

## 地震・地盤・建屋解析モデリング&シミュレーションの現状と課題

市村 強<sup>1</sup>, 河合伸一<sup>2</sup> and 小林 敬<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所

〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

[ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp](mailto:ichimura@eri.u-tokyo.ac.jp)

<sup>2</sup> 防災科学技術研究所

〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

[kawai@bosai.go.jp](mailto:kawai@bosai.go.jp)

<sup>3</sup> 東京電力株式会社

〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 3 号

[koba.kei@tepcoco.jp](mailto:koba.kei@tepcoco.jp)

原子力発電所, 石油備蓄基地, 長大橋などの超重要構造物の地震時挙動を高精度かつ高分解能に予測することは防災の観点から重要と考えられる。構造物の地震時挙動には, 断層の破壊過程, 地殻内の波動伝播過程, 地表近傍の地震波増幅過程, 地盤と構造物の相互作用が大きな影響を与えるとされている。これらの影響を考慮し, 高精度かつ高分解能に構造物の地震時挙動を予測する方法のひとつとして, 断層から構造物までを含む断層-構造物系の三次元数値解析モデルを構築し, 一連の過程を一括して数値解析を行うことが考えられる。しかし, 対象となる領域が  $10^4 \sim 10^5 \times 10^4 \sim 10^5 \times 10^4 \sim 10^5$  (m) であり, 例えば 10 (Hz) までの周波数成分の精度を保证するように離散化した場合, 分解能が  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  (m) となるため, 数値解析モデルの自由度は  $10^{14} \sim 10^{15}$  ものオーダーとなる。さらに, 地盤や構造物の非線形性や構造物の破壊過程までを考慮するとさらに計算量が膨大となり, その実現は難しいとされている。一方で, 計算機環境の進歩に伴い, 断層から地表面までを対象とした地震動解析 (例えば[1,2]など) 及び超重要構造物や構造物及び地盤を対象とした高分解能構造解析 (例えば[3]など) が行われおり, これらを組み合わせることにより, 断層-構造物系を対象とした解析が出来る可能性がある。著者らは, 階層型解析によりこれらの解析を合理的に組み合わせ, 上記の問題の解決を図り, 断層-構造物系を対象とした解析を行っている[4]。本講演では, 階層型解析の概要, モデル生成の方法[5]などを述べるとともに, 階層型解析による断層-構造物系の解析例を示す[6]。最後に, 原子力発電所を対象とした地震・地盤・建屋解析モデリング&シミュレーションの現状と課題について述べる。

### ●参考文献

[1] 藤原広行, 河合伸一, 他, 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料第 336 号, 2009.

[2] 藤原広行, 河合伸一, 他, 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所第 337 号, 2009.

[3] Ogino M, Shioya R, Kawai H, Yoshimura S. Seismic Response Analysis of Nuclear Pressure Vessel Model with ADVENTURE System on the Earth Simulator. *Journal of the Earth Simulator* 2005; 2: 41-54.

[4] T. Ichimura, M. Hori, Structural Seismic Response Analysis Based on Multiscale Approach of Computing Fault-Structure System, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.38, pp 439-455, 2009 April, DOI: 10.1002/eqe.861.

[5] T. Ichimura, M. Hori, J. Bielak, A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography, *Geophysical Journal International*, Vol.177, pp 1221-1232, 2009 March, DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04154.x.

[6] T. Ichimura and M. Hori, Seismic Structural Response and Strong Ground Motion Simulation based on Multi-scale Analysis, 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 3-4, 2009.

# 地震・地盤・建屋解析モデリング & シミュレーションの現状と課題

市村 強(東京大学)

河合 伸一(防災科学技術研究所)

小林 敬(東京電力株式会社)

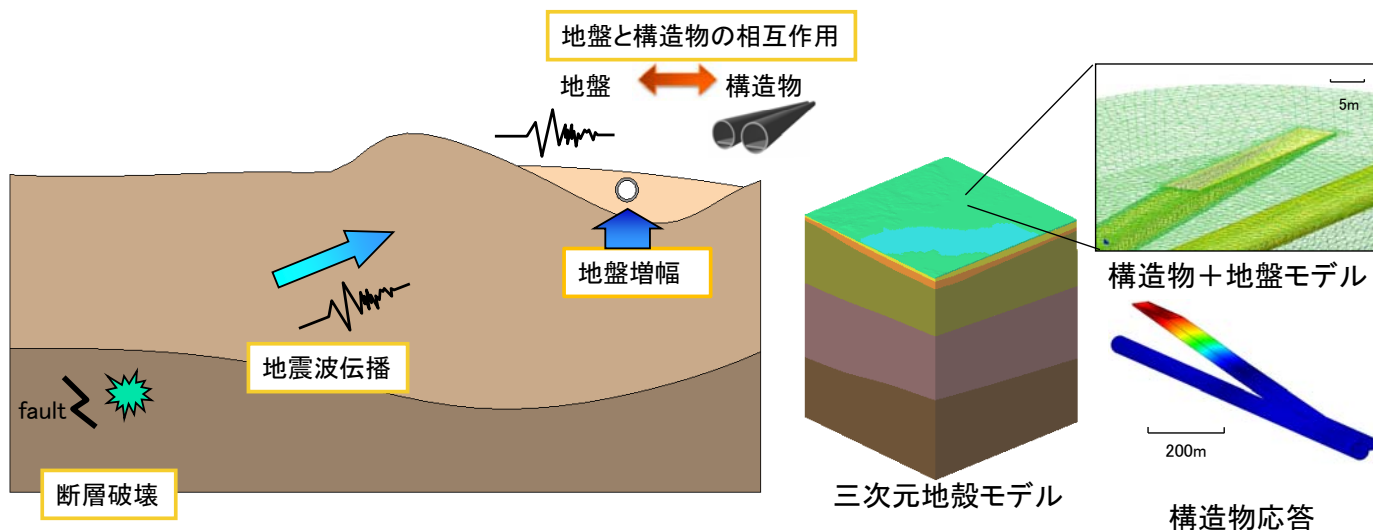
第21回CCSEワークショップ

第21回CCSEワークショップ

## はじめに

シナリオ地震断層から構造物までを考慮した高分解能被害予測

断層モデル, 三次元地殻・地盤構造, 構造物を含む断層-構造物統合三次元モデルを構築し, 大規模構造解析技術により解析.

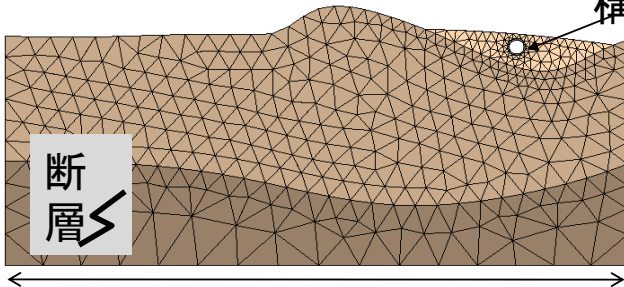


# 断層～構造系の数値解析での課題

## 断層～構造系の三次元数値解析モデル

対象周波数 10 Hz まで

構造設計変更のたびにこの計算を行う？



自由度のオーダー:

$10^{14} \sim 10^{15}$

対象領域: 10 ~ 100 km

分解能: 0.1 ~ 10 m

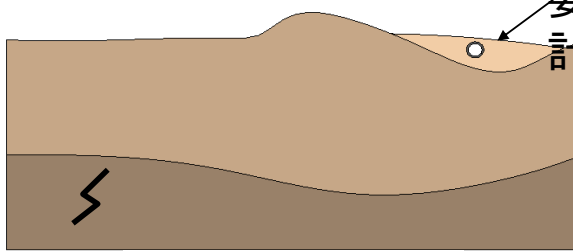
さらに...

非線形性や破壊過程などで計算量増加

計算量が膨大となる

## 階層型解析によるアプローチ

要素サイズ小:  
計算量増加の元凶



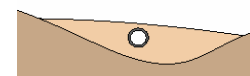
$$(c_{ijkl}u_{k,l})_{,i} - \rho\ddot{u}_j = 0.$$

直接解析

低分解能な解

高分解能な解

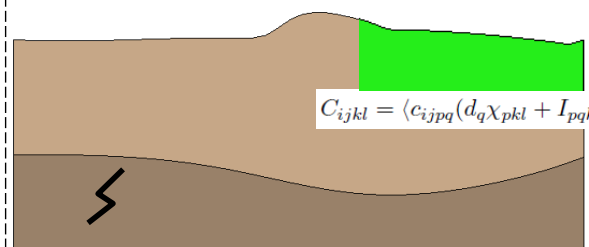
$$u_k \approx u_k^{(0)} + \epsilon u_k^{(1)}$$



$$d_i(c_{ijkl}(d_l u_k^{(1)} + D_l u_k^{(0)}) - \rho \ddot{u}_j^{(0)}) = 0,$$

ミクロ解析

+



$$C_{ijkl} = \langle c_{ijpq}(d_q X_{pkl} + I_{pqkl}) \rangle$$

$$D_i(C_{ijkl}D_l u_k^{(0)}) - R\ddot{u}_j^{(0)} = 0,$$

マクロ解析

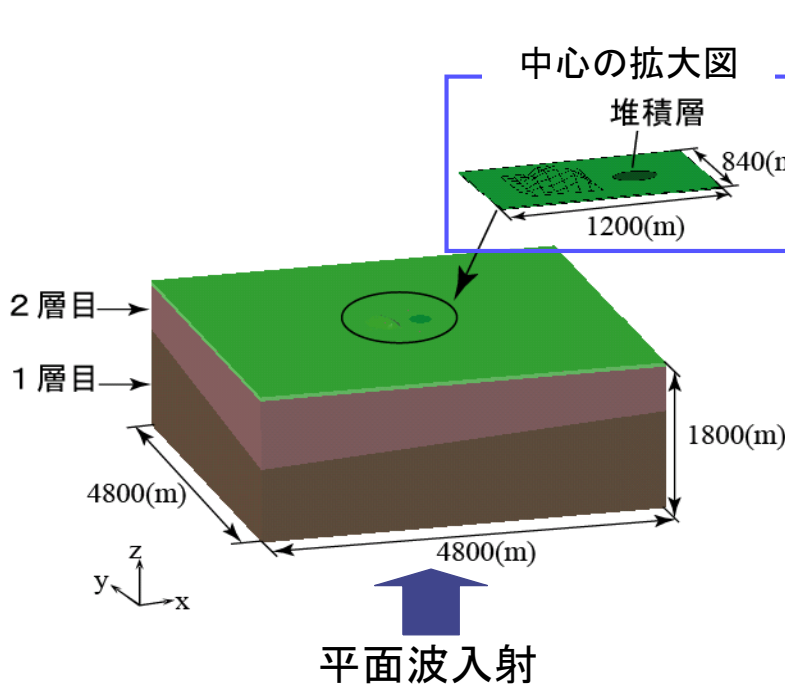
階層型解析

$c_{ijkl}$ : elastic tensor  
 $u_j$ : displacement function  
 $\rho$ : mass density  
 $(\cdot)$ : temporal differentiation  
 $(\cdot)_{,j}$ : partial differentiation  
 $X_i = \epsilon x_i$

$R$  is an apparent density described by  $\rho$   
 $D_i = \partial/\partial X_i, d_i = \partial/\partial x_i$

$\langle (\cdot) \rangle$  stands for the volume average of  $(\cdot)$

# 数値検証-波動場



支配方程式

$$(c_{ijkl}u_{k,l})_{,i} + \alpha \dot{u}_j + \rho \ddot{u}_j = 0$$

解析手法

有限要素法

入力波

JR鷹取駅で観測された三成分  
(東西, 南北, 上下方向)の波を  
深さ1800mまで引き戻したものを入射

地盤物性

	1層目	2層目	堆積層
縦波(m/sec)	1730	1000	200
横波(m/sec)	1000	600	100
密度(kg/m <sup>3</sup> )	1800	1800	1800

階層型解析と直接解析を比較

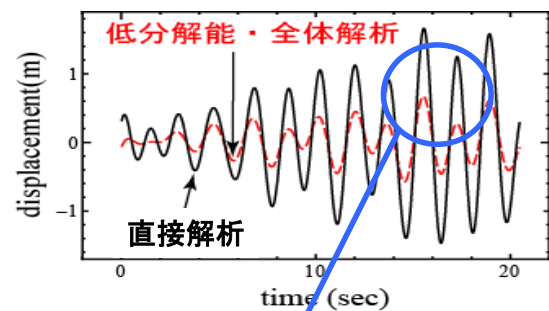
# マクロ解析の結果

地表面変位時刻歴応答(1200m×840m)



-0.77 0.84(m)

堆積層中の波形比較



このままでは一致しない

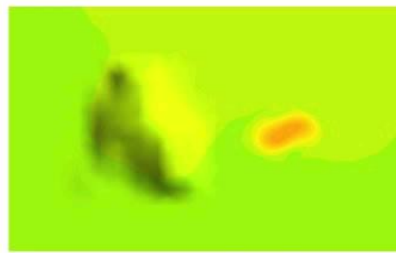
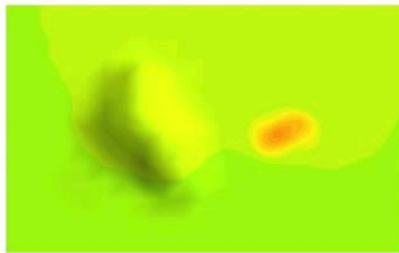
この解析で得られた地震動を  
高分解能な小領域に入射してマイクロ解析を行う

# 階層型解析と直接解析の比較

地表面変位時刻歴応答 (1200m × 840m)

階層型解析

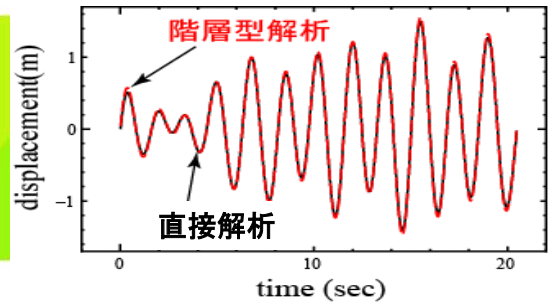
直接解析



-0.77 0.84(m)

-0.77 0.84(m)

堆積層中の波形比較

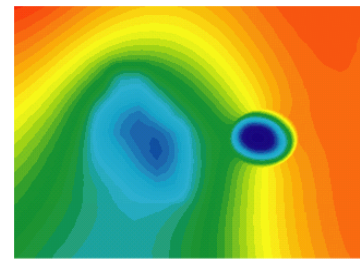
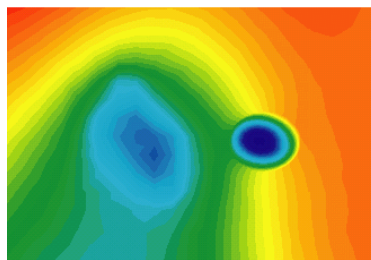


# 周波数成分分布での比較

変位フーリエ周波数×成分分布 (1200m × 840m)

階層型解析

直接解析



-390 -65.2

Fourier amplitude(cm)

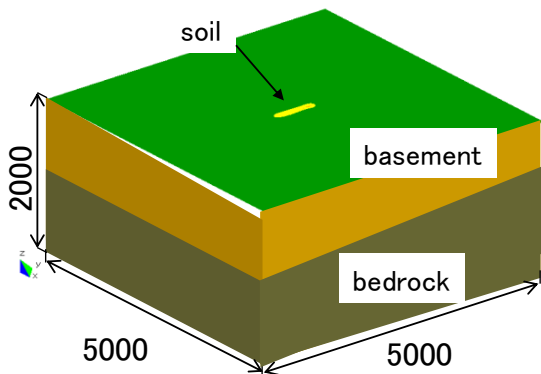
0.58Hz

-390 -65.2

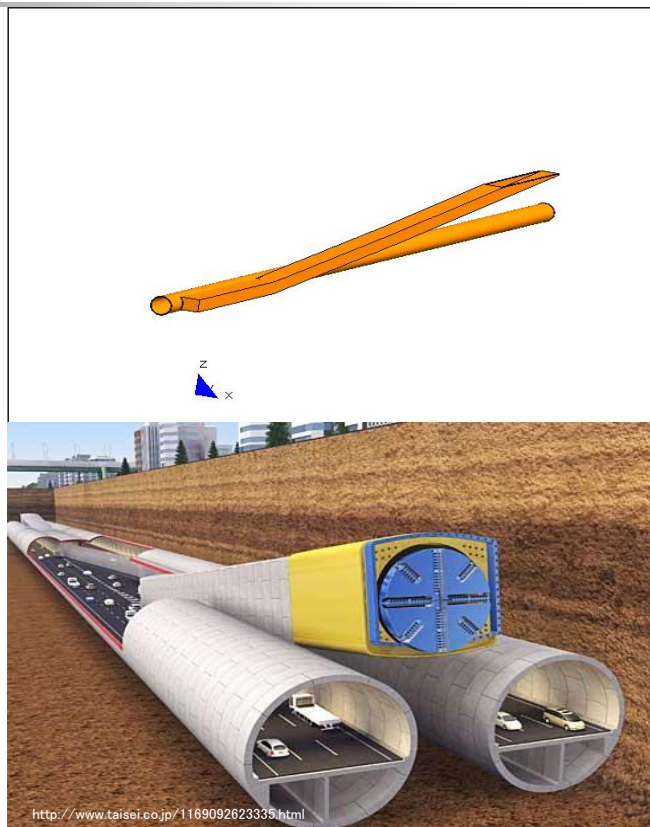
Fourier amplitude(cm)

0.58Hz

# 数値検証-構造物応答



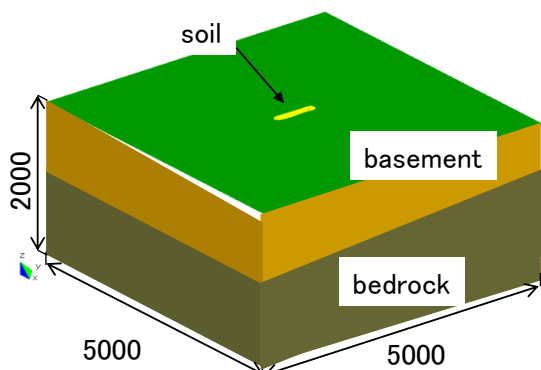
2Hzまで精度保証  
リッカー波を下面より平面波入射



# 階層型解析の適用

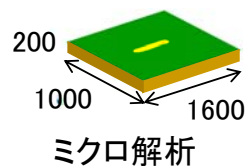
計算量膨大

直接解析



計算量軽減

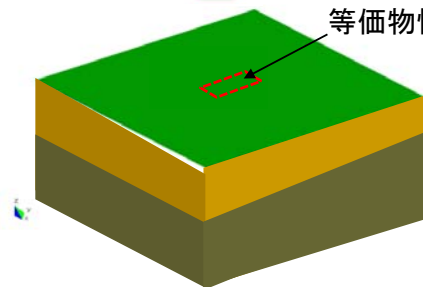
階層型解析



マイクロ解析



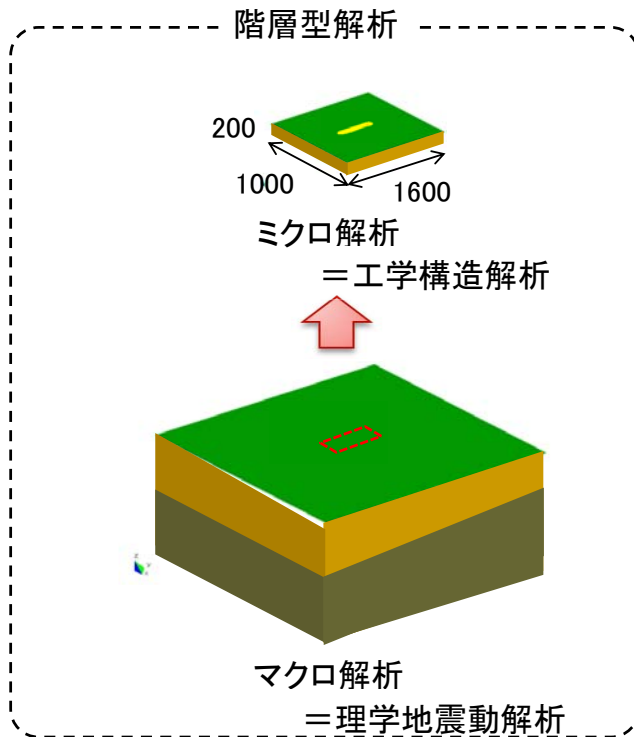
等価物性



マクロ解析

≡

# 階層型解析の利点



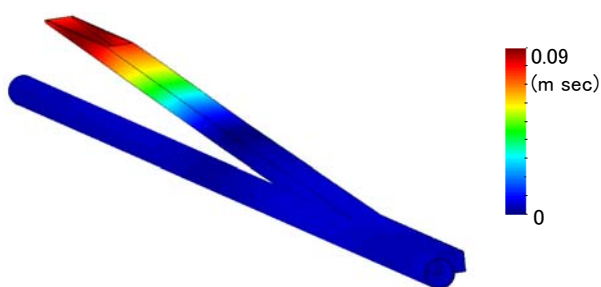
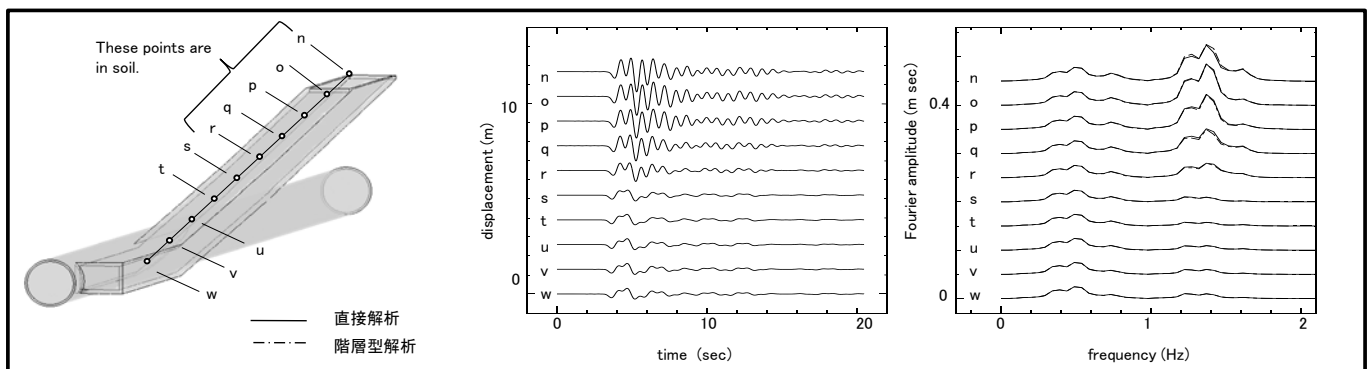
計算量軽減

もし構造物の設計変更が行われた場合、  
マイクロ解析のみをやり直せばOK

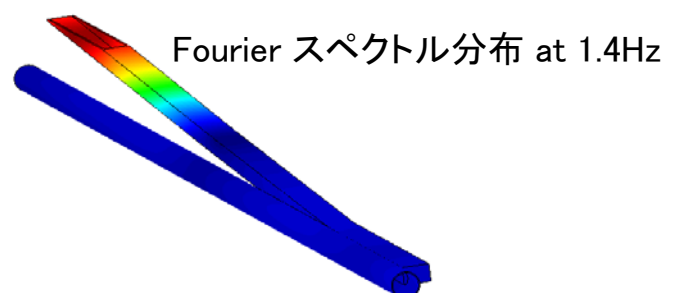
従来の工学構造解析と理学地震動解析  
を結びつけることが可能

など

# 数値検証



直接解析

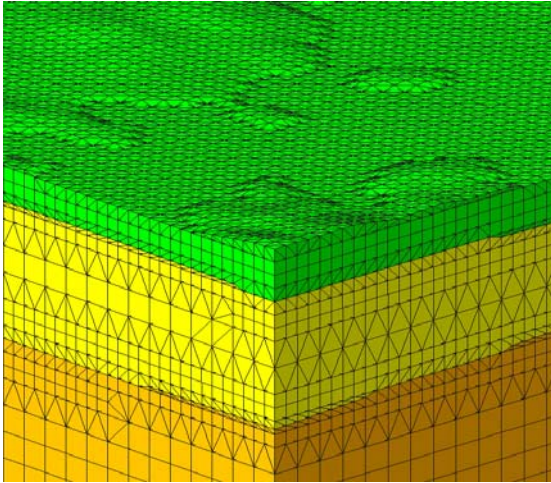


階層型解析



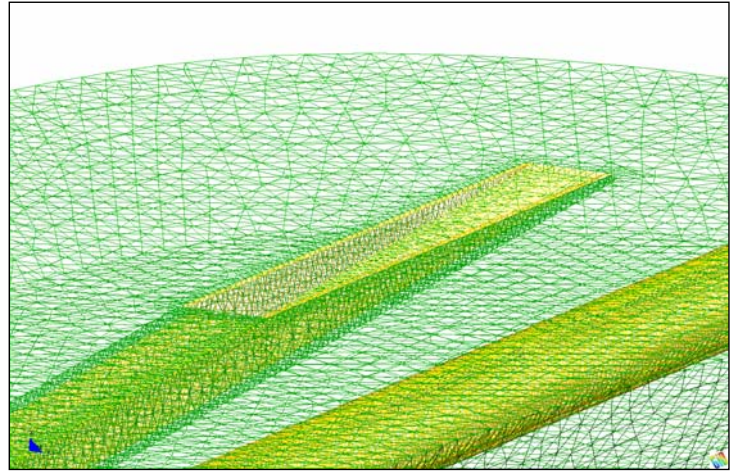
# 階層型解析用モデル構築

マクロ解析用地殻モデル



地層・表層地盤の形状を忠実にモデル化するハイブリッドメッシュの自動生成を開発中

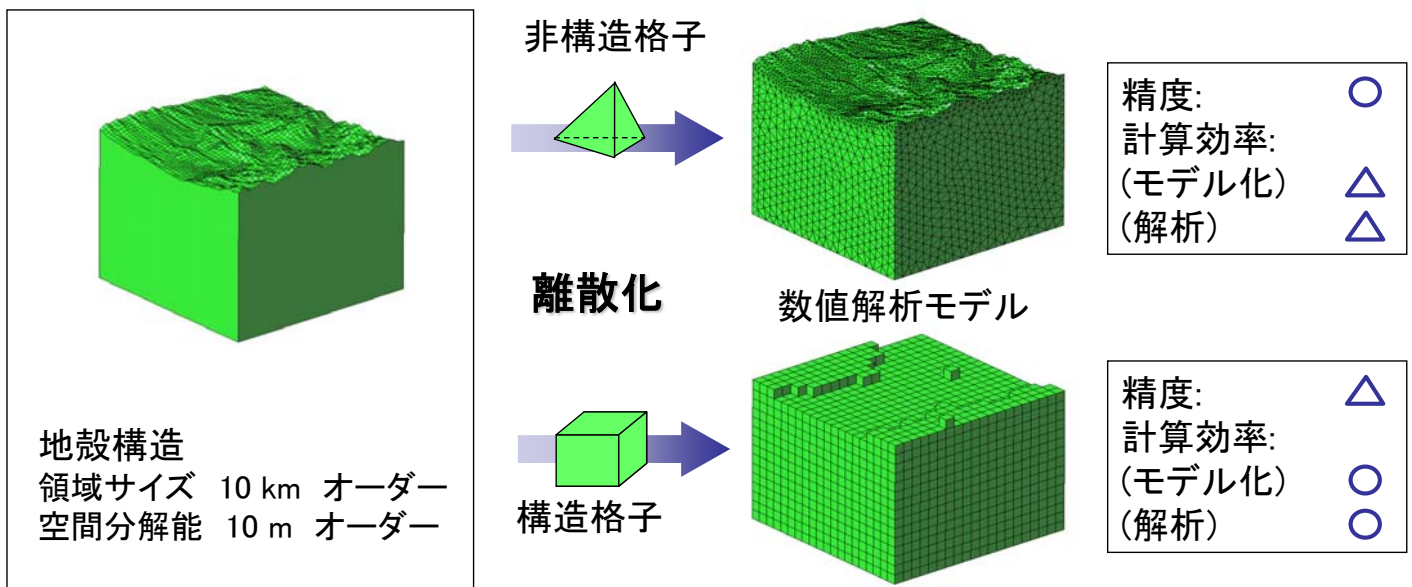
ミクロ解析用地盤-構造物モデル



CADデータを基に、構造物とそれを取り巻く地盤を詳細に表現するモデルの構築

# 地震動及び構造物地震時応答解析のための有限要素モデル構築について

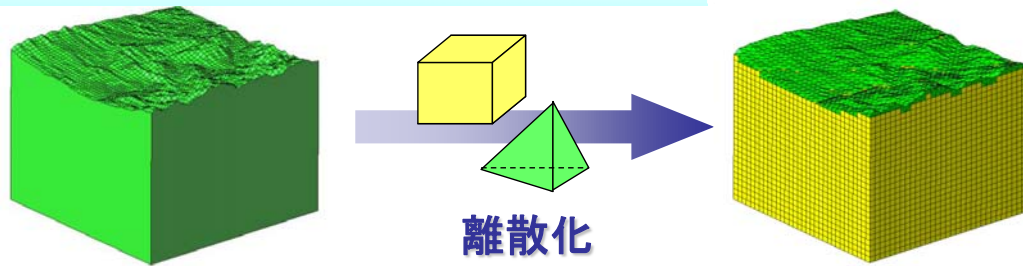
応力フリー条件 & 複雑な形状をもつ三次元地殻構造をモデル化し地震動を計算するには有限要素法が適しているが...





# 手法 (HyFEM: Hybrid FEM)

## 構造格子と非構造格子を組み合わせたFEM



精度:	<input type="radio"/>
計算効率:	<input type="radio"/>
(モデリング)	<input type="radio"/>
(解析)	<input type="radio"/>

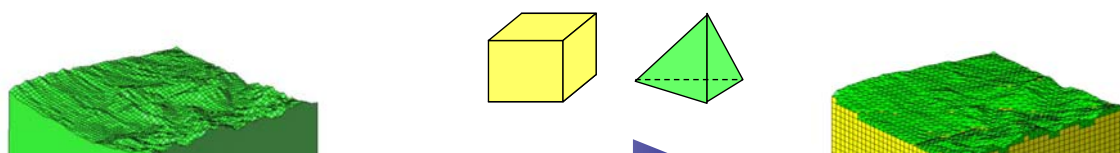
## マルチグリッド構造格子の導入

各地盤物性に応じた要素サイズで要素生成可能  
→不均質地盤のシミュレーションの効率化

## 解析用地盤構造モデル構築の完全自動化

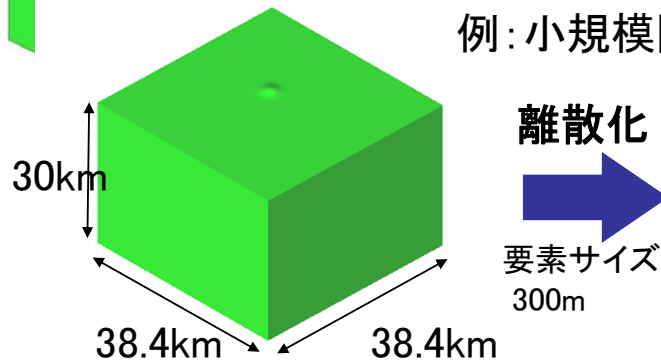
完全自動化したことにより、特別な工夫を必要とせず、誰にでも解析用モデル作成が可能  
効率的なアルゴリズムを用いているため、ロバストかつスピーディーなモデル作成が可能

# 構造格子・非構造格子を用いたハイブリッドモデリング



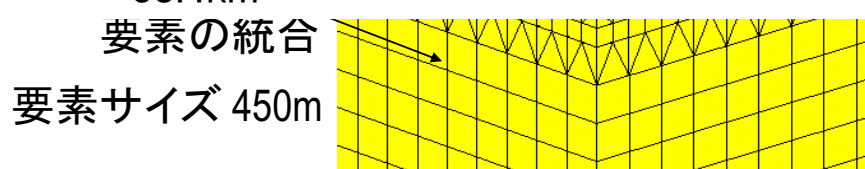
精度:

例: 小規模問題 (実際はもっと大きい問題が対象)



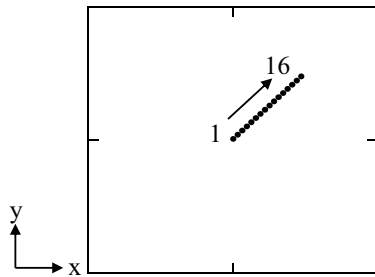
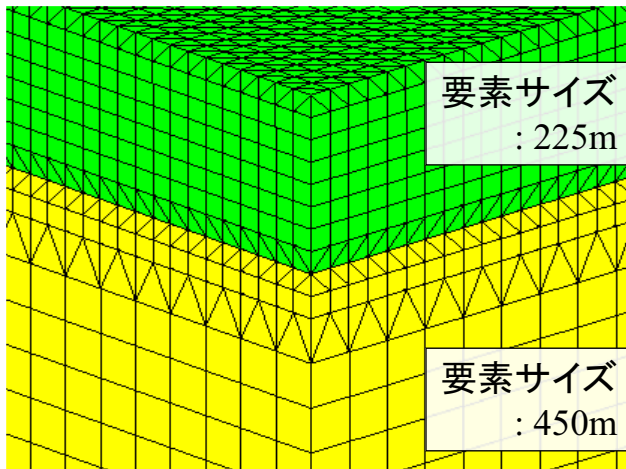
通常のFEM: 10 hours

本手法: 2.3 minutes



# 精度検証のためのモデル

## 生成されたメッシュ (拡大図)



### 材料物性

	Layer1	Layer2
Shear wave velocity (m/sec)	2250	4500
Pressure wave velocity (m/sec)	3900	7800
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2500	3000
Damping ratio (%)	1.25	0.72

### 支配方程式

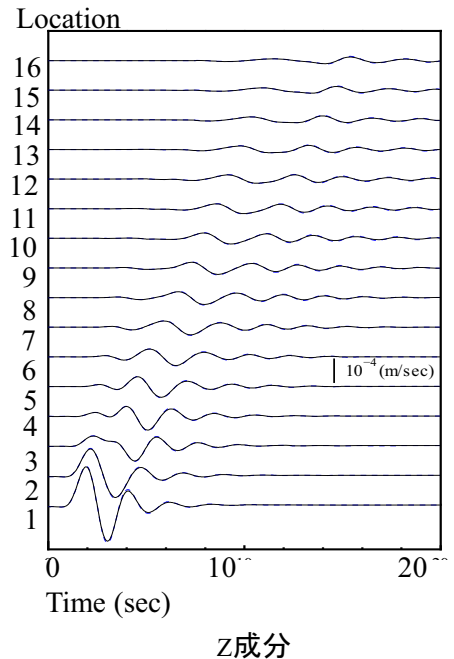
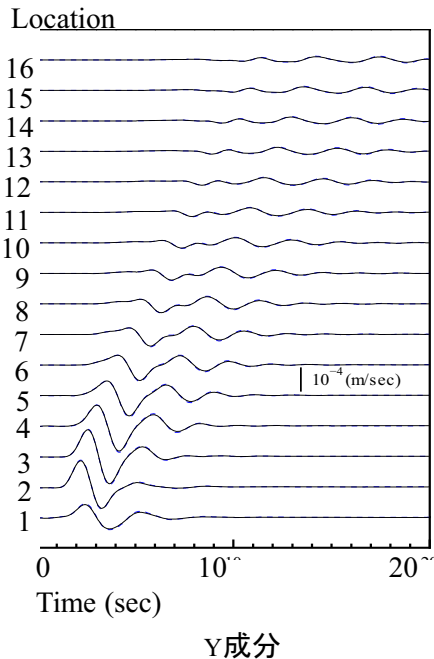
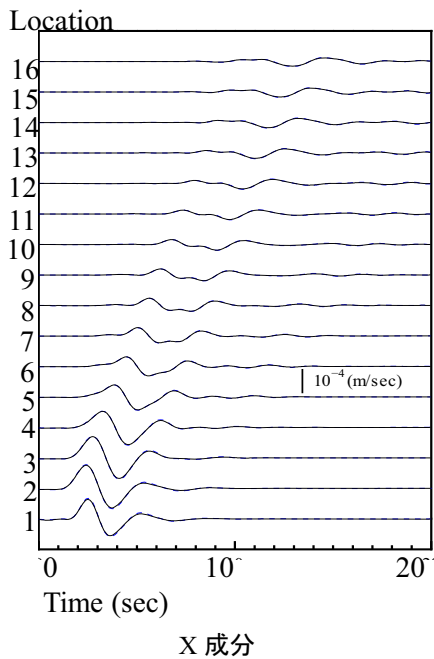
$$(c_{ijkl} u_{k,l})_{,i} + f_j = \rho \ddot{u}_j$$

$c_{ijkl}$  Heterogeneous elastic tensor   
  $u_i$  Displacement   
  $f_i$  External force   
  $\rho$  Density

第21回CCSEワークショップ

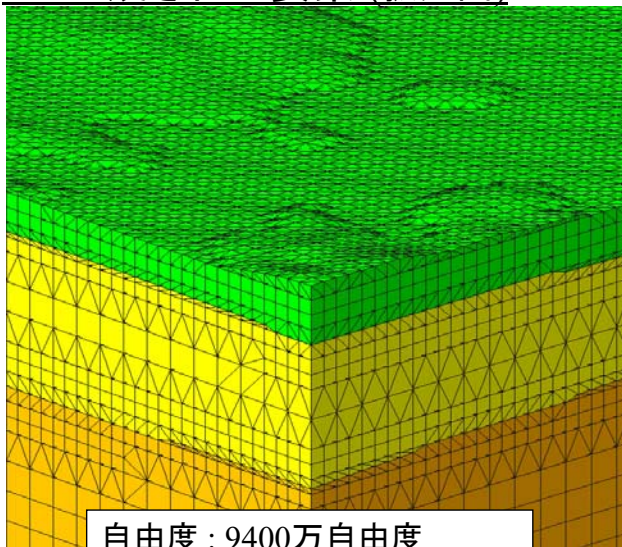
第21回CCSEワークショップ

## 手法の精度検証-速度波形による比較-



# 地震波動場数値解析例 問題設定

## 生成された要素 (拡大図)



自由度 : 9400万自由度  
 要素数 (非構造格子): 6100万  
 要素数 (構造格子): 2000万  
 8CPUによる並列計算  
 メモリ使用量: 7.2 GB  
 計算時間: 6時間 23分

## 地殻・地盤物性

層	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	減衰比 (%)
1	1850	500	1950	0.833
2	2560	1000	2150	0.333
3	3200	1700	2300	0.250
4	5800	3360	2700	0.100
5	6600	3700	2800	0.083
6	8040	4480	4400	0.062

## 支配方程式

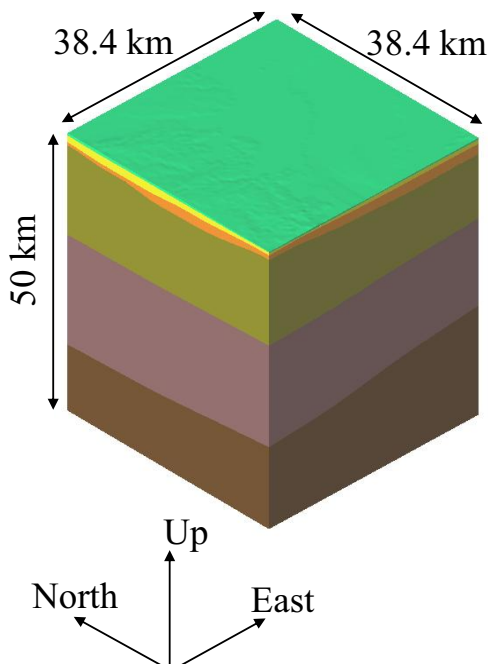
$$(c_{ijkl} u_{k,l})_{,i} + f_j = \rho \ddot{u}_j$$

$c_{ijkl}$  弾性テンソル     $u_i$  変位     $f_i$  外力     $\rho$  密度

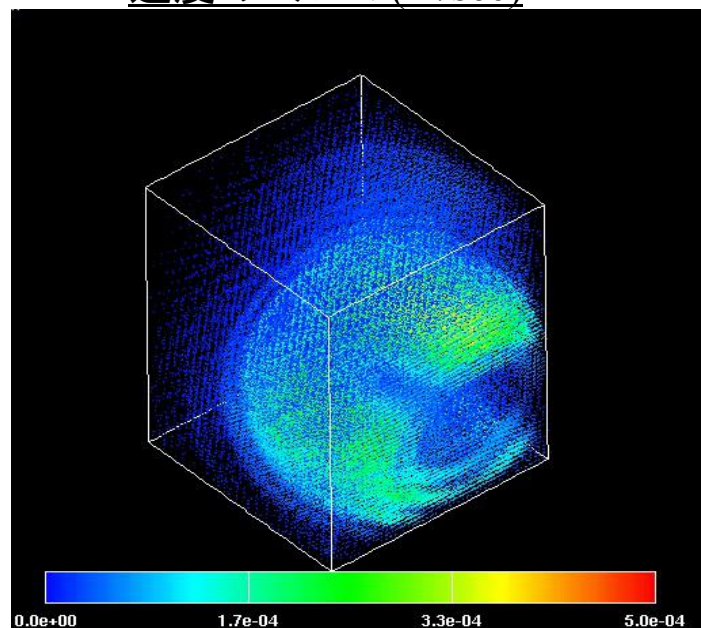
震源断層深さ: 29 km

# 地震波動場数値解析例 解析結果

## 対象モデル



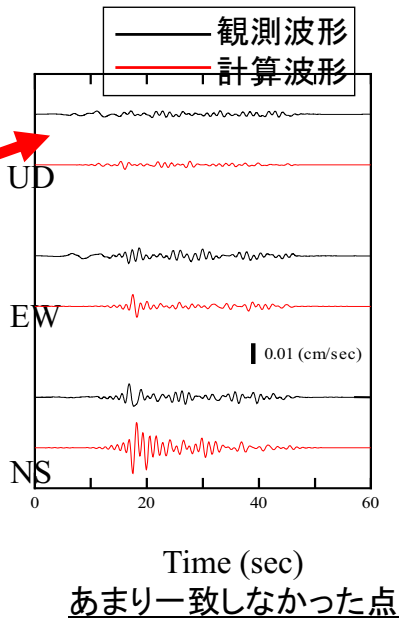
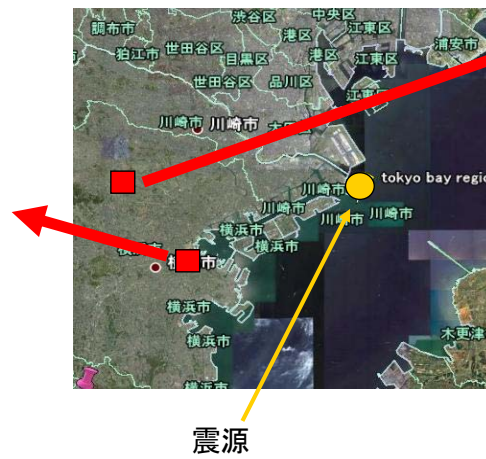
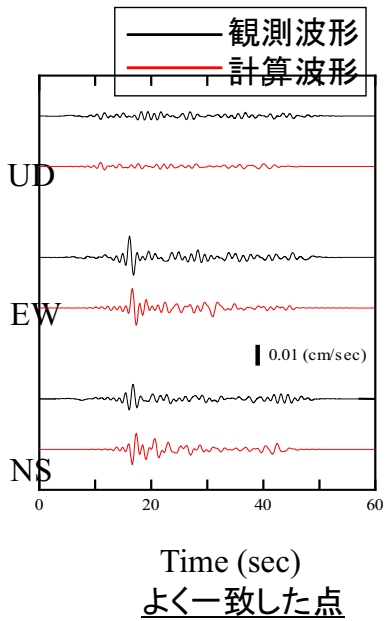
## 速度のノルム (m/sec)



8CPUによる並列計算  
 メモリ使用量: 22GB  
 解析時間: 13日 20時間



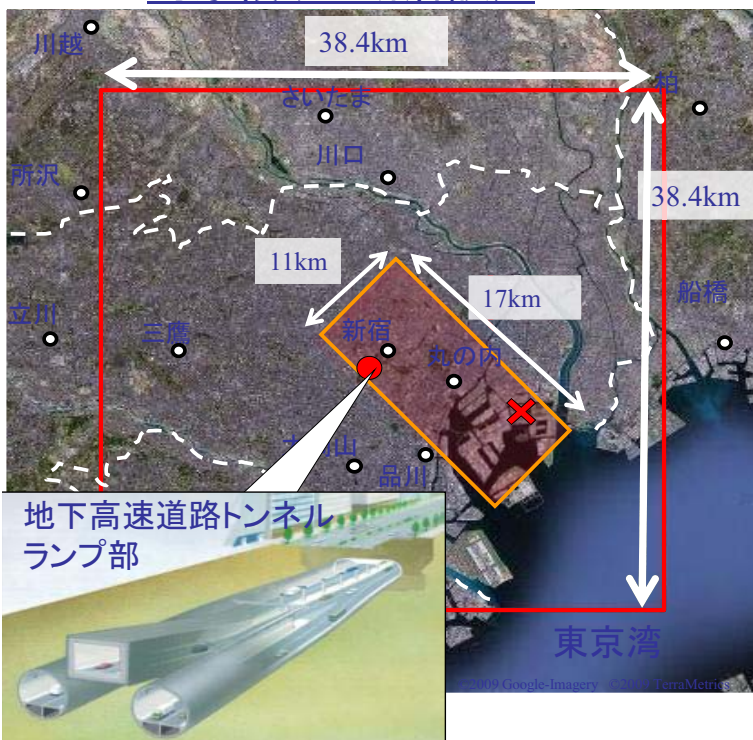
# 観測波形と計算波形の比較(速度波形)



## 適用例:

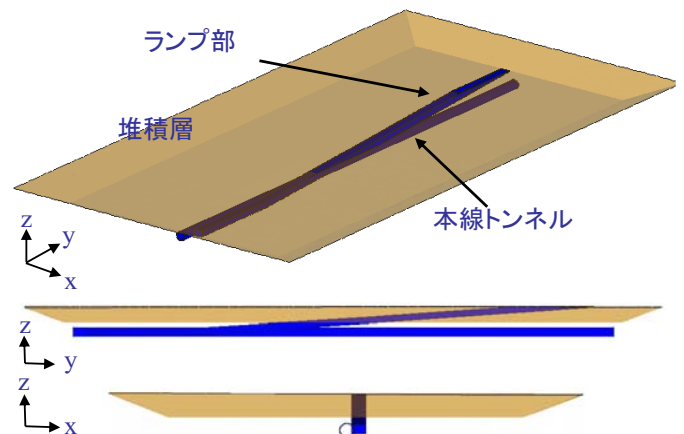
### シナリオ地震時の構造物の挙動想定

#### 対象領域と断層設定



- 対象領域
- 断層
- × 震央
- 対象構造物

#### 対象構造物



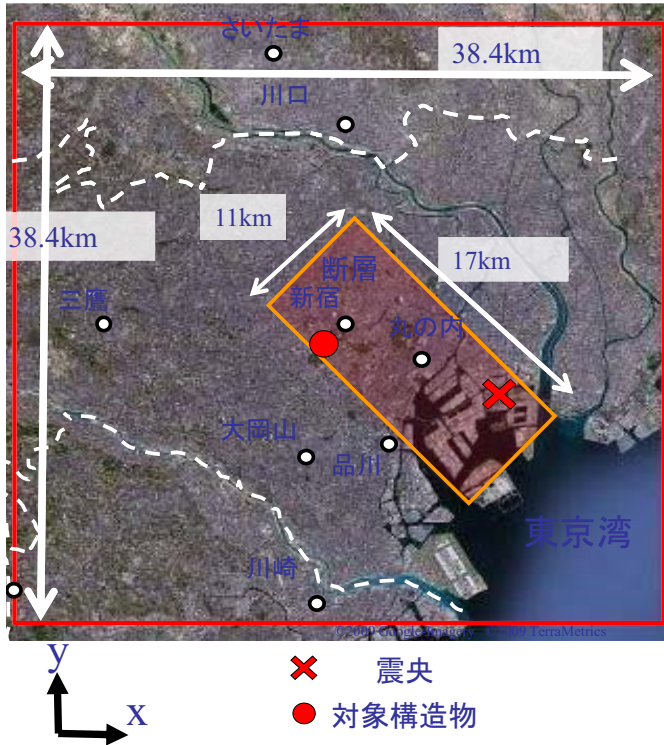
#### 物性

	縦波速度 (m/s)	せん断波速度 (m/s)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	Q 値
地盤	1850	500	1950	60
堆積層	300	100	1500	2.78
構造物	3375	2127	2500	100

# マクロ解析モデル・解析結果

地表面の速度応答

## 対象領域と断層設定



Filtered (0-0.1, 0.9-1.0)Hz

0 129.41(cm/s)



step\_206

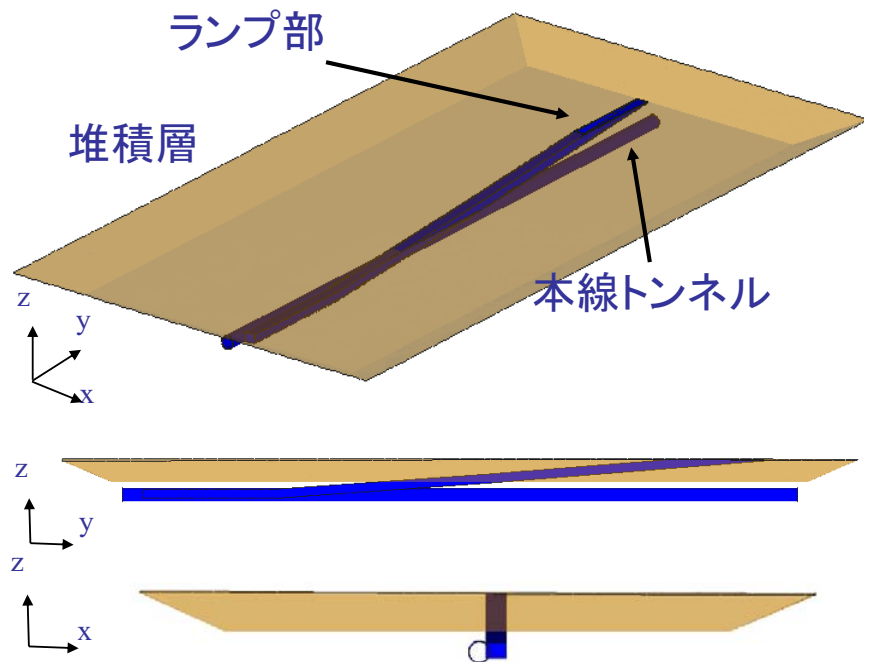
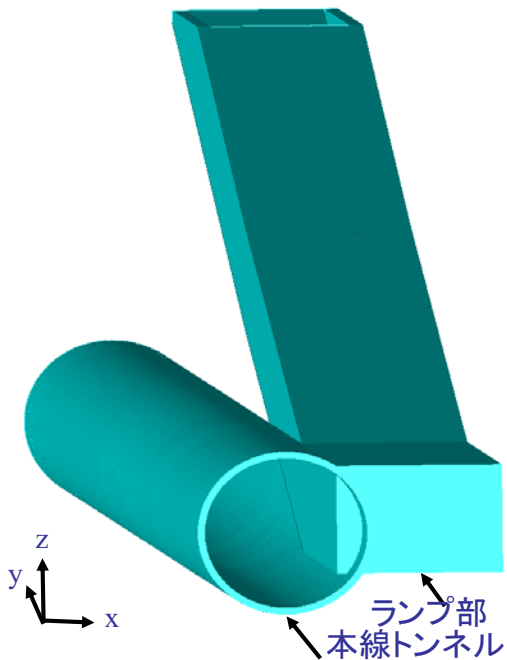
# 対象構造物の応答

## 対象構造物

構造物の変形

Filtered (0-0.1, 0.9-1.0)Hz  
変形 × 50

0 27.33(cm)

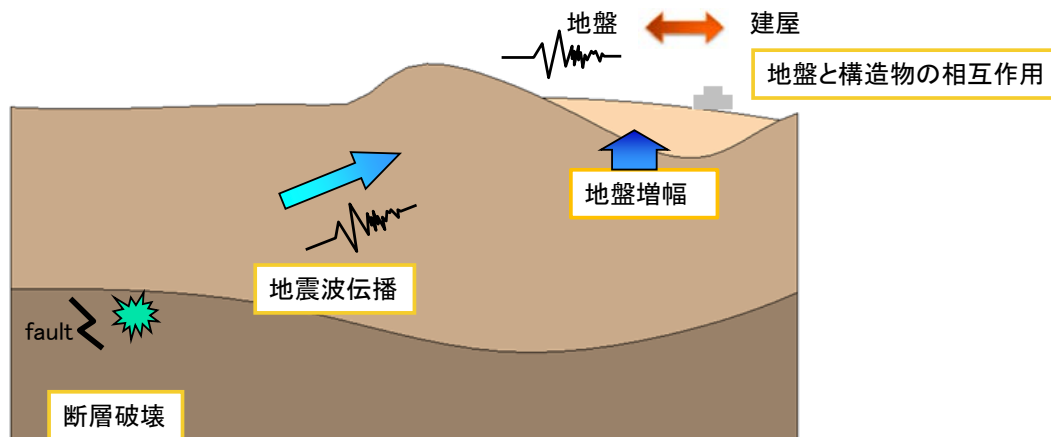




# 断層-建屋解析の モデリング & シミュレーションの現状

シナリオ地震断層から建屋までを考慮した  
高分解能被害予測の準備解析を実施

- ・中越地方の地殻構造モデル構築及び波動場解析
- ・水平二層構造での断層-建屋解析



## まとめ

- 断層-建屋解析を行うための階層型解析
  - 手法概要説明
  - 数値検証
  - 適用例
- 断層-建屋解析のための準備解析
  - 中越地方の地殻構造モデル構築及び波動場解析
  - 水平成層+建屋モデルを用いた試解析
- 今後の予定
  - 実地殻・地盤構造を用いた断層-建屋解析の実施
  - 非線形性の考慮など