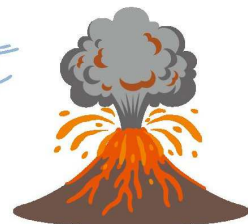
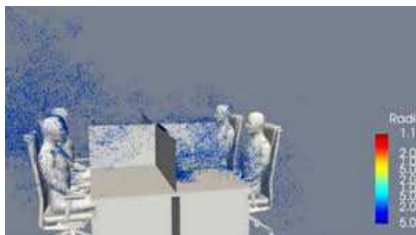
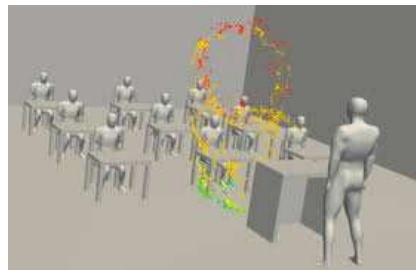
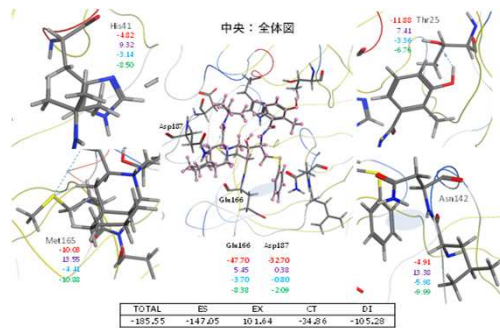


# 人類と地球を護るスパコン:「計算・データ・学習」融合による地震シミュレーション(1/3)

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!

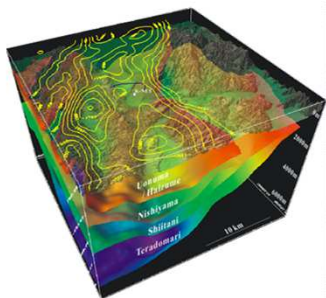
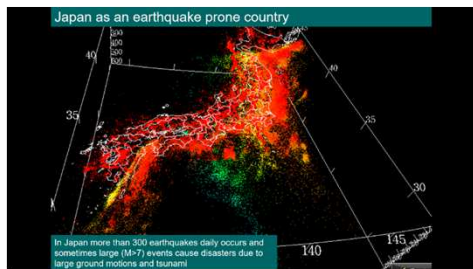


[資料提供: 望月祐志教授(立教大学)]

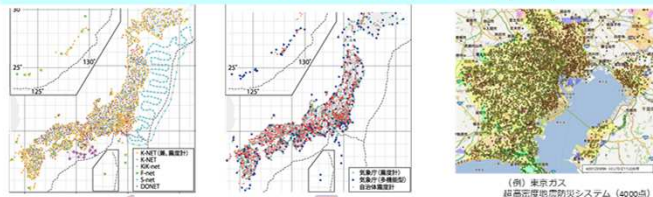
[資料提供: 坪倉誠教授(神戸大学)]

# 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(2/3)

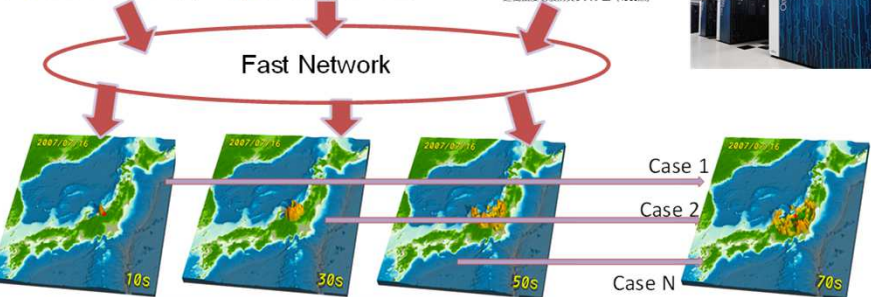
強震動シミュレーション, JDXnet(地震観測網)⇒リアルタイムデータ同化



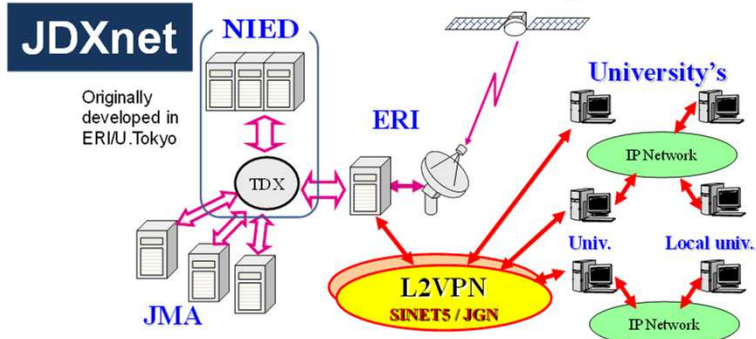
Observation Network for Earthquake:  $O(10^5)$  Points



[c/o Furumura]



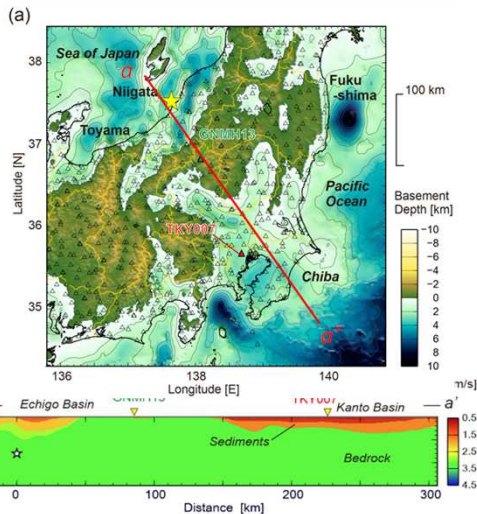
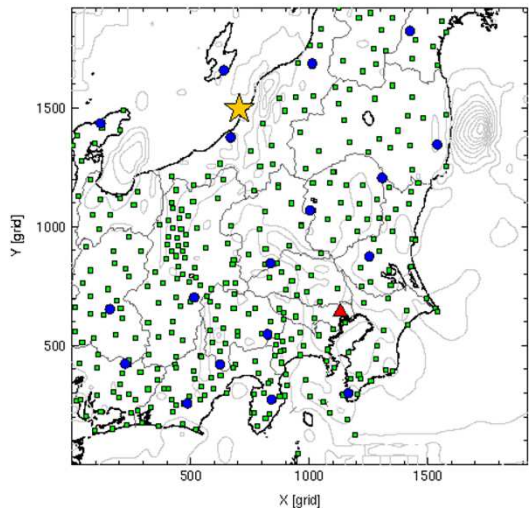
Real-Time Data/Simulation Assimilation  
Real-Time Update of Underground Model



[資料提供: 古村孝志教授, 鶴岡弘准教授(東大・地震研)]

# 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(3/3)

2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.0):350点の地震観測点



講演者:中島 研吾  
(東京大学情報基盤センター・教授)



10月28日(土)12:30-12:45

[資料提供:古村孝志教授, 鶴岡弘准教授(東大・地震研)]

- 大地震の際に高層ビル等と共振し、大きく長く揺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

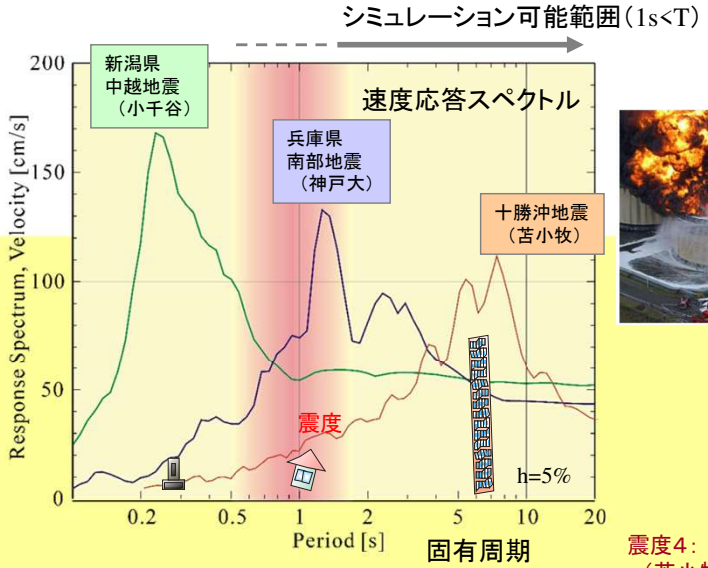
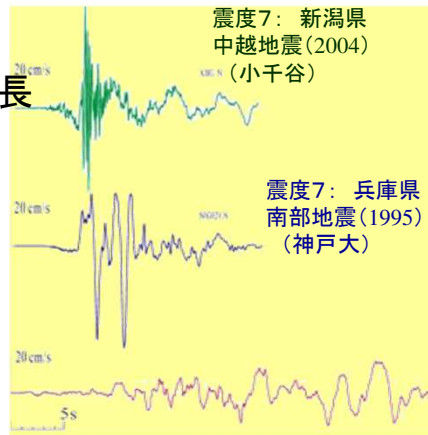
• 卓越成分と同じ固有周期の建物がもっとも激しく揺れる：一種の「共鳴」

– 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

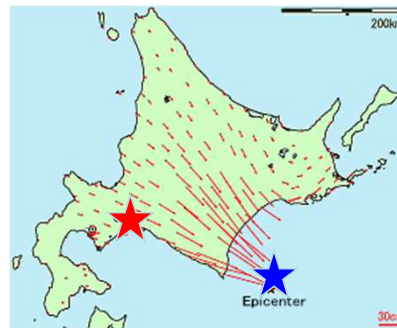


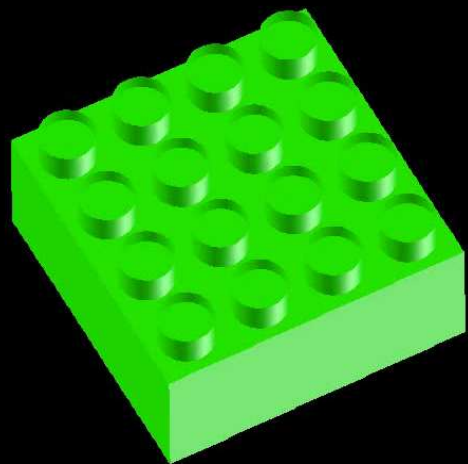
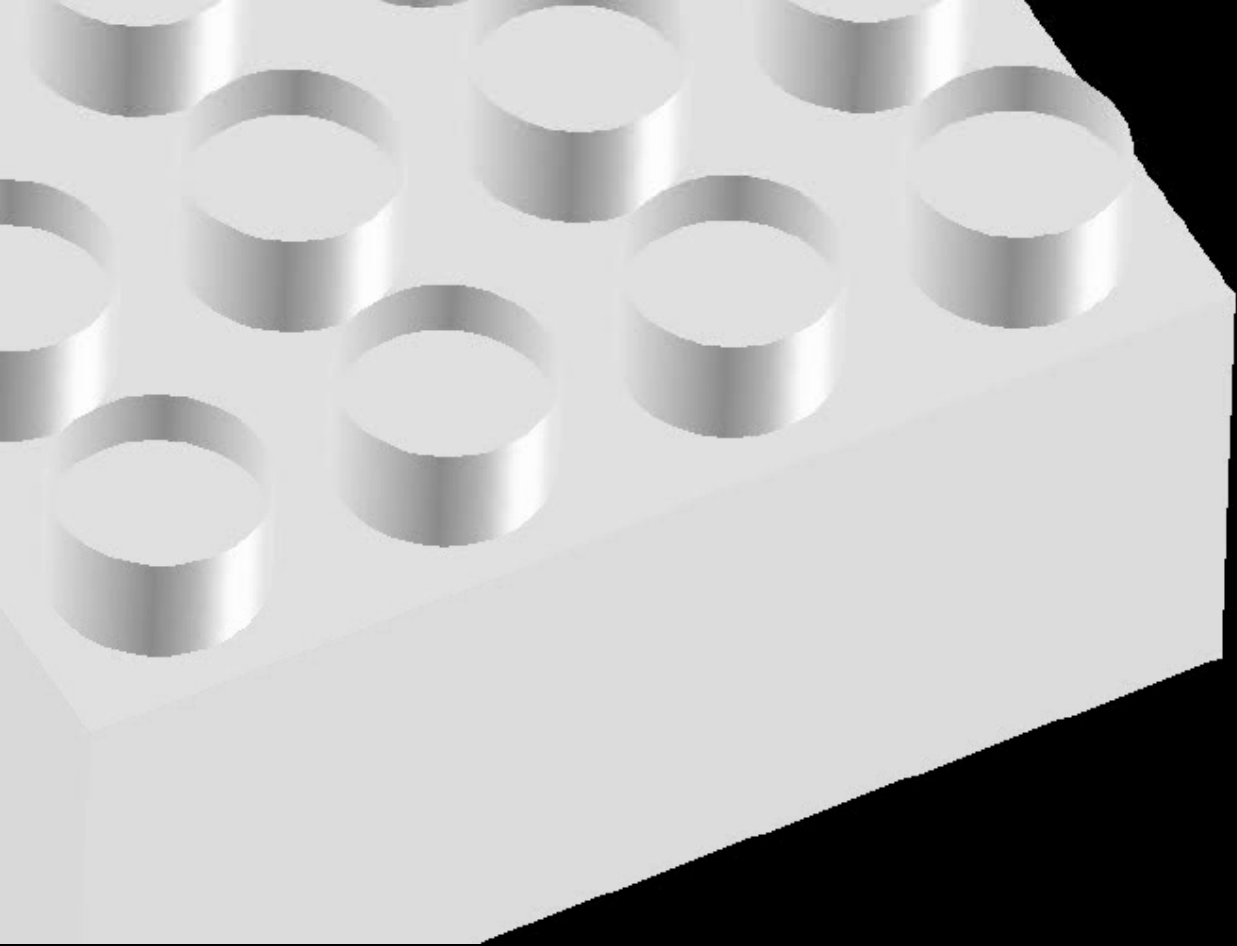
震度4：十勝沖地震(2003) (苫小牧)

[画像提供：  
古村孝志教授  
(東大・地震研)]

# 2003年 十勝沖地震：長周期地震波動

震源から200km以上離れた，苫小牧の石油タンクが激しく揺れ，金具がこすれた火花が，液面揺動（スロッシング）する石油に引火して大火災に





2022年9月10日，札幌新千歳から羽田へ  
向かう機上にて(苫小牧上空)



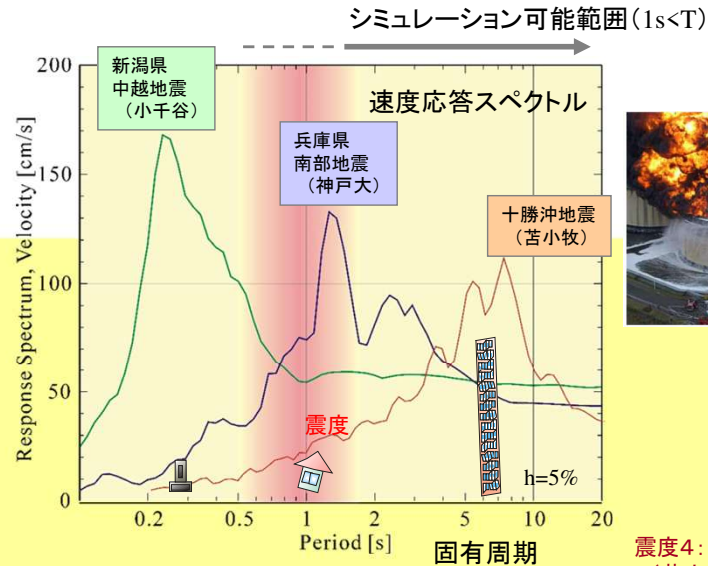
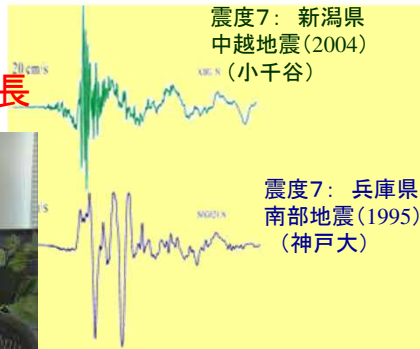


# 地震波：様々な波長の成分の合成

- 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, 破壊箇所の特性)

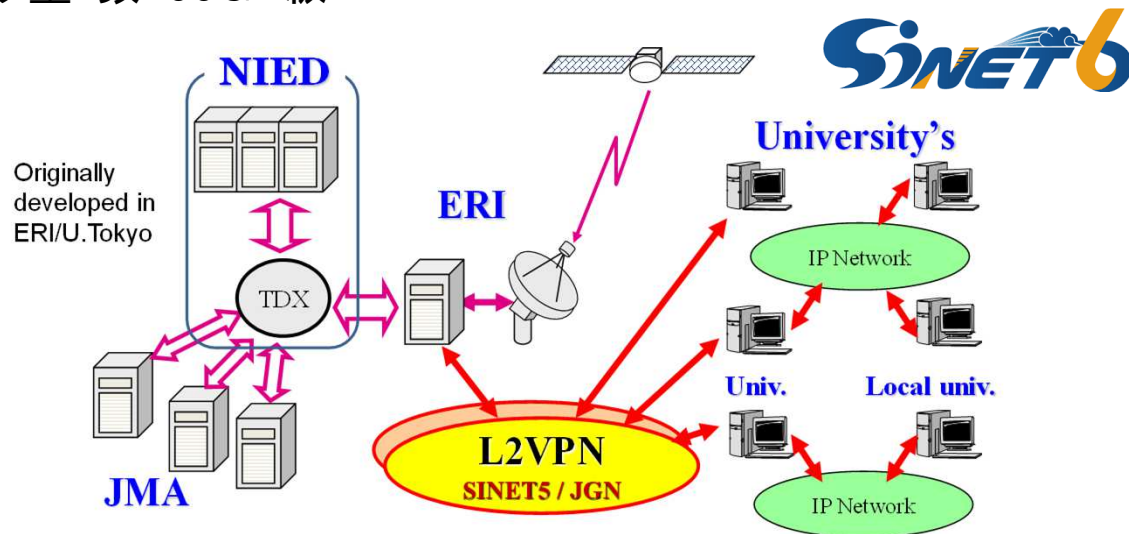
- 中越(2004)短
- 神戸(1995)中
- 十勝沖(2003)長



震度4: 十勝沖地震(2003) (苫小牧)

# 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: 数100GB級



[資料提供: 鶴岡弘准教授(東大・地震研)]

# 地震波動伝播(強震動) シミュレーション

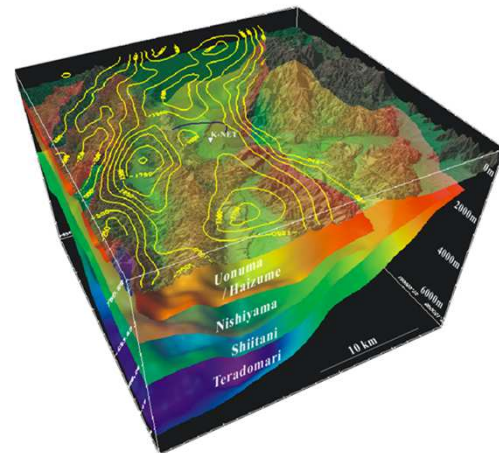
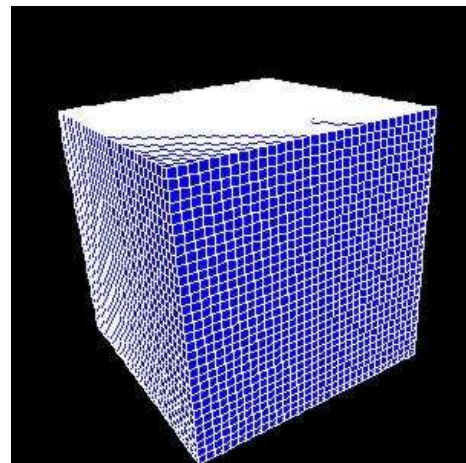
Seism3D/OpenSWPC-DAF  
[Furumura et al.]

Seismology : 地震学

- 偏微分方程式(三次元運動方程式)を差分法(Finite Difference Method)によって解く

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

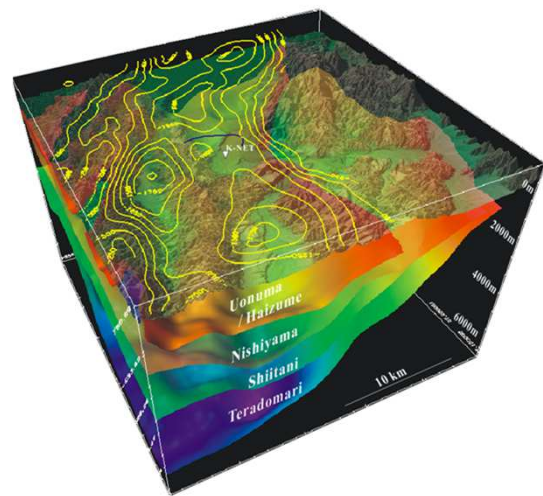
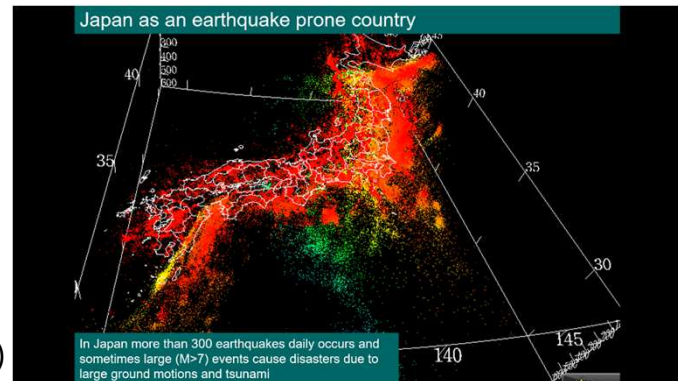
- 差分法⇒空間を細かい格子(メッシュ)に分割する
  - 直方体・立方体:規則正しい均一なメッシュ
  - 分割が細かいほど,精度は上がるが計算量が増える⇒スパコンが必要
  - 今回の2007年中越沖地震では9億近いメッシュ数



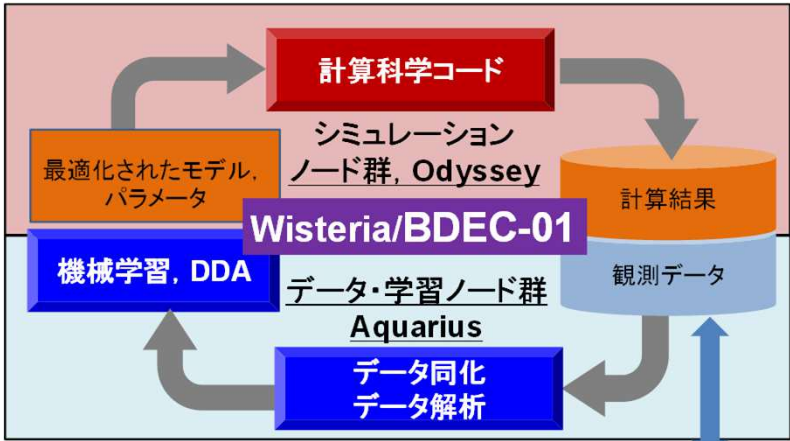
[画像提供:古村孝志教授(東大・地震研)]

# 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



[画像提供: 古村孝志教授 (東大・地震研)]

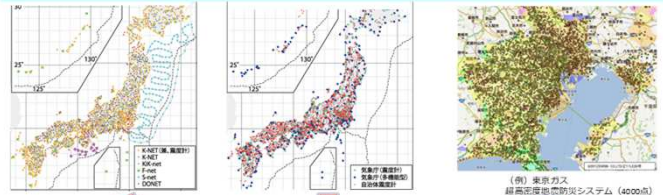


# 三次元地震シミュレーション+リアルタイムデータ同化/観測

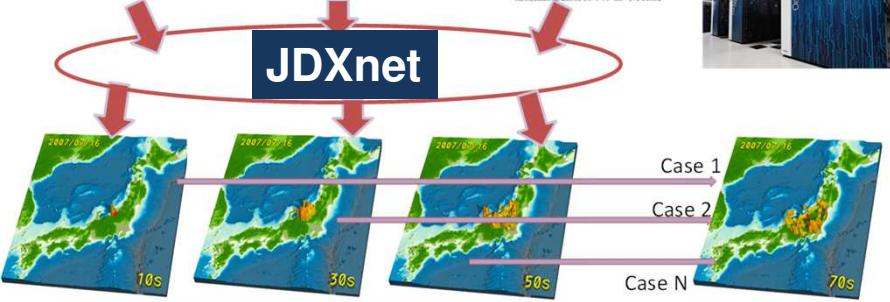
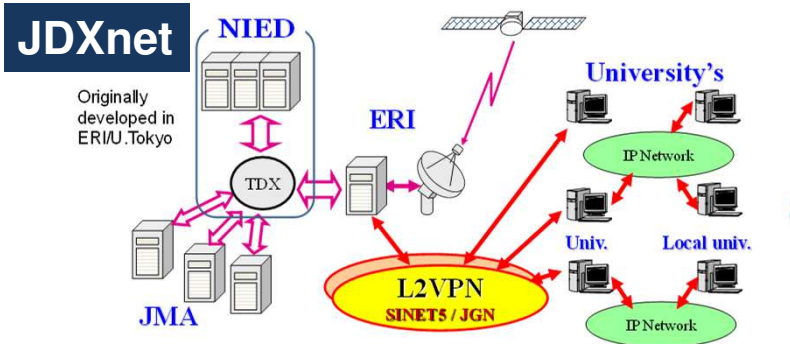
## JDXnetの観測データを利用したリアルタイムデータ同化/観測



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



[c/o Furumura]

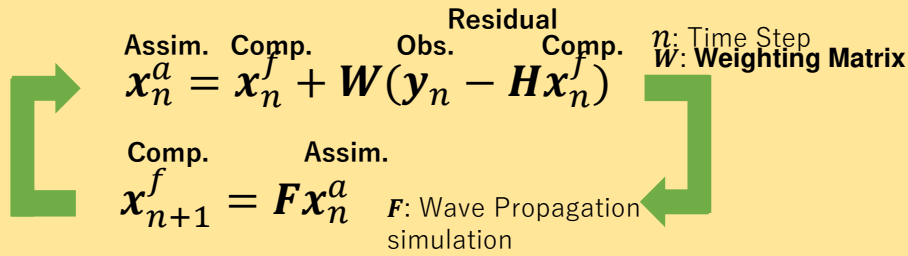


Real-Time Data/Simulation Assimilation  
Real-Time Update of Underground Model

[資料提供: 古村孝志教授 (東大・地震研)]

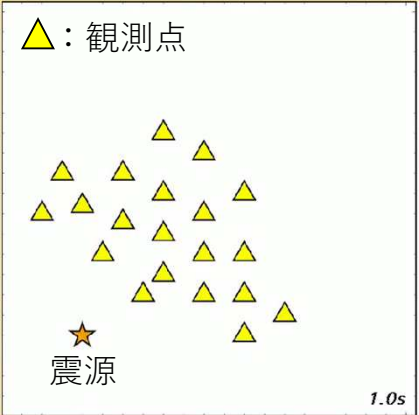
# 「リアルタイムデータ同化+シミュレーション」融合 (大場, 古村)

## ・最適内挿法によるデータ同化



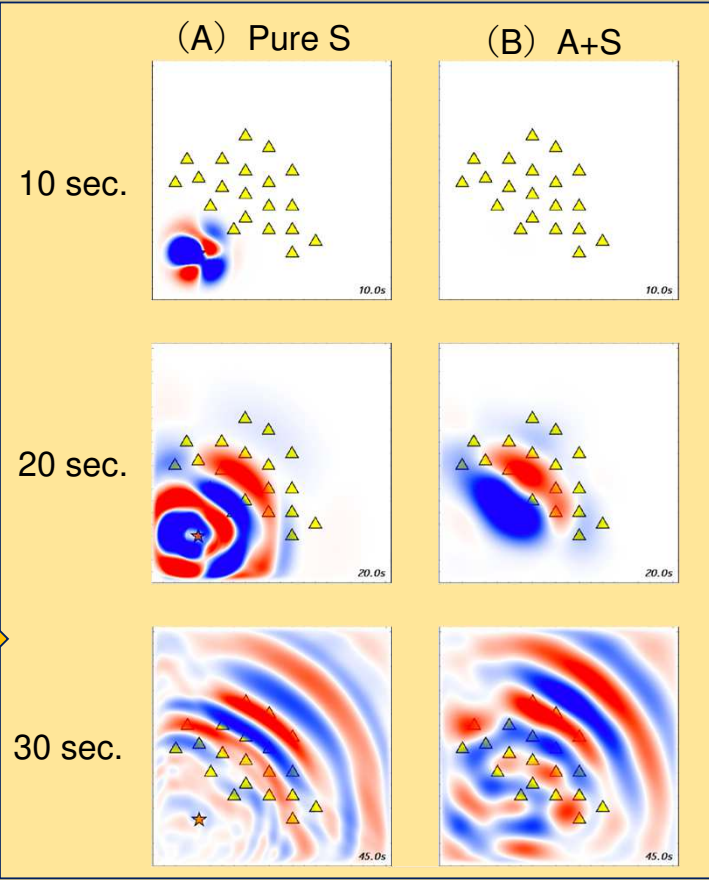
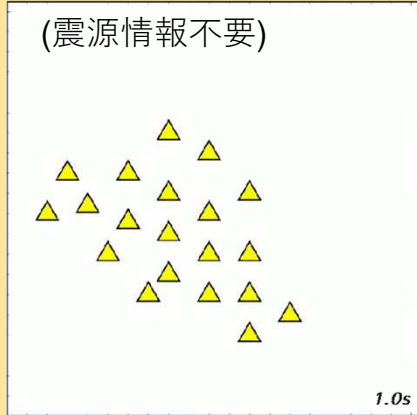
(A) Pure S :

従来型シミュレーション



(A) A+S

シミュレーション+データ同化



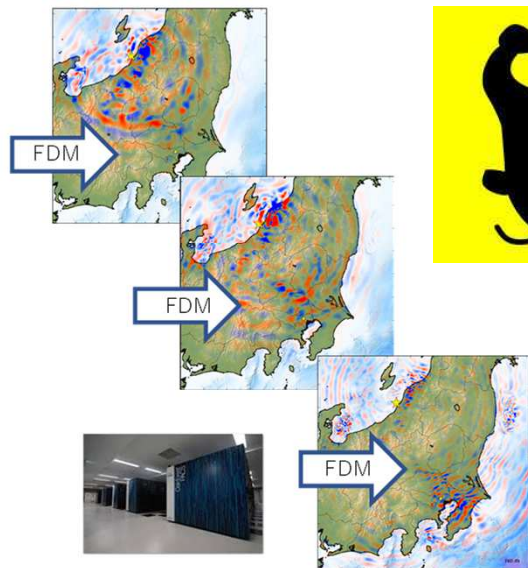
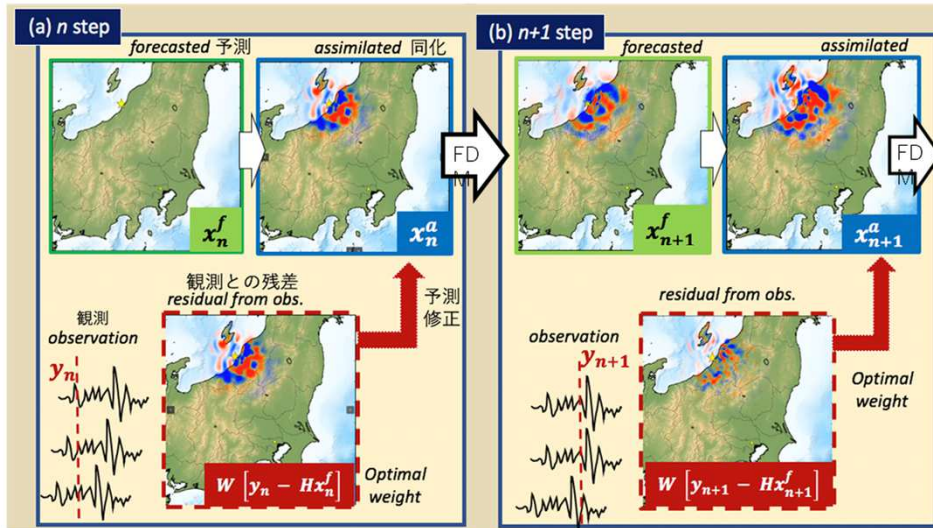
# 「A+S:同化+シミュレーション」⇒「Pure S:シミュレーション予測」

$$\begin{array}{l}
 \text{Assim. Comp.} \quad \text{Residual} \quad \text{Obs.} \quad \text{Comp.} \\
 x_n^a = x_n^f + W(y_n - Hx_n^f) \\
 \\
 \text{Comp.} \quad \text{Assim.} \\
 x_{n+1}^f = Fx_n^a \quad F: \text{Wave Propagation simulation}
 \end{array}$$

$n$ : Time Step  
 $W$ : Weighting Matrix

(A+S) Assimilation+Simulation

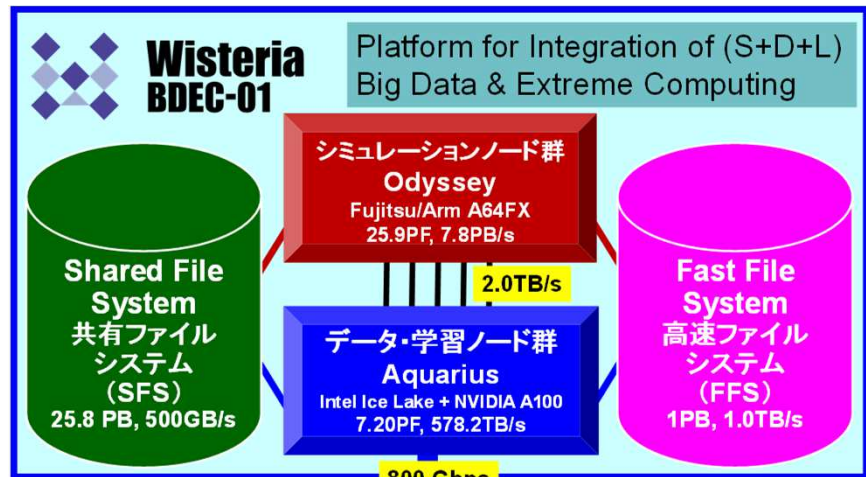
(Pure S) Pure Simulation/Forecast



# Wisteria/BDEC-01



2021年5月14日から柏Ⅱキャンパスで運用を開始した国内最大級のシステム「Wisteria/BDEC-01」は、「計算・データ・学習(S+D+L)」融合を実現する、世界でも初めてのプラットフォーム



External Network  
外部ネットワーク



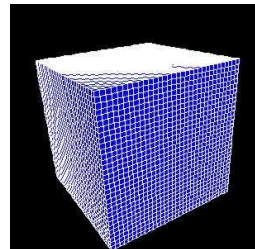
External Resources

外部リソース



# 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に格納
- Aquarius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(Aquarius)はシミュレーション終了後実施(O(10)秒)



## Seism3D/OpenSWPC-DAF

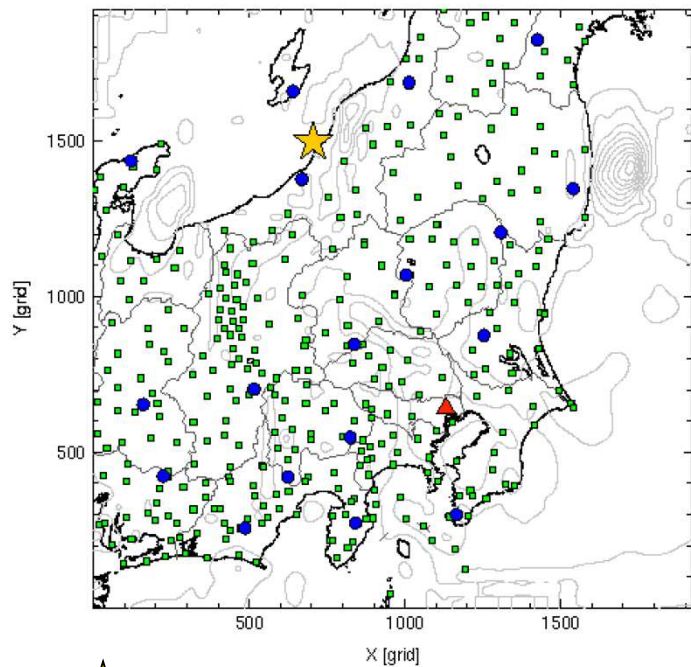
- 三次元有限差分法(Finite Difference Method), Optimal Interpolation Technique
- メッシュ数  $1,920 \times 1,920 \times 240$  (約8.85億)
- メッシュ幅 240m(立方体)
- $460.8 \text{ km} \times 460.8 \text{ km} \times 57.6 \text{ km}$

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

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

# 2007年新潟県中越沖地震 (Mw=6.6)

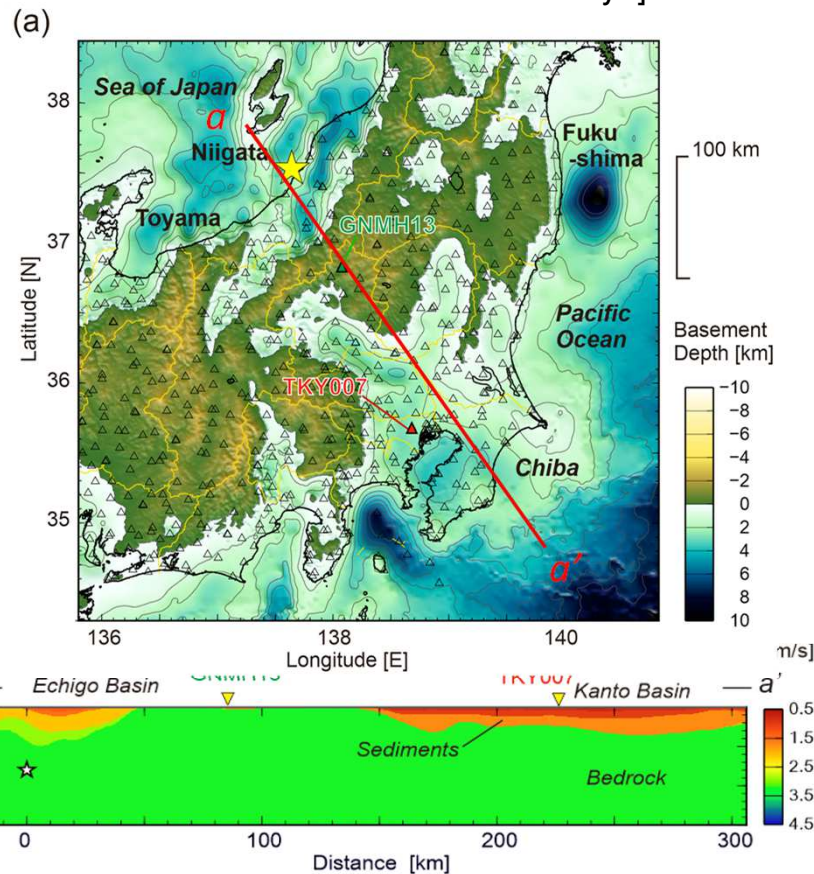
[c/o Prof. T. Furumura,  
ERI/U.Tokyo]



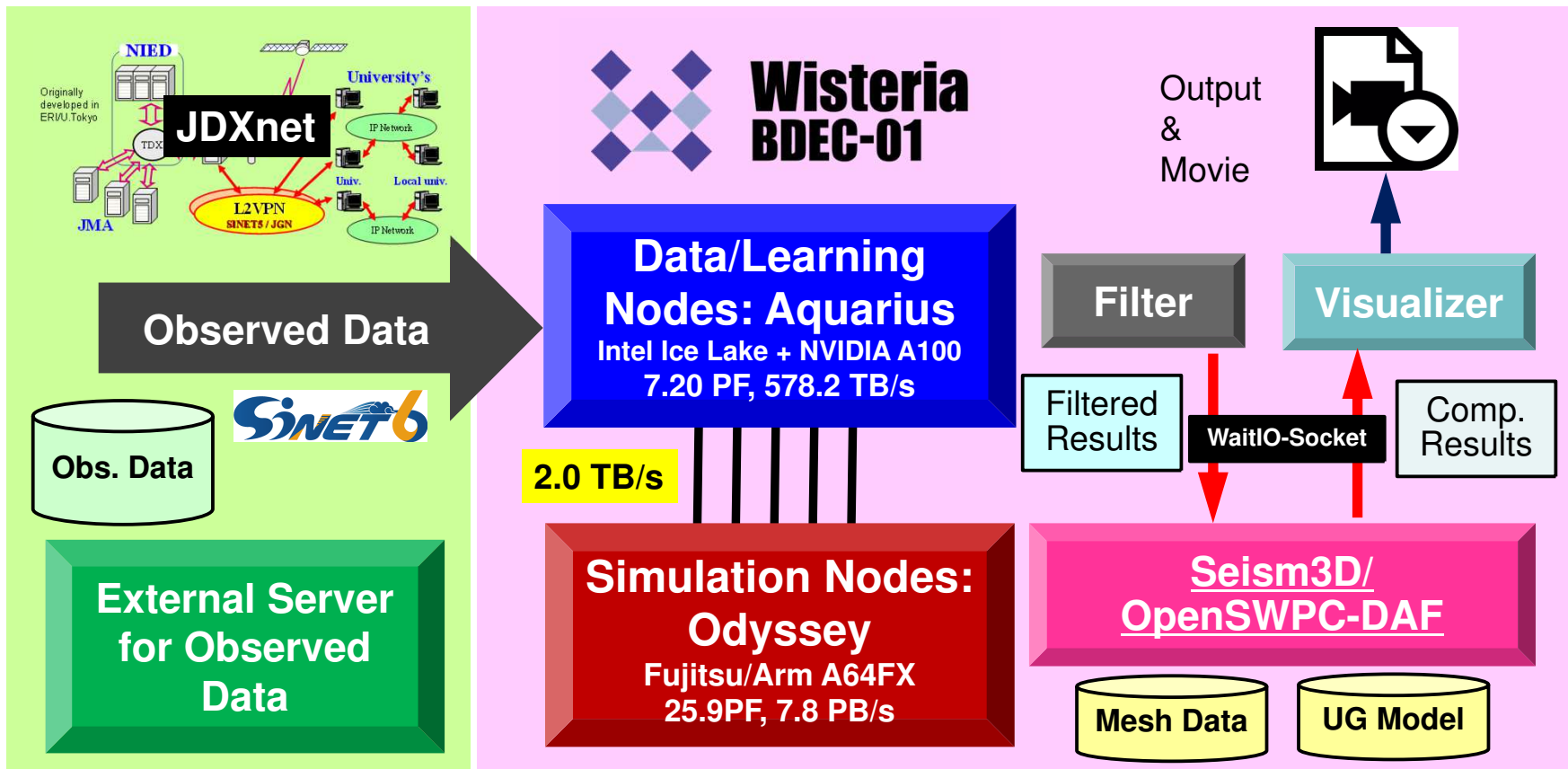
★ 震源 (Epicenter)

■ Hi-net (Short Period) 349 pts

● F-net (Broadband) 18 pts

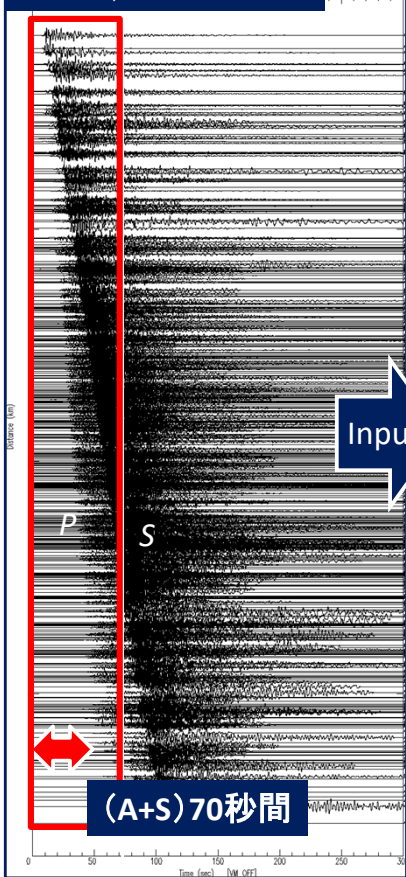


# 長周期地震動シミュレーション＋観測データ同化

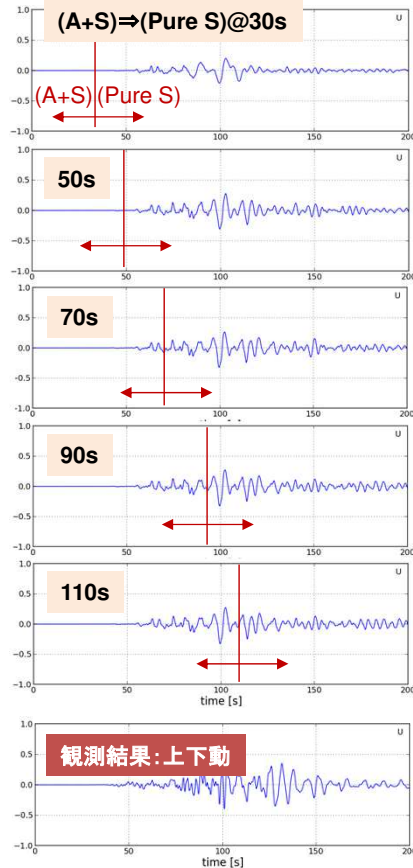


# 2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.6)

482 K-NET, KiK-net Observation



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



# 計算例:

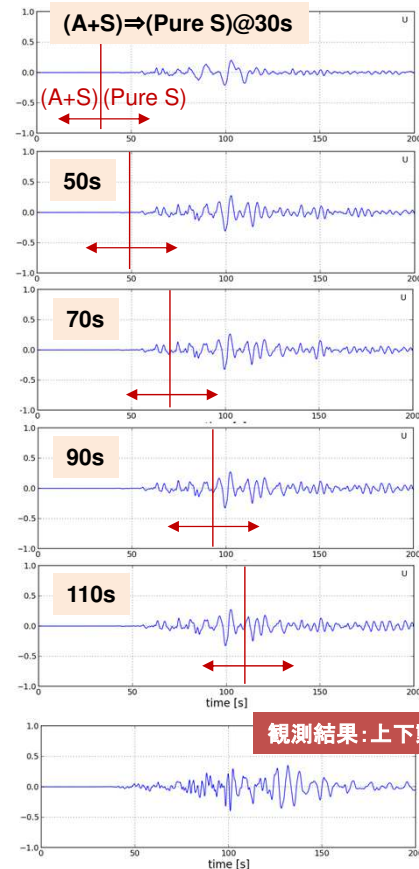
## 2007年新潟県中越沖地震(Mw=6.6)

- (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
  - (A+S)と(Pure S)の計算時間そのものはほとんど同じ

- (Pure S)

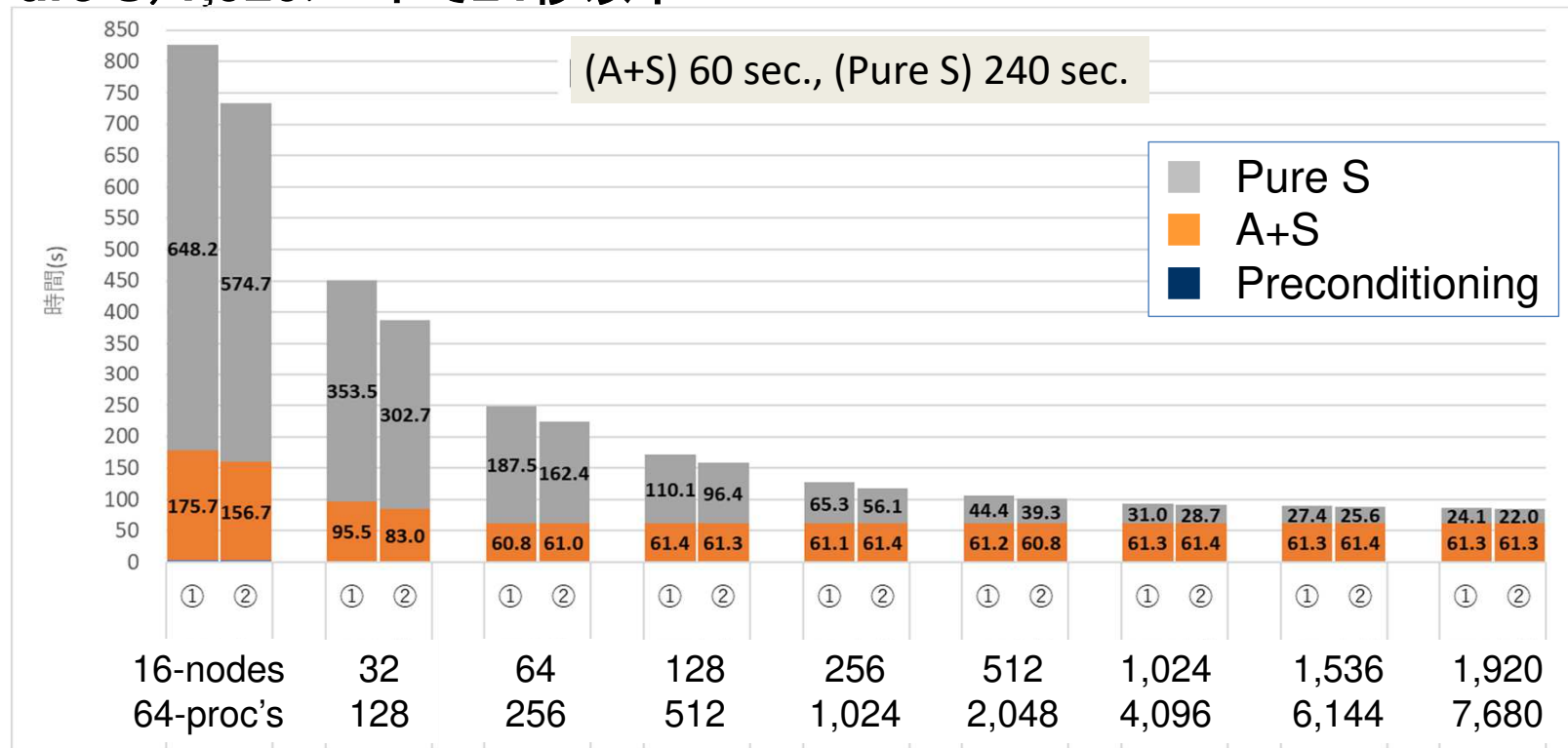
- 実現象の10分の1くらいで計算ができると良い
- 例えば、50秒で(A+S)⇒(Pure S)へ切り替え、さらにその後の50秒分を5秒で計算できれば、震源から約250km離れた東京にピーク波が到着する時間(地震発生から100秒程度)を十分に予測できる



# (A+S) 60秒, (Pure S) 240秒, Odyssey

①②: チューニングの有無

(Pure S) 1,920ノードで24秒以下



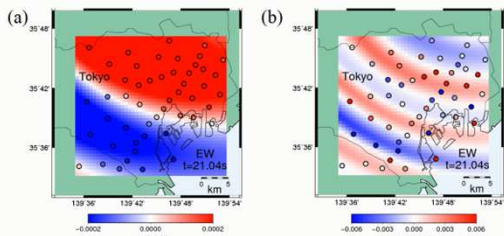
# まとめ・今後の計画等

- $O(10^3)$ 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
- 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

# 三次元地下構造モデルの構築

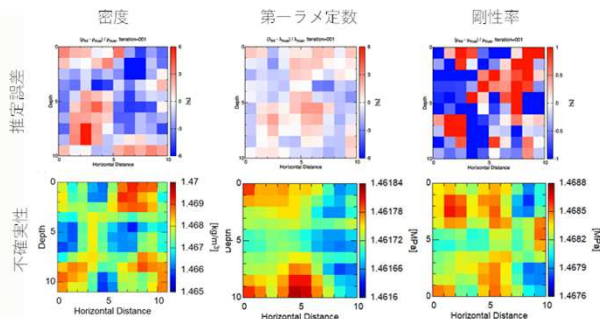
- 地下構造は複雑，不均質，実はよくわかっておらず，大小の地震時の逆解析等によりモデルを少しずつ改良する，のが現状
- 観測データ・三次元シミュレーション・データ解析を元に地下構造モデルの改良に使う

## REMC法



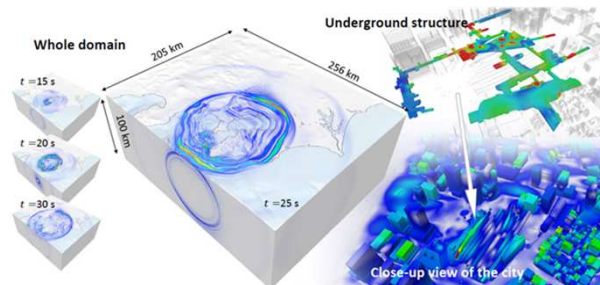
Movie S2. Seismic wavefield in the Tokyo area for the Mw 5.5 earthquake of 16 September 2014 in the northern Kanto area, in the frequency band (a) 0.10–0.20 Hz and (b) 0.10–1.0 Hz, computed with the optimum model parameters, compared to the observations (circles).

## 2<sup>nd</sup> Order Adjoint



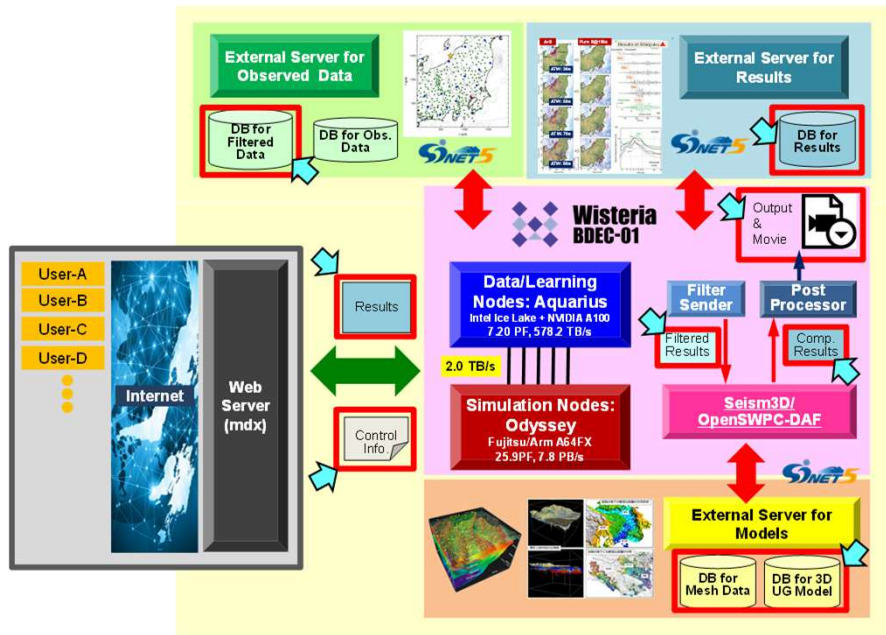
現実的な計算時間・計算機資源で不確実性評価まで可能な新しい4次元変分法の実問題への応用が可能となった

## 大規模機械学習



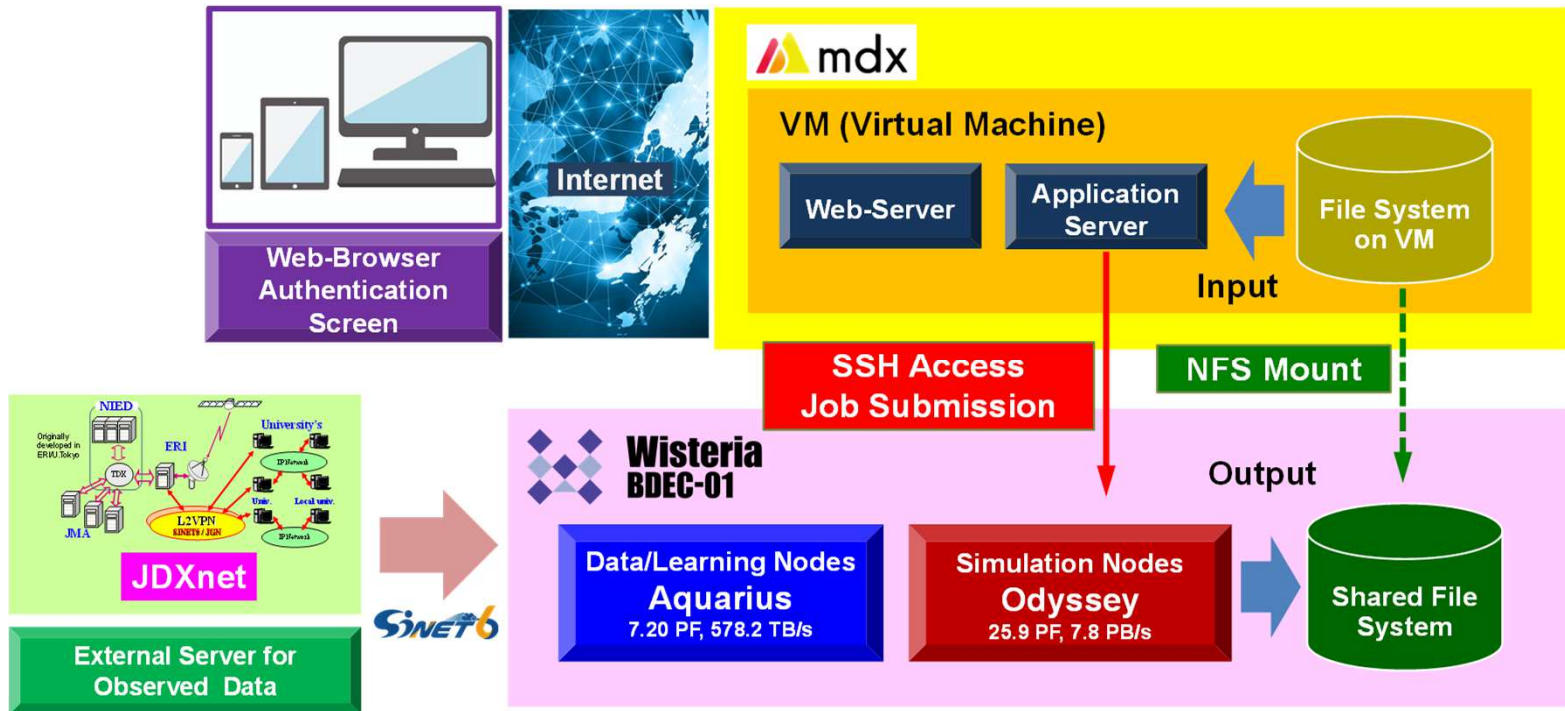


# Webベース シミュレーション体験・ データ利活用システム



- 「3D長周期地震動+リアルタイムデータ同化」融合シミュレーションシステムの「防災・減災」啓蒙・教育へ向けた利用・展開を図るため、Webベースのシミュレーション体験・データ利活用環境を構築(2022年度)
- 利用者はWeb Server(mdx上)にアクセスし、スパコン(Wisteria/BDEC-01)上でのシミュレーションの実施、計算結果、観測結果の可視化処理、表示等を行う。
- Web経由でデータ群をスパコン上で処理するフレームワークは様々なアプリケーションへの転用が可能

# Webベースシミュレーション体験・ データ活用システム



# Webベース シミュレーション体験・ データ活用システム

(A+S) Assimilation+Simulation → (Pure S) Pure Simulation/Forecast

