都28-1-9-1

### 観測に基づく 都市の地震被害評価技術の開発

- ・地震動・地震応答の大規模数値解析手法の開発
  - 表層地盤と構造物の都市モデルを構築し、大規模数値 解析によって地震動と構造物地震応答を計算
  - •入力はMeSO-net等で観測したデータ
  - サブプロジェクト②との連携(地震被害評価)
- •大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発
  - 三次元視とマルチスケールが可能な可視化
  - •応急評価に使えるよう高速処理
  - サブプロジェクト③との連携(可視化技術)

# H28年度の計画

#### ◆地震動・地震応答の大規模数値解析法の開発

- MeSO-net観測データのシステム化
- 社会基盤構造物の拡張
- ●地震被害評価技術の信頼度の検証
- ◆大規模数値解析結果の先端可視化技術の開発
  - ●地震被害の可視化の実用性の確認
  - ●サブプロジェクト③との連携(火災被害)

MeSO-netデータの利用

高空間分解能な観測網を活かした,地表面の任意の 地点における地震動分布の推定



- •これまでの成果
  - データ駆動型地震動イメージング手法の開発 Group lasso (~0.1Hz) レプリカ交換モンテカルロ法(~1Hz)

 ・震源同定の自動化の試行

#### •H28年度:システム化

• 地震動イメージングモデュールの開発



#### ⇒構造物の応答解析の入力地震動 (数値解析の入力データ)



![](_page_4_Picture_0.jpeg)

### **GROUP LASSO**

◆データ駆動型イメージング手法の開発 <sub>DC~0.1 Hz</sub>

・Group lasso / クリギング

◆物理モデル(波動方程式・地下構造・ 震源パラメータ)の導入による データ同化を用いた 地震動イメージング手法の開発

・レプリカ交換モンテカルロ法

![](_page_4_Picture_6.jpeg)

![](_page_4_Figure_7.jpeg)

![](_page_4_Figure_8.jpeg)

![](_page_4_Figure_9.jpeg)

![](_page_4_Figure_10.jpeg)

# レプリカ交換モンテカルロ法

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

<u>(\*)cf. メトロポリス法</u>

- 1. ある初期状態 x を適当に定める
- 2. 提案分布 q(x'|x)に従って候補x'を決める
- 3. *r* = *p*(*x*') / *p*(*x*)を計算し、確率min(1,*r*)で*x*'を採用する
- 4.2-3を繰り返し、サンプリングする

### 震央位置の不確定性:MeSO-netへの適用

・2012.3.16 埼玉県南部 Mjma 5.3 <u>震央の事後分布</u>

![](_page_6_Figure_2.jpeg)

▶ 3層+半無限構造、震源深さ を仮定し、震央を2次元サーチ ▶ 周期帯:5~10秒 テ 震央の事前分布: 平均を気象庁震源 標準偏差を10km 観測波形を説明する震央の 候補は一定の拡がりを持つ 400000

log(p(m|d))

Kano et al. in prep.

![](_page_7_Figure_0.jpeg)

関東平野で卓越する長周期地震動のイメージングが可能

### H28年度 地震動イメージングモジュール開発

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

![](_page_9_Picture_0.jpeg)

◆震源位置・メカニズムを様々に変化させた理論波形の データベースをあらかじめ構築しておくことで、データ同 化による震源情報のオンライン自動推定が可能になる

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

◆MeSO-netで検証を行い、気象庁やNIEDの地震計ネットワークに適用・実運用へ

# 大規模自由度系へのデータ同化

連続場の数値計算 **計算が大規模化** Navier-Stokes方程式, Phase-fieldモデル,...

![](_page_10_Picture_2.jpeg)

V. Springel (2009)

![](_page_10_Picture_4.jpeg)

T. Shimokawabe et al. (2011)

逐次ベイズフィルタによるデータ同化 ・ カルマンフィルタ ・ アンサンブルカルマンフィルタ etc.. N:自由度 必要な記憶領域 ~  $O(N^2)$   $N \sim 10^9$  倍実数で ~ 10EB = 10<sup>4</sup> PB cf. 京コンピュータ フルノード 1.26PB 現実的に不可能

大自由度系に対するデータ同化手法の開発が必須

テストモデル  

$$\tau \frac{\partial \phi}{\partial t} = \epsilon^2 \bigtriangleup \phi + \phi (1 - \phi) \left( \phi - \frac{1}{2} + m \right) \quad |m| < \frac{1}{2}$$

$$\tau, \epsilon, m \text{ は 2 時空間 で - 定値とする.} \quad \text{R. Kobayashi (1993)}$$

$$\texttt{状態}\phi \textbf{Emetizetas.}$$

$$\texttt{Kisotherwise} \texttt{for the time of time of the time of ti$$

1000e 200e 100e 100e10

 $\Delta t = 0.1\tau \ \Delta x = \epsilon$ 

# 大規模データ同化のための 革新的4次元変分法の開発

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

# 大規模データ同化のための 革新的4次元変分法の開発

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

 $H^{-1}$ を陽に求めずに, k 番目の対角成分を抽出したい.  $\rightarrow b_i = \delta_{i,k}$  として Hr = b を解けばいい.

![](_page_12_Figure_3.jpeg)

Adjoint法による誤差評価アルゴリズム

1. Adjoint 法 によって *.T* を最小化し. 最適推定値を求める. 勾配法: LBFGS法

2. 2nd-order adjoint 法+反復法で Hr = bを解いて, 反復法: CR法 推定値誤差を求める.

#### **Remark** !

- 1. O(N<sup>2</sup>)の配列を一切用いていない。
- 2. 問題の質によって勾配法や反復法を選べる.

→ O(K)の計算量で誤差評価まで実行可. K:時系列の計算量

大規模自由度系に対する、現状唯一無二の状態誤差推定法

## 4次元ハイブリッドデータ同化による 地殻活動・地震活動予測システムの構築

◆陸域・海域観測と、列島規模の大規模数値計算を 統合したデータ同化システムを構築し、地殻活動・ 地震活動の予測へ

![](_page_13_Figure_2.jpeg)

![](_page_14_Picture_0.jpeg)

地盤・構造物の都市モデルに対する大規模数値解析 を利用した地震被害評価技術

![](_page_14_Picture_2.jpeg)

- •これまでの成果
  - •建築建物のモデルの高度化
  - •建築建物の被害評価の検証
  - •社会基盤施設(橋梁)の地震被害評価の開発
  - •構造物簡易モニタリングの提案
- ●H28年度
  - 地震被害評価技術の検証(宮城県大崎市古川地区)
  - •社会基盤施設(ライフライン)の地震被害評価の開発
  - •構造物簡易モニタリングの試行

# 社会基盤施設のモデル自動構築

Ν

Yellow – Google Earth

Red – Filtered data for high way

Selected highway part

Tunnel

- 橋脚・橋桁・基礎構造物から構成
- CAD (Computer Aided Design)とGIS (Geographic Information System)のデータ

# MODEL COMPARISSON

Solid Element Model

- Element type linear tetrahedron
- No. of Nodes 21,663,728
- No. of elements 118,663,328

Frame Element Model

- Element type Timoshenko beam
- No. of Nodes 16,710
- No. of elements 16,698

![](_page_16_Figure_9.jpeg)

1<sup>st</sup> modal shape in longitudinal direction

# **PIPELINE MODELING**

• Seismic response of pipeline is induced by ground strain rather than ground acceleration 3D ground modeling and ground motion analysis are essential

> Pipe Soi

• Hierarchical modeling is essential for a pipeline network in an urban area Utilization of meta-modeling theory Set of consistent models of different fidelity

![](_page_17_Figure_3.jpeg)

# **PIPELINE MODELING**

#### Soil Layer

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

#### Pipeline

1.46 km

### EXAMPLE

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Damage probability density distribution after simulating with 25 earthquakes

### EXAMPLE

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

### 地震被害推定の幅

#### - 評価点数の影響(変数1次元の場合)-

#### ■IESを利用した応答推定精度の確認

<解析条件>

![](_page_21_Picture_4.jpeg)

- ・対象地区 :新宿区四ツ谷
- ·建物総数 : 7348棟(換算層数1~37層)
- 入力地震動: El Centro波,地表面-50m入力
   (地表面max. 337~710cm/s<sup>2</sup>)
- 計算方法 :時刻歴応答解析(平均加速度法)

![](_page_21_Figure_9.jpeg)

図:建物モデル·層剛性モデル

- ・建物モデル:多質点せん断モデル
   (建物形状から設定)
- ・剛性モデル:完全バイリニア
- 粘性減衰:Rayleigh減衰
   (1,2次モード減衰定数:2~3%)

### 点推定とその推定精度

- 評価点数の影響(変数1次元の場合)-

結論

- 3点推定の場合、1次(平均)の推定精度は良好であるが、2次(分散)の精度は必ずしも良くない
- パラメータの変動係数が推定精度を低下させる効果の定量的評価
- •評価点の増加が推定精度を向上させる効果の定量的評価

![](_page_22_Figure_6.jpeg)

(点推定の推定値)≦(モンテカルロ法の推定値±10%)となる建物割合

### 簡易モデルの適用性検討

- 剛性モデルの比較例 --

■モデル設定について(SRC建物)

<一般的な設定>

- ・モデル種別 Tri-linear型, Bi-linear型
- ・降伏耐力  $P_y \Rightarrow \mathbf{C} \cdot \mathbf{Ai} \cdot \mathbf{W}$
- ・弾性固有周期 *T* ≒ (0.015~0.02)×建物高
- Tri-linear 2次剛性  $k_{t2} \approx 0.2 \sim 0.3 k_{t1}$
- Tri-linearひび割れ耐力 $P_c = 1/3P_v$

![](_page_23_Figure_9.jpeg)

スケルトンカーブの比較 地震時応答レベルの比較

<設計値に基づく剛性モデルの例※>

![](_page_23_Figure_12.jpeg)

### 大崎市古川地区

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

1325棟の被災建物判定結果

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

#### <u>\*後藤らによる研究</u> (SGC61-P05) Goto et.al.'s study

高密度余震観測および高密度
 微動観測(※)に基づく地盤構
 造同定

※ 余震観測 36点単点微動観測 529点微動アレー観測 3箇所

仮定 2層目Vs=250m/s 3層目Vs=400m/s

1層目Vs・1~3層目深さ

#### Velocity : Low 1<sup>st</sup>+2<sup>nd</sup> layers : Thick

![](_page_25_Figure_7.jpeg)

### 地震被害推定:地盤・構造

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

### 木造建築建物モデル

#### 骨格曲線

#### 床面積あたりの重量

#### 概要

・建築基準法における
 壁倍率・必要壁量の変遷,
 許容変形角の変遷等を反映

屋根		日安
重い	軽い	石王
147 kgf/m <sup>2</sup>	108 kgf/m <sup>2</sup>	170 kgf/m²

![](_page_27_Figure_6.jpeg)

設定したスケルトンカーブ

### 木造建築建物モデル

履歴曲線

木造モデルに考慮すべき特徴

- 繰り返し時のスリップ挙動
- 験最大荷重直前の急激な 荷重上昇
- 最大荷重以降の劣化
- ※かつ複雑でないモデル

バイリニア+スリップモデル

![](_page_28_Figure_8.jpeg)

### 地震被害推定技術の検証の試行

#### 最大層間変形角・平屋の場合

![](_page_29_Figure_2.jpeg)

建物の建築年代の設定→最大層間変形角の推定に大きく影響

建築年代が不明な場合は精度の高い被害推定は難しい

### 地震被害推定技術の検証の試行

#### <u>実被害との照合・平屋の場合</u>

![](_page_30_Figure_2.jpeg)

·X

![](_page_30_Figure_3.jpeg)

古い木造建物の全壊が多いエリア 〇1959年基準相当モデル結果に整合 新しい建物が多く被害が少ないエリア Δ2000年基準相当モデルでもθmax1/100超

![](_page_31_Picture_0.jpeg)

![](_page_31_Picture_1.jpeg)

#### 🔷 今後,慣性航法を導入して, 2軸振動実験へ

![](_page_31_Picture_3.jpeg)

![](_page_31_Figure_4.jpeg)

![](_page_31_Figure_5.jpeg)

1軸振動実験の様子

計測された角速度

推定された傾斜角

## 損傷判定度の指標化の試み

計測できるもの:加速度,角速度

⇒ 損傷と強い層間をもつ指標を開発したい!

方法の一例)

地震動(気象庁HPより)または種地震を基に地震動を大量生産

4 F

構造モデルへ入力(例えばMSSモデル)

<del>い</del>

弾性応答/弾塑性応答の角速度,加速度波形

▶ Deep Learning などの機械学習

![](_page_32_Picture_10.jpeg)

※ 災害時のシミュレーションによる学習データの増産とDeep Learning はセットです!

### 破壊音計測実験

そもそもMEMSセンサで計測するのは100Hzまでの加速度/角速度で良いのか?

⇒ 部材が破壊されるときの衝撃は、もっと高周波のはず!

部材破壊実験を行い,騒音計と振動計で10kHzまでを計測する.そして,部材の破壊音を 計測するための条件を把握する.

![](_page_33_Picture_4.jpeg)

騒音計(高周波加速度も同期して計測できる)

都28-1-9-2

## 大規模数値解析結果の 先端可視化技術の開発

#### 研究目的

地震被害評価は大規模数値解析の計算結果に基づく が、これには膨大な量の計算結果を効果的に可視化す ることが必須となる.3次元視とマルチスケールが可能 な可視化を開発するとともに、応急評価に使えるよう高 速処理も併せて実現する.

- H24 都市モデルの構築
- H25 都市地震被害の可視化
- H26 構造物モデルの高度化
- H27 都市地震被害の可視化の高度化
- H28 都市地震被害の可視化の有効性の検証

#### 平成27年度までの成果

都市モデルの構築:

地理情報システムのデータを利用し、地盤と構造の都市モデル を構築した。この際、東京23区全体を対象とした200万戸以上 の構造物一棟一棟(土木構造物を含む)をモデル化した。

先端可視化技術の開発: 東京23区全体を対象とした200万戸以上の構造物の時系列変 位データ(数万時間ステップ)をリアルタイムでアニメーション表 示した.高速,3次元,マルチスケールによる都市地震応答の 先端可視化技術を開発した.

様々な被害データの可視化: 構造物の時系列変位データの可視化のみならず, 地震被害の 可視化および火災被害の可視化も実現した.

![](_page_36_Picture_0.jpeg)

![](_page_36_Picture_1.jpeg)

既存の可視化システム (異なるデータの表示には切り替えが必要)

### 平成28年度の計画

大規模数値解析法によって得られた様々な都市地震被害 データを、3次元視とマルチスケールで、かつ、マルチスク リーンで可視化し、先端可視化技術の有効性を検証する。

地震被害の可視化のみならず、サブプロジェクト③において 得られた<mark>火災被害の解析結果の可視化が自動化できるよう、</mark> 可視化技術の共有化を図る。

平成28年度の計画

#### 表示端末1(東京23区全体)

![](_page_38_Figure_3.jpeg)

操作端末(1台) 表示端末(複数台) 開発する可視化システム

![](_page_38_Picture_5.jpeg)

表示端末2(特定の街区)

![](_page_38_Picture_7.jpeg)

他のデータへの

切り替えも可

![](_page_38_Picture_8.jpeg)