

# 大規模地震波シミュレーション による沈み込み帯の波形トモグ ラフィー：2011年東北地震震 源域と南西諸島域

JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点  
第14回 シンポジウム（2022年7月7日）

課題番号 jh220060

岡元太郎<sup>(1)</sup>・竹中博士<sup>(2)</sup>・青木尊之<sup>(1)</sup>・小松正直<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> 東京工業大学 <sup>(2)</sup> 岡山大学

# 研究目的

本研究では大規模地震波シミュレーションの結果を用いた全波形トモグラフィーによって沈み込み帯の3次元不均質構造モデルを改良する研究を行う。本研究の最終目標は、改良した3次元構造モデルを用いることによって短周期の波形再現性を向上させて震源パラメータや破壊過程の解析を高精度化し、地震発生場と地球内部構造との相関関係を探る研究を短波長域に拡張することである。今年度は、東北沖のパートでは対象とする周期帯をこれまでよりも短周期域に拡大して空間分解能を向上させるための研究を行う。南西諸島域のパートでは、特に2021年12月に発生したトカラ列島群発地震と周辺の構造モデルに関する研究を行う。この研究では、トカラ列島周辺の構造モデルのフォワード計算による検証や感度カーネル計算による考察と、FAMT解析による群発地震群の精密震源パラメータの推定とその結果に基づく地震活動の考察を行う。

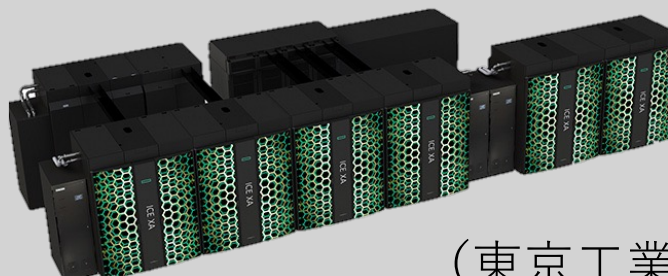
# 当拠点公募型共同研究として 実施する必要性

日本列島周辺が代表例であるプレートの沈み込み帯は、海水層・不規則海底地形・厚い堆積物層・沈み込む海洋プレートなどから構成されており、地球内部構造の3次元不均質性が強い。その効果は地震波動場に伝播経路の屈曲などとして強く表れる。地震波波形を用いた震源物理研究では、それらの強い不均質構造の効果を検討した地震波伝播シミュレーションが必要になる。本研究では最短で周期数秒程度の波動場を対象とすることから格子間隔は100–200 m程度となる。一方で対象領域のサイズは数百kmから1000kmに渡るため、地震波シミュレーションは大規模なものになる。そのため本公募の共同研究として実施する必要性がある。

本課題で得られる震源位置や震源メカニズムなどの結果は、プレートの変形量や、地震発生域における物質の強度などのプレート・テクトニクスの見解と合わせて考察する必要がある。また、強い地震動の生成における3次元不均質構造の効果について地震工学や防災科学と関連する考察も可能となる。このように、本課題は地震の震源物理にとどまらず、様々な分野の見解を総合した考察に繋がるものである。

# 大規模地震波シミュレーション

- **HOT-FDM** (Nakamura et al. 2012)
  - *Heterogeneity*, *Ocean layer*, *Topography*
  - 非弾性減衰 (Blanch et al. 1995)
  - 固体・流体境界 (Okamoto 2005; Nakamura 2011)
- **TSUBAME-3.0** (SGI ICE-XA: 東京工業大学)
  - *Multi-GPU Acceleration* (Okamoto et al., 2010, 2013)
- **Flow Type I** (Fujitsu FX1000: 名古屋大学)



(東京工業大学)



(名古屋大学)

# 研究の特徴：感度カーネル

## 波動論に基づく「感度カーネル」の計算

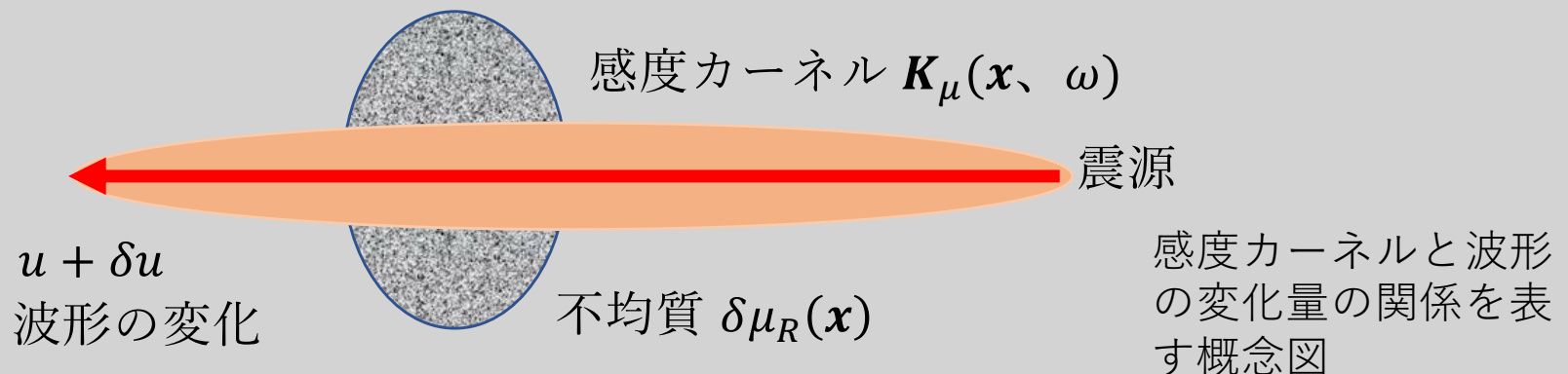
感度カーネル： $K_M(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \omega)$

→ 物性パラメータの変化に伴う波形の変化量を表す

- 波動場の特徴を抽出する
- $\delta u$  から  $\delta m$  を推定する逆問題を解く

$$\delta u(\mathbf{X}, \omega) = \int \mathbf{K}_M(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \omega) \left( \frac{\delta M(\mathbf{x})}{M(\mathbf{x})} \right) d\mathbf{x}$$

( $\delta u(\mathbf{X}, \omega)$ ：波形の変化量、 $M(\mathbf{x})$ ：物性パラメータ、 $\delta M(\mathbf{x})$ ：摂動量)



# 研究の特徴：FAMT解析 [1]

## ■ 海域の地震の解析

複雑な波形と観測点分布の偏りによる解析上の困難



## First-motion Augmented Moment Tensor (FAMT) 解析

### ■ 2つの周波数帯域を使う

- 短周期 (周期 4-40 s)

実体波初動 → 走時・深さ・震源時間関数

- 長周期 (周期 10-40 s)

全波形 → モーメントテンソル

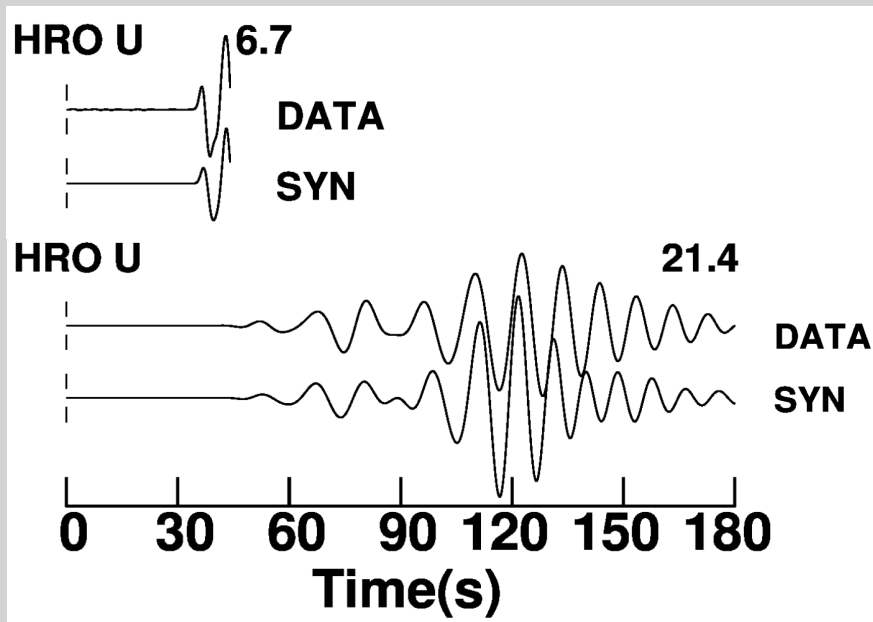
### ■ 非線形波形逆解析 + 4次元格子探索

モーメントテンソル・震源時間関数

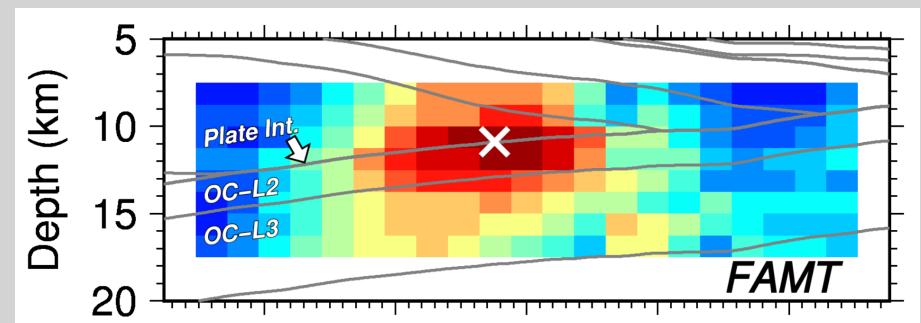
震源位置・発震時補正

# 研究の特徴：FAMT解析 [2]

(a)



(b)



FAMT解析の例：東北沖で発生した2003年Mw5.8のプレート境界型地震に関するFAMT解析の結果。(a) 得られた計算波形 (SYN) と観測波形 (DATA) との比較例。観測点はHRO、波形は上下動成分。上段は周期4–40秒のP波初動付近の波形、下段は周期10–40秒の全波形を示す。(b) 3次元格子探索の結果を構造断面図に投影したもの。最適震源位置 (×印) は、プレート境界型メカニズムから期待される通りに、プレート境界付近に推定された (Okamoto et al. 2018)。

# 東北沖でのシミュレーション： [1] 計算波形と観測波形

## ■ 計算波形

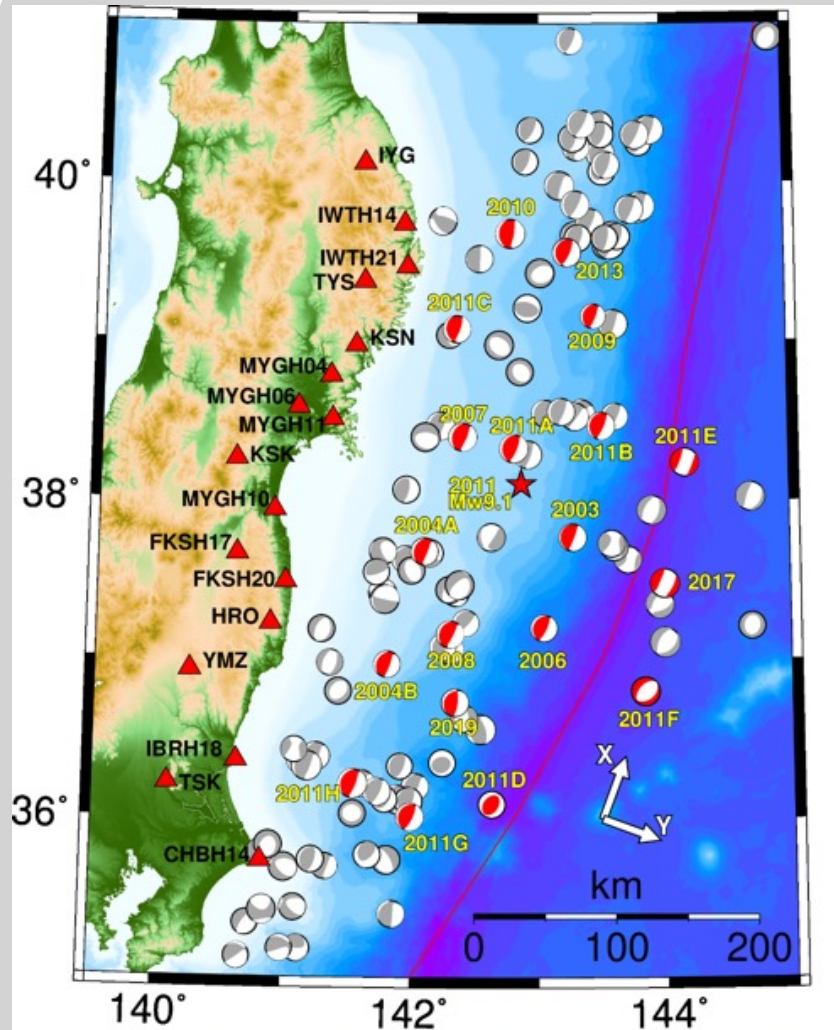
- 速度構造モデル：全国一次地下構造モデル (Koketsu 2012)  
J-SHIS V2 (NIED 2014)・岸本 (2000)
- 計算用マシン：東京工業大学 TSUBAME-3.0
- 計算スキーム：HOT-FDM (Nakamura et al. 2012)  
マルチGPU対応バージョン (Okamoto et al. 2013)

## ■ 観測波形

- F-net (NIED 広帯域地震計観測網)
- KiK-net (NIED 強震観測網)
  - ➔ 地動速度波形に変換
  - 4-40 秒および 10-40秒の週期帯の 3 成分波形を利用



# 東北沖でのシミュレーション： [2] 計算対象領域と計算パラメータ



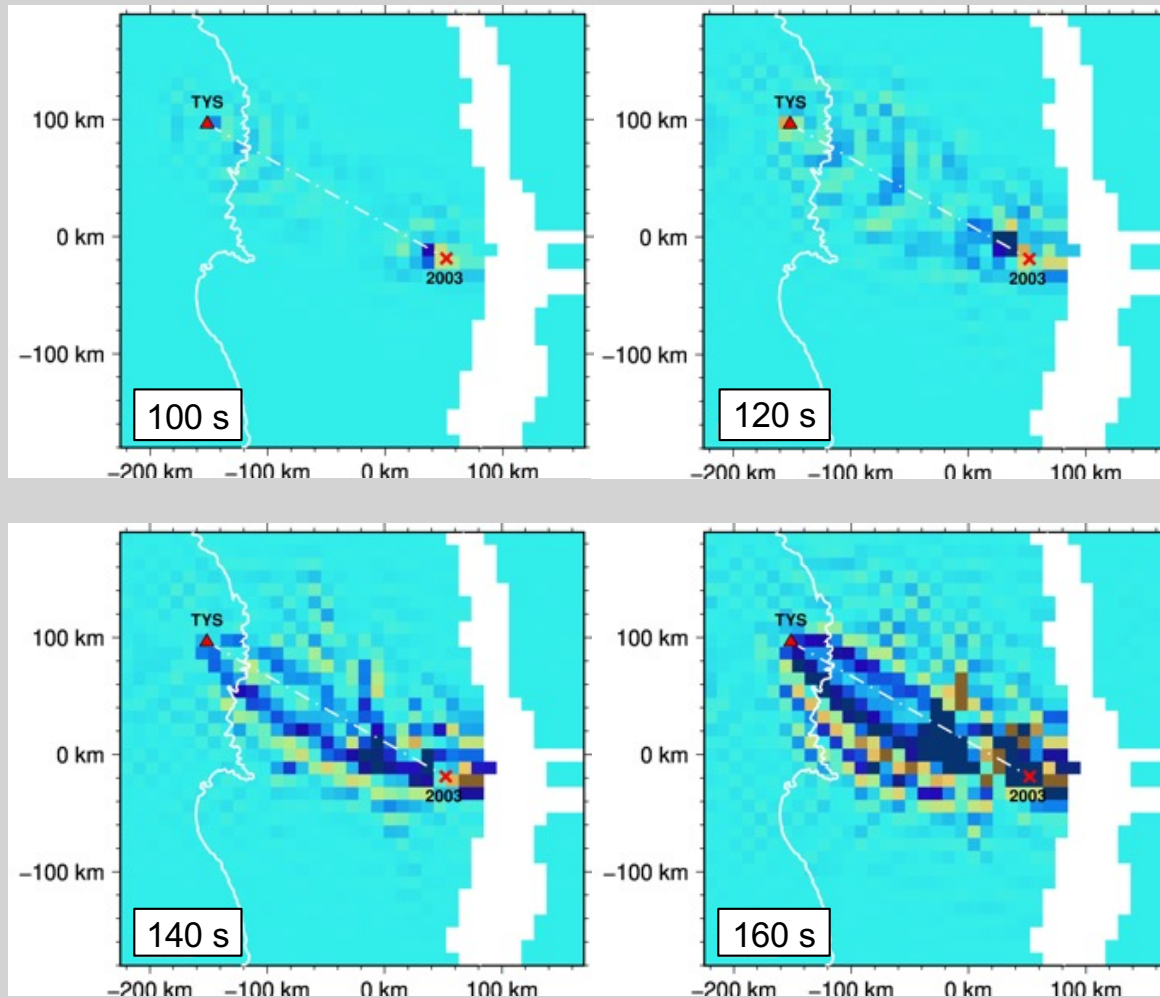
全格子サイズ	4896 × 3360 × 800
副領域サイズ	544 × 480 × 400
格子間隔	150 m
時間ステップ数	35000
時間間隔	0.007143 s
ノード数	32
GPU数	126
1回あたり計算時間	3886 s (平均値)

TSUBAME-3.0での計算パラメータ

解析対象地域。本研究でこれまでに震源パラメータを解析した地震（赤い記号でプロットしたもの）、およびデータを用いた観測点（赤い三角）を示す。

# 東北沖でのシミュレーション

## [3] 時間領域感度カーネルの例



2003年の地震（前スライドの地図の中央付近）と観測点TYSとの間で、6秒-8秒の周期帯の上下動成分地震波について、深さ0-6 kmまでの層の剛性率に関する規格化した時間領域感度カーネルを示したもの。白い部分は海水ブロック（解析から除外）。

3次元構造の効果により、カーネルは直線経路に関して非対称になる。また波形の後半ほど感度が強くなっており、これらの感度には後続波が対応していることが示唆される。

# 南西諸島の初期速度構造モデル

## [1] 計算波形と観測波形

### ■ 計算波形

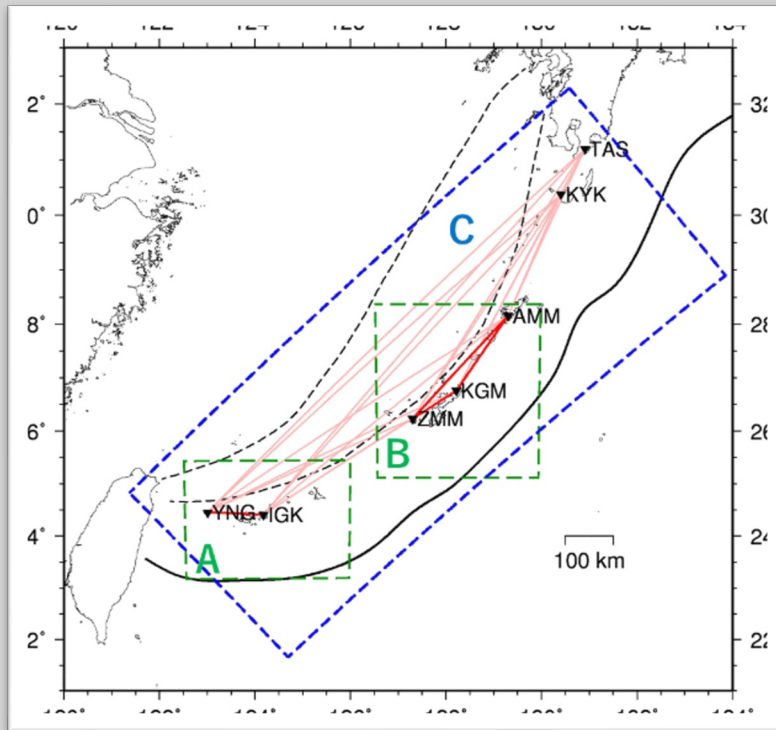
- 速度構造モデル：小松（2018）
- 計算用マシン：名古屋大学 FX1000
- 計算スキーム：HOT-FDM（Nakamura et al. 2012）  
FX1000用にスレッド数・プロセス数を調整

### ■ 観測波形

- 地震波干渉法を用いる  
ある観測点での観測地動波形と、別の観測点での地動波形との相互相関関数から、2地点の一方を震源、他方を観測点とするグリーン関数を抽出する（Campillo & Paul, 2003など）
- 観測グリーン関数波形：（邱・ほか、2017）

# 南西諸島の初期速度構造モデル

## [2] 計算領域と計算パラメータ



緑色破線ならびに青色破線が計算領域。黒三角形がF-net観測点を示す。赤色線とピンク色線は各領域における観測点間を結ぶ線。

	沖縄本島周辺	八重山諸島
格子サイズ	3601 × 3401 × 801	2501 × 3501 × 601
格子間隔	0.1 km × 0.1 km × 0.1 km	
時間ステップ	50001	
時間間隔	0.005秒	
ノード数	432	288
プロセス数	1728	1152
スレッド数	12	
計算時間	95分	63分

沖縄本島周辺・八重山諸島の計算パラメータ

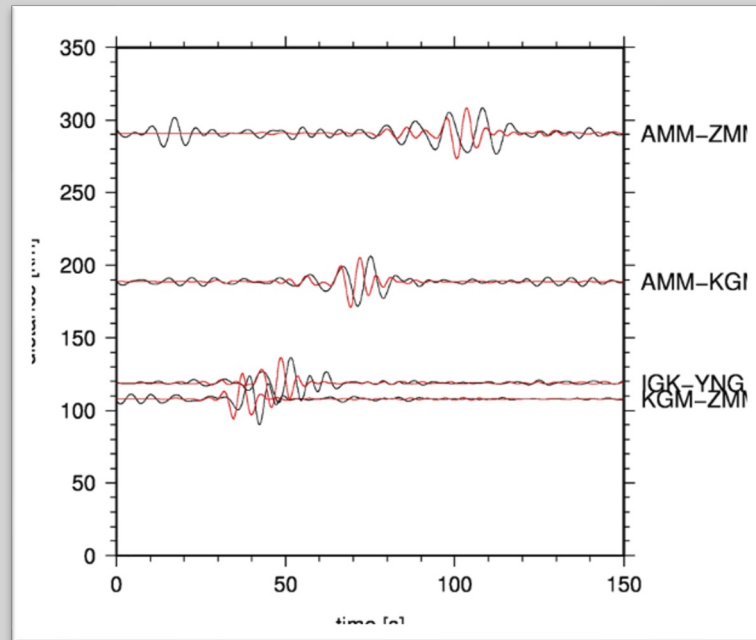
格子サイズ	2201 × 5501 × 1001
格子間隔	0.002度 × 0.002度 × 0.2 km
時間ステップ	60001
時間間隔	0.01秒
ノード数	432
プロセス数	1728
スレッド数	12
計算時間	130分

南西諸島全域の計算パラメータ

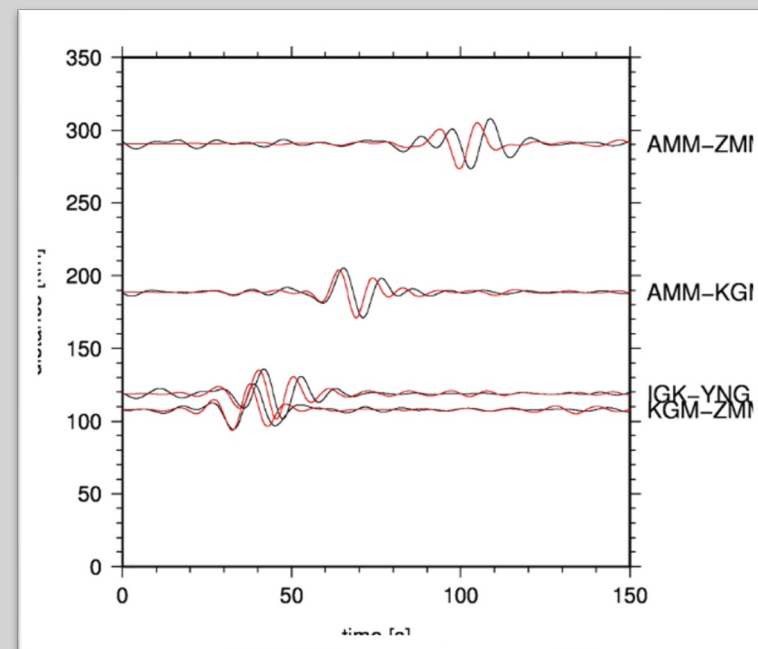
# 南西諸島の初期速度構造モデル

## [2] 沖縄本島周辺・八重山諸島

観測グリーン波形（黒線）  
と理論波形（青線）  
周期帯：5～10秒  
（地動速度波形：上下動）



観測グリーン波形（黒線）  
と理論波形（青線）  
周期帯：10～20秒  
（地動速度波形：上下動）

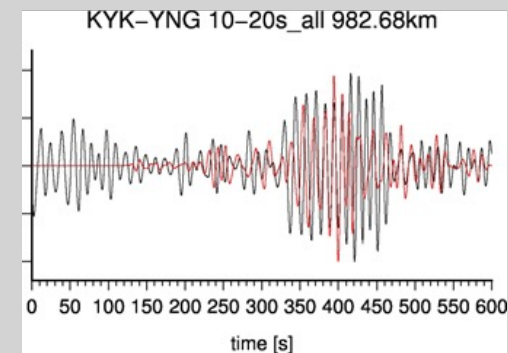
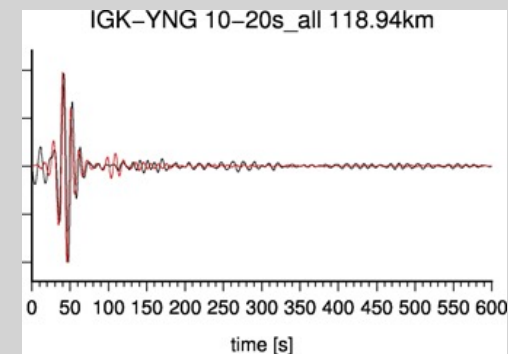
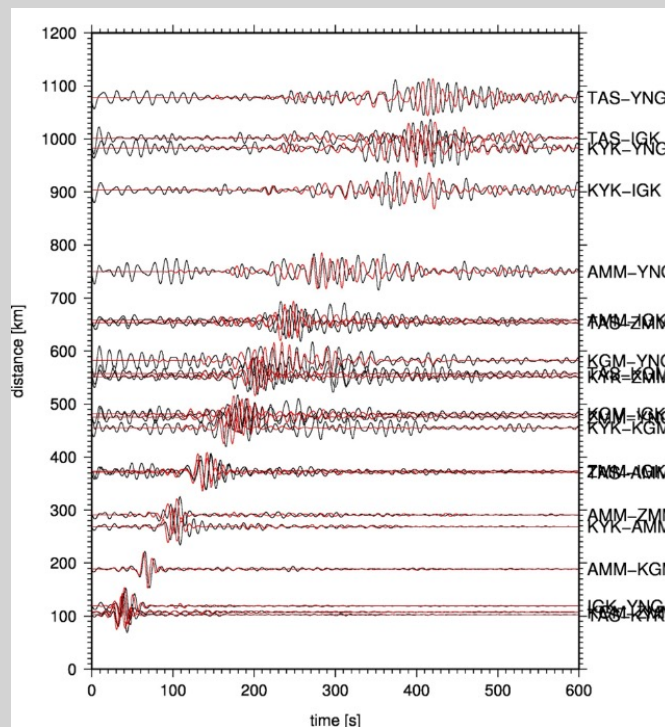


長周期（10～20秒）かつ観測点間距離200 km以下では、  
理論波形が観測グリーン関数を良好に再現する

# 南西諸島の初期速度構造モデル

## [3] 南西諸島全域

観測グリーン波形（黒線）と理論波形（青線）  
周期帯：10～20秒（地動速度波形：上下動）



長周期（10～20秒）かつ観測点間  
距離200km以下では、理論波形が  
観測グリーン関数を良好に再現する

長距離（～1000km）でも一部の位  
相の再現性が良い観測点ペアが存在  
する（下段の0～150秒の波形はノイズ）

# 研究計画

【1】 東北沖の解析：2011年 東北地方太平洋沖地震の震源域  
(主担当：岡元太郎 (東工大) ; 東工大TSUBAME3.0)

- データ追加：  
対象地震を追加してFAMT解析
- 構造モデル解析：  
長周期 (長波長) 側から短周期 (短波長) 側へ段階的に推定

【2】 南西諸島域の解析：トカラ列島群発地震

(主担当：竹中博士・小松正直 (岡山大) ; 名古屋大 FX1000)

- 群発地震に対するFAMT解析：  
精密震源パラメータ→群発地震活動の特徴の検討
- 群発地震周辺域の構造モデル：  
理論波形と観測波形の比較によるモデルの妥当性の検討