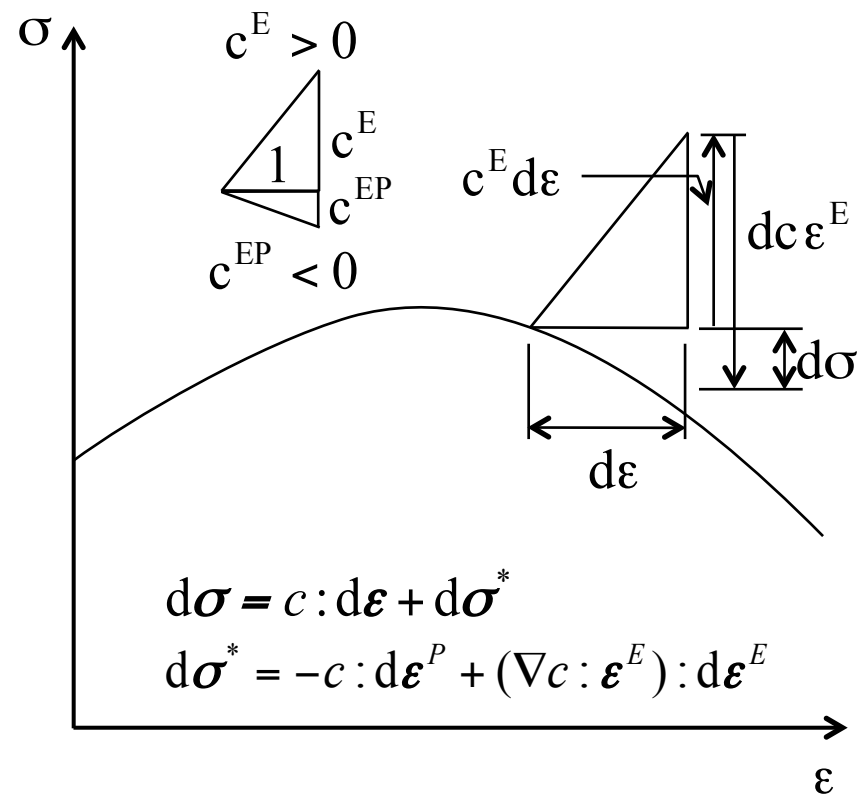
1. non-symmetric elasto-plasticity tensor
2. loss of positive-definiteness in increasing deformation
3. numerical differentiation in computing elasto-plasticity tensor

再定式化と新しいアルゴリズム

$$\begin{aligned} d\varepsilon^P - \ell d\lambda \nabla g(\dots) &= 0 \\ df(d\lambda, \dots) &= 0 \end{aligned}$$

- same form as non-associated flow rule
- functions, g and f , are function of elastic strain, which can be explicitly determined

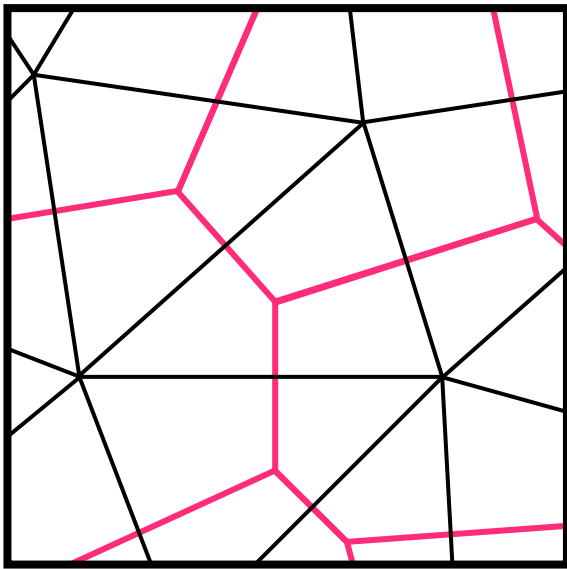
simpler expression of elasto-plasticity tensor



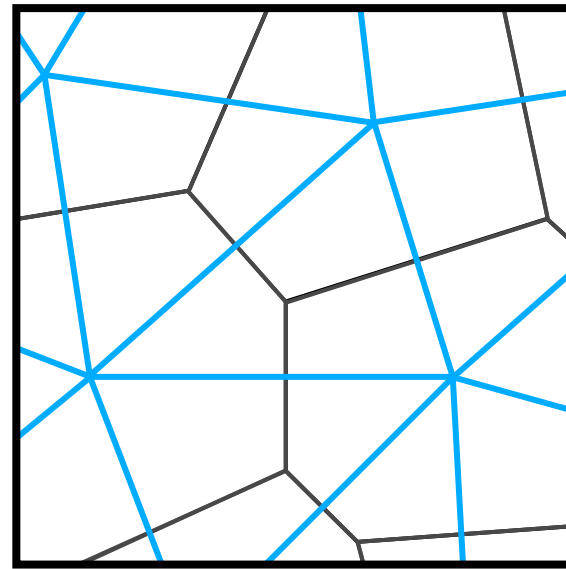
new algorithm

use of overlooked relation that corresponds to consistency condition
affine form with symmetry and positive-definiteness elasticity tensor

DUAL DOMAIN DECOMPOSITION



*Voronoi blocks for
function*



*Delaunay triangles for
derivative*

SUMMARY

- ◆ Use of different sets of basis functions for function and derivative

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &: f^d(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha} f^{\alpha} \varphi^{\alpha}(\mathbf{x}) \\ f_{,i}(\mathbf{x}) &: g_i^d(\mathbf{x}) = \sum_{\beta} g_i^{\beta} \psi^{\beta}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

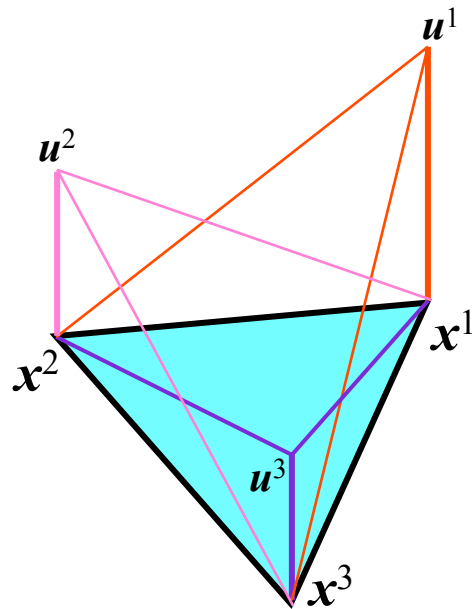
- ◆ Optimal pair of basis function sets

- function Voronoi tessellation (quasi-Voronoi tessellation)
- derivative Delaunay tessellation

For any pair of basis function sets, coefficients are uniquely determined by minimizing a discretization error. There is an *optimum* pair that minimizes an error between discretized function and integration of discretized derivative.

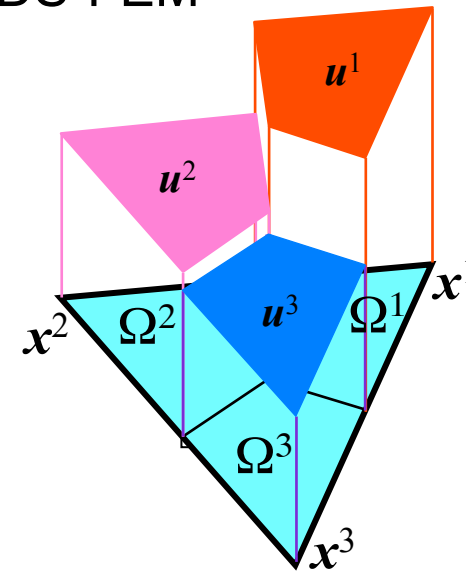
COMPARISON

FEM



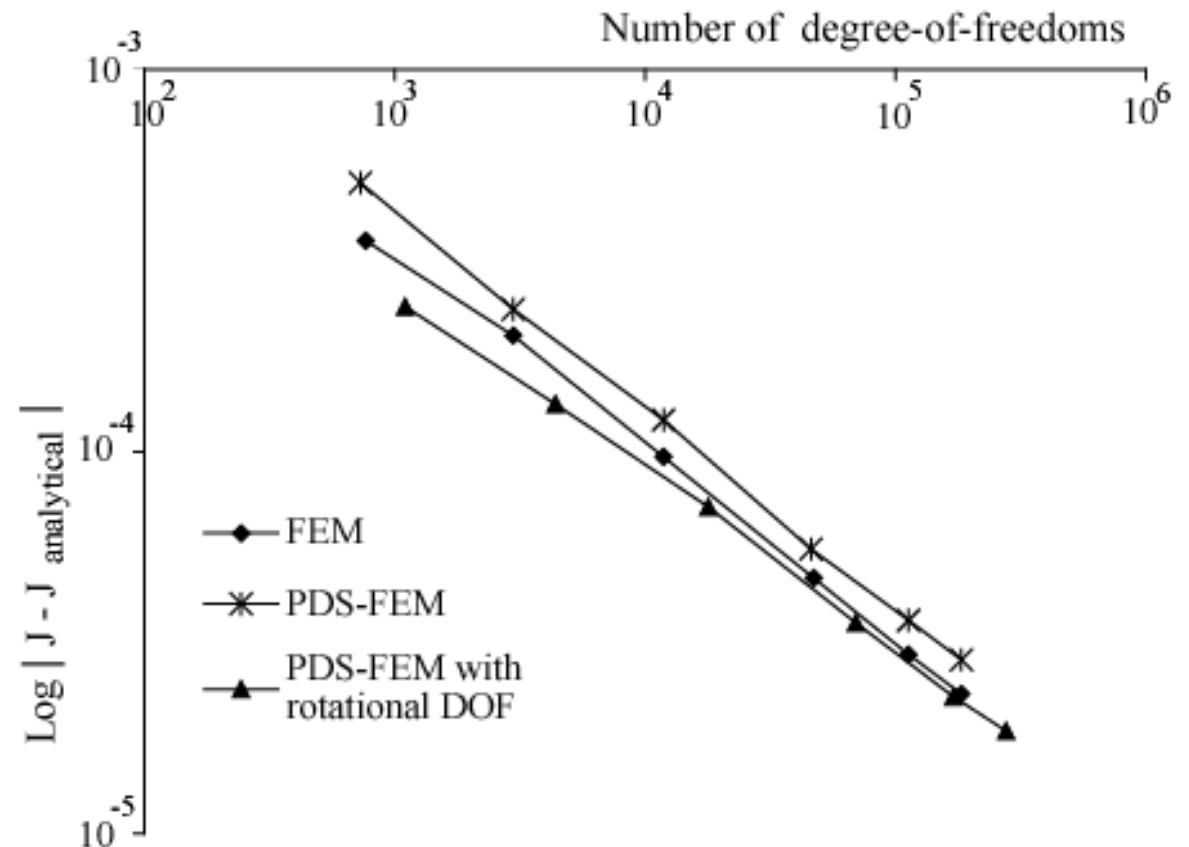
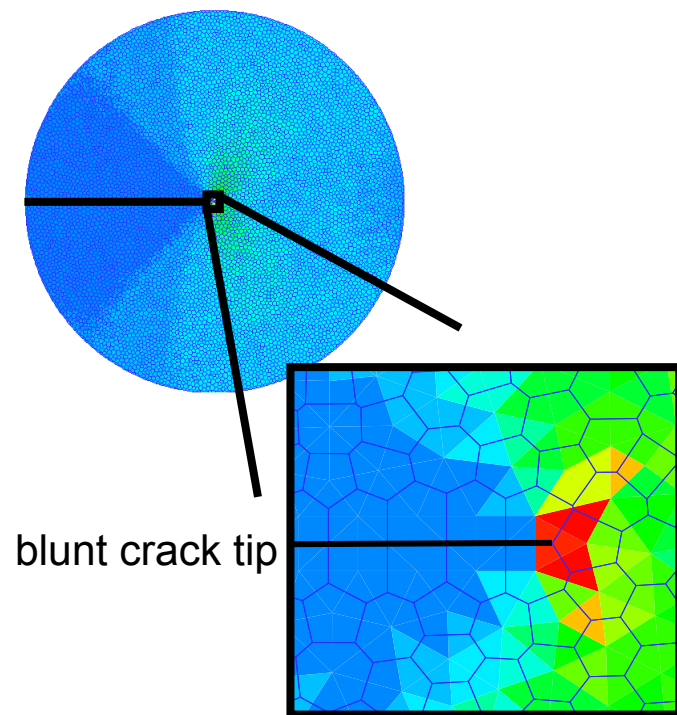
basis functions are element-wisely smooth functions

PDS-FEM



discretized function is discontinuous across Voronoi boundary

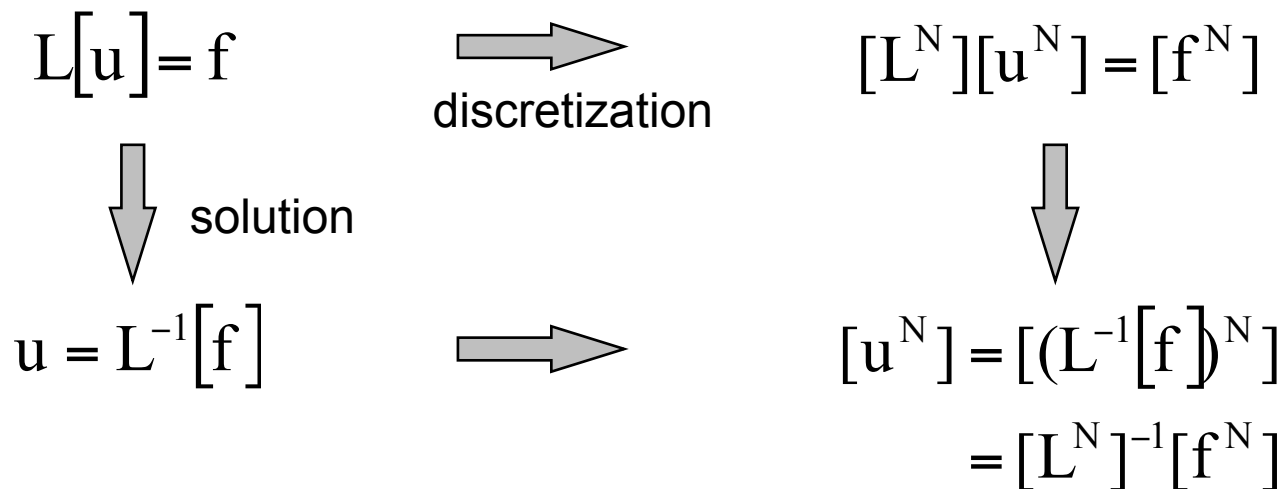
J-INTEGRAL



The accuracy of crack tip stress computed by PDS-FEM is at almost the same level as that of FEM, regardless of approximate failure treatment. The accuracy can be improved by including rotational DOF.

EXTENSION OF PDS

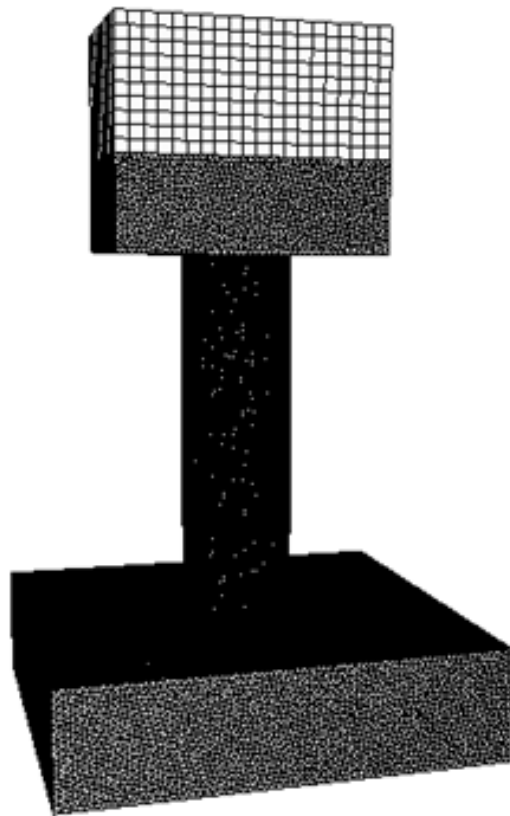
◆ Consistency of discretization scheme



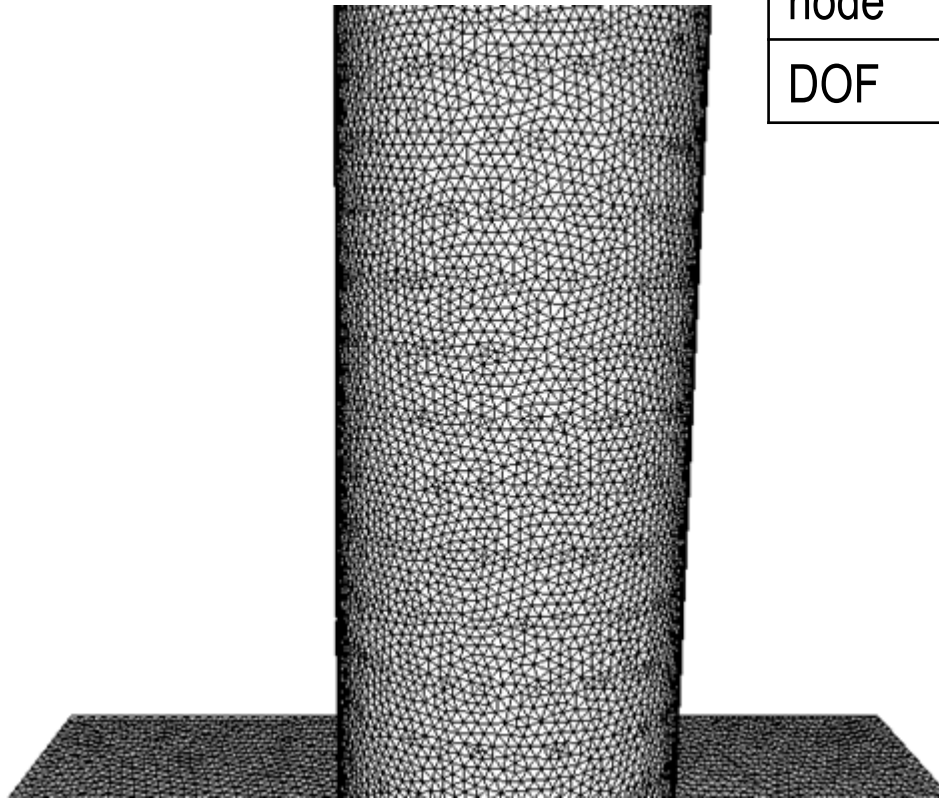
◆ Local Taylor series expansion at Voronoi mother point

- 1st -order polynomials can be included in basis function
- numerical connection of neighboring TSE's using Delaunay domain in which their derivatives are matched

DETAILED MODELING



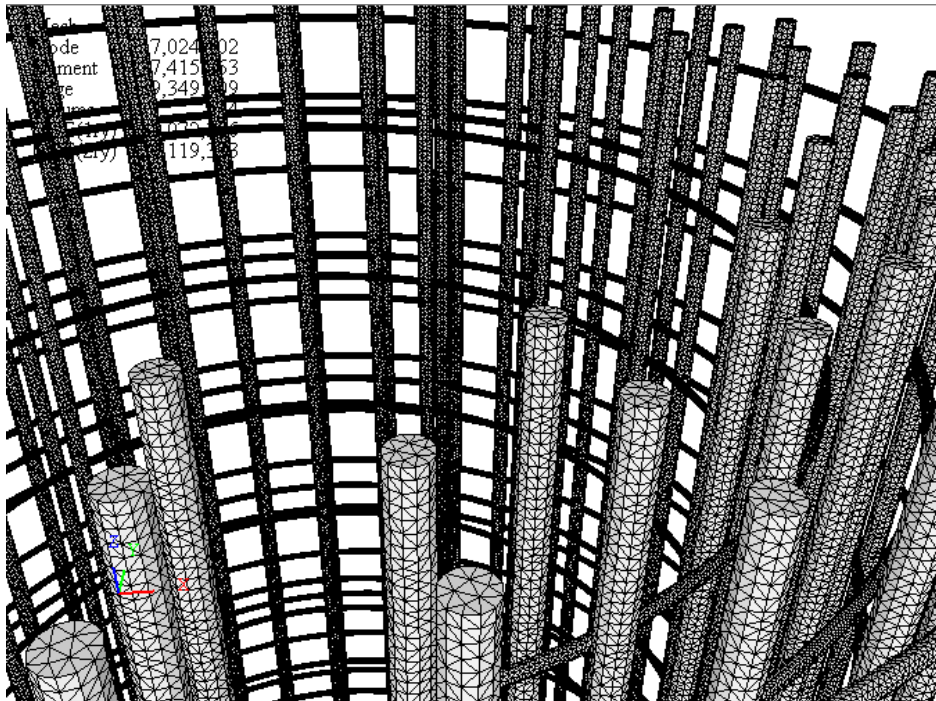
a) whole view



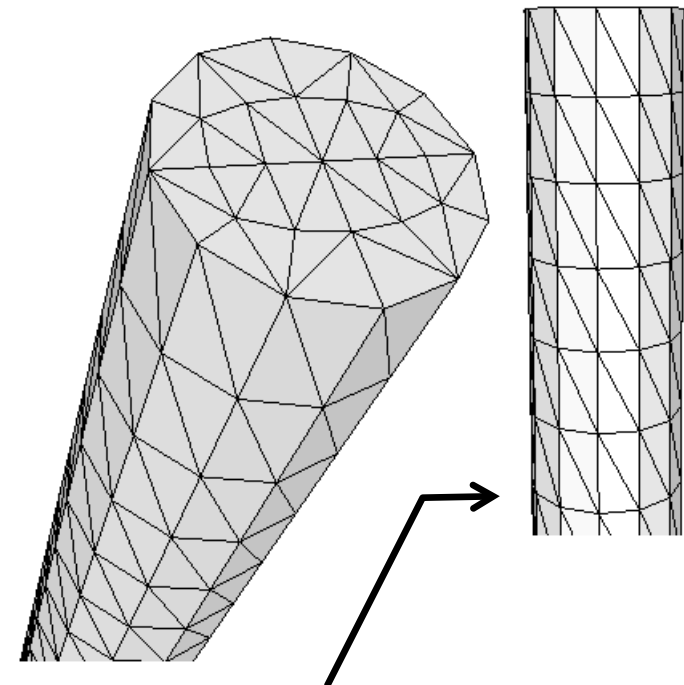
b) column

element	29,740,000
node	4,860,000
DOF	14,580,000

DETAILED MODELING

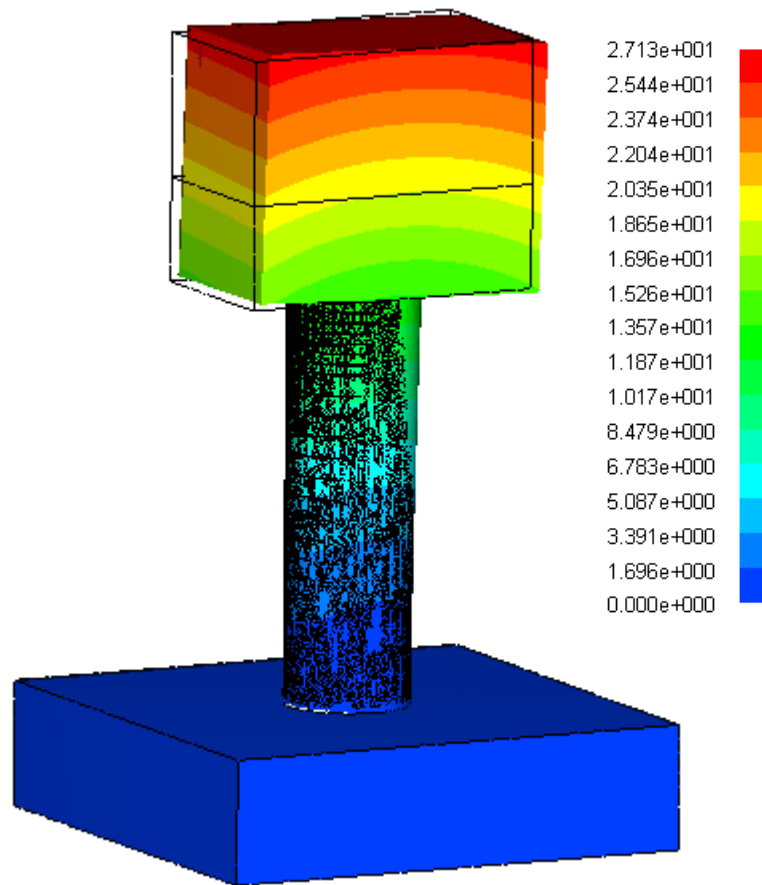


a) steel bar embedded in pier

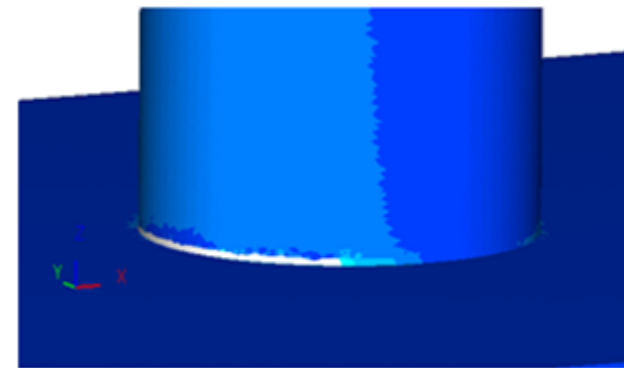


b) surface covered by rectangular elements of 15 x 7.4 mm

TENATIVE RESULTS



a) whole view

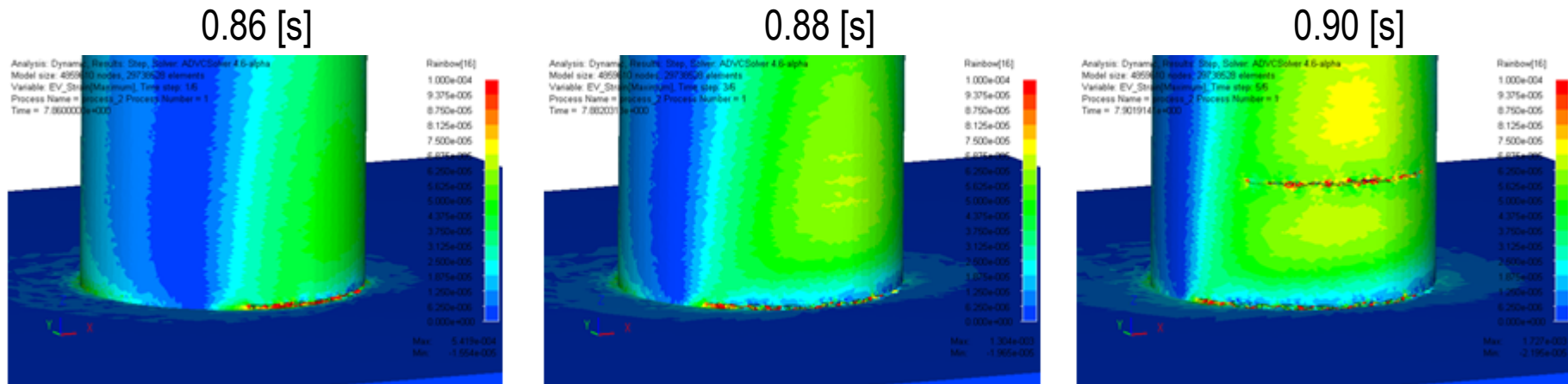


b) connecting part

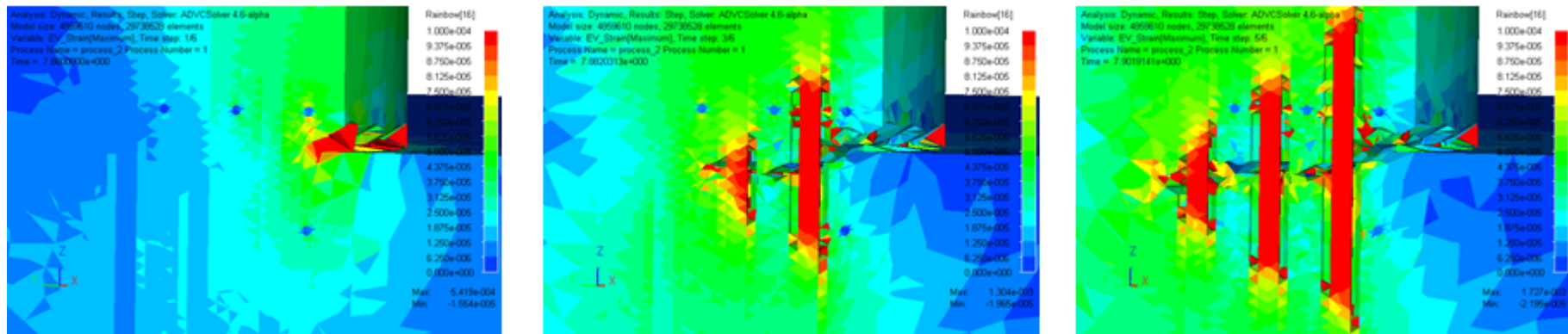


c) cross section at connecting part

TENATIVE RESULTS



a) surface



b) stress distribution inside of column

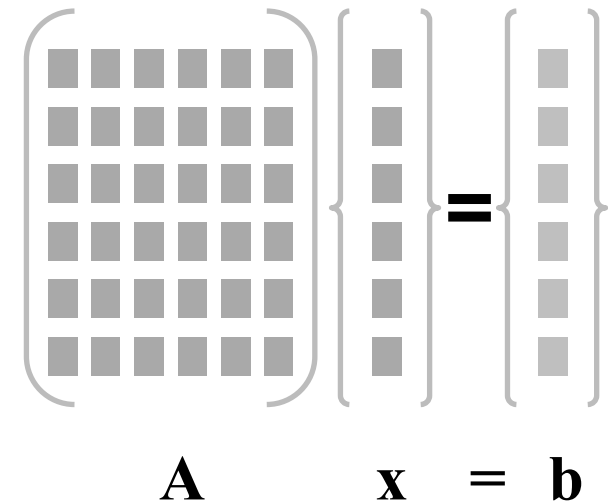
FEMの高速化

◆ 有限要素法の計算

- 前処理
- ソルバ 連立一次方程式
- 後処理

◆ ソルバの高速化

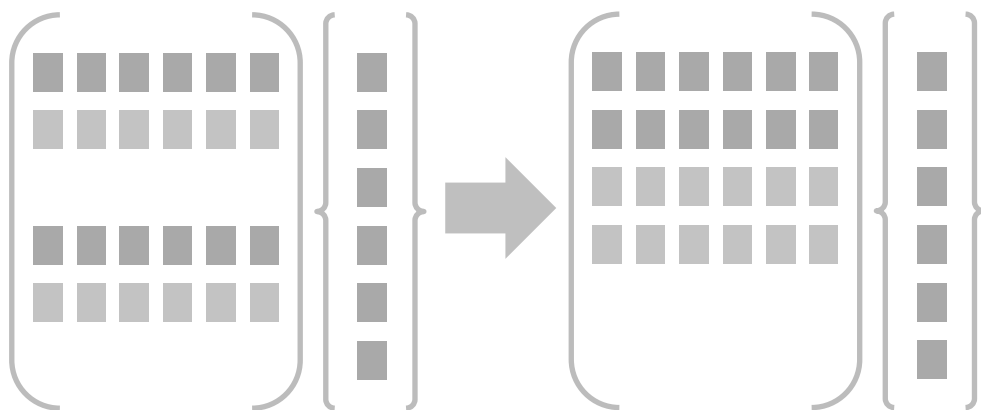
- 計算機の性能を十分に発揮させるための解析コードの最適化
- 高度な前処理により問題の収束性を改善する
- 行列ベクトル積演算などの計算負荷の高い演算を高速化する


$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

高速化1: 解析コードの最適化

◆ 改良前の解析コード

- 並列化済み：計算コア12個、8倍の高速化



■ 計算コア1 ■ 計算コア2 ■ 計算コア3

並列化時の高速化率を下げる
箇所
逐次処理が必要な箇所
競合メモリアクセスが発生する
箇所

各計算コアが担当する領域を
設定競合メモリアクセスの回
数を低減

高速化2: 可変前処理

メモリ使用量を抑えるため、連立一次方程式の解法には反復法を使用

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$



前処理により連立一次方程式の収束性を改善、必要な反復回数を少なくする

$$\mathbf{MAx} = \mathbf{Mb}$$



前処理の性能が落ちない範囲で前処理行列 $\mathbf{M}$ を粗くして計算コストを低減

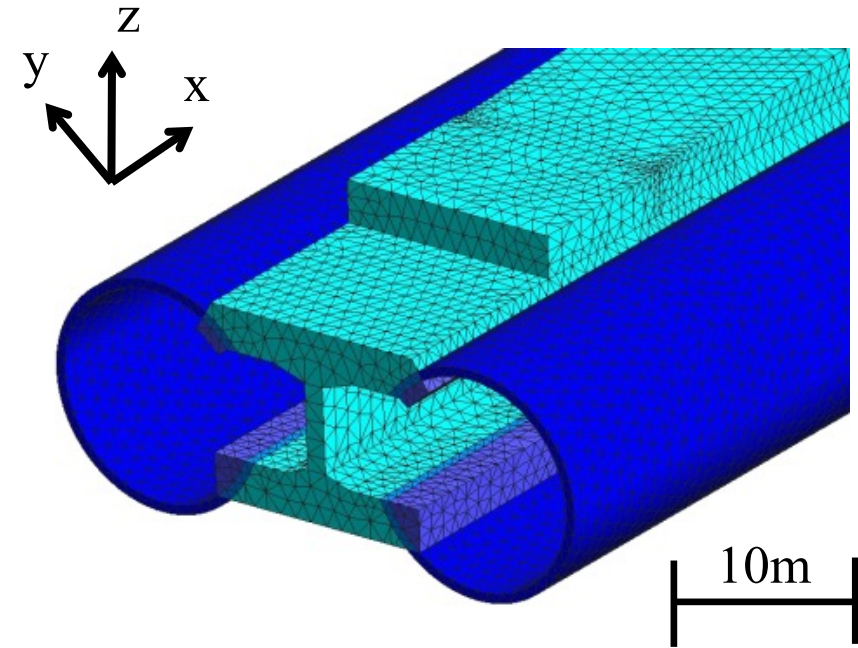
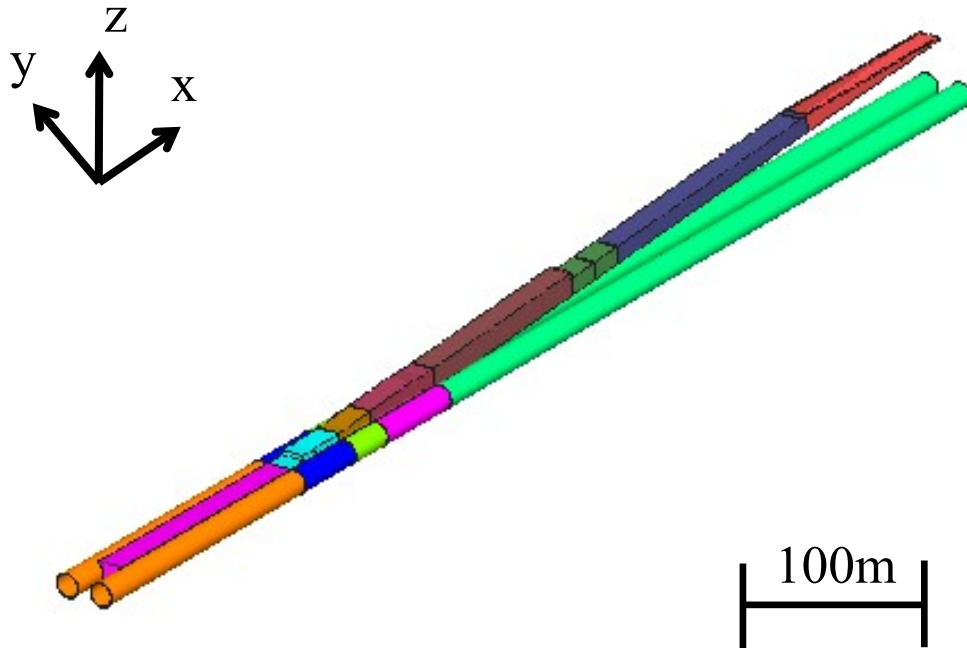
$$\mathbf{M}^c \mathbf{Ax} = \mathbf{M}^c \mathbf{b}$$

$\mathbf{A}$ 係数マトリクス
 $\mathbf{x}$ 解ベクトル

$\mathbf{M}$ 前処理マトリクス
 $\mathbf{M}^c$ 可変前処理マトリクス

数値実験

首都高速中央環状線新宿線の地下高速道路ランプトンネル



首都高速道路株式会社・鹿島建設株式会社・東京大学地震研究所の共同研究で作成された解析モデルを使用

要素数	1673489
節点数	2456212
自由度数	7368636
時間ステップ	4096

数値実験

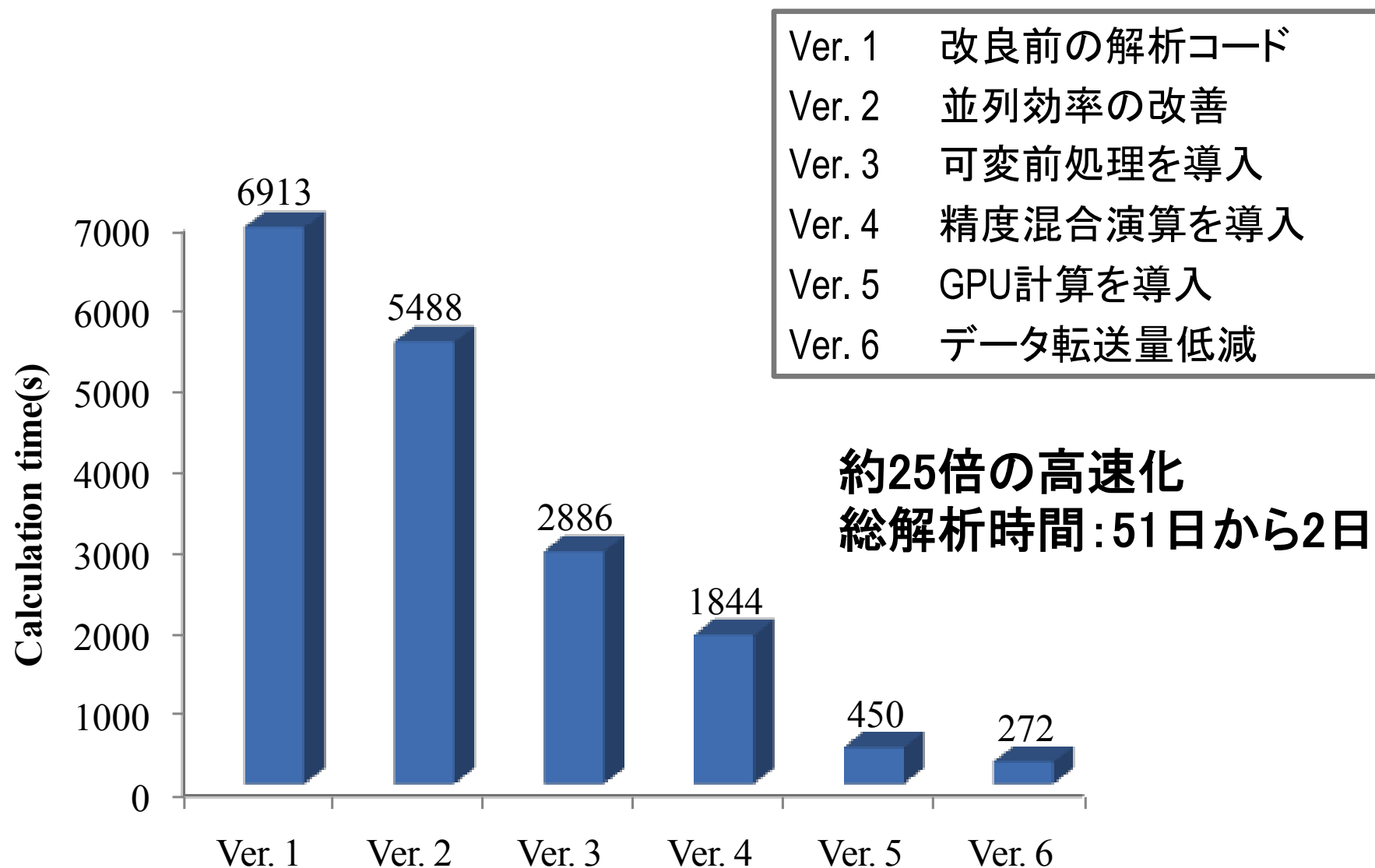
◆ 目的

主要応答の11ステップの計算時間の比較により、各改良がどの程度、性能向上に寄与したかを定量的に検証

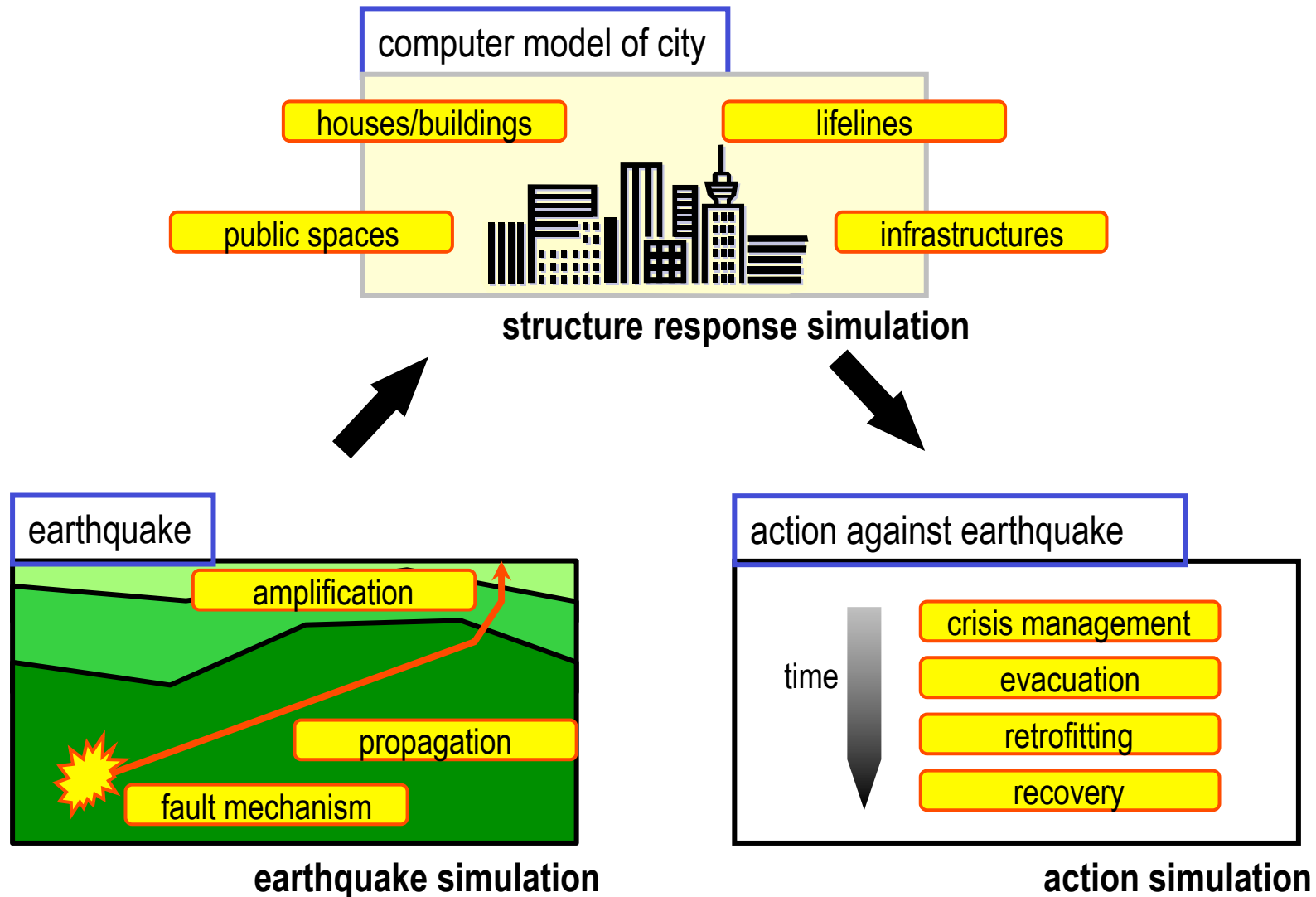
◆ 検証用コード

Ver. 1	改良前の解析コード (OpenMP 並列化, 12コア使用)
Ver. 2	Ver. 1の並列効率を改善したもの
Ver. 3	Ver. 2に可変前処理を導入したもの
Ver. 4	Ver. 3に精度混合演算を導入したもの
Ver. 5	Ver. 4にGPU計算を導入したもの
Ver. 6	Ver. 5のGPU間データ転送量を低減したもの

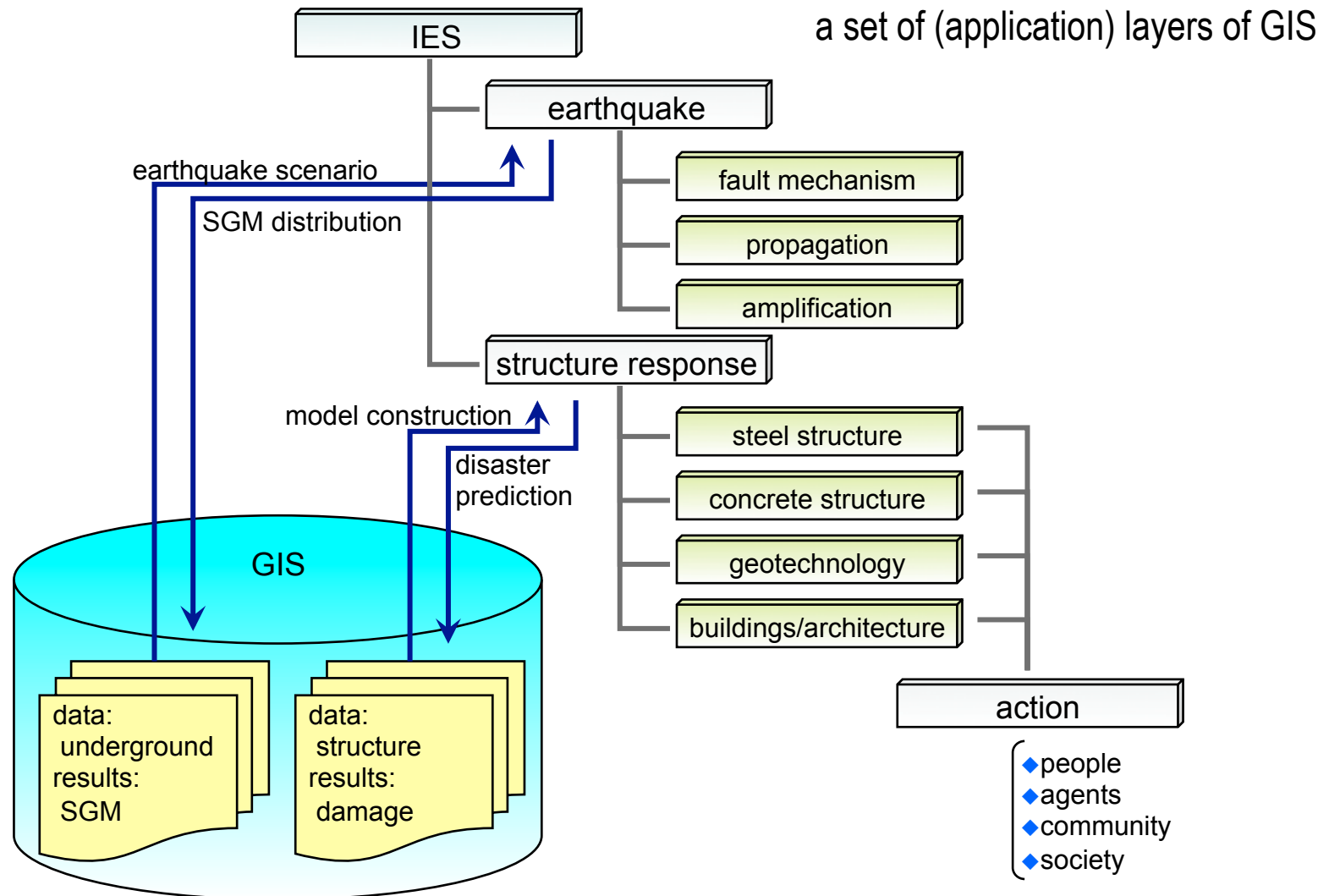
数値実験の結果



OVERVIEW OF IES

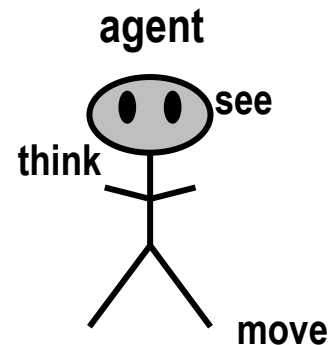
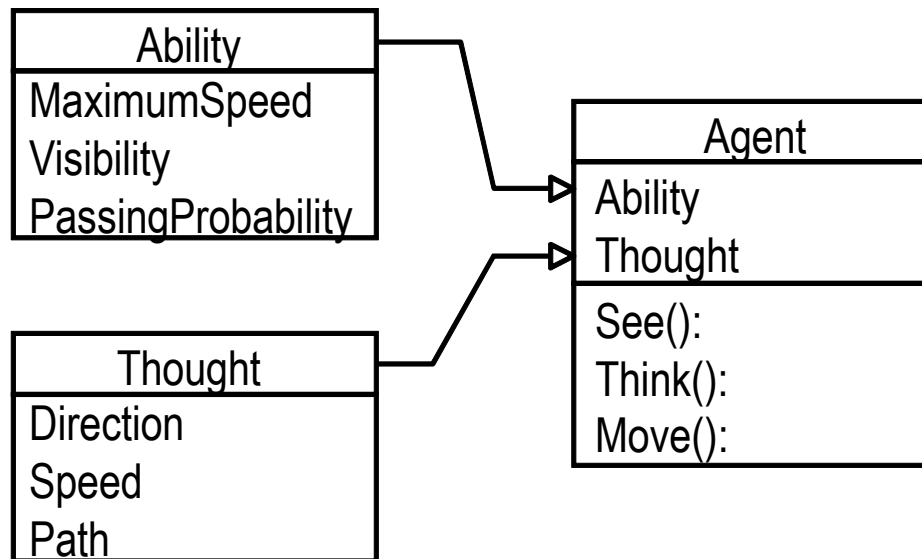


SYSTEM OF IES



DESIGN OF AGENT

class diagram



parameters

μ	average of agent maximum speed [m/s]
σ	SD of agent maximum speed [m/s]
R	visibility radius [m]
D	dimension of forward domain [m] (domain: $D \times 2D$)
m	speed reduction rate in passing
θ	modification of moving angle in passing [deg]
P	probability of making forced passing

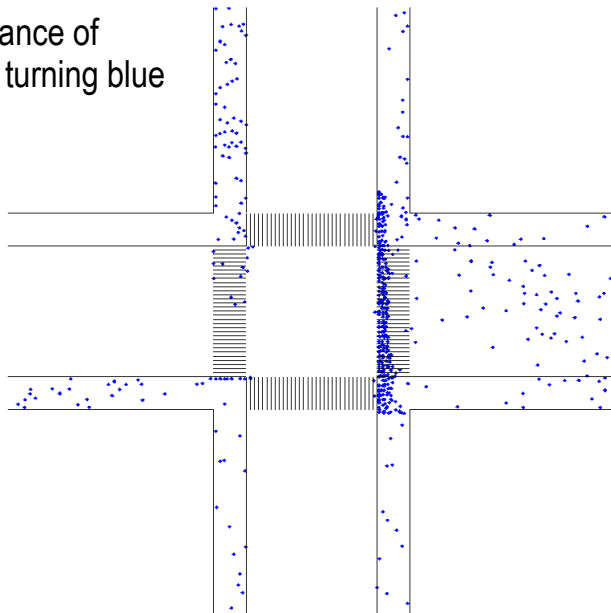
YOKOHAMA CITY FIREWORK FESTIVAL

locus of running person

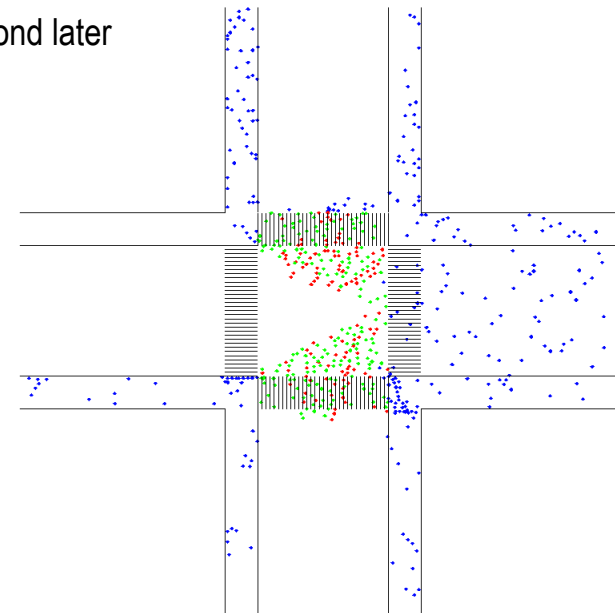
Reproduction/prediction of walking speed distribution, using image analysis of walking people captured by a video camera



at instance of
signal turning blue



10 second later



2005 MIYAGI-KEN OKI EARTHQUAKE

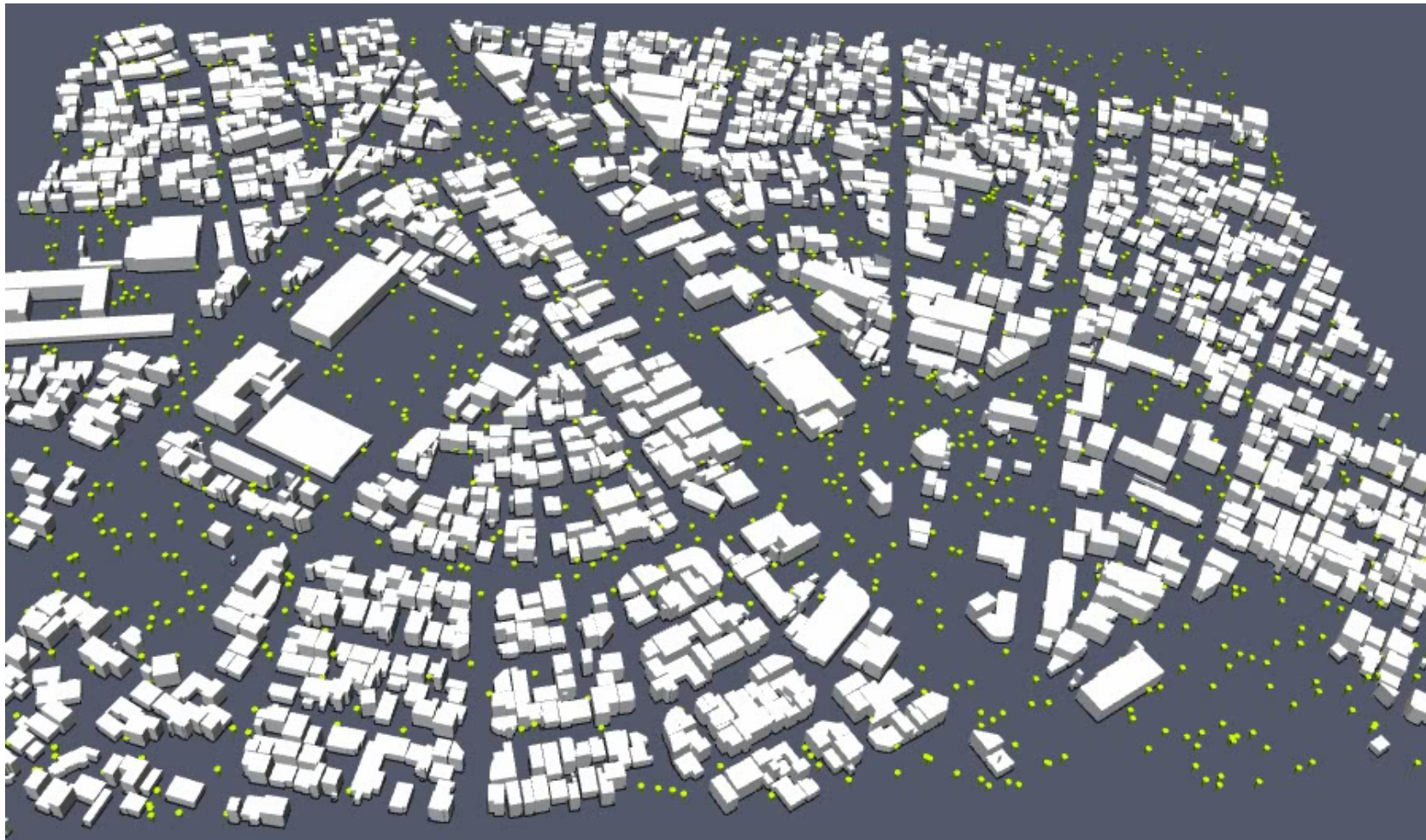
locus of running person



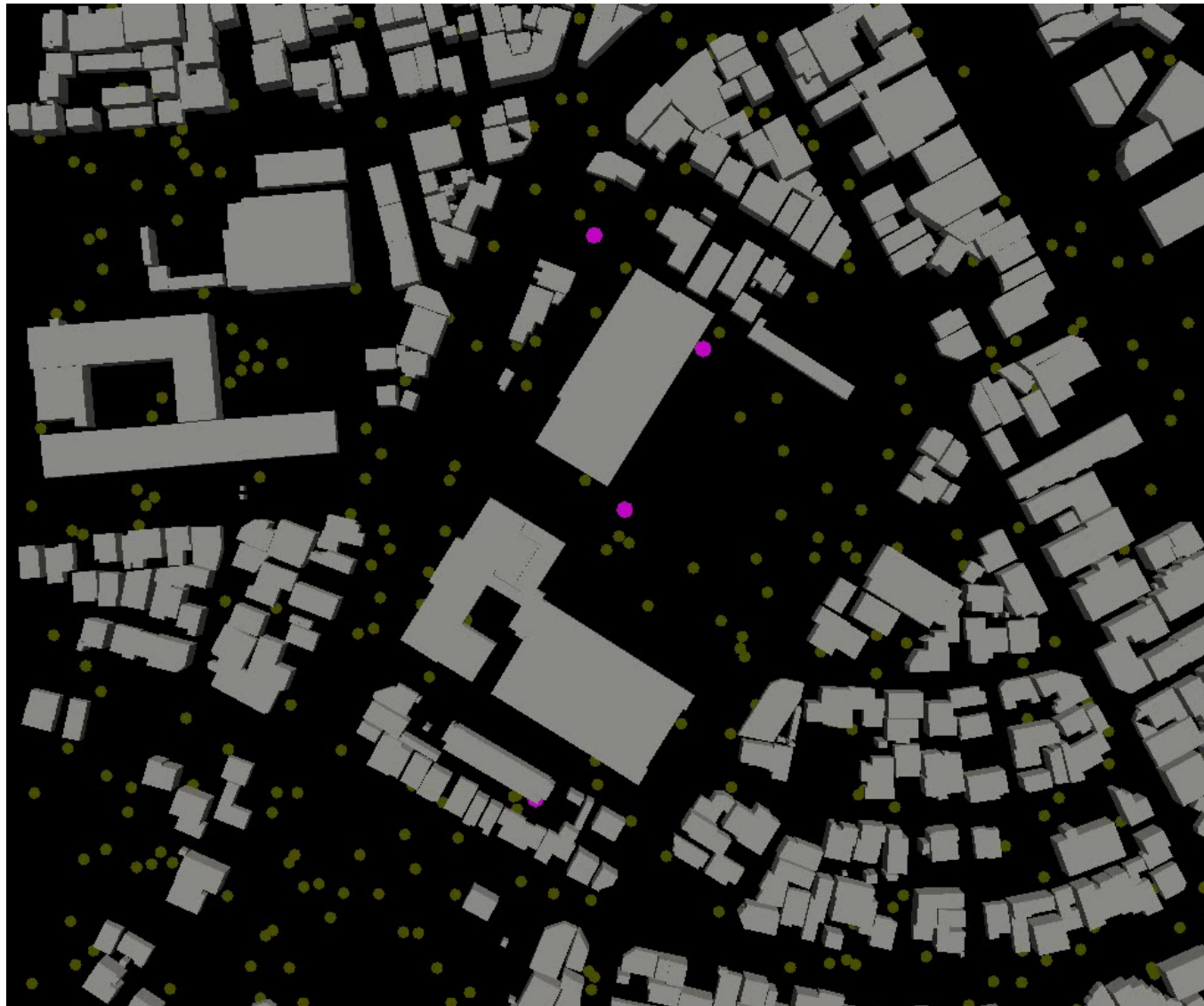
male	speed [m/s]	female	speed [m/s]
A	5.9	A	3.1
B	3.3	B	3.2
C	5.9	C	4.0
D	3.0	D	4.2
E	4.5	E	2.7
F	3.0	F	3.0
G	3.9	G	2.8
H	3.0		

mean 4.05[m/s]
SD 1.34[m/s]

IMPROVEMENT OF AGENT NAVIGATION

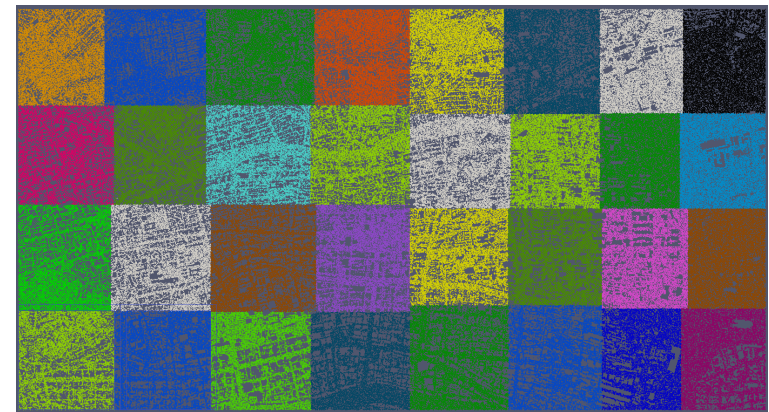
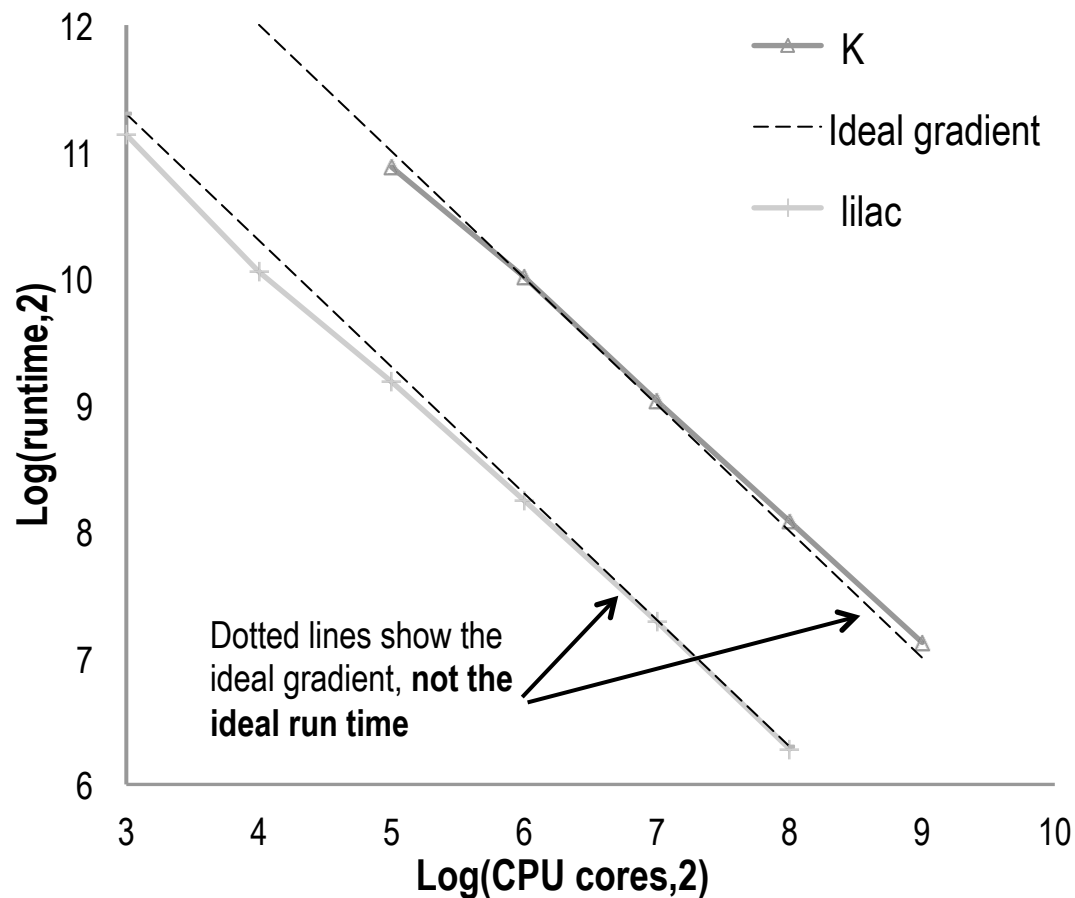


INTRODUCTION OF OFFICIAL AGENT



SCALABILITY OF MAS

Number of agents = 500,000



Domain partitioning for load balance; a node is assigned to each zone, and special cares are taken for agents moving from one zone to another

STRONG SCALABILITY

◆ Strong scalability in K

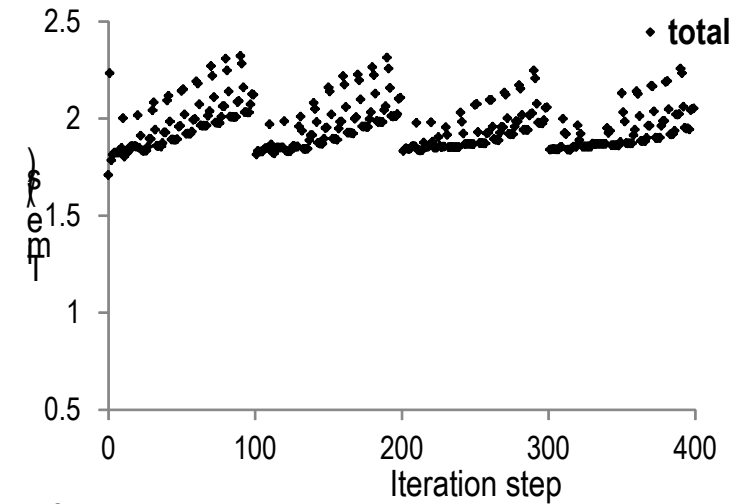
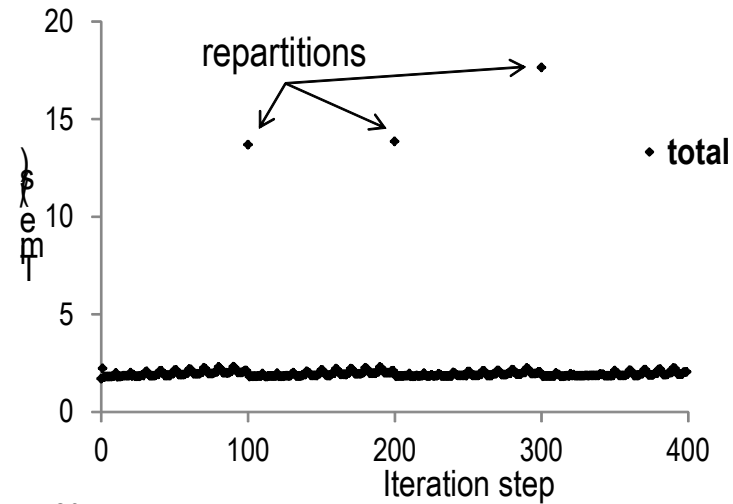
- with flat MPI
- Number of agents : 2,000,000
- Number of steps : 400 (80 seconds)

number of nodes	runtime /(s)	Strong scalability /(%)
512	1814.318	
1024	965.242	94.0
2048	495.2311	97.5

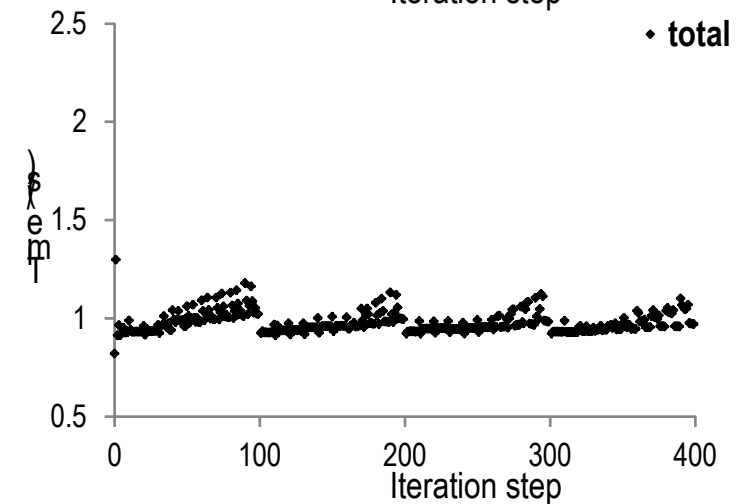
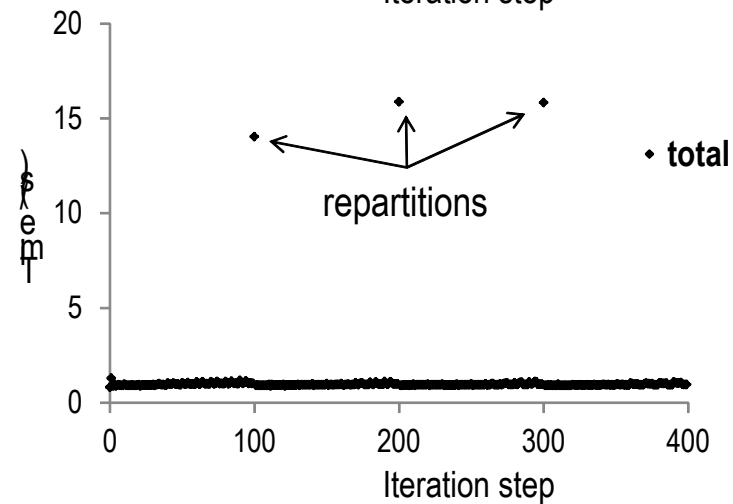
Strong scalability = $T_{\downarrow m} / T_{\downarrow n} / N_{\downarrow n} / N_{\downarrow m} \times 100$, where
 $T_{\downarrow m}$ = run time with m cpus and $n \geq 2m$

RUNTIME DETAILS

1024 NODES



2048 NODES



runtime and migration time are reduced, although repartition time remains the s

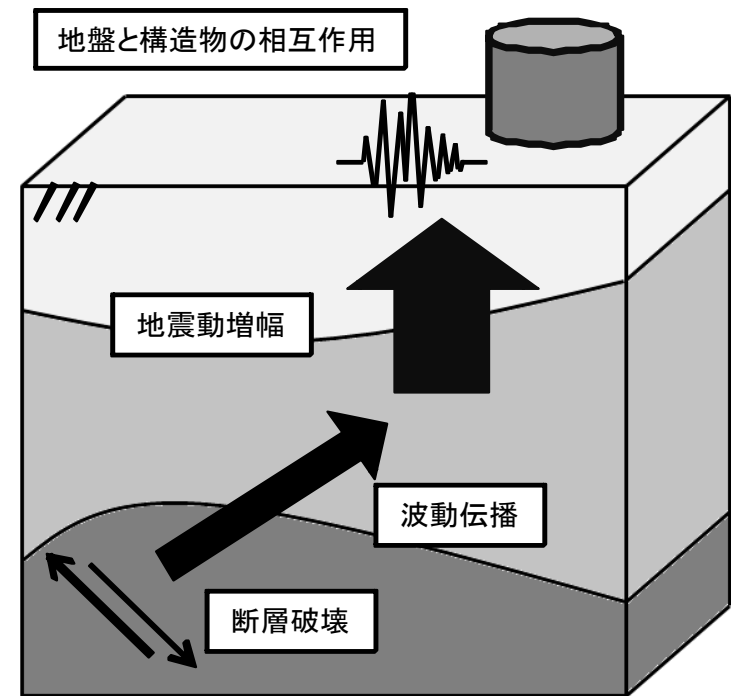
まとめ

◆ 国際的に優位な耐震設計・被害想定技術の確立

- 断層－構造システム
理学に頼らない工学智の確立
- データの曖昧さに対応
モンテカルロシミュレーション
想定外を減らす努力

◆ HPCを利用した技術開発

- 先端的大規模計算
耐震設計の構造物解析
被害想定 of 都市モデル解析
- CADとの連成(モデル構築)
- GISとの連成(可視化)



断層－構造システム