

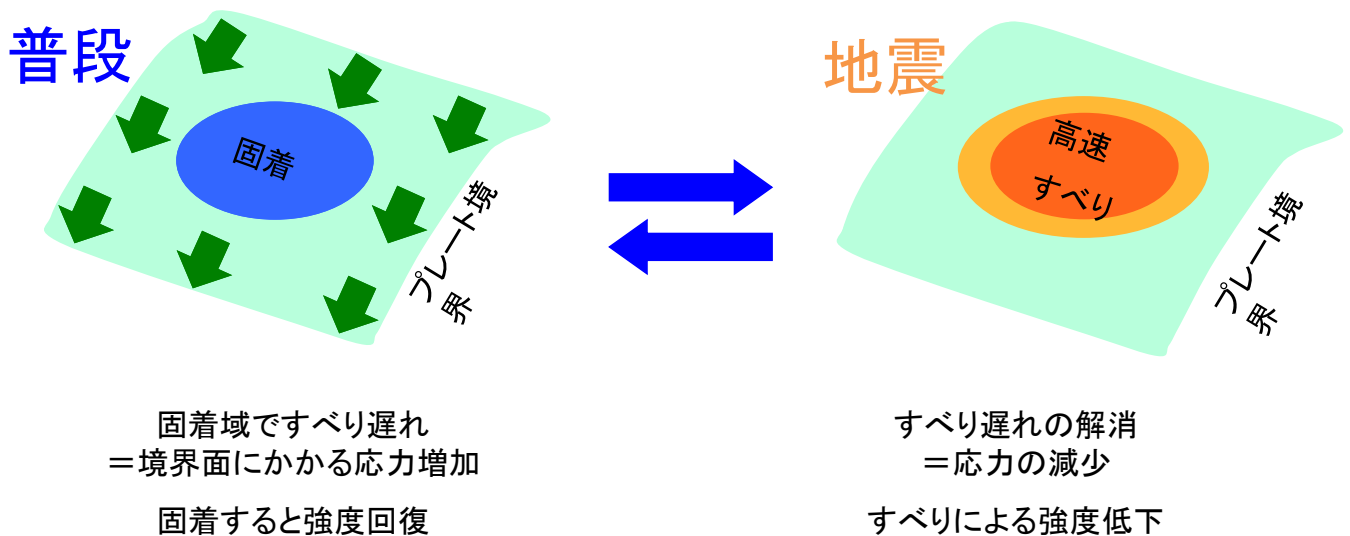
地震モデルとシミュレーションから 得られた科学的知見

堀 高峰

国立研究開発法人 海洋研究開発機構

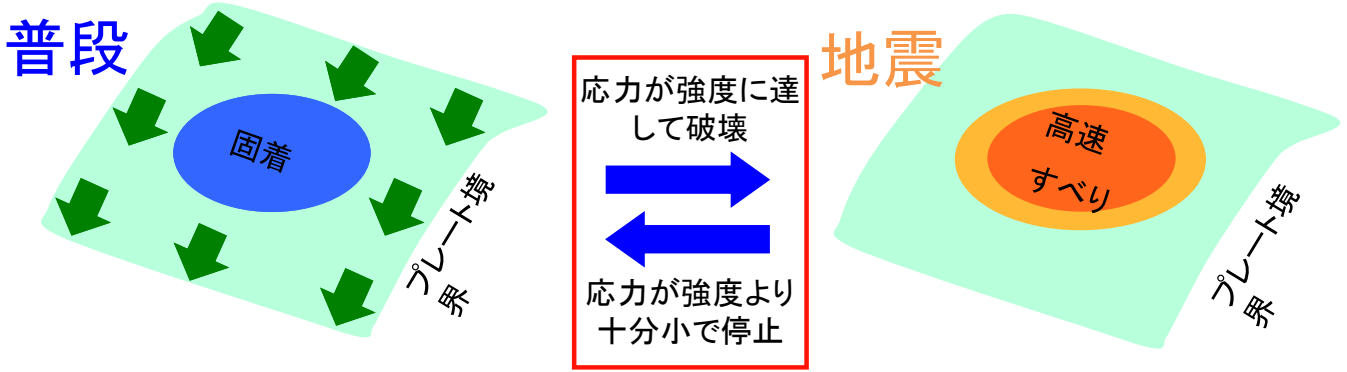
プレート境界地震をどうモデル化するか？

- 地震の繰り返し発生＝プレート境界面でのすべりの時空間変化



プレート境界地震をどうモデル化するか？

- 地震の繰り返し発生 = プレート境界面でのすべりの時空間変化



固着域ですべり遅れ = 境界面にかかる応力増加	すべり遅れの解消 = 応力の減少
固着すると強度回復	すべりによる強度低下

境界条件 力の釣り合い 摩擦則

・地震だけのモデルではなく、地震発生前の準備過程やゆっくりすべり (スロースリップイベントや余効すべり等) も含んだモデル
 ・「シナリオ」は地震の起こり方だけでなく、その前に起こる固着状態の変化やゆっくりすべりを含んだものを指す

プレート境界地震をどうモデル化するか？

プレート境界でのすべりの時空間変化の定式化

準動的な応力変化と岩石実験に基づく摩擦則

$$\frac{d\tau_i}{dt} = \sum_j K_{ij}(V_j - V_{pl,j}) - \frac{G}{2\beta} \frac{dV_i}{dt}$$

すべりによる 応力の変化

$$V_i = V_* \exp\left[\frac{\tau_i - (\tau_{s*,i} + \Delta\tau_{s,i})}{A_i}\right]$$

破壊の 構成則

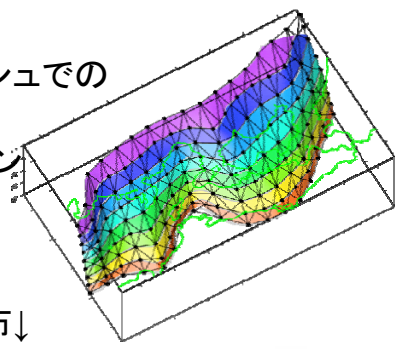
$$\frac{d\Delta\tau_{s,i}}{dt} = \frac{B_i}{L_i/V_*} \exp\left(-\frac{\Delta\tau_{s,i}}{B_i}\right) \exp\left(-\frac{V_i}{V_c}\right)$$

強度の 発展則

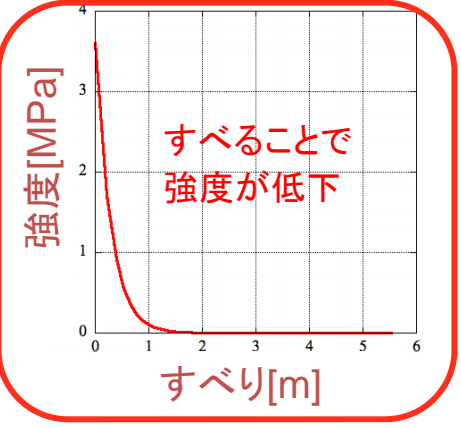
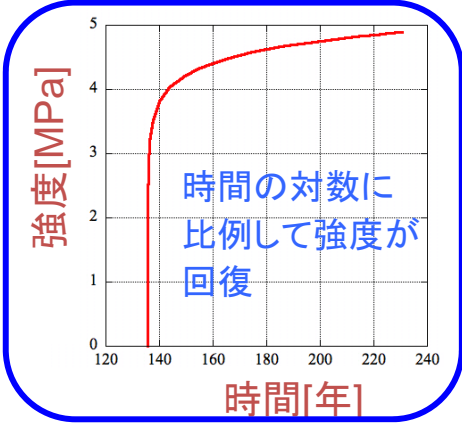
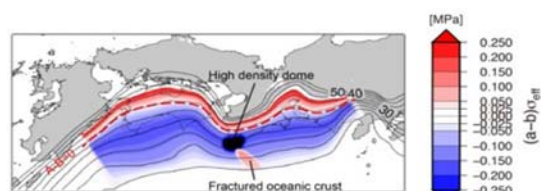
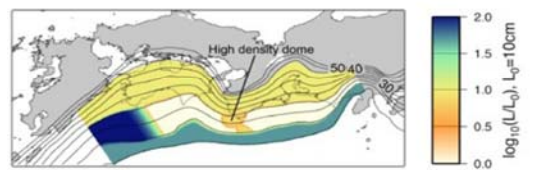
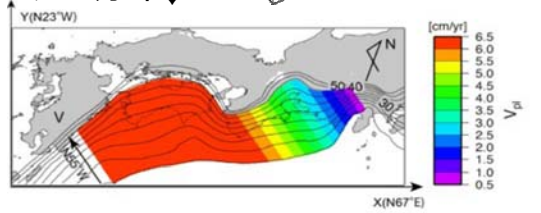
$$-\frac{V_i}{L_i} \left\{ \Delta\tau_{s,i} + B_i \ln\left(\frac{V_i}{V_*}\right) \right\}$$

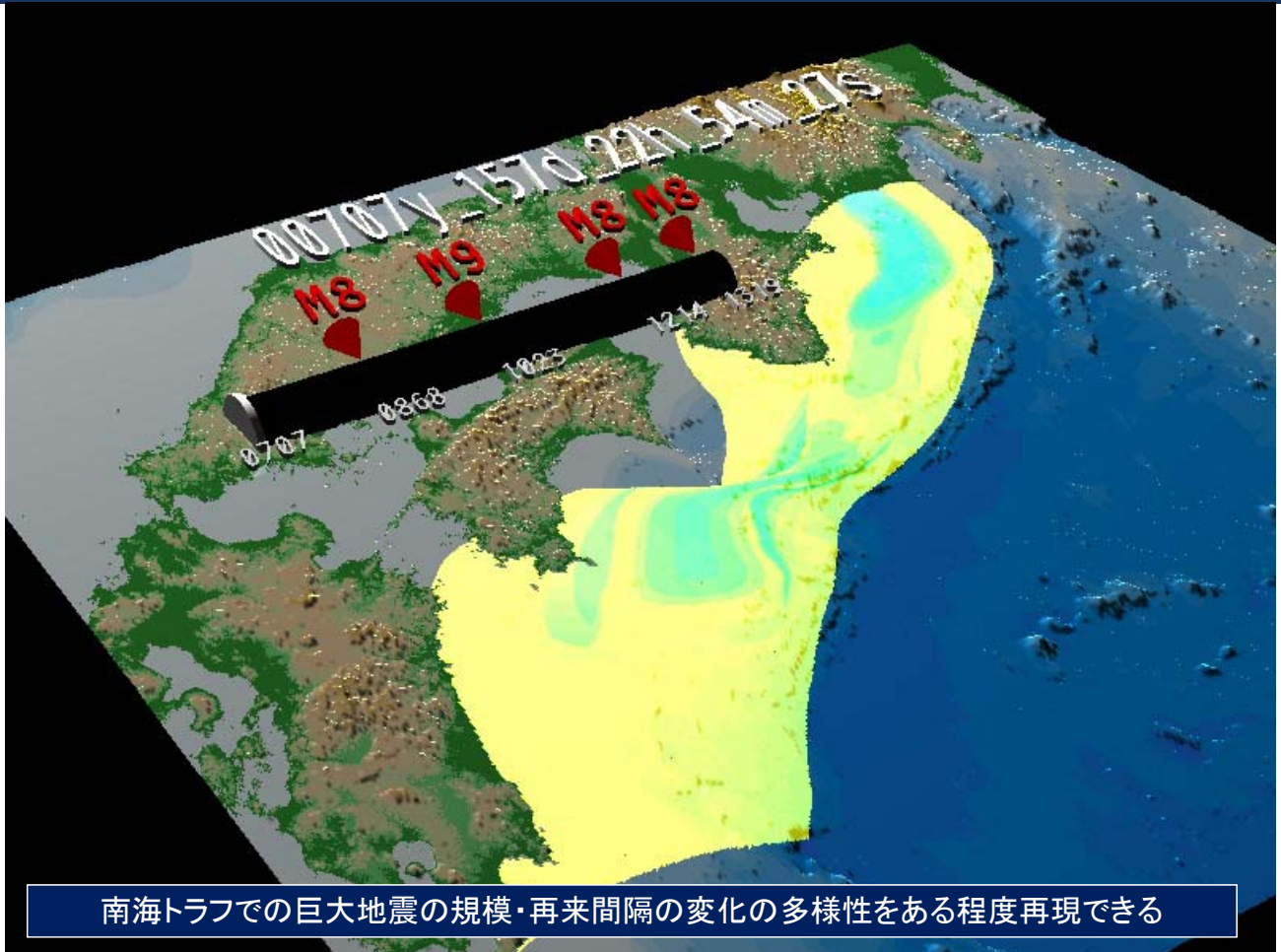
プレート境界形状

1km以下のメッシュでの収束性の確認 (シナリオパターンが変わらない)



プレート収束速度・摩擦パラメタの分布↓





前駆すべりについて

○前駆すべりは、理論的には、すべり領域を広げるのに必要な破壊エネルギー（仮定するモデルによっては破壊に伴うすべり量を規定する長さパラメータ(Dc)で表されることもある)に応じた規模で発生する [大中・松浦, 2002; Scholz, 2002]。破壊エネルギーは破壊単位の大きさに依存し、破壊単位が大きいほど破壊エネルギーも大きいと考えられる。

→上記のように断定的に書いてよいか？

○すべり領域を広げるのに必要なエネルギーが他からもたらされない場合(小規模地震からの連鎖や近傍の大中地震の影響がない場合)、前駆すべりが、破壊エネルギー(仮定するモデルによっては破壊に伴うすべり量を規定する長さパラメータ(Dc)に比例することもある)に応じた規模で、破壊核形成過程として発生する [大中・松浦, 2002; Scholz, 2002]。この理論では、破壊エネルギーは破壊単位の大きさに依存し、破壊単位が大きいほど破壊エネルギーも大きいと考えられているため、検知できるほどの前駆すべりが大地震の前に発生する可能性があるとされている。なお、破壊単位が大きいが(地震規模が大きい)ほど再来間隔が長く、その間の震源域深部延長でのすべりによる応力集中に耐えられるためには、破壊開始位置付近の破壊エネルギーが大きい必要のあることが数値シミュレーションで示されている [Kato, 2012] (ただし、地震時の大すべりがThermal pressurizationによるものである場合 [例えば Mitsui et al., 2012]、この限りではない)。

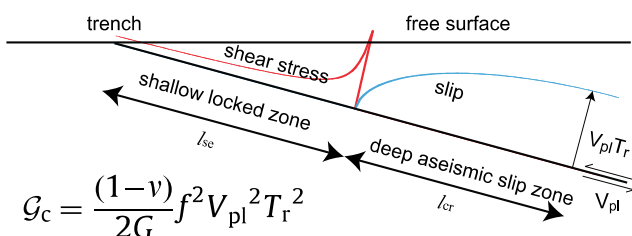


Table 1
Fracture energies at the rupture nucleation points of large interplate earthquakes in Japan.

Earthquake	M	T _r (yr)	V _{pl} (m/yr)	G _c (MJ/m ²)
Nankai	~8	90-260 ^a	0.06 ^b	0.1-1
Tohoku	~9	400-800 ^c	0.085 ^d	6-20

Kato (2012)

地震モデルと前駆すべりの検知可能性

○固有地震モデル: 地震の震源断層域全体が一定の破壊エネルギーを持つとする極端に単純なモデル。このようなモデルでは、大規模な地震の前に検知可能な規模の前駆すべりが発生する可能性がある。

○階層的不均質モデル: 震源断層域全体が空間的な階層構造を持ち、さまざまな大きさの破壊単位がべき分布※に従って存在するような極端に複雑なモデル[Ide and Aochi, 2005]。このモデルでは、破壊エネルギーが小さい場所から始まった地震が動的に連鎖して拡大した結果として大規模な地震が発生することが予想される。前駆すべりの規模は、最初の破壊の規模に依存し、最初の破壊が非常に小さい場合には、前駆すべりは必ずしも発生するとは言えず、発生したとしてもその規模は非常に小さい。

※どの大きさを見ても、それよりも一回り小さなものが一定の比率で多く存在していて、特徴的な大きさがない分布。

○地表に露出した断層帯の位置、形状の観察では、異なる長さの断層が多数入れ子になっているという観察例もある[Swanson, 2006]。【図6-1】このことは、震源断層域が複雑な構造を持つことを示唆すると考えられる。

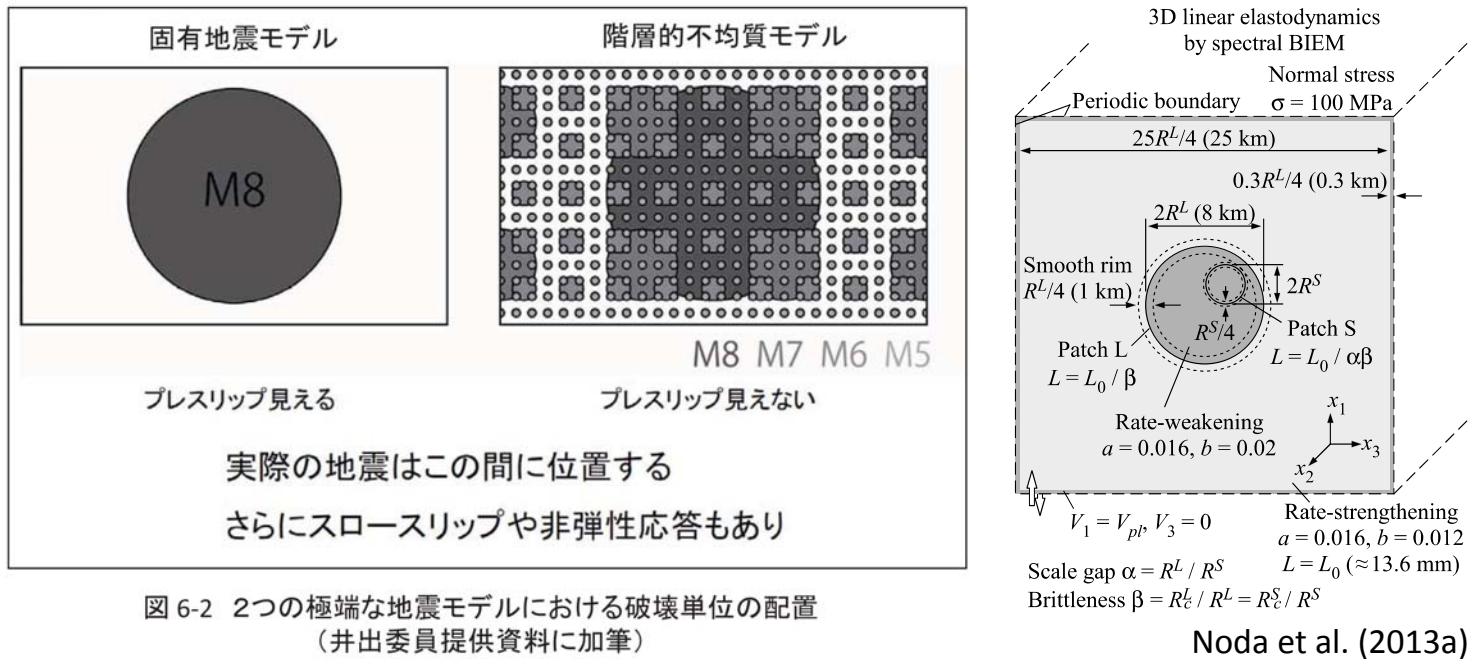
○規模の異なるいくつかの地震について地震波形の最初の部分を比較すると、ほとんど同じように見える。この観察は、これらの地震が同程度の小さな破壊単位から動的に連鎖して拡大したことを示唆しており、階層的不均質モデルに調和的である[Ide and Aochi, 2005]。

→前回の部会では、固有地震モデルは前駆すべりが発生、階層的不均質モデルは発生しないという見解を概念モデルにもとづいてまとめていた。

しかし、以下で示すように、階層的不均質モデル(を単純化した場合)の数値シミュレーションを実施した結果、階層的不均質モデルでも前駆すべりが生じる場合もあることがわかる[Noda et al., 2013a]。

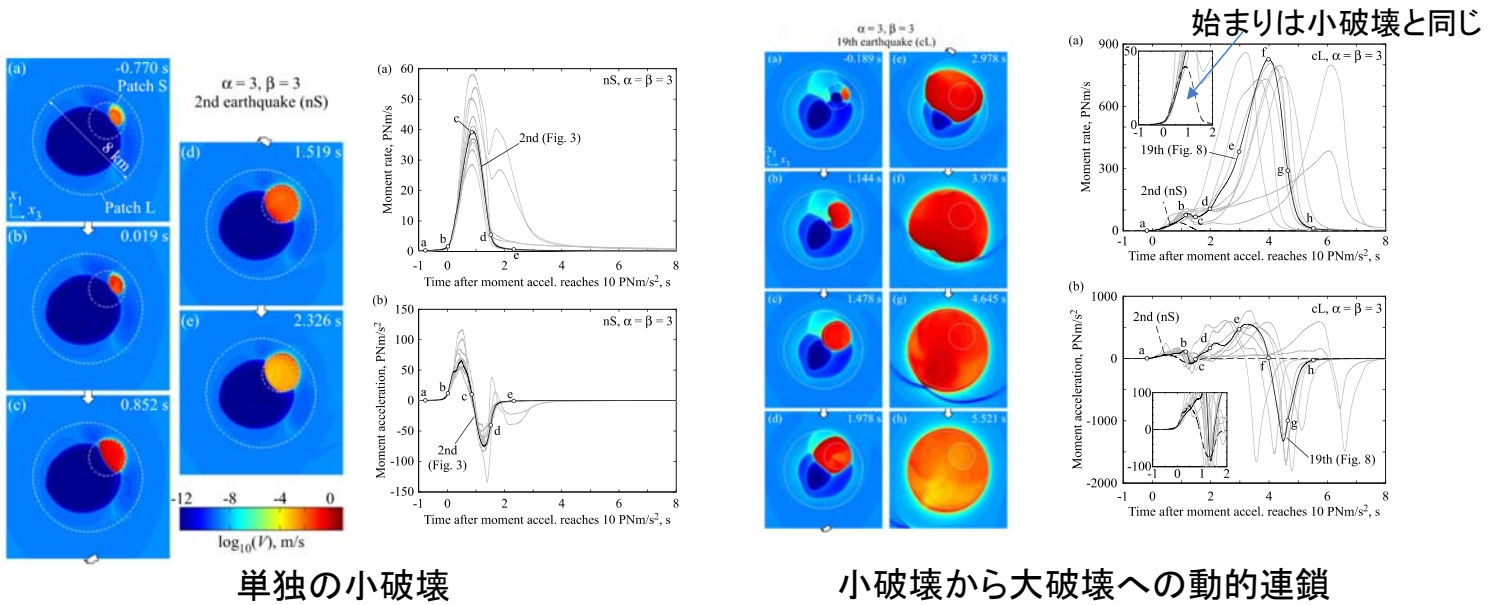
* 前駆すべりの検知可能性→検知できる位の規模の前駆すべりがおこる可能性

地震モデルと前駆すべりの検知可能性



- 固有地震モデルと階層的不均質モデルの中間的なモデル(あるいは階層的不均質モデルを単純化したモデル)での地震発生サイクルシミュレーション結果からわかることを以下で紹介する[Noda et al., 2013a]。
- なお、階層的不均質モデルでは破壊単位が大きいほど大きな破壊エネルギーを持つと仮定しているが、規模の異なる破壊単位間のギャップとしては、現実の地震の起こり方に近い条件(例えばIde and Aochi, 2005で書かれているように、sub-shear ruptureになりやすい)となっている。このため、小破壊から大破壊に必ず連鎖するのではなく、連鎖したりしなかったりということが起こる。

地震モデルと前駆すべりの検知可能性



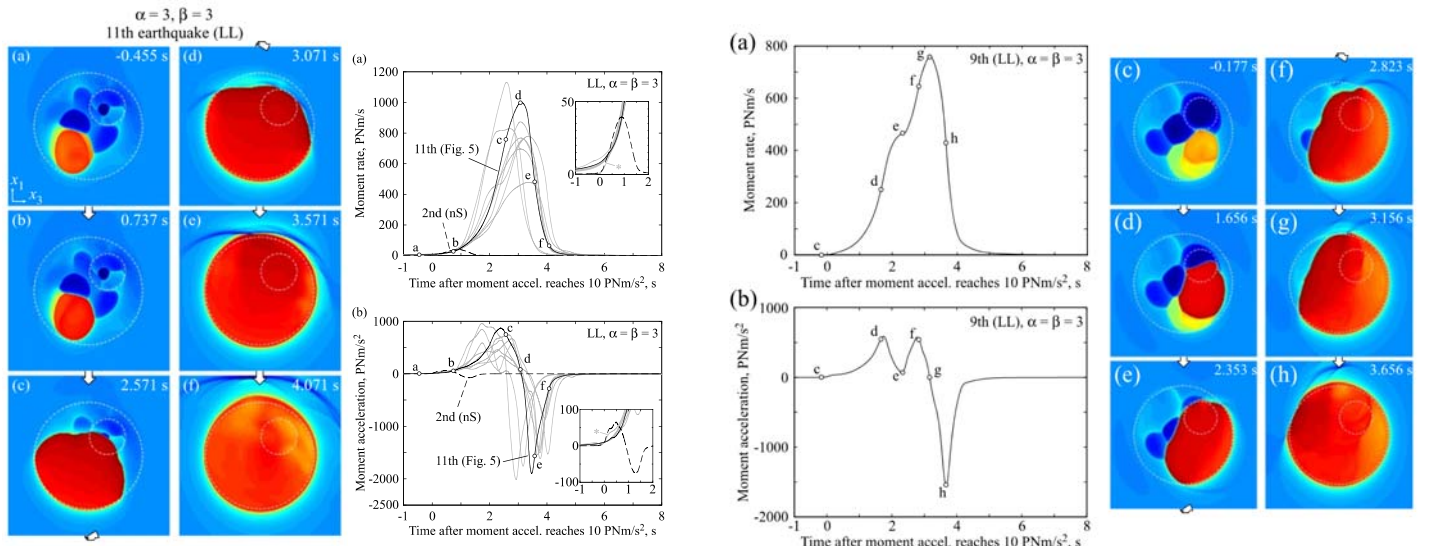
単独の小破壊

小破壊から大破壊への動的連鎖

[Noda et al., 2014]

- 小さな破壊から大きな破壊へ動的に連鎖する場合に、小さな破壊によって生じる地震波形が、単独で発生する小さな地震の波形と同じようなものとして独立して認識される[例えば Ide and Aochi, 2005]ためには、大きな破壊の破壊核と小さな破壊単位とが同程度のサイズである必要があり、その場合には大きな破壊の準備状況に応じて小さな破壊が単独で起きたり、大きな破壊に動的に連鎖したりすることが、階層的不均質モデルの最も単純な場合(1つの大きな破壊単位の内部に、1つの小さな破壊単位が存在する)のシミュレーションの結果示されている[Noda et al., 2014]。

地震モデルと前駆すべりの検知可能性



大破壊の破壊核が成長して大破壊 (前駆すべりをとまない、初期破壊も小破壊とは異なり、ゆっくりした立ち上がり)

大破壊の破壊核の成長途中に小破壊が発生して大破壊に成長

[Noda et al., 2014]

- 前述の条件のもとでは、小さな破壊から大きな破壊に動的に連鎖する場合だけでなく、小さな破壊後の余効すべりを経て大きな破壊が発生する場合・大きな破壊単位内の前駆すべりをとまなう場合などが、同じ摩擦パラメタでの繰り返し破壊の中で生じることが確認されている[Noda et al., 2013a]。つまり、階層的不均質モデルにおいても、前駆すべりをとまなう場合と、とまなわない場合がある。

地震モデルと前駆すべりの検知可能性

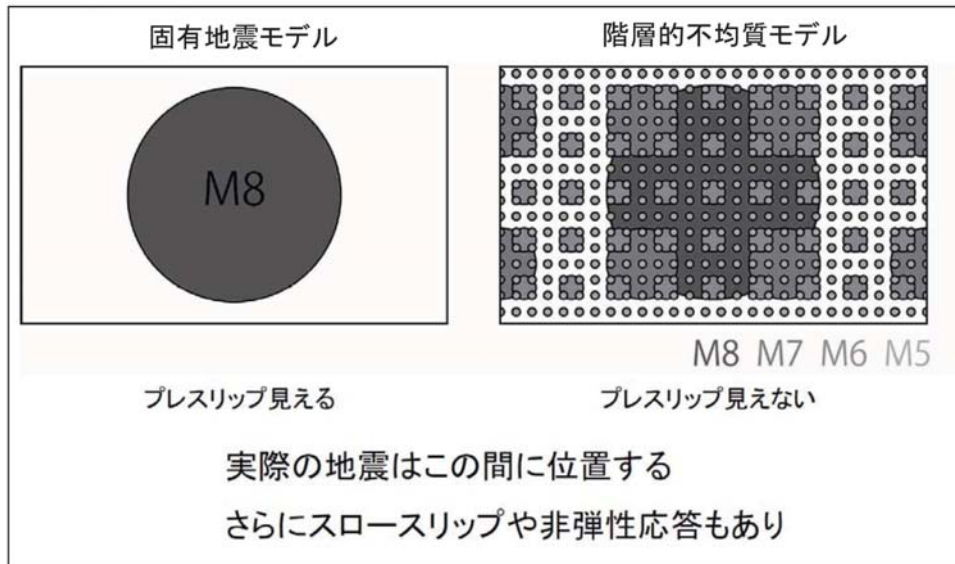
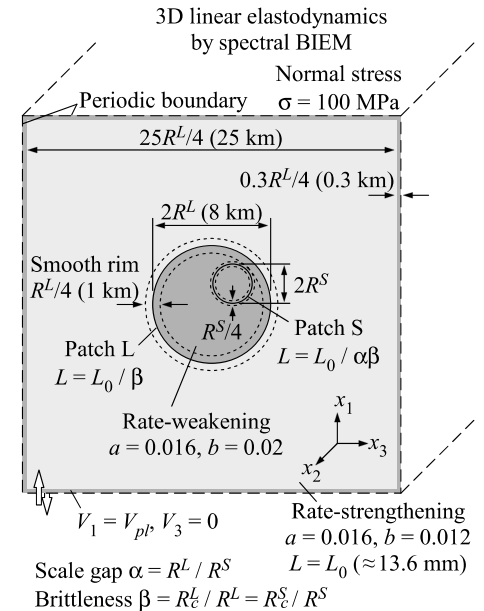


図 6-2 2つの極端な地震モデルにおける破壊単位の配置
(井出委員提供資料に加筆)



Noda et al. (2013a)

○実際の地震は、2つの極端なモデル(固有地震モデルと階層的不均質モデル)の間にあると考えられる。ただし、どちらにどの程度近いかという定量的な議論はできていないため、前駆すべりの検知可能性は評価できていない。

→階層的不均質モデルでも、前駆すべりが起こる場合はあり、どちらにどの程度近いだけが問題ではない。

地震発生時期と関係する現象

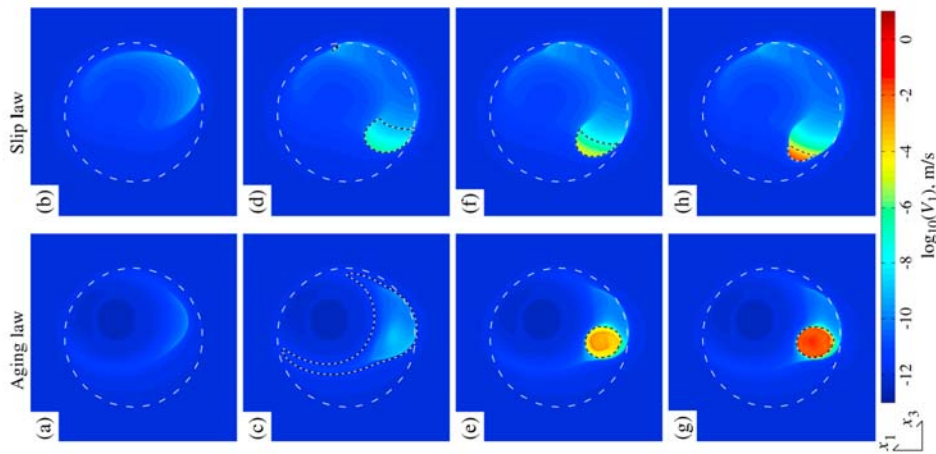
○加速する前駆すべり: 南海トラフのようにプレート間の固着が強い状況を再現した上で、これまでの南海トラフ沿いの観測事実即して本震よりも一回り小さな部分的破壊が生じないということを仮定すると、加速する前駆すべりが発生する結果が得られる[Hori, 2006; 弘瀬・前田, 2010]。ただし、**部分的な小破壊は起きずに連鎖破壊は起こせる部分が、大きな破壊単位の内部の破壊開始位置付近に存在すれば前駆すべりはしない**といったこと、構成則が異なると前駆すべりの広がり方が異なる[Noda et al., 2013b]といったことなどもあり、規模については、現状では評価できていない。このため、シミュレーションから見ても、前駆すべりを確実に観察(観測?)できるとは言えない。

○震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震とその余効すべり: 階層的な破壊単位の分布とプレート間の固着が弱い条件を仮定すると、本震前に期待される現象として定性的には再現可能である[例えば Nakata et al., 2016]。プレート境界の強く固着している領域より深部で繰り返し発生するゆっくりすべりを再現するシミュレーションでは、大規模な地震の発生が近づくにつれてゆっくりすべりの規模や繰り返し間隔が変化する可能性が示されている[Matsuzawa et al., 2010; Ariyoshi et al., 2012]。

→前回の部会では、南海トラフは固有地震モデルに比較的近く、「震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震とその余効すべり: 階層的な破壊単位の分布とプレート間の固着が弱い条件を仮定すると、本震前に期待される現象として定性的には再現可能である」という部分については南海トラフには適用されないと考えられていた。しかし、海底地殻変動観測データの解析により、固着の弱い領域も存在することが明らかになった[Yokota et al., 2016]ことや、2016/4/1の熊野灘地震後の余効変動の起き方などから、南海トラフにおいても、固着が弱く、ゆっくりすべりが震源域内でも発生する場所があることを考慮する必要があると考えられつつある。

また、前駆すべりをともなわない場合でも、小地震による余効すべりの起こり方が、大地震前とそうでない場合とで異なる(前者はより大きなモーメント解放をする)とのシミュレーション結果が得られている[Noda et al., 2013a; Hori and Miyazaki, 2011]。

地震発生時期と関係する現象

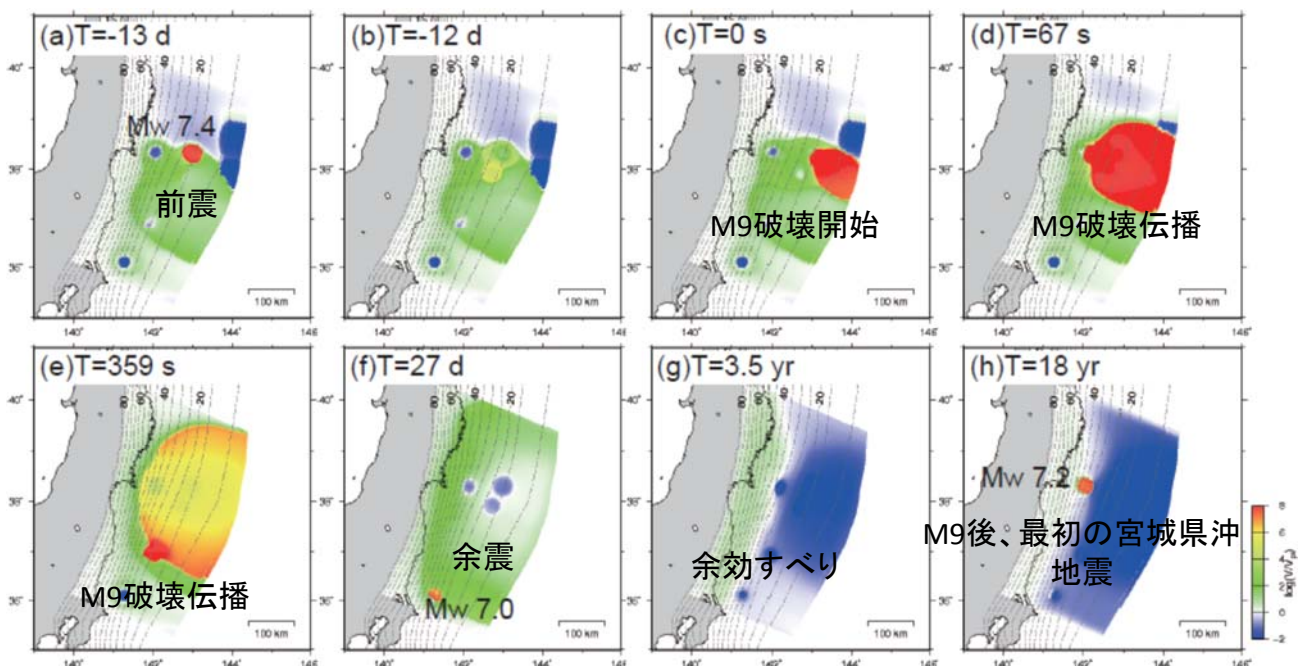


Noda et al. (2013b)

Aging lawでは破壊核が空間的に広がって動的破壊に至るが、Slip lawでは加速する領域は狭くなっていく。

加速する前駆すべり: 南海トラフのようにプレート間の固着が強い状況を再現した上で、これまでの南海トラフ沿いの観測事実 に即して本震よりも一回り小さな部分的破壊が生じないということを仮定すると、加速する前駆すべりが発生する結果が得られる [Hori, 2006; 弘瀬・前田, 2010]。ただし、部分的破壊は起きずに連鎖破壊は起こせる部分が、大きな破壊単位の内部の破壊開始位置付近に存在すれば前駆すべりはしないといったこと、構成則が異なると前駆すべりの広がり方が異なる [Noda et al., 2013b] といったことなどもあり、規模については、現状では評価できていない。このため、シミュレーションから見ても、前駆すべりを確実に観察できるとは言えない。

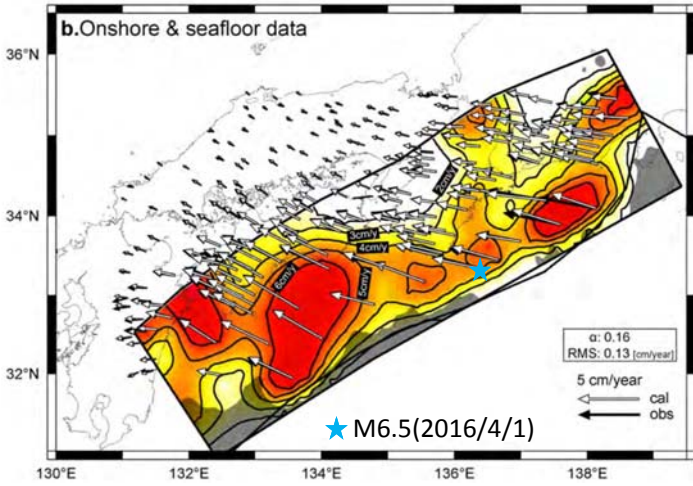
地震発生時期と関係する現象



M9やM7の繰り返し・地震時・地震後の振る舞いをある程度再現 Nakata et al. (2016)

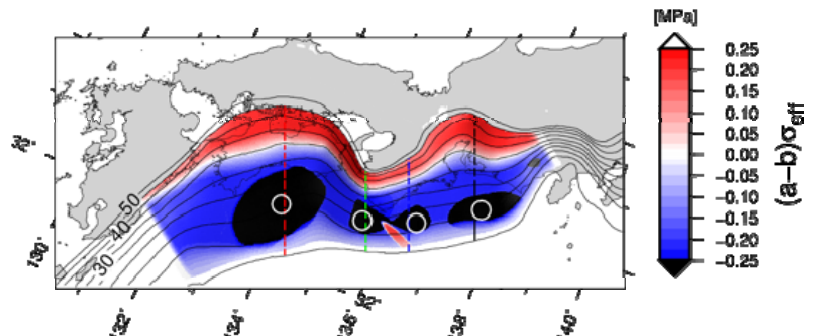
- 震源近傍でのゆっくりすべり、前震活動、前震とその余効すべり: 階層的な破壊単位の分布とプレート間の固着が弱い条件を仮定すると、本震前に期待される現象として定性的には再現可能である [例えば Nakata et al., 2016]。

地震発生時期と関係する現象

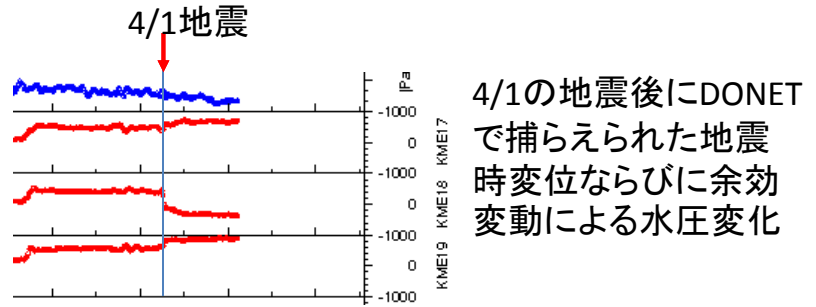


Yokota et al. (2016)

海底地殻変動データを加えたすべり欠損の解析結果。固着状態の強弱が明瞭に見られる。星印は4/1に起きたM6.5の震央。



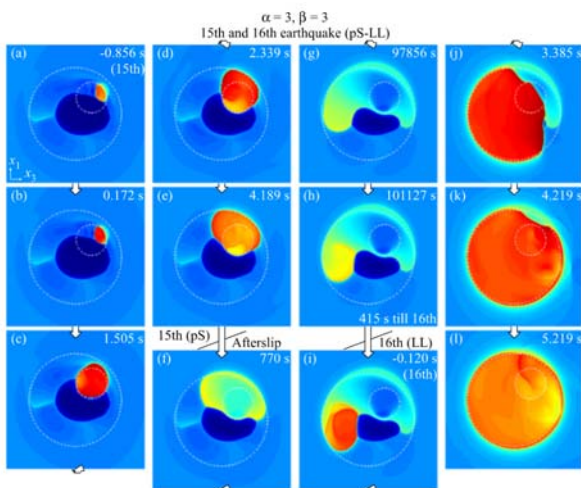
左の結果を考慮した摩擦パラメタの不均質分布。



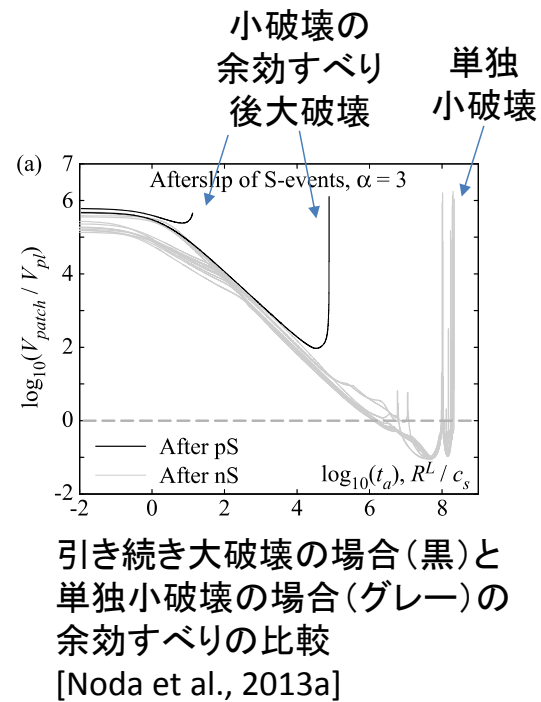
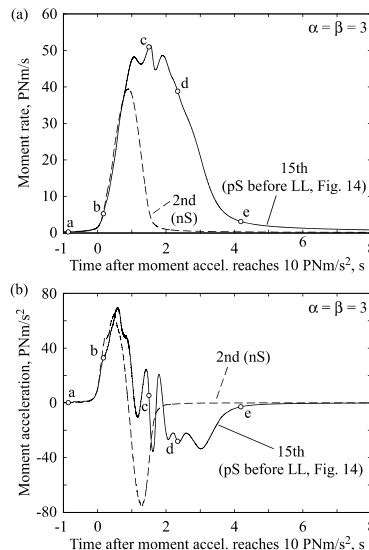
4/1の地震後にDONETで捕らえられた地震時変位ならびに余効変動による水圧変化

- 従来、南海トラフは固着の強い領域と認識されていたが、海底地殻変動観測データの解析により、固着の弱い領域も存在することが明らかになった[Yokota et al., 2016]。さらに、固着の比較的弱い領域内で起きた2016/4/1の熊野灘の地震(Mjma6.5)では、地震後の余効変動が顕著であり、プレート境界での余効すべりの可能性がある。こうした観測事実を受けて、固着の弱い条件と強い条件の両方を同時に考慮したモデルにもとづく振る舞いが検討されはじめている[兵藤・堀, 2016]。

地震発生時期と関係する現象



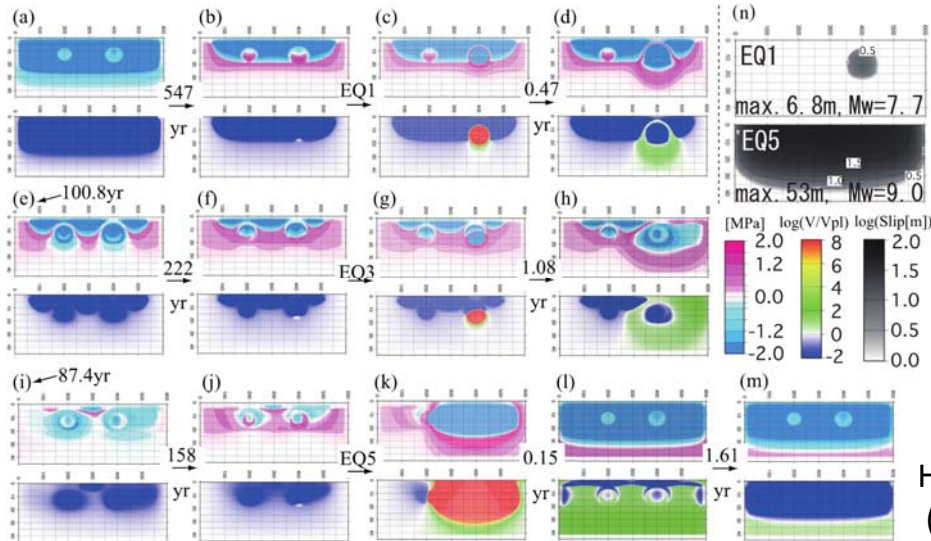
小破壊後に余効すべりが発生、伝播した先で大破壊の破壊核が形成し、大破壊に至る[Noda et al., 2014]



引き続き大破壊の場合(黒)と単独小破壊の場合(グレー)の余効すべりの比較 [Noda et al., 2013a]

- 単純な階層的不均質モデルにおいて前駆すべりをとまわらない場合のうち、小さな破壊後に余効すべりを経て大きな破壊が発生する場合には、小さな破壊だけで終わる場合の余効すべりとは領域全体のモーメント速度に有意な違いがみられる(両方の場合を複数回計算した結果の比較)[Noda et al., 2013a]。

地震発生時期と関係する現象



Hori and Miyazaki (2011)

M9震源域内でのM7の繰り返し発生のシミュレーションにおけるM7後の余効すべりが(d)と(h)を比較すると、(h)つまりM9の発生が近い場合の方が大きく広がっている。

- 階層的不均質モデルでM7とM9が共存する地震の繰り返しを表現したシミュレーションにおいて、M9地震の発生から遠い時期のM7地震の余効すべりは、発生が近い時期の余効すべりよりも大きなモーメントになる[Hori and Miyazaki, 2011]。

大地震発生に至る多様さ

- ○階層的不均質モデルを仮定したシミュレーションでは、地震発生前にゆっくりすべりを伴う場合、伴わない場合があり、またゆっくりすべりが伴う場合でもそれが加速して地震に至る場合や加速することなく大地震に至る場合等のように、大地震発生に至る多様さが示されている[Noda et al., 2013a; Noda and Hori, 2014]。このため、地震前に観測された現象から一対一の対応関係で大地震を予測することは極めて困難であると言える。なお、ここでのゆっくりすべりは、東北地震前に見られたような大地震の震源域内部で発生するものであり、豊後水道や東海で観測されている震源域深部でのゆっくりすべりとは性質が異なる可能性がある。震源域内とは異なる摩擦特性を与えて深部延長でのゆっくりすべりを表した例としては[Kato, 2003; Shibasaki and Iio, 2003]がある。最近では前駆すべりよりも、ゆっくり地震のモデルとして用いられており[例えばMatsuzawa et al., 2010]、前駆すべりとしての性質の検討は十分には進んでいない。

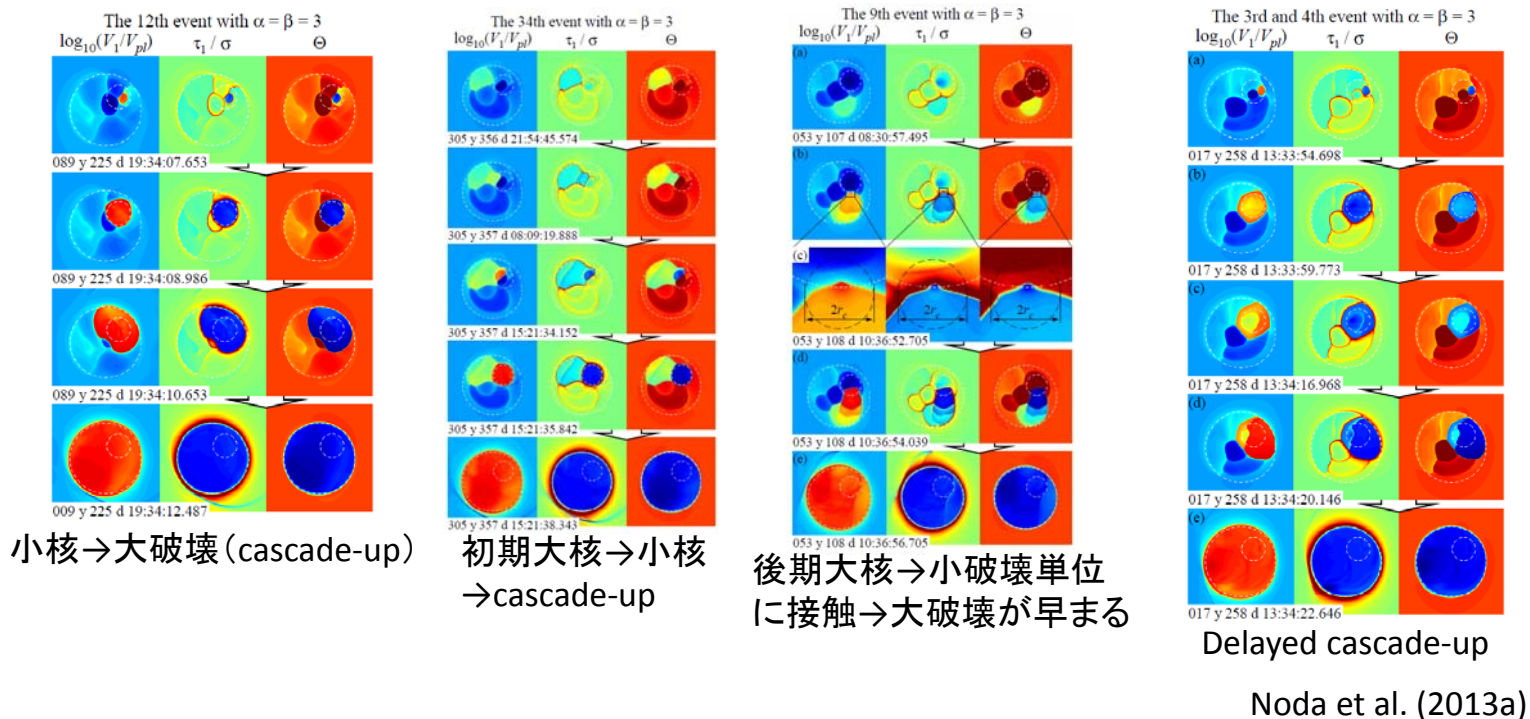
→多様さの具体例が論文として公表されている [Noda et al., 2013a]。

- 小破壊核からそのまま大破壊 (cascade-up)
 - 小破壊から大破壊への動的連鎖 (途中で少しdelayがある場合、ない場合)
 - 大破壊の破壊核の成長途中で小破壊が発生して大破壊に成長
 - 大破壊の破壊核が成長して大破壊 (前駆すべりをともない、初期破壊も小破壊とは異なる)
 - 小破壊後に余効すべりが発生、伝播した先で大破壊の破壊核が形成し、大破壊に至る
- 上記のような多様なパターンが同じモデルパラメタの繰り返し破壊の中で生じる。

- モデルパラメタによって破壊前のゆっくりすべりの起こり方が変化する[Noda and Hori, 2014]。

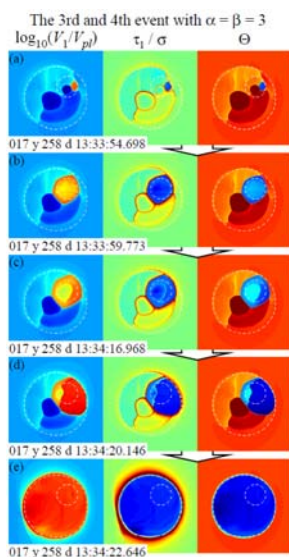
*用語整理が必要: ゆっくりすべり、前駆すべり、破壊核成長

大地震発生に至る多様さ



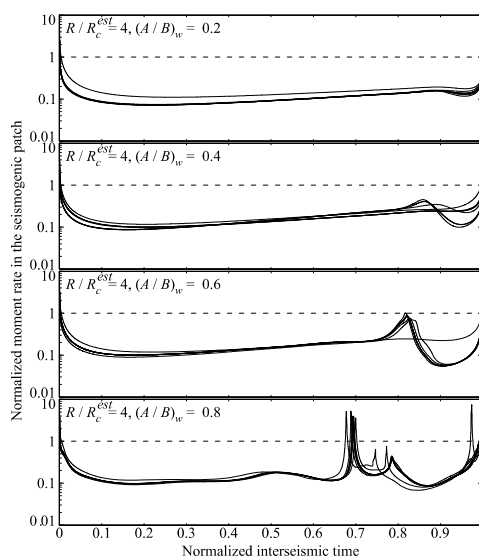
- 階層的不均質モデルを仮定したシミュレーションでは、地震発生前にゆっくりすべりを伴う場合、伴わない場合があり、またゆっくりすべりが伴う場合でもそれが加速して地震に至る場合や加速することなく大地震に至る場合等のように、大地震発生に至る多様さが示されている[Noda et al., 2013a; Noda and Hori, 2014]。

大地震発生に至る多様さ



Coalescence

Noda et al. (2013a)

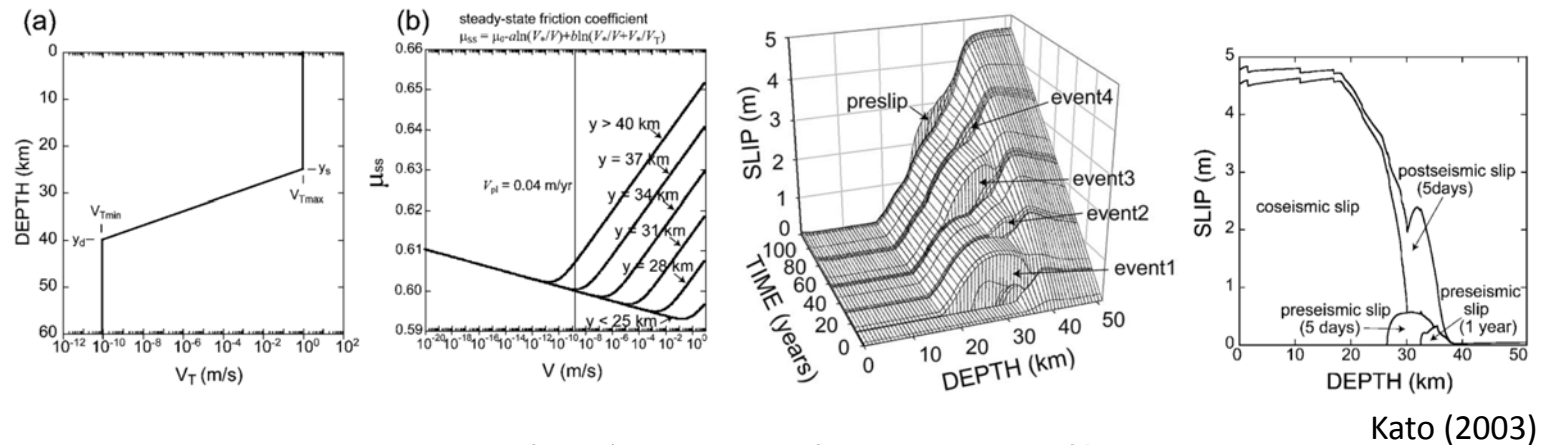


大破壊前のゆっくりすべりの
 多様性(A-BではなくA/Bに依存
 して起こり方が変わる)

Noda and Hori (2014)

- 階層的不均質モデルを仮定したシミュレーションでは、地震発生前にゆっくりすべりを伴う場合、伴わない場合があり、またゆっくりすべりが伴う場合でもそれが加速して地震に至る場合や加速することなく大地震に至る場合等のように、大地震発生に至る多様さが示されている[Noda et al., 2013a; Noda and Hori, 2014]。

大地震発生に至る多様さ



震源域深部延長では、すべり速度が大きくなると速度強化となる摩擦特性。ゆっくりすべりの繰り返しが何度か起き、その後前駆すべりが発生する。

- なお、ここでのゆっくりすべりは、東北地震前に見られたような大地震の震源域内部で発生するものであり、豊後水道や東海で観測されている震源域深部でのゆっくりすべりとは性質が異なる可能性がある。震源域内とは異なる摩擦特性を与えて深部延長でのゆっくりすべりを表した例としては [Kato, 2003; Shibasaki and Iio, 2003] がある。最近では前駆すべりよりも、ゆっくり地震のモデルとして用いられており [例えば Matsuzawa et al., 2010]、前駆すべりとしての性質の検討は十分には進んでいない。

大地震発生に至る多様さ

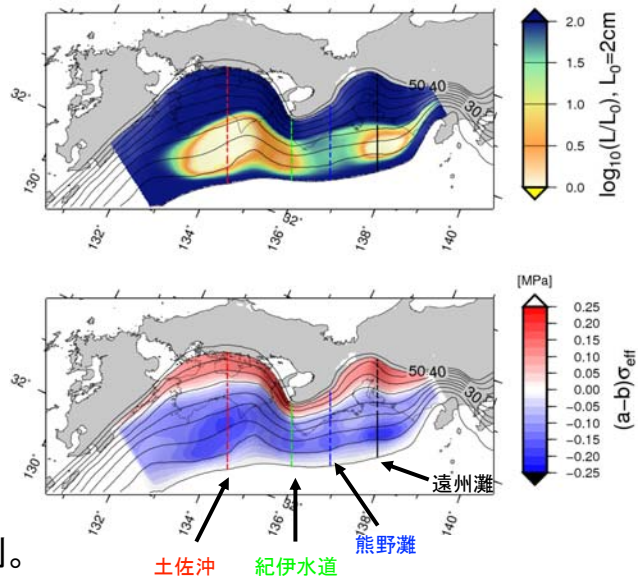
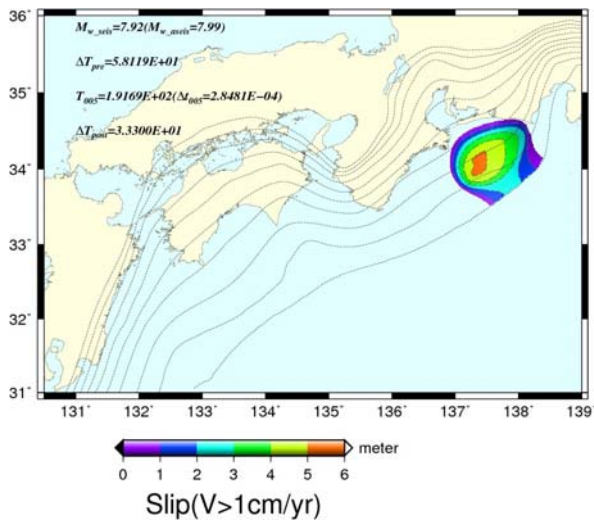
○例えば、東海及び豊後水道のゆっくりすべりの繰り返しを再現するシミュレーションの例では、紀伊半島沖で前駆すべりが発生する結果も得られているが、仮定するパラメータの値によっては豊後水道のゆっくりすべりが加速してゆっくりすべりの縁付近から破壊が開始する場合がある。また、ゆっくりすべりが大地震に至らない場合もある。なお、この例では、シミュレーションを行ったパラメータ範囲では、東海地震は単独では起きなかった [弘瀬・前田, 2010]。

→前回の部会では東海単独が起こりにくいことが示されていたが、海底地殻変動データ解析結果を考慮したシミュレーションでは東海(遠州灘沖を含む)からの発生も見られている。

また、大地震発生に至る多様さという意味では、他の地震による誘発も考慮することが重要である。

足摺沖から破壊開始して紀伊半島の西側の地震(南海地震)が東側(東海地震・東南海地震)よりも先に起こる場合が、シミュレーションでは見られる。またその中で、1968年日向灘地震の震源域でM7クラスの地震が発生すると、数十年以上早く西側の地震が早く起こる(誘発される)場合がある [Hyodo et al., 2016]。

大地震発生に至る多様さ

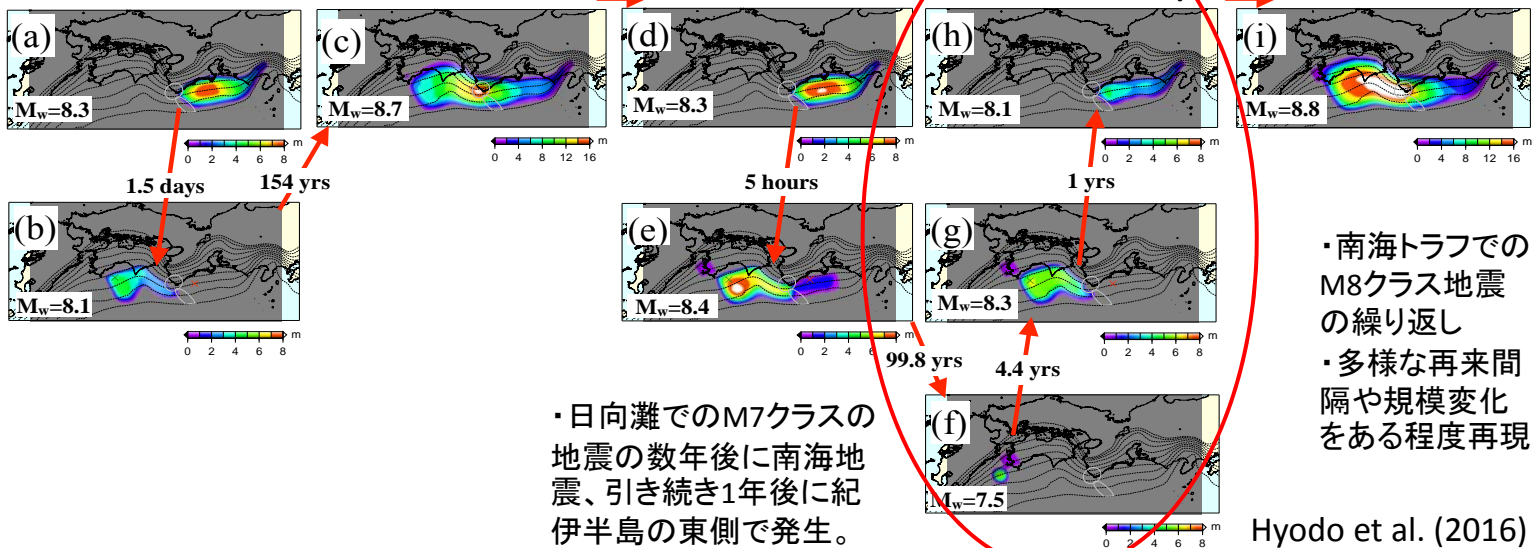


右の摩擦パラメタで生じた地震時すべりの例。
東海沖のすべり遅れ域に対応した地震が
発生している。

- 海底地殻変動データ解析結果を考慮したシミュレーションでは東海（遠州灘沖を含む）からの発生も見られる。

大地震発生に至る多様さ

← Cycle1 → → Cycle2 → → Cycle3 → → Cycle4 →



・日向灘でのM7クラスの地震の数年後に南海地震、引き続き1年後に紀伊半島の東側で発生。

・南海トラフでのM8クラス地震の繰り返し
・多様な再来間隔や規模変化をある程度再現

Hyodo et al. (2016)

- 足摺沖から破壊開始して紀伊半島の西側の地震（南海地震）が東側（東海地震・東南海地震）よりも先に起こる場合が、シミュレーションでは見られる。またその中で、1968年日向灘地震の震源域でM7クラスの地震が発生すると、数十年以上早く西側の地震が早く起こる（誘発される）場合がある [Hyodo et al., 2016]。

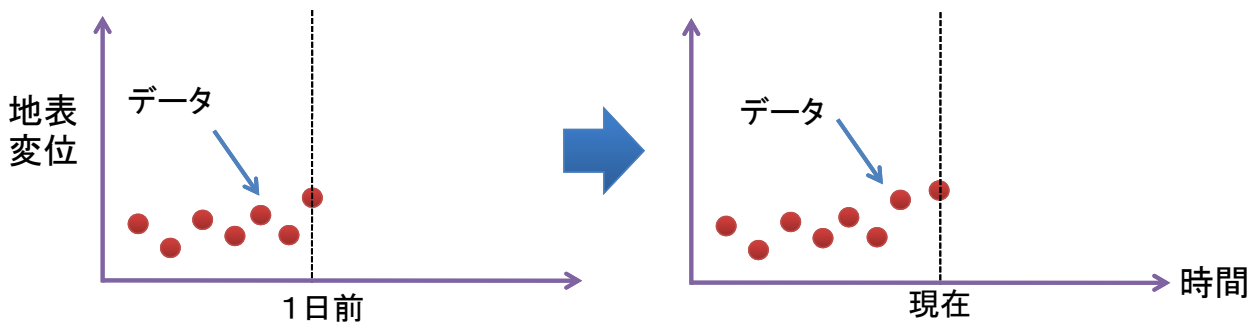
大地震発生に至る多様さ

○実際にゆっくりすべりを観測した場合に、それが地震につながる前駆すべりであるのか、地震につながらないゆっくりすべりであるかを識別することは困難である。

→現時点で上記を断定できるほど理解が進んでいる訳ではない。

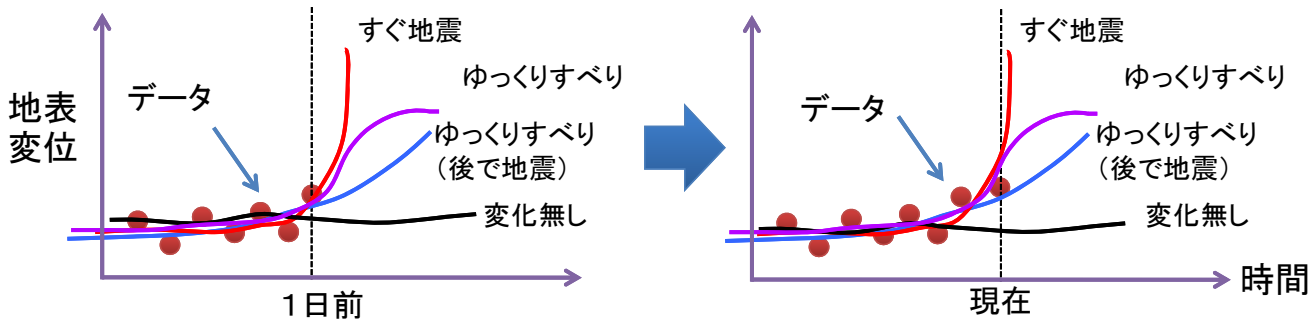
そもそも、前駆すべりかどうかだけで大地震につながるかどうかを判断するべきではなく、「地震発生時期と関係する現象」で示した現象を活用したり、東北地震の先行現象に示されたような様々な時空間スケールの現象にもとづいて大地震の発生準備が整っているかどうかを評価したりすることも重要である。

シミュレーションによる予測可能性



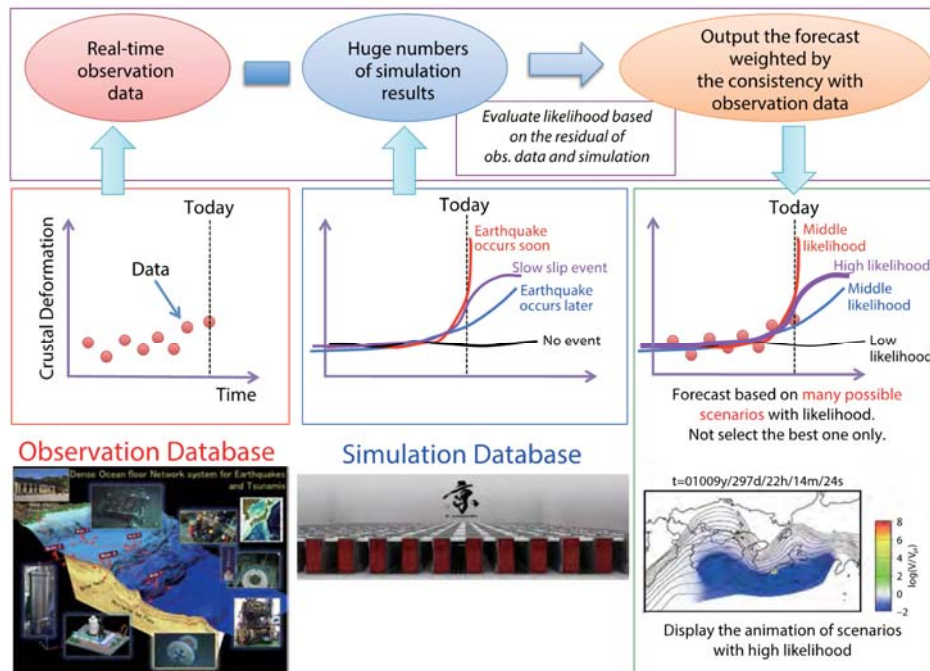
- ・常時観測をしていて、何か変化が起きたらまずは**地下で何が起きているかの把握(モニタリング)**をする
 - ・変化＝隆起・沈降の速さの変化，普段より大きめの地震や余効すべりの発生
- ・その少し先に何が起こるかを知りたい
 - ・起きている現象を、その時点で理解・説明できないか？
 - ・人間がデータを目で見て頭で考えるだけでは、もっている**知識を最大限には活かさない** & 変化が始まってからシナリオ計算準備を始めては**遅い**

シミュレーションによる予測可能性



- まず、データをリアルタイムに解析することで、地下で起きている現象を把握
- その現象が、現在の科学的理解にもとづいてできるだけ**網羅的**に調べる
- 様々なシナリオを事前に準備して、観測データに応じて**重みづけ**をする
 - 過去のすべりの履歴等で決まる初期条件や構造推定等で決まる境界条件、そもそものモデル誤差(モデルの不完全さ)、モデルパラメタの推定誤差、観測データの誤差等々、様々な要因で**シナリオのばらつき**が生まれるので、**決定的な予測はあり得ず**、できるだけ**網羅的に調べたシナリオに観測データとの整合性に応じた重みづけ**をすることで、その後の推移を予測する
- ただし、問題の持つ自由度の高さや不確定性から、本当の意味で**網羅的**には調べられず、**バイアス**がかかることは避けられない
 - あくまでも、**現状をモニタしてその場での理解に資することが目的**で、人間がデータを見て頭で考えるだけでは見落とすようなシナリオを補うためのものであって、**この結果だけにもとづいて判断するためのものではない**、つまり**行政的な判断のための「確率予測」とは切り離して扱うべきもの**

シミュレーションによる予測可能性



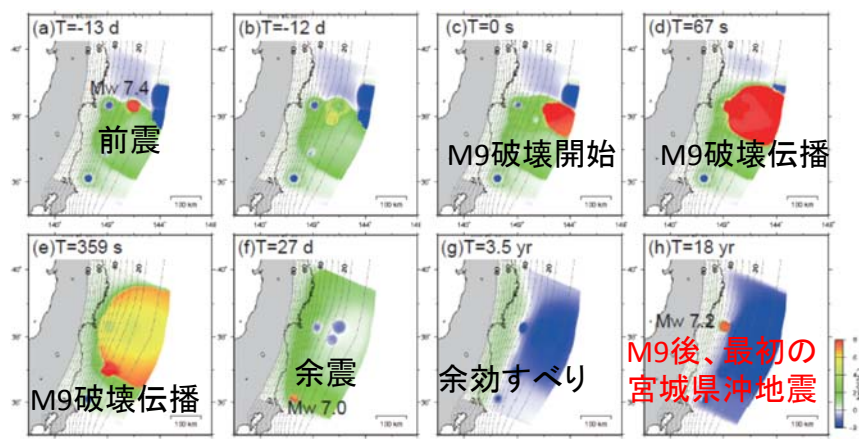
Hori et al. (2014a)

- 大地震発生に至る過程として様々な場合が起こりうることを前提として、また、初期条件やモデル、観測データの誤差などに起因する曖昧さを前提として、それら様々な場合を可能な限り網羅的にシナリオとして事前に多数用意し、リアルタイムに観測される海底ならびに陸上の地殻変動連続データと逐次比較し、データとの整合性に応じた尤度で重み付けをすることで、その後の固着・すべりの推移を確率的に予測する手法が提案されている[Hori et al., 2014a]。

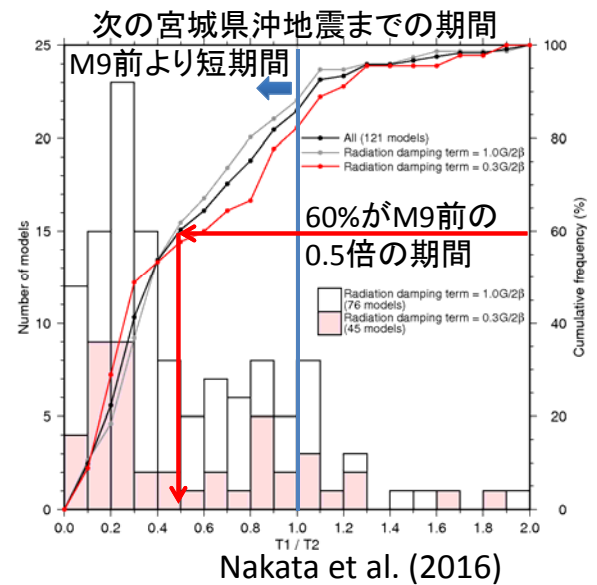
シミュレーションによる予測可能性

- 実際の南海トラフの地震では、東海から四国にわたるどの領域がまず部分的に破壊するかを事前に予測することは困難であるが、発生直後にすべり分布を推定し、その結果を様々な事前シナリオに取り込むことでその後の推移予測のためのシナリオ群とし、それらとリアルタイムに得られる海底ならびに陸上の地殻変動連続観測データに前述の手法を適用することで、事前シナリオのみの場合に比べて、より現実的な推移予測が可能となる。その際、地震発生直後のすべり分布推定の誤差に応じたシナリオのばらつきを導入することも重要になる。

シミュレーションによる予測可能性



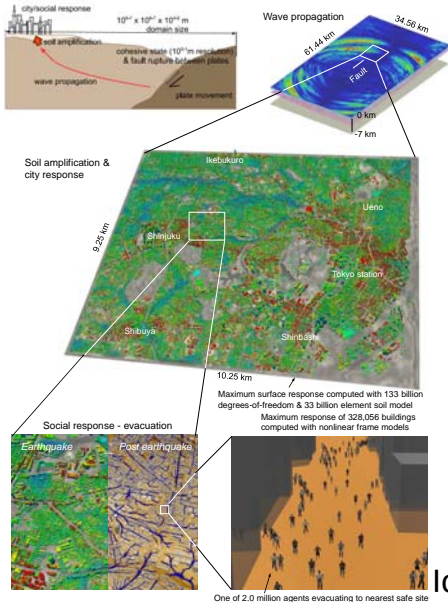
M9やM7の繰り返し・地震時・地震後の振る舞いをある程度再現する百数十ケースのうち60%は宮城県沖地震の再来間隔がM9前の半分



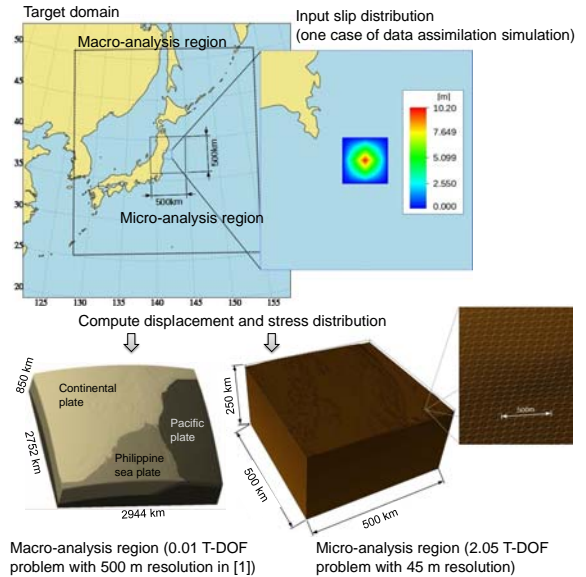
Nakata et al. (2016)

- 東北地震や余効すべり、M9地震発生前までのM7クラスの地震の繰り返し等について観測データとある程度整合するシナリオ121ケースに対して、M9地震後の振る舞いを調べた結果、次の宮城県沖地震発生までの間隔がM9地震発生前の再来間隔の半分以下になる場合が6割程度になることが示された[Nakata et al., 2016]。シナリオをより網羅的に用意すること、各シナリオのデータとの整合性を定量化することで、確率的な予測に発展させることが課題の1つである。

シミュレーションによる予測可能性



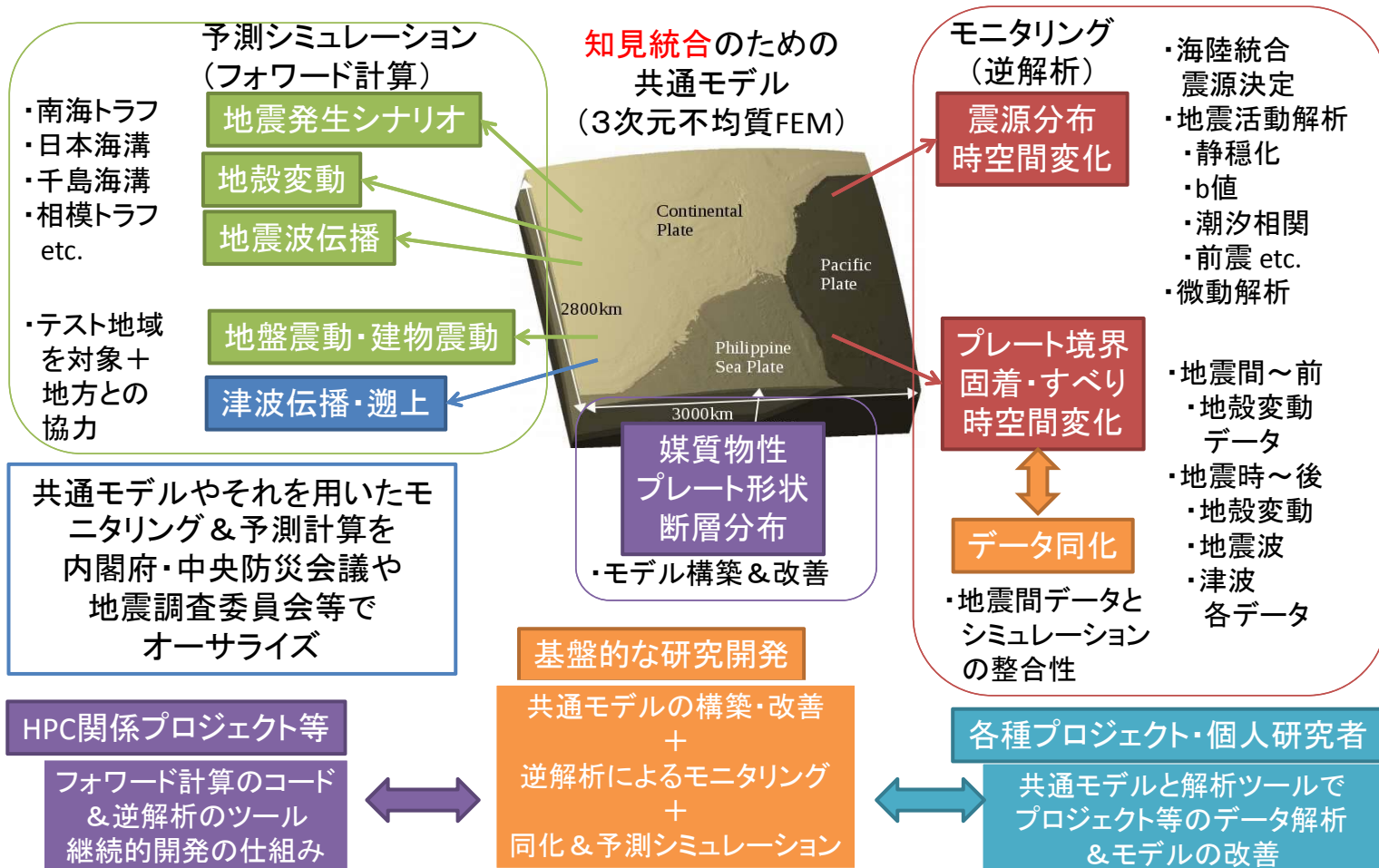
Ichimura et al. (2015)



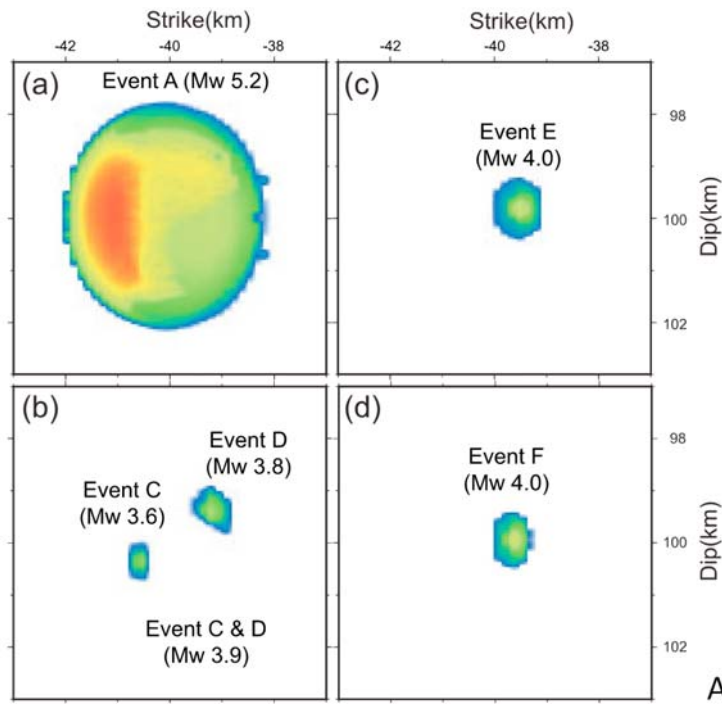
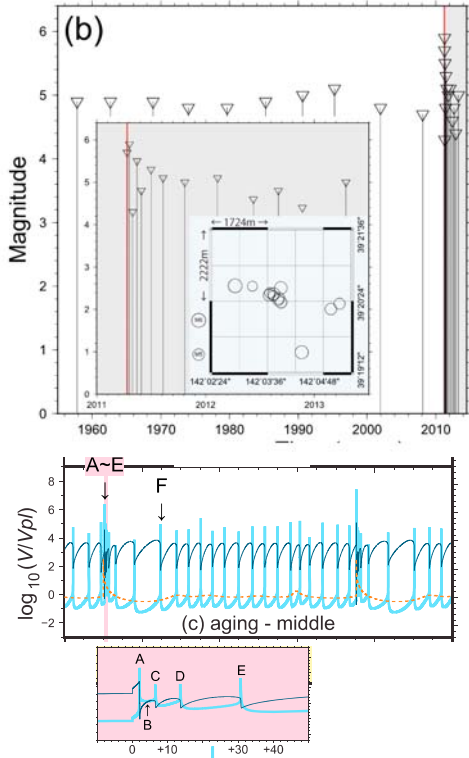
Fujita et al. (2016)

- 曖昧さを考慮した多数のシナリオを計算することは、従来は容易ではなかったが、近年の計算機の発達とそれを活用するプログラムの開発により、100を超えるシナリオの計算はすでに実現している。さらに、3次元不均質構造を取り入れた地震動や地殻変動計算の大規模・高速化が飛躍的に進んだことにより、モデルの曖昧さ(媒質の物性やプレート境界形状など)を考慮したグリーン関数を1万通り計算したり、M9地震震源域を含む10mオーダーの大規模モデル(2兆自由度)での応力評価計算をしたりすることが、現実的な時間内で可能となっている[Ichimura et al., 2014; 2015; Fujita et al., 2016]。このことにより、初期条件やモデルパラメタのもとになる固着・すべり分布を推定するためのデータ解析において、曖昧さを考慮した解析が可能になるとともに、その曖昧さを反映させた千~万オーダーのシナリオ計算の実現も、近い将来可能な状況になってきている。

モニタリングとその場理解の高度化



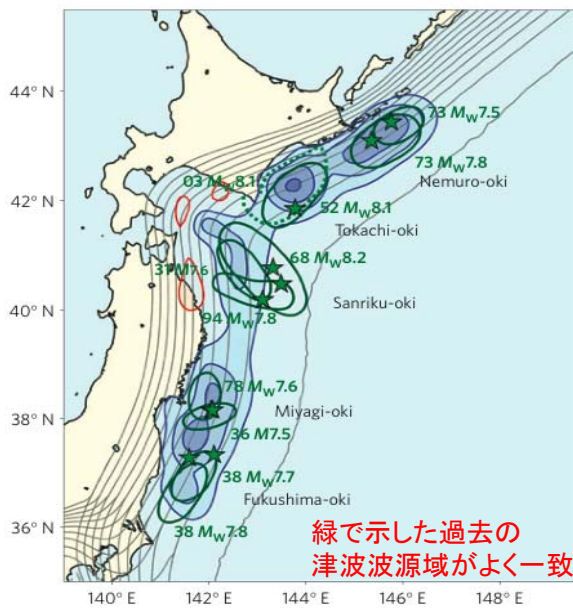
地震の規模の予測



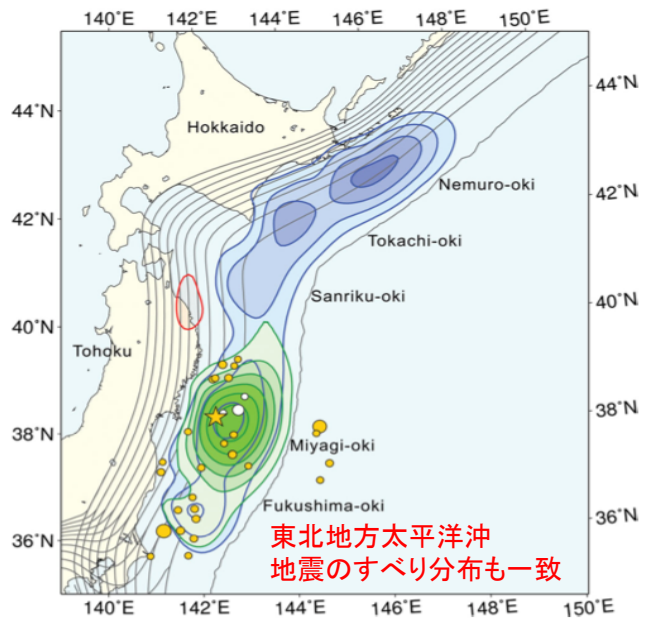
Ariyoshi et al. (2014)

- 固有地震的な振る舞い(ほぼ同じ規模の地震がほぼ同じ間隔で繰り返す)をしてきた釜石沖の地震の規模が、東北地震後に大きく変化していることが知られている。このことは、固有地震的な場合ですら、規模の予測が困難であることを示している。一方で、規則的な地震を繰り返している震源域を余効すべりが通過することによる応力や強度の変化によって、このような現象を半定量的にシミュレーションで再現することができる[Ariyoshi et al., 2014; Yoshida et al., 2016]。

地震の規模の予測



Hashimoto et al. (2009)

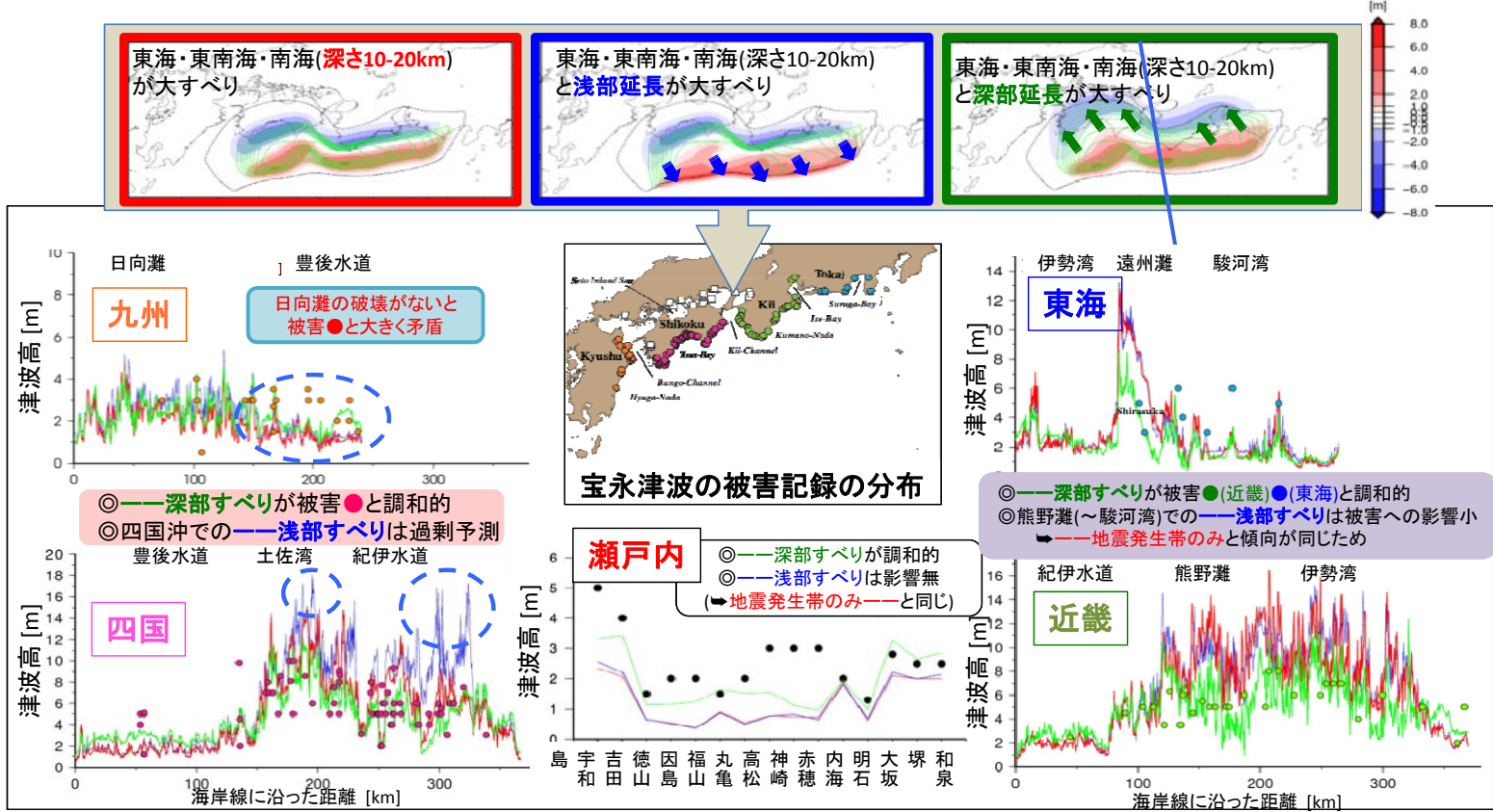


Hashimoto et al. (2012)

- 地震間のすべり欠損率の分布と過去に起きたM7以上の地震の震源域の分布の整合性[Hashimoto et al., 2009; 2012]がある

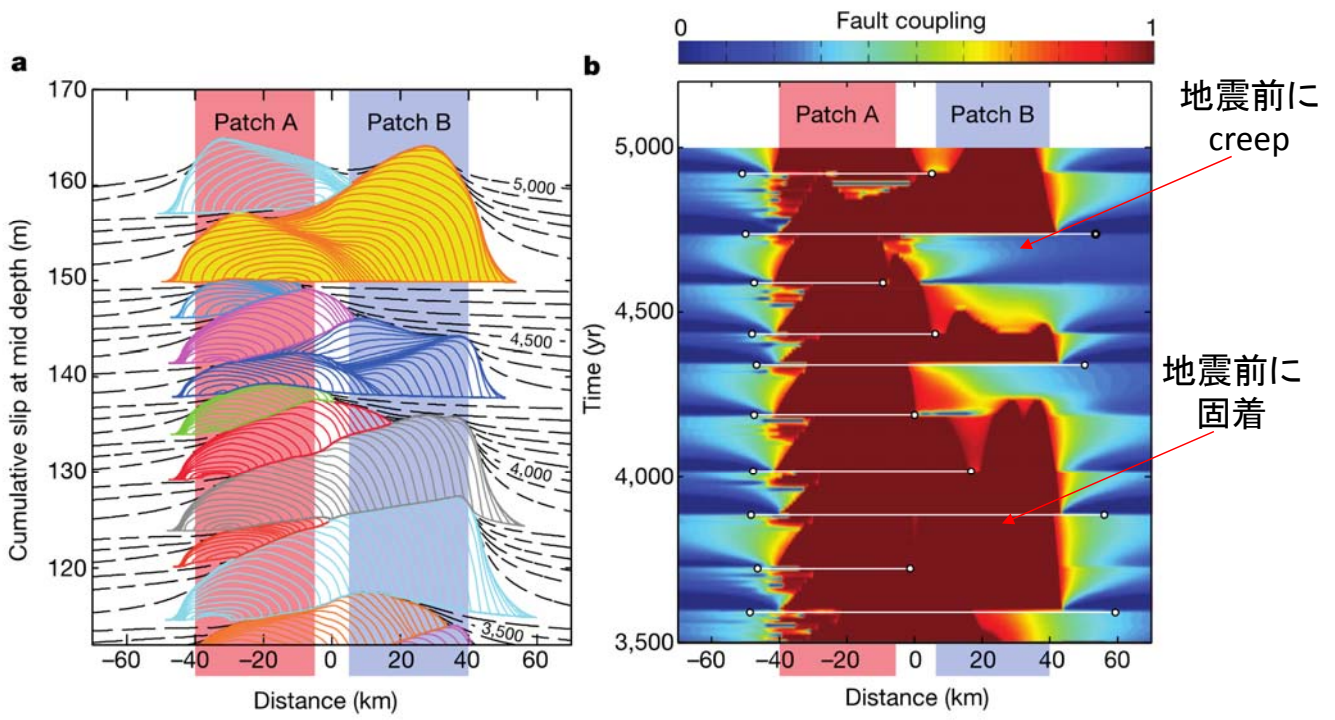
地震の規模の予測

Hyodo et al. (2015)



- 得られた結果の妥当性を評価するには、それらのシナリオによって発生する地殻変動と津波をシミュレーションすることができ、それらを津波高さ分布や遡上域を、歴史資料や地質情報と照らし合わせることで有効である[例えばHyodo et al., 2015]。

地震の規模の予測



Noda and Lapusta (2013)

- ただし、すべり欠損率が低い場所でも大すべりを起こす場合もある[Noda and Lapusta, 2013]ので、現在のすべり欠損率分布だけに依存したモデルで十分と考えるのは危険である。