

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

堀 宗朗  
東京大学地震研究所

## 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

堀 宗朗<sup>1</sup>, 市村 強<sup>2</sup> and 河合伸一<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  
[hori@eri.u-tokyo.ac.jp](mailto:hori@eri.u-tokyo.ac.jp)

<sup>2</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>3</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)

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, 膨大な計算負荷のため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, 計算の大規模化とともに数理・物理的検討を行い, 断層-構造系の解析を試みている. 具体的には, 階層型解析による地震動解析と構造解析の合理的な結合手法の提案[4,5], 数値解析モデル手法の構築[6], 数値分散を抑える有限要素の開発[7]などを行っている. 本講演では, これらの概要・適用例を示し, 最後に, 原子力発電所を対象とした地盤・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.
- [7] T. Ichimura, M. Hori and M. L. L. Wijerathne, Linear Finite Elements with Orthogonal Discontinuous Basis Functions for Explicit Earthquake Ground Motion Modeling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (in press) DOI: 10.1002/nme.3062.



# 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

---

堀 宗朗(東京大学)

市村 強(東京大学)

河合 伸一(防災科学技術研究所)

第22回CCSEワークショップ

第22回CCSEワークショップ



## 目次

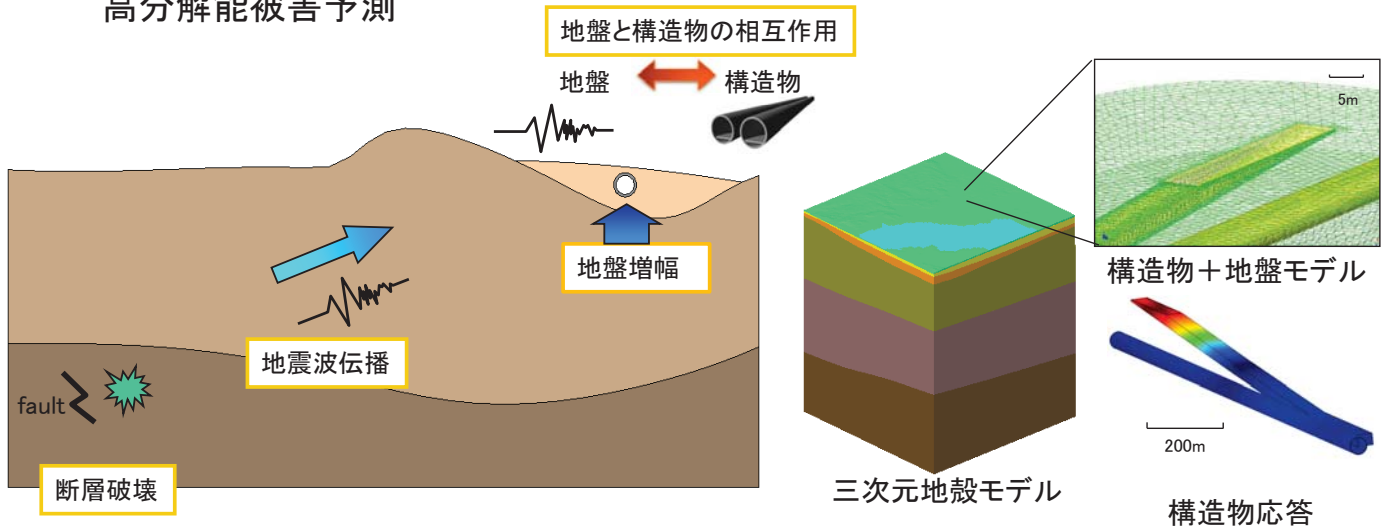
---

- はじめに
- 断層-建屋解析を行うための階層型解析
  - 手法概要説明
  - 適用例
- 断層-建屋解析のための準備解析
  - 仮想地殻構造モデル及び建屋モデルを用いた試解析
- 高精度波動場解析手法
  - 手法概要説明
  - 適用例
- まとめ

# はじめに

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，大規模波動場解析によりシミュレーション。

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

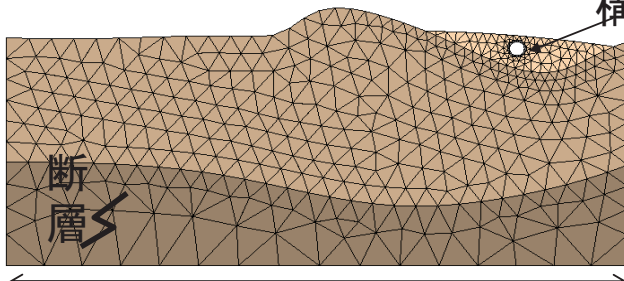


# 断層～構造系の数値解析での課題

## 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？



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

自由度のオーダー:

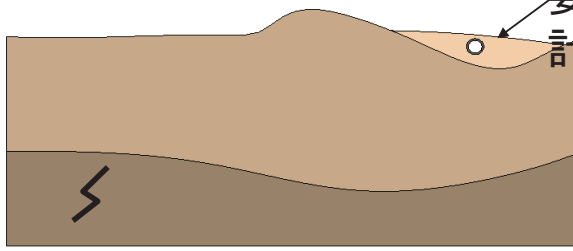
$10^{14} \sim 10^{15}$

計算量が膨大となる

計算の大規模化とともに数理・物理的検討を加え，解決を図る

# 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



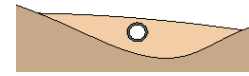
$$(c_{ijkl}u_{k,l})_{,i} - \rho\ddot{u}_j = 0.$$

直接解析

低分解能な解

高分解能な解

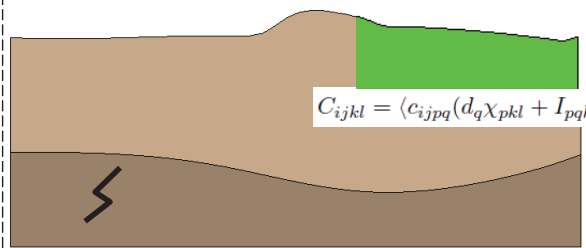
$$u_k \equiv u_k^{(0)} + \epsilon u_k^{(1)}$$



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

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

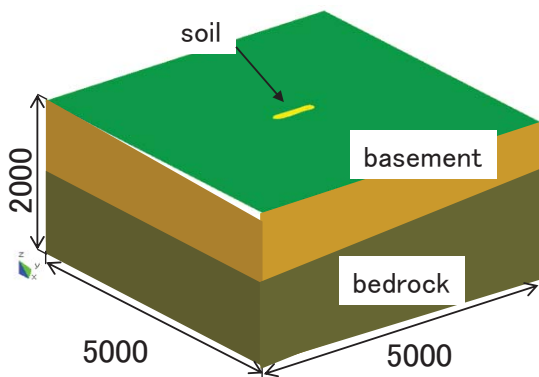
階層型解析

$c_{ijkl}$ : 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-構造物応答



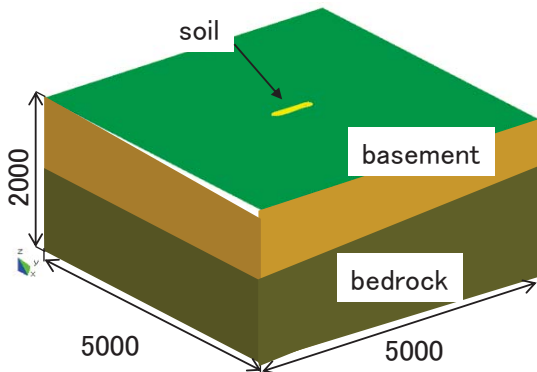
2Hzまで精度保証  
 リッカー波を下面より平面波入射



# 階層型解析の適用

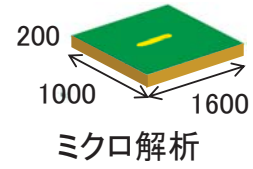
計算量膨大

直接解析



計算量軽減

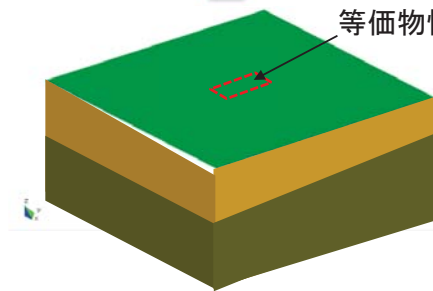
階層型解析



マイクロ解析



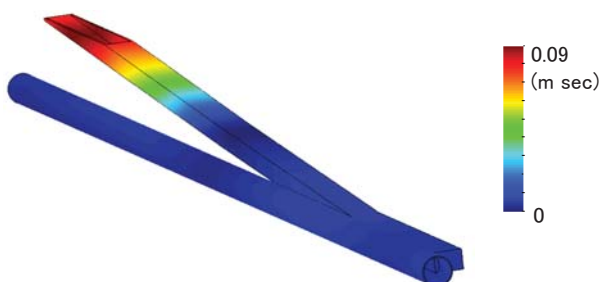
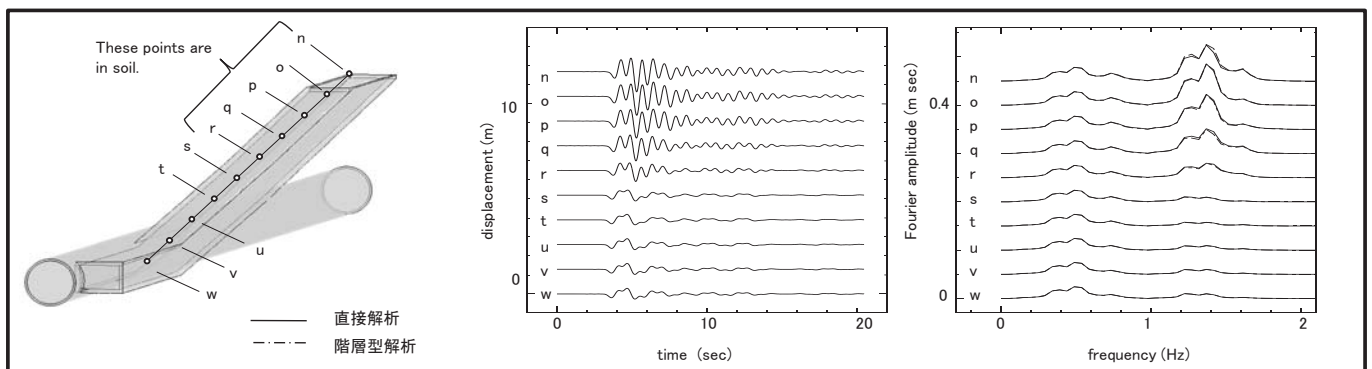
等価物性



マクロ解析



# 数値検証



直接解析

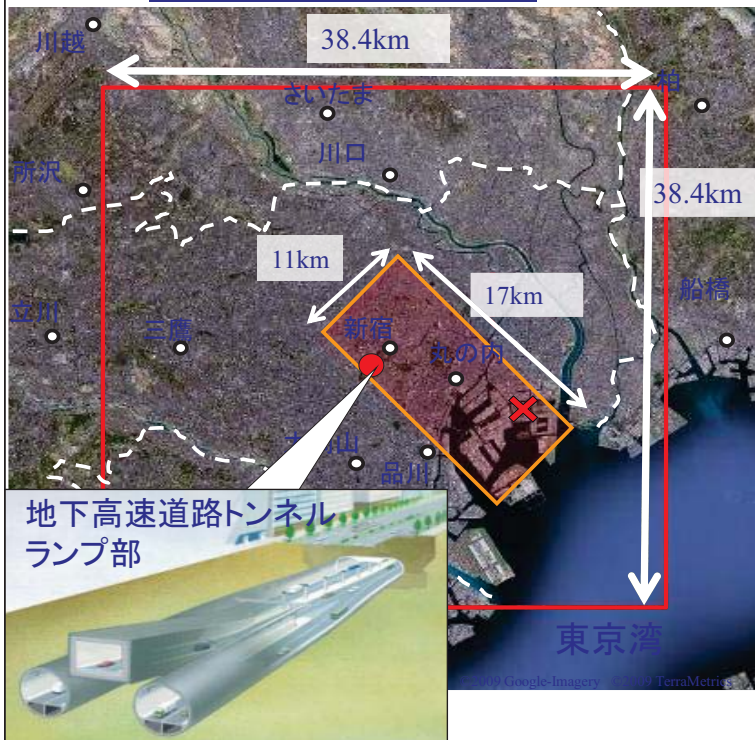


階層型解析

# 適用例:

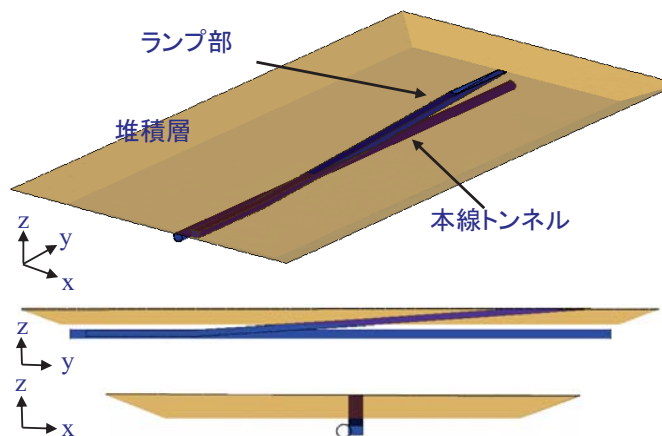
## シナリオ地震時の構造物の挙動想定

### 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

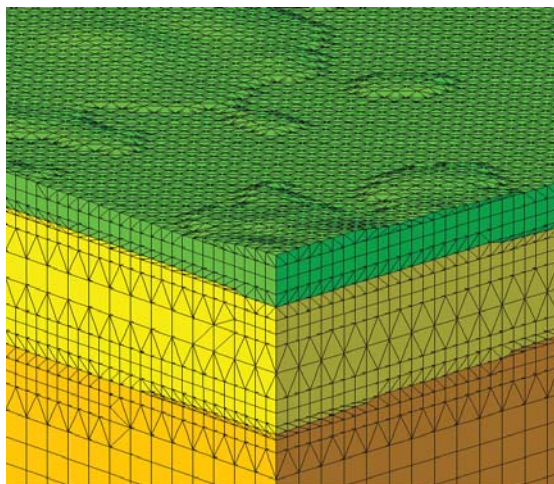


### 物性

	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

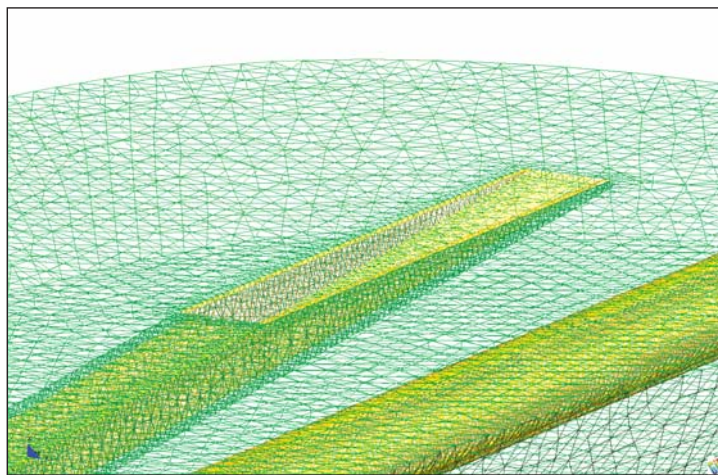
## 階層型解析用モデル構築

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

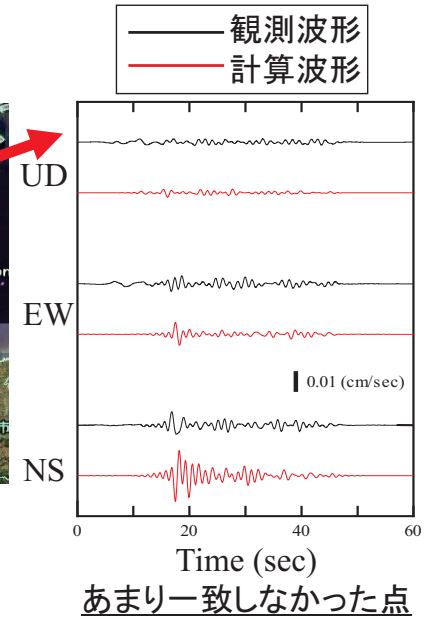
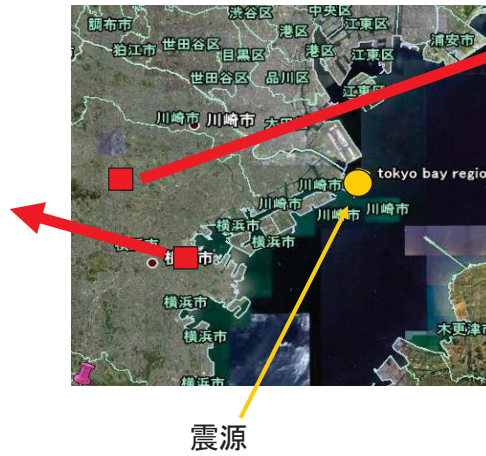
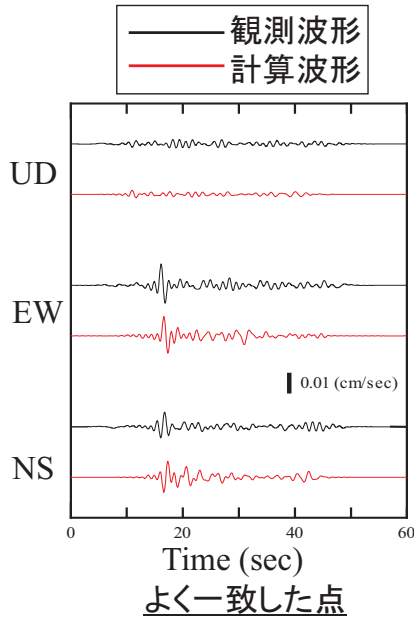
ミクロ解析用地盤-構造物モデル



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

# 小地震での観測波形と計算波形の比較

(速度波形)



## 対象地震

日時: 2005/6/1  
Mw: 3.8

震源位置: 35.5N, 139.8E  
震源深さ: 29 km

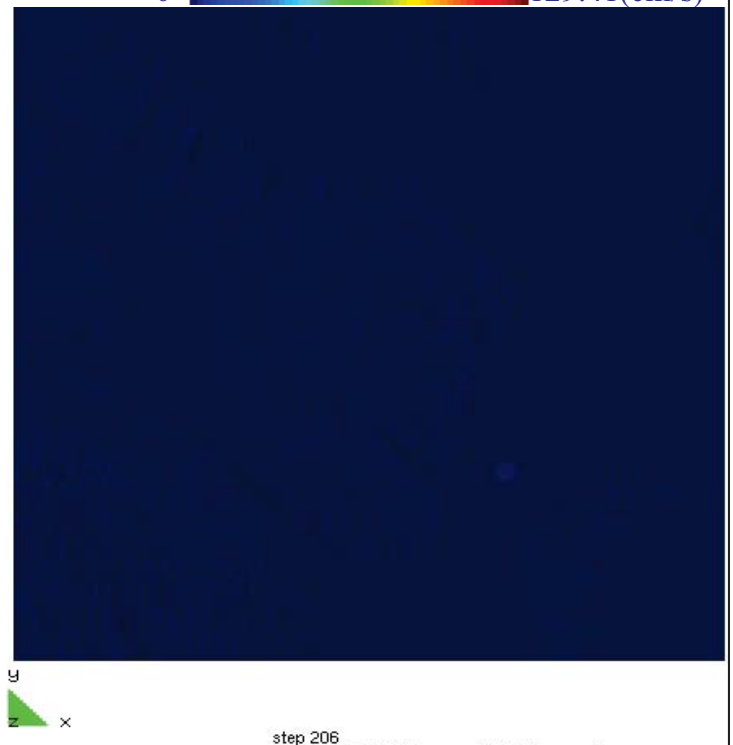
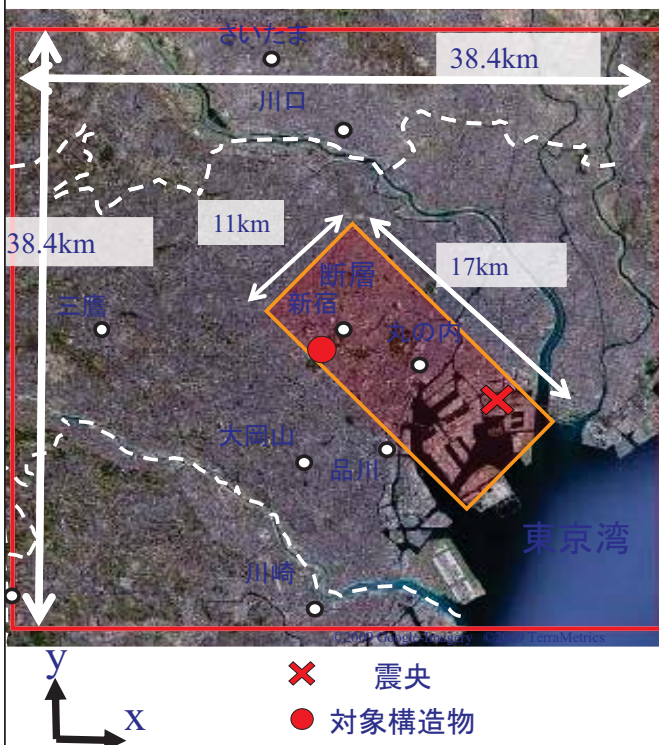
# マクロ解析モデル・解析結果

地表面の速度応答

Filtered (0-0.1, 0.9-1.0) Hz

0 129.41 (cm/s)

## 対象領域と断層設定



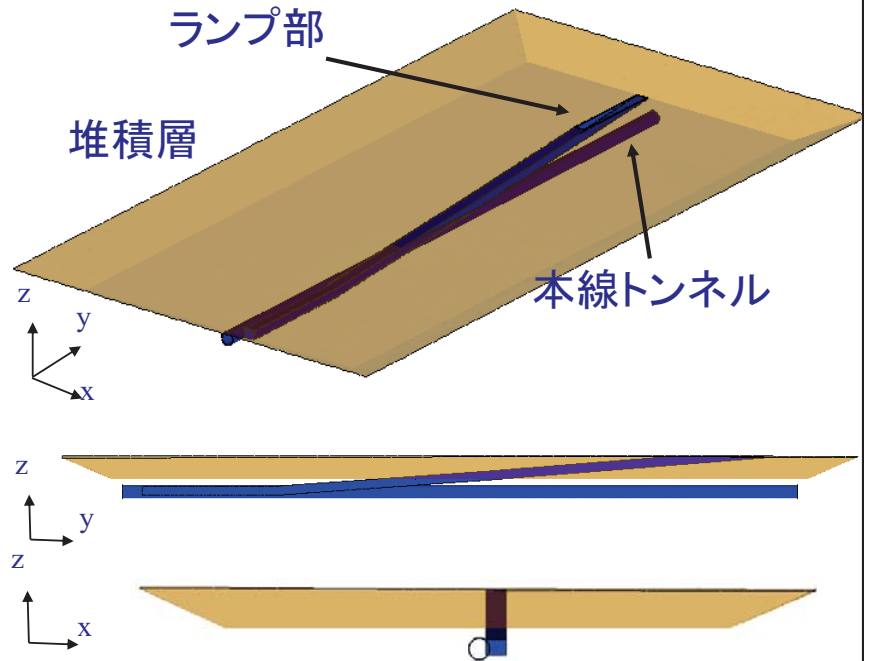
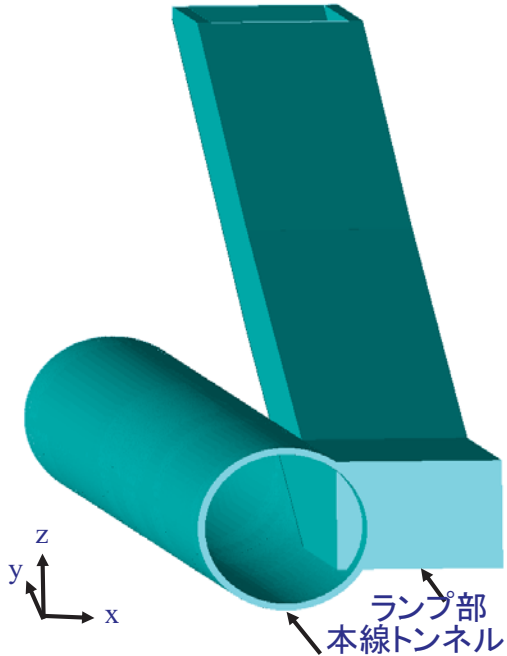
# 対象構造物の応答

## 対象構造物



構造物の変形

Filtered (0-0.1, 0.9-1.0)Hz  
変形 × 50

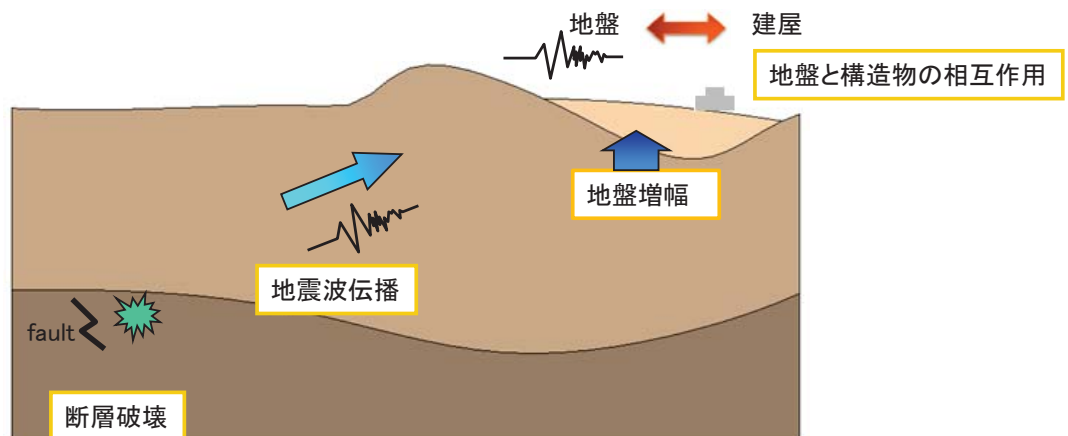


# 断層-建屋解析の モデリング & シミュレーションの現状

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

・仮想地殻構造モデル及び建屋モデルを用いた試解析

⇒ 数値分散を抑えた有限要素の必要性





## まとめ

---

### ■ 講演内容まとめ

- 断層-建屋解析を行うための階層型解析
- 断層-建屋解析のための準備解析
- 高精度波動場解析手法

### ■ 今後の予定

- より高周波数成分への拡張
- 精度検証(電卓の開発⇔現象との比較)
- シナリオ地震時の建屋挙動解析