



## 4-1 強震動予測手法と地下構造モデルに関する調査研究

首都直下地震プロジェクト20年度第2回運営委員会資料

瀬瀬一起・三宅弘恵・引間和人

東大地震研

1

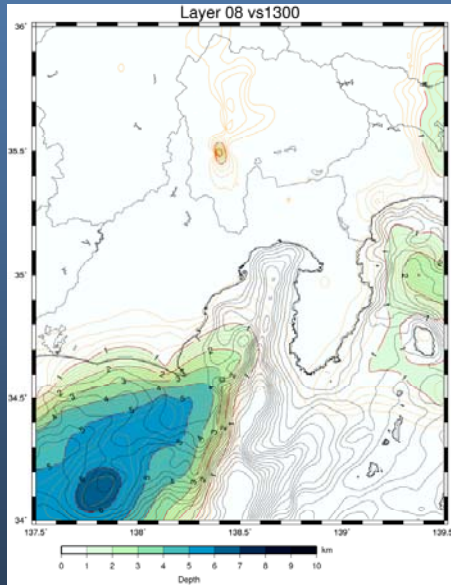
## 平成20年度の成果

- 前年度業務で改良した差分格子化方法を使った長周期地震動計算シミュレーション波形と観測波形との比較により、首都圏およびその周辺の地下構造モデルの改良を行った。
- 改良した地下構造モデルを使い、想定東海地震・東南海地震を対象とした長周期地震動予測地図を作成した。
- レイリー波成分を使った速度構造推定法(HZ法)を改良し、水平成層モデルへの拡張を行うとともに、地震観測記録へも適応可能であることを確認した。これらに関東平野の速度構造モデル構築に適用した。
- 歴史地震の震度データに基づく震源モデル化に着手し、1855年安政江戸地震を例にして解析手法について検討した。

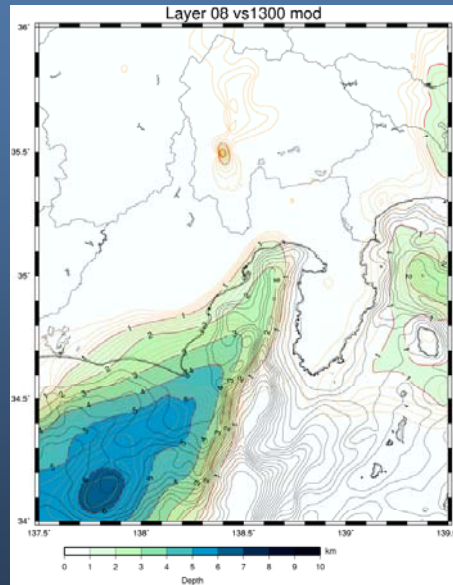
2

# 1. 長周期地震動予測による地下構造モデルの検証 および 長周期地震動予測地図の作製

- 東海・東南海地震から首都圏への伝播経路にあたる伊豆・駿河湾周辺の地下構造モデルの改良を行った



改良前(駿河湾の改良無しの改良一次モデル)

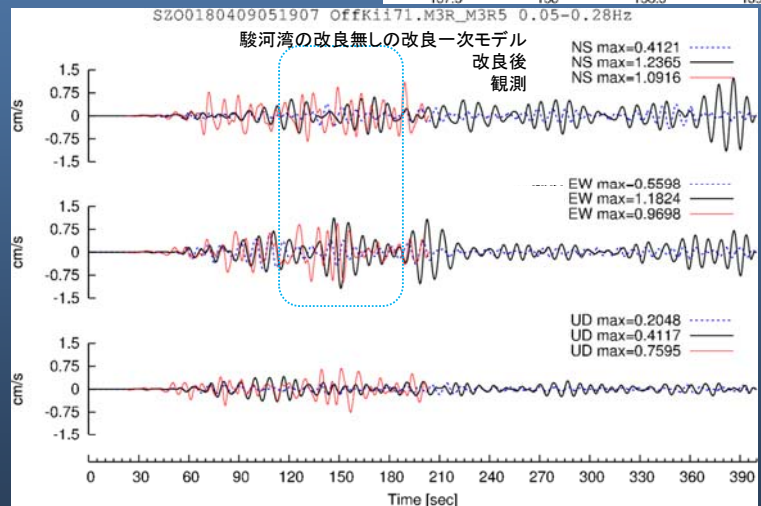
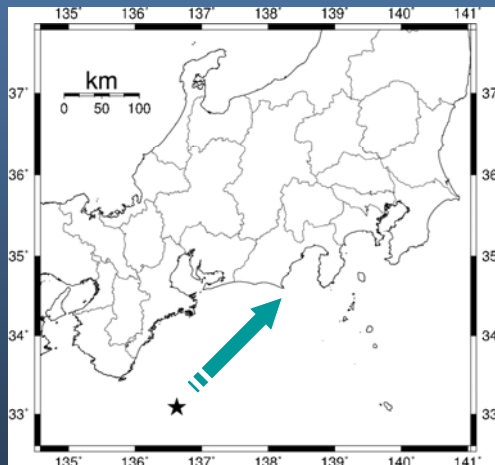
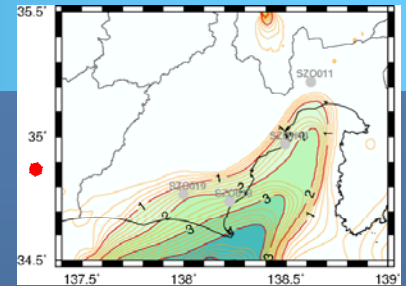


改良後

付加体 ( $V_s 1.0 \text{ km/s}$ ) 下面の深度

## 改良の効果 波形による検証例

- 紀伊半島沖の地震の前震
- SZO018(榛原)での波形

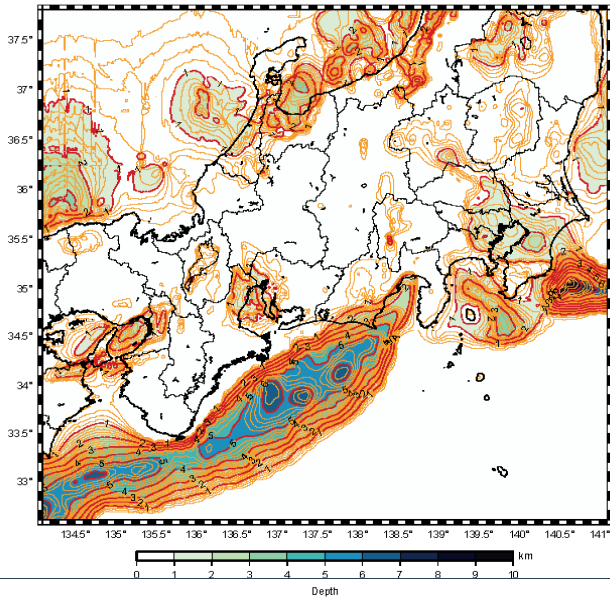


差分法によるシミュレーション波形と観測波形の比較

# 構築した地下構造モデル

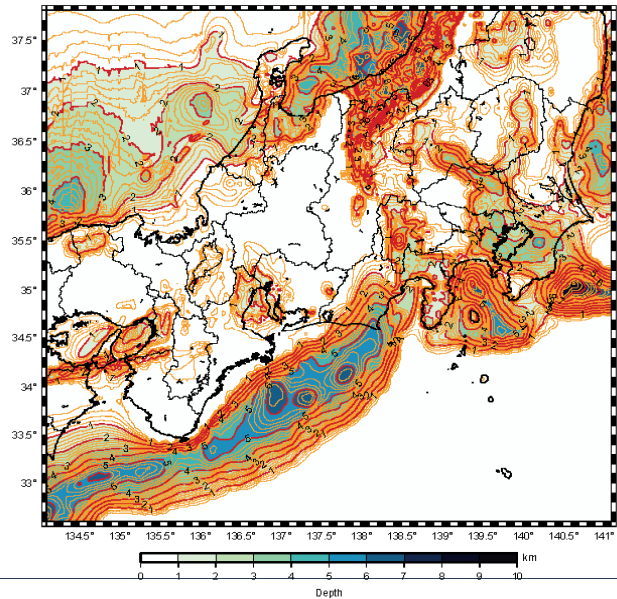
$V_s = 1.5 \text{ km/s}$  層の上面深度  
(付加体下面に相当)

Layer 09 200809chika vs1500



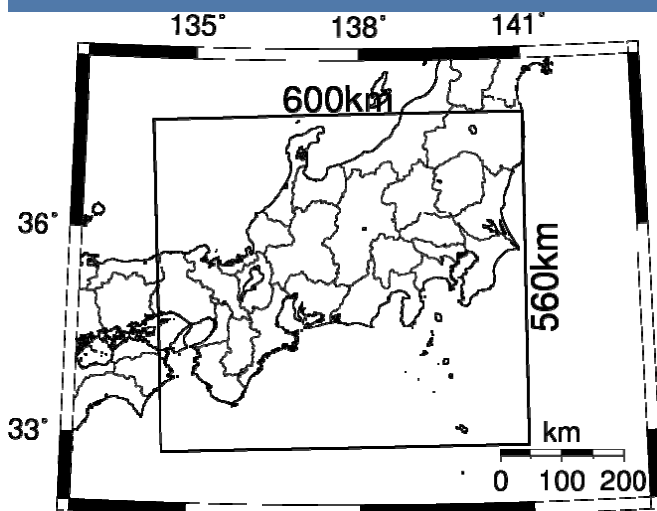
$V_s = 3.2 \text{ km/s}$  層の上面深度  
(地震基盤上面に相当)

Layer 14 200809chika vs3200



5

# 三次元差分法シミュレーション



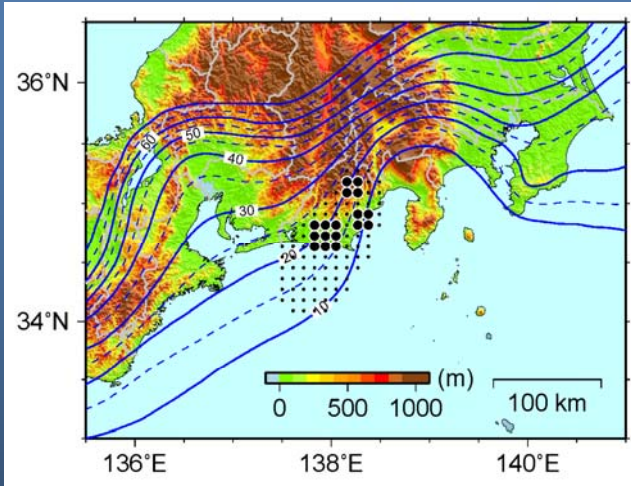
- Pitarka (1999)
- グリッド間隔:
  - 水平方向 0.25 km
  - 鉛直方向 0.2 km(深さ 0~3km)
  - 0.4 km(深さ3~7km)
  - 0.8 km(深さ7~67km)
- 格子数  
2401(EW) × 2241(NS) × 101(UD)
- 対象周期
  - 3.5秒以上(0.28Hz以下)
- 計算機環境
  - PC Cluster(42台, 総メモリ120GB)

長周期地震動予測  
= 周期3.5秒以上  
対象地震

想定東海地震(特性化震源モデル)  
1944年東南海地震(不均質震源モデル)  
1944年東南海地震(特性化震源モデル) [計算中]

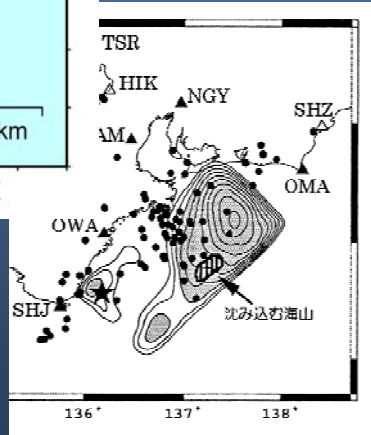
6

# 震源モデル



想定東海地震のための  
特性化震源モデル (Mw 8.0)

東南海地震のための  
不均質震源モデル (Mw 8.1)  
山中(2004)による1944年東南海地震の震源  
インバージョン結果



# 想定東海地震：最大速度と継続時間の分布

- ・工学的基盤上面
- ・EW成分・NS成分のうち、大きい値

- ・最大振幅の1/10を最初に超える時間と最後に超える時間の間隔

地震本部からの  
公表前のため削除

地震本部からの  
公表前のため削除

- ・ Directivity + 堆積層
- ・ 浜岡周辺で最大速度80cm/s程度

- ・ 震源近傍とフォワードは短く、バックワードは長い
- ・ 東京で200秒程度

## 東南海地震：最大速度と継続時間の分布

- ・工学的基盤上面
- ・EW成分・NS成分のうち、大きい値

- ・最大振幅の1/10を最初に超える時間と最後に超える時間の間隔

地震本部からの  
公表前のため削除

地震本部からの  
公表前のため削除

- ・堆積層＋距離減衰
- ・浜岡周辺で最大速度30cm/s程度
- ・不均質断層モデルのため東海地震に比べてDirectivity効果小

- ・震源近傍とフォワードで短く、バックワードで長い
- ・大阪，名古屋で250秒程度

9

## 東海地震：速度応答と速度応答継続時間 ( $T=5s, h=5\%$ )

- ・工学的基盤上面
- ・NSとEWの大きい方の値

速度応答

速度応答  
継続時間

地震本部からの  
公表前のため削除

地震本部からの  
公表前のため削除

- ・Directivity＋堆積層＋距離減衰
- ・浜岡周辺100cm/s程度

- ・震源近傍とフォワード短く、バックワード長
- ・東京で200秒程度

10



# 東南海地震：速度応答と速度応答継続時間 ( $T=5s, h=5\%$ )

- ・工学的基盤上面
- ・NSとEWの大きい方の値

速度応答

地震本部からの  
公表前のため削除

- ・堆積層＋距離減衰
- ・名古屋50cm/s程度

速度応答  
継続時間

地震本部からの  
公表前のため削除

- ・震源近傍とフォワードで短く、  
バックワード長い。
- ・名古屋で200秒程度

11

# 東南海地震：地震動の再現 (古村・中村, 2006 との比較)

速度  
NS

速度  
EW

変位  
NS

変位  
EW

地震本部からの  
公表前のため削除

地震本部からの  
公表前のため削除

黒：観測  
赤：計算

横浜

大手町

12

## 2. レイリー波振幅比インバージョン法による水平成層構造モデルチューニングと 関東平野の地下構造モデル

- ・データ：各観測点での微動・地震データの長期間連続観測記録
- ・手法：レイリー波振幅比インバージョン<Tanimoto & Alvisuri 2006>
- ・手順：1. 水平・鉛直成分の位相ずれを利用し、観測データよりレイリー波の卓越した成分を抽出  
2. 各周波数においてHZ比(水平・鉛直成分振幅比)を計算  
3. HZ比のインバージョンにより浅部S波速度構造を求める

連続観測微動データの統合

特徴：R/Vスペクトル比ピークマッチング法との比較

- ・水平・鉛直成分の位相ずれを利用してレイリー波成分を抽出。
- ・レイリー波振幅比の波形を合わせる。

### ・レイリー波振幅比インバージョン

#### Step 1 HZ カーネル

HZ比の摂動と構造パラメタの摂動との関係。  
Kは密度ρ、Vp α、Vs βの摂動に対するカーネル。  
現在のモデルに対して周波数ごとのカーネルを計算。  
得られたカーネルに対し、

$$\frac{\delta\xi}{\xi} = \int_0^R \left\{ K_\rho \frac{\delta\rho}{\rho} + K_\alpha \frac{\delta\alpha}{\alpha} + K_\beta \frac{\delta\beta}{\beta} \right\} dr$$

#### Step 2 HZの Iteration → Vs 構造推定

βで線形化。  $K_\rho \ll K_\beta$ ,  $\frac{\delta\alpha}{\alpha} = 0.75 \frac{\delta\beta}{\beta}$  (浅部地殻)

$$b_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \left\{ \frac{\delta\beta}{\beta} \right\}_j \quad A_{ij} = \int_{r_j}^{r_{j+1}} (0.75K_\alpha + K_\beta) dr$$

求めるインバージョンの基本式は、

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \epsilon^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

本研究では

- ・各層境界面深さを推定  
Vp-Vsの保持
- ・初期モデルの再設定  
水平成層構造
- ・再インバージョンの実施

田中(2009)による

13

## 水平成層モデルへの拡張

### 1. 初期モデルに対するインバージョン

- ・前節のレイリー波振幅比インバージョンを行う。

### 2. 各層境界面の抽出

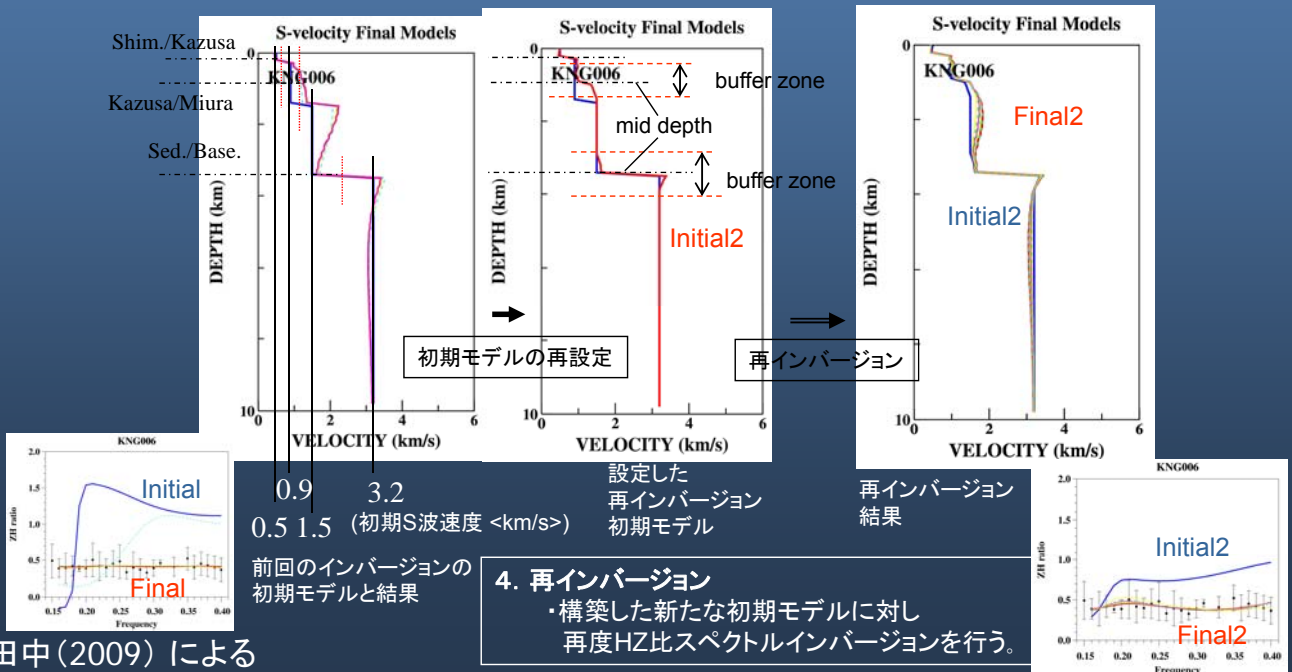
- ・各層初期速度の平均速度に相当する深さ("mid-depth")を境界面にとる。

速度修正量の境界面深さ修正量への変換

### 3. 速度の再設定

- ・各層境界面近傍に緩衝領域を取り、緩衝領域の外部の速度を初期速度に設定する。

走時・重力同時インバージョンによる成層構造への適用

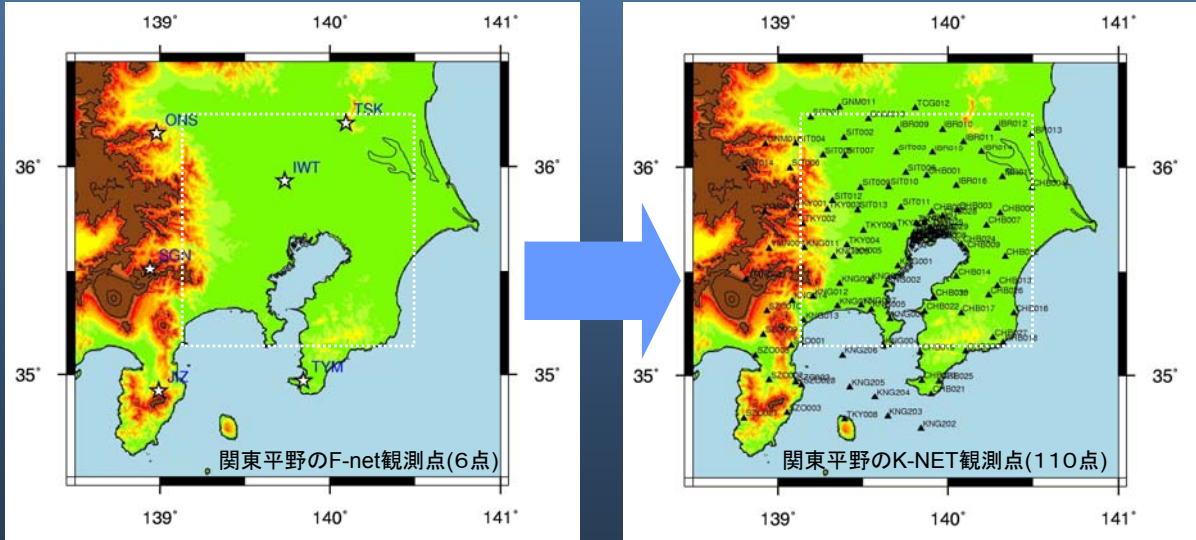


# イベントデータへの拡張

自然地震観測データの統合

微動データを用いて提案されたレイリー波振幅比インバージョン法を  
イベントデータに対して適用可能かどうかを検証する  
イベントデータを用いた場合の利点

- ・関東平野内の高密度に分布する観測点
- ・レイリー波成分に富むイベントデータを選択的に用いることが可能



田中(2009) による

15

# インバージョンによるS波構造モデル

- ・平野内で基盤上面の深い領域が広がり、三浦層がやや厚くなる。
- ・基盤が露出する点で、堆積層が厚く得られる。

物理探査データ, 自然地震観測データ  
による統合化地下構造モデル

F-net 観測点: 2点  
K-NET観測点: 73点を補間

初期モデル      チューニング結果      修正量

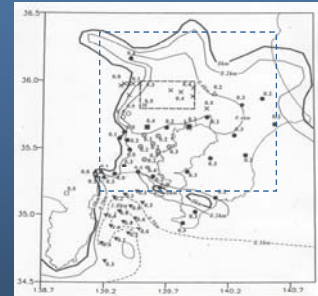
下総/上総層  
境界面深さ

上総/三浦層  
境界面深さ

三浦層/基盤  
(堆積層/基盤)  
境界面深さ

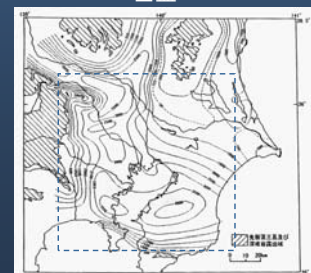
研究発表前のため削除

(既往のモデル)  
下総/上総



山中 & 山田(2002)

基盤



鈴木(1999) 16

田中(2009) による



# 地震動シミュレーションによる 構築構造モデルの検証

## 1998年5月3日 伊豆東方沖の地震動シミュレーション

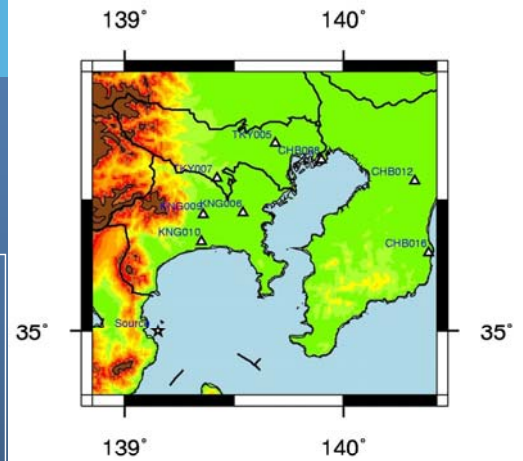
- ・構築した地下構造モデルの評価として地震動記録波形の再現を行う。

震源: 1998年5月3日伊豆東方沖の地震

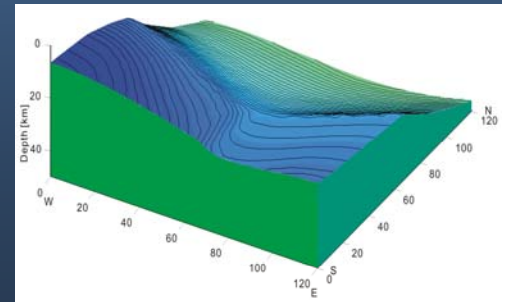
- ・震源時: 1998/5/3 11:09
- 震央: N 35.0 E 139.1
- Str/Dip/Slip: 165/85/8
- モーメント:  $2.35 \times 10^{17} \text{Nm}$ ,  $M_w = 5.7$
- 深さ: 5 km

地下構造モデル:

- ・堆積層、基盤モデルは本研究により得られた構造
- ・深部構造はAfnimar (2002)に接続
- ・フィリピン海プレート構造は Sato et al. (2005)の反射・屈折法探査モデルを元に、25kmより深部: 馬場・他(2006)の海域探査と接続。プレート東端でHori (2006)の地震活動分布を考慮。
- ・関東平野内広範囲で記録されたK-NET観測記録、走時・重力同時インバージョンによる速度構造モデル (Afnimar, 2002)と比較。



震央とK-NET観測点



フィリピン海プレートモデル

田中(2009) による

17

# ボクセル有限要素法による地震波形の再現

速度波形 EW 5秒<

- 計算手法: ボクセル有限要素法を採用。  
地形のデータを含むモデルを効率よく計算可能。
- ・震源: 点震源、継続時間2s、Herrmann型
  - ・計算領域: 東西145km x 南北134km x 深さ35km
  - ボクセル要素サイズ: (堆積層) 100m  
(基盤) 200m  
(深部) 400m
  - 要素数 : 76,000,000
  - ・解析時間: 破壊開始より90秒 (9,126 steps)
  - 計算時間: 約 28時間 (8ノード)

Obs.

本研究

Afnimar(2002)

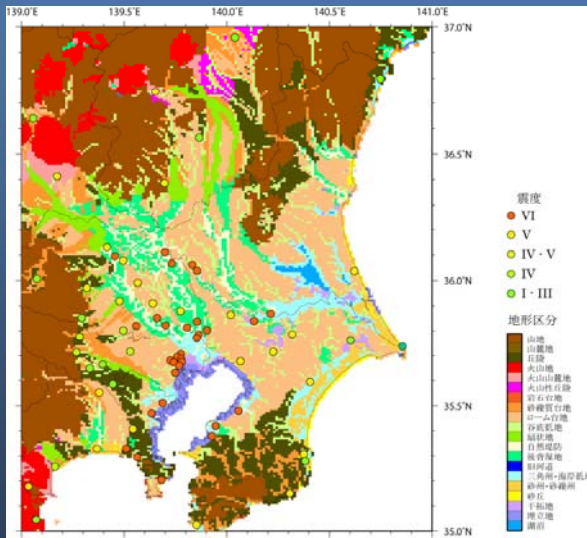
研究発表前のため削除

田中(2009) による

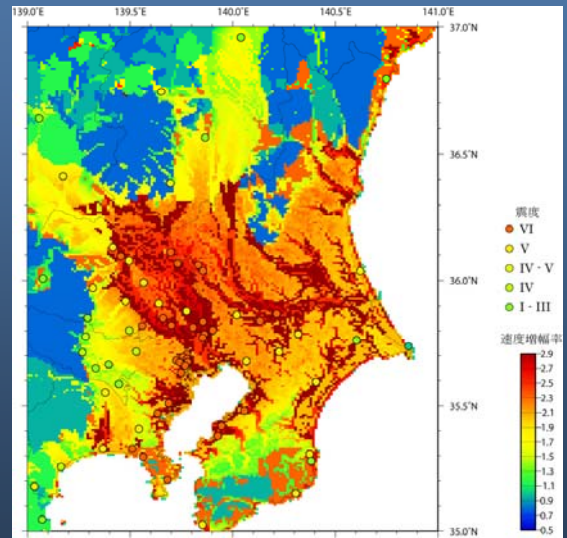
18

### 3. 史料・震度データに基づく震源モデル化

- H20年度は資料収集・整理を開始し、解析手法について検討した。  
震度データによる1855年安政江戸地震の震源モデル推定



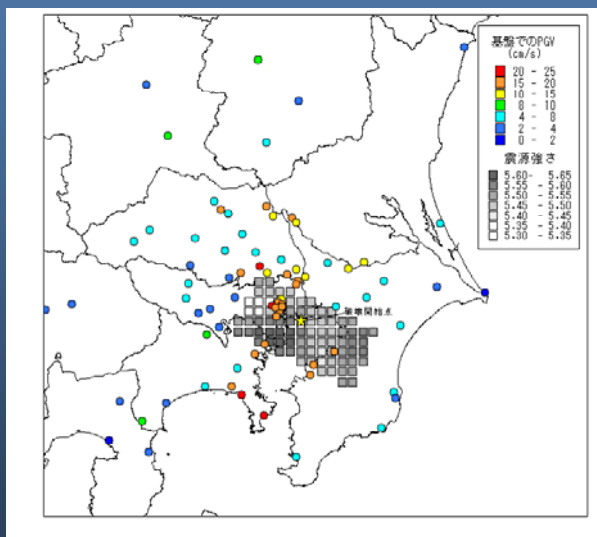
宇佐美(2003)による震度分布と若松・他(2005)による地形区分



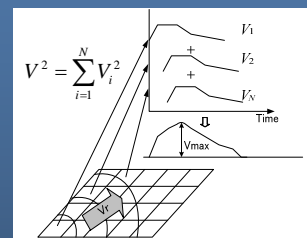
地形区分から換算した速度増幅率

### 史料・震度データに基づく震源モデル化

- ・震度から換算した最大速度に増幅率の補正をし、基盤での最大速度に変換
- ・破壊伝播を考慮した距離減衰式を使い、インバージョンにより震源強度分布を求める



基盤での最大速度と求めた震源強度分布  
(中央防災会議「東京湾北部地震」を仮定した試算)



最大速度の計算方法

#### 今後の改良

- ・震度データの見直し
- ・地盤情報・増幅率の高精度化
- ・設定する断層面の変更・震源深さの検討

## 平成21年度の実施計画

- 想定東海地震，東南海地震よりも規模が大きな南海地震についての長周期地震動予測地図を作成する。そのための地下構造モデルの構築もあわせて行う。
- 南海，東南海，東海地域の地下構造モデルと新たに作成した関東平野の地下構造モデルを統合し，強震動予測に必要な地下構造モデルを完成させる。
- 過去に発生した地震についての解析を継続する。データの見直し，解析手法の改良を行い，結果の信頼性を向上させる。