

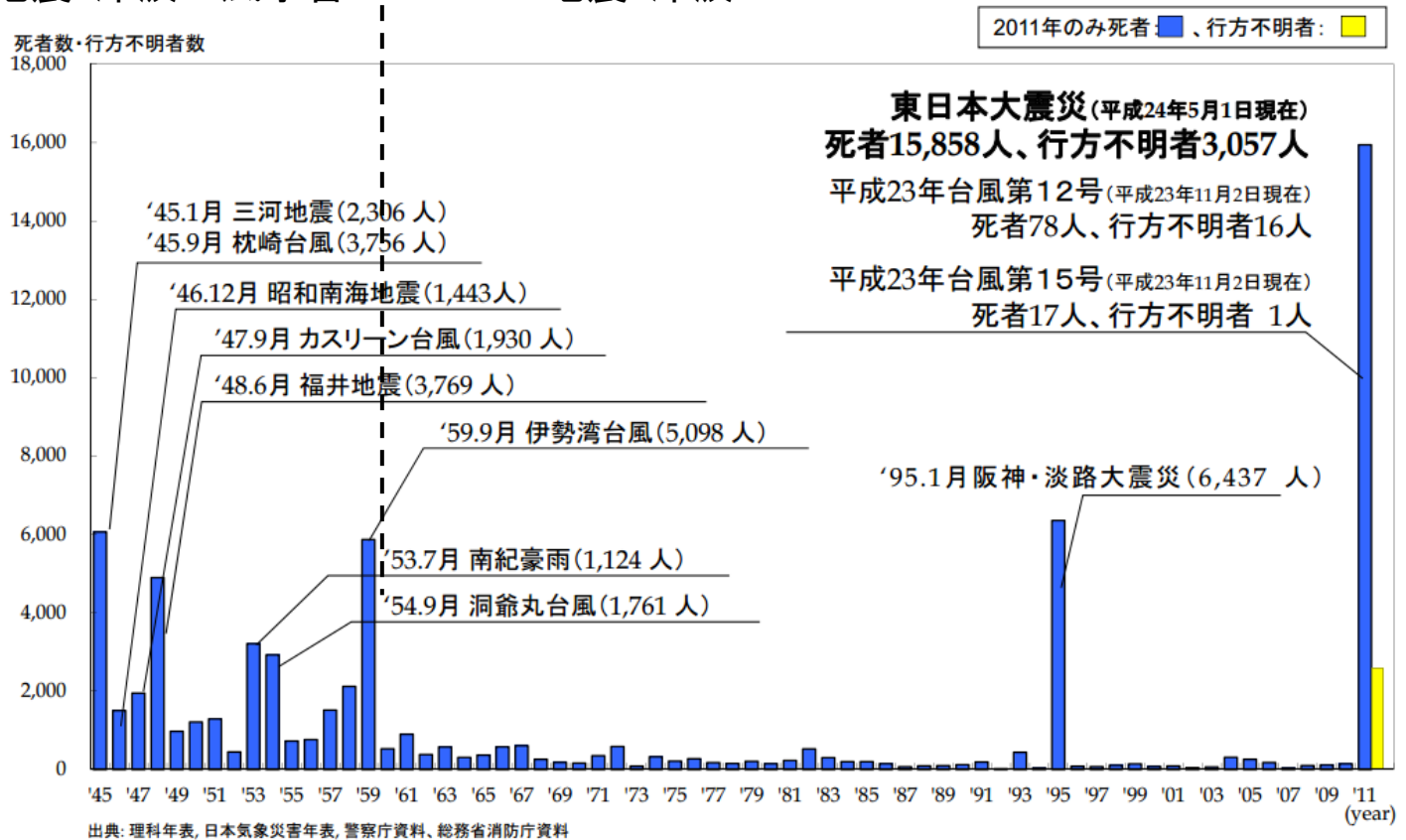
2014年10月29日  
サイエンティフィック・システム研究会  
科学技術計算分科会 2014年度会合  
次世代HPCを支える技術  
ホテルオークラ神戸

# 京コンピュータを使った地盤震動 シミュレーションの現状

理化学研究所 計算科学研究機構  
(日本学術振興会PD)  
藤田航平

# 地震・津波災害： 現代日本における主要な自然災害

~1960: 地震・津波+風水害      1960~: 地震・津波

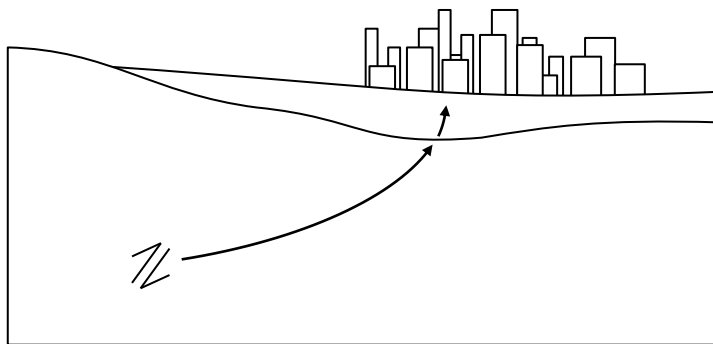


<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/resilience/dai1/siryou6-1.pdf>

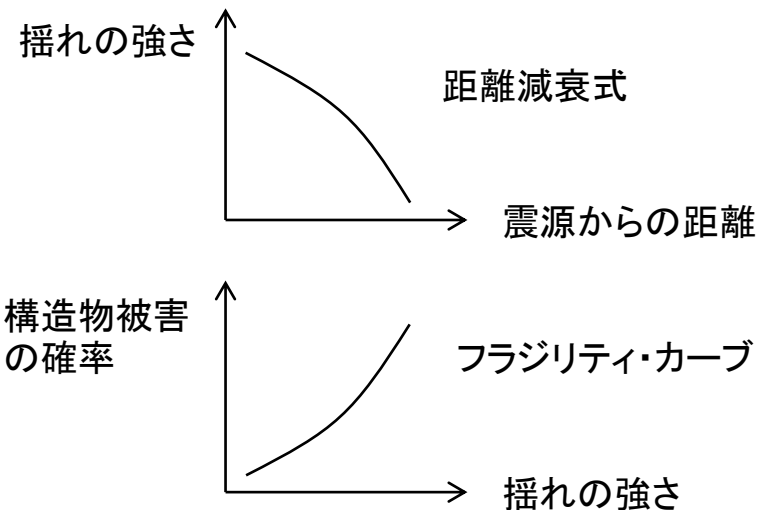
- 自然災害による人的被害の多くは防げるようになったが、地震・津波による被害は50年間解決できていない
- 初期のスパコンの誕生も1960年ごろ. この50年で飛躍的に発展したHPCで地震・津波問題を解決できないか？

# はじめに (1)

- 計算科学の観点から見た地震・津波災害
  - 物理現象自体は単純(e.g., 波動方程式)
  - ただ, 領域が広大な割に必要な時空間分解能が高い
- 従来の地震被害予測
  - 物理を3次元で追うことは膨大な計算となるため, 統計手法や経験式を組み合わせる予測
  - 観測データが少ないため大数の法則が効きにくく, 信頼性は必ずしも高くない

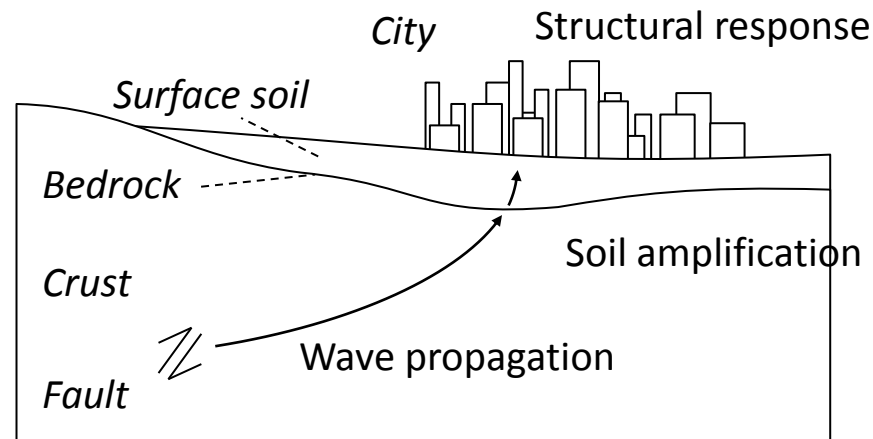


地震の物理は, 連続体中の波動伝播



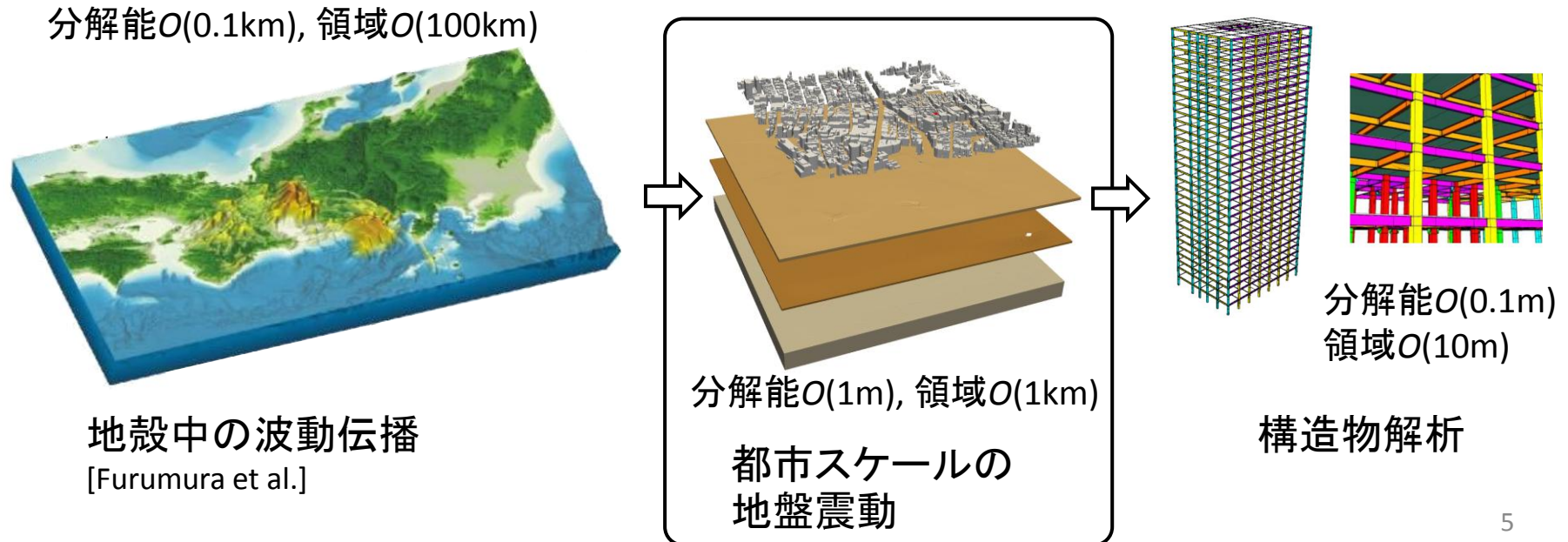
# はじめに (2)

- 物理を3次元で解くことで、地震災害の現象を理解や予測の信頼性を高めることができると期待
  - HPCのアプリケーションとして世界中で開発が進められている
- HPCI戦略プログラム分野3での「地震・津波の予測精度の高度化に関する研究」
  - 広域の問題を大規模計算で正確に解く
  - 一連の災害現象をつなげて解く(統合地震シミュレーション)
  - ➡ 京の能力・HPC技術を実社会の安全に反映するためのミッション



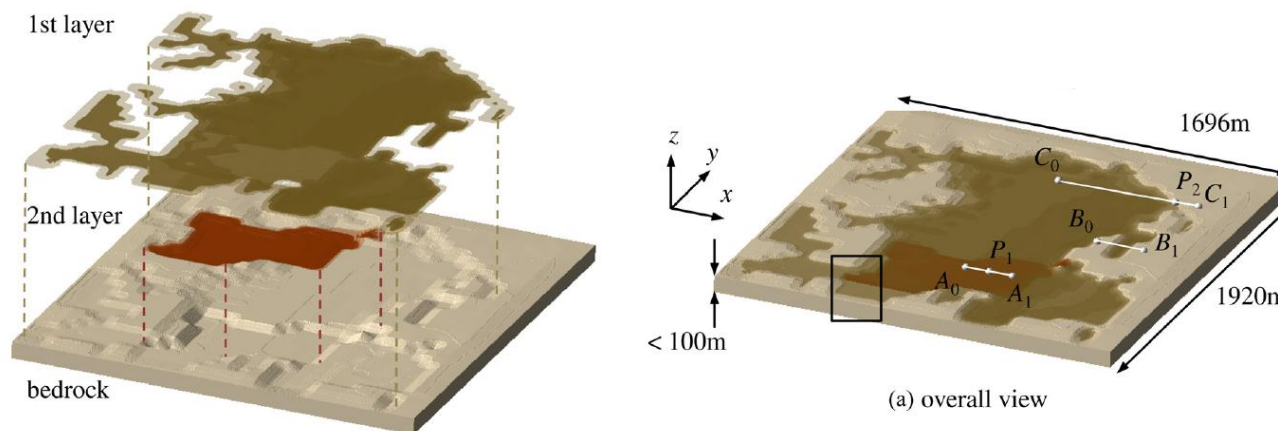
# 地震シミュレーションの現状

- 地震災害の3段階を組み合わせて解析
- 従来から「地殻中の波動伝播」と「構造物解析」はHPCアプリケーションとして盛んに研究されてきた
- 都市スケールの地盤震動問題が重要かつチャレンジングな問題となっている
  - 構造物の地震被害に大きく影響
    - 特定の周波数成分によっては10倍程度の増幅がかかることも
  - 広域・複雑形状・非線形物性のため、特に大規模な問題になる
  - 地震シミュレーション全体の信頼性を上げるために不可欠な要素



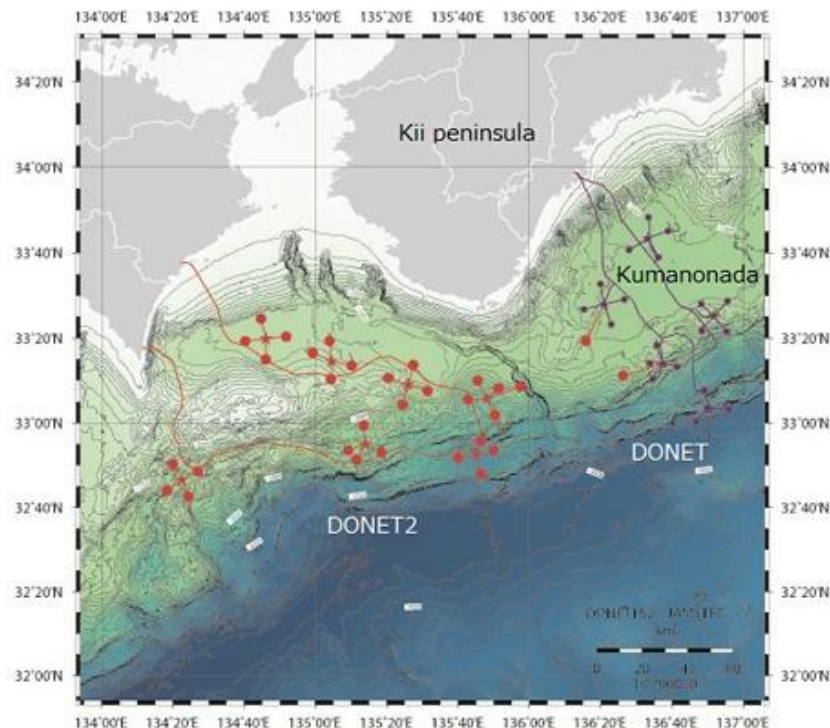
# 地盤震動シミュレーションの現状

- 地盤震動問題
  - 地表～深さ100m程度の地盤は、堆積や浸食などで複雑な物性分布・形状となっている
  - これを正確に解くには、大規模unstructured FEM解析が適している
- 都市スケールの3D地盤震動シミュレーションは可能になりつつある
  - 空間分解能4m, 時間分解能2.5Hz
- その一方で、計算コストが大きいため、
  - 構造物の応答に支配的な分解能(15Hz)は達成できていない
  - 複数回の計算ができないため、結果の信頼性を確かめることも難しい
- 高速な大規模unstructured FEM解析が地盤震動シミュレーションを実用につなげるために不可欠



# 大規模unstructured FEM解析の必要性

- 地盤震動問題だけでなく、地震・津波問題全般において、「形状を正確に解く」ことが重要になっている
  - 津波入力の推定精度の向上: 形状を正確に反映した計算で、観測データを使った断層状態の推定精度向上が期待できる
- 「大規模unstructured FEM解析」は地震・津波問題の基盤的な手法に
  - 陰解法・非構造格子という性能の出しにくい問題だが、意義の大きい問題

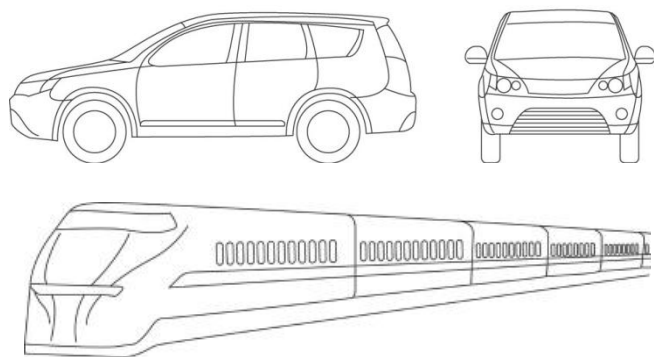


DONET, DONET2: 地震・津波観測監視システム

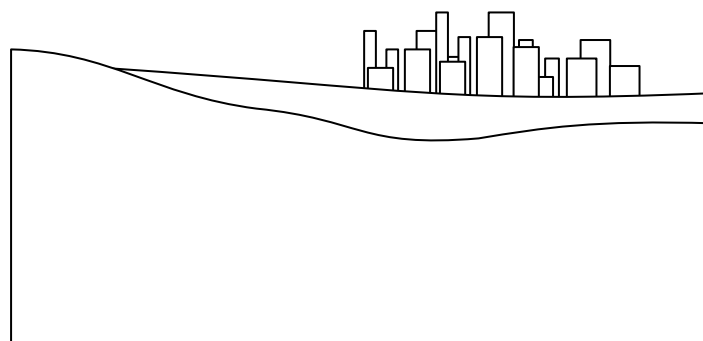
<https://www.jamstec.go.jp/donet/e/donet/donet2.html>

# 大規模unstructured FEM解析

- 陰的な時間積分を使うため、疎行列線形方程式ソルバーが重要
- 機械・原子力などの工学分野で長く研究されてきた
  - シェル・パイプなどの薄い・細い部材などにより、性質の悪い大規模問題となる
  - FrontISTR, ADVENTUREなど高性能並列解析ソフトウェアが開発
- 地震・津波災害系の問題：
  - 地盤・地殻といったバルクのある問題のため、性質はそこまで悪くないが、より大規模な問題
  - 本研究はここを狙う



車体：大部分はシェル部材の組み合わせ



地殻・地盤：中の詰まった固体



# 問題設定

- 離散化された波動方程式を解く
  - 非線形物性のため、各ステップでマトリクスが変化
  - 毎ステップ、大規模な対称疎行列の線形方程式を解く問題に帰着
- マトリクスが変化するため、高性能前処理はコストが見合わない
- その一方で、静的問題よりも対角項が大きくなるので、マトリクスの性質はそこまで悪くない

Matrix (components  
changes every time step)

$$\left( \frac{4}{dt^2} \mathbf{M} + \frac{2}{dt} \mathbf{C}^n + \mathbf{K}^n \right) \delta \mathbf{u}^n =$$

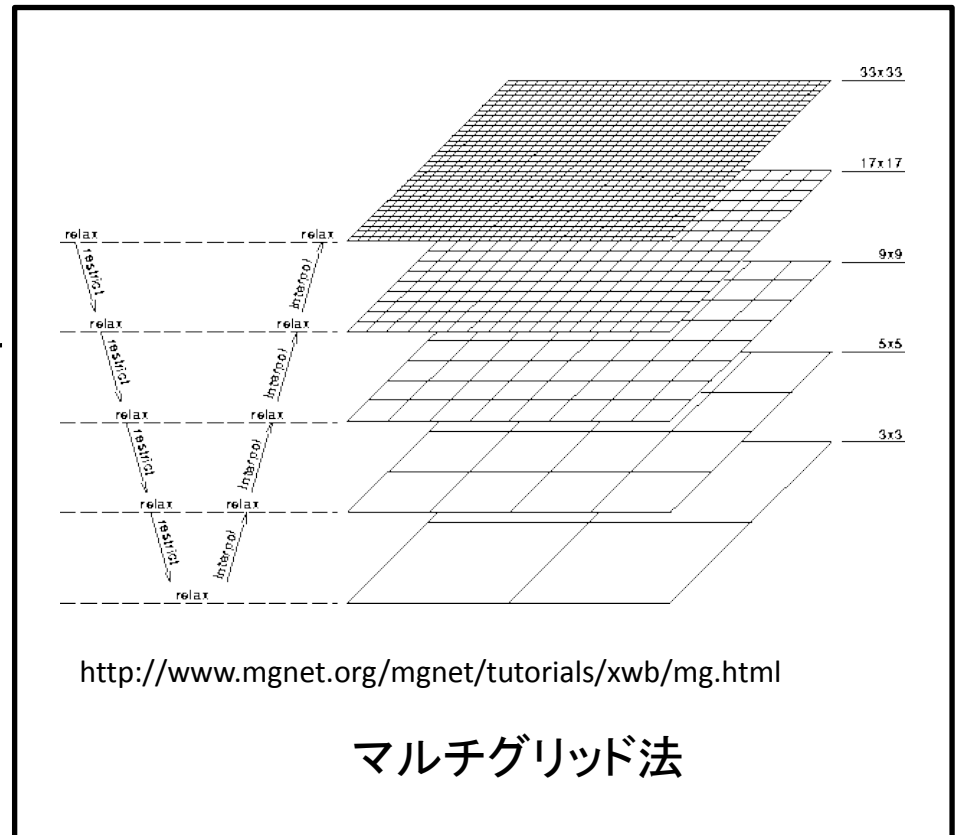
Unknown vector

$$\mathbf{F}^n - \mathbf{Q}^{n-1} + \mathbf{C}^n \mathbf{v}^{n-1} + \mathbf{M} \left( \mathbf{a}^{n-1} + \frac{4}{dt} \mathbf{v}^{n-1} \right).$$

Force vector

# 使えるような方法

- マルチグリッド法
  - 計算量を減らす
- 精度混合演算
  - 計算コスト・要求B/Fを減らす
- Element-by-element法
  - 要求B/Fを減らす
- など...



- それぞれ有用だが、組み合わせることでこの問題をより高性能で解けないか

# 使えそうな方法

- マルチグリッド法
  - 計算量を減らす
- 精度混合演算
  - 計算コスト・要求B/Fを減らす
- Element-by-element法
  - 要求B/Fを減らす
- など...

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{u} \quad \text{Matrix-vector product}$$

$$\mathbf{b} = \sum_e \mathbf{A}_e(\mathbf{x}_e, \mathbf{c}, \rho) \mathbf{u}_e$$

(for each element) Matrix-vector product  
computed by element-  
by-element method

Element-by-element法:

要素毎に行列ベクトル積を計算・足込み

- それぞれ有用だが, 組み合わせることでこの問題をより高性能で解けないか

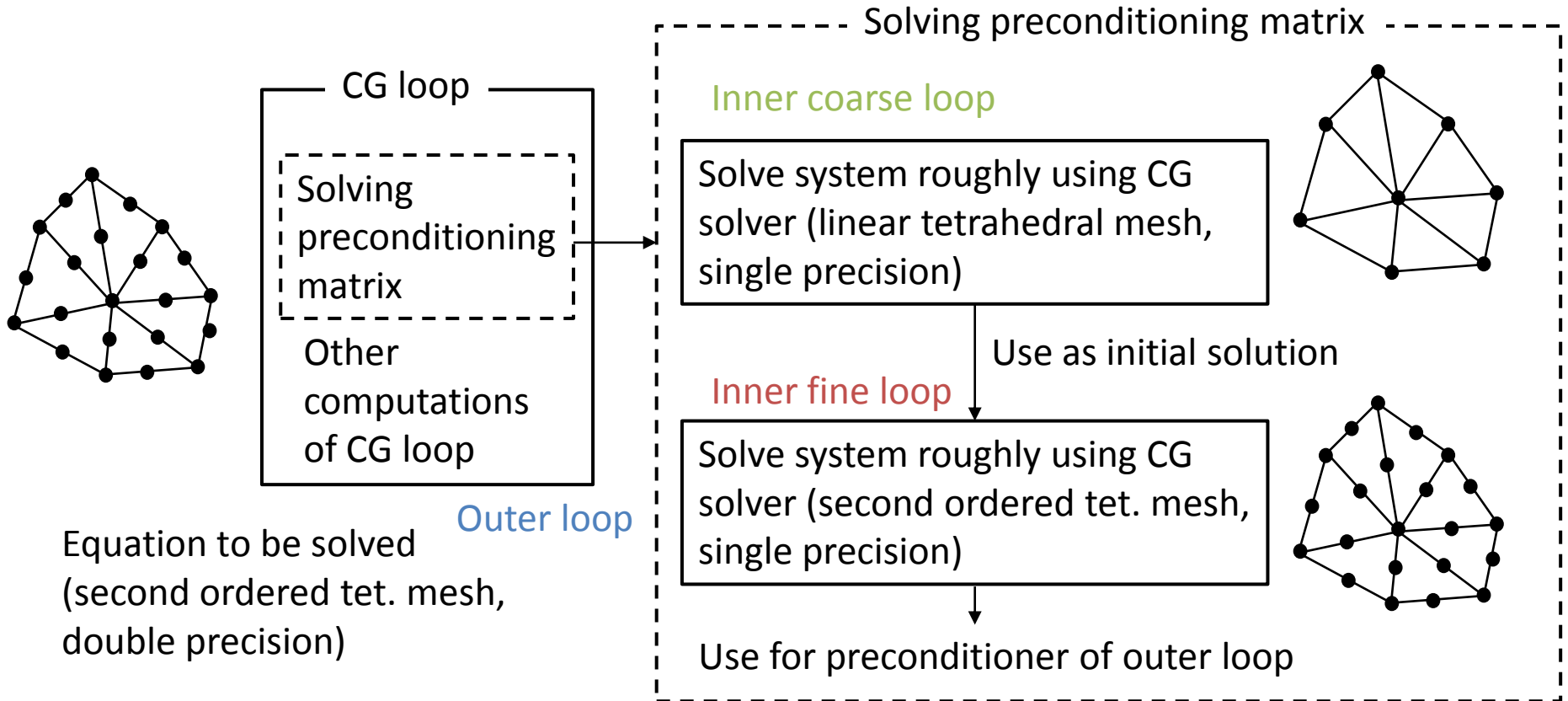
# GAMERA

- これらのHPC手法を組み合わせ  
て、地盤震動問題を高速に解く
  - multi-**G**rid method
  - **A**daptive conjugate gradient  
method
  - **M**ulti-precision arithmetic
  - **E**lement-by-element method
  - p**R**edictor with **A**dams-bashworth  
method

Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Maddegedara Lalith, Yoshihisa Shizawa, and Hiroshi Kobayashi, Physics-based urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF x 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation, SC'14, Gordon Bell Finalist, in press.

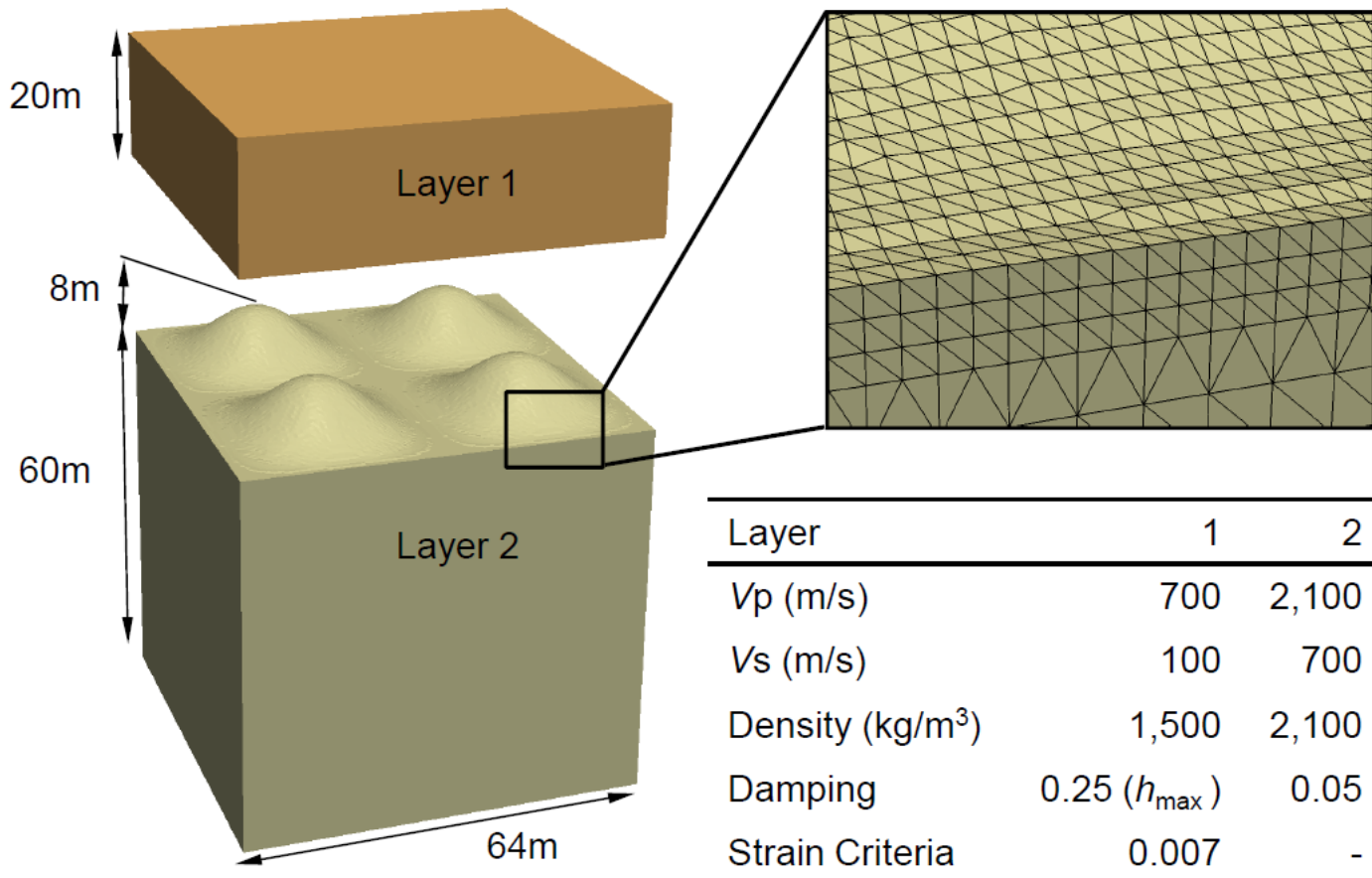
# GAMERA, solver for wave amplification problem

- Solve preconditioning matrix roughly to reduce number of CG loops
  - Use multigrid method to reduce compute cost of preconditioner
  - Use single precision in preconditioner to reduce computation and communication
- Parallelized using MPI, OpenMP, auto parallelization



# Performance measurement

- Problem setting
  - 94,407,951 DOF with element size of 1 m
  - Duplicated in  $x, y$  directions to make problems with periodical geometry



# Size-up scalability of GAMERA

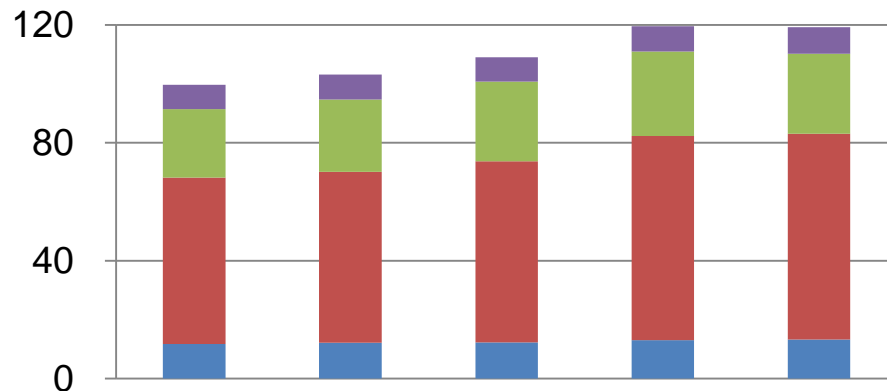
- 計算ノードあたりの問題規模を一定に保ったまま, 並列数を増やす
  - 非線形波動場解析を100ステップ解くのにかった時間を計測
  - 陰解法・低次要素・非構造格子という性能の出しにくい問題だが, 京全系でsolveできている

Elapsed time for solving 100 steps (s)

Total elapsed time

Solver

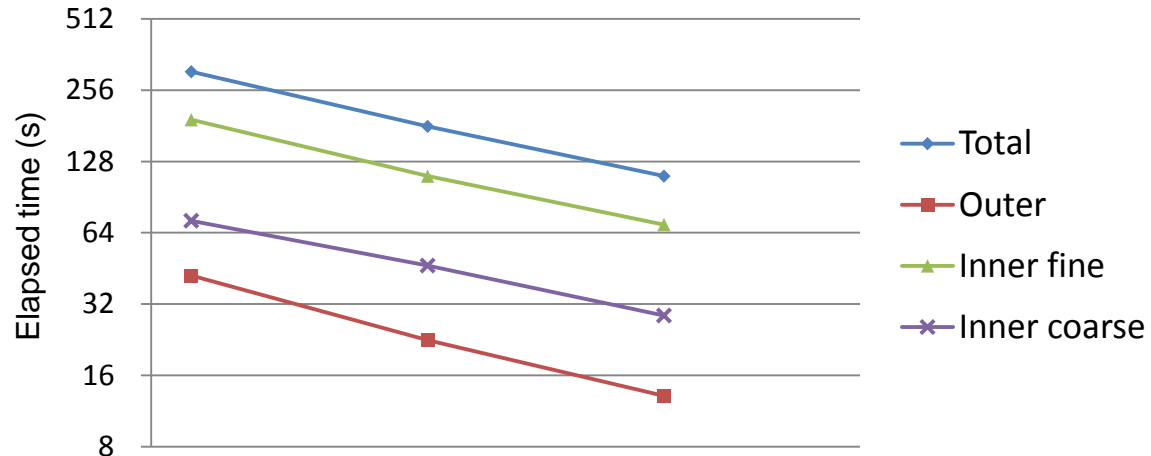
- Others
- Inner coarse
- Inner fine
- Outer



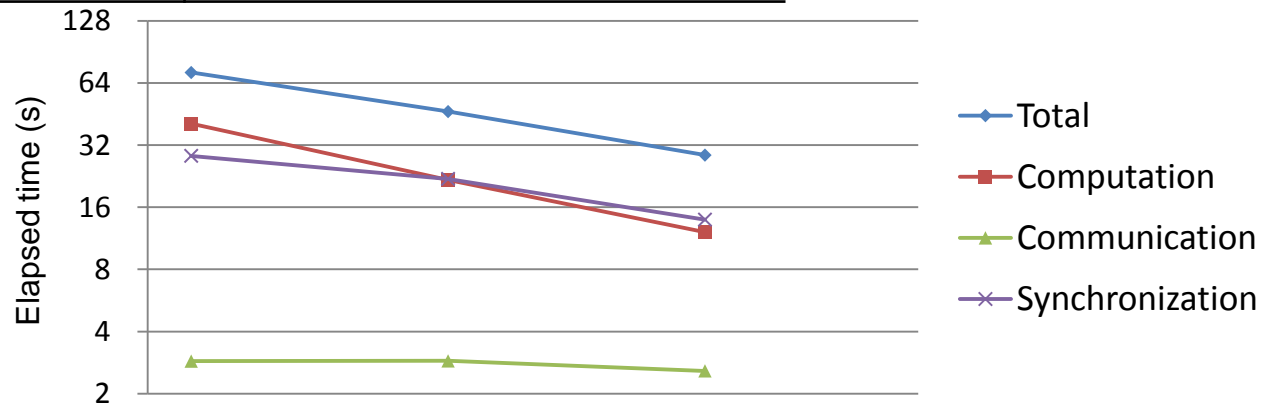
CPUコア数 (ノード数)	36,864 (4,608)	73,728 (9,216)	147,456 (18,432)	294,912 (36,864)	663,552 (82,944)
自由度数	15億	30億	60億	120億	270億
CPUコアあたりのDOF数	41k	41k	41k	41k	41k
FLOPS/Peak of solver (%)	14.49	14.06	13.28	11.82	12.34

# Speed-up scalability of GAMERA

120億DOFの問題を並列数を変えて計測



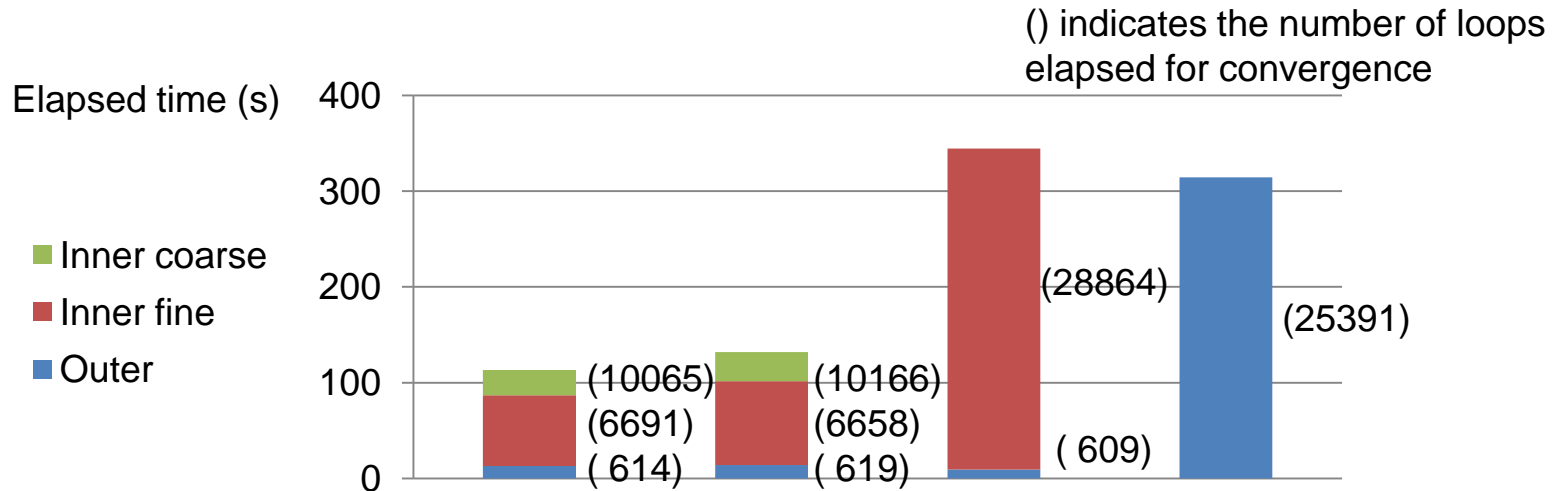
CPUコア数 (ノード数)	73,728 (9,216)	147,456 (18,432)	294,912 (36,864)
CPUコアあたりのDOF数	163k	81k	41k
Elapsed time of solver (s)	306.3	180.0	111.0
FLOPS/Peak (%)	17.1	14.7	11.8





# Effectiveness of algorithm

- GAMERAのアルゴリズムの効果を計測
  - 京全系を使って計測 (82,944ノード, 270億DOF)

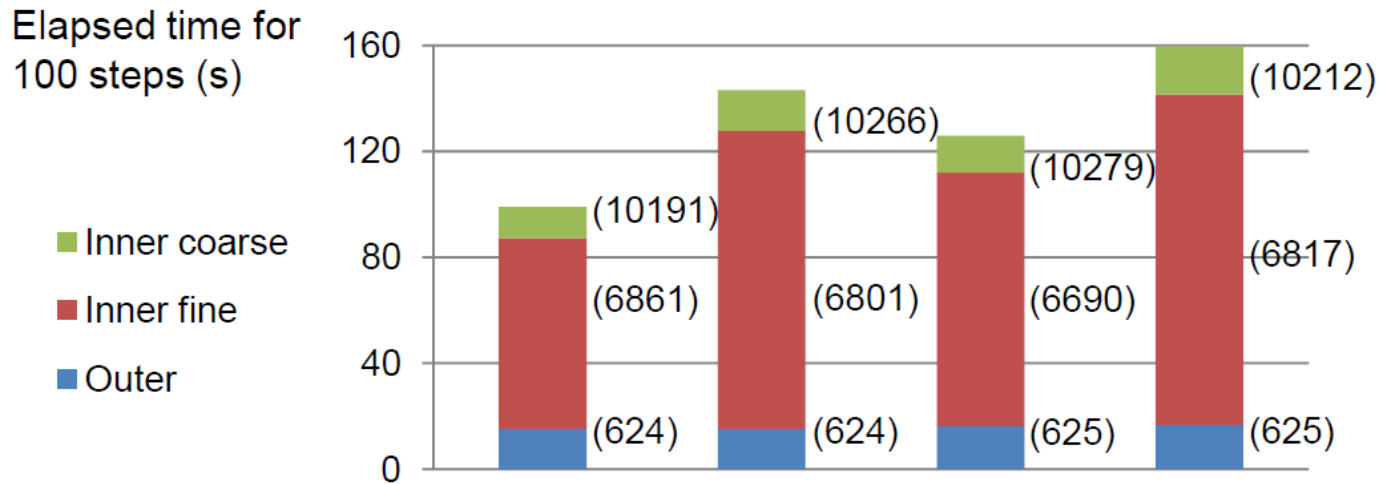


	GAMERA	Without mixed precision	Without mixed precision and multigrid	PCG method*
Elapsed time (s)	113.2	131.8	344.4	314.4
FLOPS/Peak (%)	11.7	10.2	10.8	10.0
Mem. Throughput/Peak (%)	5.59	10.3	12.0	12.4

\*Use 3x3 Block Jacobi method for preconditioning

# Portability of GAMERA

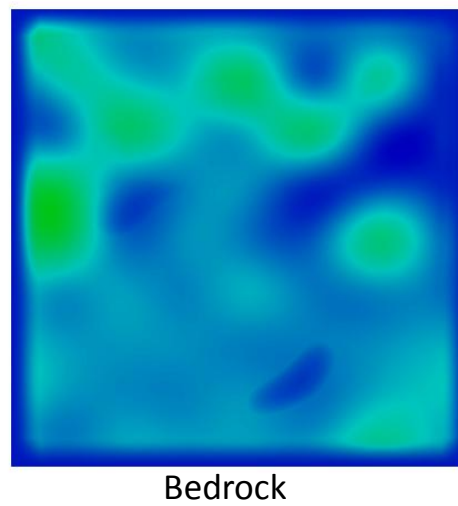
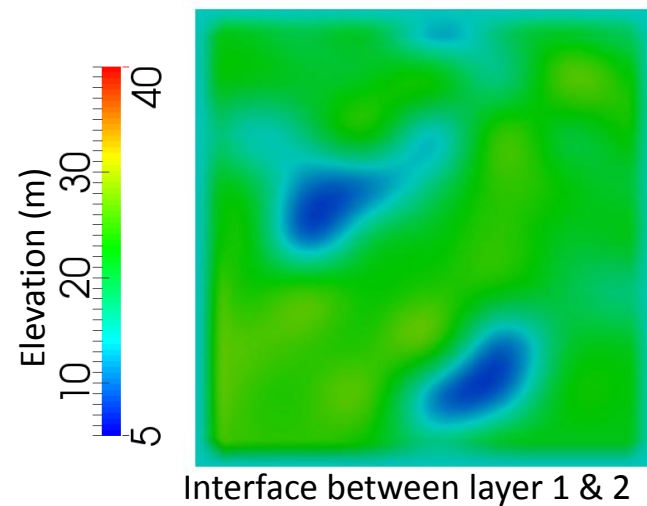
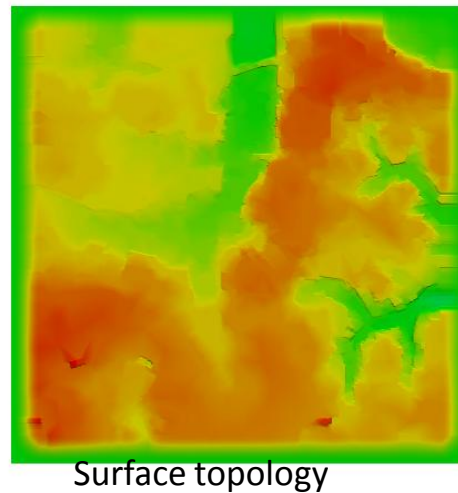
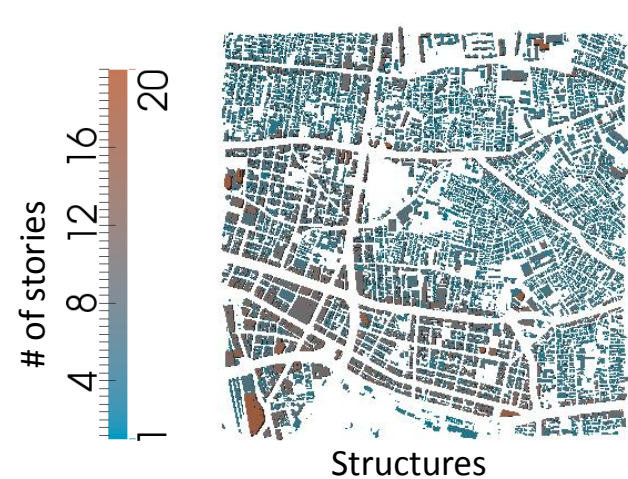
- Intel系のCPUを使ったStampede を使ってGAMERAのポータビリティを検証
  - 単精度計算の速い計算機を使うことで、精度混合演算がより効果的になる



Compute environment	Stampede 256 nodes (each with dual Intel Xeon E5-2680 CPUs)		K computer 256 nodes (each with single SPARC64VIIIfx CPU)	
Solver	GAMERA (MP, MG)	GAMERA (DP, MG)	GAMERA (MP, MG)	GAMERA (DP, MG)
Elapsed time (s)	99.0	142.9	125.9	159.5
Ratio between (MP, MG) and (DP, MG)	1.44	-	1.27	-

# 適用例：問題設定

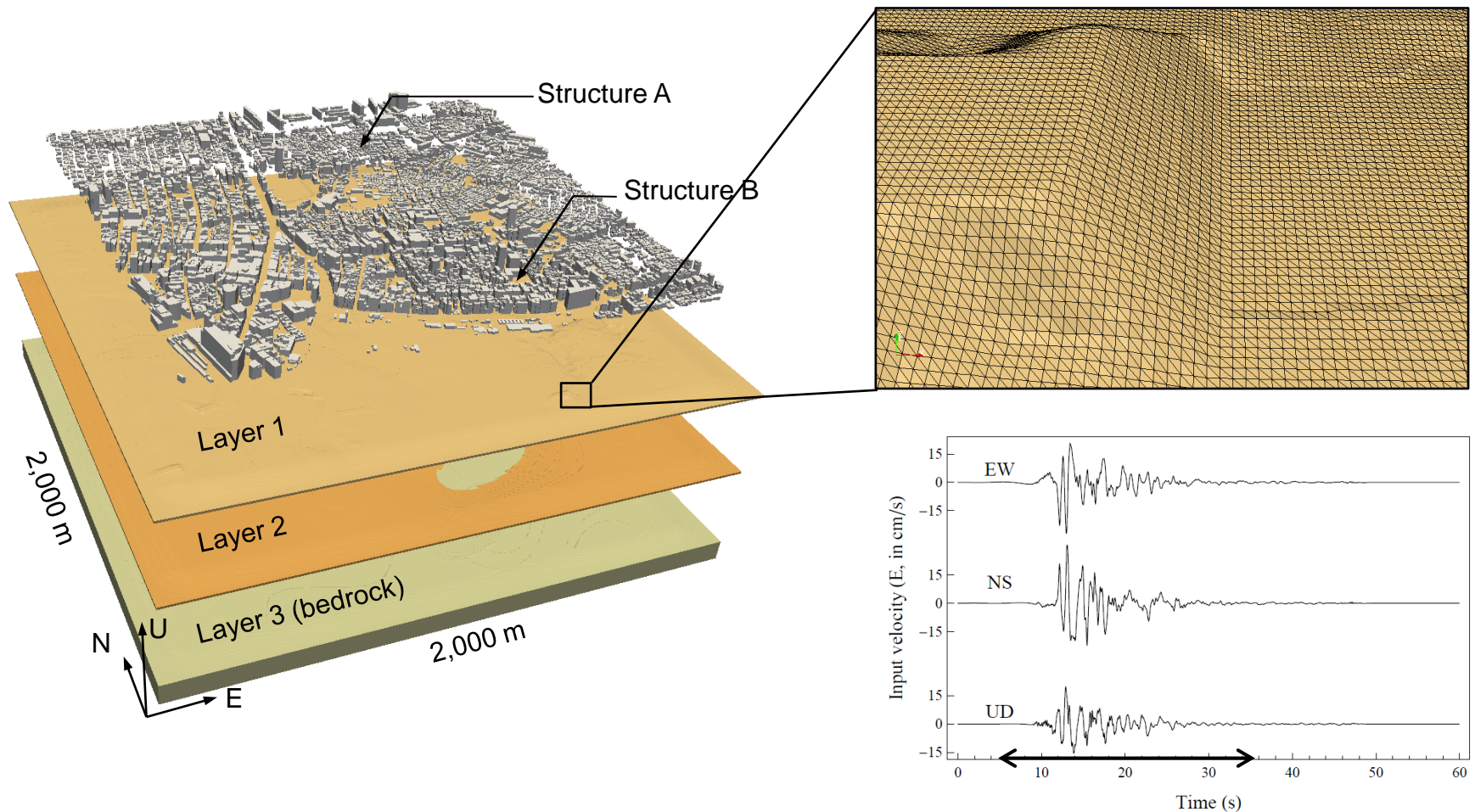
- 3層の地盤構造・13,275棟の構造物からなる2.0 x 2.0 kmの領域(新宿付近)
- 地盤工学会提供のデータをもとに地盤モデルを作成



Layer	1	2	3
Vp (m/s)	1,210	1,380	1,770
Vs (m/s)	150	255	490
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,500	1,800	1,900
Damping	0.25 ( $h_{\max}$ )	0.05	0.005
Strain Criteria	0.005	-	-

# 適用例：解析モデル

- 要素サイズ0.66 mでモデル化することで, 10,755,536,091 DOF
- 神戸波を入力 ( $dt = 0.001$  s, 30,000ステップ)



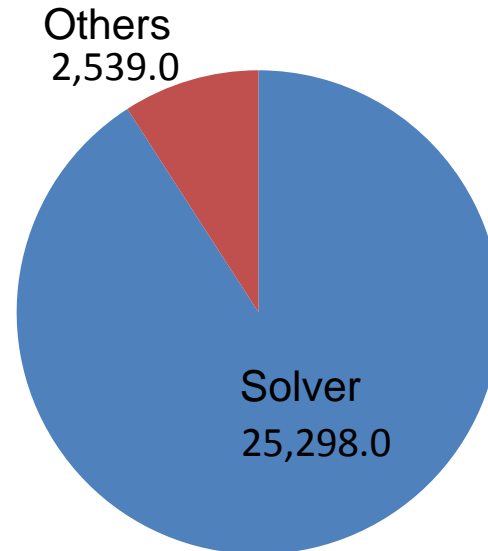
# 計算コスト

- 京コンピュータ36,864ノードを使って, 7時間44分 (27,837s)
  - 91%の時間がソルバーに使われており, 実問題でも高性能な計算が実行できている

Elapsed time for 30,000 steps (s)

Others:

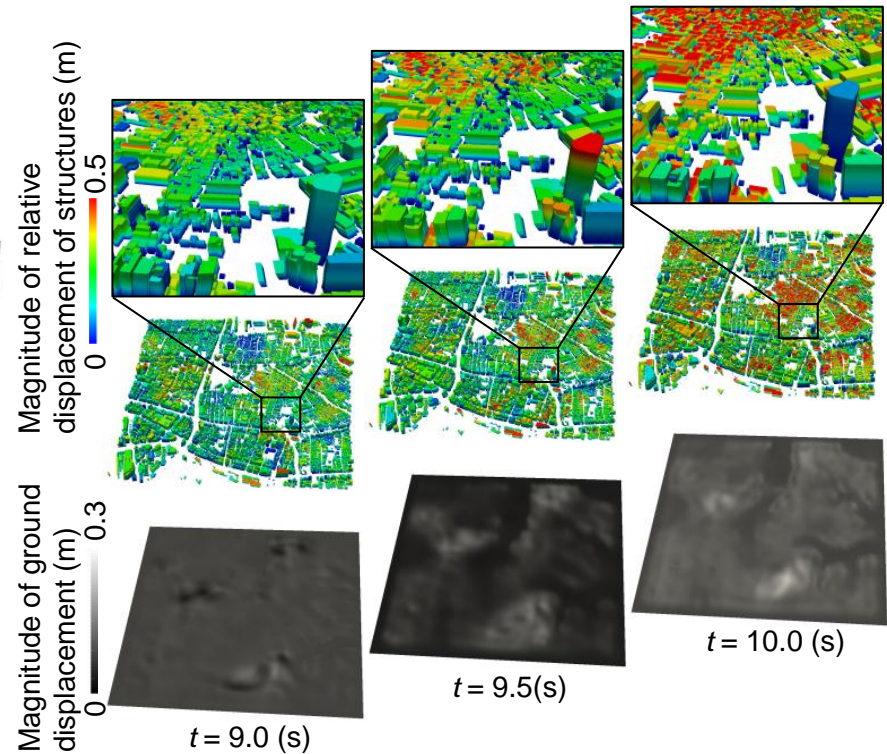
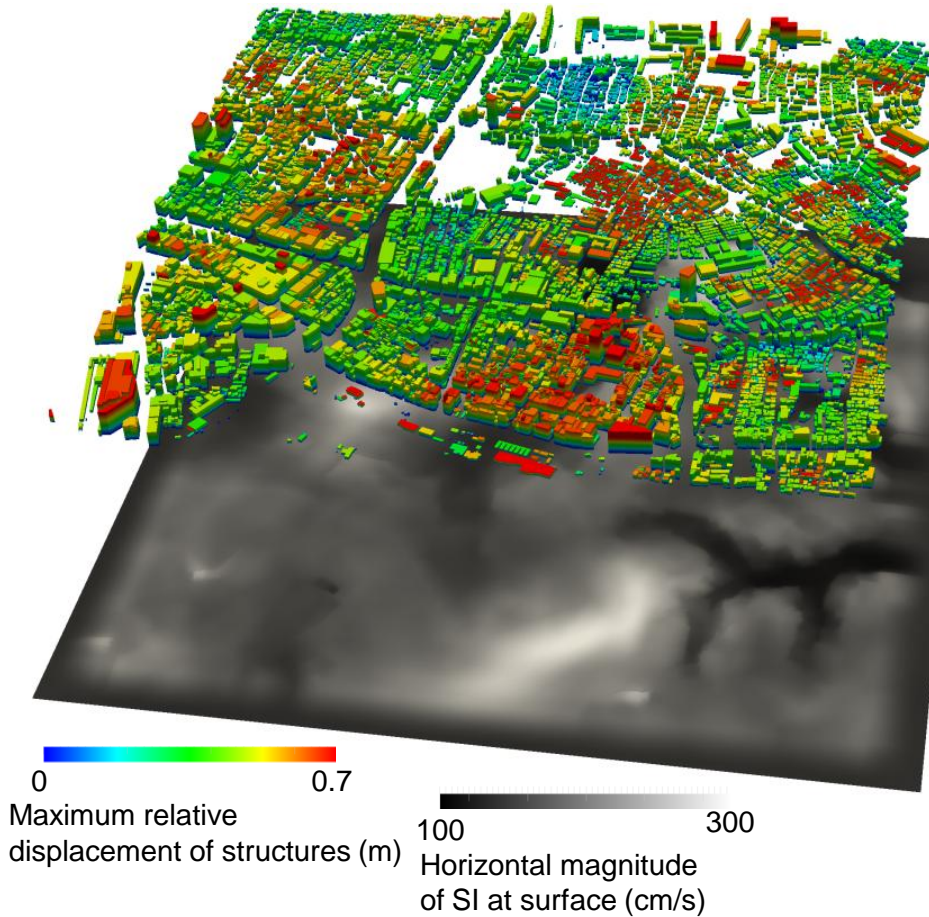
- Compute nonlinear constitutive model
- Compute block diagonal matrix
- Read input boundary condition
- Write output data



Total: 41,521 s

Sustained FLOPS/peak: 12.6% (solver), 11.8% (Total)

# 解析結果



Time history response of ground and structures



Ground motion

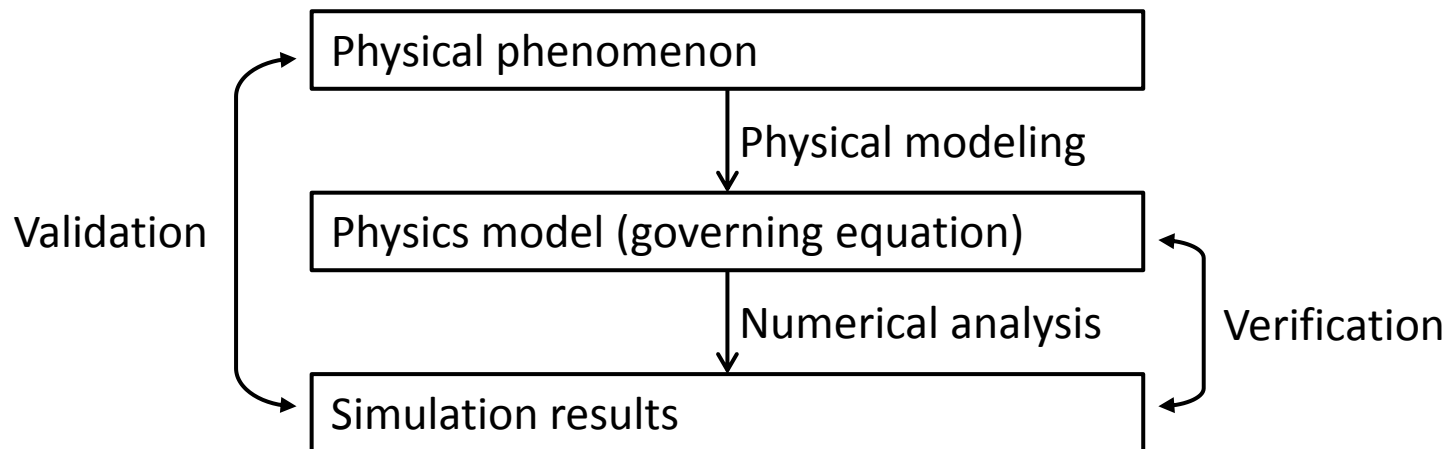


Structure response

- 地盤と構造物の特性を踏まえた被害分布を求めることができる

# シミュレーション結果の信頼性確認(1)

- V&V (Verification and Validation)<sup>[3]</sup>
  - Methodology to ensure the reliability of simulation results
  - Consists of two phases
    - Verification: check if the physics model is solved correctly
    - Validation: check if simulation results follow the actual phenomenon



[3] An Overview of the PTC 60 / V&V 10, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME, <http://cstools.asme.org/csconnect/pdf/CommitteeFiles/24816.pdf>

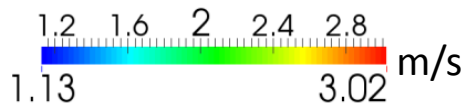
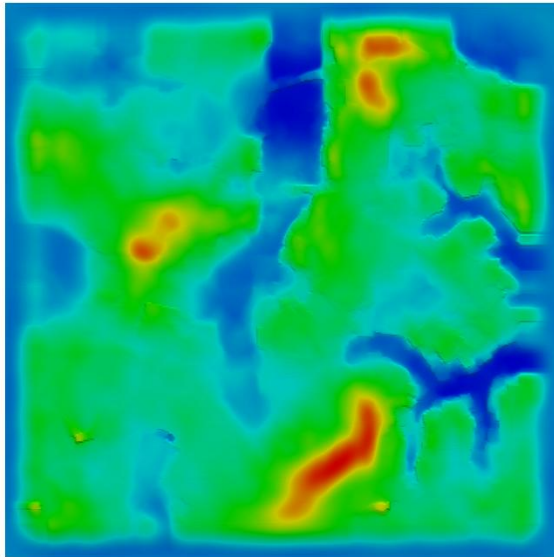
## シミュレーション結果の信頼性確認(2)

- 従来は、解析領域の一部を取り出した準備解析により、メッシュサイズを決めていた
  - 非線形な挙動で局所的に揺れが増幅する箇所では収束が甘くなる可能性がある
- 同じ数理問題に対して、分解能を変えた解析モデルを作成し、解析領域全体の解の収束性を確かめる
  - 5Hz ( $ds=2m$ ), 10Hz ( $ds=1m$ ), 15Hz ( $ds=0.66m$ )の3つのモデル
  - シミュレーションの信頼性向上に重要なステップ

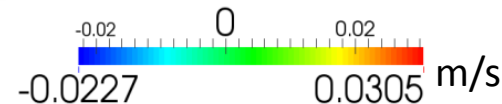
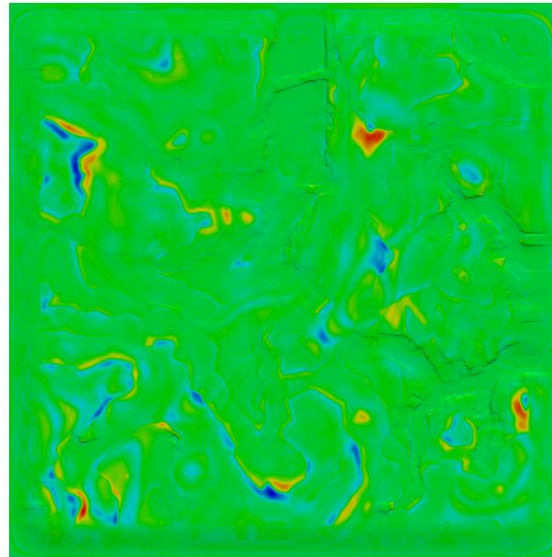


# 解の収束性確認

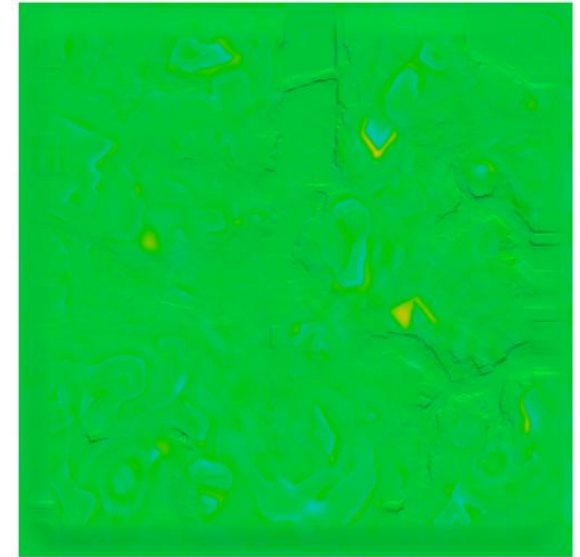
- 地表面でのSI値の分布の収束を確認
  - SI値: 構造物の被害を見積もるのに使われる地震動強さの指標
  - 15Hzモデルで, 誤差1%以内に収束



15Hz model



15Hz - 10Hz

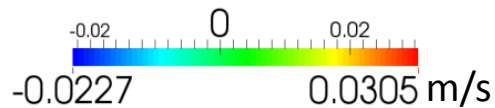
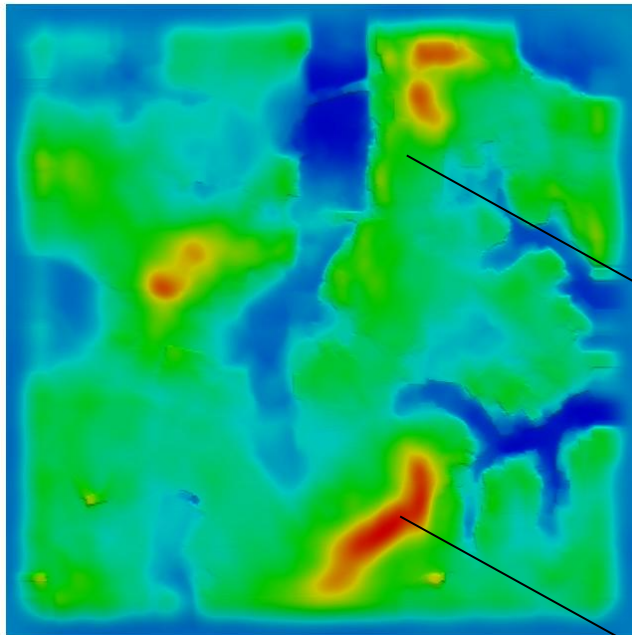


15Hz - 10Hz

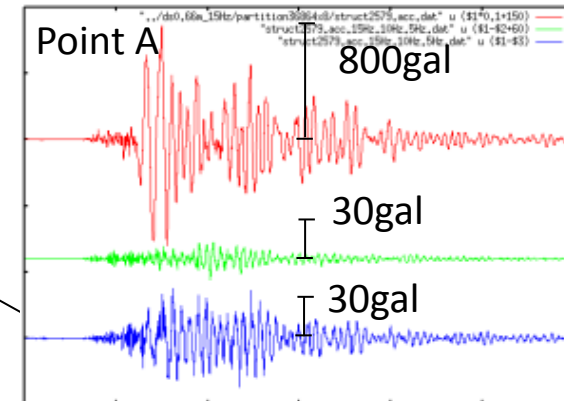
$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT$$

# 解の収束性確認

- 加速度波形も15Hzモデルで誤差1%以内に収束



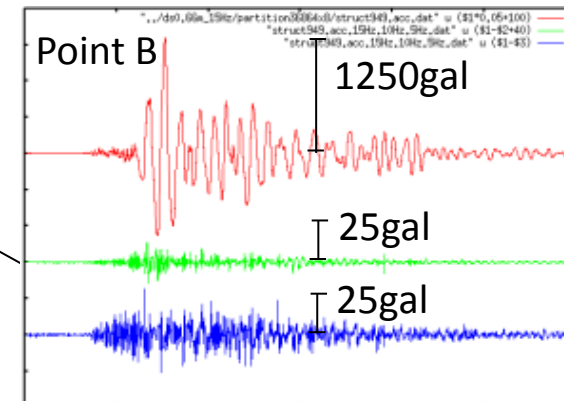
15Hz model のSI値分布



15Hz model

15Hz - 10Hz

15Hz - 5Hz



15Hz model

15Hz - 10Hz

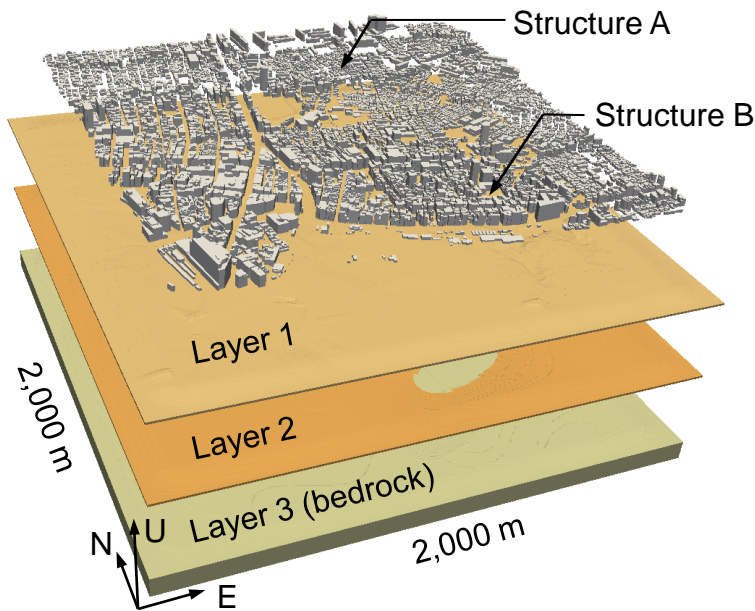
15Hz - 5Hz

0 t (s) 30

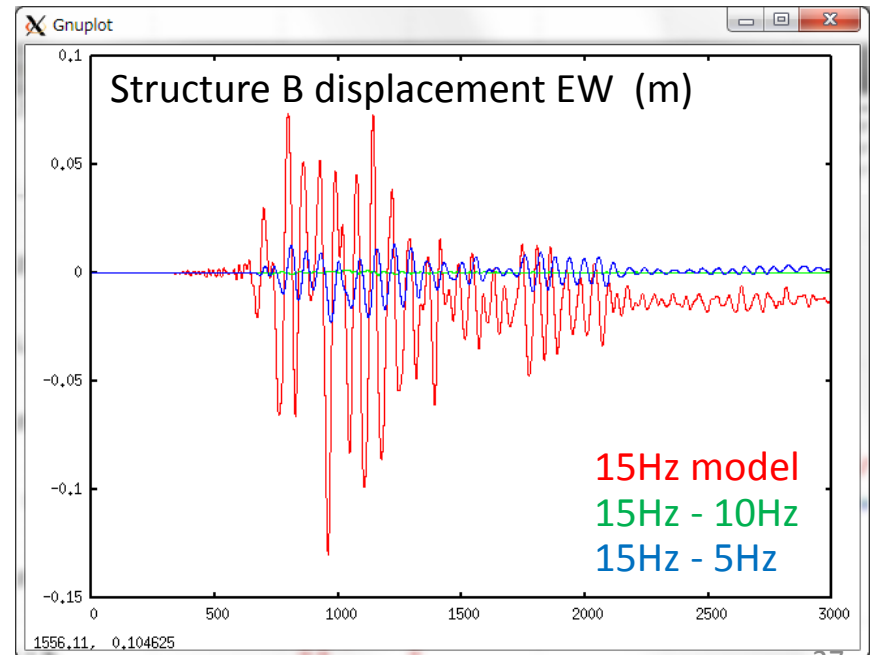
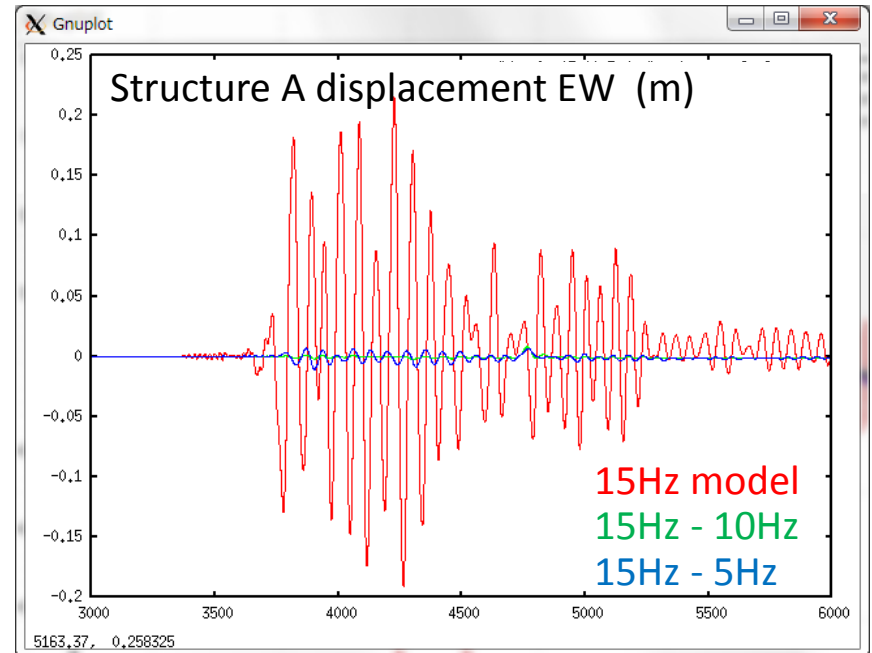
Acceleration waveform at surface (East-West direction)

# 構造物応答の収束性確認

- 2階建てRC構造物2棟の変位を比較
  - 5Hzだと収束していないが, 10Hzで収束



- 形状を厳密にモデル化する手法を十分な分解能で使うことで, 解が収束
- 京+GAMERAによって初めて都市スケールで実現



# ここまでのまとめ

- 地盤震動問題は地震の統合シミュレーションの実現に際して、重要かつチャレンジングな問題
  - 建造物の被害を左右する問題だが計算量が膨大
  - Unstructured FEMの大規模・高速解析が必要に
- 地盤震動問題のためのunstructured FEMの大規模解析手法を開発
  - 計算・通信を減らすことで、スケーラブル・高速な計算を実現
  - 京で実行することで、地盤震動の実問題を有用な分解能で解けるように
  - 形状を正確にモデル化する非構造格子を使うことで、綺麗に数値問題が解けている

# 地震・津波問題のもう一つの側面

- 実問題に適用する際には、地殻・地盤・構造物群などのモデルデータの欠如・不確実性も問題に
  - 例：広域の都市モデル．都市のデータは外形の3D情報はあっても、解析に使う構造データは整備されていない
- 数理問題を高詳細に解くのと同時に、現実問題を計算に反映させる「モデル構築」も重要
  - データを有効活用する「自動モデル構築」と、
  - 不確実性を結果に反映するための「capacity computing」を合わせて結果の信頼性向上を試みる

# Utilization of GIS data of buildings\*



Input: CAD data of buildings

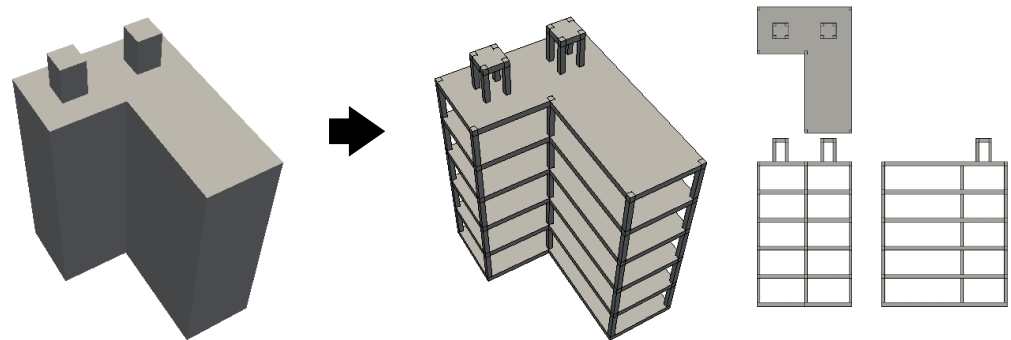
CAD data is just a set of polygons independently located for visualization

Major Challenge:

- Conversion of CAD data to models with element connectivity information

Objective:

- Develop a method for automatic construction of building models



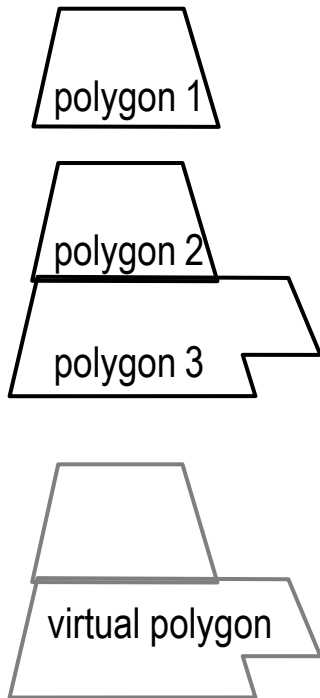
CAD data (Polygons)

Slab-Column Model

\*Hideyuki O-tani et al.: Template-Based Automatic Construction of Building Models from GIS data, *COMPSAFE 2014*

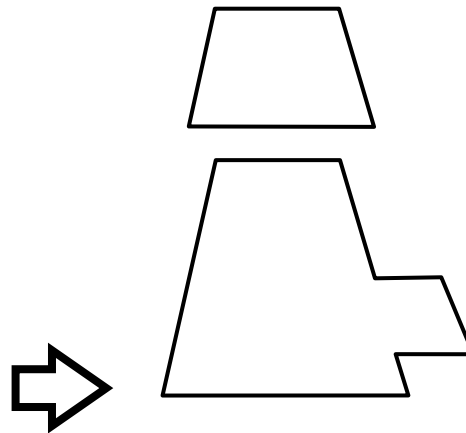
# Automated Model Construction

horizontal polygons  
with height



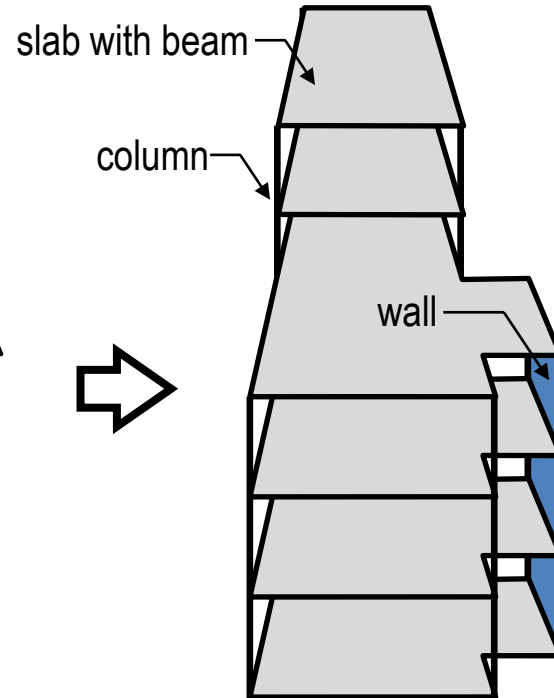
CAD data

Floor arrangement



Floor arrangement set

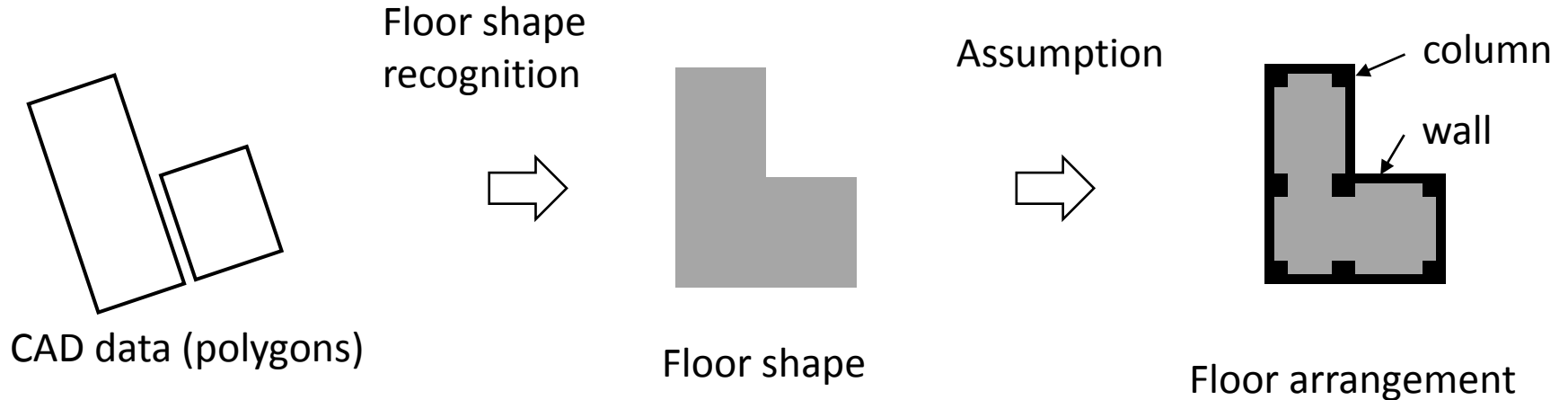
Floor with structure member



Structure Model

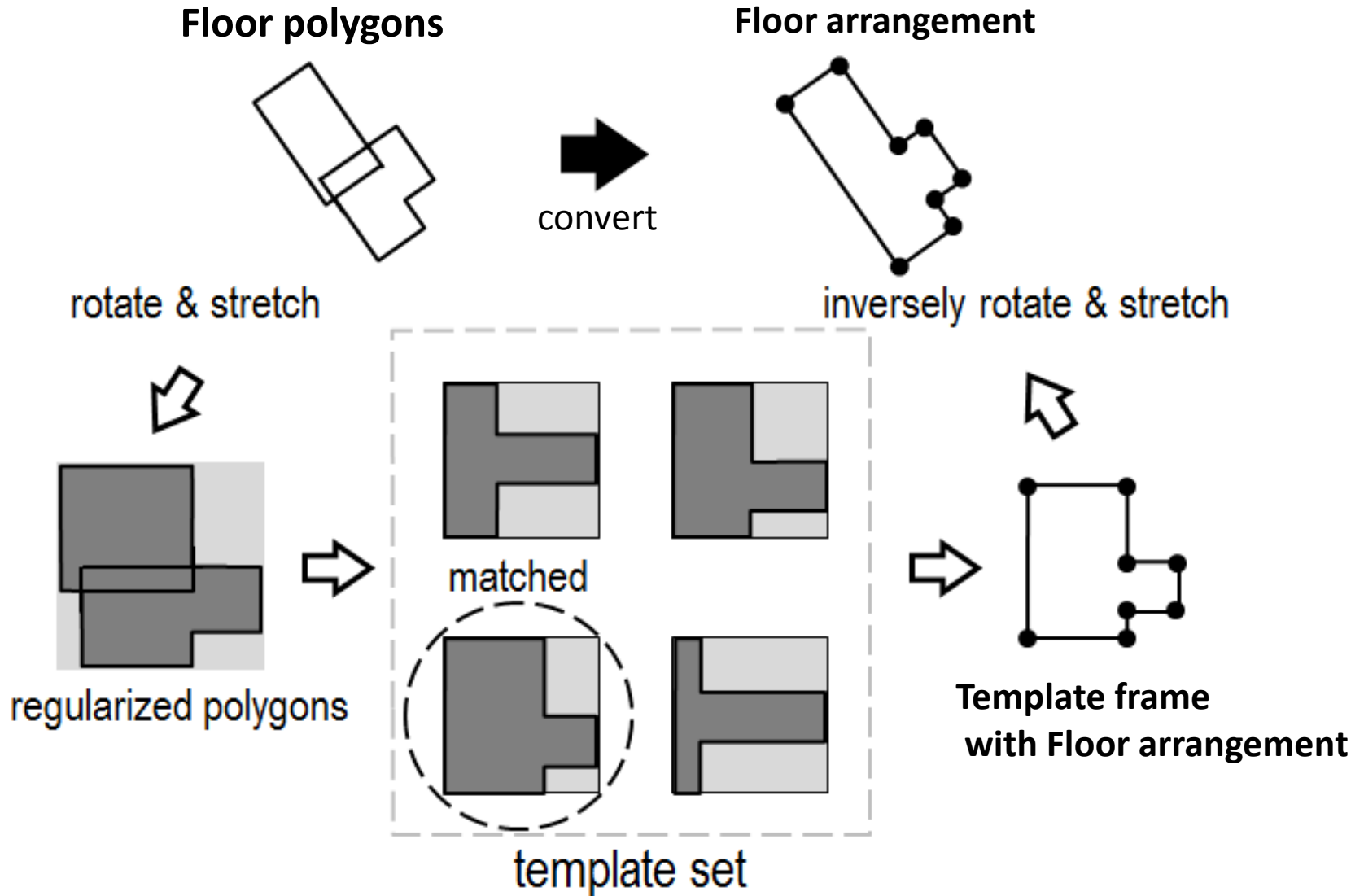
# Automated Model Construction

- Two Major Challenges:
  - Floor shape recognition
  - Assumption of floor arrangement

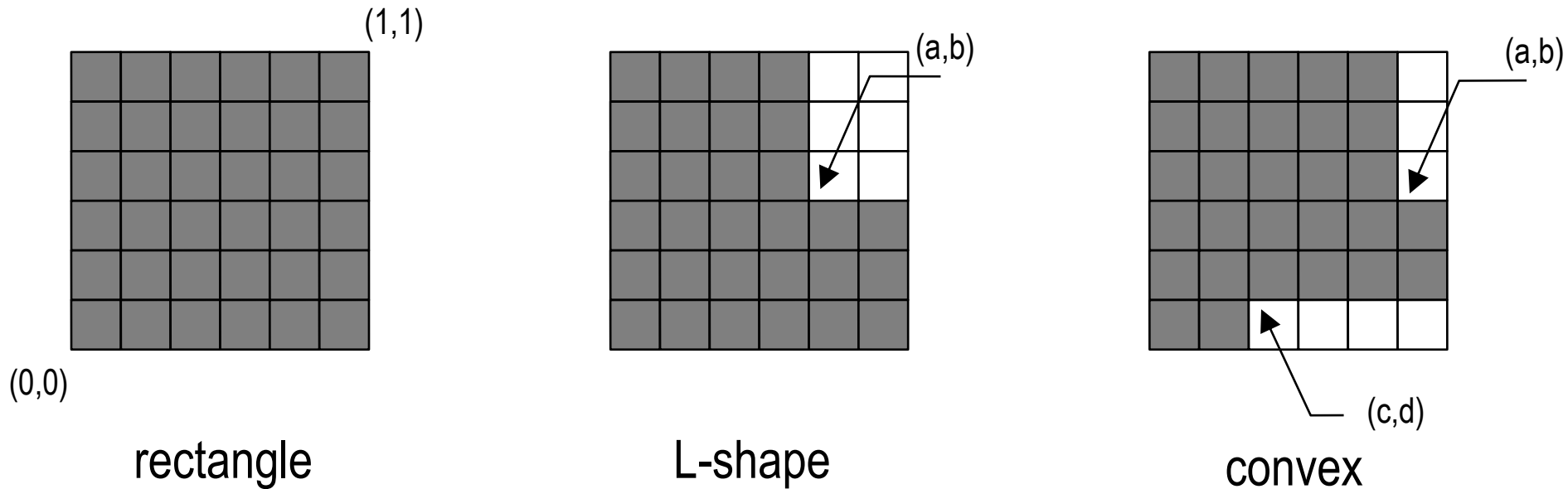




# Template Fitting



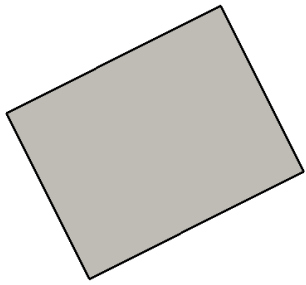
# Results of template fitting



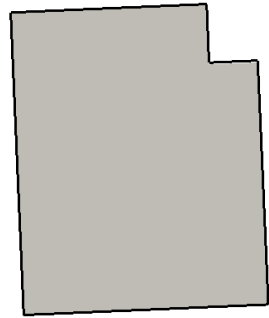
The results of template fitting applied to about 38,000 CAD data of buildings

Threshold of $d$	Rectangle	L shape	Convex	Fail
0.05	47.8%	11.3%	1.3%	39.6%
0.10	54.6%	26.7%	5.9%	12.8%

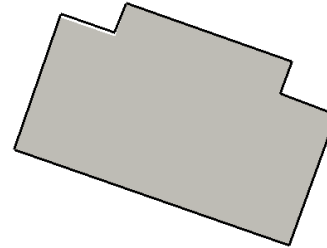
# Results of template fitting



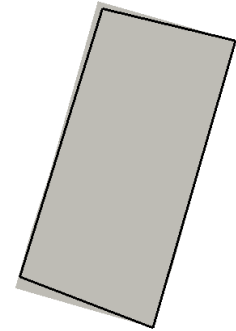
$d = 0.000$



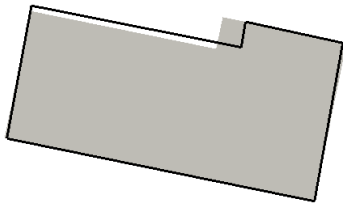
$d = 0.001$



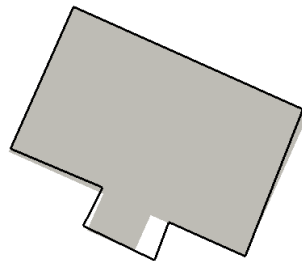
$d = 0.011$



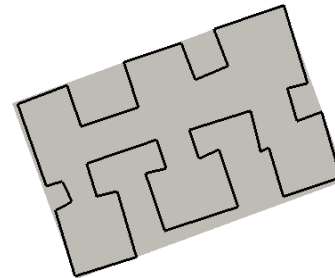
$d = 0.05$



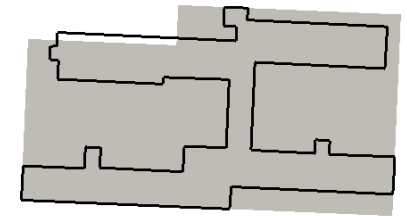
$d = 0.05$



$d = 0.05$

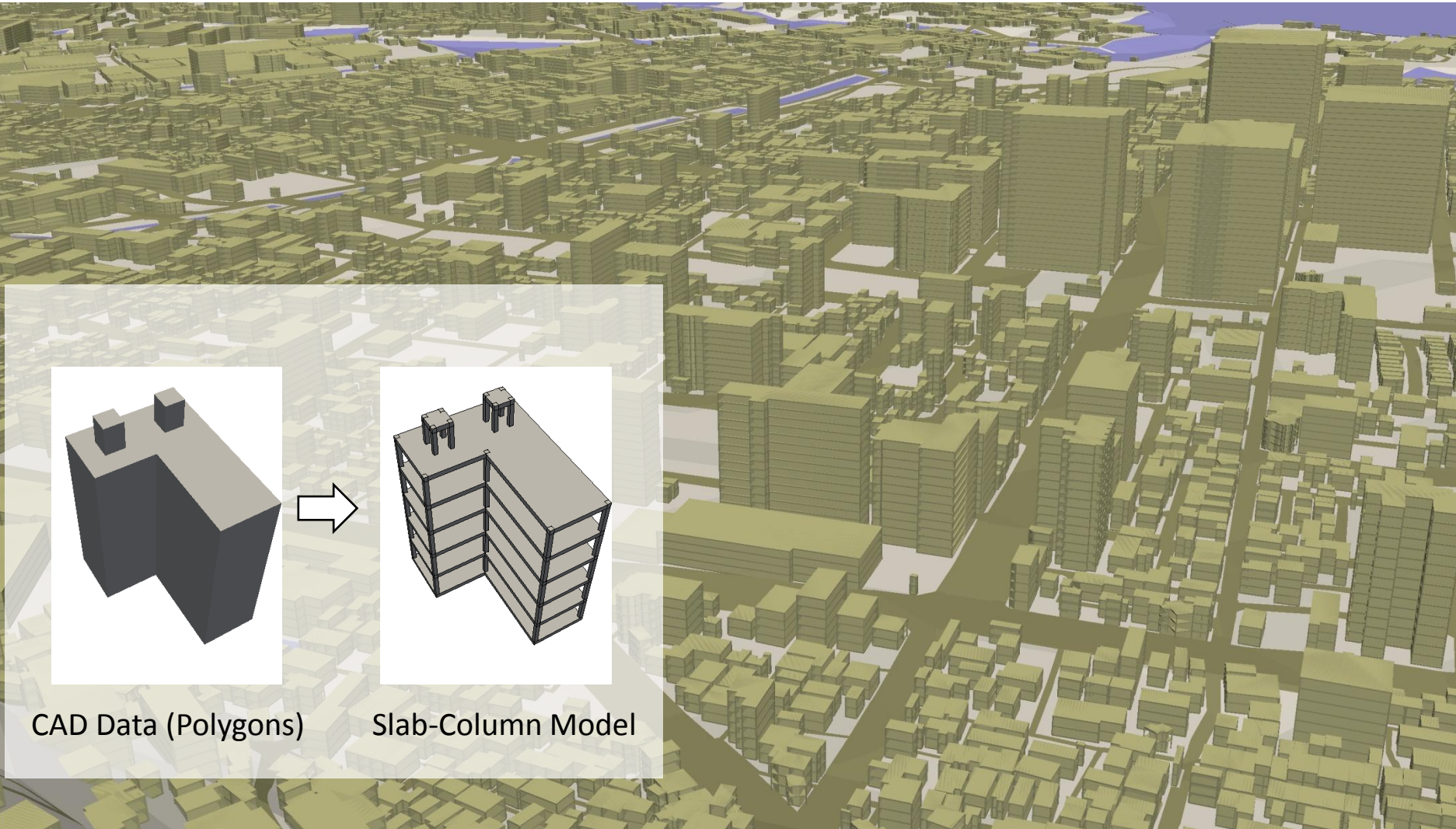


$d = 0.335$



$d = 0.565$

# Application



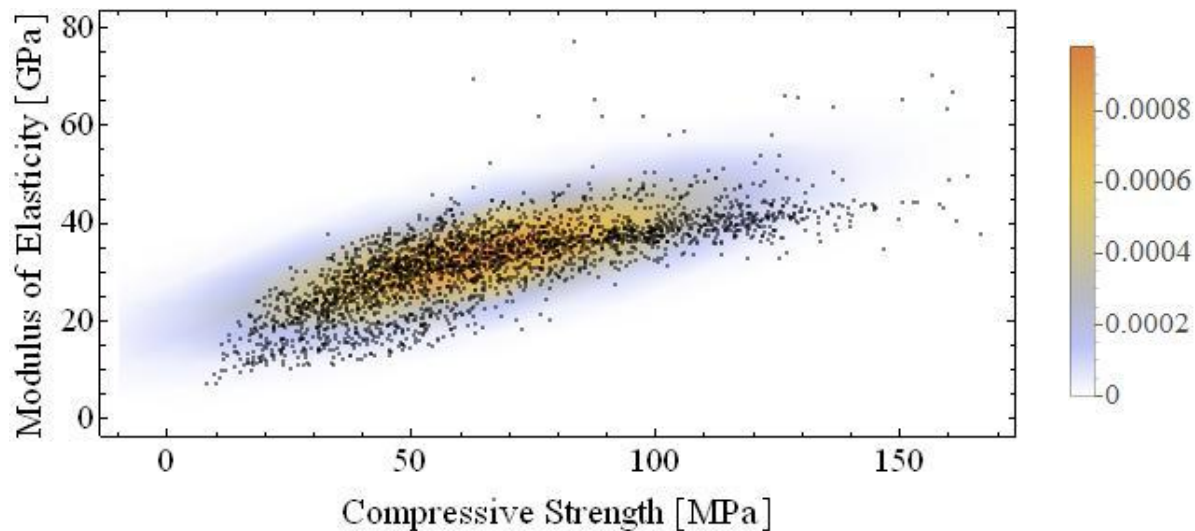
CAD Data (Polygons)

Slab-Column Model

Slabやcolumnの位置を床形状に応じて推定可能

# 構造物のstochastic modeling

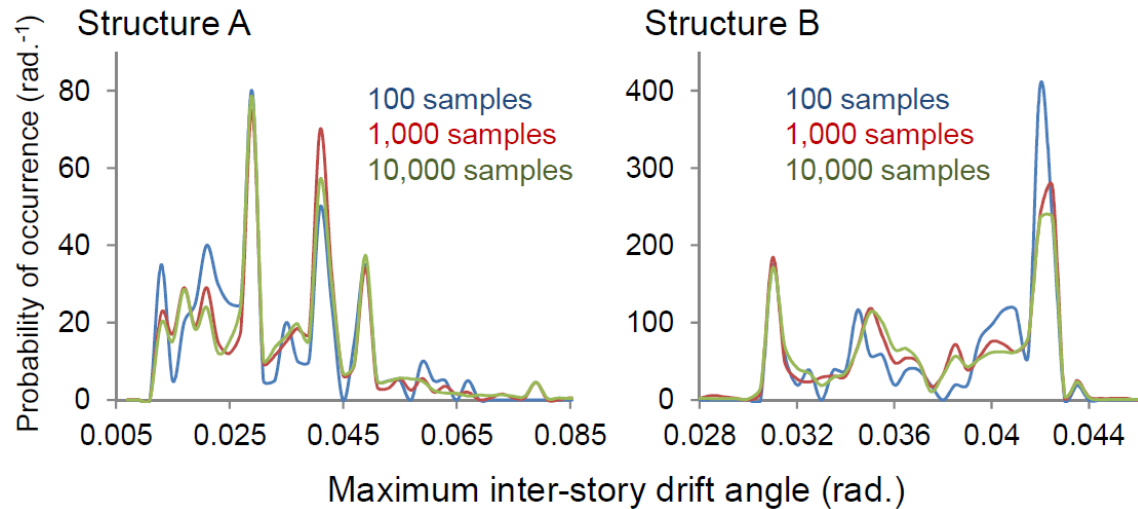
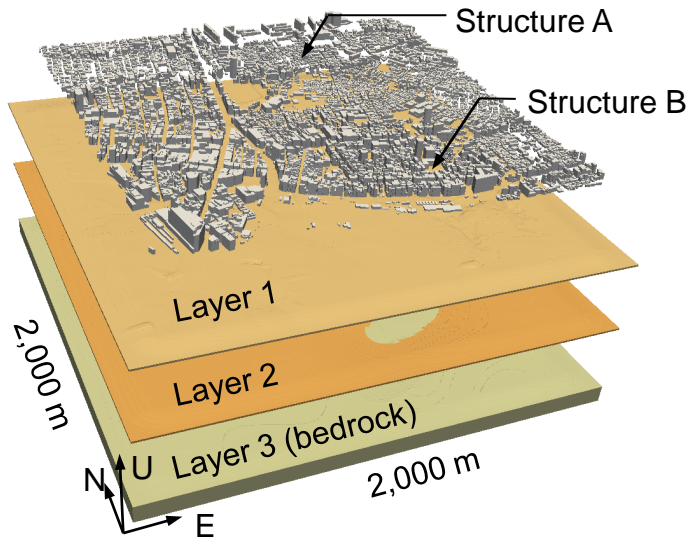
- 都市のモデル化に際しデータが欠如している場合がある
  - 例: コンクリートの物性. 同じ設計でも, 実際の性能はばらつく
- このような不確実性も被害想定に反映させることが望ましい
  - Capacity computingによる多数ケースの解析で, 入力分布に対する結果の分布を求める



Black dots: observed data by Prof. Noguchi Hirofumi,  
Colored distribution: fitted bi-normal distribution

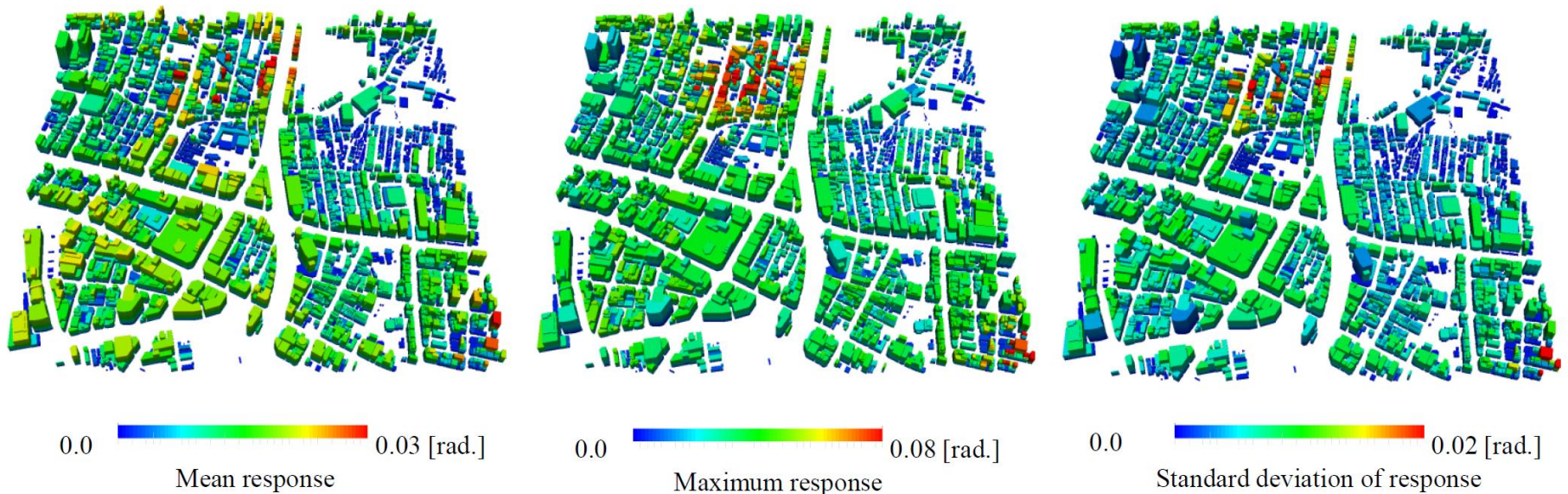
# 構造物のstochastic simulation

- 13,275棟の都市を10,000サンプル計算
  - 京コンピュータ10,000ノード, 3h56minで計算
  - 応答の確率分布を求めることができるように



# 構造物のstochastic simulation

- 全構造物に対して、応答分布を求めることができる
  - 対策の優先度を定める際などに有効と期待



層間変位角の平均応答・最大応答・標準偏差

# おわりに

- 地震・津波問題は「広域・高分解能な物理」と、「不確実性を持つ大規模モデル」という二つの側面がある
  - 物理を高詳細で追うcapability computing
  - データを有効活用するためのautomated modelingと、その限界を補うcapacity computing (不確実性モデリング)
  - HPCはこれら2つの側面に対して重要な役割を担っている
- ポスト京への期待
  - 地盤震動シミュレーションは京を使ってverifyできても、validationには足りない
  - ポスト京の計算能力を生かした多数シナリオの計算によるvalidationやstochastic simulationを行うことで、本当に役に立つツールとなることを期待