

時空間ETASによる計算について

地震発生確率の試算に用いたモデルの概要(時空間ETASモデル)

- 先行地震による地震発生可能性の高まりの検討のため、時空間ETASモデル(尾形(2015)等)を使用して、一定期間、一定領域内で、パラメータ推定に用いたデータのM下限以上の地震の発生回数の期待値を計算。
- 上で求めた期待値から、GR則を仮定してある規模以上の地震の発生回数の期待値に換算し、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回地震が発生する確率を算出。

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

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

- ・先行地震の影響による一定期間、一定領域内でのM以上の地震発生回数の期待値を計算 (λ を対象範囲で積分)
- ・期間内に少なくとも1回の地震が発生する確率を算出

◆地震の規模別頻度分布

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

$N(M)$ はある規模(M)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

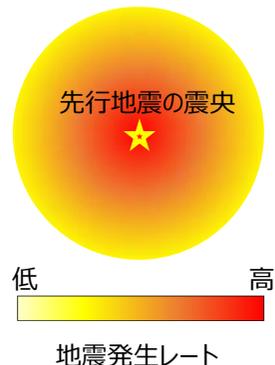


Mが1増えると頻度は概ね1/10*

- ・規模の小さな地震ほど発生回数が多い。

試算モデルが表現する一般的な地震の特徴

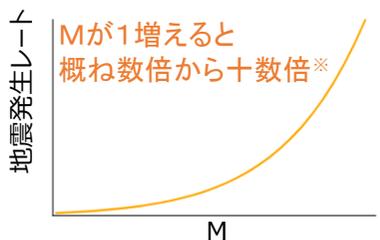
◆規模による影響の大きさと空間分布



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

【Ogata and Zhuang, 2006】

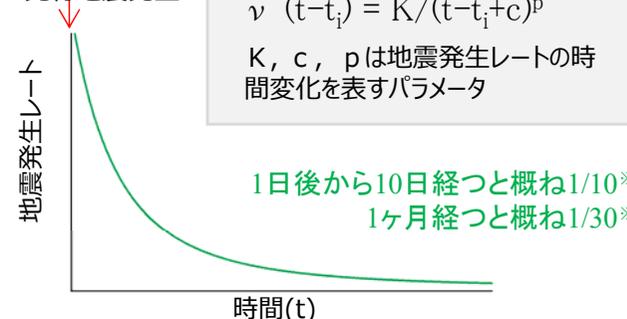
M_c はパラメータ推定に用いるデータの下限規模
 α, γ, d, q は地震発生レートの先行地震規模依存性や空間分布を表すパラメータ



- ・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

先行地震発生



$$\nu(t-t_i) = K / (t-t_i+c)^p$$

K, c, p は地震発生レートの時間変化を表すパラメータ

1日後から10日経つと概ね1/10*
 1ヶ月経つと概ね1/30*

- ・ある地震が発生した後は、別の地震が発生しやすい。

*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。1

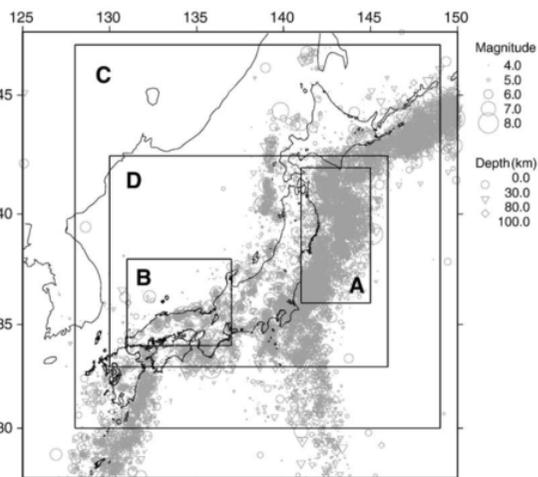
- 先行地震周辺の地震発生レートの空間分布モデルは複数提案されている。ここではOgata and Zhuang(2006)によるモデルを用い、日本全国及びその周辺、日本海溝周辺のデータから推定したパラメータセットを使用した。
- GR則のb値は、各モデルのパラメータ推定に用いたデータと同期間、同領域の一元化カタログから推定した。

検討に用いたパラメータ

Ogata and Zhuang(2006)による2セットのパラメータ

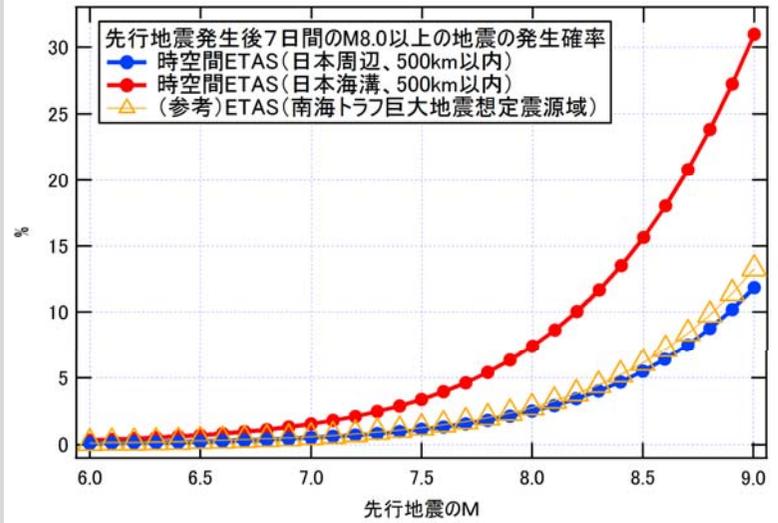
The MLEs of space-time ETAS model fitted to the three datasets 1926–1995

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			
<i>Off the east coast of Tohoku District (Region A) M ≥ 4.5, 4333 events</i>									
(10)	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*
				b=0.75		日本海溝周辺のモデル			
<i>All Japan data (Region C) M ≥ 5.0, 4586 events</i>									
(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
				b=0.92		日本全国及びその周辺のモデル			

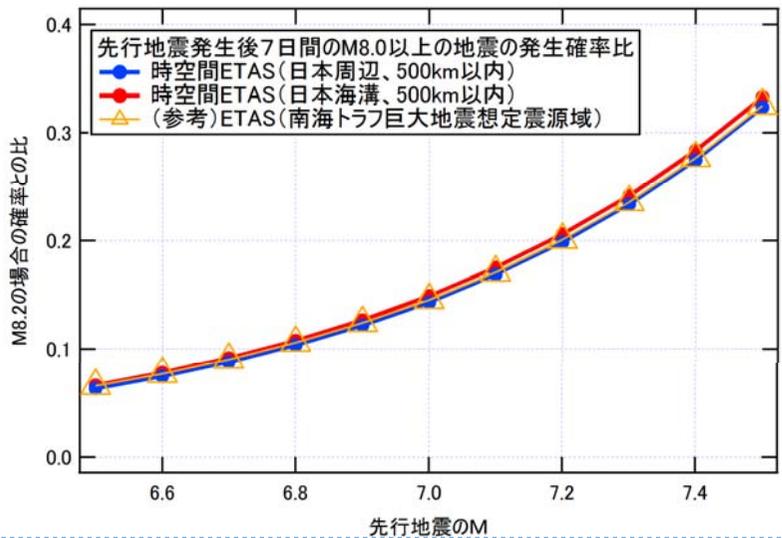
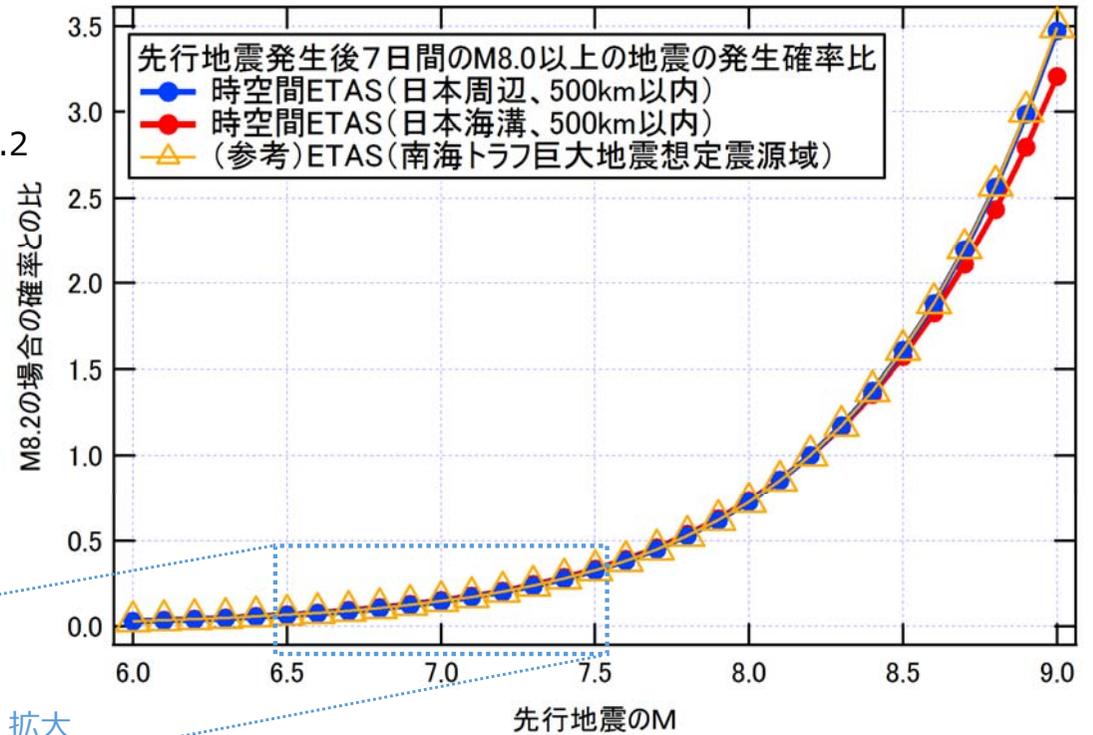


地震発生後にM8クラス(M8.0以上)の地震が発生する確率の先行地震規模依存性

○ 先行地震の規模がM6～M9の各場合に、先行地震から500km以内で7日間以内にM8.0以上の地震が発生する確率について、各モデルで先行地震がM8.2の場合との比を試算した。



先行地震M8.2の場合との比



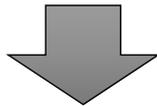
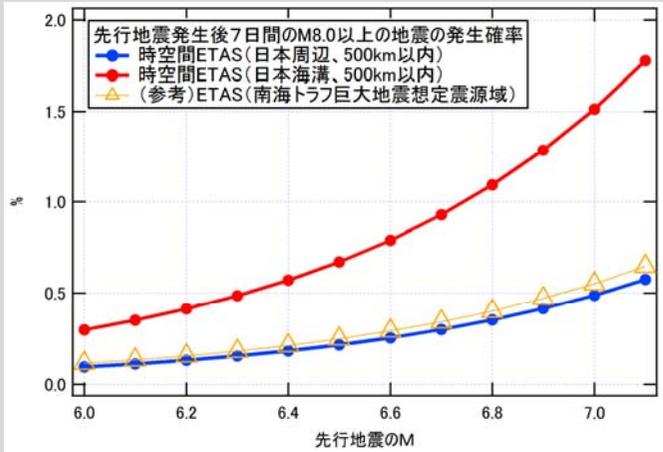
拡大

先行地震の規模	M8.2の場合との比
M8.0	約0.73
M7.5	約0.33
M7.0	約0.14
M6.5	約0.07
M6.0	約0.03

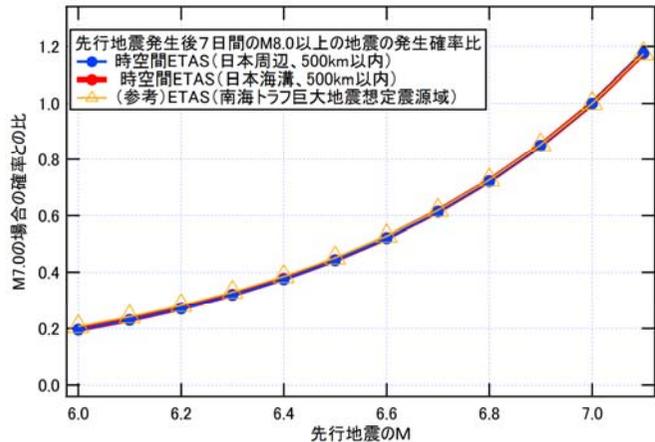
一部割れ相当よりも小さな地震が連発した時の評価について 試算方法

○ M7.0以下の地震が2回または3回短時間で連発した場合の評価の参考のため、これらの場合の地震発生確率と、M7.0の地震が1回先行した場合の地震発生確率との比を試算した。

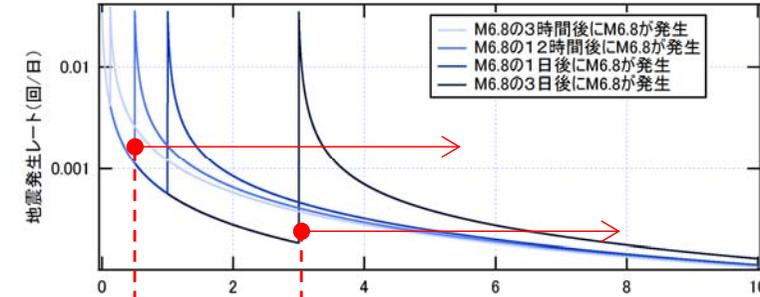
地震発生後7日間にM8.0以上の地震が発生する確率



先行地震M7.0の場合との比を算出

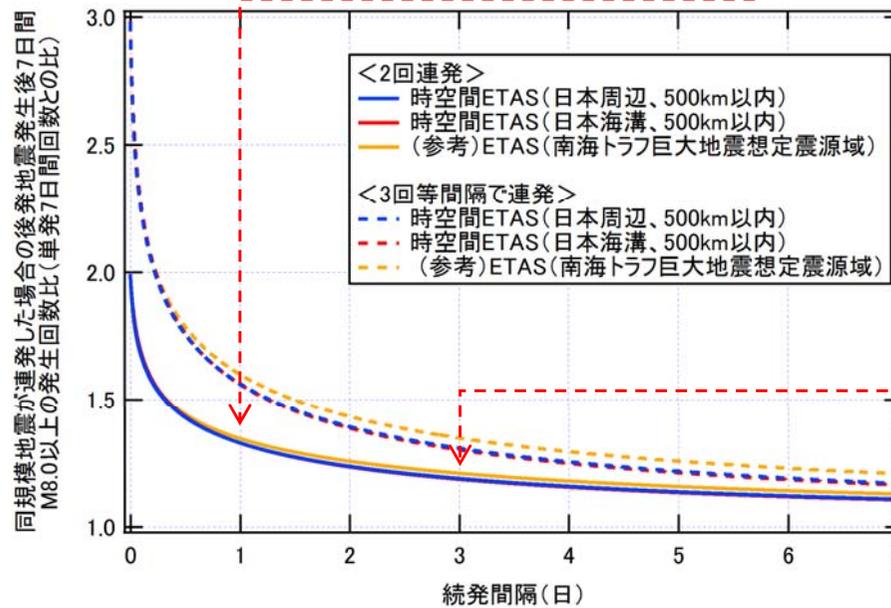


【参考】地震発生レートの推移の例 (縦軸対数)



発生回数比の時間変化は先行地震規模によらずモデル毎に一定

同規模地震が連発した場合の後発地震発生後7日間発生回数比 (単発7日間回数との比)



後発地震発生後7日間の発生レートを積分

1回の地震による地震発生確率の比 (M7.0の場合との比)



連発による確率の高まり (1回発生の場合との比)

同程度の規模の地震が2回または3回短時間で連発した場合の確率比 (M7.0の地震が1回発生した場合との比)

(参考)一定領域内の地震活動の発生確率の試算(ETASモデル)

○ 先行地震による地震発生可能性の高まりの検討のためのもう一つのモデルとして、一定領域内の地震発生確率の時間変化を表すETASモデル【Ogata, 1988 等】を使用して同様の試算を行った。

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)以上の地震発生レート 【Ogata, 1988 等】

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

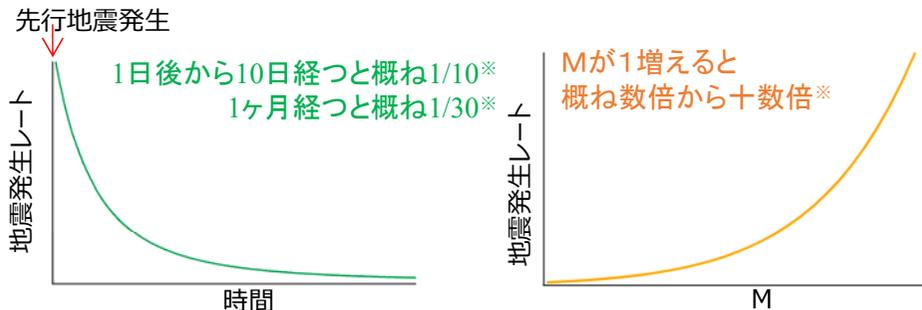
空間分布は考慮しない
(時空間ETASモデルの λ を対象領域の面積で積分したような形)

- ・先行地震後一定期間内でM以上の地震発生回数の期待値を計算
- ・期間内に少なくとも1回の地震が発生する確率を算出
(先行地震一回の影響の7日間積分と、その後の地震発生の影響も考慮した多数のシミュレーションによる確率を試算)

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

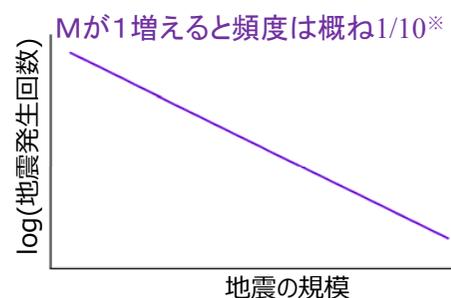


$$\nu(t - t_i, M_i) = K e^{\alpha(M_i - M_c)} / (t + c)^p$$

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)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

1923~2017年、下図領域内、深さ90km
以浅の震源データ(一元化カタログによる)
からパラメータを推した。

南海トラフ巨大地震の想定震源域



地震回数	b	M _c	μ	K	c	α	p
980	0.822	4.45	0.00766	0.0103	0.0122	1.63	0.983

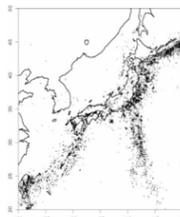
○ 先行地震規模M6~M9の各場合に、先行地震から500km以内で7日間以内にM8.0以上の地震が発生する確率、及びそれらの確率と各モデルで先行地震M8.2の場合との比を試算した。

$$\lambda(t, x, y, M) = \{ \mu(x, y) + \sum v(t-t_i) g(x-x_i, y-y_i; M_i) \} 10^{-b(M-M_c)}$$

先行地震周辺の地震発生レートの空間分布についての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 (M4以上) データ期間 2002年~2008年、 $M \geq 4$ 、 $b=0.86$

Space-Time ETASiso	7.97E-06	8.79E-05	4.48E-03	1.257	0.891	4.88E-03	1.763	81893.7
--------------------	----------	----------	----------	-------	-------	----------	-------	---------

モデル1 (M5以上) データ期間 1926年~2008年、 $M \geq 5$ 、 $b=0.90$

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】

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{v}	\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
(10) 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*

モデル2 (A)

$b=0.75$

日本海溝周辺のモデル

Central and western Honshu (Region B) $M \geq 4.0$, 3007 events
(10) 0.953 × 10⁻⁴ 0.524 × 10⁻⁴ 0.878 × 10⁻² 1.103 0.802 1.028 0.416 × 10⁻³ 1.580 -675.1*

モデル2 (B)

$b=0.80$

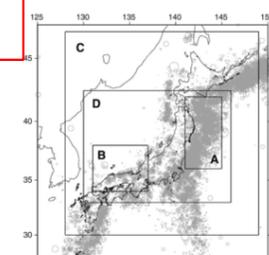
西南日本内陸部のモデル

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

モデル2 (C)

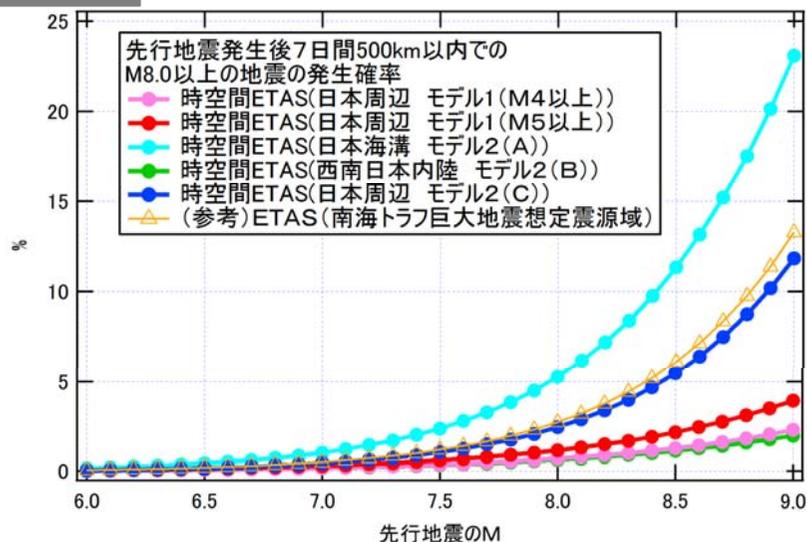
$b=0.92$

日本全国及びその周辺のモデル

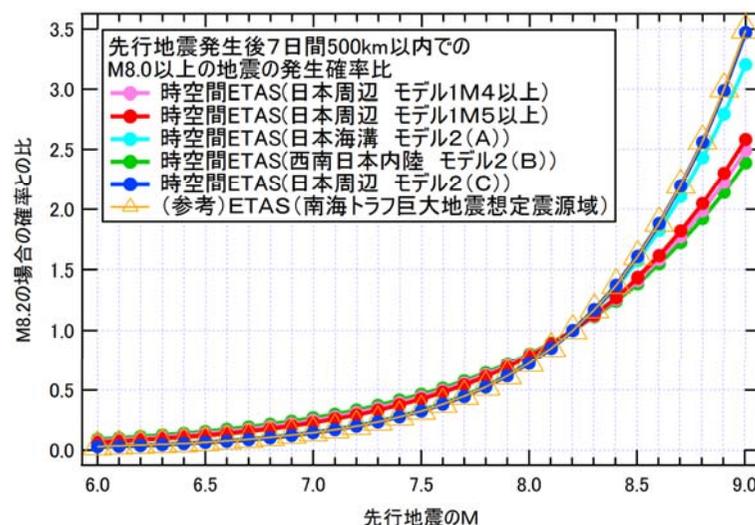
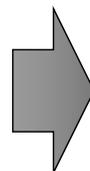


試算結果

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 (A) (日本海溝)、2 (C) (日本周辺) を使用

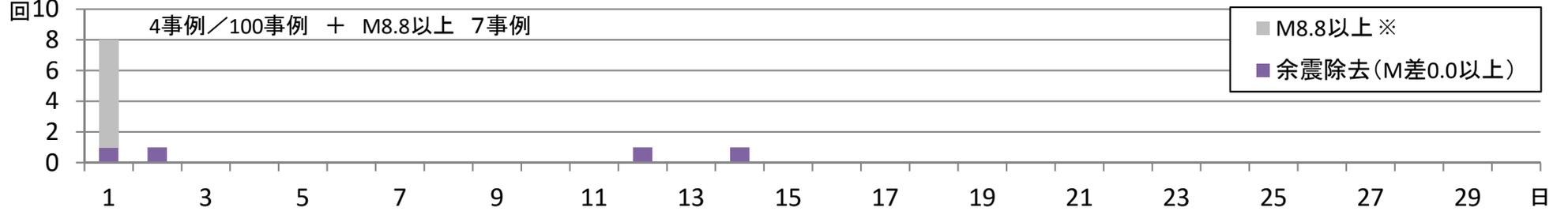
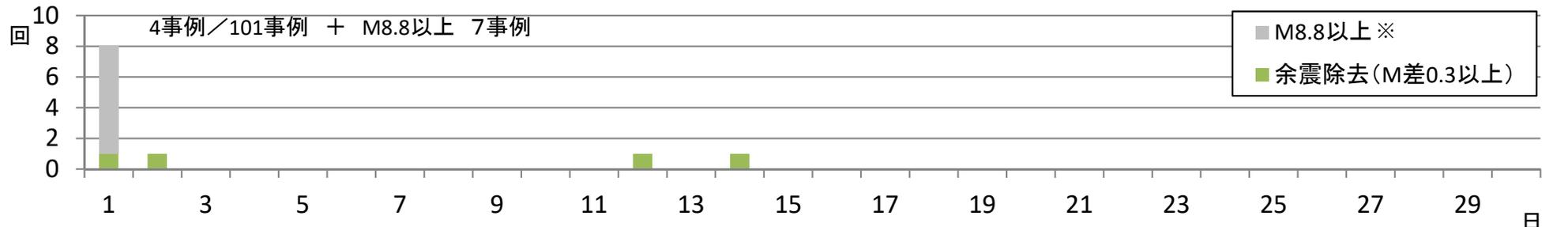
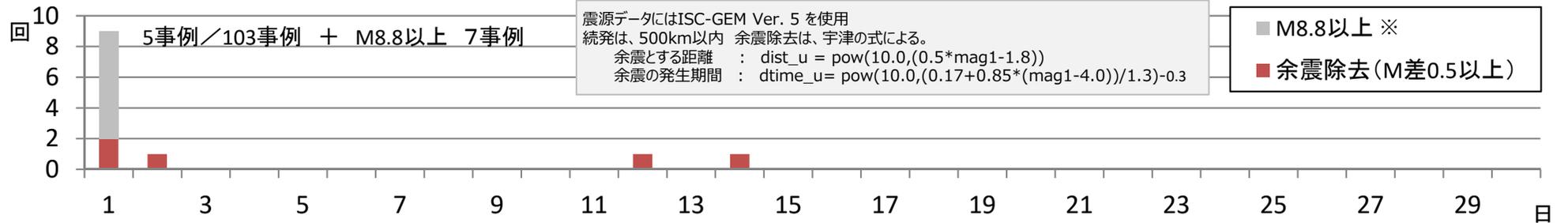
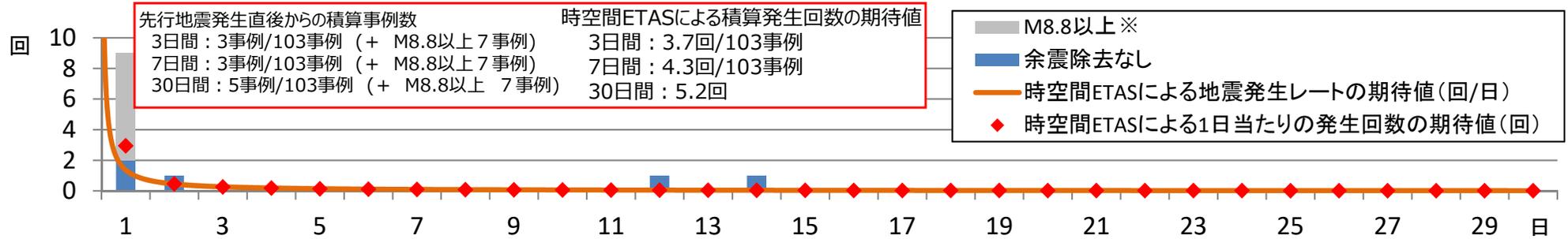


先行地震M8.2の場合との比



○ 大規模地震の発生直後は別の大規模地震の発生頻度が高く、ETASモデルとも整合的。

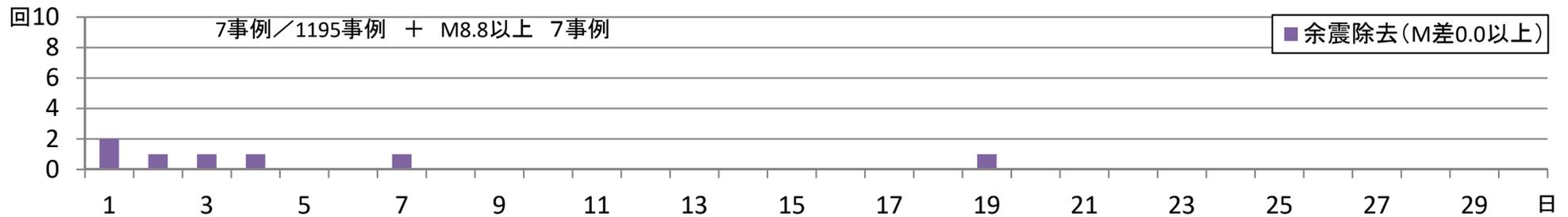
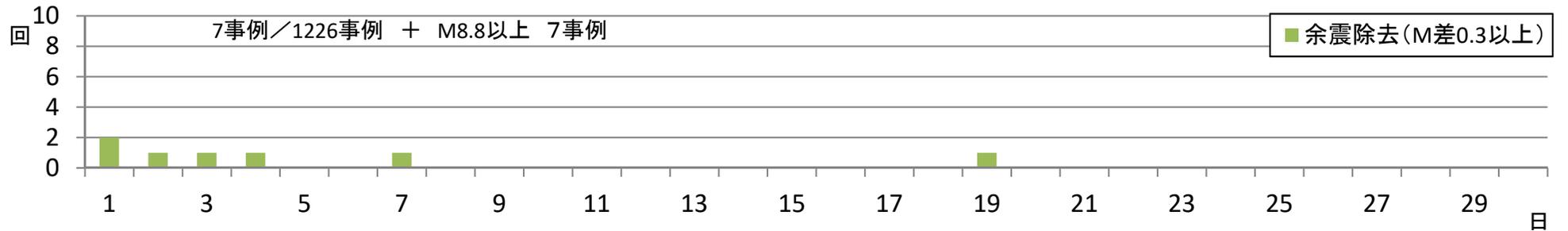
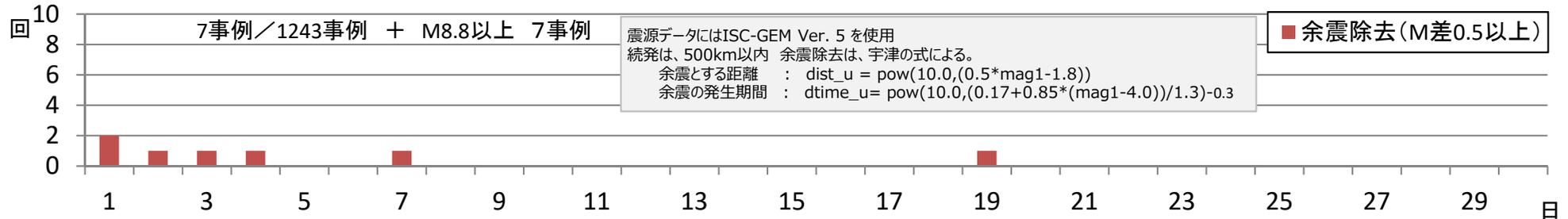
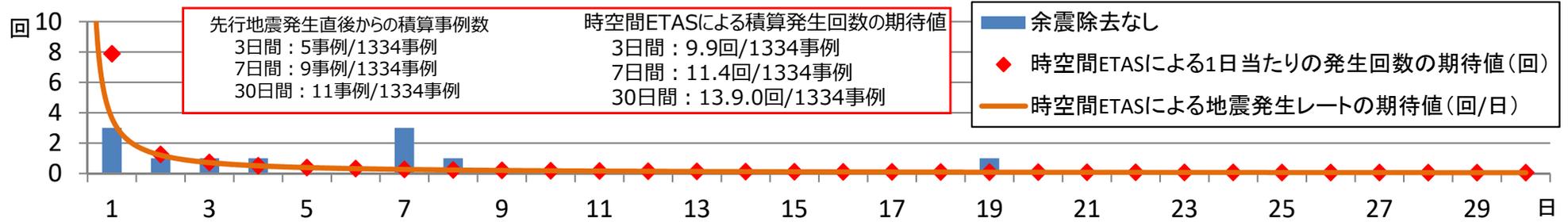
- M8.0以上 (103事例) の地震に続いて、M8.0以上の地震が**続発 (30日内)** したケースの発生パターン (横軸：続発するまでの時間 日単位)



※ISC-GEM5のデータセットの中にはMw8.8以上の地震事例が7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。

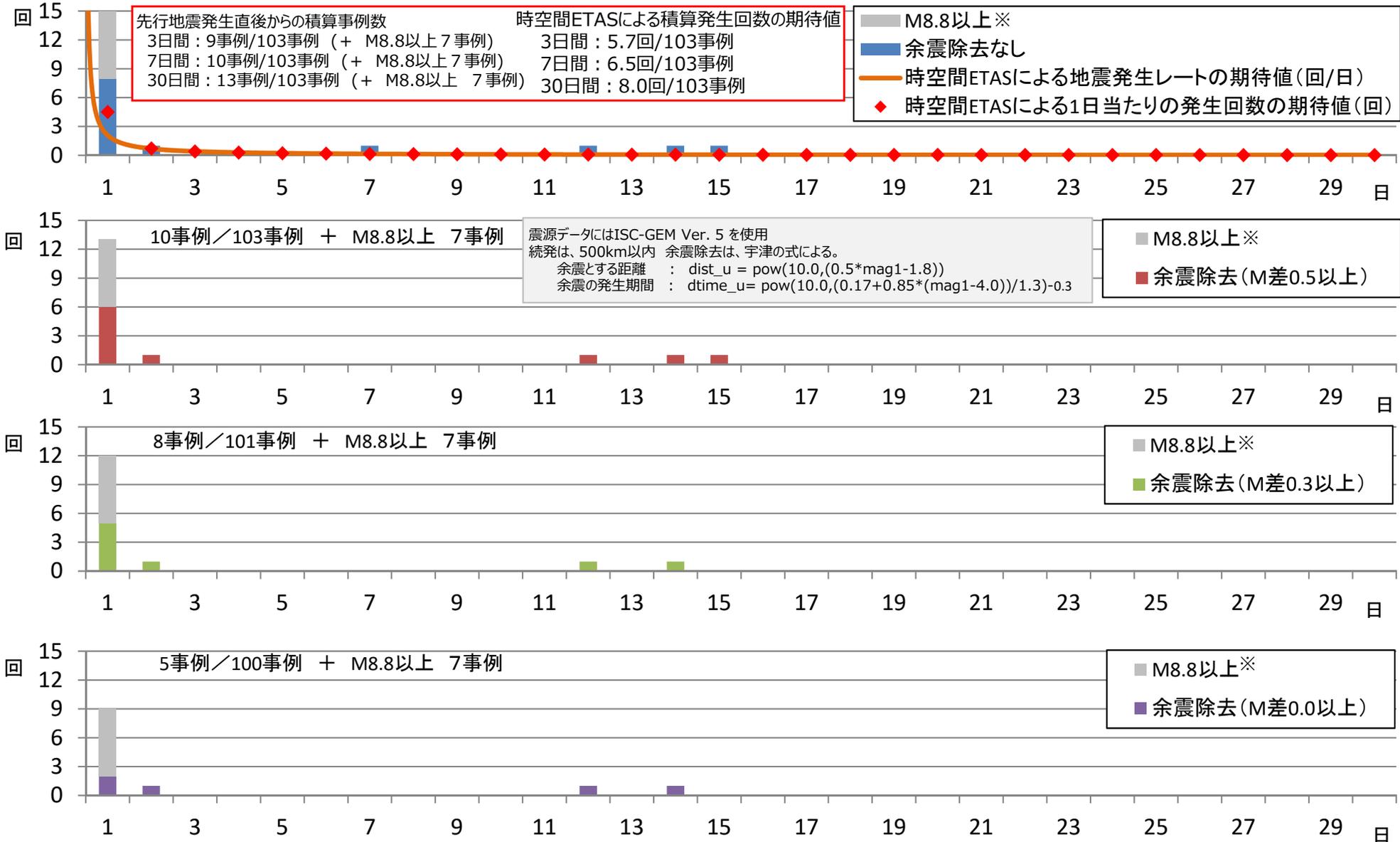
○ 大規模地震の発生直後は別の大規模地震の発生頻度が高く、ETASモデルとも整合的。

- M7.0-7.9 (1334事例) の地震に続いて、M8.0以上の地震が続発 (30日内) 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)



○ 大規模地震の発生直後は別の大規模地震の発生頻度が高く、ETASモデルとも整合的。

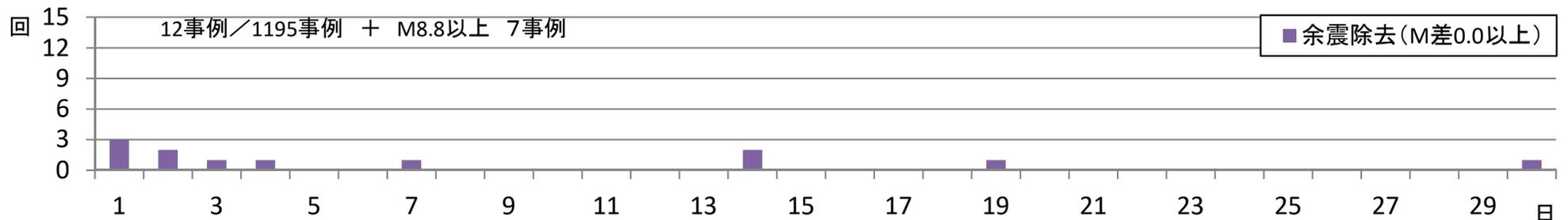
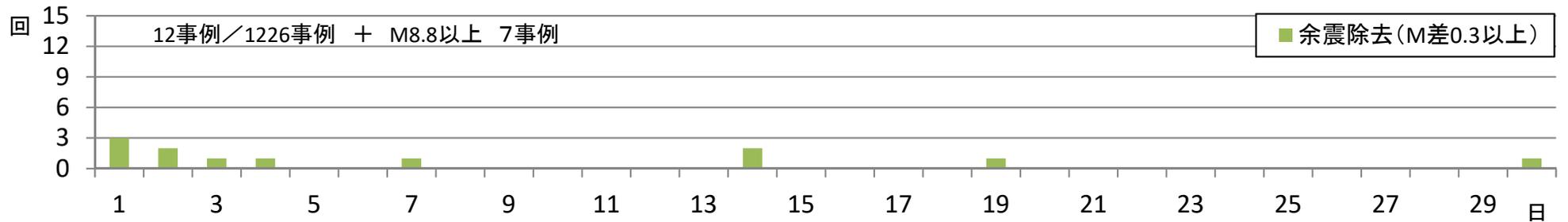
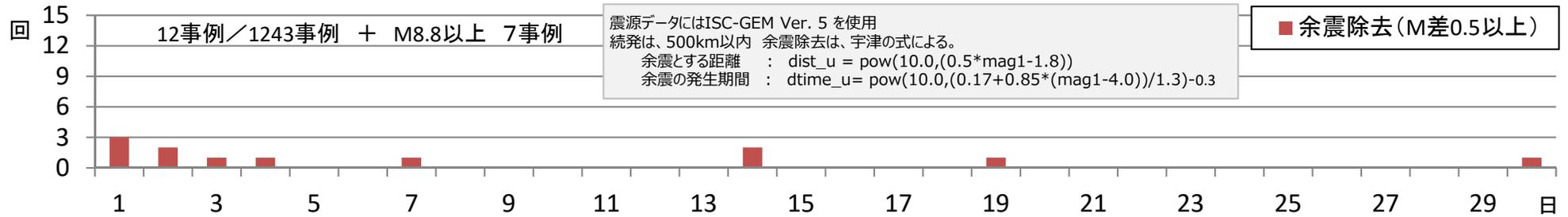
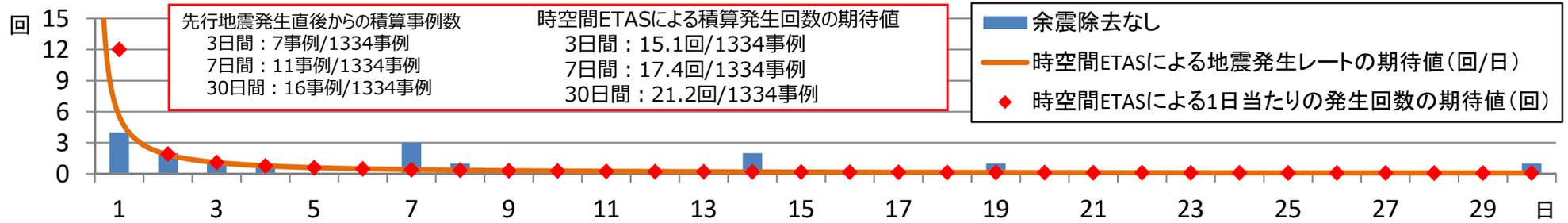
- M8.0以上 (103事例) の地震に続いて、M7.8以上の地震が**続発 (30日内)** したケースの発生パターン (横軸: 続発するまでの時間 日単位)



※ISC-GEM5のデータセットの中にはMw8.8以上の地震事例が7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。

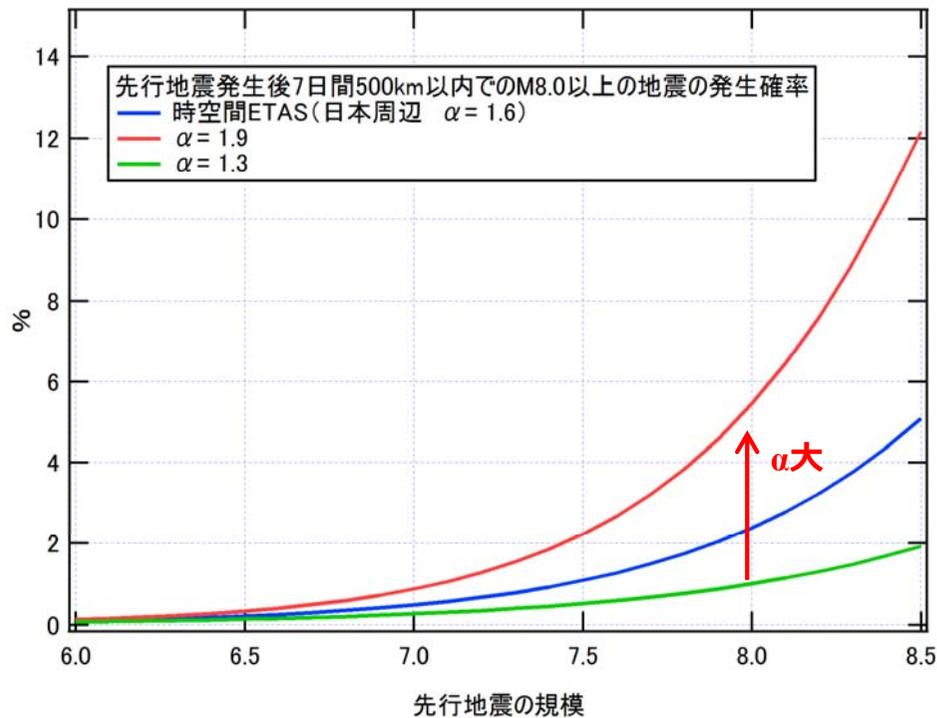
○ 大規模地震の発生直後は別の大規模地震の発生頻度が高く、ETASモデルとも整合的。

● M7.0-7.9 (1334事例) の地震に続いて、M7.8以上の地震が続発 (30日内) 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)

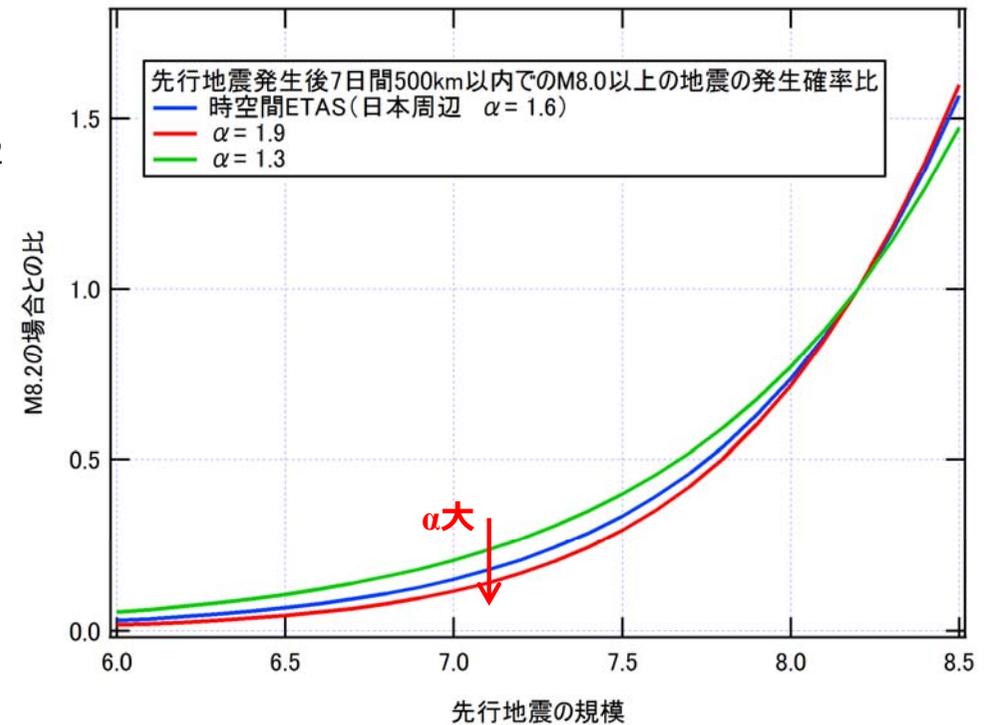


- 先行地震の規模を変えた場合にその後の地震発生確率がどのように変化するかについては、基準となる規模の先行地震での確率で規格化することで、パラメータ依存性を小さくすることができるが、パラメータ依存性が完全になくなるわけではない。

先行地震発生後7日間以内の500km以内での地震発生確率への α の違いの効果



先行地震M8.2
の場合との比

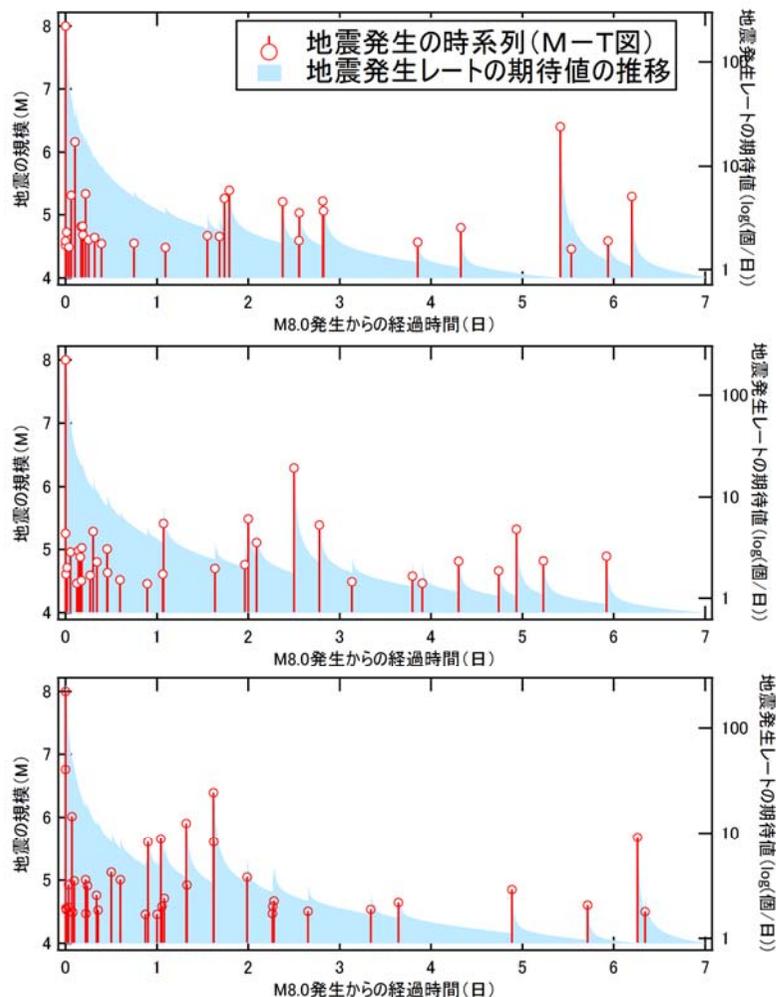


時空間ETASモデル(日本周辺)を基本とし、 α のみを増減させて計算した結果

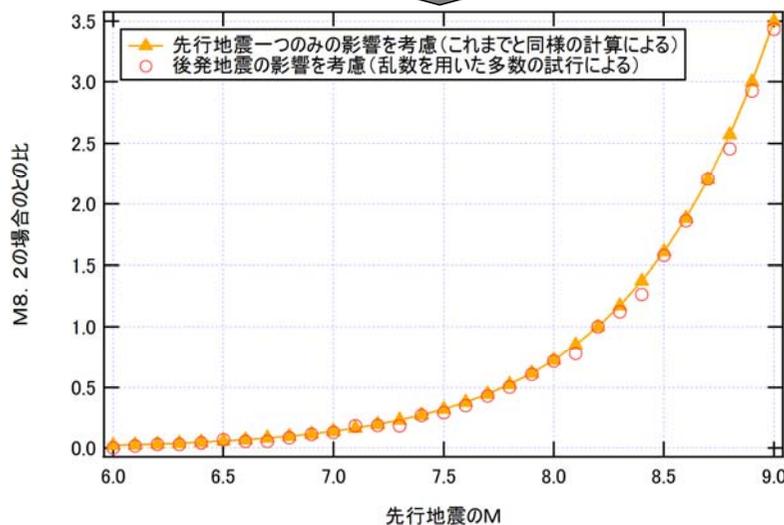
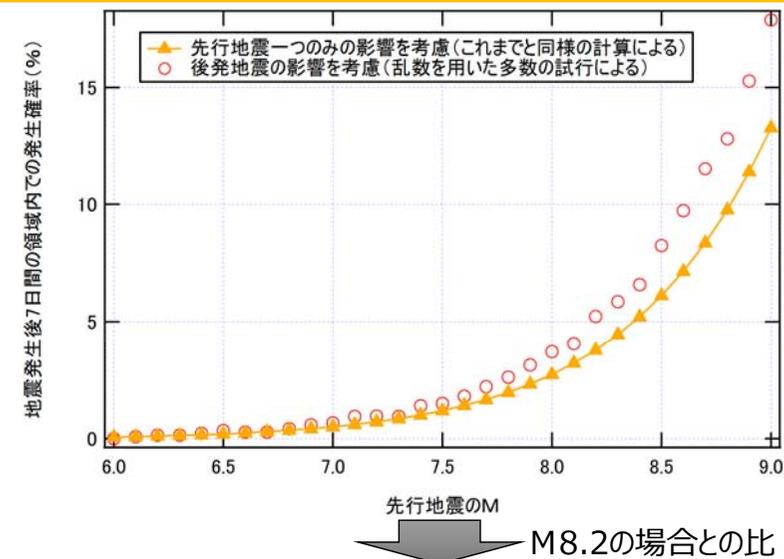
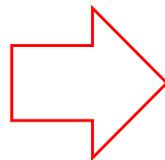
(参考) 後続の地震活動の影響

- M8地震発生後の地震活動の影響の検討のため、乱数を用いたシミュレーションにより、先行地震発生後7日間のM8以上の地震の発生確率を試算した。その結果、先行地震一つだけの影響に比べて確率はわずかに増加するものの、M8.2の結果との比にはほとんど変化は見られない。
- ただし、地震活動の推移にはケース毎にばらつきがあり、実際に発生した地震をデータとして取り込むことにより、予測精度の向上が期待される。

ETASモデル（南海トラフ巨大地震想定震源域内）によるM8.0発生後7日間の地震活動（ $M \geq 4.45$ ）のシミュレーション結果例（3例とも同じ条件で計算した結果）

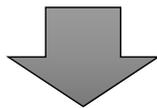
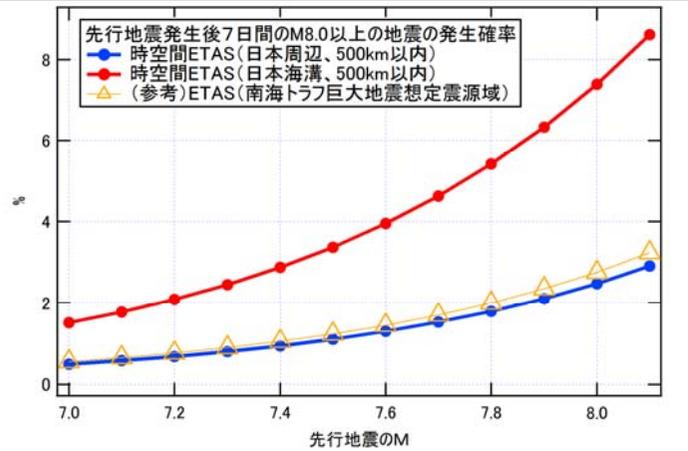


先行地震規模別に1万回ずつ試行してM8.0以上の地震が1回以上発生する割合を算出

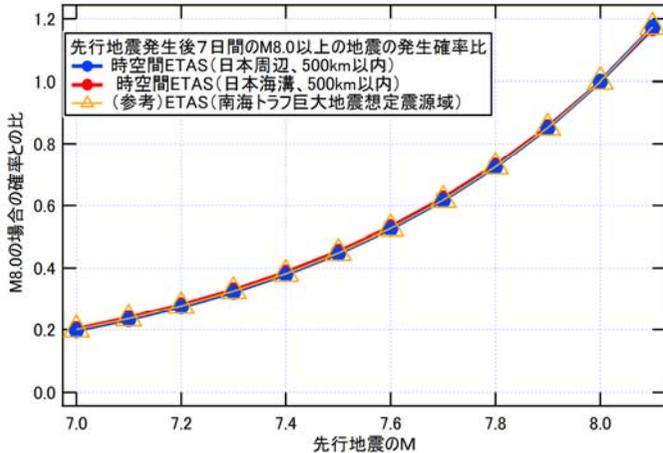


○ M8.0以下の地震が2回または3回短時間で連発した場合の評価の参考のため、これらの場合の地震発生確率と、M8.0の地震が1回先行した場合の地震発生確率との比を試算した。

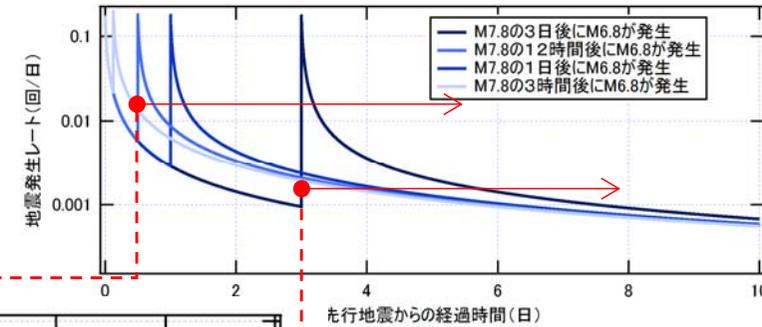
地震発生後7日間にM8.0以上の地震が発生する確率



先行地震M8.0の場合との比を算出

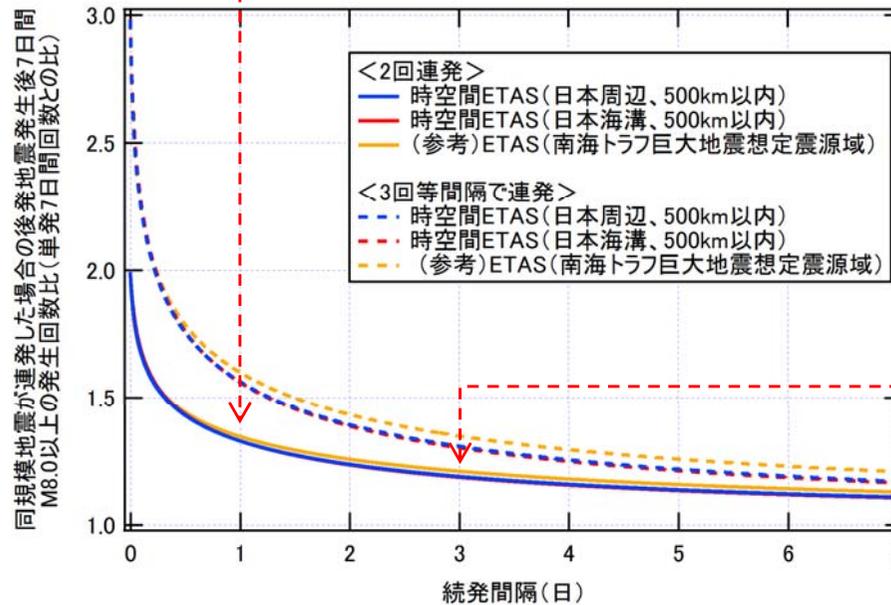


【参考】地震発生レートの推移の例 (縦軸対数)



発生回数比の時間変化は先行地震規模によらずモデル毎に一定

同規模地震が連発した場合の後発地震発生後7日間発生回数比 (単発7日間回数との比)



後発地震発生後7日間の発生レートを積分

1回の地震による地震発生確率の比 (M8.0の場合との比)



連発による確率の高まり (1回発生の場合との比)

同程度の規模の地震が2回または3回短時間で連発した場合の確率比 (M8.0の地震が1回発生した場合との比)