

委員提供資料

掘高峰 委員  
提供資料

# 地震発生サイクルシミュレーション から得られた知見

海洋研究開発機構  
地震津波・防災研究プロジェクト  
堀 高峰

南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会  
@2012.09.13

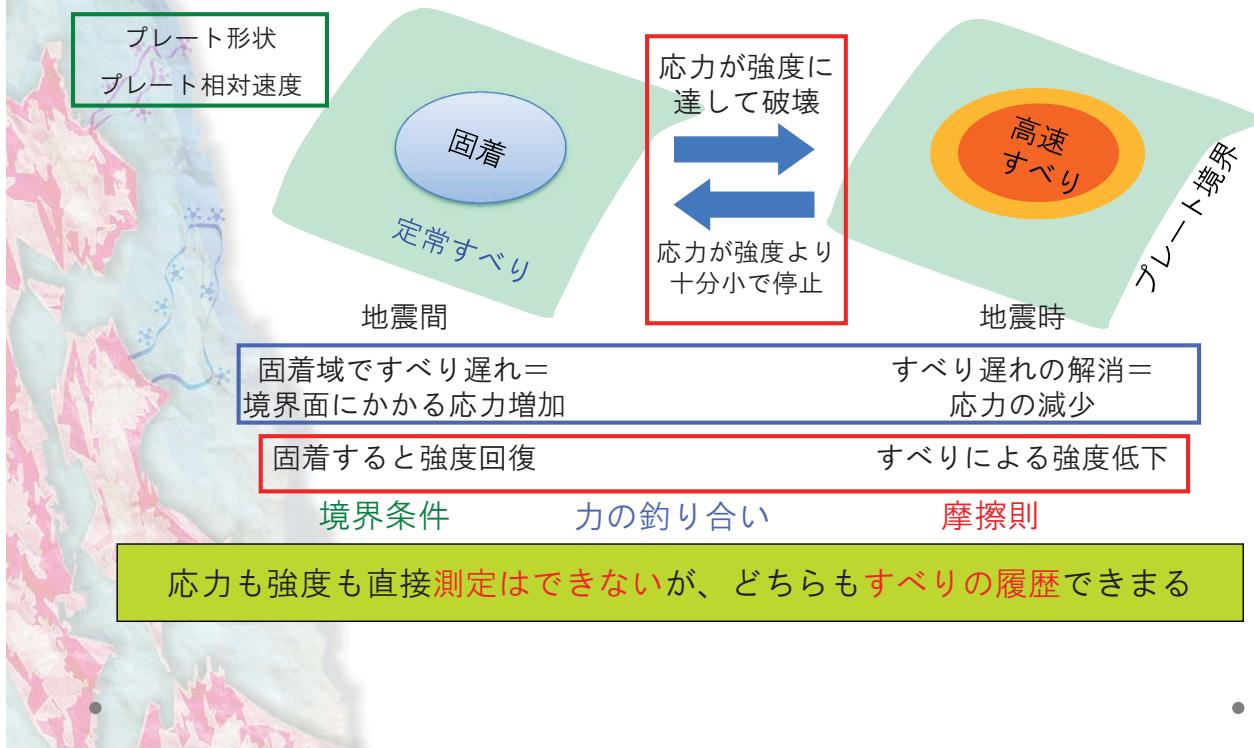


## 流れ

- 地震発生サイクルシミュレーションの枠組み
- 予測に向けた数値シミュレーション研究の流れ
- 予測精度は高められるか？
- 地震発生時期の情報を持つと地震発生サイクルの計算結果から期待される現象
- おわりに

# 地震発生サイクルシミュレーションの枠組み

- 地震の再来：プレート境界（既存弱面）でのすべりの時空間変化



3

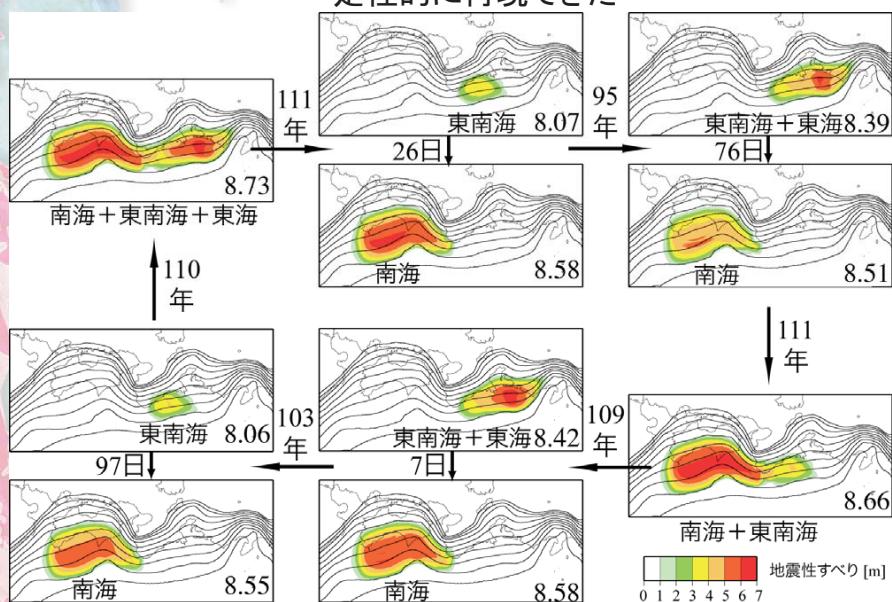
## 予測に向けた数値シミュレーション研究の流れ

シミュレーション手法	●長所	▲短所
フォワードモデリングによる長期地震サイクルの再現	<ul style="list-style-type: none"> <li>●過去の地震活動履歴が分かれば試行可能</li> <li>⇒観測データが乏しい場合でもパラメター推定をやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲貞觀地震(869年)など、古い地震については様々なシナリオの可能性がある</li> <li>⇒単一のモデルによって未来予測をするのは困難</li> </ul>
すべり欠損による応力蓄積状態の推定に基づく動的破壊のシミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>●破壊しやすいか否かを直接的に判断することが可能</li> <li>⇒多数モデルによって確率的な評価も可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲入力する観測データや仮定に強く依存</li> <li>⇒海溝付近の地殻変動データは分解能が低く、正確な評価が困難</li> </ul>
逐次データ同化による推移予測	<ul style="list-style-type: none"> <li>●複数のシナリオに対して確率的な評価をすることが可能</li> <li>●複数の見解に分かれた未確定のもの(摩擦構成則など)も取り入れが可能</li> <li>⇒確率的に低い事象でも見逃しにくい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲多数のモデルを用意する必要がある(京コンピュータなどのHPCにより解決しつつある)</li> <li>⇒事前に用意することができれば即時的な対応も可能</li> </ul>

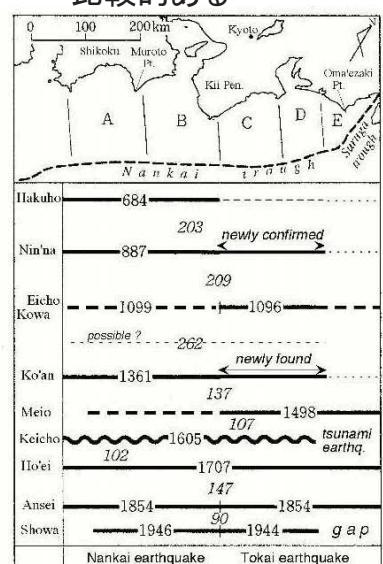
4

# フォワードモデリングによる長期地震サイクルの再現

過去の数回分のパターンが定性的に再現できた



歴史地震の情報が比較的ある



Hori (2006)

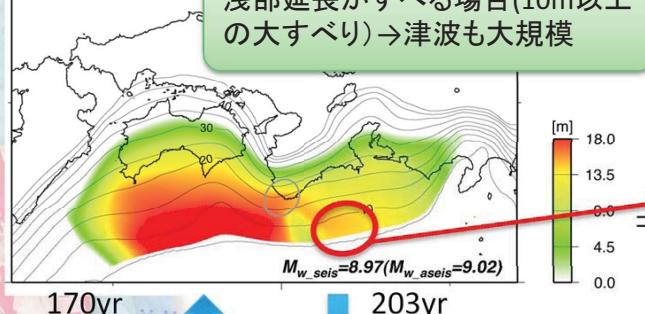
石橋(2002)

- ・歴史記録と矛盾しないシナリオを含む結果はデータ同化用に活かす
- ・課題：プレート境界以外の断層運動の導入  
自発的なサイクル計算で再現できない履歴をどう扱うか

5

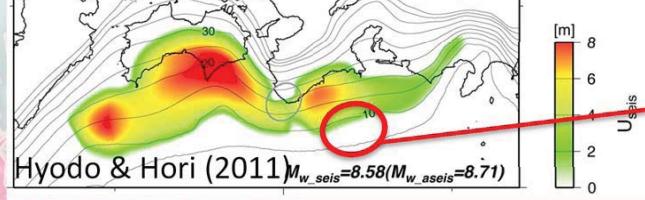
# フォワードモデリングによる長期地震サイクルの再現

浅部延長がすべる場合(10m以上の大すべり)→津波も大規模



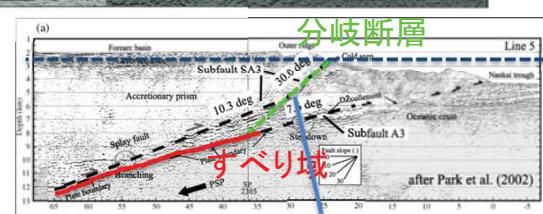
170yr ↑ ↓ 203yr

浅部延長ですべらない場合→全体に10m未満

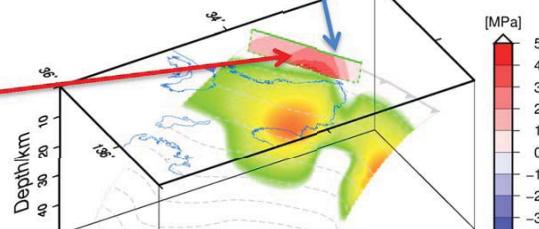


超巨大地震が373年で繰り返す(その間にMw8.6が1回発生)  
(仮に373年の間にさらに安政東海Mw8.4+南海Mw8.4と同等の地震が起きるとしてそのモーメントを引いてもMw8.87で超巨大)

分歧断層

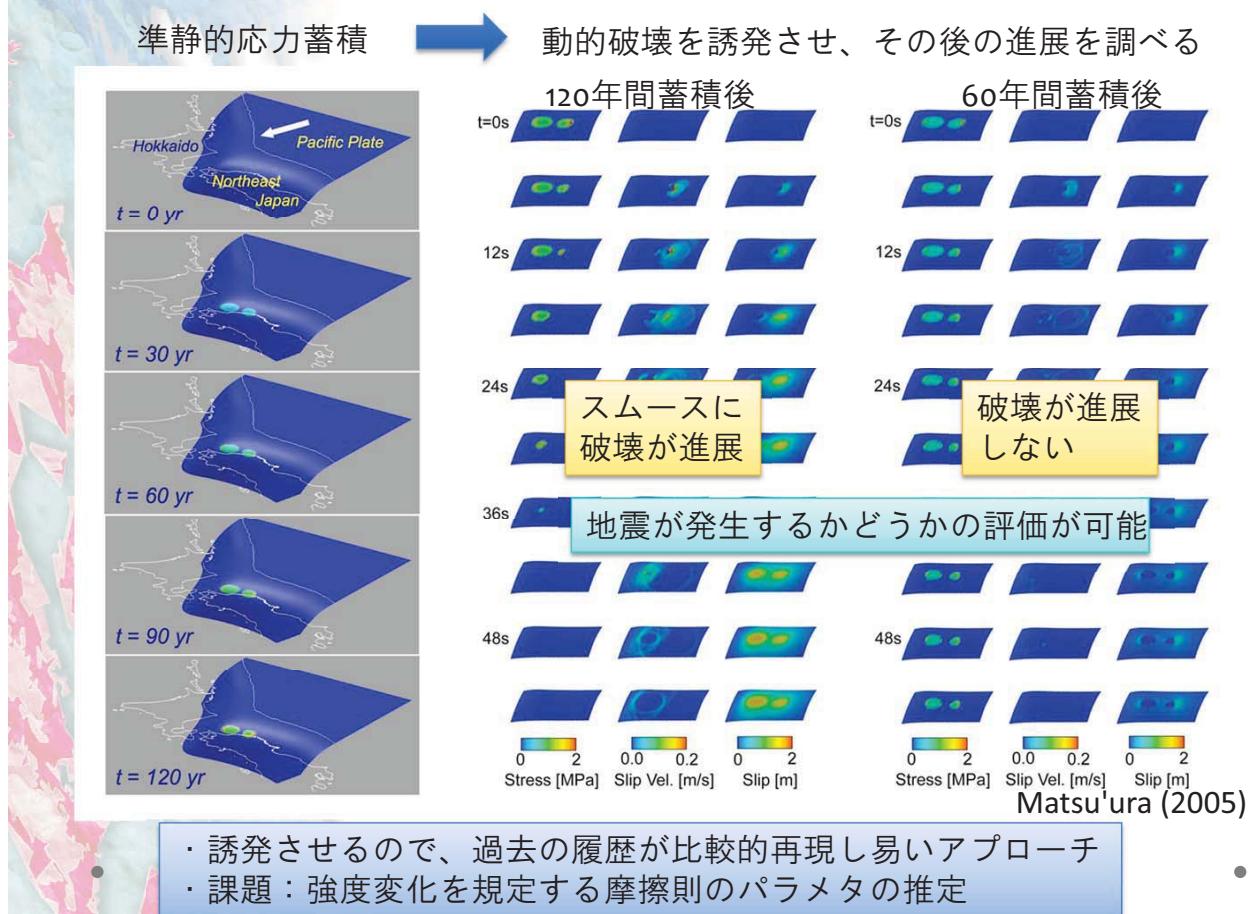


すべり域



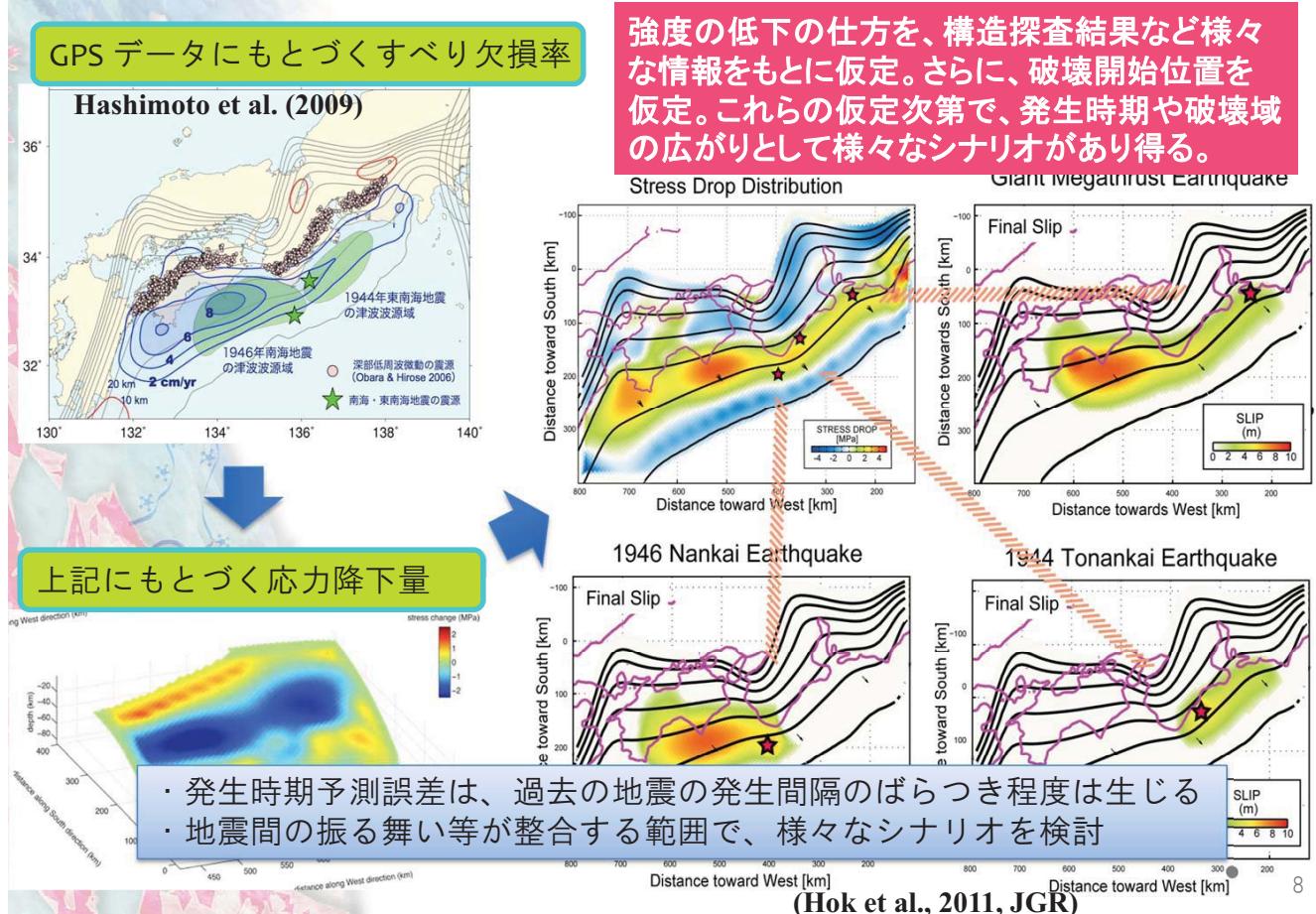
浅部延長がすべらない場合、分歧断層のせん断応力が大きく増加(+4MPa)

# 応力蓄積状態の推定に基づく動的破壊シミュレーション

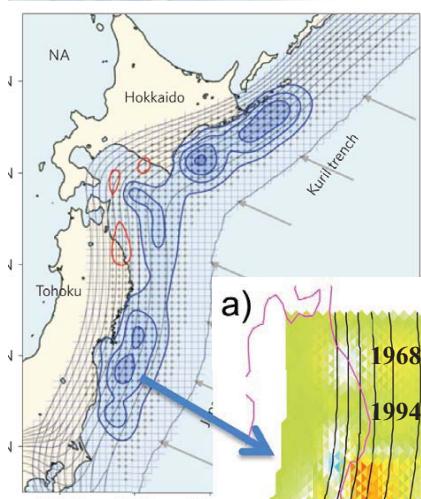


7

# 応力蓄積状態の推定に基づく動的破壊シミュレーション

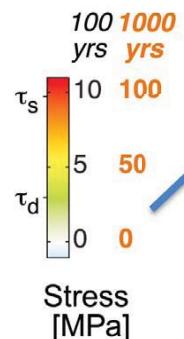


# 東北地方太平洋沖地震領域でのシナリオ



すべり遅れ量分布  
(Hashimoto et al., 2009, NGeo)

何年蓄積するか  
によって変わる



a)

応力蓄積量分布  
過去の地震発生を一部考慮

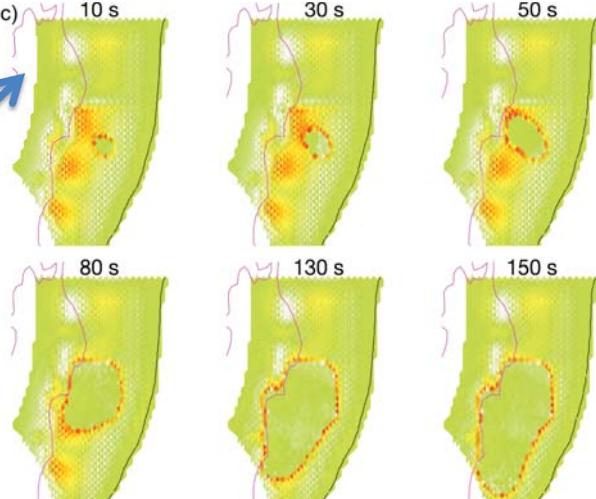
(Hok et al., 2011, JGR)

観測されていたすべり欠損分布等から、  
**M9まで見落としなくシナリオ計算可能**

→今後の予測にとって重要

先入観によって、観測と矛盾しないシナリオを排除しないこと

## 動的破壊進展のシミュレーション



応力の時間変化(破壊進展の様子)

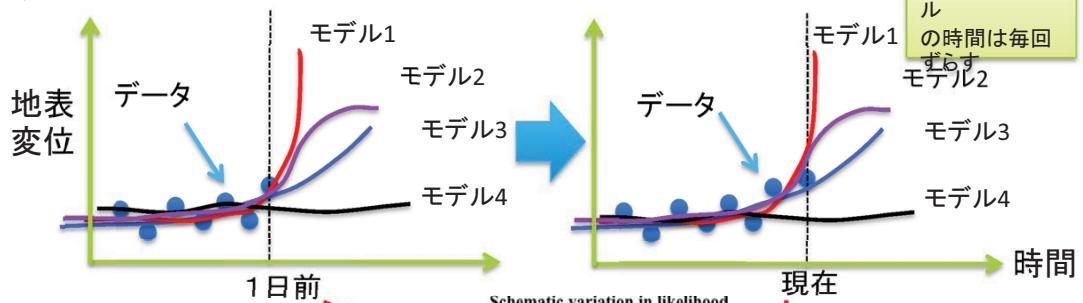
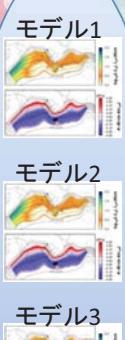
9

## 逐次データ同化による推移予測のイメージ

$$x_k = F_k(x_{k-1}) \quad \text{システムの時間発展: 地震発生サイクルシミュレーション(システムノイズなし)}$$

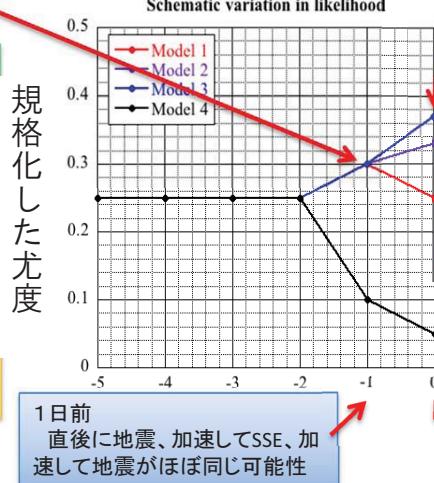
$$y_k = Hx_k + w_k \quad \text{観測方程式: すべりにともなう地殻変動 } w_k : \text{ 観測ノイズ(正規分布)}$$

初期値やパラメタ  
値の異なるシミュ  
レーション結果



データが加わるたびにモデルと  
データの合い具合(尤度)を評価  
↓  
何か変動があった際に、データ  
により適合したモデル群を抽出  
することが可能

最適なモデル1つを選択するの  
ではなく、モデルの合い具合の  
評価なので、起こりうる様々な  
場合を、データとの合い具合の  
重み付きで予測することになる



今後の推移  
モデル1:直後に地震  
モデル2:加速してSSE  
モデル3:加速して地震  
モデル4:変化なし

多数用意する

# 予測精度は高められるか？

- 予測精度を高めるために必要なこと
  - 仮定する数理モデルを改善する必要があるが、真のモデルを手にすることは不可能であり、**モデル誤差は前提とせざるを得ない**
  - **観測データの改善が不可欠**であり、過去のすべりの履歴を可能な限り精度よく推定することは、シナリオの絞り込みにとって必要(ただし、**遡るのは限界**がある)
  - 様々なシナリオのうちの**どれに近い状況が起きつつあるか**を知らない限り、シナリオの絞り込みは困難であり、発生時期にしても破壊領域の広がりにしても予測精度を上げることは困難
  - したがって、さらに予測精度を高めるためには、**次の地震の発生時期や破壊域の広がりについての情報を持った何らかの現象**が、プレート境界で生じ、それを観測データで捉え、整合させることでシナリオを絞り込む必要がある
    - データ同化による予測システムは**シナリオの順位付け**を観測データにもとづいて行うものであり、1つの最適なシナリオを選択するためのものではない

11

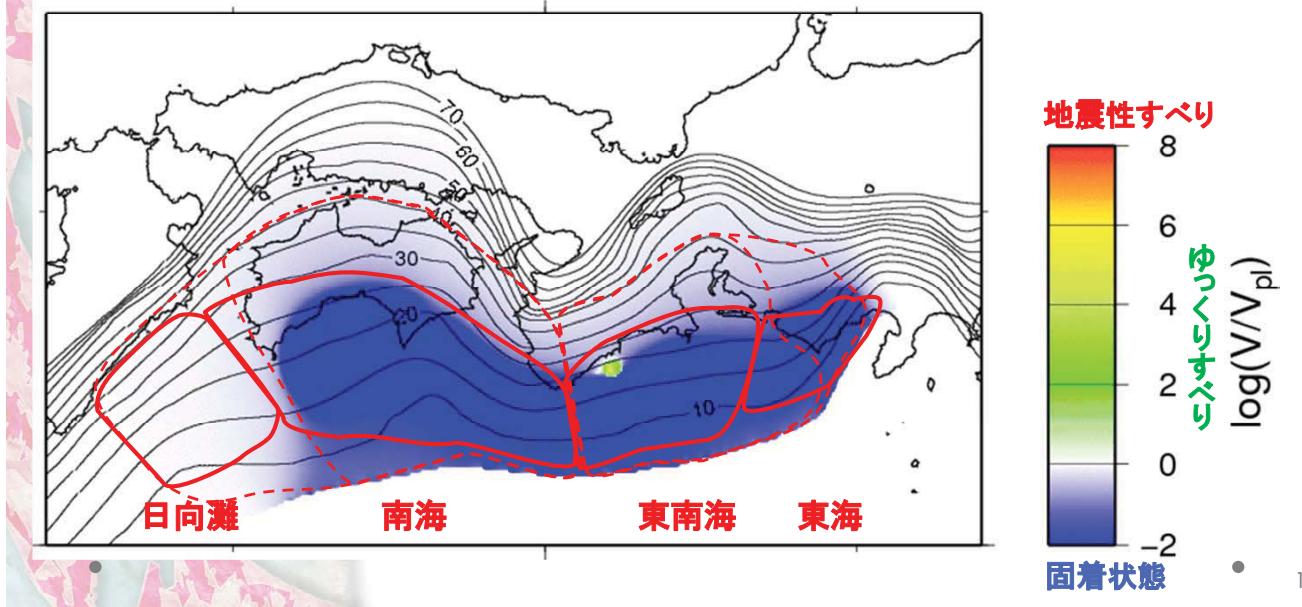
## 地震発生時期の情報を持つと地震発生サイクルの計算結果から期待される現象

- 加速するプレスリップ
  - 破壊核に向けた加速
  - 南海トラフのように**固着度の高い**状況を再現した上で、**本震よりも一回り小さな部分的破壊が生じないと**仮定する(これまでの観測事実)と、加速するプレスリップが発生する可能性がある
    - ただし、規模が観測可能なくらい大きいかどうかは現状では拘束できておらず、確実に観測できるという保証はない
- 加速するプレスリップ以外の本震に先行するすべり
  - 震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震＋余効すべり
  - 東北地方太平洋沖地震前に加速するプレスリップが観測されず、一方で上記のような現象が生じたが、こうした振る舞いは**階層的なアスペリティ**を仮定し、**固着度が低い**条件では、**本震前に期待される現象**として定性的にはシミュレーションで再現可能
    - 同じパラメタでも、先行するすべり無しで本震に至る場合もある
    - ゆっくりすべりは複数回起きてから本震に至るので「空振り」あり
  - 東北沖でプレスリップの加速が観測されなかったことを南海での発生可能性と結びつけるのは必ずしも適切とは言えない
- 近傍で発生した地震の余効すべり
  - 南海トラフ全域で地震が起こらず途中で破壊が停止した場合(例:1944東南海地震)、その周辺で発生する**余効すべり**の起こり方と、南海トラフ沿いで次に発生する地震(例:1946年南海地震)までの**発生間隔には相関**があるとシミュレーションから期待される

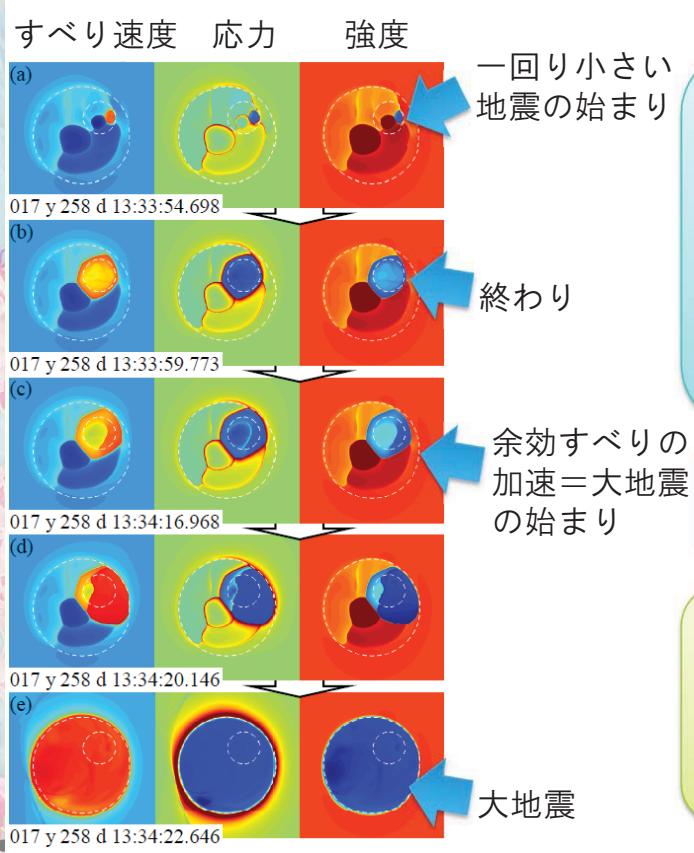
12

# 固着度の高い条件での地震発生サイクル計算 とプレスリップ

01009y\_297d\_22h\_14m\_24s



## 固着度が低い場合に本震前に期待される現象



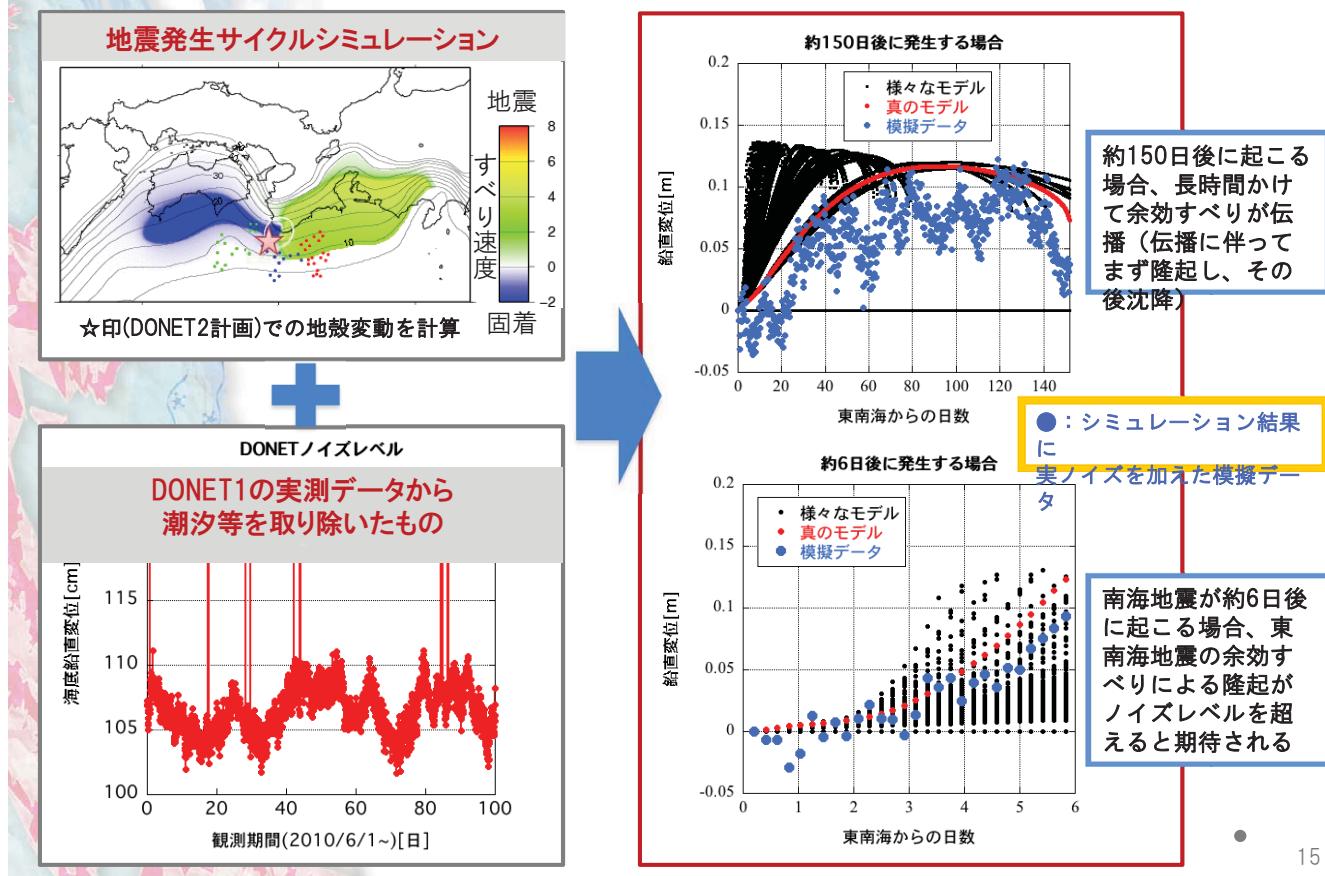
一回り小さい地震が発生、余効すべりが生じ、それが加速して大きな地震に至る。

加速が時間をかけて起こる場合とそうでない場合がある（後者では「すべりの加速」は観測でとらえられない）

地震発生サイクルの後半に複数のゆっくりすべりが発生

同じパラメタでも、小地震で終わる場合、小地震から大地震にそのまま至る場合、すべりの加速から大地震に至る場合など様々な場合が起きる

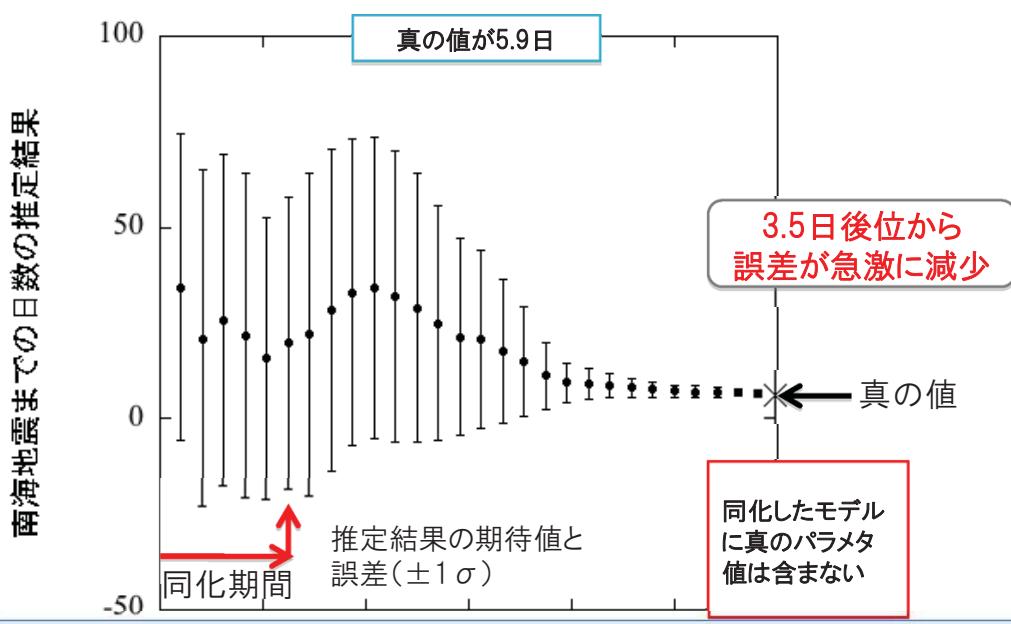
# 東南海地震後に期待される地殻変動：模擬データ



15

# 地震発生時期の予測：データ同化実験結果

東海・東南海地震が発生した後に、南海地震発生する間隔が約6日となる模擬データについて初期値とパラメタの異なる109のモデルで推定した結果



課題：先行現象が発現した際に本当に予測ができるかは実データでの検証が必要

16

# おわりに

- **巨大地震の空振り・見逃しを軽減するためには…**
  - データ同化をはじめとする、複数のモデルに基づいたシナリオを描くことが必要（確定的な予測の試み⇒確率的な評価）。これにより、最悪の事態や確率的に発生し易い事態などを事前に把握することが可能となる。
- **減災対策へのコメント**
  - 観測と整合する残されたシナリオの中で、それによって生じる被害等の影響に応じた個別の対策が必要
  - 空振り・見逃しは十分あり得るので、耐震補強や避難対策は万全を期すのが大前提
  - その上で、さらに減災を進めるために予測情報を活用する必要があり、どのような活用が可能かは今後の研究課題



# 海域リアルタイム観測網 (DONET&DONET2)

海洋研究開発機構  
地震津波・防災研究プロジェクト  
堀 高峰・高橋成実・金田義行

南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会  
@2012.09.24



## 地震・津波観測監視システム (DONET)



-先端技術を用いた地震津波の常時監視-

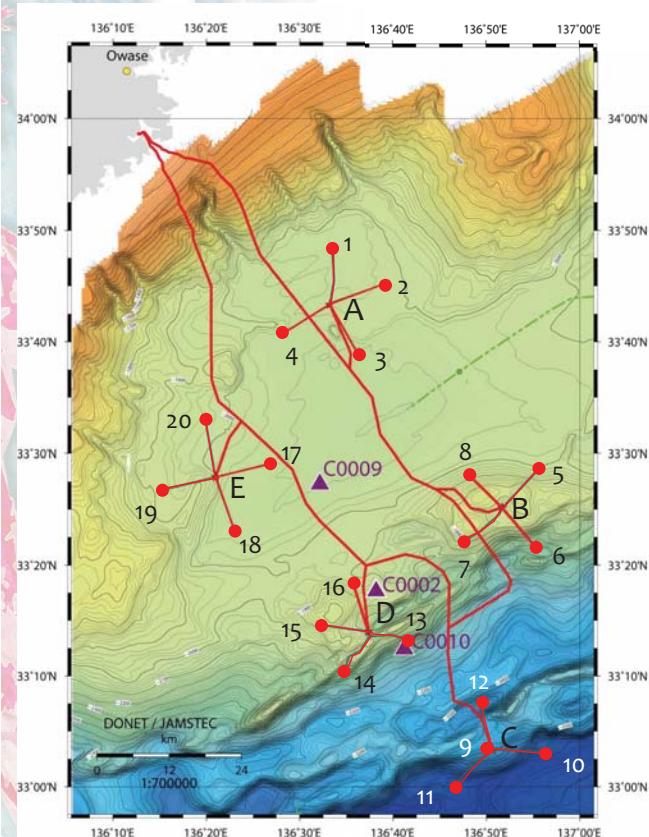
圧力センサシステム：

水圧計、微差圧計、ハイドロフォン、温度計

海底で設置作業を行う

ROV

# DONETの特徴



## 冗長性

1か所ケーブルが切れても給電とデータ伝送が可能

## 拡張性

必要に応じて観測点を増設したり、新たなセンサーを組み込むことが可能

## 置換性

老朽化したセンサーを交換したり、ROVを用いて、観測点やノードのメンテナンスが可能

## マルチなセンサー

地殻変動、津波、強震動、微小地震など広帯域、高ダイナミックレンジでの地震・津波観測が可能

2

# 地動センサーシステム

## 観測対象

長周期地震動:

微小地震:

大地震:

## 広帯域な現象

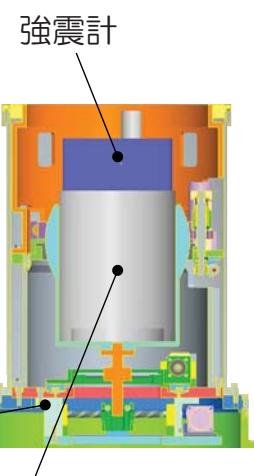
0.001 - 0.1 Hz;  $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$  - (at 0.05Hz)

0.1 - 100 Hz;  $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$  - (at 10Hz)

0.01 - 100 Hz; - 39.2 m/s<sup>2</sup> (at 10Hz)



ジンバル機構



広帯域地震計

3

# 圧力センサーシステム

## 観測対象：

地殻変動:

1 day ~ 100 sec; >1 Pa

津波:

~ 100 sec; >1 Pa

長周期振動:

0.001 ~ 0.1 Hz; > 1 Pa

微小地震:

0.1 ~ 100 Hz; > 1 Pa

大地震:

0.01 ~ 100 Hz; > 3 MPa

## 広帯域な現象



水晶水圧計



高精度温度計



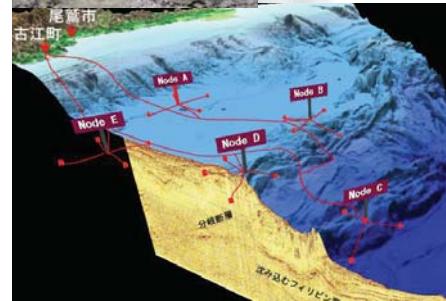
微差圧計



ハイドロフォン

4

# DONETデータのリアルタイム伝送



DONETデータ  
リアルタイム  
波形表示



地方自治体

Webによる計算  
結果の配信

DONETデータ  
リアルタイム  
波形表示

専用線 (GIGA STREAM)

win32フォーマット 0.1秒パケット

広帯域地震計 3 ch (200 Hz)

強震計 High/Low Gain 6 ch (200 Hz)

ハイドロフォン 1 ch (200 Hz)

微差圧計 1 ch (200 Hz)

水晶水圧計 1 ch (10 Hz)

精密温度計 1 ch (1 Hz)

独立行政法人  
海洋研究開発機構

震源メカニズム決定  
津波の波動伝播計算

JAMSTEC

防災科研/気象庁の陸上観測点データ

(南海トラフ沿い約200観測点)

地震計、水圧計

Earth LAN

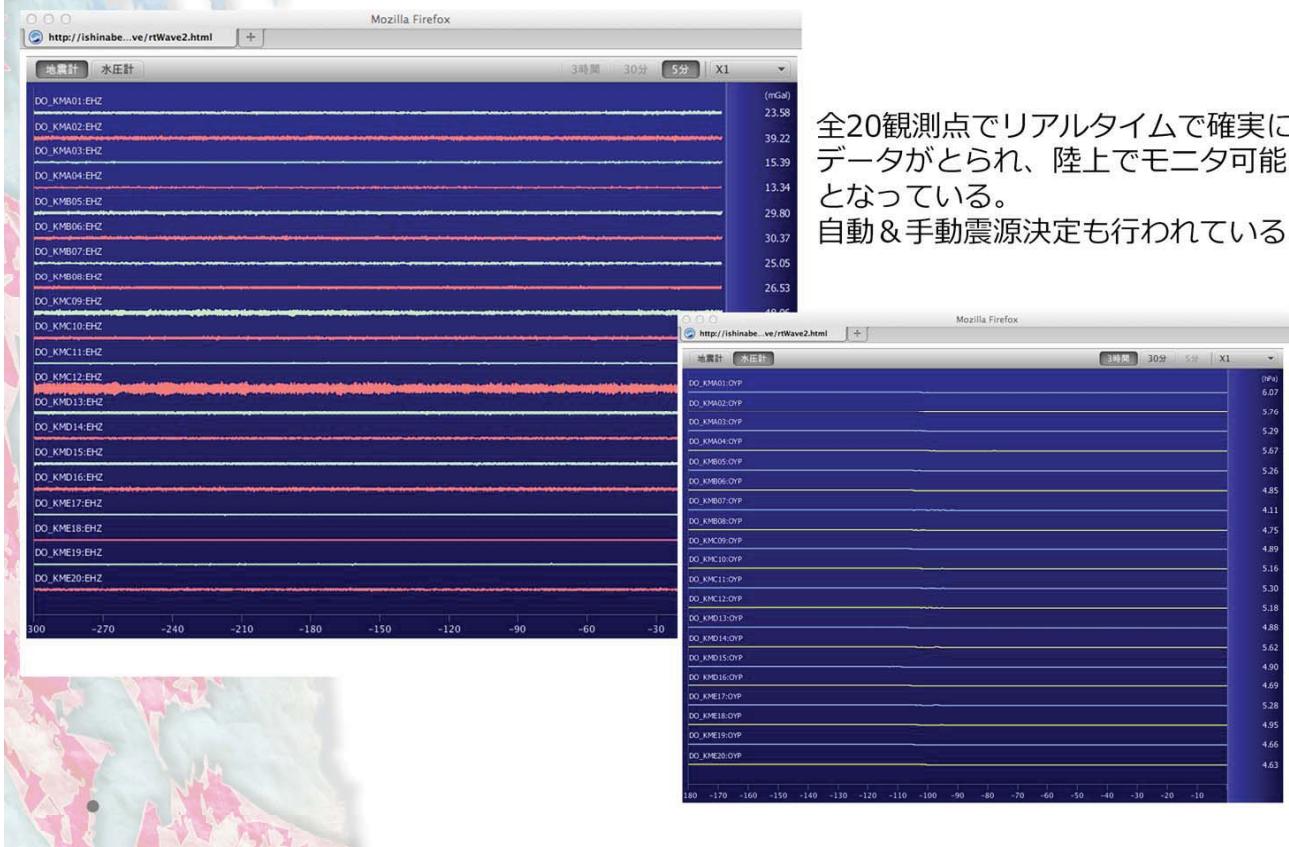
気象庁  
Japan Meteorological Agency

独立行政法人

NIED 防災科学技術研究所

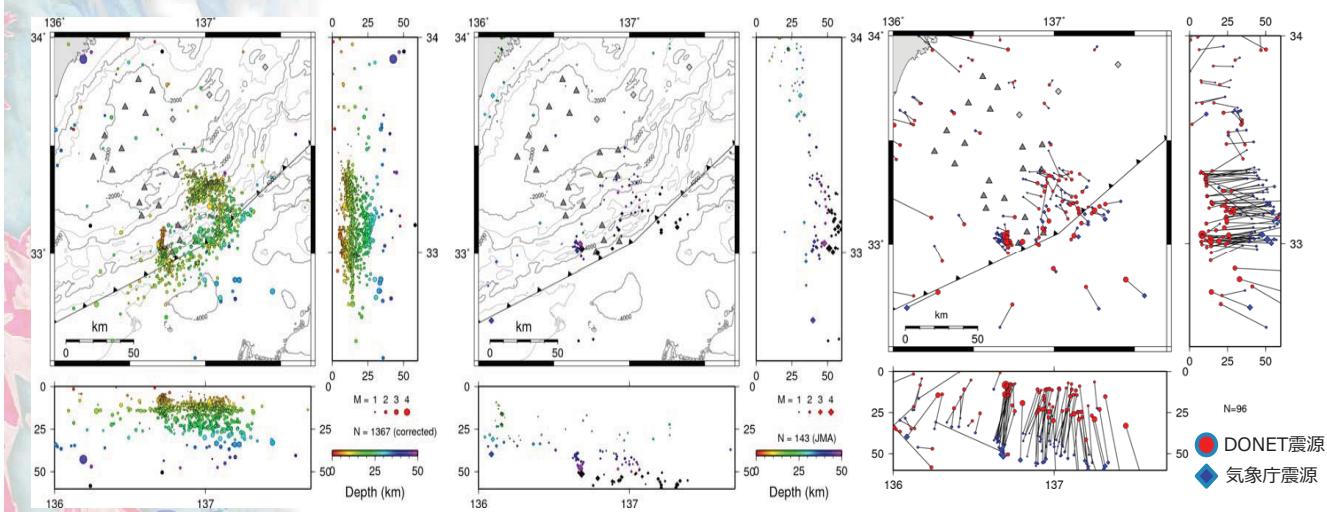
緊急地震速報  
津波警報

# DONETデータのリアルタイム伝送



6

## 海域の地震の検知能力および震源決定精度の向上



DONET観測から得られた震源分布  
(2011年1月～8月末、1367個)

気象庁一元化処理による震源の分布  
(左と同じ期間、143個)

DONETと気象庁一元化処理との  
比較

陸上観測網：震源域から離れているため、震源決定精度（特に深さ）がよくない

→DONET観測により

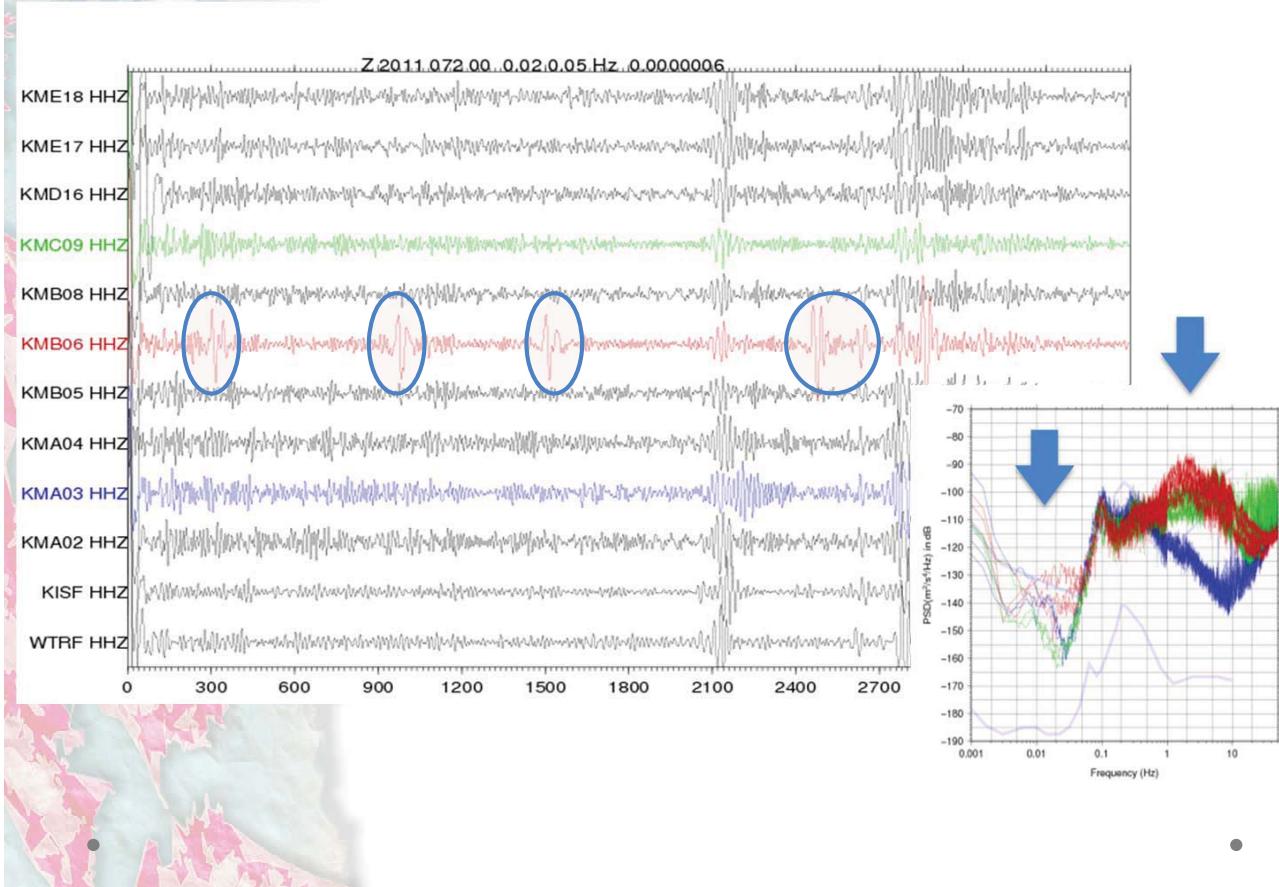
- ①紀伊半島沖の地震の検知能力が大きく向上し、②地震の震源位置の精度（特に深さ）が向上

\* 現在、即時的な震源決定は気象庁の緊急地震速報等にも活用されており、震源決定精度の精度を向上させることはその高度化にも有用である。

(Nakano et al., 2012, EPS)

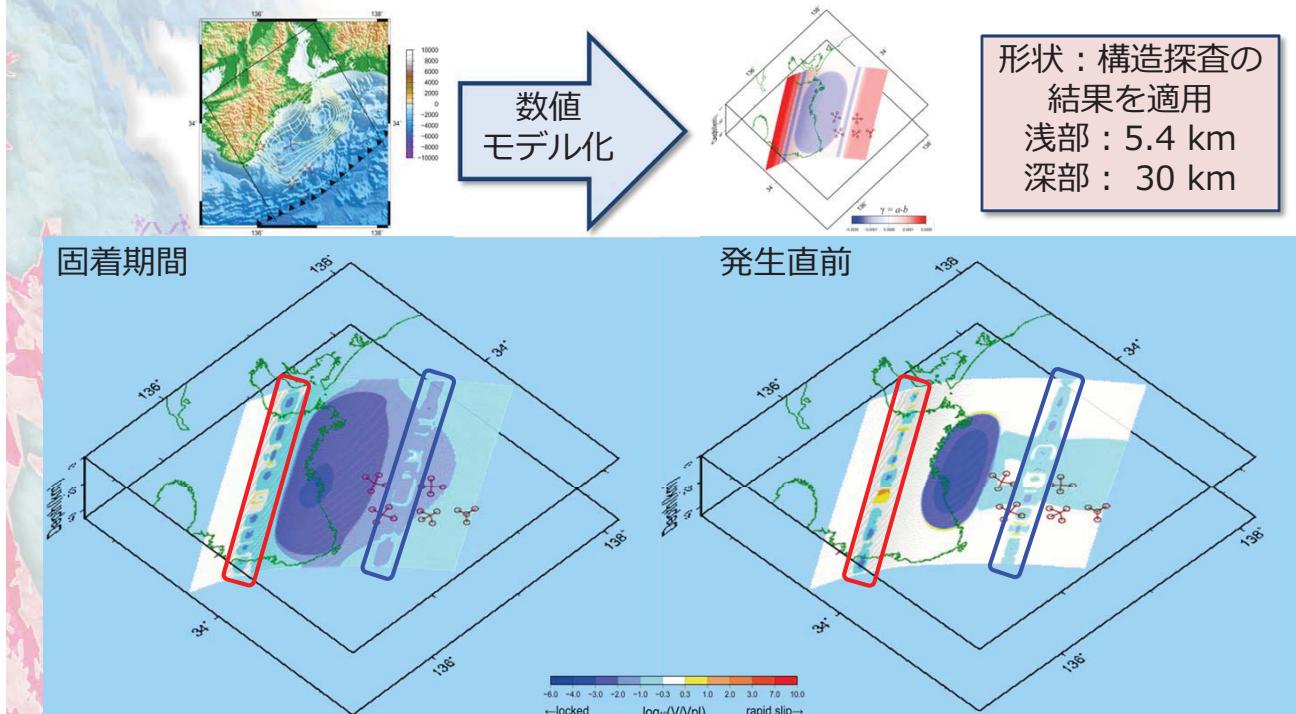
7

# 微小な浅部低周波地震の観測に成功



8

## 深部・浅部での低周波イベントの活動変化



- 固着期間(左図)・・・海溝型巨大地震震源域傍で浅部の低周波イベントが不活発
- 地震発生直前(右図)・・・浅部でも活発化 → 深部との類似性が高まる
- ★ 深部低周波イベントの理解 ⇒ 浅部低周波イベントへの応用が可能
- ★ 浅部低周波イベントの観測 ⇒ 海溝型巨大地震に至る切迫度評価のためのツール

9

# DONET1水圧計データについて

- ・潮汐除去アルゴリズムを実装し稼働中。
- ・潮汐除去されたデータには半日～30日程度の変動(5-10hPa)が残っており(20日間のRMS変動量1.6-1.8hPa程度)、同一ノード内の観測点間相互で似ている。
- ・ここで、1hPa=1cmの上下動に相当。
- ・隣接観測点間の差分データを取ると、同一期間の変動量がRMS 0.3-0.8hPa 程度の範囲まで縮小した。
- ・仮に0.3hPaで観測点間が20kmとすると、2点間傾斜変動で $1.5 \times 10^{-7}$ 程度( $0.15 \mu\text{rad}$ )に相当する。
- ・差分データの長期ドリフトの様相は、だんだんとドリフト率が低下する傾向にあり、大きな場合でも年10hPa程度。多くの場合年数hPa程度。
- ・

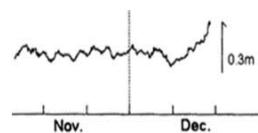
10

## プレート境界すべりのシナリオの絞り込みへの活用

### ○プレスリップ

・東北地方太平洋沖地震のような、プレート境界での固着度が低く、M6-7程度の地震が普段から起きているところでは、これらの地震が加速するプレスリップの肩代わりをするため起こりにくい。

・一方、南海トラフのように全体的に固着が強く、M6-7程度（本震よりひと回り小さな規模）の地震が普段からは起きていないところでは、プレスリップが起こる可能性が十分あり、それに起因すると思われる潮位変化が1946年南海地震の2-3日前にも記録されている（なお、1944年東南海地震前は震源付近の記録が無い）。したがって、その発生に備えたモニタリングが必要。



1946年南海地震における下津（紀伊半島北西部）に対する浦神（紀伊半島南端部、震源域の東端）の潮位変化（小林他, 2002）

### ○プレスリップ以外の先行現象

・巨大地震発生前に固着域の広がりが狭まり、微動など周辺の活動のパターンに変化が現れる（シミュレーション結果より：前ページ）

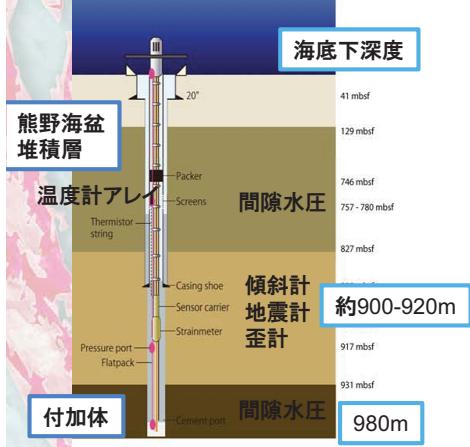
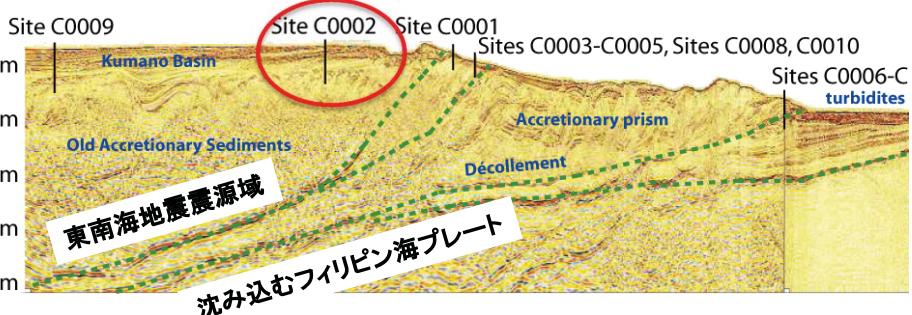
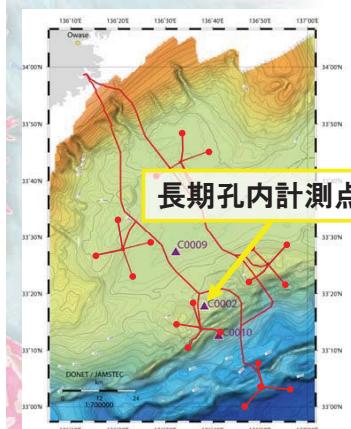
・東北地方太平洋沖地震前には、地震後に広い範囲の余効すべり、震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震+余効すべりの伝播した上で本震発生、など、様々な先行現象が観測された。

・南海トラフ全域で地震が起こらず途中で破壊が停止した場合、その周辺で発生する余効すべりの起こり方が、次に発生する地震までの発生間隔と相關すると期待される（シミュレーション結果より）。

上述の現象が発生し、観測された場合、逐次データ同化によるシナリオの絞り込みが可能。ただし小規模で時空間変化するため、モニタリングにはDONETのような稠密アレイがより有効。

11

# 掘削孔内計測システムの DONETへの接続



## [観測項目]

地殻変動（体積歪・傾斜）  
地震動（強震・広帯域・高感度）  
間隙水圧

## 温度

- 地殻変動・地震動センサーは地中にセメントングすることにより高感度なデータを長期間安定に得られる。
- DONETへ接続が行える（2012年度内予定）

12

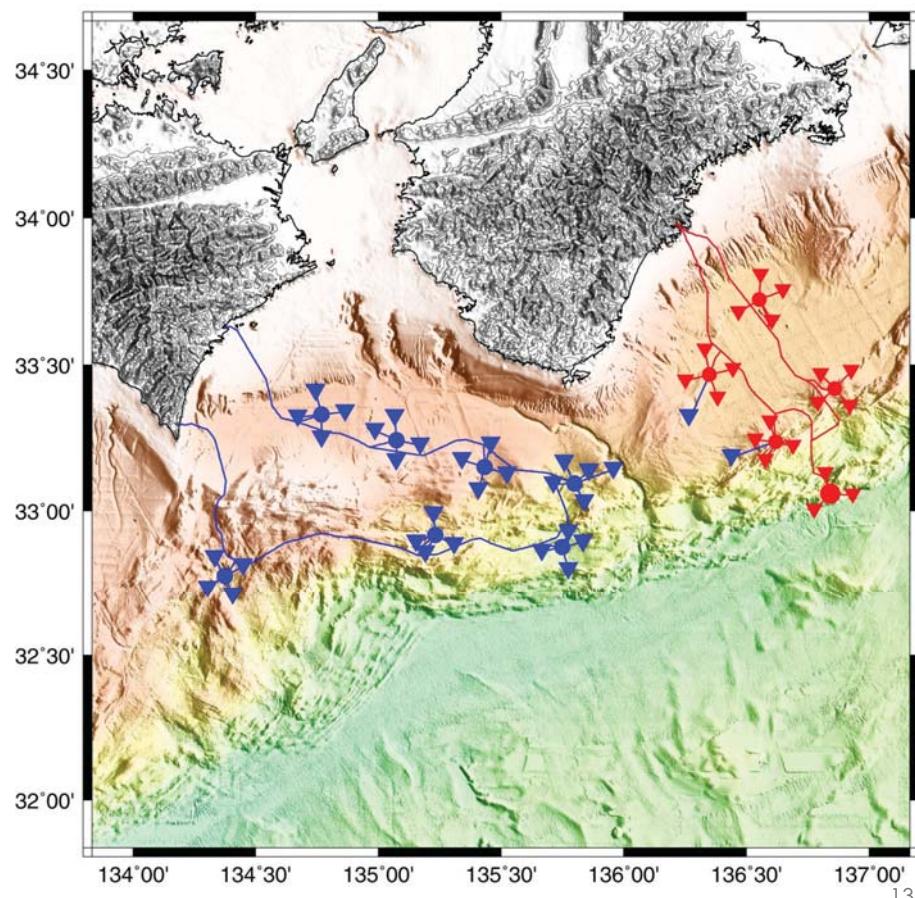
# 新しい地震・津波観測監視システム (DONET2)

## システム構想 (カッコ内はDONET1)

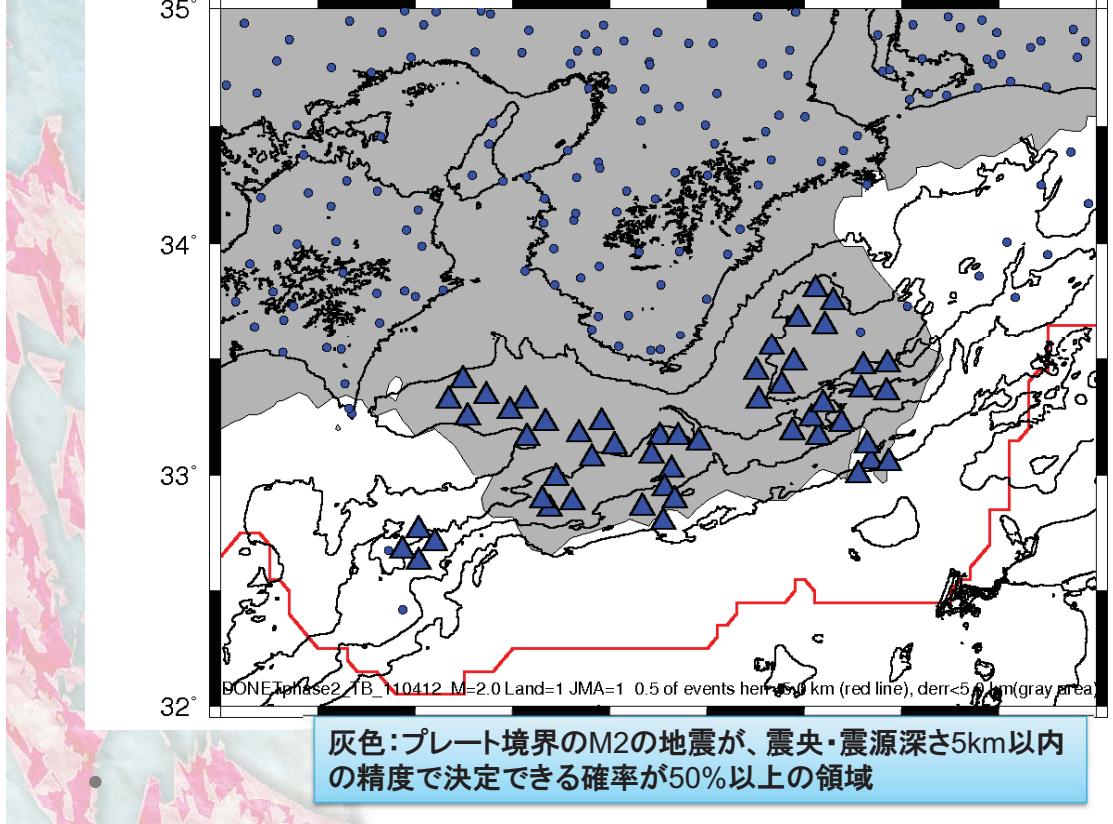
- 基幹ケーブル長:  
約350km(約250km)
- 分岐装置:  
7式(5式)
- ノード:  
7式(5式)
- 観測装置:  
29式(20式+2式)

H27年度中に設置完了  
の計画

※現在、最終ルート決定のための  
事前調査実施中。

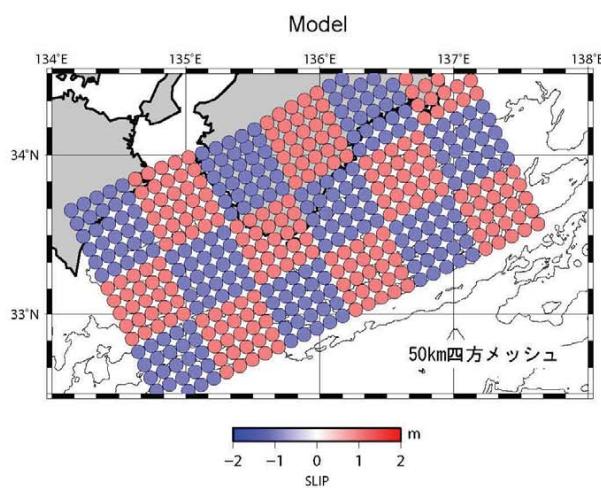


# 震源決定能力の向上

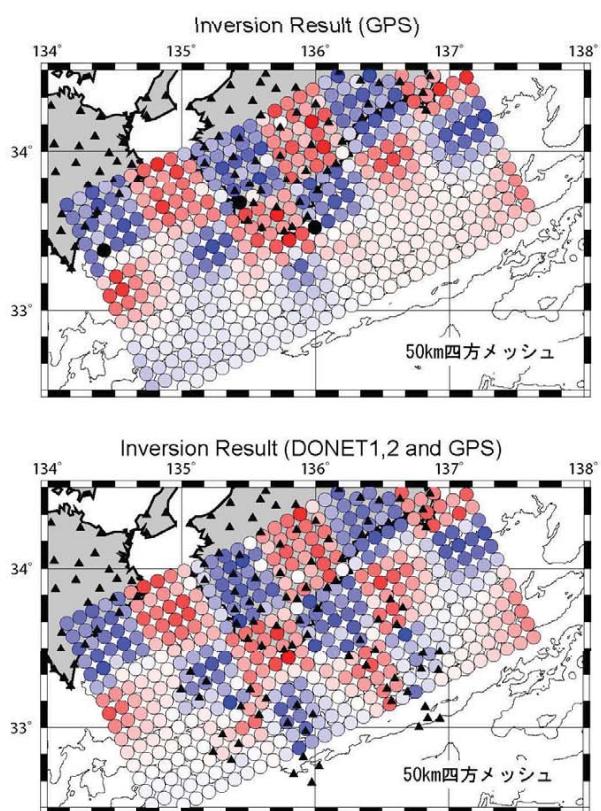


14

## プレート境界でのすべりの検知能力



プレート境界面上に±1 mのすべり分布から得られる観測点での理論的な地殻変動量に、GPS水平成分： $1\sigma = 1 \text{ mm}$ 、GPS鉛直成分： $1\sigma = 3 \text{ mm}$ 、PG鉛直成分： $1\sigma = 10 \text{ mm}$ のガウス分布のノイズを与え、それを観測データとしてインバージョン



15

# まとめ

- DONET観測網の全観測点でリアルタイムデータを着実に取得
- DONET観測網により、紀伊半島沖の巨大地震震源域内での震源決定精度が大きく向上
- 地殻変動についても、ゆっくりすべりなどtransientな変動については、海底上下変位の誤差が1cm未満で検知できると期待される
- 今後長期孔内計測と接続することにより、さらに精度向上が見込まれる
- またH27年度までに設置予定のDONET2観測網により、紀伊水道沖でも震源決定並びに地殻変動検知能力が向上することが期待される
- こうした高精度海域リアルタイム観測網は、先行現象にもとづいた巨大地震の切迫度評価やシナリオの絞り込みに役立つことが期待される

16

## シナリオ絞り込みの補足

