

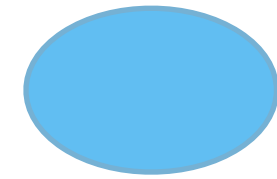
経験則による地震予知 -どの程度の予測なのか？

中谷正生（東京大学地震研究所）

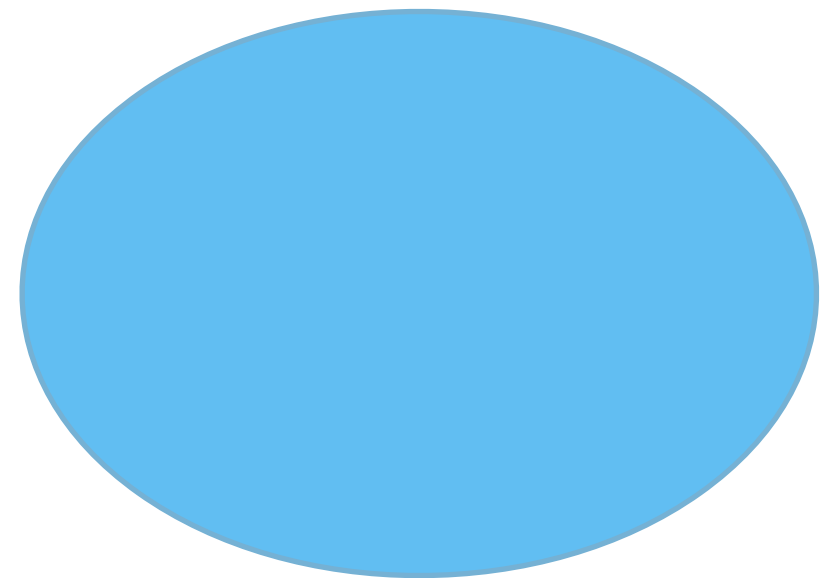
- 本来の専門は、岩石の摩擦や破壊を調べて、地震発生に至る物理プロセスを暴くこと。「必然性のある前兆」を志向した「予知らしい予知」の本流。
- が、それは原理的に難しいと、かなり説得されてしまったので、経験則でどれくらい予知できるものなのかを熱心に調べ始めた。
- 話を直感的にするために、あえて慎重を期さず、本質・本音を主観的に言います。

地震の予備知識

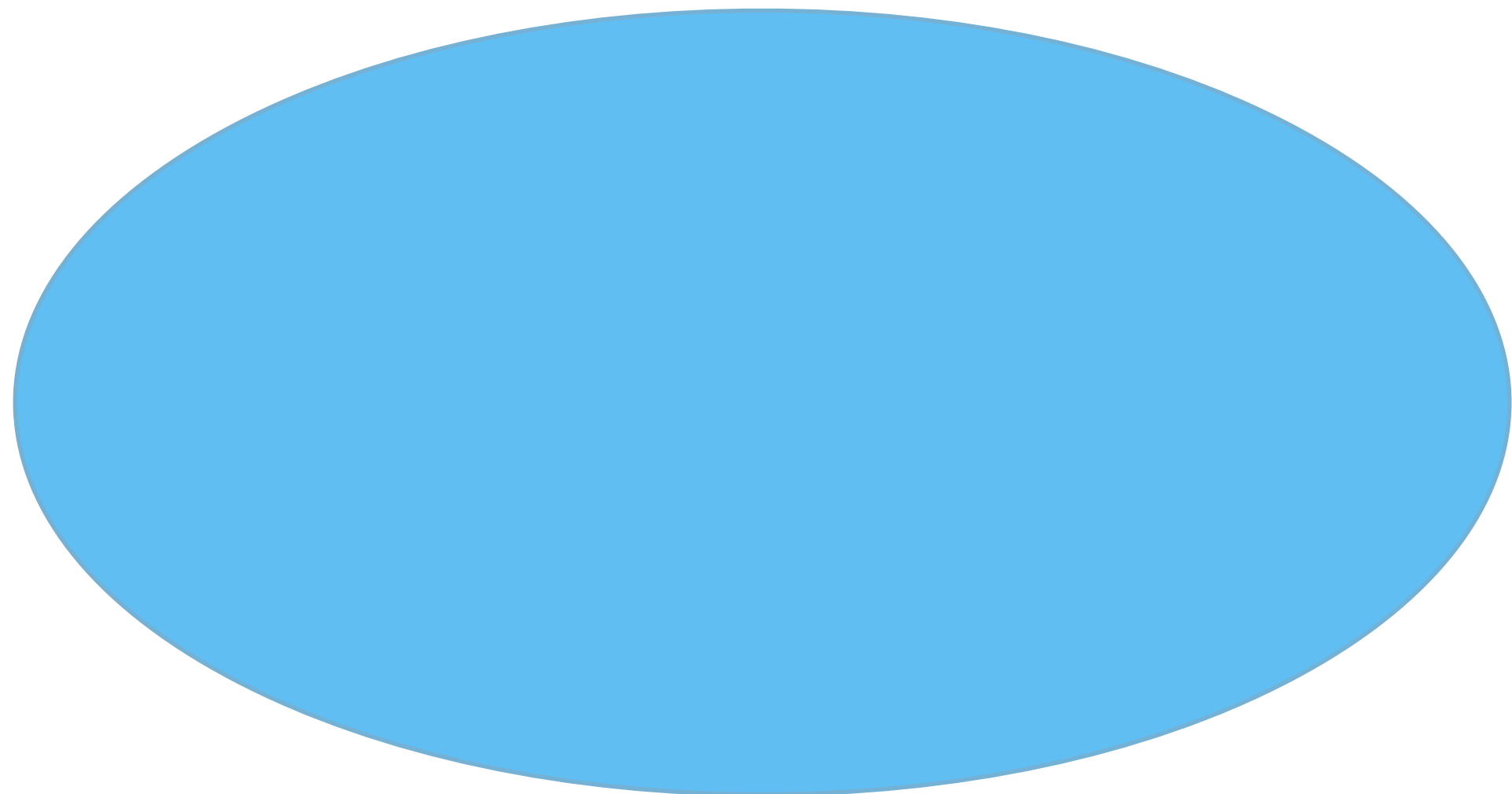
地震は、断層(の一部)があるときドシヤンと滑ること。滑り域がどこまで広がるかで大きさ(マグニチュード)が決まる。大きな地震ほど珍しい。



M6: 10kmの範囲が平均60センチすべる。
世界で1年に100個くらい



M7: 30kmの範囲が平均2mすべる。
世界で1年に10個くらい



M8: 100kmの範囲が平均6mすべる。
世界で1年に1個くらい

経験則による地震予知 ～ ジンクス

過去の経験からいうと「これこれのこと」があったら、**当分は心配(アラームON)**です。

どこで いつ M8+とか

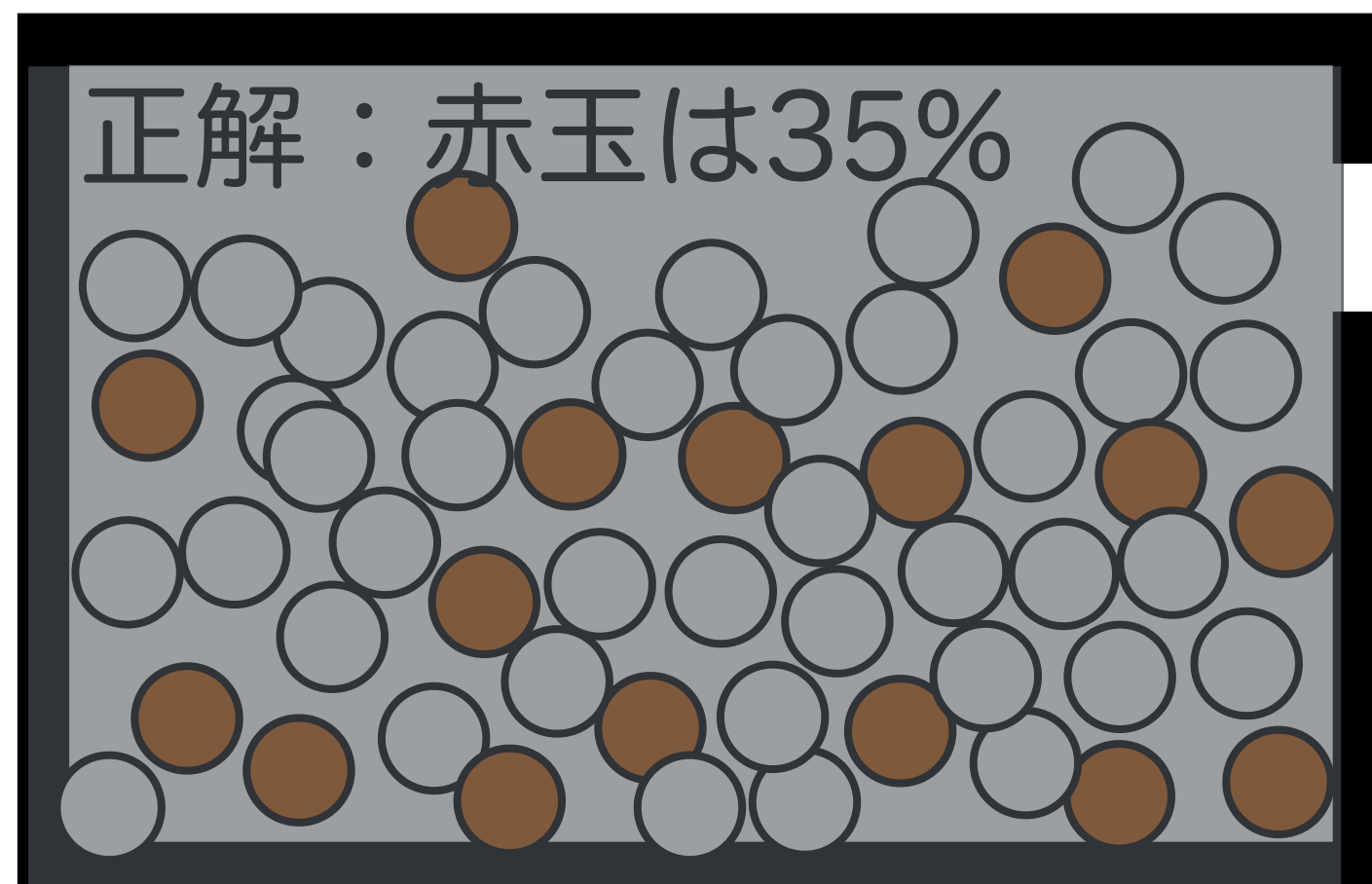
そのうちB回で、RT内に大地震が発生

過去に「これこれのこと」をA回経験

= **適中率: Q'** (過去の経験=サンプル調査)

サンプル数Aが不十分なことを加味して
ちょっとボカす。抜き取り調査による母
比率の推定。

次、「これこれのこと」が起きたときに期待される**地震発生確率: Q**



10個抜きとり調査



$\frac{600}{1000} \sim 60\%$, [57% – 63%]

$\frac{60}{100} \sim 60\%$, [50% – 70%]

$\frac{6}{10} \sim 60\%$, [26% – 88%]

経験則による地震予知 ～ ジンクス

過去の経験からいうと「これこれのこと」があったら、**当分は心配(アラームON)**です。

どこで いつ M8+とか

そのうちB回で、RT内に大地震が発生

過去に「これこれのこと」をA回経験

= **適中率: Q'** (過去の経験=サンプル調査)



サンプル数Aが不十分なことを加味して
ちょっとボカす。抜き取り調査による母
比率の推定。

次、「これこれのこと」が起きたときに期待される**地震発生確率: Q**

右の数字が、例えば、関西で3日以内に
M8+がおきる確率だと思って、自分はど
うしたいか、考えてみてください。

$\frac{600}{1000} \sim 60\%$, [57% – 63%]

$\frac{60}{100} \sim 60\%$, [50% – 70%]

$\frac{6}{10} \sim 60\%$, [26% – 88%]

経験則による地震予知 ～ ジンクス

過去の経験からいうと「これこれのこと」があったら、**当分は心配(アラームON)**です。

どこで いつ M8+とか

そのうちB回で、RT内に大地震が発生

過去に「これこれのこと」をA回経験

= **適中率: Q'** (過去の経験=サンプル調査)

サンプル数Aが不十分なことを加味して
ちょっとボカす。抜き取り調査による母
比率の推定。

次、「これこれのこと」が起きたときに期待される**地震発生確率: Q**

心配の程度を定量的に推定 — 「何だ、確率の話かよ」に対する言い訳

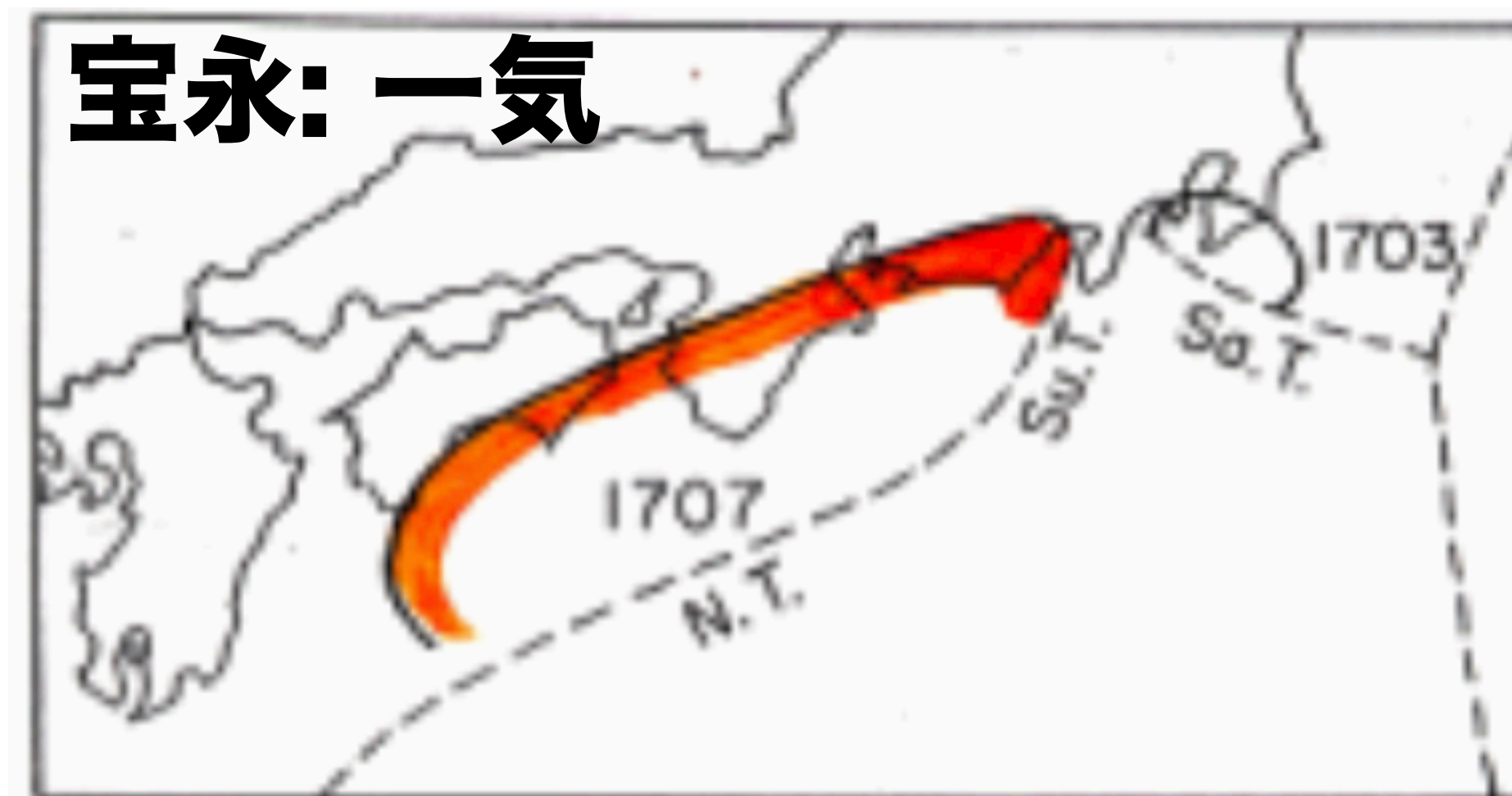
- 地震は、物理法則に従って起きるので、ほんとうは、明日、そこで大地震が起きるかどうかは、既に決まっている。
- しかし、地震の物理的準備過程を捉えて、お、いよいよだ、というのは原理的にとても難しそうだと分ってきた。
- せめて「単なる経験則」でどの程度の確率をはじきだせるか、お伝えしたい。
- ただ「心配ですね」というより、**どの程度心配かを数字(Q)で言うほうが、よほどまし**なはずです。

経験則による地震予知

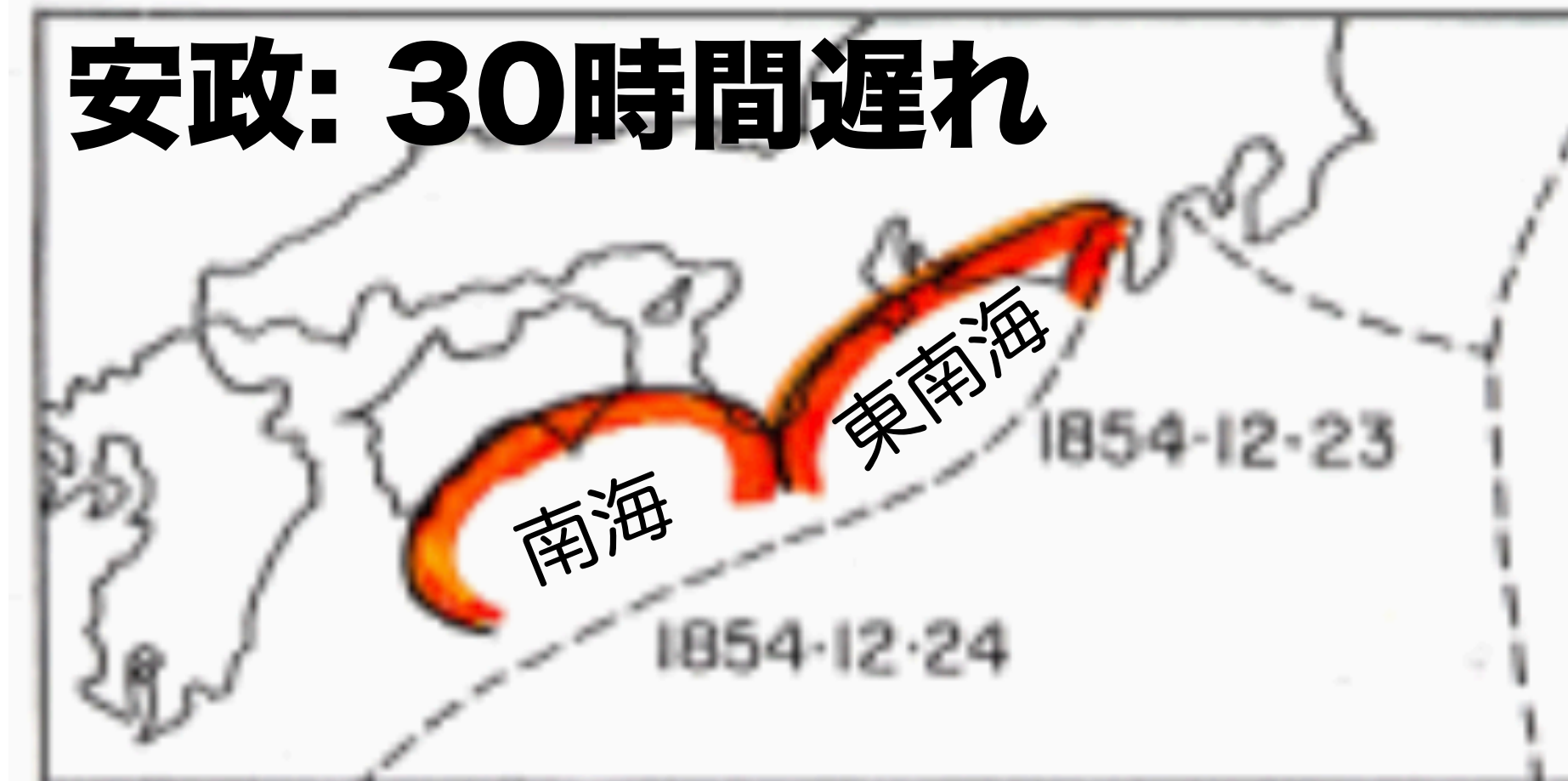
例1. いわゆる半割れケース：東のセグメントが
はねたら、西のセグメントはどれくらい心配か？

	3日以内 (普段は0.01%)	
過去の経験：B回/A回 [内閣府調査部会資料, 2017]	東南海-南海 1/2 = 50% (普段の5千倍)	全世界 10/96 = 10%
発生確率 Q の推定範囲 [95%信頼区間]	1—99 % (普段の百倍-1万倍)	5—18%

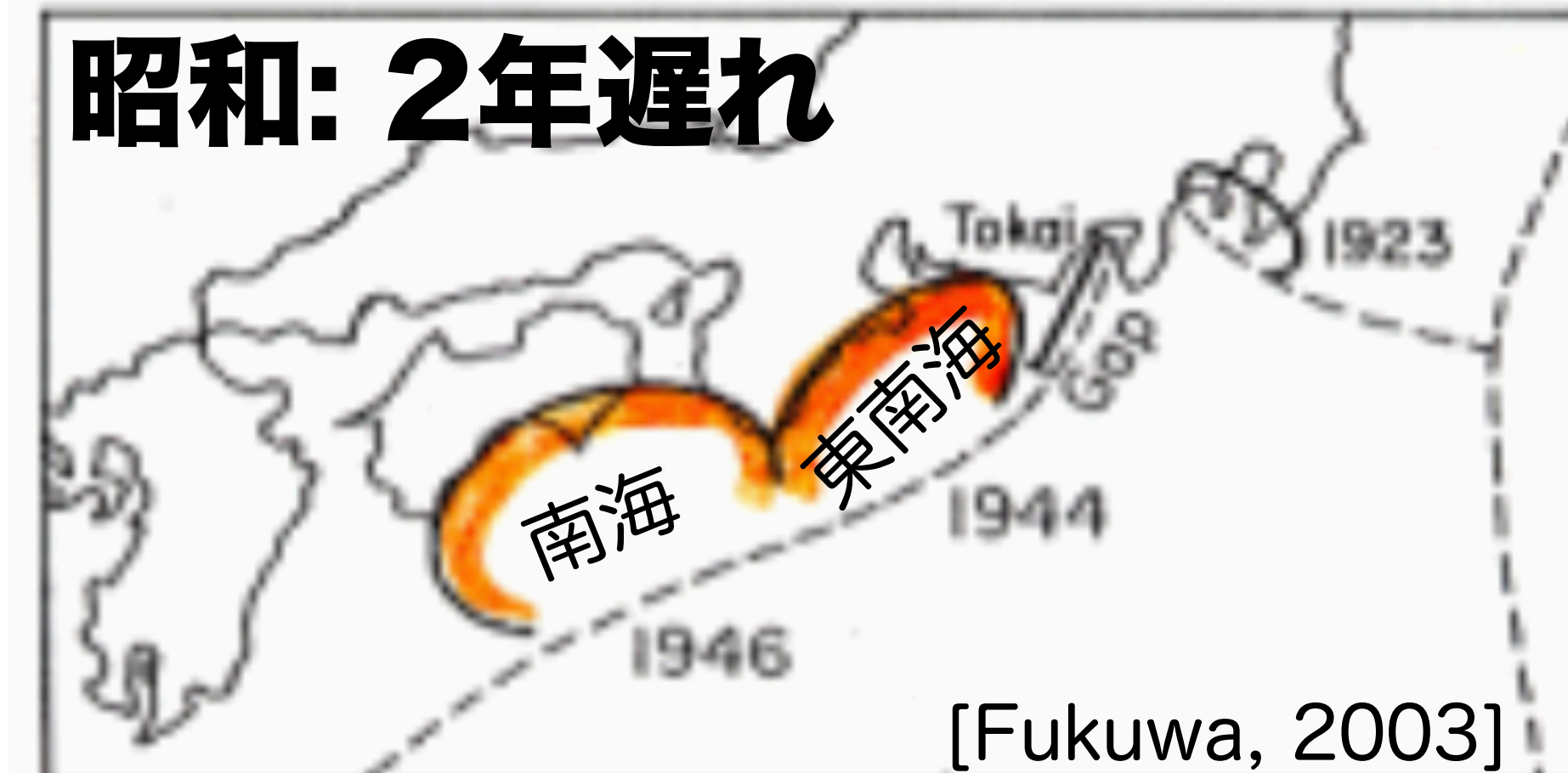
宝永：一気



安政：30時間遅れ



昭和：2年遅れ



[Fukuwa, 2003]

経験則による地震予知

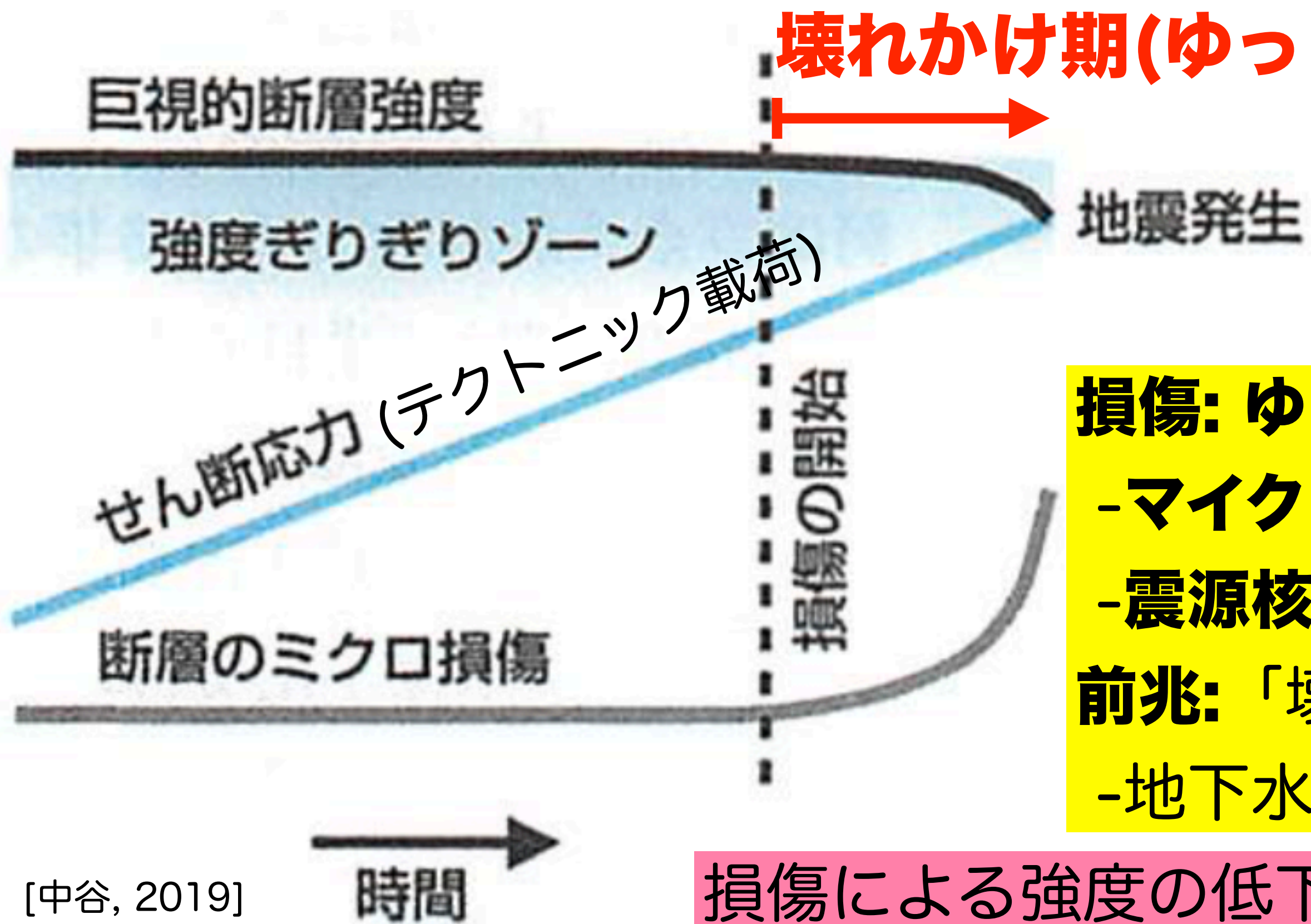
例1. いわゆる半割れケース：東のセグメントがはねたら、西のセグメントはどれくらい心配か？

	3日以内 (普段は0.01%)		3年以内 (普段は3%)	
	東南海-南海	全世界	東南海-南海	全世界
過去の経験：B回/A回 [内閣府調査部会資料, 2017]	1/2 = 50% (普段の5千倍)	10/96 = 10%	2/2 = 100% (普段の30倍)	38/96 = 40%
発生確率 Q の推定範囲 [95%信頼区間]	1—99 % (普段の百倍-1万倍)	5—18%	16—100% (普段の5倍-30倍)	30—50%

- こんなに強烈なQが出る「これこれのこと」は滅多にない。
- あたり前だが、一発目の大地震の予測には無力。(南海トラフ地震の半分くらいは、東西が一気にいく)
- 「前兆」というよりは、でかい一発目がでかい二発目をトリガするケース。力学的には当然の現象。二発目を余震として予測しているだけともいえる。

「予知らしい予知」をできると思っていた理由

📍 1970—1990年代：「**壊れかけ**」状態を経ずして壊れるはずがないのだから、「**ゆっくりと壊れ始めている**」状態が出すシグナル(理想的な前兆)を観測することで、**直前予知**くらいは当然できそうなものだ。それも、見逃しも、空振りも原理的にはそんなにないはずの予知を…



損傷: ゆっくりと壊れ始めている(現行犯逮捕)

- マイクロクラック：断層岩石にミシミシと細かい亀裂
- 震源核/プレスリップ(本震域の一部がゆっくり滑り始める)

前兆: 「壊れかけ」から派生する異常現象

- 地下水、ラドン、電気伝導度、前震、地殻変動 etc…

[中谷, 2019]

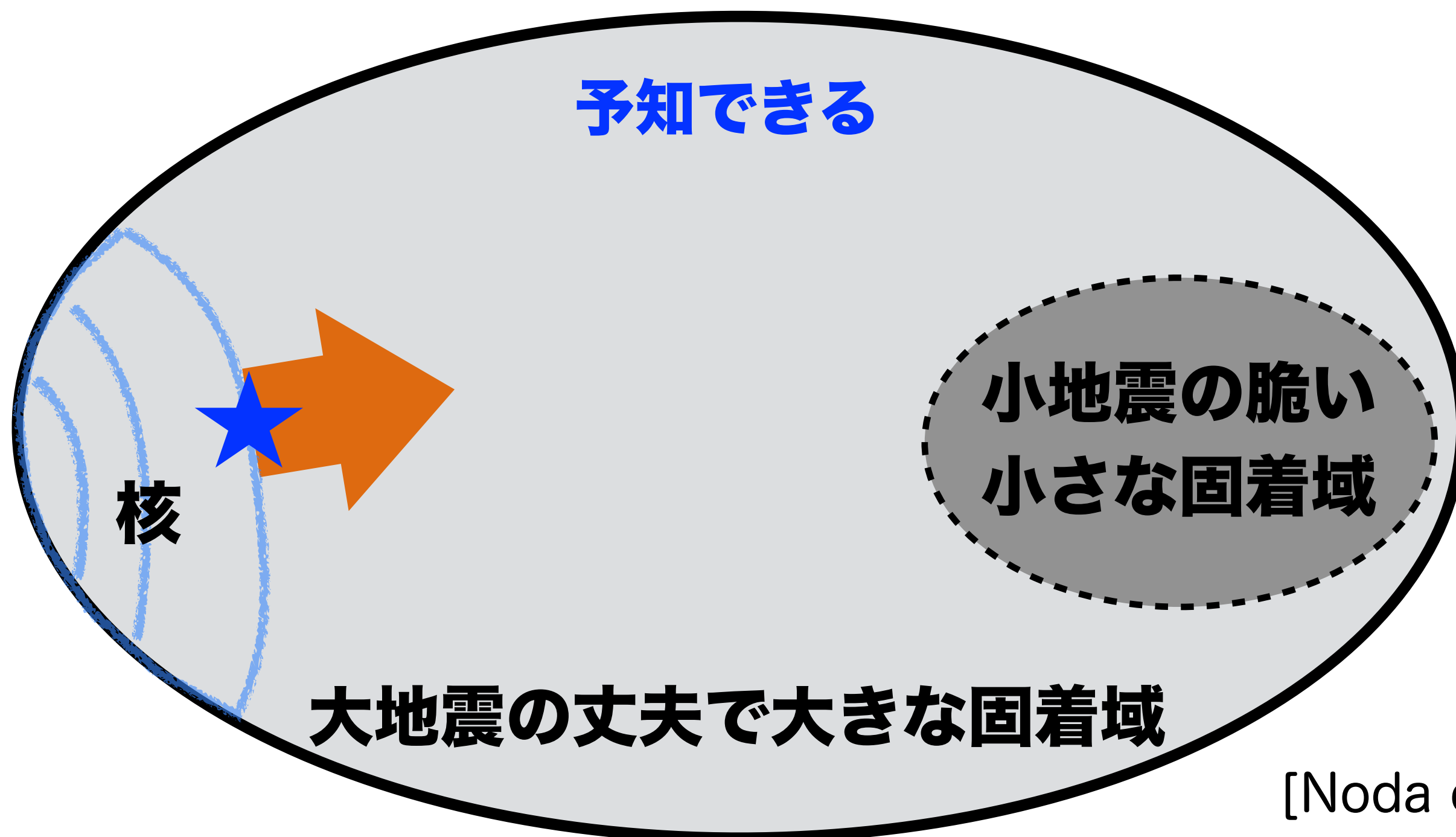
損傷による強度の低下, ゆっくりすべり域の周囲で応力が上がるなど損傷の進行は、**大破壊に向って自発的に加速する。外力がゆっくり上がるより、材料の劣化が支配的(遅れ破壊)**

必然的な前兆による直前予知が**原理的に無理**そうな理由

- 地震破壊の成長の様子の詳細な観察から、「大きな破壊」の準備は、高速破壊が小さな地震として始まってから行われるという説(**カスケード説**)が説得力を増した。[Meier et al., 2016; Okuda & Ide, 2018]
- そのようなことを合理的に説明できる「**階層アスペリティモデル**」が出た [Ide&Aochi, 2005]。
- 大本命であった「ゆっくり壊れ始める」という状態を経ておきる大地震は、あってもごく稀だろう。

大きな震源核(プレスリップ) ⇒ 大地震

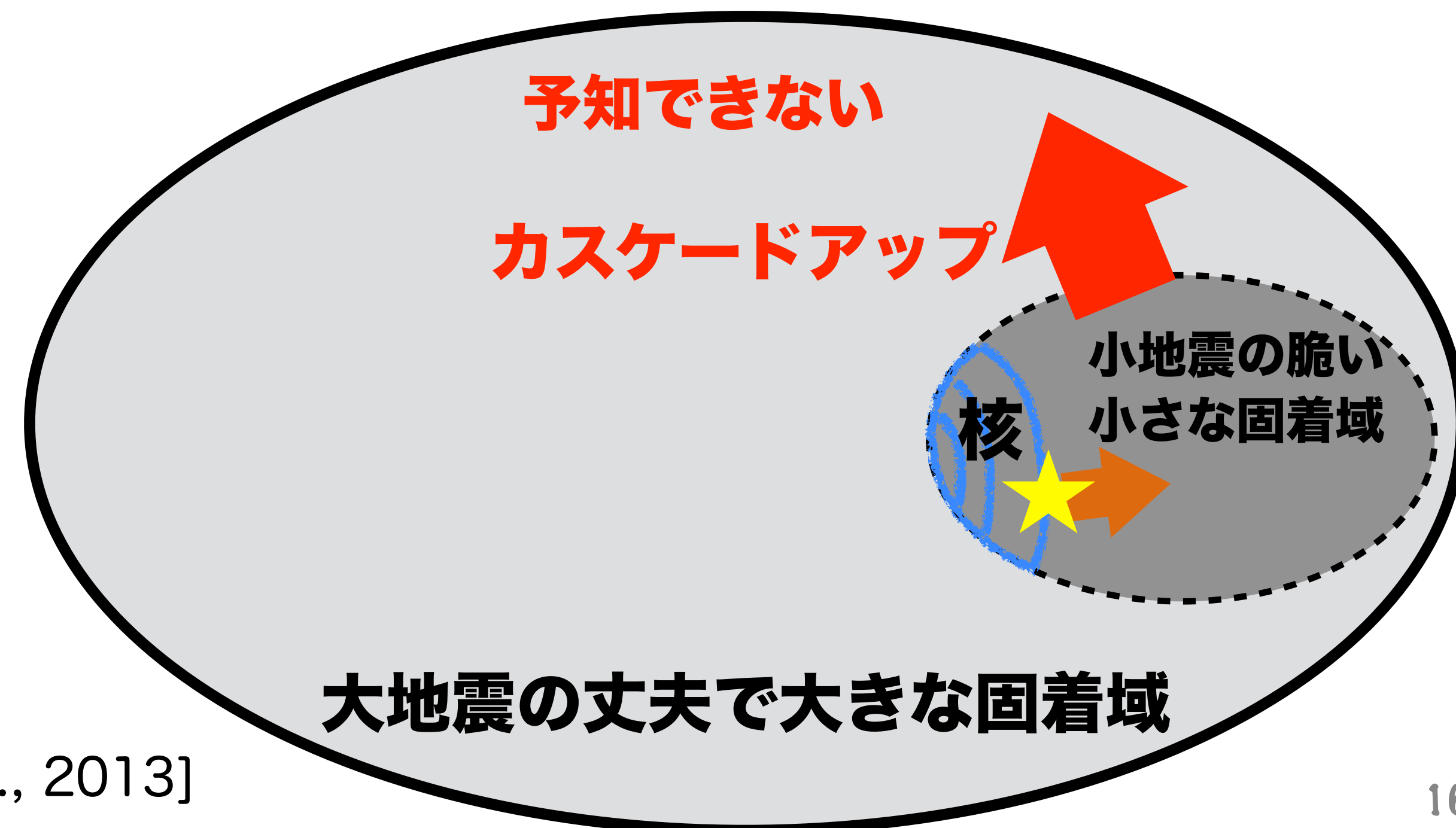
100 km



小さな震源核(プレスリップ) ⇒ 小地震

II

大きな震源核 ⇒ 大地震



[Noda et al., 2013]

というわけで、「直前予知くらいは原理的にできそうなもんだ」という考えは、根拠を失ってしまいました。**本日のテーマは、経験則**(夕焼けがきれいだから、明日は晴れ)でどれだけいけるか？です。



しかし、「壊れ始め」を捉えたものでなくとも「これこれがあると、普段より危ない」と統計的に証明されている現象は多数ある。それらは、役に立ちそうな情報だろうか？

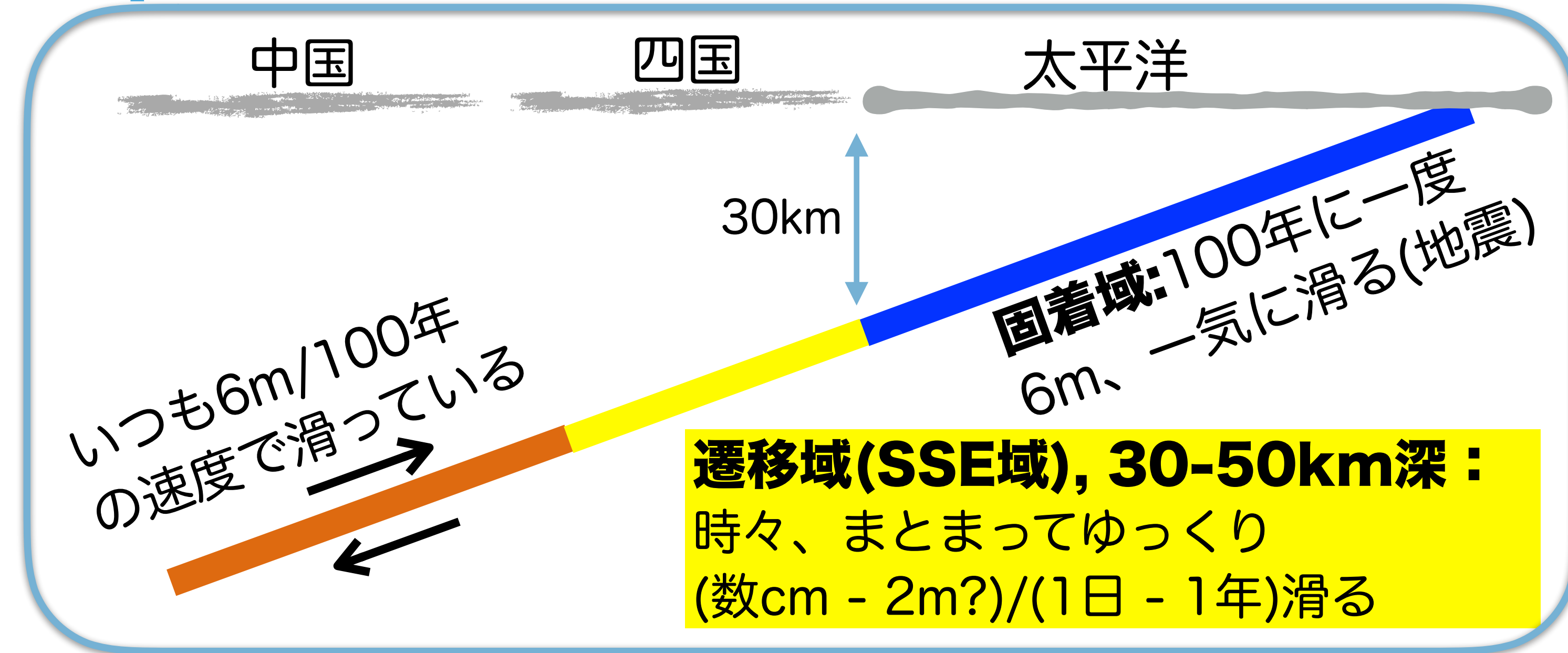
経験則の成績と、ジンクスが「気のせい」でない証明

- 📍 **アラーム**：場所R,時間Tの内にマグニチュードM以上の地震が普段より起きやすいという予言。
- 📍 **適中率(予測確率) Q**：アラームRT内に実際に**M+がおきる確率**。1－空振り率。高いほどよい。
- 📍 **予知率**：マグニチュードM以上の地震の何%に警告が出せるか。1－見逃し率。高いほどよい。
- 📍 **警報分率**：全時空間のうちアラーム域の占める割合。低いほどよい。
- 📍 **ゲイン G**：最も本質的な成績。高いほどよい。適中率も、予知率も**ランダム予測よりG倍改善**される。そして、「これこれのこと」は**今特に心配すべき理由**なのだから、**普段よりG倍危い**は、ユーザーにとっても重要な情報。
 - ランダム予測による適中率は、その地域のベース確率(例, 高知県のM8+は約百年に一度)
 - ランダム予測による予知率は、警報分率。
 - Gが有意に(偶然の一致では説明できない程度に)1より高ければ、そのジンクスは気のせいではなく当たっている(**証明**)。外れだらけでも、ランダムよりよければok. いくら払う価値があるかは、特徴(R, T, 適中率, 予知率, ゲイン)をにらんで決めてください。もちろん、ジンクスの成績は、地域ごとに異なります。

例2. 超弩級の深部Slow Slip Event?

プレート境界断層の断面図

- 計器観測による確実は例はないが、あったと推測できる例はある。**1946 南海地震前日の井戸涸れ、湾が干上がって帰港不能**などは、**2m**くらいの深部**SSE**[Linde & Sacks, 2002]による地殻変動(30cm隆起)?

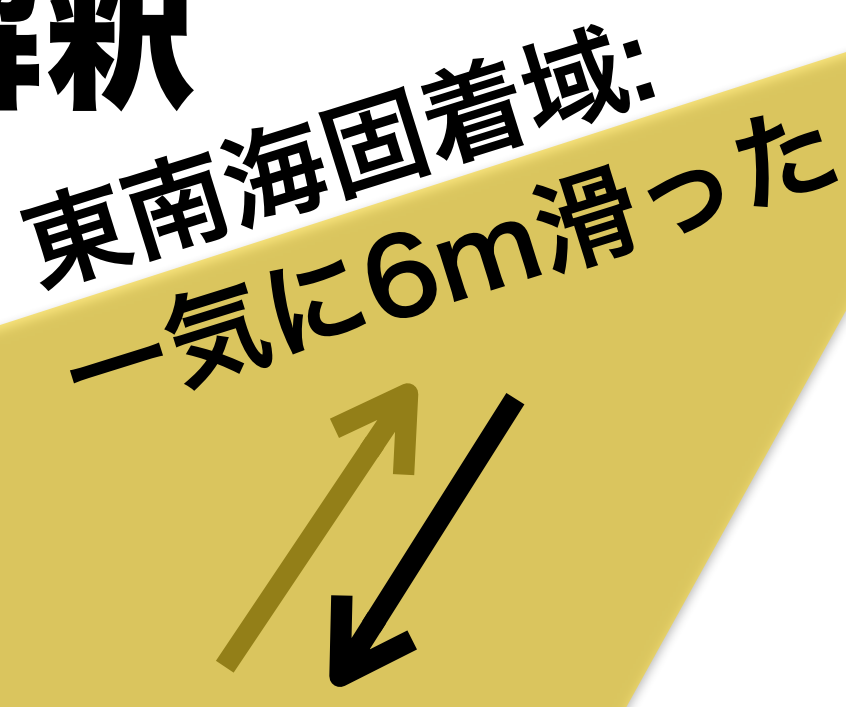


- そんな強烈なSSEが非常に稀なことは確実。つまり、**空振りは少いはず。震源域のお隣で2mもひねられたら、強烈な効果がある**のは力学的に当然。経験則によらずとも、メッチャ危険。Ohtani et al. [2019]の力学シミュレーションでは適中率 ~40%。(空振りも予想されたことが驚き)
- 大地震のほとんどは、そんな巨大なSSEなしで起きたことは確実。つまり予知率は低い。**ただし、南海地震に限っていえば1854安政の直前井戸涸れも入れて2/2。上述のシミュレーションでは予知率 ~80%。おこるところではいつもおこる?

例1 & 2: 巨大な外部イベントによる载荷 = 僥倖による予知

例1：半割れケースの解釈

南海固着域：
とりあえずは耐えたが、
めっちゃひねらたので
⇒遅れ破壊？

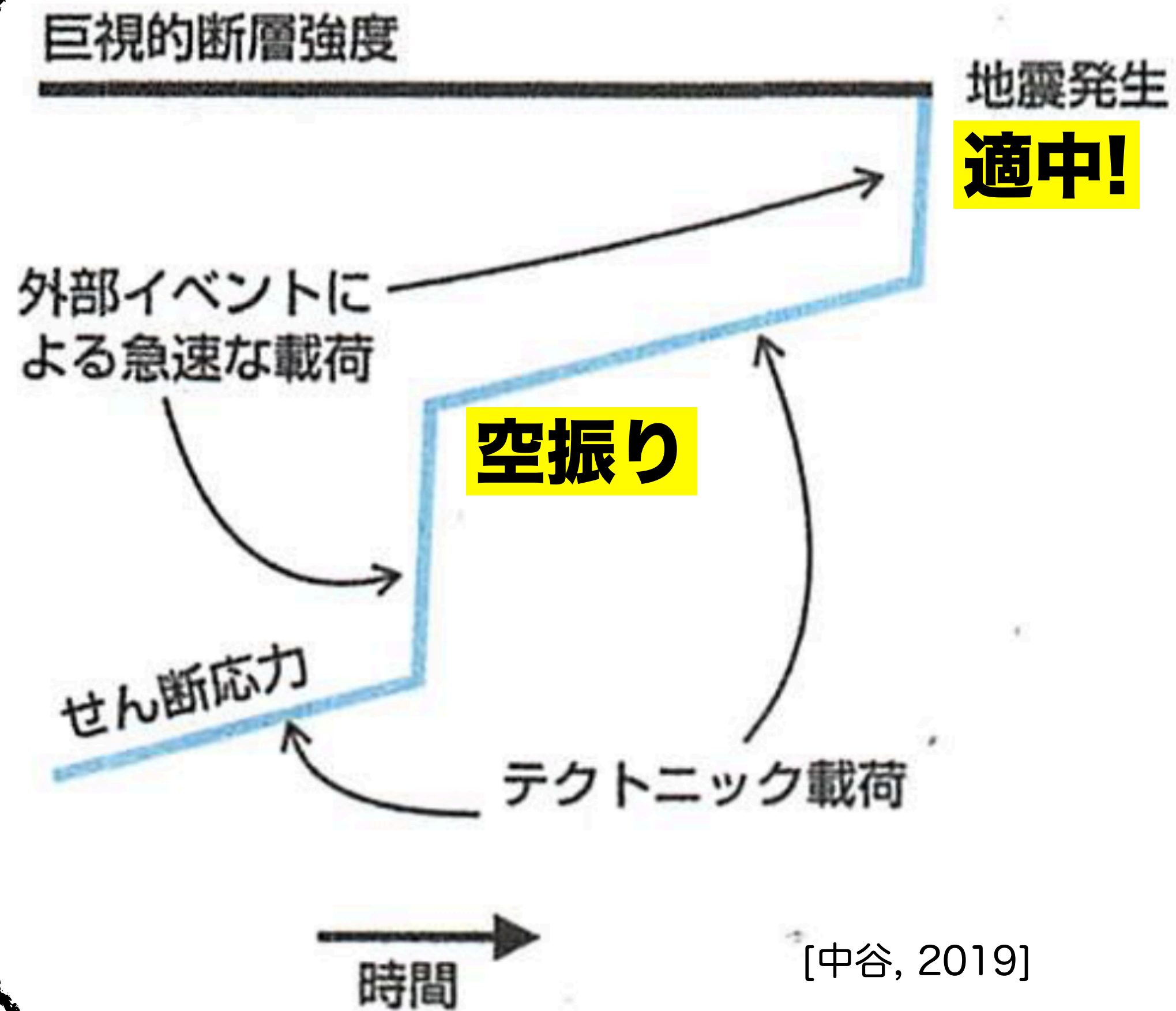


例2：超弩級SSE プレート境界断層の断面図



例1 & 2: 巨大な外部イベントによる载荷 = 僥倖による予知

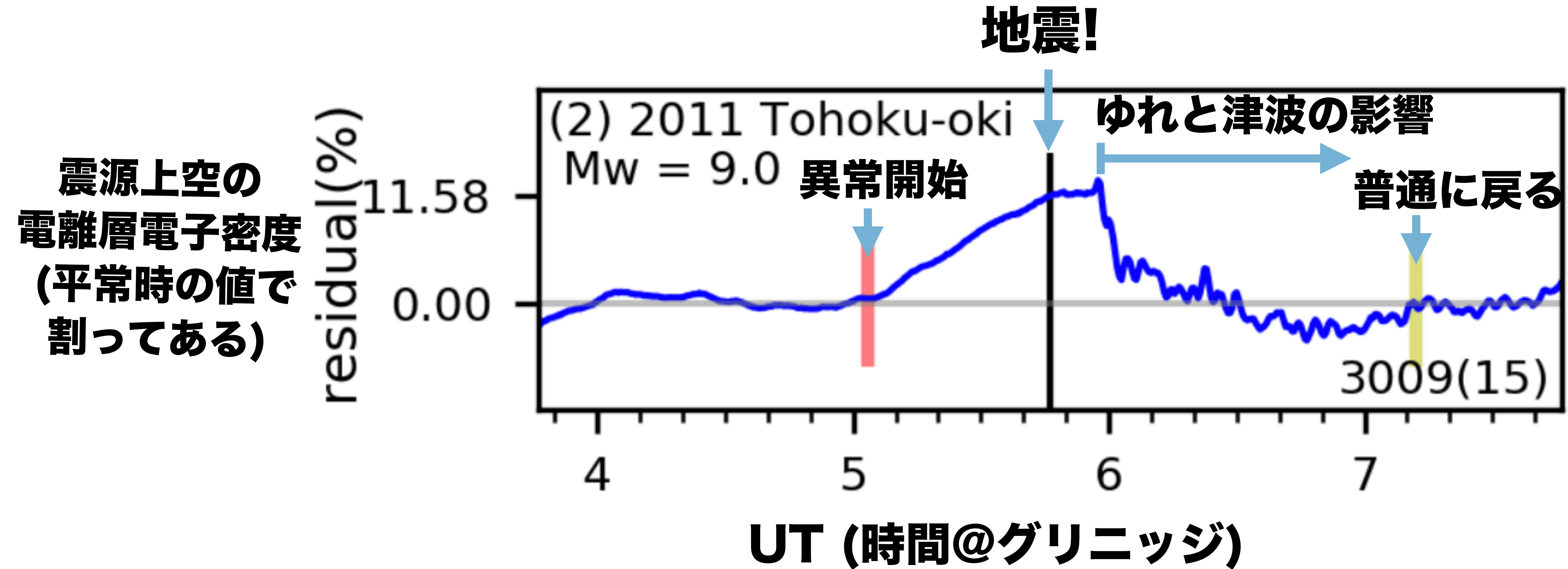
必然性のないシナリオ



- 📌 そういうことがなくとも、ゆっくりした载荷でいずれ地震はおきる。**必然性がないから、一般論としては、予知率は低い。**
- 📌 でも、おきるところではいつもおきる? (そういうところでは予知率も高い?)
- 📌 どこであろうと、**こんなの(巨大な外部イベント)がおきたら、あたりまえにとっても危い。**

例3. M8.2+の数十分前に必ず現れる電離層の異常

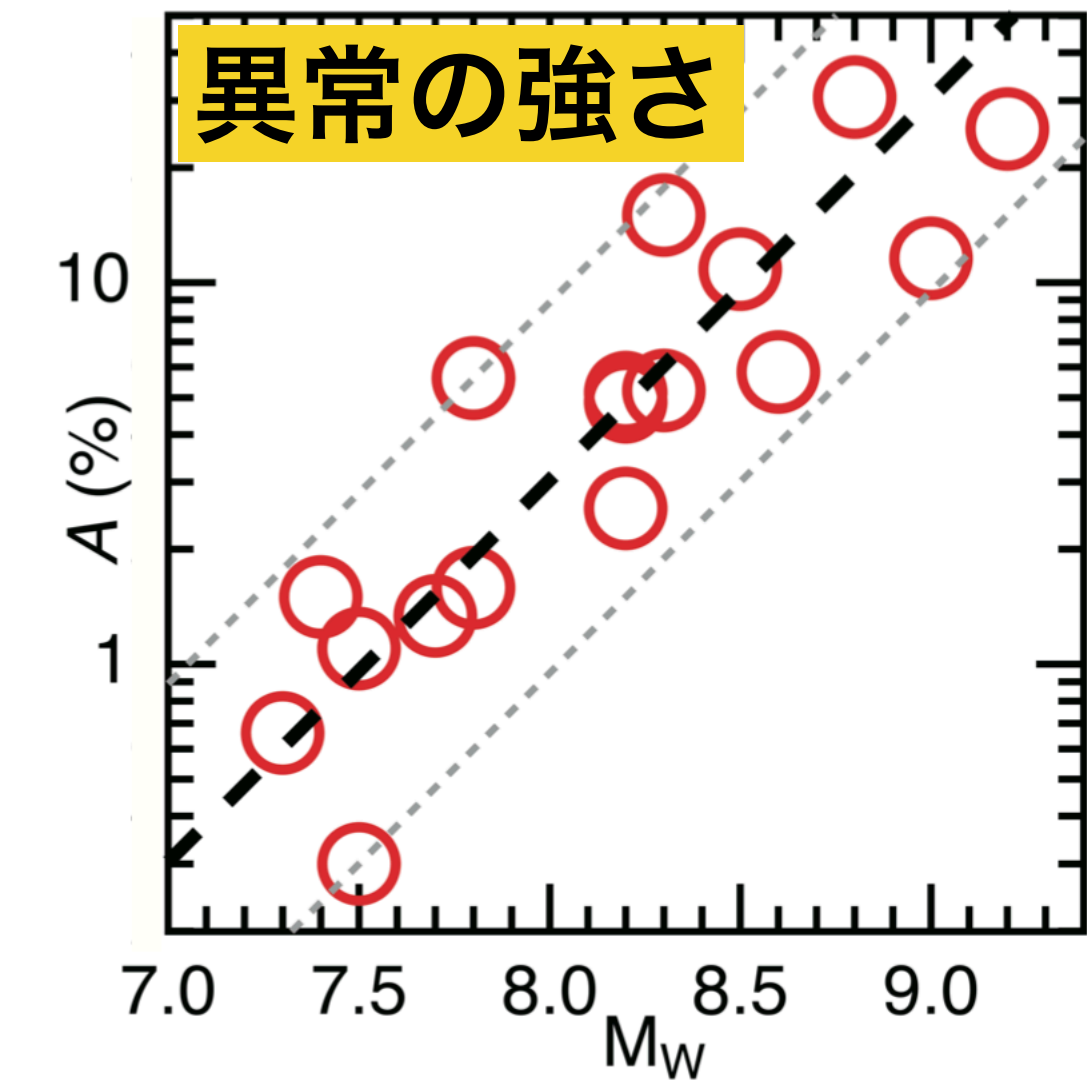
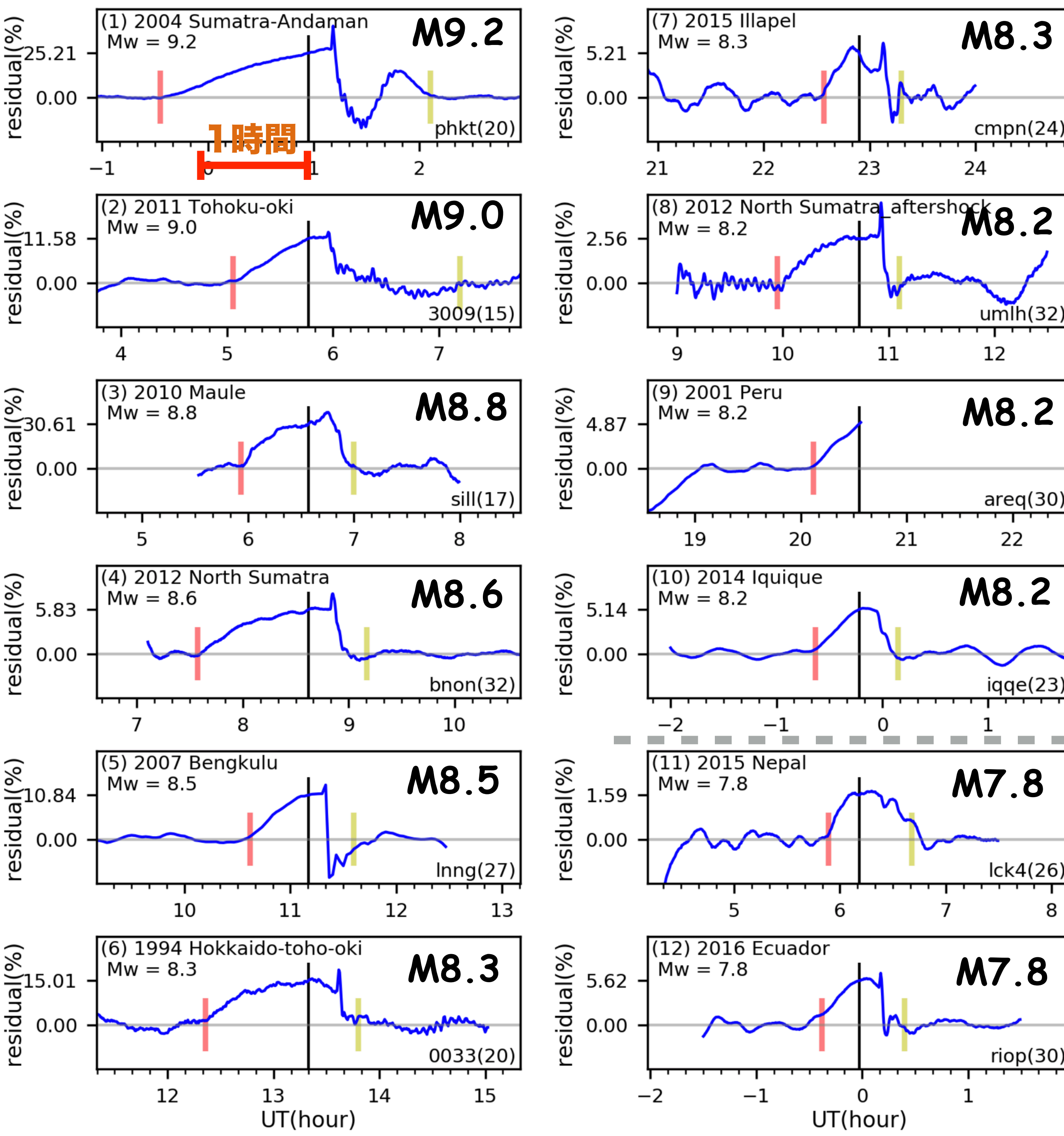
[Heki, 2011 ~]



[Nakatani & Heki, in prep.]

例3. M8.2+の数十分前に必ず 現れる電離層の異常

- 予知率 10/10 ~100%! こんな他にない。
しかもピンポイント (R~震源サイズ, T~1時間)
- いまからおきる地震の大きさと、異常の強さが
相関している。こんなのも他にはない。



[Nakatani & Heki, in prep.]

- そもそも「目の錯覚」だという批判もあったが、既にやっつけた [Heki & Enomoto, 2015]。

例3. M8.2+の数十分前に現れる電離層の異常

- 📌 予知率 10/10 ~100%! こんな他にない。しかもピンポイント (R~400km, T~1時間)!
- 📌 いまからおきる地震の大きさと、異常の強さが相関している。こんなのも他にはない。
- 📌 そもそも「目の錯覚」だという批判もあったが、既にやっつけた[Heki&Enomoto, 2015]。
- 📌 同じような異常は、(主に磁気嵐により)普段から頻繁(警報分率10%, 最悪値見積)にあるので、適中率が低く (**Q = 0.001%**, アラームの99.999%が空振り)、**ゲインも10**にとどまる。それでも、確率計算をすると、10回のうち7回以上は、地震と関係していたはず(**証明**)。
- 📌 仮に異常の99%が磁気嵐等のノイズでこれを区別できたとすると, $G = 1000$ 。それでも $Q = 0.1\%$ 。何しろ1時間だからね。
- 📌 「数十分」だから「**壊れはじめ**」由来かな?と思いたいが、「**断層の強度が気紛れにちょっと落ちる**」ようなことが頻繁に起きているのだと考えても説明は可能。その場合は、適中率にかなり低いところ(数%?)に原理的な限界があることになる[Nakatani & Heki, 早くどこかに再投稿しないと]。

例4. 数年スケールの地震活動の変調

- 昔から有名な現象(静穏化, b値異常, 潮汐応答異常)が多いが、**有意に $G > 1$ (まぐれ当たりばかりではない)**が証明されたものは少い。
- 中期的な準備過程は、直前の「壊れはじめ」とは別に存在しうるので、まだ望みがある。
- M8法**：地震活動の様々な変化を適当にポイント化して総合判断。世界のM8+の事前予測実験(1992-2016)から有意に $G > 1$ が証明されている [Kossobokov, 2017]。
 - **R ~1000km, T ~5年と絞り込みが甘いので**、適中率33%、予知率 $15/23 = 65\%$ と、いい感じ。
 - だが、絞り込みが甘いから警報分率が大きく(30%)、**ゲインは2倍強にすぎない**。
- RTP法**：パターン認識を使って、M8法の時間の絞り込みを強化した。日本周辺の1975—2011のM7+の予測として[Shebalin, 2012, emsev]、**R~1000km、T~9ヶ月**のアラームを出し、適中率 ~50%、予知率 $14/15 \sim 90\%$ 、**警報分率7.7%、 $G \sim 1.2$** 。かなり凄いのと思うが、M7の震源サイズは~30km。でもやっぱり凄いかも。
- 余震の静穏化**：M7級地震の余震が妙に減ると危い。R ~200 km, T ~1年, M7+, Q ~2%, $G \sim 10$ [Ogata, 2001, 2007]。もちろん、最近数年内にM7が起きた地方以外では無力。

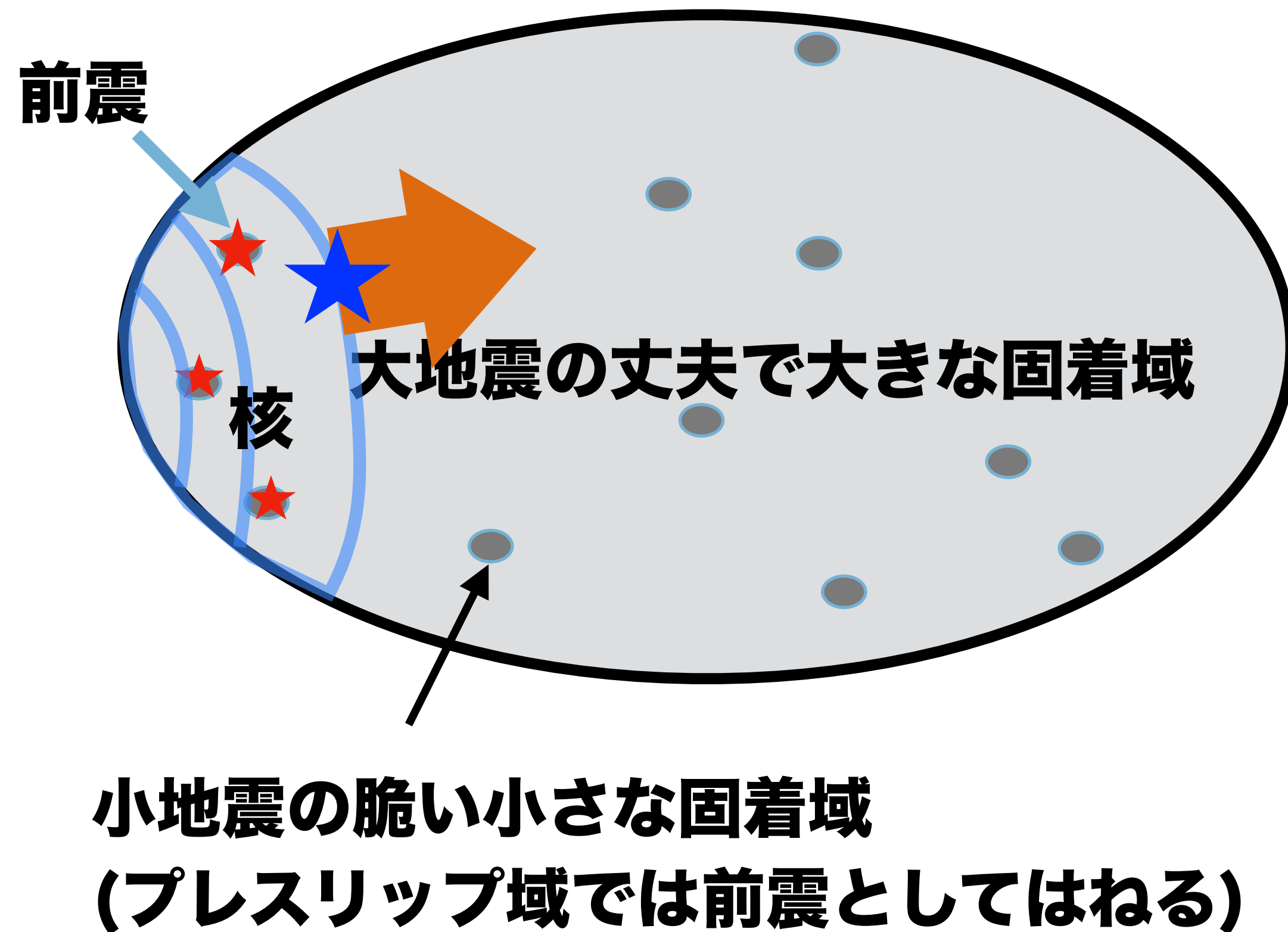
例5. 地震活動の短期的活発化(短期的前震?)

- 📌 多くの例を重ねあわせてみれば、大地震の1ヶ月ほど前に、その震源の周辺で中小の地震が増えるという傾向は明らか。ただし、個々のケースは千差万別で、静かな時期にいきなり大地震がおきること(見逃し)も、派手な活動があっても大地震が起きないケース(空振り)も全然ふつうにある。様々な予測手法があるが、いずれも**絞り込み(Rは予測する地震の震源サイズ程度、Tは1-30日程度)がよく、百倍-数万倍という圧倒的に高いゲイン**が得られる。
- 📌 RTの絞り込みがよい分、ゲインの割に適中率は低い($Q = G \times \text{普段の確率}$)。T=1日、対象をM7+とした場合に換算すると、 $Q \sim 1\%$ 。(実際にはM6+を予測するものが多く、 $Q \sim 10\%$)。
- 📌 予知率は数十%が相場だが、地域差がある。警報分率は低い(0.002-0.1%)。
- 📌 現状では、これがエース。

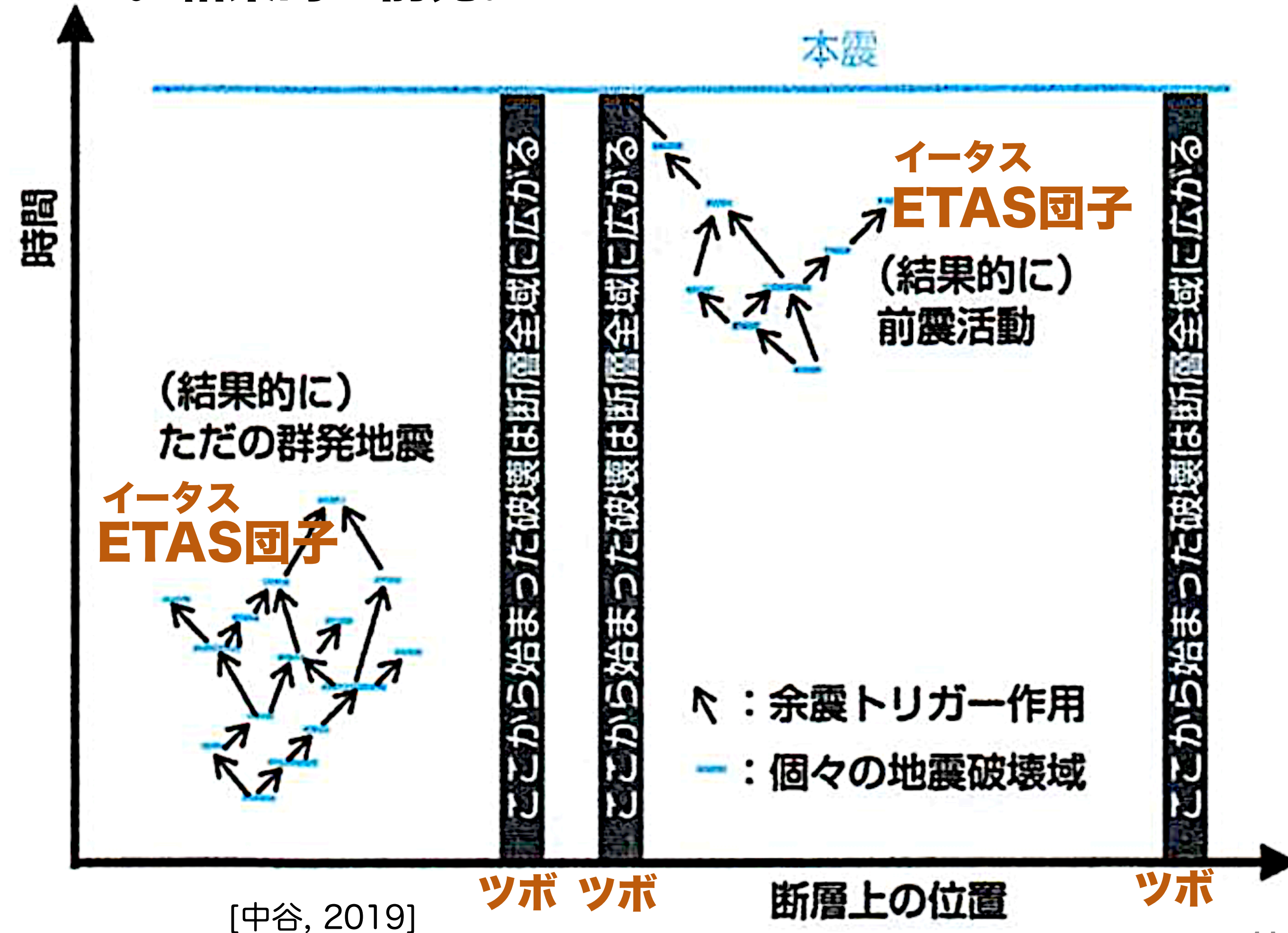
短期的前震?の物理解釈

- 昔は、震源核のプレスリップに伴う小さなひっかかりのノイズだと思われていた。つまり、**本物の前兆**。[e.g., Ohnaka, 1992]

幻想だった?



- しかし、ゲインの大部分(百倍から数千倍)は「**本震は前震の余震**」という解釈で説明できる[Helmstetter et al., 2003]. **たくさん起きる余震の中には、大きくなるやつもある。結果的に前兆。**



ETAS 夢
5500倍 x 7倍 = 38,500倍 @南カリフォルニア

	データ	M	R, km	T	適中率Q	警報分率	予知率	ゲインG
#7. ETASに閾値 Lippielloら 2012	地震活動 南加, 1987-1999	6+	10	1日	0.2% - 2%	0.015%	5/6	5500
		7+			0.02% - 0.2%			
#8. 前震な確率 Lippielloら 2012	群発活動 南加, 1987-1999	6+	10	1日	1.5% - 25%	0.002%	5/6	38320
		7+			0.15% - 2.5%			

- #7：沢山の地震の中には大きいのも一定の比率で混じる(e.g., M3+の地震1000個のうち1個くらいは、M6+と期待できる;**ゲーテンベル・グーリヒター(GR)則**)ので、最近の地震活動を**余震の経験式(ETAS)**に放り込んで予測できる**明日おきる余震の数は、明日大地震がおきる確率に比例する**。このETAS値がある閾値をこえたらアラームONとして、たった0.015%の警報分率でM6+地震6個のうち5個を当てた。**G ~5500! Q ~1%**。
- #8：余震の法則だけでは説明できない「**本物の前震活動に特有の癖**」(この場合は、活動が狭い領域に集ってゆくこと)を利用して、さらにあやしい活動を絞り込む(警報分率が0.015%→0.002%)ことで、さらに7倍のゲインが稼げ、1日、10kmに対して1.5% - 25%というQが出た。

ETAS(余震の法則) + GR則： 夢はなくても力もち。

- 📌 #7': 明日おきる余震の数(ETAS値)は、明日大地震がおきる確率に比例する。これとGR則を組み合わせれば、閾値を経由せずに直接、明日の大地震のQがはじきだせる。(ETAS値をそのまま使う確率予測)
 - 1984-2011のカリフォルニアのM6.5+9個のうち4個は、**普段の数千倍一百万倍**高いETAS値が出ているときに起きていた[Hardebeck et al., 2013]。 **R=10km, T=1日のQにして、0.2%-50%。**
 - 1個は、ふだんの数百倍のとき。
 - 残り4個は、普段程度のときにおきた。(先刻ご承知)

実戦総合演習：ゲインの掛け算@熊本2016[Ogata, 2017]

- この地域のベースレート (永年確率)：M7+のQが0.0004%/day
 - 日奈久ー布田川断層は、前の地震から1000年以上経過 ⇒ **長期(30年)予測としてゲイン数倍**
 - 2005年3月20日：M7@福岡県西方沖
 - 2015年11月14日：M7@薩摩半島西方沖
 - 2016年4月14日：M6.5@熊本日奈久断層
 - 2016年4月16日：M7.3@熊本断層布田川断層
- 余震の静穏化もあり。 **地味ながらあわせて数十倍**
- ⇒ **中期(数年)予測としてゲイン10倍**
- M6.5の余震は実は**前震**？
- ⇒ 短期(30日)予測として**ゲイン数百倍**

	データ	M	R, km	T	適中率Q	警報分率	予知率	ゲインG
#11. 前震のみ Ogata 2017	短期 熊周, 1923-2016	7+	90	30日	5%	さ ら に 数 十 倍		290-620
				1日	0.17%			290-630
#12. ゲイン掛算 Ogata 2017	長,中,短期 熊周, 1923-2016	7+	90	30日	39% - 79%			2200-9600
				1日	2% - 10%			3400-37000

短期予測にとって数十倍のゲインなんて、それだけでは焼け石に水だが、ゲインの高い現象(前震)が共起したときは、地味なやつも生きてくる。前震だけだとQ~0.17%/dayなの、数%/dayに!

まとめ

1. 確率の数字は、今ある知識(経験)から推測するに…であって、**本当は、明日大地震がおきるかは、黒か白かに決っている**。でも、我々にはそれが見えない。だから、**せめて(経験則で)グレーな確率**を言う。
2. 昔は、80点くらいの予知が原理的にはできるような現行犯逮捕の前兆があると思っていたが、**実は、せいぜい20点くらいしかとれない原理的な仕組み(カスケード)があった**。がっかり。
3. 現状、3点くらいとれるジंकウスがあって、あとはどれだけ20点に近付けるかというゲームに見える。
4. 外れには2種類ある。アラームでないのに地震がくる(**見逃し**)と、アラーム出したのに地震が来なかった(**空振り**)。でも、どちらの観点でみても、同じ数字、**ゲインG倍だけランダムよりよい**。
5. ちょっとでも心配があったら言ってほしい? 普段のたった2倍でも? **「5年以内に東日本でM8+の確率33%」**といわれたらどうする? オリンピックやめる? **普段のたった2倍でも? Qだけでビビらないで**。
6. 普段の100倍危いと言われても、0.01%(普段の3日確率)が**1%になっただけならどうする? Qも大事**。
7. 例1や2のような**僥倖でピンポイントに高いQ(>10%)**が出せることはあると思う。でも、それはとても稀で、ほとんどの大地震は逃げ出したくなるほど怖い「これこれのこと」なしに突然おこる。
8. 「本震は前震の余震」の原理だけでも、かなり(M7+, 1日, 1%)のQ (**Gは数千倍**)が出ることはあり、それは、僥倖というほど例外的ではない(予知率~5割)。さらに数倍のコントラストをつけられる「本物の前震ならではの癖」もありそう。**前震の正体が何にせよ、これがエース**。

最終確認

「(最近おきてる色々と気色の悪い現象を過去の経験に照らすと)、**3日以内に熊本で大地震がおきる確率は5-20%です。**」というのは、めったにない、普段より1万倍危険な状況で、明らかに、**10%くらいの確率で地震が来る!という警報**ですが、80%以上の確率で大丈夫だとも言っています。10回に9回は空振りだとも言っています。

確率の数字の意味は文字通りです。自分の事情でどうするか決めてください。