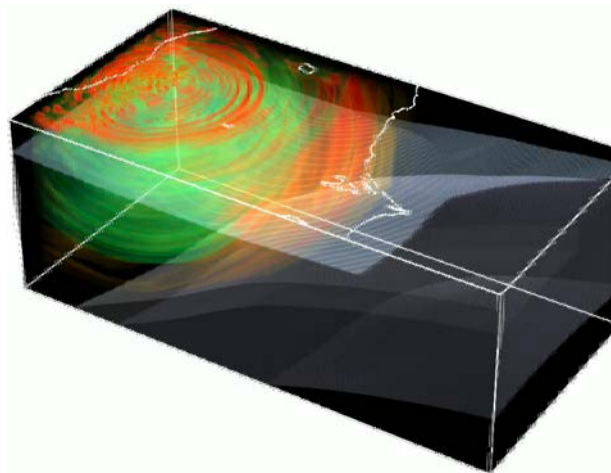
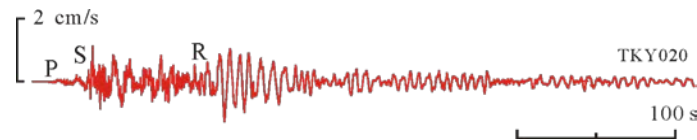


3次元不均質地球構造での地震・津波波動伝播シミュレーション

巨大地震による長周期地震動の予測、そして防災に向けて

古村 孝志 (東京大学地震研究所)



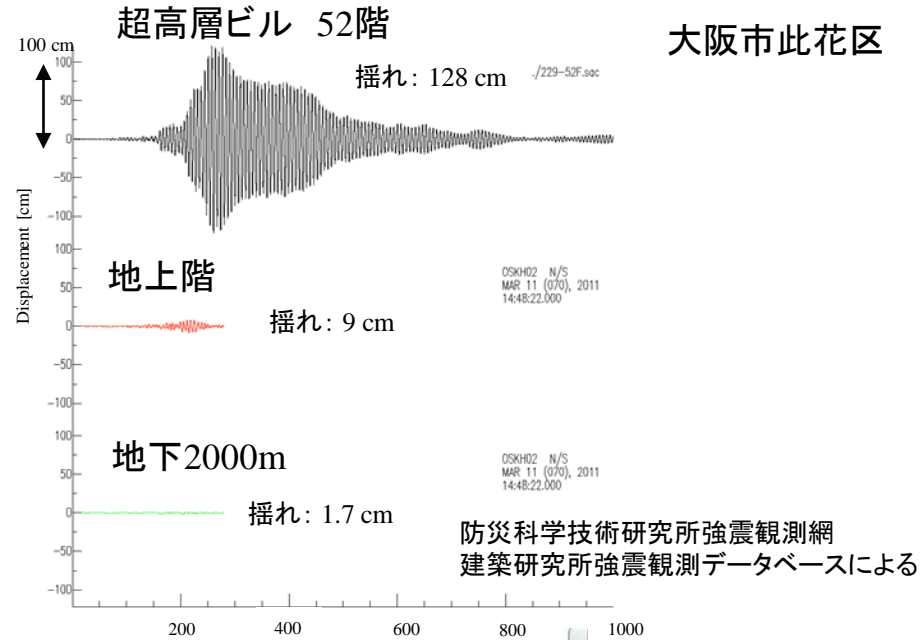
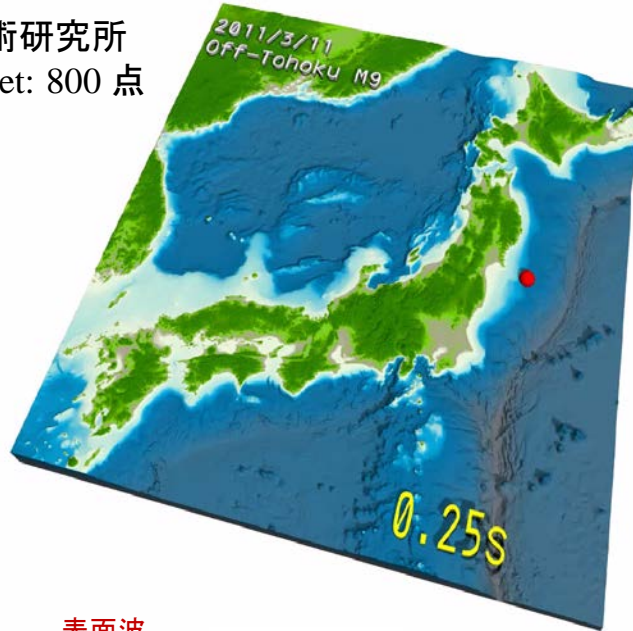
内容:

1. 大地震による長周期地震動の予測、そして防災に向けて
2. 地震動シミュレーションのための地下構造モデルの整備
3. 地震観測・計算データ同化と、高速計算に基づく未来予測
4. 計算コードの公開、計算地震学コミュニティの拡大

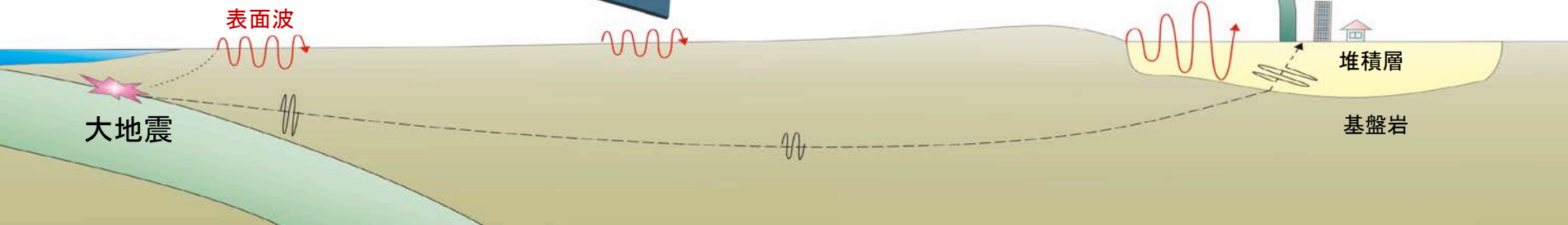
2011年東北地方太平洋沖地震(M9)による長周期地震動

強震観測データの可視化

防災科学技術研究所
K-Net, KiK-net: 800点



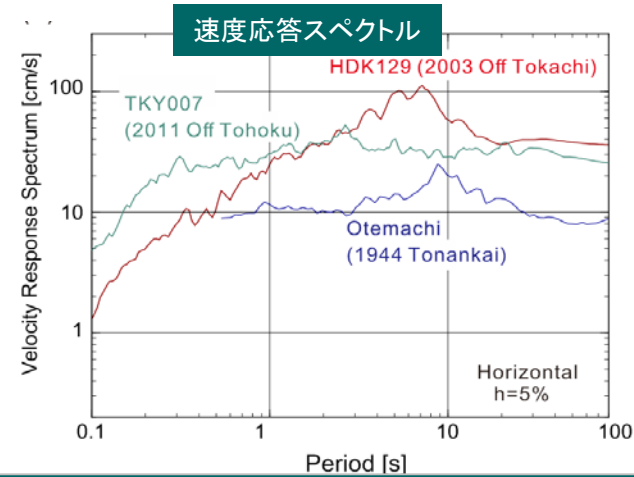
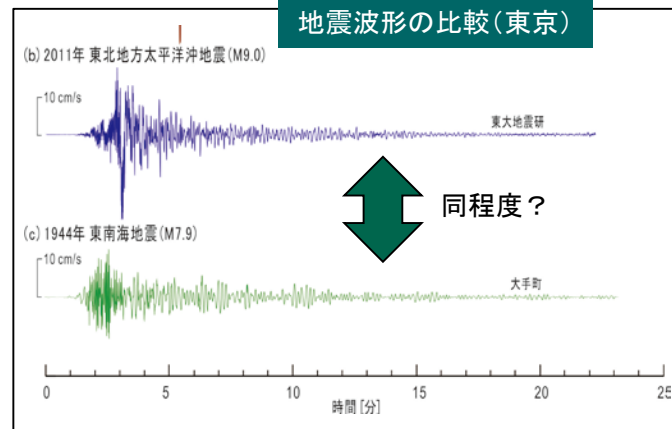
防災科学技術研究所強震観測網
建築研究所強震観測データベースによる



南海トラフ巨大地震で心配される長周期地震動



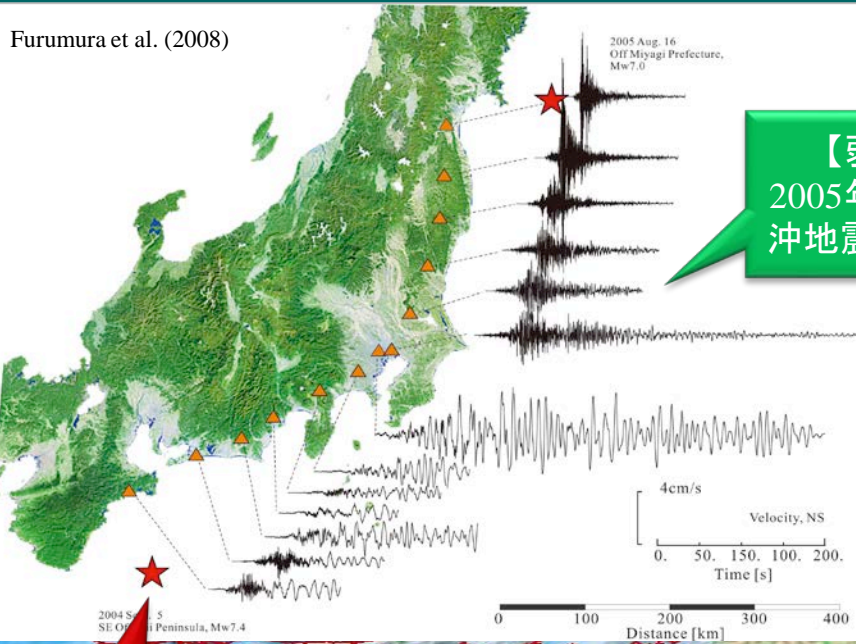
1944年東南海地震の地震記録解析



都心の長周期地震動は、昭和東南海地震(M7.9)と同レベル、では、M9クラスの超巨大地震では？

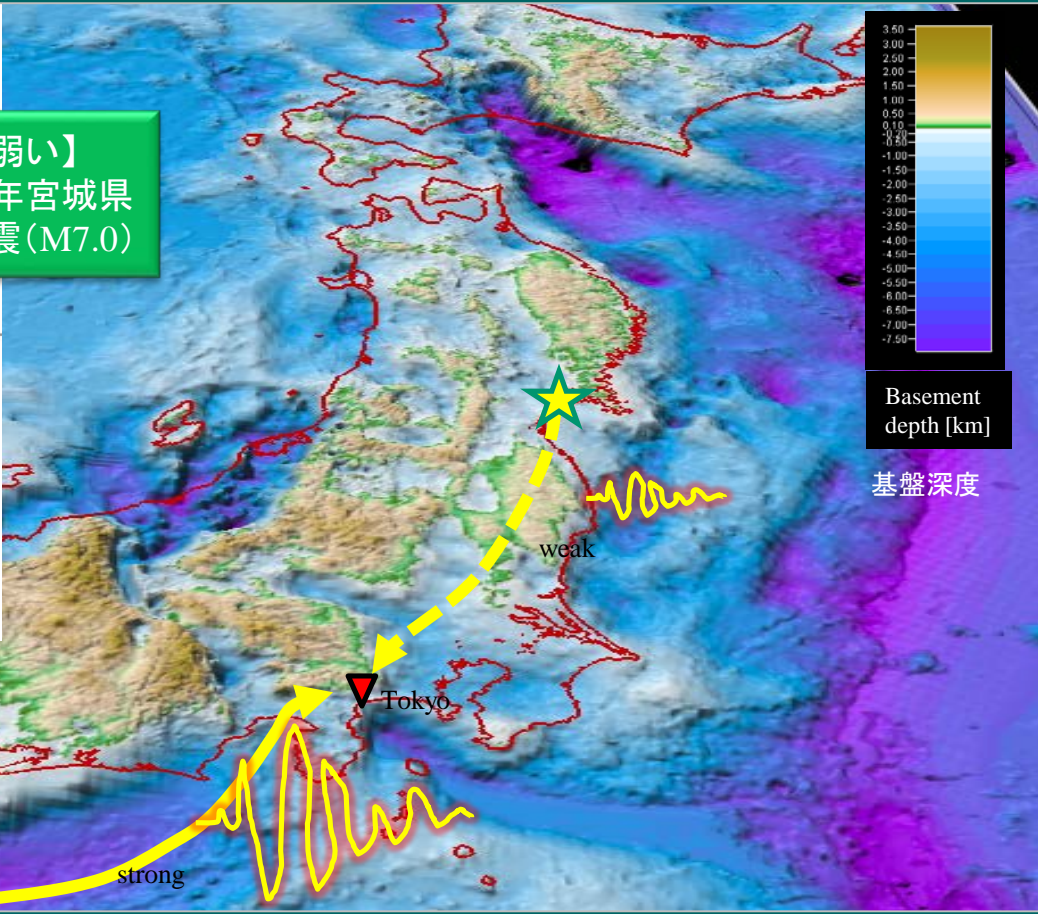
南海トラフ巨大地震で心配される長周期地震動

Furumura et al. (2008)



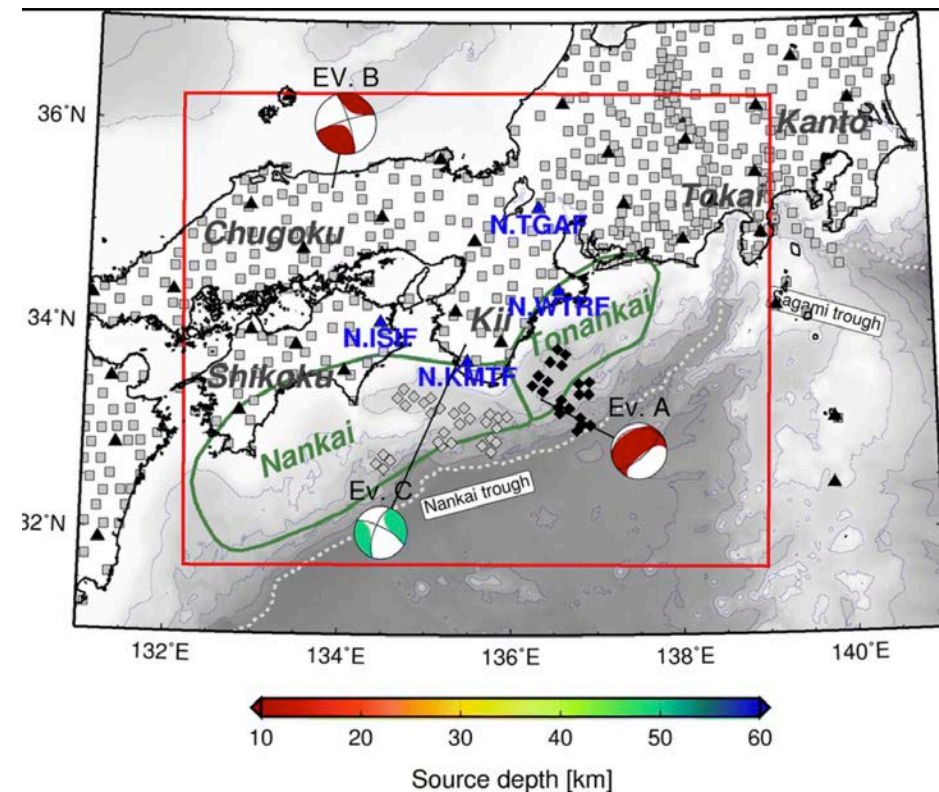
【弱い】
2005年宮城県
沖地震(M7.0)

【強い】
2004年紀伊半
島南東沖地震
(M7.4)

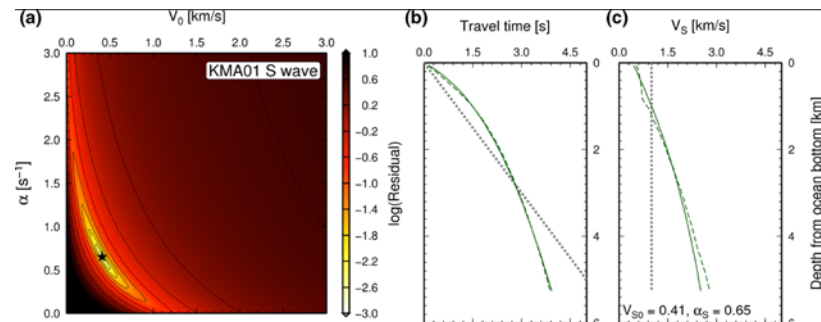
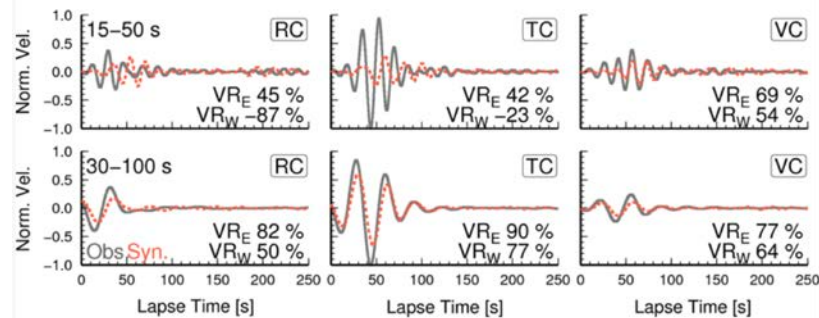


地下構造(付加体)の影響により、南海トラフ地震では長周期地震動が強く生成される傾向がある

【成果①】南海トラフ地震の長周期地震動：付加体構造のモデル化

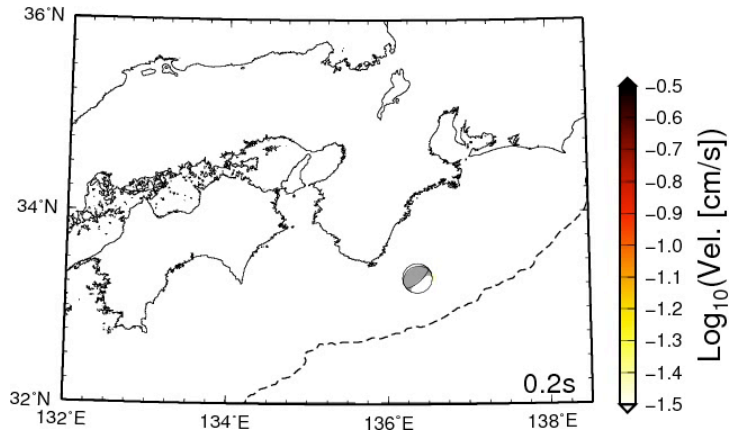
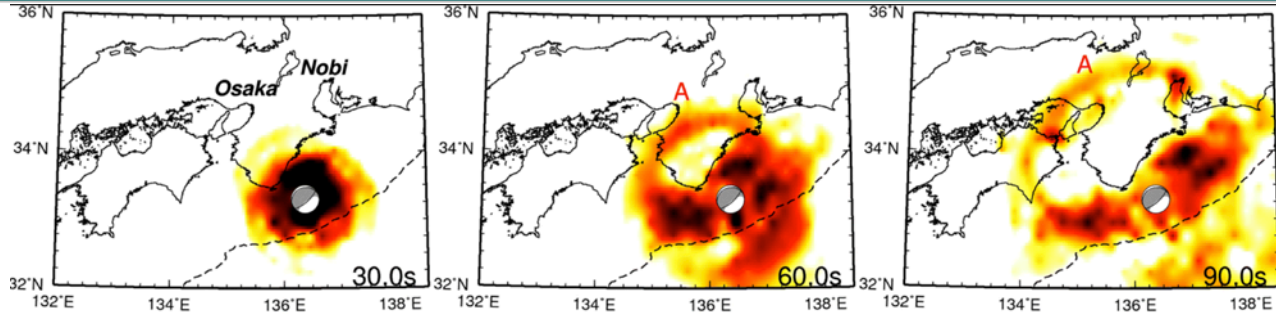


Takemura, et al. (2019)

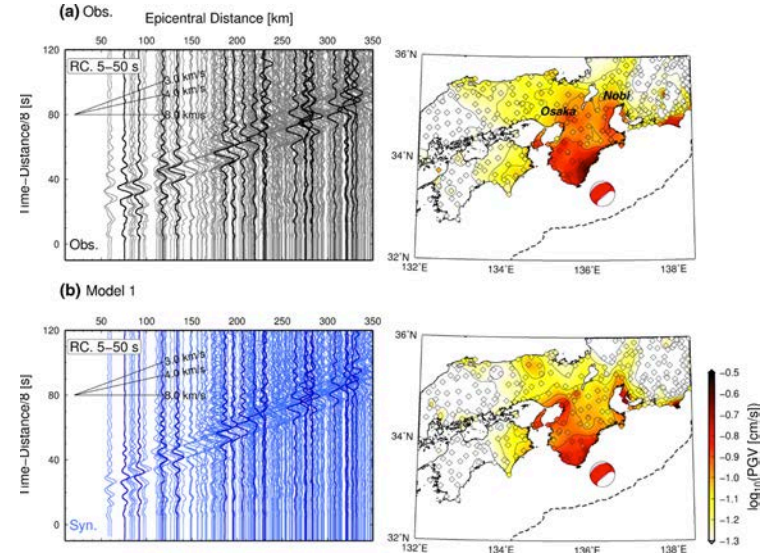


海底ケーブル地震観測 (DONET) データと波動伝播シミュレーションに基づく、地下構造 (付加体) の推定

【成果①】南海トラフ地震の長周期地震動：付加体構造のモデル化

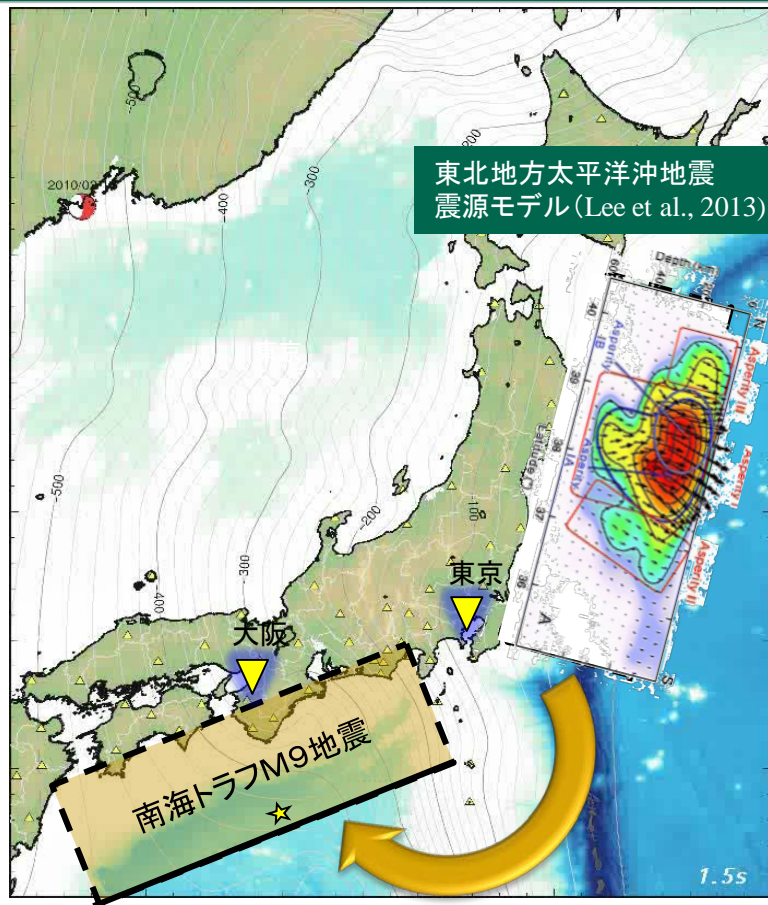


Takemura, et al. (2019)

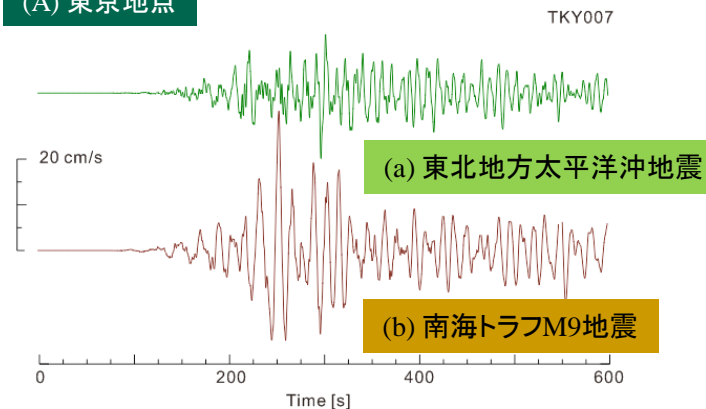


高分解能シミュレーションにより、南海トラフ地震の長周期地震動の発生・伝播過程の理解が進む

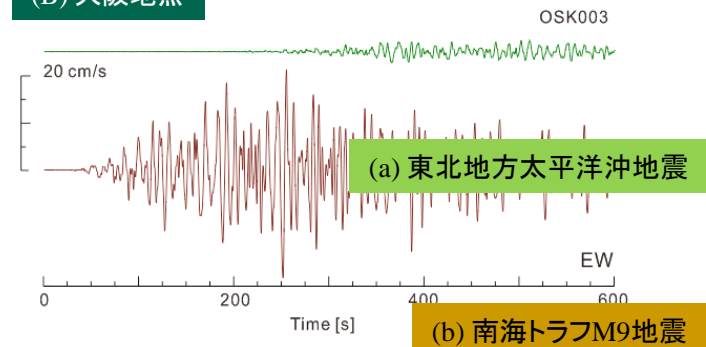
南海トラフ巨大地震で心配される長周期地震動



(A) 東京地点

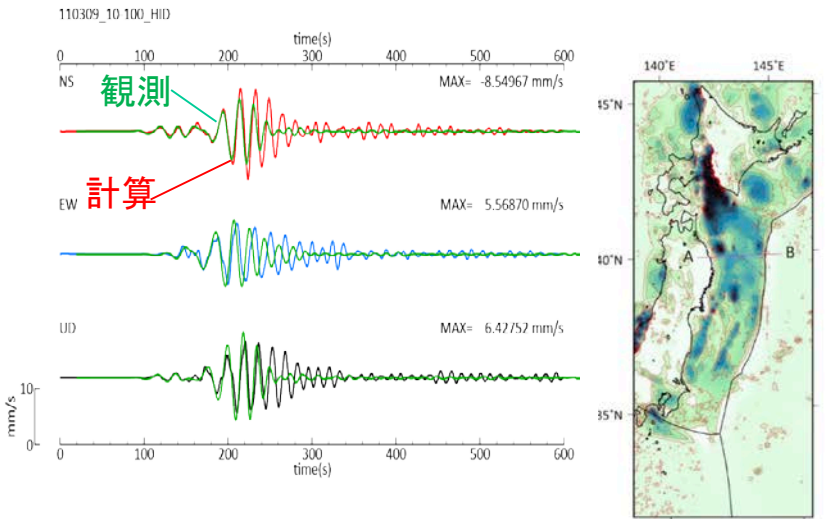


(B) 大阪地点



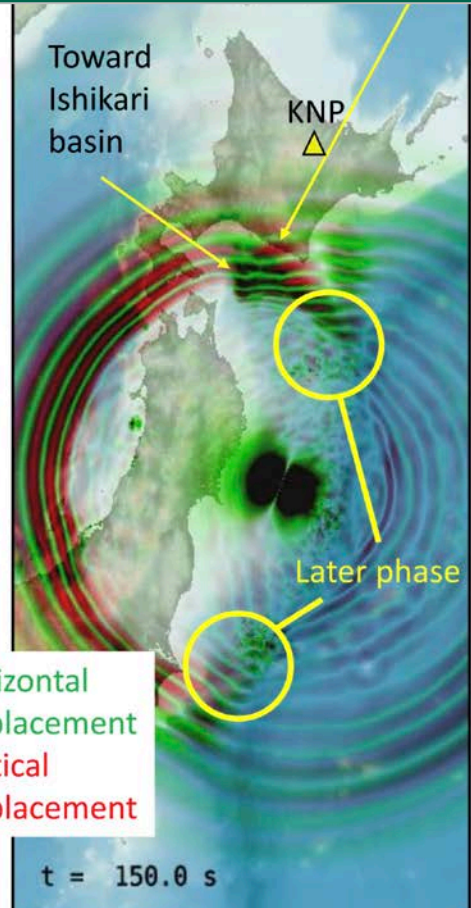
東日本大震災と同等 (M9) の南海トラフ地震の長周期地震動は、関東で2倍、大阪で4倍以上の可能性

日本海溝の地震で心配される北海道の長周期地震動



野口・前田・古村(2018)

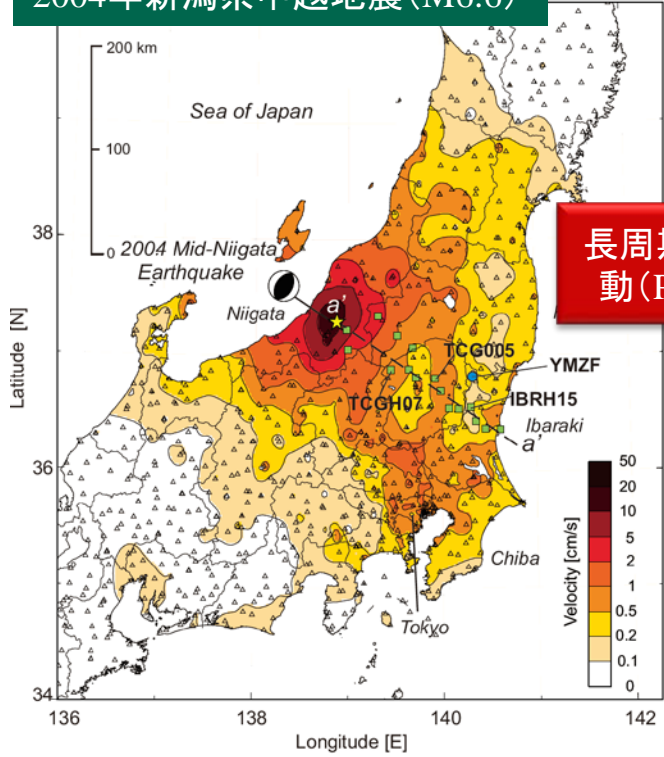
2011.03.09.



北海道石狩低地帯の厚い堆積物でも、付加体と同様の長周期地震動の増幅と誘導の可能性が高い

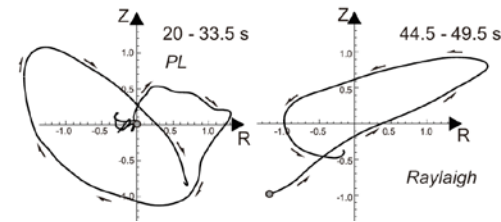
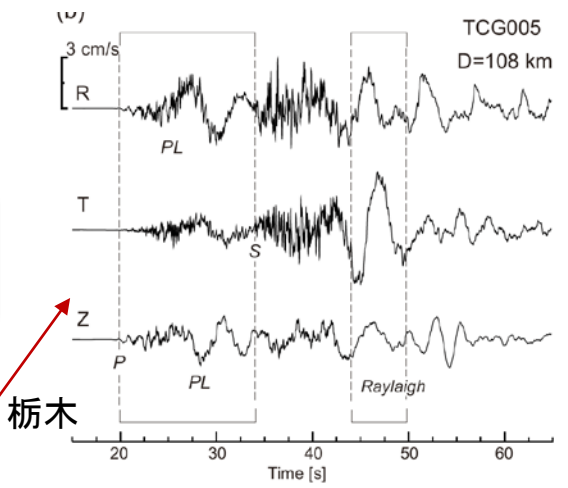
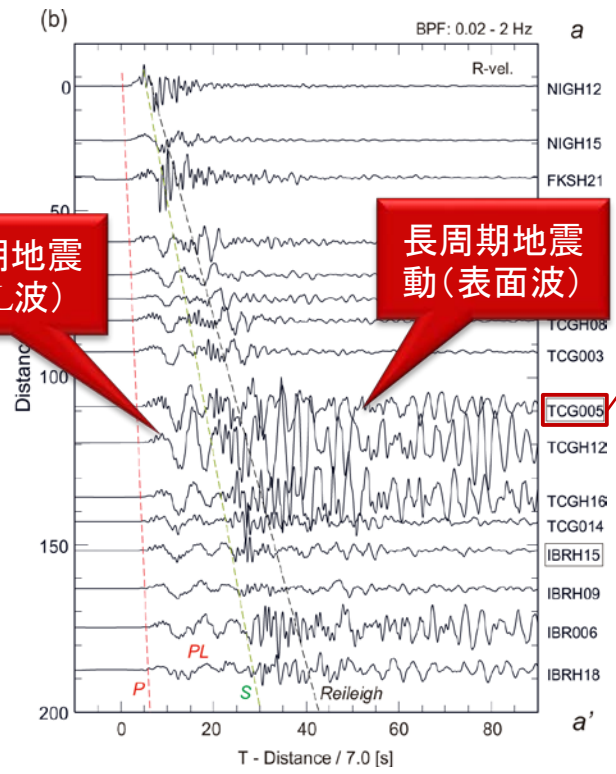
内陸地震で見られる、P波直後からの長周期地震動

2004年新潟県中越地震(M6.6)



長周期地震動(PL波)

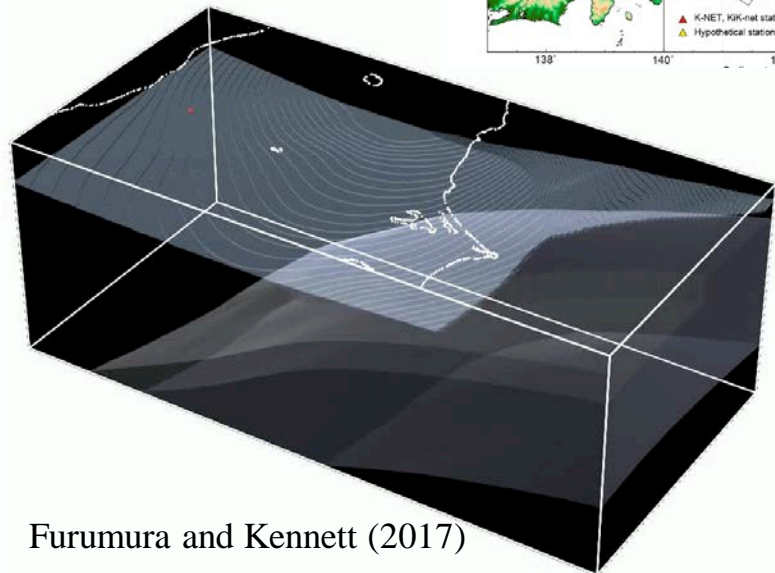
長周期地震動(表面波)



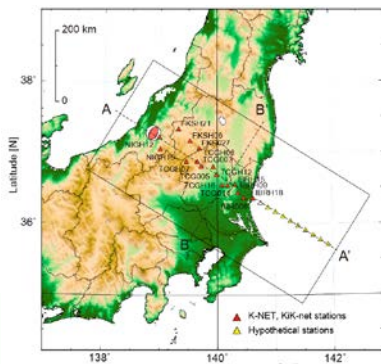
Furumura and Kennett (2017)

新潟県中越地震の際に、栃木においてP波の直後の早い時間帯から長周期地震動が観測された

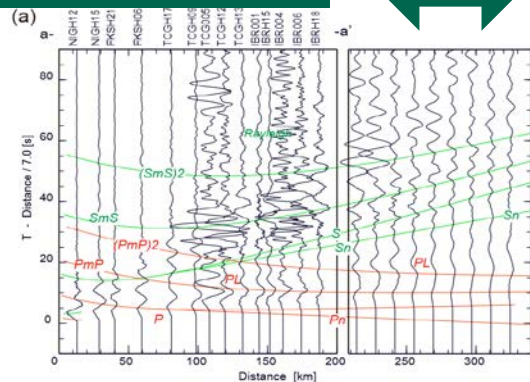
【成果②】 内陸地震で見られる、P波直後の長周期地震動



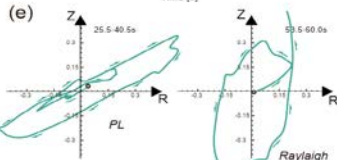
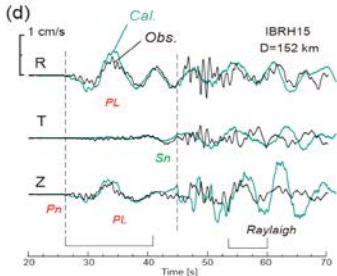
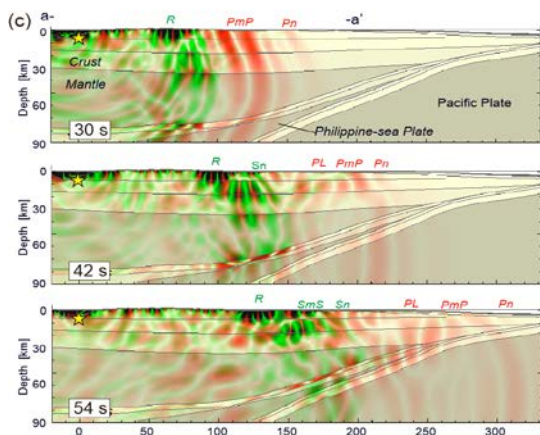
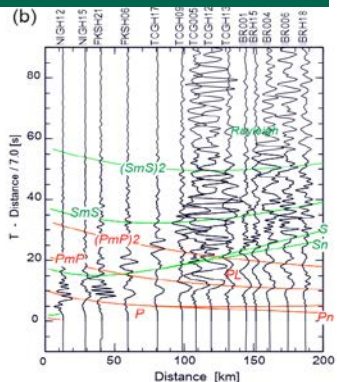
Furumura and Kennett (2017)



(a) シミュレーション



(b) 観測

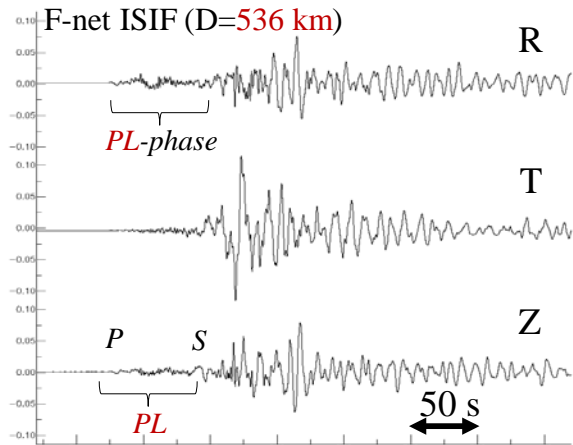


地震波解析により、低速度の地殻を伝わるPL波と判明、地震波伝播シミュレーションから証明された

【成果②】 内陸地震で見られる、P波直後の長周期地震動

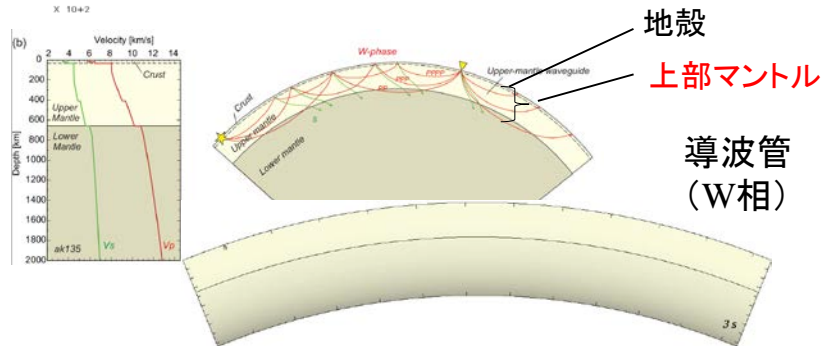
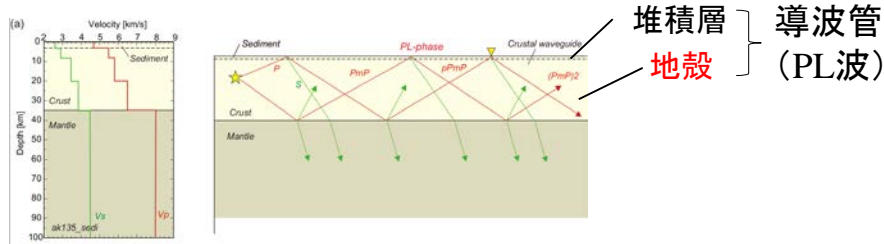
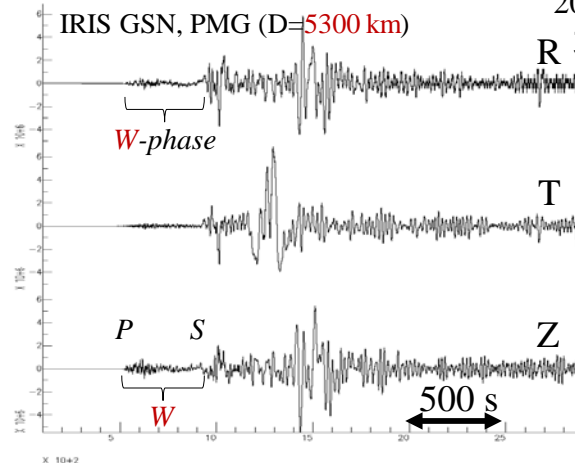
(a) 近地 *PL* 波 (5-30 s)

2004 年新潟県中越地震



(b) 遠地 *W* 相 (100-1,000 s)

2011 年東北地方太平洋沖地震



Furumura and Kennett (2017)

地殻を伝わるPL波は、上部マントルを伝わるW相と類似のメカニズムを持つ波動現象として説明できる

【成果④】 強震観測データ同化に基づく、長周期地震動の即時予測

(a) 現在の緊急地震速報(震度、到達時間)の仕組み



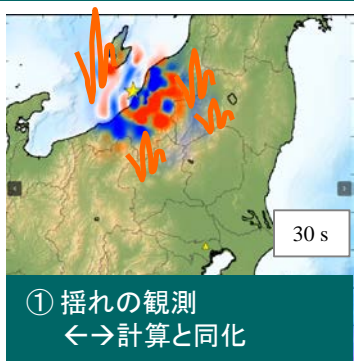
・距離減衰式
・サイト増幅

経験式



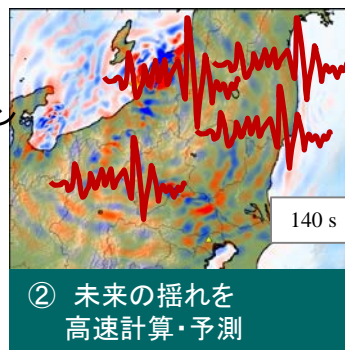
- ・震度(波形でない)を予測
- ・震源をいち早く推定

(b) 観測データ・シミュレーション同化に基づく揺れの予測 **NEW**



・地震波伝播シミュレーション

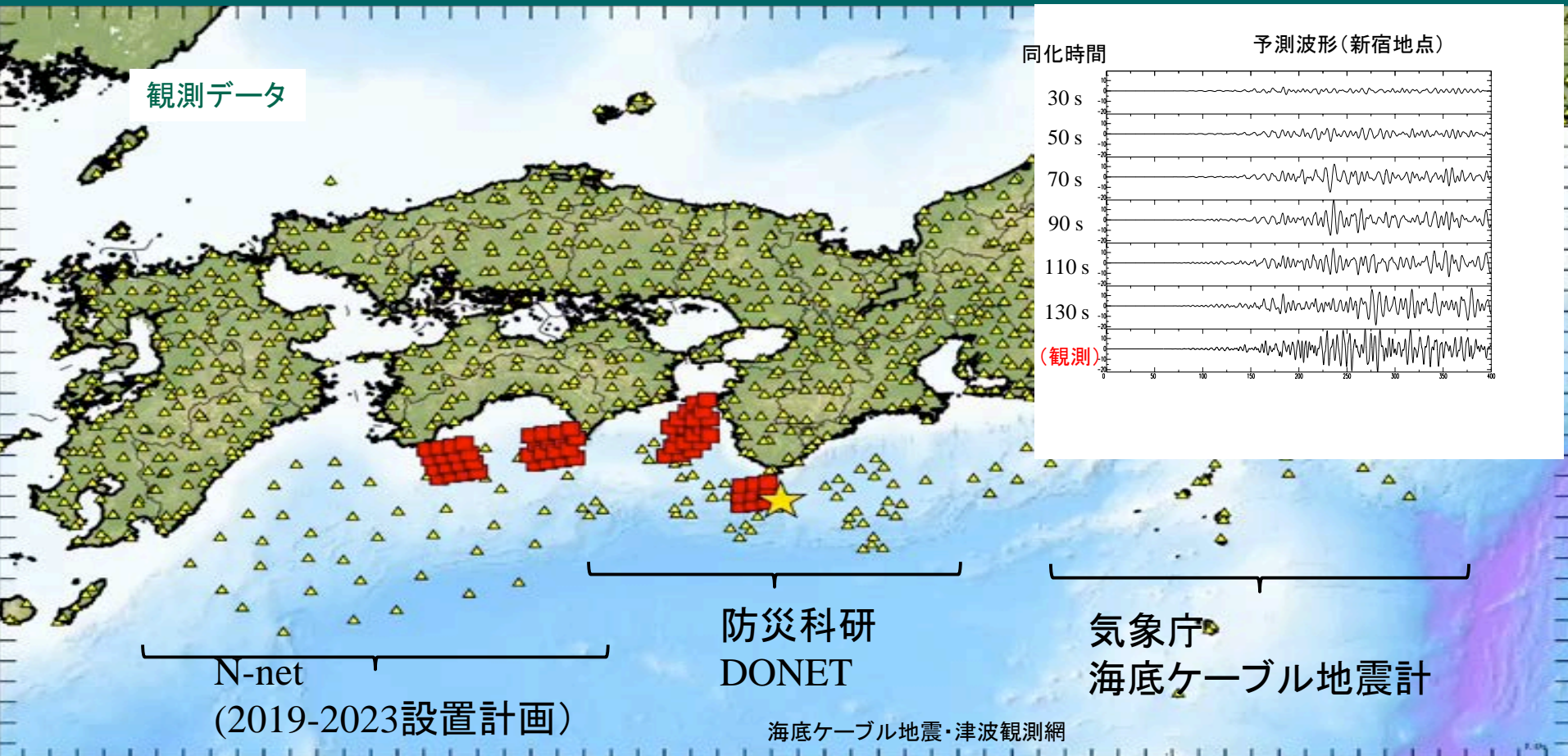
高速計算



- ・長周期地震動の波形を予測
- ・震源は最後まで推定しない

リアルタイム地震観測と高速計算環境により、揺れ(長周期地震動)の即時予測が可能になった

【成果④】 強震観測データ同化に基づく、長周期地震動の即時予測

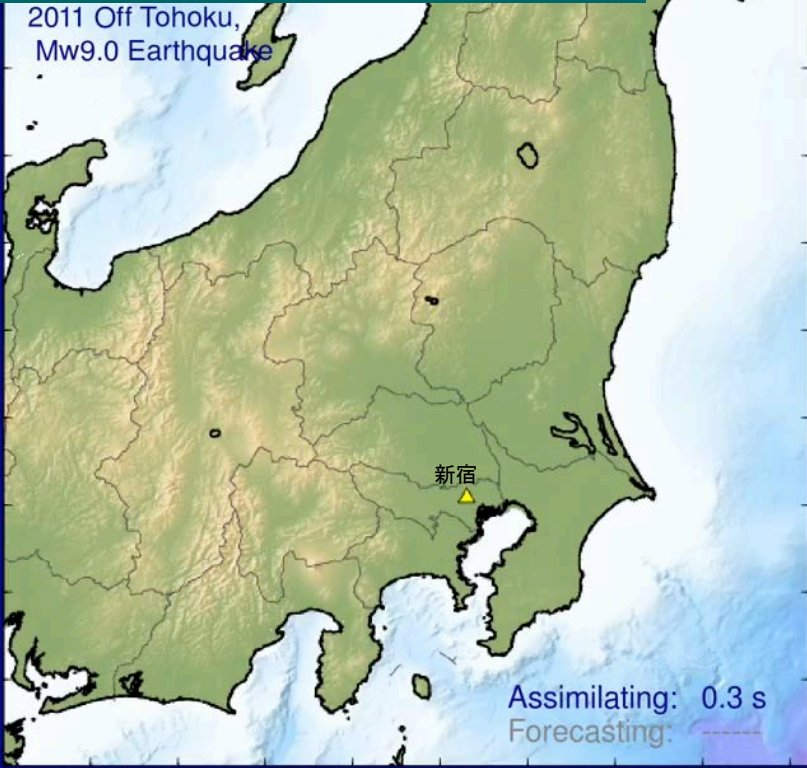


海陸リアルタイム観測データと、高速計算環境に設けた仮想地球との同化、そして地震の予測・防災へ

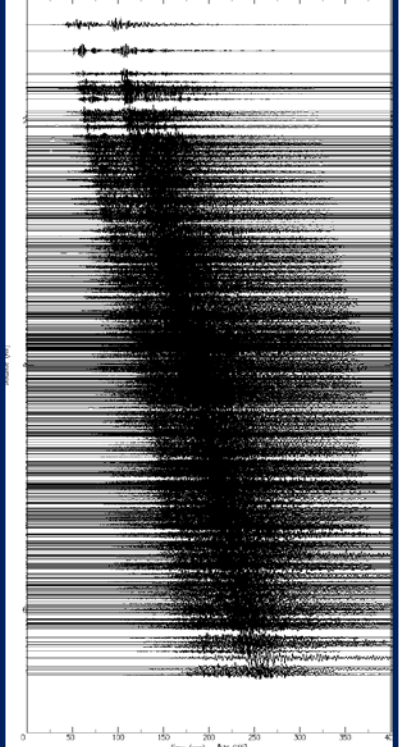
【成果④】 強震観測データ同化に基づく、長周期地震動の即時予測

Furumura et al., (2018)

2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の予測



2011年東北地方太平洋沖地震波形観測データ



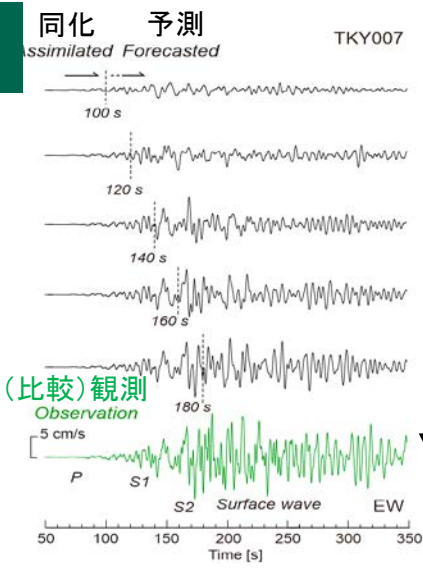
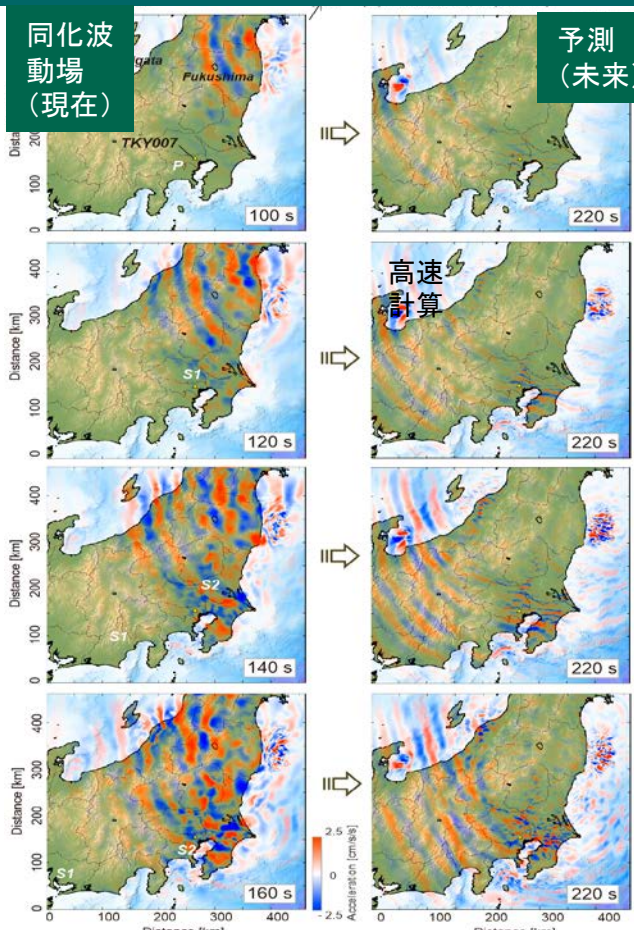
データ同化
・予測



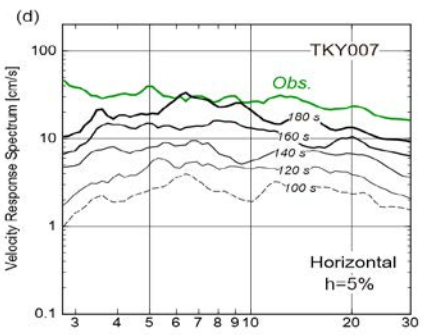
データ同化・予測 $x_n^f + W [y_n - Hx_n^f] \rightarrow x_n^a$

リアルタイム地震観測と地震波伝播シミュレーションの同化、そして長周期地震動の発生の実時予測

【成果④】 強震観測データ同化に基づく、長周期地震動の即時予測

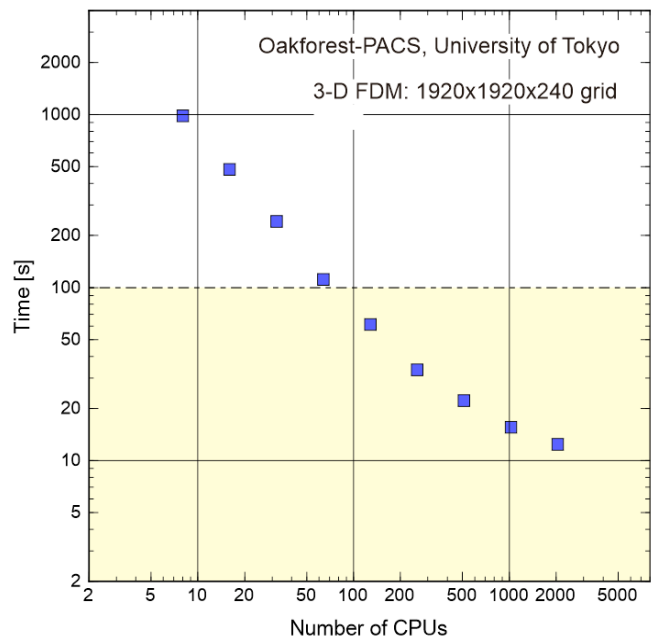


予測更新



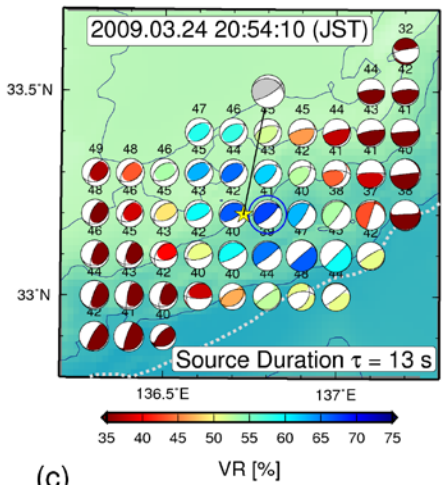
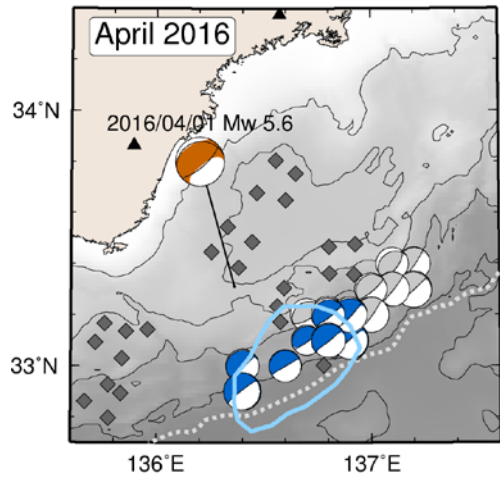
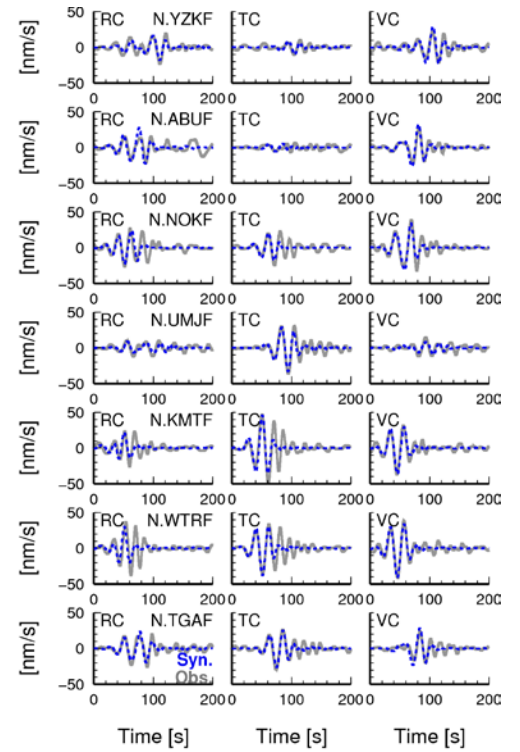
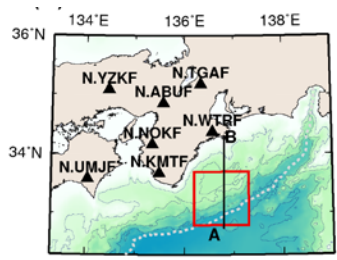
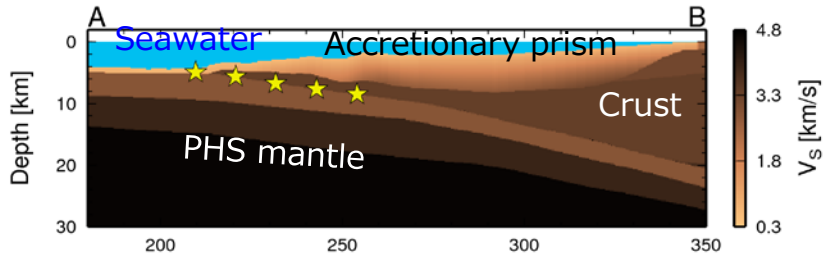
新宿地点の揺れの予測
(10秒毎に更新)

100秒間の波動伝播計算
→12秒(実時間の8倍高速)



リアルタイム地震観測と地震波伝播シミュレーションの同化、そして長周期地震動の発生未来予測

【成果】 3次元地下構造モデルを用いた南海トラフの地震活動解析



Takemura et al. (2018)

高精度な理論地震波形 (Green関数) の計算とデータベース化 → 地震活動の即時解析へ

【成果④】地震波伝播シミュレーションコード公開

Technical report | Open Access

Maeta, Takemura, Furumura (2017)

OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media

Takuto Maeta  , Shunsuke Takemura and Takashi Furumura

Earth, Planets and Space 2017 69:102

<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2> © The Author(s) 2017

Received: 27 February 2017 | Accepted: 14 July 2017 | Published: 26 July 2017

ES3向け最適化コード
% make arch=es3

*GitHUBにてコード公開中

<https://github.com/takuto-maeda/OpenSWPC>

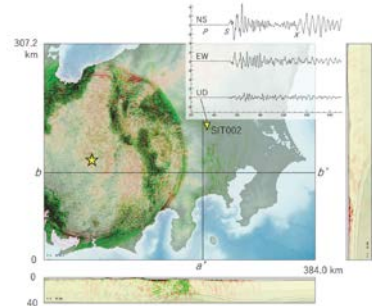


図1 1984年長野県西部地震の地震波伝播シミュレーションの例。地震発生から42秒後の地表および地下断面での地震波伝播の様子。右はKNET熊谷(SIT002)地点での3成分速度波形(シミュレーション結果)。この地震において、熊谷地方気象台で記録された顕著な後続波(小田・他, 1992; 山田・他, 2006)がNS成分の波形にS波から1分遅れて到着(X印)する様子が再現されている。

古村(2018), 日本地震学会ニュースレター

表1 地震動シミュレーションの諸元(低、中、高解像度モデル)と、必要な計算機資源量の見積もり。括弧内は中解像度モデルの各パラメータを基準とする倍率を表す。

	低解像度モデル	中解像度モデル	高解像度モデル
格子サイズ	400 m (4)	100 m (1)	25 m (1/4)
最大周波数	0.19 Hz (1/4)	0.78 Hz (1)	3.1 Hz (4)
格子数	768*960*100 (1/64)	3,072*3,840*100 (1)	12,288*15,360* (4)
タイムステップ	0.024 s (4)	0.006 s (1)	0.0015 s (1/4)
総ステップ数	6,250 (1/4)	25,000 (1)	100,000 (4)
計算機メモリ	16 GB (1/64)	1 TB (1)	64 TB (64)
計算時間	1.2 時間	8.5 時間	9.4 時間
[使用計算機]	[Mac Pro, 1CPU]	[E1C, 36 CPU]	[ES, 1024 node]

地震波伝播シミュレーションの発展に向けて、地震波伝播計算Openコードの開発(ES3最適化)、公開

【成果④】地震波伝播シミュレーションコード公開—その後



Computers & Geosciences

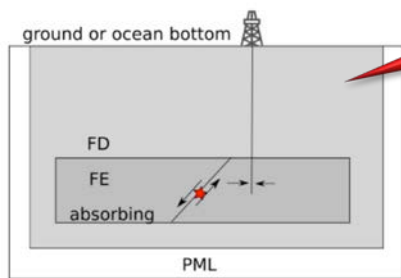
Volume 113, April 2018, Pages 54-69



Research paper

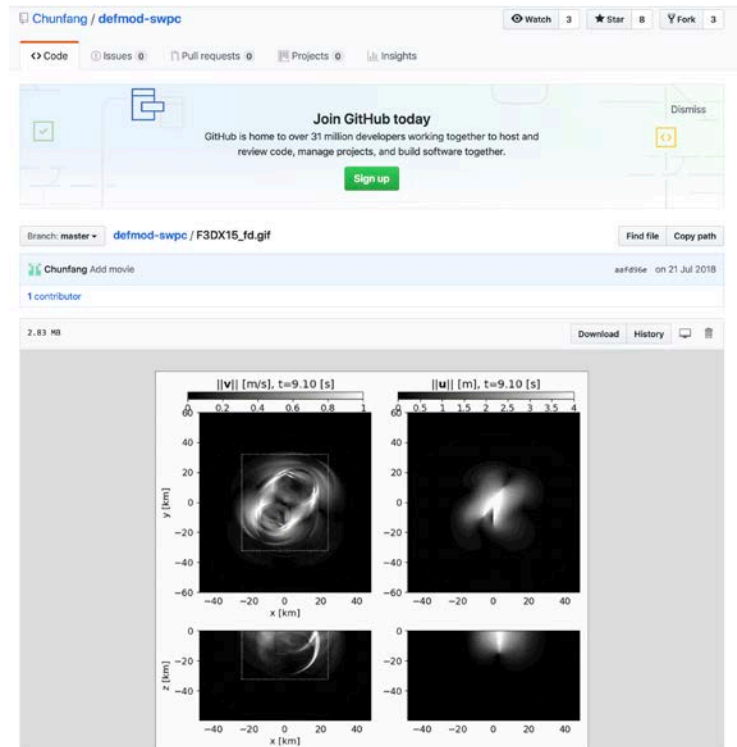
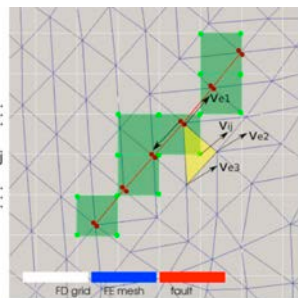
A finite element and finite difference mixed approach for modeling fault rupture and ground motion

Chunfang Meng , Hua Wang



OpenSWPC
Maeda et al.
(2017)

Hybrid
FDM \leftrightarrow FEM



成果が成果を生む→良循環・成果の最大化

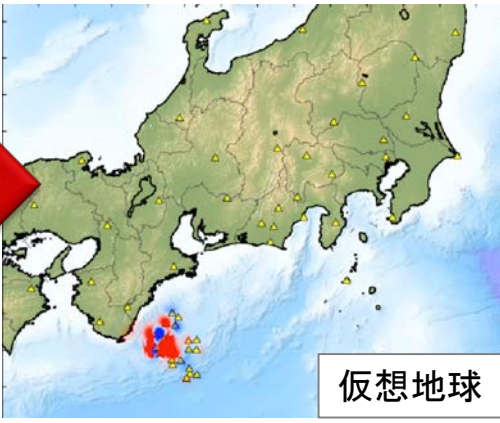
オープンコード公開による波及効果—さらなる研究発展 (FEM-FDM結合地震発生—波動伝播計算コード)

地球シミュレーション：地震の強い揺れの予測、そして防災に向けて

(A)リアルタイム
地殻活動観測データ



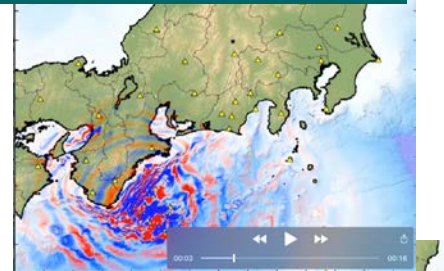
(B1)高速計算
地球現象の模倣



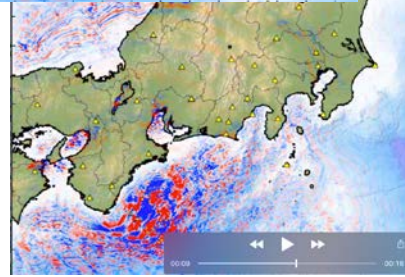
同化

(B2)高速計算
未来予測

予測



予測



全国センサーネット
高速データ通信



データ同化
リアルタイム
計算機



未来予測
高速計算機

大容量
高速
ストレージ

グリーン関数
データベース

地球シミュレータ利用成果(2017-2018)のまとめ

1. 大地震で発生する長周期地震動

- ・ 東北地方太平洋沖地震(M9)による長周期地震動の評価
- ・ 南海トラフ巨大地震で心配される長周期地震動の予測

2. 浅い、地殻内地震のP波により生まれる長周期地震動(PL波)

- ・ PL波の生成メカニズムと、表層地盤の効果
- ・ マントルを伝わる超長周期W相と、地殻を伝わるPL波の相似性

3. データ同化・高速計算に基づく長周期地震動の予測に向けて

- ・ 現実の地震波動場と計算を同化、高速計算により未来の揺れを先取り
- ・ グリーン関数(伝達関数)データベース併用した、実用的な予測

4. ES3最適化大規模並列計算コードの公開

- ・ 計算地球科学コミュニティの底上げ・拡大
- ・ オープンサイエンス、新たな研究展開