

固体地球・宇宙分野

# 逐次データ同化による プレート境界固着・すべりの推移予測実験

課題責任者 堀 高峰<sup>1</sup>

課題参加者 #中田 令子<sup>1</sup>・兵藤 守<sup>1</sup>・有吉 慶介<sup>1</sup>

1：海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター 地震津波予測研究グループ

謝辞：本研究は文科省の「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の補助を受けて行われました。

数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

# 本課題の概要

## 逐次データ同化によるプレート境界固着・すべりの推移予測実験

(解析対象：海洋プレートが沈み込んでいる南海トラフや日本海溝)

### データ同化プログラムの開発 (H28年度～現在進行中の成果：ポスター発表)

地殻変動観測データ

GEONET, DONET, S-net 等

地震発生サイクルシミュレーション

応力蓄積  $\rightleftharpoons$  応力解放 = 地震発生



### 日本海溝沿いを対象とした（海溝型）地震発生サイクルシミュレーション

(H25～28年度成果：本講演；Nakata et al., 2016)

**背景** 過去の南海トラフ地震に関する観測データは不十分  
2011年東北地方太平洋沖地震前後に多様な観測データが得られている

**成果** データ同化に必要なシミュレーションデータベースの蓄積  
多数のシミュレーション結果に基づいた予測手法の提案

# 日本海溝沿いの地域で繰り返し発生する海溝型地震

太平洋プレートの沈み込みに伴って  
東北沖ではマグニチュード(M)7クラスの  
地震が複数のセグメントで繰り返し  
発生

## 宮城県沖

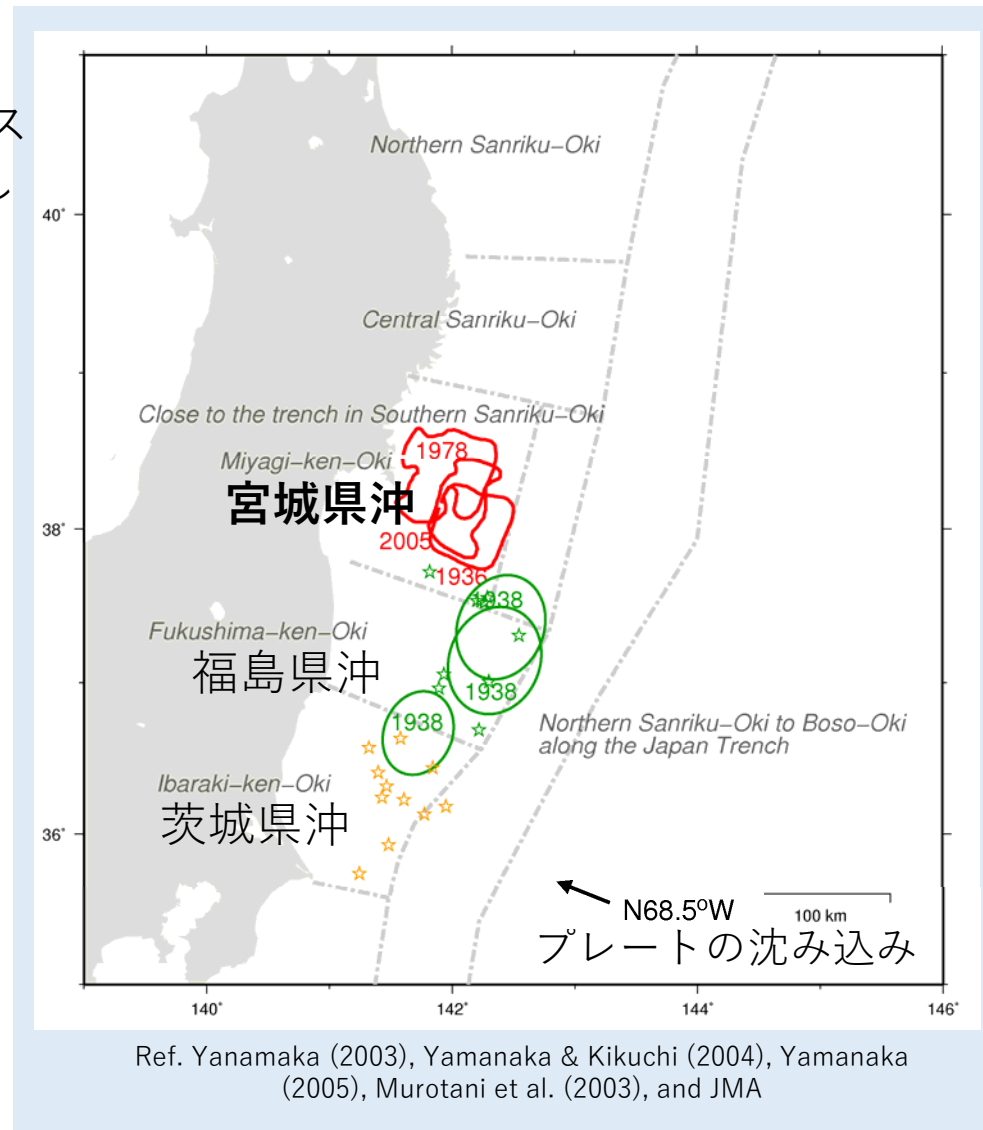
M7.2~7.4が30~40年間隔で発生  
(1978, 1936, 1897)

## 福島県沖

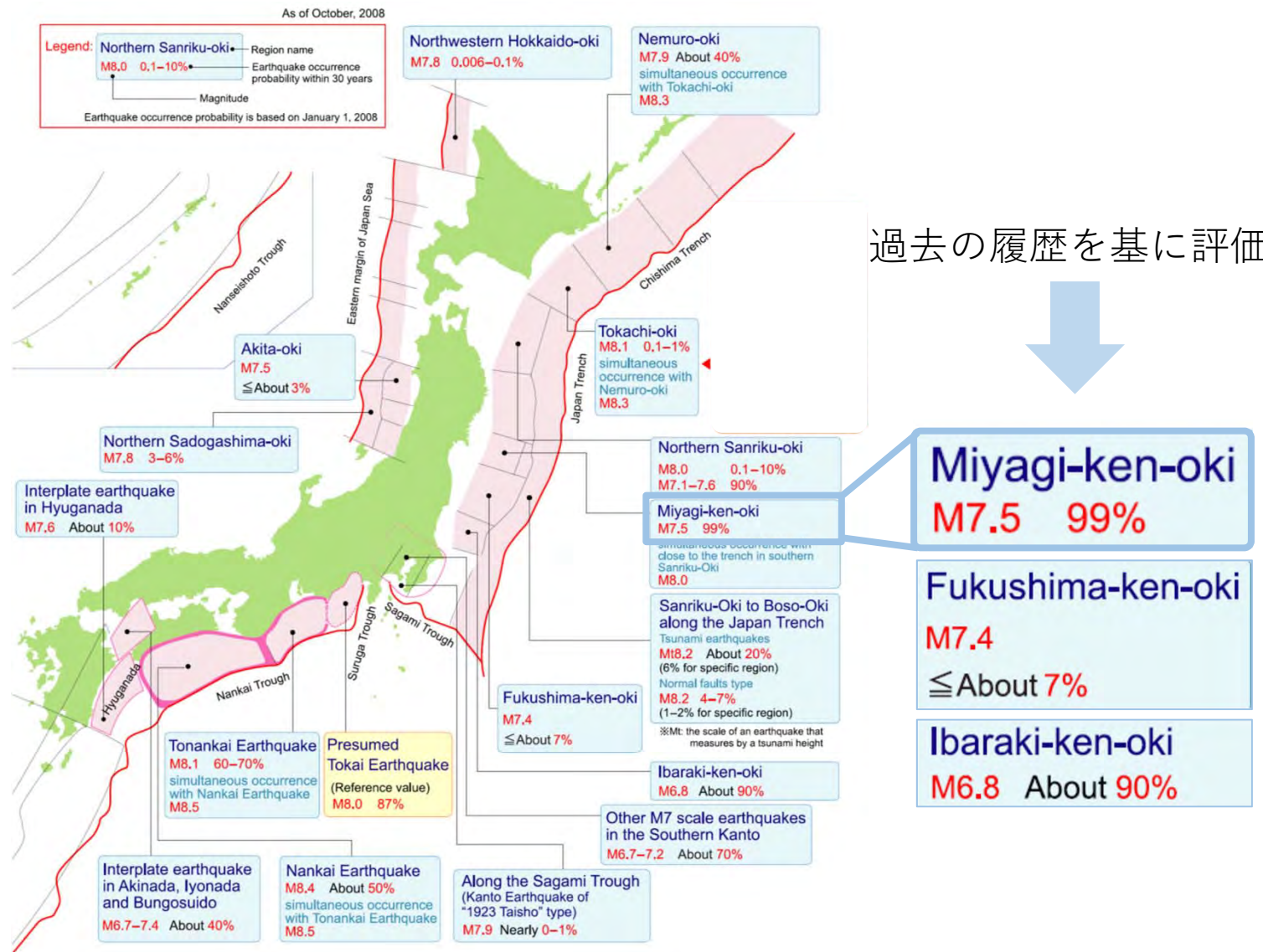
M7.3~7.5 が1938年11月に3回発生  
M < 7 は繰り返し発生  
(2010, 2008, 1996, 1987, 1959, 1945)

## 茨城県沖

M > 7 は過去80年以上発生なし  
M ≤ 7 は20~30年間隔で発生  
(2008, 1982, 1965, 1961, 1943...)



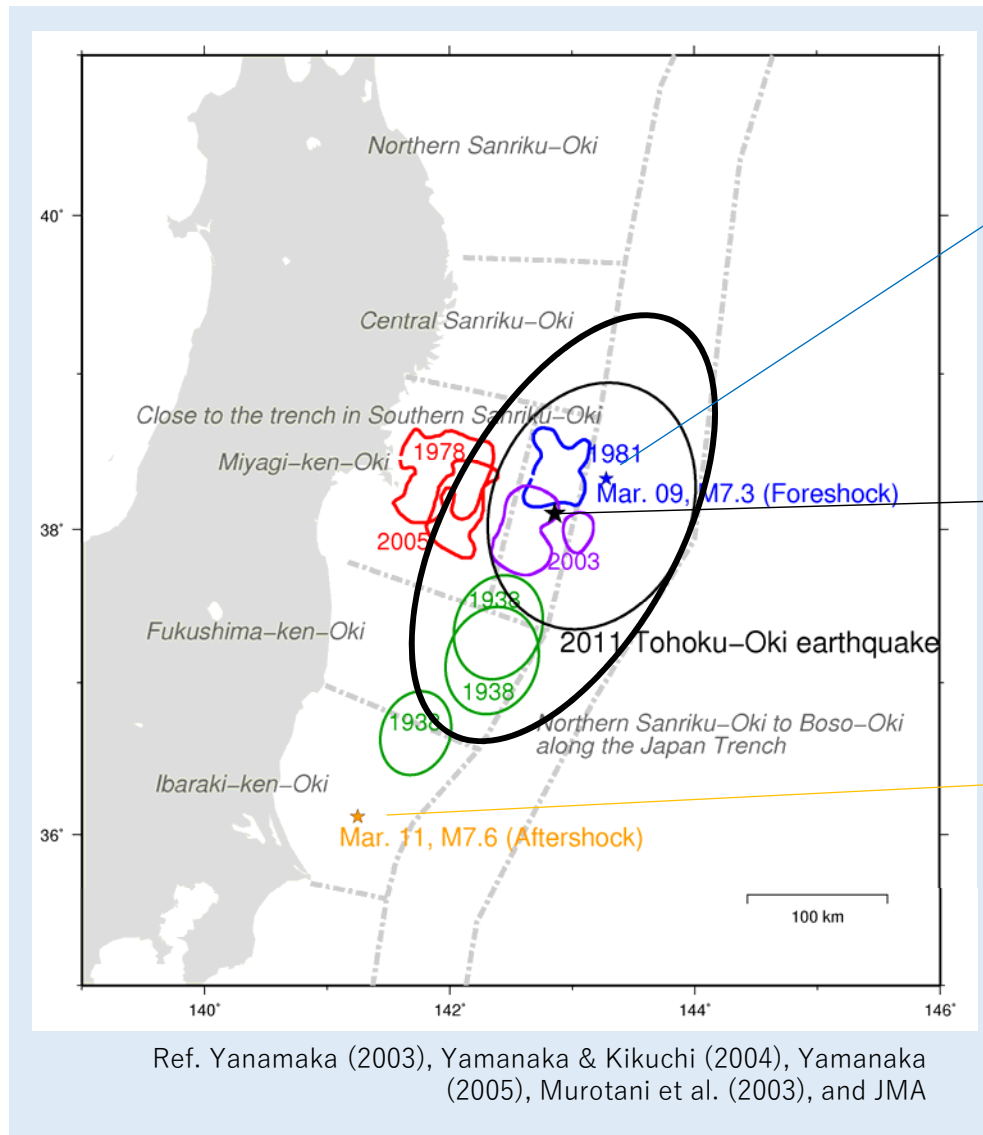
# 長期評価（今後30年以内に起こり得る地震の規模とその確率）：2008年10月



過去の履歴を基に評価



# 2011年東北地方太平洋沖地震



## 最大前震 (M7.3)

3月9日11:45

余効すべりが南へ伝播し本震を誘発 [Ando & Imanishi, 2011]

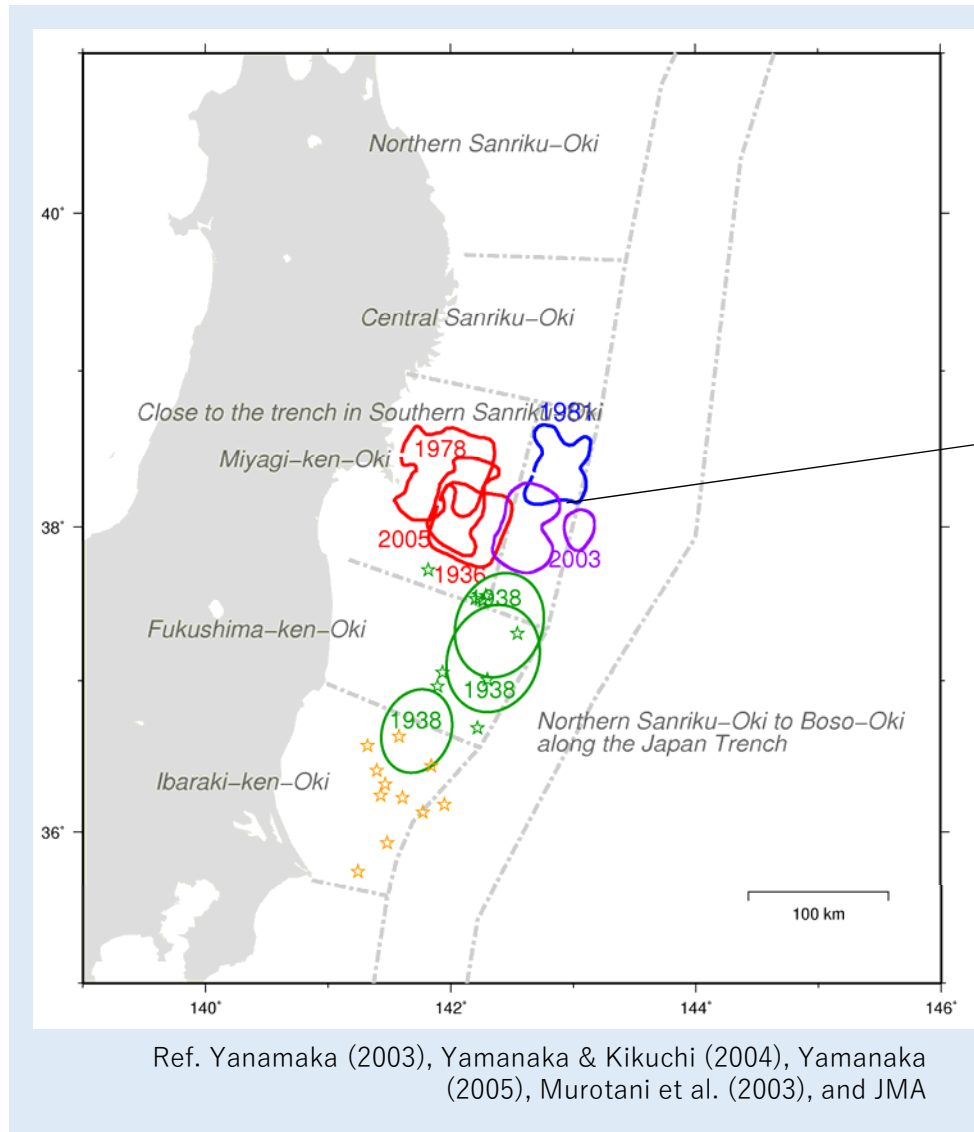
## 本震 (M9.0)

3月11日14:46 (前震の51時間後)  
最大震度7

## 最大余震 (M7.6)

3月11日15:15 (本震の29分後)

# 2011年東北地震の大すべり域内で発生した過去の地震



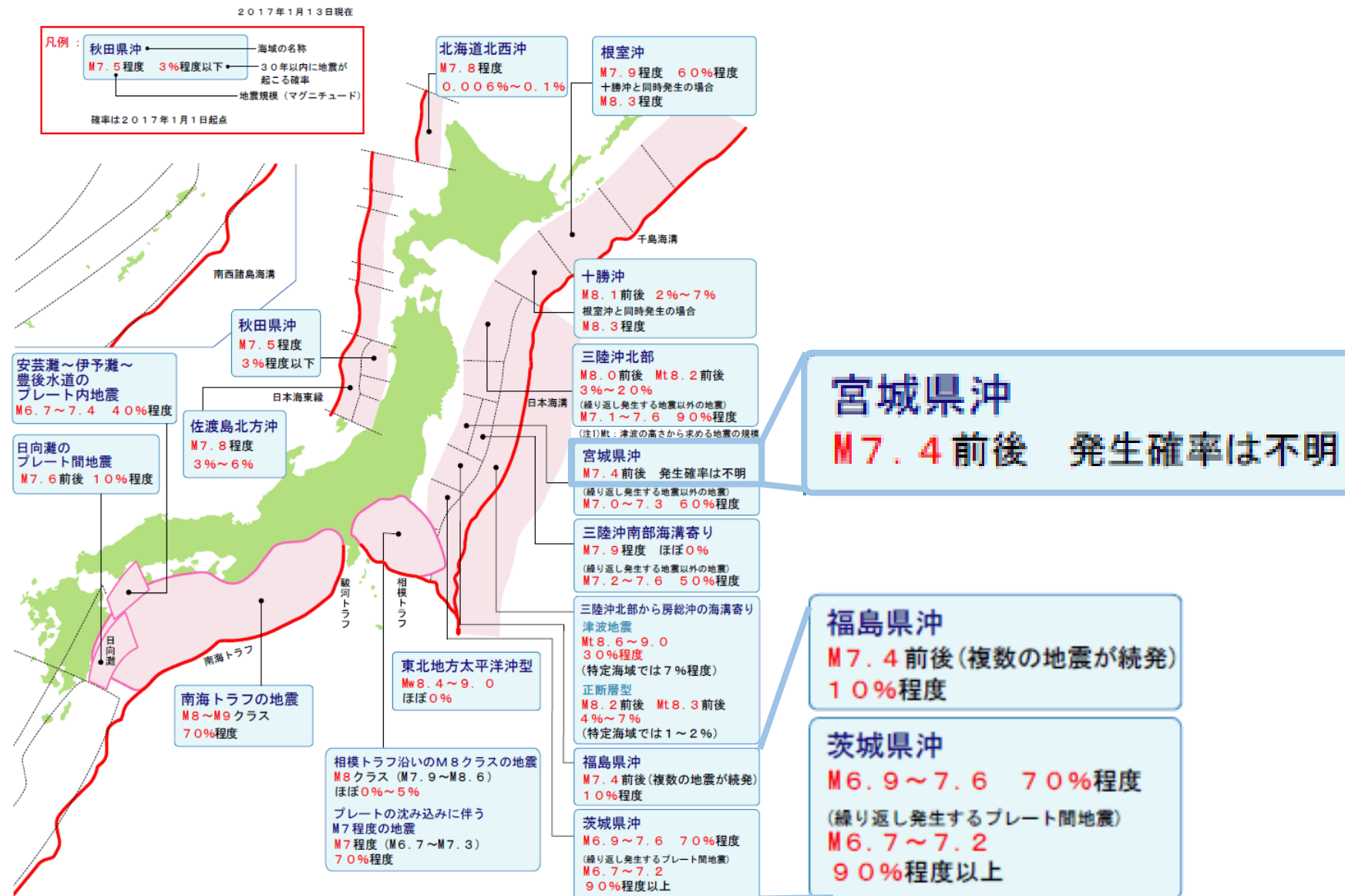
## 三陸沖南部海溝寄り

M ≤ 7 地震が過去に発生

1981年M=7.0：3月9日の前震付近

2003年M=6.8：本震の震央付近

# 長期評価：2017年1月





# 長期評価の見直し：東北沖地震後

2011年3月のM9地震から6年経過した現時点で、過去の宮城県沖地震震源域でM>7の地震は起きていない。

## 地震調査研究推進本部

『東北地方太平洋沖地震の余効変動が観測され続けている現段階では今後どのように歪が蓄積し、地震がどのような間隔で発生するか不明である』  
(2011年11月)

『余効変動が依然として継続しており、アスペリティの固着が確認できないため確率は算出できない』 (2017年1月)

→ 今後30年以内に宮城県沖でM7.4前後の地震が発生する確率『**不明**』

## 過去の宮城県沖地震震源域内のすべり量

2011年東北地震時のすべり(5~20 m) + 余効すべり (~3 m)  
>> 1978年宮城県沖地震時のすべり (~3 m)

**すべり量の収支**だけに着目すると、少なくとも1回分はすべっていると見なして、新たなサイクルを始めたと考えることができる。その場合、少なくともこれまでの再来間隔と同程度の年数が経過するまで、同規模の地震は発生しないと考えられる。しかし、**応力場**に着目すると、2011年東北沖地震時には、過去の宮城県沖地震震源域を含めた**広い範囲で大きなすべり量を観測しており**、単純な問題ではない可能性も考えられる。



# 本研究では

2011年3月のM9地震から6年経過した現時点で、過去の宮城県沖地震震源域で $M > 7$ の地震は起きていない。

## 地震調査研究推進本部

『東北地方太平洋沖地震の余効変動が観測され続けている現段階では今後どのように歪が蓄積し、地震がどのような間隔で発生するか不明である』  
(2011年11月)

『余効変動が依然として継続しており、アスペリティの固着が確認できないため確率は算出できない』 (2017年1月)

→ 今後30年以内に宮城県沖でM7.4前後の地震が発生する確率『不明』

そこで本研究では

地震発生サイクルの数値シミュレーションを多数行い、プレート境界面上の固着およびすべり分布を推定し、次の宮城県沖地震発生時期について考察した。

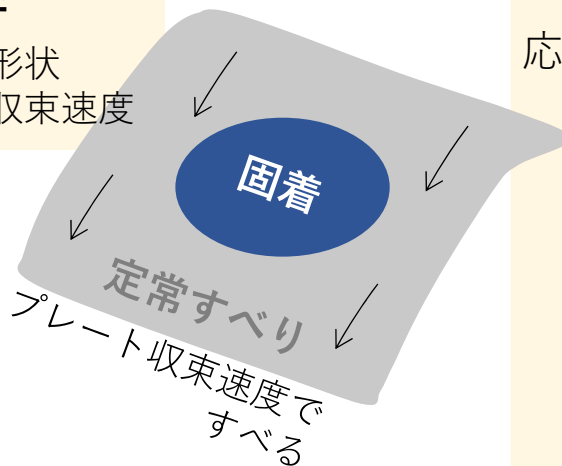
- \* 3次元のOhtani et al. [2014]のモデルを基に、摩擦パラメタ等を修正
- \* M9地震前～地震後の観測・知見をなるべく多く再現するモデルを構築
- \* M9地震時に観測されたすべり量と空間的な広がり of 再現を優先
- \* 余効変動や固着分布から、どのように応力蓄積・解放過程が進むのか調べる

# 手法: プレート境界地震発生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」を定式化

## 境界条件

プレート形状  
プレート収束速度



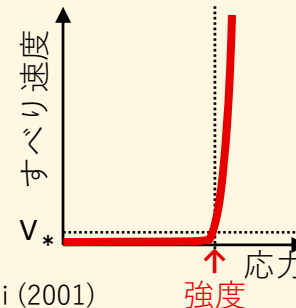
通常時 (地震間)

## 断層の構成則 (2)

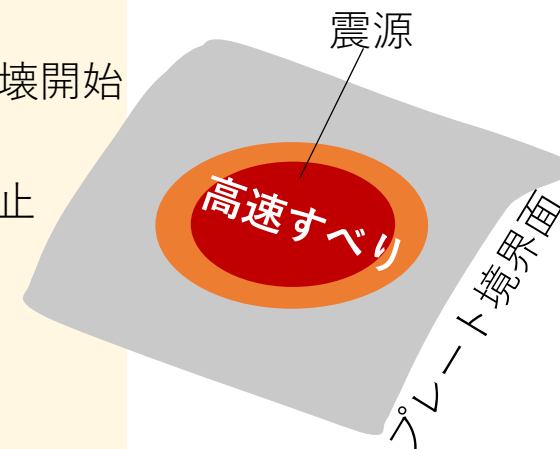
応力が強度に達したら破壊開始



応力 < 強度で破壊停止



Nakatani (2001)



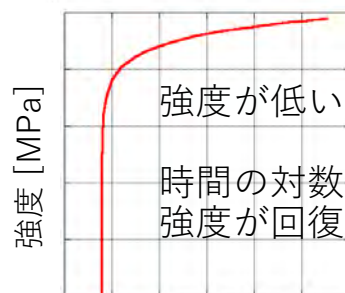
地震時

固着域ですべり遅れ  
= 応力増加

応力の時間微分  
(1)

すべり遅れの解消  
= 応力減少

固着すると強度回復

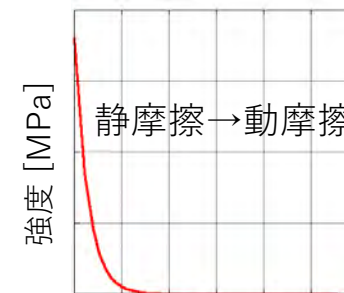


時間 [年]

強度が低いと早く強度増加  
時間の対数に比例して  
強度が回復

強度の時間発展則  
(3)

すべることで強度低下



すべり [m]

静摩擦 → 動摩擦

# 手法: 支配方程式と数値計算

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

- (1) プレーートの相対運動に起因する要素 $j$ のすべりによる要素 $i$ でのすべり方向の応力の時間変化

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

- (2) 速度状態依存摩擦則 [Dieterich, 1979]  
断層の構成則 [Nakatani, 2001]

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

- (3) 強度の時間発展則 slowness (aging) law [Dieterich, 1979; Ruina, 1983]

$N$ 個の要素それぞれに摩擦条件( $A, B, L$ )を与え、式(1)–(3)から導出される連立微分方程式を、時間刻み幅可変のRunge-Kutta法で時間積分する。

ESで  
計算

$K_{ij}$ : すべり応答関数: 面素 $j$ の単位すべりによる面素 $i$ 上での静的せん断応力変化

$\eta$ : ダンピング係数 (=  $0.3G/2\beta$ ): 地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似する項

$V_{pl}$ : プレーートの相対運動速度 (8.4 cm/yr)

$V$ : すべり速度

$V^*$ : 任意のすべり速度 ( $V^* = V_{pl}$ )

$\beta$ : S波速度 (3.27 km/s)

$G$ : 媒質の剛性率 (30 GPa)

$\tau_{s*}$ :  $V^*$ で定常すべりする時の基準摩擦強度

$\Delta \tau_s$ : 基準摩擦強度からの変化

$A$ : 断層の構成則に関する摩擦パラメタ

$B$ : 強度の時間発展に関する摩擦パラメタ

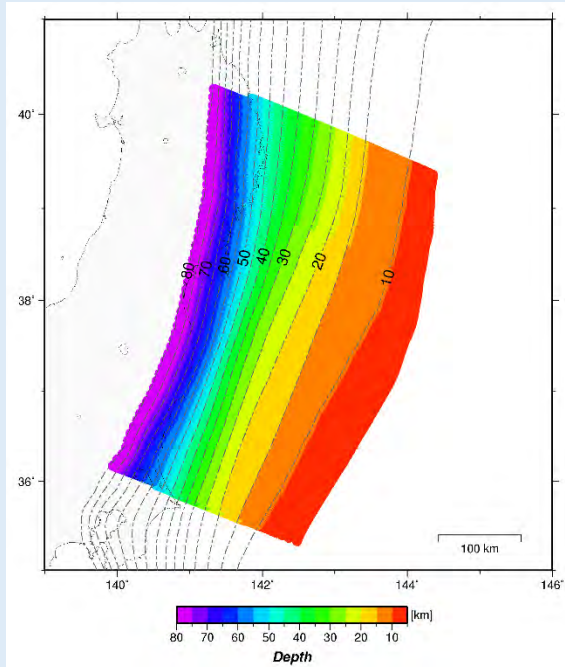
$L$ : 特徴的すべり量

本研究では、 $A, B, L$ は時間変化しないと仮定

$N$ : プレート境界面の分割数(127,367)

# 手法: パラメタ設定

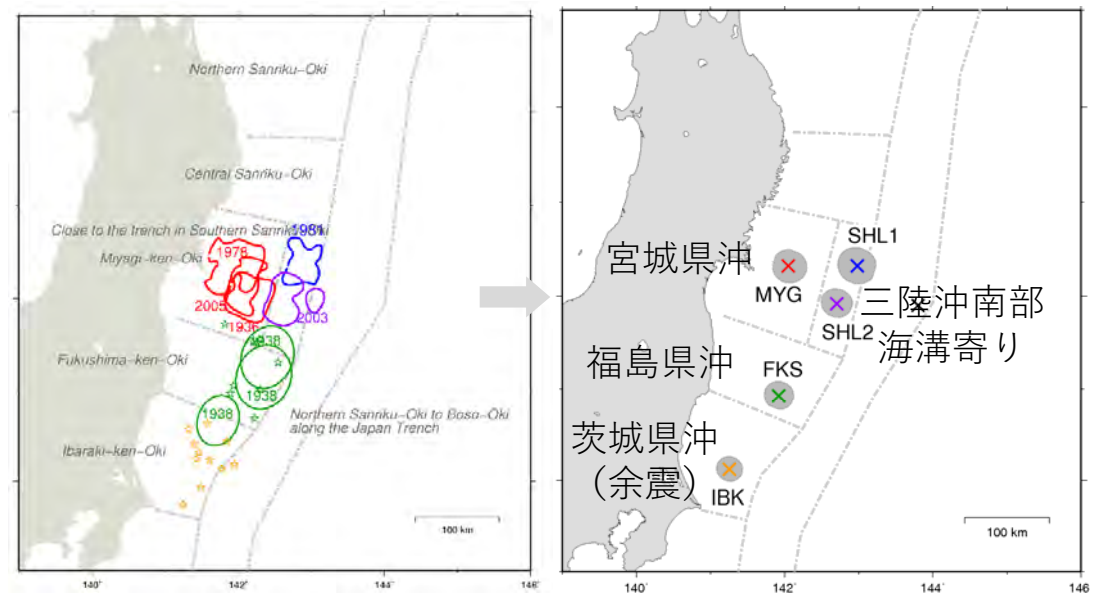
プレート境界面



海域における構造探査に基づく3次元形状

深さ範囲70 km  
走向方向480 km のエリアを  
1, 3, 9 kmメッシュを  
組み合わせた127,367要素に  
分割

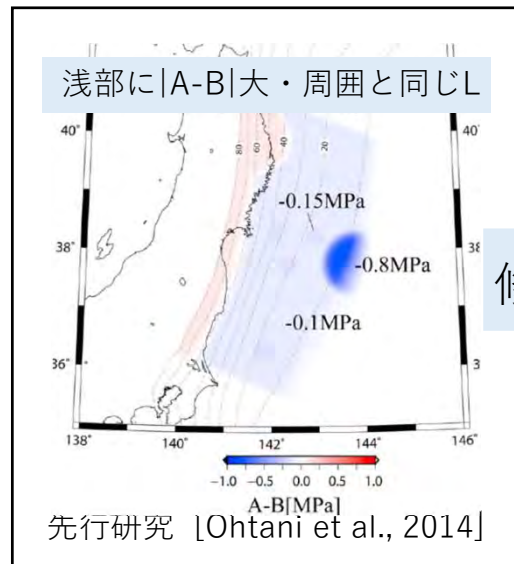
過去のM7クラスの地震の震源域



半径約20kmの円形パッチで近似

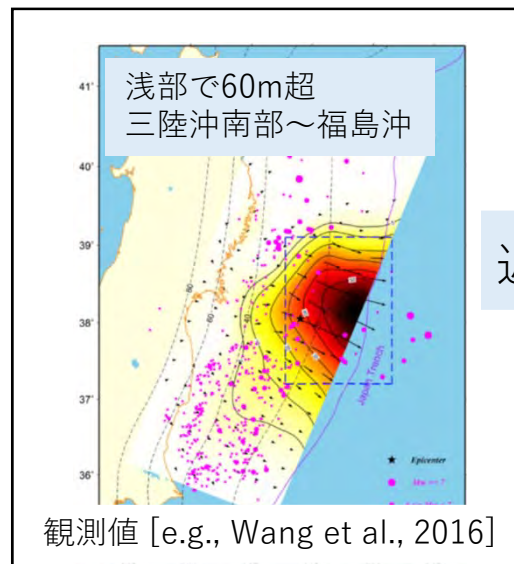
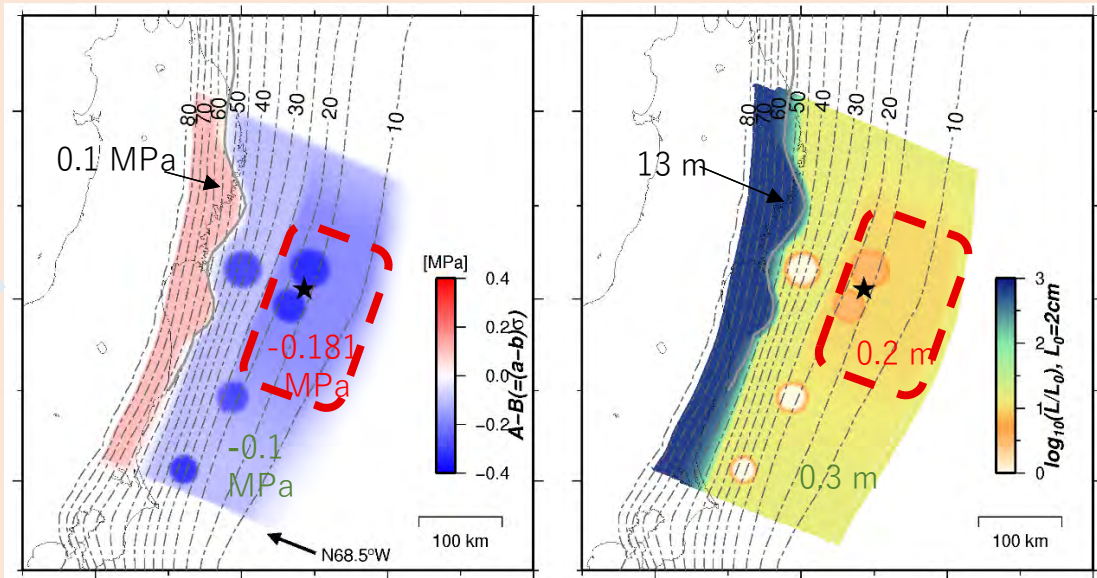
宮城県沖・福島県沖・茨城県沖に1か所ずつ  
三陸沖南部海溝寄りに2か所

# 手法: パラメタ設定: 摩擦パラメタ(A—B and L)



修正

摩擦パラメタ分布の例 (左) A-B (Mpa) (右) L(m)



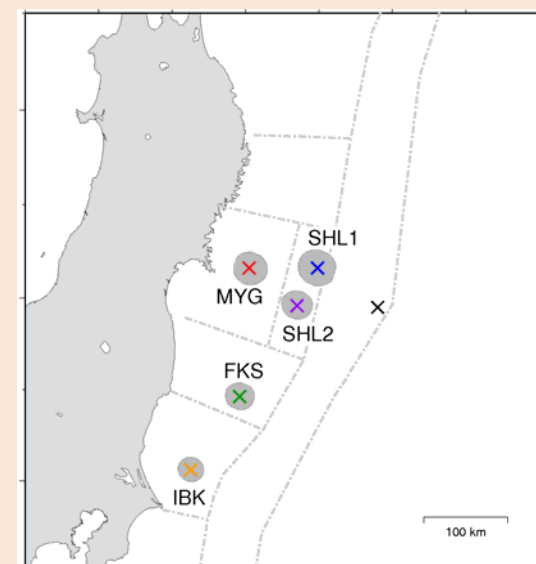
近似

M9地震大すべり域(150km長)

→ 周囲(-0.1 Mpa, 0.3 m)より  
やや大きい|A-B|  
やや小さい L  
(-0.181 Mpa, 0.2 m)

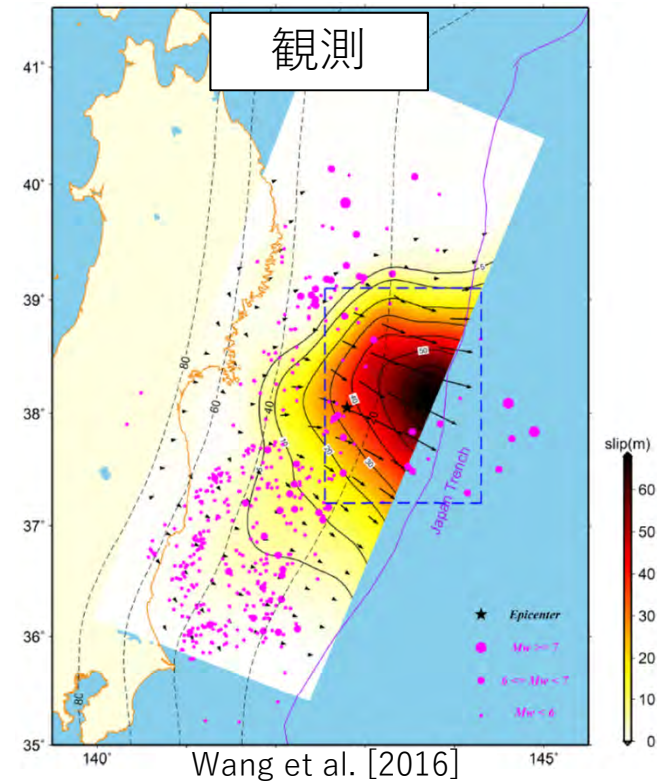
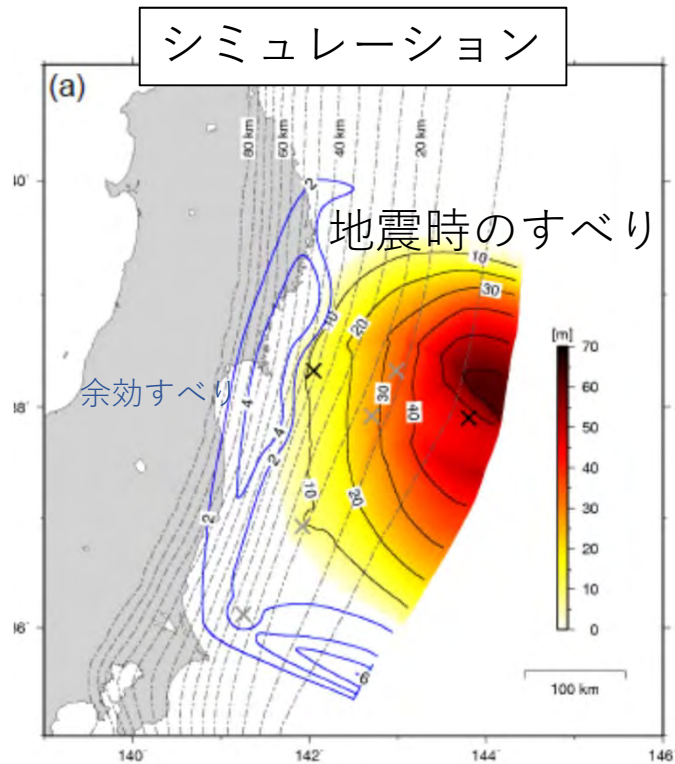
M7地震震源域(半径18~24km)

→ 周囲(-0.1 Mpa, 0.3 m)より  
~3倍大きい|A-B|  
2桁小さい L  
(-0.278~-0.325 Mpa, 0.021~0.068 m)





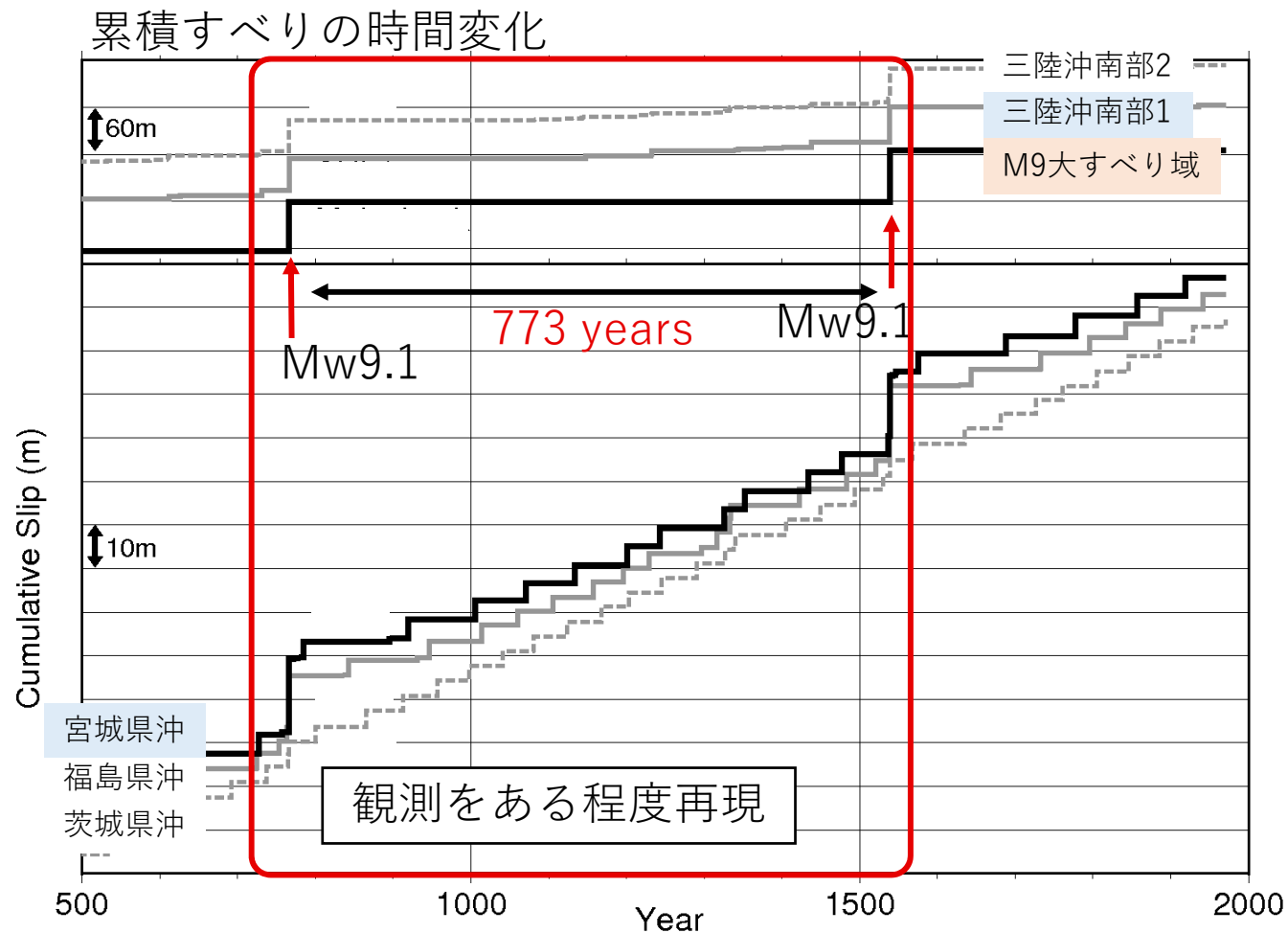
# 結果: M9クラス地震時のすべり



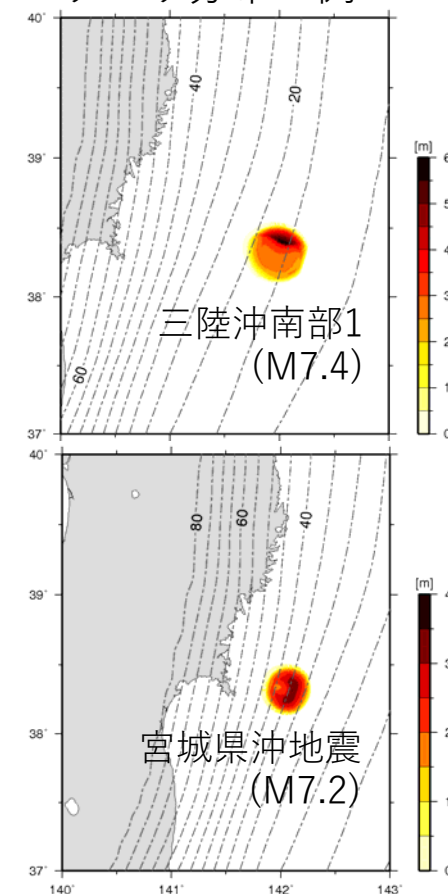
本研究	観測 (複数の文献より)
M = 9.1	M = 9.0
773 年	500~1000 年
62 m	65 m [Wang et al., 2016] (30~85 m)
約10 m	5~20 m
約10 m	5~20 m
0 m、余震(M7.0)発生	0 m、余震(M7.6)発生

マグニチュード  
繰り返し間隔  
最大すべり量  
宮城県沖  
福島県沖  
茨城県沖

# 結果: M7クラス地震の時空間分布



すべり分布の例



2つのMw9.1地震の間（773年間）のM7クラスの地震の繰り返し

	宮城県沖	福島県沖	茨城県沖	三陸沖南部1	三陸沖南部2
シミュレーションM	7.1－7.4	6.7－7.1	6.9－7.1	7.2－7.4	7.0－7.1
平均再来間隔	64 years	54 years	42 years	2 or 3	0 or 1
観測 (1923～)	38 years	1938	22 years	1981, 2011	2003
観測 M	7.2－7.4	7.3－7.5	～7.2	7.0, 7.3	6.8



# 結果:すべりの時空間変化

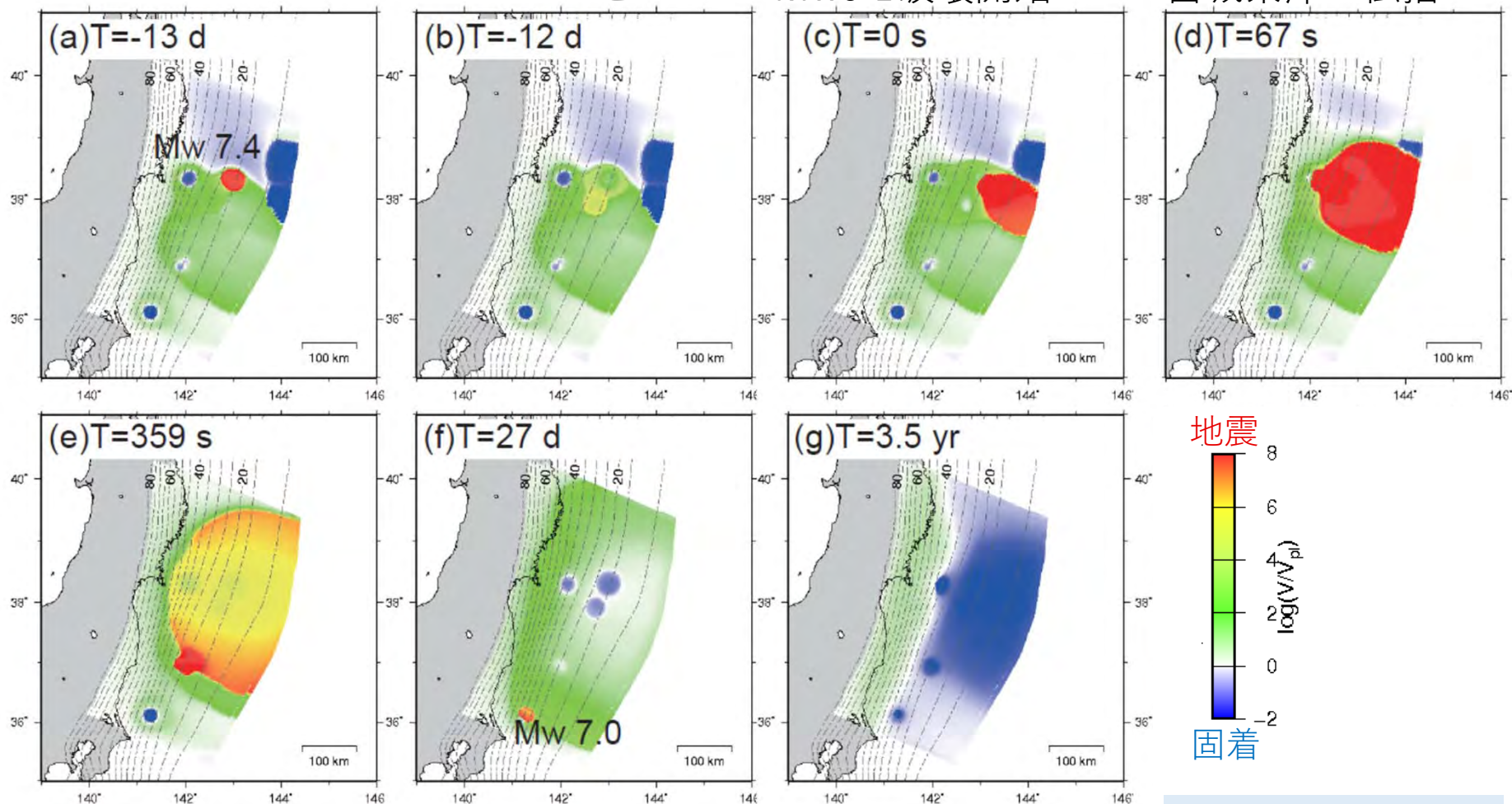
すべり速度のスナップショット

前震

すべりの加速

Mw9.1破壊開始

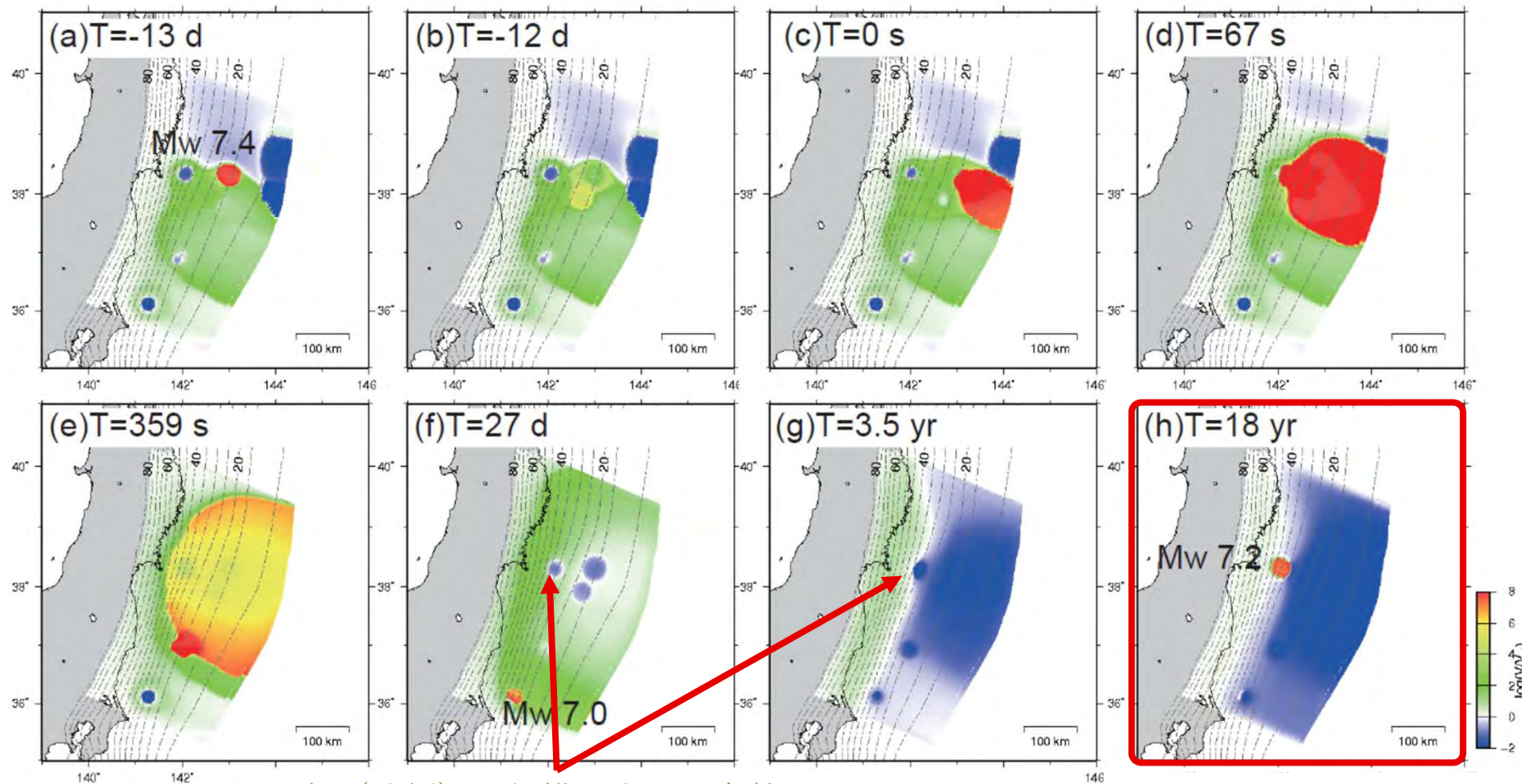
地震時のすべりが  
宮城県沖へ伝播



観測を  
ある程度再現した  
とみなせる

# 結果: M9地震後の宮城県沖地震

すべり速度のスナップショット



深部（陸側）で規模の大きな余効すべり

宮城県沖地震震源域は固着

→ 両者の境界部分で応力蓄積レートが高い状態

過去（M9前200年間）の  
平均再来間隔（52年）  
より短いタイミング



# シミュレーションデータベースの蓄積

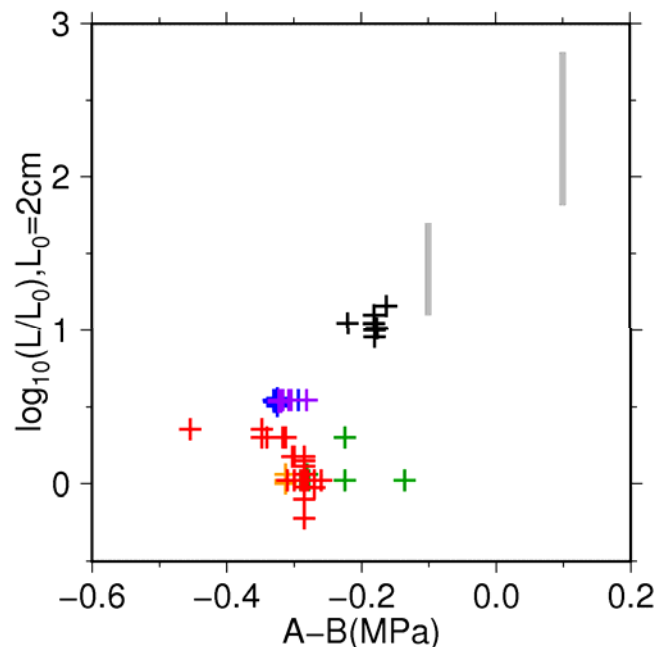
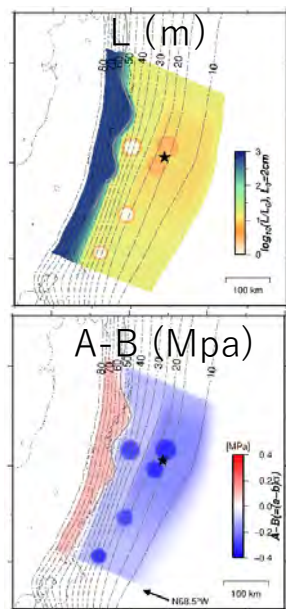
試行錯誤的にいろいろなパラメタセットで同様の計算を行い、それぞれの地震のすべり分布・規模・再来間隔などが異なるシナリオを多数得た。その中で、**M9地震時のすべり分布と宮城県沖でのM7クラス地震発生**に関してある程度観測を再現できているものは、77個あった。

77通りのシナリオそれぞれについて、 $(T_{\text{int}}/T_{\text{rec}})$  を調べた。

$T_{\text{int}}$  : M9発生後から宮城県沖地震発生までの時間 (年)

$T_{\text{rec}}$  : M9前200年間に発生した宮城県沖地震の平均再来間隔 (年)

先ほどの例では  $T_{\text{int}} = 18$ 年、 $T_{\text{rec}} = 52$ 年  $\therefore T_{\text{int}}/T_{\text{rec}} \cong 0.35$

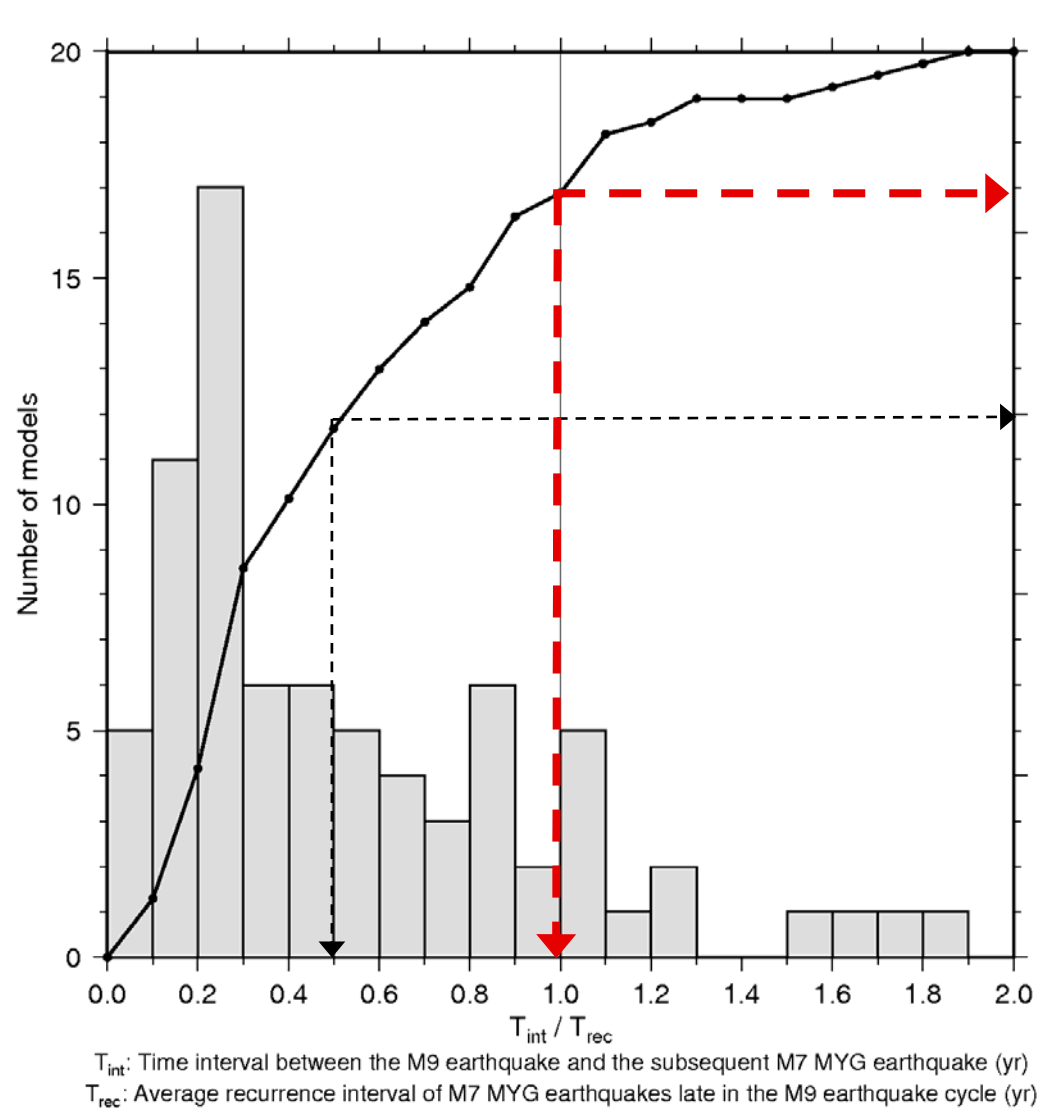


パラメタ範囲 (77モデル)

	走向方向長さ (km)
— バックグラウンド ( $A-B > 0$ )	480
— バックグラウンド ( $A-B < 0$ )	480
+ M ~ 9 地震震源域 (深さ8(10)–22 km)	150 (110~170)
M ~ 7 地震震源域	
	半径 (km)
+ 前震 (SHL1)	24
+ 三陸沖南部 (SHL2)	20
+ 宮城県沖 (MYG)	23 (20~26)
+ 福島県沖 (FKS)	20
+ 茨城県沖 (IBK)	18

(注) 77モデルのうち51モデルはM7クラスの地震を起こしやすいパッチを5つモデル化しているが、26モデルでは3つで、福島県沖と茨城県沖での地震をモデル化していない。

# 議論: M9後の宮城県沖地震発生時期



約84%のシナリオで  
M9地震とその後のM>7宮城県沖地震  
との時間間隔( $T_{int}$ )は  
過去の宮城県沖地震の平均再来間隔  
( $T_{rec}$ )よりも短かった

ただし  
想定しうるすべてのパラメタ範  
囲を網羅しているわけではない。  
今後もシナリオの蓄積を進めて  
様々なシナリオに基づいた図を  
作成し、長期評価に役立つ知見  
を提供していきたい。

先の例だと  $T_{int} = 18$ 年,  $T_{rec} = 52$ 年  $\therefore T_{int} / T_{rec} \cong 0.35$

# 本課題の概要

## 逐次データ同化によるプレート境界固着・すべりの推移予測実験

(解析対象：海洋プレートが沈み込んでいる南海トラフや日本海溝)

### データ同化プログラムの開発 (H28年度～現在進行中の成果：ポスター発表)

地殻変動観測データ

GEONET, DONET, S-net 等

地震発生サイクルシミュレーション

応力蓄積  $\rightleftharpoons$  応力解放 = 地震発生



### 日本海溝沿いを対象とした（海溝型）地震発生サイクルシミュレーション

(H25～28年度成果：本講演；Nakata et al., 2016)

**背景** 過去の南海トラフ地震に関する観測データは不十分  
2011年東北地方太平洋沖地震前後に多様な観測データが得られている

**成果** データ同化に必要なシミュレーションデータベースの蓄積  
多数のシミュレーション結果に基づいた予測手法の提案

**Reference** Nakata et al. (2016) Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704.

# 本課題の概要

## 逐次データ同化によるプレート境界固着・すべりの推移予測実験

(解析対象：海洋プレートが沈み込んでいる南海トラフや日本海溝)

### データ同化プログラムの開発 (H28年度～現在進行中の成果：ポスター発表)

蓄積した多数のシミュレーション結果を用いて  
三陸沖南部海溝寄りで $M > 7$ の地震が発生した後、(模擬)観測データの変動から  
その後に発生する $M9$ 地震に至る過程を見出せるかどうかを調べた



### 日本海溝沿いを対象とした（海溝型）地震発生サイクルシミュレーション

(H25～28年度成果：本講演；Nakata et al., 2016)

**背景** 過去の南海トラフ地震に関する観測データは不十分  
2011年東北地方太平洋沖地震前後に多様な観測データが得られている

**成果** データ同化に必要なシミュレーションデータベースの蓄積  
多数のシミュレーション結果に基づいた予測手法の提案

**Reference** Nakata et al. (2016) Possible scenarios for occurrence of  $M \sim 7$  interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Scientific Reports*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704.