

(別冊図表集)
(案)

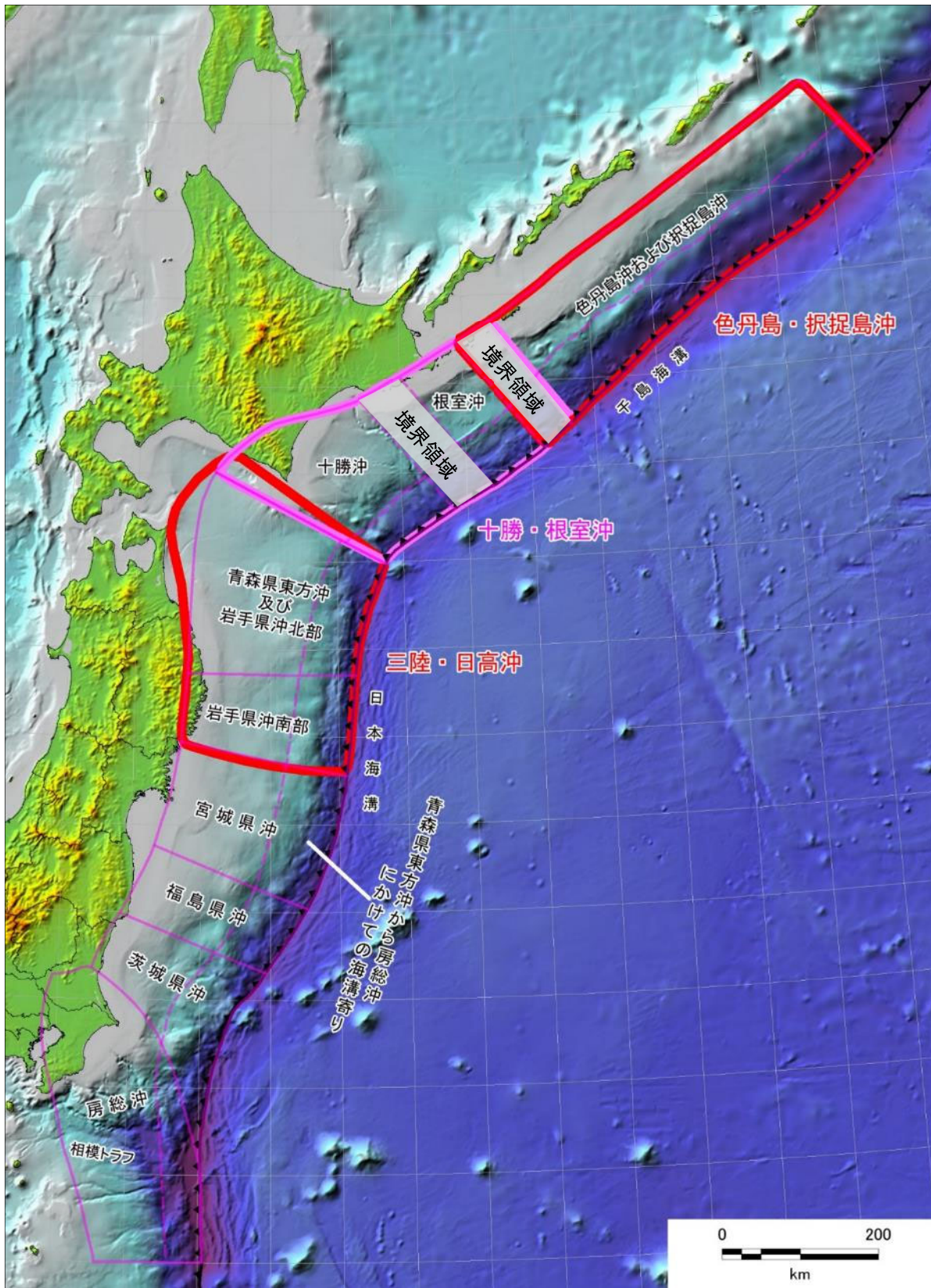
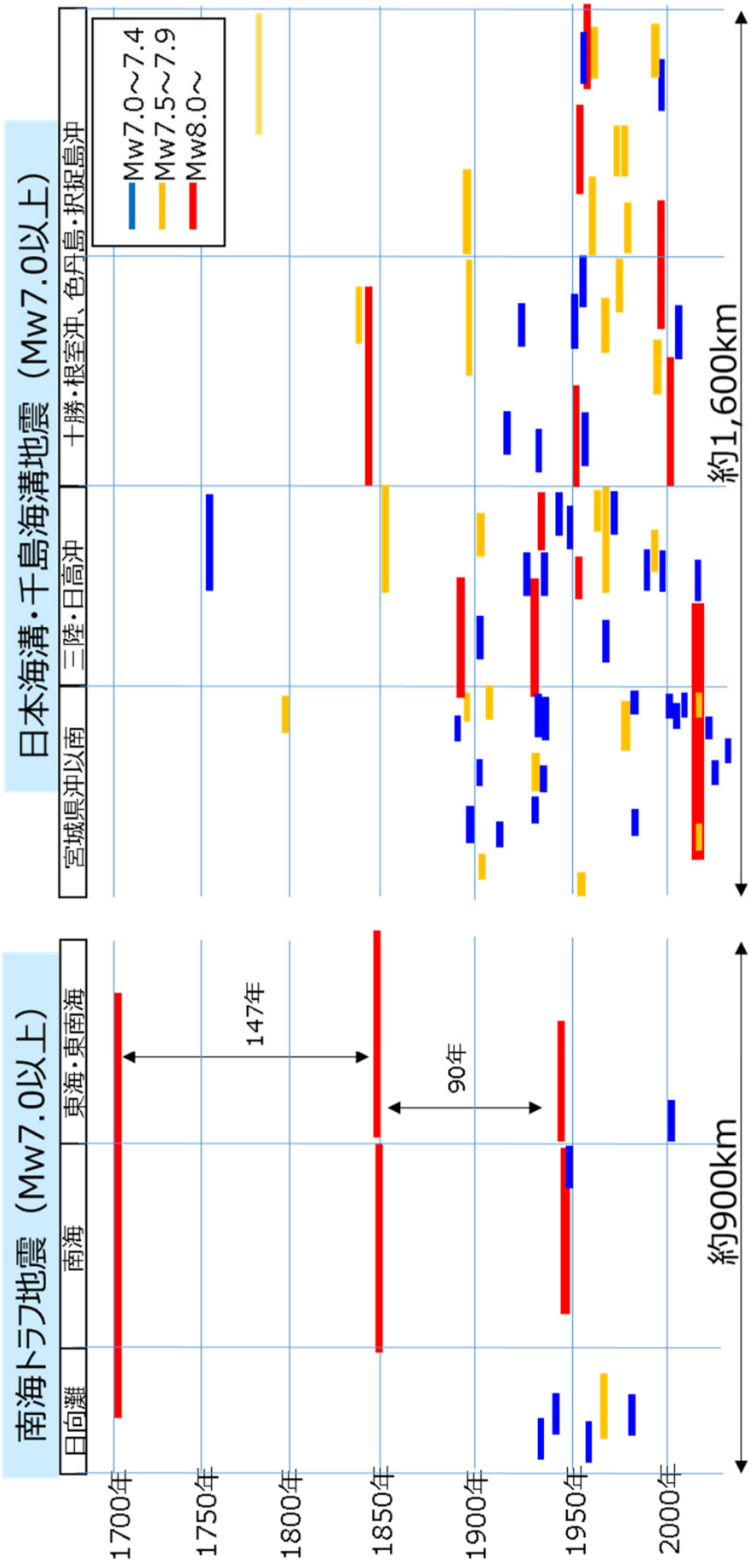


図1 地震調査委員会（2017、2019）による日本海溝・千島海溝の領域区分
 ・モデル検討会において、三陸・日高沖、十勝・根室沖、色丹島・択捉島沖の領域を加筆



※ 地震は地震調査研究推進本部の長期評価に基づく

図3 南海トラフ沿いと日本海溝千島海溝沿いの地震発生様式の比較
日本海溝・千島海溝沿いでは、南海トラフ沿いと比べ、M7クラスの地震が頻発していることが分かる。

地震は地震調査研究推進本部の長期評価に掲載された地震を対象に作成
ISC-GEM8.0の資料を用いた1904年以降と比べ、それ以前はM7クラスのデータは少なくなっている。

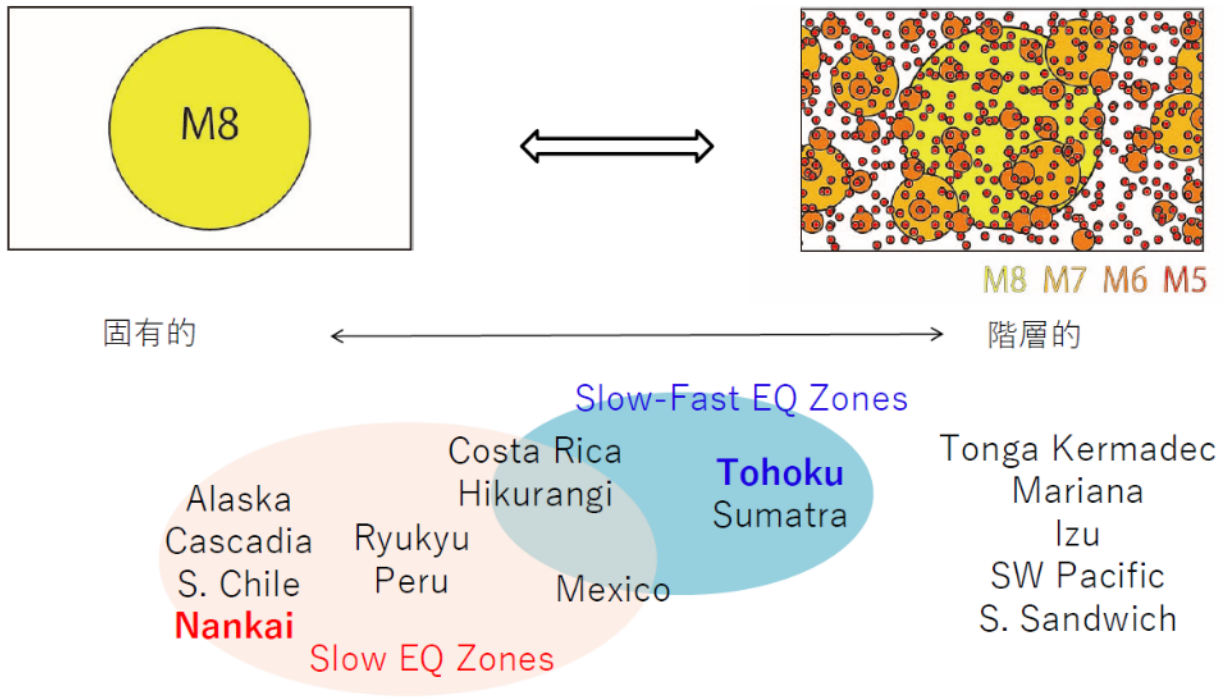
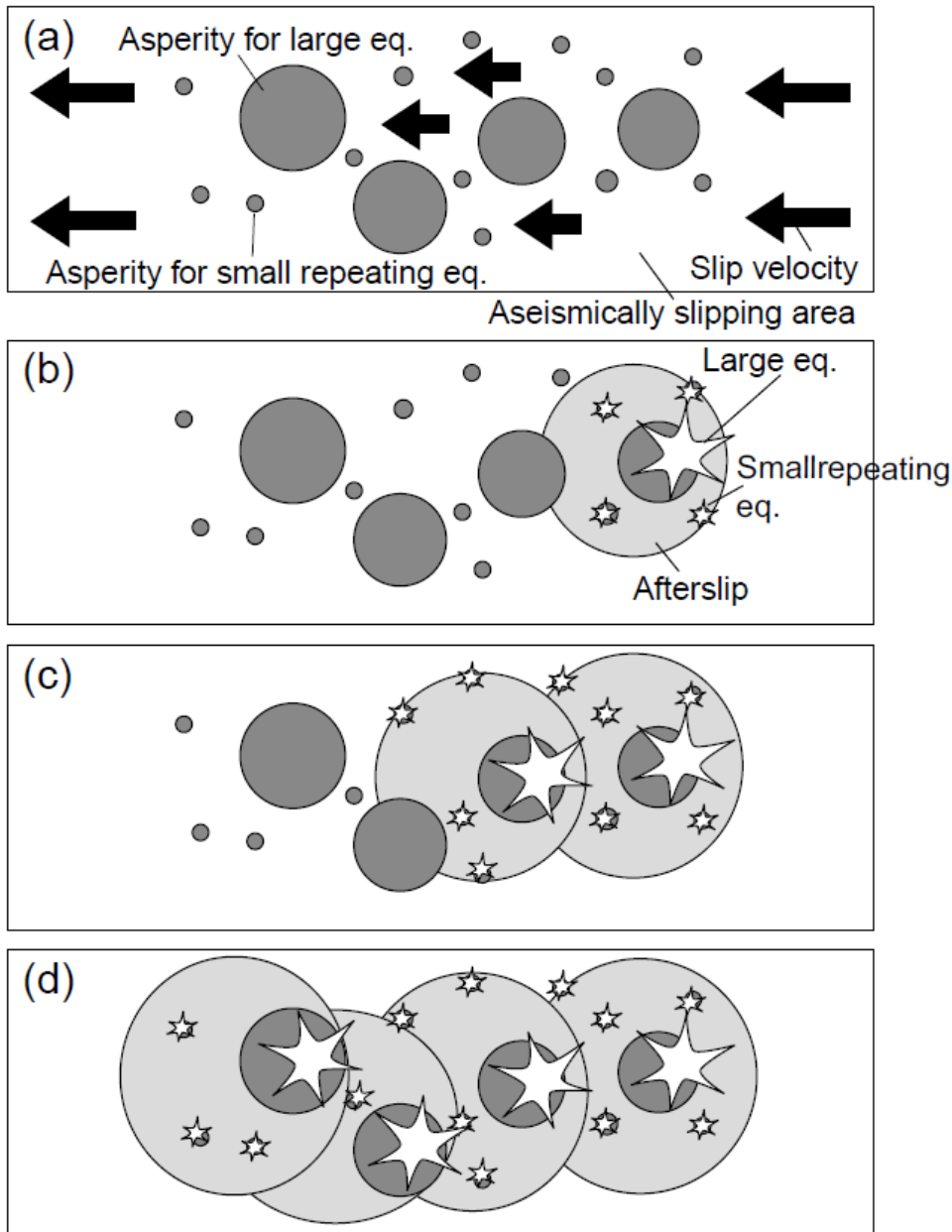


図4 階層的モデルの模式図 (井出委員提供資料)



Matsuzawa et al.(2004)

図5 余効すべりにより、次の地震を引き起こす Chain-Reaction Modelの模式図

- (a) 大きなアスペリティは大きな地震を起こし、小さなアスペリティは小さな繰り返し地震を起こす
- (b) アスペリティではない部分がすべり、アスペリティに応力が集中し、破壊が起こる。小さな繰り返し地震により、余効すべりが発生する。
- (c) 余効すべりは近くの大きなアスペリティに応力を与え、それが割れると、大きな地震が発生する。
- (d) このようにアスペリティの破壊(地震)が余効すべりを発生させ、余効すべりが次のアスペリティを破壊する。

試算に用いたモデル

ある時刻(t_i)に対象領域内である規模 (M_i) の地震が発生した後の対象領域内での、ある時間(t)における一定規模(M_w)以上の地震発生レート【Ogata, 1988 等】

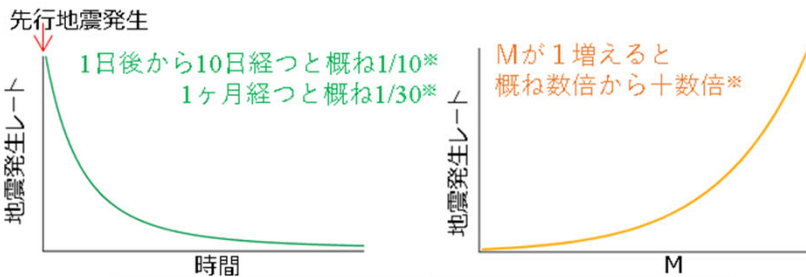
$$\lambda(t, M) = \underbrace{\mu}_{\text{背景地震活動}} + \sum_i \underbrace{K e^{\alpha(M_i - M_c)}}_{\text{先行地震規模による影響の大きさ}} \underbrace{(t - t_i + c)^{-p}}_{\text{時間変化}} \underbrace{10^{-b(M - M_c)}}_{\text{規模別頻度分布}}$$

空間分布は考慮しない(時空間ETASモデルの λ を対象領域の面積で積分したような形)

- λ を対象範囲で積分することにより、先行地震後一定期間内で M_w 以上の地震発生回数の期待値を計算
- 地震の発生がポアソン分布に従うとして、期間内に少なくとも1回の地震が発生する確率を算出

試算モデルが表現する一般的な地震の特徴 ※を付した値は典型的なパラメータによる概算値であり活動により値は前後する。

◆地震発生後の地震活動の時間変化 + 地震規模による影響

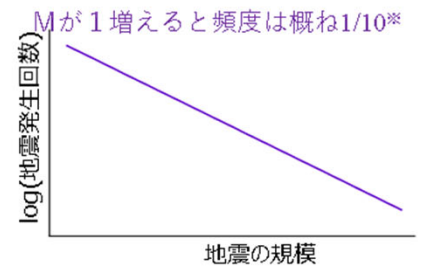


$$v(t - t_i, M_i) = K e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t - t_i + c)^p$$

K, c, p は地震発生レートの時間変化を表すパラメータ
 M_c はパラメータ推定に用いるデータの下限規模
 α 地震発生レートの先行地震規模依存性を表すパラメータ

- ある地震が発生した後は、別の地震が発生しやすい。
- 影響の大きさは地震の規模による。

◆地震の規模別頻度分布



$$\log N(M) = A - bM$$

$N(M)$ はある規模(M_w)以上の地震の総数
 A, b は地震の規模別頻度分布を表すパラメータ

- 規模の小さな地震ほど発生回数が多い。

使用したパラメータ

以下の2つの領域、期間について一元化カタログからパラメータを推定した。

- 1923~2017年、南海トラフ巨大地震の想定震源域内、深さ90km以浅
- 1926~2010年、日本全国およびその周辺(北緯30~47度、東経128~149度)、深さ65km以浅(Ogata and Zhuang(2006)の領域Cに対応)

南海トラフ巨大地震の想定震源域



	南海トラフ	日本周辺
地震回数	980	5975
b	0.822	0.913
M_c	4.45	4.95
μ	0.00766	0.0581
K	0.0103	0.0174
c	0.0122	0.0267
α	1.63	1.68
p	0.983	1.07

図7a ETASモデル(一定領域内の地震活動の時間変化のモデル)による試算の概要
 ・基準検討部会より引用

試算に用いたモデル【尾形, 2015】

ある時刻(t_i)に場所(x_i, y_i)である規模 (M_i) の地震が発生した後の、ある時刻(t)ある場所(x, y)における単位面積当たり一定規模(M)以上の地震発生レート

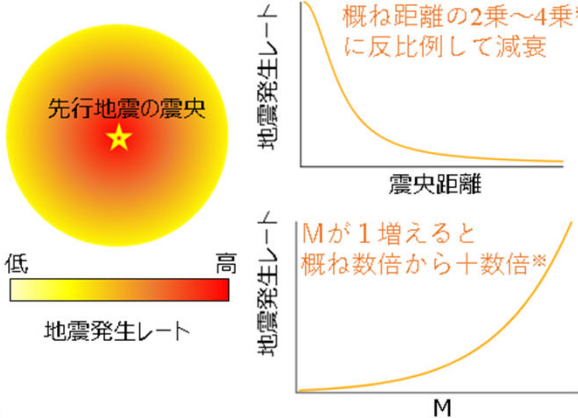
空間分布も考慮

$$\lambda(t, x, y, M) = \underbrace{\mu(x, y)}_{\text{背景地震活動 (試算では}\mu=0\text{を仮定)}} + \sum_i \underbrace{v(t-t_i)}_{\text{時間変化}} \underbrace{g(x-x_i, y-y_i; M_i)}_{\text{空間分布}} \underbrace{10^{-b(M-M_c)}}_{\text{規模別頻度分布}}$$

- λ を対象範囲で積分することにより、先行地震の影響による一定期間、一定領域内でのMw (パラメータ推定に用いたデータのMw下限) 以上の地震発生回数の期待値を計算
- 地震の発生がポアソン分布に従うとして、期間内に少なくとも1回の地震が発生する確率を算出

試算モデルが表現する一般的な地震の特徴

◆規模による影響の大きさと空間分布



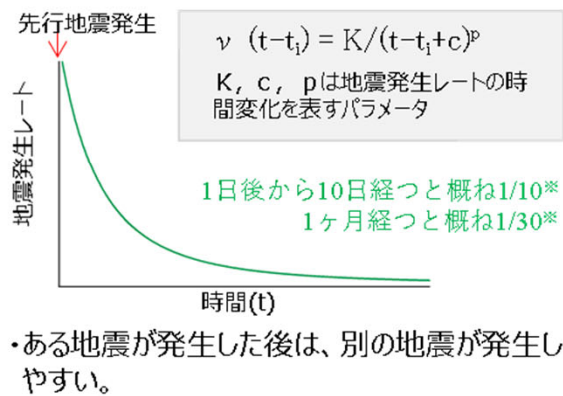
$$g(x-x_i, y-y_i; M_i) = e^{(\alpha-\gamma)(M_i-M_c)} \cdot \left\{ \frac{((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2)}{e^{\gamma(M_i-M_c)} + d} \right\}^{-q}$$

【Ogata and Zhuang, 2006】

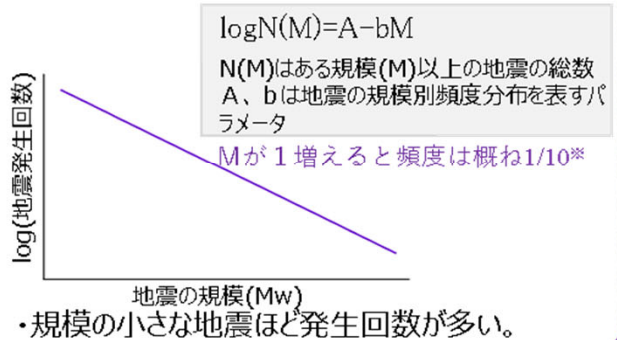
M_cはパラメータ推定に用いるデータの下限規模
 α, γ, d, q は地震発生レートの先行地震規模依存性と空間分布を表すパラメータ

- ある地震が発生した後は、その周辺で別の地震が発生しやすい。
- 影響の大きさや範囲は地震の規模による。

◆地震発生後の地震活動の時間変化

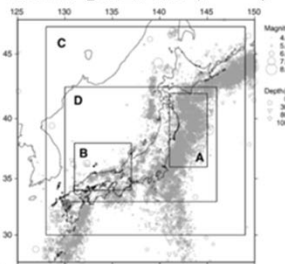


◆地震の規模別頻度分布 (GR則)



※を付した値は典型的なパラメータによる概算値であり活動により値は前後する。

使用したパラメータ



Ogata and Zhuang(2006)による日本全国及びその周辺 (C領域) の震源データに基づくパラメータを使用。GR則のb値については、同期間、同領域の一元化カタログから推定した。

The MLEs of space-time ETAS model fitted to the three datasets 1926-1995

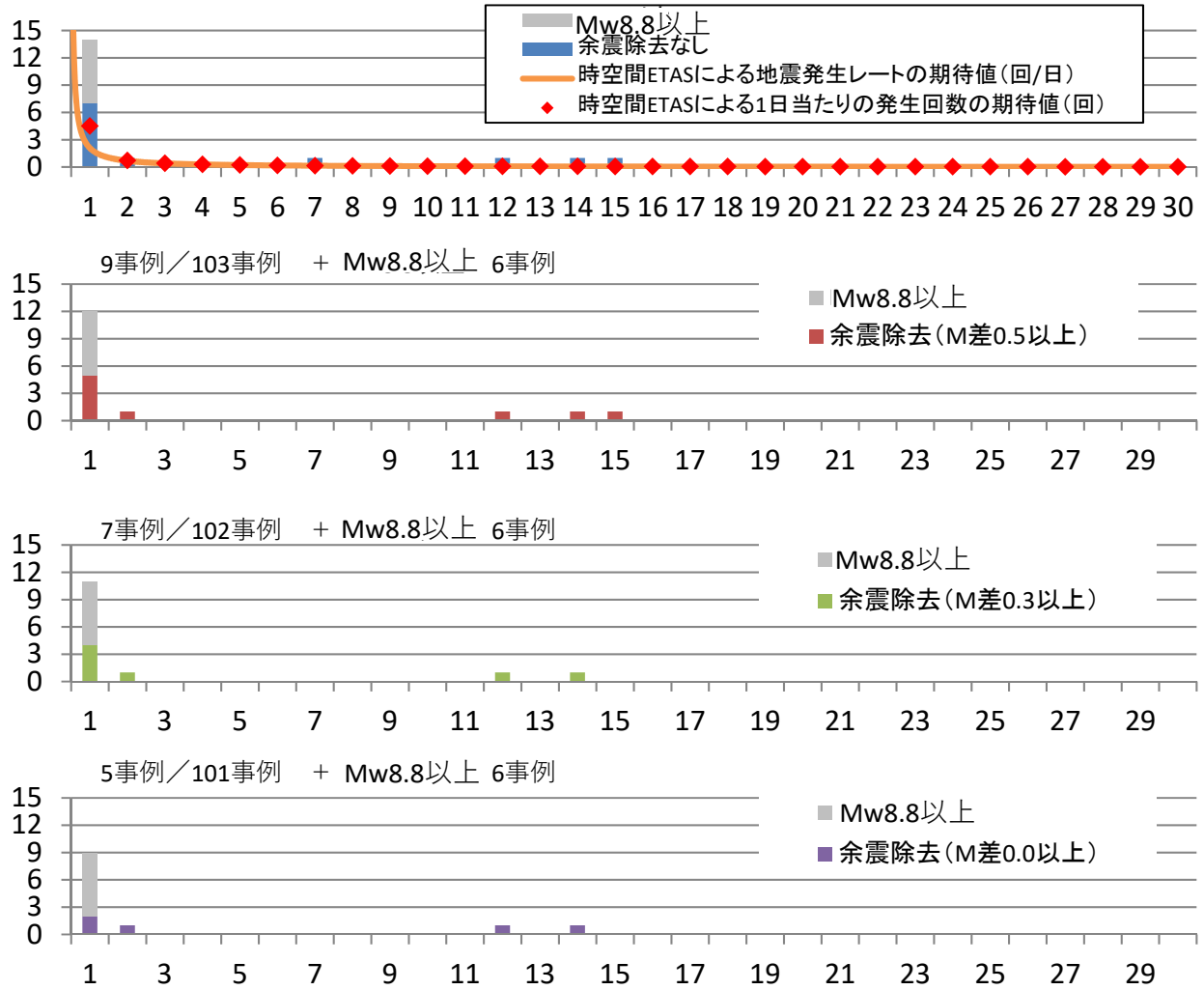
Model	$\hat{\nu}$	\hat{K}	\hat{c}	$\hat{\alpha}$	$\hat{\gamma}$	\hat{p}	\hat{d}	\hat{q}	AIC
Unit	Events/day/degree ²		Days	Magnitude ⁻¹			Degrees ²		
All Japan data (Region C) $M \geq 5.0$, 4586 events									
(10)	0.134×10^{-3}	0.468×10^{-4}	0.186×10^{-1}	1.644	1.183	1.026	0.394×10^{-2}	1.800	-1435.0

日本全国及びその周辺 : $b=0.92$

図7 b 時空間ETASモデルによる試算の概要
 ・基準検討部会より引用

続発は、500km以内 余震除去は、宇津の余震域の経験式による。
 余震とする距離： $\text{dist_u}=\text{pow}(10.0,(0.5*\text{mag1}-1.8))$
 余震の発生期間： $\text{dtime_u}=\text{pow}(10.0,(0.17+0.85*(\text{mag1}-4.0)))/1.3)-0.3$

Mw8.0以上（104事例）の地震に続いて、Mw7.8以上の地震が続発（30日以内）したケースの発生パターン（横軸：続発するまでの時間 日単位）



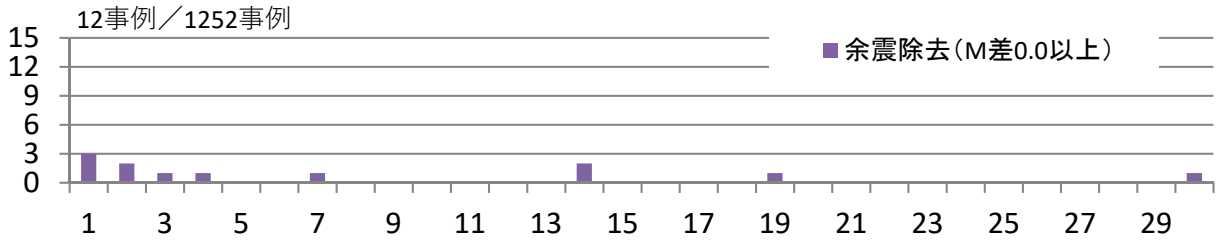
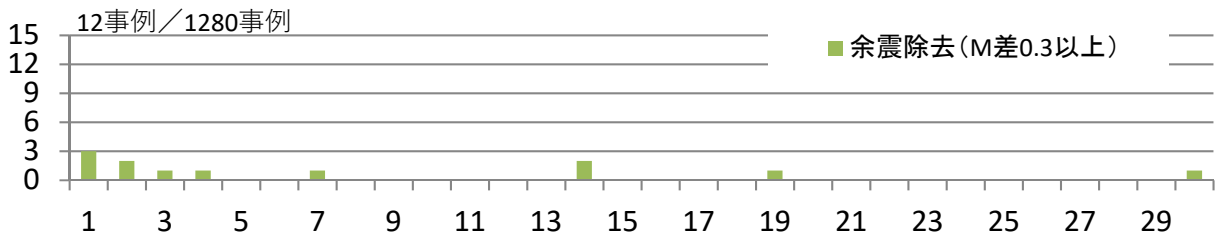
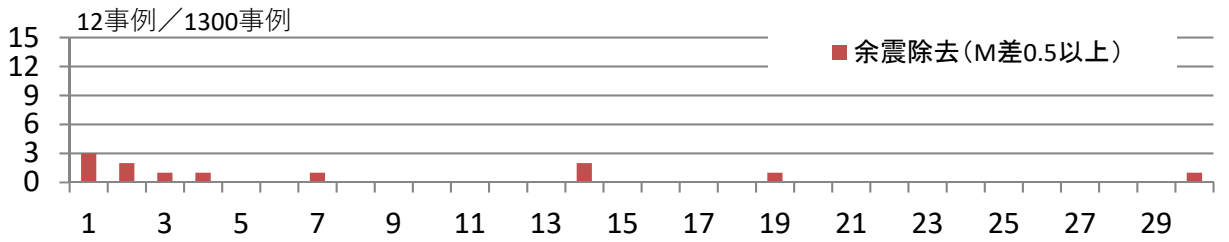
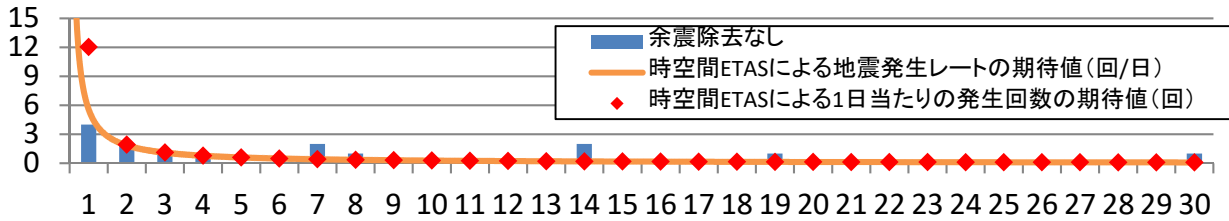
先行地震発生直後からの積算事例数
 3日間： 8事例/104事例 (+ Mw8.8以上 6事例)
 7日間： 9事例/104事例 (+ Mw8.8以上 6事例)
 30日間： 12事例/104事例 (+ Mw8.8以上 6事例)

※ISC-GEM8.0のデータセットの中にはMw8.8以上の地震事例が6つある。これら事例を複数領域での地震が続発したものと仮定した場合、灰色部分のように続発事例が増える。
 ※ISC-GEMの震源カタログ(Version8.0)の1904年～2017年のデータを使用

図 8 a Mw8.0以上の地震に続いて、Mw7.8以上の地震が続発したケースの発生パターン

続発は、500km以内 余震除去は、宇津の余震域の経験式による。
 余震とする距離： $dist_u=pow(10.0,(0.5*mag1-1.8))$
 余震の発生期間： $dtime_u=pow(10.0,(0.17+0.85*(mag1-4.0))/1.3)-0.3$

●Mw7.0-7.9 (1373事例) の地震に続いて、Mw7.8以上の地震が続発 (30日以内) したケースの発生パターン (横軸：続発するまでの時間 日単位)



先行地震発生直後からの積算事例数
 3日間： 7事例/1373事例
 7日間： 10事例/1373事例
 30日間： 15事例/1373事例

※ISC-GEMの震源カタログ(Version8.0)の1904年～2017年のデータを使用

図 8 b Mw7.0以上M8.0未満の地震に続いて、Mw7.8以上の地震が続発したケースの発生パターン

時間・空間に依存するETASにおける先行地震周辺の地震発生レートの空間分布(g)についての2つのモデル

モデル1 【Ogata, 2011】

$$g(x,y;M) = \{(x^2+y^2)/e^{\alpha(M-M_c) + d}\}^{-q}$$

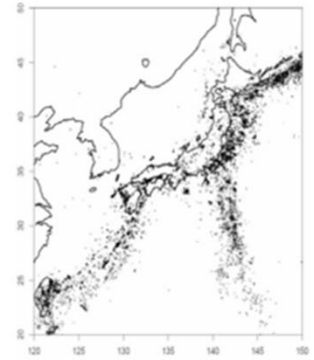
Ogata (2011)による2セットのパラメータを使用

Table 1. Estimates of the models applied to the $M \geq 4$ data.

Model unit	μ events/day/deg ²	K events/day/deg ²	c days	α 1/mag	p —	d deg ²	q —	AIC, ABIC
Space-Time ETASiso	7.77E-05	9.63E-05	1.24E-03	1.197	0.853	2.32E-04	1.415	47972.0

モデル1 (Mw4以上) データ期間 2002年~2008年、Mw \geq 4、b=0.86

モデル1 (Mw5以上) データ期間 1926年~2008年、Mw \geq 5、b=0.90



モデル2 【Ogata and Zhuang, 2006】

$$g(x,y;M) = e^{(\alpha-\gamma)(M-M_c)} \cdot \{(x^2+y^2)/e^{\gamma(M-M_c) + d}\}^{-q}$$

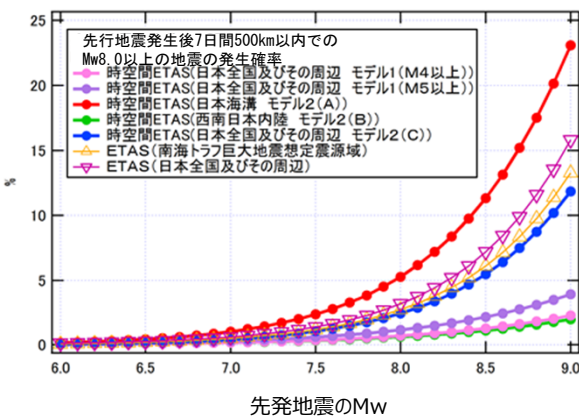
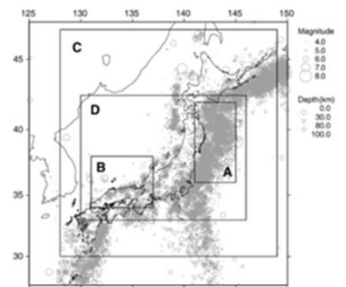
Ogata and Zhuang(2006)による3のパラメータセットを使用

The MLEs of space-time ETAS model fitted to the three datasets 1926-1995

Model	$\hat{\nu}$	\hat{K}	\hat{c}	$\hat{\alpha}$	$\hat{\gamma}$	$\hat{\rho}$	\hat{d}	\hat{q}	AIC
Unit	Events/day/degree ²	Days	Magnitude ⁻¹	Degrees ²					
Off the east coast of Tohoku District (Region A) $M \geq 4.5$, 4333 events									
モデル2 (A)	0.134×10^{-3}	0.402×10^{-4}	0.243×10^{-1}	1.645	1.331	1.050	0.179×10^{-2}	1.648	-1057.6*
Central and western Honshu (Region B) $M \geq 4.0$, 3007 events									
モデル2 (B)	0.953×10^{-3}	0.524×10^{-4}	0.878×10^{-2}	1.103	0.802	1.028	0.416×10^{-3}	1.580	-675.1*
All Japan data (Region C) $M \geq 5.0$, 4586 events									
モデル2 (C)	0.134×10^{-3}	0.468×10^{-4}	0.186×10^{-1}	1.644	1.183	1.026	0.394×10^{-2}	1.800	-1435.0

同じデータを用いた推定では、モデル1よりもモデル2の方がAIC小
【Ogata and Zhuang, 2006】

本検討における、南海トラフ沿いの領域についての時空間ETASモデルによる試算には、モデル2 (C) (日本全国及びその周辺) を使用



先行地震Mw8.2の場合との比

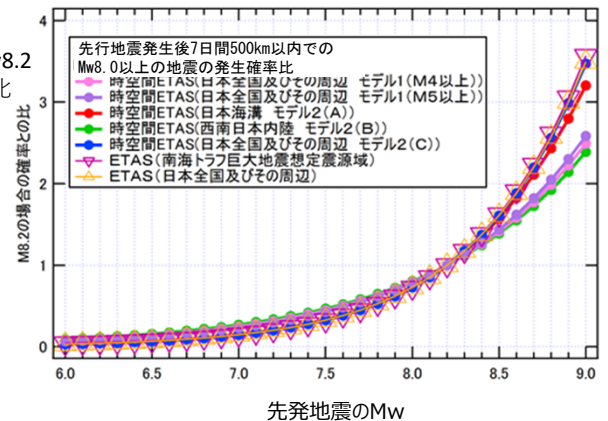


図9a ETASに関わる複数のモデルやパラメータセットとそれらを用いた先行地震発生後7日間の地震発生確率、各モデルで先行地震がM8.2の場合の発生確率に対する比の試算結果。

・基準検討部会より引用

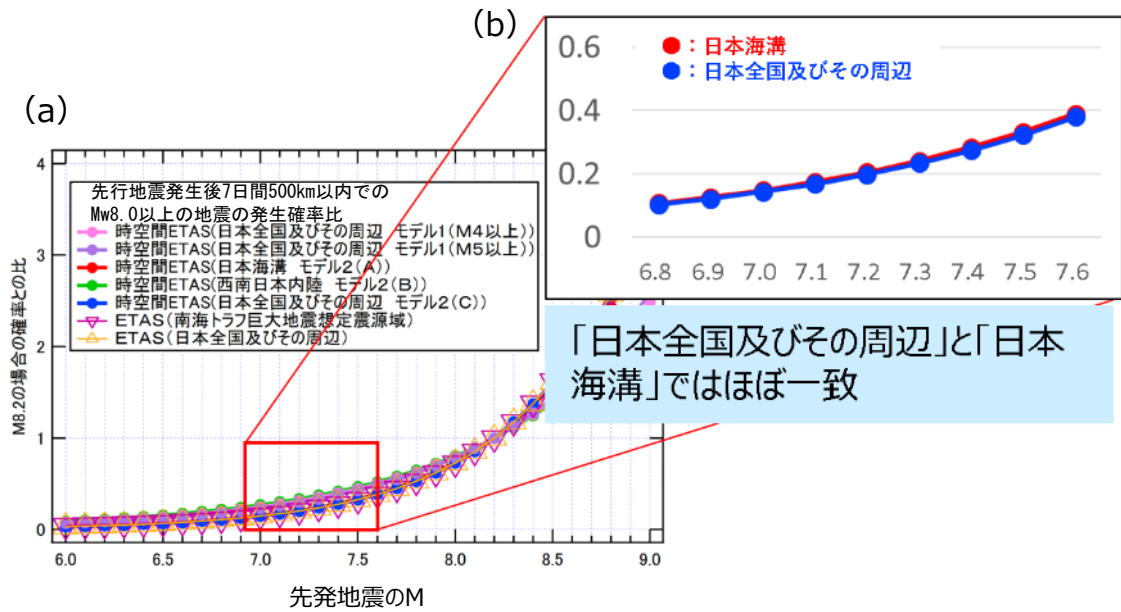


図9b (a) ETASによる先行地震から500km以内での7日間地震発生確率の先行地震規模別の試算結果を、各モデルで先行地震がMw8.2の場合の発生確率と比較したもの。(b) (a)のうちMw6.8~Mw7.6の範囲の拡大図。

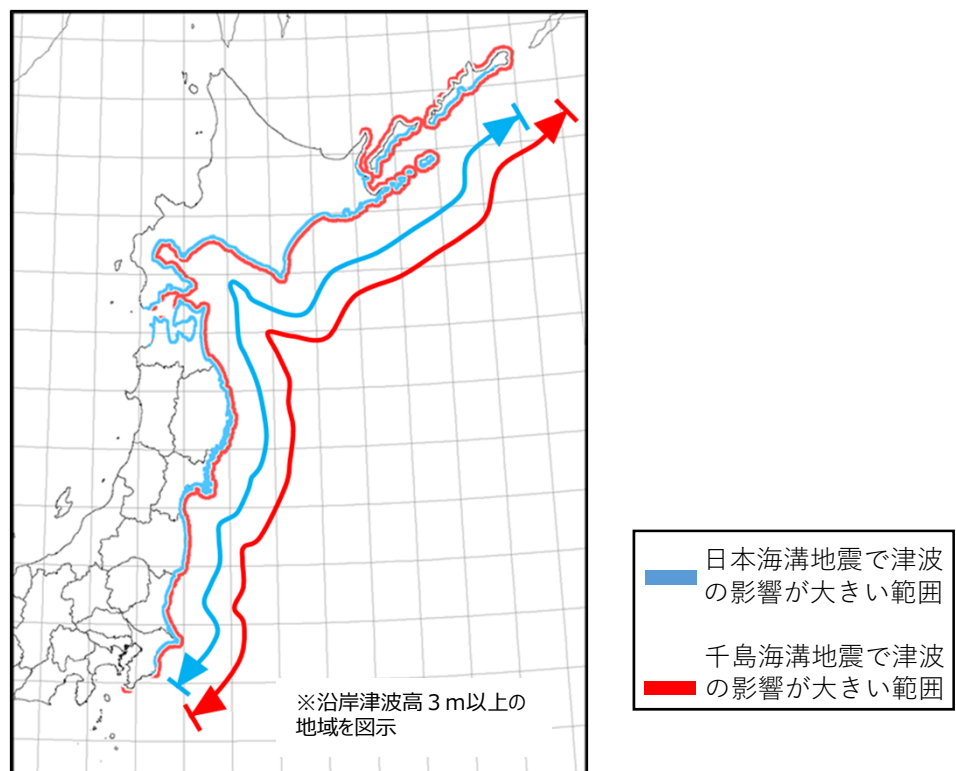


図10 日本海溝モデルと千島海溝モデルにおける沿岸での津波の影響の大きい範囲

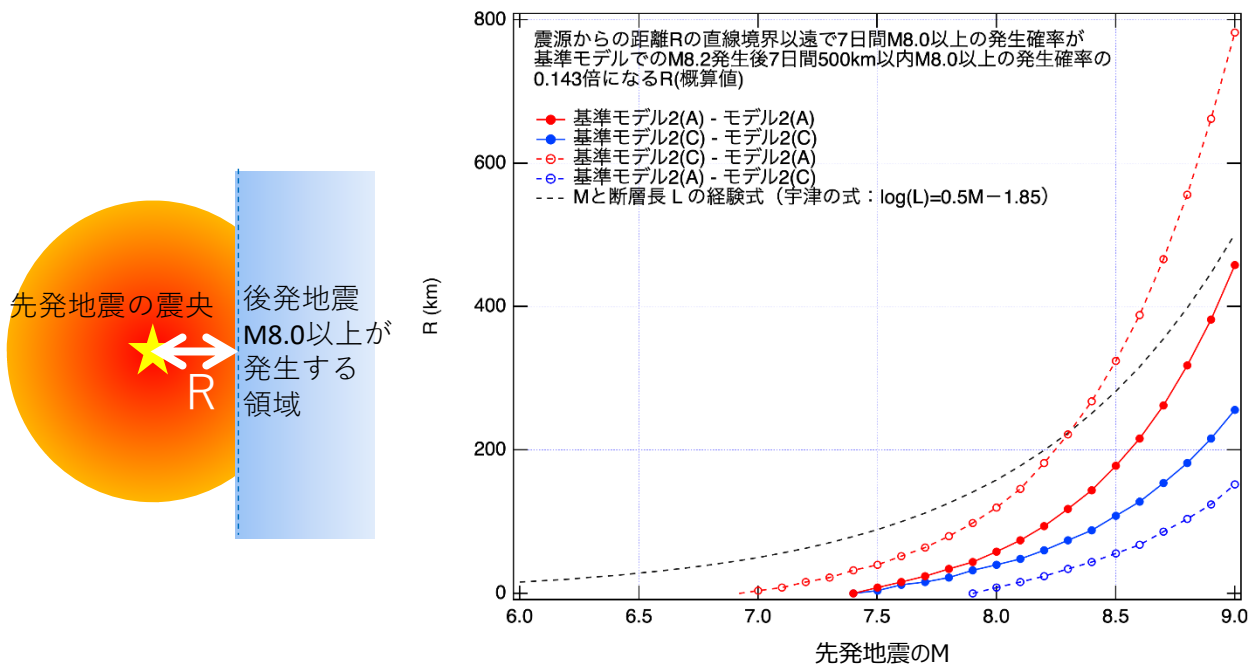


図11 ETASモデルによる各モデルのマグニチュードと影響範囲Rとの関係及びマグニチュードと断層長との関係

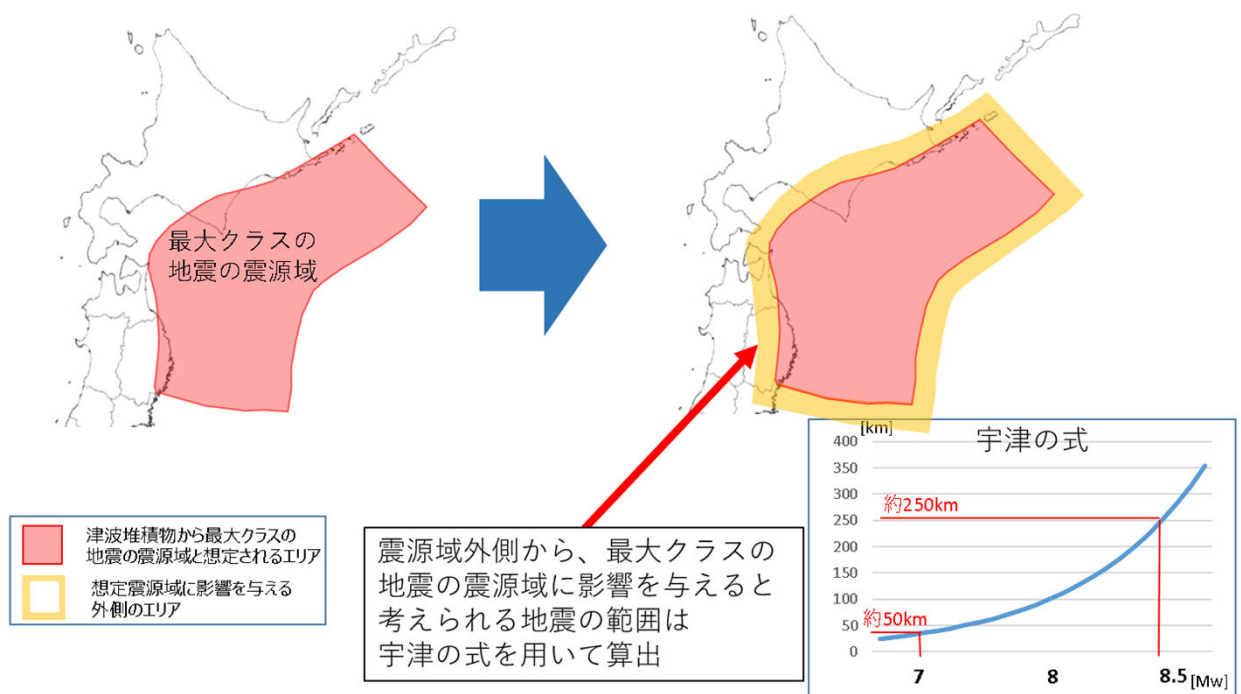


図12 日本海溝・千島海溝沿いでの地震を評価する対象領域

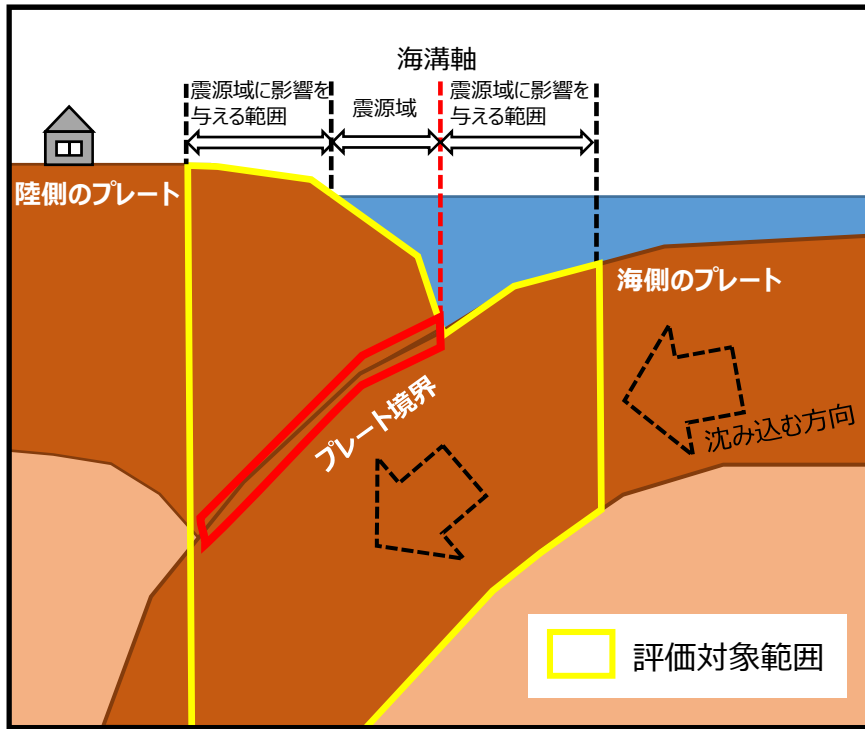
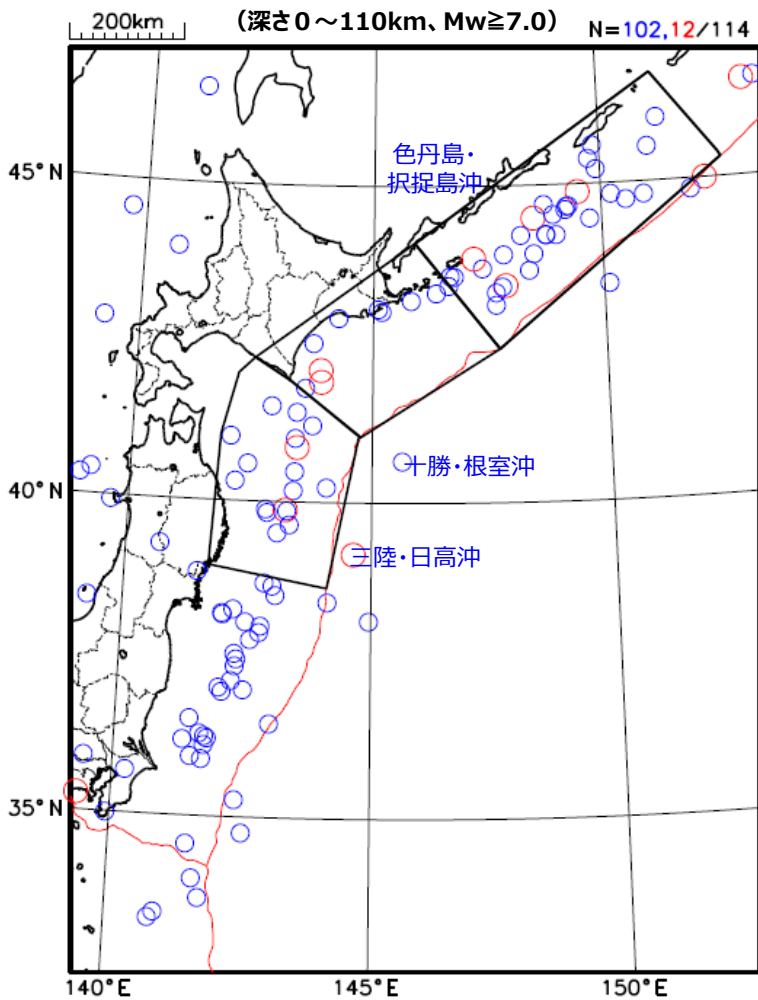


図13 プレート境界以外の地震



- ・使用した震源データはISC-GEM (ver.8.0)のうち1904年～2010年のデータ
- ・領域内で最も深い105kmの震源に合わせて、深さの表示範囲を110kmまでとした。
- ・赤：Mw8.0以上の地震、
青：Mw7.0以上Mw8.0未満の地震

図14 日本海溝・千島海溝沿いで観測された地震

表1 1904年～2010年で各領域で観測された地震の回数

Mw 下限	宮城沖※	三陸・日高沖	十勝・根室沖	色丹島・択捉島沖※	海溝軸外側※	内陸※	全計	○年に1度
Mw7.0	6	18	9	8	2	2	45	2.4
Mw7.1	6	13	8	8	2	1	38	2.8
Mw7.2	6	10	6	6	2	1	31	3.5
Mw7.3	6	8	6	6	2	1	29	3.7
Mw7.4	4	6	5	6	2	1	24	4.5
Mw7.5	3	5	4	4	2	1	19	5.6
Mw7.6	3	5	3	3	2	1	17	6.3

※ 宮城沖、色丹島・択捉島沖、海溝軸外側、内陸については、宇津の式で求めた半径から、大すべり域に影響のある地震のみをカウントしている。

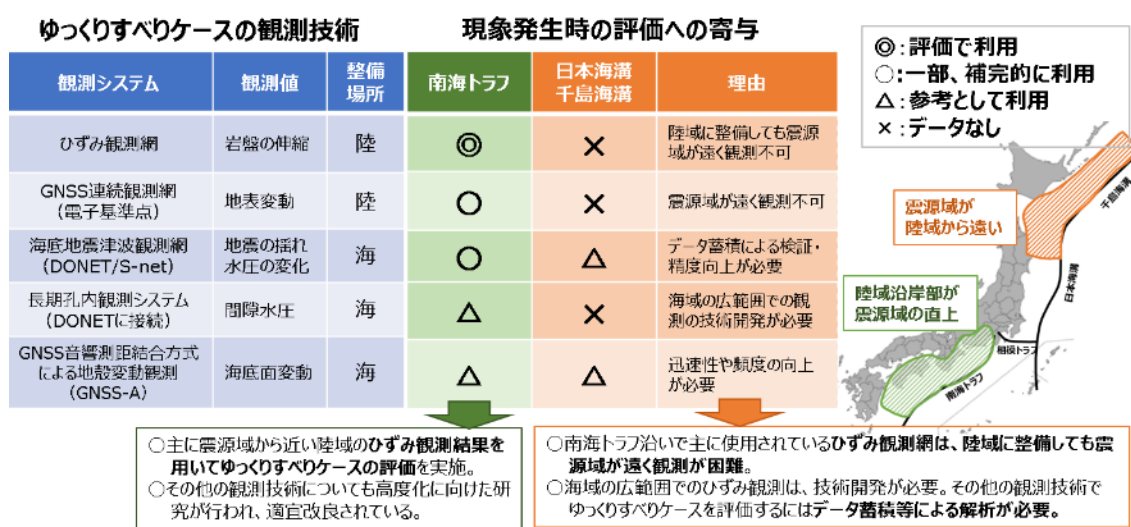
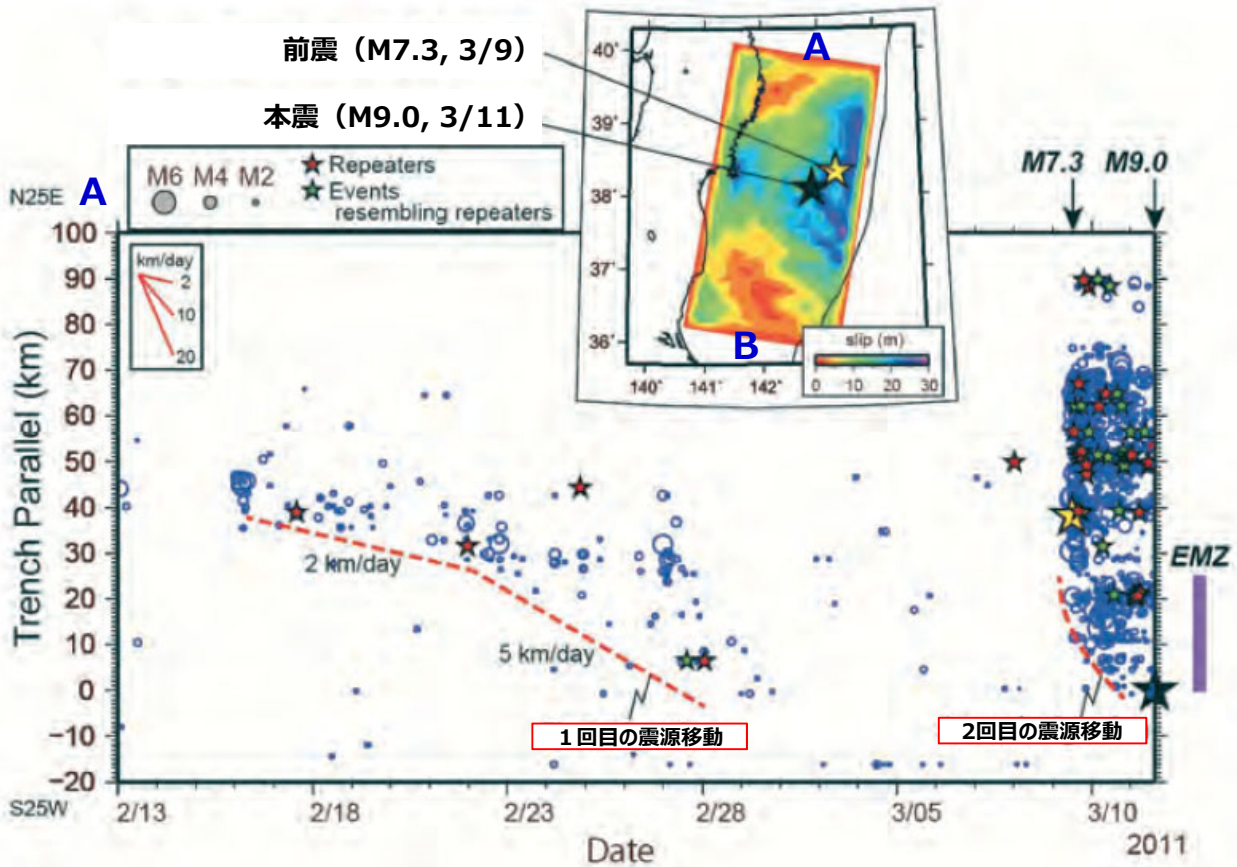


図15 ゆっくりすべりを観測するための観測網



引用文献：加藤（2012）；2011年東北地方太平洋沖地震の特徴について，地球化学 46,87-98

図16 東北地方太平洋沖地震の前に見られた震源の移動
・加藤（2012）に内閣府で一部加筆

地震発生からの経過時間	得られる観測データ・解析結果 (※を付したものは、精度良く結果が得られない場合がある)	公表内容	対応する情報等
0～5分程度	<ul style="list-style-type: none"> ○地震波形の自動解析による震度及び主要動到達時刻の予想（→緊急地震速報） ○2分程度の地震波形を用いた手動解析（→震源、M（マグニチュード）） ○震源、Mを用いた津波データベース検索結果（→津波警報、津波情報） ○震度観測結果 	<ul style="list-style-type: none"> ○震度 ○津波警報 ○震源、M 	<ul style="list-style-type: none"> ○緊急地震速報 ○震度速報 ○津波警報等、津波情報 ○地震情報（震源・震度に関する情報等）
15～30分程度	<ul style="list-style-type: none"> ○W-Phase、Mw、発震機構、セントロイド※（国内観測データによる自動解析結果） 	<ul style="list-style-type: none"> ○（必要に応じて）津波警報等の更新 	<ul style="list-style-type: none"> ○津波警報等、津波情報
(随時)	<ul style="list-style-type: none"> ○震度観測結果 ○沖合または沿岸における津波観測結果 ○Mw、発震機構、セントロイド※（国外観測データによる自動解析結果） 	<ul style="list-style-type: none"> ○地震の発生状況（震度1以上） ○津波観測結果 ○（必要に応じて）津波警報等の更新 	<ul style="list-style-type: none"> ○地震情報（震源・震度に関する情報等） ○津波情報 ○津波警報等
～2時間程度	<ul style="list-style-type: none"> ○震源、M※（精査した暫定震源） ○自動震源による地震活動図※（地震活動域、MT図、回数積算図等） ○Mw、発震機構、セントロイド※（手動解析結果） 	<ul style="list-style-type: none"> ○発生した地震や津波の解説、防災上の留意事項、今後の地震活動の見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ○発生した地震や津波に関する報道発表（記者会見）
最短2時間程度	<ul style="list-style-type: none"> ○津波波源域※ 		
それ以降（～1日程度）	<ul style="list-style-type: none"> ○暫定震源による地震活動図等 	<ul style="list-style-type: none"> ○発生した地震や津波の解説、防災上の留意事項、今後の地震活動の見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ○随時報道発表（必要に応じて記者会見）

図17 地震の規模（Mw）評価のタイミングとデータ収集、情報発表等の時間推移