

地震学講座

地震学の基礎（地震がわかる）01

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4月26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3階 3101講義室

1. 地球の内部構造と大地の動き



- ・WEB参考書・データ・教科書
- ・地震学とは 地球について
- ・地震波の種類 実体波・表面波・自由震動・Q
- ・地震波伝播 1次元地震波速度構造(PREM)
- ・地震波トモグラフィー 1次元⇒3次元地震波速度構造
スラブペネトレーション: マントル滞留:
プルームテクトニクス
- ・大地の動き ウェゲナーに始まる歴史的変遷
- ・大陸移動 海底年代
地磁気の逆転 海底磁気縞状異常
- ・プレートテクトニクス
- ・宇宙技術によるプレート運動(地殻変動)の測定
VLBI・SLR・GNSS SAR

WEB参考書・データ・教科書

地震研究推進本部 <https://www.jishin.go.jp/>

- ・日本の地震活動 https://www.jishin.go.jp/resource/seismicity_japan/

- ・活断層の地震に備える ー陸域の浅い地震ー
全国版

https://www.static.jishin.go.jp/resource/pamphret/katsudanso_sonaeru_zenkoku.pdf

地方版(四国 作成中)

- ・地震がわかる! 防災担当者向け

https://www.jishin.go.jp/main/pamphlet/wakaru_shiryo2/wakaru_shiryo2.pdf

データベース

- ・データ公開ポータルサイト <https://www.jishin.go.jp/database/portal/>

防災科学研究所

- ・地震の基礎知識とその観測

http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/1stpage.htm

- ・強震動の基礎

<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication/>

やや古くなったがプロ向き教科書:地震学(第3版)(宇津徳治著:共立出版2001年)

- ・Dagik Earth <https://www.dagik.net/>

<http://dagik.org/dow/>

地震学 (Seismology) とは？



地震そのものの研究

: 地震の発生

(どうして、どのように、発生予測は？)

地球半径:6371km 回転楕円体

: 赤道方向(a)が極方向(c)より20km長い:

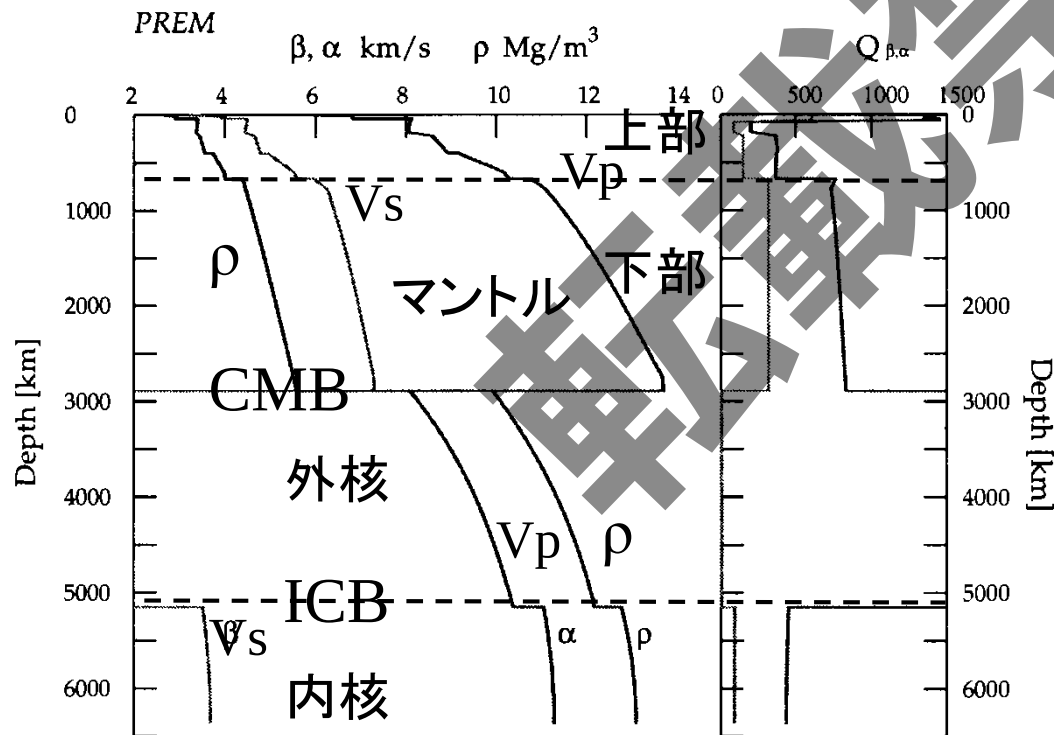
$$a = c + 20 \text{ km} \quad \text{扁平率 } f = (a - c) / c \sim 1/300$$

年齢:46億年

海と陸の違い: 深さ400kmまで

地球について

地殻	マントル	核
上部・下部	上部・下部	CMB 外核 ICB 内核
岩石	(相転移)	鉄(液体) 鉄(固体)
深さ(km) 5-70	660 2900	5150



地震波速度・密度・Qの深さ分布

Vp: P波速度(km/s)

Vs: S波速度(km/s)

ρ: 密度(Mg/m³)

Q: 地震波の減衰を表す
パラメータ

Q回振動(波長伝播)
すると振幅は1/23になる

地震波の種類

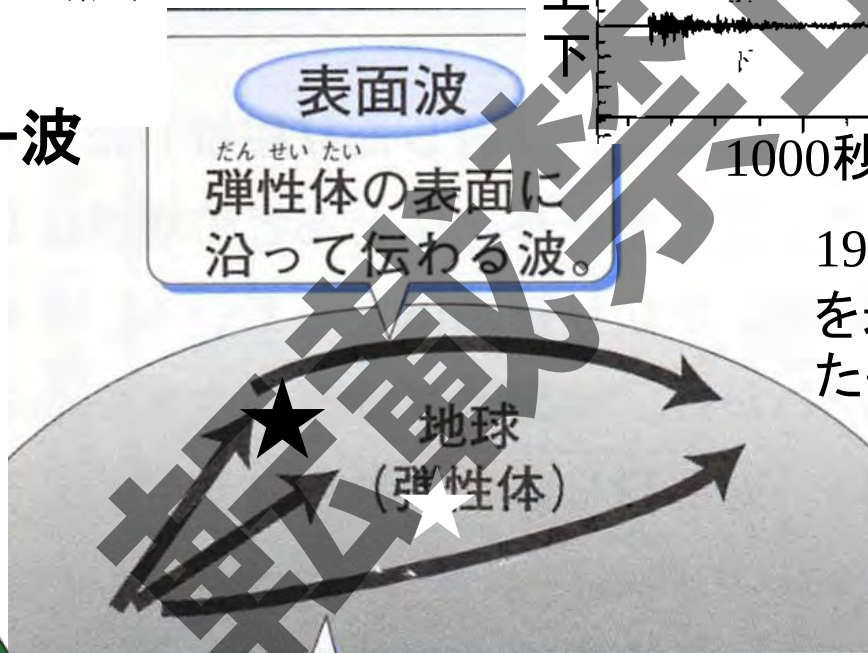
実体波

： P波・S波

表面波

レイリー波
ラブ波

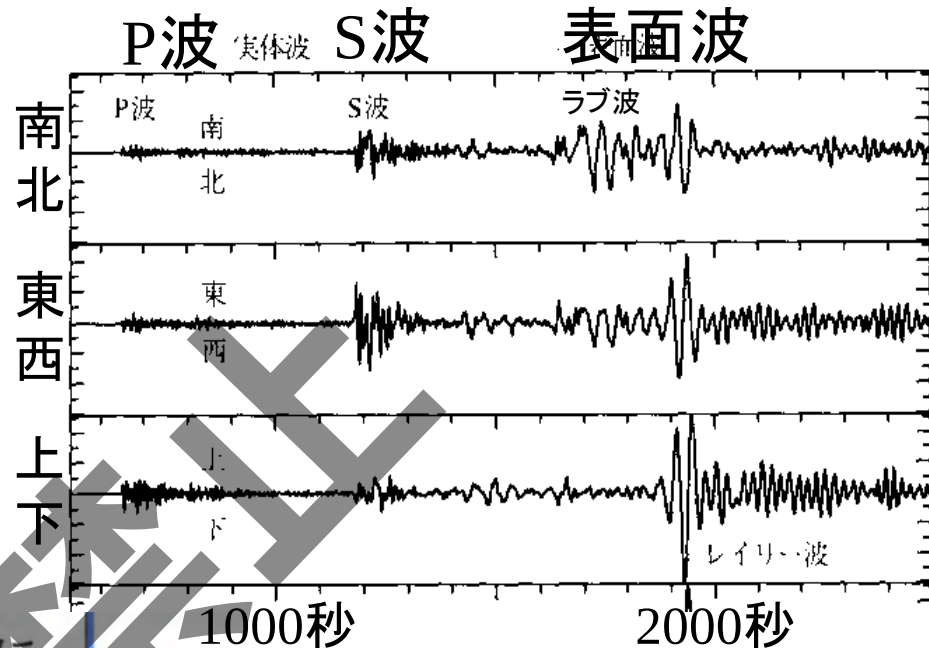
自由振動



P波

S波

弾性体の内部を伝わる波。



1993年北海道南西沖地震
を米国オレゴン州で観測した
長周期地震波形

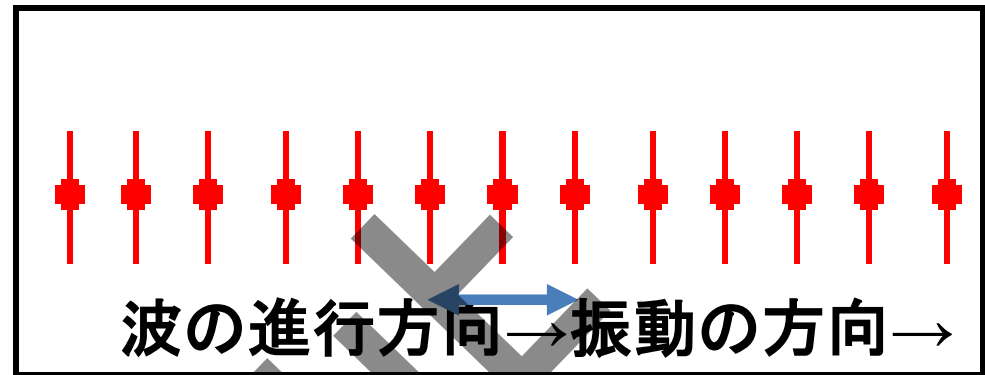
新版地学教育講座2
地震と火山(1996)

尾池和夫：
図解雑学：地震

地震波の種類(1)

P 波(縦波) primary wave

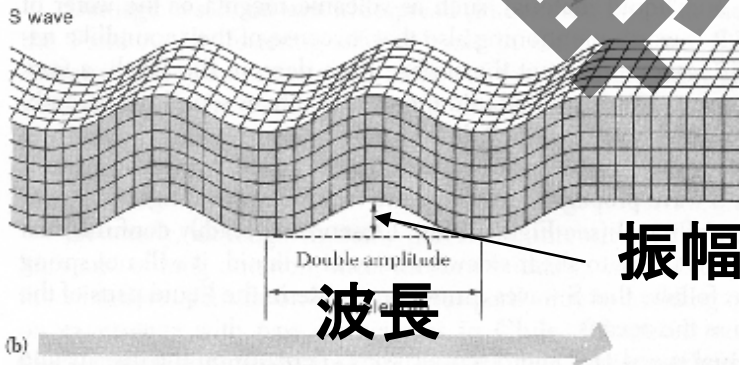
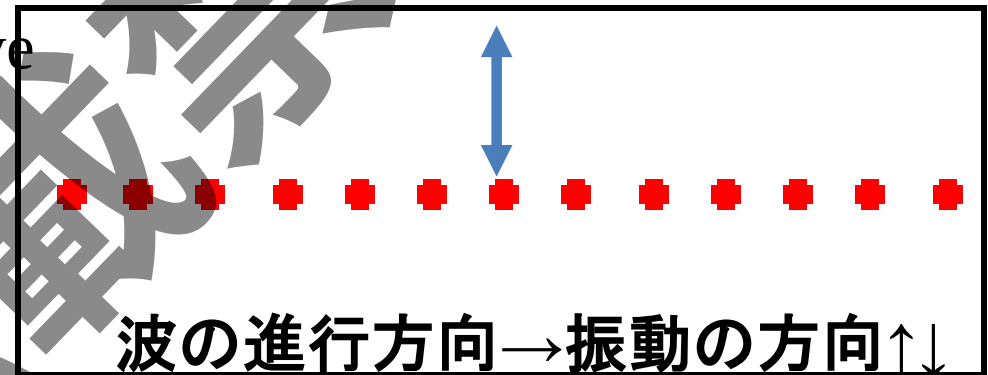
- ・振動の方向と波が進む方向が同じ
- ・固体・液体・気体を伝わる
- ・粗密波: 体積変化が伝播



$$V_p \sim 1.7 V_s$$

S 波(横波) secondary wave

- ・振動の方向が波が進む方向に対して垂直
- ・固体の中のみを伝わる
- ・ねじれが伝わる



周期 T (sec): 振動が元に戻る時間

振動(周波)数 f (Hz) = $1/T$

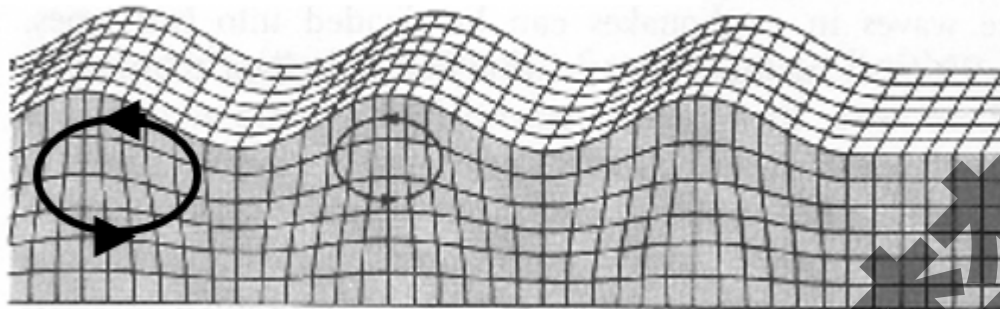
角振動(周波)数 $\omega = 2\pi f$

波長 λ (m) = 地震波速度 (v) $\times$ 周期 (T)

表面波(surface wave)

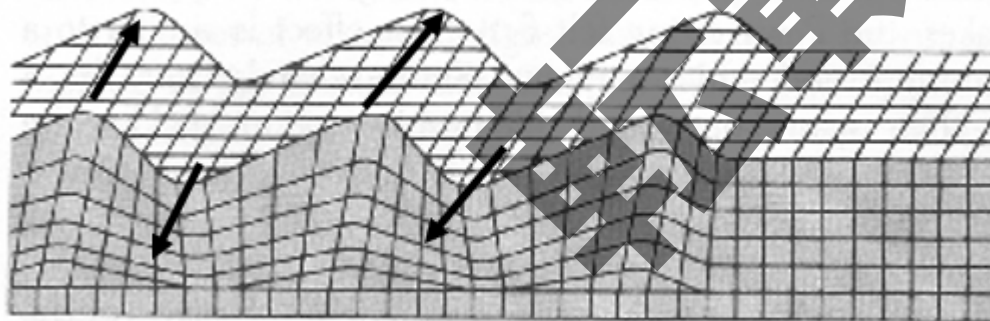
地震波の種類(2)

レイリー波(Rayleigh wave)



(d)

ラブ波 (Love wave)



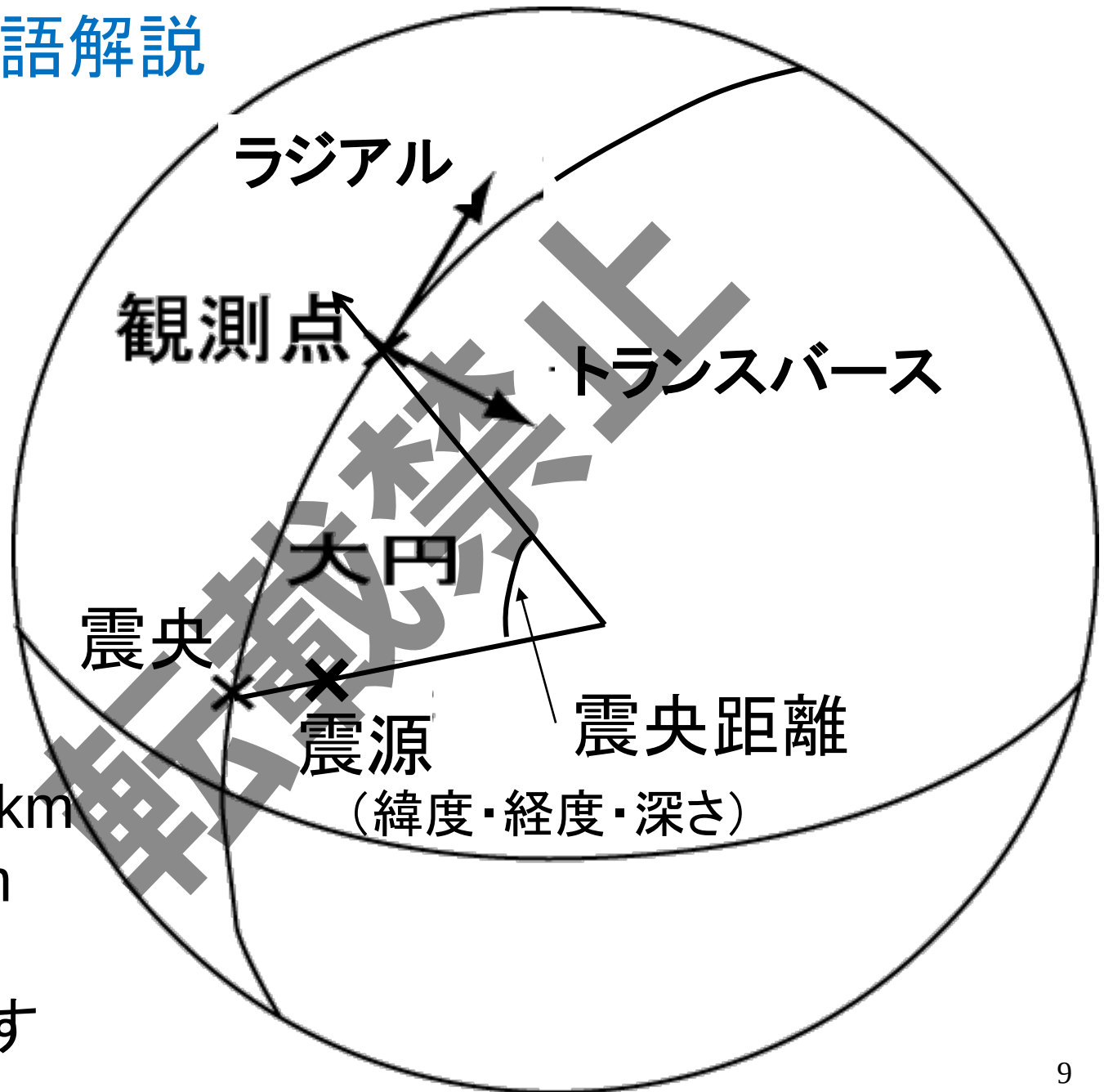
(e)

地表から1/4波長程度の深さ(周期100秒でおおよそ100km程度の領域)で大きな振幅を持ち、それより深くなると急激に振幅が小さくなる。

Love波はS波と同様に、進行方向と直交する方向に振動する。ただし進行方向は地表に沿った方向に限られ、地表での運動は水平方向に限られる。

Rayleigh波は進行方向に平行な平面内で楕円運動をする。振動の大きさは深さが深くなるに連れて小さくなる。回転する方向は、波の進む方向と同じ方向に進んでいる車輪と逆方向です(retrograde motion)。地表で観測すると、上下方向、水平方向ともに振動している事を確認できる。

地震学用語解説



地球半径6371km
1° = 約111km
震央距離は数°
まではkmで表す

実体波

表面波

地震波形記録例

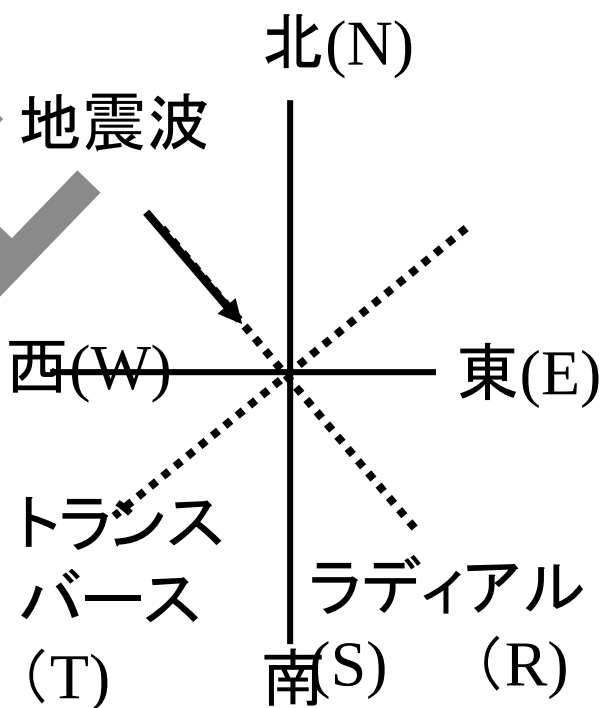
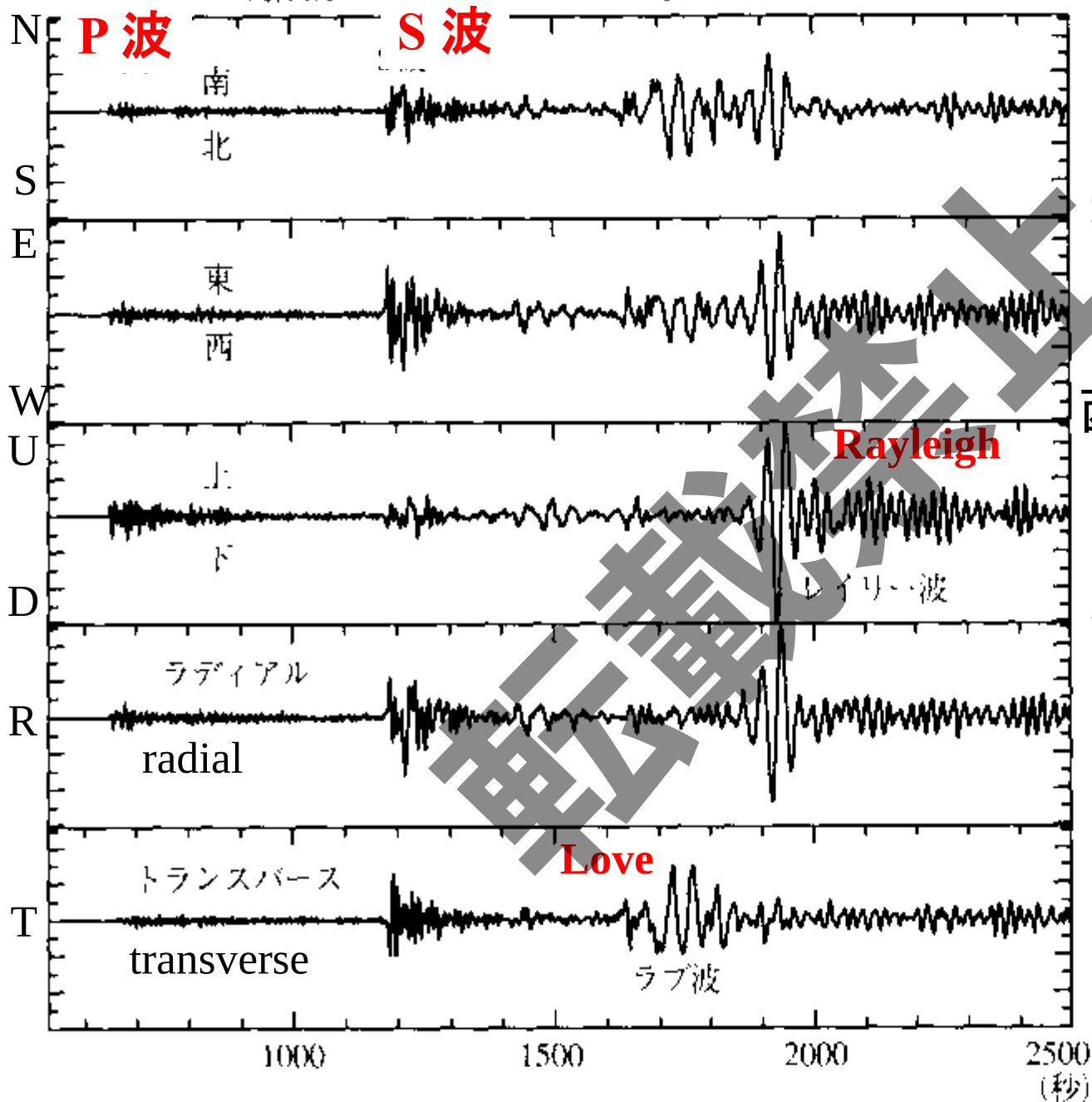
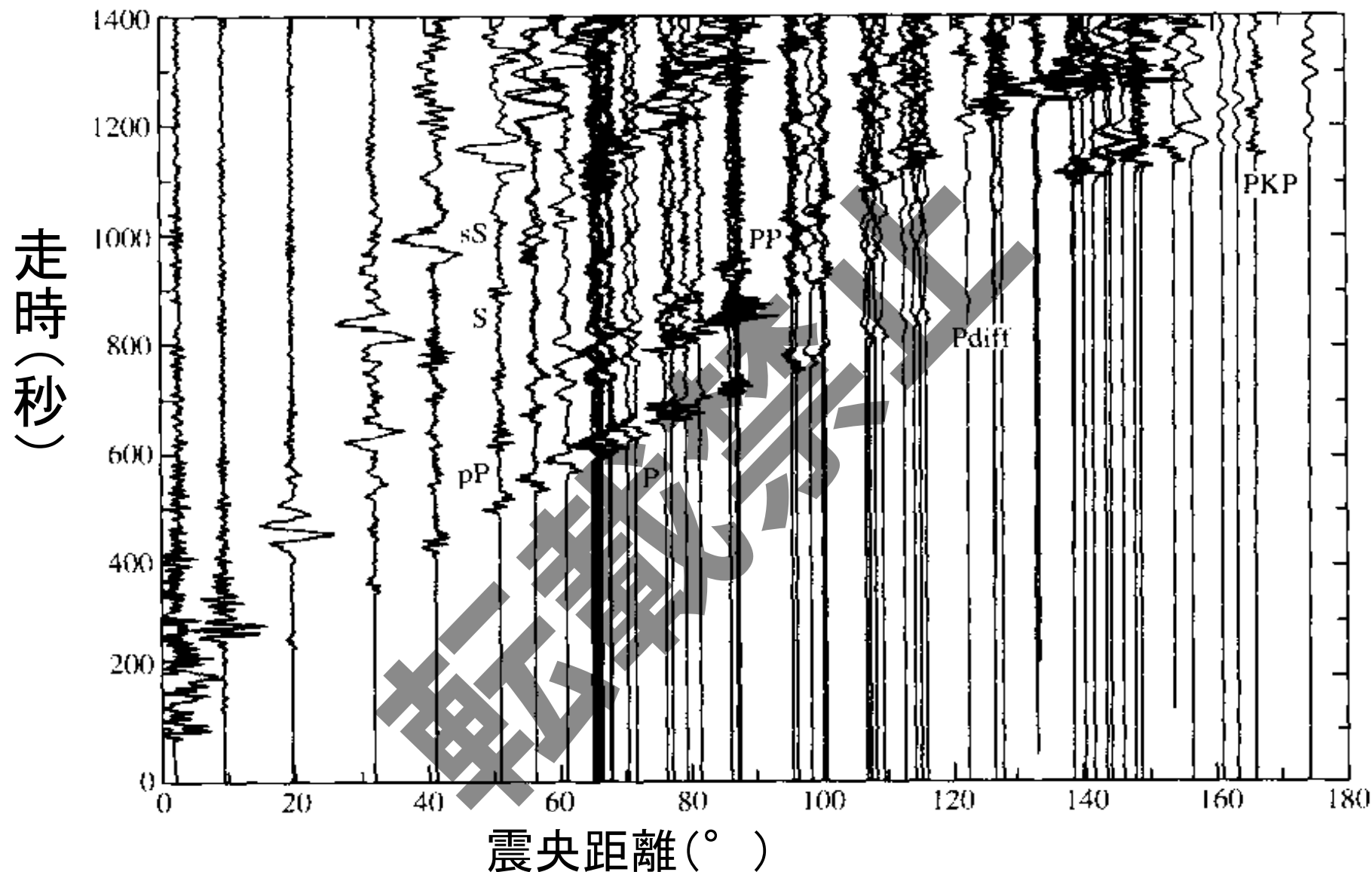


図2-5 アメリカ合衆国オレゴン州で観測された1993年7月12日北海道南西沖地震での長周期地震波形 上から、南北動、東西動、上下動、ラディアル成分、トランスバース成分。

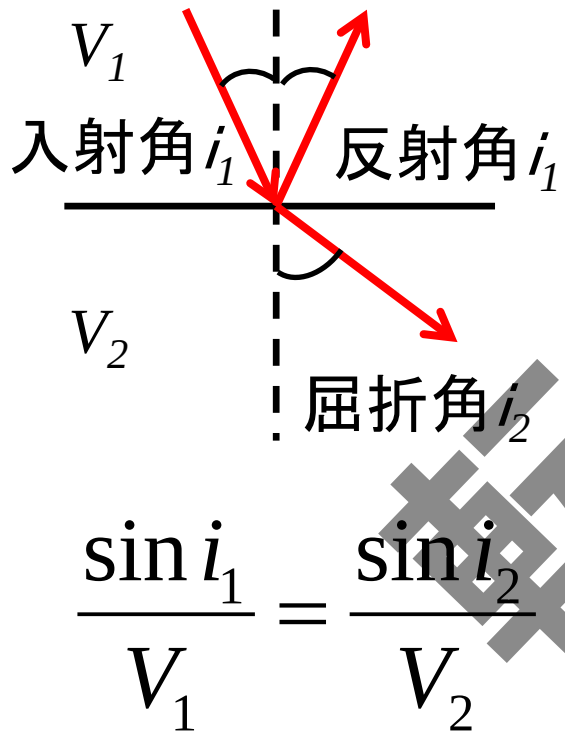
走時曲線



6 世界の観測点で観測された1994年6月9日ボリビアの巨大深発地震（深さ631km）による地震波形（上下動成分） 縦軸は、発震時からの時間（秒），横軸は、震央距離（度）。周期10秒以上の波をとり出してある。

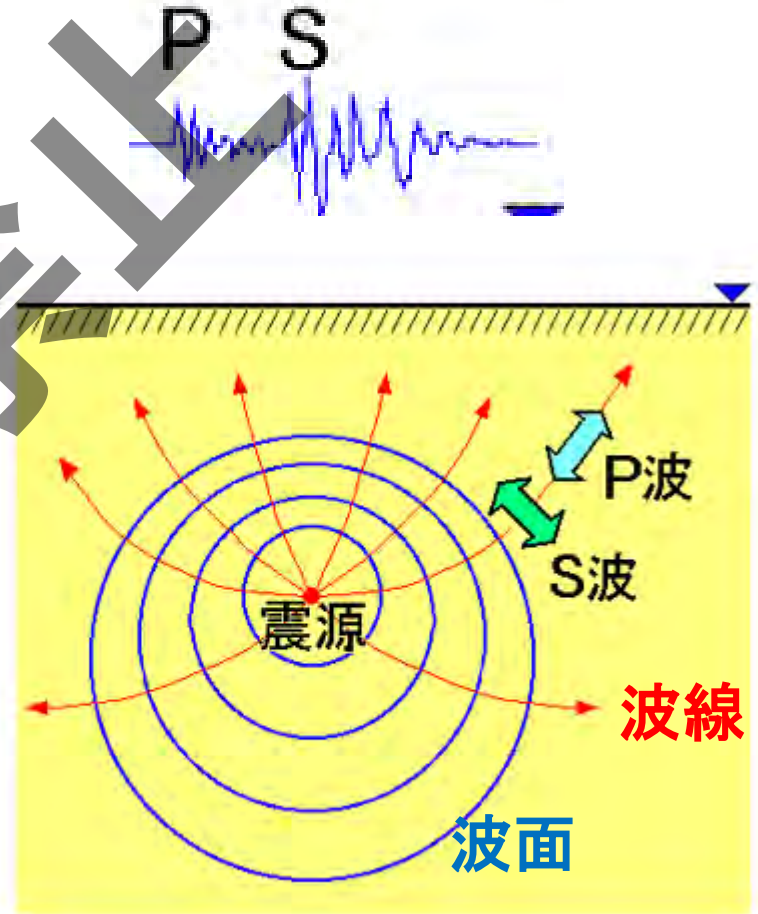
波面の広がり・波線の曲がり

地震波の屈折
スネルの法則
(反射・屈折)



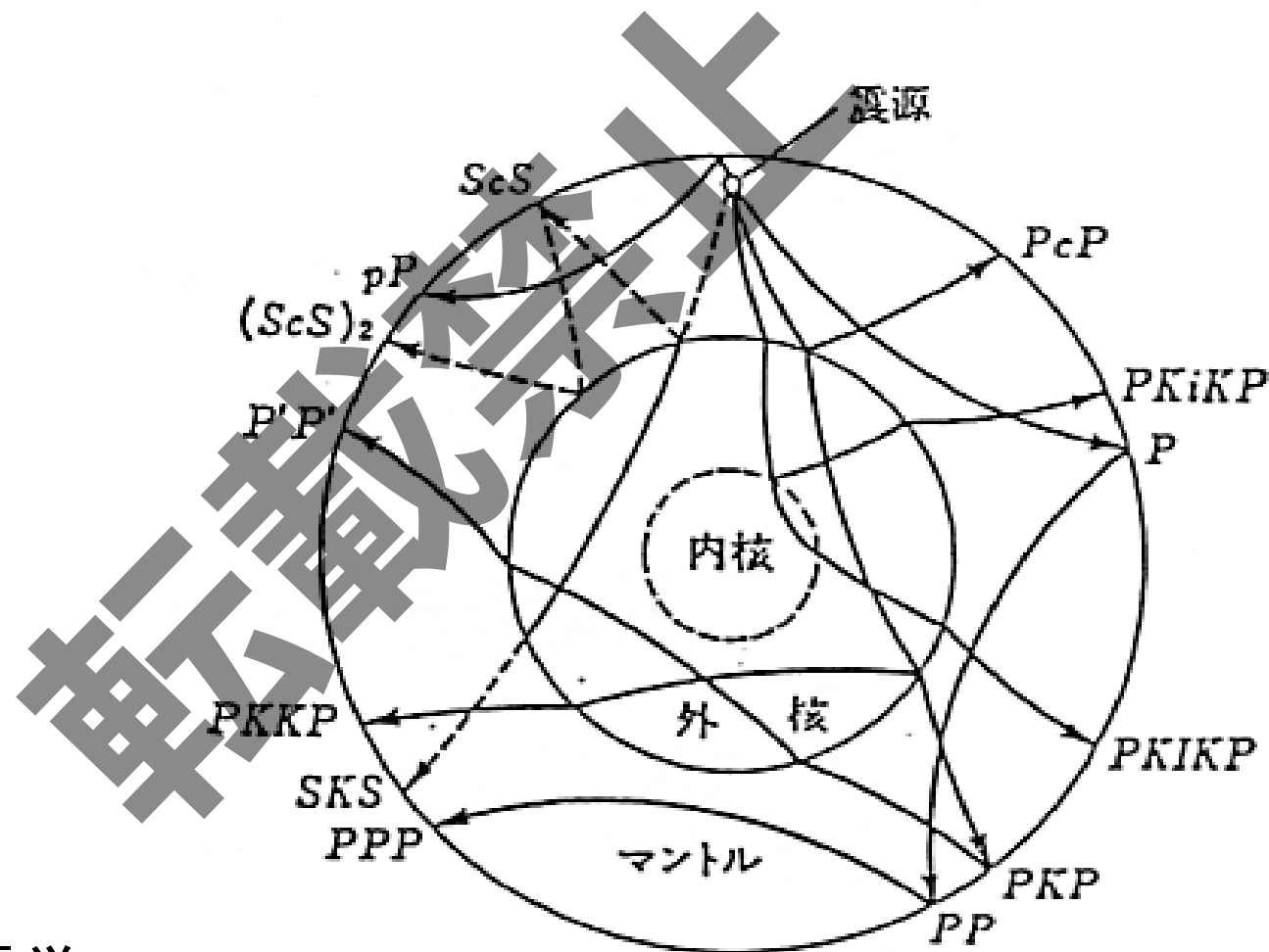
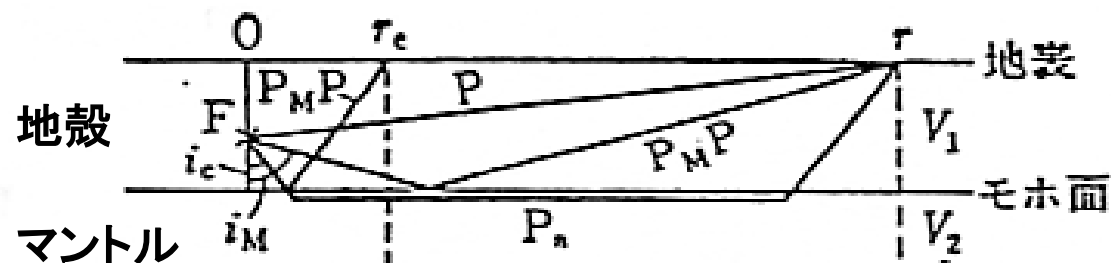
$$V_1 < V_2 \quad \rightarrow \quad i_1 < i_2$$

速度
深さ



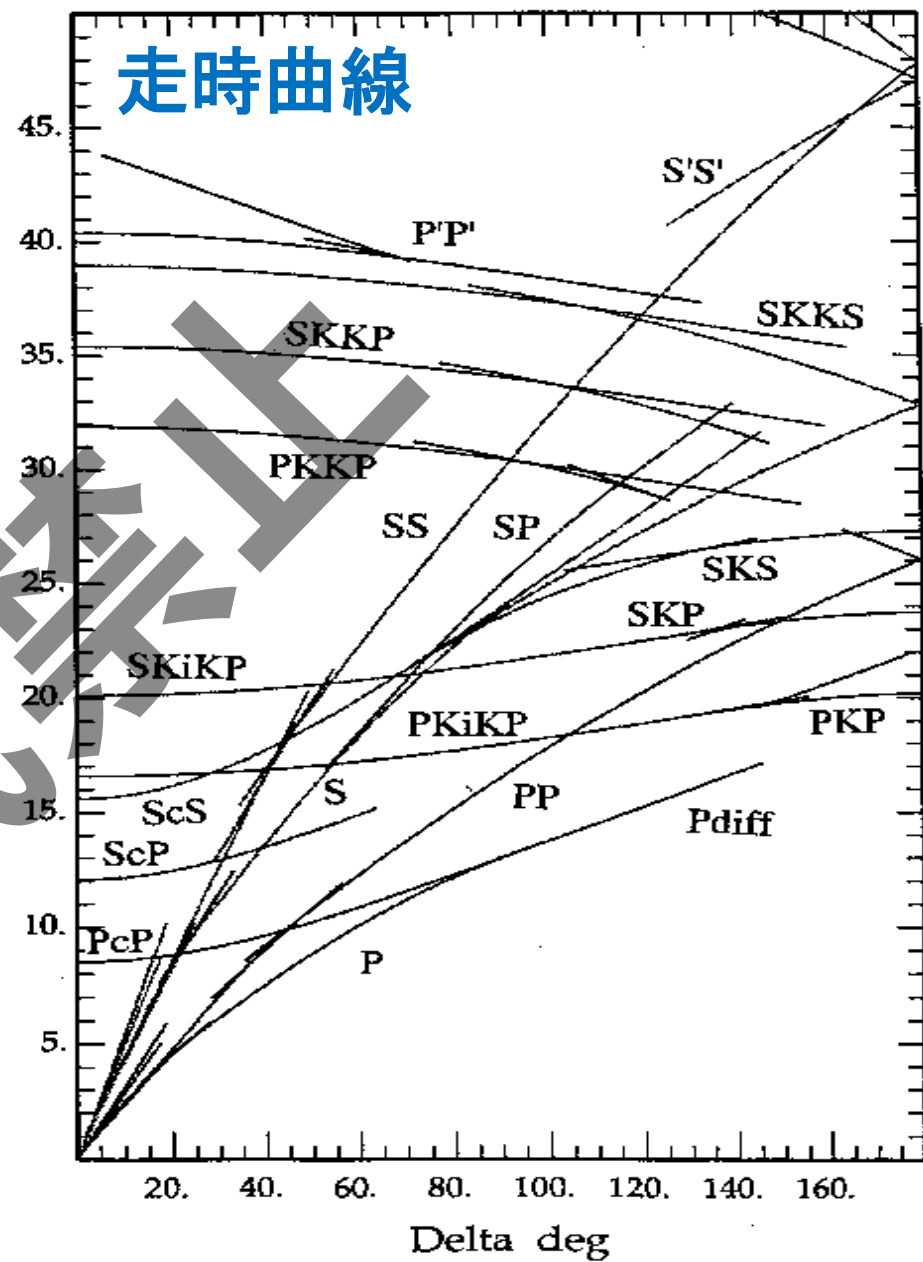
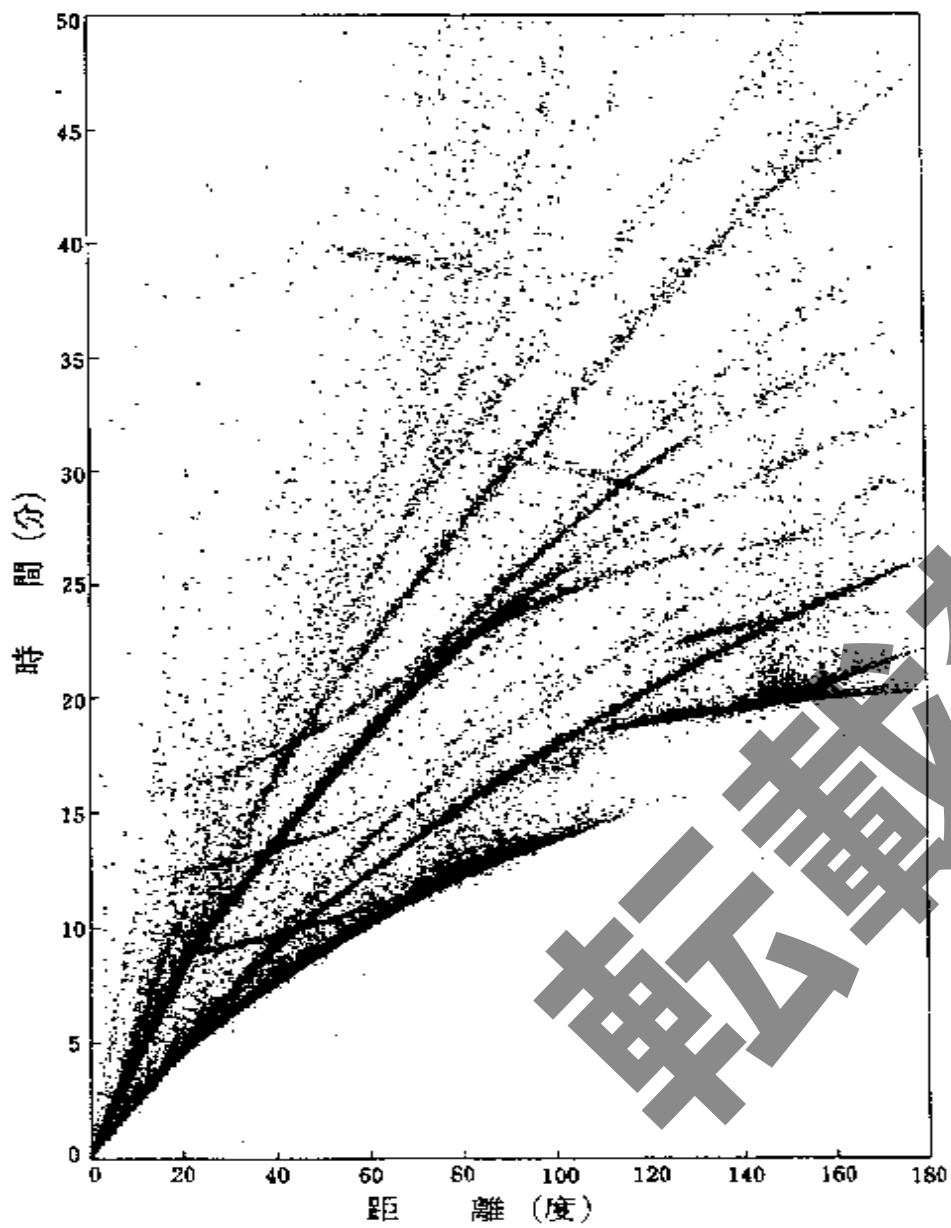
地震の基礎知識(防災科学研究所)

実体波の 伝播・名称



宇津:地震学

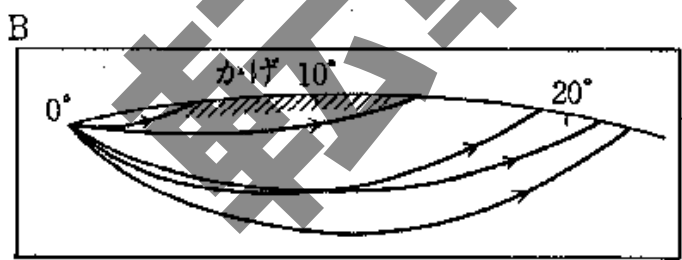
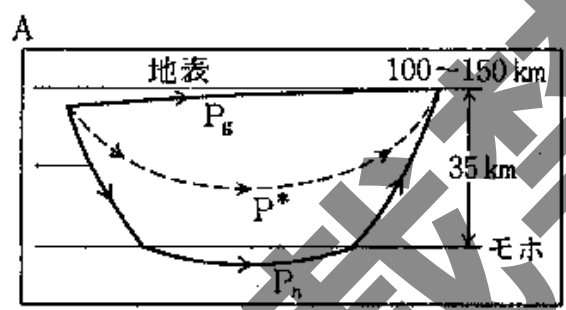
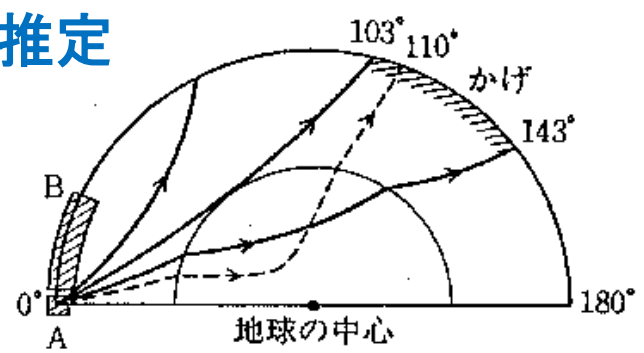
地球内の実体波の伝播 (実線はP波, 破線はS波) (



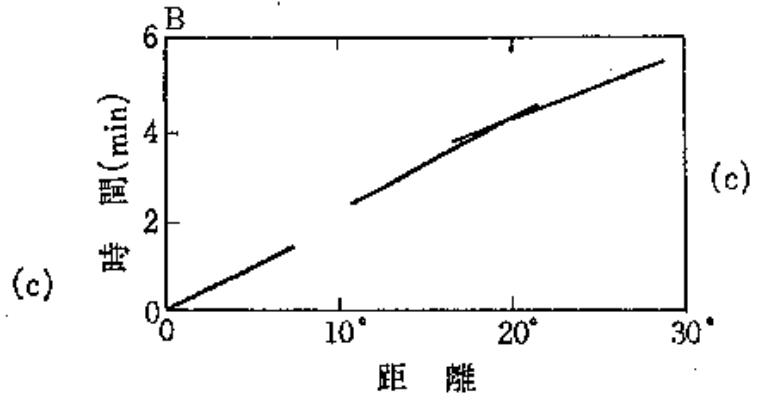
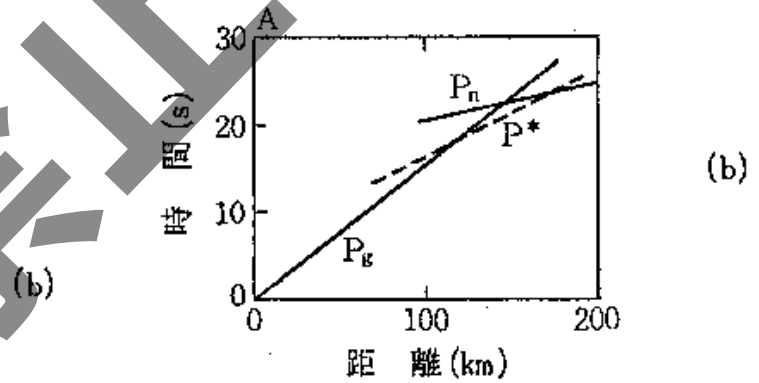
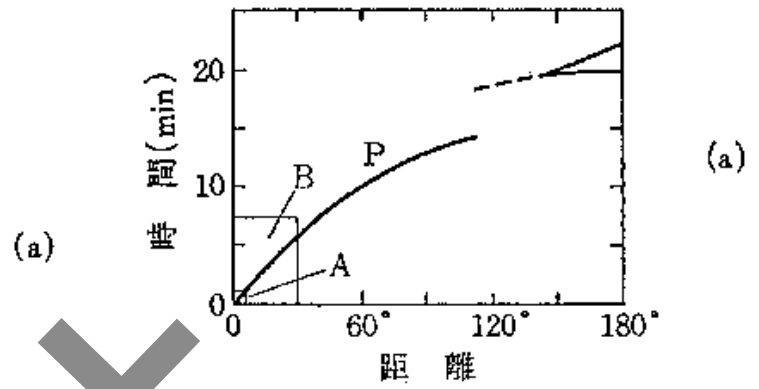
ISC報告值(1983年, $M \geq 5$, $h \leq 50$ km) IASP91走時表($h = 0$ km)

観測された走時曲線一波線

→1次元速度構造推定



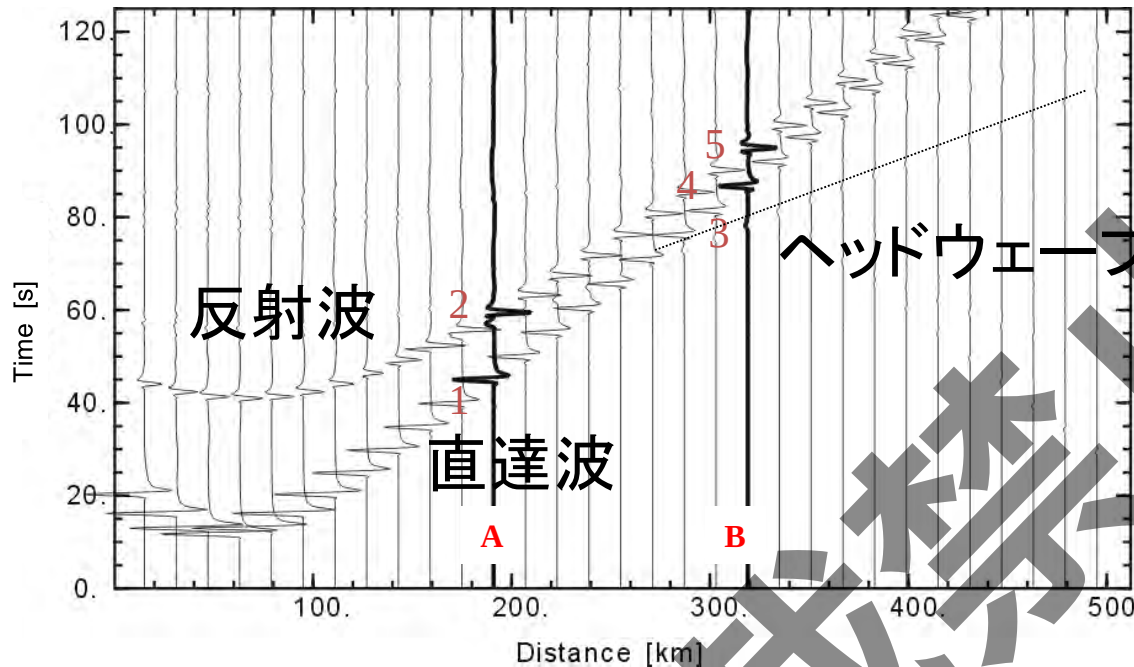
(a) 地球内部での波線, (b) 地殻内での波線, (c) 距離 20° までの波線 (マントル内低速度層による 'かげ' の地帯と 20° 不連続面)



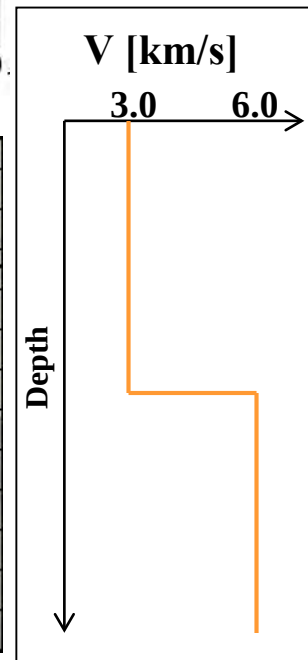
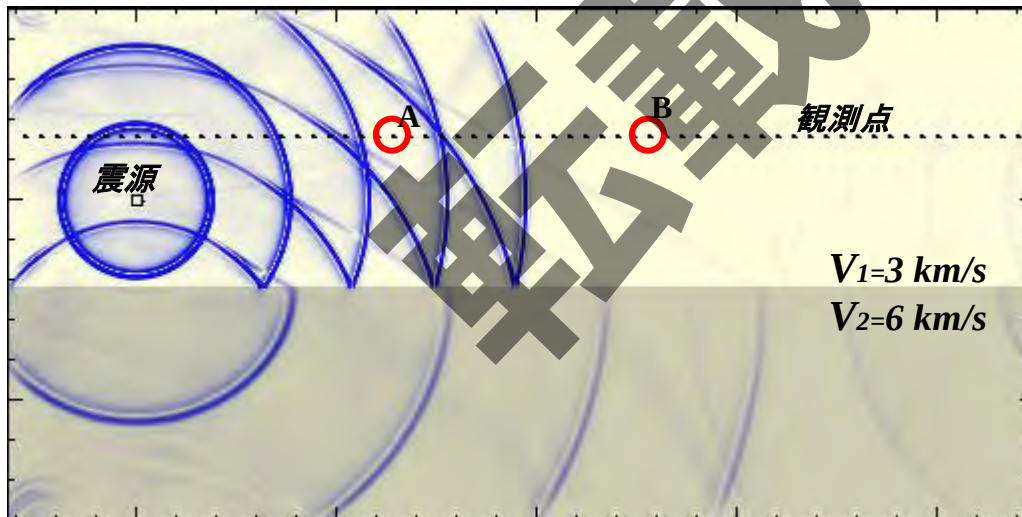
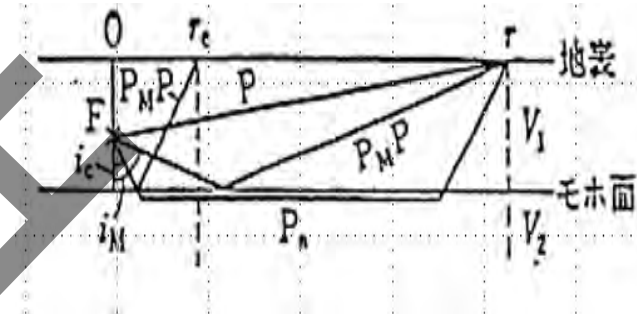
(a) 地球についての P 波の走時曲線, (b) 地殻についての走時曲線, (c) マントル内の低速度層による 'かげ' の地帯と 20° 不連続面による走時曲線

金森
(岩波地球科学1)

波線と波面（不連続な速度増加）



古村孝志(東大地震研)

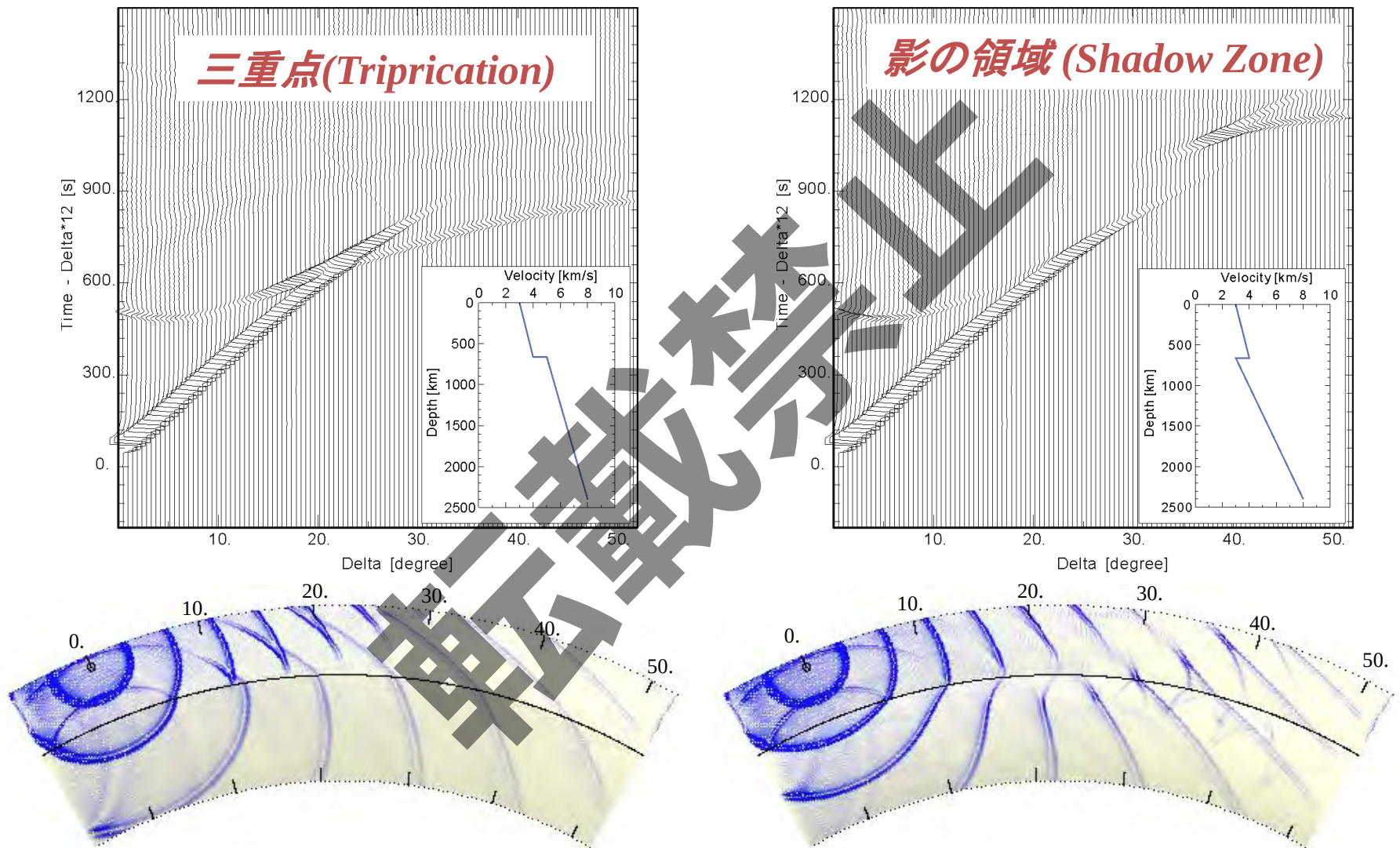


波線は？

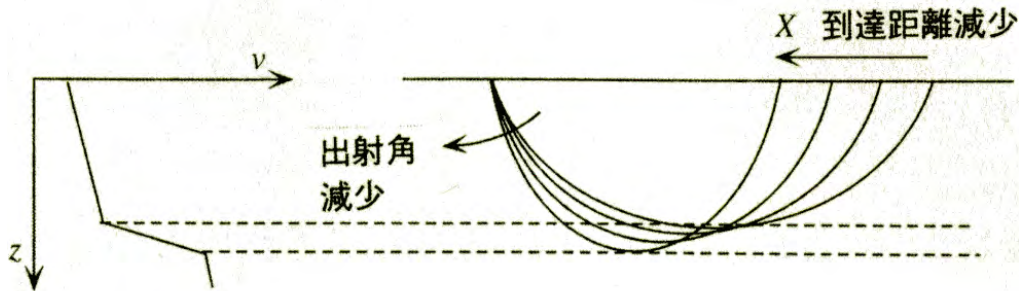
地震波不連続面のある場合の波動伝播(球対称モデル)

(a) 速度ジャンプ

(b) 低速度層 古村(東大地震研)



10, 20, 30, 40 and 50 ° における波線は？.



地震波不連続面のある 場合の波線 (球対称モデル)

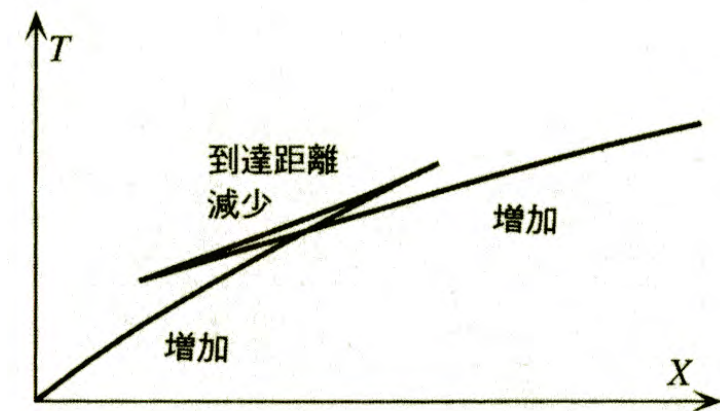


図 1.11 地震波線と走時曲線(速度が急に増える場合)

T:走時、X:震央距離

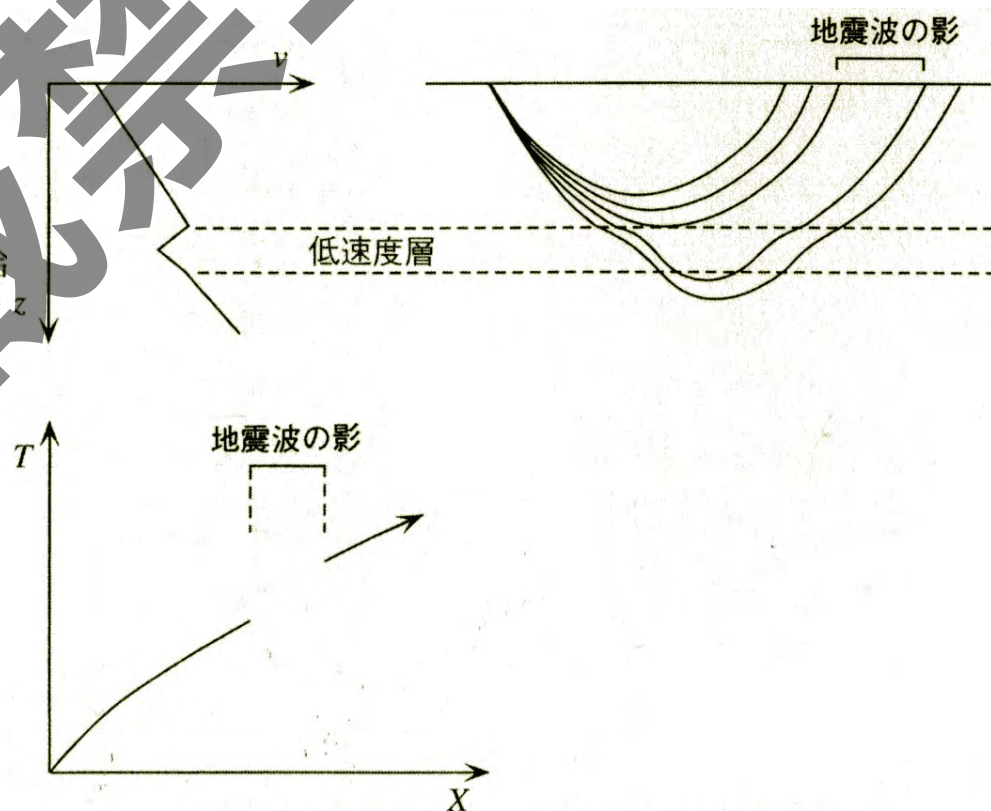
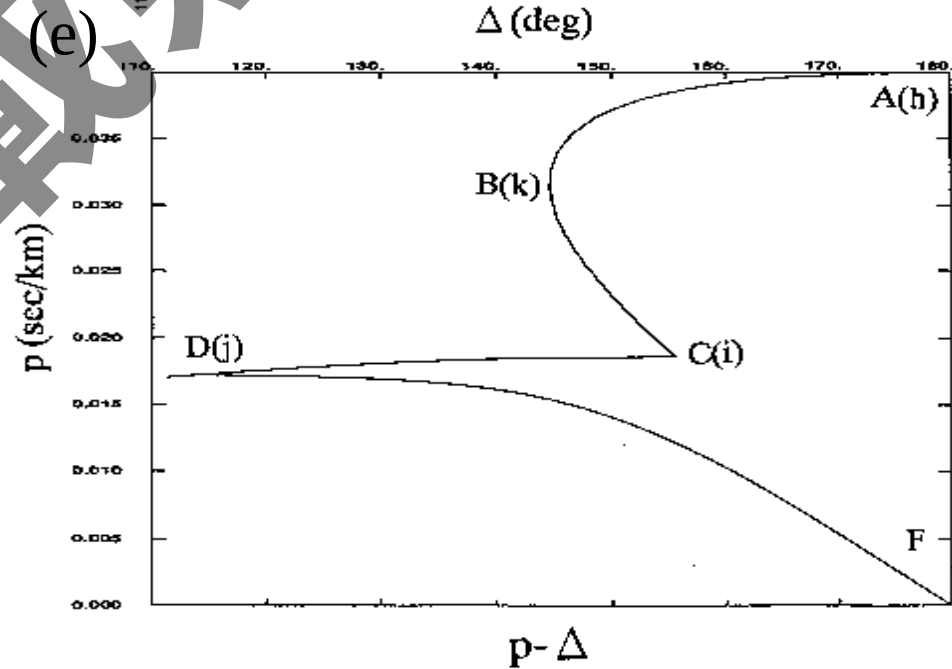
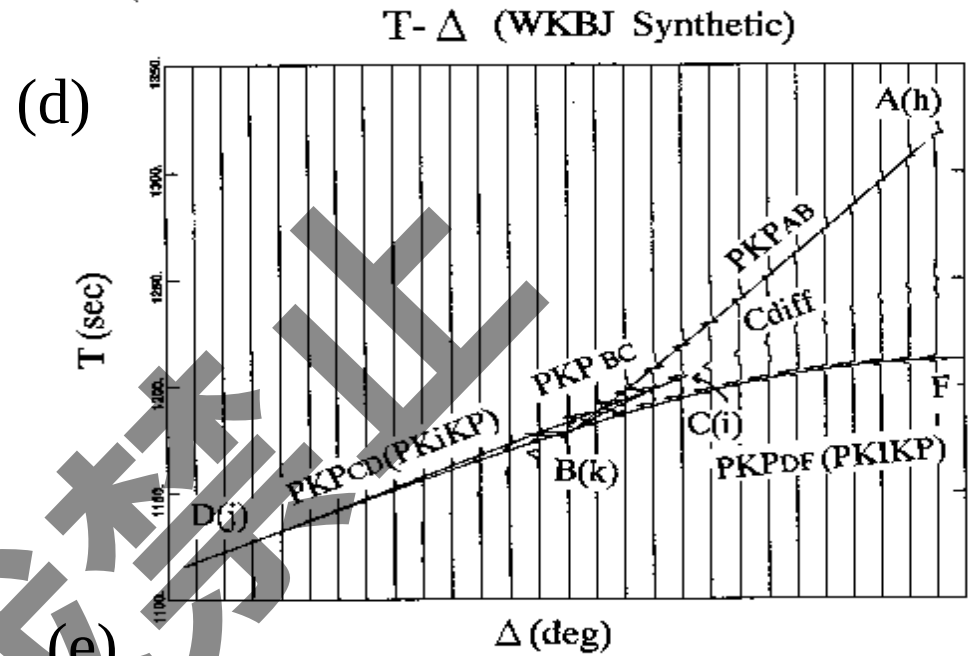
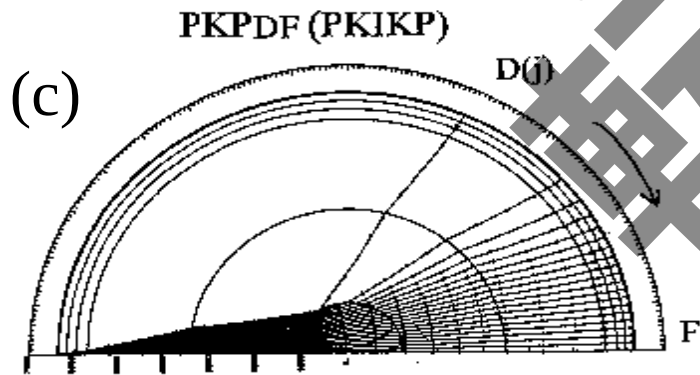
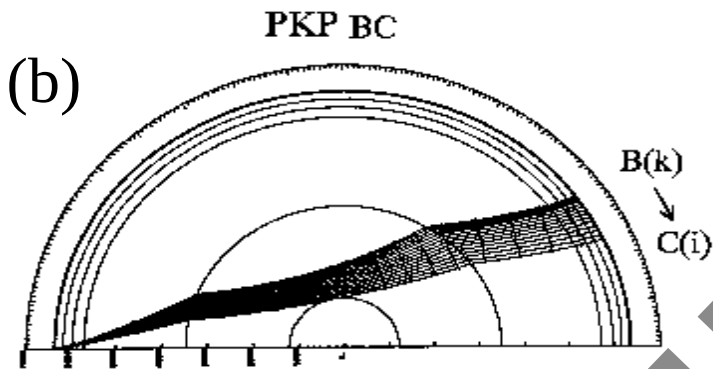
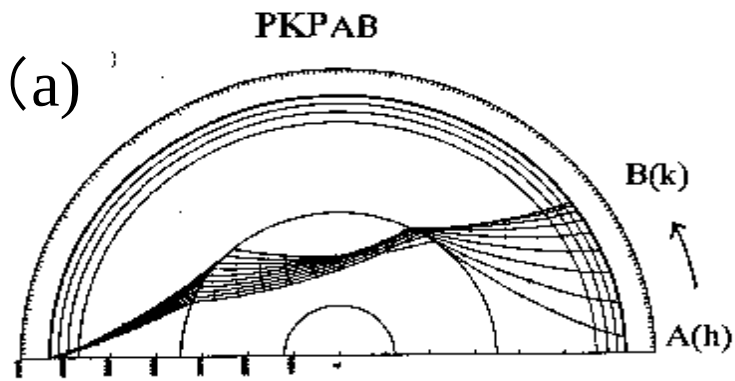


図 1.12 地震波線と走時(低速度層がある場合)

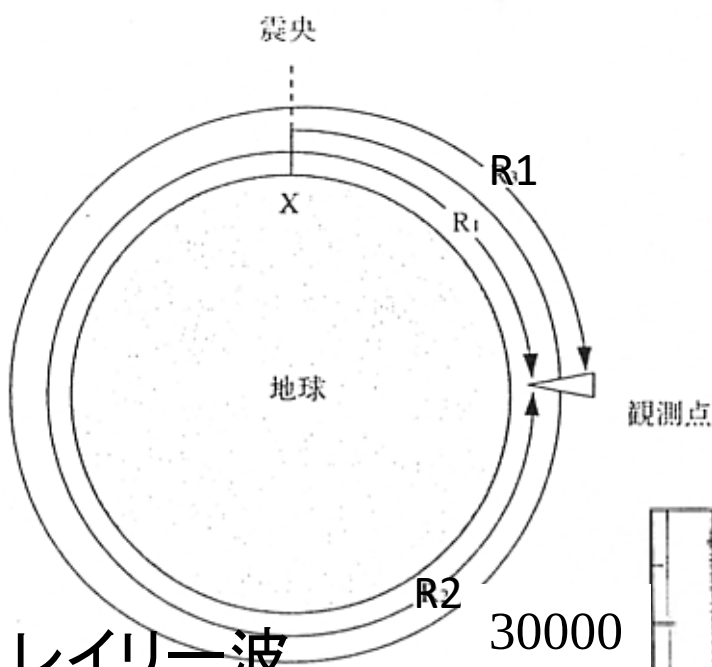
コアフェイズ Core phases



表面波：マントルレイリー波

1994年6月のボリビア巨大深澁地震による
マントルレイリー波(上下動記録)

1000秒以上の周期の波を見ている
(Period $T > 1000$ sec.)



レイリー波

: R1, R2...

ラブ波

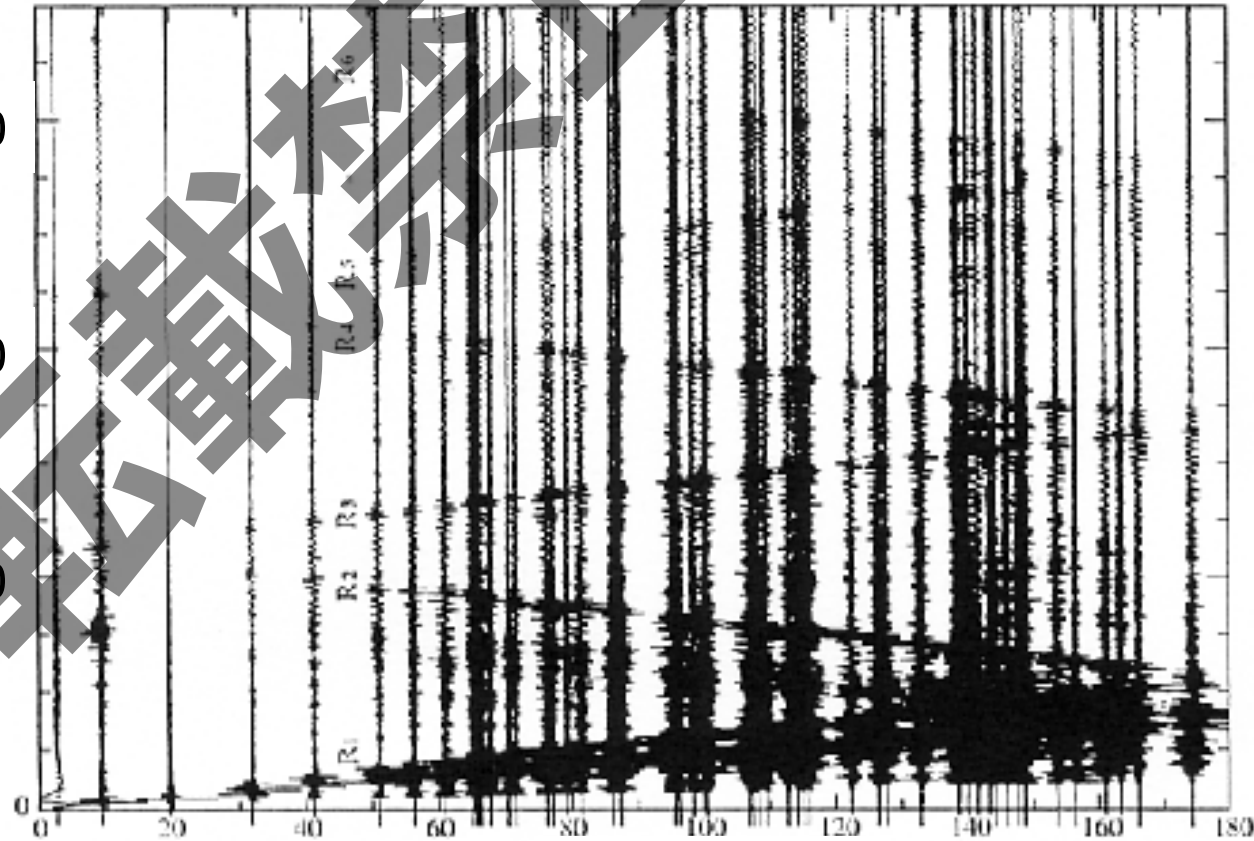
: G1, G2...

走時(秒)

30000

20000

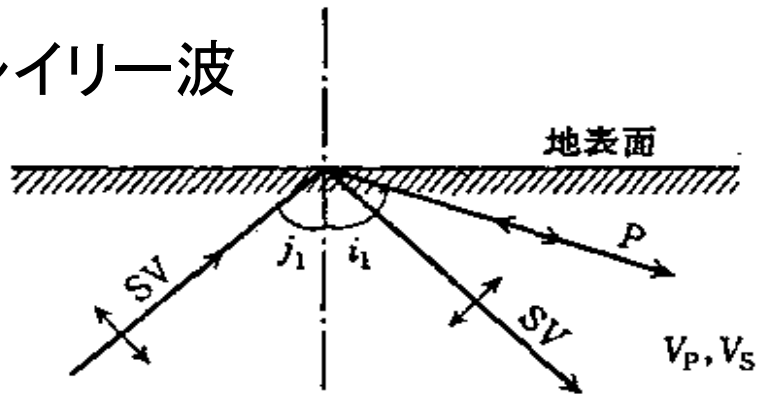
10000



震央距離(度)

表面波の発生

レイリー波

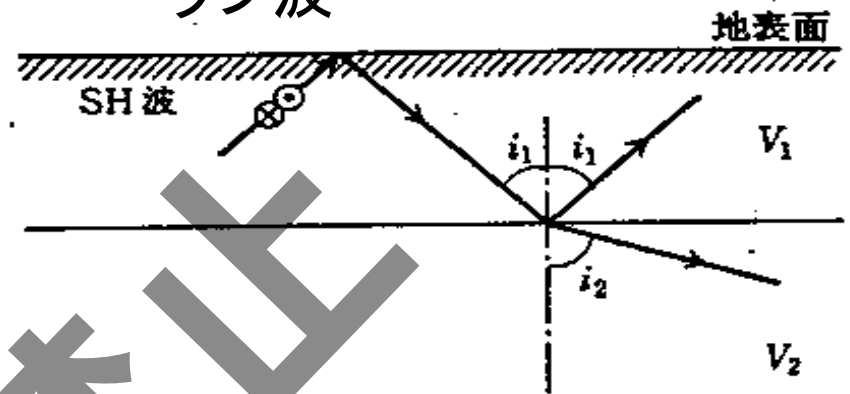


$$\frac{\sin j_1}{V_S} = \frac{\sin i_1}{V_P}$$

P-SV

(a)

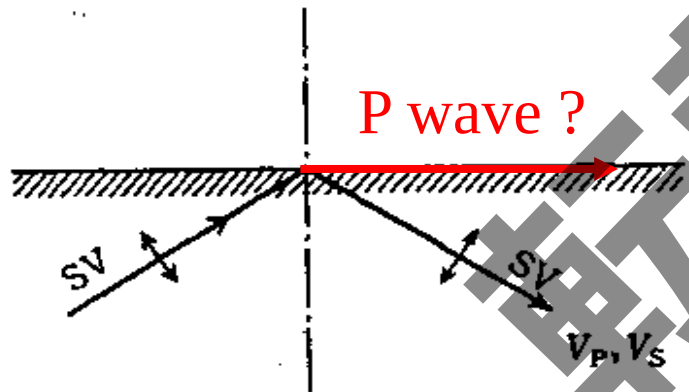
ラブ波



$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2}$$

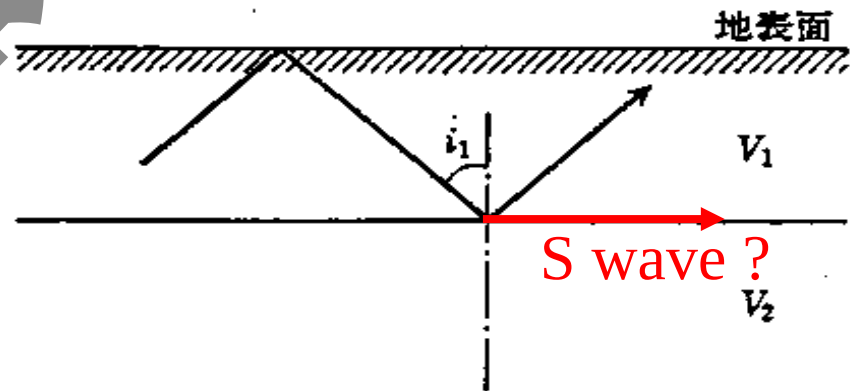
SH

(a)



$$\sin j_1 \geq \frac{V_S}{V_P}$$

(b)



$$\sin i_1 \geq \frac{V_1}{V_2}$$

(b)

表面波は位相速度 $c(=k/\omega)$
が周期(または周波数)に
より異なる。

「長波長(長周期)の波ほど深部ま
で振動し、速い速度となるため。」



これを分散(dispersion)と呼ぶ。

$$u(x, t) = \cos(k_1 x - \omega_1 t) + \cos(k_2 x - \omega_2 t)$$

$$\omega_1 = \omega - \delta\omega, \quad k_1 = k - \delta k$$

$$\omega_2 = \omega + \delta\omega, \quad k_2 = k + \delta k$$

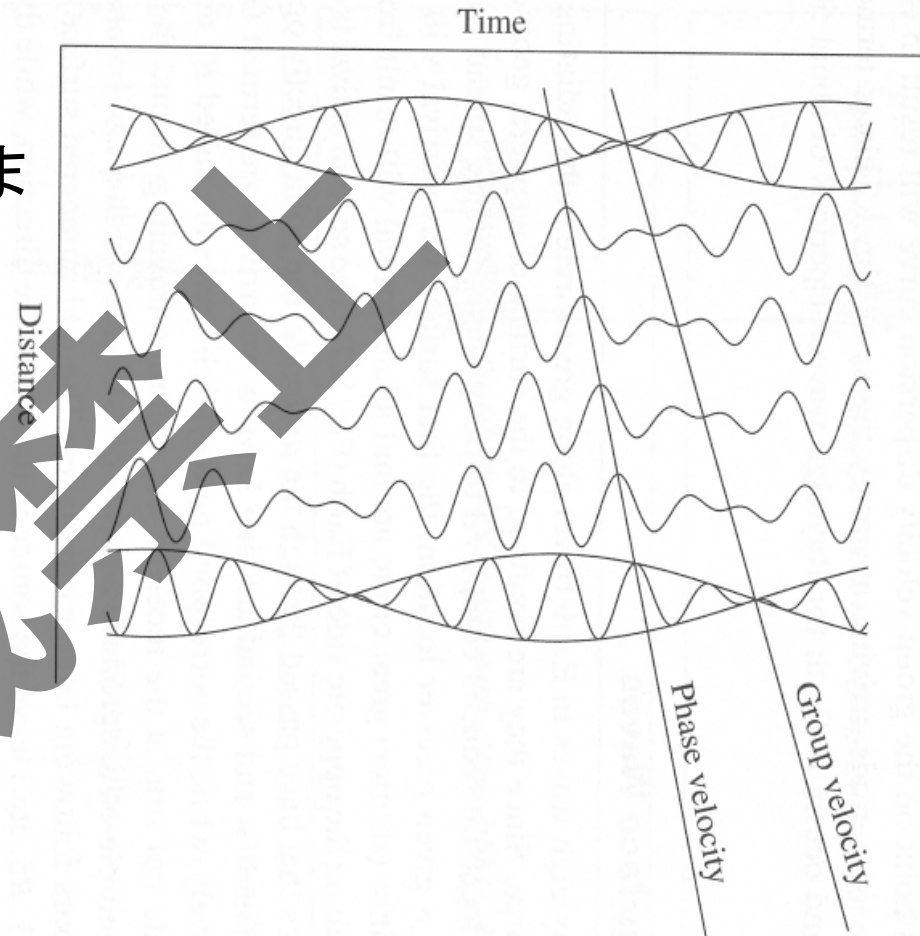
$$u(x, t) = 2 \cos(\delta k x - \delta\omega t) \cos(kx - \omega t)$$

$$c = \omega / k \quad : \quad (\text{位相速度 phase velocity})$$

$$U = \delta\omega / \delta k = d\omega / dk \quad : \quad (\text{群速度 group velocity})$$

$$= c + k dc / dk$$

表面波の分散(dispersion)



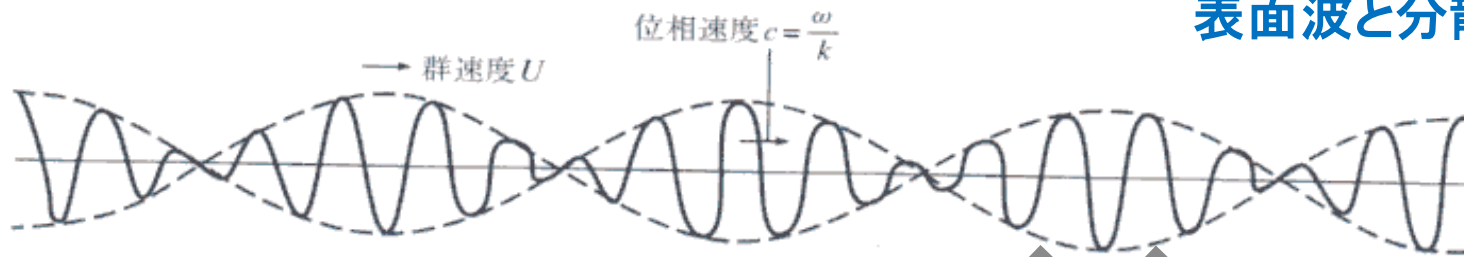
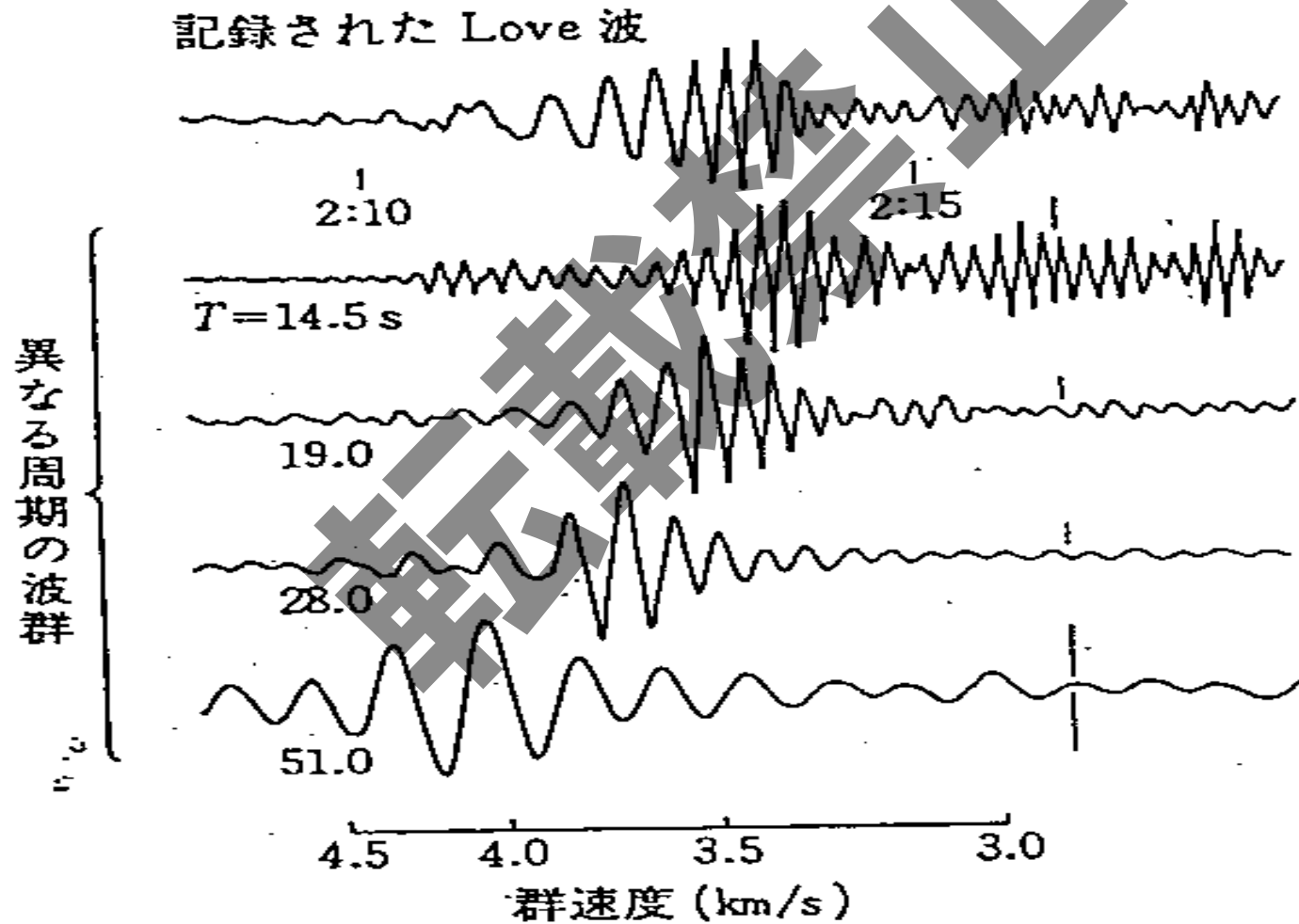
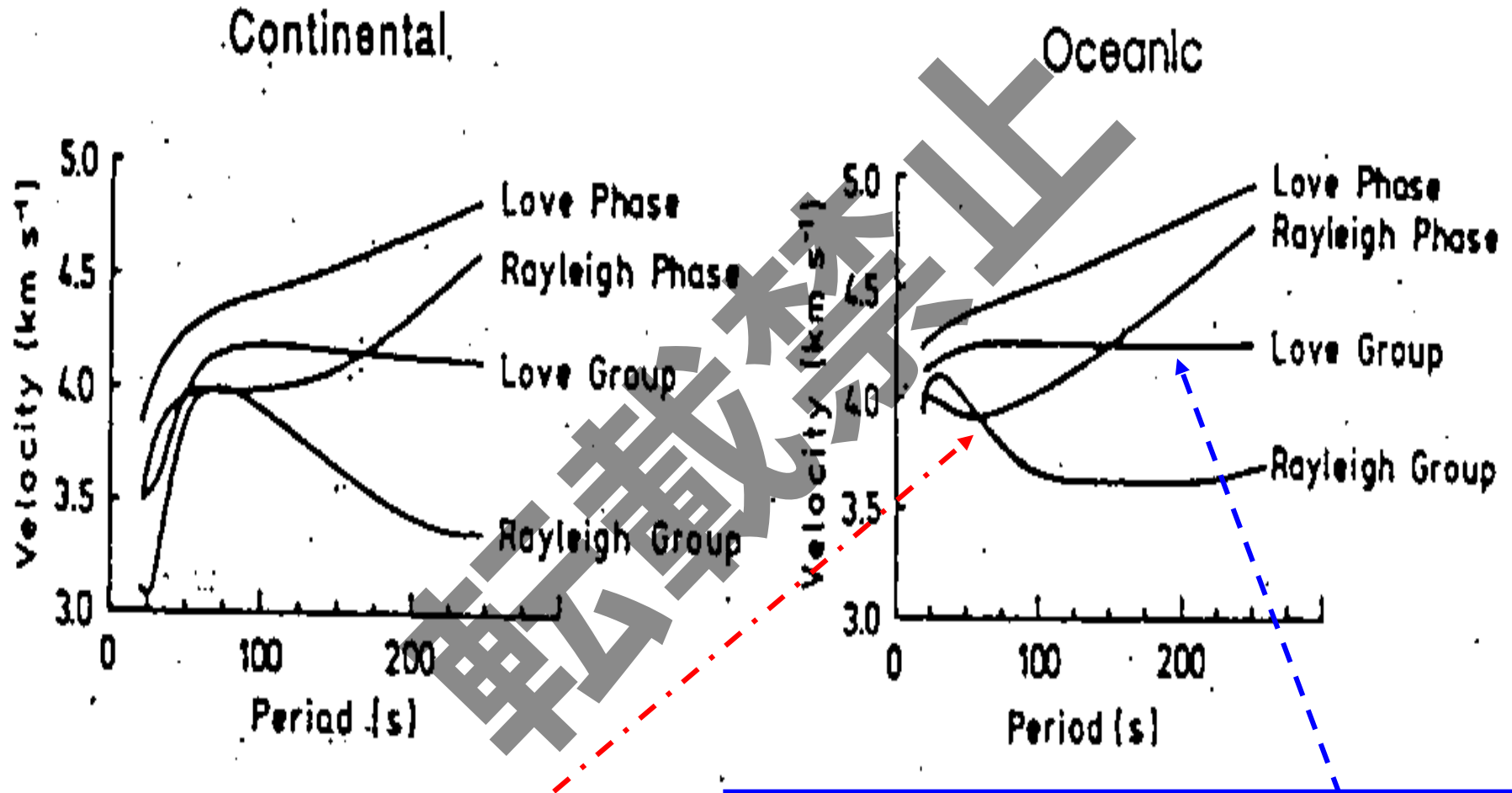


図2-16 位相速度と群速度



分散曲線



深さ60-100kmに低速度層

海パスのラブの群速度はほとんど分散を示さないので、パルス状の形をしている。

地震波の種類(3)

地球の自由振動

地球の固有周期

静かな地球



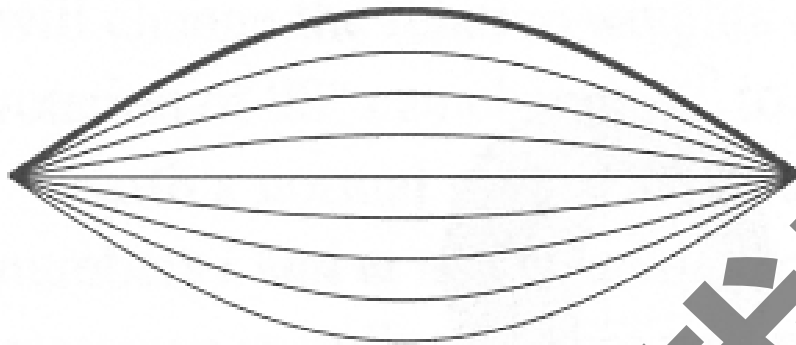
大地震



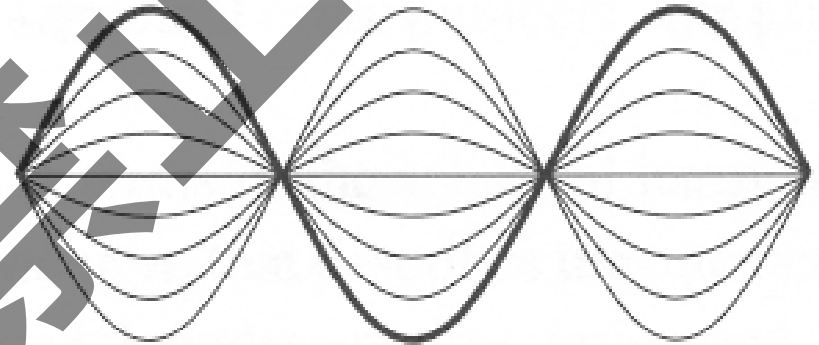
この「地球の自由振動」の記録を分析して
地球の内部構造を明らかにする。

1次元の弦の振動(固定端)

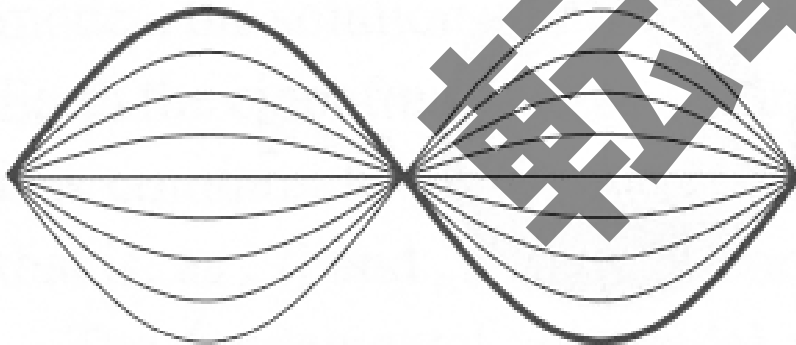
基本モード (fundamental mode)



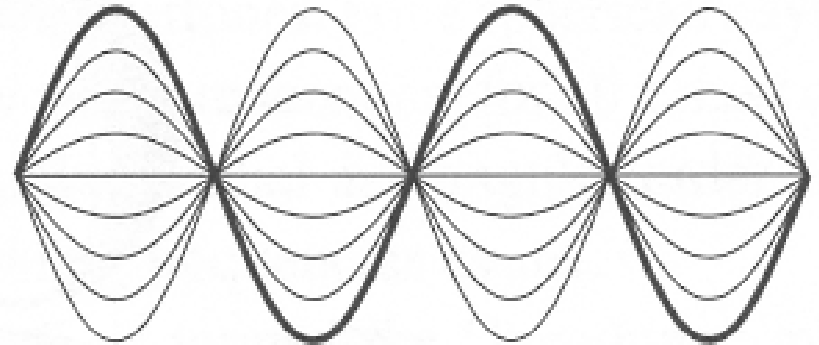
3次モード



2次モード(higher mode)



4次モード

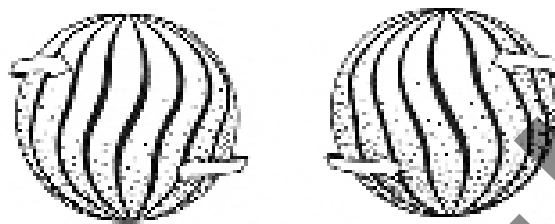
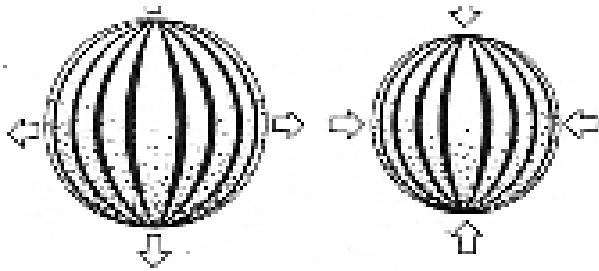


自由振動のモード (T: 周期)

地震波の種類(3)

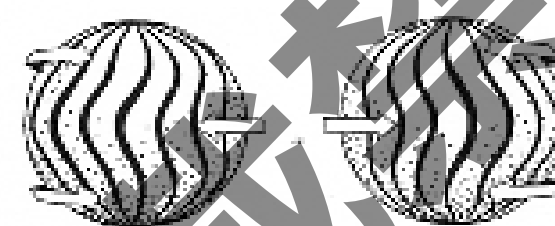
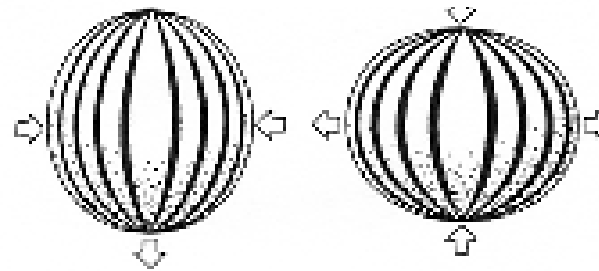
$0S_0$ (T 20.6分 min.)

$0T_2$ (T 44.1分 min.)



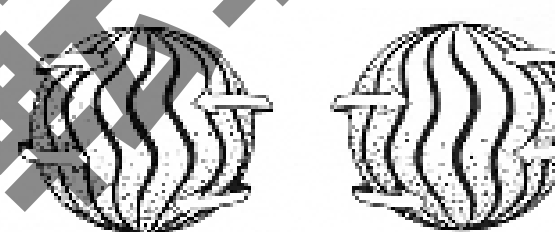
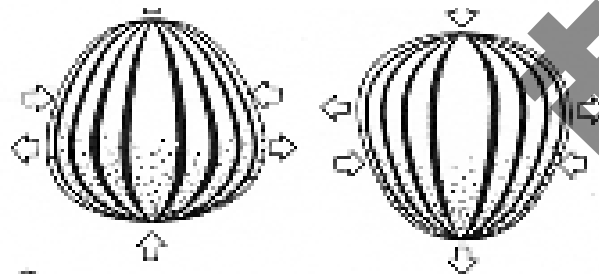
$0S_2$ (T 53.7分)

$0T_3$ (T 28.2分)



$0S_3$ (T 35.7分)

$0T_4$ (T 21.8分)



伸び縮み振動
のモード

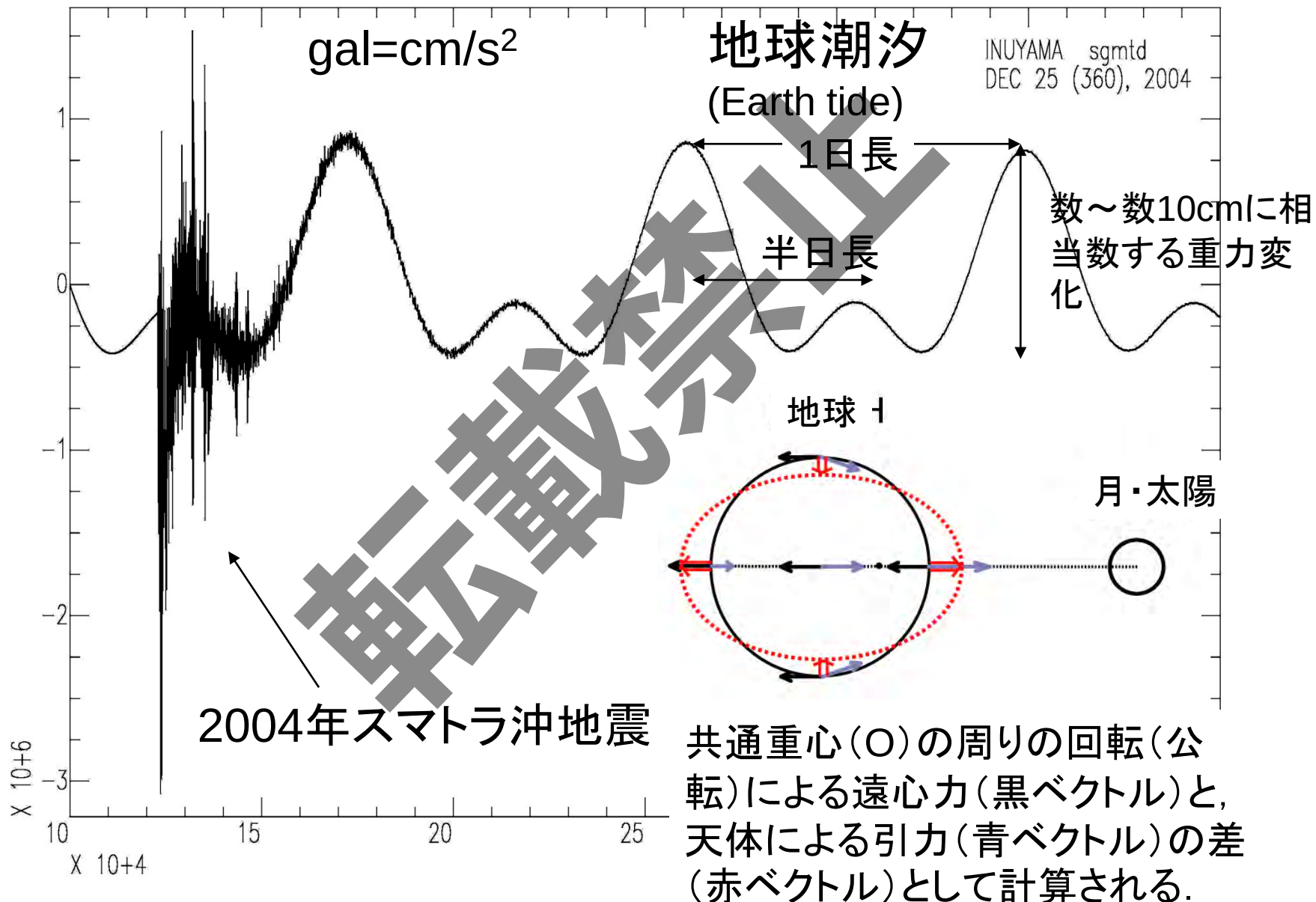
ねじれ振動
のモード)

大地震が起きると、お寺の鐘がなる時のように地球が揺れる。これを地球の自由振動(free oscillation)という。

超伝導重力計によるスマトラ沖地震の記録

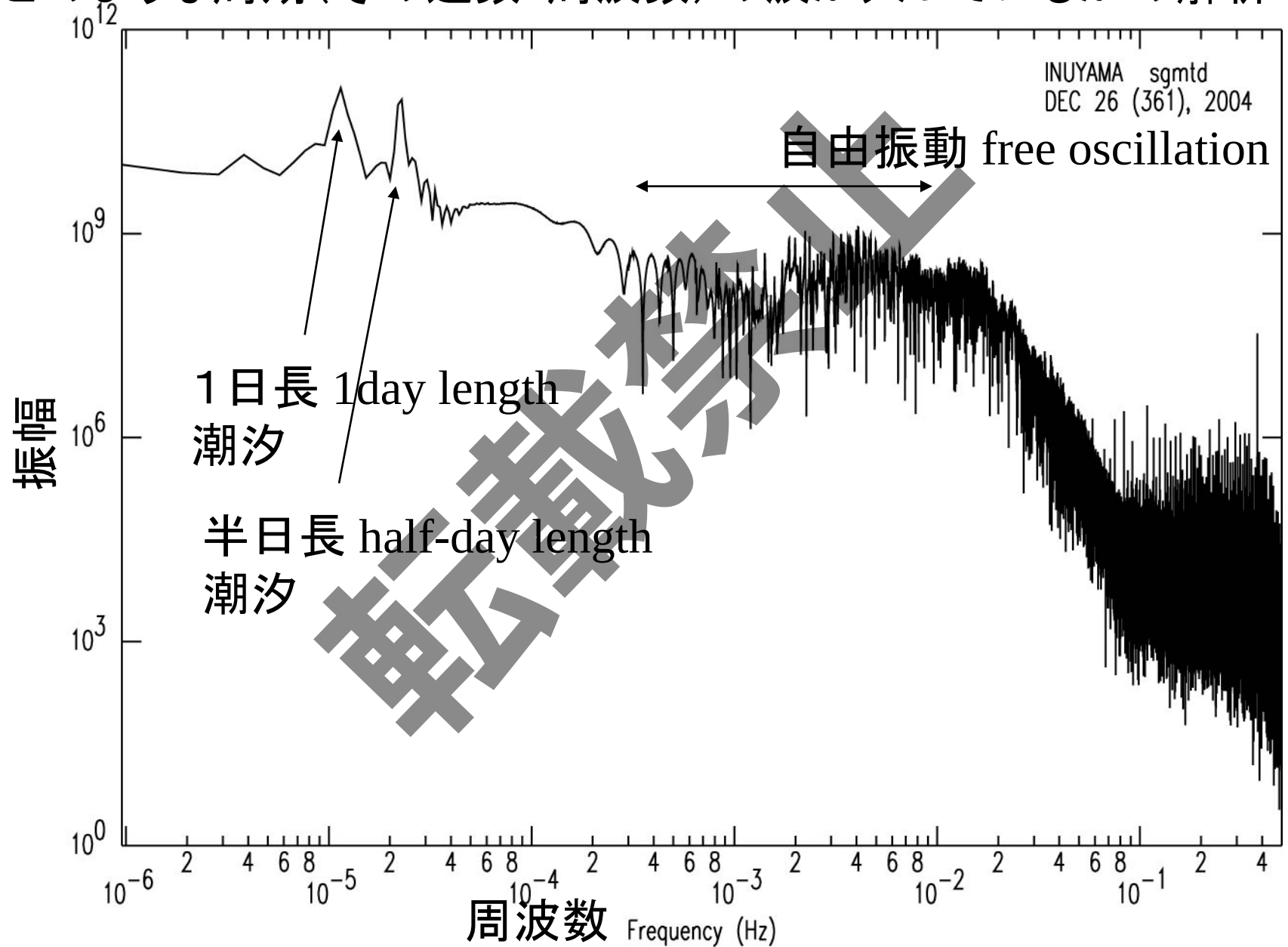
(犬山名大観測点)

0.3086mgal(ミリガル)/m



スペクトル解析

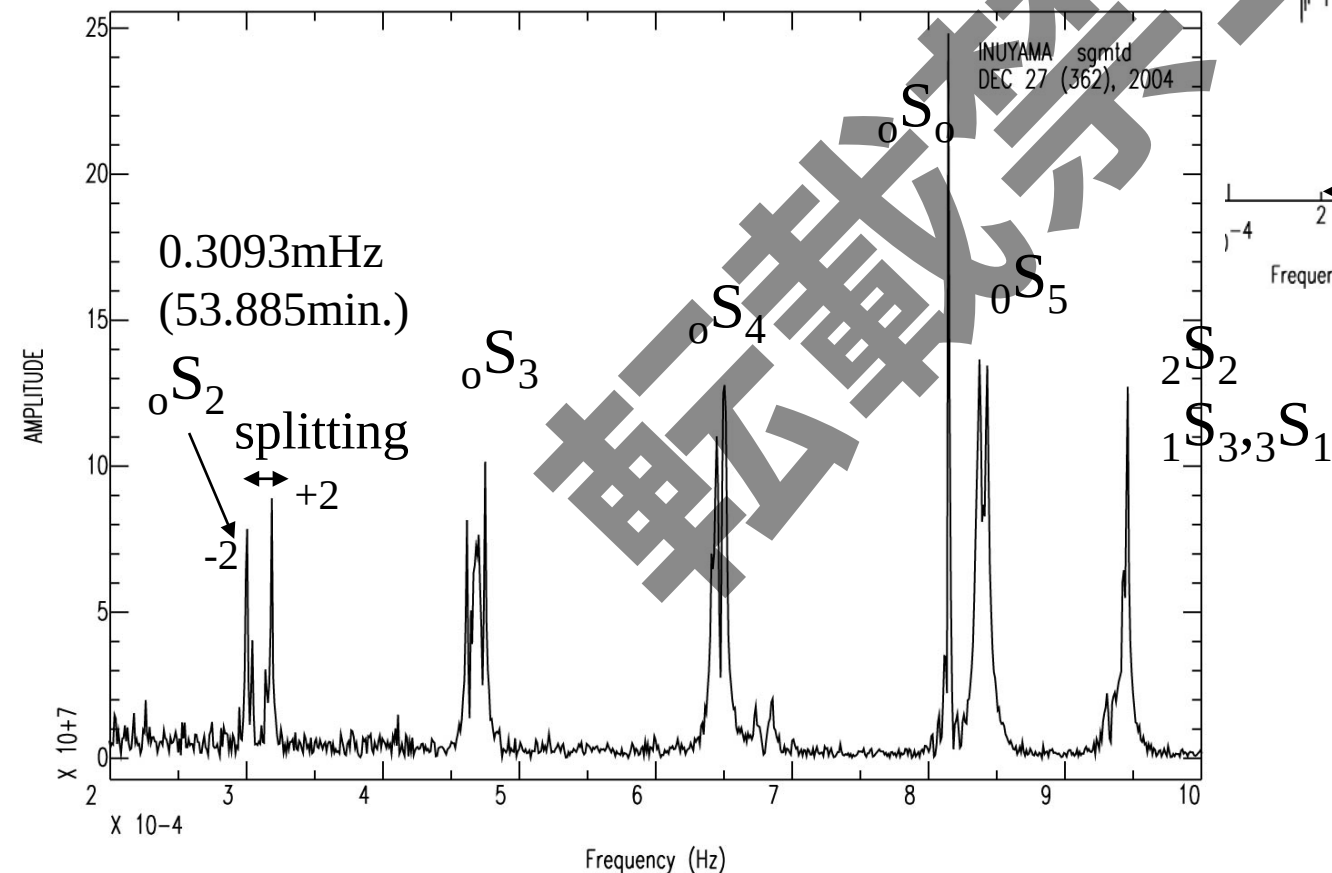
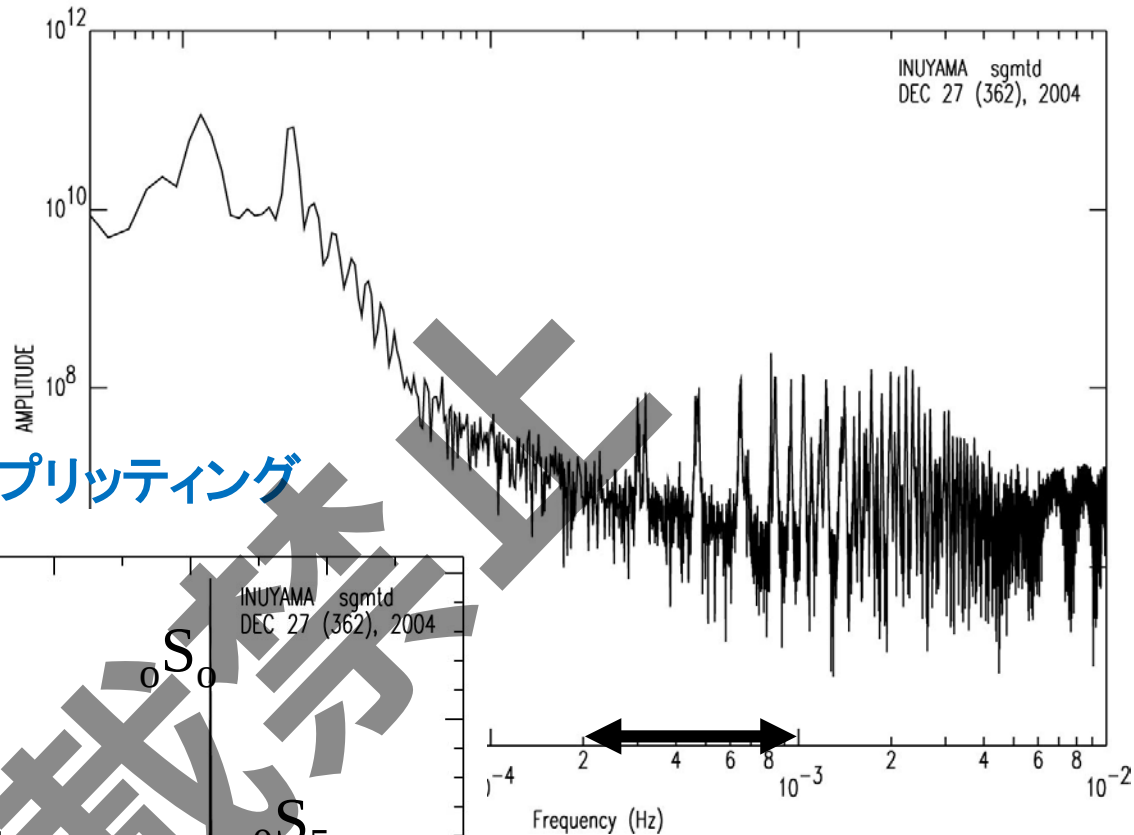
: どのような周期(その逆数: 周波数)の波が入っているかの解析



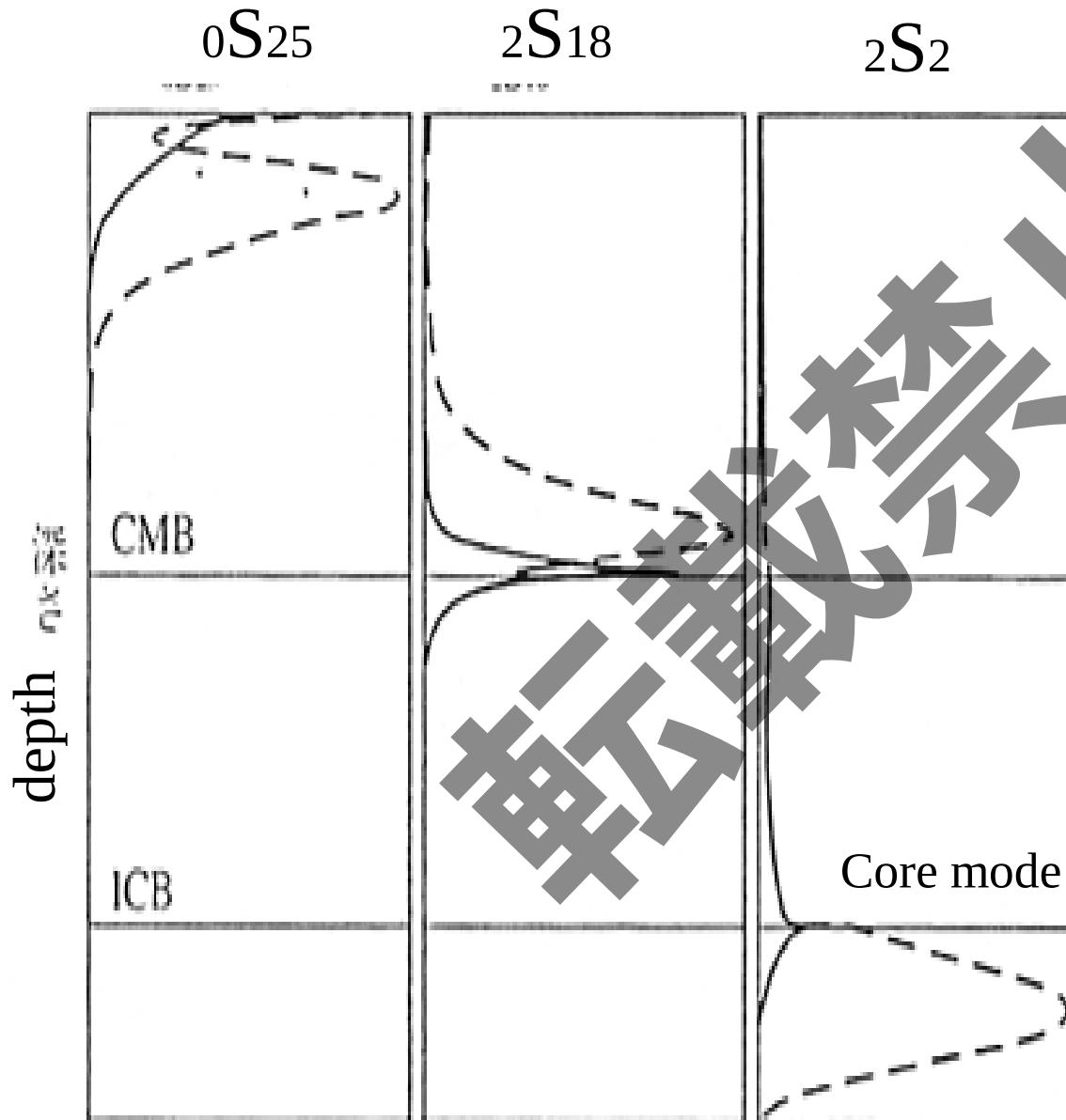
$nS_l \rightarrow (2l+1)$ splitting

地球回転・楕円体
不均質性により
スペクトルが分離

回転, 楕円体
球対称構造からのずれ → スプリットिंग



自由振動各モードのエネルギー深さ分布



各モードの半
径方向の振動
エネルギー分
布。

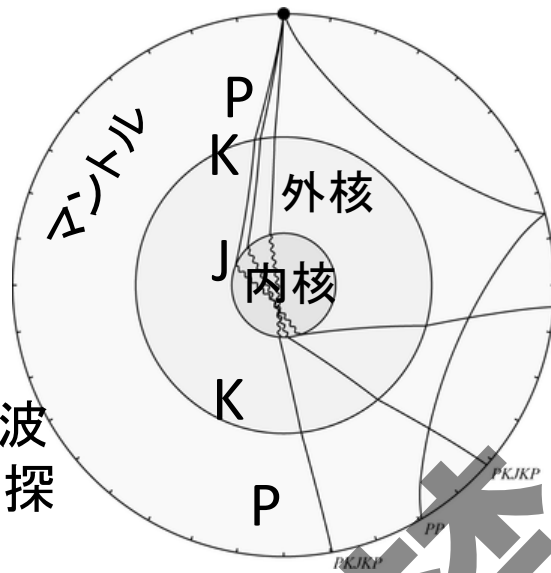
実線はP波、
点線はS波に
関するエネル
ギー。

内核にエネル
ギーを持つ
モード $2S_2$ 等
により内核が固
体であること
が分かった。

PKJKP (幻のフェイズ)

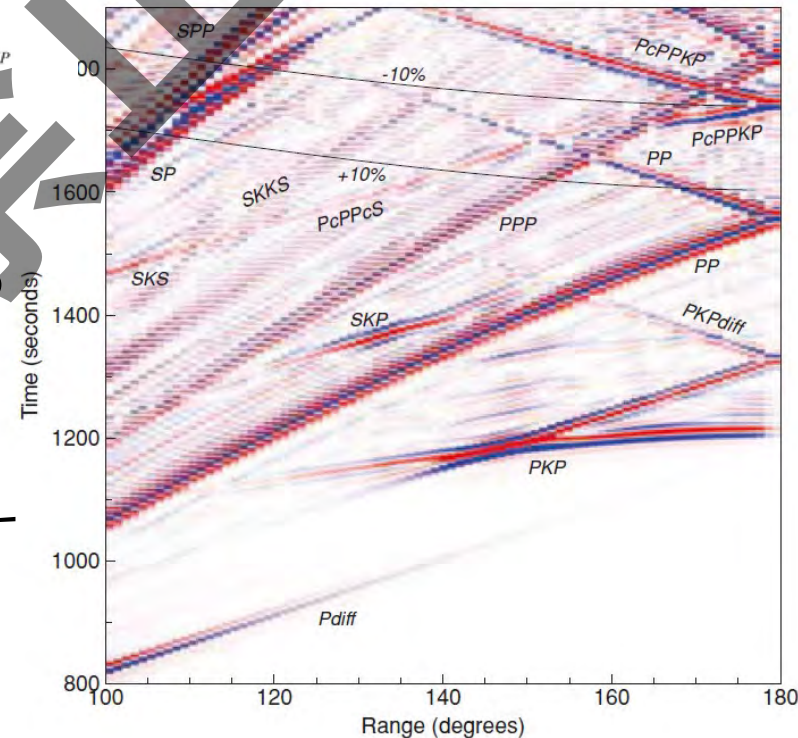
内核をS波で伝わる実体波で内角のS波速度構造を探るうえで重要

内核-外核でのPS、SP変換効率が小さく、また図のように波線が広がる(幾何学的減衰)が大きいので、短周期記録では見えない。長周期記録($T \geq 10$ 秒)を重ね合わせる(スタッキング)して見つけたという論文は出ているが、確定的ではない。



PREMに基づくPPに対する理論振幅
PREMのS波の+10%、-10%に対応する走時曲線が書かれている

Figure 1 PKJKP and PP ray paths. Solid lines show P-wave legs through the outer core and mantle; wiggly lines show the .



Shearer et al.(2011)

地震波の非弾性減衰(attenuation)

減衰: 1)幾何学的減衰 2)散乱減衰
3)物質固有の減衰(熱に変わる)

↓↓

Q (Quality Factor):

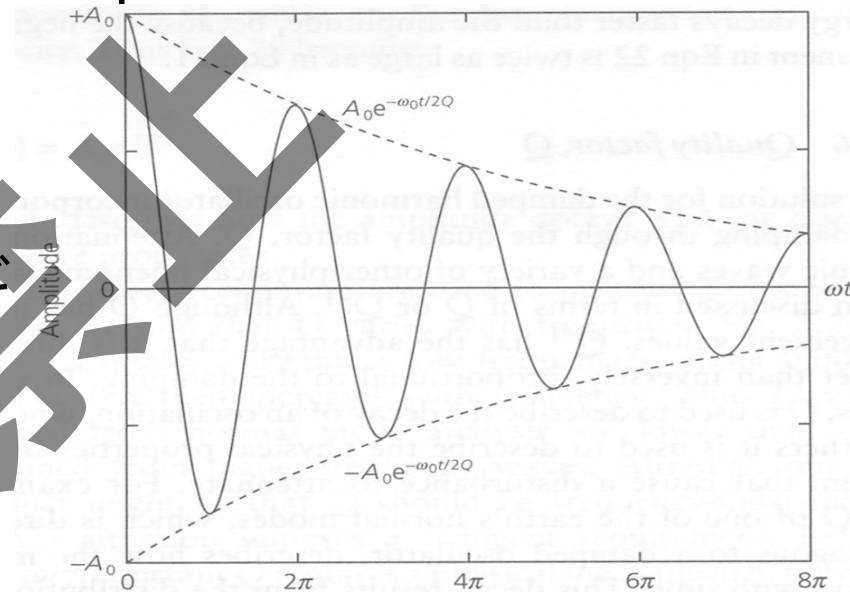
$$Q^{-1} = dE / (2\pi E) = dA / (\pi A)$$

(1周期 T (1波長 λ)の間に波動エネルギー E 及び振幅 A が dE, dA 失われる)

$$\begin{aligned} A(t) &= A_0 \exp(-\pi / (QT) t) \\ &= A_0 \exp(-(1/(2Q)) \omega t) \\ &= A_0 \exp(-t * \omega / (2Q)) \end{aligned}$$

$$A(x) = A_0 \exp(-\pi / (Q\lambda) x)$$

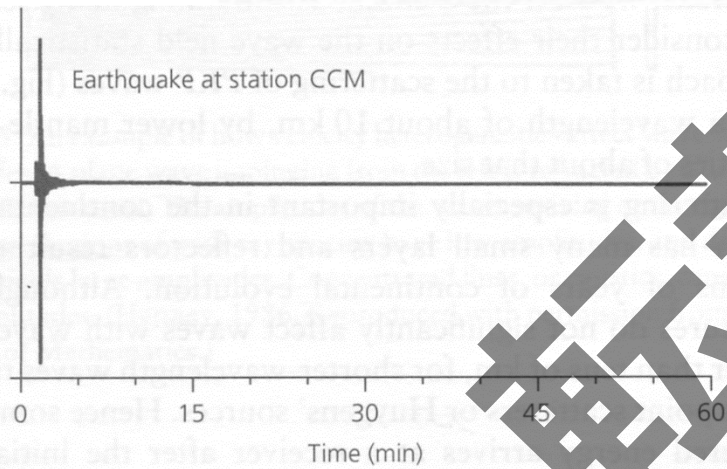
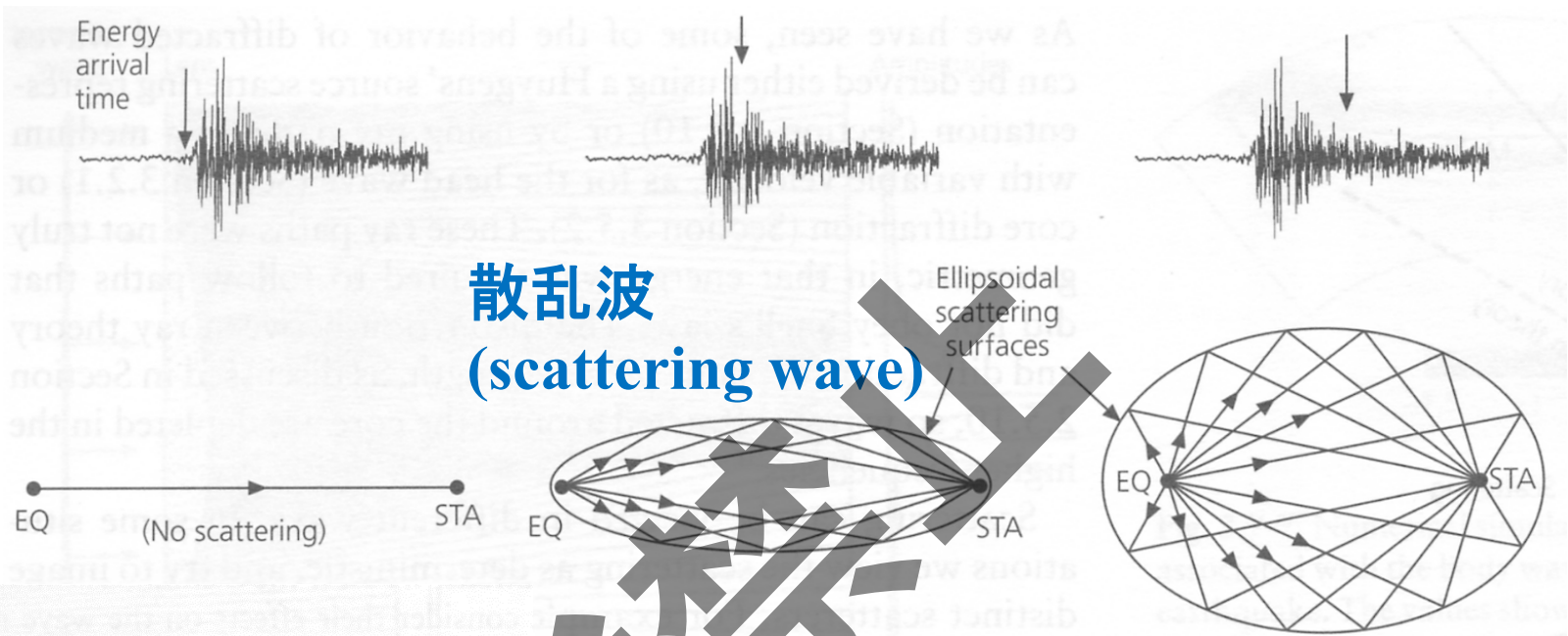
Q回振動する[$t=QT$](Q波長伝播すると[$x=Q\lambda$])、振幅は $e^{-\pi} \sim 1/23$ になりほぼ減衰する。



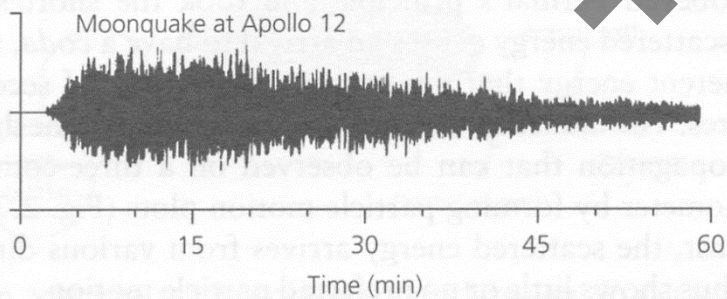
$$A_0 \exp(-\omega t / 2Q) \cos(\omega t)$$

High Q : 低減衰

Low Q : 高減衰



小地震の地震波形 ($\Delta=138\text{km}$)
高減衰



月震(月の地震): 揺れ続ける
減衰が少ない

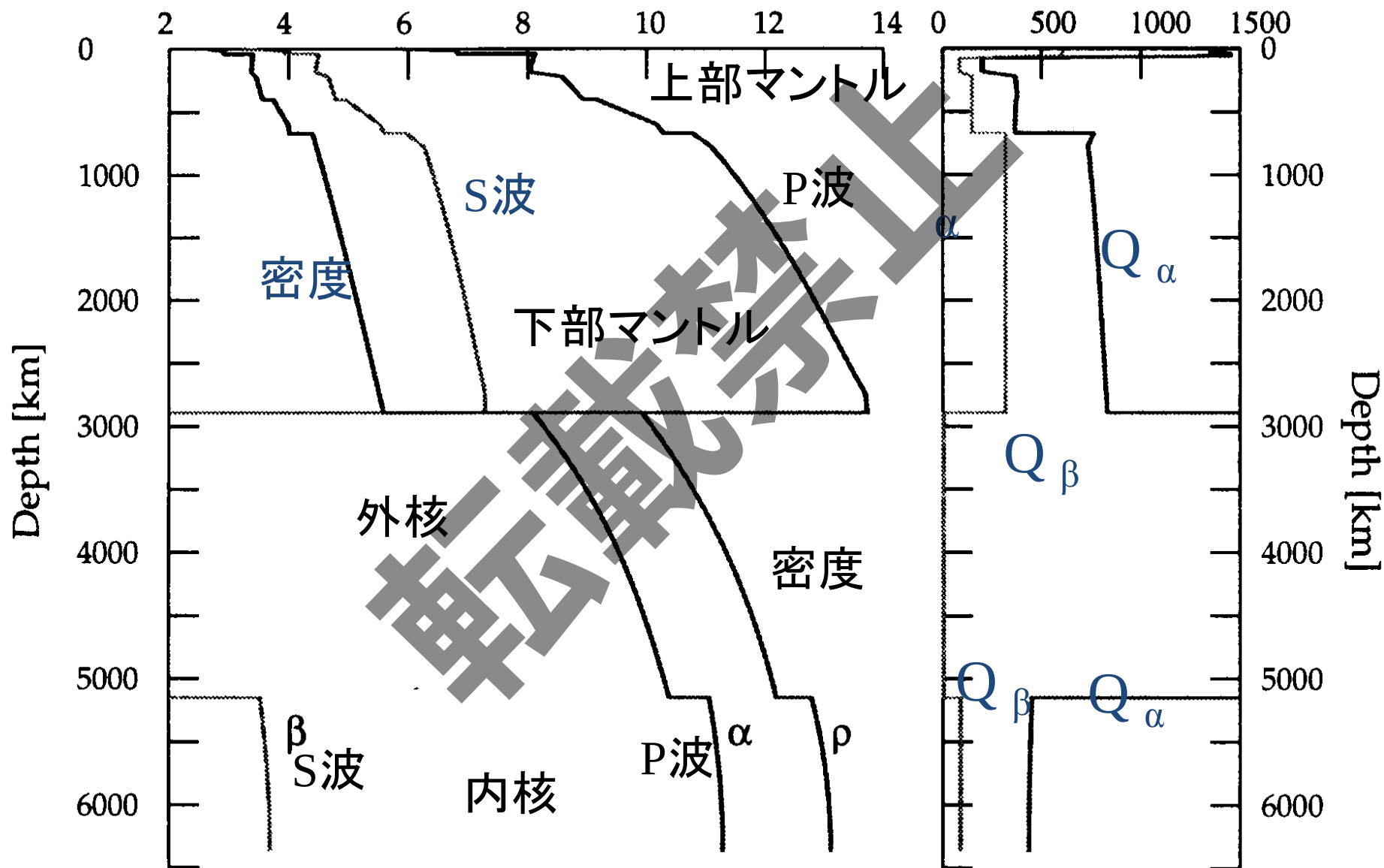
(1次元モデル)地震波速度・密度

減衰

PREM

β, α km/s ρ Mg/m³

$Q_{\beta, \alpha}$



世界的 global

地殻

地域的 local

モホ 5-70 km

遷移層

± 15-30 km

0
410
520
660

Cold

上部
マントル

Hot

60
80
220
330
710
900
1,050

下部
マントル

核-マントル境界
± 1-10 km

2,889

2,640

D* layer

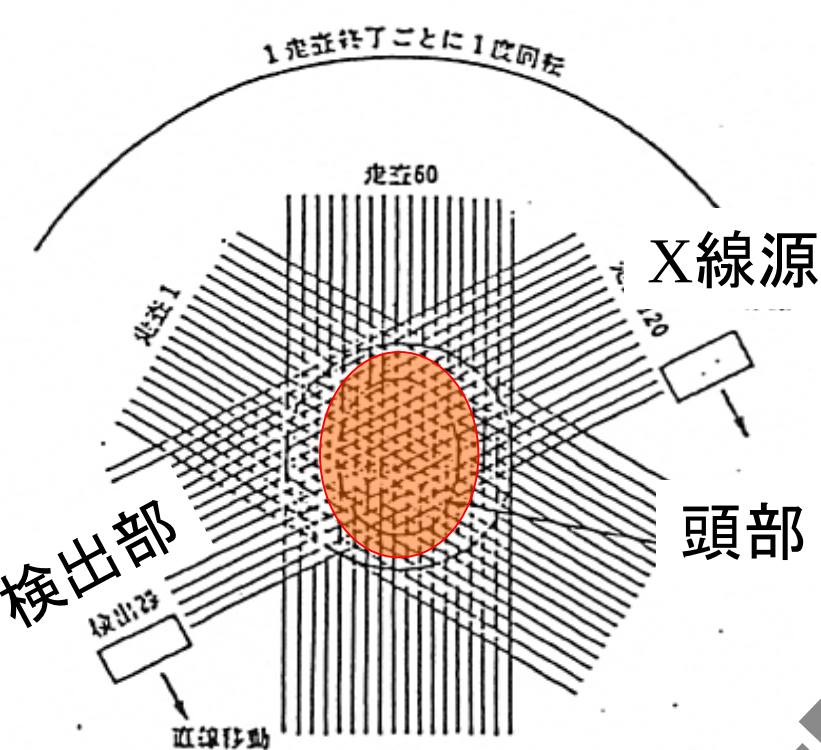
外核

5,155

内核

6,371

地球内部の
地震波不連続面

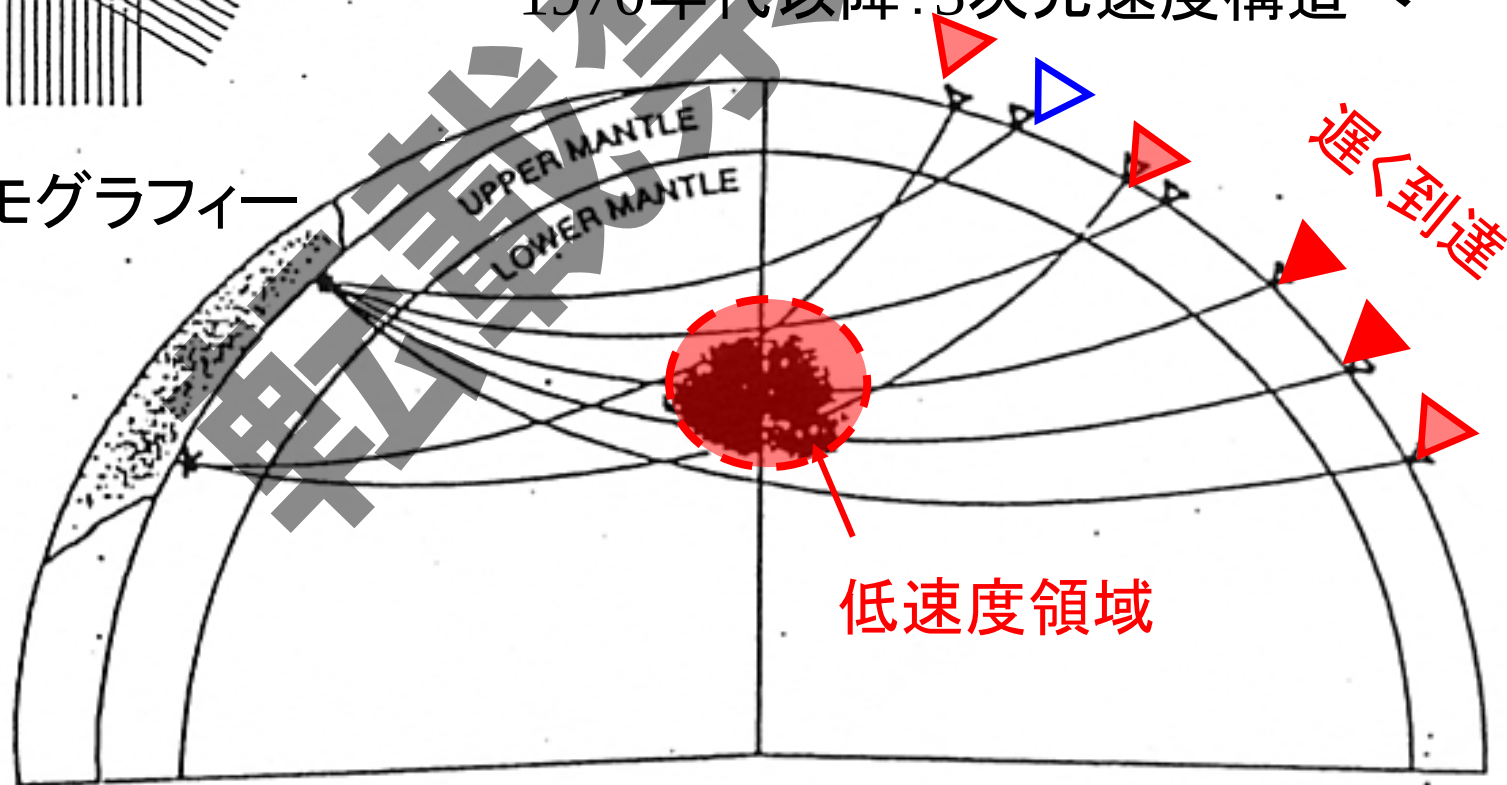


医学のトモグラフィー

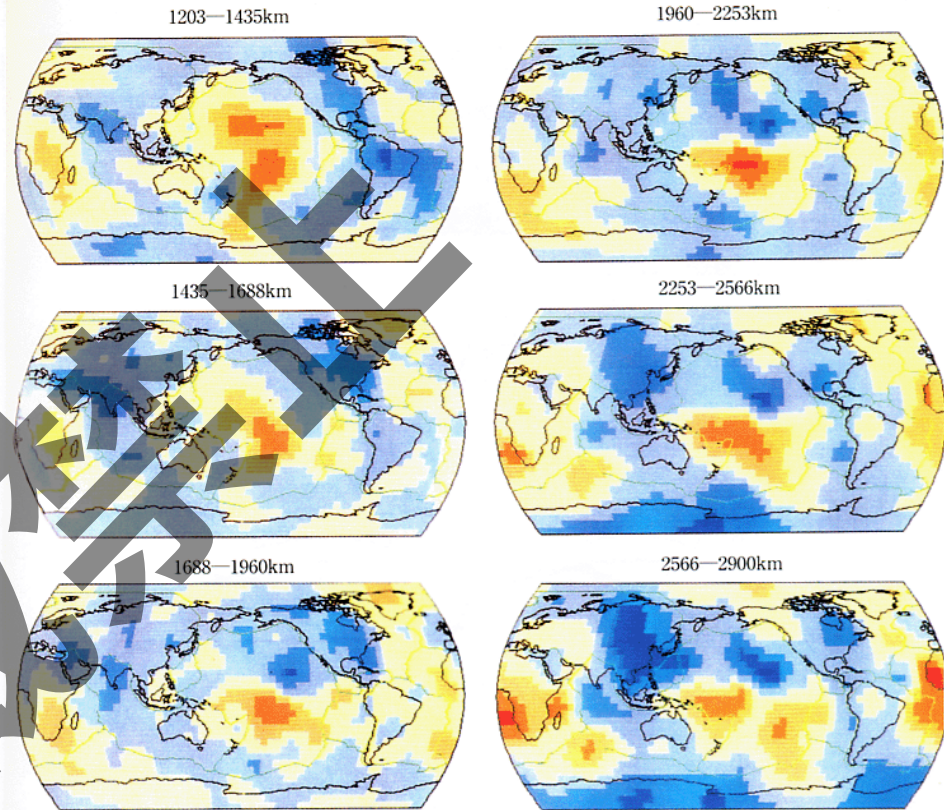
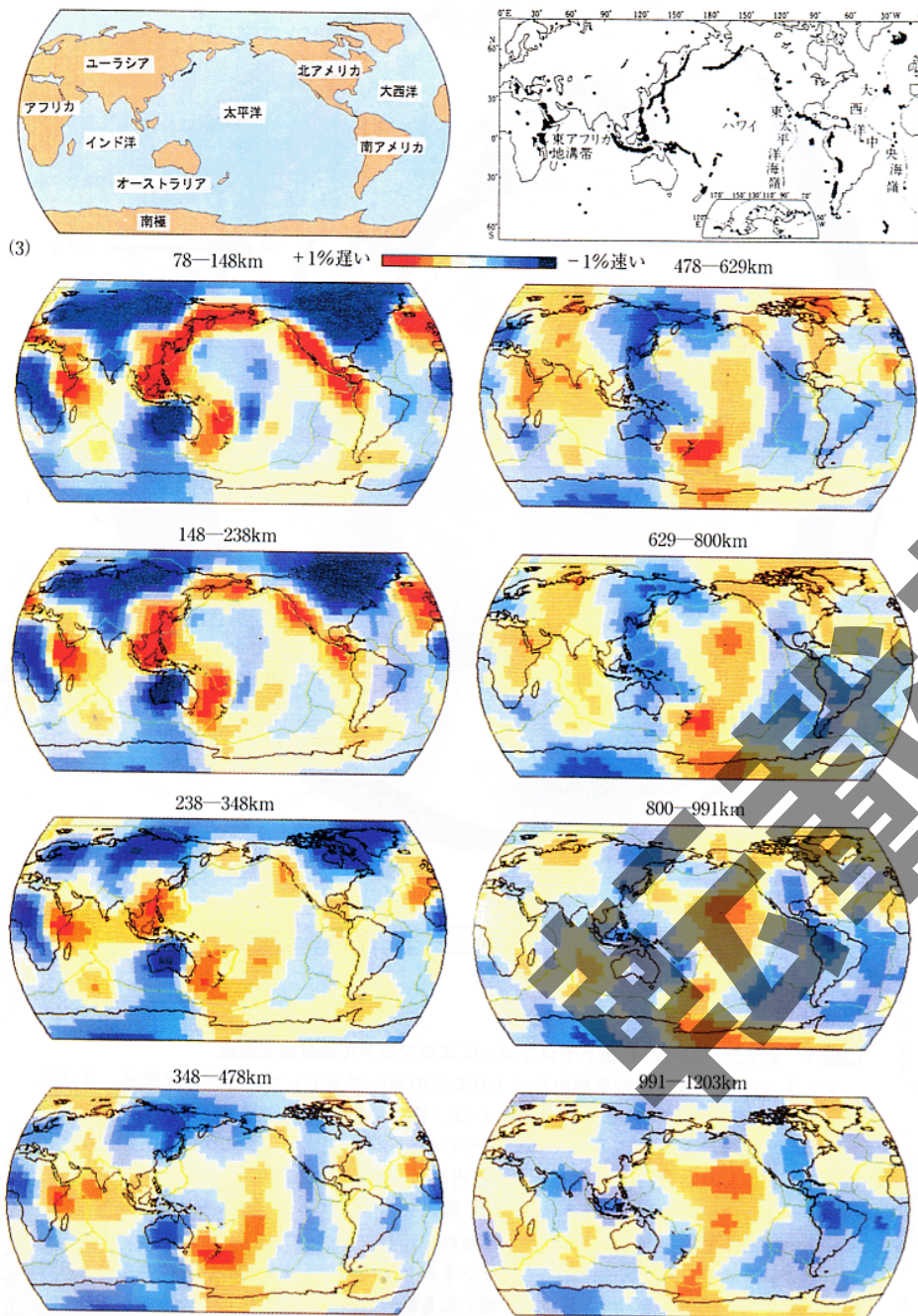
CT(Computerized Tomography) : Seismic Tomography 地震波トモグラフィー

1970年代まで: 1次元速度構造

↓
1970年代以降: 3次元速度構造へ



P波トモグラフィー(井上他・1990)



口絵 2 全世界の深さ別の P 波速度異常分布

(1) 参照世界地図、(2) 世界の火山分布、(3) 各層での P 波速度異常分布。2566～2900km の核・マントル境界層の上のアジア地域にみられる高速域は、低温スラブが堆積していると解釈されている。南太平洋スーパープリューム、南アフリカスーパープリュームとみられている低速域の広がり方に注目。火山分布（ホットスポットも含む）と低速（高温）域との関係から、核・マントル境界に起源をもつ火山（例えばインド洋三重点の南のケルゲルン島）とそうでない火山（例えば日本列島の火山）とに分けられる。ハワイホットスポットの起源は核・マントル境界にあると思われていたが、対応する低速（高温）域がみられないため、1200km の深さで南太平洋スーパープリュームから枝分かれしたものと解釈されるようになった。（井上，1989；丸山ほか，1993；深尾ほか，1994 原図：深尾良夫氏提供）。

地震波トモグラフィーは何を見ているか？

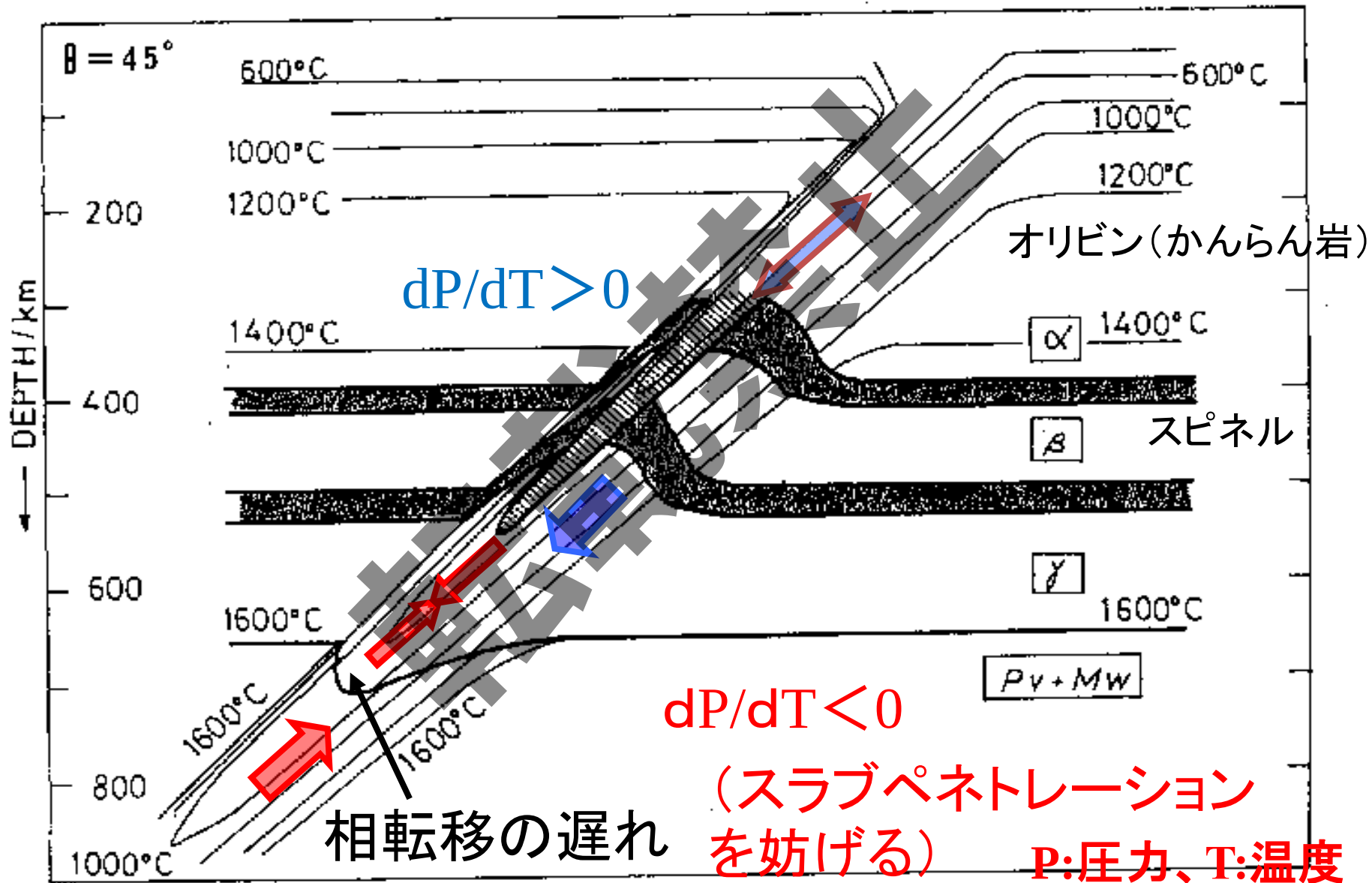
地震波速度・減衰の温度・圧力への依存性(一般的傾向)

温度: 低い(L) — 速度: 速い(F) — 密度: 大(L) — 減衰: 小(S)
(T) 高い(H) (V) 遅い(S) (ρ) 小(S) (AT) 大(L)

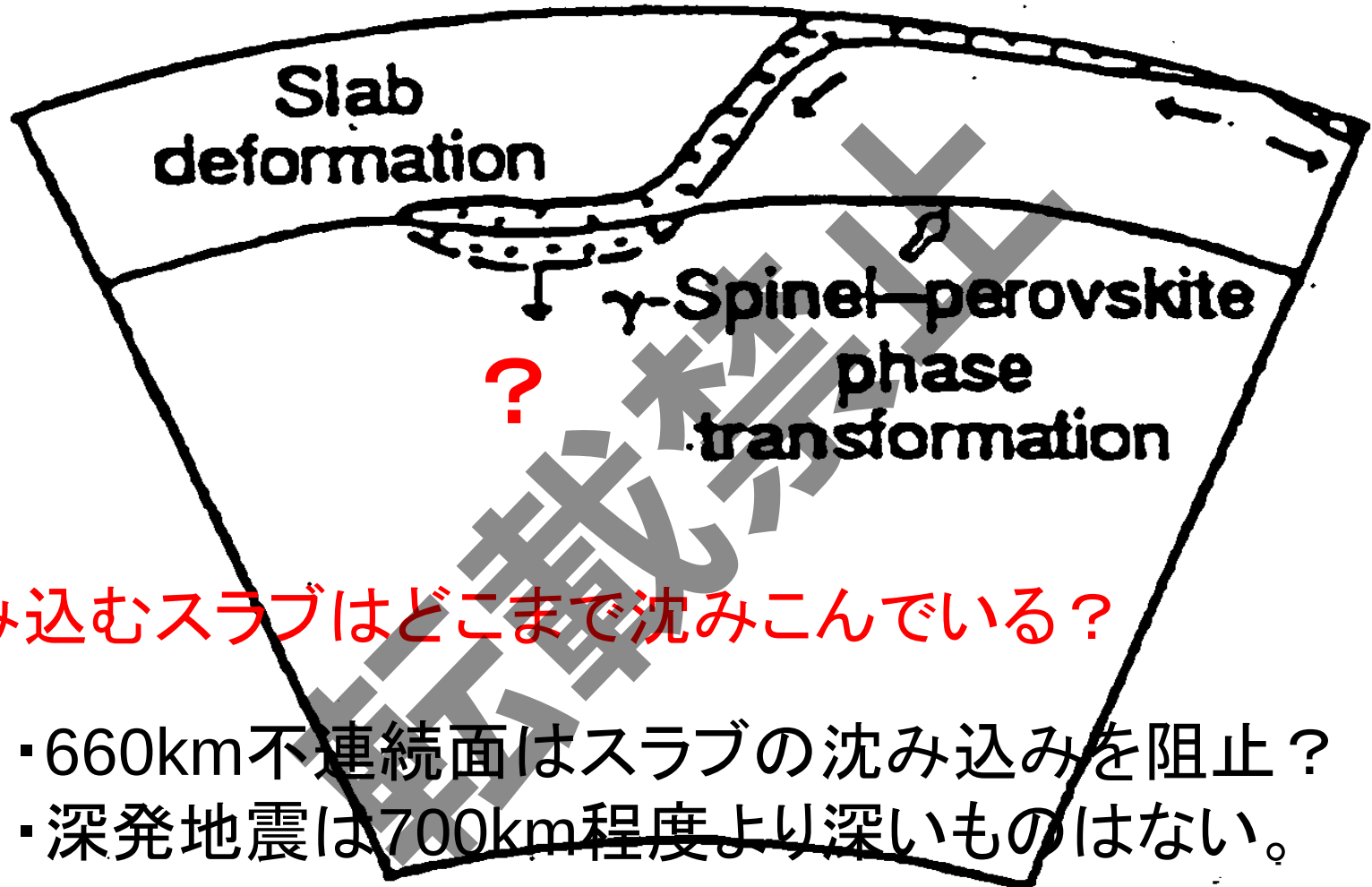
圧力: 高い(L) — : 速い(F) — : 大(L) — : 小(S)
(P) 低い(S) 遅い(S) 小(S) 大(L)

速度・減衰構造 → 温度構造の推定
(3次元構造 → マントル対流のスナップショット)

沈み込むスラブ(プレート)中の相転移 :地震波不連続面



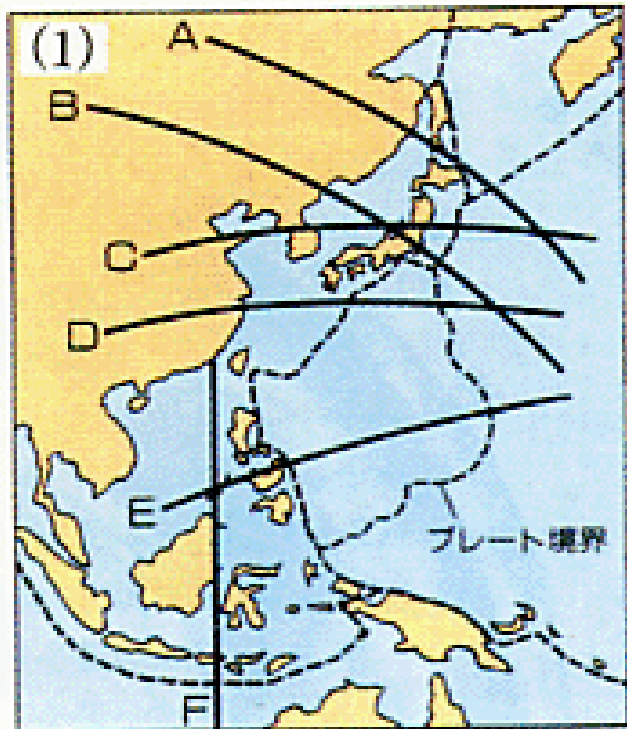
Slab Penetration



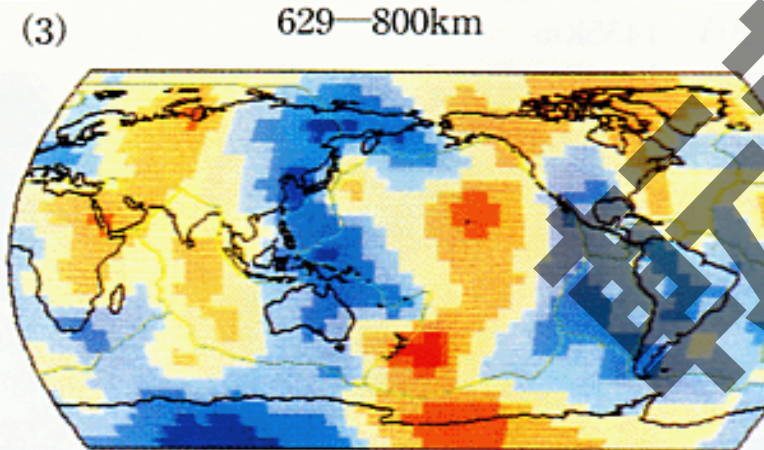
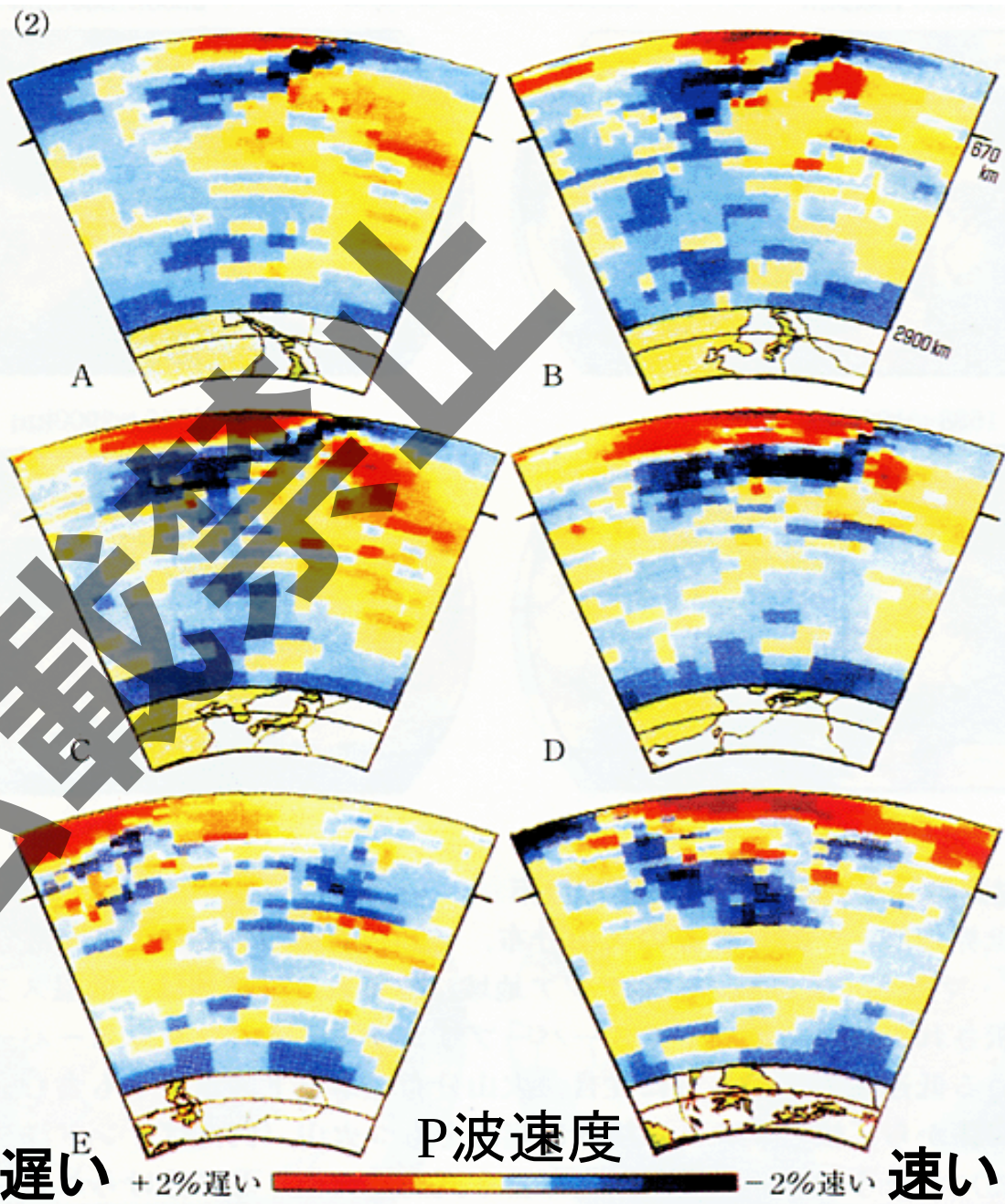
沈み込むスラブはどこまで沈みこんでいる？

- ・660km不連続面はスラブの沈み込みを阻止？
- ・深発地震は700km程度より深いものはない。

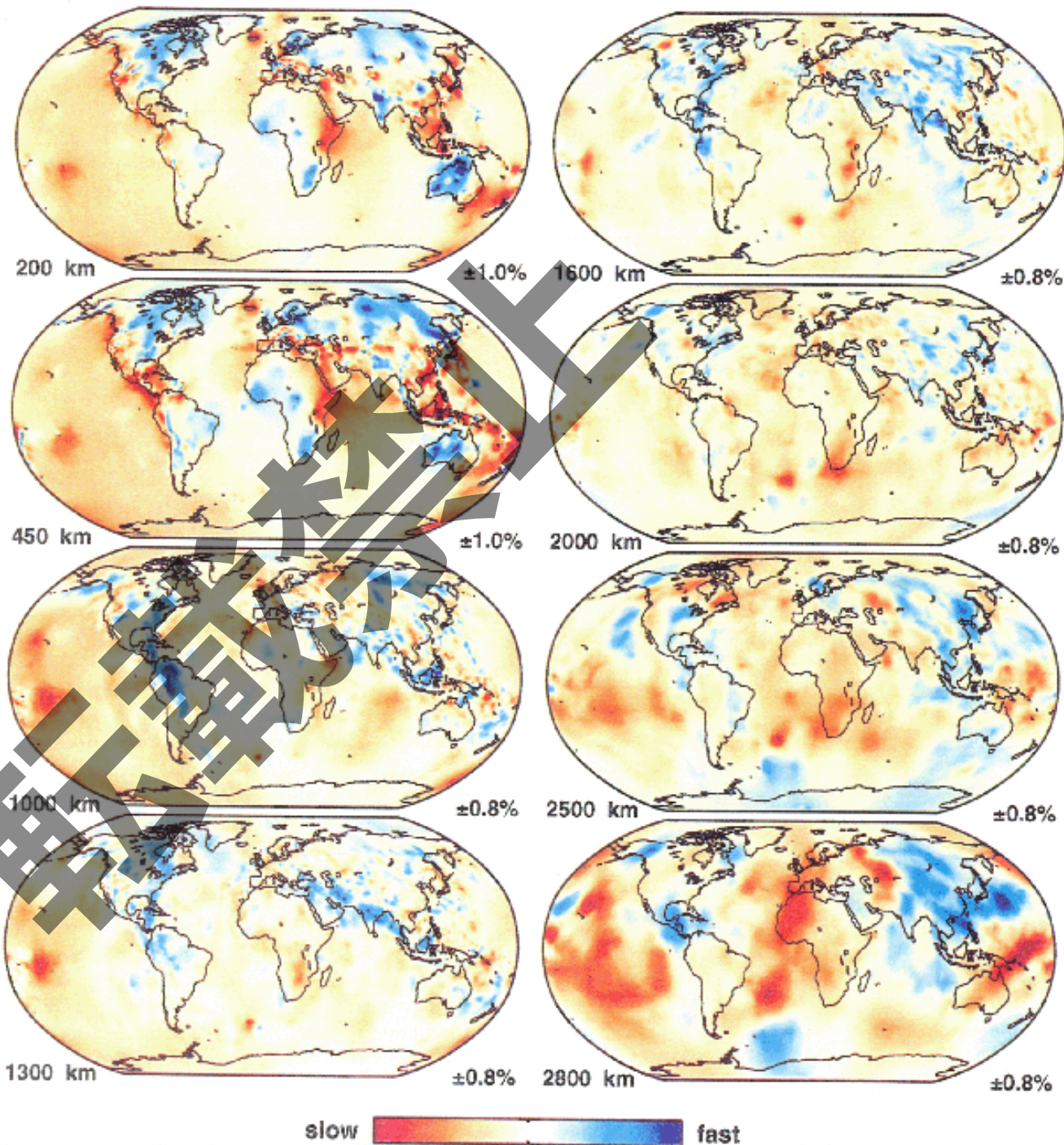
地震波トモグラフィーで探る！



(1990 model)



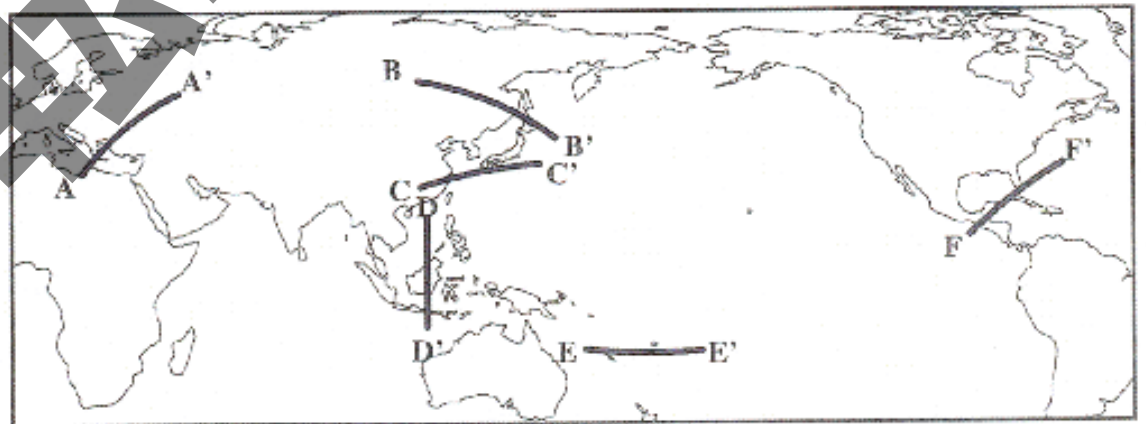
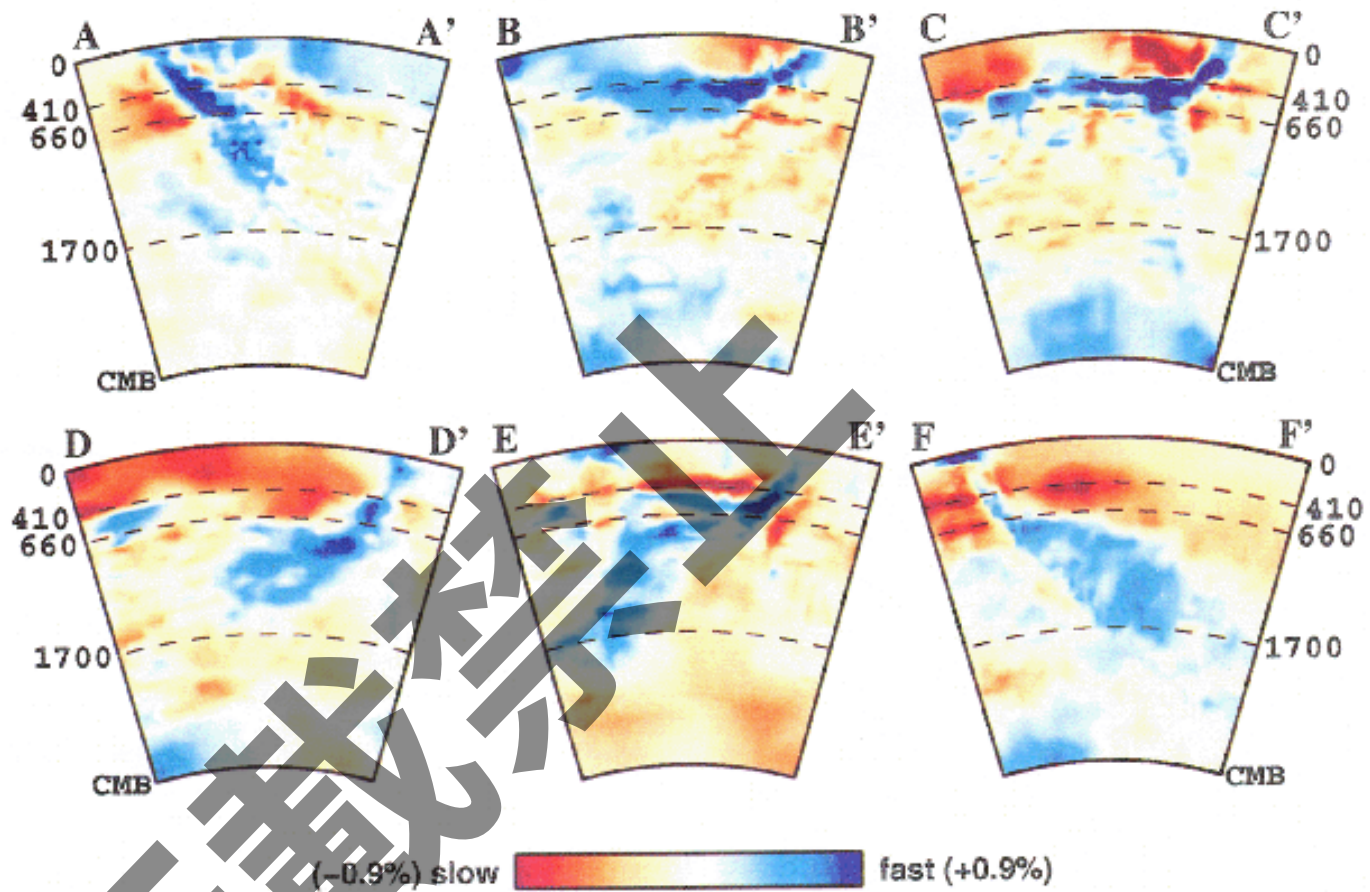
2000年P波 トモグラフィー モデル

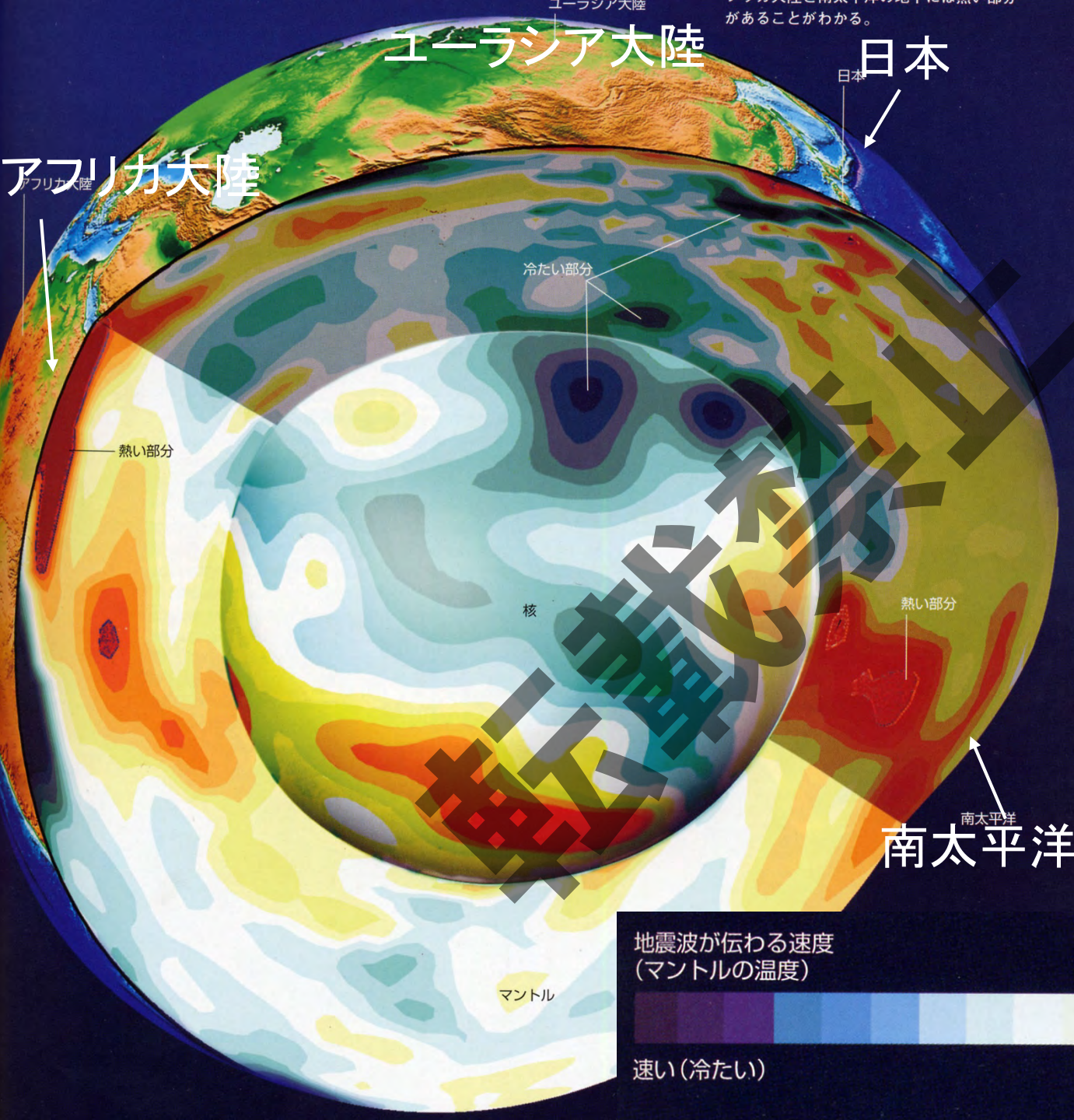


Karason &
van der Hilst(2000)

slab penetration

Karason &
van der
Hilst(2000)





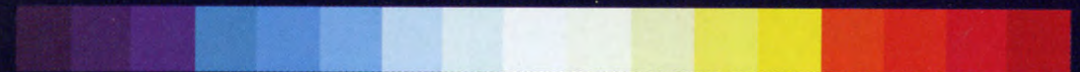
地球を輪切りにするCT

- ・ユーラシア大陸の下のコールドプルーム
- ・アフリカと南太平洋下のホットプルーム

↓
プレート運動を引き起こしている

ニュートン
地球のしくみと
進化の歴史

地震波が伝わる速度
(マントルの温度)



速い(冷たい)

遅い(熱い)

大地の動き: 歴史的変遷



1910年頃 **大陸移動説**(continental drift)

(ウェゲナー(Wegener))

陸地形の相似性・生物化石

1930年 ウェゲナーグリーンランド探検中に死す

1940年頃 大陸移動説: 下火に

- ・パンゲアの分裂がつい最近である約2億年前に起きた。
- ・大陸移動の原動力?

1950年代～ **古地磁気学**(paleomagnetism)

- ・地磁気の逆転
 - ・地磁気極の移動
 - ・大陸移動
- Do you believe in continental drift ?

1960年代 **海洋底拡大説**(sea-floor spreading)

グローバル海底研究

海底地形年代・地磁気縞状異常(テープレコーダーモデル⁴⁶)

1970年代 **プレートテクトニクス**: 新しい地球観

- ・プレートの剛体運動
- ・プレート運動モデル: 間接的推定
(地磁気縞状異常による拡大速度・
トランスフォーム断層の方位・地震のスリップベクトル)

1980年代 **プレート運動の実測**

(VLBI・SLR・GPS: 宇宙測地技術による実測)

地震波トモグラフィー: 地球内部の3次元地震波速度構造
(seismic tomography)

↓
地球内部の3次元熱構造

↓
マントル対流のスナップショット

↓
新・新しい地球観

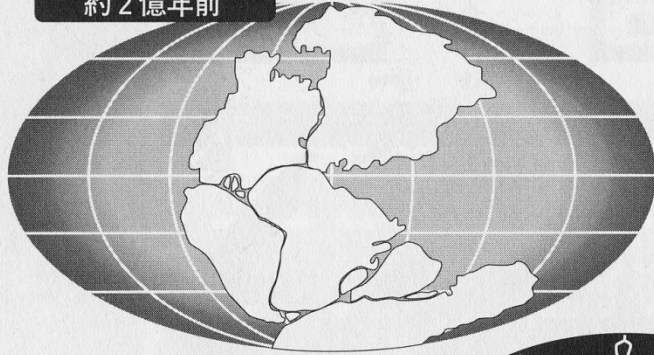
プレートテクトニクス → **ブルームテクトニクス**

移動する大陸

大西洋の両側の大陸の形の
パズル合わせが出发点

■ ウェーゲナーの大陸移動説

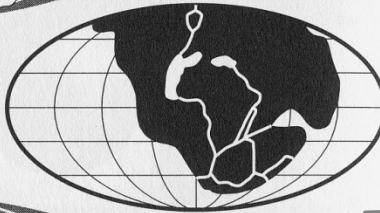
約 2 億年前



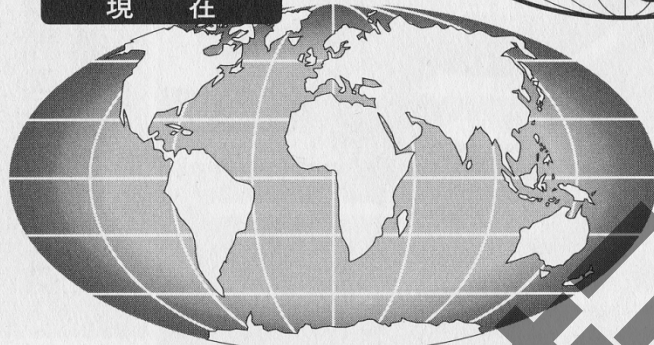
約 1 億8000万年前



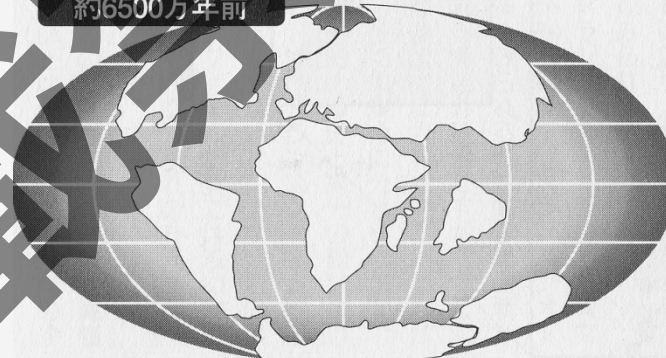
ウェーゲナーの考えた超大陸パンゲア→



現在



約6500万年前



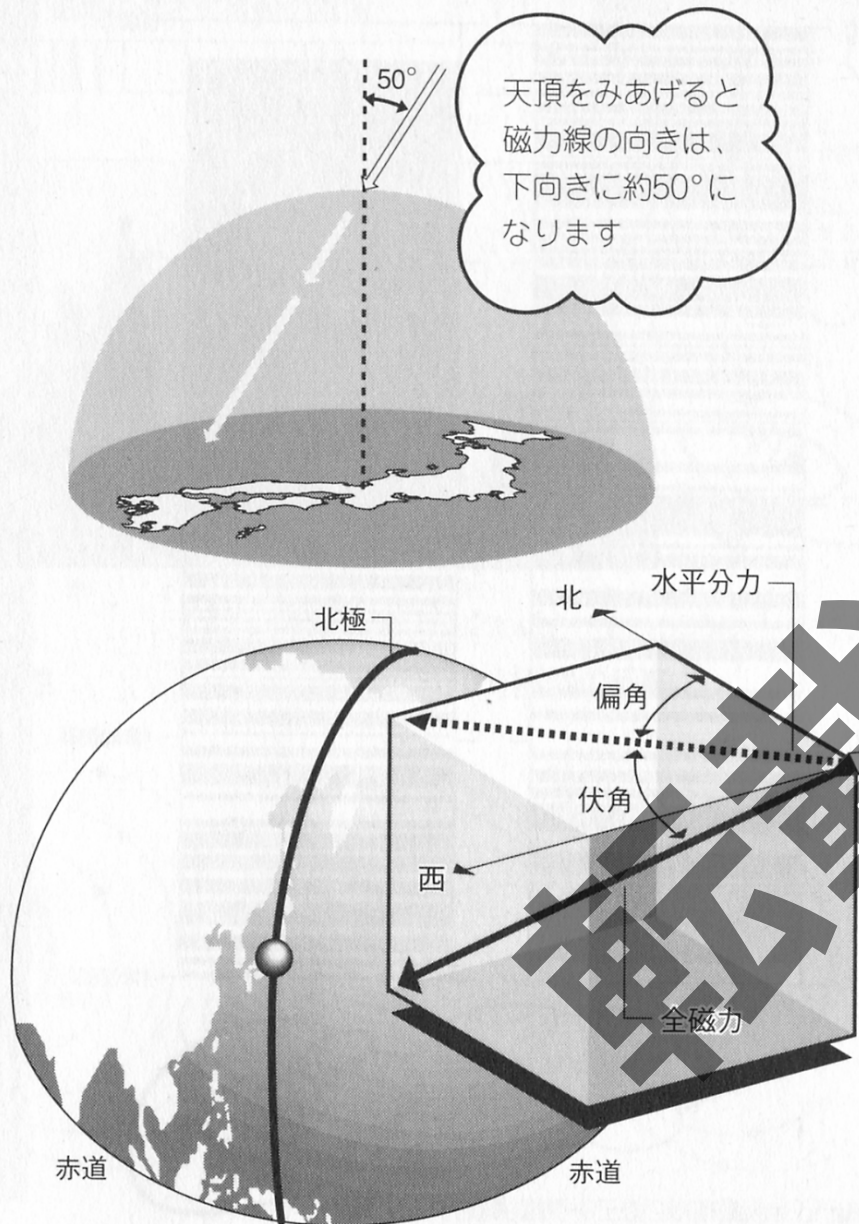
1910年頃 大陸移動説の提唱(ウェーゲナー)→1930年頃衰退

(大陸移動の原動力?)

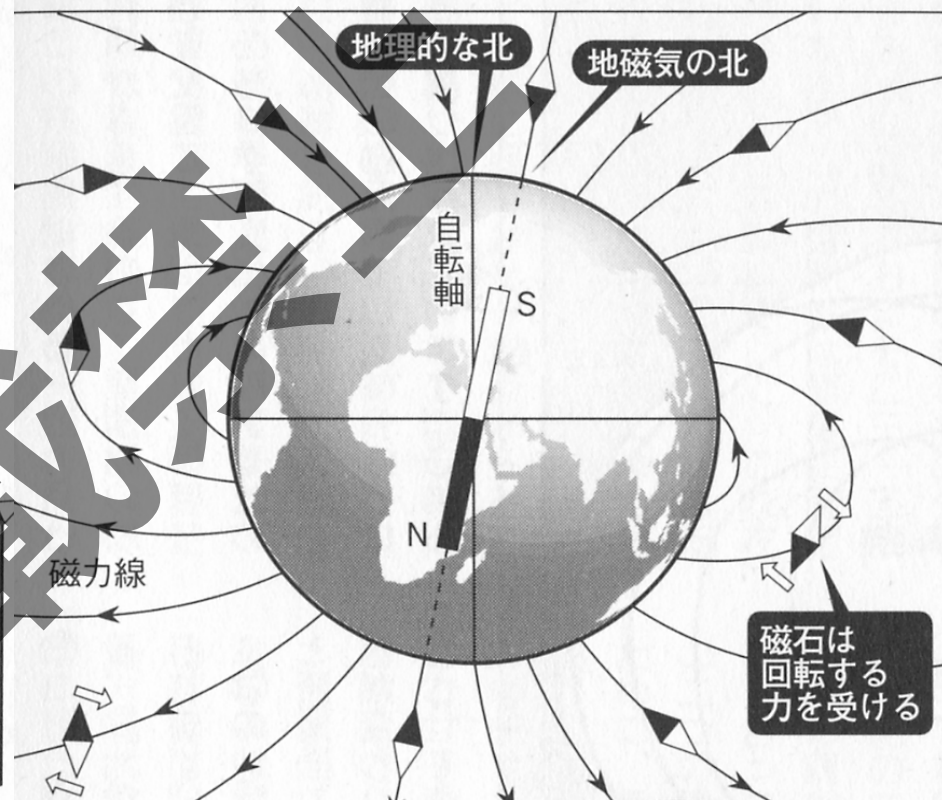
- ・大西洋両岸大陸の海岸線の相似
- ・地質構造、動植物の化石、大陸氷河の分布の相似



過去に大陸がつながっていた

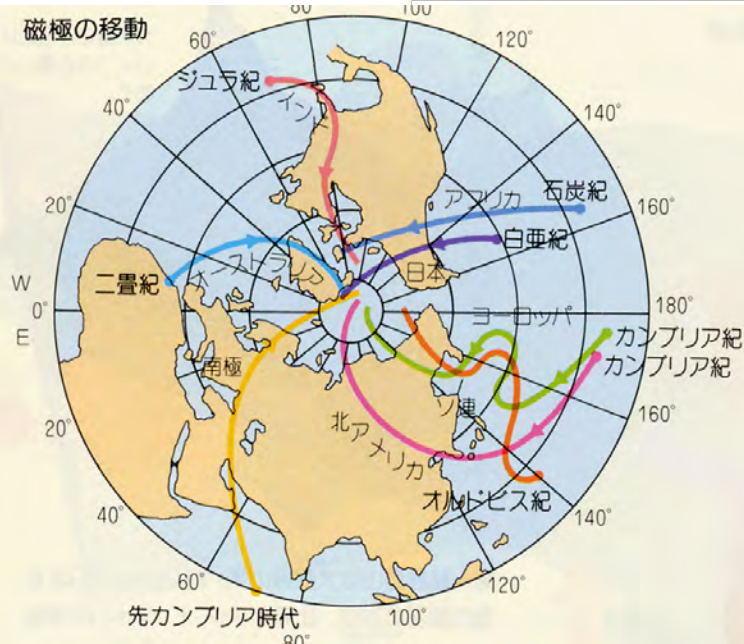


地球磁場は地球中心に置いた棒磁石でよく近似される 約11° のずれ

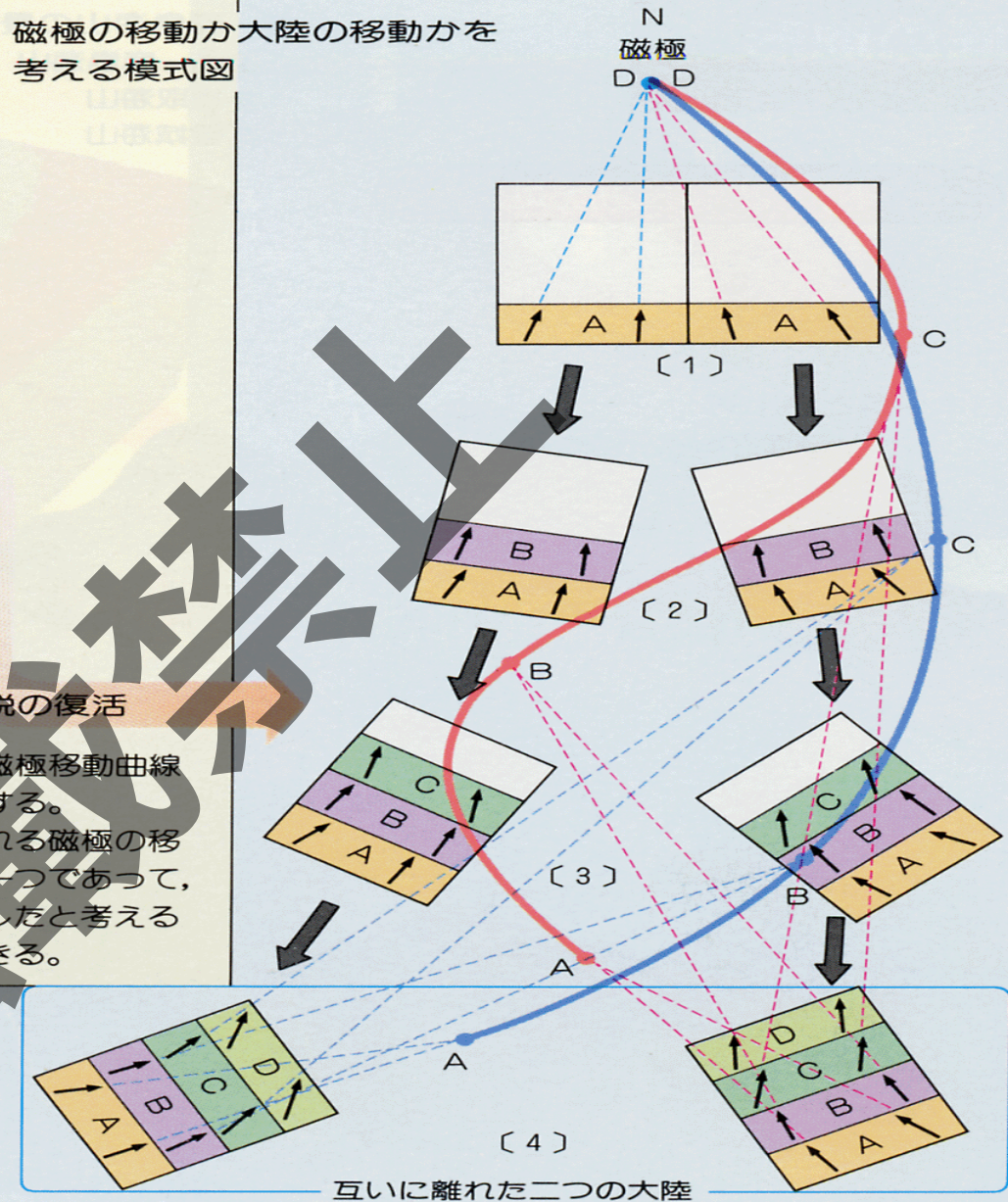


磁北・真北：日本付近では磁石は真北より(5-10°)西を向く。49

磁極の移動



磁極の移動か大陸の移動かを考える模式図



古地磁気学

磁極の移動

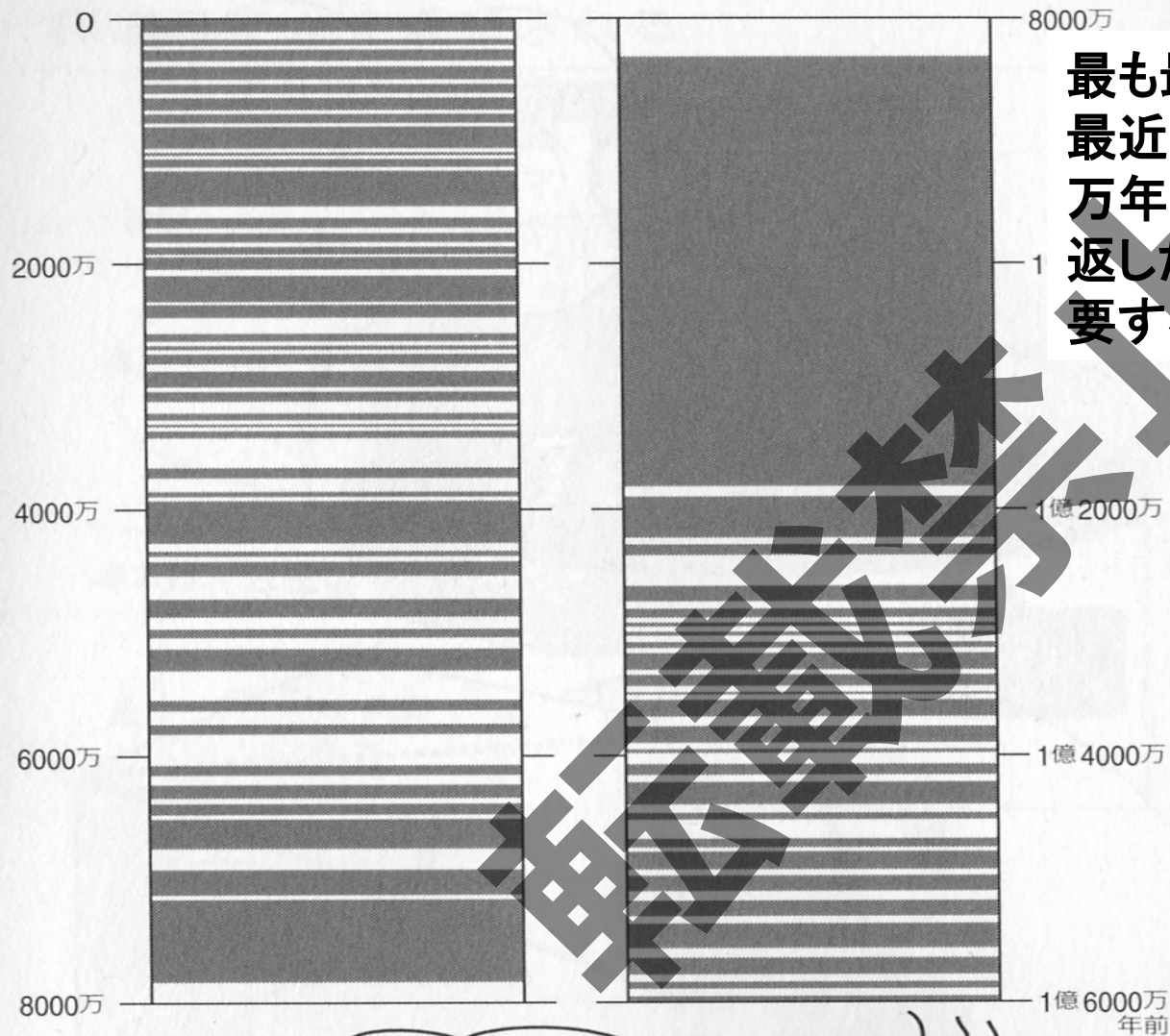


大陸移動

(continental drift)

〔4〕の位置にある二つの大陸ができたときから今まで動かなかったと仮定すると、磁極はA→B→C→Dと動いたことになる。しかし、N磁極が一つで固定し続けていたと仮定すると、大陸が二つに分裂しながら〔1〕→〔2〕→〔3〕→〔4〕と移動したと考えなければならない。矢印は各時代の地磁気の向きを示す。

地球磁場の逆転(magnetic reversal)史



最も最近は80万年前。
最近500万年には20
万年に1回逆転を繰り
返した。磁場の逆転に
要する時間は数千年。

逆転する磁場

過去に何度も
逆転を繰り返していた

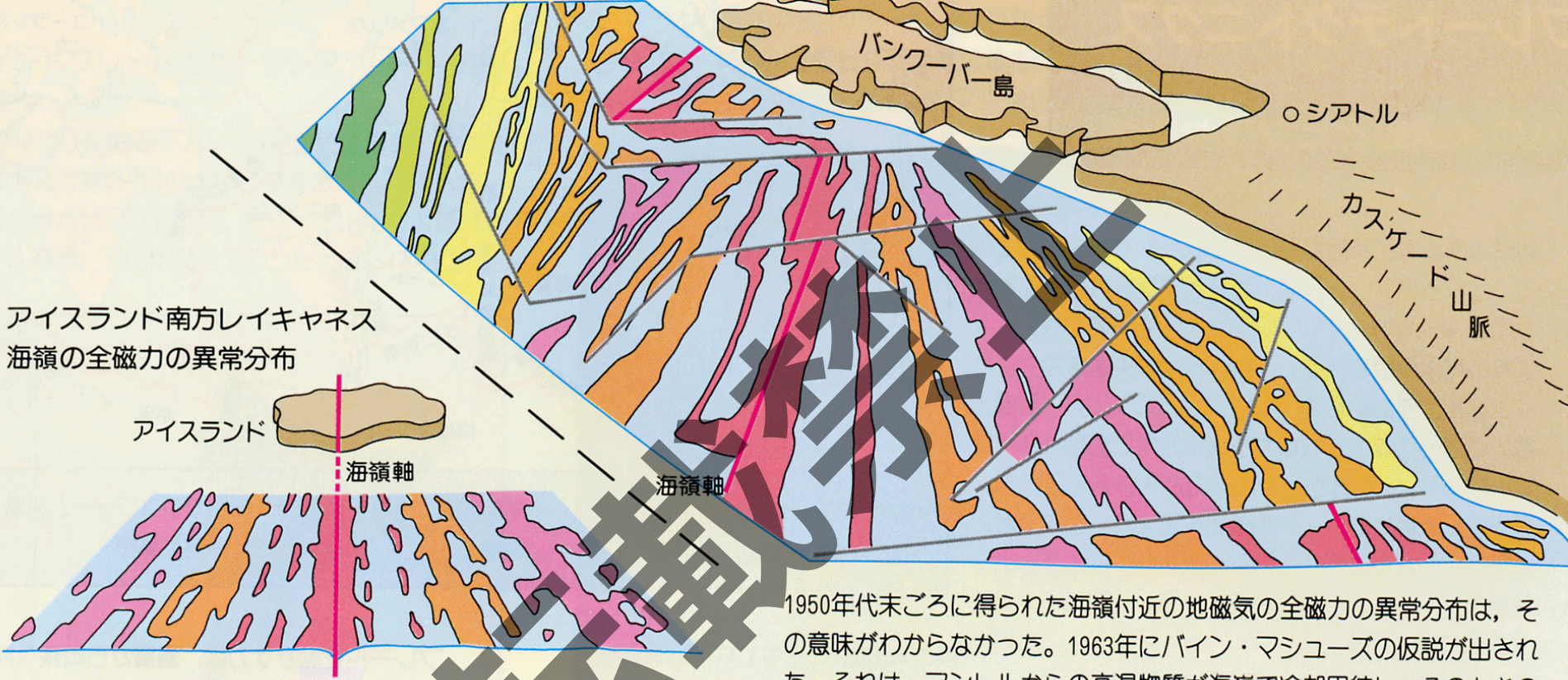
白い部分が現在と磁場が
逆転しているところだよ

世界の海底地形



地磁気縞状異常

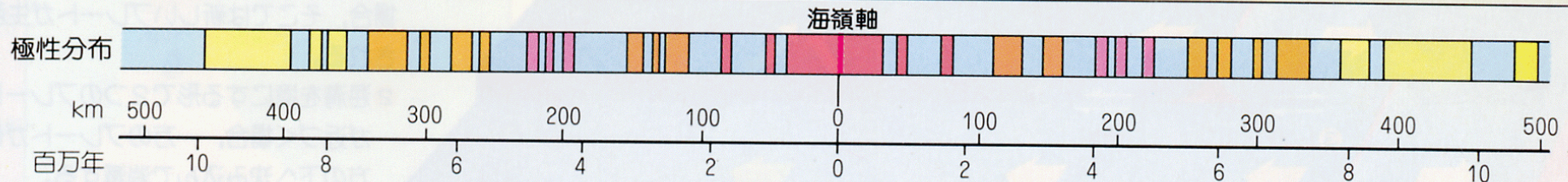
東太平洋の全磁力の異常分布



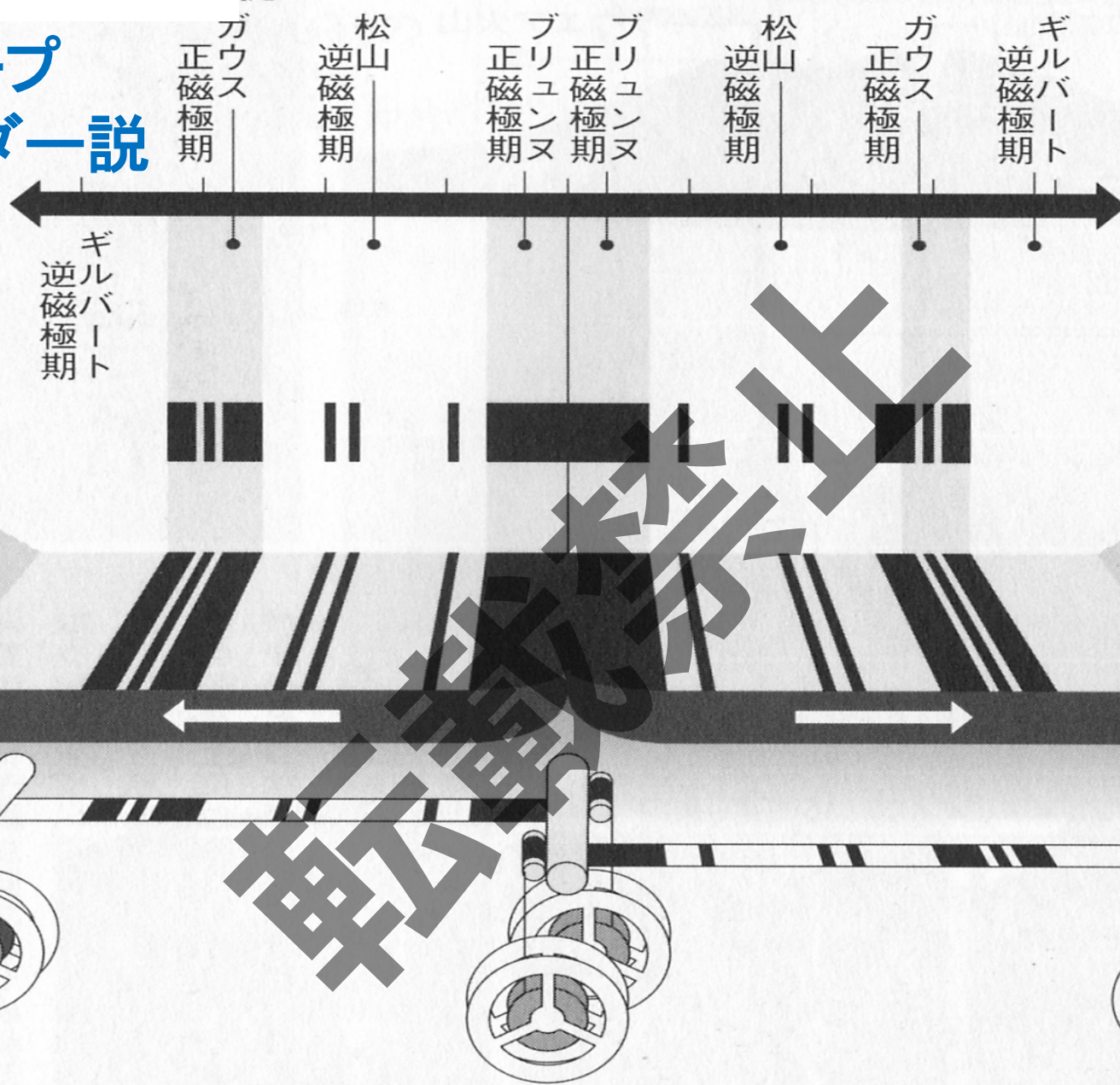
アイスランド南方レイキャネス
海嶺の全磁力の異常分布

地磁気縞模様の海嶺
軸に対する対称性

1950年代末ごろに得られた海嶺付近の地磁気的全磁力の異常分布は、その意味がわからなかった。1963年にバイン・マッシュューズの仮説が出された。それは、マントルからの高温物質が海嶺で冷却固結し、そのときの地球磁場にしたがって磁場を獲得する。磁化した地殻はしだいに海嶺から離れていく。そこに刻まれた磁気縞模様は磁極の反転を示すと考えられた。このことは1967年に定量的にも検証され、さらに岩石の年代の測定結果とあわせ、海底拡大と地磁気の反転が確立した。



テープ レコーダー説

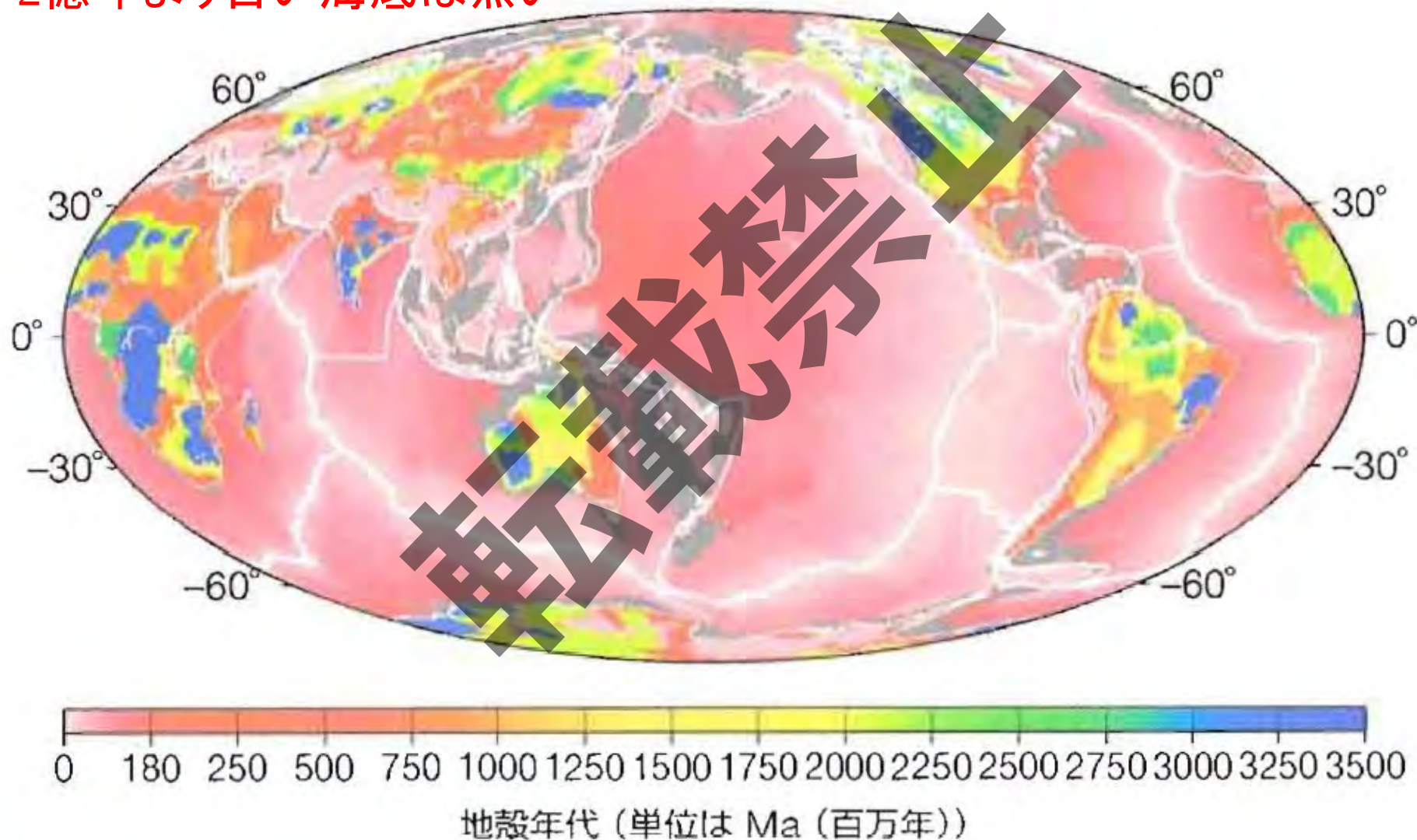


磁場の時間的変化を忠実に記録する海底拡大のからくりは、
一対のテープレコーダーになぞらえることができる。

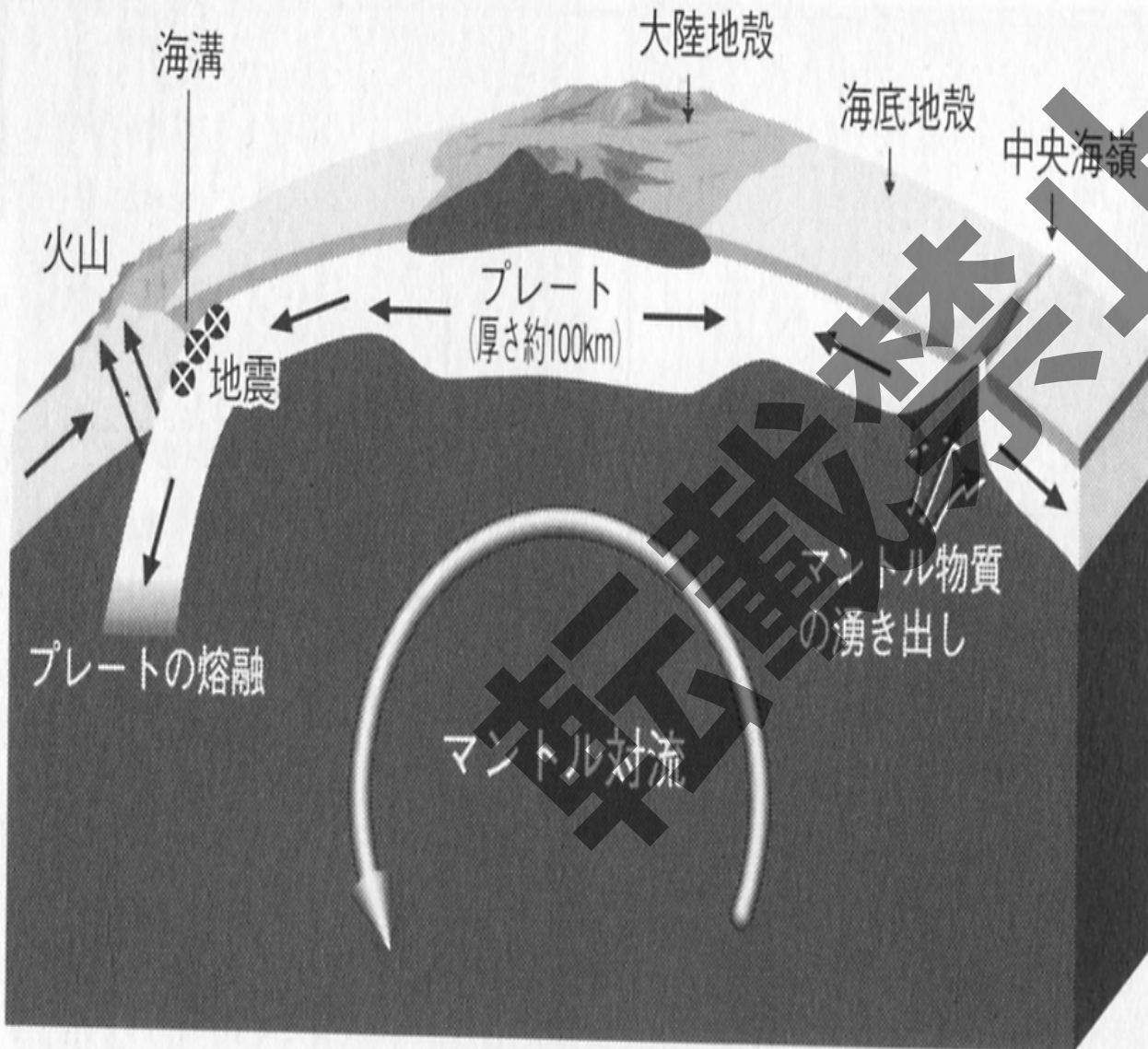
地殻年代図 是永 (2014)

図 1.5 地殻の形成年代マップ。海洋地殻の年代は Müller et al. [2008]、大陸地殻の年代は Artemieva [2006] に基づく。灰色の部分にはデータが存在しない地域を示す。

2億年より古い海底は無い



プレートテクトニクスとは？



プレートテクトニクスとは、地球表面を覆う厚さ100km程度の剛体をいくつかのプレートに分割し、それらの相互作用の結果として、さまざまな地学現象を説明しようとする考えである。地球の大陸形成については、一般に次のようにいわれる。初期の地球を覆う薄い地殻が地下に潜り込み、再熔融してカコウ岩が作られる。それらのカコウ岩が集まって初期の大陸が作られた。

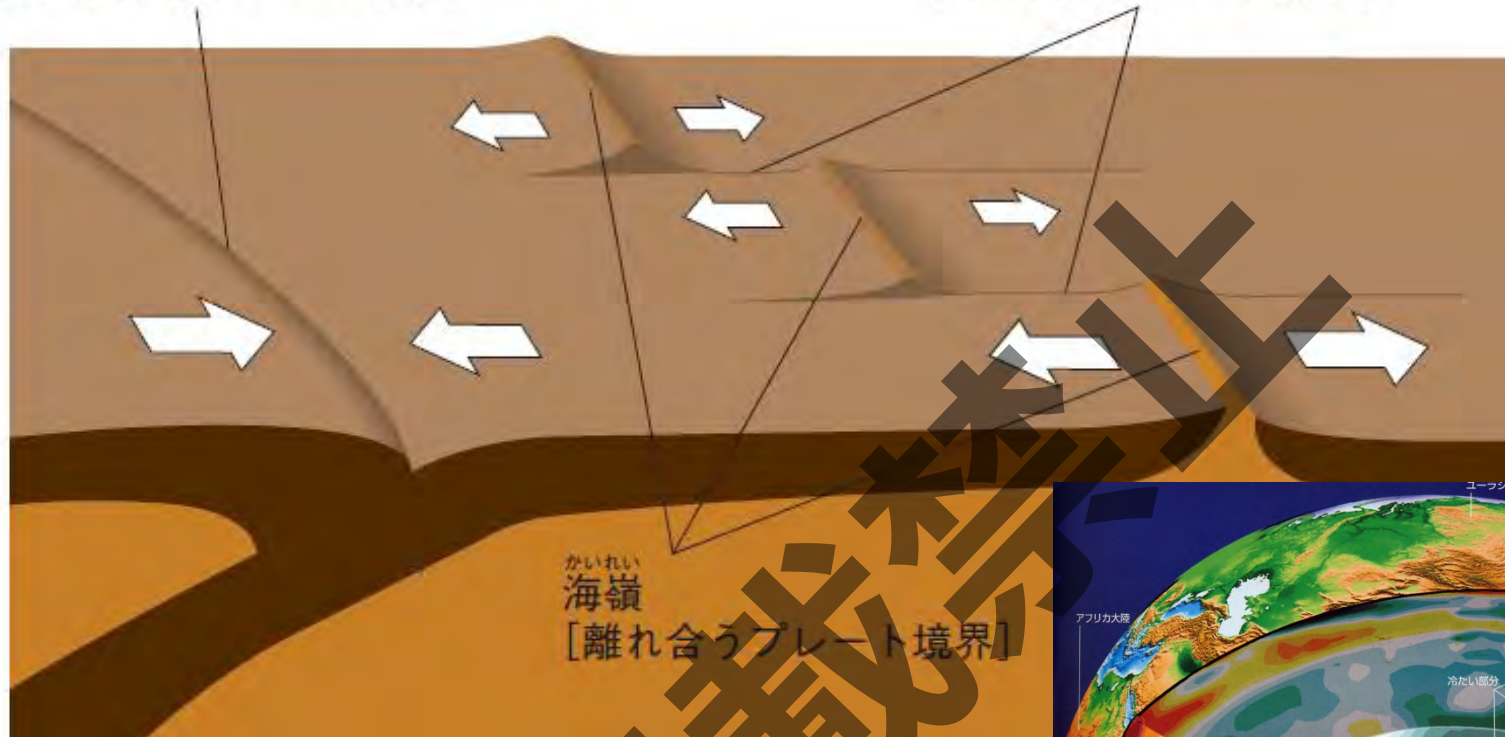
プレート境界の種類

海溝

[近づき合うプレート境界]

トランスフォーム断層

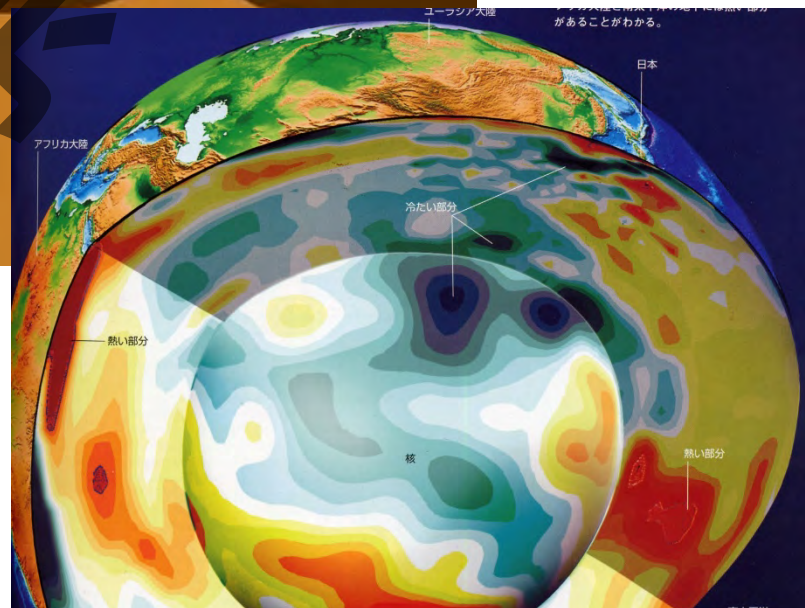
[すれ違うプレート境界]



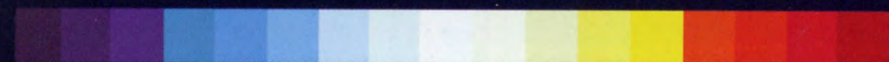
ニュートン
地球のしくみと
進化の歴史

プレートの厚さ～80km

プレート境界で地震が発生
収束 発散 すれ違う



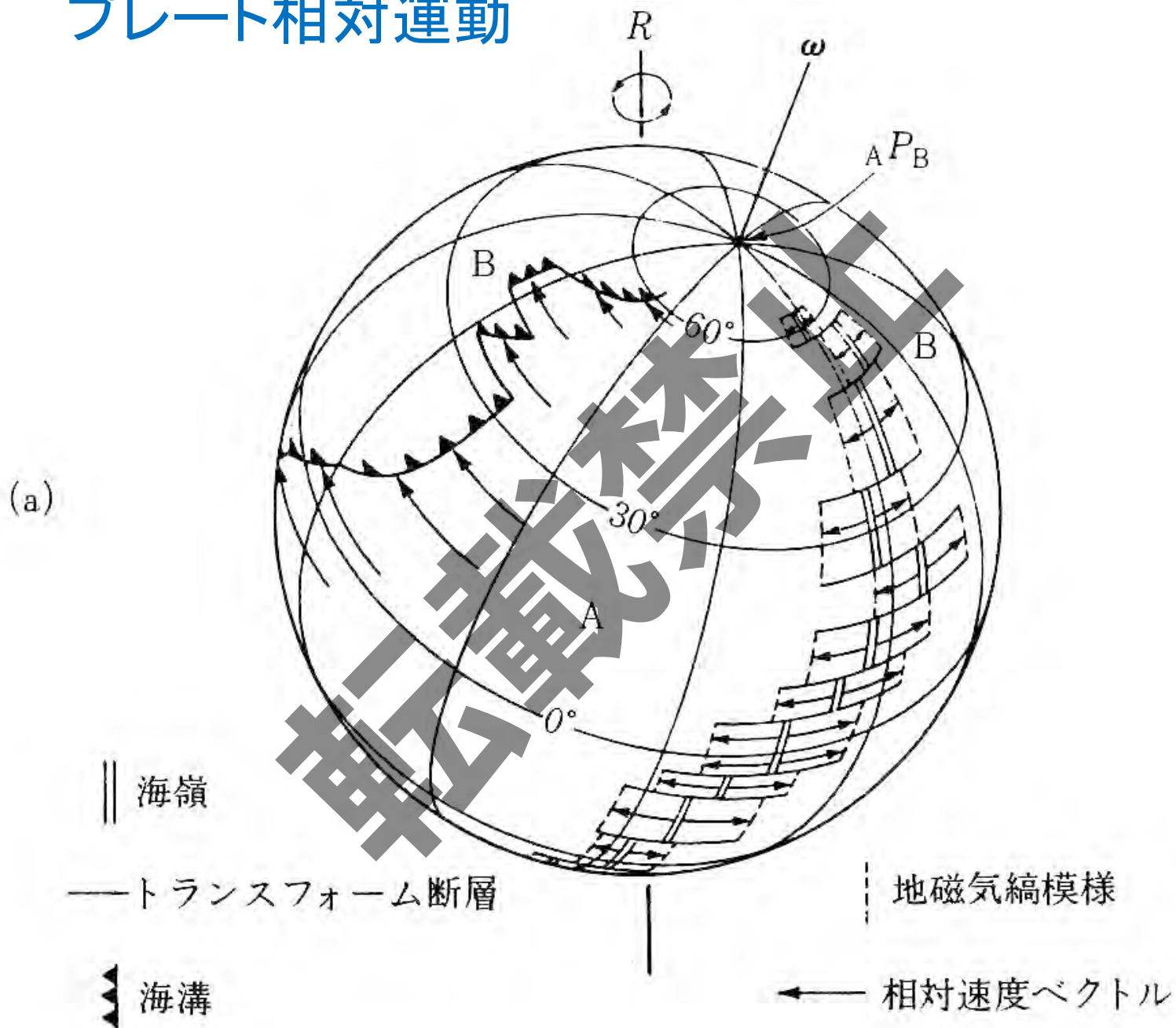
地震波が伝わる速度
(マントルの温度)



速い(冷たい)

遅い(熱い)

プレート相対運動



間接的に求められたプレート相対運動モデル

- データ ①トランスフォーム断層の走行
②地震のスリップベクトル
③拡大速度(地磁気縞状異常)

NUVEL-1(DeMets et al., 1990)

過去数百万年の平均的運動

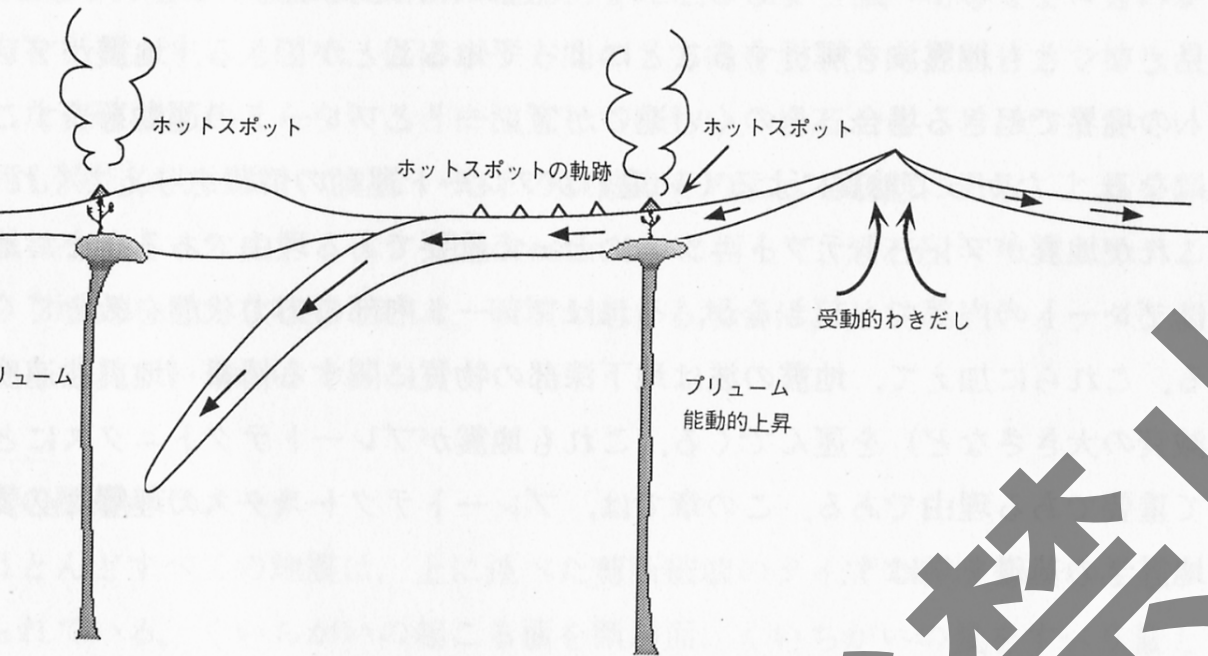
間接的に求められたプレート絶対運動モデル

相対運動データ

+

ホットスポット基準系

平均リソスフィア(no-net-rotation)系



ホットスポット

ホットスポットとプルームの概念

地球深部(下部マントル)から上昇してきた円柱状プルームは、地表でホットスポットとなる。

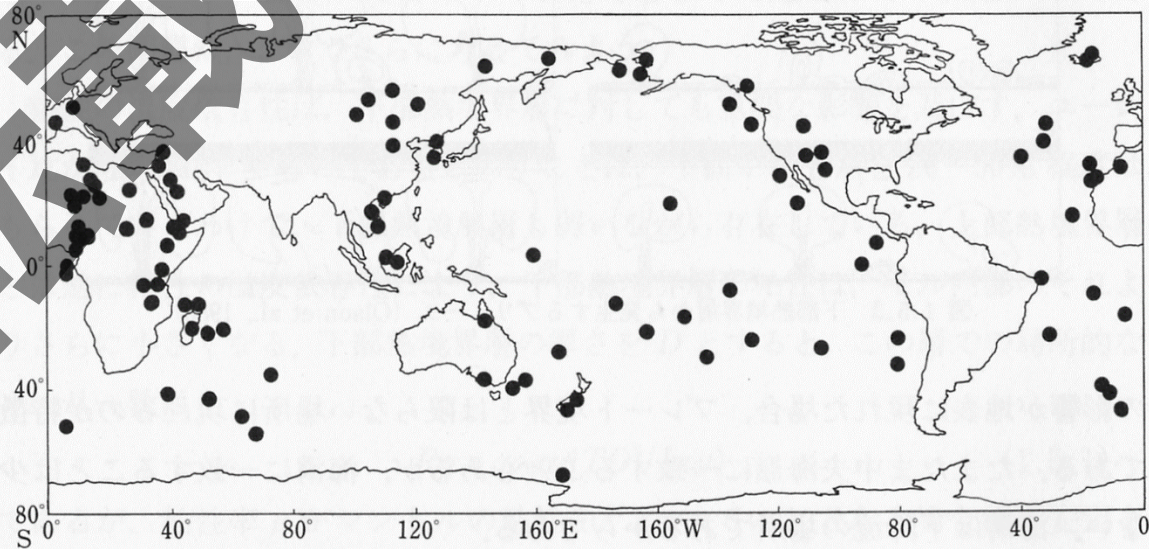
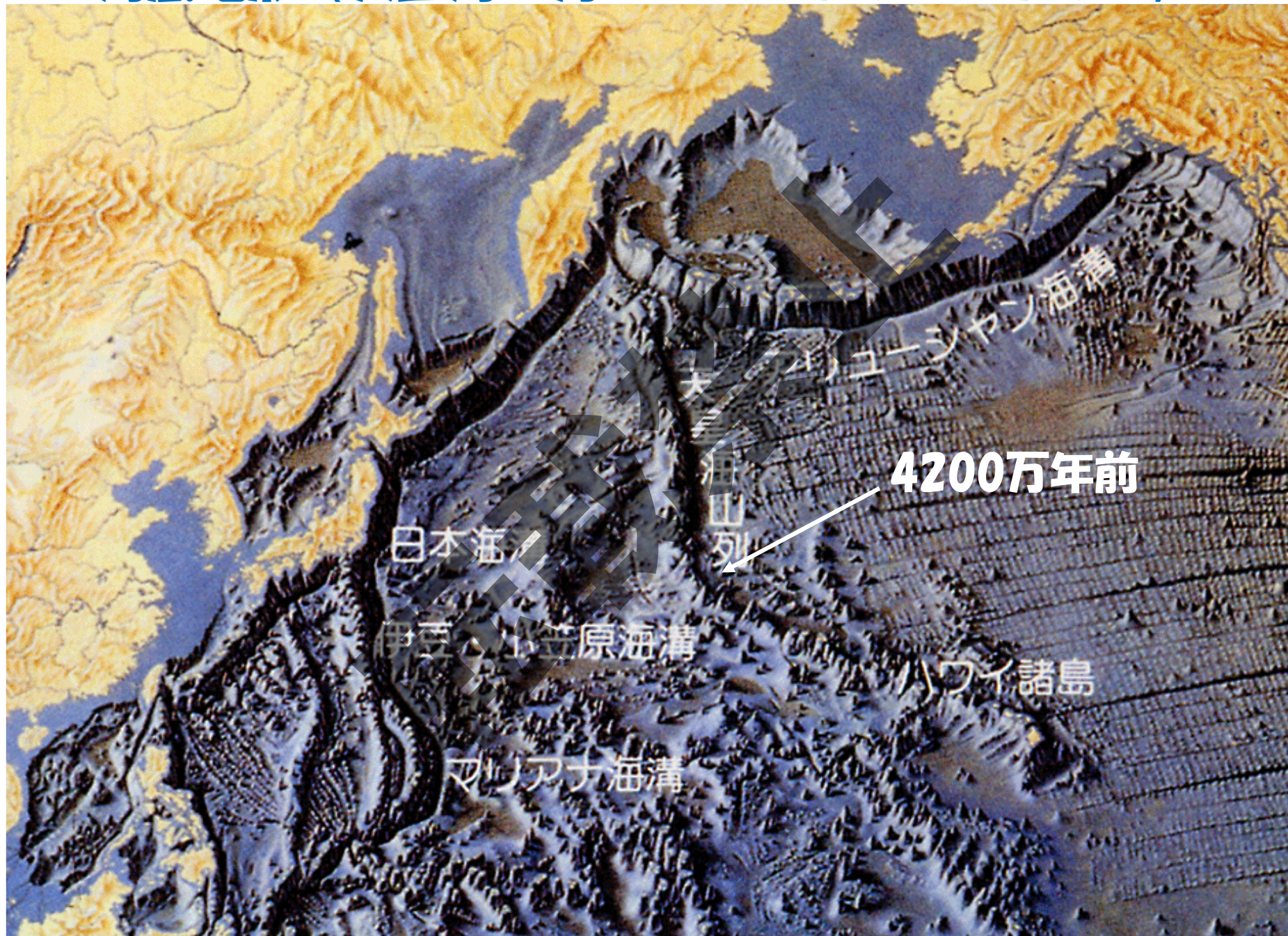


図 ホットスポットの分布

海底地形（天皇海山列：ハワイホットスポット）



プレート運動(Plate motion)

↔ : 50 mm/年

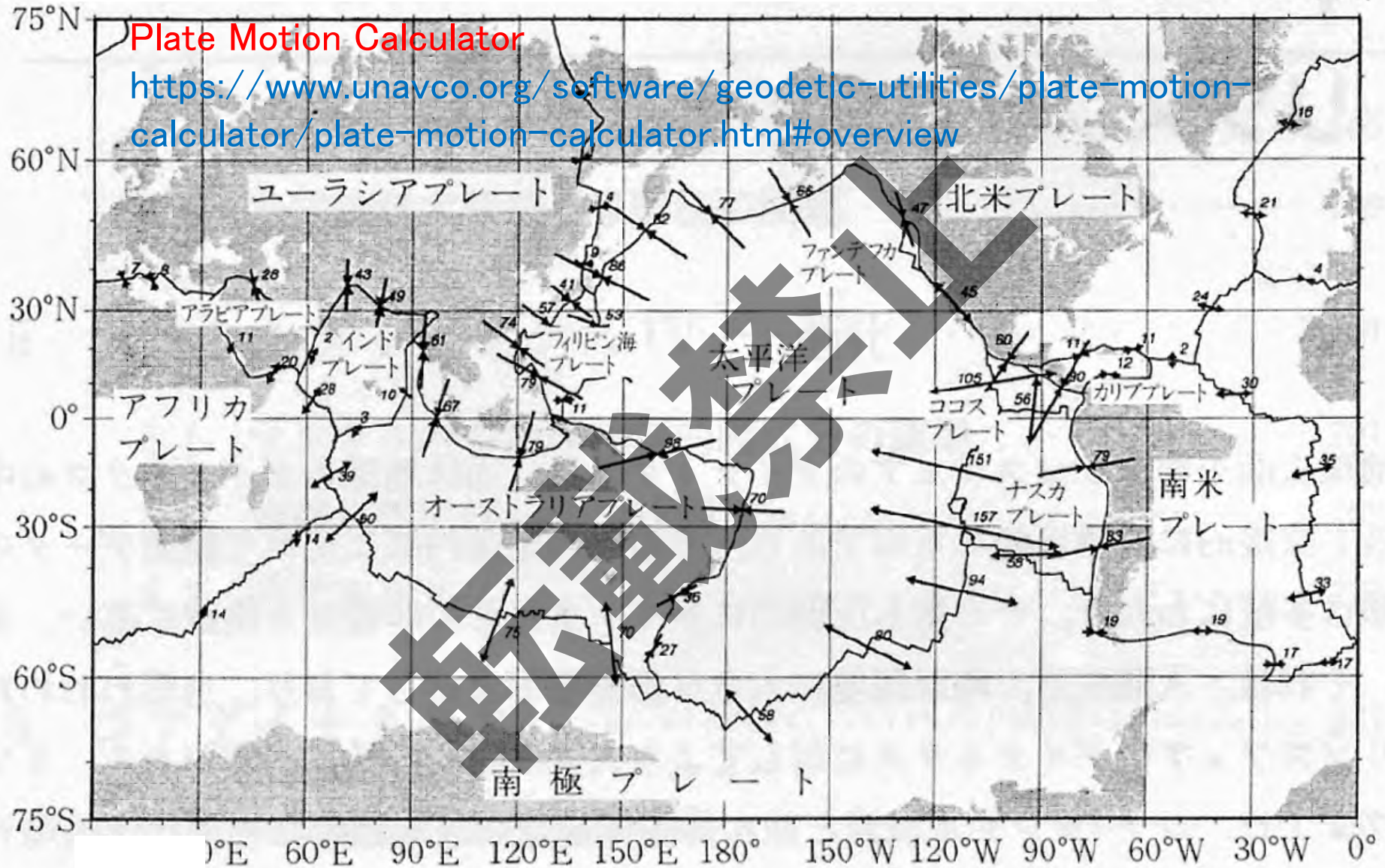


図 1.1 プレーートの分布と相対運動. プレート運動モデル NUVEL-1 に基づく, 数値はその地点の相対運動を示し, 単位は mm/年.

宇宙技術によるプレート運動の直接測定

1000km離れた2点間の距離を1 cm～mm程度の精度で測ることができる。

①VLBI (Very Long Baseline Interferometer
: 超長基線干渉計)

準星からの電波の位相差を電波望遠鏡で精密に測定

②SLR (Satellite Laser Ranging: 衛星レーザー測距)

鏡からなる衛星に地上からレーザーを発射し、返ってくるまでの時間差を測る

③GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム)

米国が開発したシステムで人工衛星からの電波を受信する⇒最近では他国の衛星も含めてGNSS

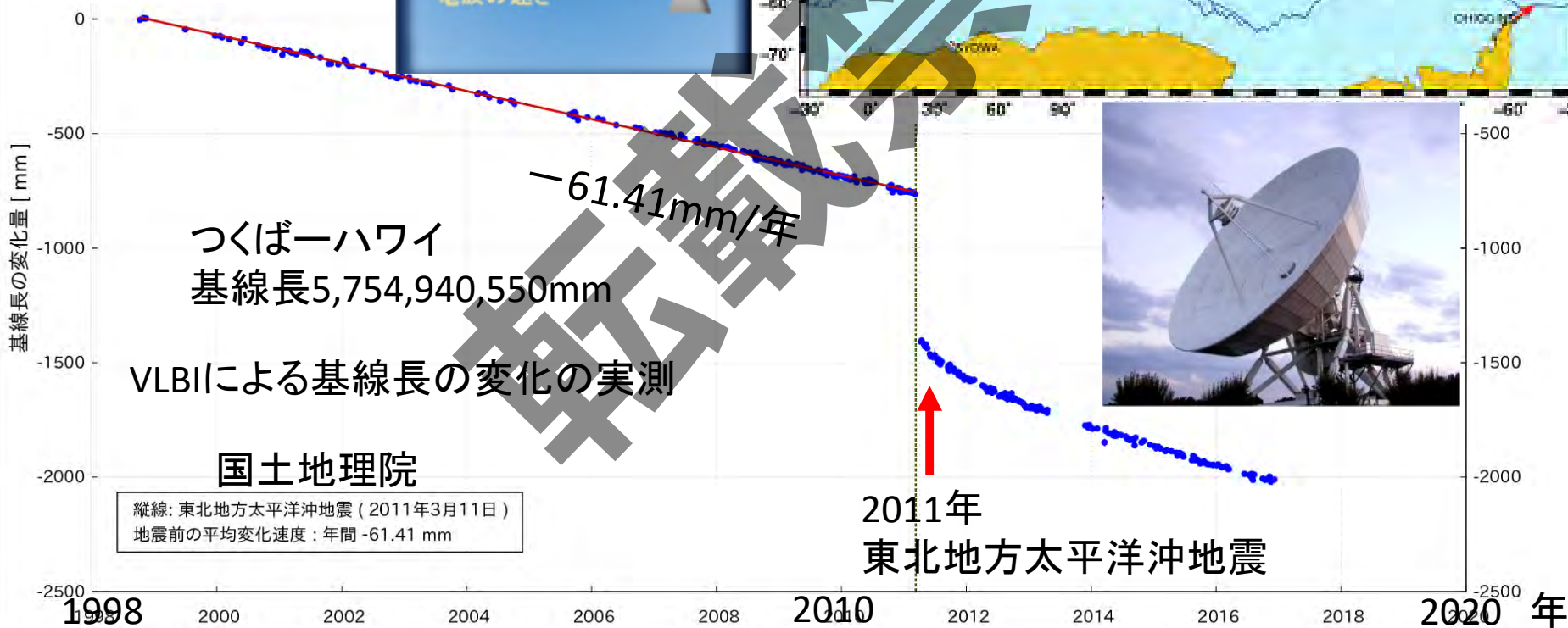
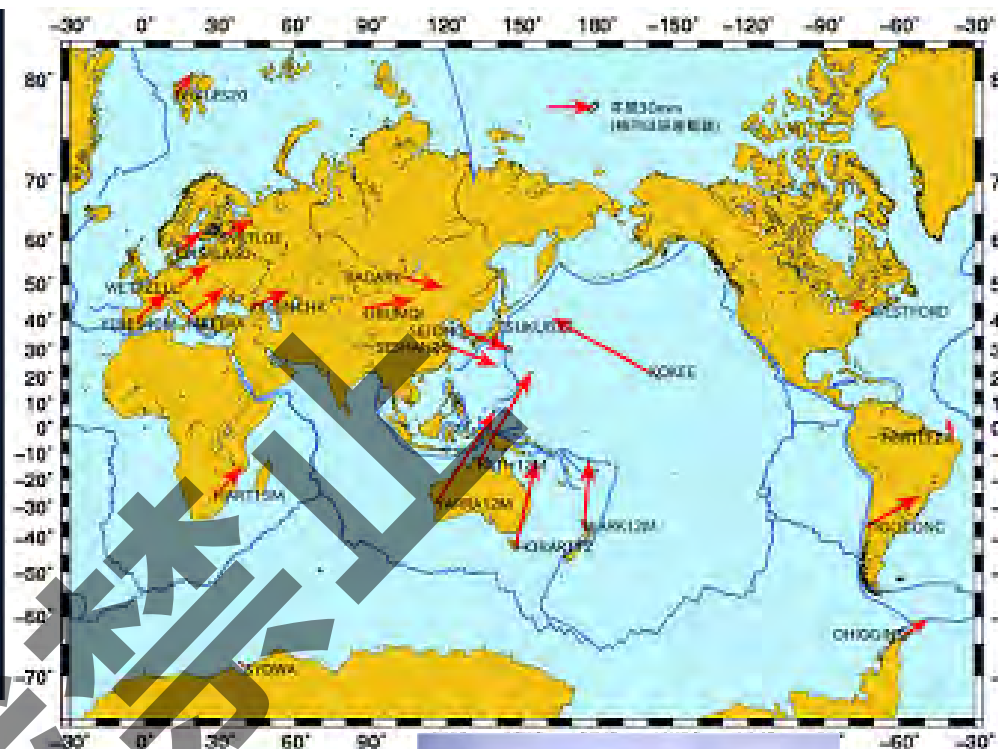
(Global Navigation Satellite System)と呼ぶ

大地は動く (プレート運動の実測)

VLBI

(Very Long Baseline Interferometry)

超長基線干渉法



Tsukuba-Kokee
基線長: 5,754,940,550mm

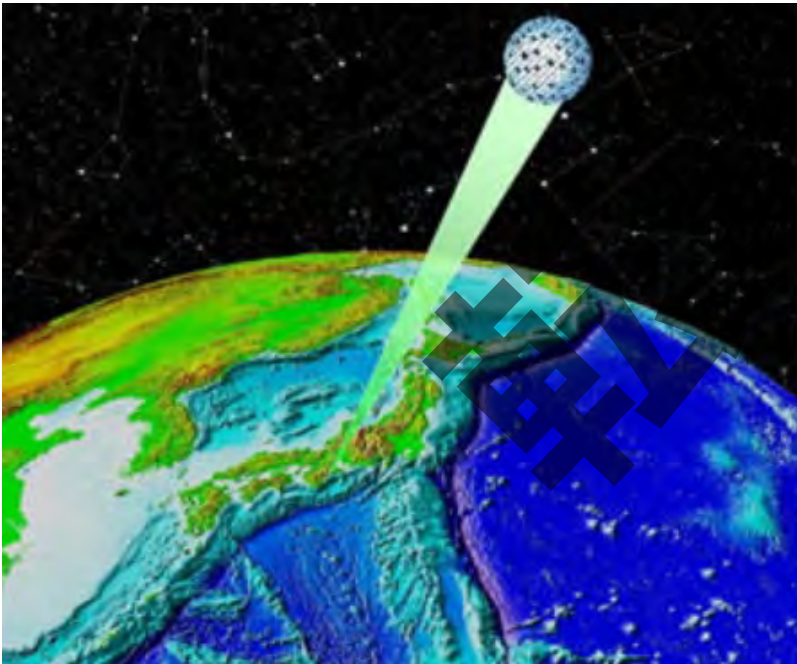
<http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/vlbi-data.html>

83,100 mm

大地は動く (プレート運動の実測)

SLR (Satellite Lazer Ranging) (人工衛星レーザー測距)

人工衛星(高度500km~2万km)へレーザーを発射し、衛星で反射された光を受け、その往復に要した時間が計って、人工衛星までの距離を測定。(日本:下里 海上保安庁)



海上保安庁 下里観測所 hPa



SLR衛星「あじさい」は、今も運用が続いている(30年間)

GNSS(人工衛星を利用した測位システム)

GNSSとは： GNSS(Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム)は、GPS、GLONASS、Galileo、準天頂衛星(QZSS)等の衛星測位システムの総称。

GPSとは： GPS(Global Positioning System)は、アメリカ合衆国によって、航空機・船舶等の航法支援用として開発されたシステム。

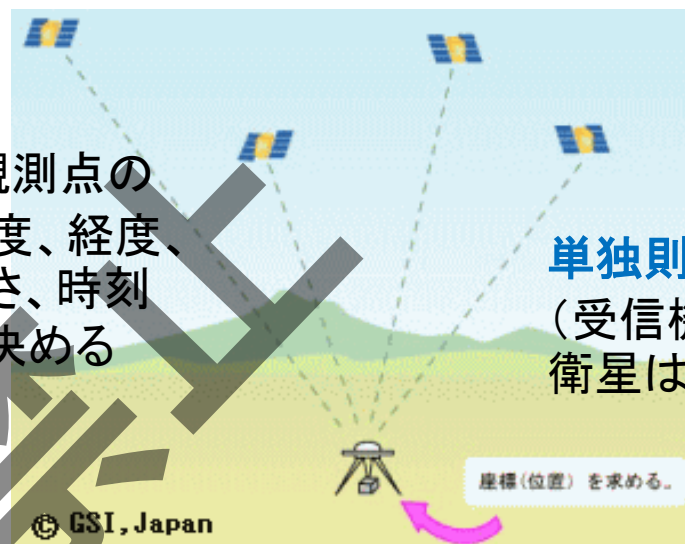
航空機・船舶等では、上空約2万kmを周回する4個以上のGPS衛星(6軌道面に30個配置)からの距離を同時に知ることにより、自分の位置等(**単独測位**)を決定します。GPS衛星からの距離は、GPS衛星から発信された電波が受信機に到達するまでに要した時間から求めます。

相対測位： 2点の観測値の差をとることにより、観測値に含まれる衛星の位置誤差や対流圏・電離層遅延量が消去されます。

1観測点の緯度、経度、高さ、時刻を決める

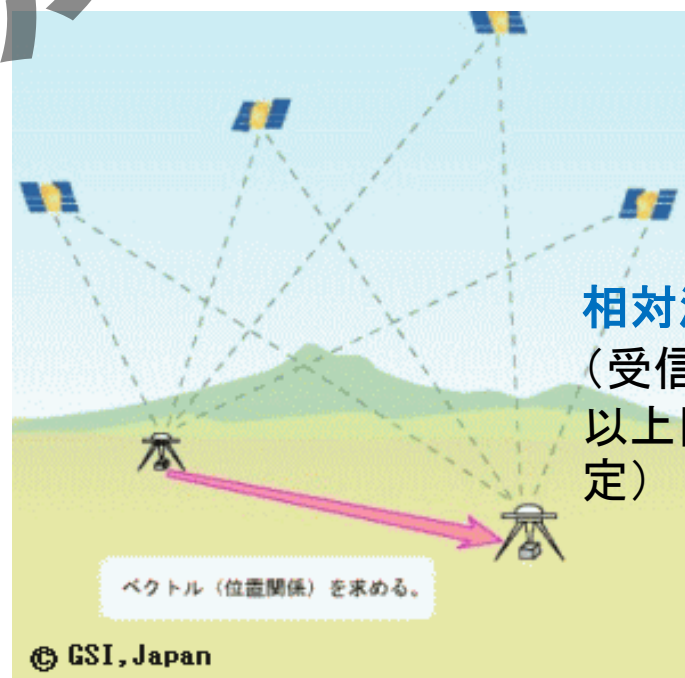
単独測位

(受信機は1台、衛星は4個以上)

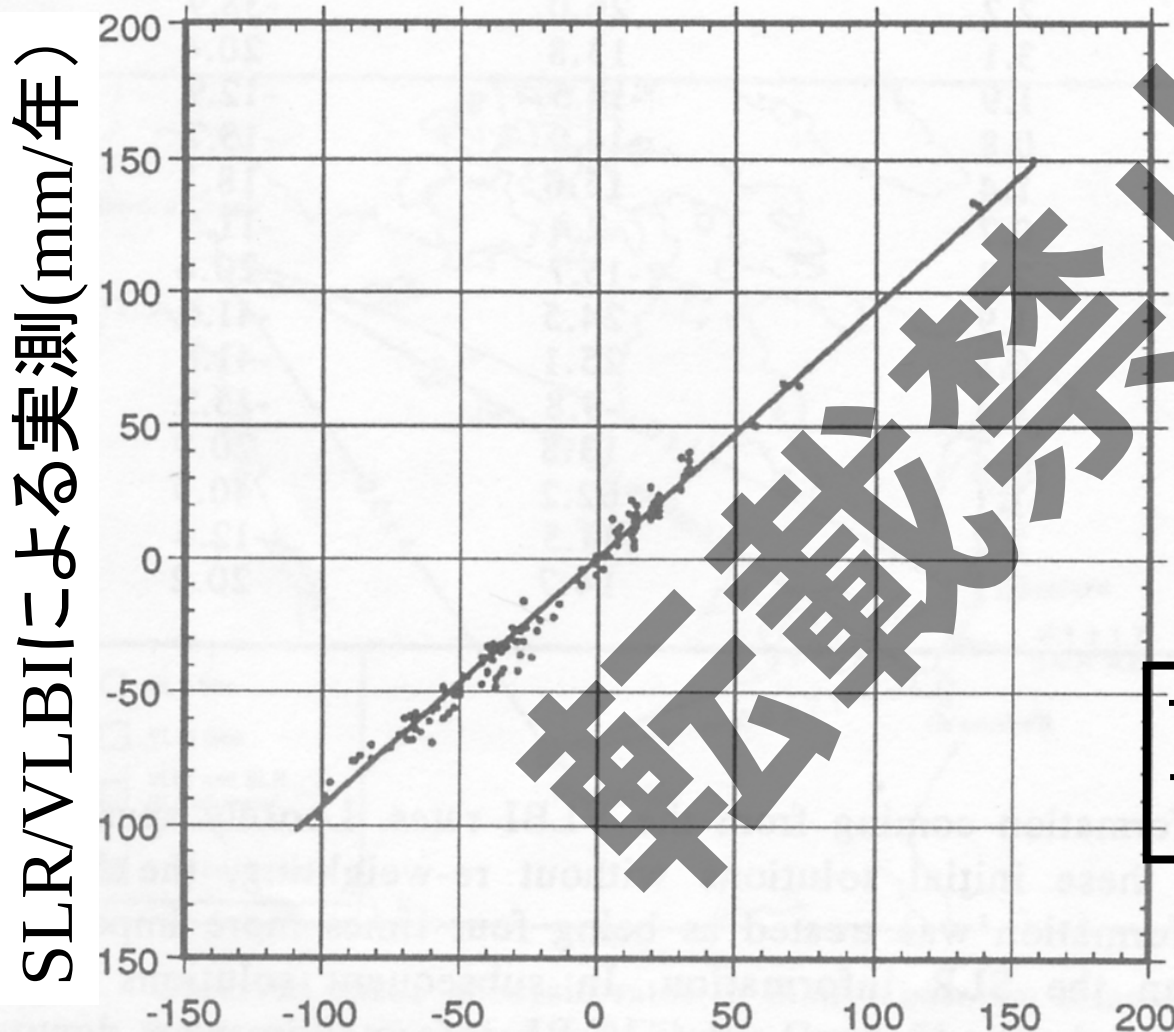


相対測位

(受信機は2台以上同時測定)



宇宙技術による実測結果①



安定したプレート内部の観測点で測った現在のプレート運動速度は、間接的に求めた運動モデルと良く合っていた



プレート運動は過去数百万年はほとんど一定

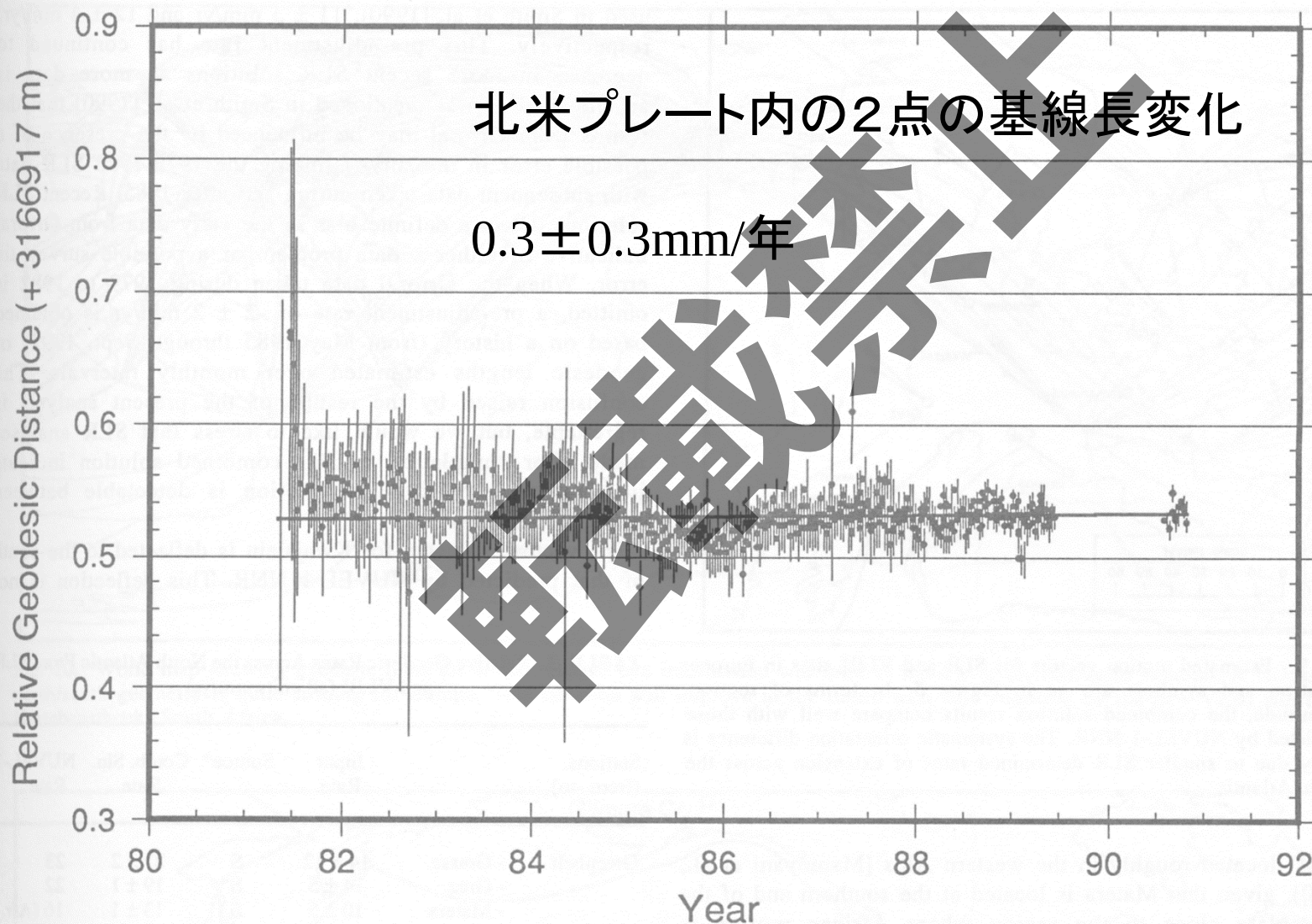
NUVEL-1からの予測値(mm/年)

宇宙技術による実測②

同じプレート内の2点の動きは無い



プレートの内部変形小→剛体性

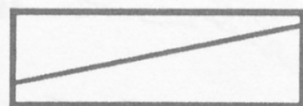


宇宙技術による実測③

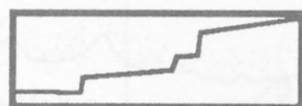
プレート境界では大きな変形が見られる

プレート境界における変位の時間的变化

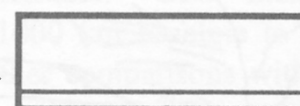
プレートAに対する
相対変位



連続的変位



エピソード的な変位



Time

Long-term (M.Y.) steady (?) plate motion

剛体的なプレート内部

プレートB

プレート境界
変形帯

SEISMIC
ASEISMIC

Minor episodic seismic slip and creep

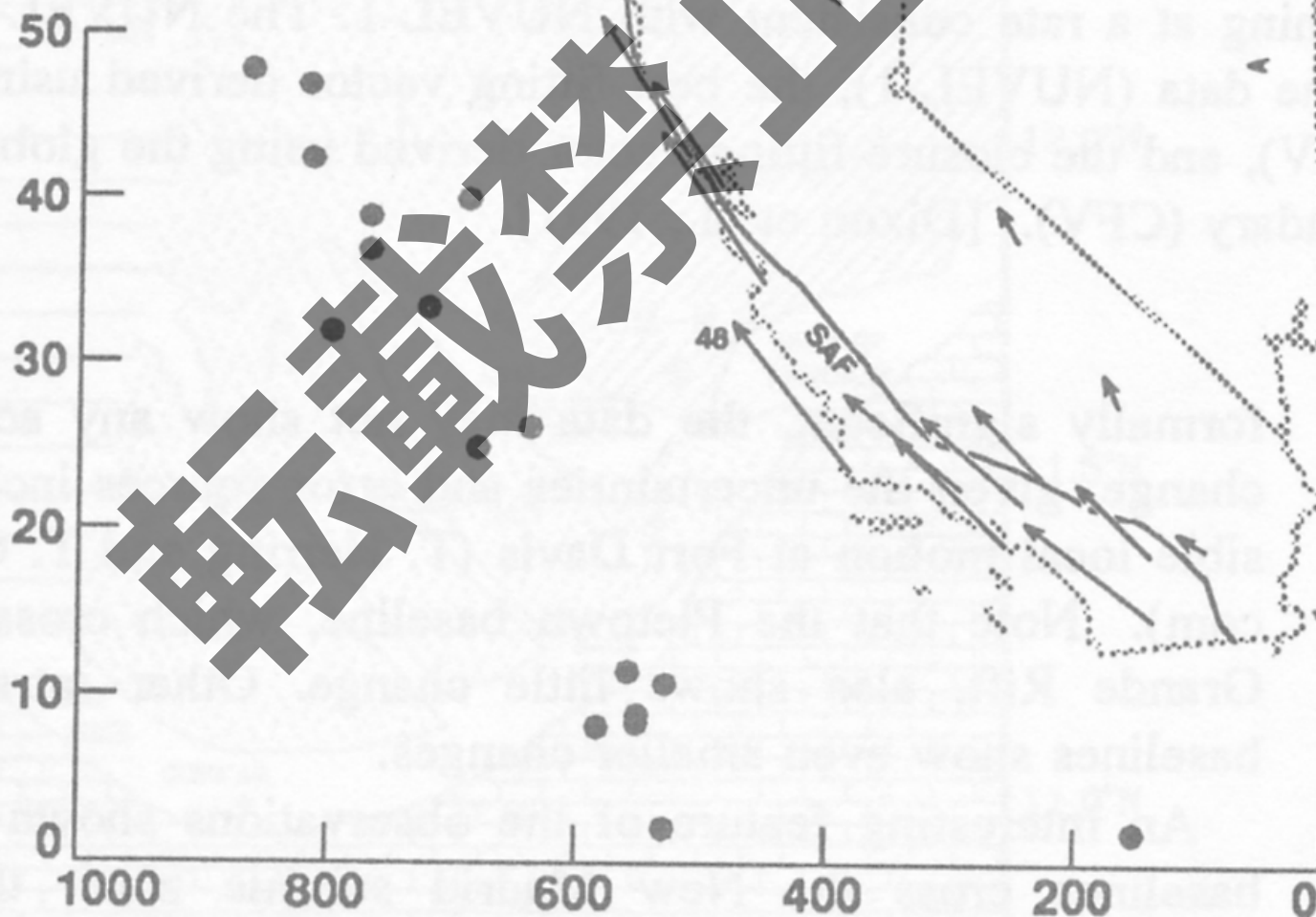
剛体的なプレート内部

プレートA

カリフォルニアにおける実測

北米プレートに対するVLBI
観測点での水平変位速度

太平洋—北米プレートの相対運動
に平行な変位速度 (mm/年)





影の部分：大変形をしているゾーン

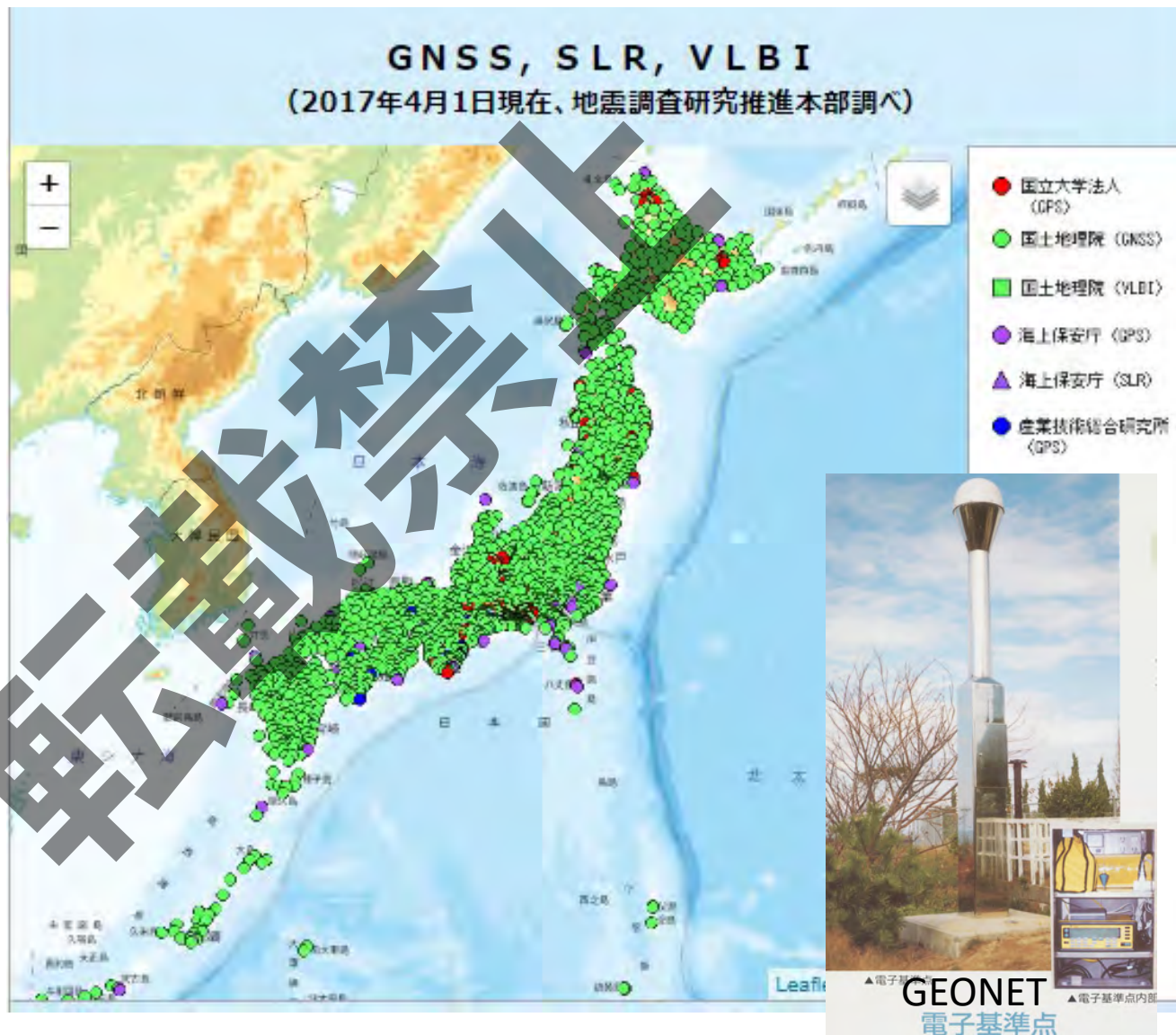
地殻変動観測

GNSS(人工衛星を利用した測位システム)による地殻変動観測

GNSS の連続観測施設は全国1,400ヶ所以上が整備されているが、地殻に蓄積されるひずみを全国的に偏りなく観測するために、20～25km 間隔を目安として観測施設の整備が進められている。

SLR(衛星レーザー測距) 鏡を搭載した衛星へ向けレーザを発射し反射時間を図り、観測点の位置決定(海上保安庁)

VLBI(超長基線電波干渉法) 天体からの電波を利用してアンテナの位置を測る技術(国土地理院)

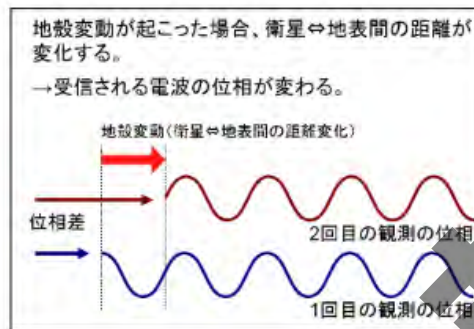


合成開口レーダーによる面的な地殻変動観測

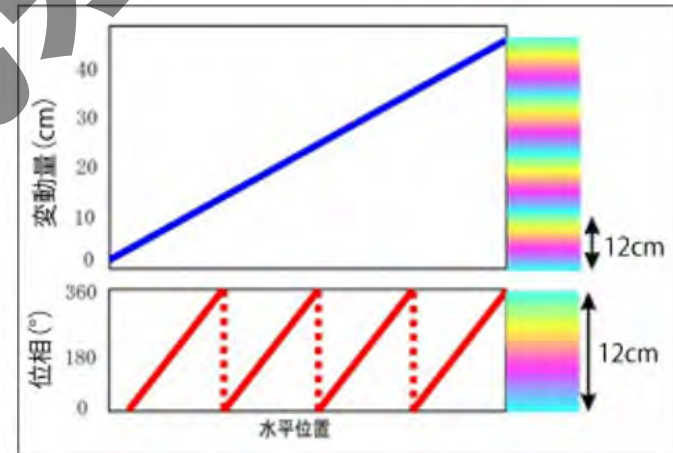
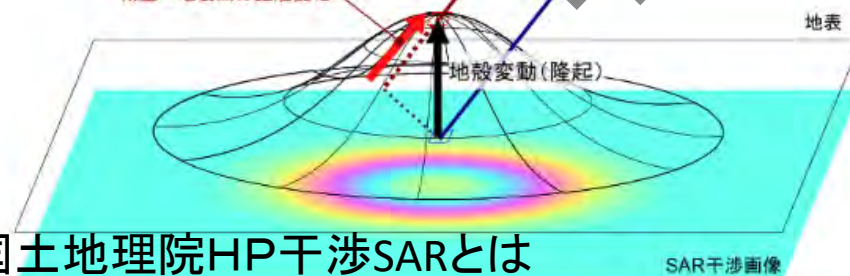
合成開口レーダーとは？

人工衛星や航空機にレーダーを搭載して飛行し、移動中に地表へのマイクロ波の照射と地表からの反射波の受信を行ってその情報を合成することで、大型アンテナと同等の高い分解能を実現したレーダーシステム。一定の時間間隔をおいた2種類の観測データを得ることによって、その期間内の地表面の変動を、広範囲かつ高分解能で捉えることができる。

水準測量やGNSSなど、これまでの地殻変動観測では、ある特定の線上または点の変位しか把握することができなかったが、合成開口レーダーを用いた観測では、面的に変位を把握することに特徴がある。一方で、人工衛星等の飛行周期でしか観測ができないため、時間的に連続な観測はできない。(地震本部 用語集より)



SAR干渉解析により得られる地殻変動成分
衛星⇄地表間の距離変化



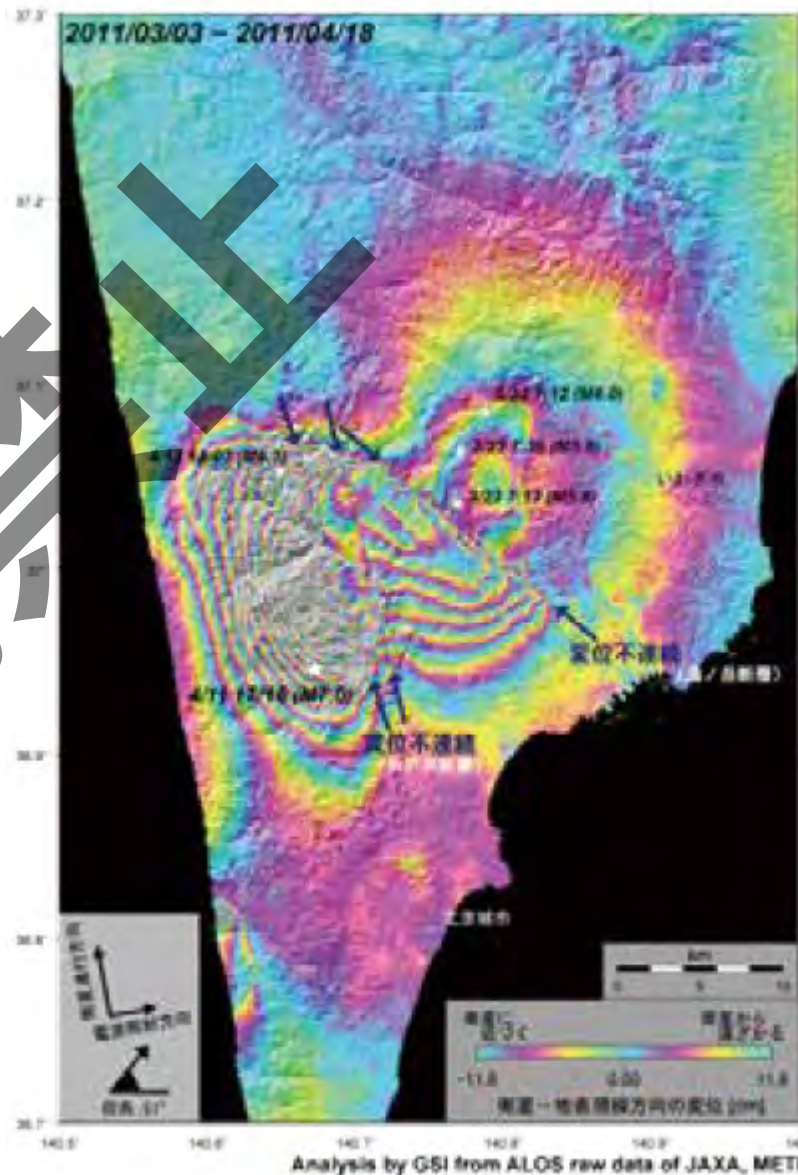
レーダーの波長は約24cmなので、360度の位相差は約12cmの変動を表す(往復測定を片道に直すために2で割る)

合成開口レーダによる面的な地殻変動観測

リモートセンシング技術の一つである、合成開口レーダ(SAR)による地殻変動の検出は、これまで、地球資源衛星のJERS-1(ふよう1号)、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)等のデータを利用した、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震のような国内外で発生した大規模地震の解明に利用されてきた。

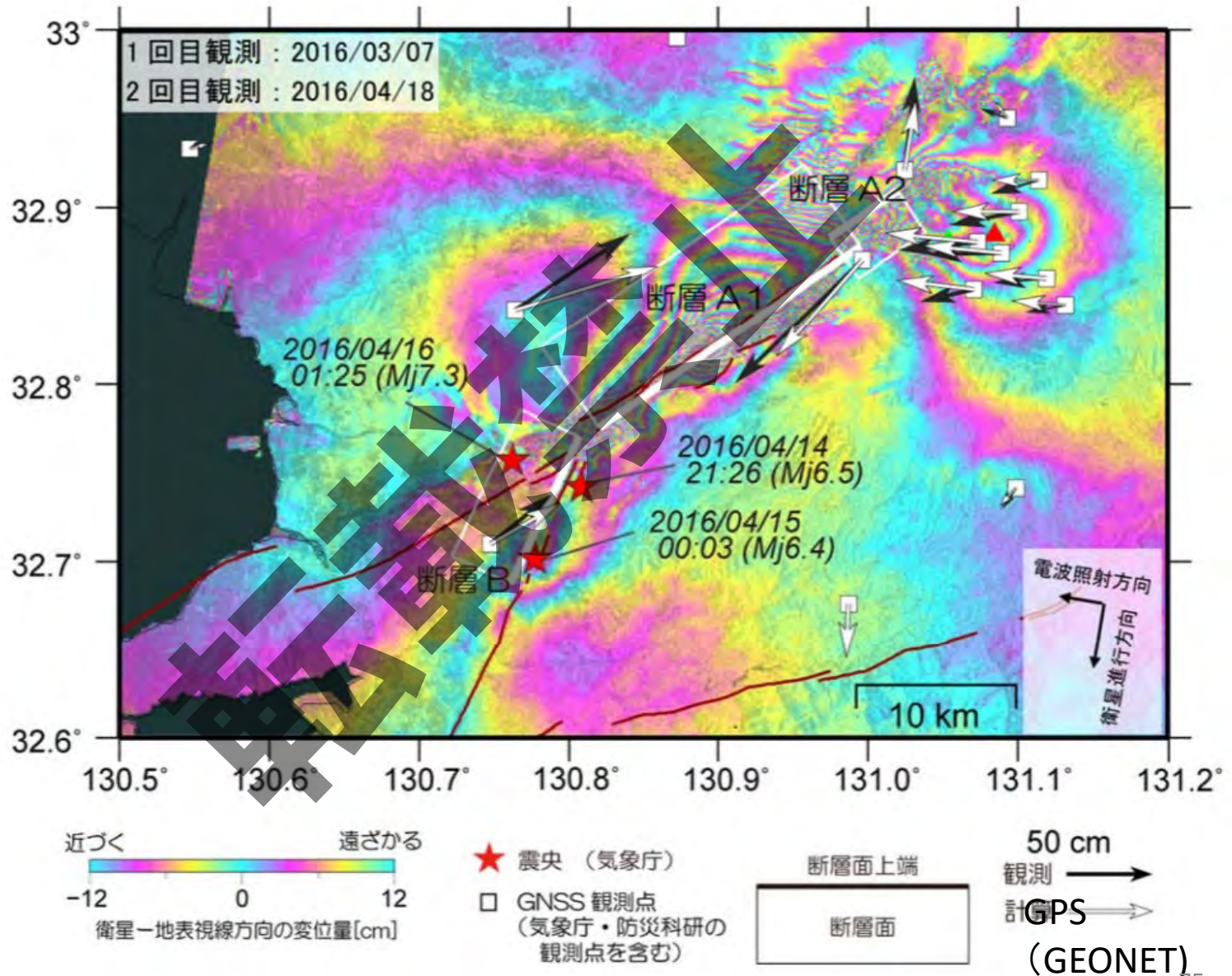
現在は、だいち(ALOS)の後継機として2014年5月に打ち上げられた陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)に搭載される高性能化されたLバンド合成開口レーダ(SAR)を利用して、地震現象を含めた、地殻・地盤変動を高精度に検出するための技術開発が行われている。

合成開口レーダ(SAR)による成果の一例として、平成23年(2011年)4月11日に発生した福島県浜通りの地震(M7.0)がある。地震の前と後に観測されたデータから得られた干渉画像からは、地震に伴う地殻変動を面的に把握することができ、井戸沢断層沿い及び湯ノ岳断層沿いに、変位の不連続が明瞭に見られる。



InSAR 干渉合成開口レーザ

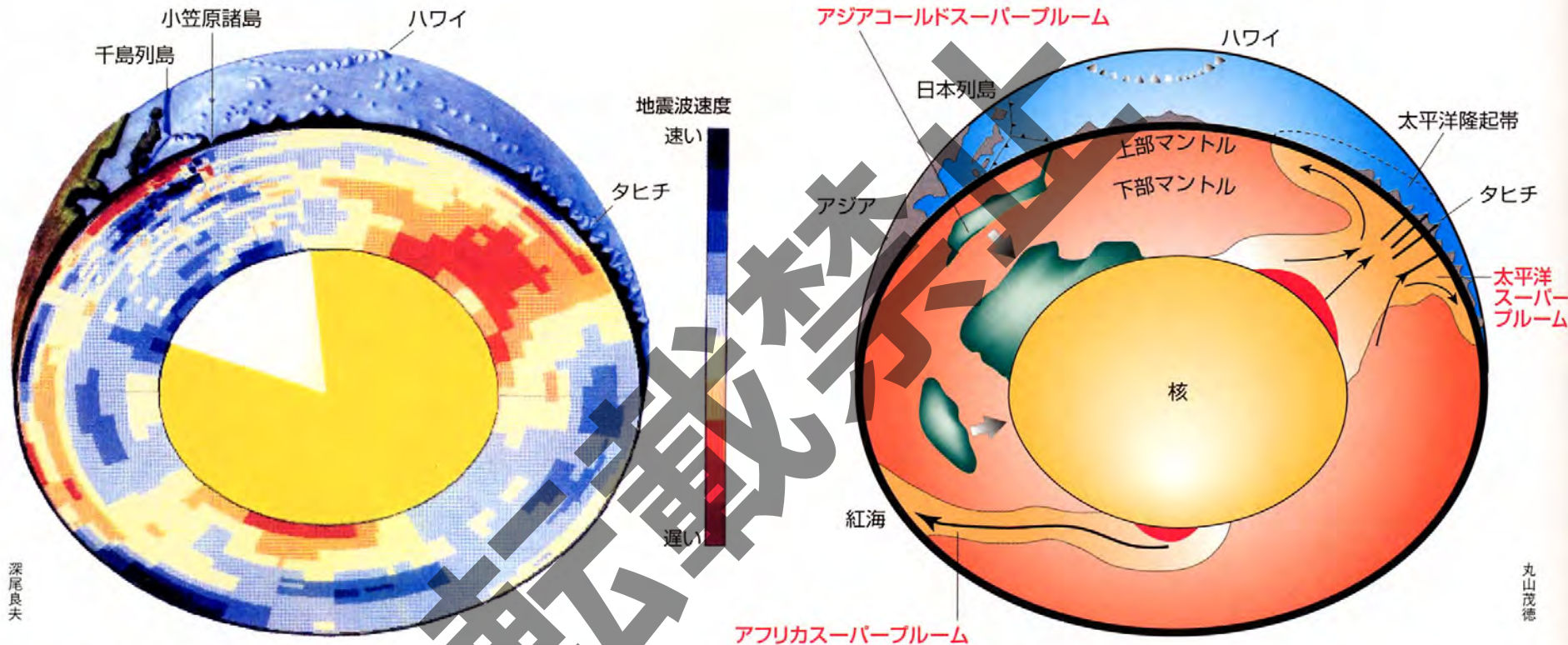
2016年
4月16日
熊本地震
M7.3



国土地理院

地震波トモグラフィーとスーパープルーム

Seismic tomography and super plume



地震波がとらえた地球の異常領域 地震波を多数の地点で観測すると、到達速度の差からマントル内部の地図を描ける。地震波（P波）が遅く伝わる領域（赤い部分）は高温・低密度の岩石でできている。こうした「地震波トモグラフィー」の画像から、南太平洋・タヒチ島付近の真下にマントルの大規模な高温領域があり、それが原因で白亜紀に火山活動が活発化したことがわかった。一方、日本の真下には地震波が速く伝わる低温の領域（青）がある。

マントルの対流 地震波トモグラフィー像や表層地質を詳しく調べた結果、南太平洋の真下にある高温部の正体は巨大なマントル上昇流であることが判明し、「太平洋スーパープルーム」と呼ばれている。一方、日本を含むアジア東部には「コールドスーパープルーム」という大規模な下降流がある。コールドスーパープルームの周辺ではプレートが沈み込んでおり、マントル層の途中でいったん滞留した後、まとめてマントル下部に崩落する。

プルームテクトニクス模式図



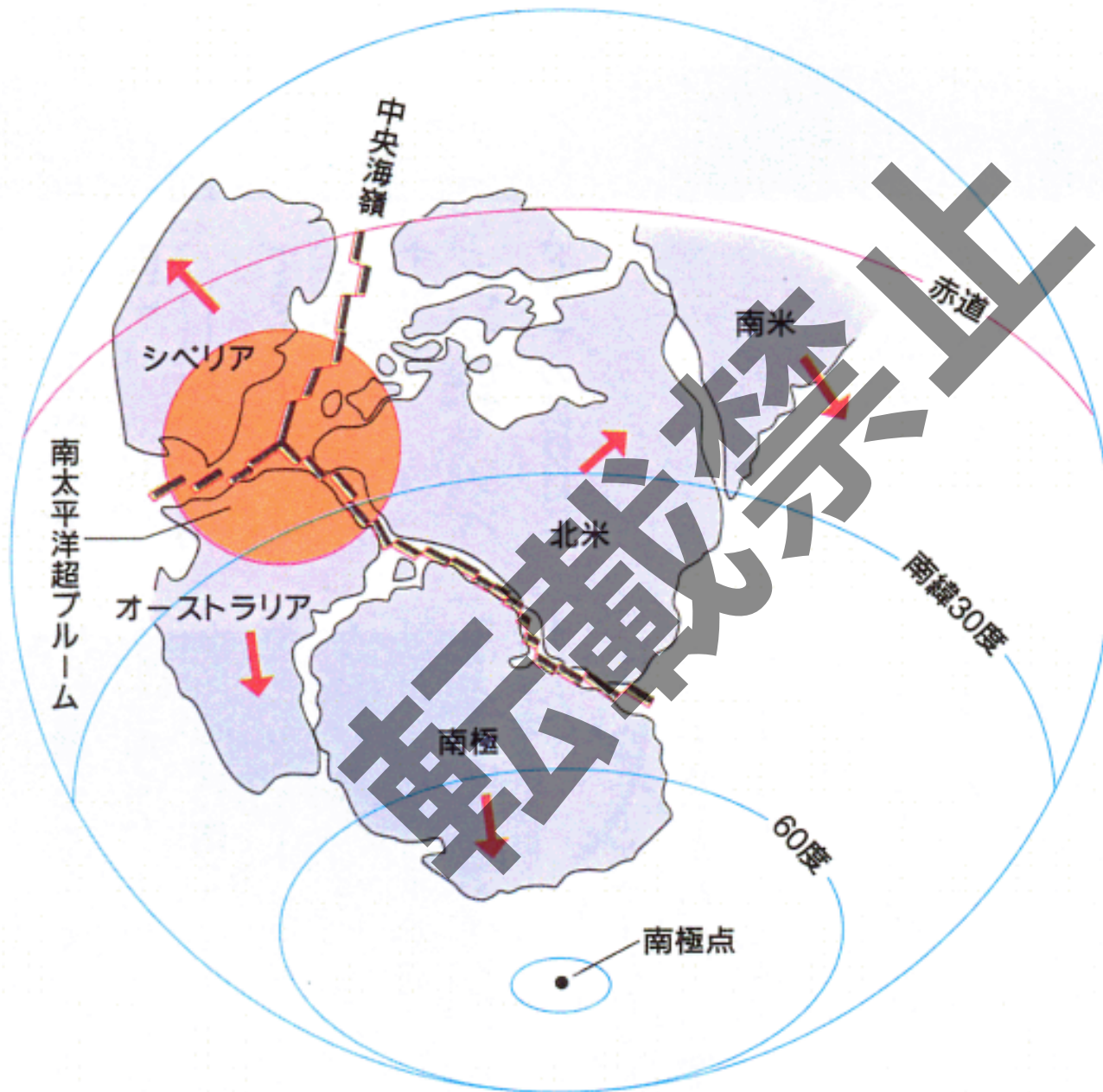
ゴンドワナの分裂(約7.5億年前)

■過去の2つの超大陸を突き破ったブルームの上昇

ゴンドワナの分裂(約7億年前)

南太平洋超ブルームが湧き上がり、太平洋が生まれた。矢印は陸地の移動方向

6.5億年前
全球凍結



パンゲアの分裂 (約2億年前)

パンゲアの分裂 (約2億年前)

最大のアフリカ超ブルームを含むパンゲア中央ブルーム鎖が湧き上がり、大西洋が生まれた。一方で、ユーラシア大陸に向かって陸地が集まっていく。寒冷前線のような印はプレートが沈み込んだ方向を示す

超大陸を囲む沈み込み帯でのスラブの大崩落



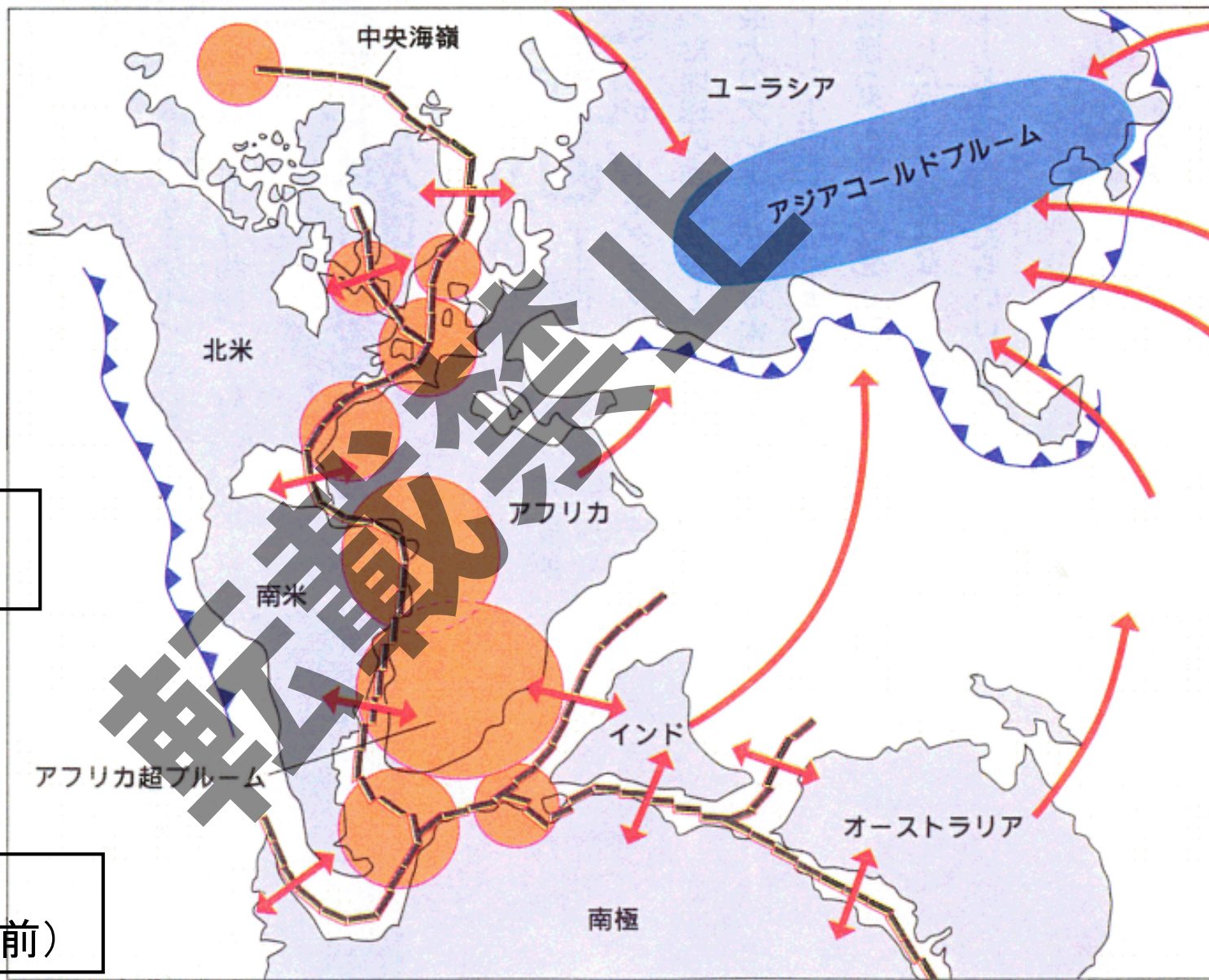
巨大ホットスーパーブルーム



巨大火山噴火



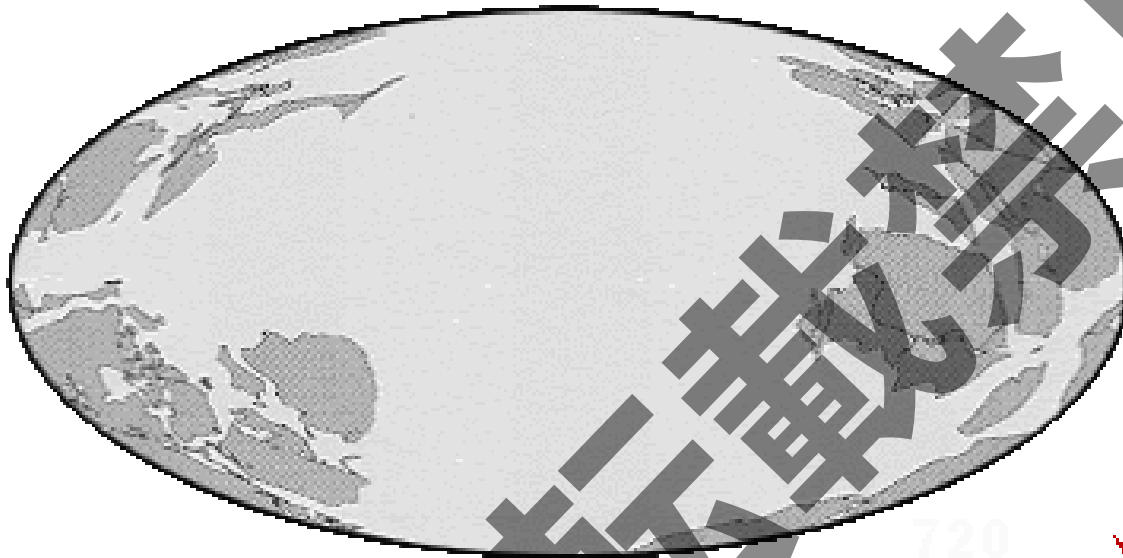
生物の大量絶滅
P/T境界(2.5億年前)



大地は動く：大陸移動

(ウェゲナー)

ウィルソンサイクル：超大陸の集合⇔分裂



アルフレッド
ウェゲナー
(1880-1930)

生物大量絶滅

新生代

6.5千万年 隕石
衝突

中生代

2.5億年(パンゲア)
超大陸
分裂

古生代

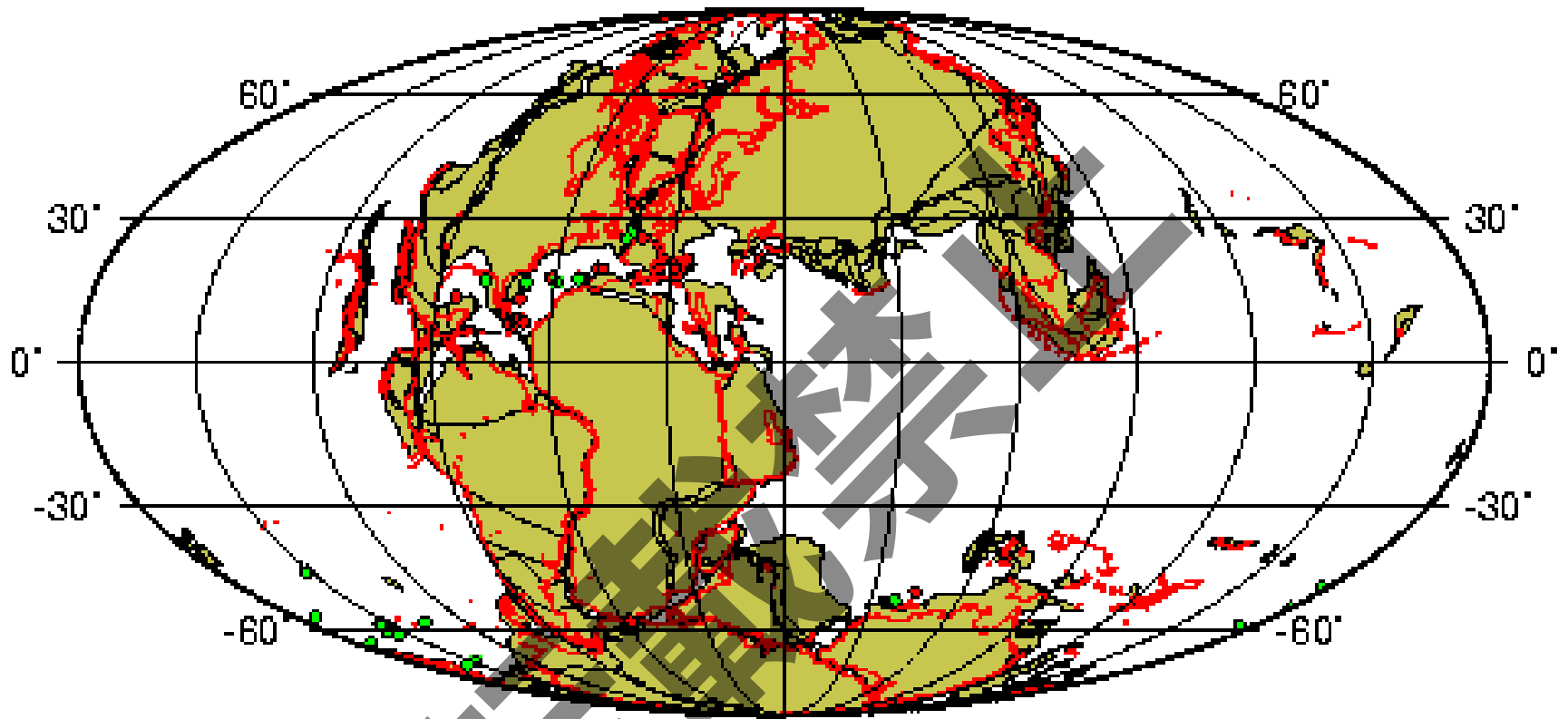
5.4億年

先カンブリア

7億年 全球
凍結

10億年 超大陸
(ゴンドワナ)
分裂

<http://www.ucmp.berkeley.edu/geology/tectonics.html>



150 My Reconstruction

<http://www.ods.de/ods/services/paleomap/paleomap.html>