

地震学講座

地震学の基礎（地震がわかる）02

平原和朗



講義予定

- 4月26日 1. 地球の内部構造と大地の動き
- 5月10日 2. 地震って？
- 5月24日 3. 日本の地震活動
- 6月07日 4. 短・長周期地震動、ゆっくり地震
- 6月21日 5. 東北沖地震 & 南海トラフ巨大地震
- 7月05日 6. 地震予測研究と今後の地震学

2019年5月10日(金)10:30-12:00

@香川大学創造工学部(林町キャンパス)講義棟1階 3101講義室

地震って

平原和朗

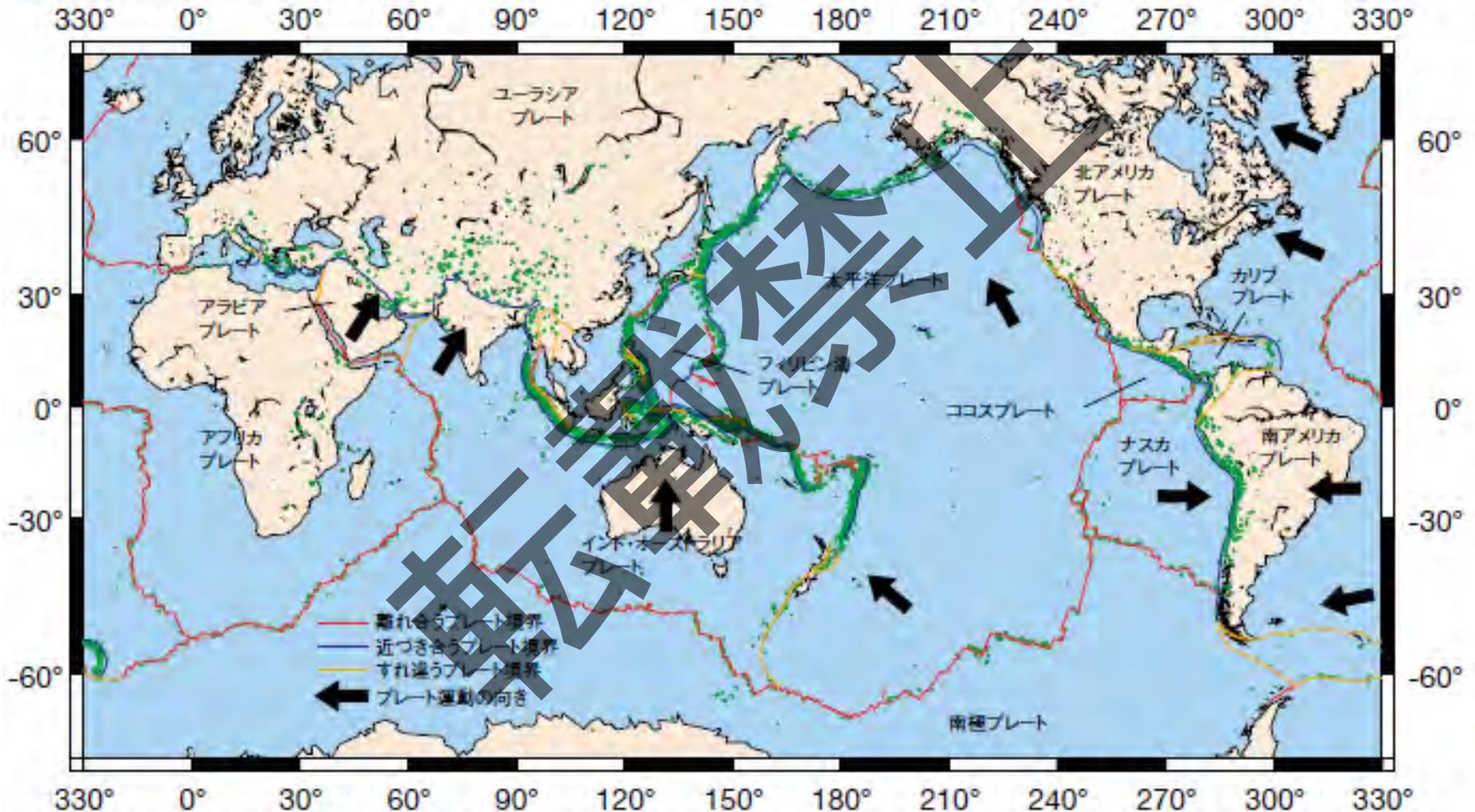


- ・地震はどこで発生
- ・プレート収束帯に位置する日本列島
- ・日本列島で発生する地震
- ・地震って？ 震源 マグニチュード 断層パラメータ
GR則 b値:地震前の変化
- ・震度 震度計 異常震域
- ・震源決定
- ・P波初動の押し引き 震源球 発震機構 ダブルカップル
- ・地震活動のパターン
- ・余震の時間的減衰
- ・緊急地震速報
- ・地震観測 高感度地震計 強震計 広帯域地震計
MOWLAS

地震はどこで発生？

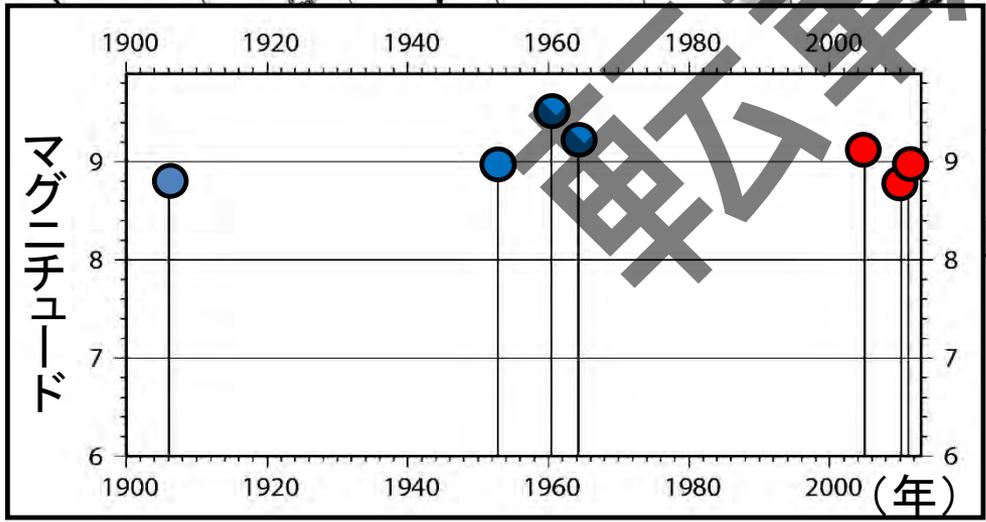
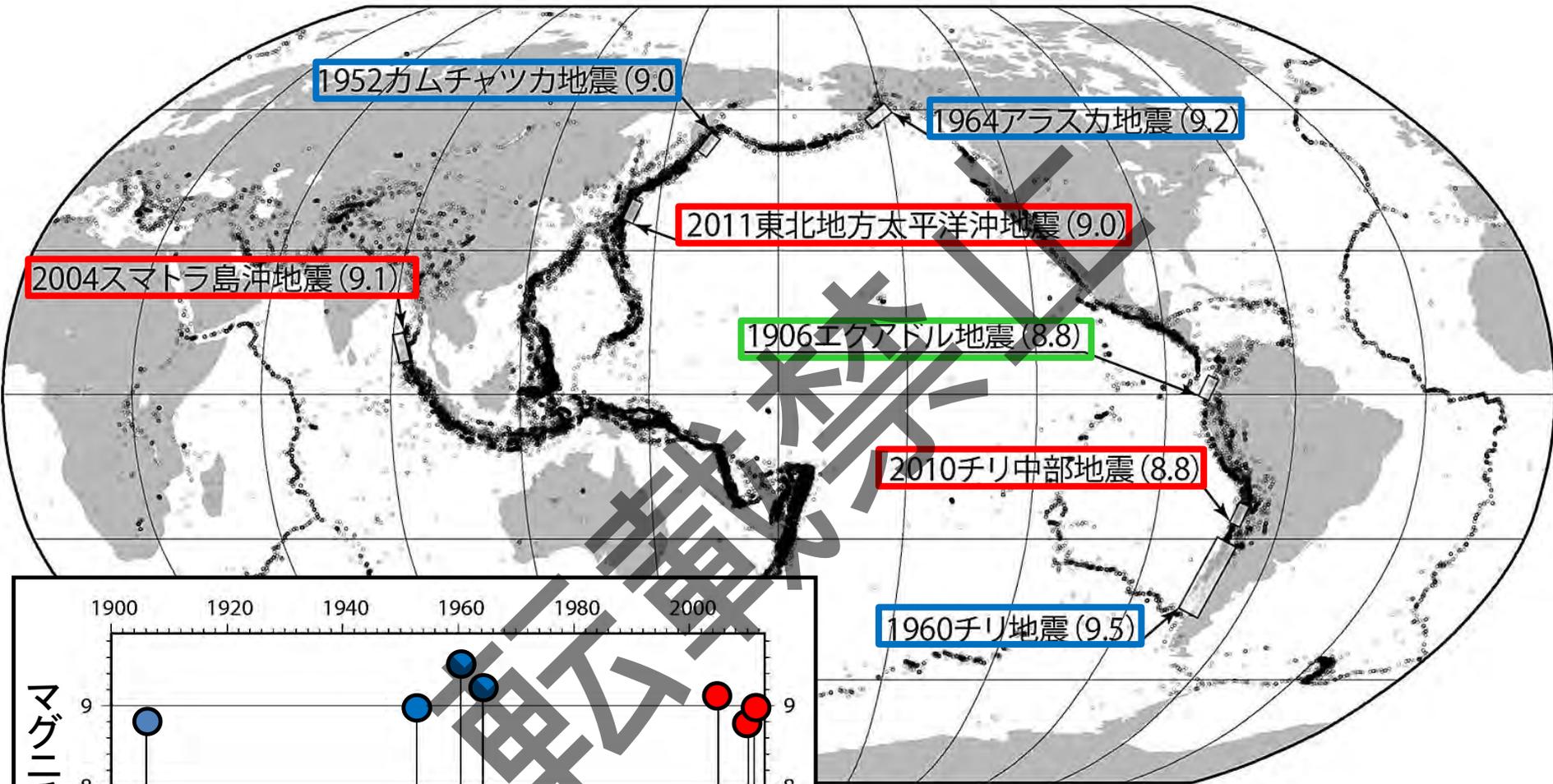
大きなひずみが蓄積するプレート境界で発生

■世界の地震分布とプレート境界



震央（緑色の点）は、USGS（米国地質調査所）の資料をもとに、1998 - 2007年、M5以上、100kmより浅い地震を表示（気象庁作成）。プレート境界は、テキサス大学地球物理学研究所（The PLATES Project）の資料をもとに作成。

世界の超巨大地震 ($M_w \geq 8.8$ 1900~2011)



**超巨大地震
活動期？**

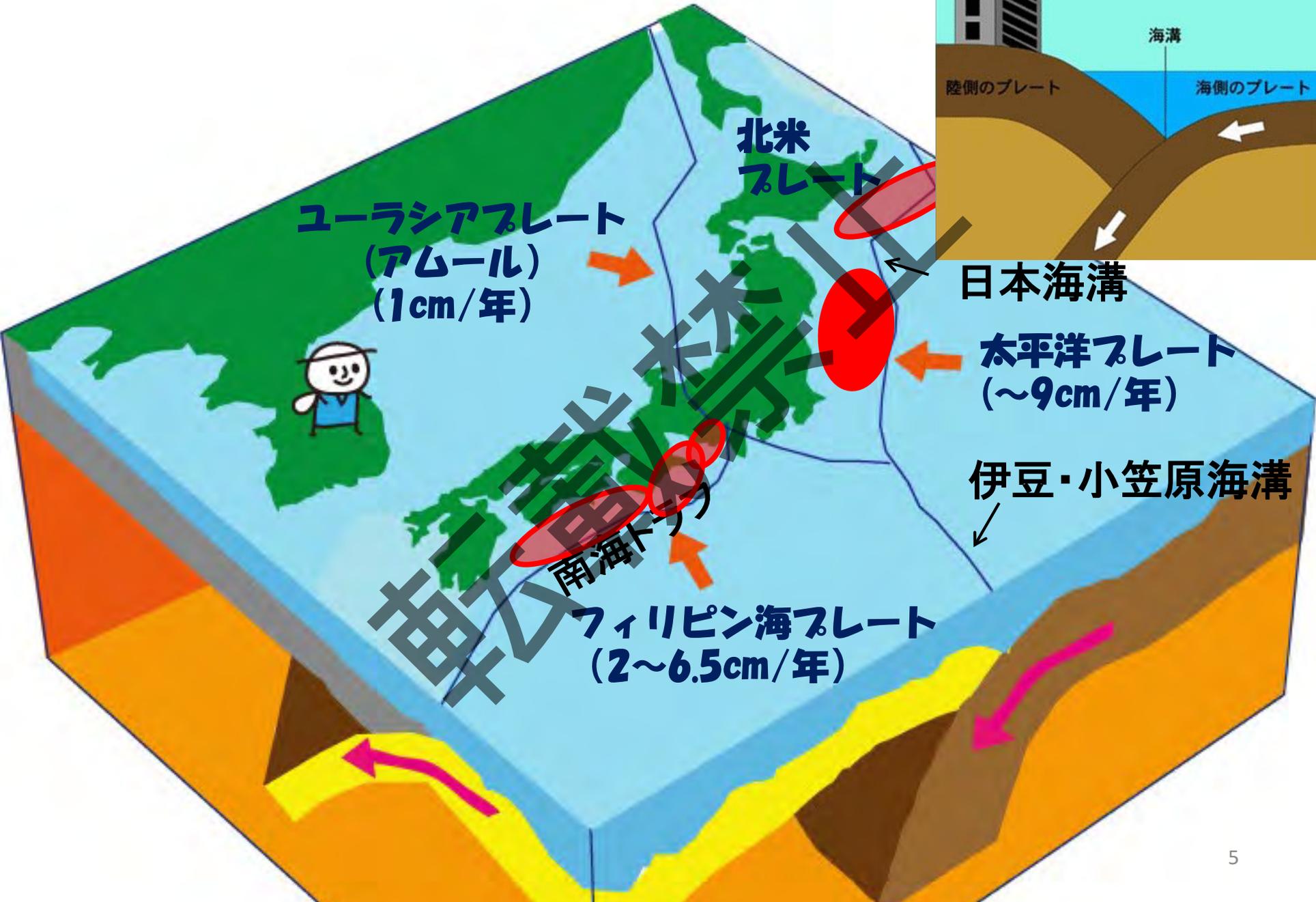
震央分布: $M \geq 5.0$

1973-2011 4

米国地質調査所(2012)

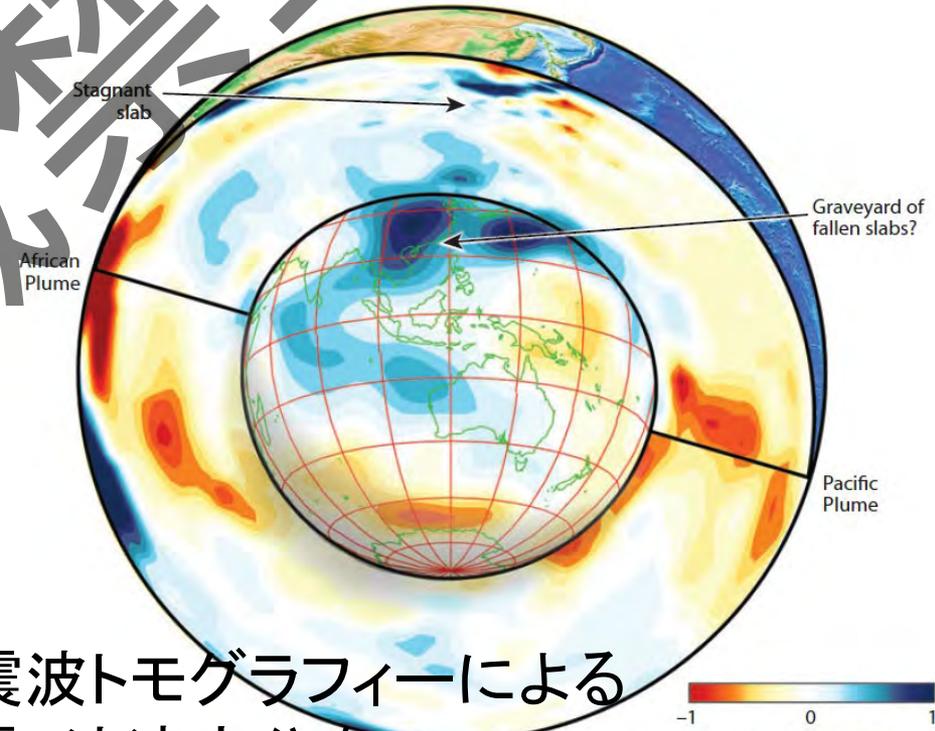
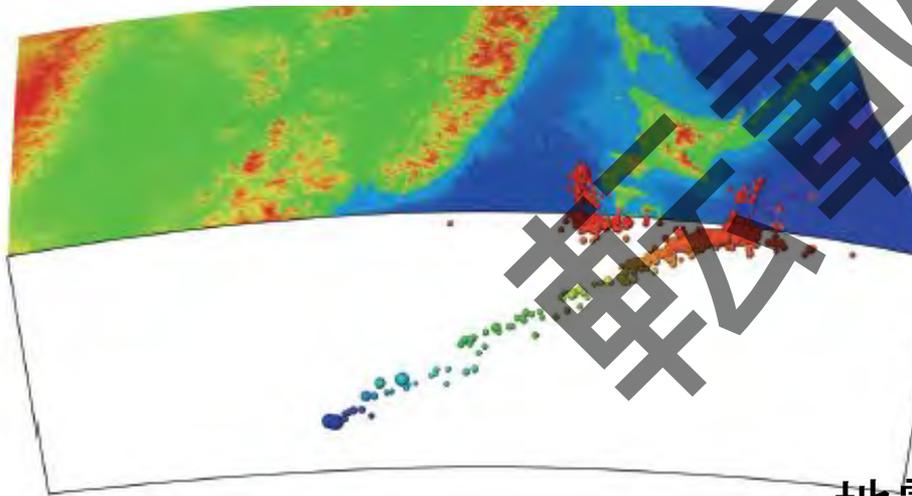
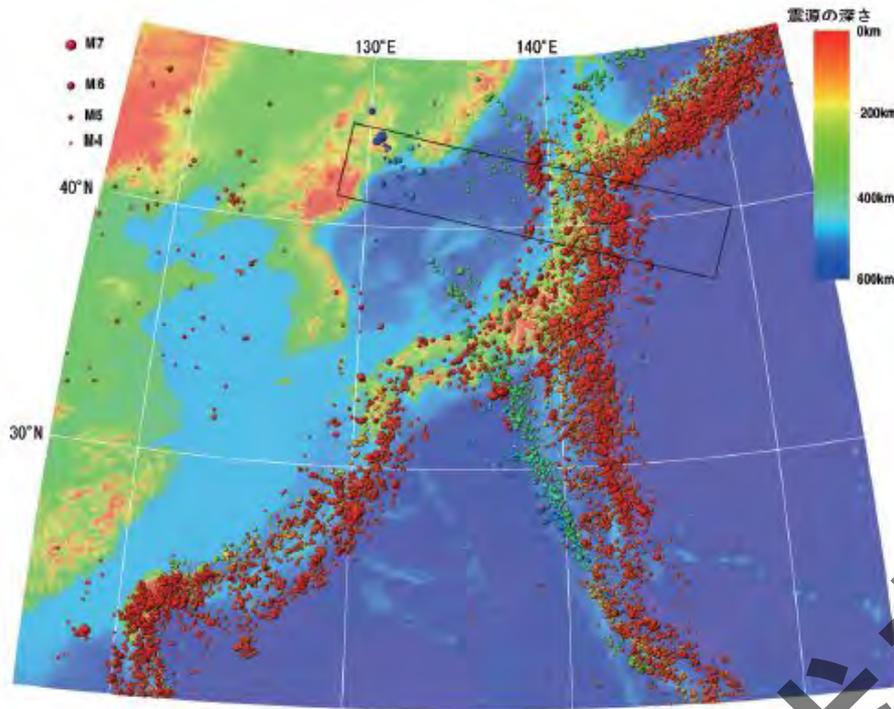
平原・澁谷(2012)より

プレート収束域としての日本列島



日本周辺の地震活動と沈み込むスラブ

1993年～2006年 $M \geq 4$
ISC(国際地震センター)データ
深さ600kmの深さまで地震が発生している。これらの地震の多くは沈み込む太平洋プレート内で発生している。



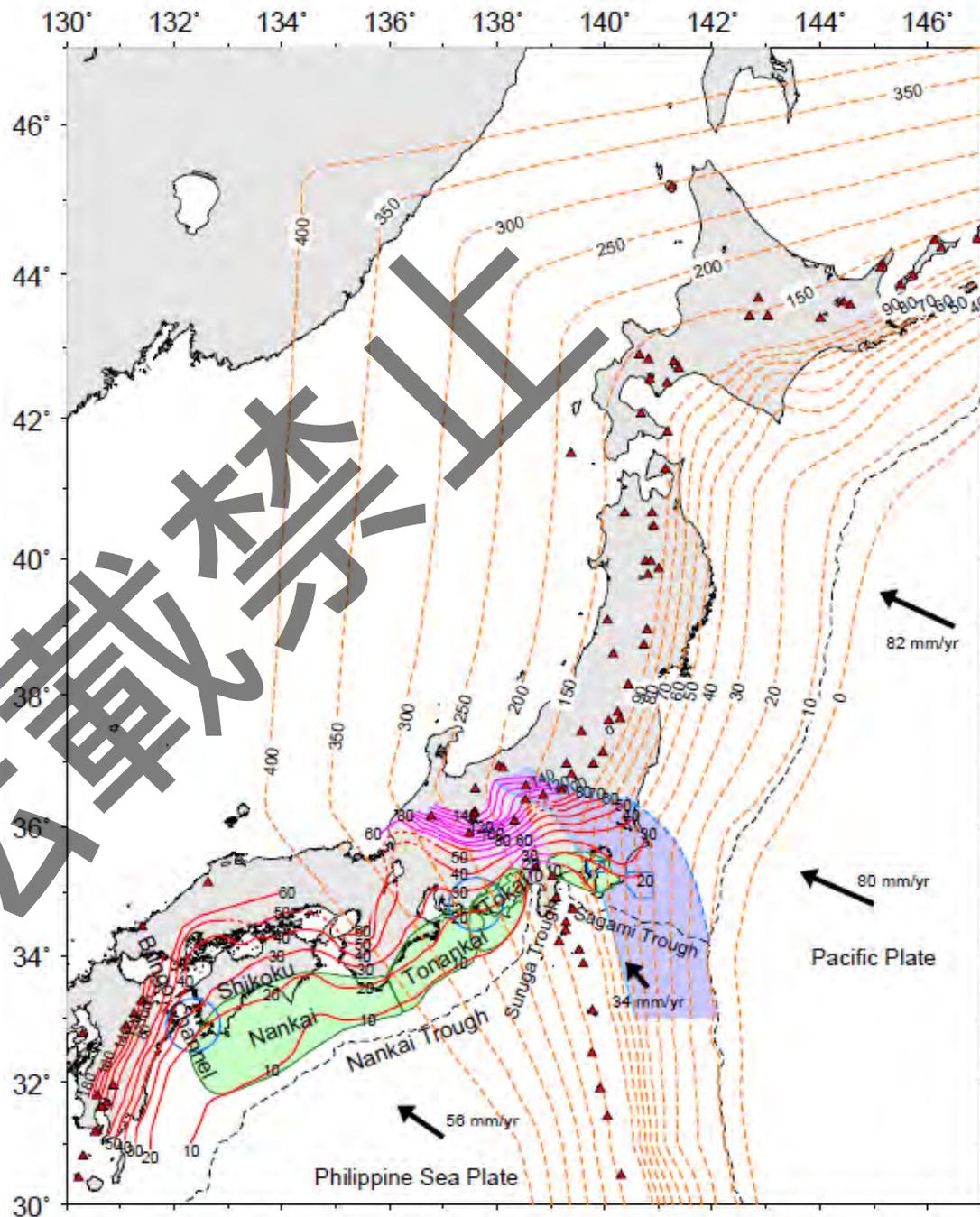
地震調査研究推進本部

地震波トモグラフィーによる
地震P波速度分布(Fukao et al., 2009)
ホット・コールドプルーム

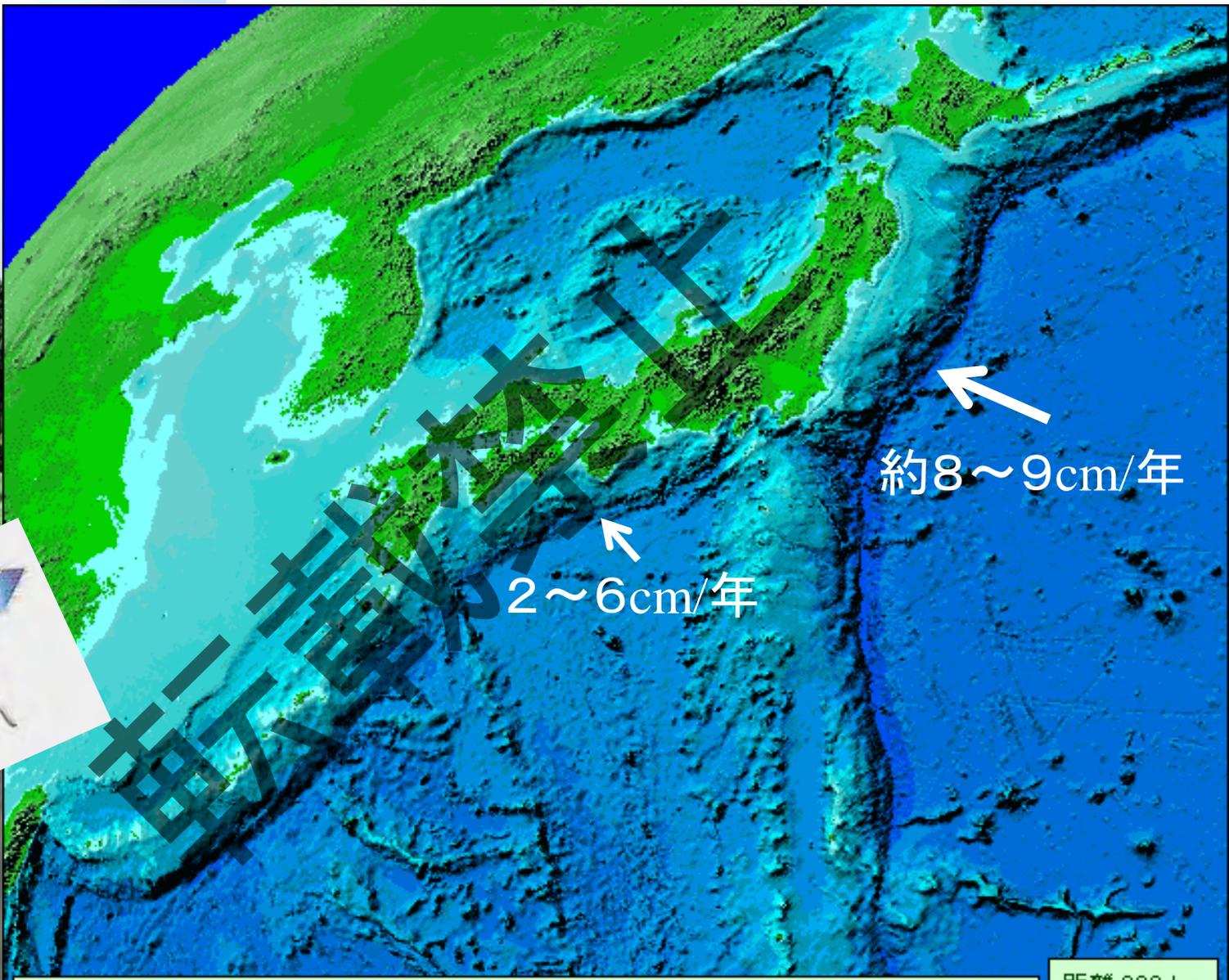
太平洋・フィリピン海プレート の沈み込み等深度分布

弘瀬 (気象研)

<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2ken/fhirose/ja/PlateConfiguration.html>



GNSS(Global Navigation Satellite System)で捉えた日本列島の変動



電子基準点がとらえた日本列島の地殻変動 期間:1996/4~1999/12 0/4

電子基準点の観測データから推測した水平変動量を誇張して表現しているため細部は正確ではありません。
海抜地形データはETOPO2(NGDC)を使用しています。 国土地理院 <http://mekira.gsi.go.jp/>

距離 200 km

変動 50 cm

40万倍誇張

変動する 日本列島

陸域GNSS(全地球航
法衛星システム)で捉え
られた水平変動
1997/01-1999/07
(Sagiya et al.,2000)

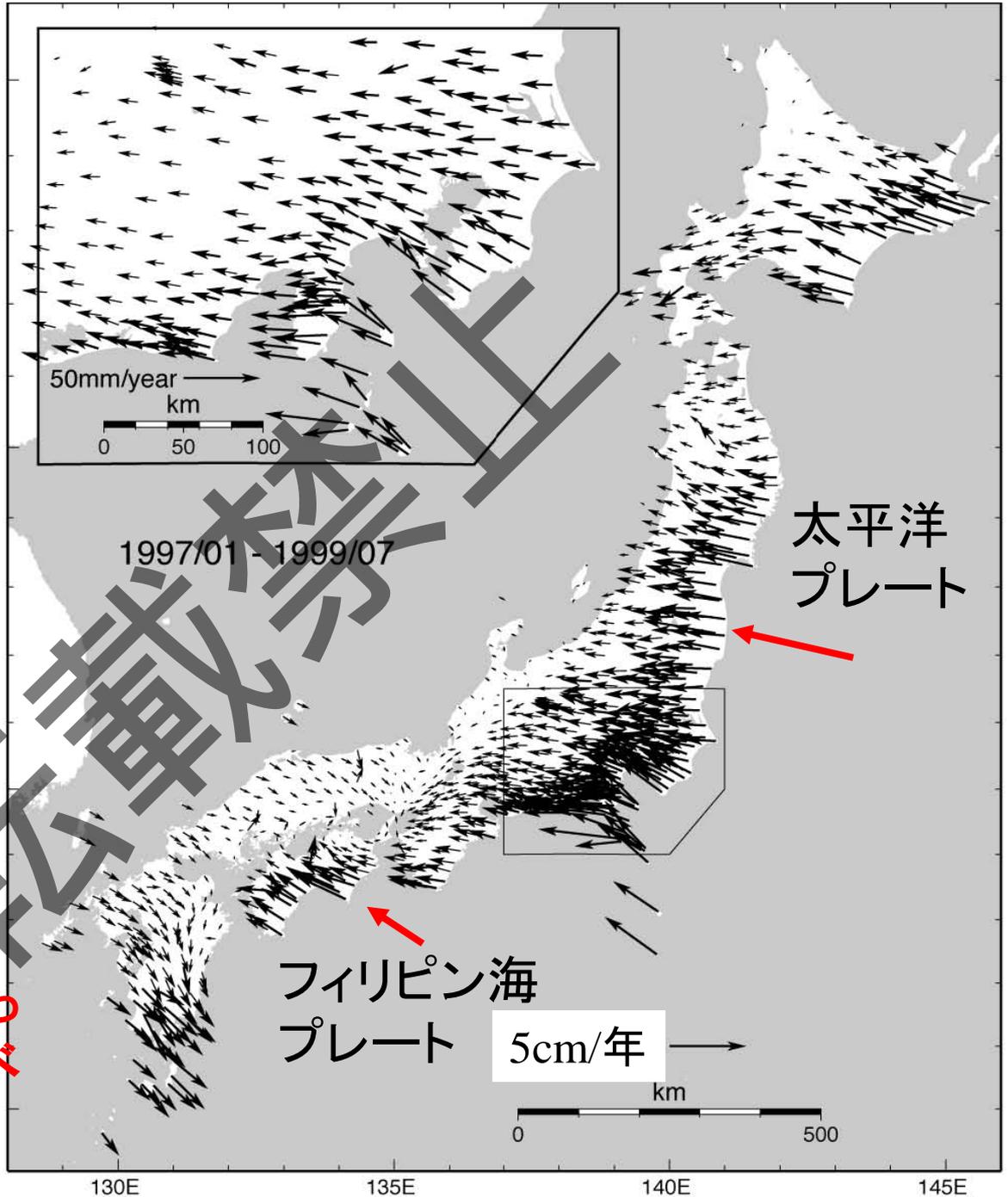
陸域GNSS
GEONET

海域GPS/A



日本列島の西への押され
方からプレート境界でのくっ
つき方(固着・すべり)(すべ
り遅れ・欠損)
が推定できる。

45N
40N
35N
30N



V_{pl}

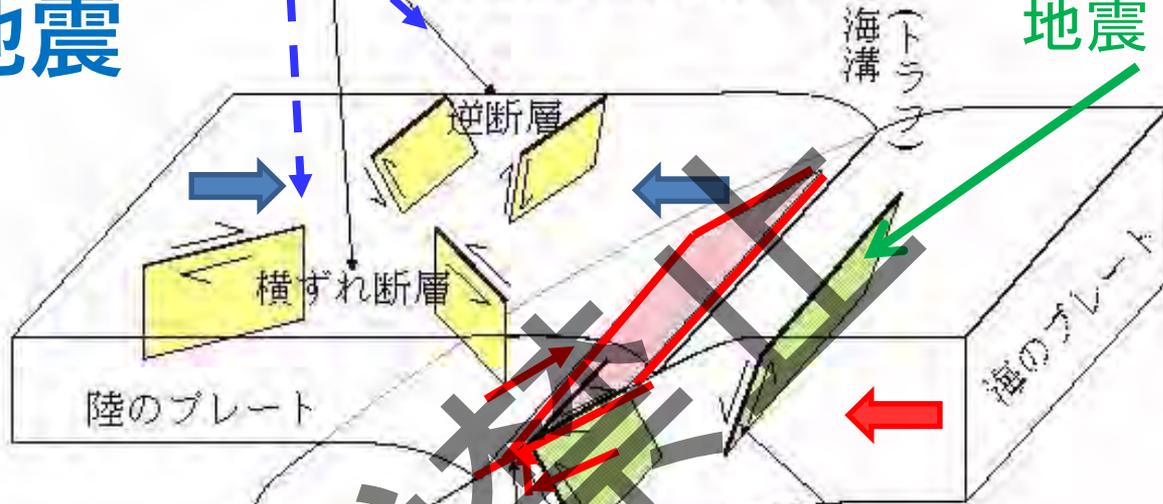
フィリピン
プレート

日本列島周辺で生じる地震のタイプ

内陸地震 活断層

(濃尾地震(1891年)や1995年兵庫県南部地震など)

アウターライズ地震

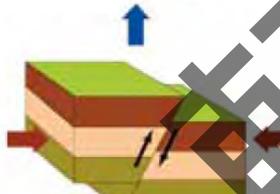
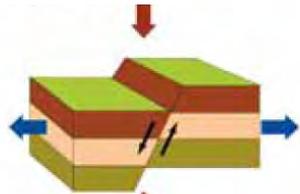


断層運動の種類

正断層

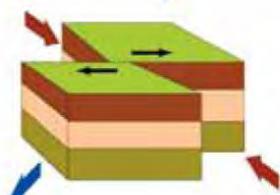
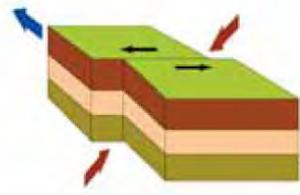
逆断層

断層
 圧縮の力 (赤い矢)
 張力 (青い矢)



左横ずれ断層

右



スラブ内地震

沈み込むプレート内の地震
(正断層: 1933年三陸地震)

沈み込んだプレート内の地震
(高角逆断層: 1994年北海道東方沖地震)

プレート間(境界)地震、海溝型地震

(低角逆断層: 1968年十勝沖地震, 1923年関東地震や南海トラフ沿いの地震など)

2011年東北地方太平洋沖地震

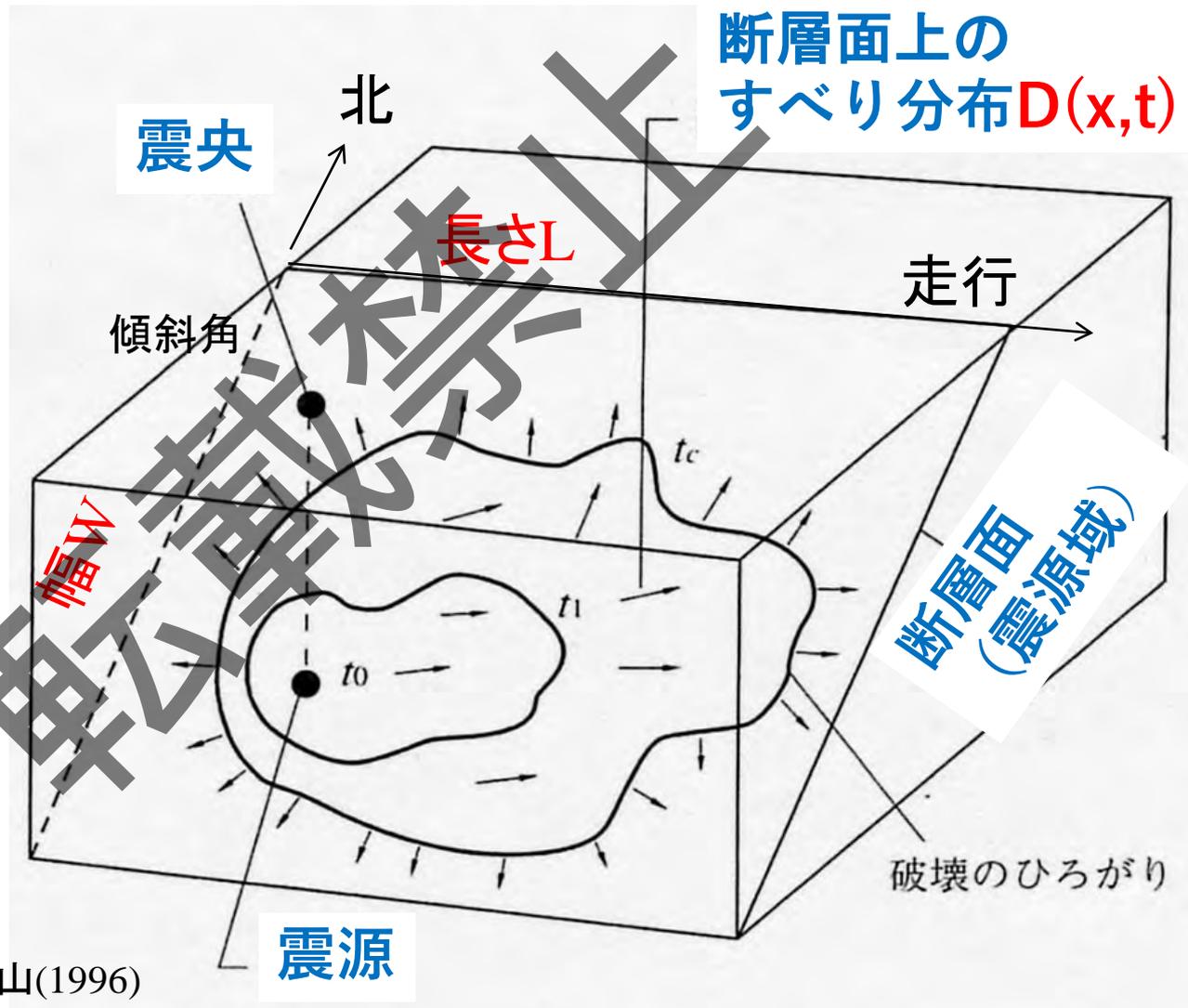
沈み込んだプレート内の深い地震
(水平断層: 1993年釧路沖地震)

地震って？

地震は、地殻あるいはマントルに働く力によって、その内部に**断層**上にすべり・ずれが生じて起こる急激な破壊現象である。

震源とは、この破壊が最初に生じた地点のことをいう。(地震波を最初に出した点)

震央とは、地下の震源を真上の地表へ投影した位置である。震源で発生した破壊は周囲へ伝播し、ある範囲で破壊は止まります。この破壊が広がった**震源断層**を含む領域のことを**震源域**と呼び、地震の巨大なエネルギーはこの領域から発生する。

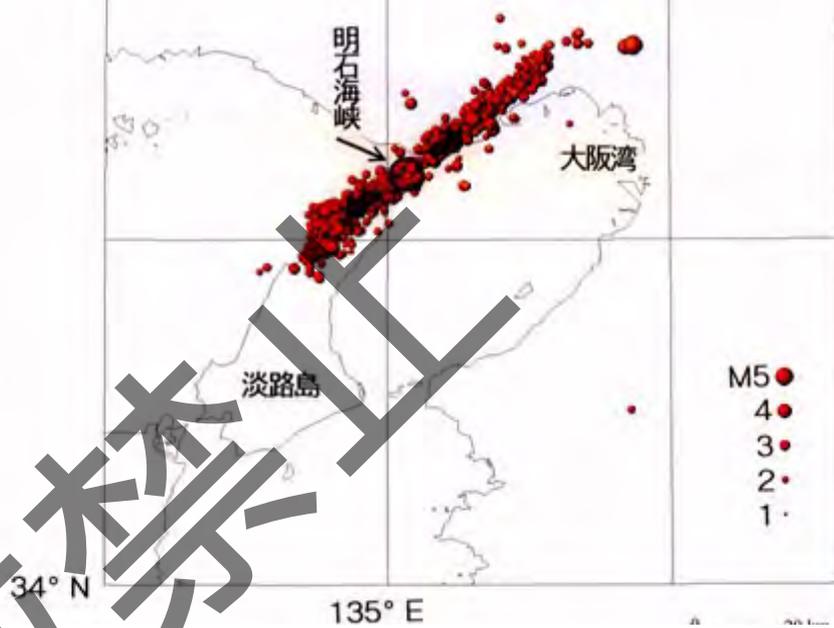


1995年兵庫県南部地震

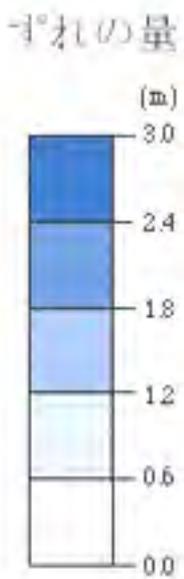
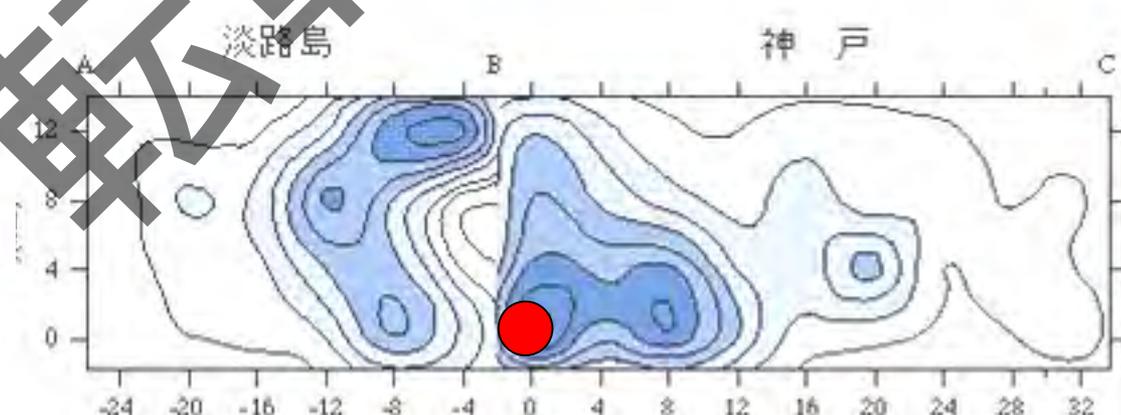
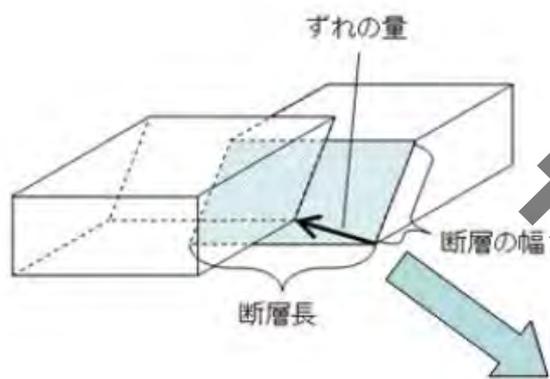


35° N

余震分布



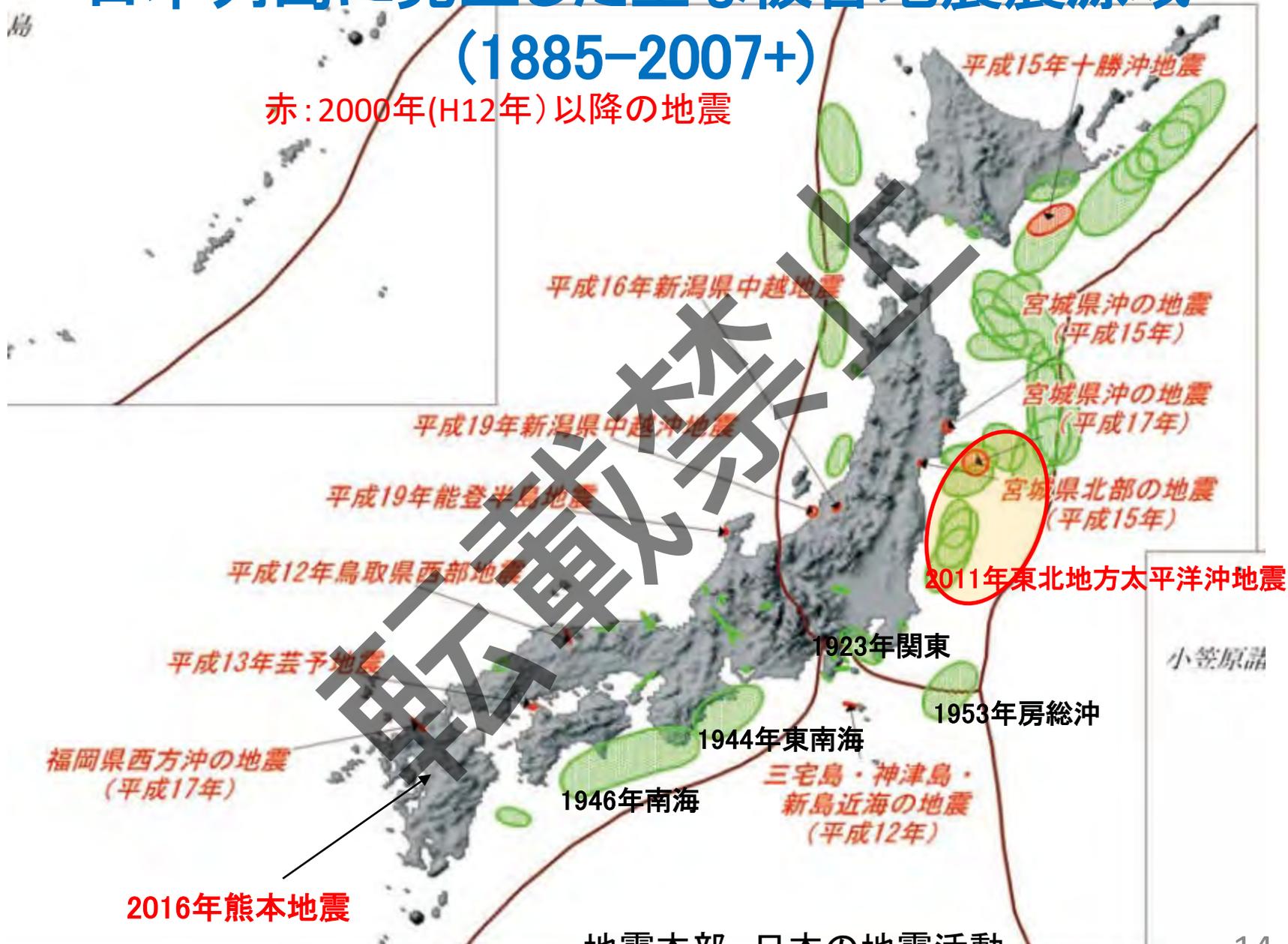
1995年兵庫県南部地震 断層面上のすべり分布



震源 (km)

日本列島に発生した主な被害地震震源域 (1885-2007+)

赤: 2000年(H12年)以降の地震



指数(冪乗則 power law)・対数 log ログ

指数関数: $z=a^y$ ($a>0$) a の y 乗 冪乗(べきじょう) y :指数

対数関数: $y=\log_a z$ (log: ログ logarithm)
 y は底(てい)を a とする z の対数

例 $z=2^4=2\times 2\times 2\times 2$ $y=\log_2 z=\log_2 2^4=4\log_2 2=4$

$a^0=1 \rightarrow \log_a 1=0$ $a^1=a \rightarrow \log_a a=1$

$a^y \times a^z = a^{y+z}$ $a^y/a^z = a^{y-z}$ $10^2 \times 10^3 = 100 \times 1000 = 10^{2+3}$

$\log_a yz = \log_a y + \log_a z$ $\log_a (y/z) = \log_a y - \log_a z$ $\log_a y^z = z \log_a y$

底が10の場合: 常用対数と呼び底10を省略

$y=\log_{10} z = \log z$ $z=10000=10^4$ $\log z = \log 10^4 = 4$

$E(M) = a \times 10^{1.5M}$

$\rightarrow E(M+1) = a \times 10^{1.5(M+1)} = a \times 10^{1.5M} \times 10^{1.5} = 10^{1.5} E(M) \sim 32 E(M)$

$\rightarrow E(M+0.2) = 10^{1.5 \times 0.2} E(M) = 10^{0.3} E(M) \sim 2 E(M)$

$n(M) = 10^{a-bM}$ $\log n(M) = \log (10^{a-bM}) = a - bM$

マグニチュード (M: Mb, Ms, Mj, Mw)

・地震の大きさを表す尺度 $E \propto 10^{1.5(M+1)} = 10^{1.5} \times 10^{1.5M} = 10 \times 10^{0.5} \times 10^{1.5M}$

・1大きくなるとそのエネルギーは約32倍 ($E \propto 10^{1.5M}$)

(0.2大きくなるとエネルギーは2倍) $E \propto 10^{1.5(M+0.2)} = 10^{0.3} \times 10^{1.5M}$

M9.0の今回の地震はM7クラスの1995年神戸地震

(Mj7.3, Mw6.8)の $32 \times 32 =$ 約1024倍の大きさに相当

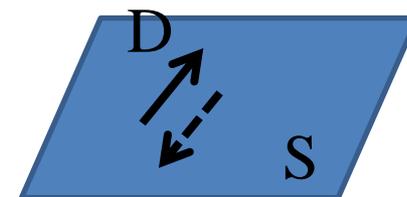
・Mの飽和: 測れる周期の限られた地震計の振幅から計算されたMはM7~8を超えると同じになる

(Mj: 気象庁Mは周期5秒の地震計でのM: M7-8で飽和)

・そこで、M8を超えると、モーメント M_0

(\propto 平均的すべり量(D) \times 面積(S): 広帯域地震波形から正確に測れる量)から計算されるMw(モーメントマグニチュード)を用いる。

平均すべり量

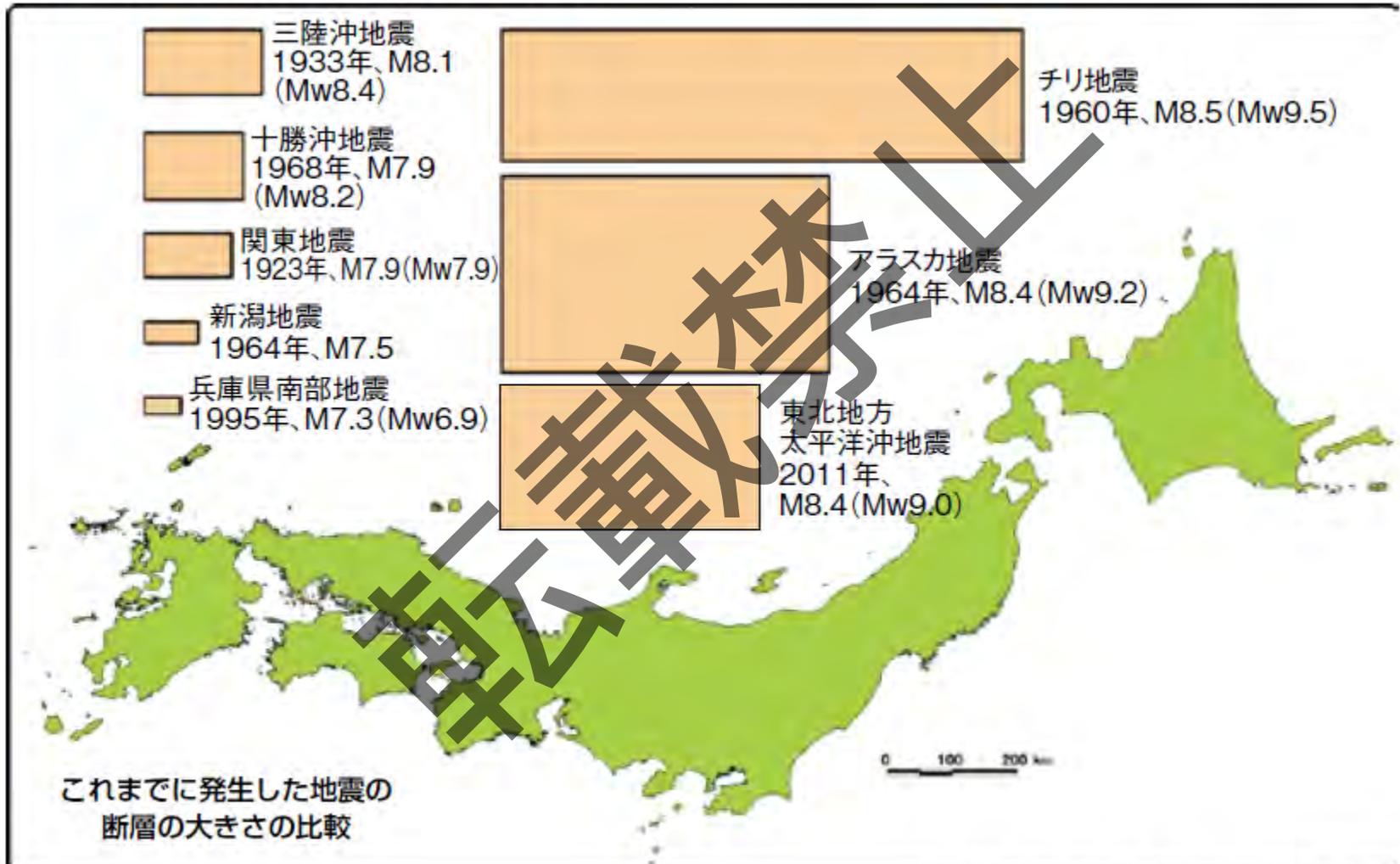


面積

$$Mw = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 \quad (M_0 \propto D \times S)$$

マグニチュードと断層面の大きさ

色のついた長方形が推定された地震の断層面の大きさを表しています。断層面の大きさを比較するために、並べた日本列島と同じ縮尺で描いてあります。



(マグニチュードは理科年表等による)

標準的な地震の断層パラメータ(地震学:宇津)

- 地震波エネルギー E_s : J (ジュール) ($1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$ 力 \times 距離)

$$\log E_s = 1.5M + 4.8$$

- 地震モーメント M_o : $\text{N}\cdot\text{m}$ (力 \times 腕の長さ)

M_w : モーメントマグニチュード

$$\log M_o = 1.5M_w + 9.1$$

L: 断層長さ W: 断層幅 ($L \sim 2W$)

- 余震域面積・断層面積 S ($\sim LW \sim 1/2L^2$) (km^2)

$$\log S = 1.0M - 4.0L$$

- 断層の長さ L ($\sim 2W$) (km)

$$\log L = 0.5M - 1.85$$

- 断層の平均すべり量 D (m)

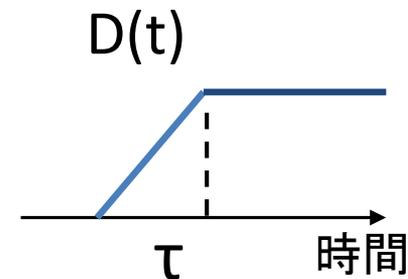
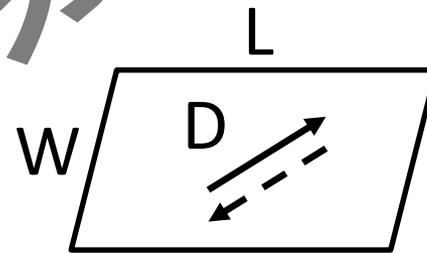
$$\log D = 0.5M - 3.1$$

- 震源時間 T_f ($=L/v_r$ v_r : 破壊伝播速度 $\sim 0.7V_s = 3\text{ km/s}$) (秒)

$$\log T_f = 0.5M - 2.3$$

- ライズタイム τ (断層面のある場所で滑りが継続する時間) (秒)

$$\log \tau = 0.5M - 3.1$$



標準的な地震の断層パラメータ

M_w	E_s (J)	M_o (N·m)	S (km ²)	L (km)	D (m)	T_f (秒)	τ (秒)
-2	6.3×10^{-1}	1.16×10^6	10^{-6}	2.24×10^{-3}	7.94×10^{-5}	5.01×10^{-4}	7.94×10^{-5}
0	6.3×10^{-4}	1.26×10^9	10^{-4}	1.41×10^{-2}	7.94×10^{-4}	5.01×10^{-3}	7.94×10^{-4}
2	6.3×10^7	1.26×10^{12}	10^{-2}	0.141	7.94×10^{-3}	5.01×10^{-2}	7.94×10^{-3}
4	6.3×10^{10}	1.26×10^{15}	1.0	1.41	7.94×10^{-2}	0.501	7.94×10^{-2}
6	6.3×10^{13}	1.26×10^{18}	10^2	14.1	0.794	5.01	0.794
7	2.0×10^{15}	3.98×10^{19}	10^3	44.7	2.51	15.8	2.51
8	6.3×10^{16}	1.26×10^{21}	10^4	141	7.94	50.1	7.94
9	2.0×10^{18}	3.98×10^{22}	10^5	446	25.1	158	25.1

E:1kWh= 3.6×10^6 J 火薬1kg= 4.2×10^6 J 広島型原爆= 6.4×10^{13} J ~ $E_s(M6.1)$

小さな地震ほど多く発生！ GR則 (マグニチュード別地震発生回数)

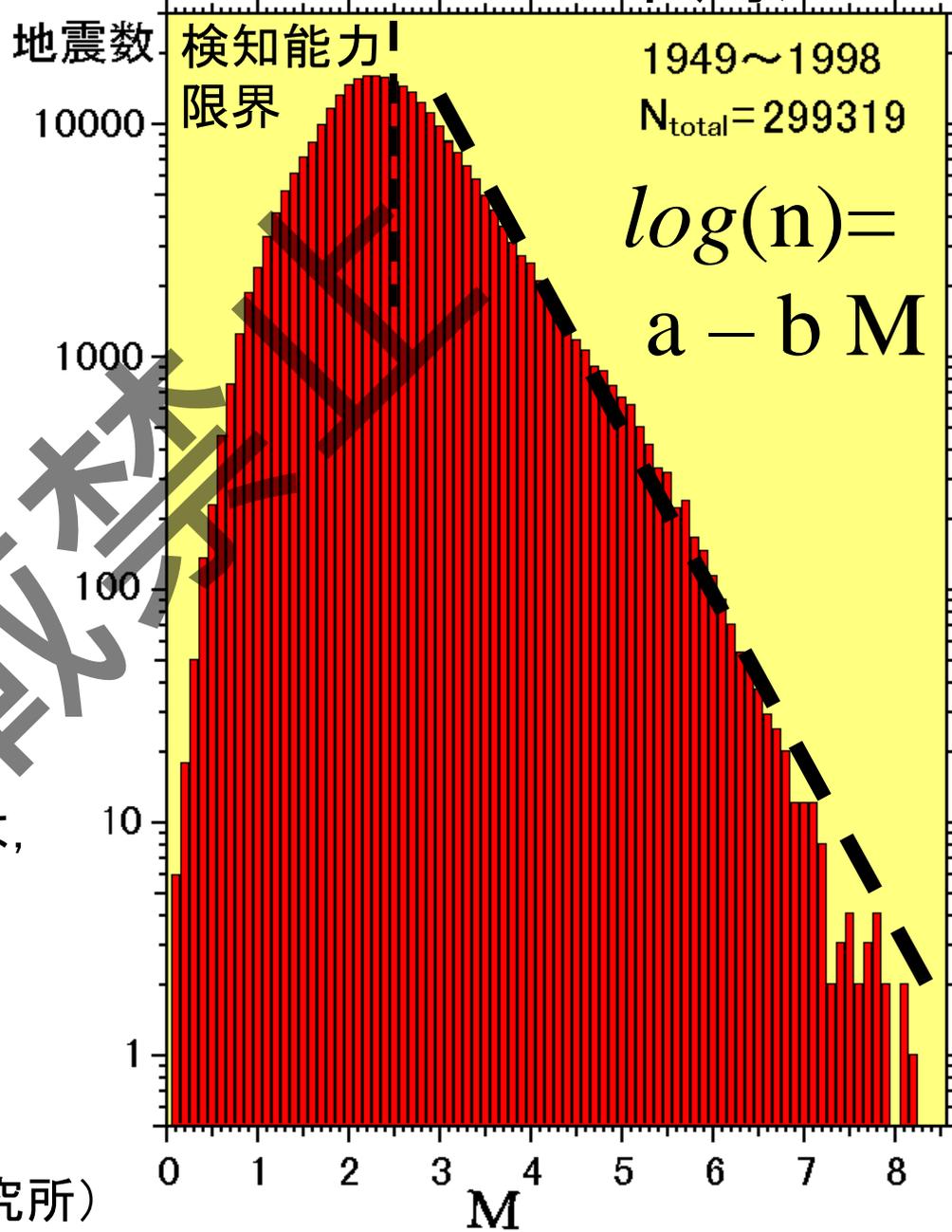
平均的な年間の地震発生率
 M8級:0.06個/年, M7級:1個/年,
 M6級:10個/年, M5級:73個/年,
 M4級:284個/年

縦軸: 対数目盛 Mが3~7では,
 (M, M+dM)の発生個数n(M)は

$$\log n(M) = a - b M$$

と表わせる. この式は**ゲーテンベルグ-リヒター(GR:Gutenberg-Richter)則**と呼ばれ, 地震統計の基本となっている. b値は通常0.9~1で, これは, **Mが1だけ小さくなると発生する地震数は8~10倍に増え, Mが2小さくなると地震数は64~100倍に増大すること**を意味する.

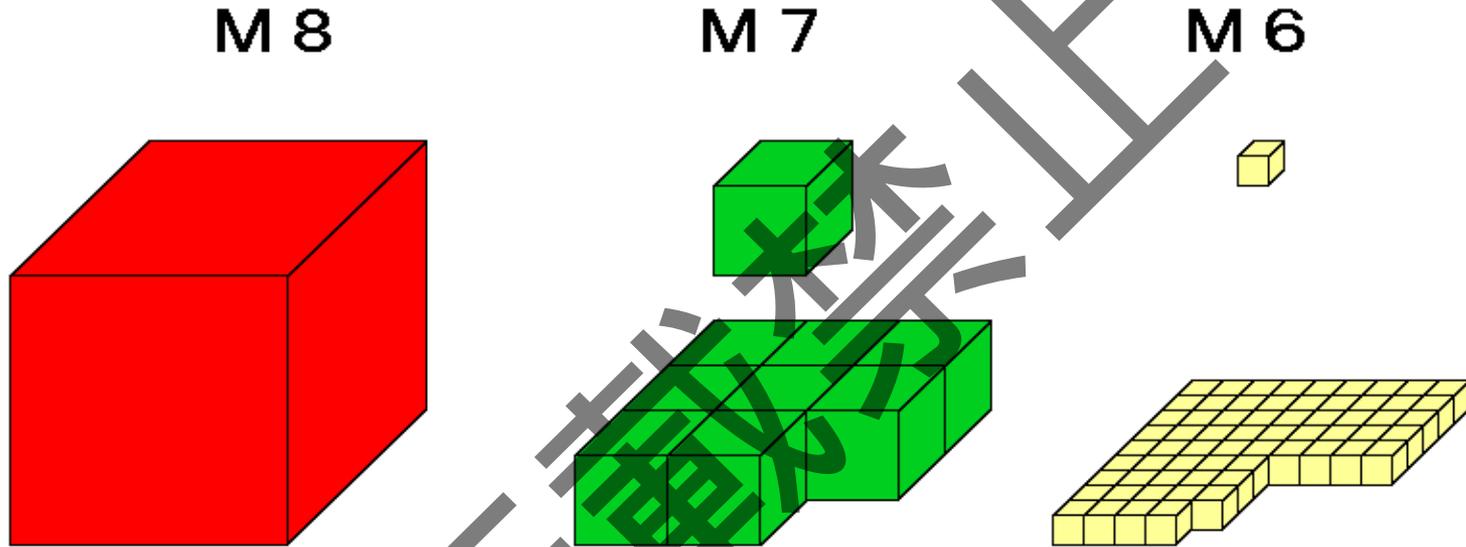
Mc 日本周辺



マグニチュードと地震のエネルギーの関係

マグニチュードが1違うと地震エネルギーは約32倍

地震のエネルギーと発生回数



地震の発生回数

ゲーテンベルグ・リヒターの関係式によれば、Mが1だけ小さくなると地震の発生数は8～10倍に増えるということから、地震数が8倍、64倍と増えた場合の総エネルギーも、図に示されています。この図からわかる通り、小さな地震がたくさん集まっても、大きな地震ひとつのエネルギーには及びません。

b値の時空間変動

b値が小→ 小さい地震に比べて大きな地震が多い

b値が大→ 大きな地震に比べて小さな地震が多い

b値の時空間変動

- ・地下構造が複雑で不均質な場所→b値が大きい
- ・地震発生域での破壊強度や温度に関連
- ・実験室・地震データ → 応力が高いとb値は減少

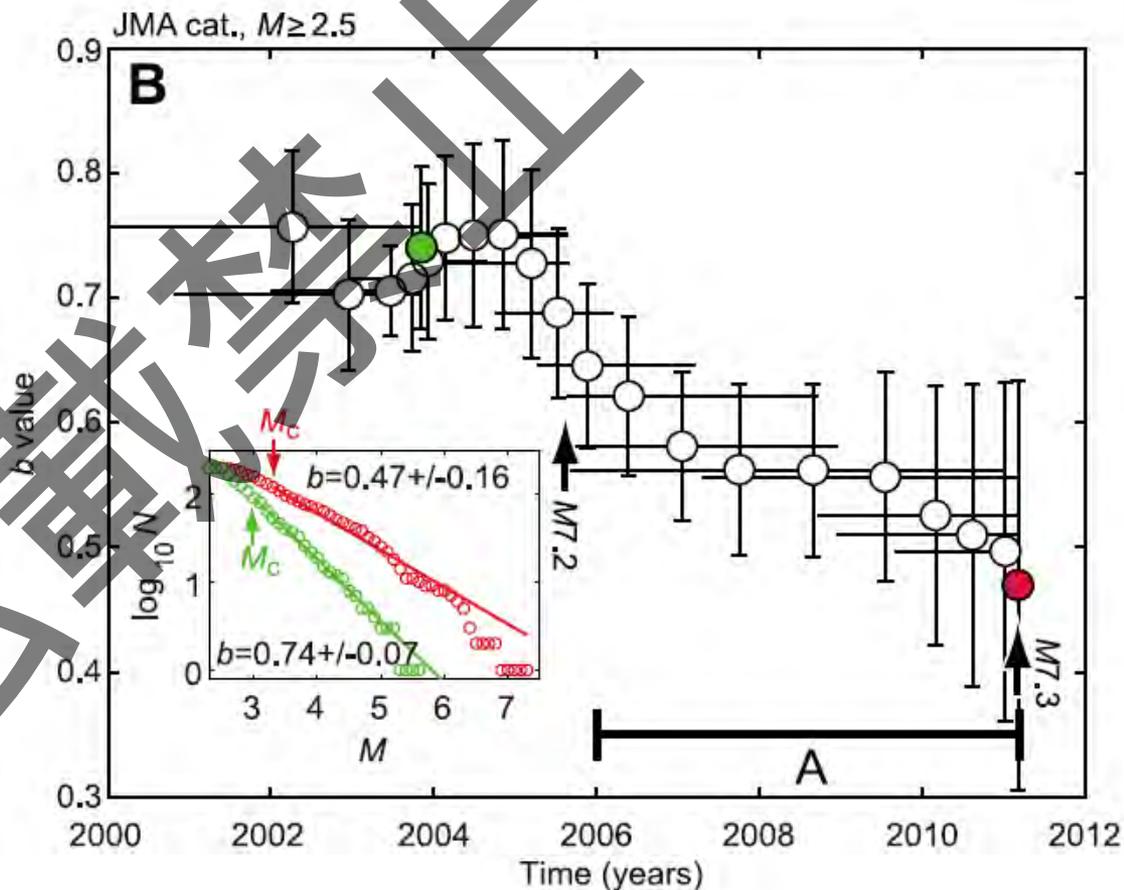
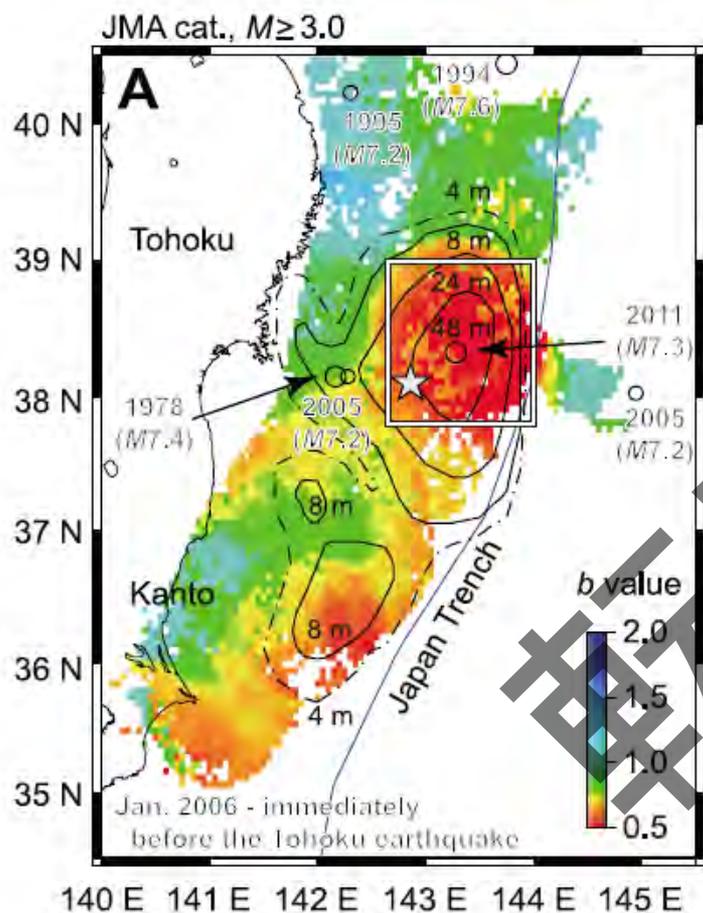
○地震前に震源域でb値が減少

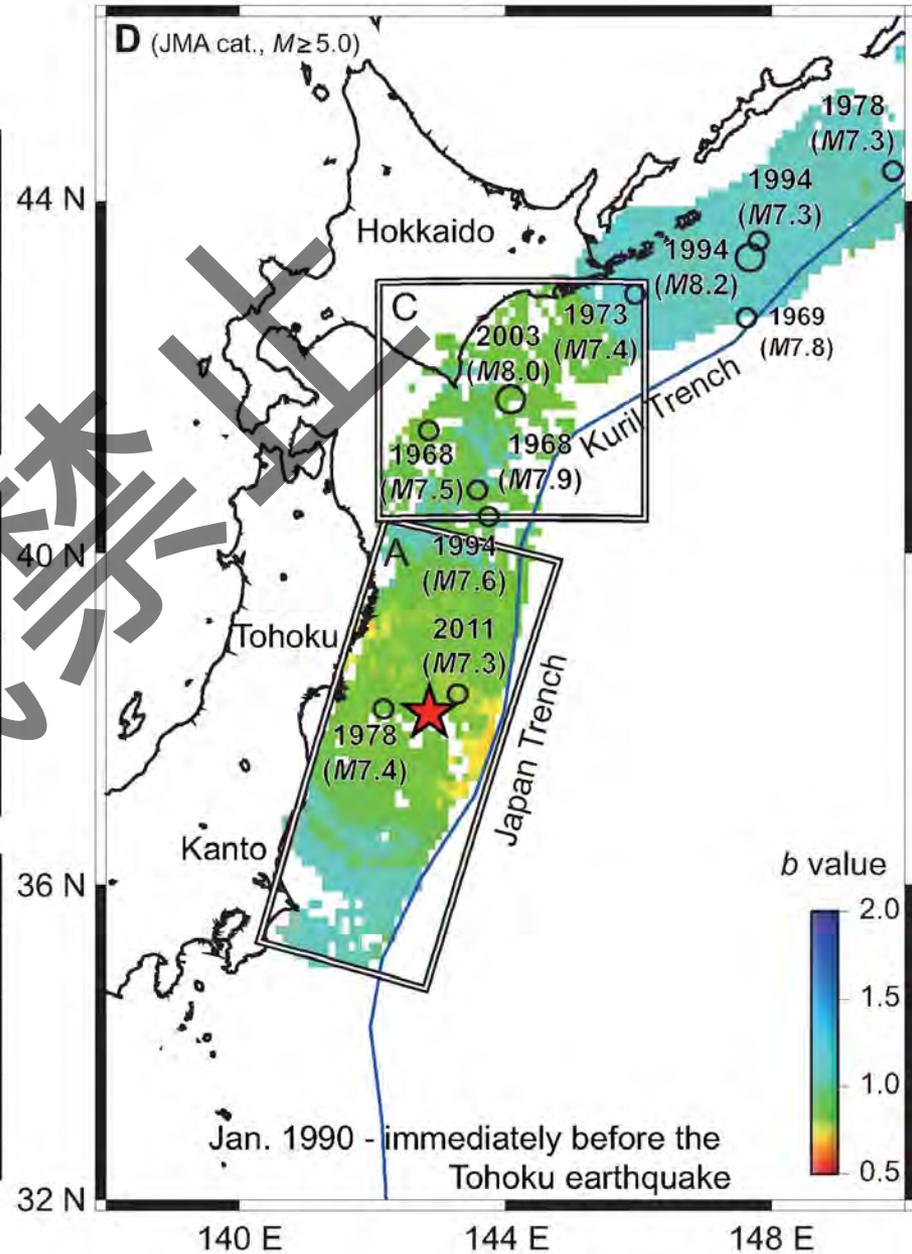
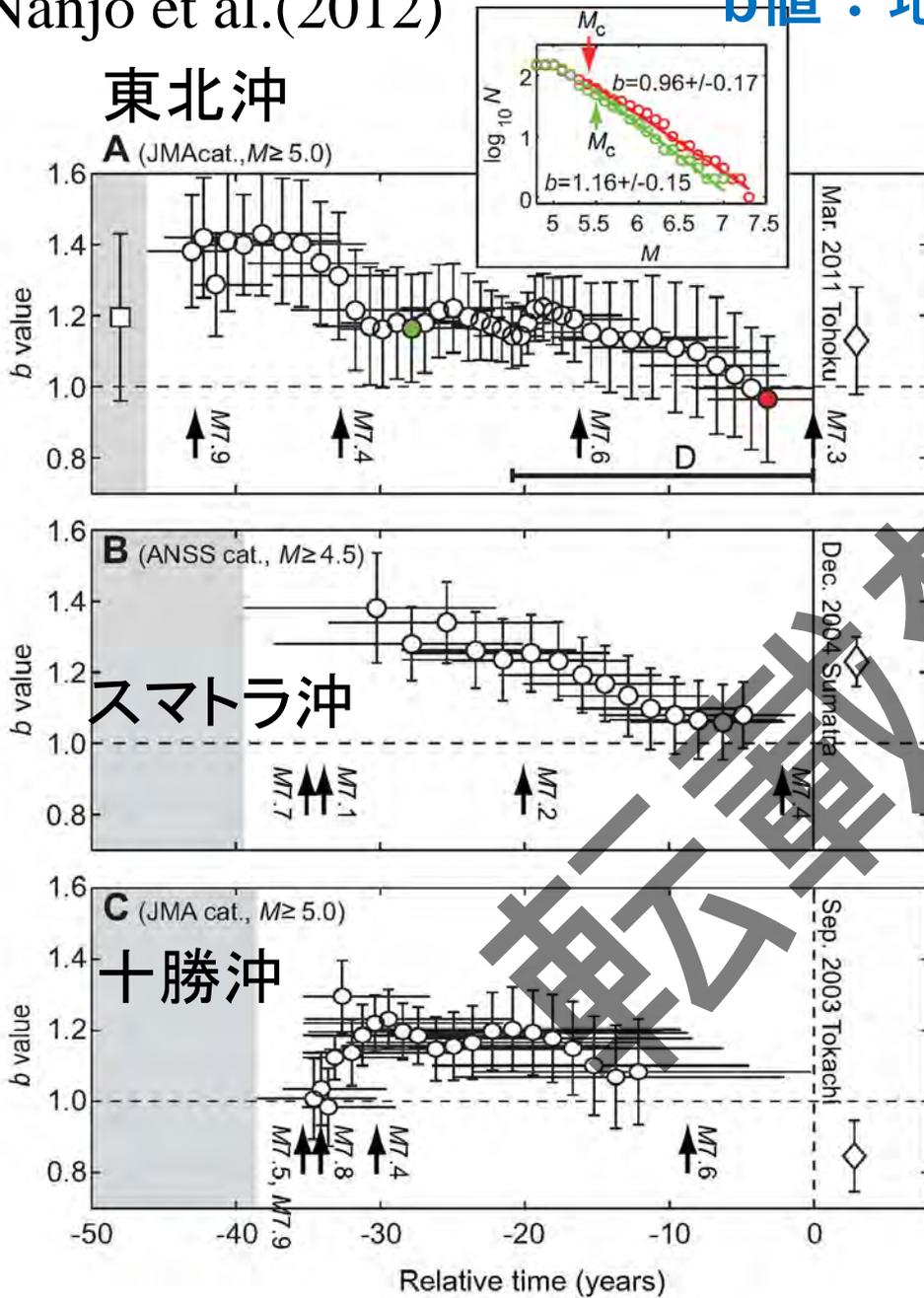
(2011年東北、2004年スマトラM9地震前(数年～数10年)にb値低下)

○南海トラフ地震震源域でのb値マッピング

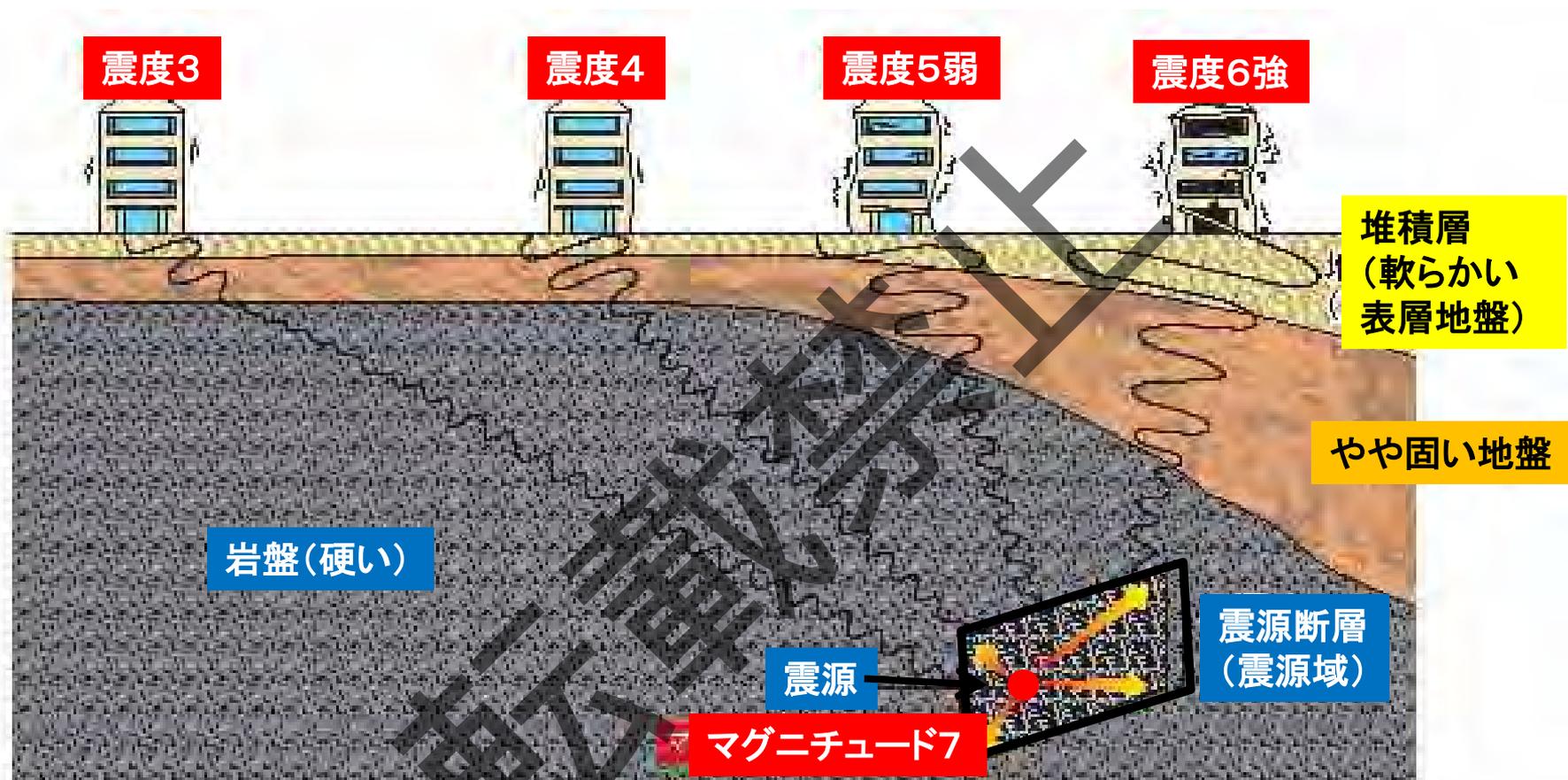
(b値マッピングは南海トラフ地震は東セグメントが最初に破壊することを示唆)

2011年東北地方太平洋地震震源域でb値が低下 Nanjo et al.(2012)





震度とマグニチュード

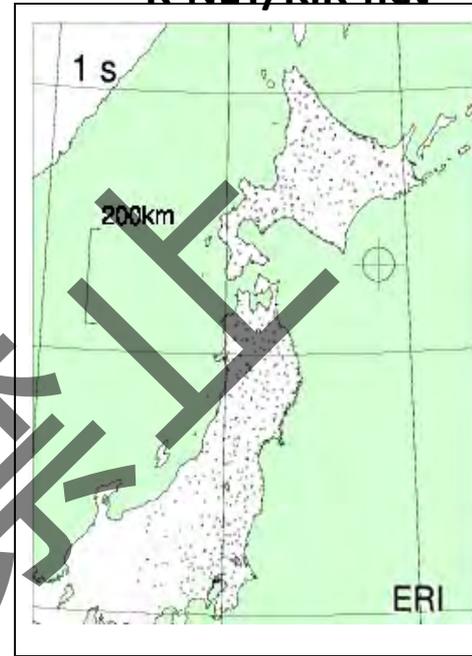
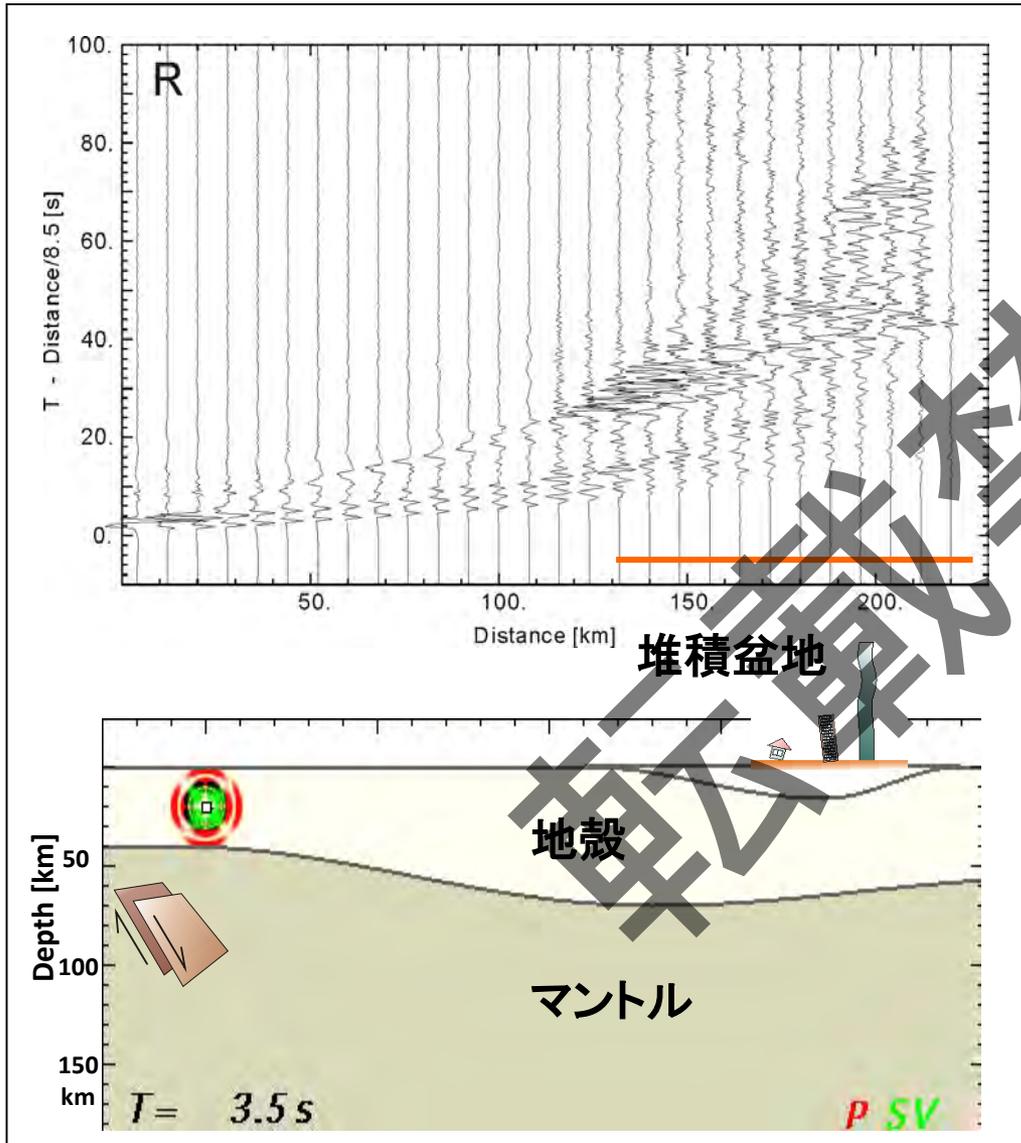


地震の規模を表す**マグニチュード**は1つですが、それぞれの場所の揺れの大きさを示す**震度**は場所により異なります。図は、震源に近く、地盤が軟らかい場所ほど大きく揺れることを示しています。(地震がわかる！地震調査研究推進本部)

堆積盆地と強震動

2003 十勝沖地震 (M8)

K-NET/KiK-net



震度→計測震度

我が国では、1908年、当時の中央気象台により震度0(無感)からVI(烈震)までの7段階からなる「気象庁震度階」が定められた。これは、人間の体感や室内の様子、周囲の状況などの観察結果に基づいて**測候所の職員が総合判断して決定する、きわめて人間的な尺度**でした。その後、1948年福井地震に際して生じた被害の甚大さから、家屋の倒壊が30%以上に及ぶことを基準とする震度VII(激震)がつけ加えられたが、基本的にはこのように人間が判断して震度を決めるという方式が、つい最近まで続けられてた。

1995年兵庫県南部地震の翌年、我が国における震度の決め方は、それまでの人間中心の方式から計器(**震度計**)による自動決定の方式へと、大きく改められた。また、この変更にあわせて、震度5と震度6はそれぞれ弱と強とに2分するようになり、全体としては10段階の区分(**計測震度**)が採用されるようになった。

世界の震度階

- ・気象庁震度階
- ・メルカリ震度階:12階級 アメリカ、韓国
- ・メドヴェーデフ・シュポンホイアー・カルニク震度階級:12階級
CIS諸国、東欧諸国、イスラエル、インド
- ・中国震度階級 ・ヨーロッパ震度階級 12階級

気象庁震度階



【震度0】
人は揺れを感じない。



【震度1】
屋内で静かにしている人の中には、揺れをわずかに感じる人がいる。



【震度2】
屋内で静かにしている人の大半が、揺れを感じる。



【震度3】
屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。



【震度4】
○ほとんどの人が、驚く。
○電灯などのつり下げ物は大きく揺れる。
○座りの悪い置物が、倒れることがある。



【震度5弱】
○大半の人が、恐怖を覚え、物につかまりたいと感じる。
○棚にある食器類や本が落ちることがある。
○固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。



【震度5強】
○物につかまらないうまく歩くことが難しい。
○棚にある食器類や本で落ちる物が多くなる。
○固定していない家具が倒れることがある。
○補強されていないブロック塀が崩れることがある。



【震度6弱】
○立っていることが困難になる。
○固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。ドアが開かなくなることがある。
○壁のタイルや窓ガラスが破損、落下することがある。
○耐震性の低い木造建物は、瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。



【震度6強】
○はわないと動くことができない。飛ばされることもある。
○固定していない家具のほとんどが移動し、倒れるものが多くなる。
○耐震性の低い木造建物は、傾くものや、倒れるものが多い。
○大きな地割れが生じたり、大規模な地すべりや山体の崩壊が発生することがある。



【震度7】
○耐震性の低い木造建物は、傾くものや、倒れるものがさらに多くなる。
○耐震性の高い木造建物でも、まれに傾くことがある。
○耐震性の低い鉄筋コンクリート造の建物では、倒れるものが多い。

震度計 気象庁HP

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/shindo-kansoku/index1.html>

震度観測体制について

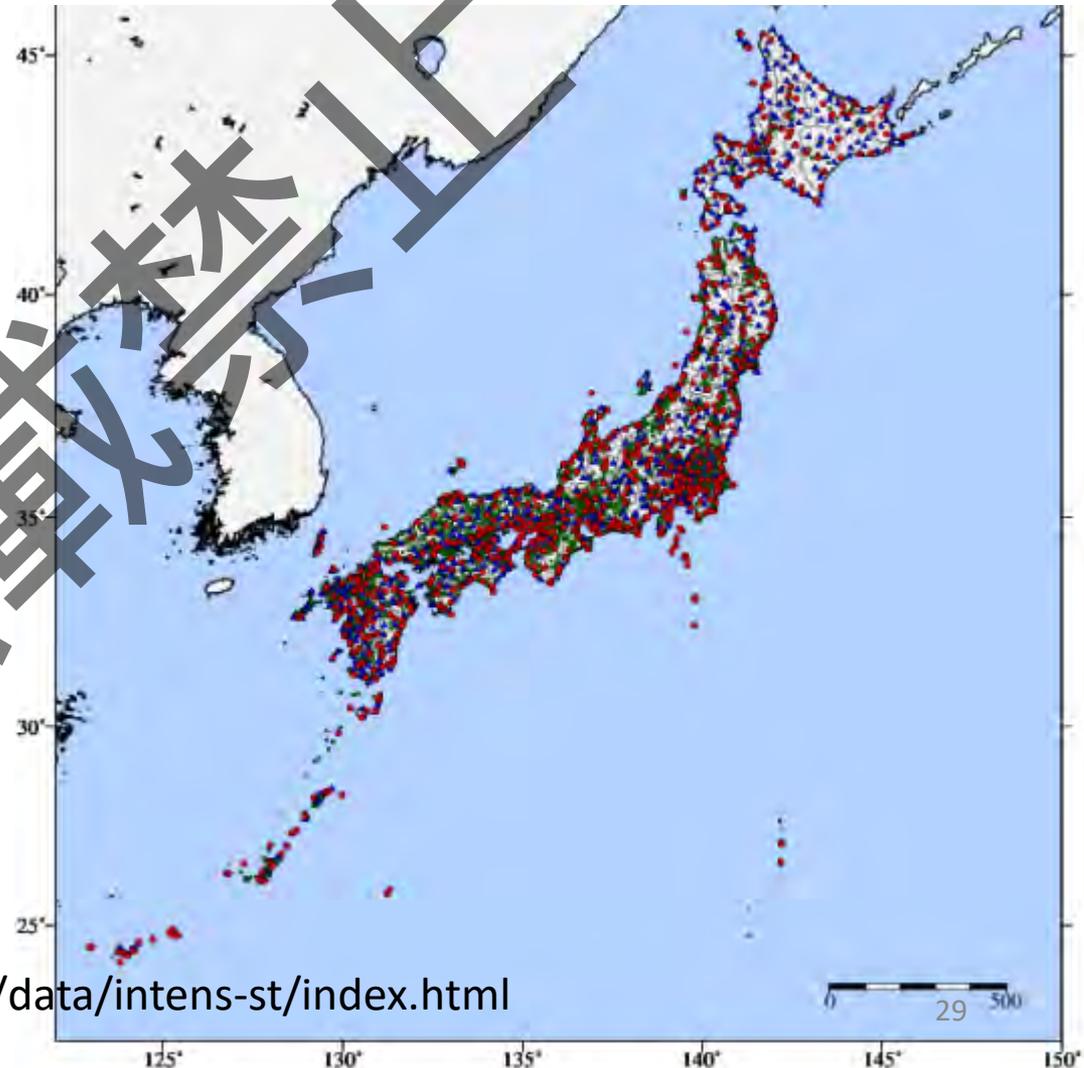
平成21年10月現在、気象庁が発表する震度情報に活用している観測点は、約4200地点となっています(震度観測点分布図を参照)。これらの震度計は、気象庁の他、都道府県等地方公共団体、(独)防災科学技術研究所により整備・運営されています。

観測結果は、各管区気象台等、都道府県庁または(独)防災科学技術研究所等に電話回線や防災行政無線等を使用し集約・処理され、地震発生から数分後には、気象庁へ提供されます。

なお、気象庁は、震度計の設置環境を事前に調査し、その評価を踏まえ震度情報に活用しています。

震度観測点 (全国)

● : 気象庁 ■ : 地方公共団体 ▲ : 国立研究開発法人防災科学技術研究所

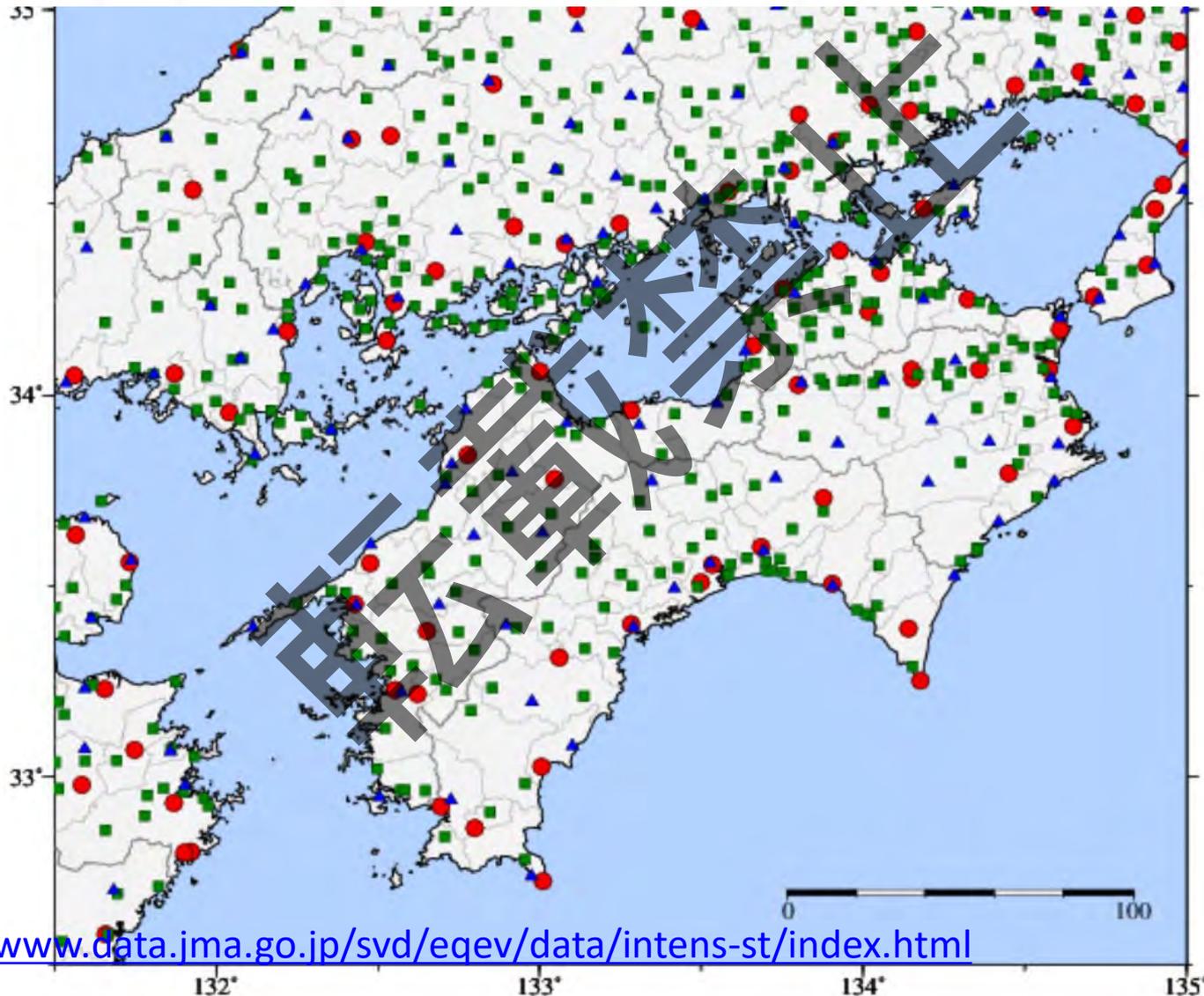


<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/intens-st/index.html>

震度計 気象庁HP

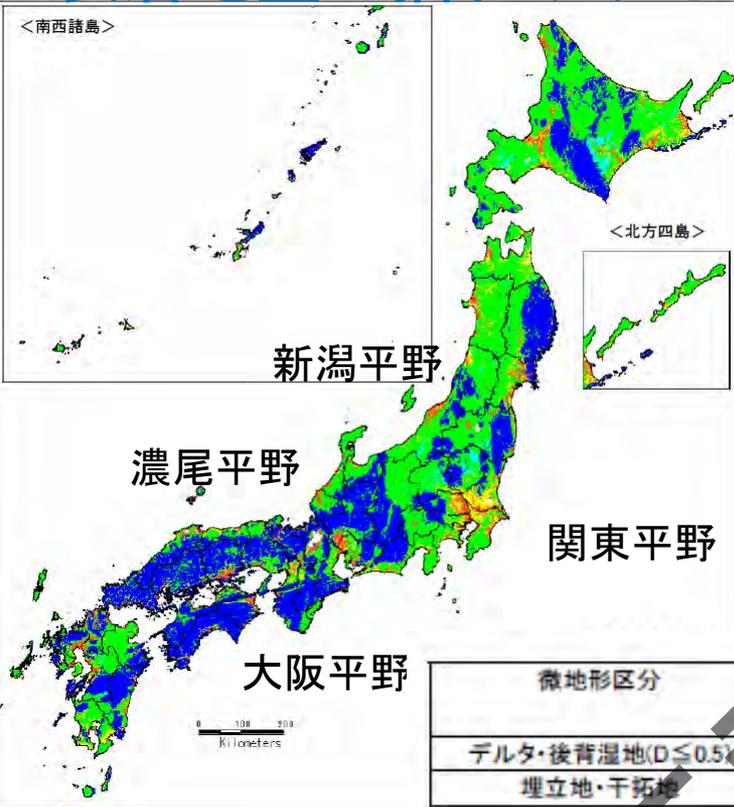
震度観測点 (中国・四国)

● : 気象庁 ■ : 地方公共団体 ▲ : 国立研究開発法人防災科学技術研究所



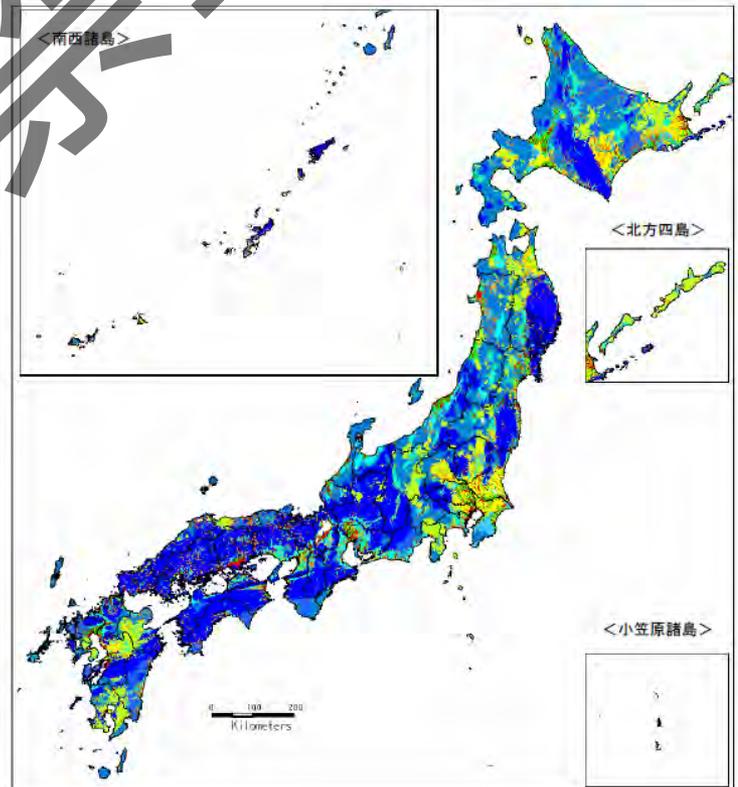
表層地盤の揺れやすさマップ(1kmメッシュ) と微地形分布

<http://www.seis.bosai.go.jp/>



計測震度増分	色	
1.0 ~ 1.65	Red	↑ ゆれやすい
0.8 ~ 1.0	Orange	
0.6 ~ 0.8	Yellow	
0.4 ~ 0.6	Green	
0.2 ~ 0.4	Cyan	
0.0 ~ 0.2	Blue	↓ ゆれにくい
-0.95 ~ 0.0	Dark Blue	

微地形分布



微地形区分	色	地盤の状況
デルタ・後背湿地(D≤0.5)	Red	↑ やわらかい
埋立地・干拓地	Orange	
谷底平野	Yellow	
砂州・砂丘	Light Green	
自然堤防	Green	
ローム台地	Cyan	↓ かたい
第四紀火山・他の地形	Light Blue	
人工改変地	Blue	
デルタ・後背湿地(D>0.5)	Dark Blue	
砂礫台地	Very Dark Blue	
扇状地	Black	
丘陵地	Dark Grey	
新第三紀	Light Grey	
古第三紀	Medium Grey	
中生代	Dark Grey	
古生代	Black	

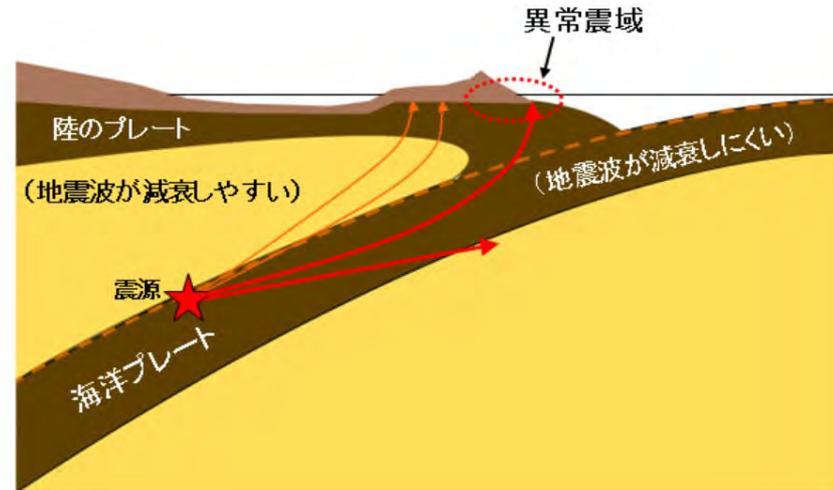
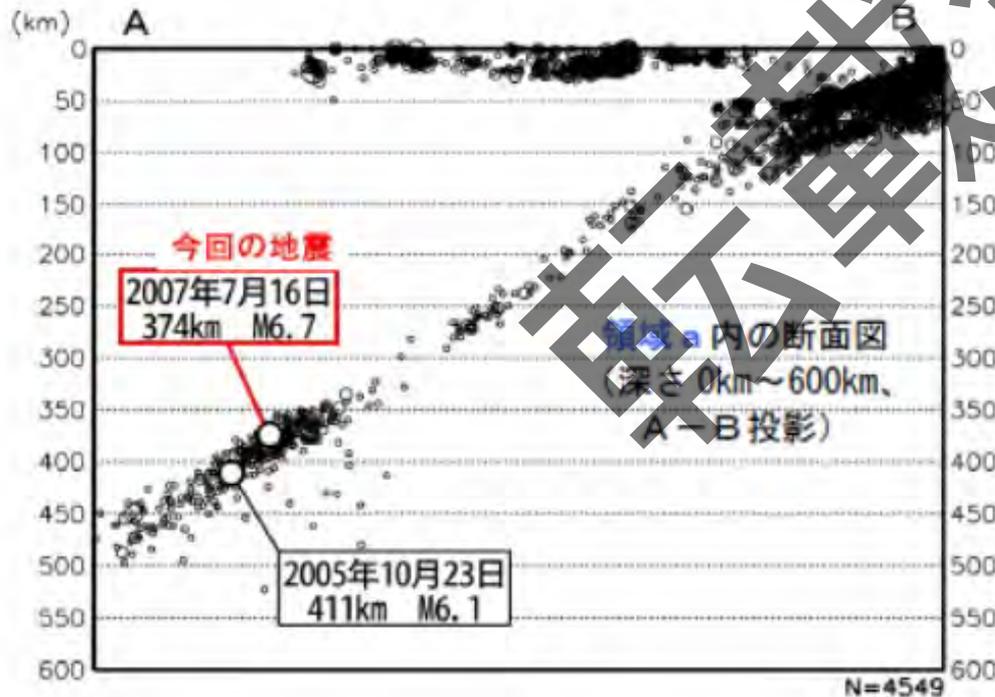
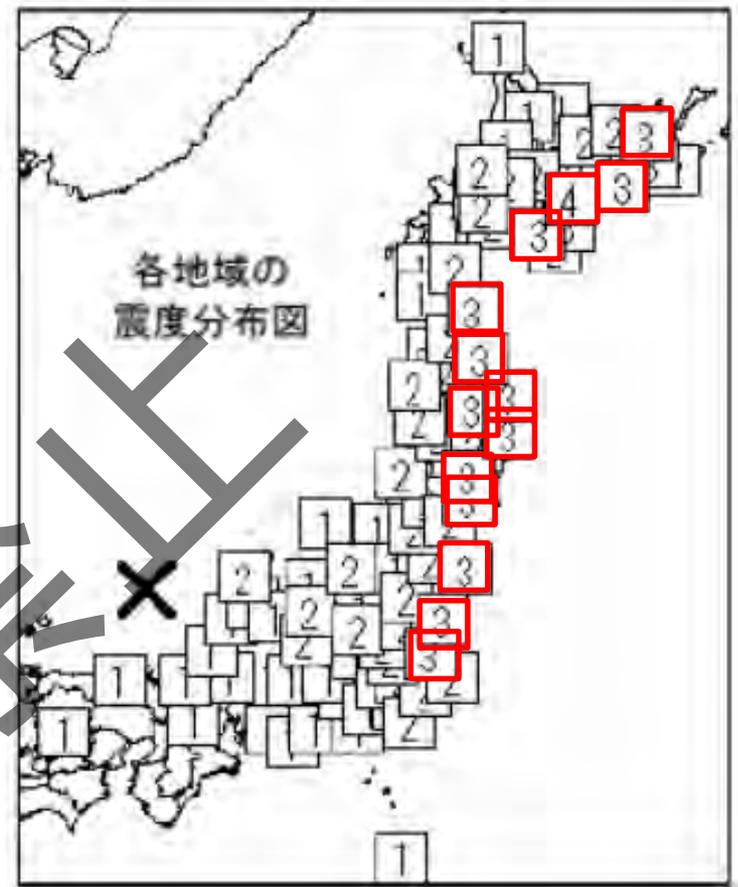
揺れやすさ
マップ

内閣府

D : 河川からの距離(km)

異常震域

震源が非常に深い場合、震源の真上ではほとんど揺れないのに、震源から遠くはなれた太平洋側の場所で揺れを感じることもある。この現象は、「異常震域」という名称で知られています。原因は、地球内部の岩盤の性質の違いによるものです。(気象庁HP <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/faq/faq27.html#7>)



震源・震源決定

S-P時間:

$t_s - t_p = r/V_s - r/V_p$ r :震源距離

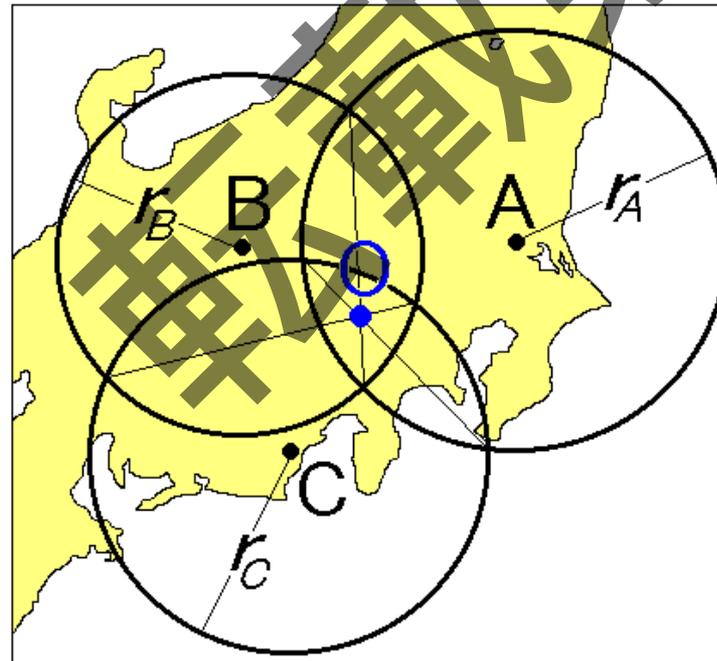
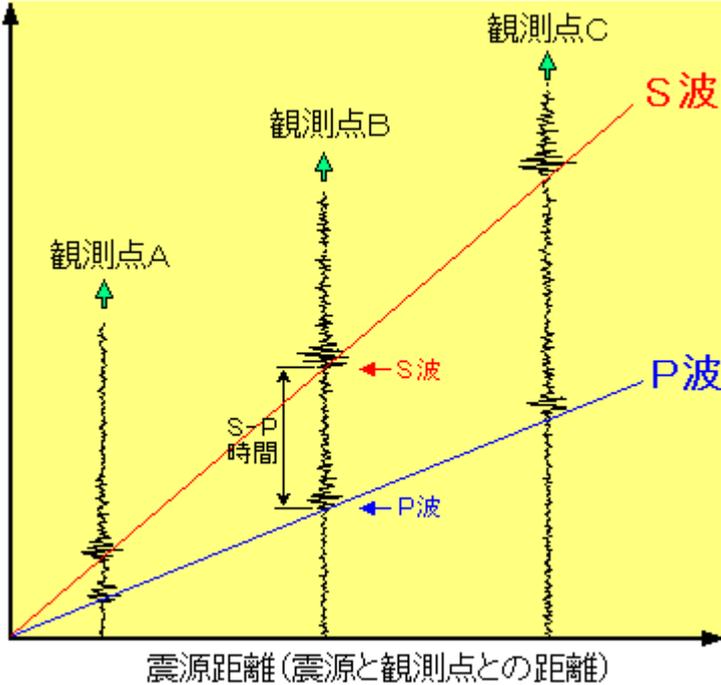
$= (1/V_s - 1/V_p)r = k r$

k :大森定数

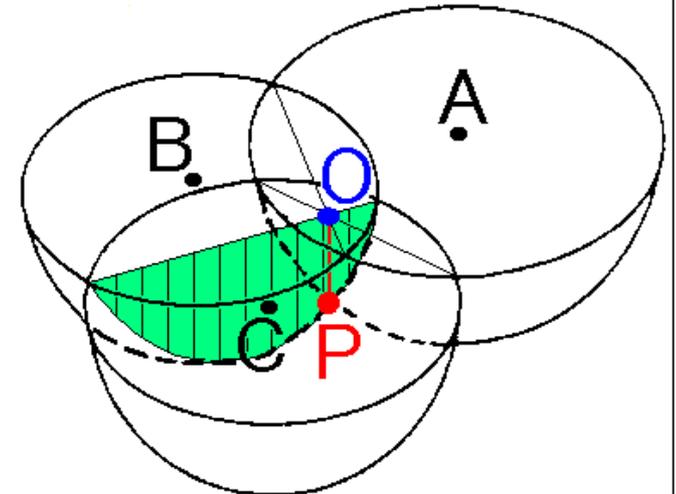
($= 7.5 \text{ km/s} \quad V_p = 5 \text{ km/s} \quad V_s = 3 \text{ km/s}$)

P波到達時刻: 走時表(地震波速度分布)と4観測点で震源(緯度、経度、深さ)と発震時刻を決めることができる。

走時(伝播時間)



S-P時間を使うと3観測点で震源を決定できる。



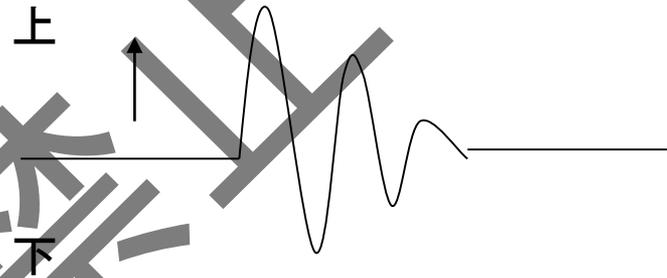
P波初動の押し引き



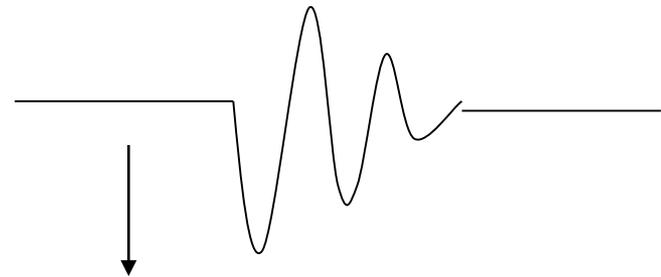
M7.3. 深さ 20 km

福井地震 ($M=7.2$, $d=20$ km,
1948年6月23日) の時の初動の押し
引き分布

押し: 初動がUp



引き: 初動がDown



震源球

地震波の屈折
スネルの法則
(反射・屈折)

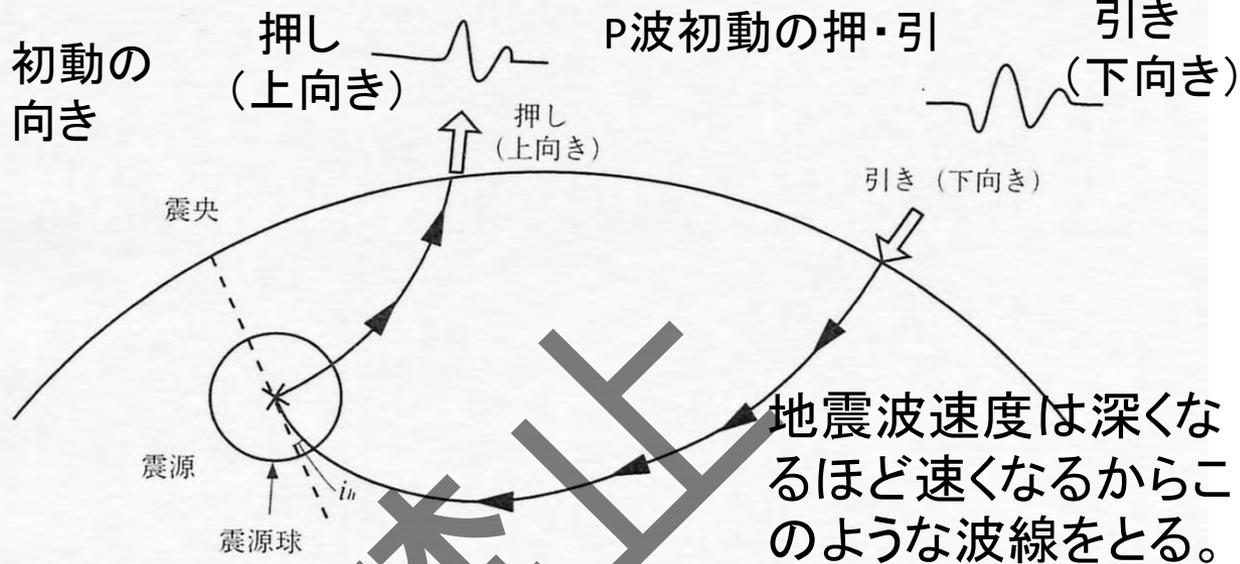
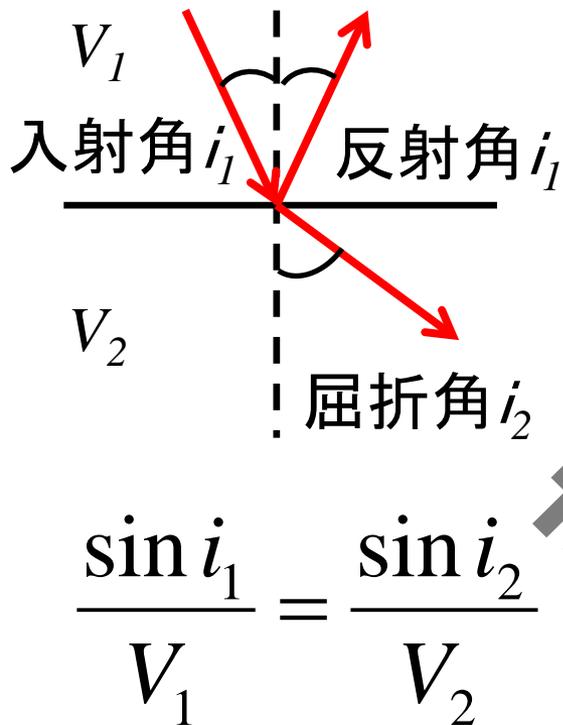


図3-2 震源 (球), 震央およびP波初動の押し引き

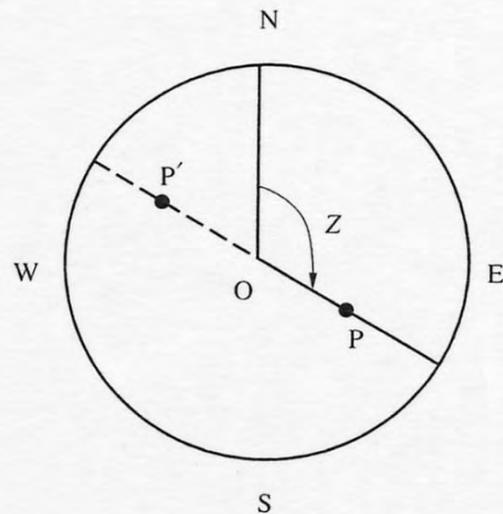
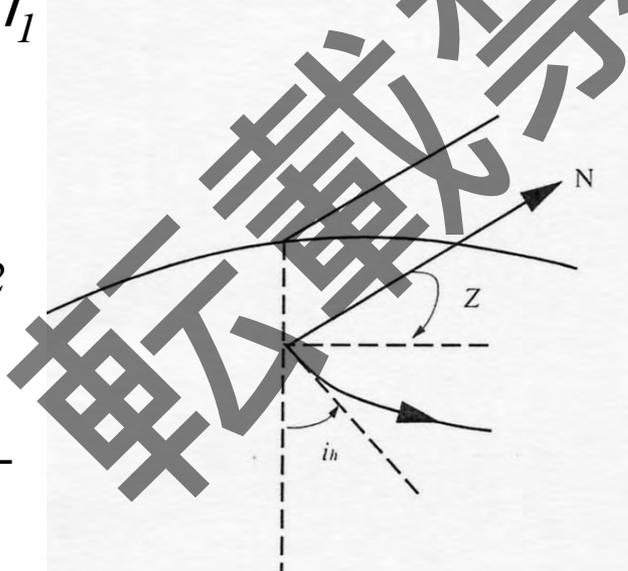


図3-3 震源球への投影

震源球の例

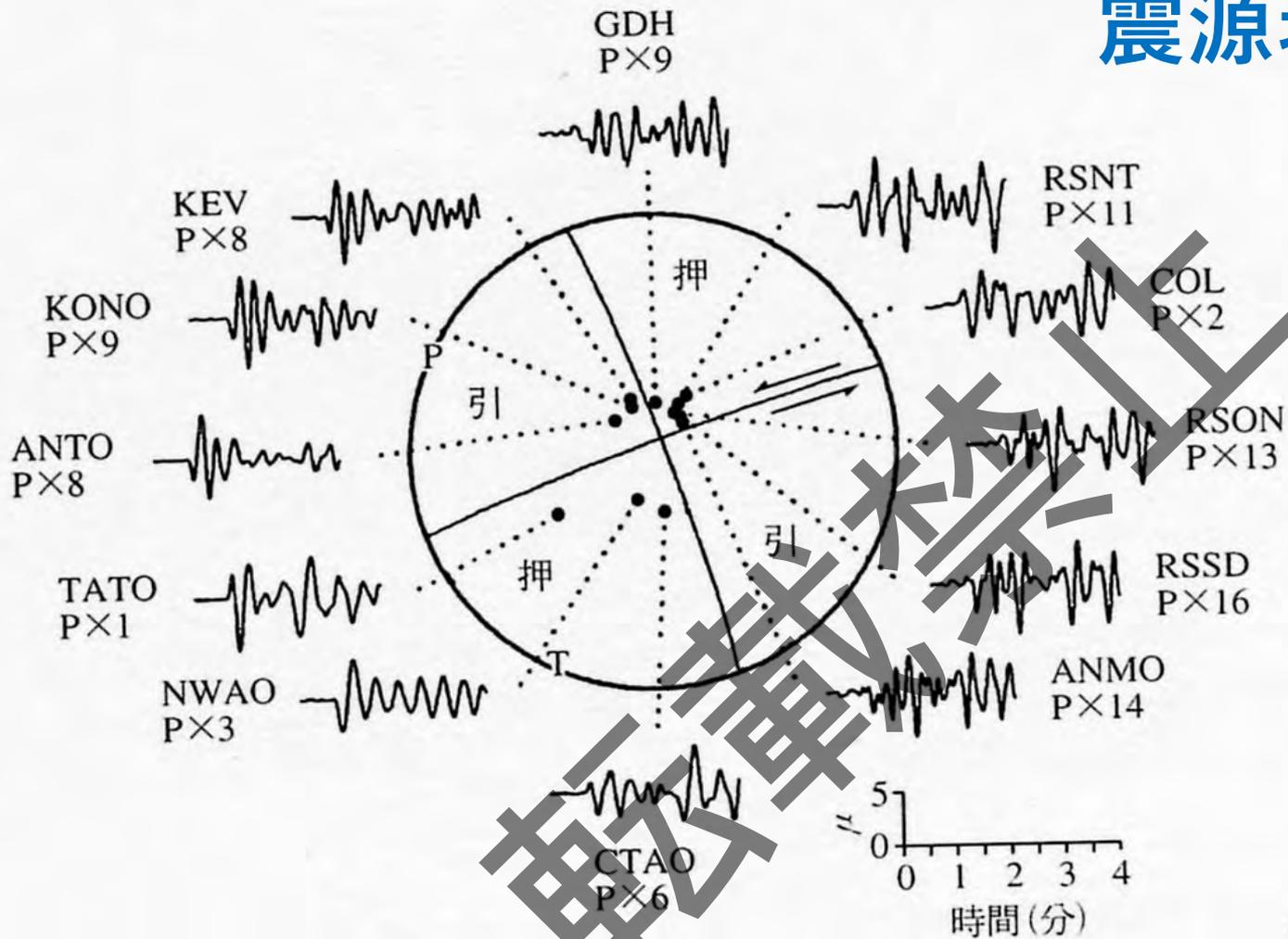


図3-6 1984年9月の長野県西部地震の発震機構と遠地上上下動波形記録

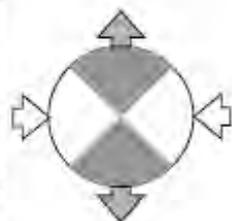
発震機構解

発震機構解〔初動解〕について

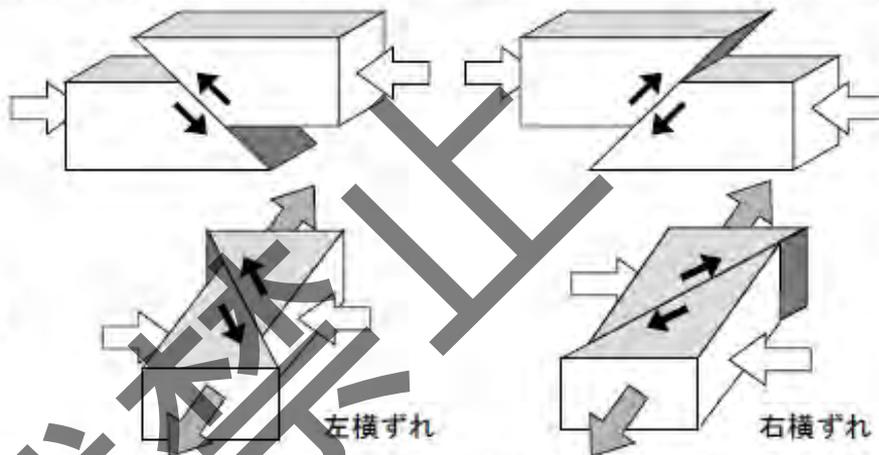
圧力軸に注目した場合の例



逆断層型



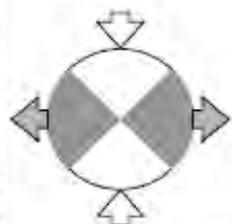
横ずれ断層型



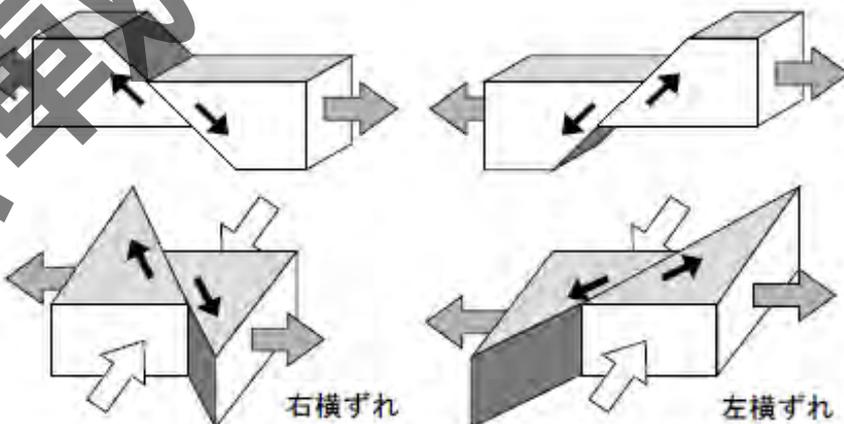
張力軸に注目した場合の例



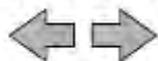
正断層型



横ずれ断層型



圧力 (押す力)



張力 (引く力)



断層がずれる方向

断層運動と等価な力源は？

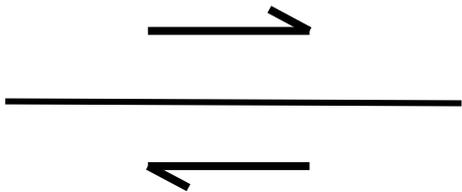
地震＝断層運動(変位の食い違い・すべり)

＝シングルカップル 又は ダブルカップル？

変位の食い違い

シングルカップル

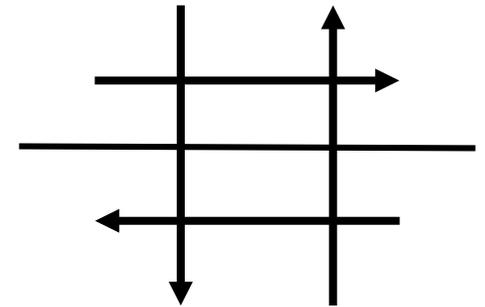
ダブルカップル



=



or



P波・S波の方位特性

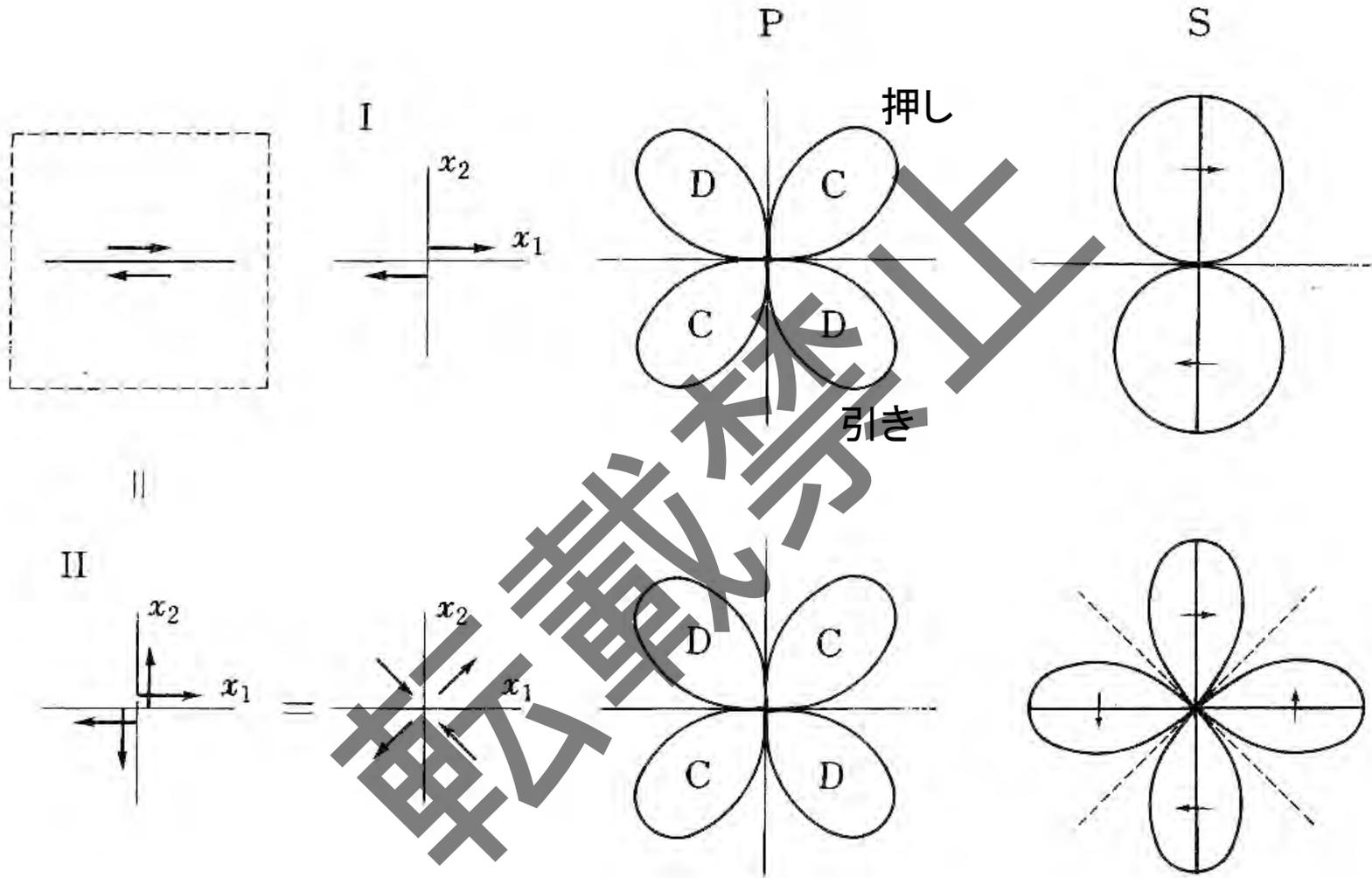
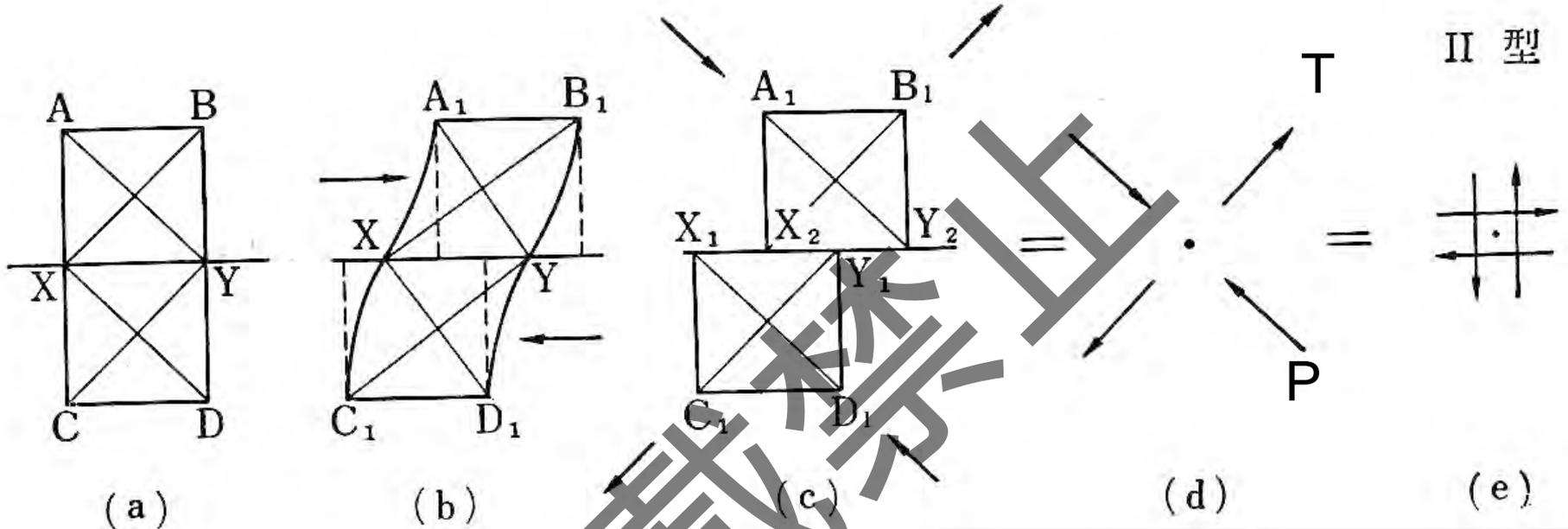
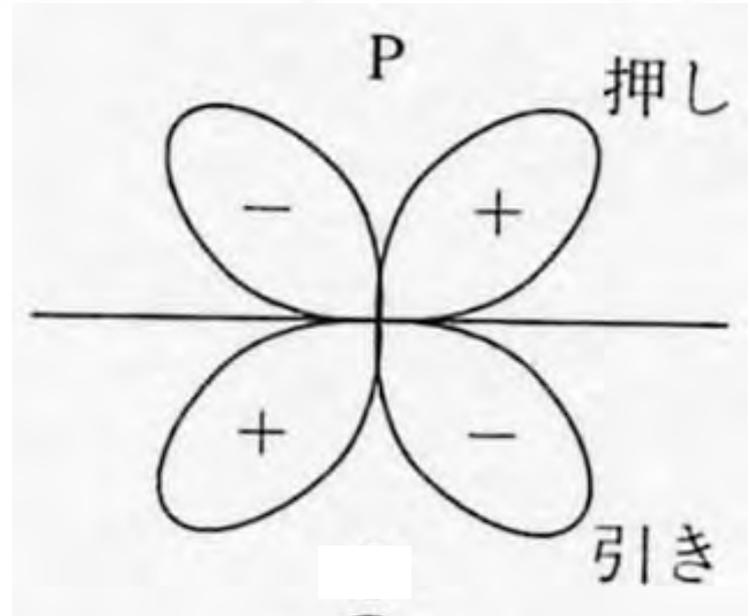


図 10.6 I 型 (シングルカップル) および II 型 (ダブルカップル) の震源による P 波, S 波の方位特性

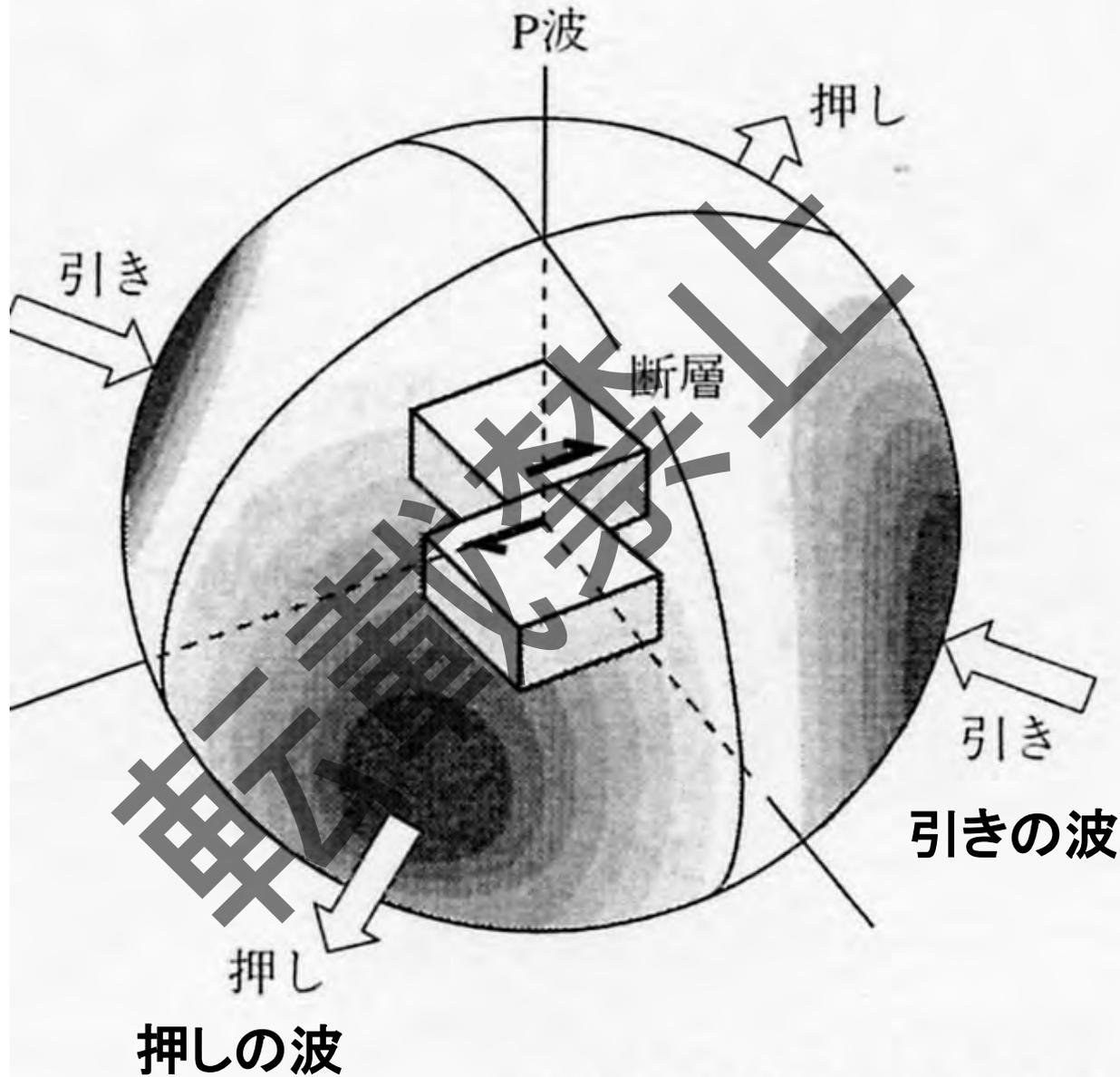
ダブルカップルの方が妥当？



(b)から(c)で、XB1、YC1はX2B1、Y2C1のように急に縮んで、この変化が押し波を矢印の方へ出す。逆に、A1Y、D1XはA1、D1を不動点として今度は急に伸びてA1Y2、D1X1になるため、引き波をY2A1、Y2C1方向へ放出する。力は、(d)のように、T(引っ張り、tension)、P(圧縮、compression)となる。これは、(d)のダブルカップルと同じ力系となる。



断層モデルとP波の押し引き



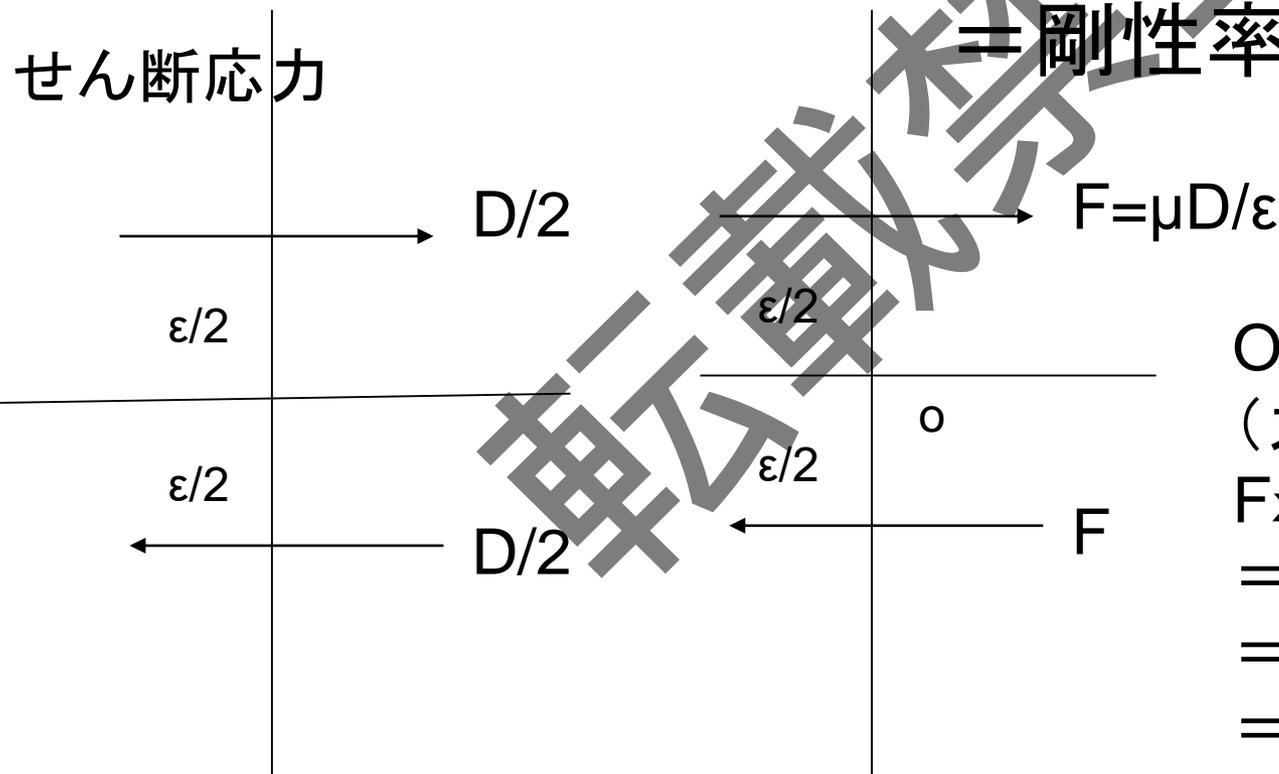
モーメント $M_o = \mu DS$

μ : 剛性率 D : 変位 S : 断層面積

$$M_o = \mu DS \text{ (N/m}^2 \cdot \text{m} \cdot \text{m}^2 = \text{N} \cdot \text{m)}$$

応力 = 力 / 面積 = 剛性率 \times ひずみ

= 剛性率 \times 変位 / 元の長さ



Oの周りのモーメント
(力 \times 腕の長さ) は
 $F \times \epsilon/2 + F \times \epsilon/2$
 $= 2F \times \epsilon/2$
 $= 2 \times \mu \times D / \epsilon \times \epsilon/2$
 $= \mu D$

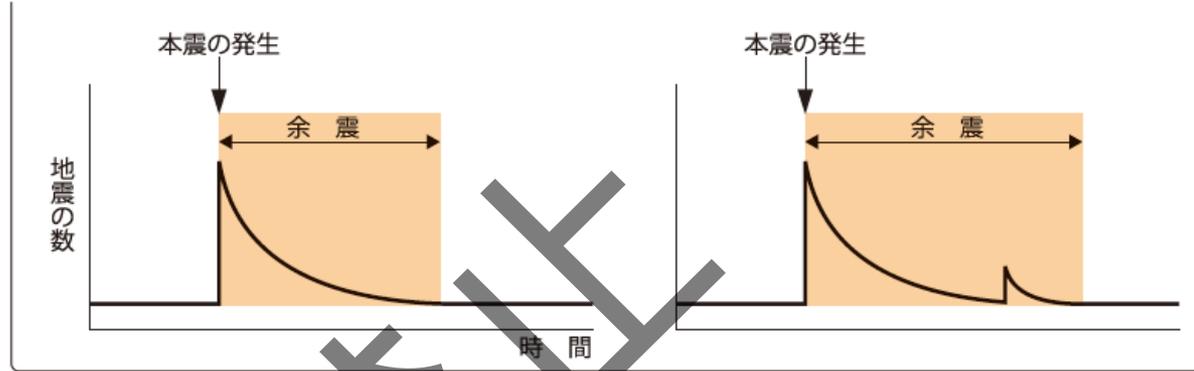
地震活動のパターン 地震がわかる！

本震—余震型：最初に規模の大きな地震が発生し、その後から規模の小さな地震が多く発生

本震：最初の大きな地震

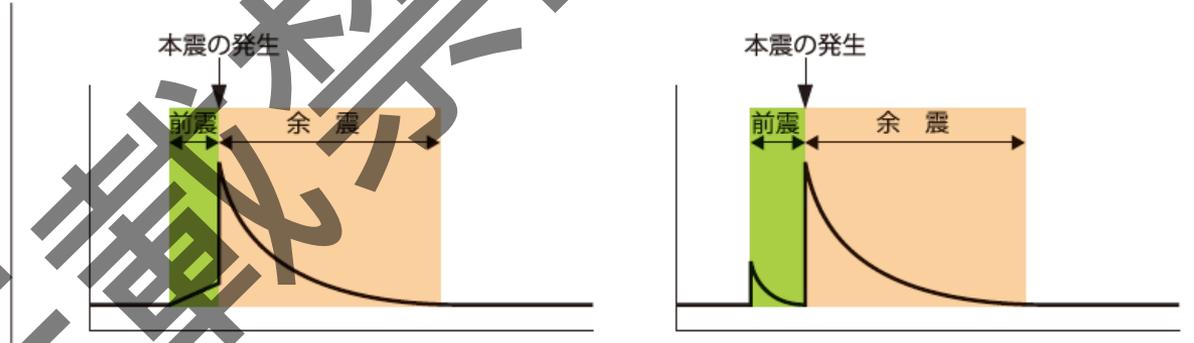
余震：本震に続く小さな地震

本震—余震型



前震—本震—余震型：本震に先立って規模の小さな地震を伴うこともあり、前震と呼ぶ。前震のb値は小さいことがある。

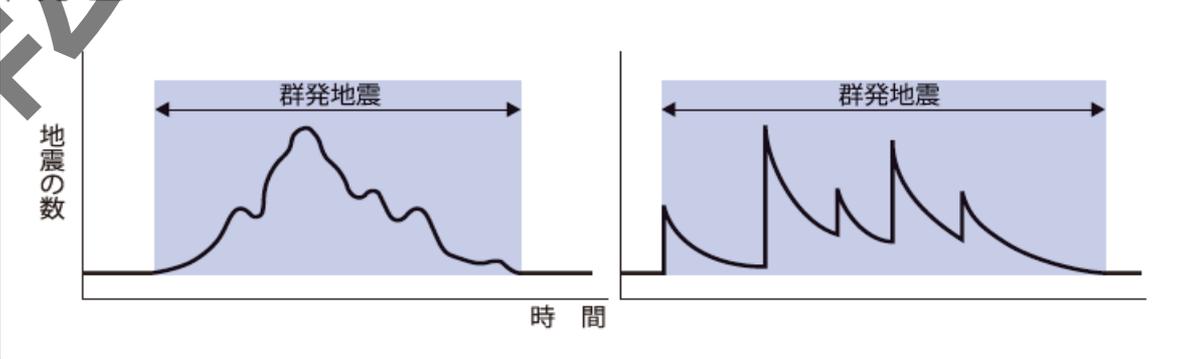
前震—本震—余震型



群発型：大きな地震（本震）が発生せず、j強弱の地震活動を繰り返しながら長期間にわたり活動が続く地震

昭和40年(1965年)の松代群発地震や平成12年(2000年)の伊豆諸島群発地震、伊豆半島東方沖で発生する群発地震がよく知られている。

群発型



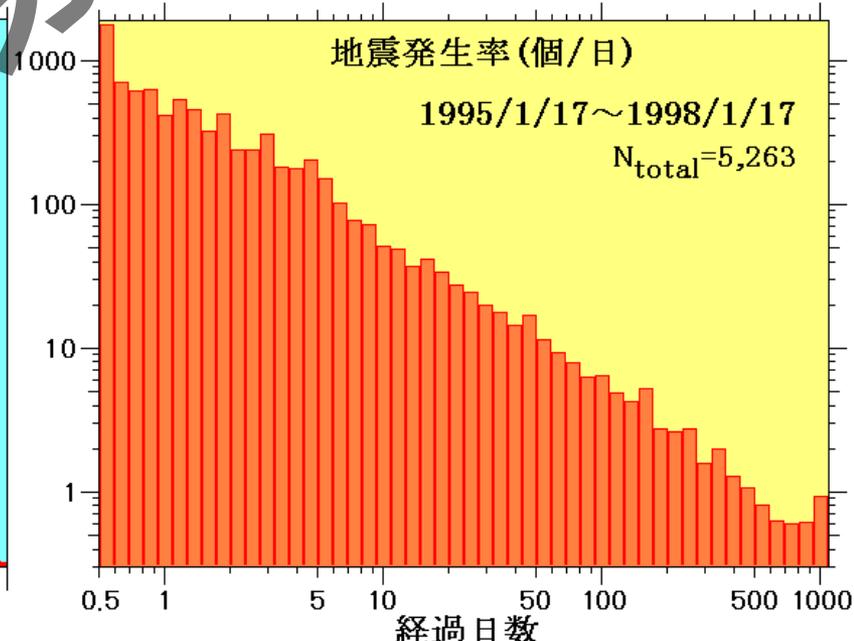
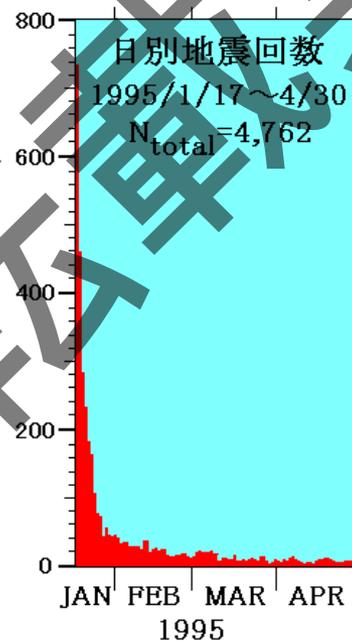
余震の時間的減衰

余震の数は時間とともに減少する。本震から時間が経過したときの単位時間(例えば1時間)当たりの余震数 $n(t)$ とすると、余震数は「改良大森公式(大森・宇津公式)」

$$n(t) = K / (t + c)^p$$

に従って減衰する。ここで、 K 、 c 、 p は余震群ごとに定まる定数で、 p は1.0ないしそれよりやや大きい値となることが多い。 c は数時間以内、長くても1日以内のことが多い。

1995年兵庫県南部地震の余震活動。(左)地震後3ヶ月半の日別余震回数、(右)地震発生から3年間の余震発生率の推移



前震

前震は、大きな地震(本震)の前兆現象の一つだが、本震が発生するより前に、それが前震であるかどうかを判断することは、現状では難しい。(b-値が小さいか、b値の推定に地震数を要する)ただ、前震を伴う地震は全体の10-20%程度と言われている。

最近の前震のケース

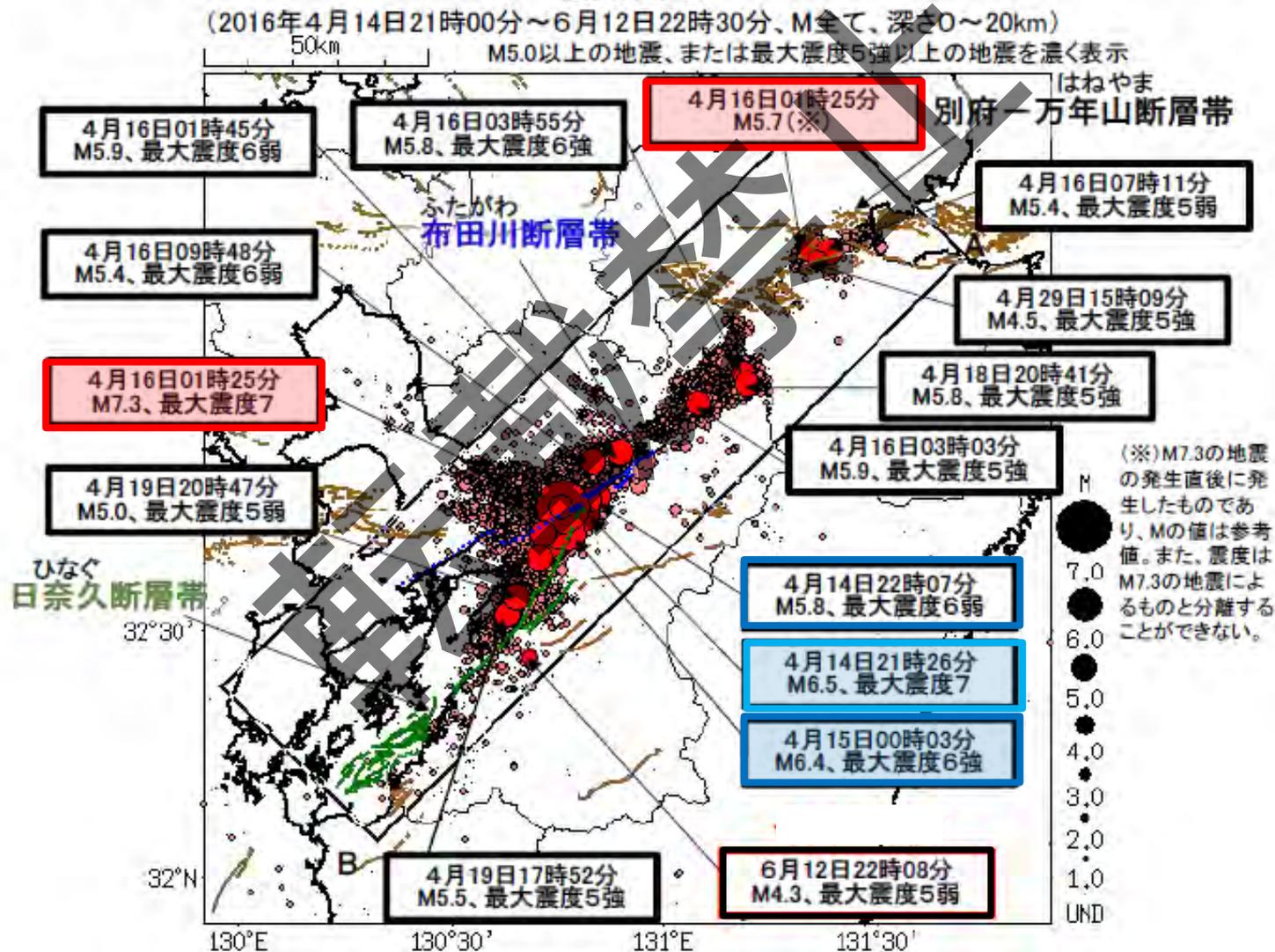
2011年の東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)では発生2日前の3月9日からM7.3(震度5弱)を皮切りにして地震が多数観測されたが、後にこれらは前震であった可能性があると発表された。Mw9.0の本震が発生するまではM7.3の地震を本震、それ以後の地震は余震と判断されていた。

2016年の熊本地震(Mj7.3)では、発生28時間前の4月14日にM6.5(震度7)の地震を中心にM6.4(震度6強)などの地震が多く観測されたが、後にこれらは前震であると判断された

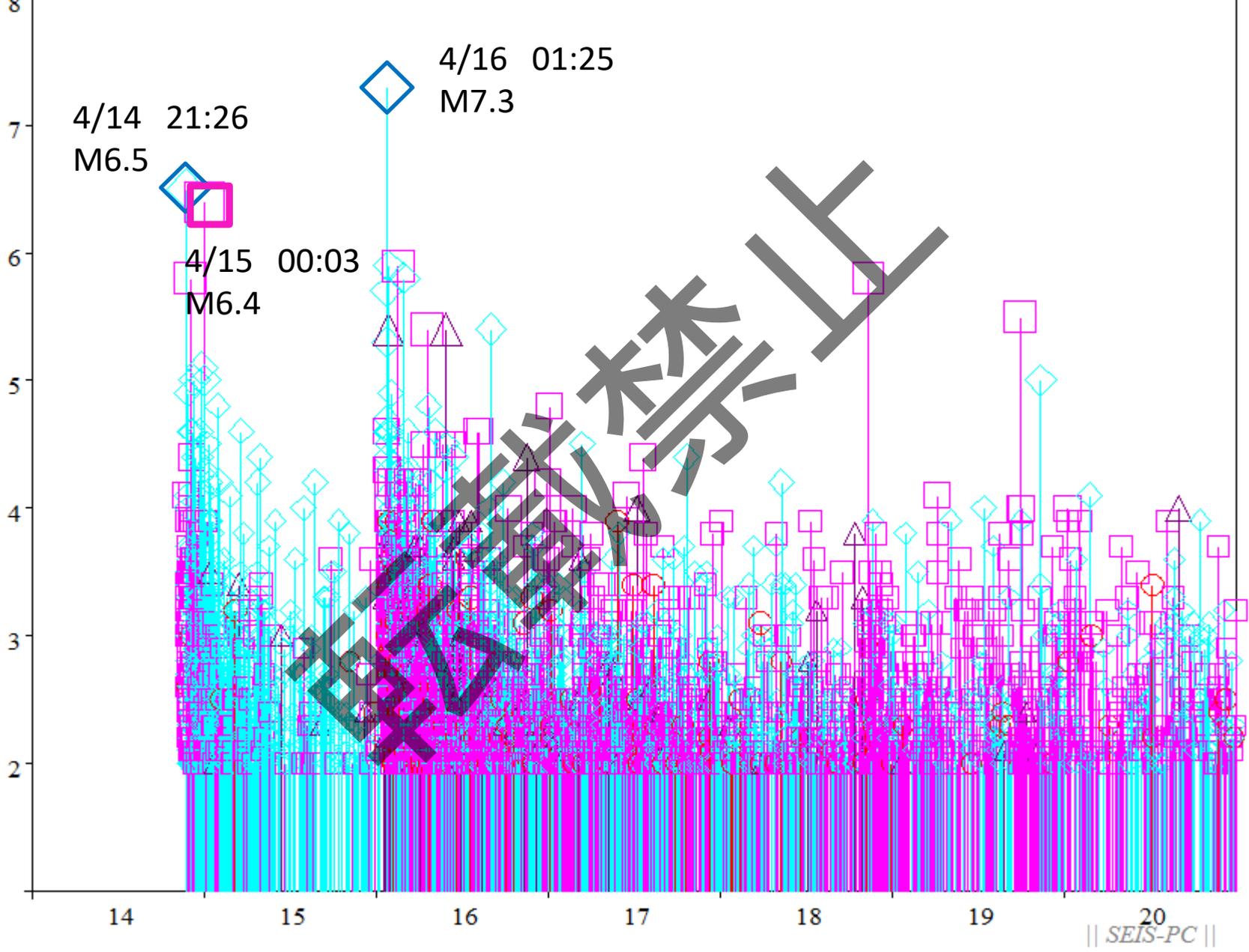
平成28年熊本地震

「平成28年(2016年)熊本地震」(気象庁による命名)は、4月14日21時26分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動を指す。

熊本県から大分県にかけての地震活動の状況(6月12日22時30分現在)
震央分布図



M 2016 4/14 0: 0 -- 2016 4/20 23:59 : M 2.0 <=> 7.5 : Dep 0.0 - 20.0km : NN= 4145 /N= 4149



松代群発地震

1965年8月3日(昭和40年)に始まったとされている(すべての地震のエネルギーを合計するとM6.4相当)。死者は無し。

最大の地震は、1966年4月5日17時51分 M5.4

有感地震は、6万回を越え、1日当たりの有感回数の最大は585回(2.5分に1回、以前は661回としていたが、これは午前9時から翌日の9時までの回数で現在は0時から24時までの回数)、無感地震を含めると6780回(約13秒に1回)を数えた(1966年4月17日)。

繰り返し起きた地震のため善光寺三門(重要文化財)の下層軸部が破損し、応急補強されていたが、平成大修理(平成14年～19年)で本格修理が終了した。

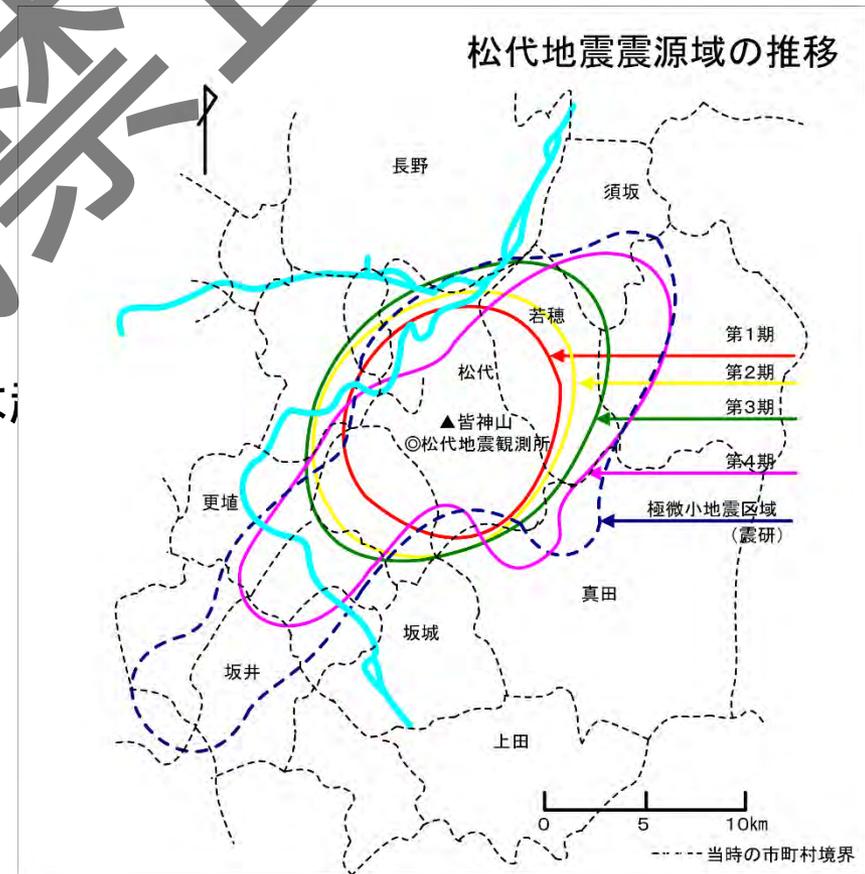
その後、無感地震を含めた総回数は、既に74万回を超え、現在も1日に1回程度は起きている。(2015年:気象庁松代地震観測所)

第1期(1965年8月～1966年2月)

第2期(1966年3月～1966年7月)

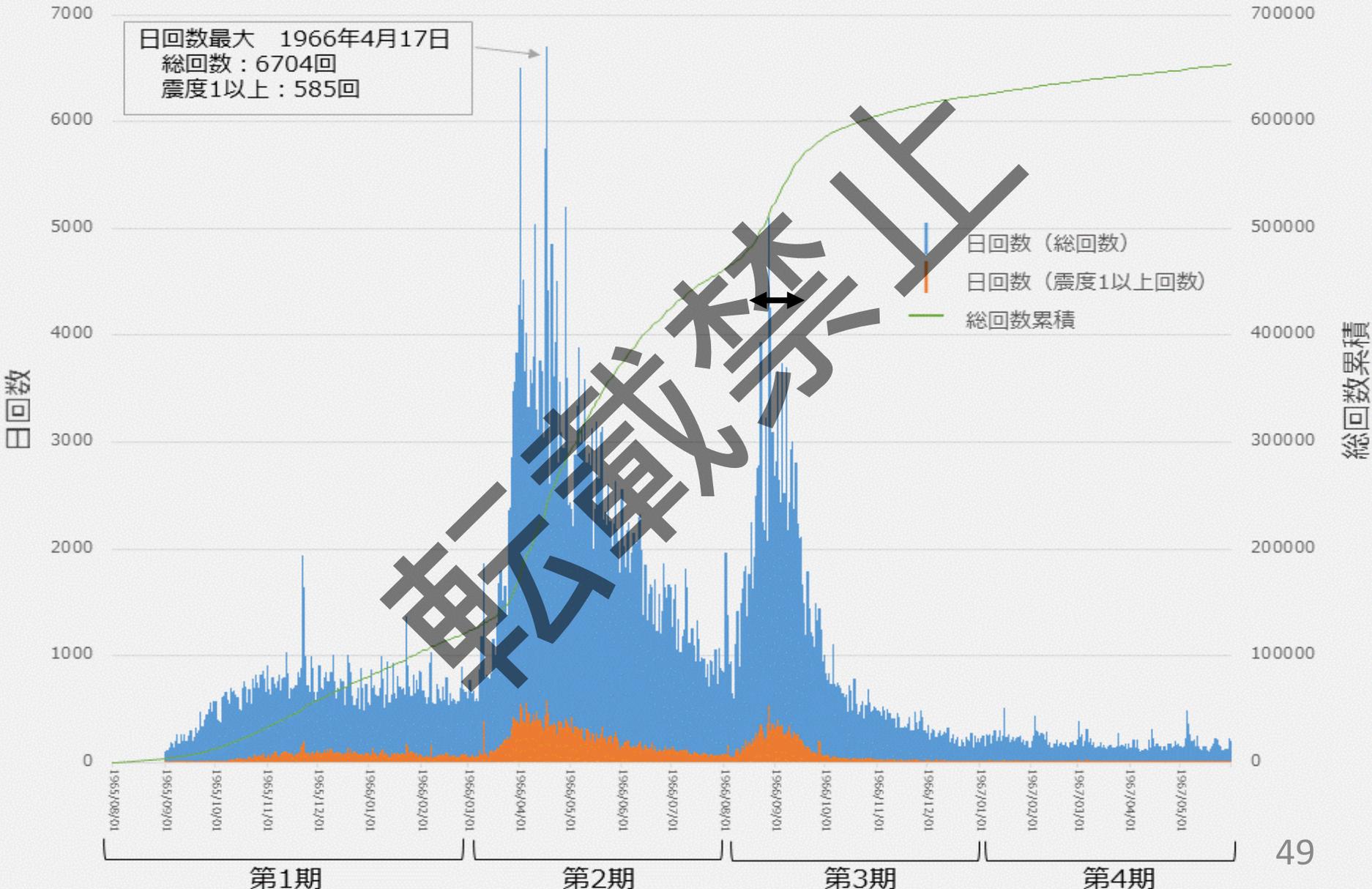
第3期(1966年8月～1966年12月)

第4期(1967年1月～1967年5月)



松代群発地震日別地震回数

松代群発地震日別回数 (1965年8月3日～1966年5月31日)



液状化現象が起きた。
この穴から土砂が噴
出した。

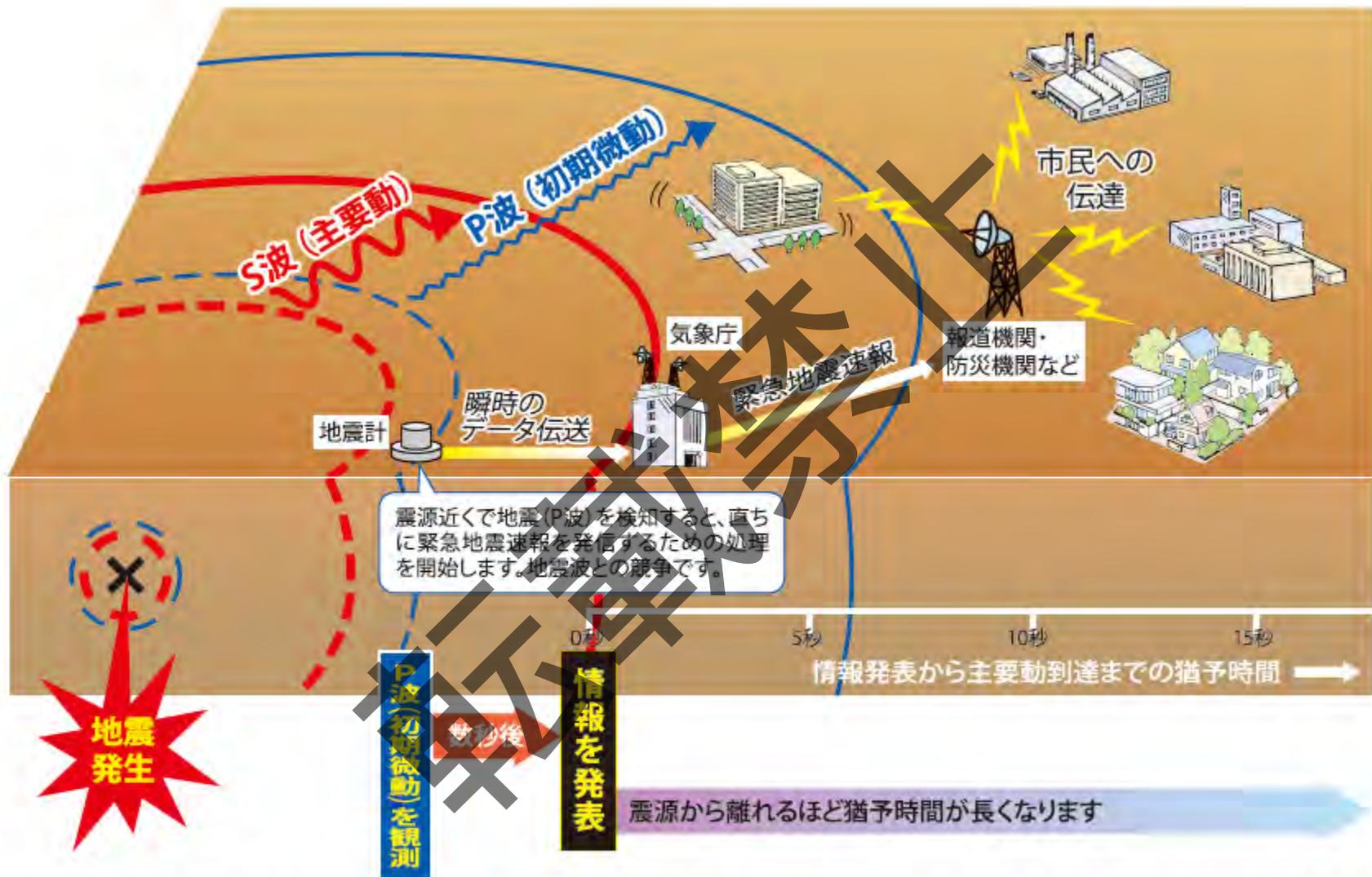
(坂本邦夫氏撮影)

液状化現象だと考えられる噴砂・噴水現象が見られている。1966年4月5日17時51分に起きたマグニチュード5.4、最大震度は5を観測した地震で、須坂市村山地区では、地下水が10～15cm位の口径で、高さ5cmまで噴出する現象が10分間程度続きました。

多くの発光現象の観察記録が集められ、特に松代町東条の栗林亨氏による世界で初めての写真撮影例、10例(8例はカラー)が得られた。これらの資料は、発光現象を科学的に調査する上で貴重な資料となった。松代群発地震は、最盛期には数分間隔で震度1以上の地震、数秒間隔で体に感じない地震が発生しており、発光現象と個々の地震との対応は明確ではない。また、比較的規模の大きい地震の発生時あるいはその前後に、発光が強かったというわけでもなく、発光現象のはっきりした原因は解明されていない。

発光現象。
(栗林亨氏撮影)

緊急地震速報 地震がわかる！



- ・「緊急地震速報」は、震源近くで地震（P波、初期微動）をキャッチし、位置、規模、想定される揺れの強さを自動計算します。地震による強い揺れ（S波、主要動）が始まる数秒～数十秒前に、素早くお知らせします。
- ・ただし、震源に近い地域では、「緊急地震速報」が強い揺れに間に合わないことがあります。

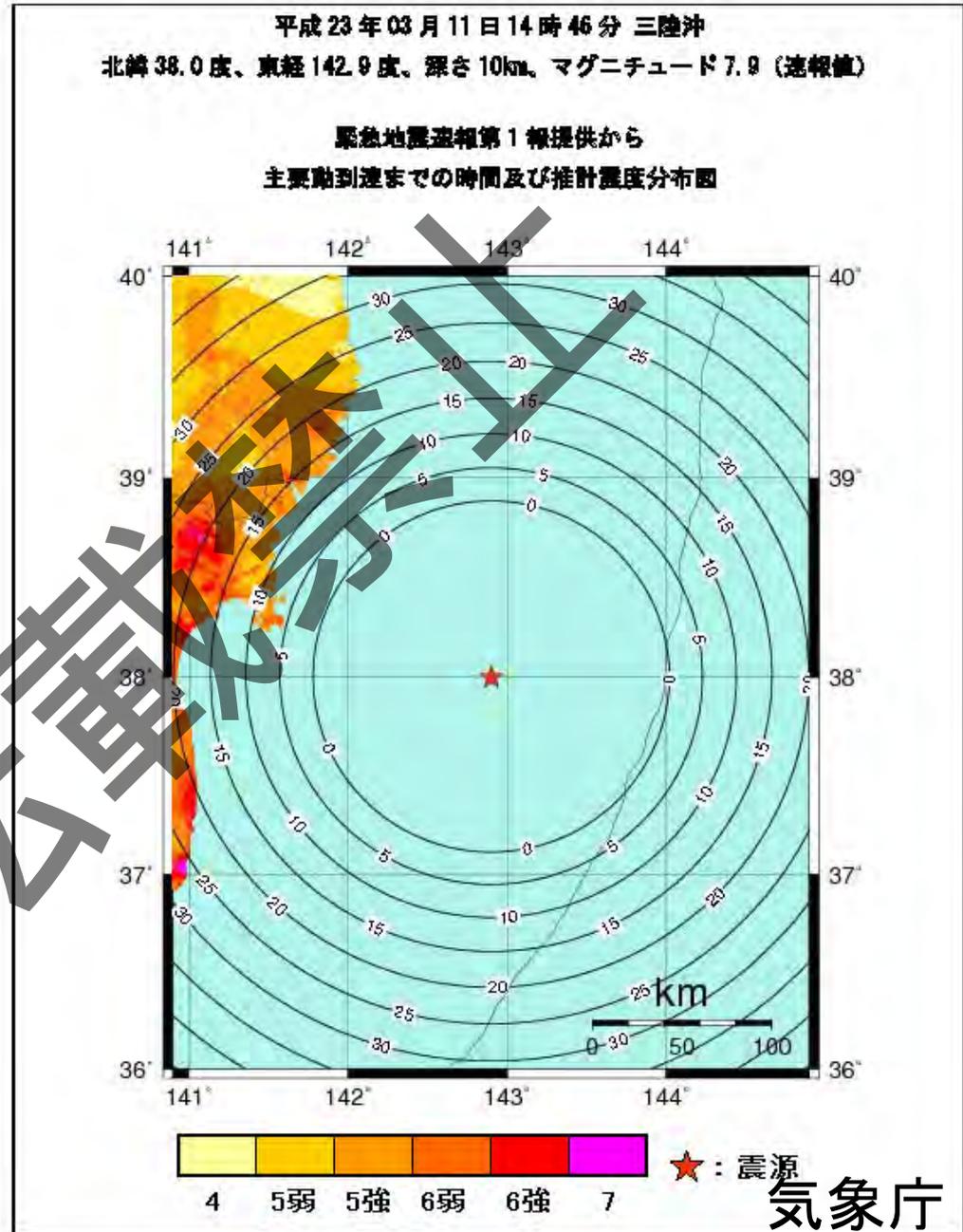
緊急地震速報

Earthquake Early Warning

緊急地震速報とは、地震の発生直後に、震源に近い地震計でとらえたP波観測データを解析して震源や地震の規模(マグニチュード)を直ちに推定し、これに基づいて各地での主要動(S波)の到達時刻や震度を予測し、可能な限り素早く知らせる地震動の予報及び警報のことです。(気象庁)

問題点

1. 震源が近いと有効ではない
2. 大地震では規模(従って震度)の推定が困難。特に関東における震度の過小評価。
3. 余震の同時地震発生の場合区別するのが難しい場合あり。
4. データの欠測



緊急地震速報詳細

発震時 46分18.1秒

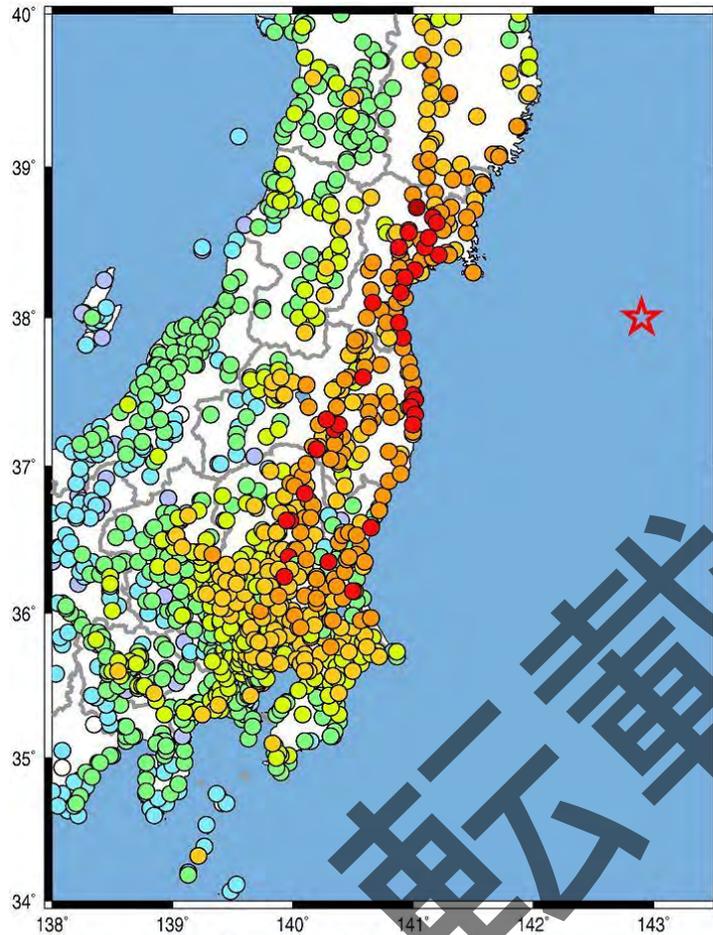
表1 平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震の緊急地震速報の詳細

n報	電文発表時刻	震央地点		マグニ チュード	震源深さ(km)	最大 予測震度
		緯度	経度			
1	14時46分45秒	北緯38.2	東経142.7	4.3	10	1
2	14時46分46秒	北緯38.2	東経142.7	5.9	10	3
3	14時46分47秒	北緯38.2	東経142.7	6.8	10	4
4	14時46分48秒	北緯38.2	東経142.7	7.2	10	5-
5	14時46分49秒	北緯38.2	東経142.7	6.3	10	4
6	14時46分50秒	北緯38.2	東経142.7	6.6	10	4
7	14時46分51秒	北緯38.2	東経142.7	6.6	10	4
8	14時46分56秒	北緯38.1	東経142.9	7.2	10	4
9	14時47分02秒	北緯38.1	東経142.9	7.6	10	5-
10	14時47分10秒	北緯38.1	東経142.9	7.7	10	5-
11	14時47分25秒	北緯38.1	東経142.9	7.7	10	5-
12	14時47分45秒	北緯38.1	東経142.9	7.9	10	5+
13	14時48分05秒	北緯38.1	東経142.9	8	10	5+
14	14時48分25秒	北緯38.1	東経142.9	8.1	10	6-
15(最終)	14時48分36秒	北緯38.1	東経142.9	8.1	10	6-

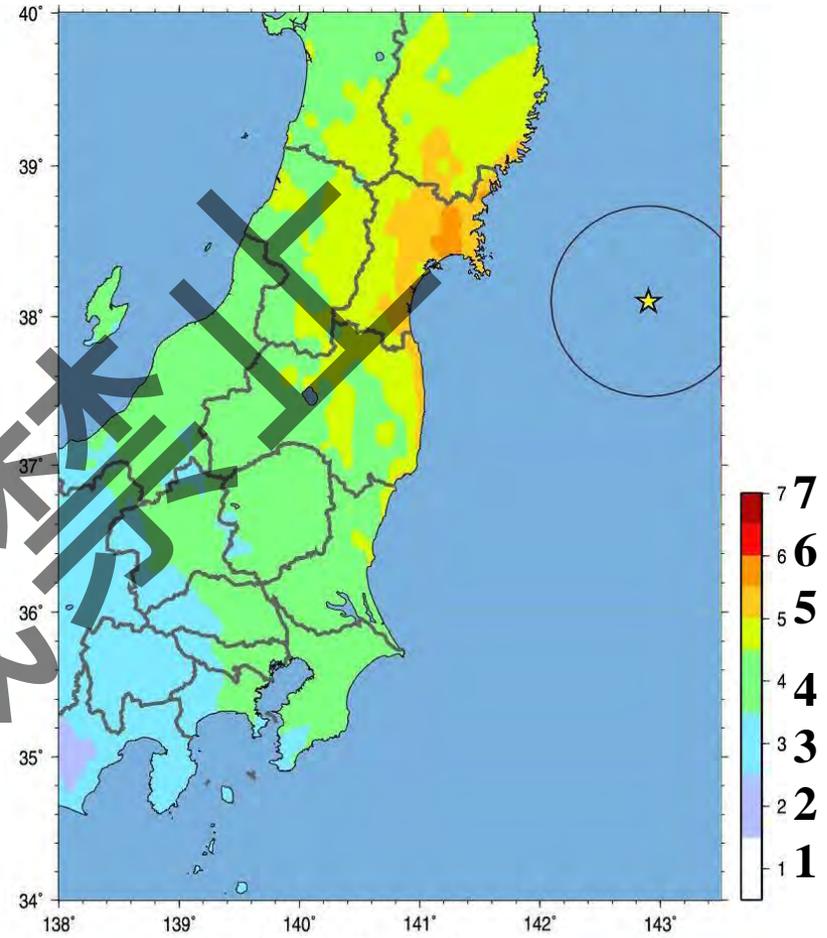
一般向け

震度5を超えると出される一般向けの速報は第4報(赤字)で配信された。最初にP波が観測されてから8秒後、地震発生31秒後に発信。

観測震度



予測震度



緊急地震速報での予測震度マップ(右図)。黒い円は推定された断層面を示している。(現在のシステムでは点震源モデルを使用しているため。)予測震度は関東や東北の多くの地域で過小評価となった。これは、1) 予測マグニチュードが小さかったこと、2) 推定された断層面が小さく、断層距離が長くなったこと、3) 断層形状を考慮しなかったこと、などが原因と考えられる。

山田真澄(京大防災研)

技術的改善の概要・新しい手法の導入（1 / 3）

（IPF法で精度向上）
従来法



P波検出
↓
震源を推定
震源を基に
マグニチュード算出
↓
全域の震度を予測

■ IPF法

- ・ 従来の手法の高度化
- ・ 複数の地震が同時発生した場合でも従来より適切に地震を分離して過大な警報発表を回避
- ・ 従来の手法と同じく、震源の位置やマグニチュードを推定して震度を予測

（巨大地震にも対応）
PLUM法



リアルタイム震度※
（観測値）
↓
周辺の観測値から震度を予測
（震源推定せず）

■ PLUM(プラム)法

- ・ 現在の手法とは根本的に異なる手法
- ・ 震源推定を行わずに予測地点周辺の観測値（リアルタイム震度※）から震度を予測

■ ハイブリッド法

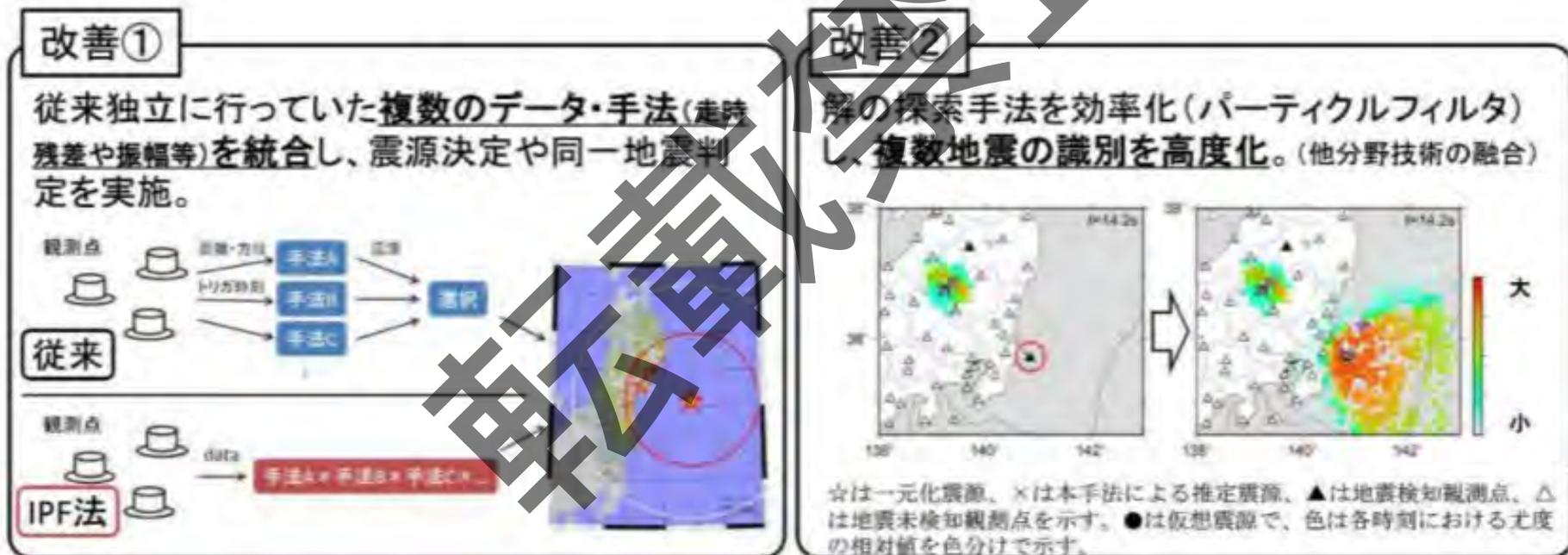
- ・ 従来法（含IPF法）による震度予測とPLUM法による震度予測の大きい方を採用

※：地震動の大きさを即時に算出したもの。（独）防災科学技術研究所による特許。
（「計測震度」は1分間の地震動データから震度値を算出）

複数の地震を分離・識別 IPF法 Integrated Particle Filter 法

2016年
12月18日
より運用
開始

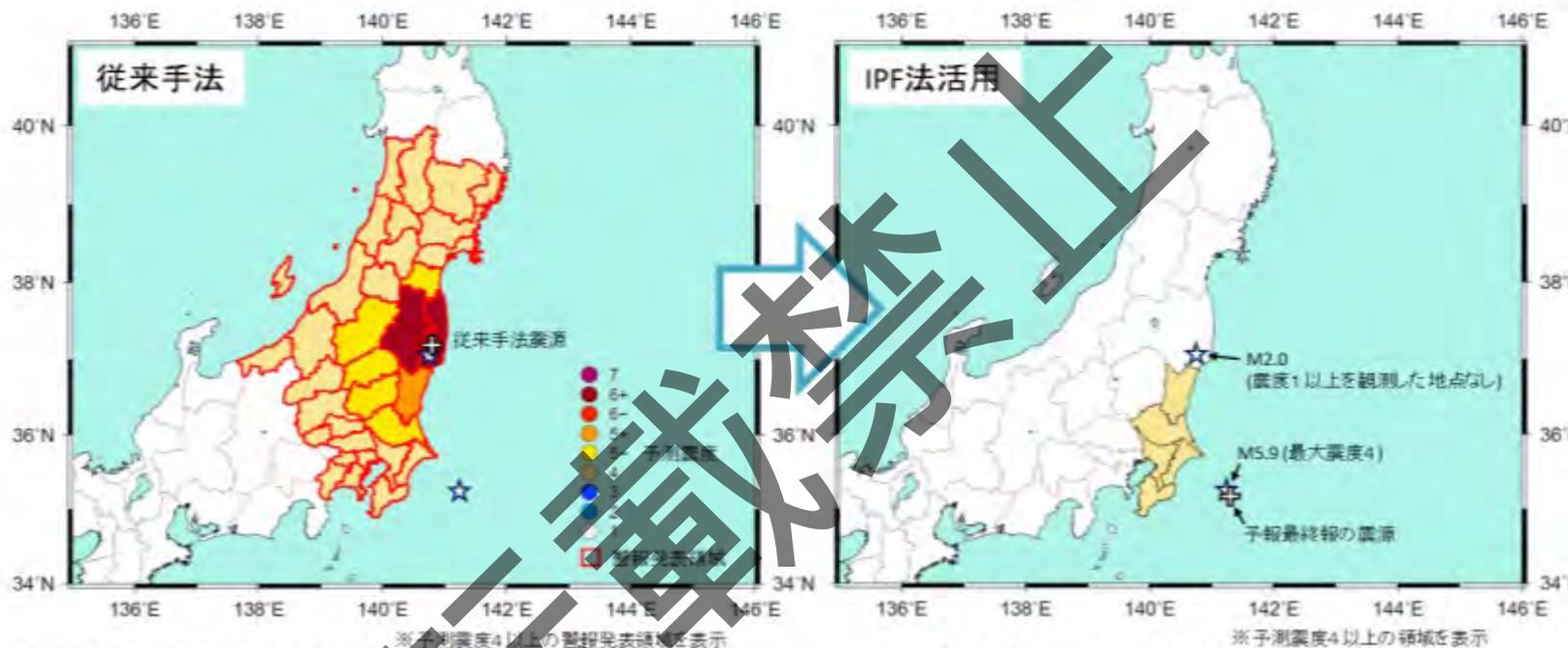
IPF法(Integrated Particle Filter法)とは、震源決定や同一地震判定において、従来別々に用いたデータや手法(走時残差や振幅等)を統合的に用いる手法であり、パーティクルフィルタを用いて震源要素を短時間で求めるなどの効率化を行う。IPF法は、少ない観測点であっても多くの情報を同時に処理に用いるため、緊急地震速報で用いる震源要素の信頼性が向上す



IPF法の概念図

IPF法による改善例

(a) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の地震活動における事例
(平成 23 年 3 月 22 日 12 時 38 分頃の緊急地震速報)



実際に発表した緊急地震速報（警報）の予測震度

IPF 法活用時の最終報の予測震度

千葉県東方沖の地震の直前に発生した福島県浜通りの小さな地震の影響を受け、従来手法（左図）では、福島県浜通りの地震（M7.2）として広範囲に警報を発表した（最大予測震度は6強）。IPF 法（右図）では二つの地震を識別し、千葉県東方沖の地震に対して最大予測震度4の緊急地震速報（予報）を発表。（実際に観測した最大震度は4）

震源を推定せずに
震度予測を行う



PLUM法による震度予想は、近傍(半径30km以内)で強い揺れを観測して以降に可能なものであるため、猶予時間は短い。

※: 各地点の地盤の揺れやすさ=増幅度=も加味して ▼ 地点に対する予想値を計算する。

<目的> 震度の観測値 (リアルタイム震度) を基に震度を予測することで、震源推定に関係なく震度の予想を行う。

東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の場合も、震源から遠い地域に対しても警報を発表する。

<効果>

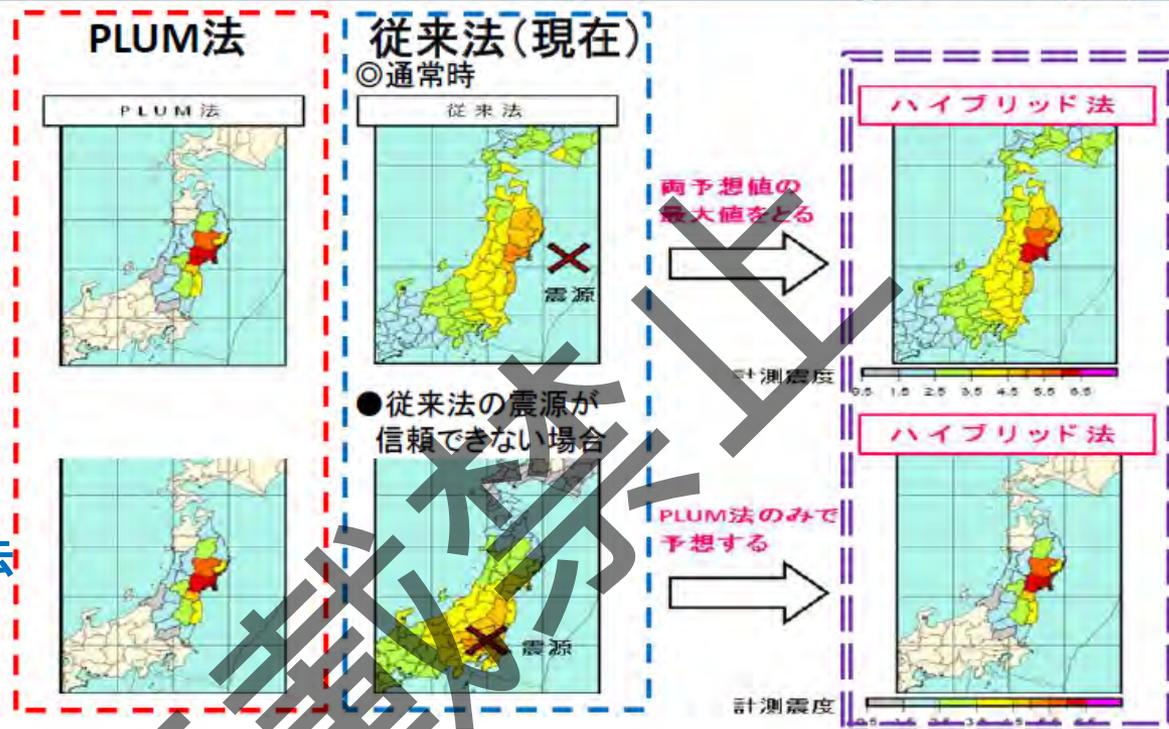
- 東北地方太平洋沖地震の事例で、関東地方に強い揺れを適切に推定。(5弱以上を観測した全41予報区中、予測が2階級以上ずれたのは3予報区のみ)

ハイブリッド法

Hybrid法

PLUM法と従来法の
の長所を生かし、
組合わせて活用

気象庁の緊急地震速報
では、従来の手法と
PLUM法の両手法での
予想震度を比較(両手法
をハイブリッド)して、大
きい方の予想を基に発
表します。



<目的> 地震発生当初は従来法、巨大地震の場合はPLUM法の特徴を生かして迅速・確実な緊急地震速報の発表が可能。
PLUM法の予測値だけで緊急地震速報の発表が可能。

<効果>

- 東北地方太平洋沖地震以後2011年12月までに、警報を発表した全94地震について、予報区域別に見た場合、予想した震度が±1階級に収まる割合が76%から88%に改善

新しい手法の運用面での特徴

1. PLUM報による震度予測では、猶予時間は長くても十秒程度。
2. PLUM法のみによる震度予測では、震源の位置・マグニチュードの値を仮定値とする。

PLUM法のみで震度予想を行った場合は推定震源がないが、電文フォーマットを維持するため、最初の地震を検知した観測点の緯度経度・深さと、それを基に算出したマグニチュードを代入。

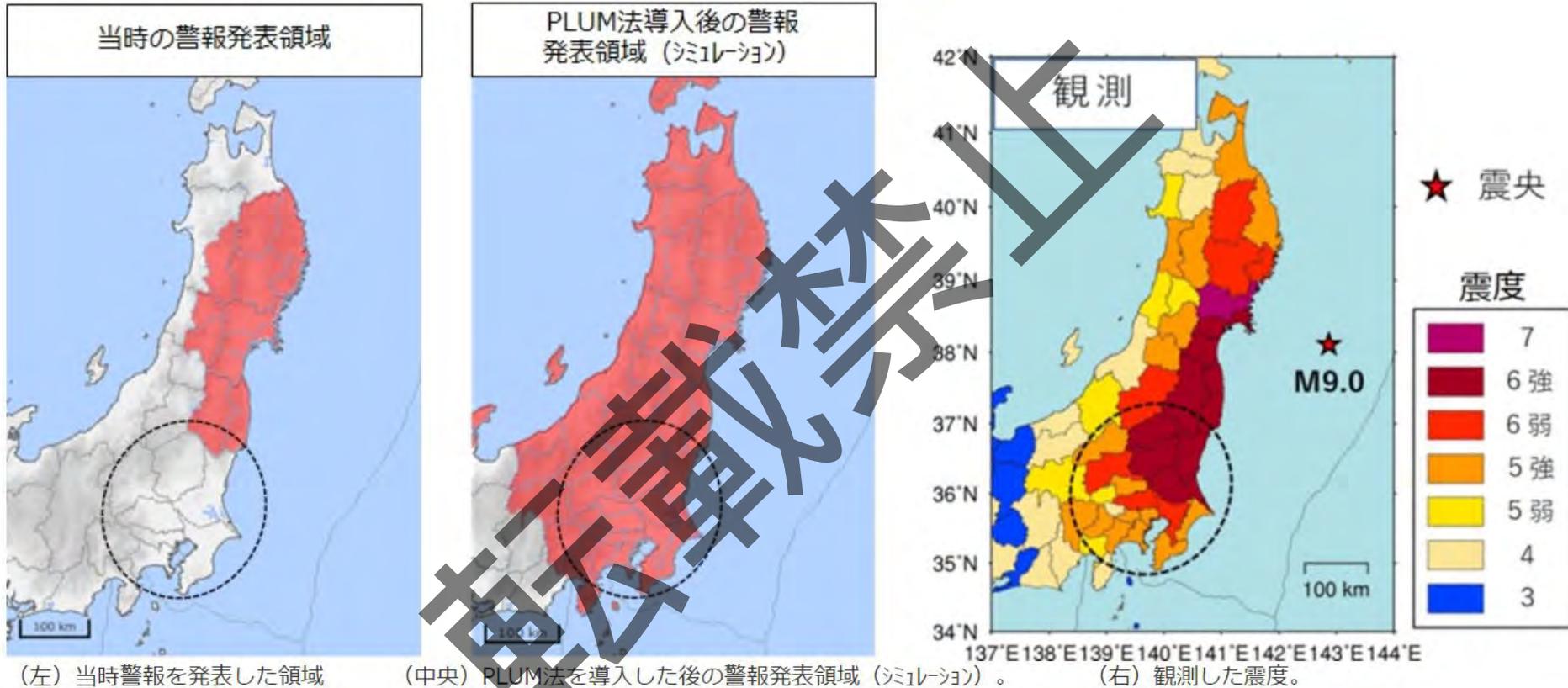
3. PLUM法（ハイブリッド法）導入により、警報・予報の発表（続報）回数が増加。

3.11東北地方太平洋沖地震のシミュレーション

- ・ 現行の手法 警報：2通 予報：約15通（警報発表60秒制限なしの場合）
- ・ ハイブリッド法 警報：4通 予報：約50通
- ・ PLUM法のみ 警報：7通 予報：約100通

緊急地震速報: PLUM法(ハイブリッド法)の導入 (2018年3月22日:気象庁)

PLUM法による改善事例(平成23年東北地方太平洋沖地震 マグニチュード9.0の地震)



従来手法は震源域の広がりに対応できなかったために、関東地方の強い揺れが予想できなかった(図中黒円内)。PLUM法は揺れの広がりそのものから揺れを予想するため、震源から離れた関東地方の強い揺れも予想できる。

緊急地震速報：予報・警報・特別警報

緊急地震速報（予報）：

最大震度が3以上と予想されるなど一定の基準を超える地震が発生した場合に、各地域や地点で予想される震度や、大きな揺れ（主要動）の到達予想時刻などを発表するものです。一般に「緊急地震速報（予報）」は、1つの地震に対して数回（5～10回程度）発表されます。

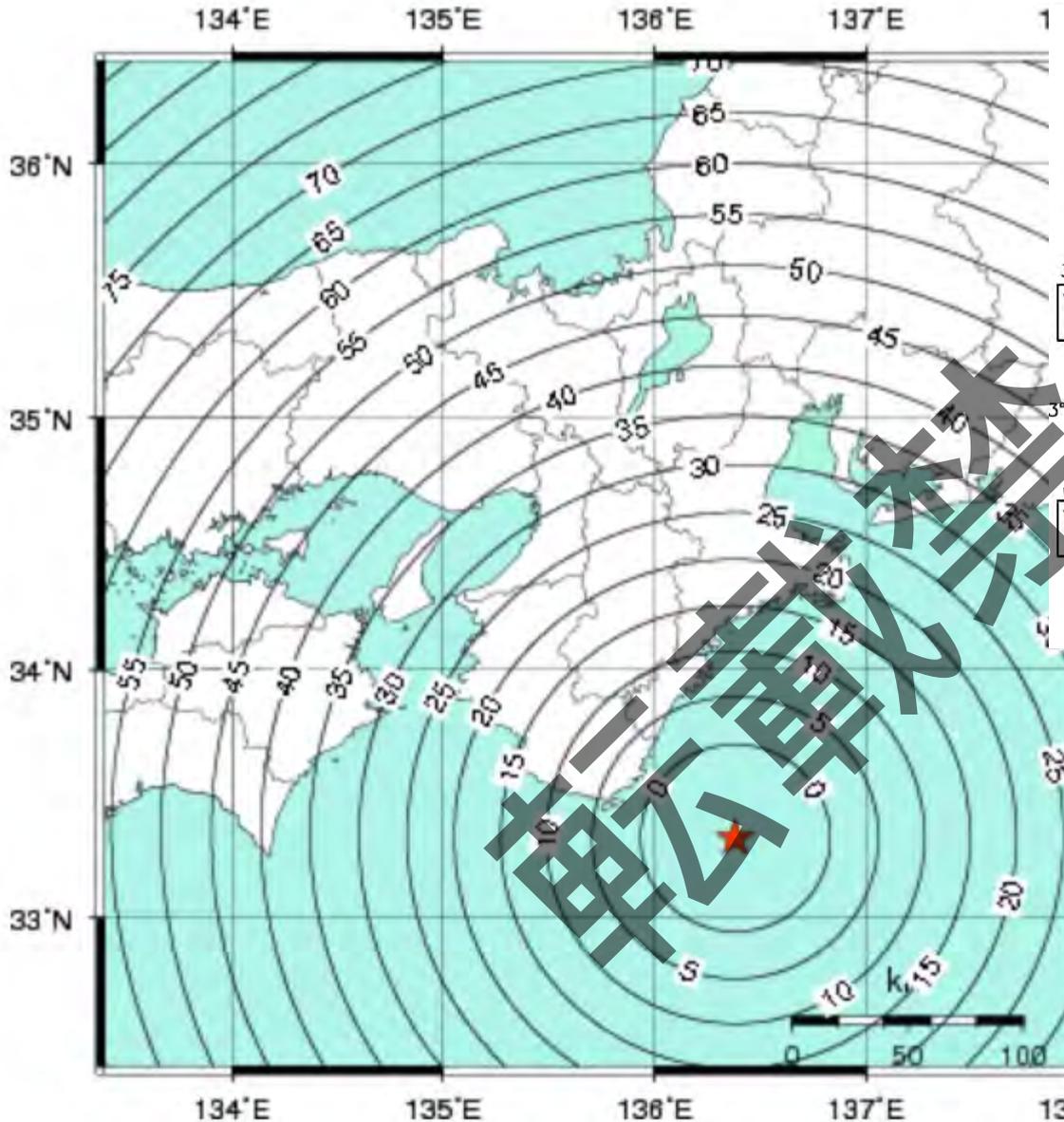
緊急地震速報（警報）：

特に強い地震が発生した場合（最大震度が5弱以上と予想される場合）に、強い揺れが予想される地域を発表するものです。各地域で予想される震度や、大きな揺れ（主要動）の到達予想時刻は発表せず、対象地域に対して端的に警戒を呼びかけます。一般にテレビや携帯端末などで見聞きする緊急地震速報はこの「警報」にあたります。

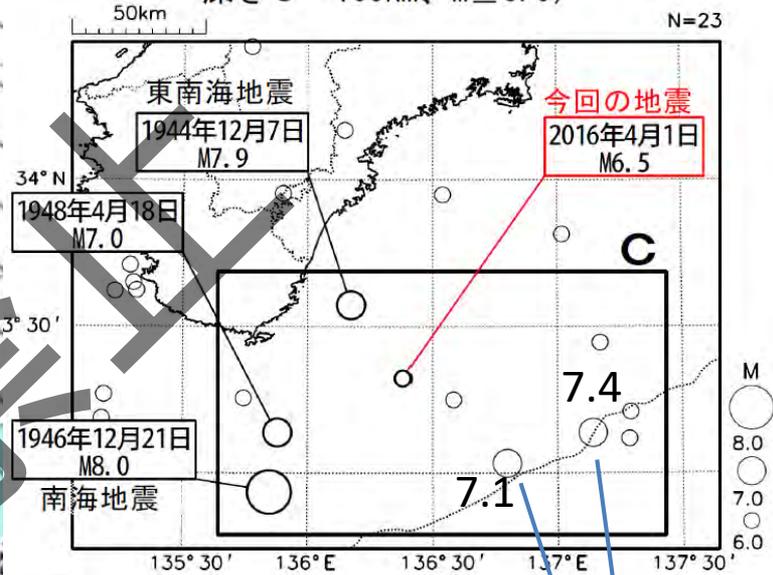
特別警報：

「緊急地震速報（警報）」のうち、震度6弱以上の大きさの地震動が予想される場合を「特別警報」に位置付けています。

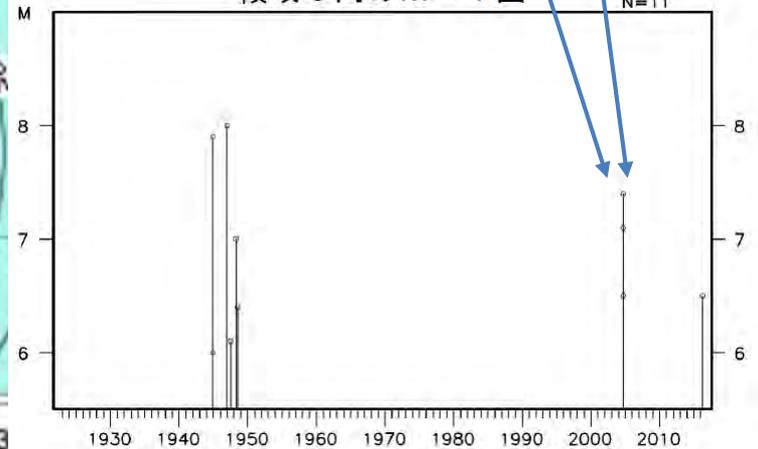
2016年4月1日 三重県南東沖 深さ29kmk M=6.5



震央分布図
(1923年1月1日~2016年4月6日、
深さ0~100km、M≥6.0)

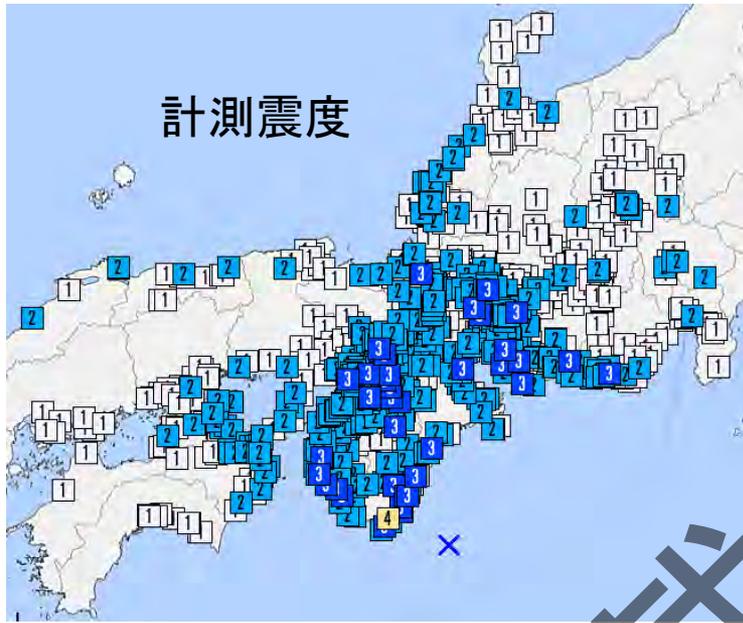


領域c内のM-T図 N=11



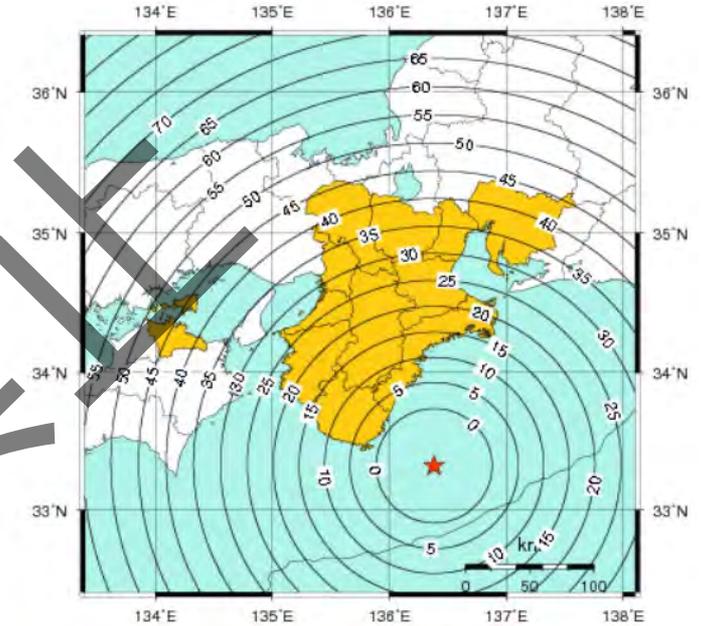
緊急地震速報第1報提供から主要動到達までの時間

2016年4月1日三重県南東沖地震(Mj6.5,Mw5.8)



緊急地震速報(警報)第1報を発表した地域及び主要動到達までの時間

気象庁HP
より



緊急地震速報の詳細

(緊急地震速報(警報)は背景が灰色[第3報]の時に発表)

地震発生日時
平成28年04月01日11時39分7.8秒

提供時刻等	地震波検知時刻	地震波検知からの経過時間(秒)	震源要素等				予測震度
			北緯	東経	深さ	マグニチュード	
	11時39分17.5秒	—	—	—	—	—	
1	11時39分21.9秒	4.4	33.3	136.4	10km	5.8	※1
2	11時39分22.4秒	4.9	33.3	136.4	10km	6.3	※1
3	11時39分22.9秒	5.4	33.3	136.4	10km	6.7	※2
4	11時39分23.9秒	6.4	33.3	136.4	10km	6.7	※2
5	11時39分24.3秒	6.8	33.3	136.4	10km	6.3	※1
6	11時39分27.6秒	10.1	33.3	136.4	10km	6.6	※3
7	11時39分40.0秒	22.5	33.3	136.4	10km	6.5	※4
8	11時39分42.8秒	25.3	33.3	136.5	10km	6.4	※1
9	11時39分47.6秒	30.1	33.3	136.5	10km	6.5	※5
10	11時40分07.1秒	49.6	33.3	136.5	10km	6.6	※6
11	11時40分19.3秒	61.8	33.3	136.5	10km	6.6	※6

緊急地震速報(警報)を発表した地域 ★: 震源

- ※1 震度4程度 和歌山県南部、三重県南部
- ※2 震度4から5弱程度 和歌山県南部、三重県南部
- 震度4程度 和歌山県北部、奈良県、大阪府南部、三重県中部、愛知県西部
- 震度3から4程度 三重県北部、滋賀県南部、京都府南部、香川県東部
- ※3 震度4から5弱程度 和歌山県南部
- 震度4程度 三重県南部、和歌山県北部、大阪府南部、三重県中部、愛知県西部
- 震度3から4程度 奈良県
- ※4 震度4程度 和歌山県南部、三重県南部、和歌山県北部、愛知県西部
- 震度3から4程度 大阪府南部、三重県中部
- ※5 震度4程度 和歌山県南部、三重県南部、愛知県西部
- 震度3から4程度 和歌山県北部、三重県中部、大阪府南部
- ※6 震度4程度 和歌山県南部、三重県南部、和歌山県北部、三重県中部、奈良県
- 震度3から4程度 奈良県

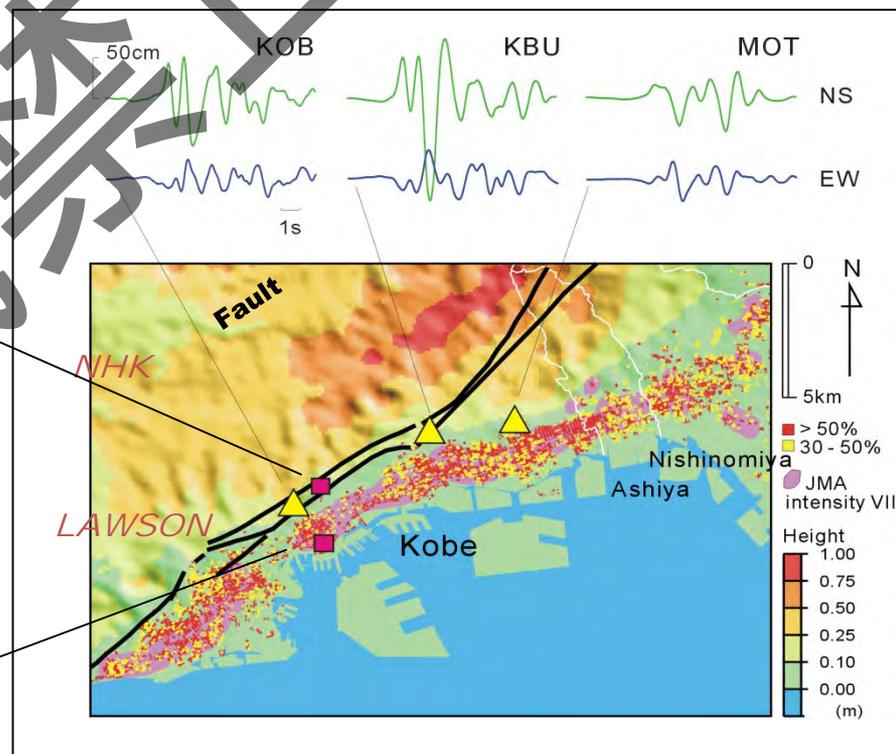
直下型地震

緊急地震速報が間に合わない！

(a) VCR Record



(b) 断層近傍の強震動



コンビニ

地震観測 地震計

地震計の原理

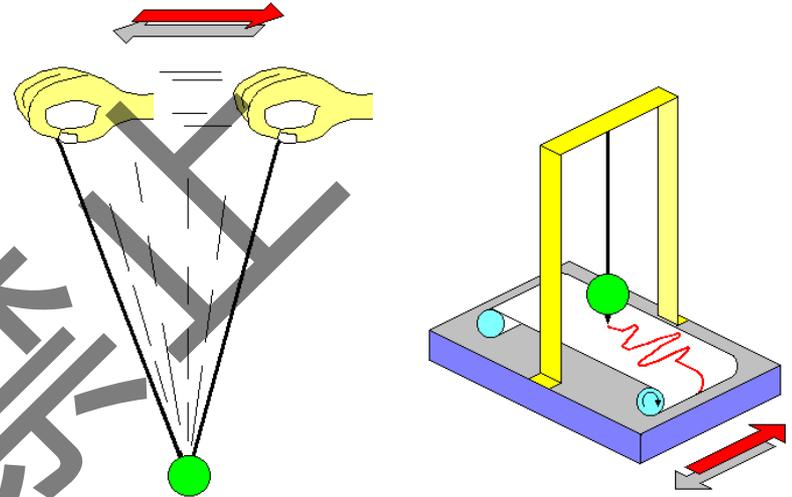
ある地震計で記録できる振動の速さの目安は、その振子自身を自由に振らせた時の振動周期、すなわち**固有周期**です。長さ l をもつ単振子の固有周期 T は、重力加速度を g ($=9.8\text{m}/\text{sec}^2$)として、 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ で表わされます。たとえば $l=6\text{cm}$ なら $T \doteq 0.5$ 秒、 $l=25\text{cm}$ なら $T \doteq 1$ 秒、 $l=1\text{m}$ なら $T \doteq 2$ 秒であり、振子はこの T よりも短い周期の振動に対しては地面の変位に等しい振れを、また T よりも長い周期の振動に対しては地面の加速度に比例する振れを示します。

加速度は建築物等に加わる力に関する量であり、一般に**強震計**では、非常に短い固有周期を持った振子を用いて、対象地震動の加速度を計測しています。一方、**高感度地震計**は固有周期が1秒前後、**広帯域地震計**は固有周期が数10秒程度の振子を用い、変位特性の領域で計測を行なうのが一般的です。

地面の上におかれた地震計がなぜ地面の動きを記録できるのか？

手を素早く動かすと、振り子は動かない。

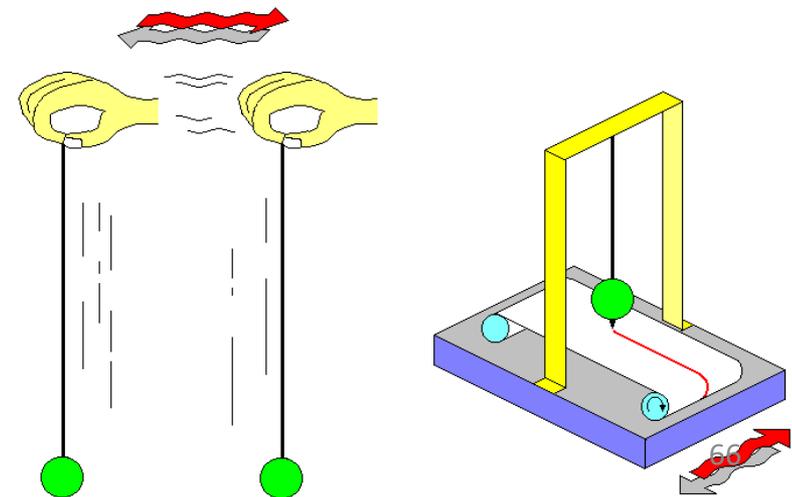
地面が早く動くと、その記録が残る。



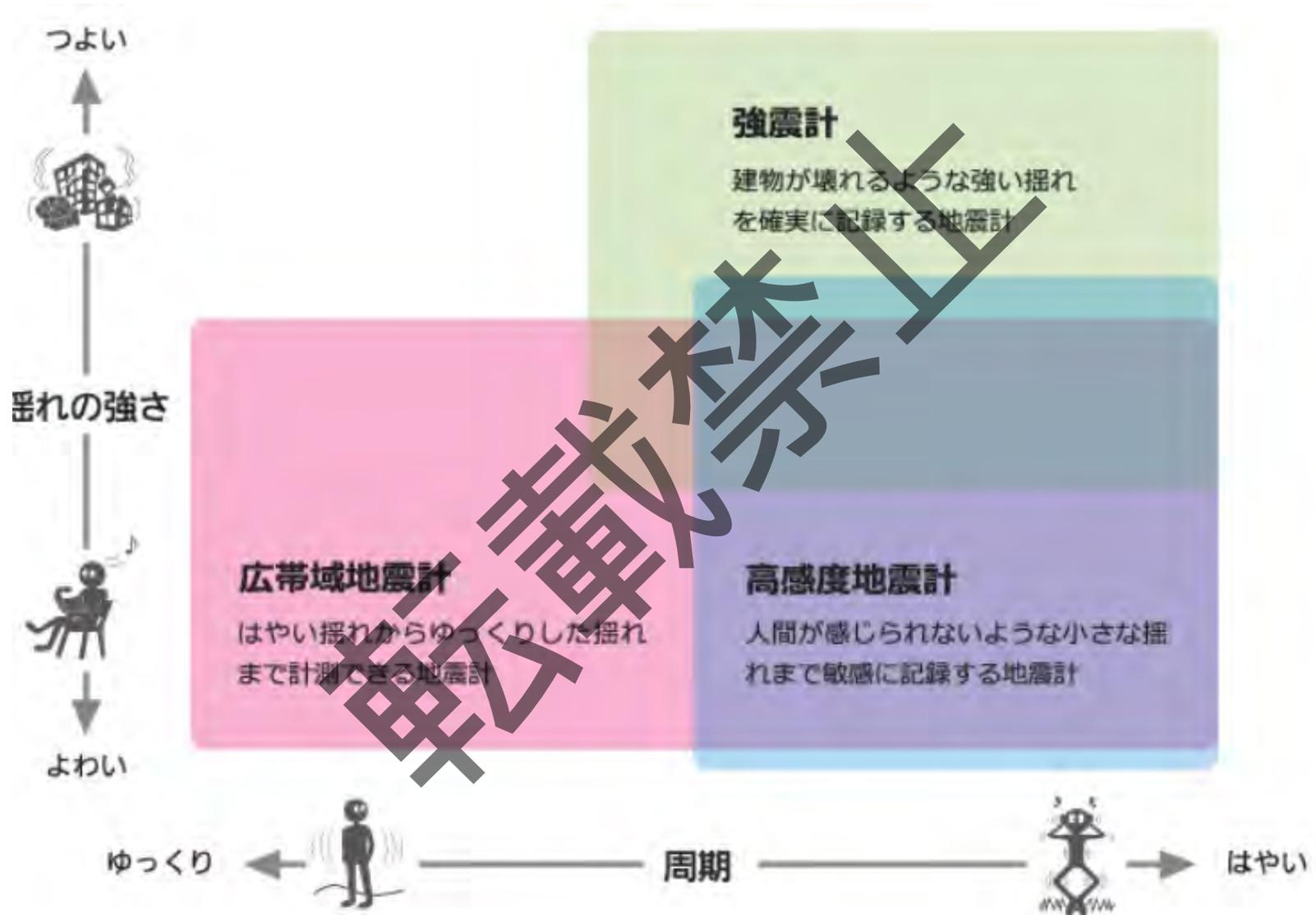
地面がゆっくりと動く場合はどうなる？

手をゆっくり動かすと振り子がついてくる。

地面がゆっくり動くとその記録は残らない。



3種類の地震計



地震観測 観測地震波形

■ 2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震の余震で観測した地震波形

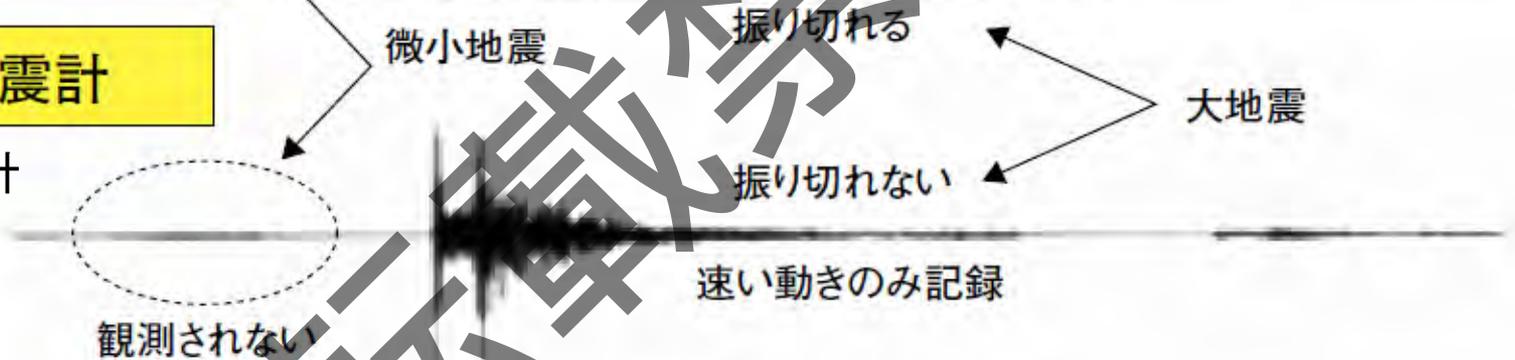
高感度地震計

速度計



強震計

加速度計



広帯域地震計

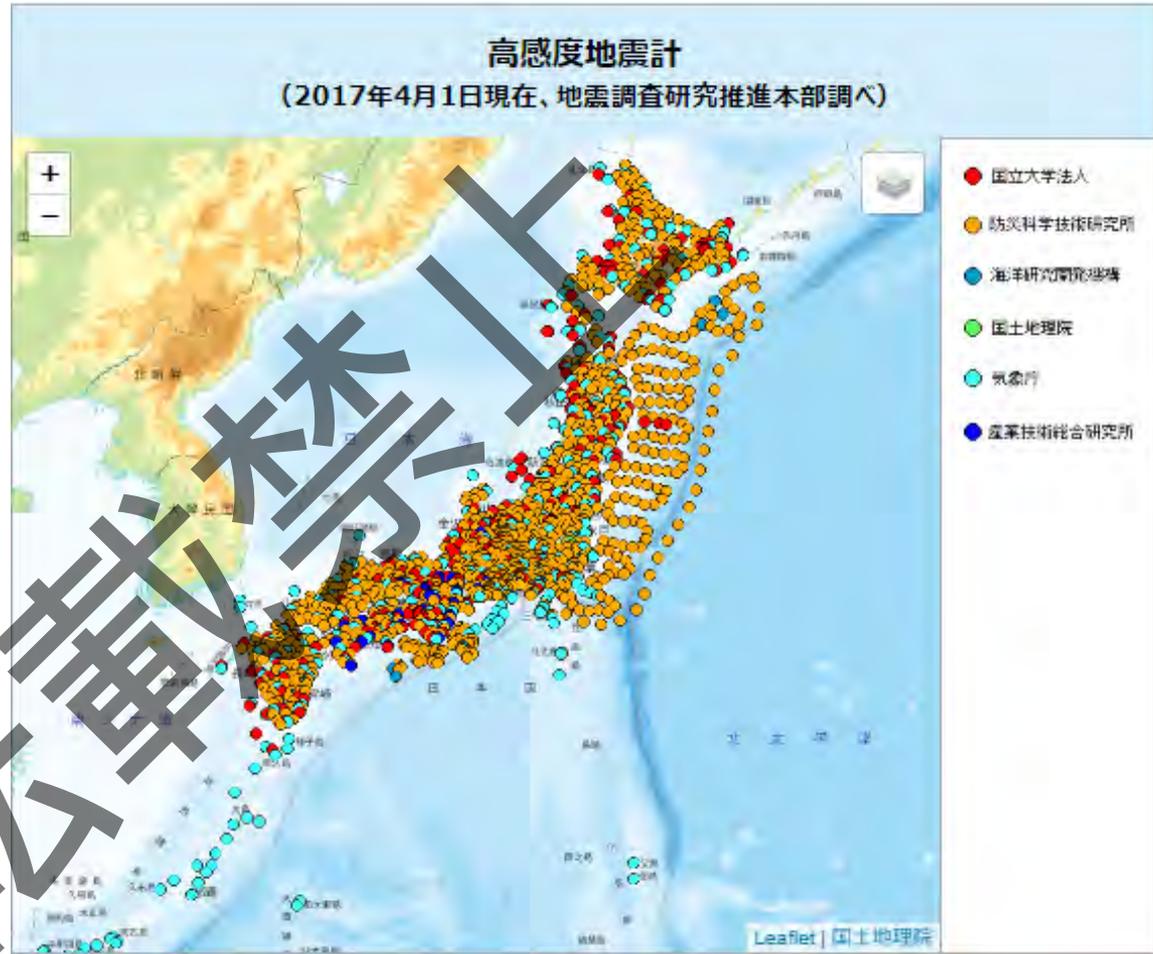
変位・
速度計



地震観測 高感度地震計による観測-微小地震観測

高感度地震計は、人間が感じることが出来ないような非常に小さな地震(微小地震)をとらえ、その震源位置や断層運動のメカニズムを高い精度で推定します。

現在、高感度地震計は、全国で偏りなく**微小地震**を検知できるよう、**15 ~ 20km 間隔**を目安として、独立行政法人防災科学技術研究所(Hi-net)、国立大学法人、気象庁などにより全国1000ヶ所以上設置されています。これらは一体的な観測ネットワークを構築し、すべてのデータはリアルタイムで相互に流通して各機関における業務に資するなど、様々な地震調査研究を支えています。



地震本部 観測施設一覧 高感度観測点

https://www.jishin.go.jp/main/kansoku/kansoku17/gis/high_sens_gis_2017.html

地震観測 高感度地震計による観測-微小地震観測

高感度地震計

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



地震本部 観測施設一覧 高感度観測点

https://www.jishin.go.jp/main/kansoku/kansoku17/gis/high_sens_gis_2017.html

地震観測 強震計による観測-強震観測

強震計は、規模の大きな地震による強い揺れでも振り切れずに記録できます。

強震計による観測網では、地震動の強さやその周期、継続時間およびそれらの分布を把握することが出来るほか、震源域で断層の破壊が進む様子を解明する研究にも活用されます。また、表層の地盤構造が地震動に及ぼす影響を明らかにして、強い地震動の予測を行うために役立てられます。強い地震動を即時に把握して、被害の大きな地域を推定し、防災活動を有効に展開するための情報を与えることが期待されています。

現在、強震計は地方公共団体、独立行政法人防災科学技術研究所、国土交通省などにより全国7000ヶ所以上設置されています。それらの多くは地表に設置されていますが、地盤の構造に深く関わる地震動の特性を把握するには、地下の基盤(固い岩盤)での観測が必要不可欠です。そのため、高感度地震計に併設するなど、地下の基盤にも強震計が整備されています。

防災科学技術研究所観測網

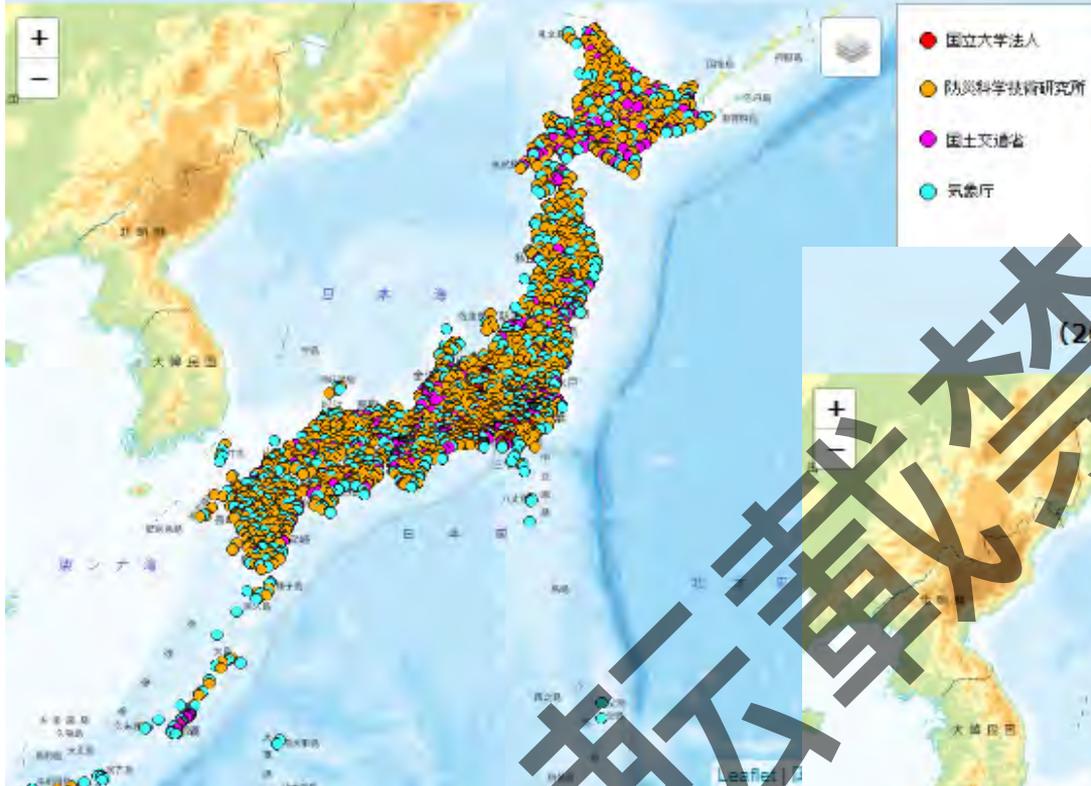
K-NET (Kyoshin Net: 全国強震観測網): 全国を約20km 間隔で1,000箇所以上の強震観測施設からなり、地表に強震計が設置されています。

KiK-net (Kiban-Kyoshin Net: 基盤強震観測網): 地震調査研究推進本部が推進している「地震に関する基盤的調査観測計画」の一環として、高感度地震観測網 (Hi-net) と共に整備した強震観測網で、全国約700 箇所に配置され、各観測施設には観測用の井戸(観測井)が掘削されており地表と地中(井戸底)の双方に強震計が設置され、鉛直アレーを構成しているのが特徴です。

地震観測 強震計による観測-強震観測

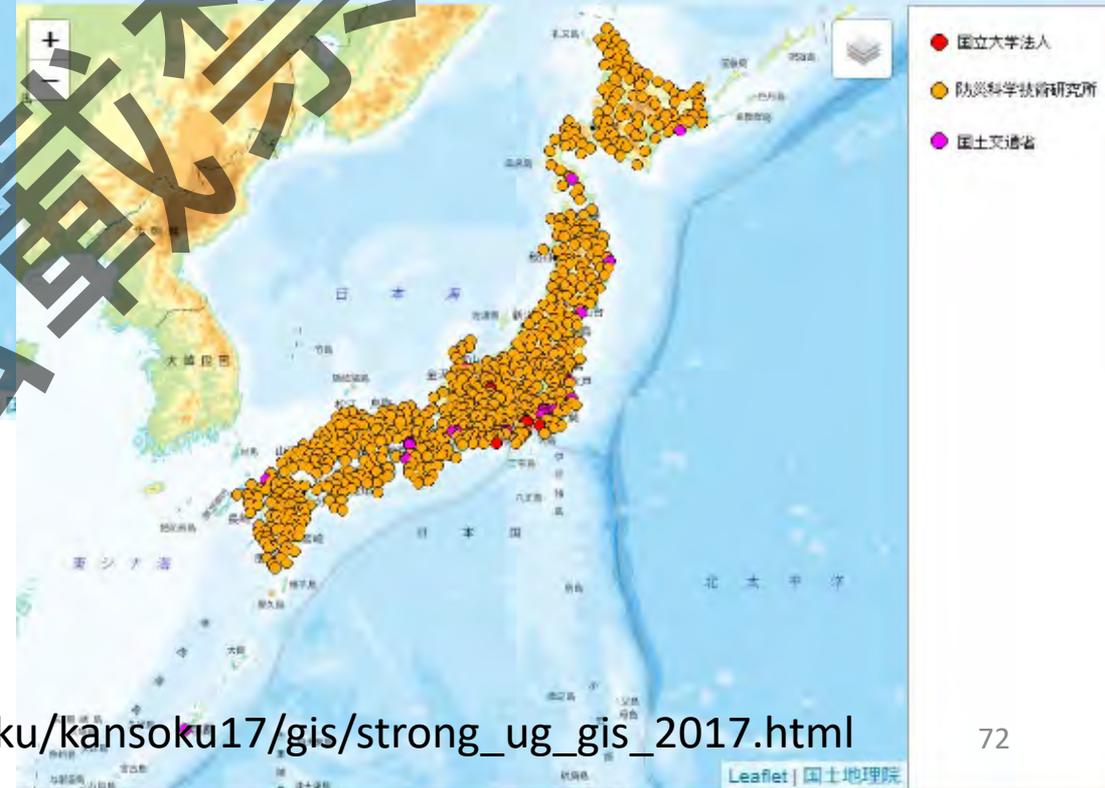
強震計 (地上)

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



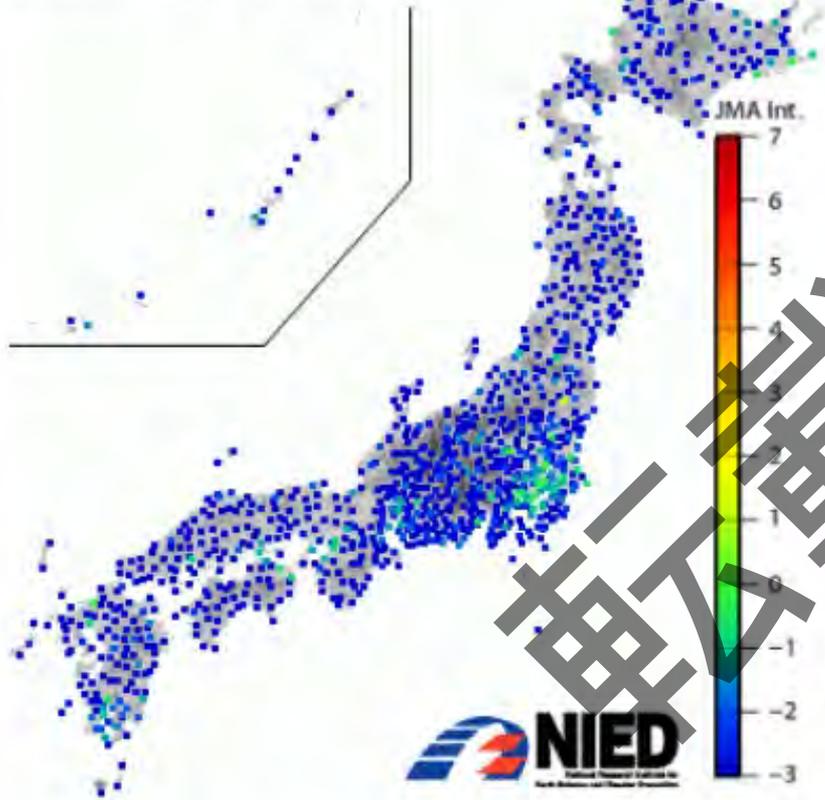
強震計 (地下)

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



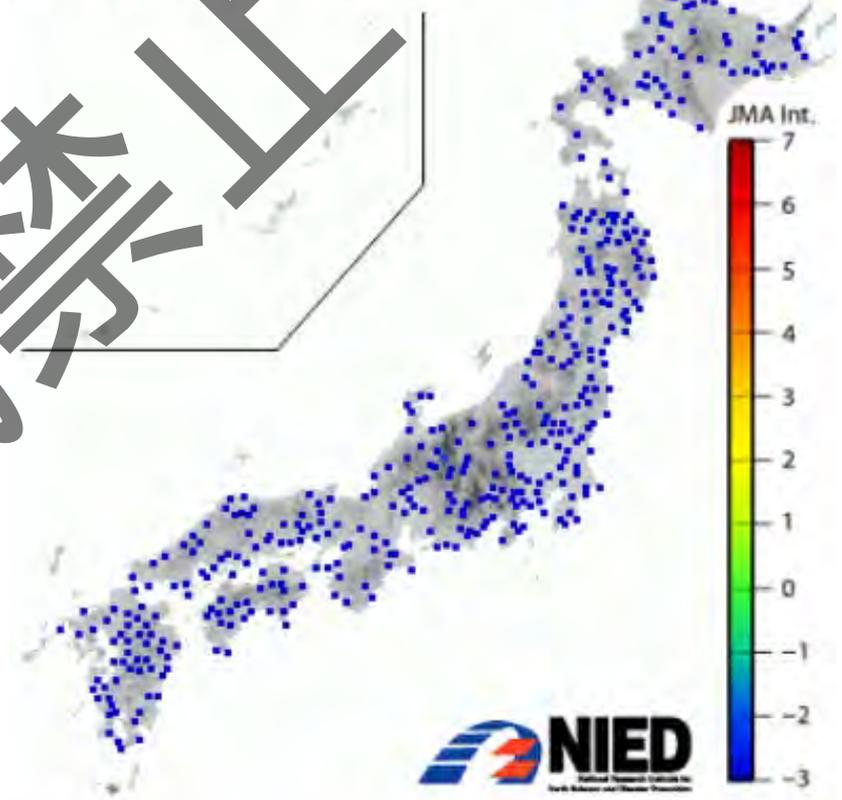
現在の日本列島の揺れ (強震モニタ)

Realtime Sindo (Surface)
2018/12/04 16:51:54



現在の日本列島の揺れ (強震モニタ)

Realtime Sindo (Borehole)
2018/12/04 16:52:30



リアルタイム震度

最大加速度

- 地表
- 地中

リアルタイム震度

最大加速度

- 地表
- 地中

地震観測 強震計による観測-強震観測

https://www.jishin.go.jp/main/kansoku/kansoku17/gis/strong_ug_gis_2017.html

強震計 (地下)

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



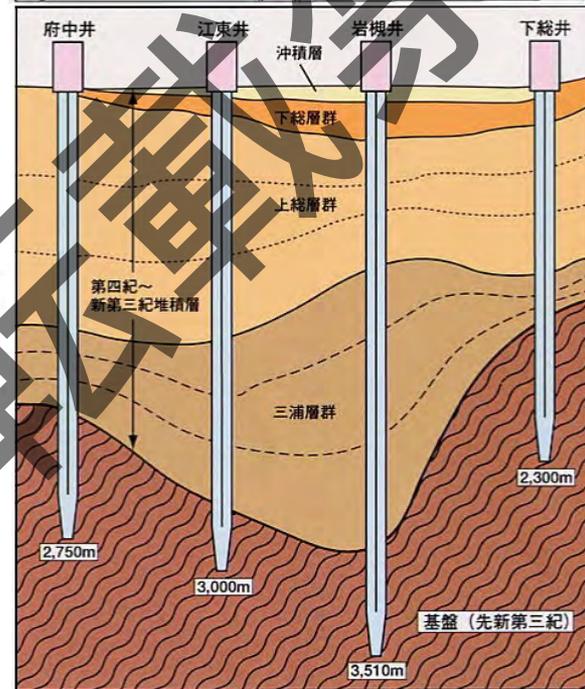
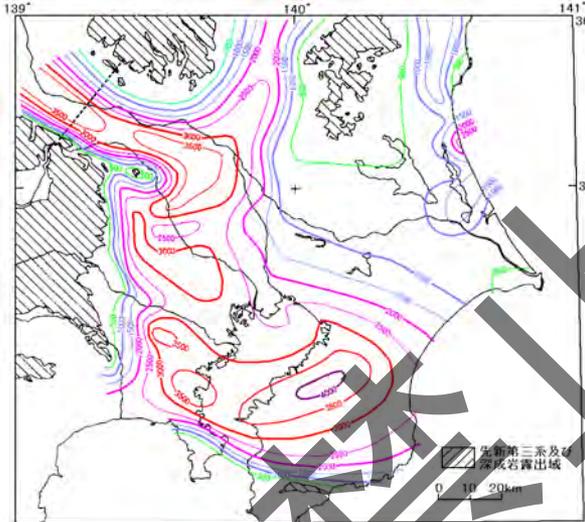
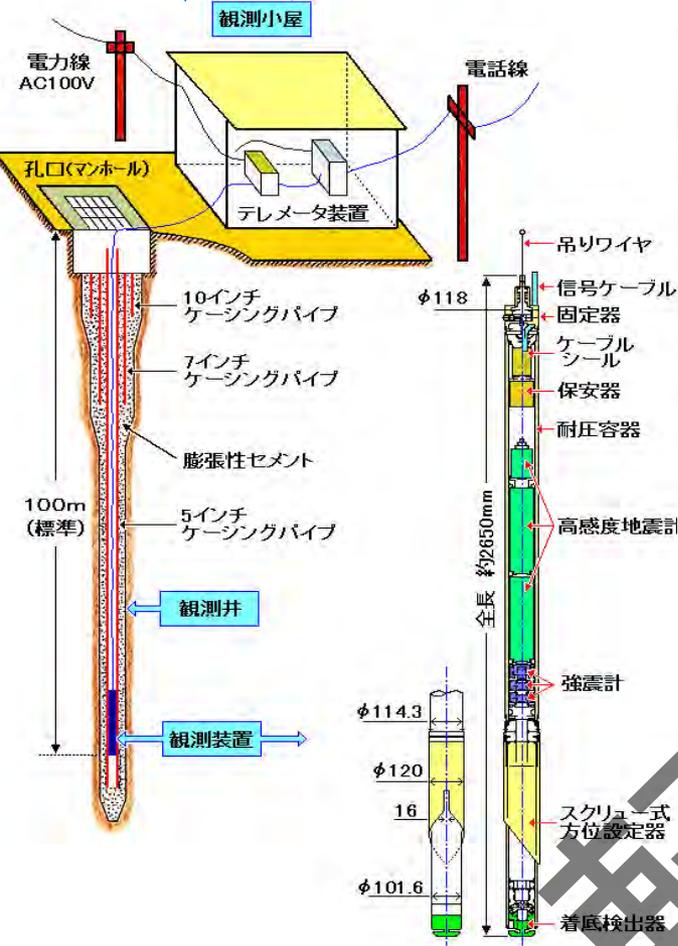
強震計 (地下)

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



https://www.jishin.go.jp/main/kansoku/kansoku17/gis/strong_ug_gis_2017.html

地震観測 高感度地震・強震観測



一般に、大都市部では人工的雑音が大きく、また厚い堆積層に覆われています(左上図:首都圏の基盤である先新第三系の上層深度分)。横浜から房総半島中部にかけての地域では3500mを超え、また東京から利根川中流域では3000 mを超える深い谷状になっています。

このような場所で高感度の微小地震観測を行うためには、基盤に達するかなり深い観測井が必要となります(左下図)。もっとも深いものは、防災科学技術研究所が埼玉県岩槻市に設置している3,510mの観測井であり、孔底温度は86°Cに達します。2014年現在、深さ1,000mを超える高感度地震観測井の数は、首都圏に22ヶ所、大阪府に3ヶ所、愛知・岐阜・静岡・宮城の各県で各1ヶ所の、計29ヶ所となっています。

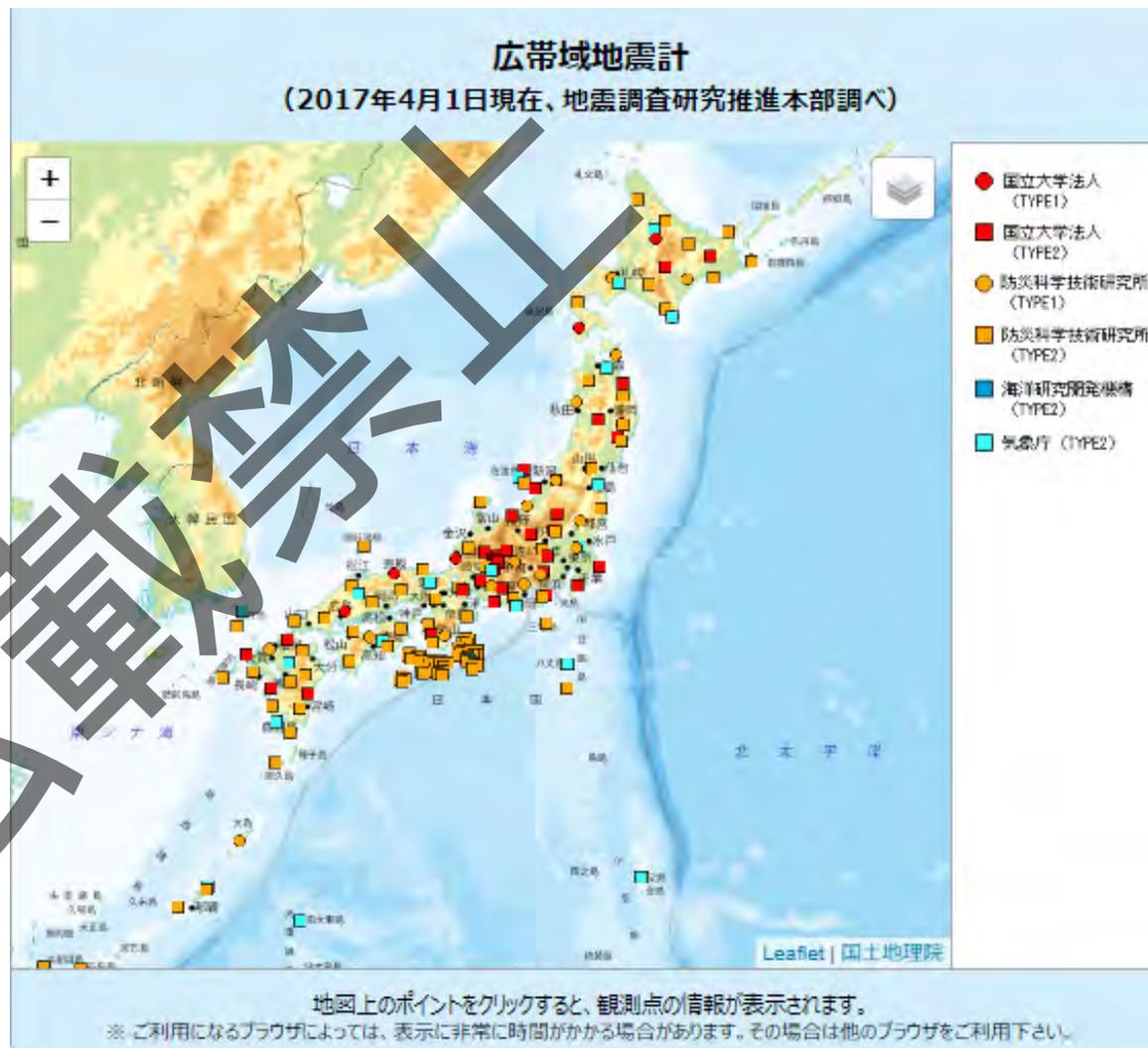
観測用の井戸は、直径10数cm、深さは通常100～200m程度であり、井戸の底に、耐圧容器に収められた3成分の地震計が設置されます。

地震観測 広帯域地震計による観測-広帯域地震観測

広帯域地震計は、非常にゆっくりとした振動から速い振動まで、広い周波数にわたる地面の揺れを記録することができます。

広帯域地震計による観測網では、マグニチュード3クラス以上の地震についての断層運動のメカニズムを把握することや、震源域で断層の破壊が進む様子を解明し、また、地震の規模と断層の破壊方向を即時に把握して、被害のより大きな地域を推定し、防災情報を提供します。さらに、津波地震の検知と解明にも有効であるため、津波災害の軽減に役立ちます。

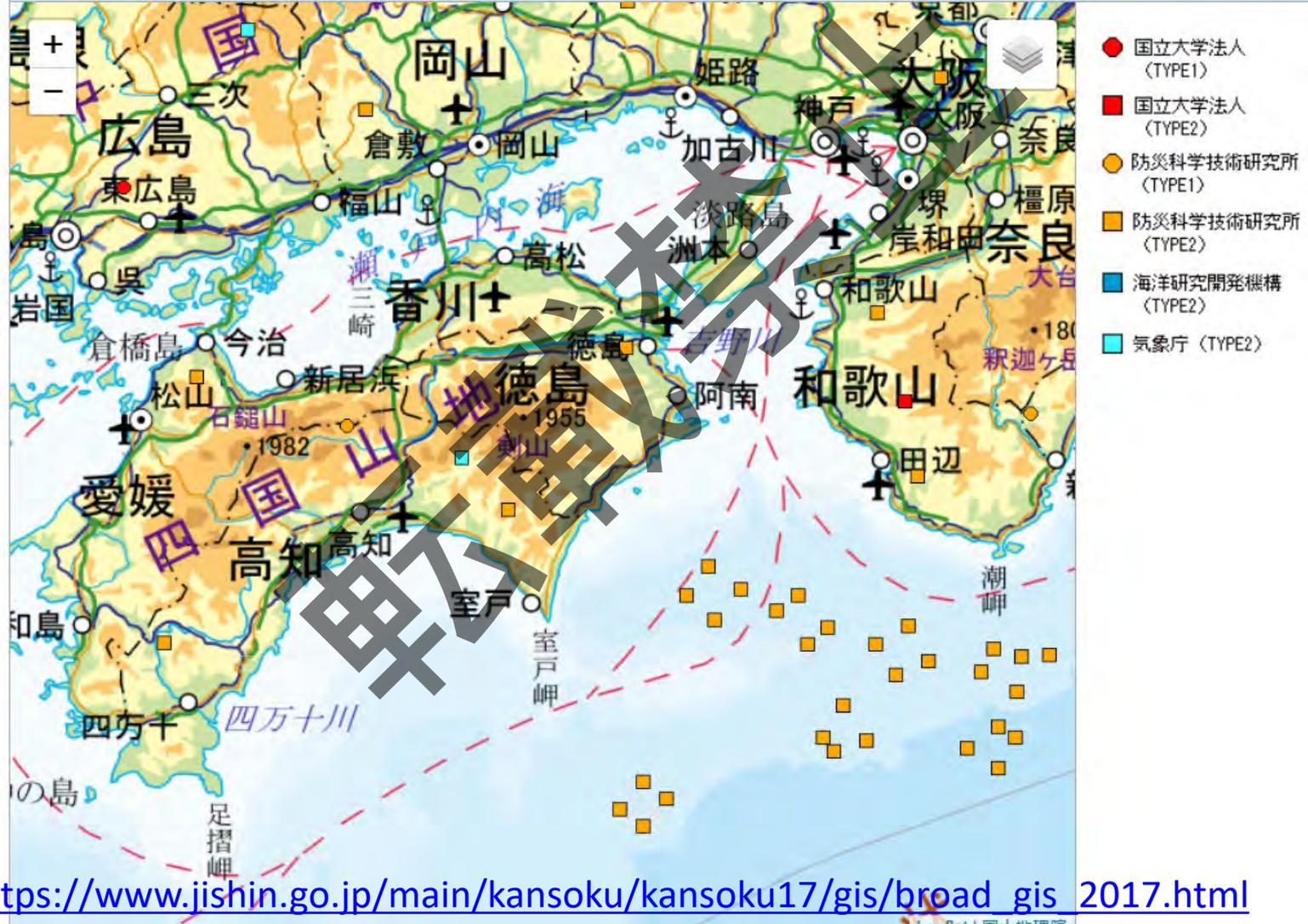
現在、広帯域地震計は水平距離で約100 km間隔の三角網を目安として整備が進められ、独立行政法人防災科学技術研究所(F-net)、国立大学法人などにより全国100ヶ所以上設置されています。



地震観測 広帯域地震計による観測-広帯域地震観測

広帯域地震計

(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)



地震観測 広帯域地震計による観測—広帯域地震観測



地震による地面の速い振動から、非常にゆっくりとした振動まで、広い周波数範囲にわたって地震動を記録できるのが、広帯域地震計です。従来は、周期20～30秒までの地動を捉えるために、水平振子や逆振子などを用いた長周期地震計が古くから使用されてきましたが、これらの器械的工夫のみによって固有周期を伸ばした地震計は一般に不安定であり、取り扱いが困難でした。

しかし、近年の計測技術の進歩によって、振子の動きを電氣的に制御する方式を用い、見かけ上数100秒の固有周期を持つ地震計が実現できるようになってきました。

広帯域地震計には、固有周期が300秒程度のTYPE-1と、100秒程度のTYPE-2があります。高精度の広帯域地震観測を行なうためには、歪計や傾斜計による地殻変動連続観測と同じ注意が必要です。温度変化や気圧変化は大敵であるため、通常、**広帯域地震計は横坑の奥に設置されるケースが大部分です。**

防災科研:9.4 広帯域地震観測

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/part2.html

陸海統合地震津波火山観測網

MOWLAS (Monitoring of Waves on Land and Seafloor : モウラス)

防災科学技術研究所(以下、防災科研)では、平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災を契機として、全国の陸域において**高感度地震観測網(Hi-net)**、**全国強震観測網(K-NET)**、**基盤強震観測網(KiK-net)**、**広帯域地震観測網(F-net)**の整備・運用を行ってきました。また、16の火山において**基盤的火山観測網(V-net)**の整備を行い、火山活動を観測しています。

海域においては、平成23年3月11日に発生した東日本大震災を受け、海域を震源とする地震や津波の早期検知・情報伝達などを目的として、**海底地震津波観測網(S-net)**を北海道沖から房総半島沖までの海底に整備しました。加えて平成28年4月には、紀伊半島沖から室戸岬沖にかけて整備された**地震・津波観測監視システム(DONET)**が海洋研究開発機構より防災科研に移管されました。

