地殻熱流量測定による地下温度構造の研究

山野 誠 (東京大学地震研究 所)

- 1.地殻熱流量の測定方法 陸域と海域
- 2 . 熱流量の分布日本列島周辺世界
- 3.プレートテクトニクスとの関連 海洋プレートの熱的進化 沈み込み帯の温度構造
- 4.地球の放熱量

地殼熱流量

地下から流出してくる熱量

(単位時間、単位面積あたり)

単位 [J/m²/s] = [W/m²] 典型的な値 40~100 mW/m²

熱流量 = 熱伝導率 × 地温勾配

地下の温度構造を知るための境界条件

温度構造に支配されるもの

地震の発生 地震波の速度・減衰 マグマの発生 固体の変形・流動 岩石の磁化・電気伝導度 鉱物の変成 マントル対流 プレートテクトニクス 等々

熱拡散方程式(1次元)

$$\rho \mathbf{c} \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left(\mathbf{k} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{z}} \right) \right)$$

:密度,c:比熱,k:熱伝導率

定常状態

$$\frac{d}{dz} \left(k \left(\frac{dT}{dz} \right) \right) = 0$$

$$k \left(\frac{dT}{dz} \right) = 定数 = 熱流量$$

熱拡散方程式(1次元)

$$\rho \mathbf{c} \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{t}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left(\mathbf{k} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{z}} \right) \right)$$

:密度,c:比熱,k:熱伝導率

一様な媒質

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2}$$

$$\kappa = \frac{k}{\rho c} = 熱拡散率$$

熱拡散の特性

・温度変動の伝播に時間を要する

岩石の熱拡散率 ~ 10 ⁶ m²/s

厚さ30kmの層の時定数 ~ 7 m.y.

現在の地下温度構造はわからない 過去の温度構造についての情報が得られる

・短周期・短波長の変動ほど減衰が大きい

地下深部での細かい現象は見えない

長い時間・空間スケールでの平均が見える

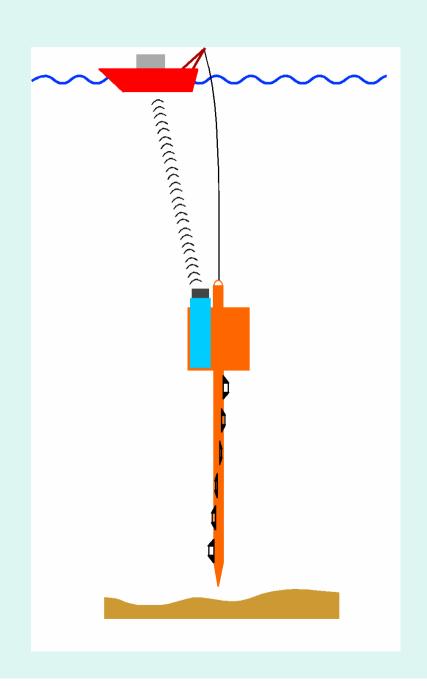
熱流量の測定方法

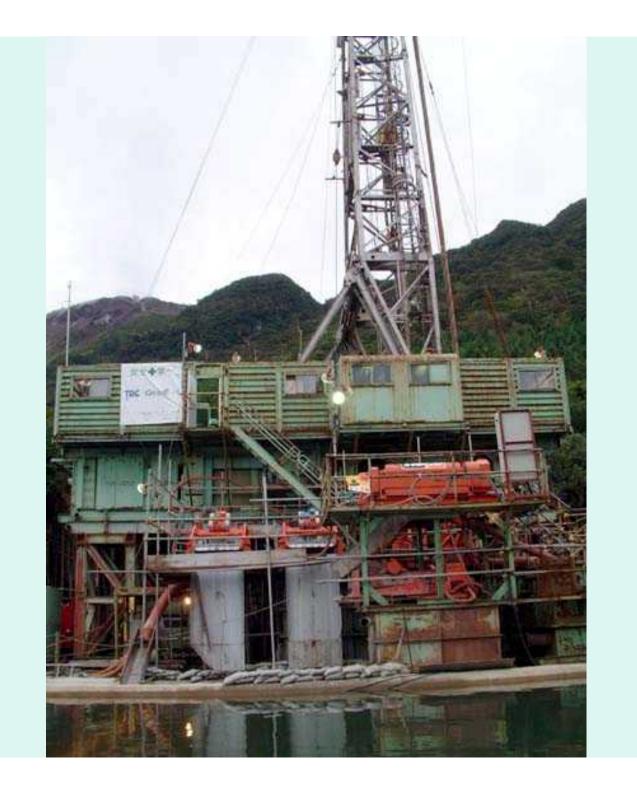
陸上

深い掘削孔内での温度分布測定

海底

堆積物中に温度プローブを貫入





温度センサ(サーミスタ)

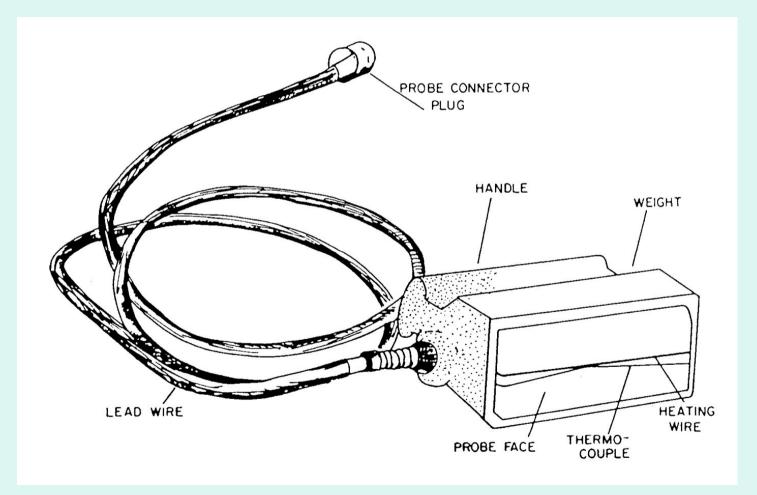






熱伝導率の測定

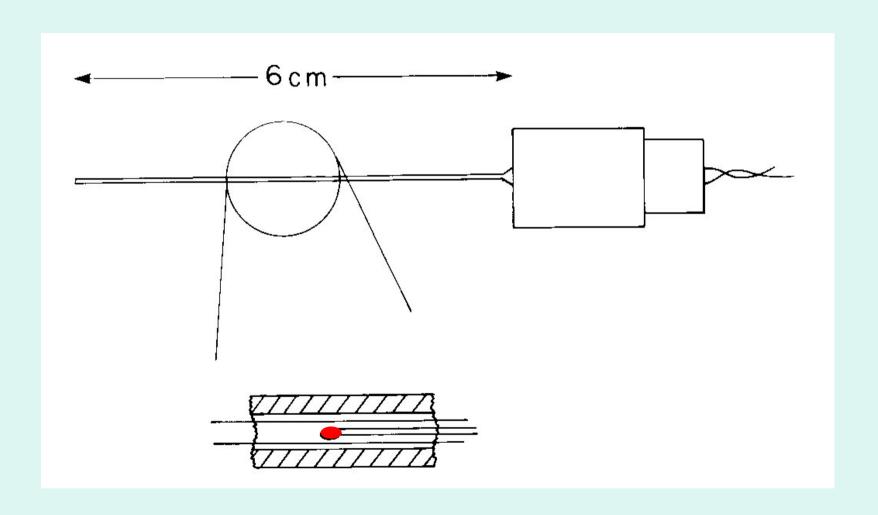
非定常法(QTM)

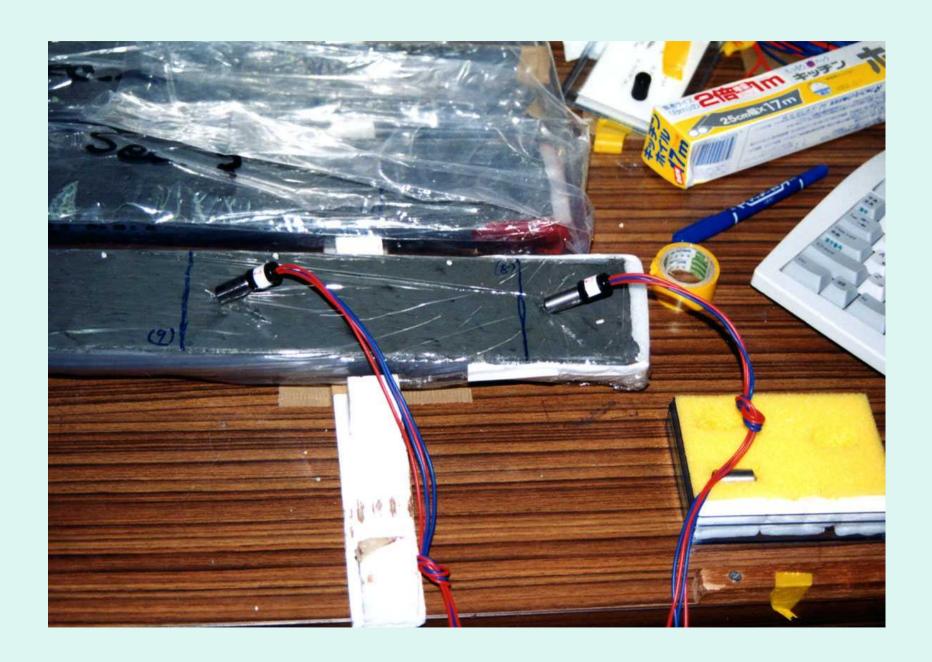




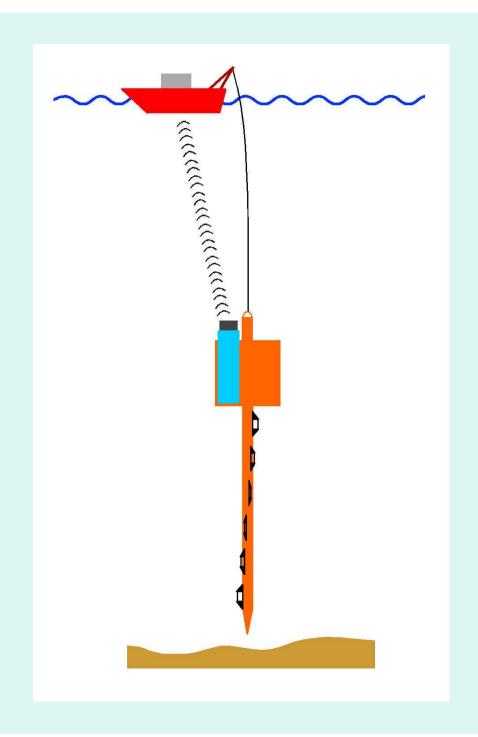


ニードル・プローブ



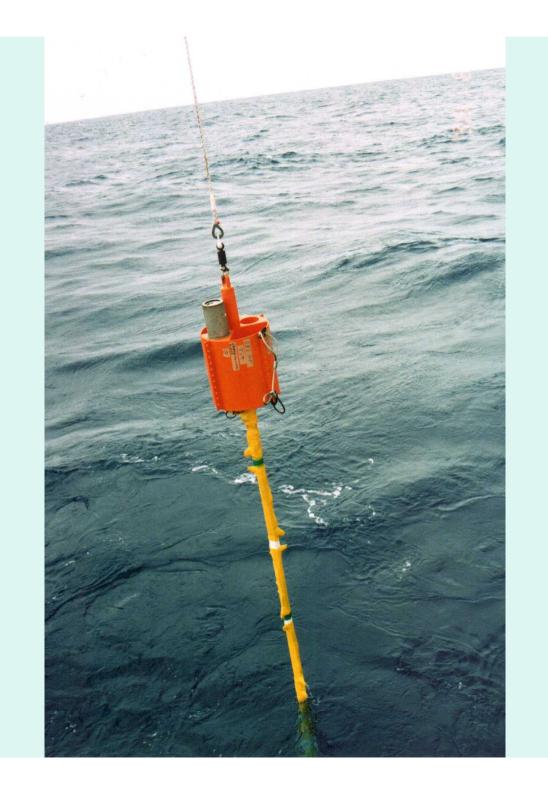


海域での 熱流量測定



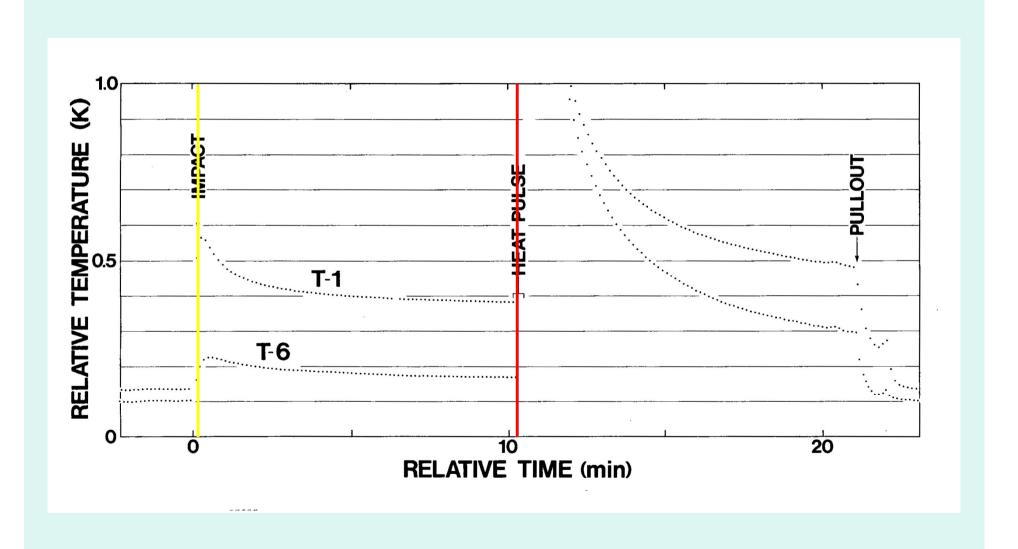


温度センサ

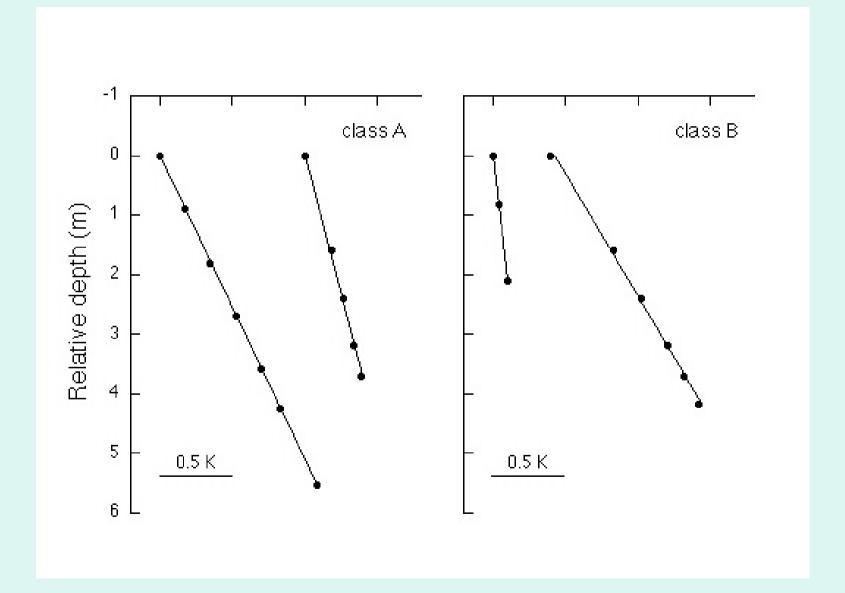




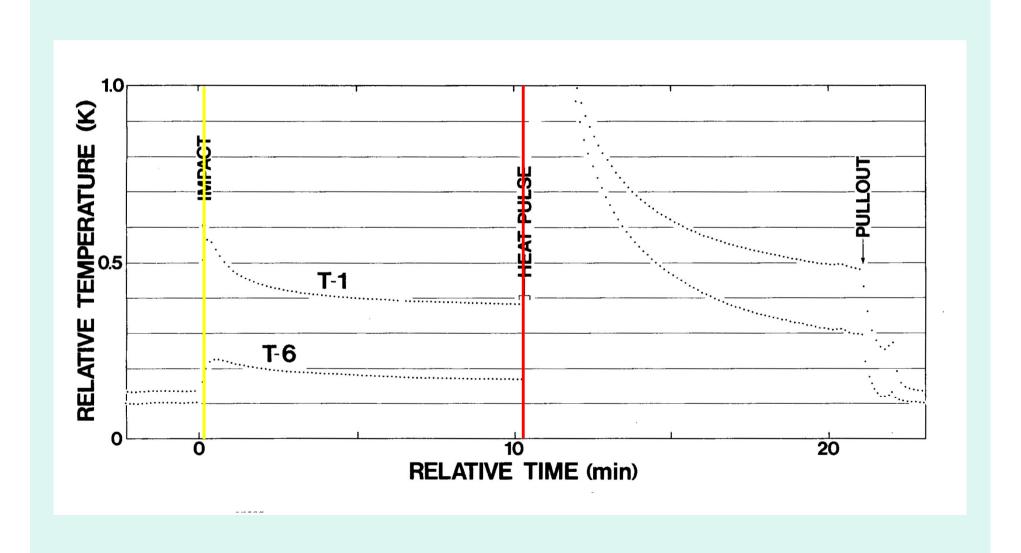
温度データの例



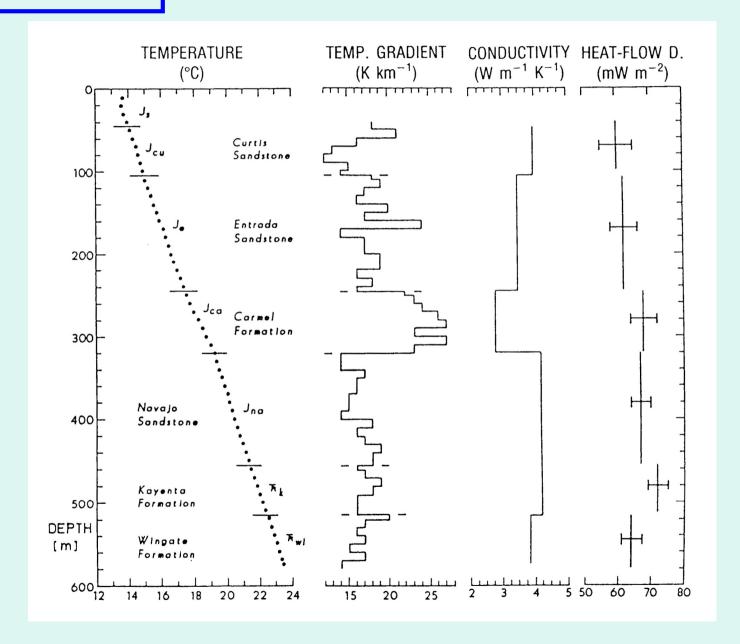
温度プロファイル



熱伝導率の"その場"測定



熱流量の算出



各種の誤差要因、補正

地形、地表面環境

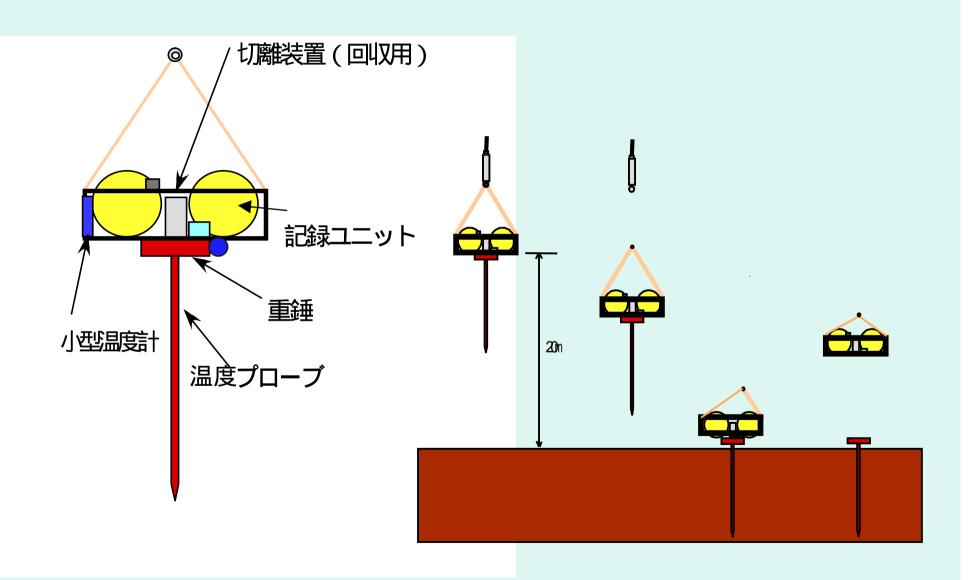
隆起・侵食

沈降・堆積

地下水・間隙水の流動

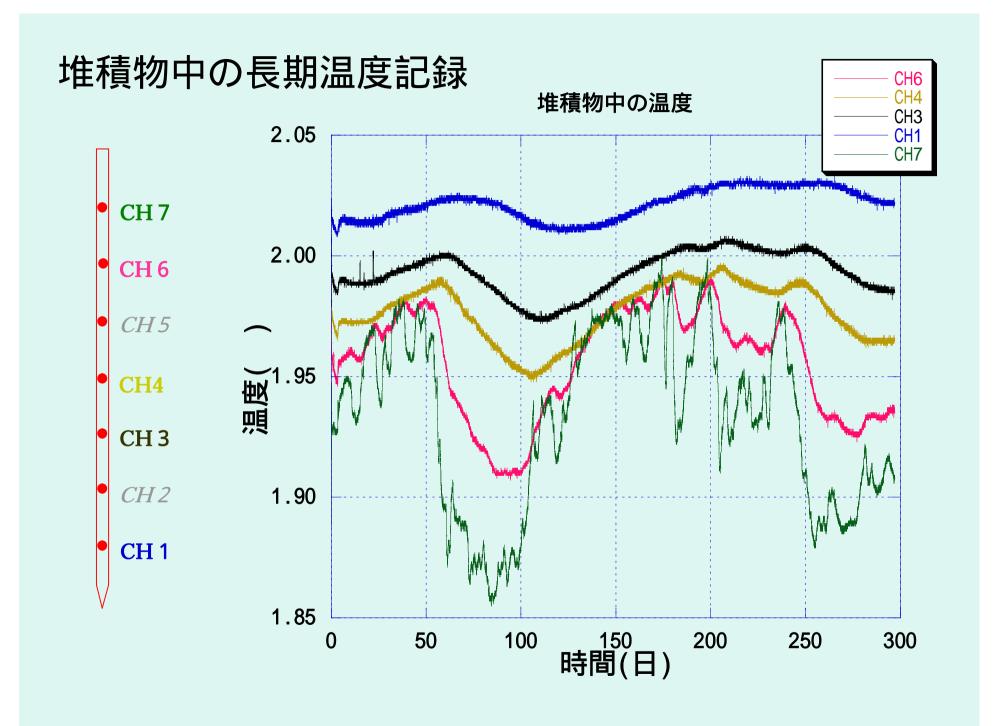
地表面温度の変動 気候変動、海底水温変動

海底水温変動の影響

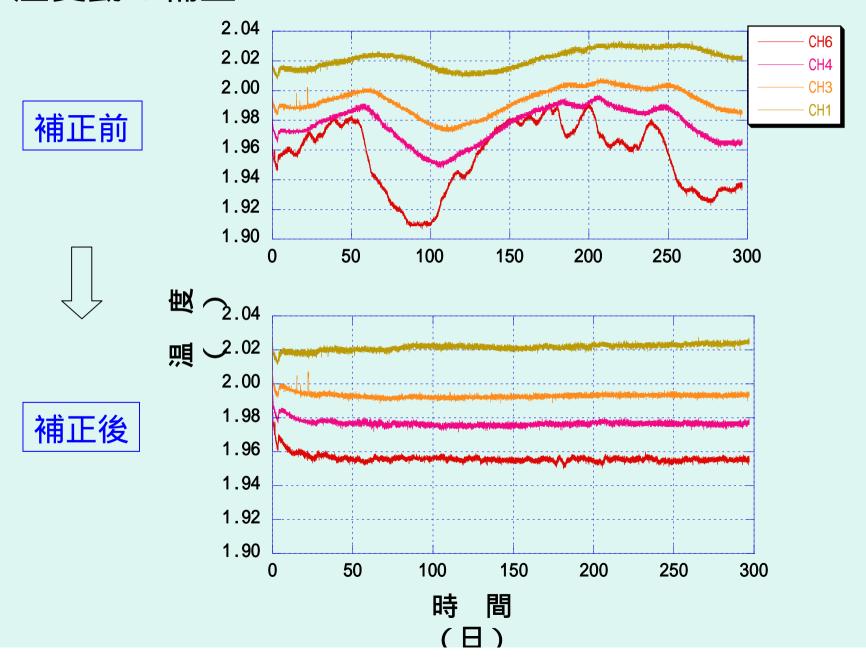


自己浮上式長期温度記録装置

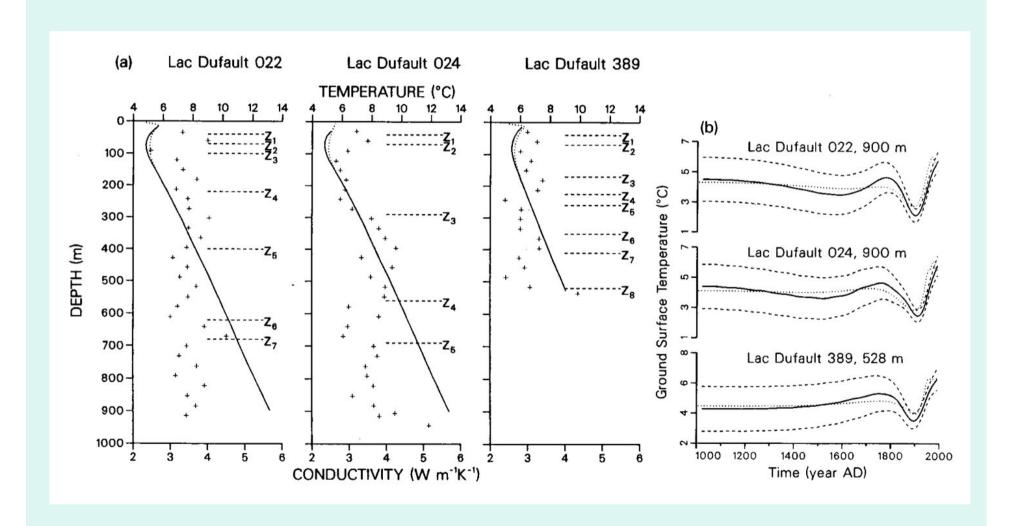




水温変動の補正

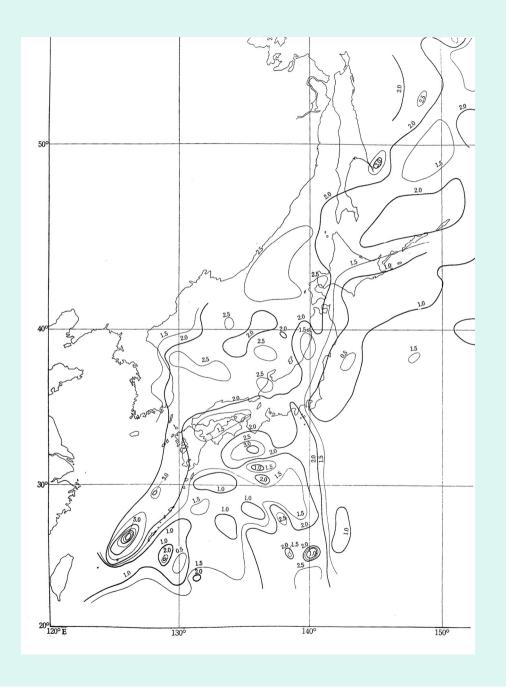


気候変動の復元

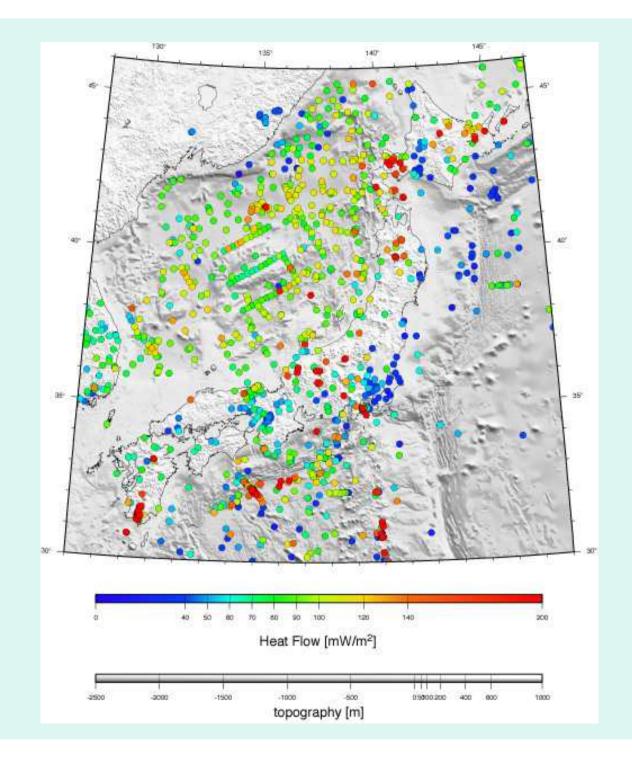


熱流量の分布

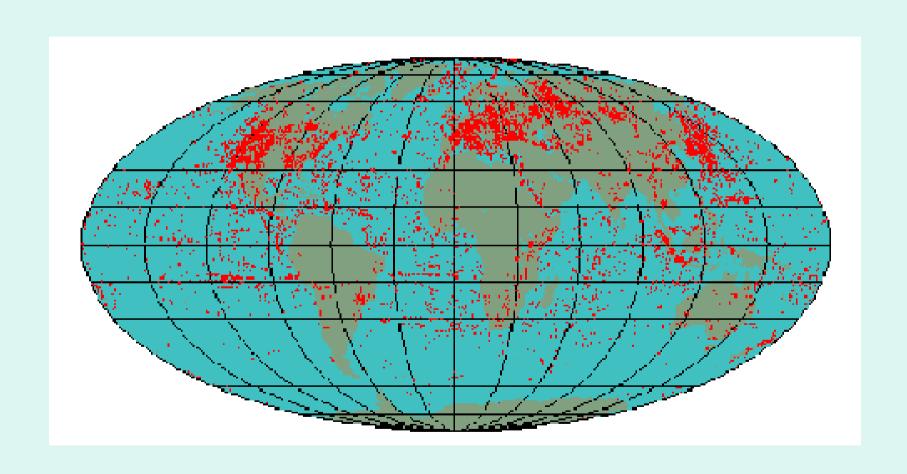
1970年頃までに 大まかな特徴は判明



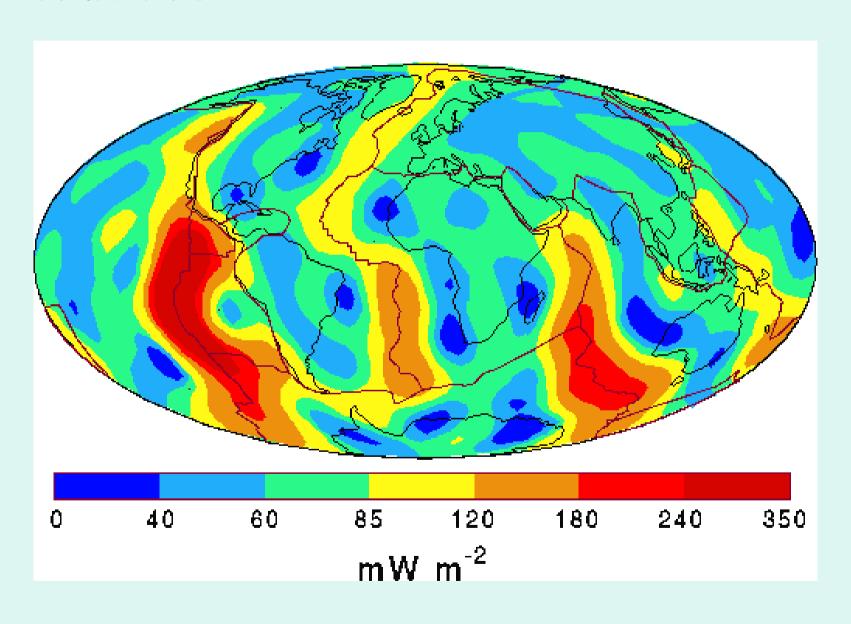
最新の分布図



世界の観測点分布



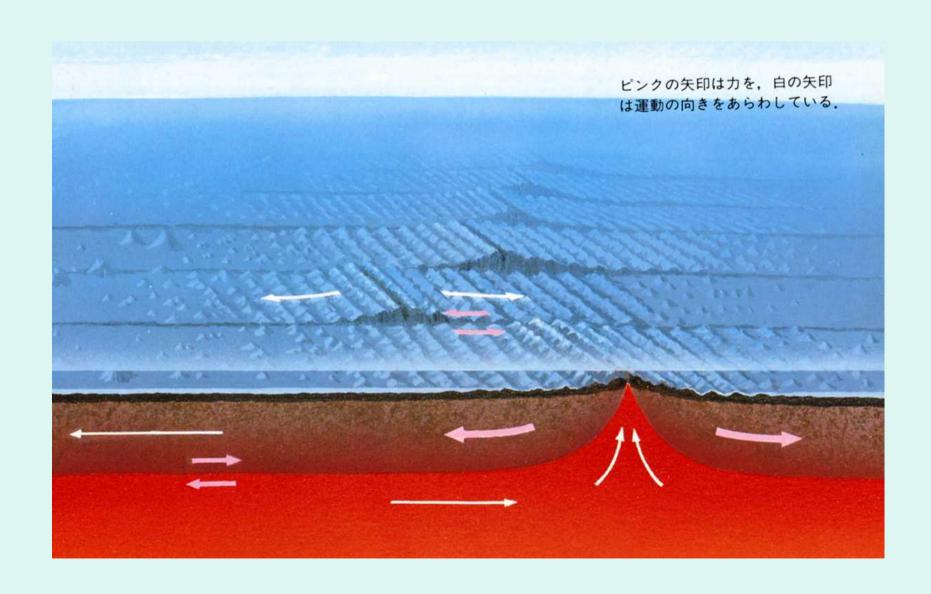
球関数展開



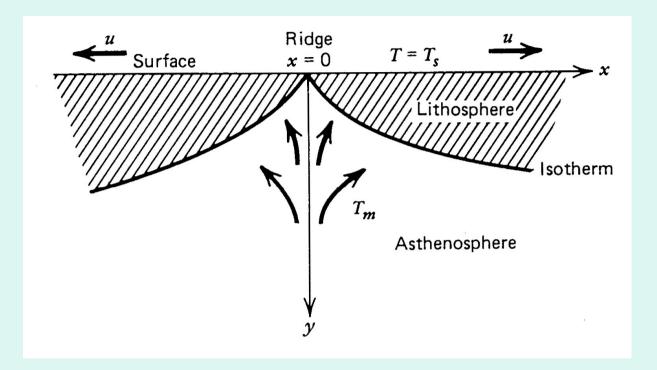
世界の主なプレート



海洋プレートの熱的進化



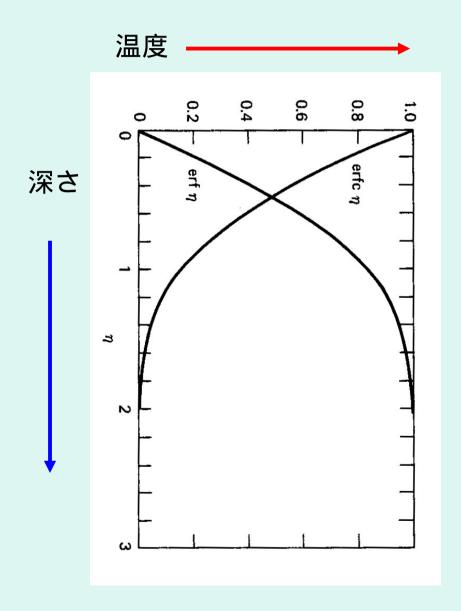
簡単なモデル



水平方向の熱の流れは垂直方向に比べて小さい

1次元、半無限媒質の冷却 で近似可能

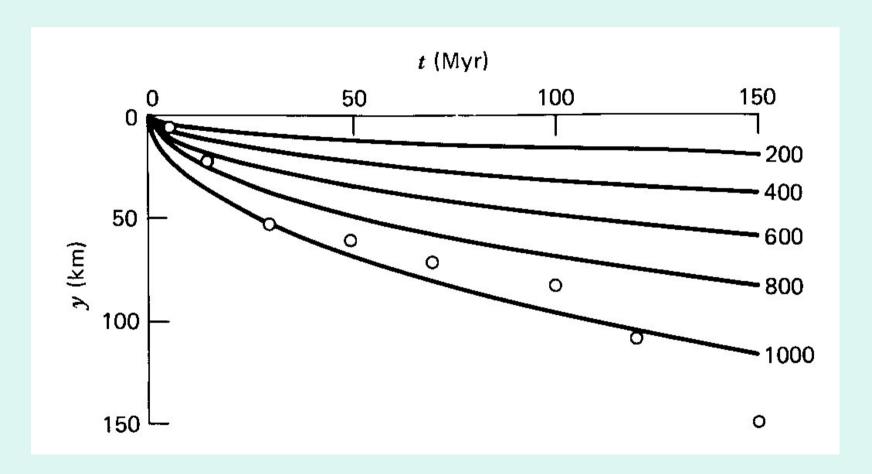
プレート内の温度構造



解は誤差関数の形となる

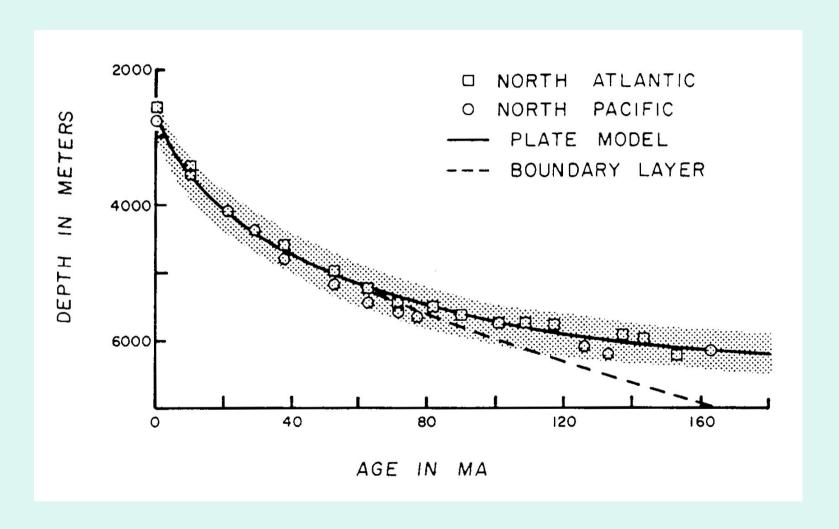
√t 法則が成り立つ
 (t:海底年齢)
 等温面の深さ∝√t
 熱流量 ∝√½
 水深 ∝√t

等温面の深さ



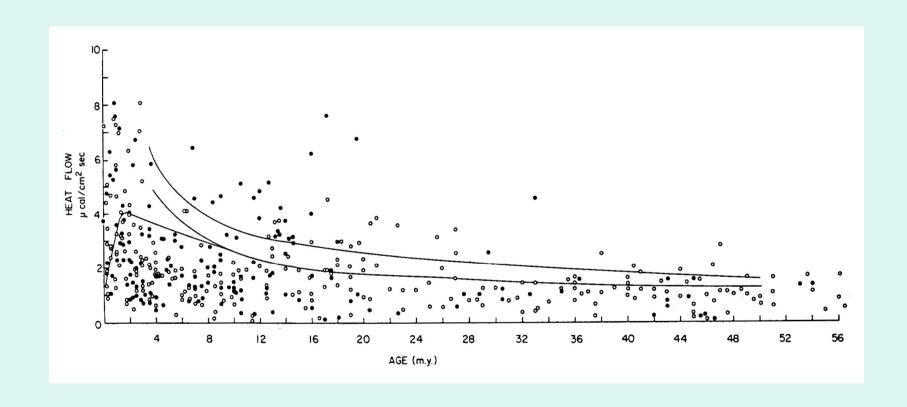
プレートの厚さの変化を説明できる

水深と海底年齢の関係



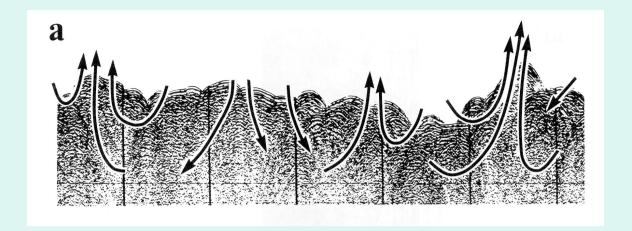
80m.y.くらいまではモデルによく合う

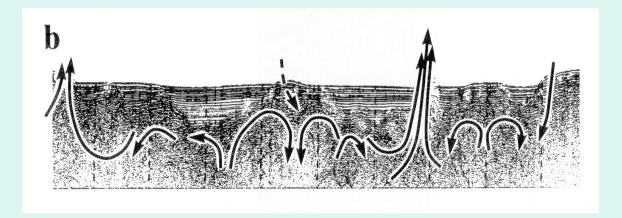
地殼熱流量の問題

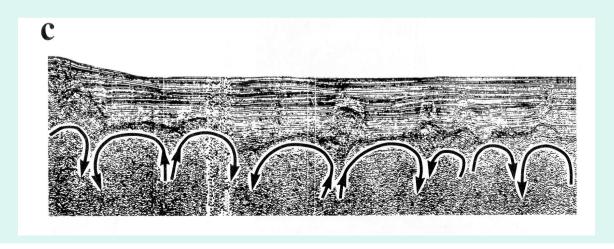


理論値よりも低く、ばらつきが大きい

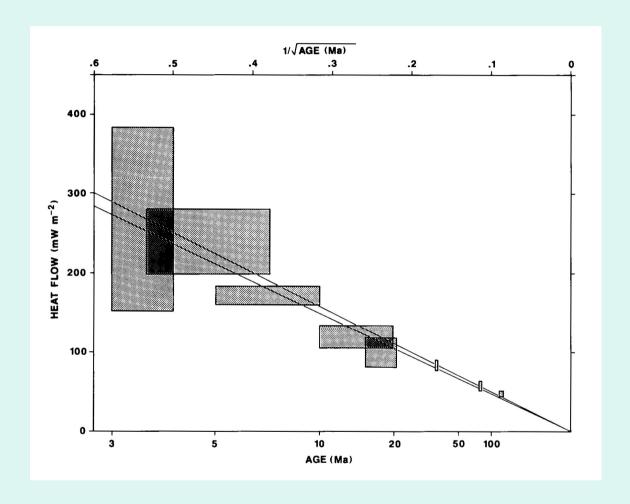
熱水循環







熱水循環の影響を避けると

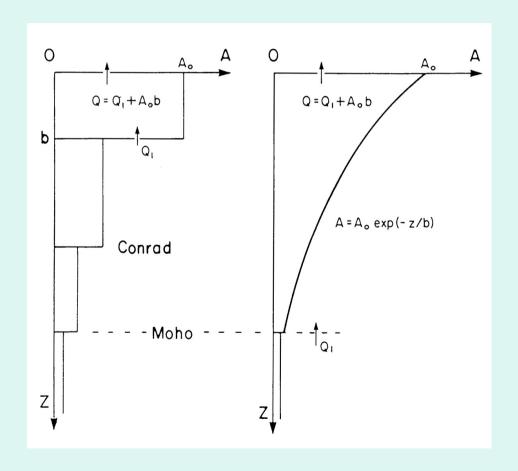


熱流量もモデルと合う

$$q \approx \frac{500}{\sqrt{t}} (\text{mW/m}^2)$$
 (t in m.y.)

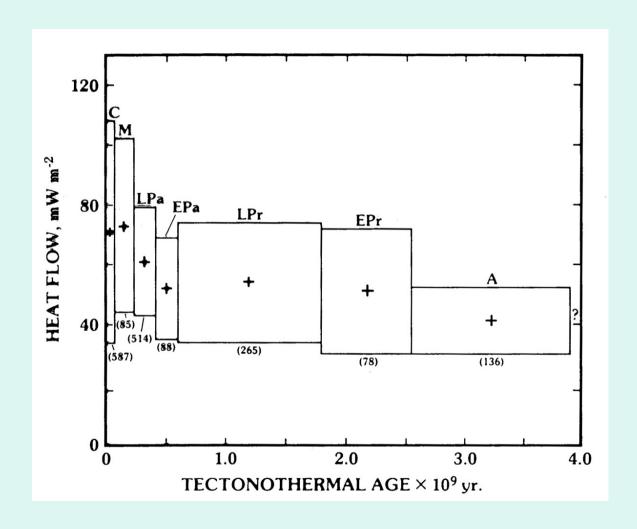
大陸プレートの温度構造

放射性発熱(U, Th, K)が上部地殻に濃集

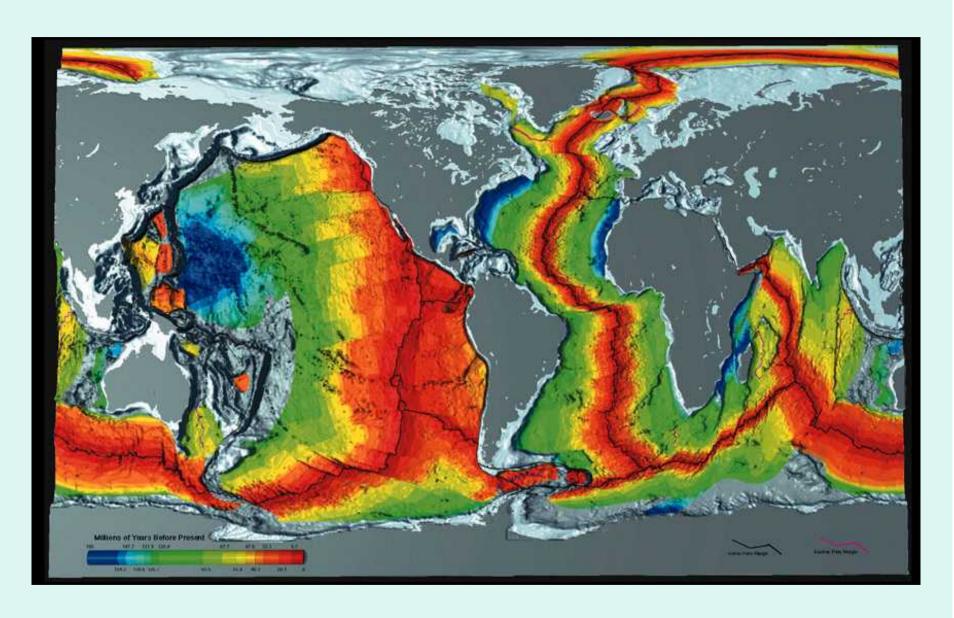


深さの指数関数で減少?

年齢と熱流量の関係



明瞭な関係はない



海底年齢の分布

地球の放熱量

放熱量の推算値(×10¹³ ₩)

W)				
VV)	大陸	海洋	(熱水循環)	計
Lee (1970) 等面積に分けて平均値	0.90	2.21		3.11
Chapman and Pollack (1975) 年齢と熱流量の関係(観測値)	1.09	1.92		3.01
Sclater et al. (1981) 年齢と熱流量の関係(理論値)	1.15	3.04	1.0	4.20
Stein and Stein (1994) 海洋プレートのモデルを改訂		3.20	1.1	(4.35)

放熱量の内訳 (Sclater et al., 1981)

大陸 1.15×10¹³ W 59 mW/m²

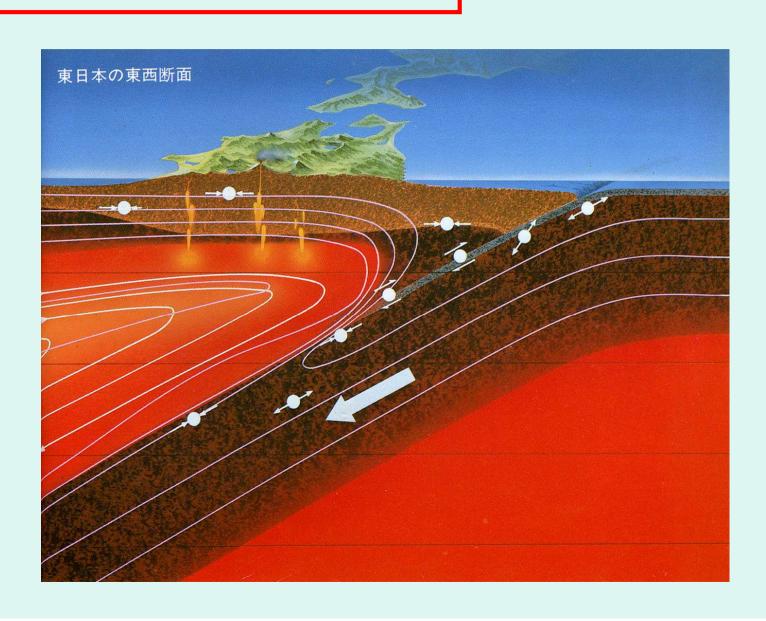
海洋 3.04×10¹³ 100

全地球 4.20×10¹³ 84

熱水循環 1.0×10¹³ W 24% 海洋プレートの生成 2.6×10¹³ 63%

地殼内発熱 0.7×10¹³ 17%

沈み込み帯の温度構造



温度構造を決める主な要素

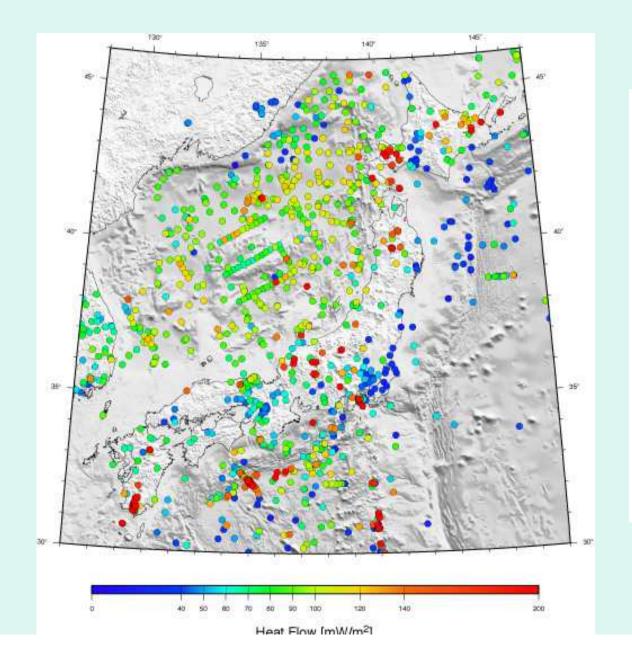
・既知の量

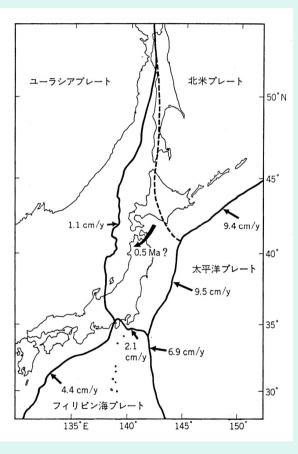
沈み込む海洋プレートの年齢 沈み込みの速度と角度 海溝付近における堆積層の厚さ

・未知の量

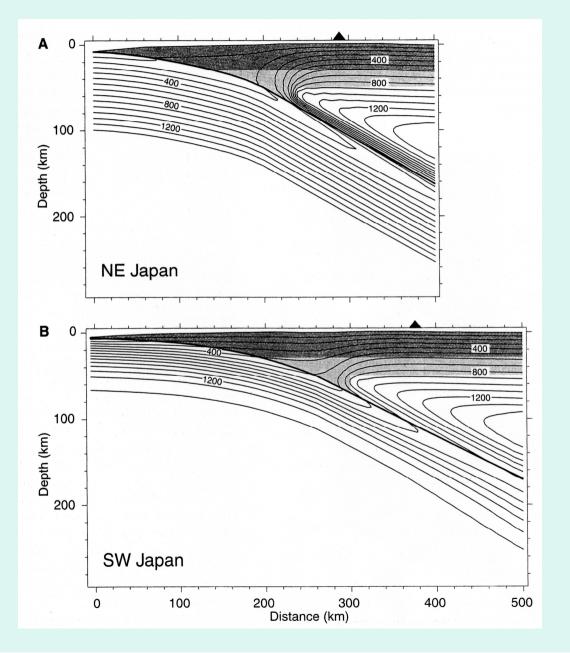
プレート境界面での摩擦発熱 陸側プレート内の放射性発熱 沈み込みの時間変化、付加体の成長

東北日本と西南日本の比較





温度構造の違い



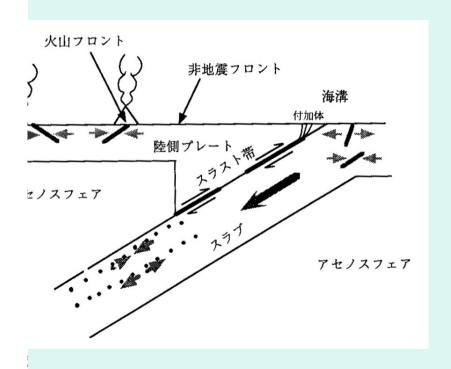
東北日本

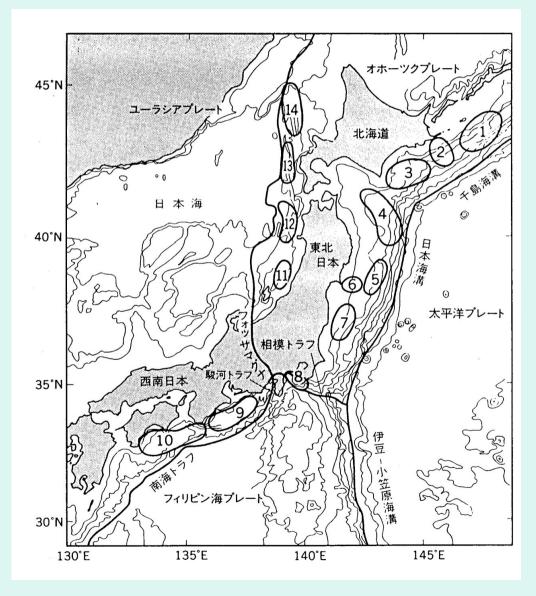
太平洋プレート 古くて冷たい より高角・高速

西南日本

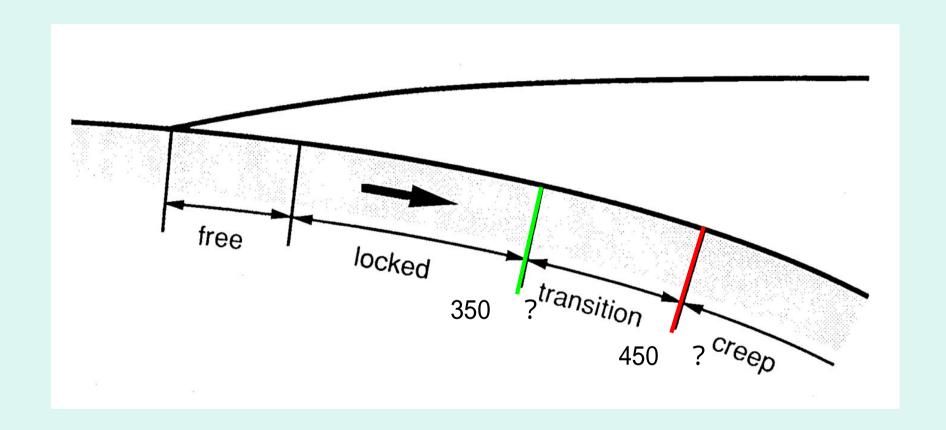
フィリピン海プレート 若くて高温 より低角・低速

海溝型巨大地震の震源域と温度構造



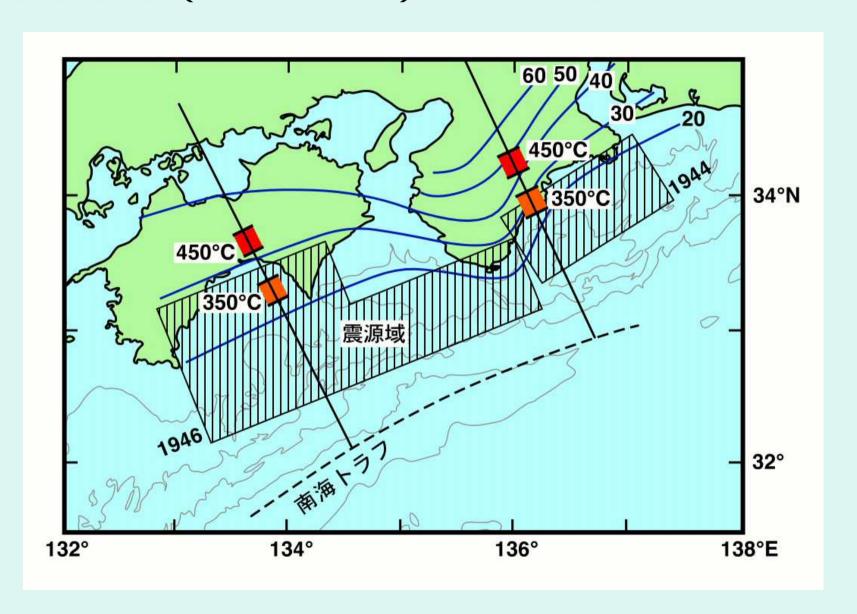


震源域の広がりは温度構造で決まる?

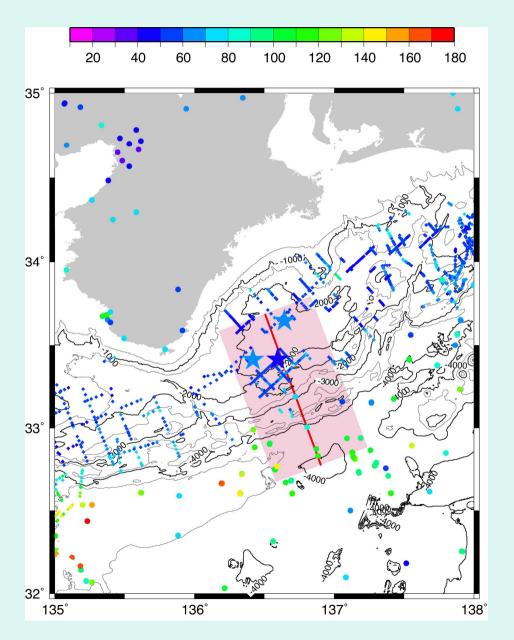


プレート境界面の温度が重要

西南日本(南海トラフ)沈み込み帯



熊野沖海域での熱流量測定

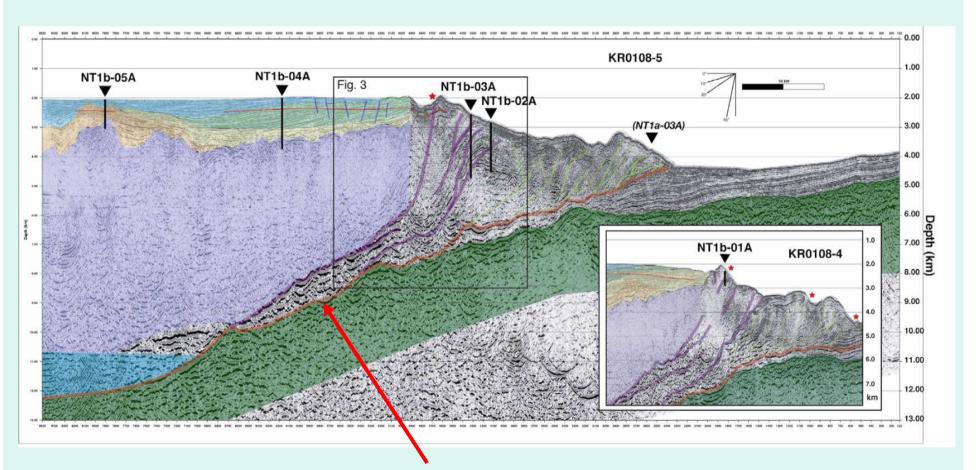


IODPによる 地震発生帯掘削計画



ライザー掘削船「ちきゅう」

構造と掘削候補地点



プレート境界

熱流量の観測値とモデルによる計算値

