



東京大学情報基盤センター  
INFORMATION TECHNOLOGY CENTER, THE UNIVERSITY OF TOKYO



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 人類と地球を護るスパコン： 「計算・データ・学習」融合による 地震シミュレーション

東京大学情報基盤センター  
中島研吾



# 謝 辞

- 東京大学地震研究所
  - 古村 孝志 教授
  - 鶴岡 弘 准教授
  
- 富士通株式会社



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



FUJITSU

- 中島研吾(東京大学情報基盤センター)
- 古村孝志(東京大学地震研究所)
- 鶴岡 弘(東京大学地震研究所)



東京大学情報基盤センター

INFORMATION TECHNOLOGY CENTER, THE UNIVERSITY OF TOKYO



東京大学

THE UNIVERSITY OF TOKYO

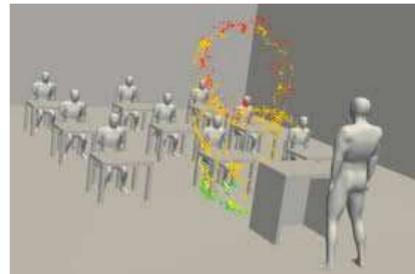
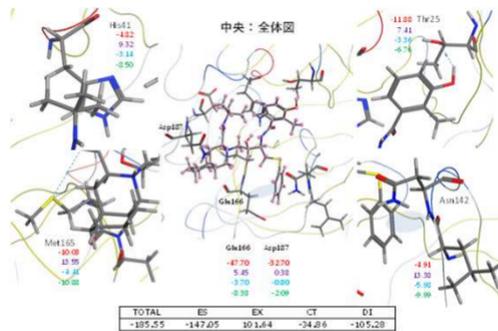


# 人類と地球を護るスパコン



**Wisteria  
BDEC-01**

自然災害, COVID-19に関連したシミュレーション⇒人類と地球を護る！



[資料提供: 望月祐志教授(立教大学)]

[資料提供: 坪倉誠教授(神戸大学)]

- 大地震の際に高層ビル等と共振し、大きく長く揺する被害をもたらす長周期地震動の予測と災害軽減に向け、全国に展開された地震観測網の観測データと地震波動伝播のシミュレーションを融合した長周期地震動の予測手法が提案されている
- 古村(東大地震研)らは三次元長周期強震動シミュレーションと観測データによる同化を実施するコードSeism3D/OpenSWPC-DAF(Data-Assimilation-Based Forecast)を開発している。
- 本研究は、全国地震観測データ流通ネットワーク「JDXnet」による観測データを受信、処理し、Seism3D/OpenSWPC-DAFによる「データ同化・シミュレーション」融合をリアルタイムに実施するフレームワークをスーパーコンピュータ上に構築し、
- 長周期地震動に対する安全な防災行動、減災を実現することを最終的な目標とする。

# 地震波：様々な波長の成分の合成

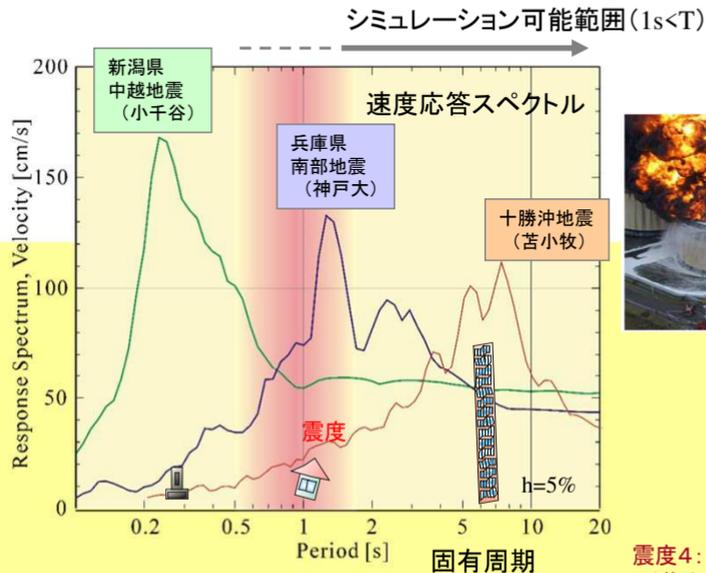
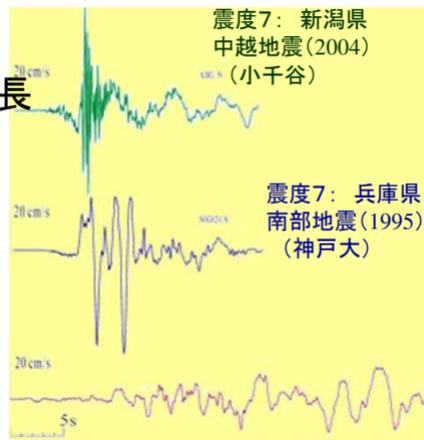
- 卓越成分と同じ固有周期の建物がもっとも激しく揺れる：一種の「共鳴」

– 人工構造物の固有周期(振動周期)は0.1~10 sec 大きな建物ほど大きい

- 長周期の波は長く続き、遠くまで届く：測定場所によってもスペクトル分布は異なる

– どの成分が卓越的になるか、というメカニズムは実は良くわかっていない(地下構造不均質性, 破壊箇所特性)

- 中越(2004)短
- 神戸(1995)中
- 十勝沖(2003)長

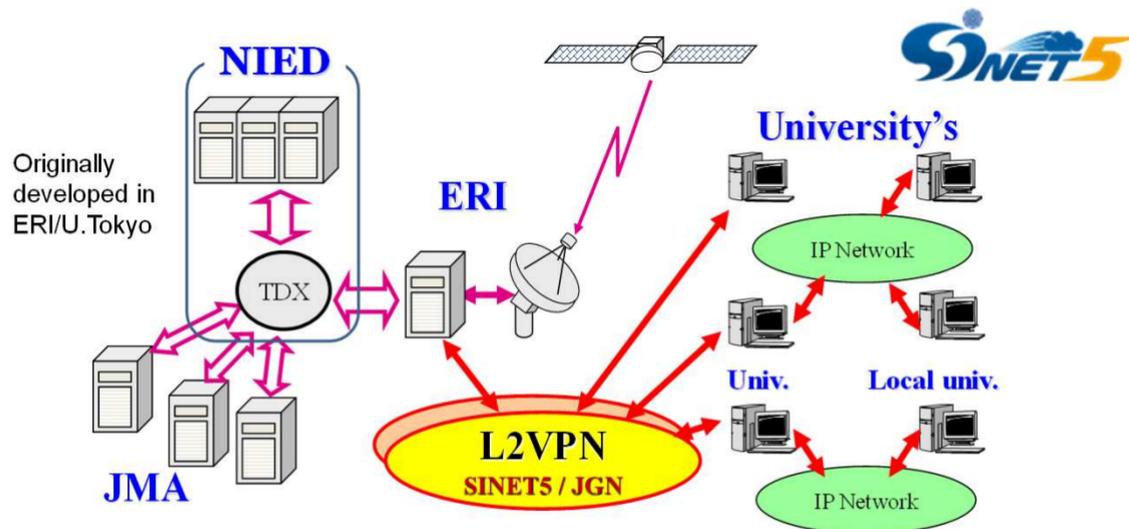


震度4：十勝沖地震(2003)  
(苫小牧)

[画像提供：  
古村孝志教授  
(東大・地震研)]

# 全国地震観測データ流通ネットワーク「JDXnet」

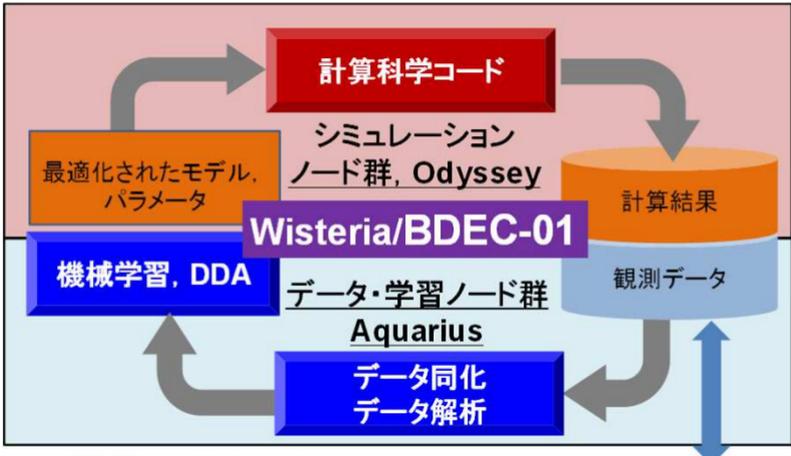
- 国内地震観測点の観測データ(約2,000点, 100Hz, 3方向)をSINET経由でリアルタイムに取得可能
  - 気象庁, 東大地震研, 防災科技研, 各大学
  - 1日のデータ量: 100GB級



[資料提供: 鶴岡弘准教授(東大・地震研)]

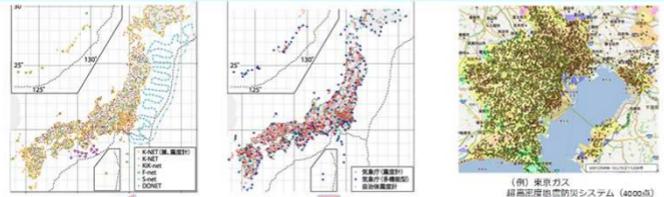
# 三次元地震シミュレーション+リアルタイムデータ同化/観測

## JDXnetの観測データを利用したリアルタイムデータ同化/観測

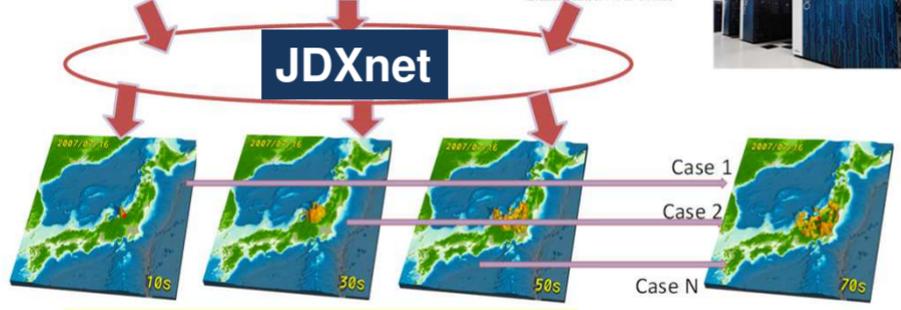
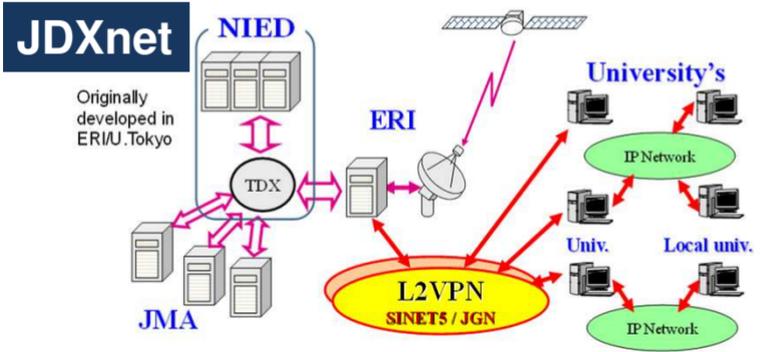


**外部リソース**  
Server, Storage, DB, Sensors他

Observation Network for Earthquake:  $O(10^5)$  Points



[c/o Furumura]

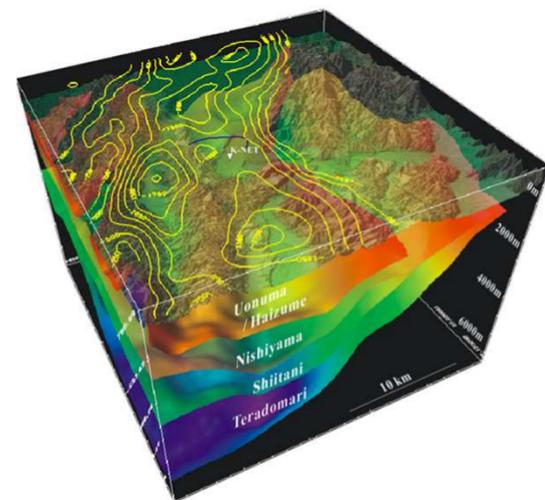
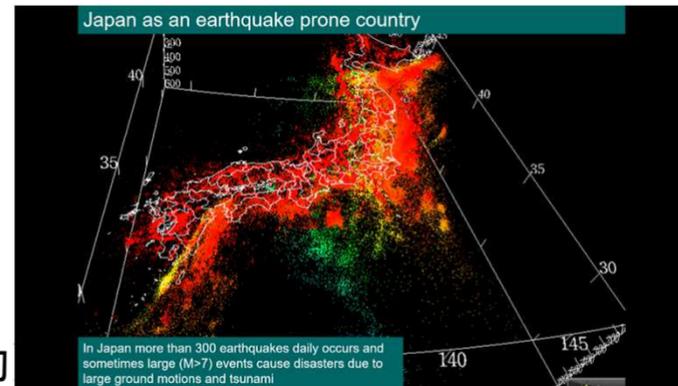


Real-Time Data/Simulation Assimilation  
Real-Time Update of Underground Model

[資料提供: 古村孝志教授 (東大・地震研)]

# 地震シミュレーション： 不確実性 (Uncertainty) と 隣り合わせ

- 地震シミュレーション (強震動シミュレーション)
  - 応力蓄積過程⇒動的破壊⇒地震波動伝播 (強震動)
- 地下構造⇒不均質・不確定
- シミュレーション・観測融合が不可欠
- 伝統的なシミュレーション
  - いわゆるフォワードモデリング
  - 「メカニズムの理解」の域を出ない
- データ同化・リアルタイム観測と融合した手法の開発が必要
  - シミュレーション (Simulation) : 予測 + 観測・データ同化 (Data Assimilation) : 補正

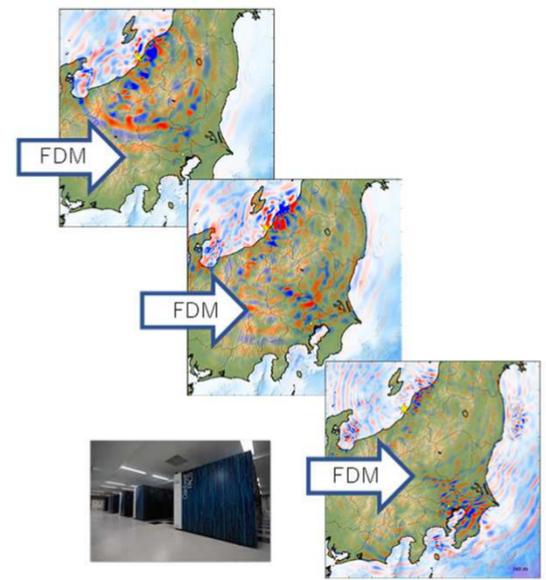
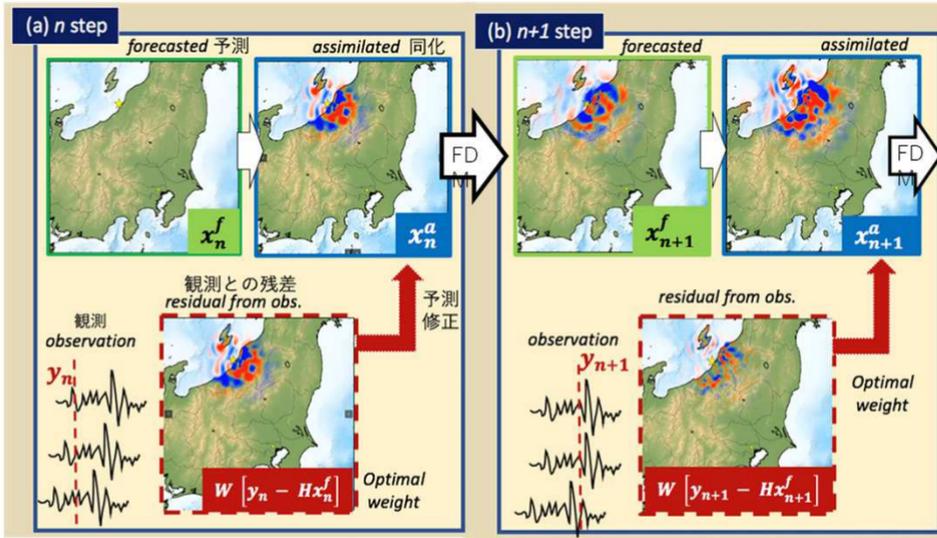


[c/o Prof. T. Furumura, ERI/U.Tokyo]

# 「A+S:同化+シミュレーション」⇒「Pure S:シミュレーション予測」

$$\begin{aligned}
 \text{Assim. Comp.} \quad x_n^a &= x_n^f + W(y_n - Hx_n^f) \\
 \text{Comp.} \quad x_{n+1}^f &= Fx_n^a
 \end{aligned}$$

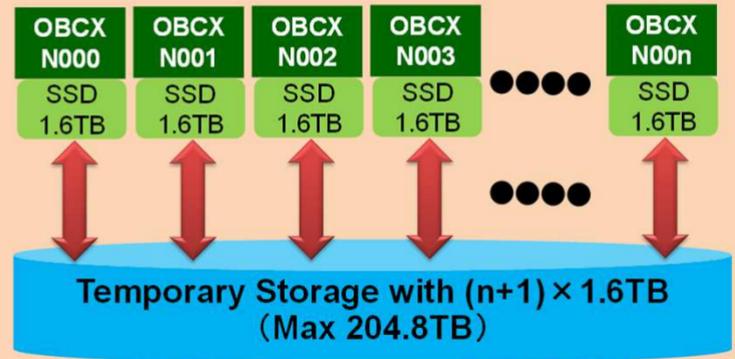
$n$ : Time Step  
 $W$ : Weighting Matrix  
 $F$ : Wave Propagation simulation



# Oakbridge-CX (OBCX)

- 全1,368ノードのうち128ノードにSSD (Solid State Drive) 搭載
  - Intel SSD + BeeGFS
    - 容量: 1.6 TB/node
    - 読み書き性能: 3.20/1.32 GB/s/node
    - BeeOND (BeeGFS-on-Demand) により200+TB (128 × 1.6) の高速ファイルシステムとして使用可能
  - データ科学アプリケーション
    - ソフトウェア類も充実
  - ステージング, チェックポイント
- 128ノードのうち16ノードはSINET経由で外部リソース(サーバー, ストレージ, センサーネットワーク)に直接接続
  - 外部接続ノード

## BeeGFS on Demand (BeeOND)



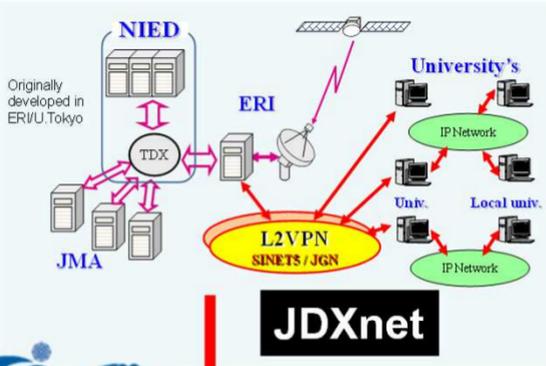
Total: 1,368 nodes

128 nodes  
with SSD

16

OBCXの16ノード(外部接続ノード)  
SINET経由で外部計算機資源に直接接続,  
BDECにおけるデータ・学習ノード群と同様の  
役割

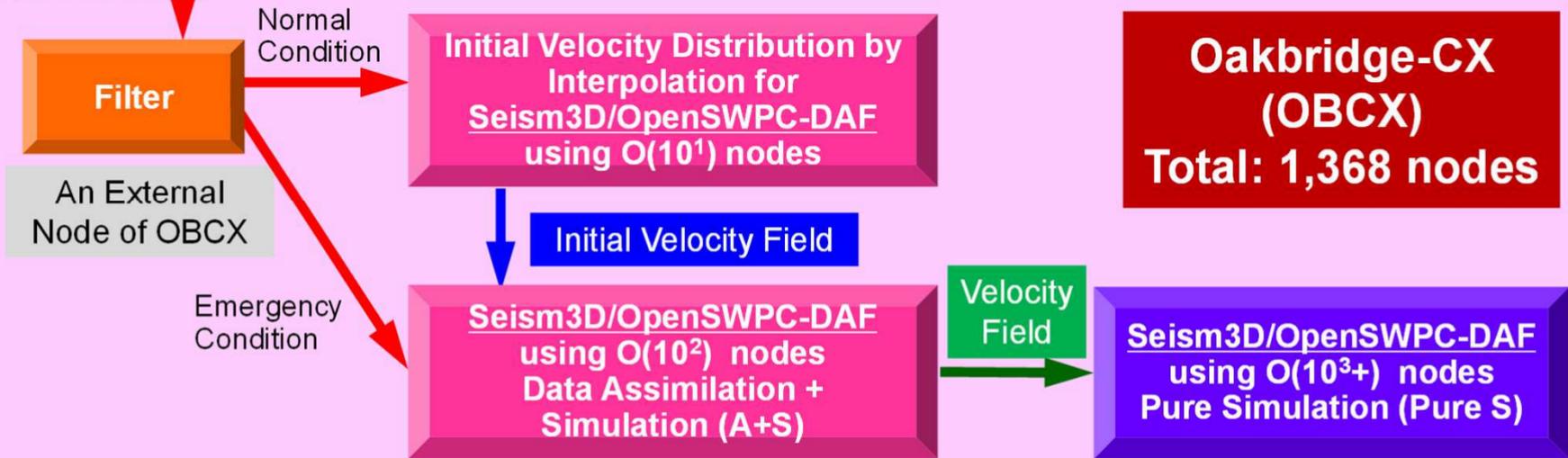
SINET5



# 三次元地震シミュレーション＋ リアルタイムデータ同化/観測

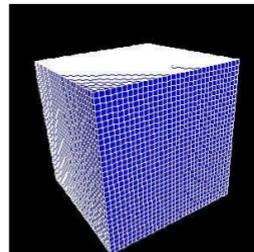
JDXnetの観測データ:リアルタイムデータ同化/観測

- ・通常時:フィルタリング⇒観測データ内挿
- ・緊急時:データ同化＋シミュレーション



# 計算例: 2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.6)

- 観測データ: あらかじめ外部サーバ(mini-mdx)に格納
- OBCX外部接続ノードで受け取ってフィルタリング
- 「データ同化+シミュレーション(A+S)」と「シミュレーション予測(Pure S)」は分離したプログラムだが, 使用ノード数は同じで実施
- 動画処理はシミュレーション終了後実施(O(10)秒)



## Seism3D/OpenSWPC-DAF

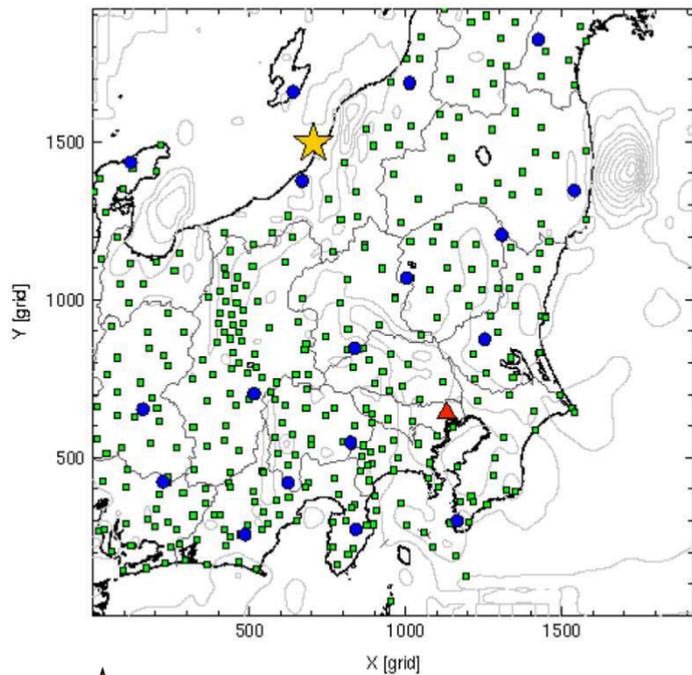
- 三次元有限差分法(Finite Difference Method), Optimal Interpolation Technique
- メッシュ数  $1,920 \times 1,920 \times 240$  (約8.85億)
- メッシュ幅 240m(立方体)
- $460.8 \text{ km} \times 460.8 \text{ km} \times 57.6 \text{ km}$

$$v_p^n = v_p^{n-1} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xp}^{n-1/2}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yp}^{n-1/2}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zp}^{n-1/2}}{\partial z} \right) \Delta t \quad (p = x, y, z)$$

$$\begin{array}{l} \text{Assim. Comp.} \quad \text{Residual Obs. Comp.} \\ \mathbf{x}_n^a = \mathbf{x}_n^f + \mathbf{W}(\mathbf{y}_n - \mathbf{H}\mathbf{x}_n^f) \\ \text{Comp.} \quad \text{Assim.} \\ \mathbf{x}_{n+1}^f = \mathbf{F}\mathbf{x}_n^a \end{array} \quad \begin{array}{l} n: \text{Time Step} \\ \mathbf{W}: \text{Weighting Matrix} \\ \mathbf{F}: \text{Wave Propagation simulation} \end{array}$$

# 2007年新潟県中越沖地震 (Mw=6.6)

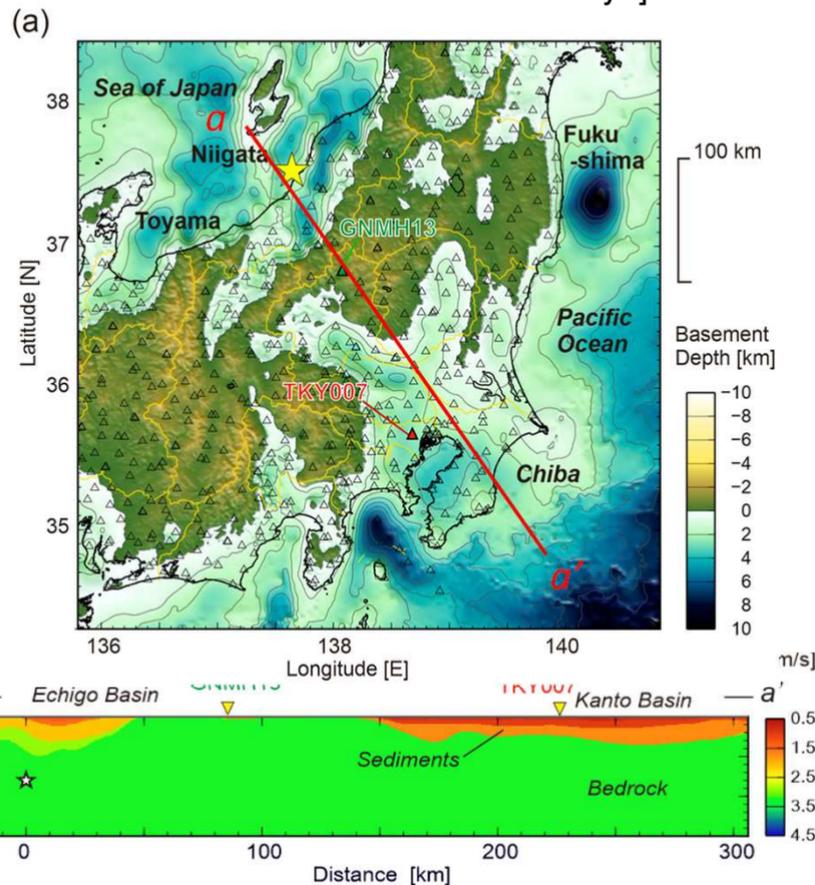
[c/o Prof. T. Furumura,  
ERI/U.Tokyo]



★ Epicenter

■ Hi-net (Short Period) 349 pts

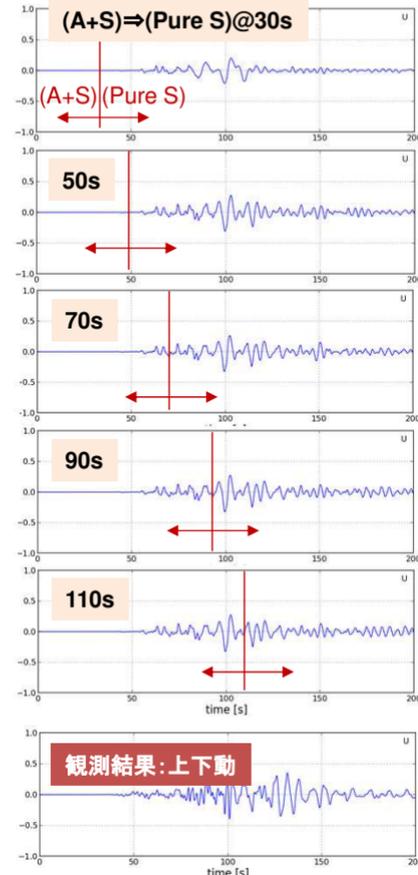
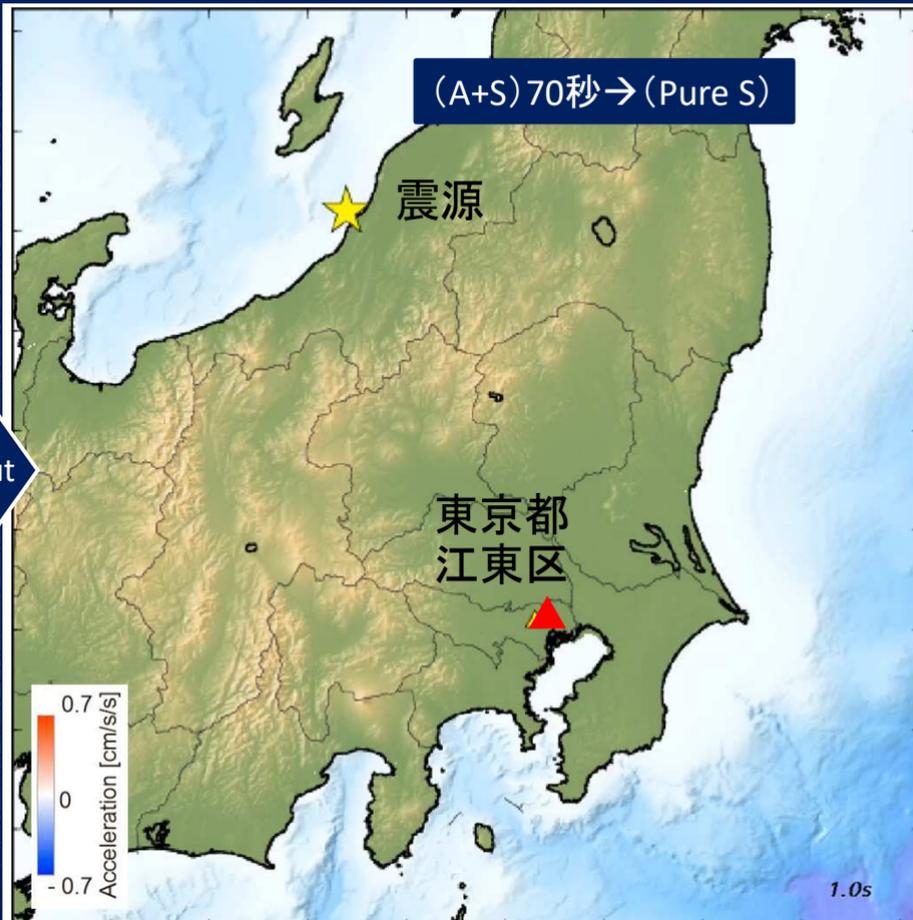
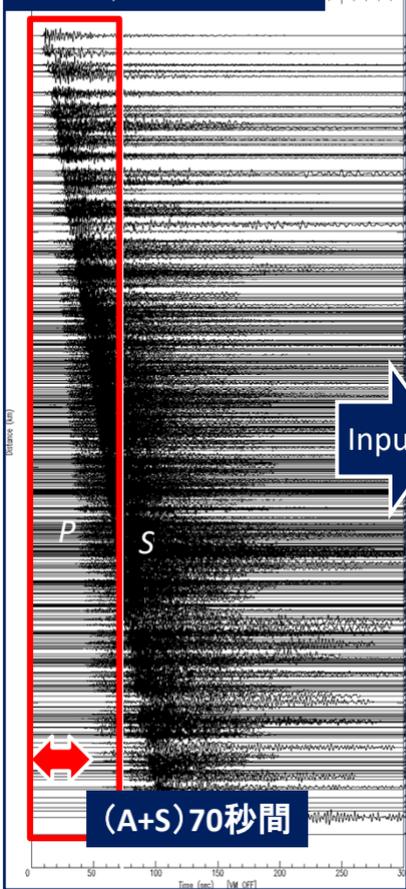
● F-net (Broadband) 18 pts



# 2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.6)

東京都江東区 ▲ (N.KOTH)  
 N 35° 37.0'  
 E 139° 46.9'

482 K-NET, KiK-net Observation



# 計算例:

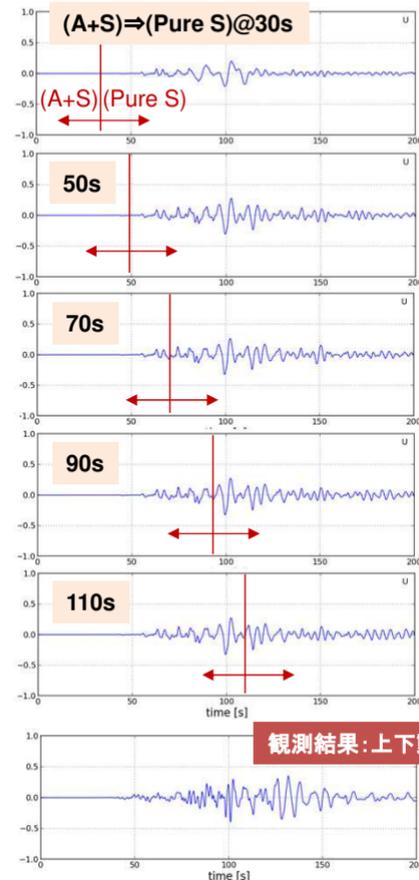
## 2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.6)

### • (A+S)

- 観測結果を受け取りながら実施するため、実時間よりは前に進めない
- ただ、フィルタリング等の前処理を考えると、実現象の半分くらいの時間で計算できると良い

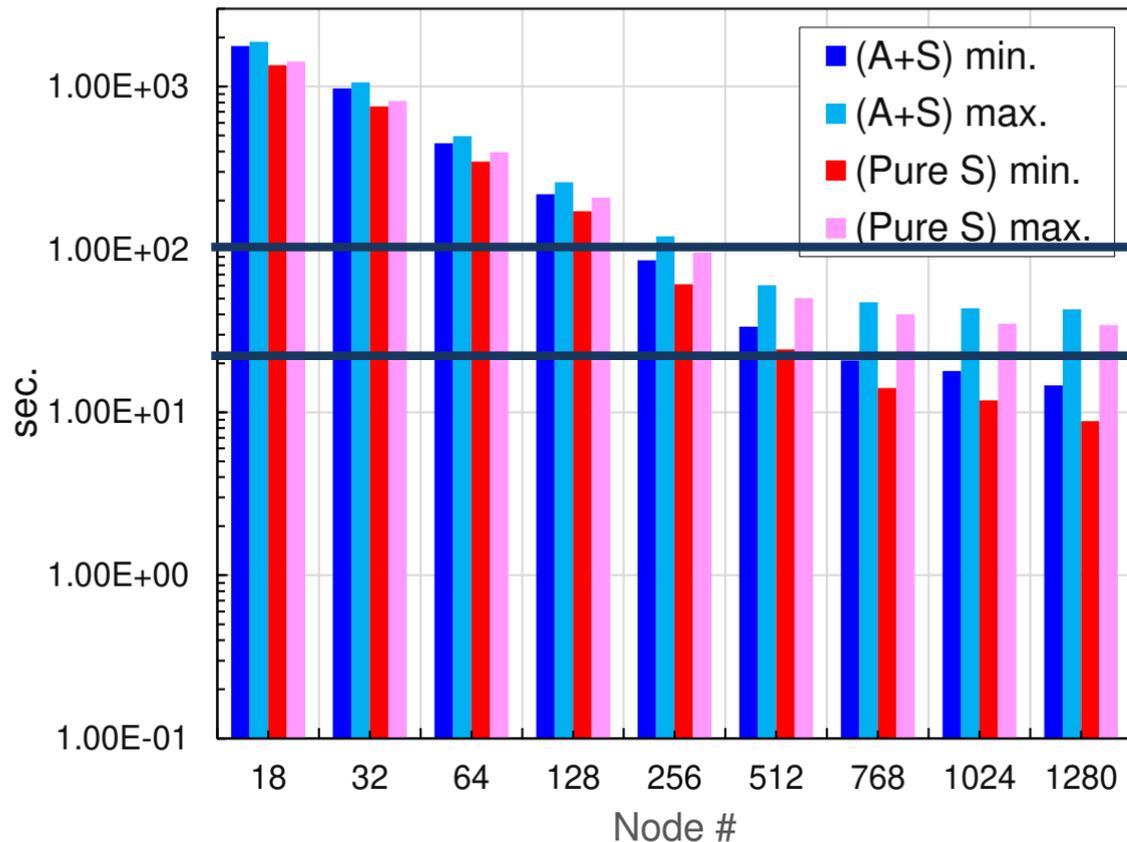
### • (Pure S)

- 実現象の10分の1くらいで計算ができると良い
- 例えば、50秒で(A+S)⇒(Pure S)へ切り替え、さらにその後の50秒分を5秒で計算できれば、震源から約250km離れた東京にピーク波が到着する時間(地震発生から100秒程度)を十分に予測できる



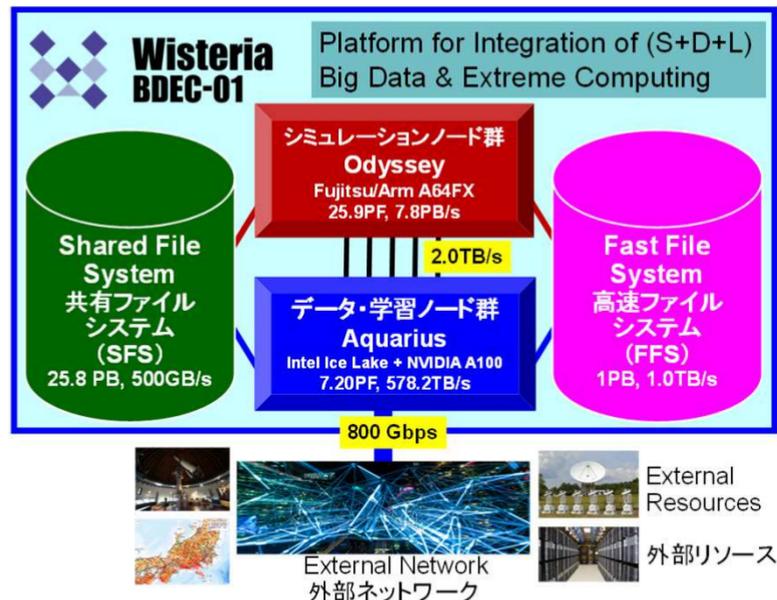
# 計算時間:200秒分

- I/O用通信が含まれている
  - min.:通信含まず
  - max.:通信含む
- (A+S)
  - 現実の半分(100秒)で計算できれば良い
  - 300-400ノード程度
- (Pure S)
  - 現実の10分の1(20秒)が求められる
  - 1,000ノード以上



# まとめ・今後の計画等

- $O(10^3)$ ノード程度の計算機資源を使用することで、観測データ同化による長周期地震動リアルタイム予測の可能性が示された
- 新システム(Wisteria/BDEC-01)への移植
- プログラム最適化
  - I/O高速化・削減
  - 「計算+通信」オーバーラップ
- 現実に近い地下構造モデル生成
  - Mw~3.0程度の地震データを元に、フォワードモデリング, 逆解析, データ同化(レプリカ交換モンテカルロ法・4次元変分法等), 機械学習等を組み合わせ, 三次元地下構造モデル改善を試みる



## 本研究成果

リアルタイム処理対応可能な  
シミュレーション・データ同化  
コード群, 必要データセット

様々なデータセット：計算結果,  
精密地下3D構造モデル



東大スパコン群, HPCIストレージ上で  
保存, Webから参照, 計算実行  
可能とする

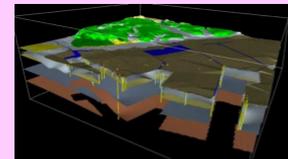


## 「防災・減災」へ向けた利用・展開

緊急事態向け  
インフラ整備

避難計画・  
制度策定

関連アプリ・データ群整備連携  
国交省「i-Construction」  
産総研「都市域地質地盤図」



データ群・知見  
避難シミュレーション等  
への利用

啓蒙・教育  
シミュレーション体験

官公庁

自治体

研究機関

建設

交通

保険

教育機関