

# 地震予測（予知）研究の現状について

～専門家集団の迷走

- ・ 非難ではなく、他山の石として
- ・ 今後何が必要なのかを明確にするために過去を振り返る

～地震の理解にはどんな物理が必要か？

講義のスライドは以下URLに順次アップロード

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/hatano/lecture.pdf>

# 「地震学の敗北」発言の衝撃

「甘い見積もりに安住した地震学の敗北だ」

橋本学・京都大防災研究所教授

「今回の巨大地震は地震学の大きな敗北」

松沢暢・東北大教授

「科学が敗北したようなものです」

瀬瀬一起・東大地震研教授

東北地方でM9クラス地震が起こるとは誰も思っていなかったことを「敗北」と表現したのであろう。

それにしても「敗北」とは異様な表現に思えるが  
なぜこんな事態になったのか？

2011年まで、地震学者たちは何を言っていたのかというと

「プレート境界の大地震の場所と規模の予測については、  
一定の見通しが得られた段階」

文科省「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」(2008年)

「将来的に起こる地震の場所とマグニチュードは分かる」  
とっていた

今週の目的：なんでそう思っていたのか？を理解する

これまで政府の地震調査研究推進本部が想定した「固有地震」は宮城県沖でM7.5程度だったが、3.11のマグニチュードは9.1であった。

「防災対策と地震科学研究のあり方:リセットの時期」 ロバート・ゲラー

地震学会論文集「地震学の今を問う」

[http://zisin.jah.jp/pdf/SSJ\\_final\\_report.pdf](http://zisin.jah.jp/pdf/SSJ_final_report.pdf)

サブ課題1：固有地震を説明する

文科省「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」(2008年)

「(固有地震の) 時期の予測に関しては、一般に長期予測の段階」

### 長期予測と短期予測の違い

長期予測：「今後30年以内にn%の確率で発生」

短期予測：数時間～1ヶ月以内にかんがりの確率で来る

(具体的に避難計画とか新幹線を止めるとか検討するレベル)

いずれの場合も(どの断層が滑るから)どのくらいの大きさの地震が来るかは言う

サブ課題2：両者の論拠を説明する

まとめると、2011年の段階で、「どこでどれくらいの地震が来るかは決まっていて、その時期に関しては確率的に推測できる」と思っていた

複数の地震学研究者が「地震学の敗北」と言っただけなのは理解できなくもない？

だが、本当にそうなのだろうか？

そもそも地震学とは何なのだろうか？

何をする（目的とする）学問なのだろうか？

# 地震学は何をする学問か？ (Wikipedia)

**Seismology** (English pronunciation: /saɪz'mɒlədʒi/) is the scientific study of earthquakes and the propagation of elastic waves through the Earth or through other planet-like bodies. The field also includes studies of earthquake effects, such as tsunamis as well as diverse seismic sources such as volcanic, tectonic, oceanic, atmospheric, and artificial processes (such as explosions).

[Seismology and society](#)

[\[edit\]](#)

**Earthquake prediction**

[\[edit\]](#)

*Main article: [Earthquake prediction](#)*

Forecasting a probable timing, location, magnitude and other important features of a forthcoming seismic event is called [earthquake prediction](#). Various attempts

..... " " .....

英語版では「地震学」と「地震予知」は別物

(「社会とのつながり」で考えるべき)

# 地震学は何をする学問か？(日本語版Wikipedia)

**地震学**（じしんがく、英語: seismology）とは、地震の発生機構、およびそれに伴う諸事象を解明する学問である。

地震学の研究の多くは、地震予知を目標として行われてきたが・・・

## NHKクローズアップ現代「予測できなかった超巨大地震」より (2012/01/19放送)

長谷川教授が研究者への道を歩み始めた1960年代。

地震学の最大の目標は地震の前兆を捉え直前の予知を実現することでした。

しかし、1995年転機が訪れます。阪神・淡路大震災です。

このとき、事前に警告を出すことができなかった地震学への批判が高まったのです。

[http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail02\\_3144\\_1.html](http://www.nhk.or.jp/gendai/kiroku/detail02_3144_1.html)



# 日本の地震学と海外の地震学は違うのか？



M9地震を予測出来なかったのは「地震学の敗北」？

海外の地震学者なら「そもそも地震学の目的は予知ではない」と言うのでは？

・・・と思っていたのだが、たとえばイタリアやギリシャ、  
中央アジアの国々ではまだそれなりに予知のための研究がされている

少なくともアメリカでだけ、あまり表立っては言っていないようだ？

(いろいろな経緯による)

ただ、米国でも個人レベルでは「これができれば予知ができる」みたいなことは言う  
(逆に、「今はそれができていないから予知できない」ともいえる)

## 地震学は何をする（している）学問か？

その日、私は東京大学理学部1号館2階の会議室にいた。安田講堂のちょうど裏手にある高層の建物だ。隣には米カリフォルニア工科大の金森博雄・名誉教授が座っていた。この分野では知らぬ人のいない巨大地震学の権威である。

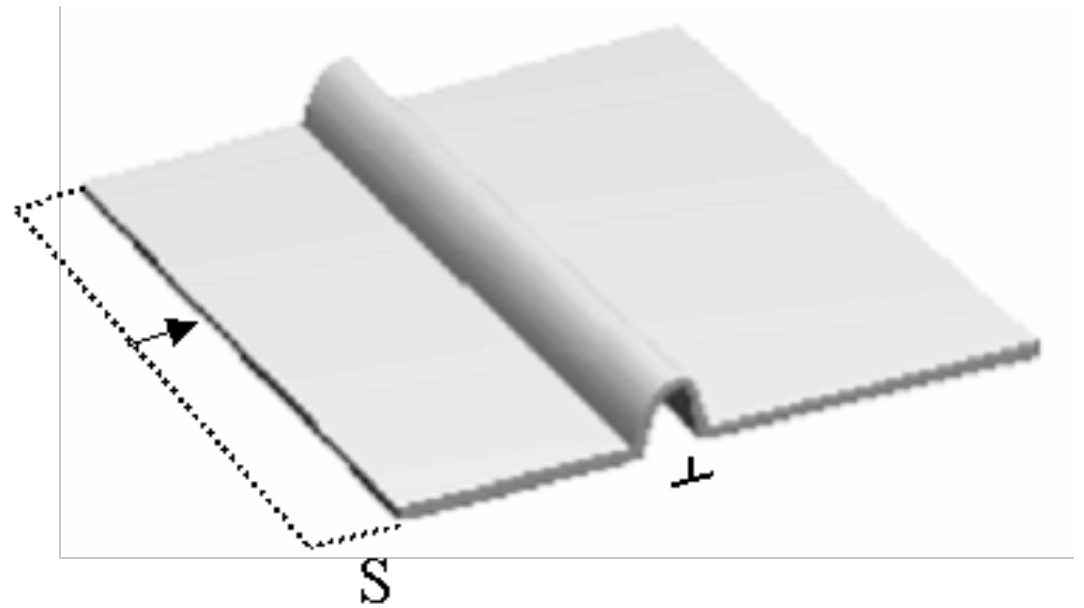
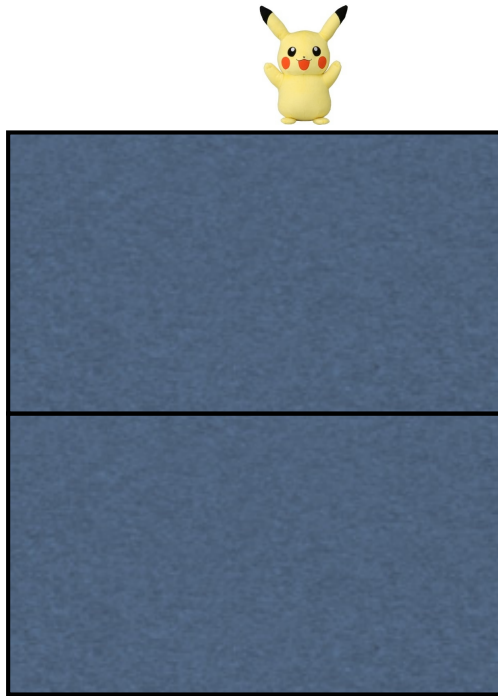
窓ガラスを揺らして始まった地震は遊園地のコーヒークップのように私たちを揺さぶり続けた。ただならぬ気配に腰を浮かしつつ、「これはいったいどういう地震なんですか！」と間の抜けた質問を繰り返していたことを思い出す。金森さんはそのつど悠然と答えた。「**今ごろ、震源も規模もメカニズムも、すっかり分かっているはず**です」

3・11後のサイエンス:地震学に懸ける橋＝青野由利  
毎日新聞 2012年02月28日 東京朝刊

**起こった地震に関してはすごく細かいことまで分かる！**

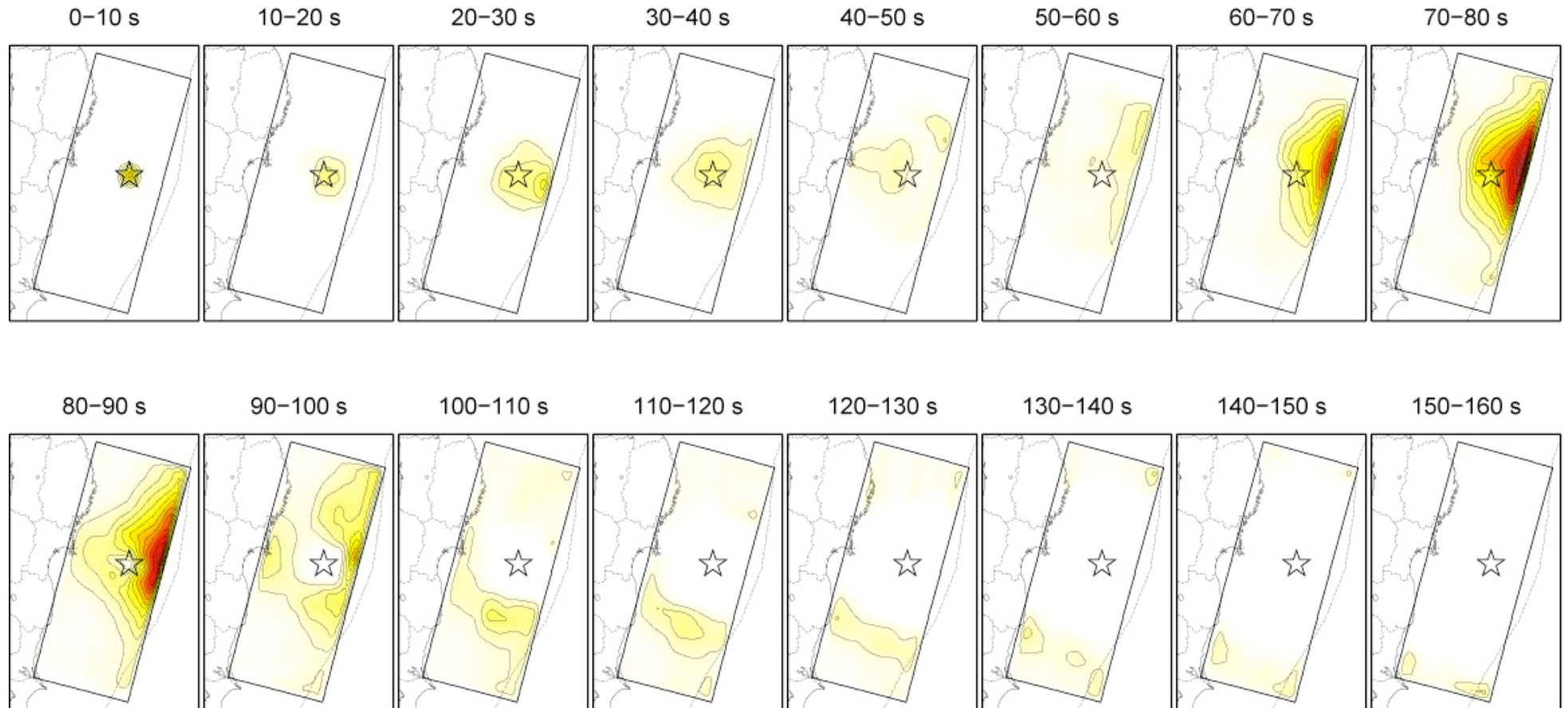
ここから、観測地震学の現在の知見をレビュー

# 断層は全体が均等に滑る訳ではない

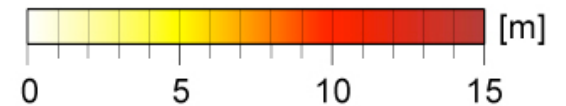


# 東北地方太平洋沖地震の場合

[http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo\\_20110311/inversion/](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/TohokuTaiheiyo_20110311/inversion/)



すべりの時間進展過程。10秒ごとのすべり分布を示している。



どうして地震波を観測しただけでこんなことまで分かるのか？

# 現在の地震学は「断層の滑り方 <--> 地震波」の対応を付ける学問

地震波の振幅は、地震モーメントの一階時間微分に比例する

弾性論計算で導出可能 → 5月20日の講義で

$$M_o \propto SD$$

地震モーメント = 断層破壊伝播過程で時々刻々定義される

$$M_o(t) \propto \int_{\text{fault}} dx dy D(x, y; t)$$

$$\dot{M}_o(t) \propto \int_{\text{fault}} dx dy \dot{D}(x, y; t) \quad \text{モーメントレート関数}$$

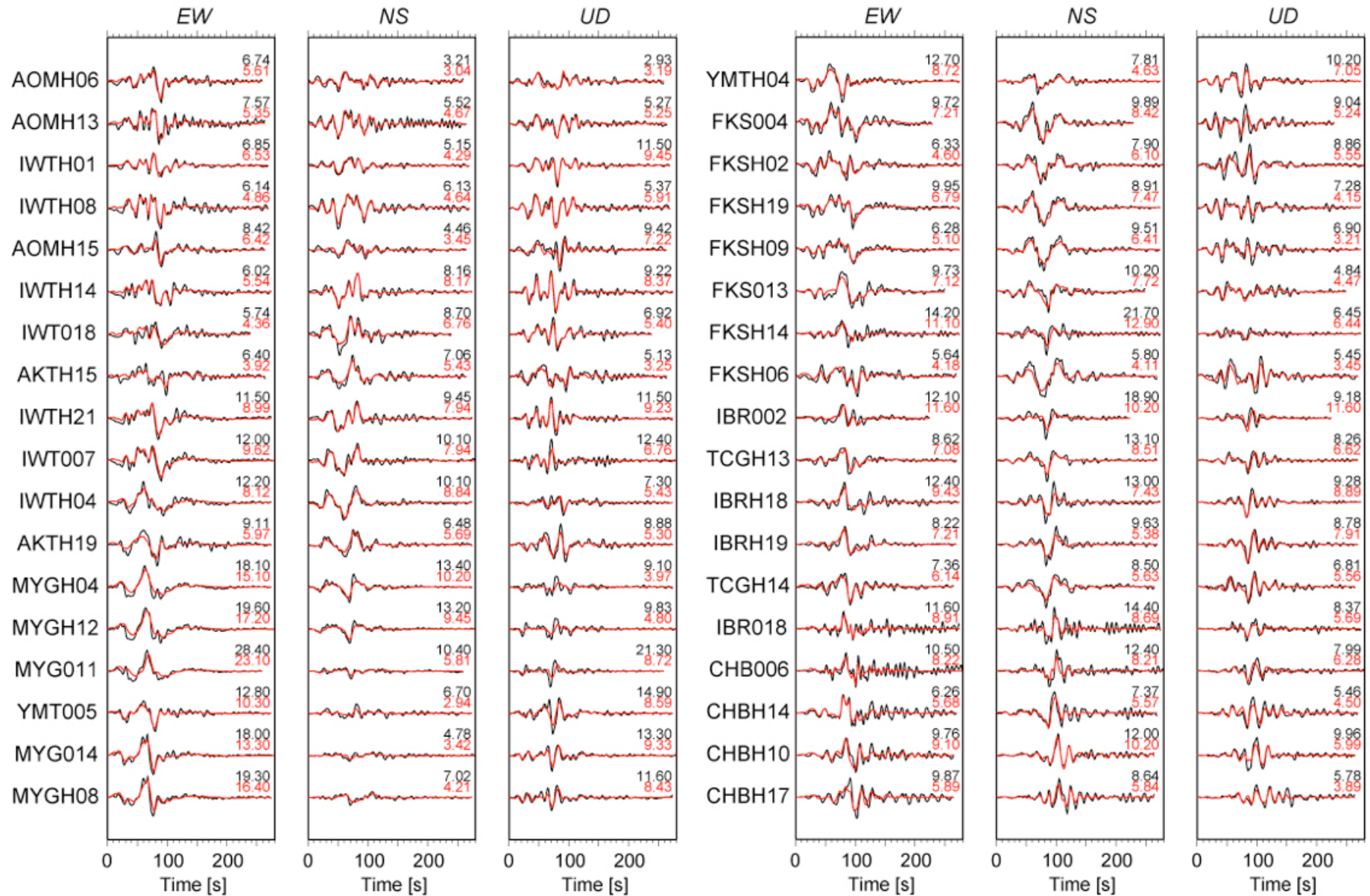
→ 破壊伝播・すべりが速いと地震波は大きくなる

揺らぎも重要（断層の凸凹など）

すべり関数  $D(x, y; t)$  とグリーン関数で地震波が決まる

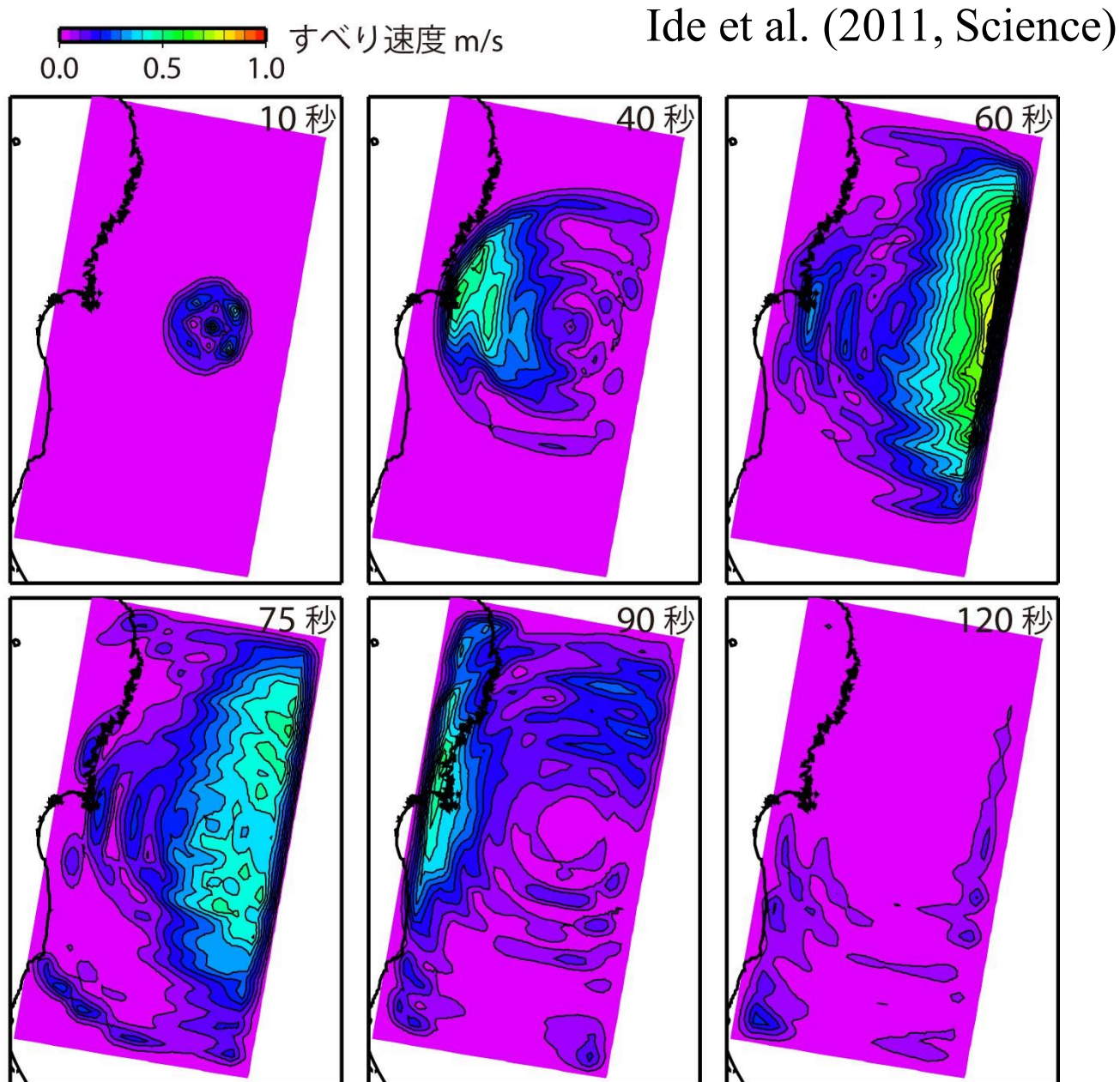
# すべり関数 $D(x,y;t)$ とグリーン関数を仮定して地震波を合成

— Obs. — Syn.



観測波形（黒線）と合成波形（赤線）の比較。波形の右上にそれぞれの最大値（cm/s）を示す

# 地震波を再現する $\longleftrightarrow$ すべり関数 $D(x,y;t)$ を全震源断層面上で与える





## ひとつの問題設定

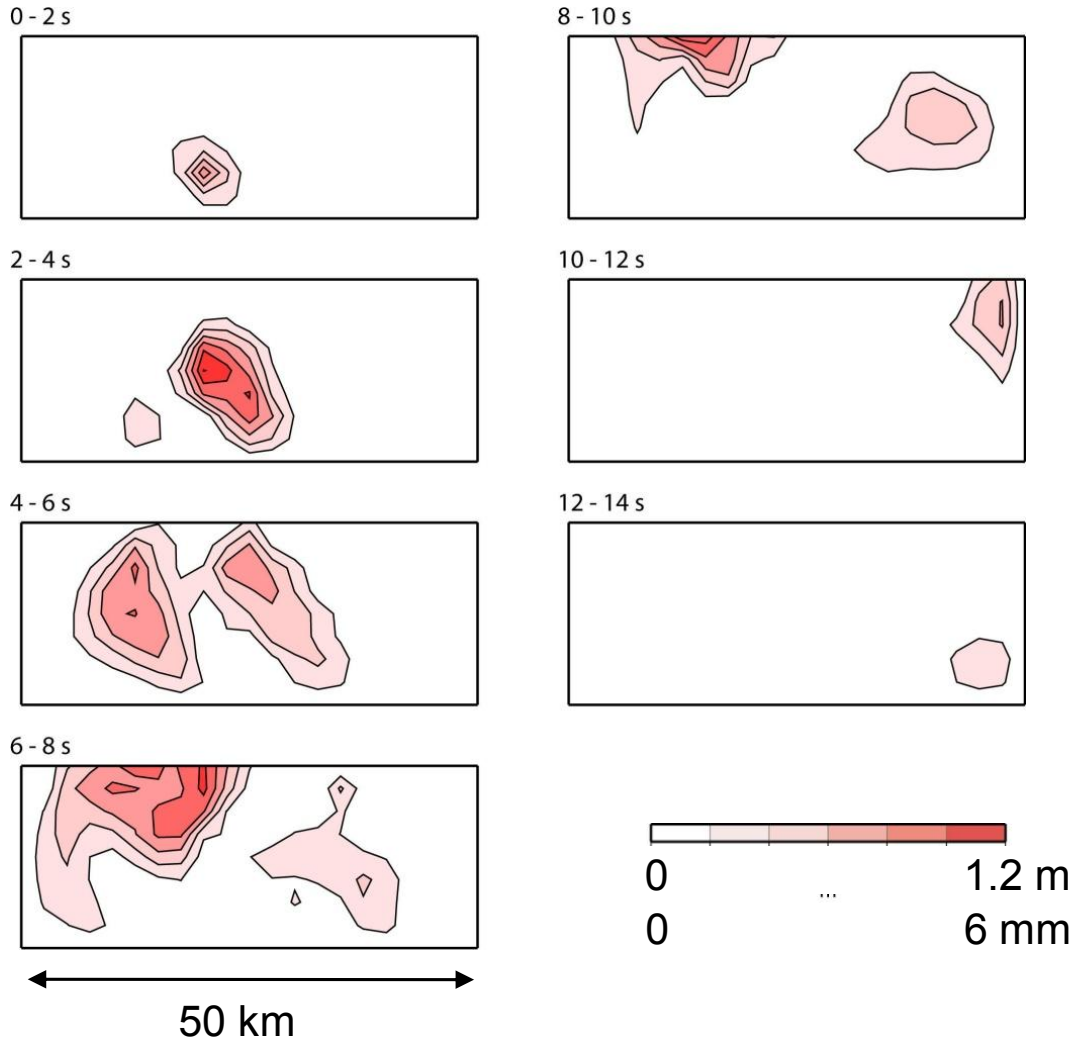
断層破壊ダイナミクスに、地震の規模依存性はあるだろうか？

e.g. 「大きい地震は複雑/小さい地震は単純」？

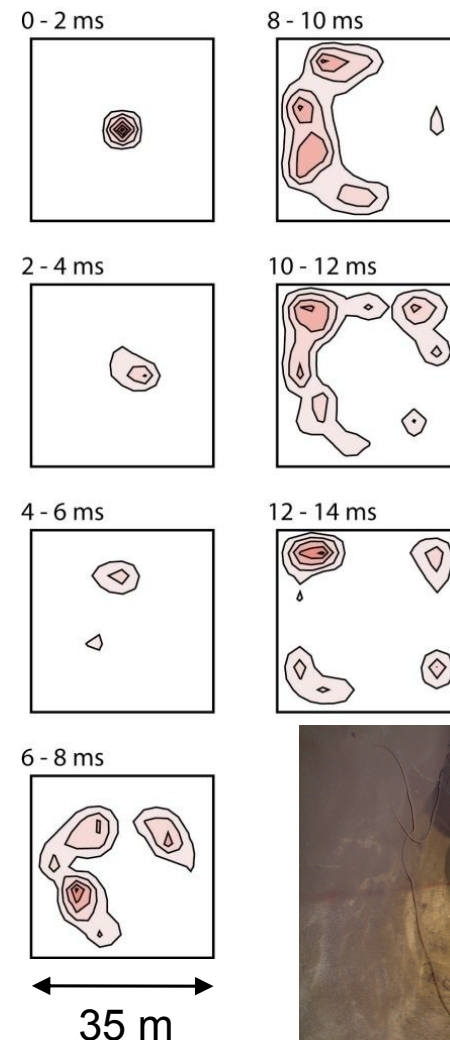
- ・ GRによれば大きい地震と小さい地震には区別がないはず
- ・ 一歩進めて、ダイナミクスもそうになっているだろうか？
- ・ もし否定的なら、地震の最小構成要素(quanta)を示せるだろうか？

# 神戸および南アフリカ金鉱山地下

1995 Kobe Mw6.8 (Ide and Takeo 1997)



SA mine Mw1.4 (Yamada et al., 2004)



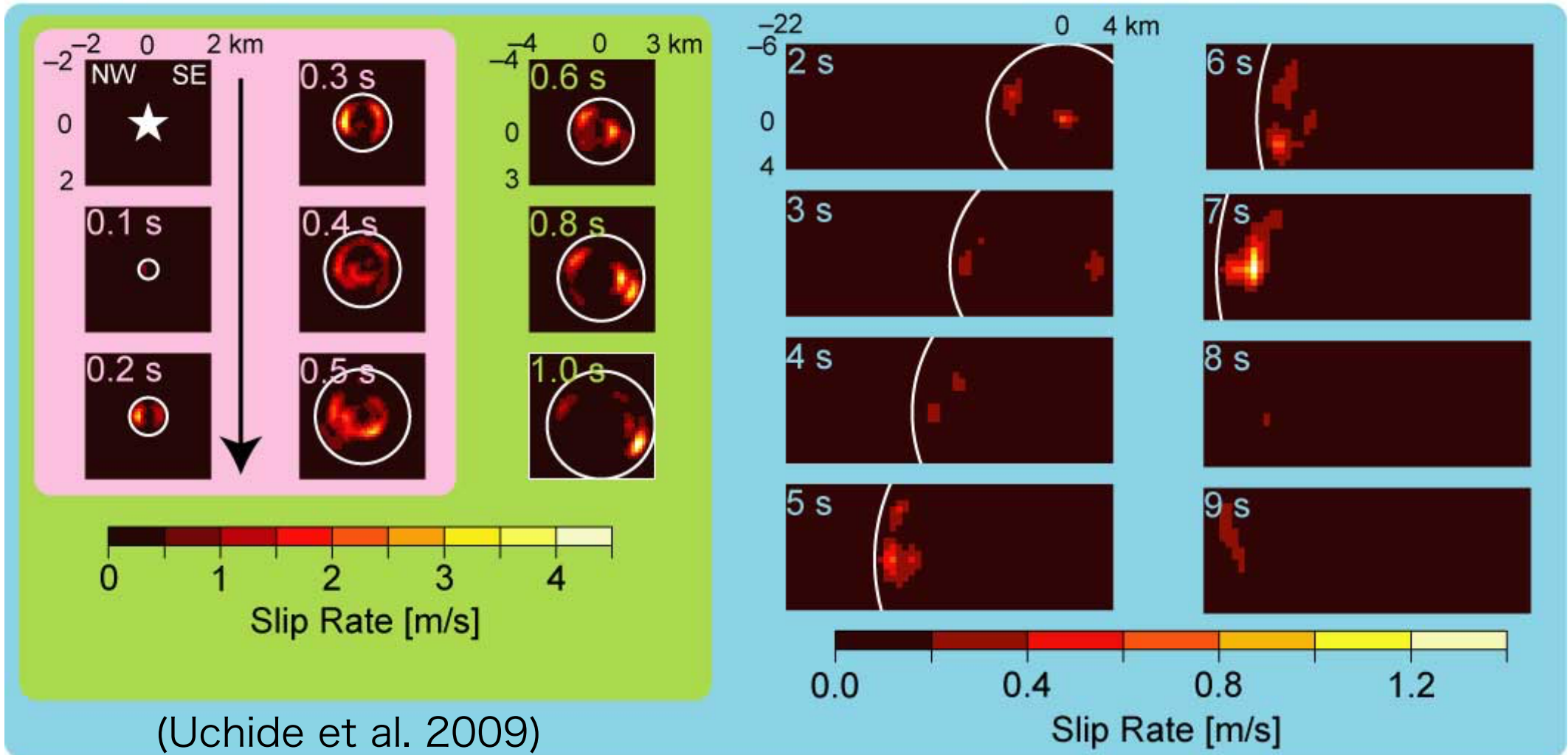
大きい地震でも小さい地震でも、断層の滑り方は充分複雑！  
(空間スケールを拡大縮小すれば見分けがつかない)

# パークフィールド地震(Mw6.0, 2004)の場合

Small Scale

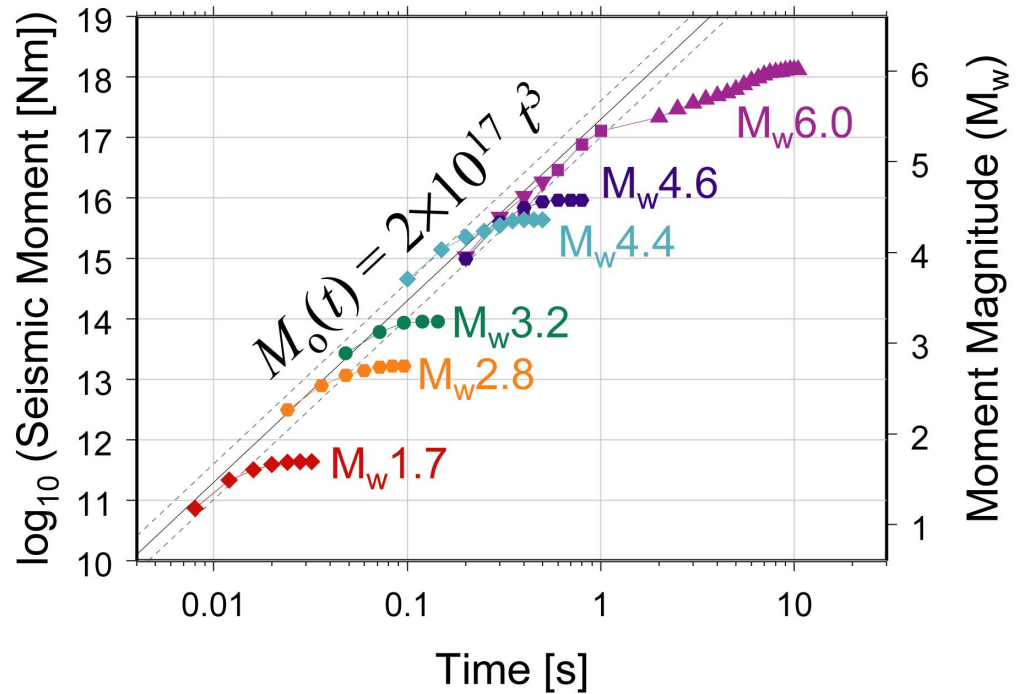
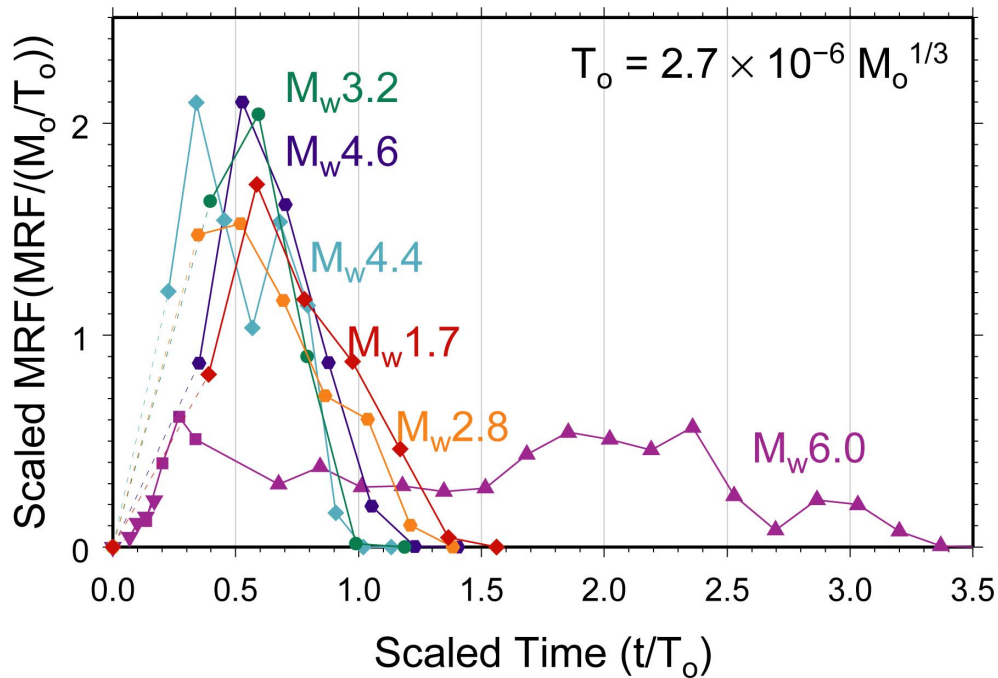
Medium Scale

Large Scale



ひとつの地震でも開始から終了まで、局面ごとに複雑なダイナミクス

# 大小様々な地震のモーメントの時間発展



小さい地震はむしろ完全に自己相似

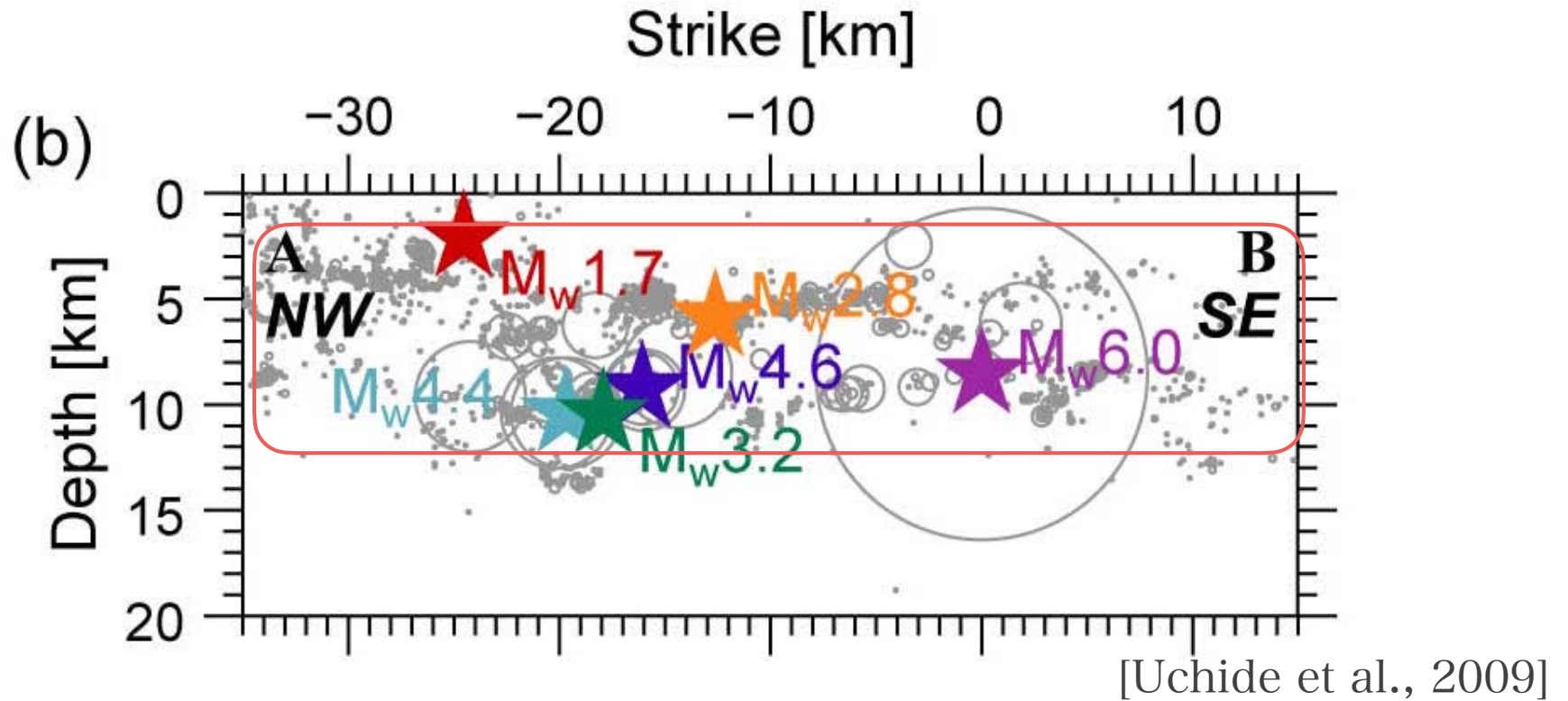
大きい地震の方は自己相似からのずれが顕著になってくる

内出崇彦氏（産総研）による：カリフォルニアParkfield地域で発生した地震

<https://staff.aist.go.jp/t.uchide/ja/research/scaling.html>

# 自己相似からずれる理由：地震の深さには制限がある

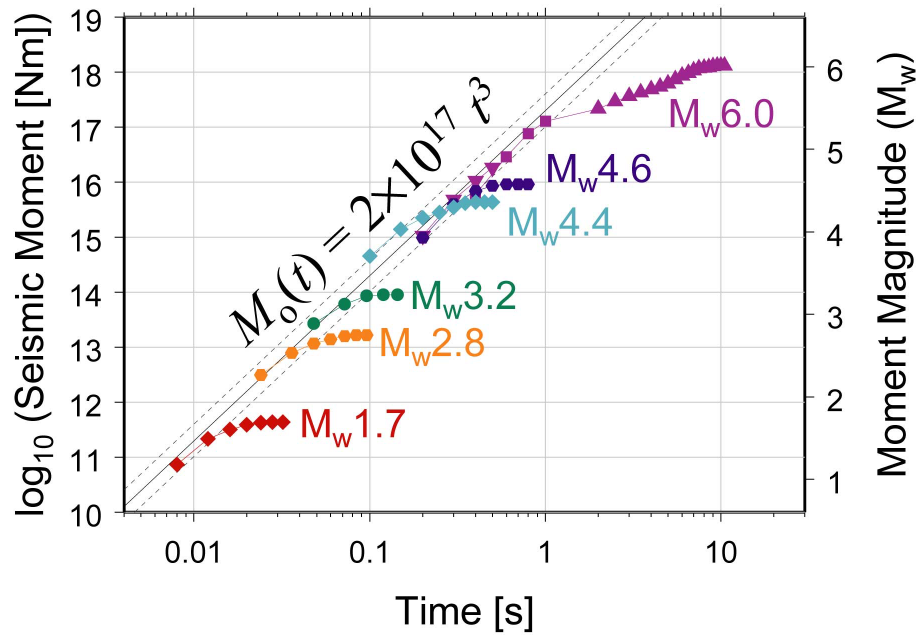
とくに、カリフォルニア・サンアンドレアス断層は浅い



M<sub>w</sub>~5でL~5kmなので、深さ方向にはもう進めなくなる

→ Mo(t) ~ t<sup>3</sup>からt<sup>2</sup>的振る舞いへ

# $M_o(t) \sim t^3$ から $t^1$ 的振る舞いへ (?)



パルスの破壊だと $M(t)$ は $t$ に比例

$$\dot{M}_o(t) \propto \int_{\text{fault}} dx dy \dot{D}(x, y; t)$$

$\dot{D} \neq 0$  となっている領域の面積が時間一定

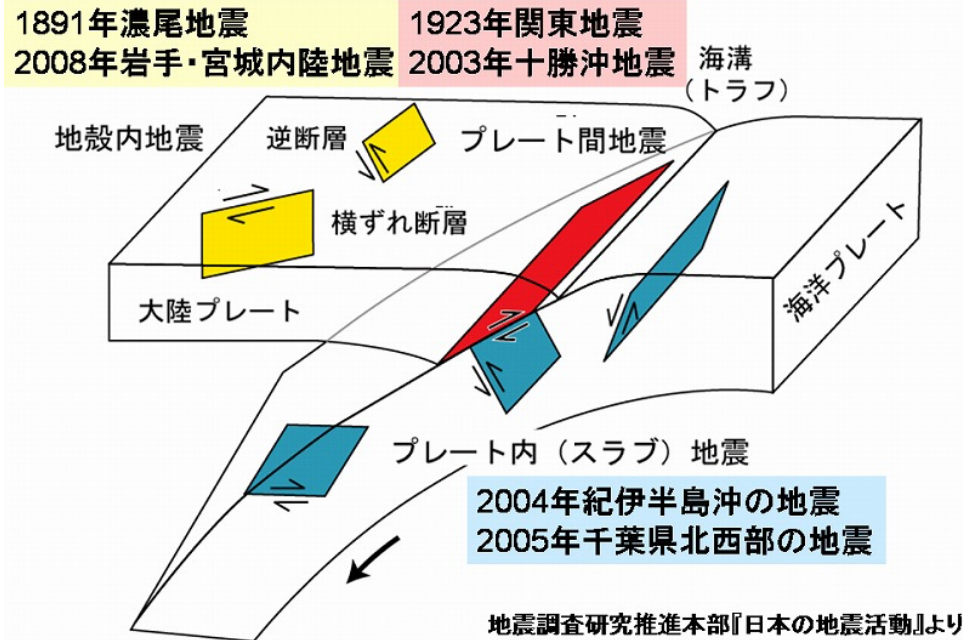
[Uchide et al., 2009]

「なぜパルスの破壊が起こるのか」は完全にOpen question

cf. 破壊力学で亀裂進展を解くと、徹頭徹尾自己相似的 ( $t^3$ に比例)

# 地震の深さには制限がある：日本の場合

## 日本付近で発生する地震のタイプ



プレート境界型地震は  
だいたい深さ60kmくらいまで  
(たいていは10~30kmまで)

プレートにも依存  
例：フィリピン海プレートでは  
30~40kmでスロー地震など  
(普通の地震は起こりにくい)

理由＝高温になると摩擦特性が変わる（安定化）・・・来週の講義で

スラブ内地震は、80km 以深も存在（500~670kmで頻発）  
いわゆる破壊・摩擦ではなく、鉱物の相転移によると思われる

# 動的自己相似性：まとめ

断層破壊ダイナミクスに、地震の規模依存性はあるだろうか？

1. あまり大きくない地震では、ダイナミクスも自己相似的（動的スケーリング）
2. 大きい地震も、まだ小さいうちは同じスケーリングに従う
3. 大きくなってくると自己相似とずれる：
  - ・地質学的構造による（地震が起こる深さが限られているから）
  - ・パルスの伝播へ遷移する（??）

(open question) パルスの破壊は地震の大きさに関係あるのか？  
それとも動的不安定性などで決まっていて小さい地震もそうなりうる？

今の地震学の国際的”主流”課題の一つ

東北M9が起ころうが、地震学が敗北したことにならない



地震波を観測すれば、地下で起こったことは  
手に取るように（は言い過ぎにしても）よく分かる

では、逆に地震波は予測できるか？

「断層の滑り方」が分かれば、発生する地震波を弾性論で計算出来る

→ 地震波を観測して「断層がどのように滑ったのか」を推定できる

地球科学の学科で学ぶ地震学はこれが中心になる

(というより、これこそが「地震学」とされている面がある)

→ 「地震時に断層がどのようにすべるか」を予測できれば  
ある断層から発せられる「地震動の予測」ができる

注：地震予知（いつ地震が起こるか）とはまた別

防災行政（原発の耐震など）に使われる非常に重要な情報

地震予知（時間場所規模）は難しいが、地震が起こった時に「その断層がどうすべるか」は予測出来るのか？

←→ すべり関数 $D(x,y;t)$ を時空の関数として与える

$$\dot{M}_o(t) \propto \int_{\text{fault}} dx dy \dot{D}(x, y; t)$$

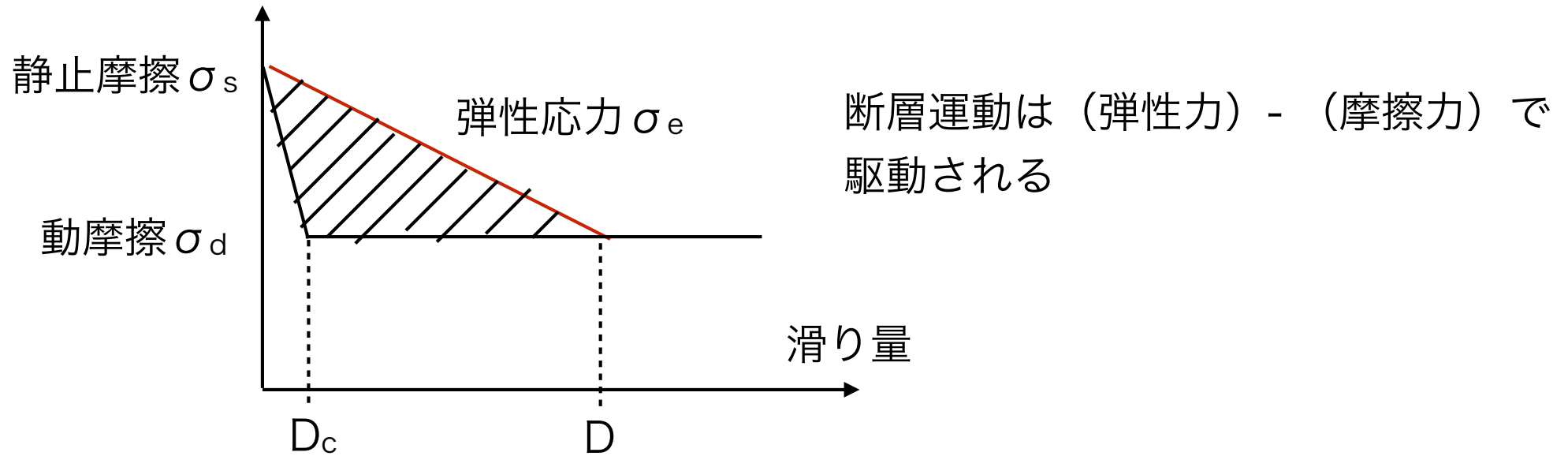
すべり関数は断層面上の摩擦力と弾性力の結果として決まるものだが、現在はこの関数を各断層ごとに適当に推測して地震波を評価している  
(物理的には求めていない)

簡易方法：すべり関数は一切考えず、 $M_w$ など少数パラメタをもつ経験式

詳細方法：断層形状とグリーン関数は既知として、適当なすべり関数を仮定

例：原発にはしばしば安全審査で仮定していた地震動よりもだいぶ強い地震波が来る。  
宮城県沖地震(2005年8月)では女川原発、能登半島地震(2007年3月)では志賀原発、  
中越沖地震では柏崎刈羽原発を、それぞれ想定を超えた地震波が襲った

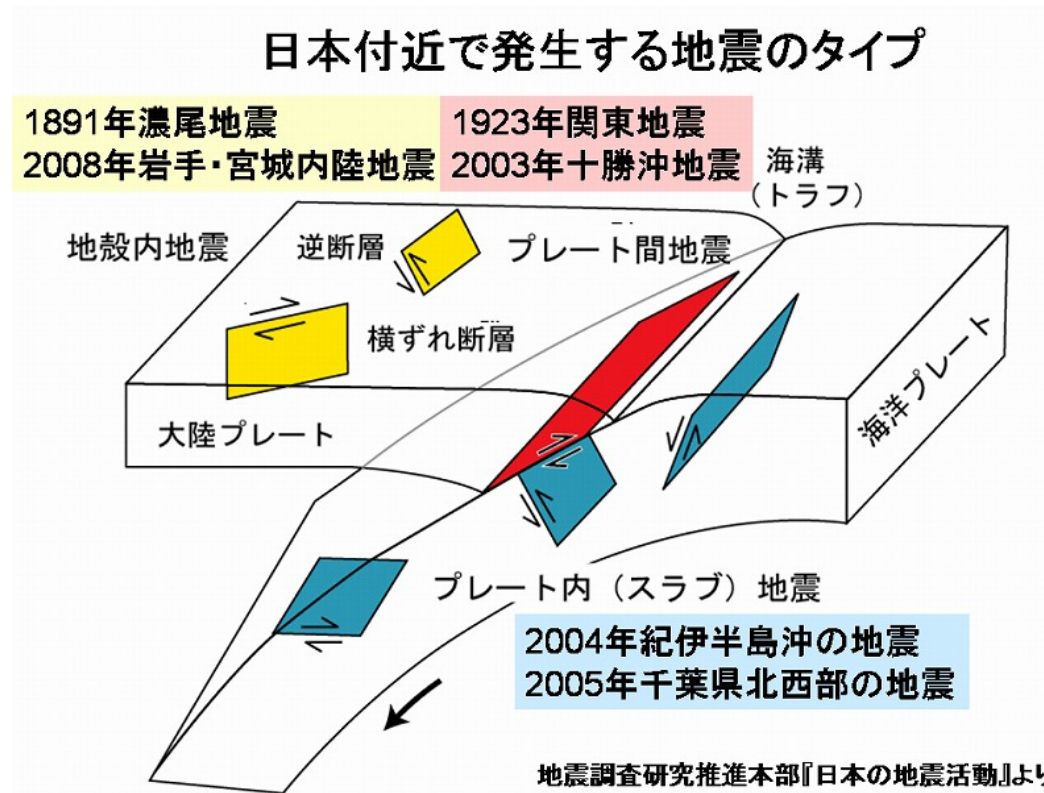
## すべり関数の物理的な決まり方



弾性応力は線形弾性論だから、断層の形状と弾性定数を与えればOK

摩擦力が分かれば、すべり関数が分かる → 放射する地震波が分かる

# 実際の様子



1. 海洋プレートは大陸プレート下に潜り込もうとするが、摩擦力のせいで大陸プレートもくっついてくる。
2. 大陸・海洋プレートの両方にひずみがたまる
3. 弾性的復元力が摩擦力を上回り、元に戻る。

摩擦力と変形の復元力の「せめぎ合い」

3. 弾性的復元力が摩擦力を上回り、元に戻る。

A. 急激に元に戻れば、「地震」（地震波が出る）

B. ゆっくり元に戻る場合も多々ある（地震波を出さない）

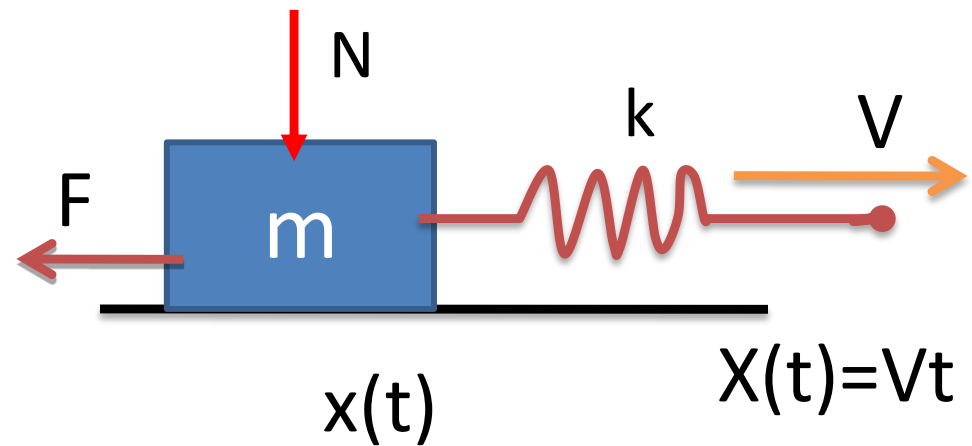
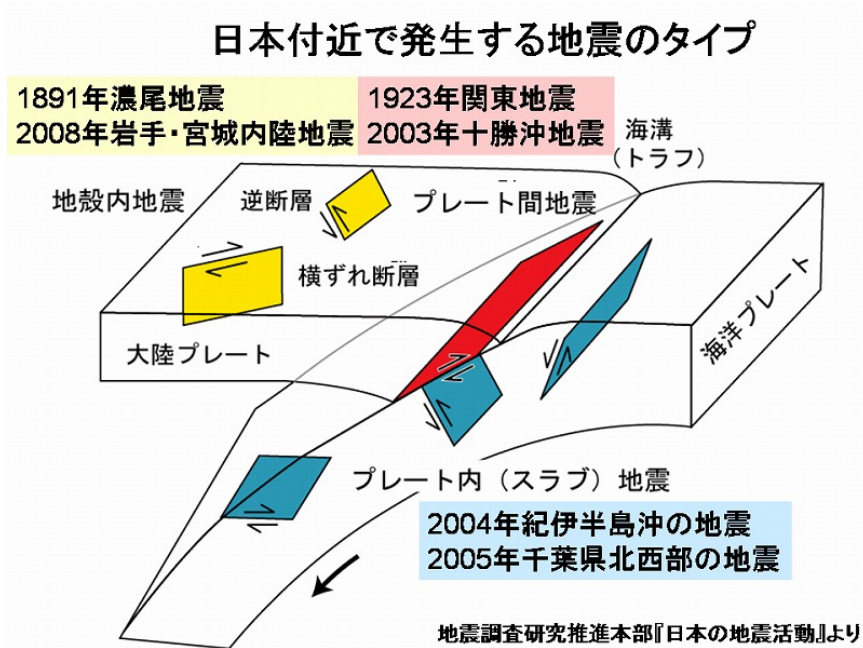
- ・ 津波地震（地震波は非常に弱いが生津波は発生）
- ・ 低周波微動（特殊な地震計でのみ感知可能） → 5月6日の講義で
- ・ スロースリップ（数ヶ月～数年かけてすべる）

2'. 摩擦力が弱くてひずみをためられない

様々なバリエーションが存在しうる。なぜか？

答え：摩擦力の性質がさまざまだから  
（復元力に関してはみな同じ）

# 簡単なモデルで考えてみよう



プレート境界の摩擦係数 = 床との摩擦係数  
プレートの復元力 = バネの復元力

動画：

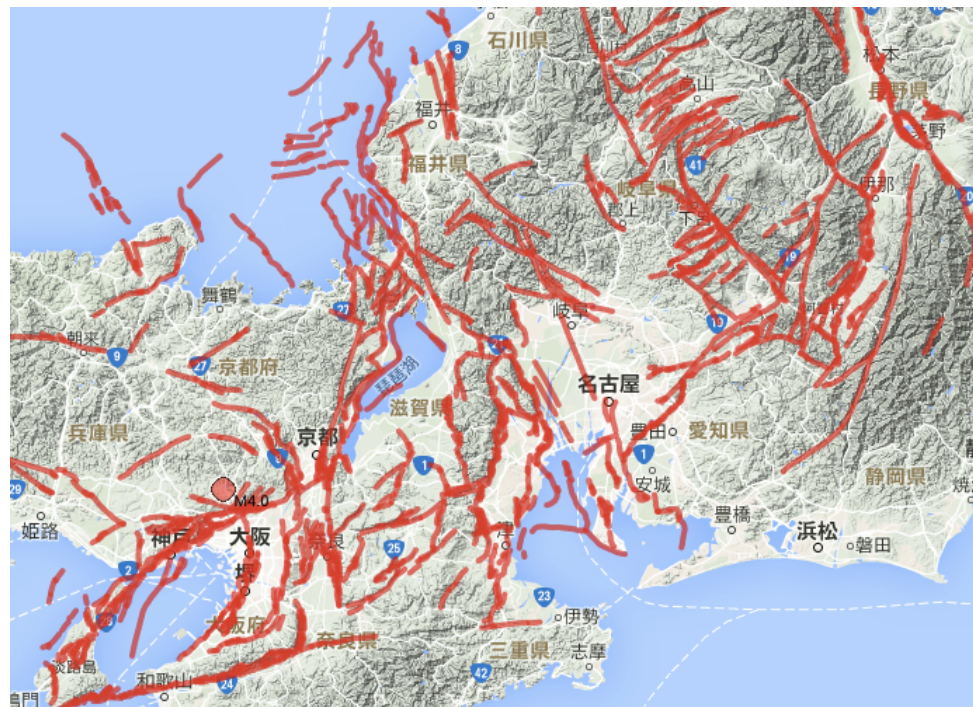
<https://dl.dropboxusercontent.com/u/4864660/Presentations/StickSlipVideoYouTube.mp4>

# 摩擦の性質が分かればすべり方が分かる

「断層の摩擦法則」を知る必要

・・・断層の摩擦なんてどうやって研究するのか？

実験ができない超巨大スケールの現象

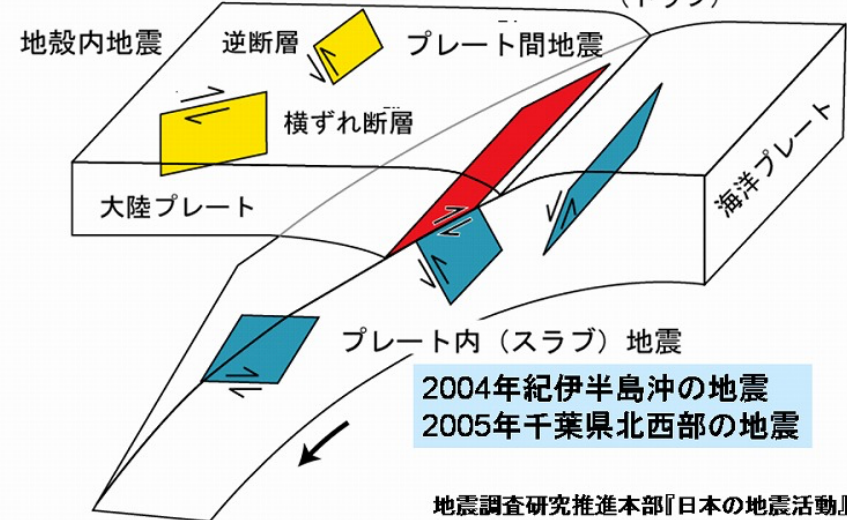


## 日本付近で発生する地震のタイプ

1891年濃尾地震  
2008年岩手・宮城内陸地震

1923年関東地震  
2003年十勝沖地震

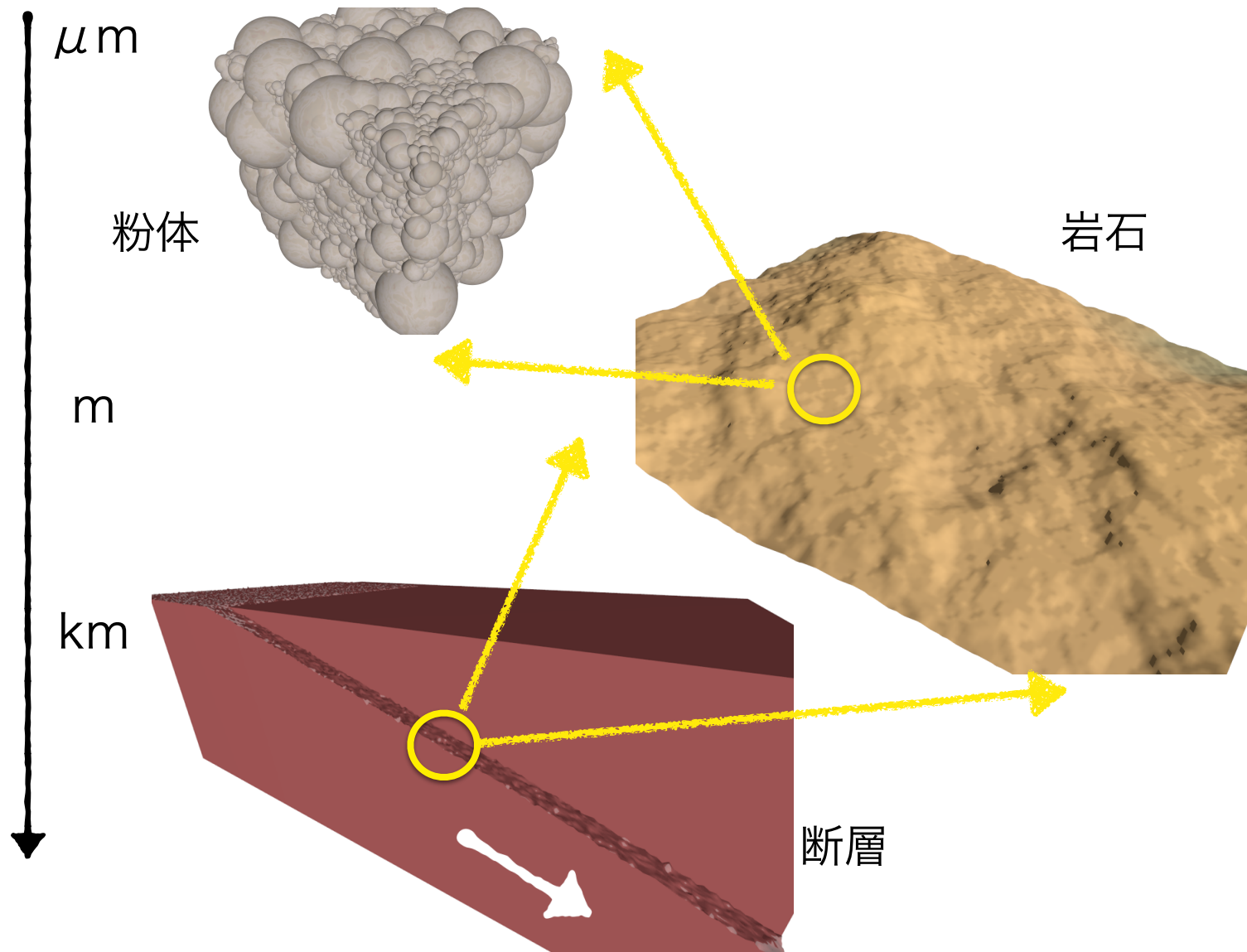
海溝  
(トラフ)



2004年紀伊半島沖の地震  
2005年千葉県北西部の地震

地震調査研究推進本部『日本の地震活動』より





とにかくサブ要素から理解していくしかないだろう

摩擦は小さいスケールでも分からないことが多いんだから、  
まずそこから理解しないと話にならない

→現状、謎もまだあるが、小さいスケールではだいぶ理解は進んできた

もちろんサブスケールが分かったからといって大きいスケールが  
すぐに分かるわけではない。（そこはまた別の話）。

大きいスケールになったら摩擦ではなく断層スケールの凸凹など、  
別要因の方が重要になる可能性もある。その場合は”ちゃぶ台返し”と  
いうことになる(Kagan, 2014)

# 地震動の予測：現状のまとめ

現時点では、地震動を物理的には予測できない

物理的予測のためには、断層の摩擦法則を知る必要

断層の摩擦法則をどう研究するのか？

スケールの問題：実験と断層との対応？

(まだ端緒についたばかり)

この問題が未解決のまま地震動予測をしているのだから

「敗北」は戦う前から自明であろう

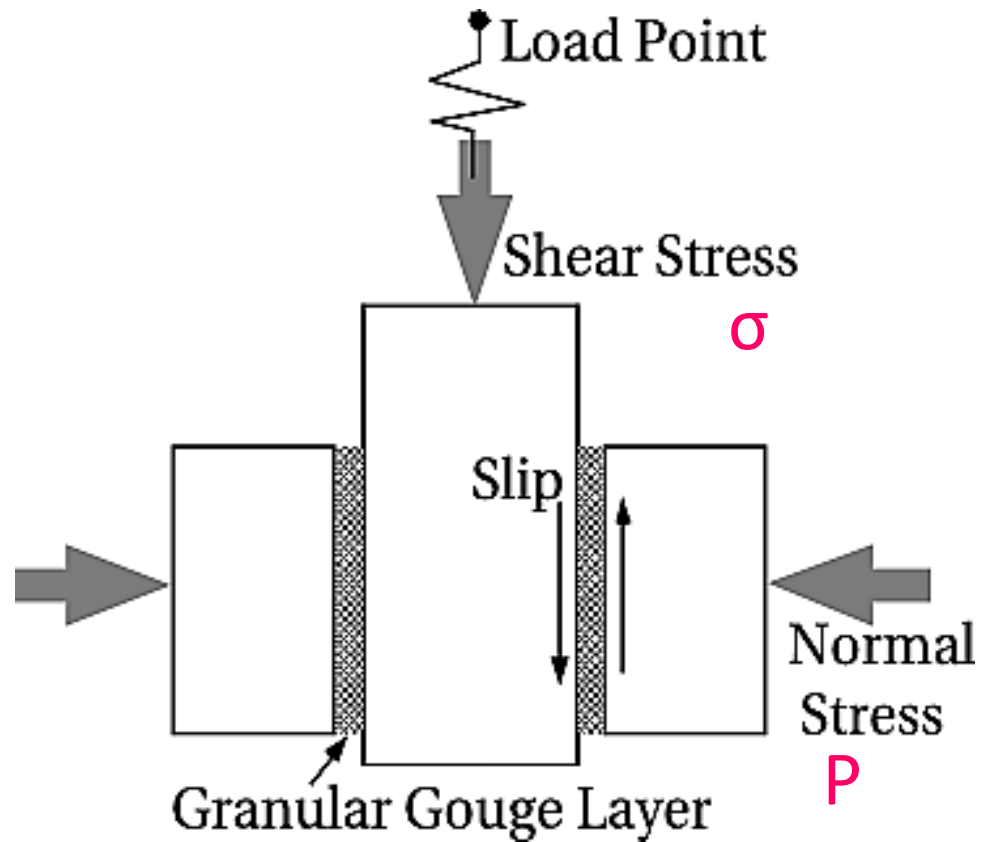
(特に怖いのは原発立地の地震動予測、後で議論)

## サブ課題1：固有地震を説明する

「固有地震」概念の形成には、観測のみならず  
実験で明らかになった摩擦法則の裏付けが  
あったようにみえる

まず摩擦実験、それから観測を説明する

# 岩石の摩擦実験：装置の一例



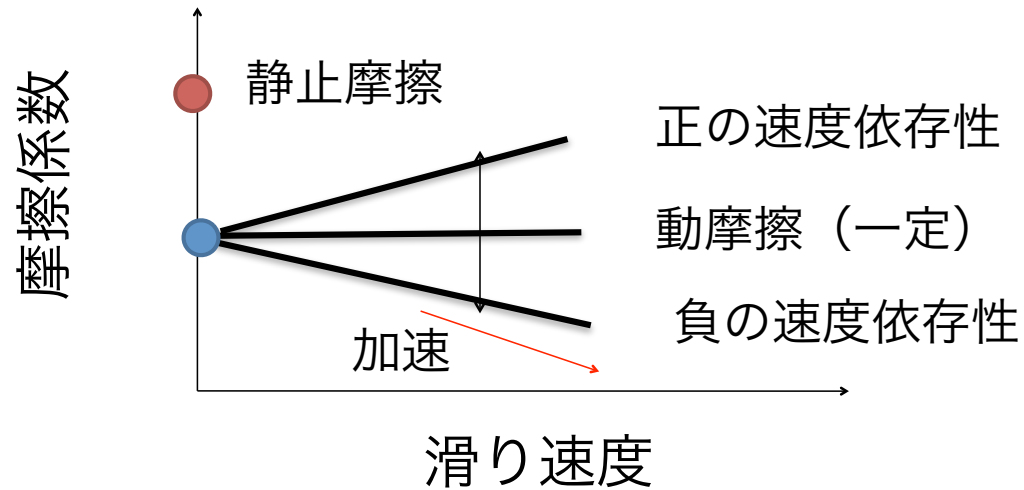
$$\mu = \sigma / P$$

摩擦係数

C. Marone 1998

一定速度で動かして摩擦係数を計る

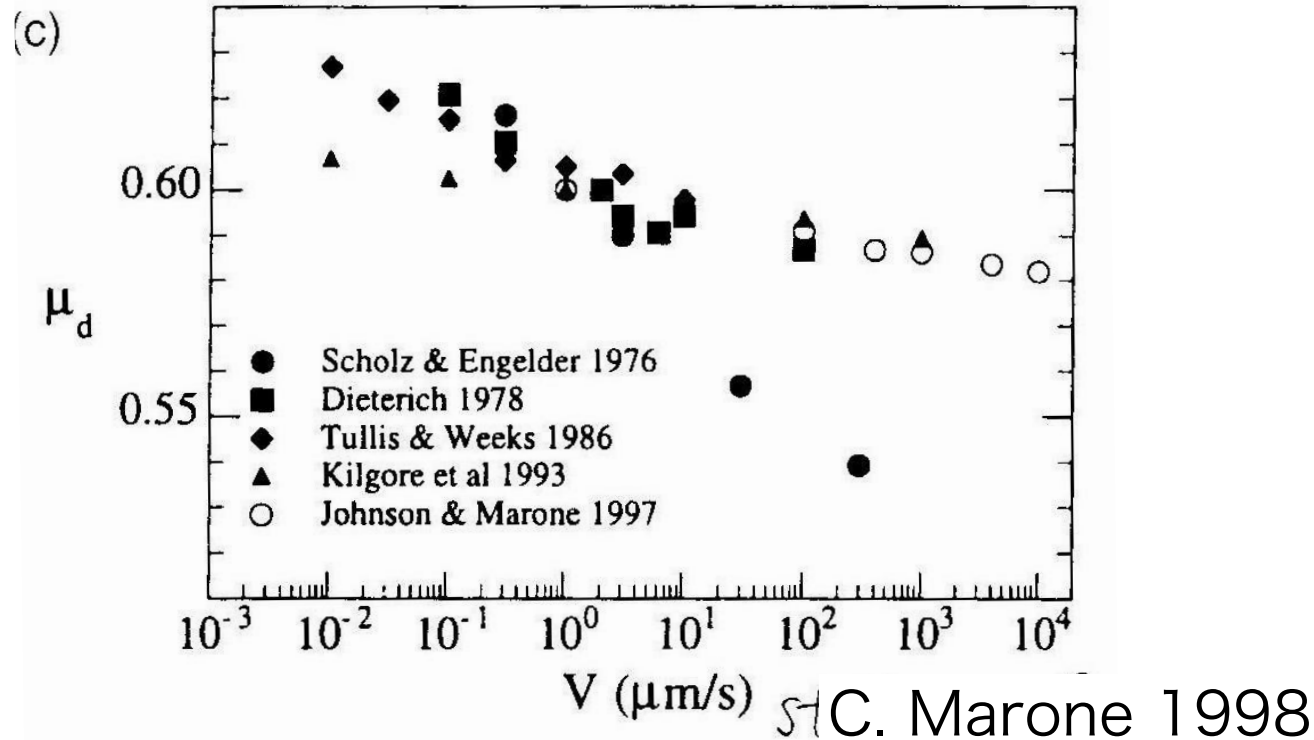
# 知見1：摩擦係数はすべり速度の関数である



→ 静止摩擦はすべらせるときの速度にも依存してしまう

動摩擦係数の速度依存性は正にも負にもなりうる

# 代表的な実験データ



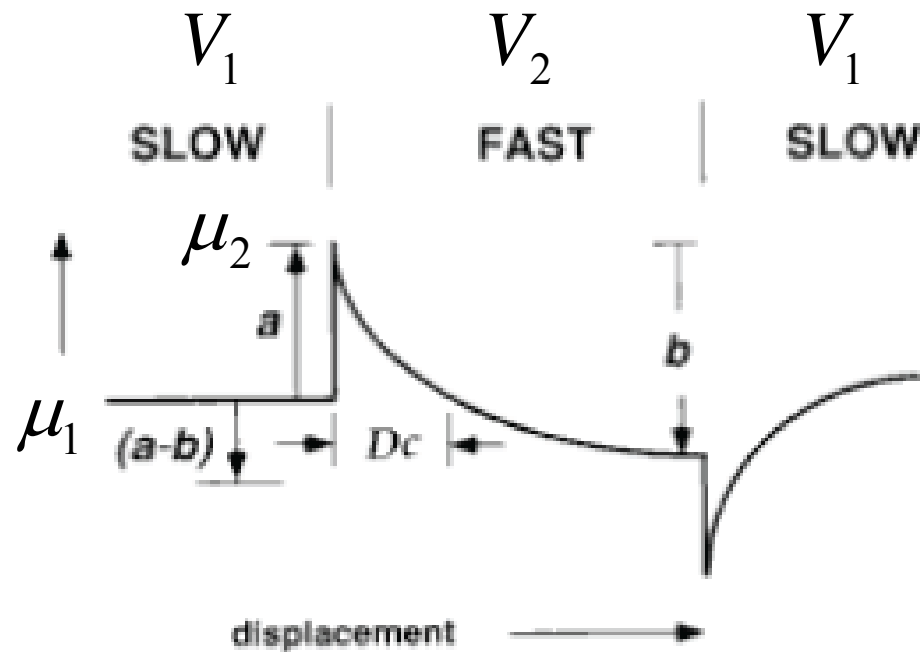
動摩擦係数は速度に対して対数的に低下

$$\mu = \mu_* - C \log \frac{V}{V_*}$$

Cは非常に小さい (0.001-0.01程度)

(詳細は4月22日の講義で)

## 知見2：摩擦係数はある距離すべると定常値に落ち着く



与えられた面に対して特徴的な長さ定数 $L$ があり、その距離だけすべると、摩擦力は定常値に落ち着く



# まとめると、

「速度・状態依存摩擦法則」

$$\mu = \mu_* + a \log \frac{V}{V_*} + b \log \frac{V_* \theta(t)}{L}$$

$$\dot{\theta}(t) = f(\theta, L)$$

例  $\dot{\theta} = 1 - \frac{\theta V}{L}$  (Dieterich 1979)

$\mu$  : 摩擦係数

$V$ : すべり速度

$\theta$ : 状態変数

$\mu^*$  : 速度 $V^*$ での摩擦係数

$V^*$  : 任意の基準速度

$L$  : 長さ定数

$a, b$  : 正定数

摩擦特性を決める定数 :  $a, b, L$

定常状態の  
状態変数  $\theta_{ss} = \frac{L}{V} \longrightarrow \mu_{ss} = \mu_* + (a - b) \log(V/V_*)$

$a - b < 0$ なら摩擦力は負の速度依存性をもつ

実は、 $a < b$ ならば摩擦は時間・空間的に不安定になることが  
簡単なモデルでは示せる（来週の講義）

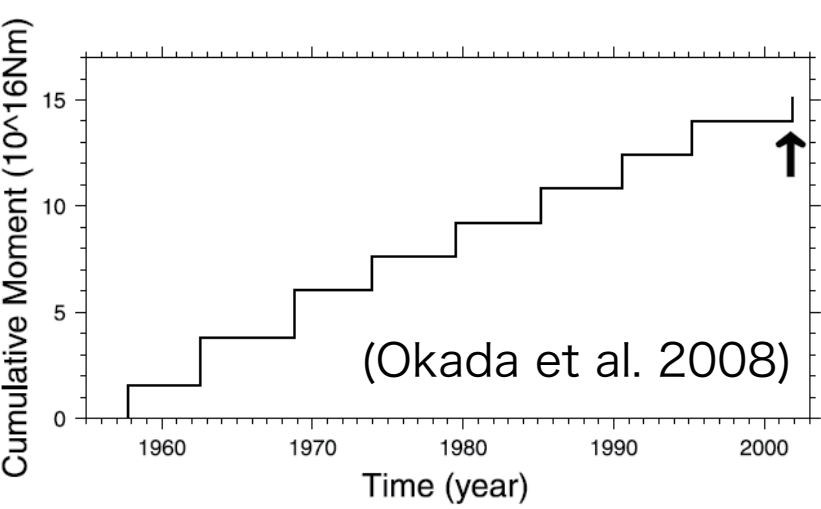
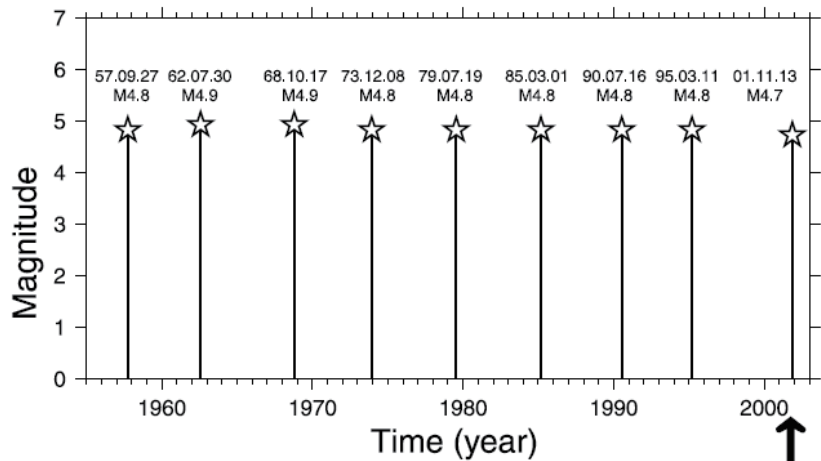
$a > b$ ならば安定にしかすべらない

実験から決まる経験的パラメーターが安定性を支配

そのうえで、実際の地震観測をみてみよう

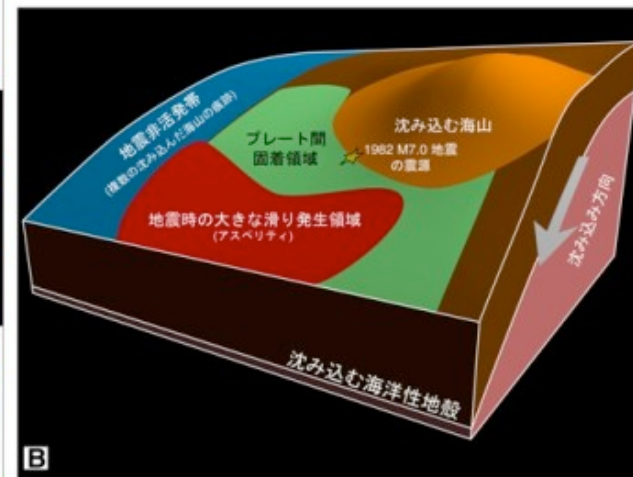
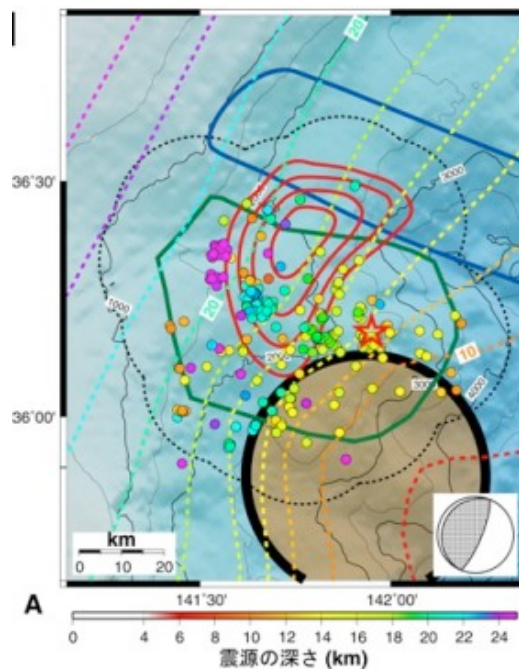
# 固有地震 (aka 繰り返し地震、リピーター)

しばしば、プレート境界では同じ箇所が繰り返し  
同じような地震を起こしているように見える



釜石沖：約5年間隔でM5弱の繰り返し

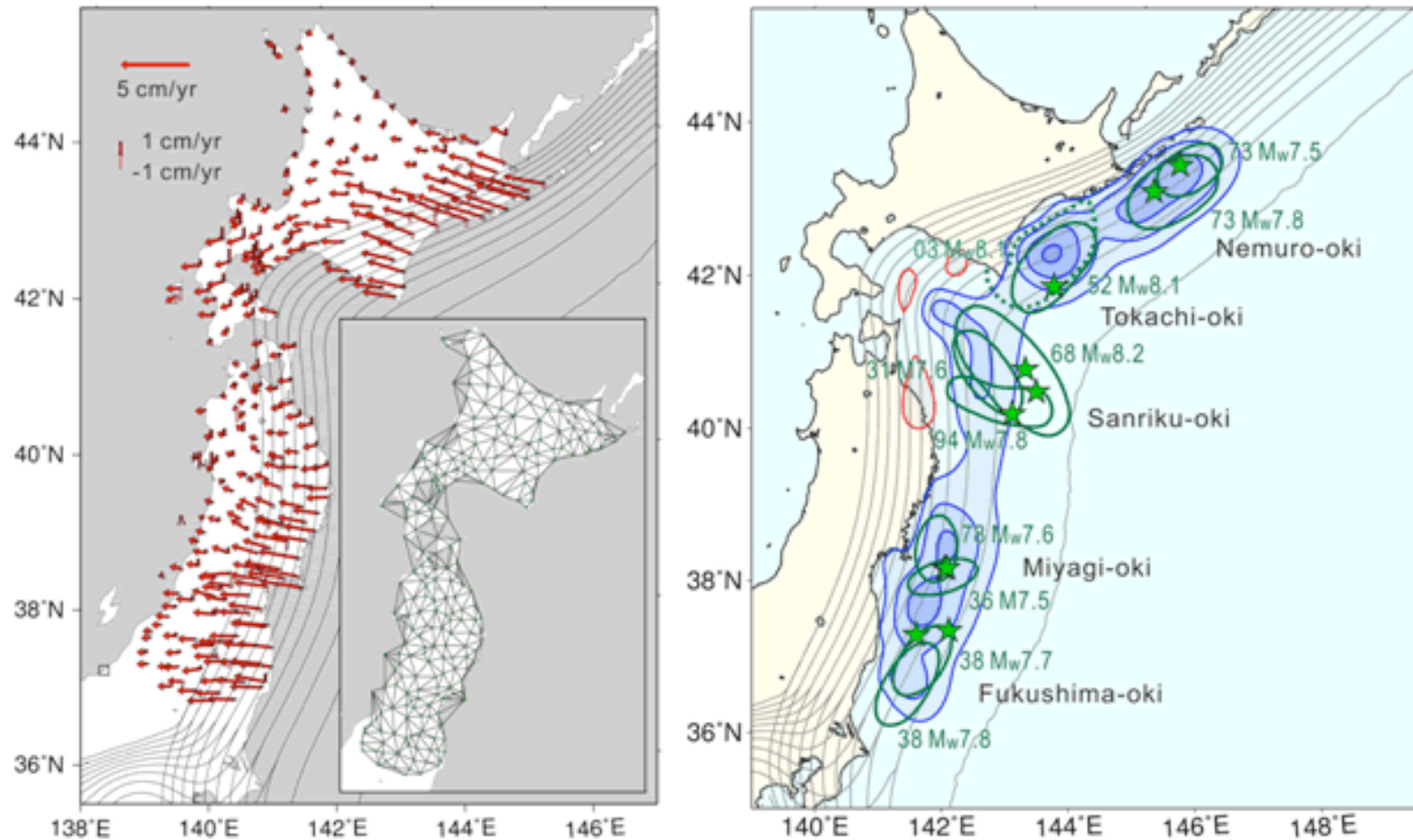
釜石沖、茨城県沖、宮城県沖、etc.



(Mochizuki et al. 2008)

茨城県沖：約20年間隔でM7規模を繰り返す

# 測地学的観測：プレート境界の沈み込みは空間的に非一様



Hashimoto et al., Nature Geoscience, 2009

周囲と比較してすべり速度が遅くなっている領域=すべり遅れ

すべり遅れている領域で固有地震が起こっている

## 地震観測と測地学的観測を合わせると・・・

「すべり遅れ」領域の周囲にはひずみがたまる  
そのひずみを急激に解消すれば地震になる

「固有地震の起こる理由は、すべり遅れる場所がいつも決まっているからだ」

場所（面積）が決まっているので、いつも同じ規模になる

固有地震の震源は、他の場所と比べて特別な領域であることを意味

何が特別なのか？

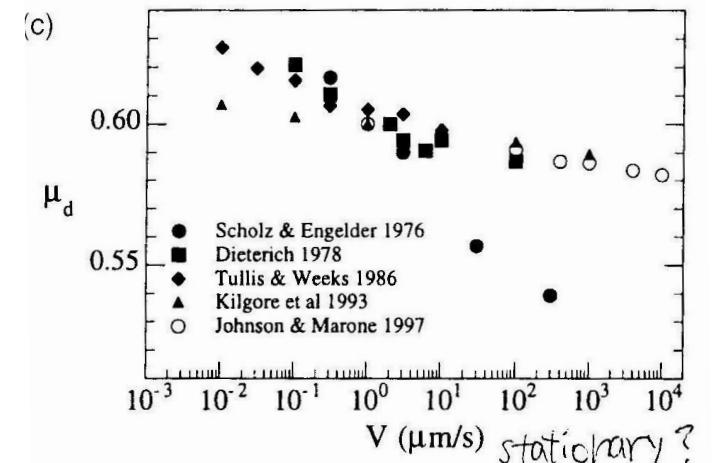
# 「すべり遅れる部分は摩擦の性質が他と違う」？

プレート境界には正と負の速度依存性を持つ領域がある。  
正の領域ではスルスルと沈み込み、負の領域では強く固着する

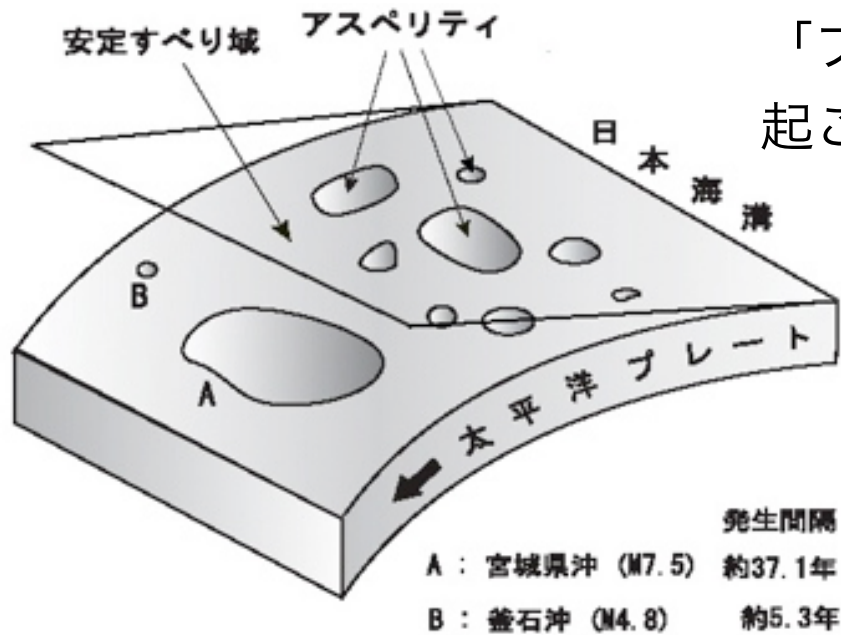
以下3つの問いに同時に答えることが可能

1. なぜすべり遅れる領域があるのか？
2. なぜすべり遅れる場所は決まっているのか？
3. なぜすべり遅れ箇所は急激にすべるのか？

固有地震の震源では負の速度依存性の摩擦



# アスペリティモデル



「プレート境界には、大小さまざまな固有地震を起こすパッチが分散している」というモデル

それらパッチを「アスペリティ」と呼ぶ

「アスペリティ＝速度依存性が負の領域」

暗黙の仮定：アスペリティの一部だけで地震を起こすようなことはない  
(そうでないと固有地震ではなくなる)

アスペリティ＝地震の「原子」

# 素朴な疑問

1. どうやってそれが最小単位ということを知るのが？

実はもっと小さい構成要素からなっているのだが、  
たまたま何度も連動しただけではないのか？  
(極端な考え = 全ての地震は「連動地震」)

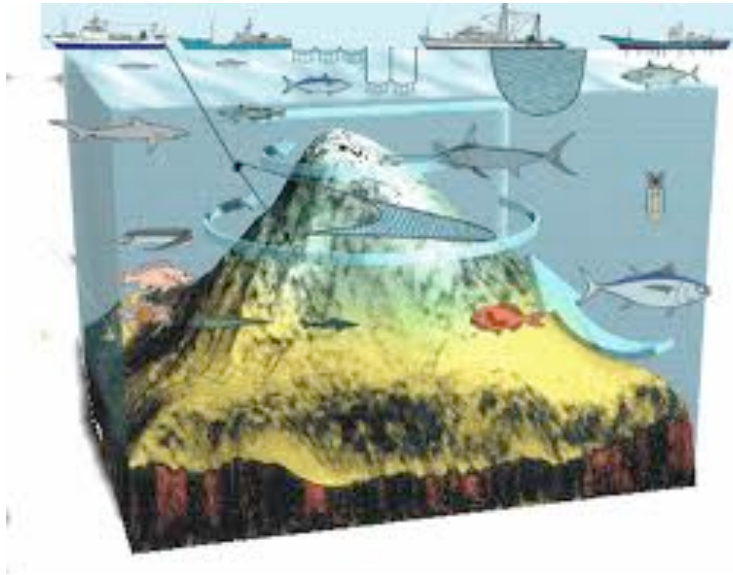
2. 実験室スケールでの知見は断層スケールでも正しいのか？

3. そんな大きなスケールにおよぶ不均一構造があるのか？

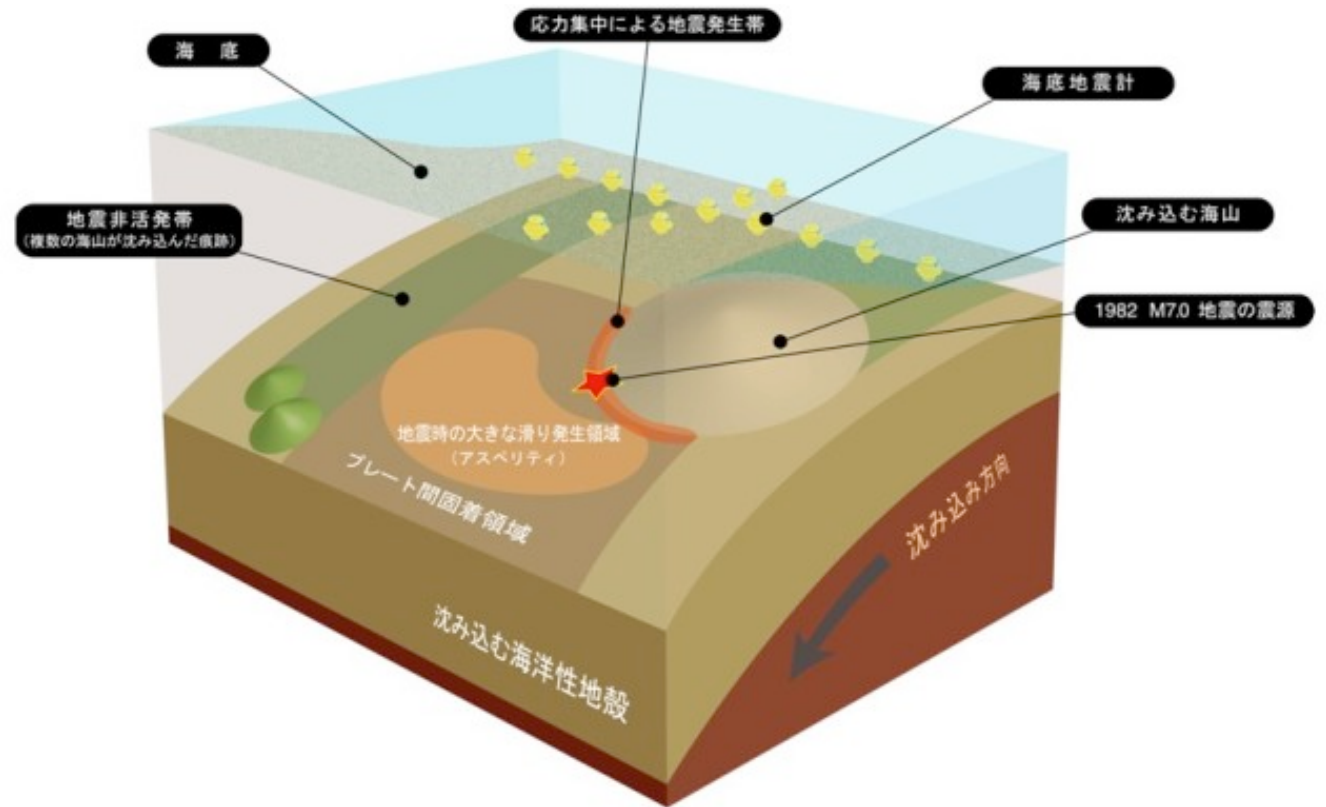
cf. 海山



# 海底の凸凹地形が沈み込むとアスペリティになる？



<http://rtseablog.blogspot.jp/>



<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/kimi/Projects/Ibaraki.html>

茨城県沖のリピーター (M7が20年間隔) は沈み込んだ海山の奥にある

(望月公廣など、2008)

## というわけで、

1. どうやってそれが最小単位ということを知ることなのか？
2. 実験室スケールでの知見は断層スケールでも正しいのか？
3. 巨大スケール不均一構造の起源？

・・・などの様々な疑問はあるが、実験とも観測とも整合性が良いし、他にもっと優れた考えがあるわけでもないので、日本の地震学ではこのモデルを信じて話を進めてきた

アスペリティの大きさも周期も過去の地震から分かる

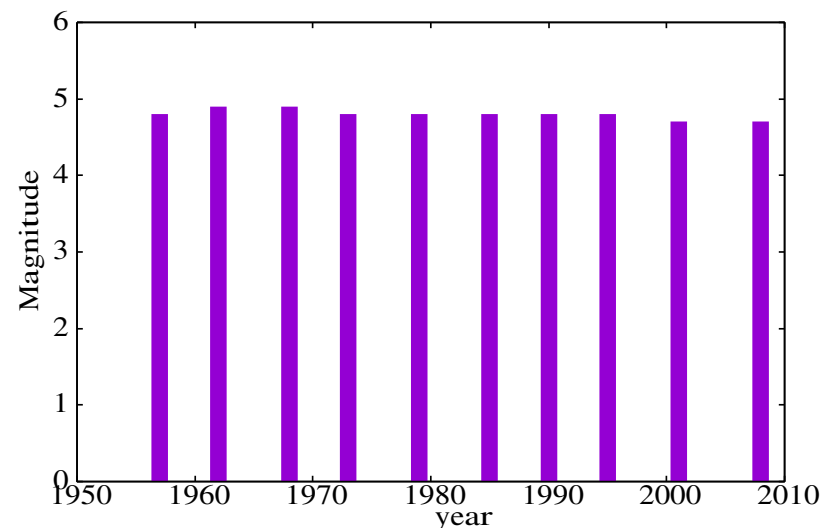
宮城県沖ではM7.5、三陸沖はM8（明治三陸、昭和三陸）

# 固有地震は予知が出来る？

## NHKクローズアップ現代「予測できなかった超巨大地震」より

(東北大グループが) 中でも注目したのが岩手県釜石沖のアスペリティです。このアスペリティを分析するとマグニチュード5弱の地震がほぼ同じ間隔で繰り返し起きていることが分かりました。長谷川教授たちはある予測を打ち出します。2001年11月末までに99%の確率でマグニチュード4.8前後の地震が起きる。

そして、11月。予測どおりの地震が発生します。アスペリティを調べれば、地震の規模や発生時期を予測できるのではないか。研究者たちの期待が高まりました。



アスペリティモデルでは、東北では宮城県沖(M7.5)や三陸沖(M8.2)などの固有地震を想定していた

少なくとも宮城県沖地震はかなり高い確率で起こるとは言っていたが、その規模はM7.5と予言していた

M9が起こるなんて夢にも思っていなかった

**起こったのはM9で、三陸から茨城県沖まで全部すべった  
何が間違っていたのか？**

# 可能性

1. 東北の小アスペリティ群は、実は更に巨大なアスペリティに埋め込まれていた一部だった？

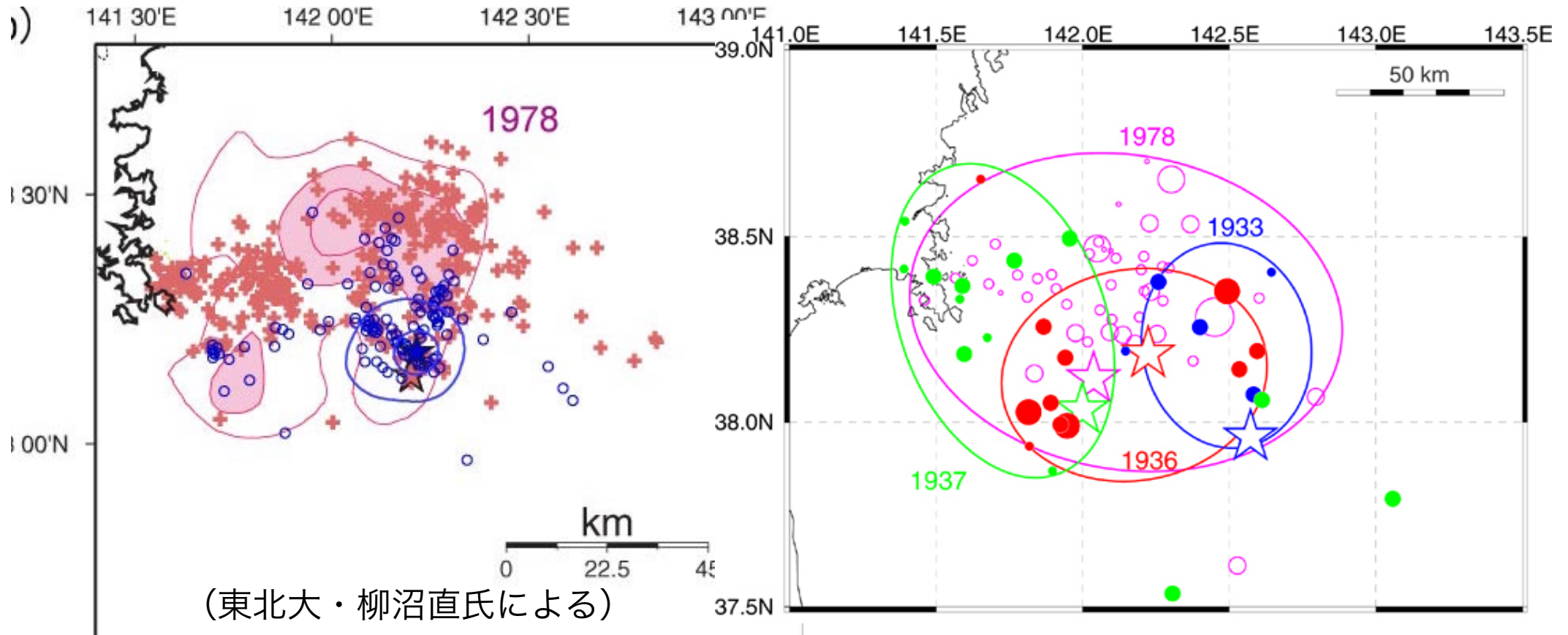
- ・アスペリティ内部に微細構造がある？
- ・それだとアスペリティ概念自体よくわからなくなる（小さい方にも無限に続く？）
- ・ラスボスはいつ出てくるのか？（最大地震は起こってみるまで分からない）
- ・結局、アスペリティのご利益は何もなくなる

2. 実験室スケールでの知見は断層スケールでは正しくない？

3. プレート境界にそんな長波長の静的不均一性はなく、動的な不均一性で自発的に大小さまざまな応力不均一性ができるダイナミクスがある

固有地震はたまたま局所的なリミットサイクルに落ちている？

# アスペリティの曖昧さ：宮城県沖の場合



実は、三つの部分からなっているのかもという話は2005年からあった

2005年8月、2011年3月9日のは部分的破壊？

## サブ課題2 長期予測と短期予測の違いと、それぞれの論拠

- ・ 地震予知研究の目標は、地震現象を理解し、モデル化に基づく予測シミュレーションとモニタリングを総合化した「総合予測システム」を構築。「地震がいつ、どこで、どの程度の規模で発生するか」の定量的な予測
- ・ 現在の目標到達度は、プレート境界の大地震の場所と規模の予測については、一定の見通しが得られた段階。時期の予測に関しては、一般に**長期予測**の段階

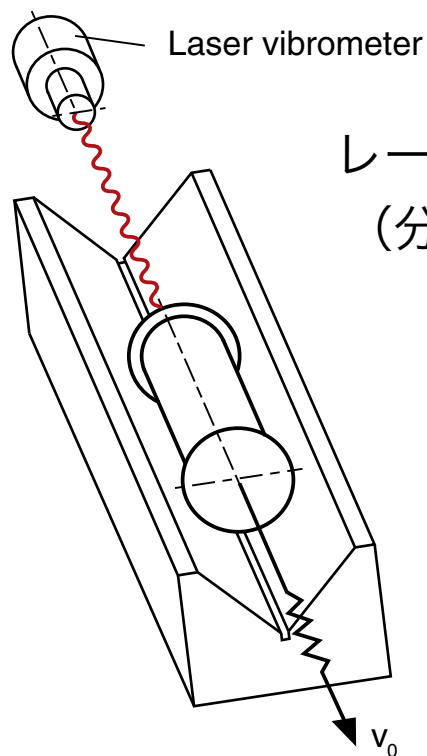
「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」（平成20年）

長期予測：「今後30年以内にn%の確率で発生」

短期予測：数時間～1ヶ月以内にかんがりの確率で来る

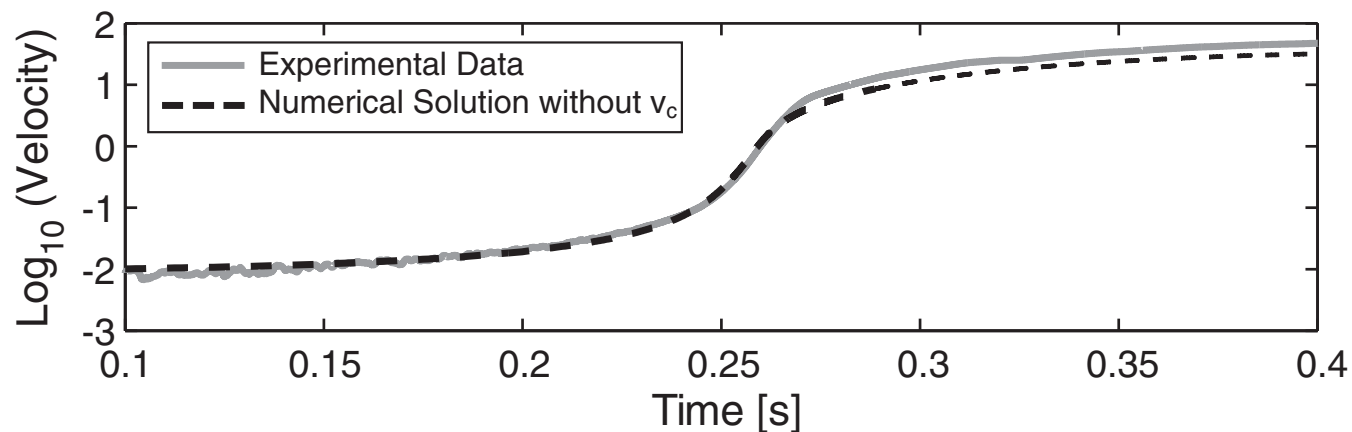
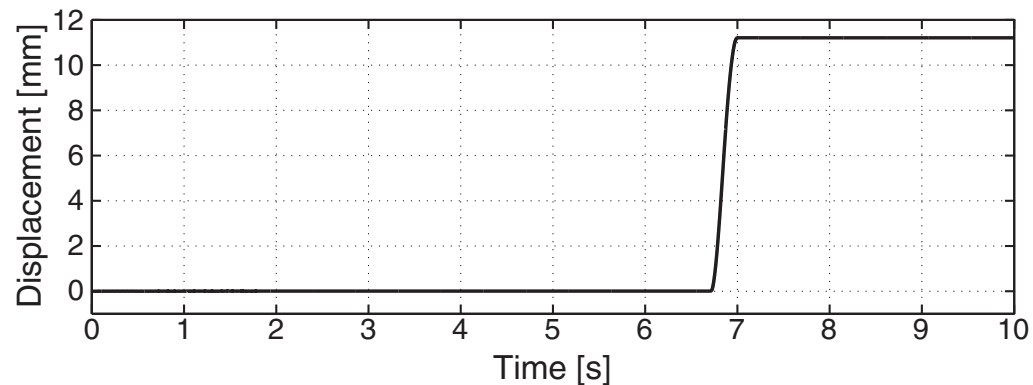
（具体的に避難計画とか新幹線を止めるとか検討するレベル）

# 実験室：不安定なすべりも実は連続的な加速である



レーザー変位計  
(分解能8nm)

V. Popov et al. 2012



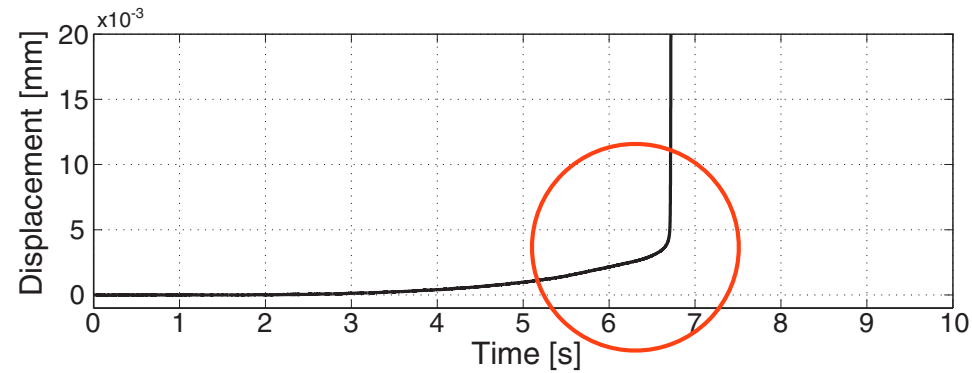
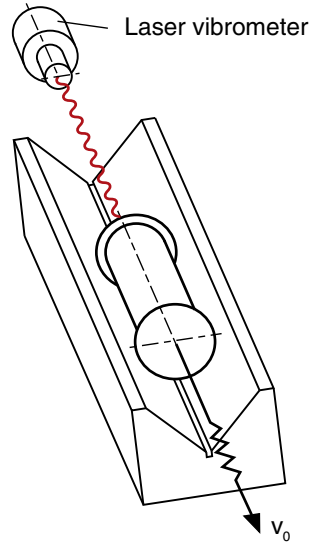
少しでも力がかかっていれば目に見えないくらいゆっくり動いている (クリープ)

不連続に見える不安定すべりも、実は連続的に加速していつている



# 「短期予測」と「長期予測」の違い

短期予測：地震すべりに先行する微小な地殻変動を検知



(東海地震)

科学的根拠：実験室レベルでの摩擦法則

地震前に地殻変動が起こる

それが地下水の異常やラドン放出、電磁異常を起こす

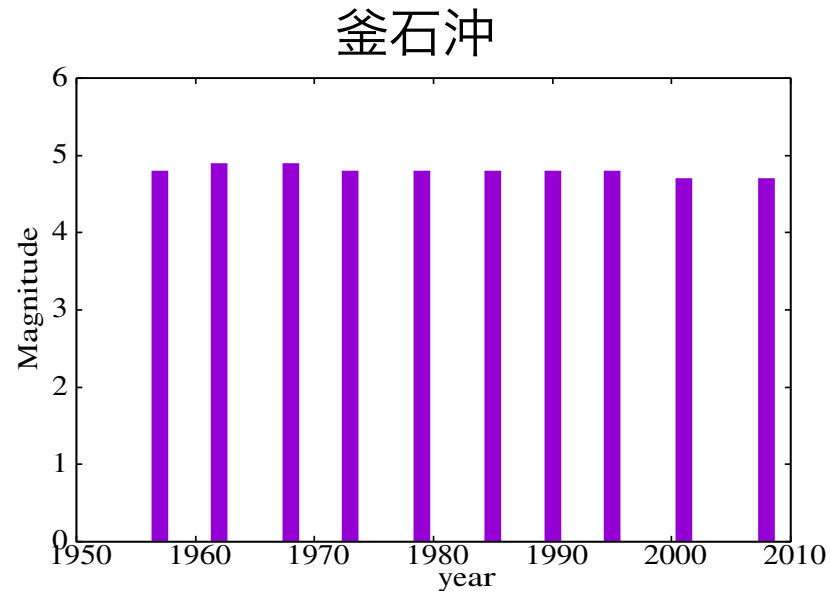
いずれかをキャッチすれば地震が予知できる

# 長期予測の考え方

前提は「地震は同じ場所・同じ規模で繰り返す」（固有地震）

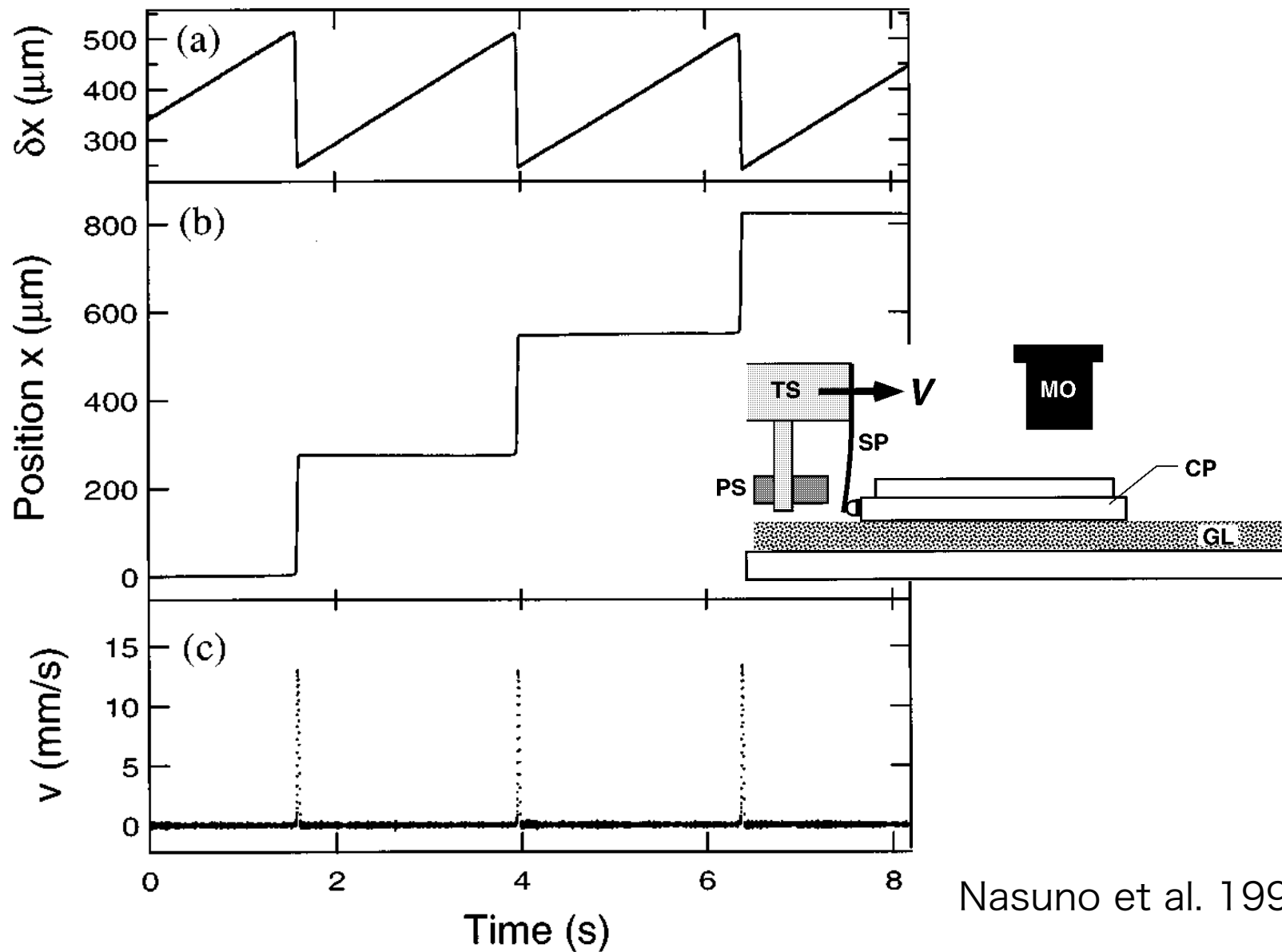
前回とだいたい同じくらいのひずみが溜まることが必要  
→ ひずみ速度が一定ならば、固有地震は周期的に起こる

プレート境界型地震ではある程度経験則（とくに東北）



# 静止摩擦力も動摩擦力も毎回だいたい同じ場合 = 予知できる

(ただし駆動速度一定の場合)

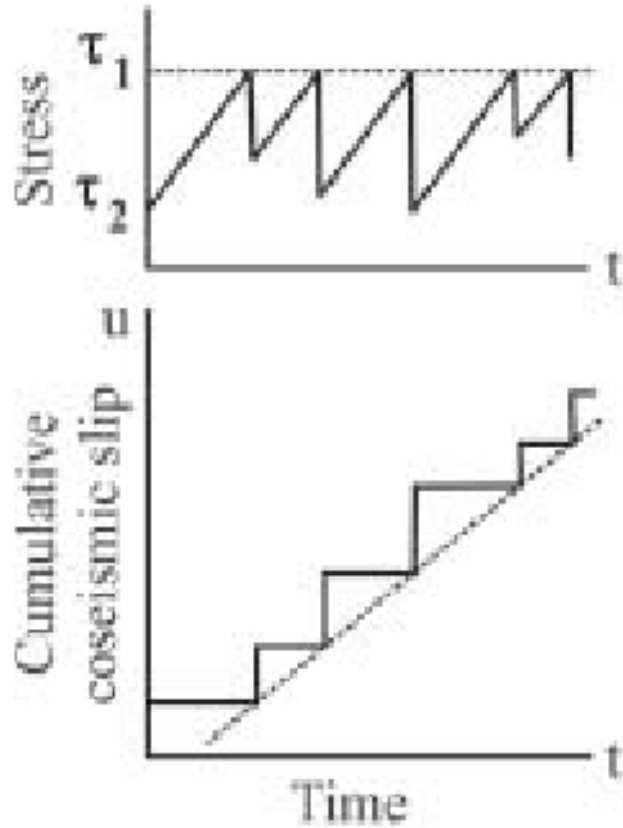


Nasuno et al. 1998

# 実際は、静止摩擦・動摩擦のどちらかが揺らぐ可能性も

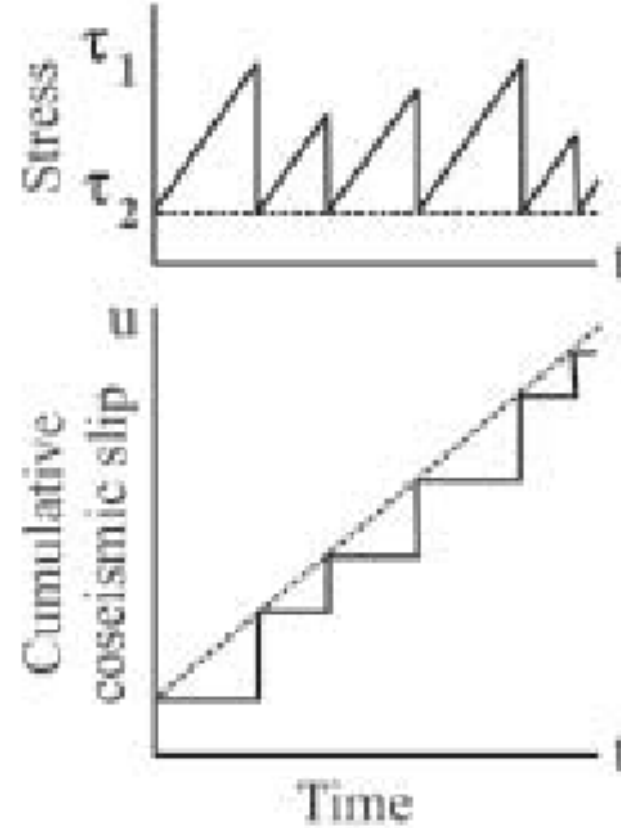
## Earthquake Recurrence Models

Shimazaki & Nakata 1980



Time Predictable

静止摩擦一定モデル



Slip Predictable

動摩擦一定モデル

## 内陸断層では固有地震仮説は全く非自明

地震としては1回の観測のみ。あとは地層の調査で推測するしかない。  
(そうして推測される繰り返し周期は数百～数千年)

### 例：新丹那トンネル建設の論理

北伊豆地震1930によって掘削中の丹那トンネルが左右に2.7mずれてしまった  
同じ丹那断層を横切る予定の新丹那トンネルをどうする？

1. 地形（谷など）が丹那断層を境に1000mずれている。2. 湯河原火山由来の50  
万年前の溶岩も断層を境に1000mずれている。3. 約50万年で1000mずれたと仮  
定。4. 一回の変位量は1930年と同じ約2mと仮定 5. すると周期は約1000年!

その後の丹那断層ボーリング調査により、前回の地震が841年であることが  
確認された！

参考：「日本の地震災害」伊藤和明（岩波新書）

地震は有史以来観測していない場合でも、周囲の地殻応力状況と地形、地層の痕跡から活断層と判断する

「過去260万年に少なくとも一回の地震を起こした痕跡があり、今後も活動する可能性のある断層」

「活断層とは何か」 (池田・島崎・山崎) 東大出版

このような場合にも固有地震概念を敷衍することはたいへん大きな仮定とみるべき

# 固有地震発生は確率過程

一つの地震が他の地震を引き起こすこともある

原因：地震波・微小な応力変化など → 5/16の講義

このような擾乱の効果により周期は揺らぎうる

→ 固有地震発生は確率過程とする

例：宮城県沖地震過去の記録：1793、1835、1861、1897、1936、1978

周期平均37年、標準偏差5.9

釜石沖よりはだいぶ揺らぎが大きい

“The government knows where Japan's big one will most likely strike. This is a country where the trains run on time, and earthquakes are supposed to do the same.”

ナショナルジオグラフィック2006年4月号 「The next big one」

これはさすがに言い過ぎ



# 長期予測＝統計モデリング

固有地震の発生をどのような確率過程とみなすか？

再来周期 $T_i$ は独立な確率変数と仮定（更新過程）

= 再来周期の確率分布関数は履歴に依存しない

確率分布関数  $f(T; \Lambda_1, \dots)$

パラメタ $\Lambda_i$ に過去の履歴は不要

# 再来周期の確率分布

主観的に定められた確率分布：通常はBrownian 1st-passage time分布を利用

$$f(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right)$$

パラメター2つ：

$\mu$  = 平均値

$\alpha$  = (標準偏差) / (平均値)

データからパラメタを最尤法で推定

プレート境界の場合は各固有地震ごとに求める

内陸断層の場合、同じ断層が地震を起こす間隔は数百～数千年！

平均値 $\mu$ は、地質学的に推定された平均食い違い速度などから各断層ごとに推定（例：丹那断層のケース）

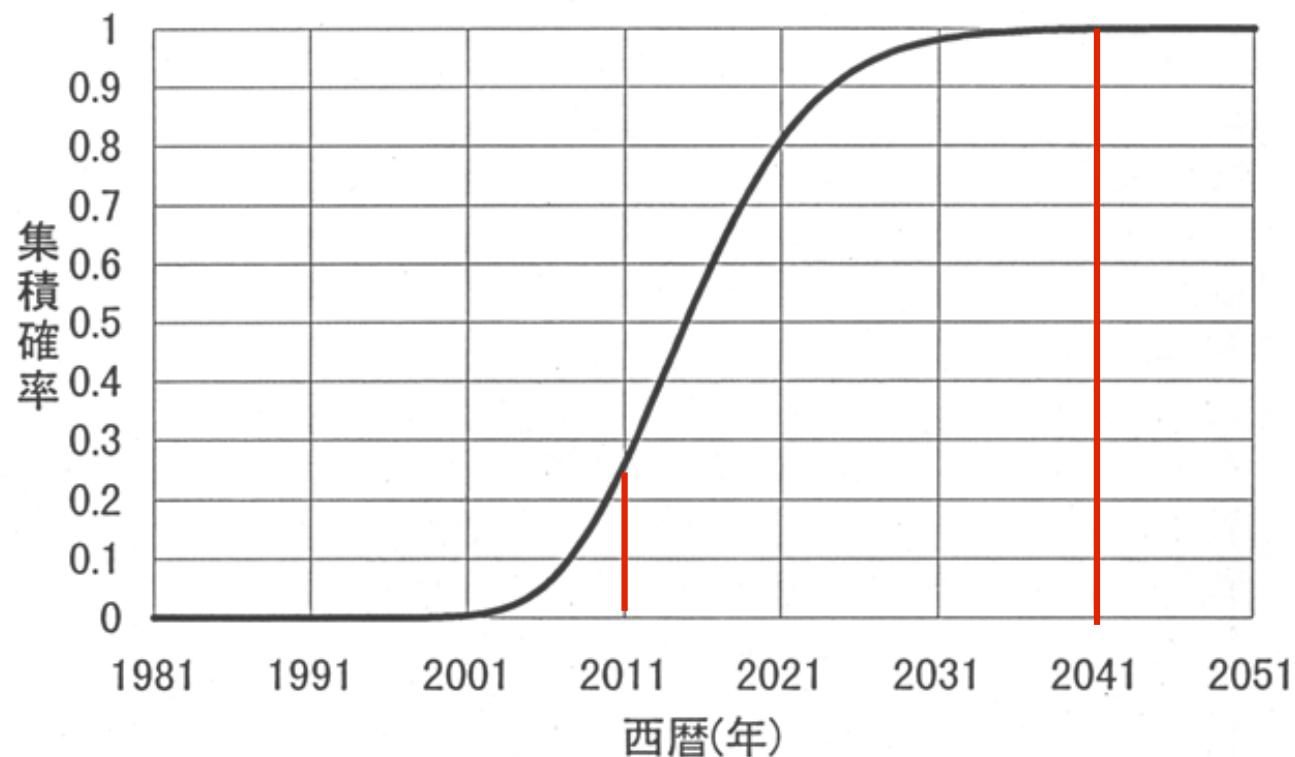
$\alpha$ はデータから決めるのは難しい。

比較的活動履歴が知られている内陸断層4つの例から求めた値0.24を全ての断層について仮定。

# 「宮城県沖地震」の発生確率評価

過去の記録：1793、1835、1861、1897、1936、1978

周期平均37年、標準偏差5.9

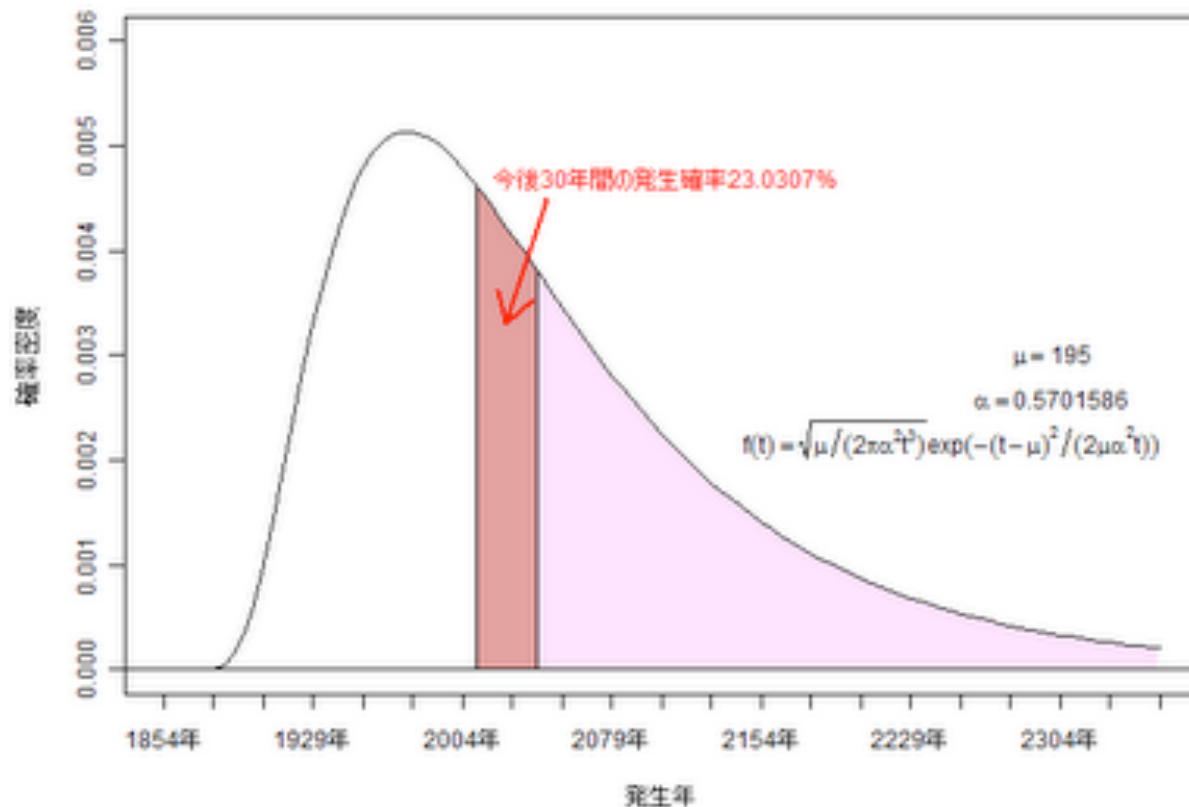


2011年から30年以内に地震の起こる確率=99%

$(0.99-0.26)/(1-0.26) = 0.99$  地震調査研究推進本部、2011年1月11日

東海地震は歴史上、684年、887年、1096年、1498年、1605年、1707年、1854年の7回が観測されている。間隔のサンプル数6。平均周期195年。周期の標準偏差は111年。（平均値と標準偏差が同程度！）

$$f(t) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right)$$



# 長期予測の不思議

仮定した確率分布はどれくらい正しいのか？

最尤法で決めたパラメータは？

統計モデルにすぎないのだから、  
その予測能力を評価しなくてはいけない。

→ 新しいデータが出るのが物凄く遅いので、難しい

→ 検証できない統計モデルにどれくらい意味があるか？

すべり遅れをモニタリングしてシミュレーションで予測すれば補える？

「摩擦法則」がカギ：短期予測と同じ

プレート境界の摩擦法則なんて分かるのか？

# 短期予測・長期予測のまとめ

## 短期予測：室内実験スケールではほぼ間違いなくできる（クリーブ）

- ・ 実際の地震で加速的地殻変動はこれまで検知されていない
- ・ 前震はあるが、本震が来て初めてあれが前震だったと分かる
- ・ 電磁氣的・水理学的異常はどう考えるべきか？

→ 5/16の講義

## 長期予測：純粋な統計モデル

固有地震仮説に基づく

「周期の揺らぎはBPT分布に従う」という統計モデル

固有地震仮説はアスペリティという「実体」が支える  
(摩擦特性が周囲と異なる) ← 室内実験の知見

ほぼ周期的 = プレート沈み込み速度一定の仮定

# 2011年までの地震学にとって 東北太平洋沖地震は何を意味するのか？

1. 「アスペリティ」は地質学的にみれば**すごく短いタイムスケールでの経験則**に過ぎず、信用できなくて当たり前

(地震観測・測地観測いずれも100~150年くらいの歴史)

2. 実験室の知見からの安易な類推は危険

(例：浅いところは砂泥なので固結が弱い・固着しないと思っていた。  
実際は浅いところが大きく滑って巨大な津波に。浅い部分も固着している  
ことを示す測地データもあったが、先入観が邪魔をして結論には至っていなかった)

3. 結局、地震が起こってみるまでアスペリティはわからない

「すべり遅れが地震を起こす」ことは間違いないが、測地データは  
たかだか100年。M9クラスは1000年。

そう考えると、東北M9地震は地震学・測地学へ新しい課題を提供したのであって、それは地震学の敗北でもなんでもないのでは？

想像：アスペリティ概念を、仮説ではなく、十分確立した知識のように（地震学の精華か何かのように）思い込んでいた？  
また、それを政府などに喧伝していたからこそ打ちのめされた？

「地震予知研究も細分化しているが、近年アスペリティという新たな概念によって統合化されつつある」

「この10年の進歩は、専門家だけでなく誰にでもわかる本質的なものだった」

「今、我々は意外とすごいことを知っているんですよ、皆さん」

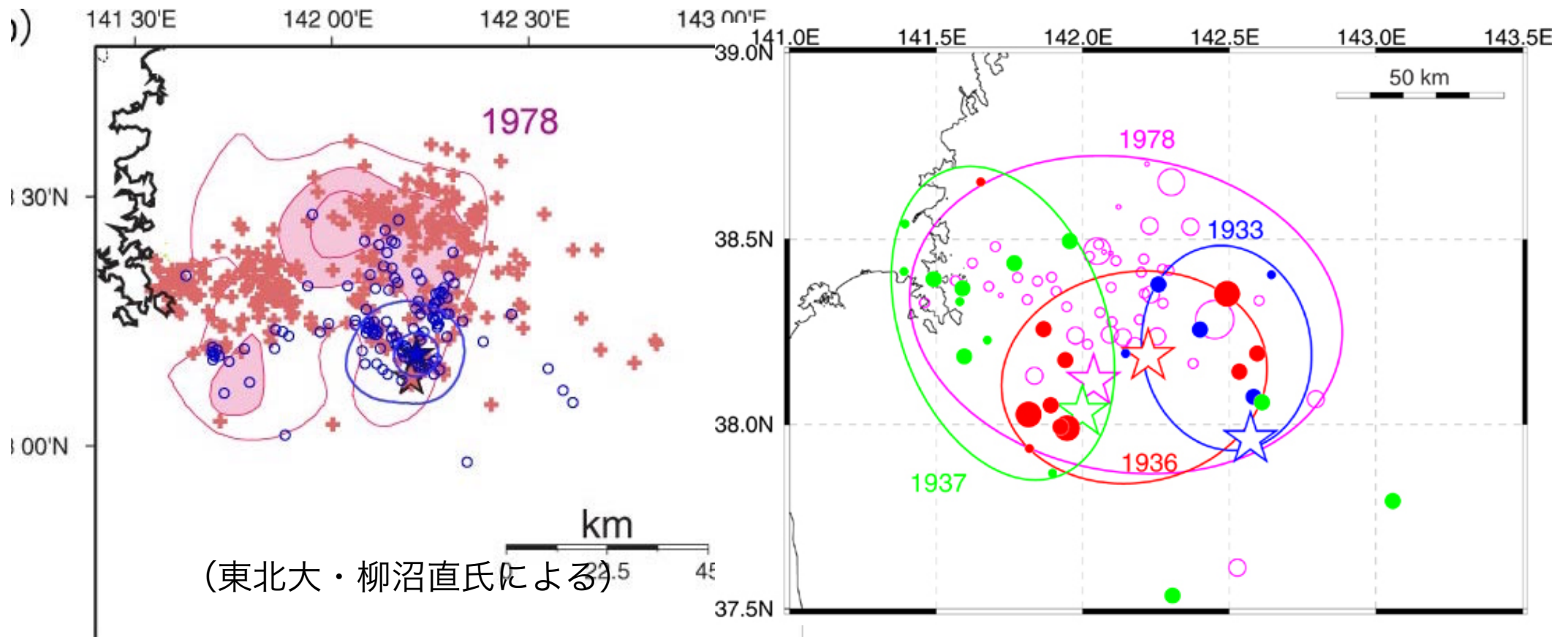
「地震予知の科学」(2007)より

「プレート境界の大地震の場所と規模の予測については、一定の見通しが得られた段階」

文科省「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」(2008年)



# ただし、東北M9地震以前にも兆しとなる事例はあった

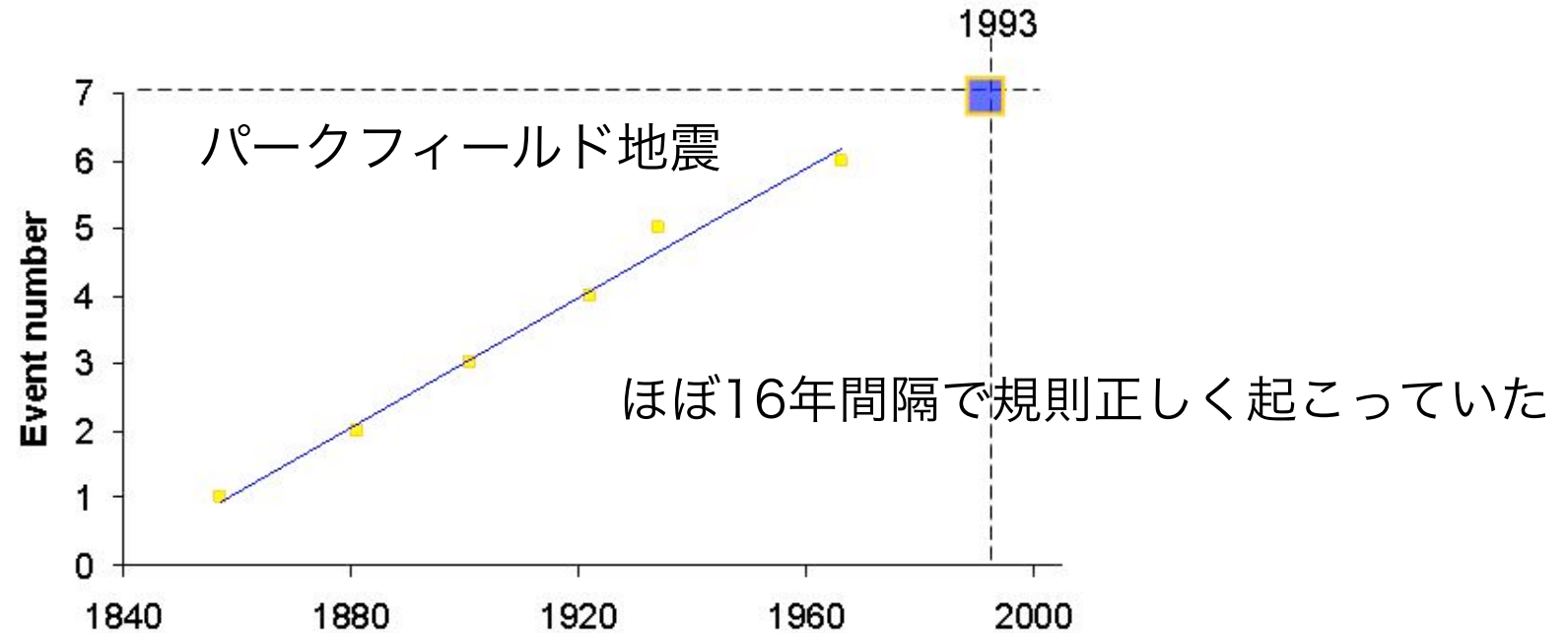


実は、三つの部分からなっているのかもという話は2005年からあった

2005年8月、2011年3月9日のは部分的破壊？

→ アスペリティ概念の曖昧さを示す事例

# 固有地震説：米国の場合



(釜石沖と同じようにして) 次の地震は1993年に起こると予想されていたが、次の地震が実際に起きたのは2004年！

地震の規模も、固有モデルから予想されたより小さかった。  
「すべり方」も前回までとは全然違っていた。

固有地震モデルの破綻：米国ではこれ以降「地震予知は不可能」という合意ができたようにみえる

# 他分野に耳を貸さなかった？

貞観地震の津波堆積物調査から、東北で500年周期くらいで超巨大地震が起きている可能性は地質学者からつとに指摘されていた。

(2006年佐竹ら)

→ 地震学者は地質学者の言うことをあまり真面目に聞いていなかった？

時間スケール：

(地震学) < (測地学) <<<< (地質学)

定量的精密さ：

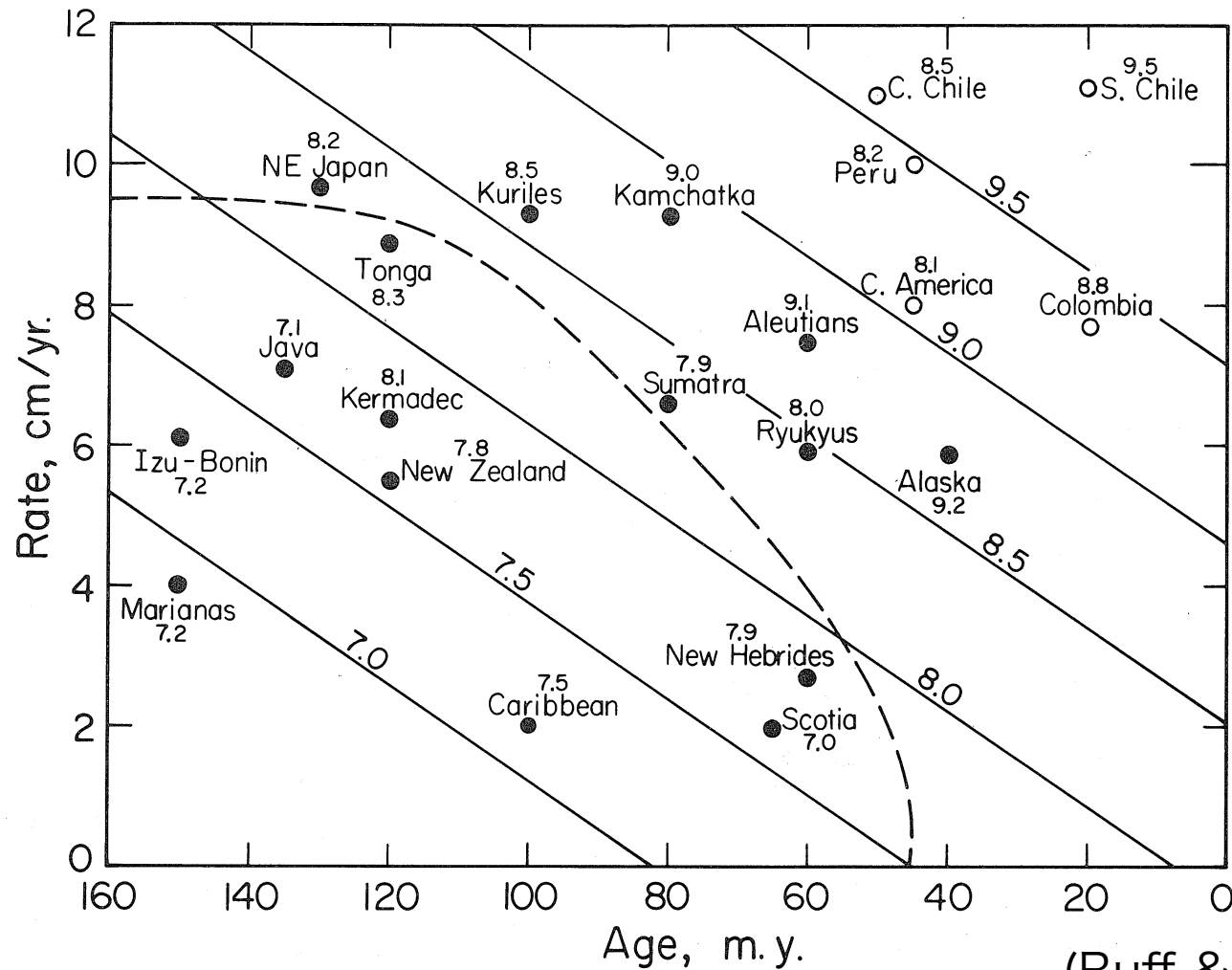
(測地学) >> (地震学) >>>> (地質学)

地質学を一段劣った学問と見なす地震学者もいたかもしれない

(地震学は線形の世界、地質学は非線形の世界。)

線形世界がより定量的なのは当たり前。「線形世界の傲慢」？)

# 世界の沈み込み帯の比較



(Ruff & Kanamori 1980)

M9クラスの巨大地震は、沈み込み速度がある程度速く、「若い」プレートでしか起こらないと考えられていた。

2004スマトラ島沖地震(M9.1)はあてはまらない

## まとめると、

1. パークフィールド(2004年)の教訓
2. 宮城県沖アスペリティの微細構造(2005年)
3. 貞観地震津波堆積物調査による東北M8.6の可能性(2006年～)
4. M9巨大地震はどこでも起こりうる(2004年スマトラ)

立て続けに固有地震概念の再考を迫られる事態が発生していたが、それを生かす時間的余裕がなかった（おそらくは精神的余裕も）

東北M9がとどめを刺した

# 方向転換

文科省の事業としての全国規模研究（500億～700億/年）

「地震予知のための新たな観測研究計画」（1999~2009）

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」（2009~2014）

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（2015~）

「予知」の字が消えた

# 実は、阪神大震災のあとも同じことが起こっていた

## 再び、「クローズアップ現代」

地震学の最大の目標は地震の前兆を捉え直前の予知を実現することでした。しかし、1995年 転機が訪れます。阪神・淡路大震災です。このとき、事前に警告を出すことができなかった地震学への批判が高まったのです。国は、**直前予知**を目指していた研究体制を改革。**各地で起きる地震の規模や発生確率を長期的に予測する**方針を打ち出しました。国の新たな方針のもと研究者たちは長期予測の基礎となる地震発生のメカニズム解明に力を注ぐようになったのです。

直前予知は諦めて、地震サイクル全体を理解することによって  
長期的リスク予測を目指すという方向転換

地震サイクル = 「歪み蓄積 --> 前震 --> 本震 --> 余震」

- ・ 方向性自体は間違っていないと思うが、アスペリティ概念を過信（盲信？）  
（サイクルという言葉自体が固有地震的）
- ・ 長期的時間スケールを相手にするなら、地質学との連携をもっと強化すべきであった

# アスペリティ概念がなぜこんなに過信されたのか？

室内実験による摩擦特性から説明がついた

→ ただし、スケール乖離の問題は真面目に考えられていなかった

(今でもあまり真面目に考えられていないが)

少なくとも、2004年以前は観測事実と整合するよう見えた

→ ただし、2004年以降の新しい事実は生かせなかった

一度確立された学説があると、それと相性の悪いデータは無視されやすい

(地震学だけでなくかなり一般的な問題)



「科学者は自説の検証作業に、たとえば10年単位の時間をかけて取り組むのだが一般の人は途中で耐え切れなくなって自説の殻にこもってしまうことがある。あるいは反例が見つかって棄却された仮説を捨てられずに最初の思いつきを繰り返すだけだったり、反例そのものを否定することにエネルギーを費やしてしまう。このような落とし穴には科学者すら陥ることがある。」

地震予知の科学(2007, 東大出版)

# 今後、何が必要か？

1. 地震学自体は成功しているが、それは起こったことを説明するだけ。

使っているのは線形弾性論にすぎない。地盤による減衰などの問題に関しては、経験的グリーン関数や様々な経験式を使っている。

2. 滑り方の予測に関しては、摩擦や破壊などに関する物理が必要。

3. 地震発生の予測に関しては、歪み蓄積過程まで含まれるので超長時間の現象であり、地質学との連携が必要（過去の地震の知見も）

地質学自体、大変形レオロジーの問題なので、非線形物理との相性は良い

4. 確率過程と見なすなら、統計学との連携も必要（統計力学とも？）

- ・ 統計学の尾形良彦氏がETASモデル1988を発表しても完全に黙殺していた
- ・ アメリカで流行りだしてから日本で受け入れられた

→ 5/16の講義で

## 冒頭の「地震学の敗北」宣言について

2004年以降、固有地震仮説を疑わせる事例は次々に出てきており、本来ならその時点で「仮説の敗北」を認めて修正すべきであった2011年のM9地震が起きてから初めてそう言いだしたのは、それらの反例を対岸の火事として真面目に考慮していなかったから？

→ まず、「敗北」の主語は「アスペリティ仮説」であるべき

→ 「アスペリティ仮説」を捨てられなかったことが貞観地震の受容の遅れにつながった？

→ アスペリティ仮説を捨てられなかった「私」が敗北したのであり、その責任を「地震学」全体に押し付けるのは欺瞞だろう

(M9以前からアスペリティ概念に強い疑義を呈していた中堅はいた)

→ アスペリティ仮説を捨てられなかった「私」が敗北したのに、なぜ「地震学の敗北」などと言うのか？

(私＝地震学か？何らかの共同体幻想？)