

東北中部の電気伝導度からみた マグマ・流体分布

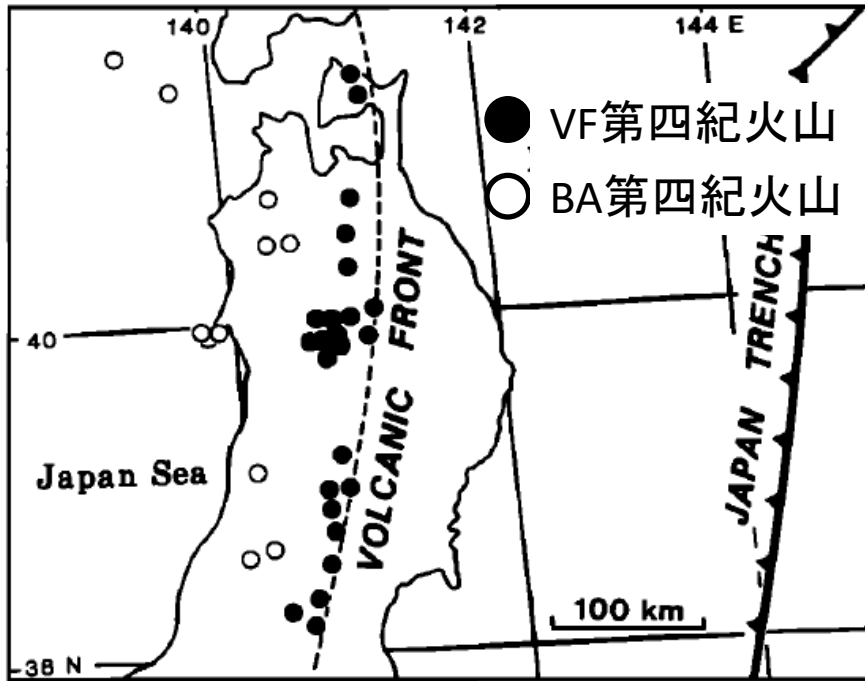
祝辞：海半球観測研究センター設立20周年誠におめでとうございます。
僭越乍、今後益々の御発展を祈念申し上げます。

市來雅啓1, 小川康雄2, 海田俊輝1, 小山崇夫3, 上嶋誠3, 出町知嗣1, 平原聡1,
本蔵義守2, 神田径2, 河野俊夫1, 松島政貴2, 中山貴史1, 鈴木秀市1, 藤浩明4

(1: 東北大学 2: 東京工業大学 3: 東京大学 4: 京都大学)

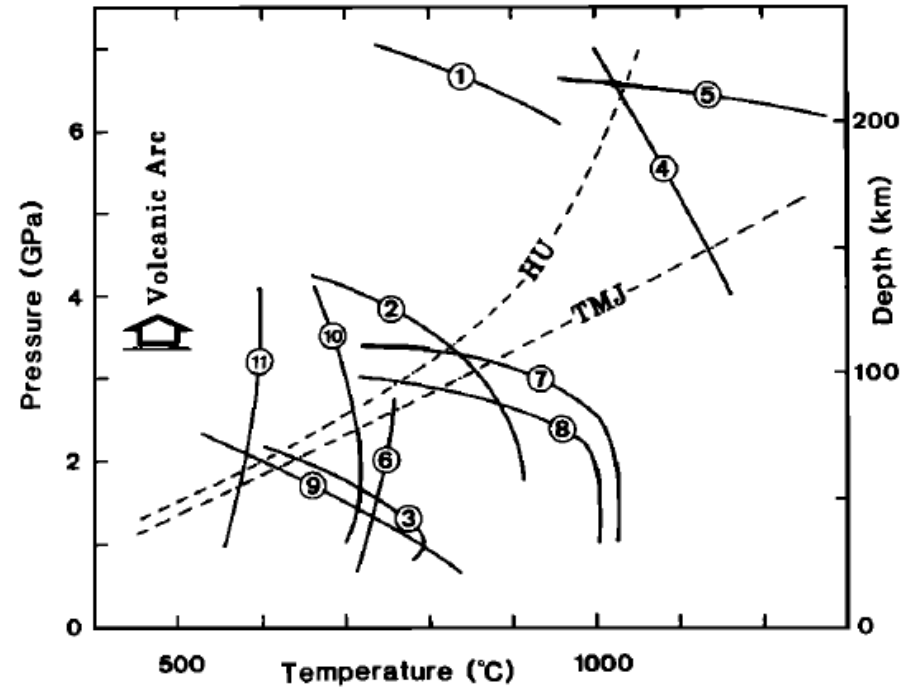
御礼：この度は20周年記念シンポジウムにお招き頂き誠に有難うございました。

第四紀火山分布図



巽モデル

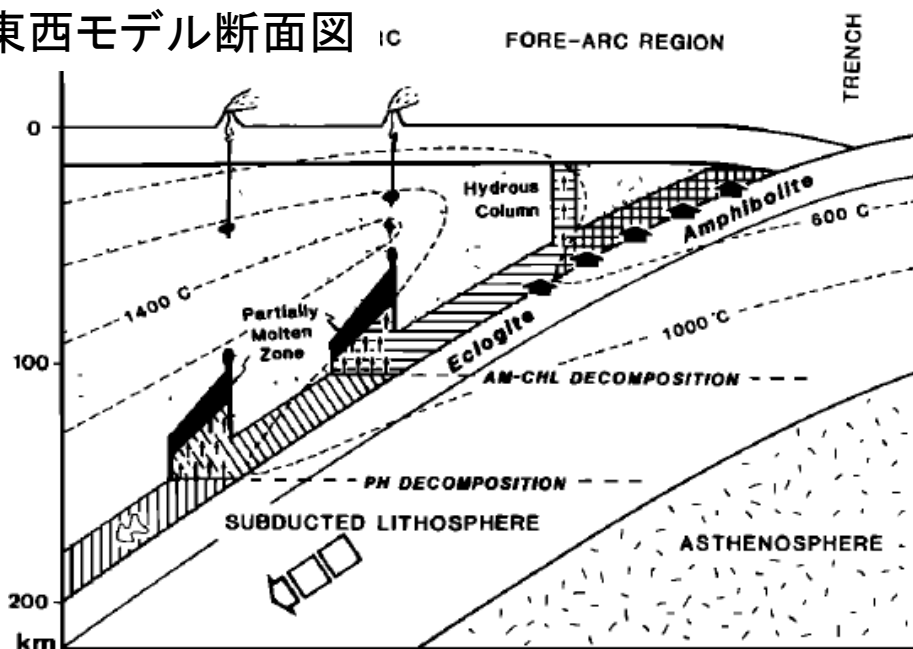
MORB, 橄欖岩の
主要hydrous mineralsの脱水



- ⑦, ⑧ 橄欖岩・MORB中の角閃石相境界
- ④, ⑤ 地表, 橄欖岩中の金雲母相境界

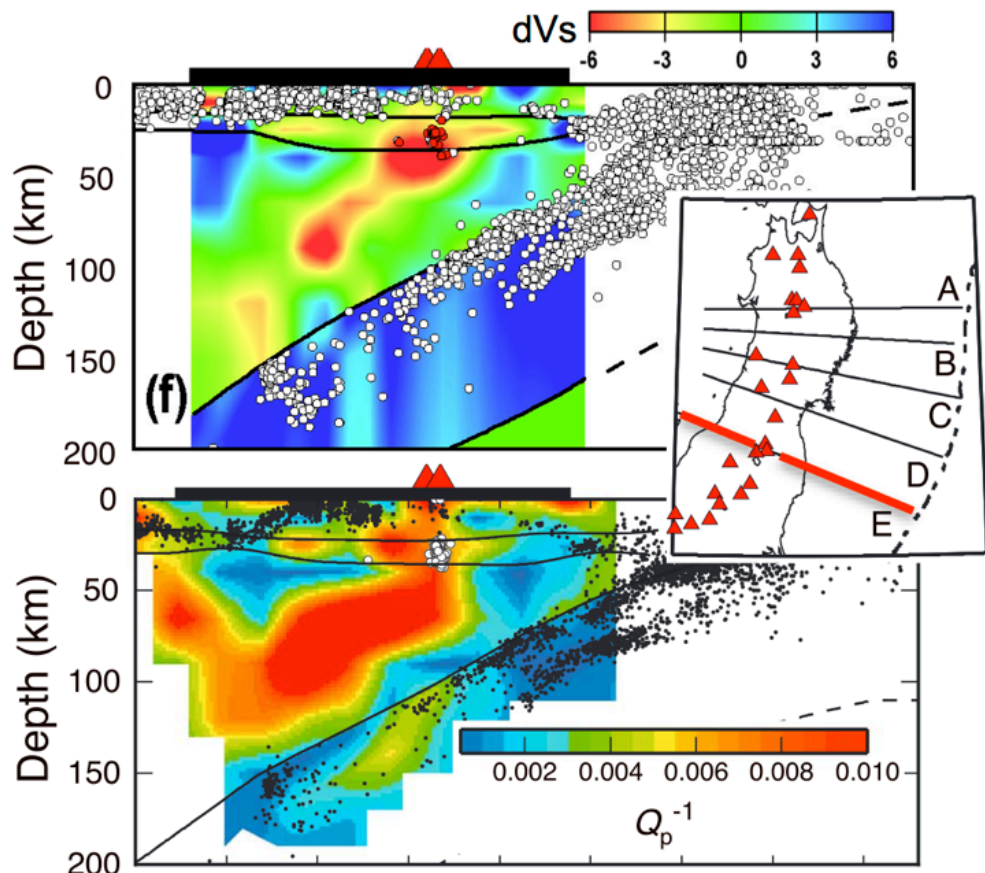
(Tatsumi, 1989)

東西モデル断面図

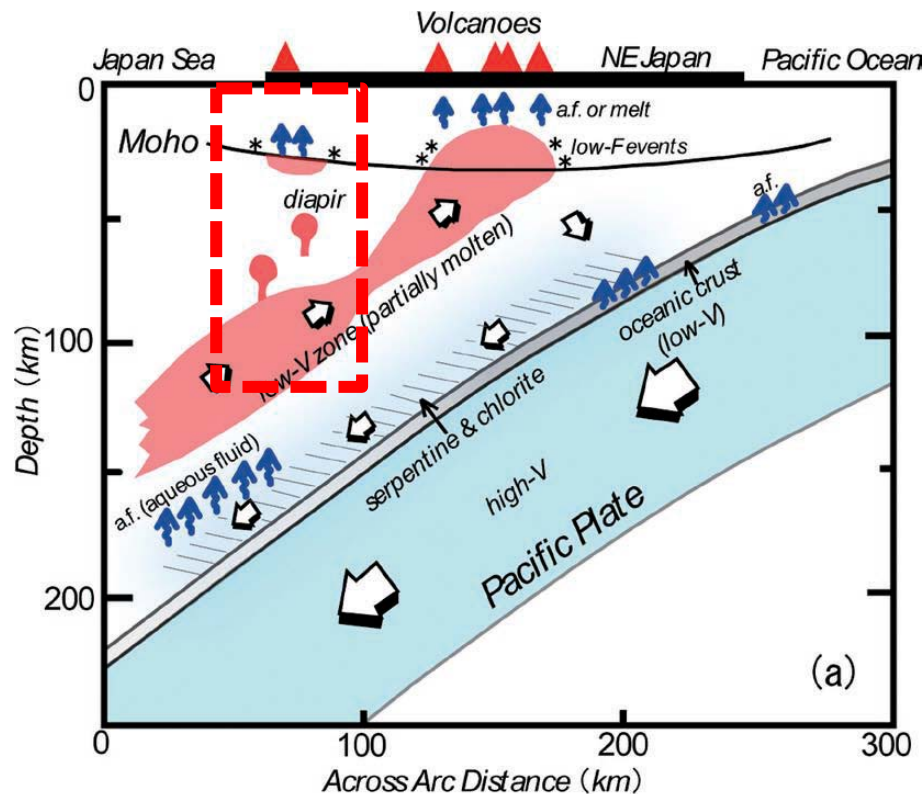


脊梁下の脱水に関しては 地震学的構造が待ったをかける

しかし、背弧の火山活動は謎の まま、diapir説が生き残る



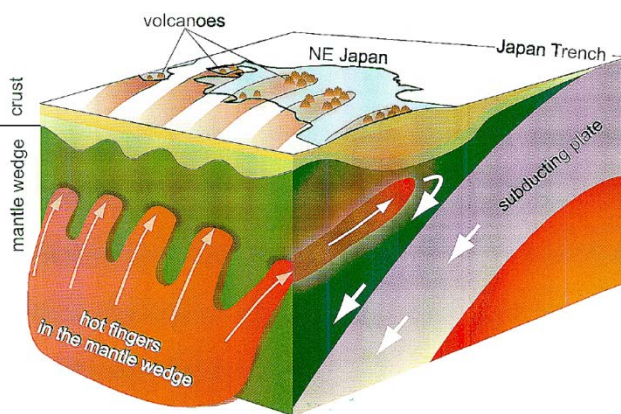
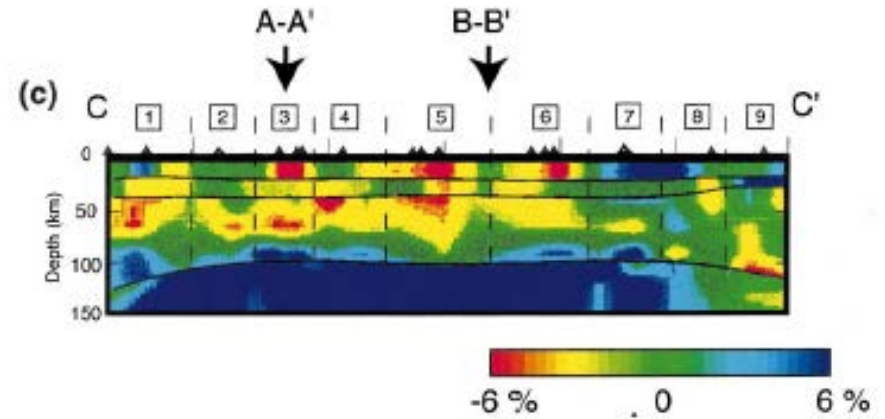
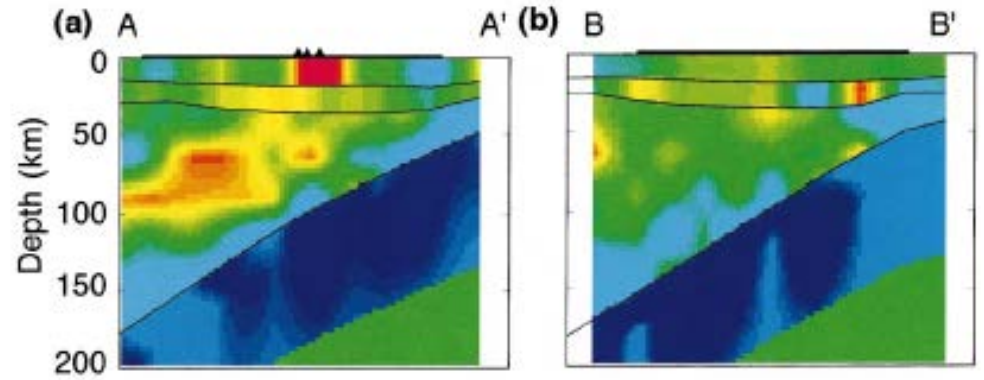
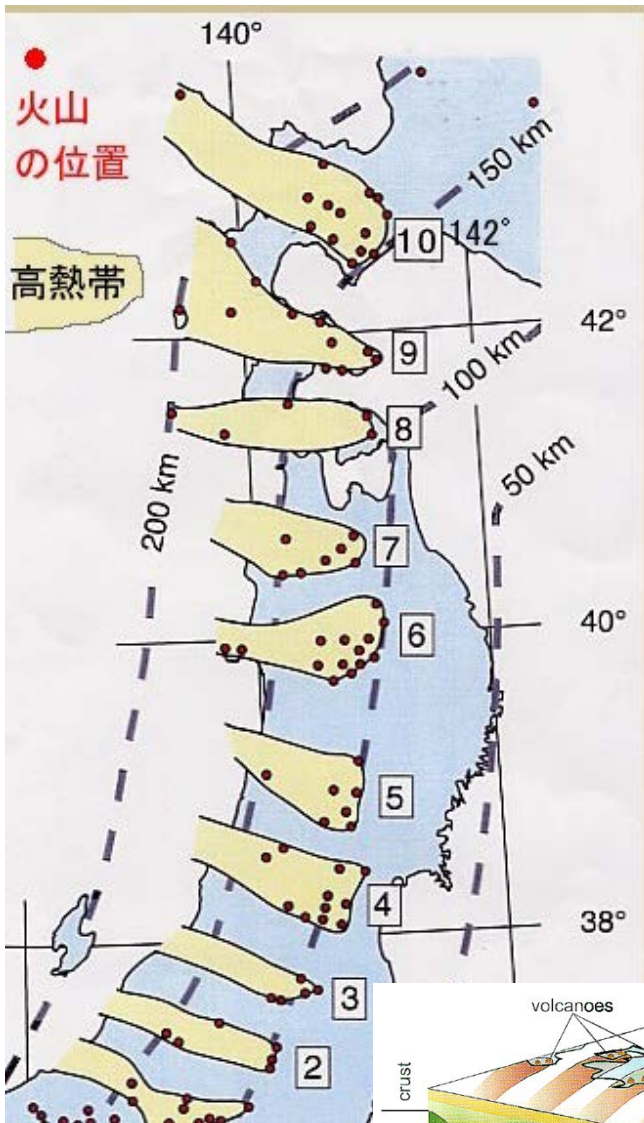
(Nakajima et al., 2001; 2013)



(Hasegawa & Nakajima, 2004)

※注 ここでは低速度、高減衰をマグマ・流体と解釈

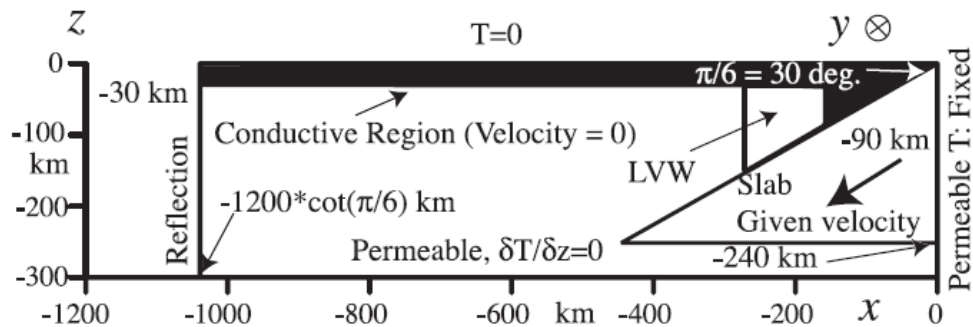
そんな中、Hot Finger説(H.F.)が出始める



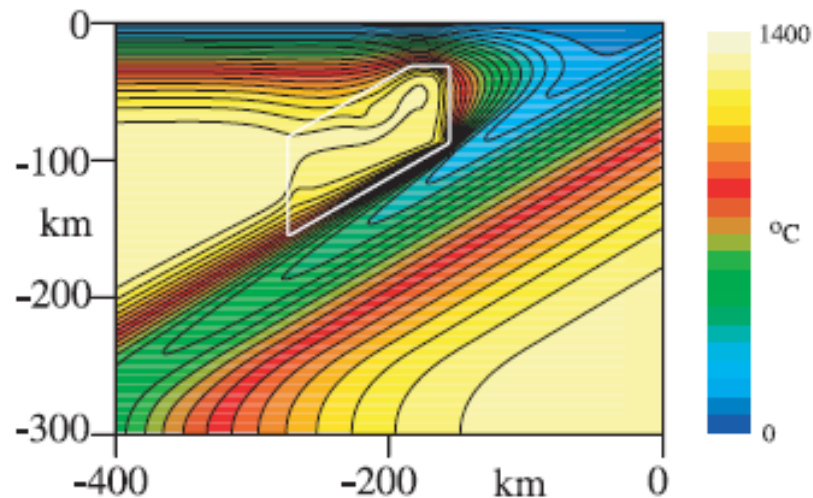
(Tamura et al., 2002)

H.F.=Rayleigh-Taylor不安定 (roll-like convection) パターン とすれば, roll-like convectionの形成条件は?

モデルセッティング

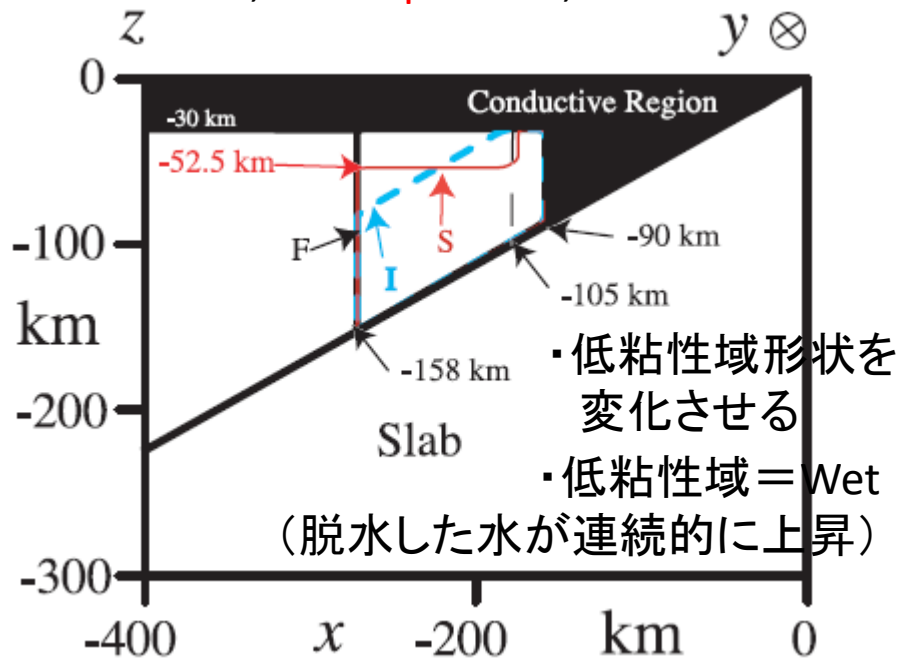


25Myrでの温度構造 (Step modelが良い)



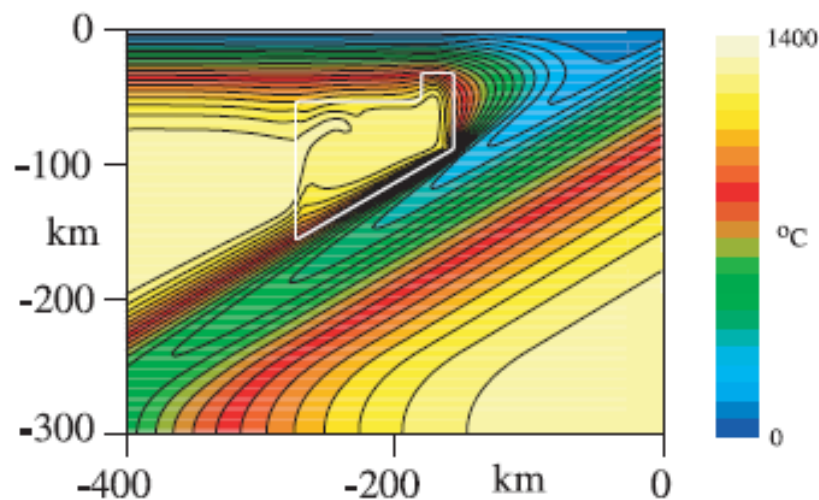
(b) S1B (S)

F: Flat model, S: Step model, I: Inclined model



- ・低粘性域形状を変化させる
- ・低粘性域 = Wet (脱水した水が連続的に上昇)

(Honda & Yoshida, 2005)



※注 ここでは低速度を高温域と解釈

命題

- H.F.は電気伝導度構造からみると、どのように見えるのだろうか？
- 背弧火山の成因を電気伝導度構造からアプローチする

具体的には…

長谷川・中島モデルイメージが正解

➡ Slab Subparallel 高伝導 + 背弧火山下の高伝導

本多・吉田モデルイメージが正解

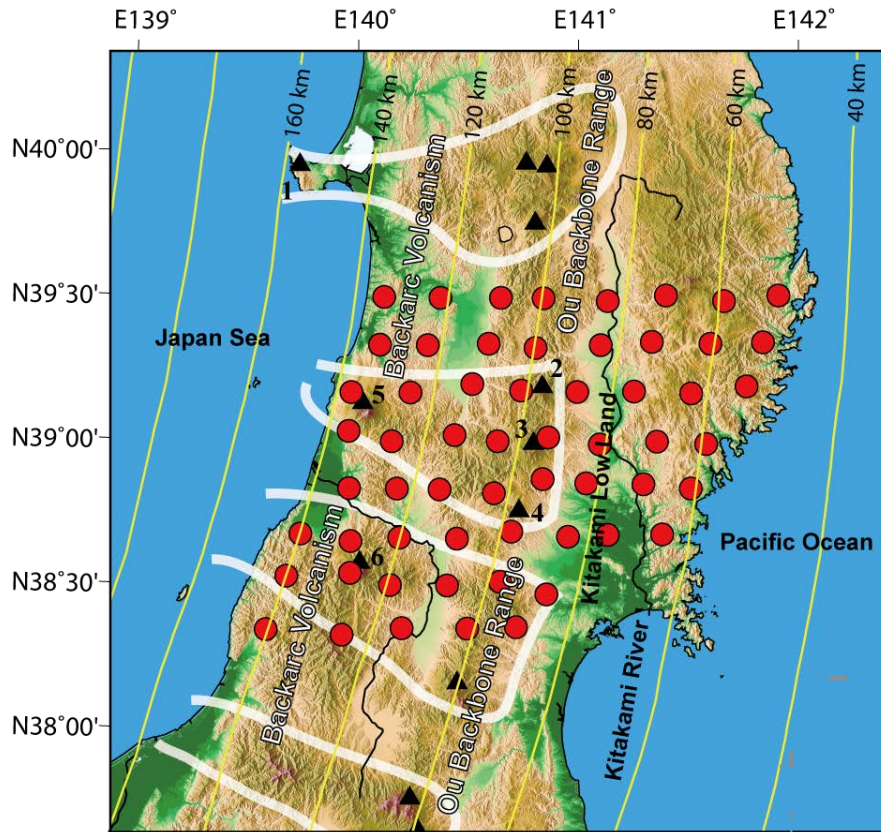
**➡ ウェッジマントルが全般的に高伝導
(Honda & Yoshida, 2005) の Step Model**

※注 実は2013年時点でNakajima et al., (2013)のLow-QをWet領域と考えると、Honda & Yoshida, (2005)とNakajima et al., (2013)でかなり調和的に見えていた。
⇒ 電気伝導度も本多・吉田モデルイメージに近いことが期待される。

観測

● : 長周期MT観測点(59観測点)

▲ : 活火山



黄線: スラブ上面等深線
(Kita et al., 2010; Nakajima et al., 2009)

白線: Hot Fingers (Tamura et al., 2002)

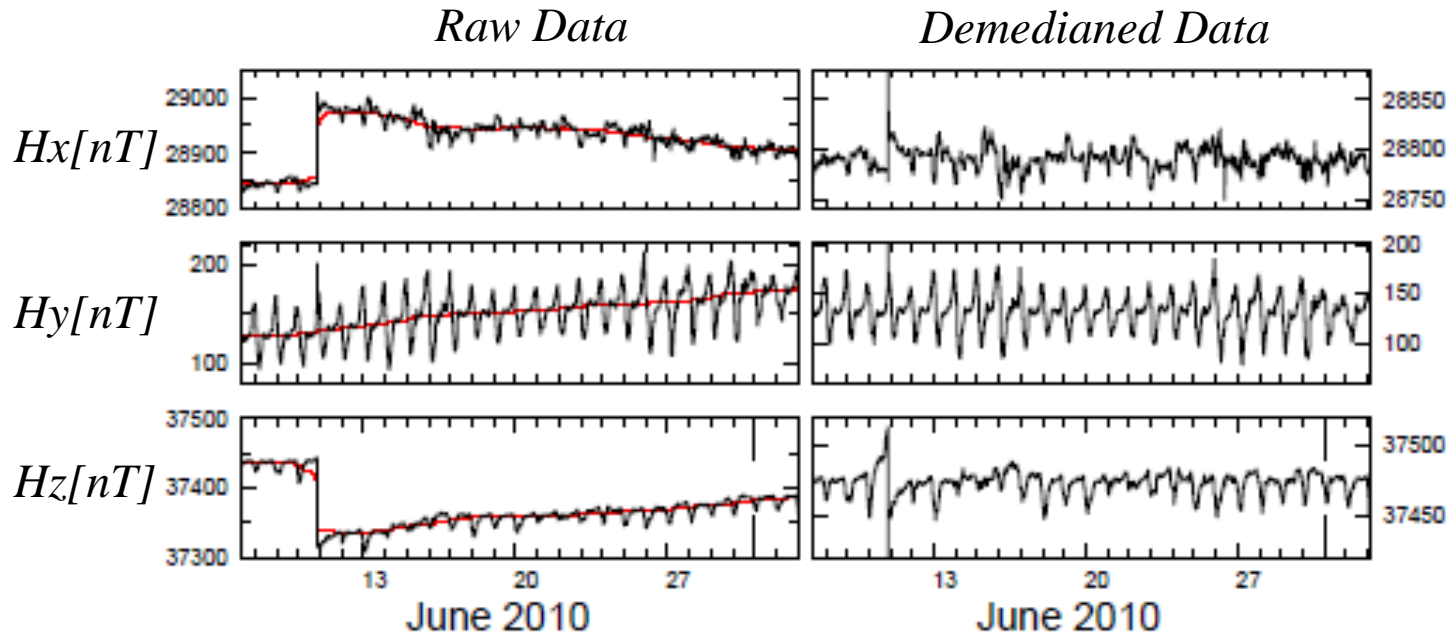


各点2-4 か月観測 (実施期間: 2009年~2013年)

周期帯: 20~61440秒

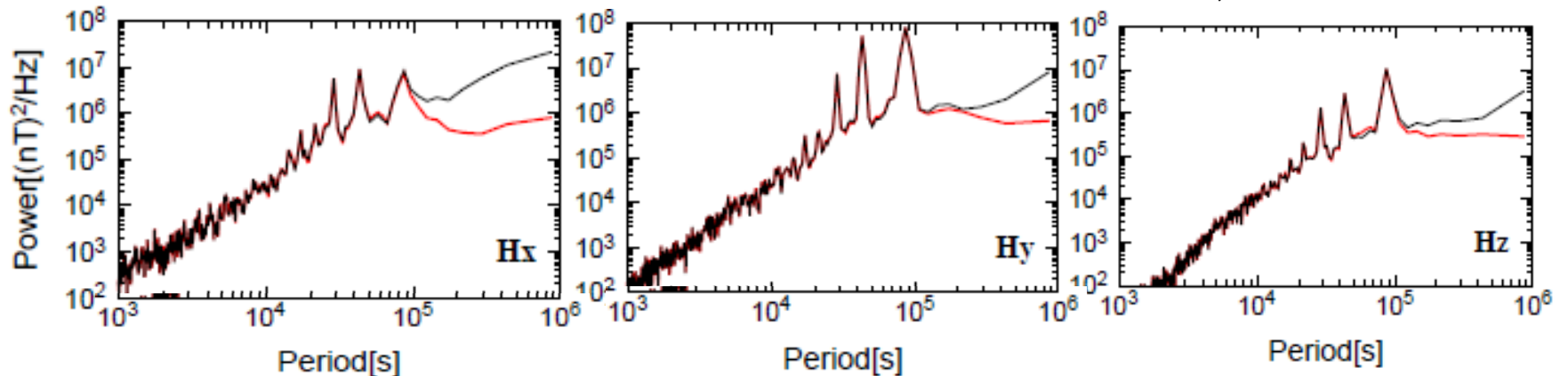
データ時系列処理

Demedian Operation (Time Window: 1 day)

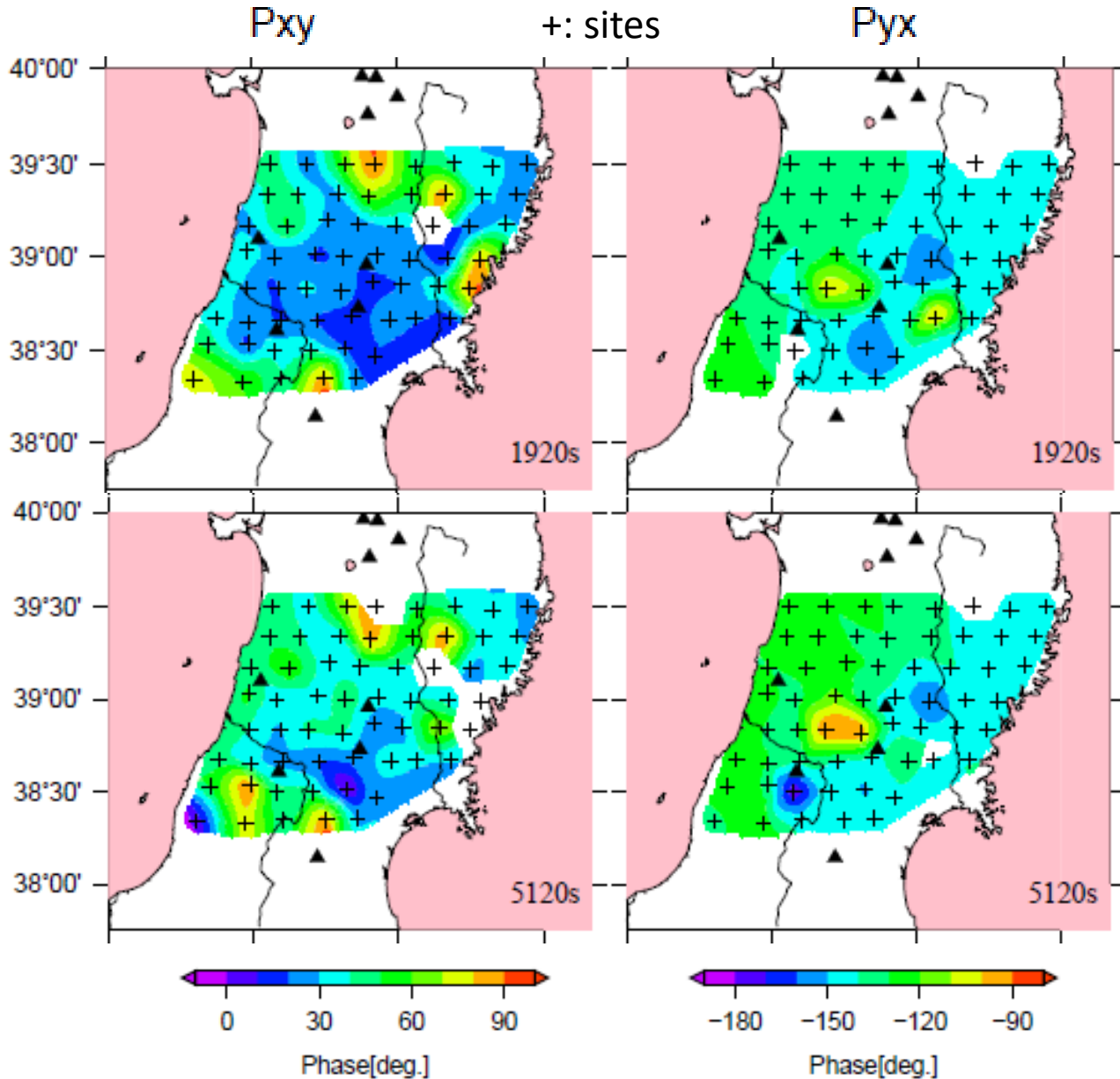


Demedian operation によるパワースペクトル変化 (ジンバル付き磁力計データでの検証)

Black: Raw data, Red: Demedianed data



MT位相応答関数



$P_{xy} \approx TE, P_{yx} \approx TM$

[東側]

P_{yx} 広域的に遅い位相
(スラブを示唆)

+

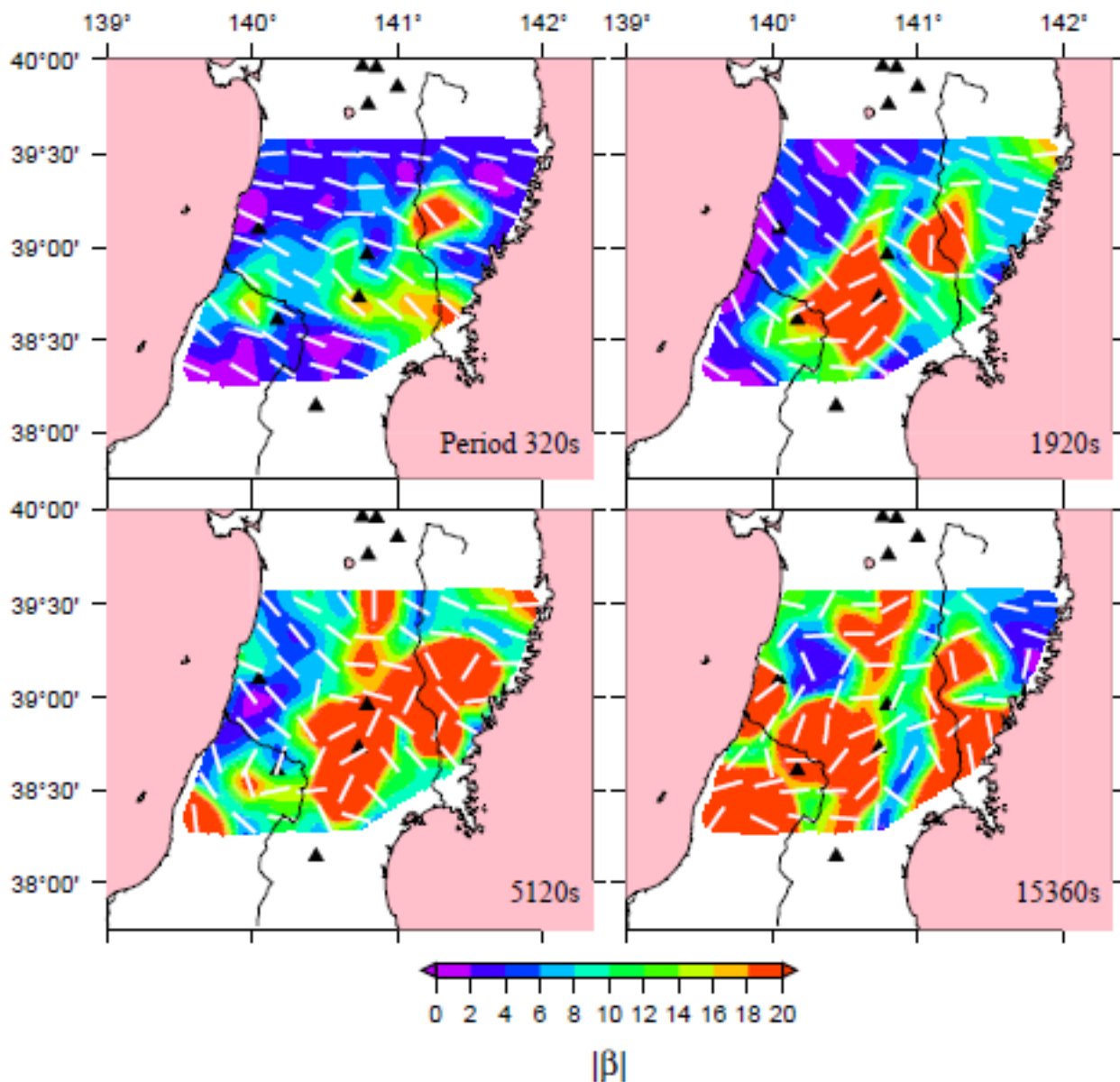
ローカルな異常

P_{xy} 全般的に複雑な傾向

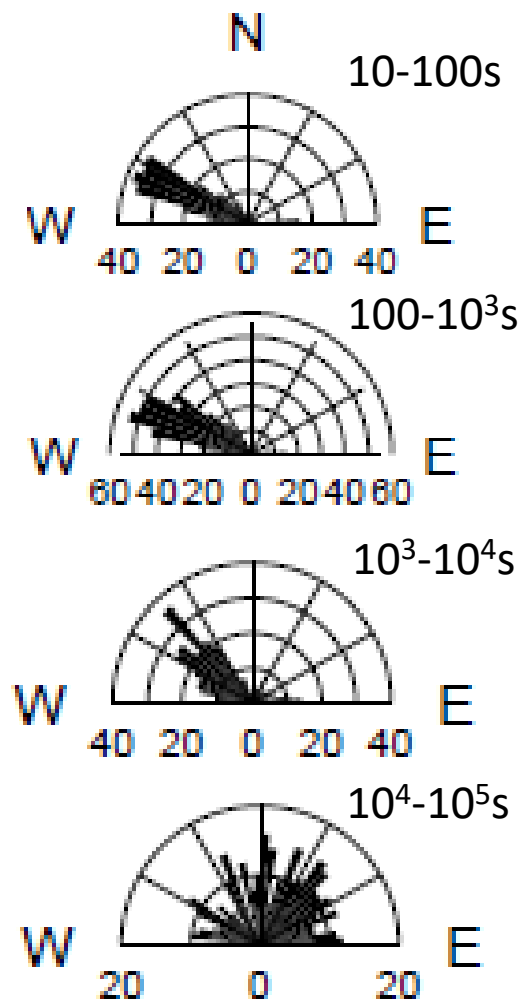
※ *TM mode* は3-D構造中の
2-D的な特徴を抽出する。
(e.g Wannamaker et al., 1984)

MT応答関数では
BIRRP (Chave & Thomson, 2004)
コードを利用した。

Phase tensor skew angle(β), reference frame angle(α)



Rose diagram of α



3-D Inversion

周期：30～61440 s (12 periods)

グリッド：47 (±700km) x 66 (±744 km)
x 50 (1200km)

コード：WSINV3D-MPI
(Siripunvaraporn et al., 2009)

-- Data Space Inversion (Parker, 1994)

-- Occam Inversion (Constable et al. 1987)

$$U(\mathbf{m}, \lambda) = \mathbf{m}^T \mathbf{C}_m^{-1} \mathbf{m} + \lambda^{-1} \{ (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}])^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}]) \}$$

in WSINV3D

$$U(\mathbf{m}, \lambda) = (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) + \lambda^{-1} \{ (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}])^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{F}[\mathbf{m}]) \}$$

\mathbf{C}_d : データ共分散行列 \mathbf{m}_0 : 参照モデル

\mathbf{C}_m : モデル共分散行列 λ : Lagrange係数

ここで $\mathbf{C}_m \propto \exp\left\{-\left(\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i\| / \sqrt{4\tau\delta}\right)^2\right\}$

i : 観測点インデックス

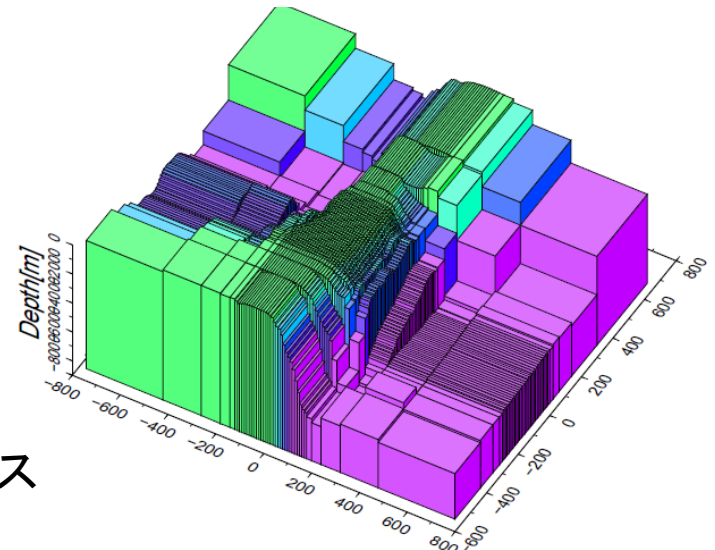
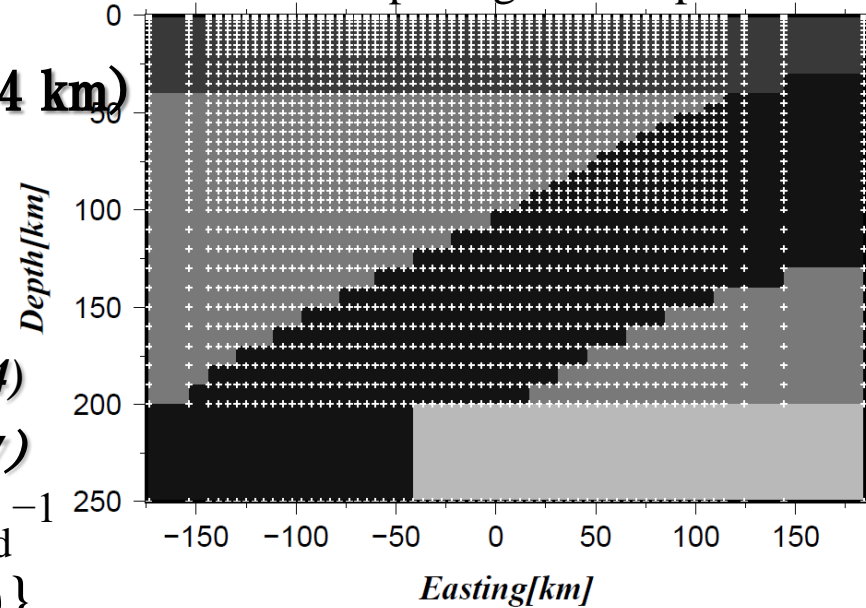
τ : (仮想)緩和時間

δ : (仮想)熱拡散率

$4\tau\delta$: 最尤値2.0

モデルに組み込んだ海底地形(etopo1を参照)

Grid spacing on EW profile



参照モデル

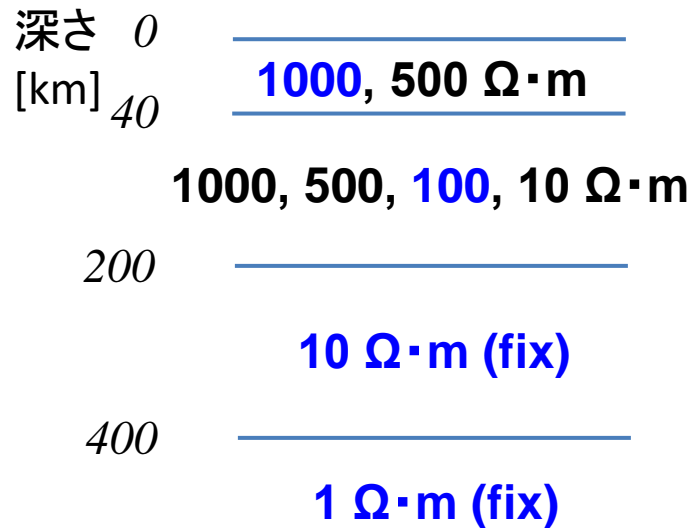
・先験情報入りの種々の参照モデルでInversionを試行錯誤し、最尤モデルを決定

1) 一様モデル ※[] 内は *RMS misfit*

$\rho = 5000$ [3.75], **1000 [2.81]**, 500 [3.01], 100 [3.18], 10 [3.75] $\Omega \cdot m$

2) 層構造

(8 モデル試行)

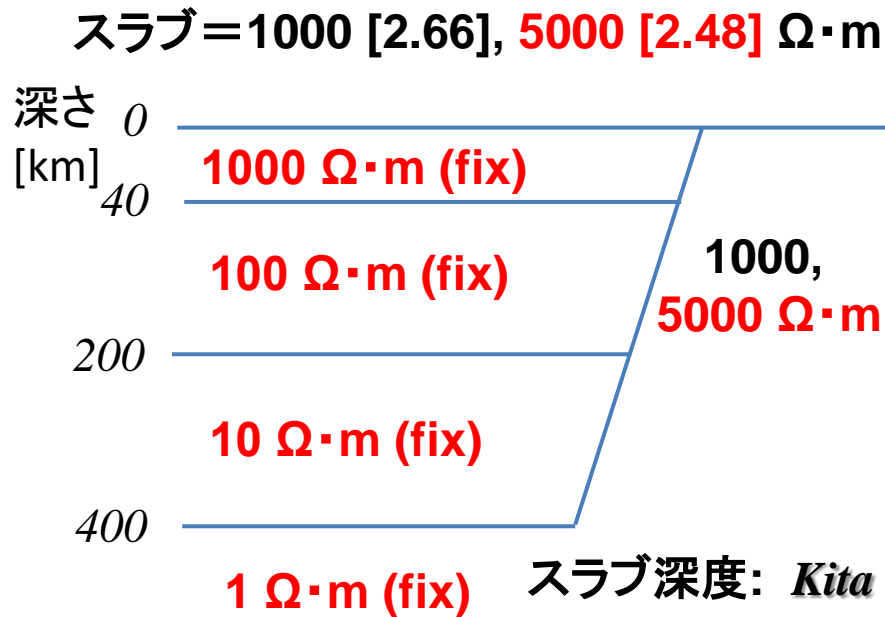


(最尤層構造モデル)

$\rho = 1000$ (地殻),
100(最上部マントル)
[2.72]

3) 層構造 + スラブ

: 層構造は2)の最尤モデル固定



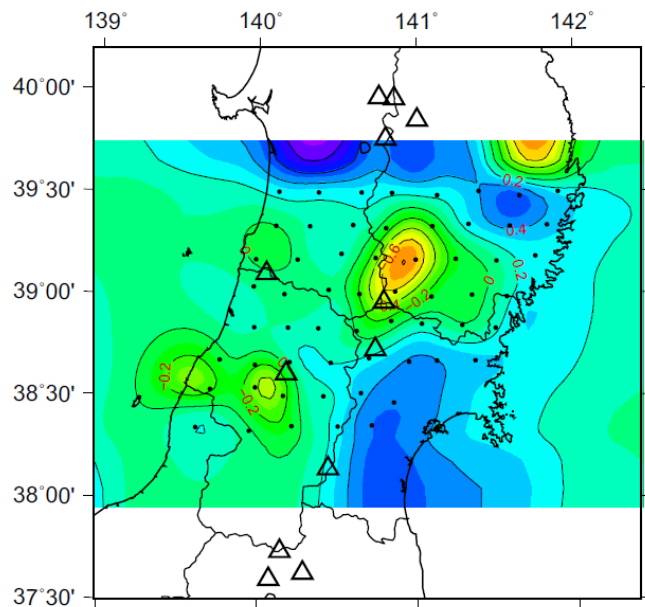
スラブ深度: *Kita et al.(2010), Nakajima et al.(2009)*
スラブ厚さ: 90 km
(*Kawakatsu et al., 2009*)

比抵抗モデル平面図

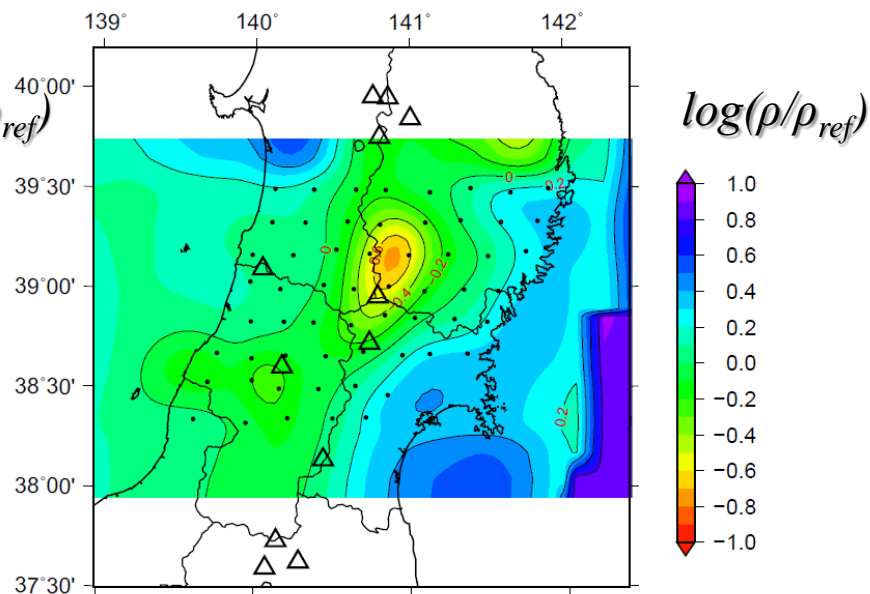
※注: 描画ref.: 層構造モデル

計算ref.: slabモデル

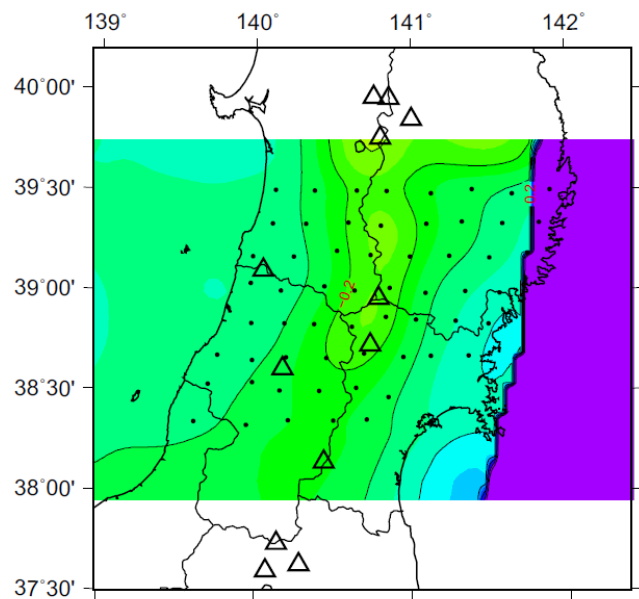
Depth 22.50km



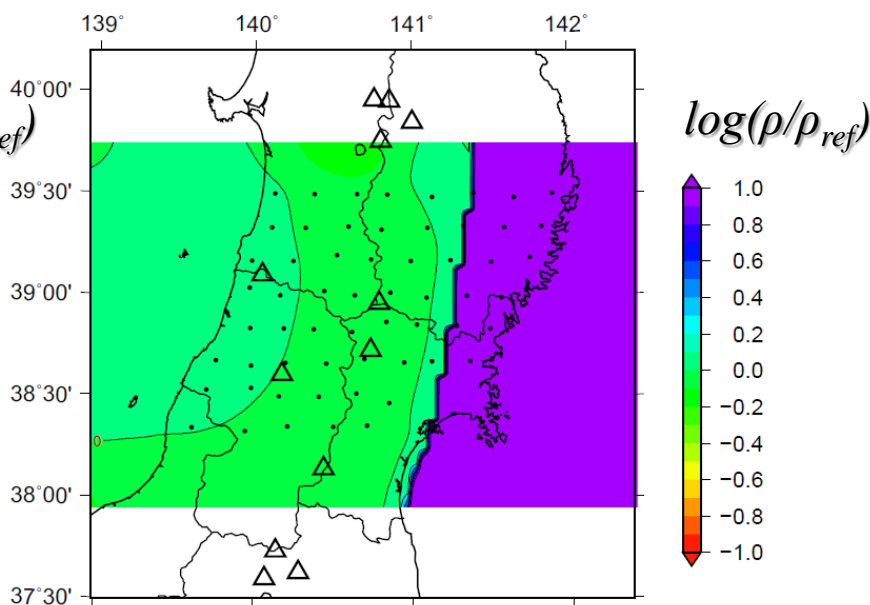
Depth 37.50km



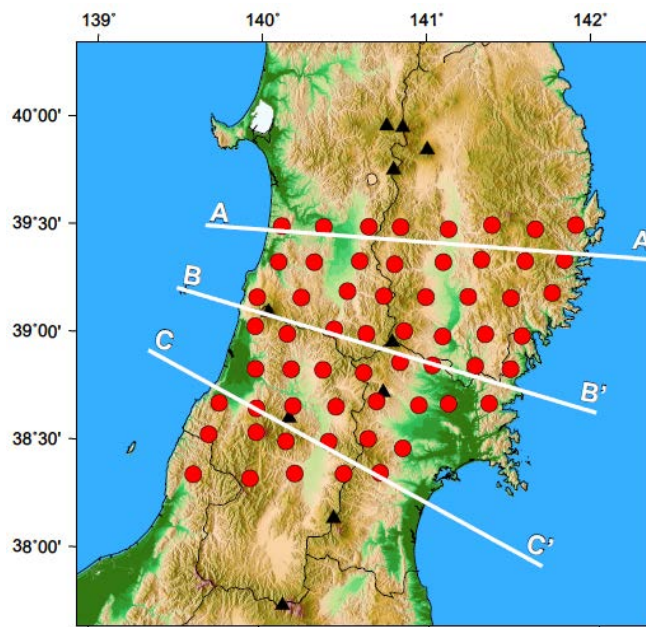
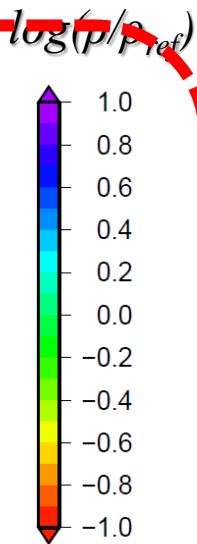
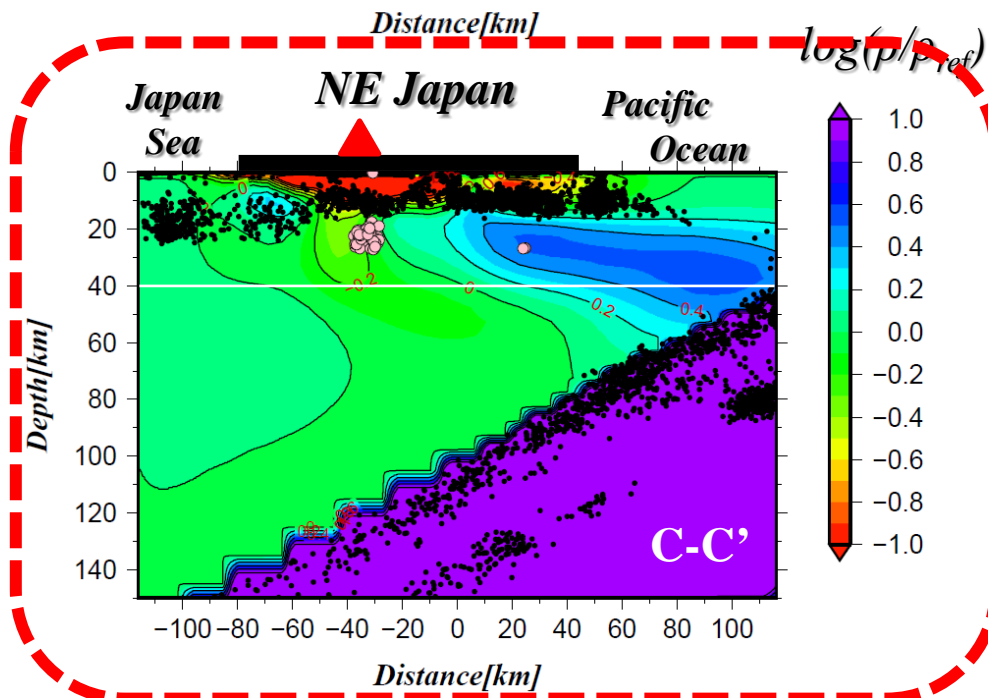
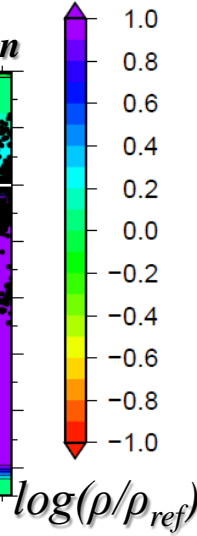
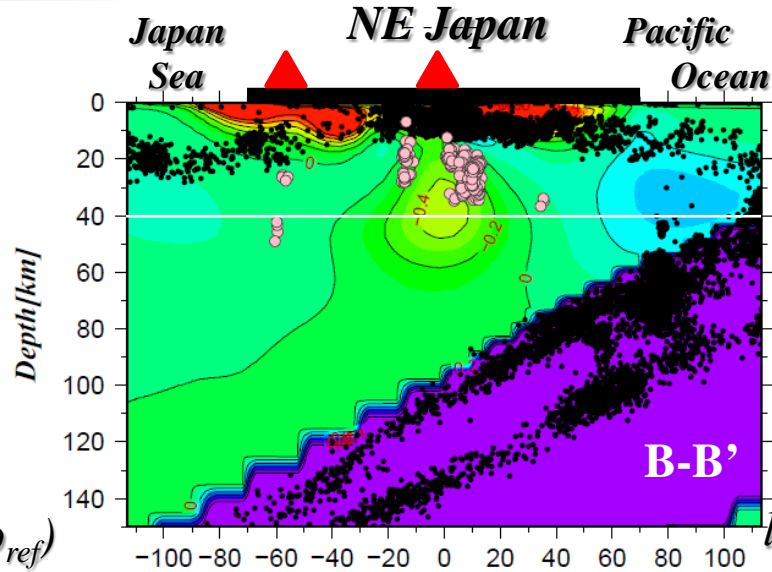
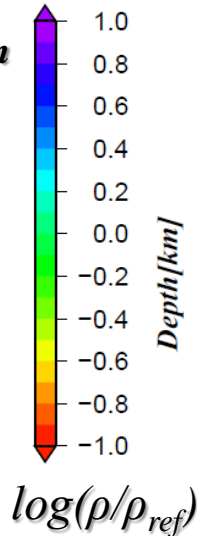
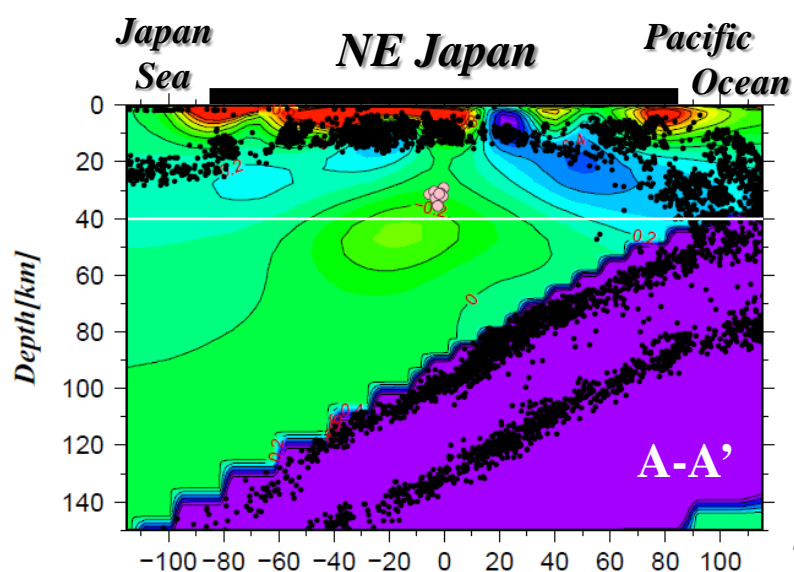
Depth 52.50km



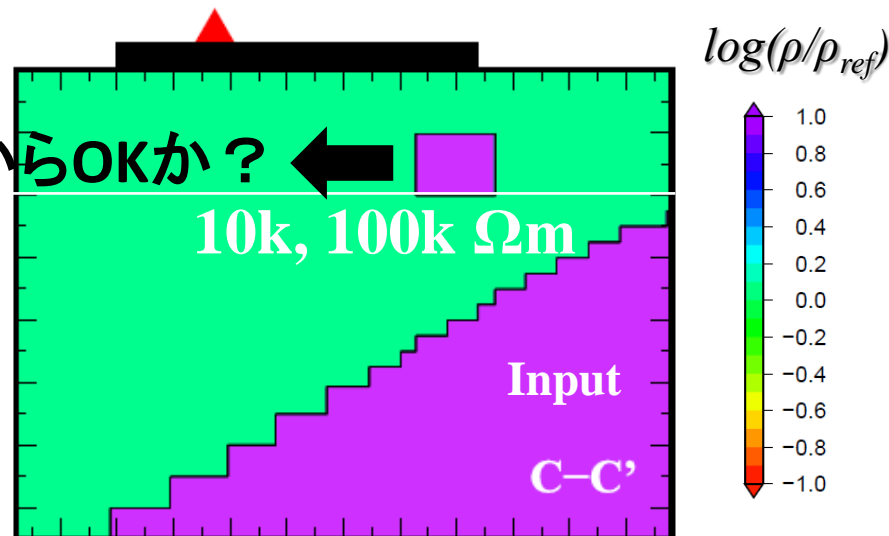
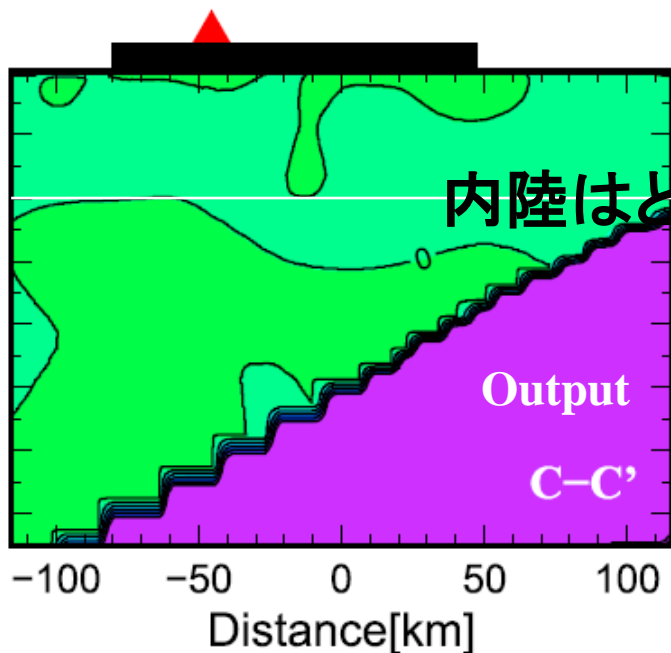
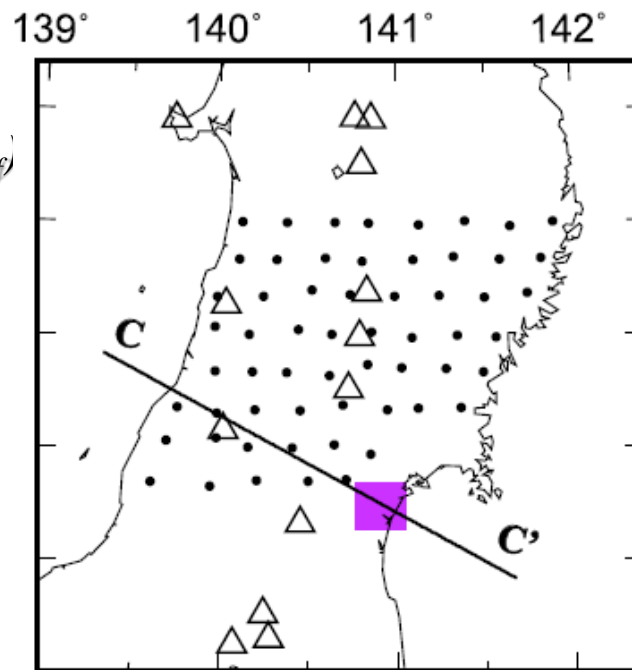
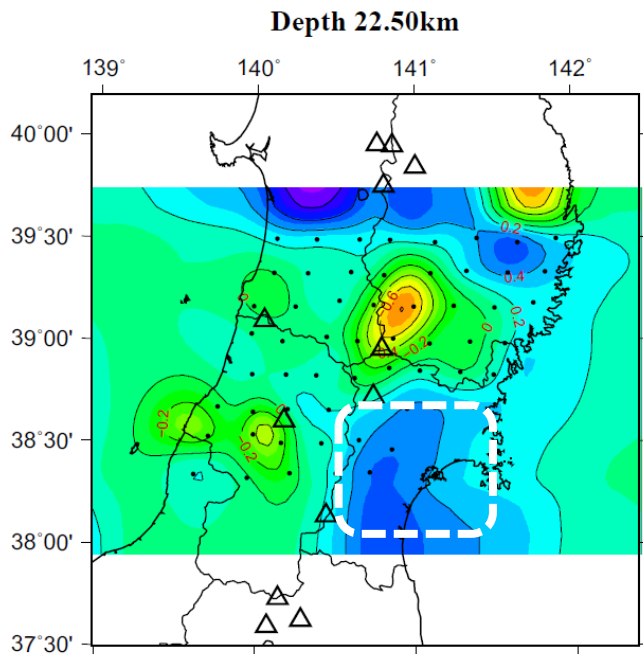
Depth 72.50km



比抵抗モデル (海溝軸直交断面図)



Box test (疑似インパルステスト)：下部地殻抵抗体



疑似 Fréchet 微分

深さ20-40kmの(水平方向の)Fréchet微分 K_{ij} を考える

$$\delta Z_{ij}(\mathbf{r}_k, \omega) = \int_V K_{ij}(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}', \mathbf{m}, \omega) \delta \mathbf{m}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

Z_{ij} : (i,j)成分のMT impedance ω : 角周波数 \mathbf{r}_k : k 観測点の位置 \mathbf{m} : モデルパラメータベクトル

上記の**全観測点の積算** Δ_{ij} を考慮し、 \mathbf{m} を電気伝導度の対数スケールとし、その摂動として深さ20-40kmのある位置 \mathbf{x} における 20^3km^3 の 1S/m の立方体を与えて数値計算する

$$\Delta_{ij}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_k^{sites} K_{ij}(\mathbf{r}_k, \mathbf{x}, \sigma_0(\mathbf{x}), \omega) \cdot \delta \log(\sigma) \cdot \delta V$$

$$\Delta_{ij}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_k^{sites} \delta Z_{ij}(\mathbf{r}_k, \omega) \quad \delta V: \text{摂動体積 (}20^3\text{km}^3\text{)} \quad \sigma: \text{電気伝導度}$$

ここで1次元の解析解(Oldenberg, 1979)を参考にし、3次元でも同様の形式をとるものと仮定

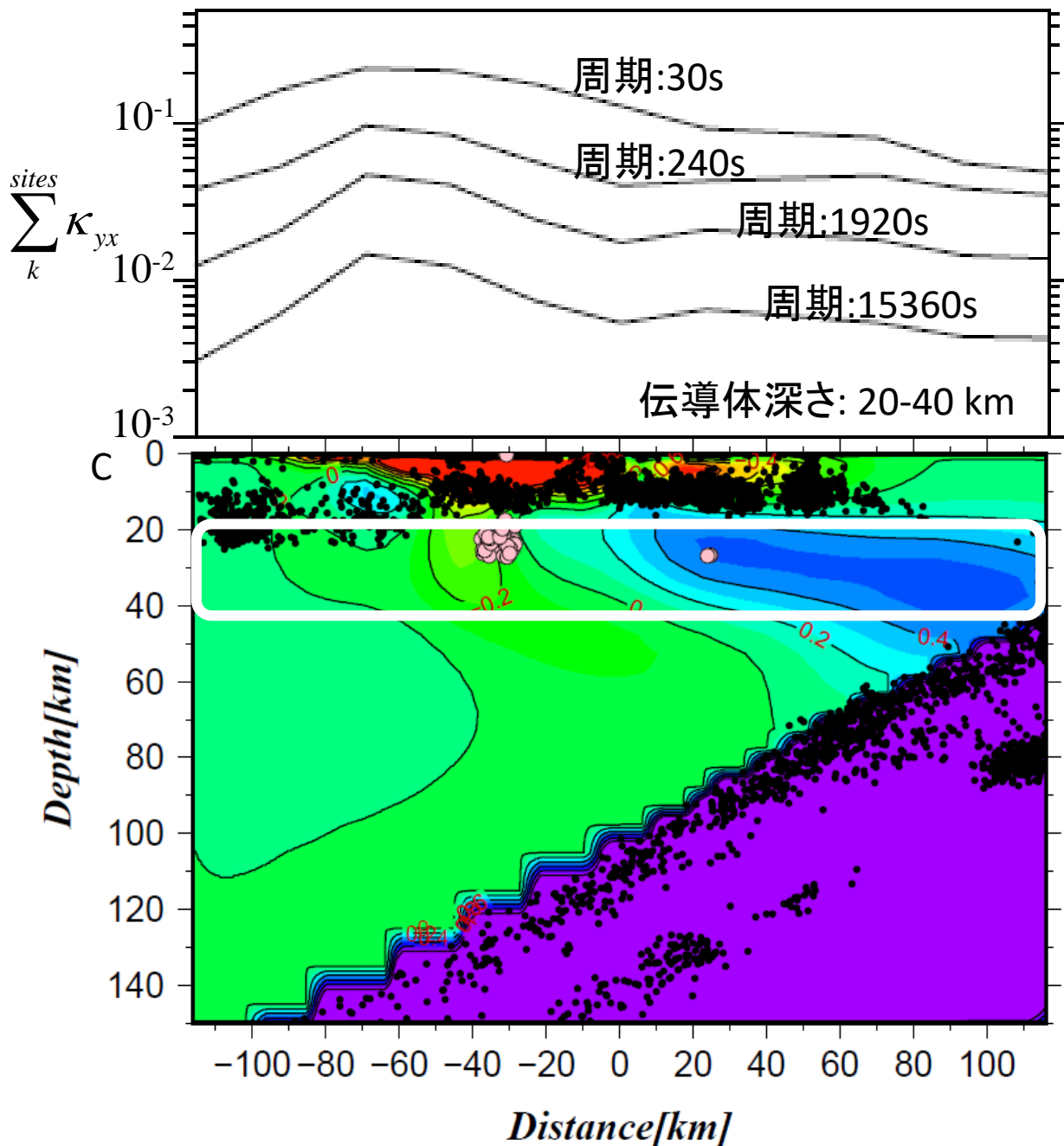
viz.

$$\Delta_{ij}(\mathbf{x}, \omega) = \sigma_0(\mathbf{x}) \cdot \delta \log(\sigma) \cdot \delta V \sum_k^{sites} K_{ij}(\mathbf{r}_k, \mathbf{x}, \omega)$$

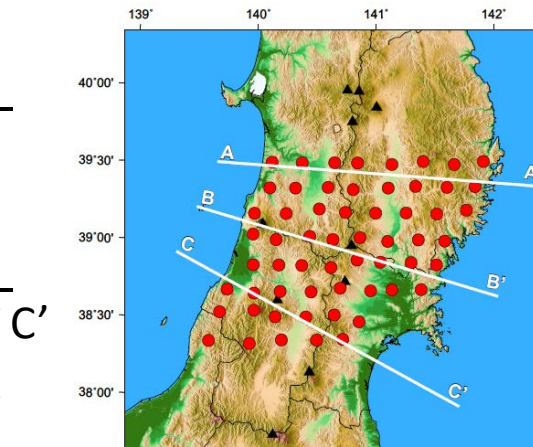
[$\Omega^2/\text{m}^2/\log(\text{S/m})$]

$[\times 10^{-6} \Omega^2/\text{m}^2/\log(\text{S}/\text{m})]$

C-C' 側方疑似 Fréchet 微分



LineC-C' に沿って1 S/m
 20^3km の伝導体を移動して計算



高伝導体の位置⇒分解能が良い

しかし、

相対的に側方の分解能が悪い

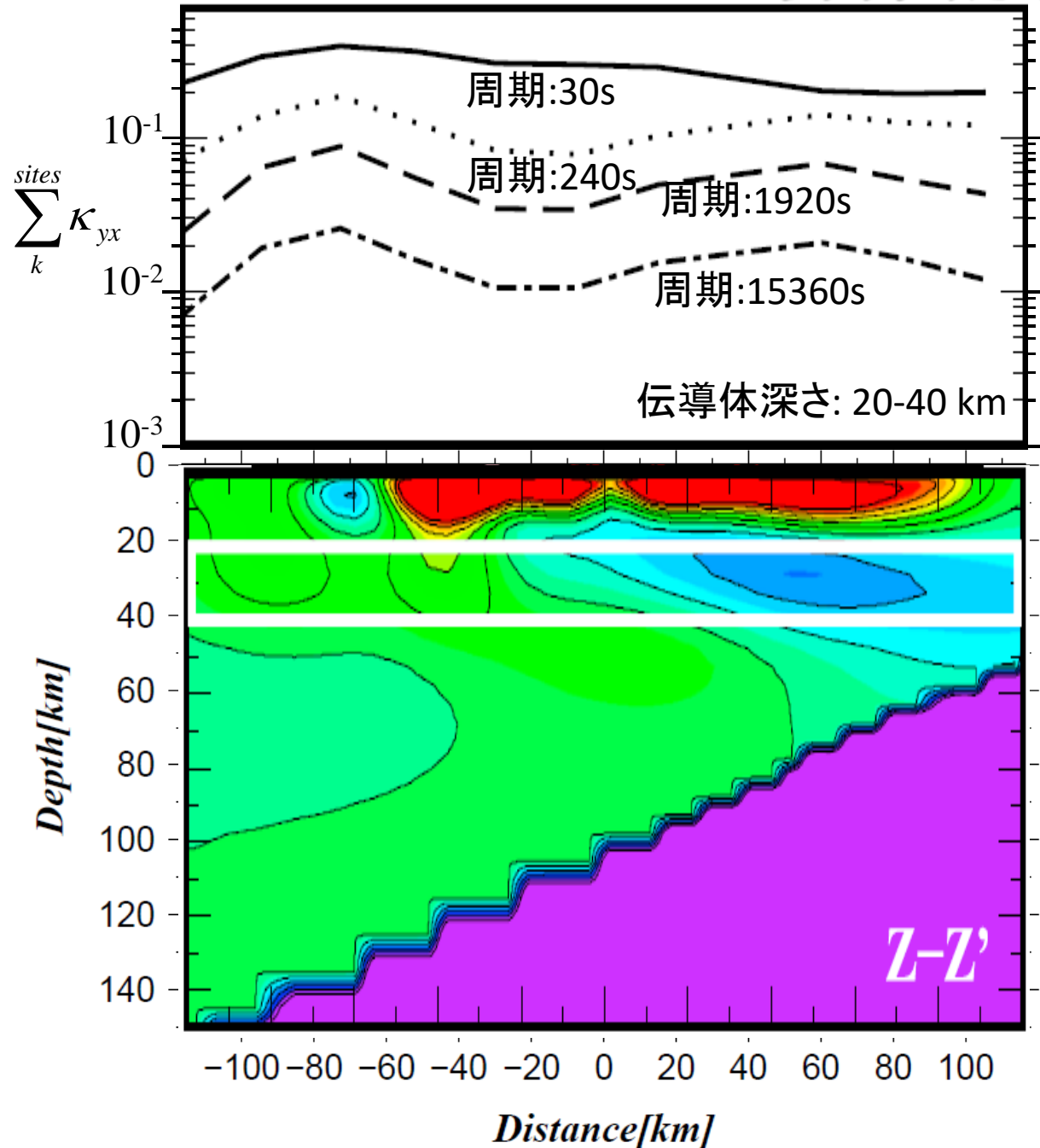


高伝導体が側方に、
より広がっている可能性

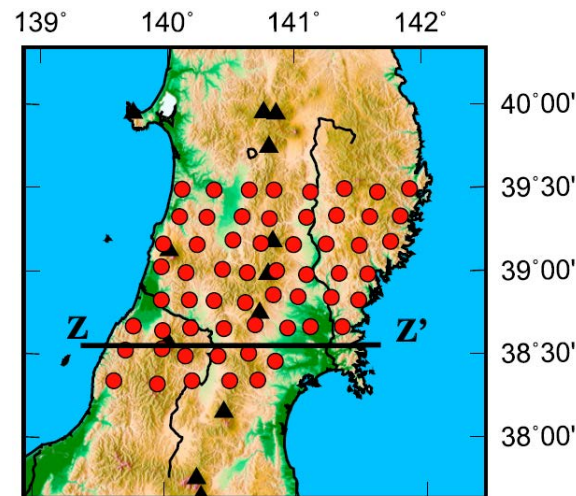
オーバーターン?
漏斗状?

$[\times 10^{-6} \Omega^2/\text{m}^2/\log(\text{S}/\text{m})]$

Z-Z' 側方疑似 Fréchet 微分



Line Z-Z' に沿って1 S/m
 20^3km の伝導体を移動して計算



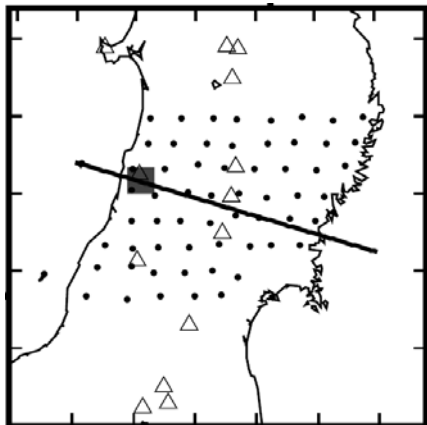
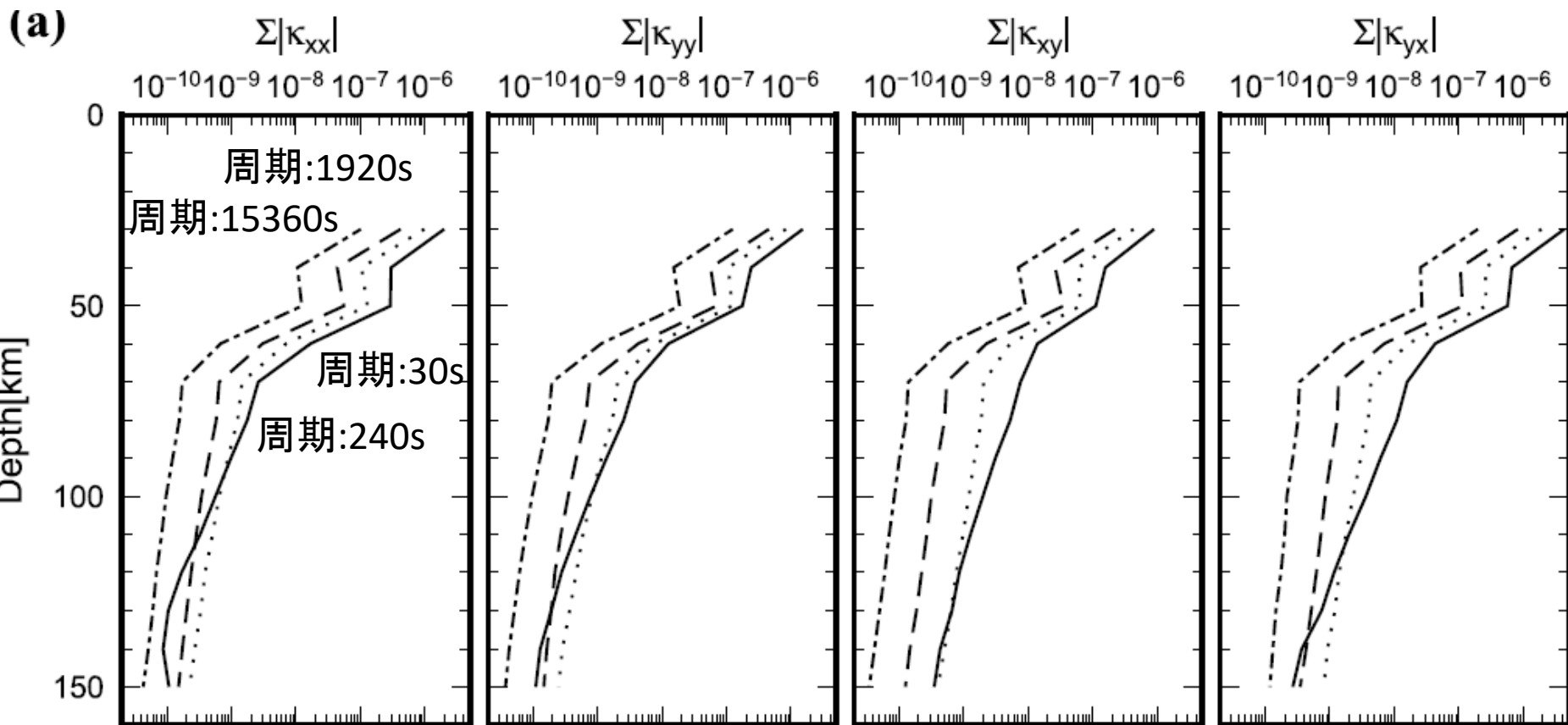
背弧側高伝導体の隣接部分
⇒分解能が良い



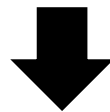
高伝導体は背弧側限定
の可能性が高い

**月山 (背弧火山の一つ)
はVF付近のプリューム
オーバーターン**

背弧プリュームは無いのか？：背弧鉛直方向疑似Fréchet微分



深さ60 km程度までは分解能あり



背弧火山の最上部マントル(60km以浅)に伝導体は無い
スラブに沿う深部conductor(100km以深)は分解能無し

プリューム・オーバーターンの原動力は何か？

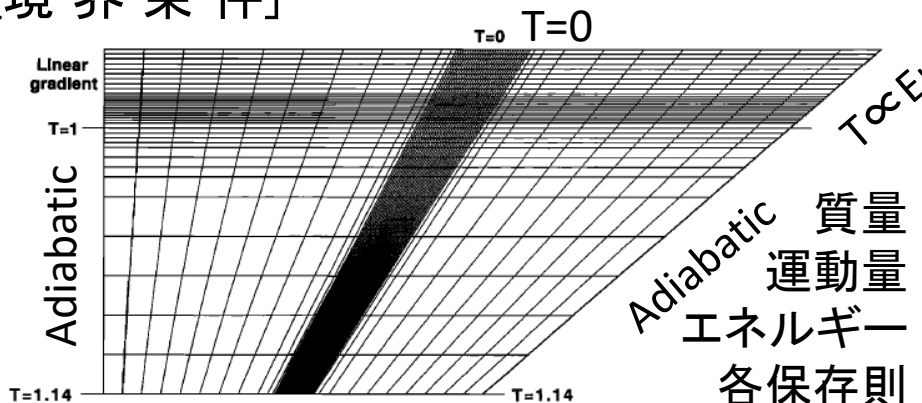
: **Flow Reverse** by Davies & Stevenson (1992)

[Buoyancy #] (~ Rayleigh #)

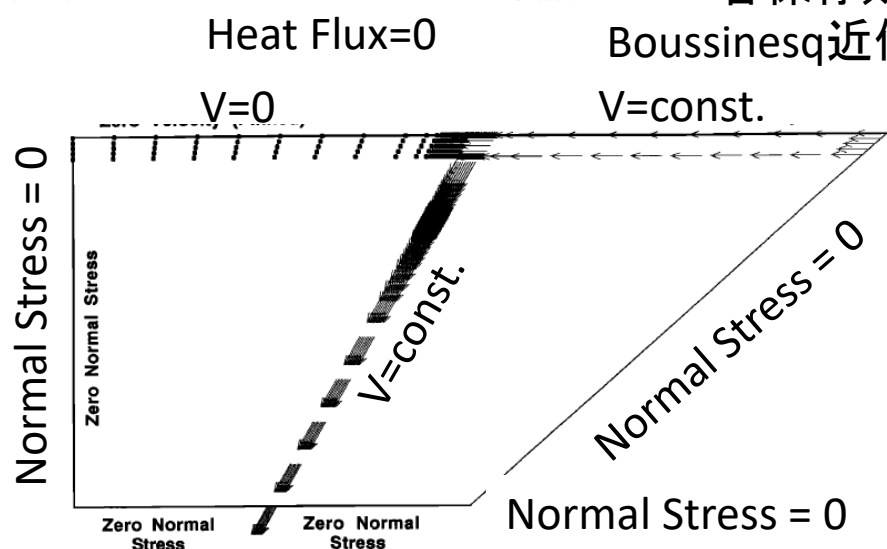
$$d^3 \Delta \rho g / (\kappa \eta)$$

d^3 : 体積 κ : 熱拡散率 $\Delta \rho$: 密度異常
 η : 粘性率

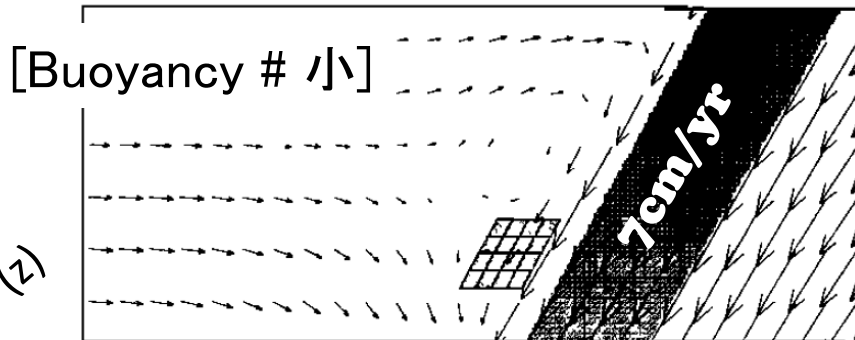
[境界条件]



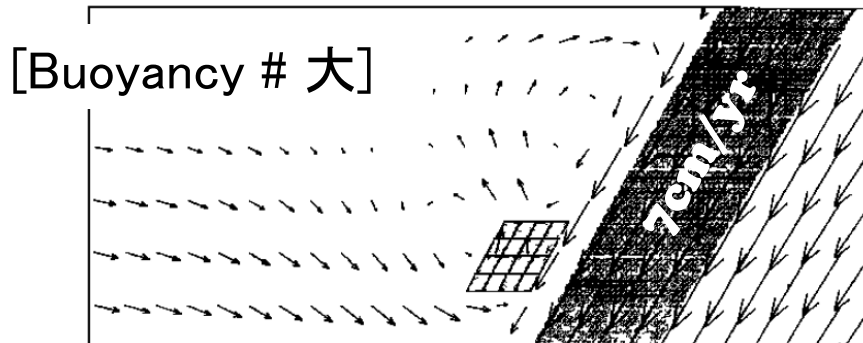
質量
運動量
エネルギー
各保存則
Boussinesq近似



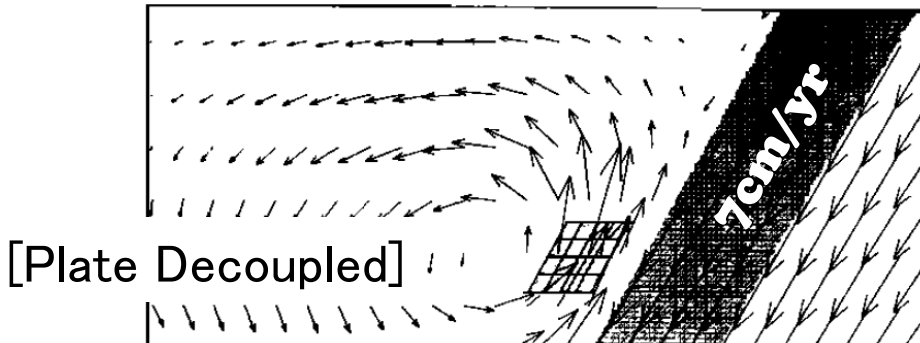
c) Buoyancy Number = 10^6 [速度場]



d) Buoyancy Number = $2 \cdot 10^6$



c) Buoyancy Number = $2 \cdot 10^6$ Viscos



臨界Buoyancy Numberから電気伝導度試算

$$\cdot d^3 \Delta \rho g / (\kappa \eta) \sim 10^6$$

 含水率推定 with $\Delta \rho \sim 2 \text{ wt}\%$

(仮定) d^3 : 半径20kmの円柱 κ : $10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$

$\rho_{\text{マントル}}$: $3.34 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ η : $7 \times 10^{18} [\text{Pa s}]$

(Davies & Stevenson, 1992)

含水橄欖岩電気伝導度実験式

$$\log \sigma = 2.172 - \frac{860.82 - 204.46\sqrt{W}}{T - 1146.8} \quad (\text{Ni et al., 2011})$$

σ : 電気伝導度[S/m], W : 含水率[wt%], T : 温度[K]

$T=1130-1180^\circ\text{C}$ (Davies & Stevenson, 1992) とすると、

$$\sigma = 0.9 \sim 2 [\text{S}/\text{m}]$$

Speculation :

Currie & Hyndman (2006) の沈み込み帯イメージ

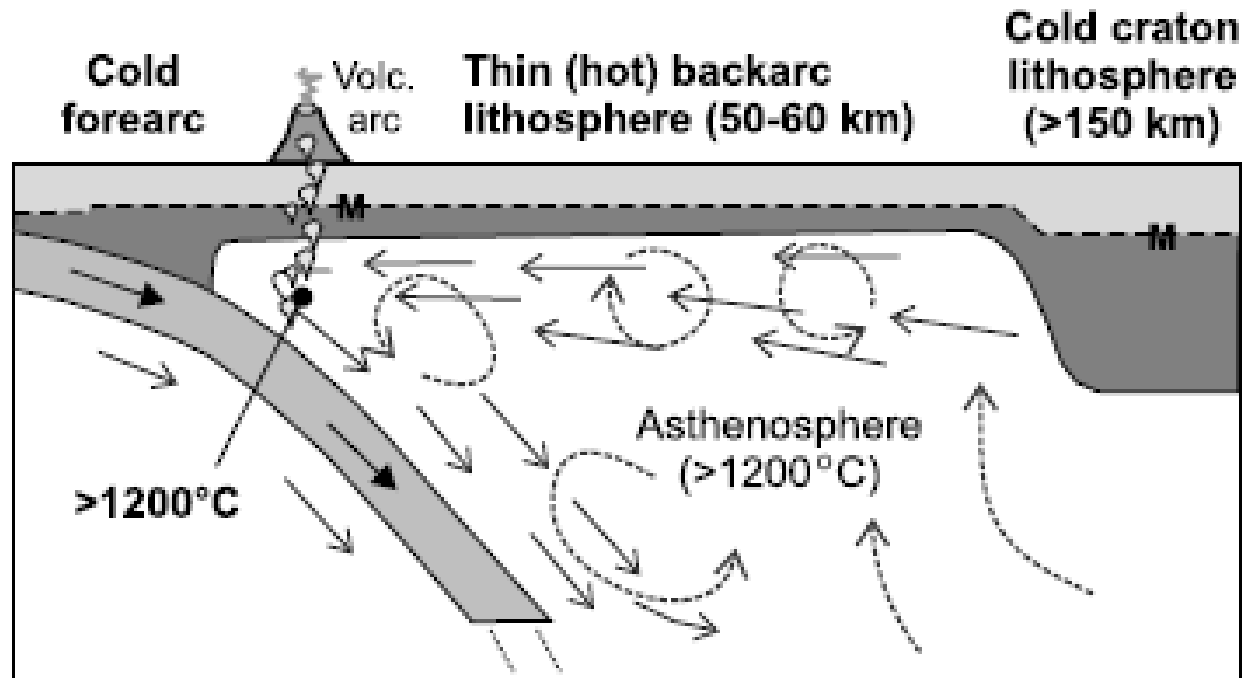
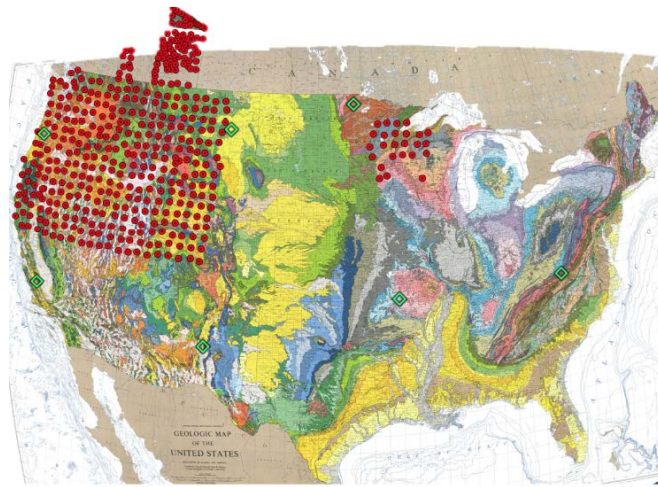


Figure 1. Schematic cross section through a continental subduction zone. The main driving forces for back-arc mantle flow are viscous coupling with the subducting slab (solid arrows) and thermal buoyancy (dashed arrows). The landward limit of the back arc in some areas is an Archean craton.

(Currie & Hyndman, 2006)



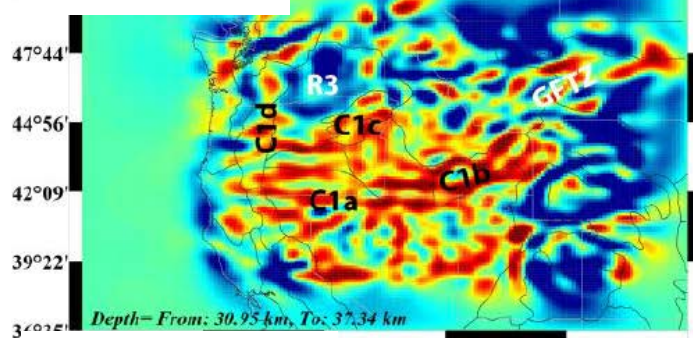
Speculation :

EM study in EMScope (USArray EM branch)

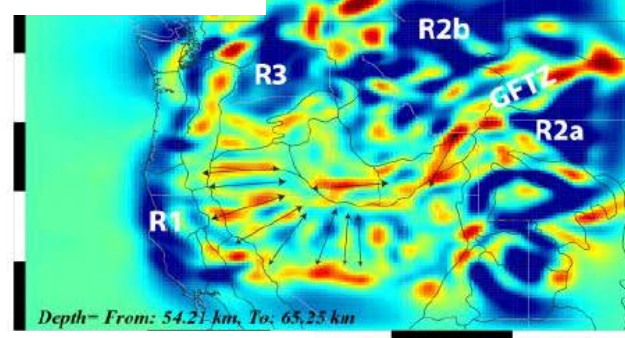
325 sites
ca. 70 km in separation
Period: 20-20000 sec

(Egbert et al., 2012 EMIW abstract)

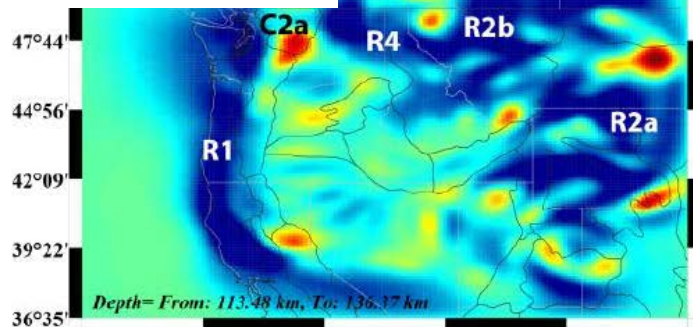
D:37-40km -119°27' -114°34' -109°41' -104°48'



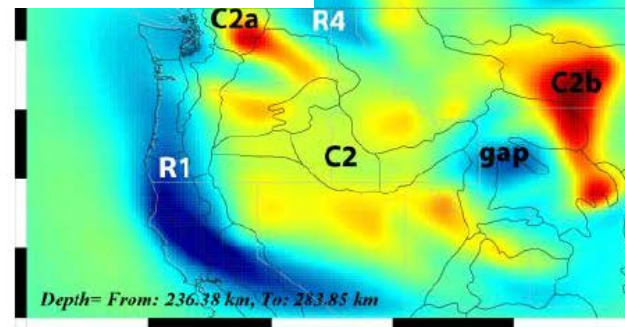
D:54-65km 9°27' -114°34' -109°41' -104°48'



D:113-136km



D:236-264km

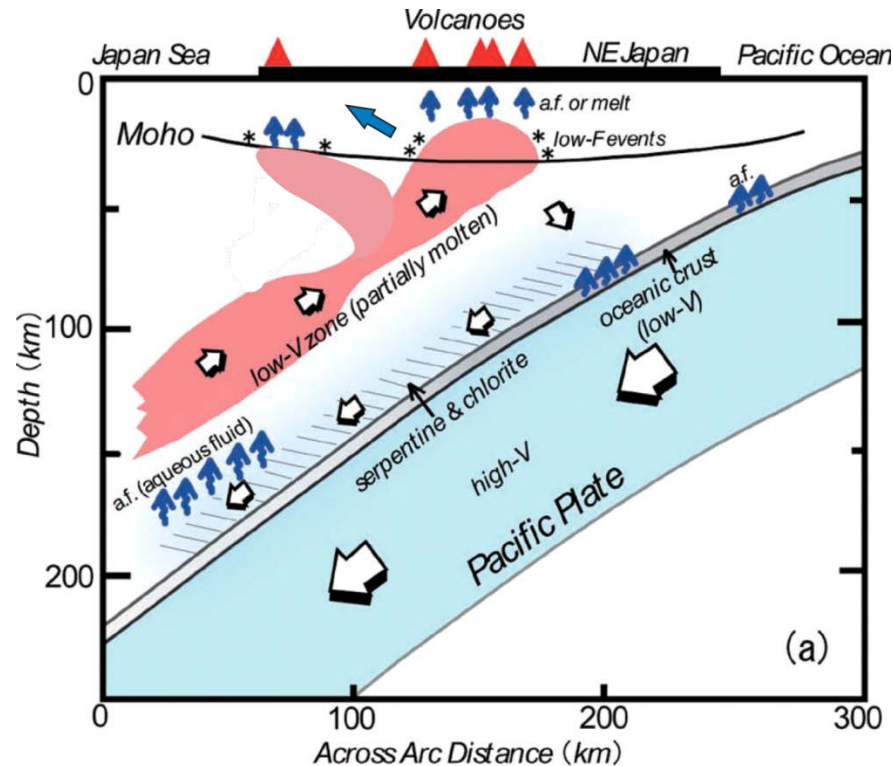
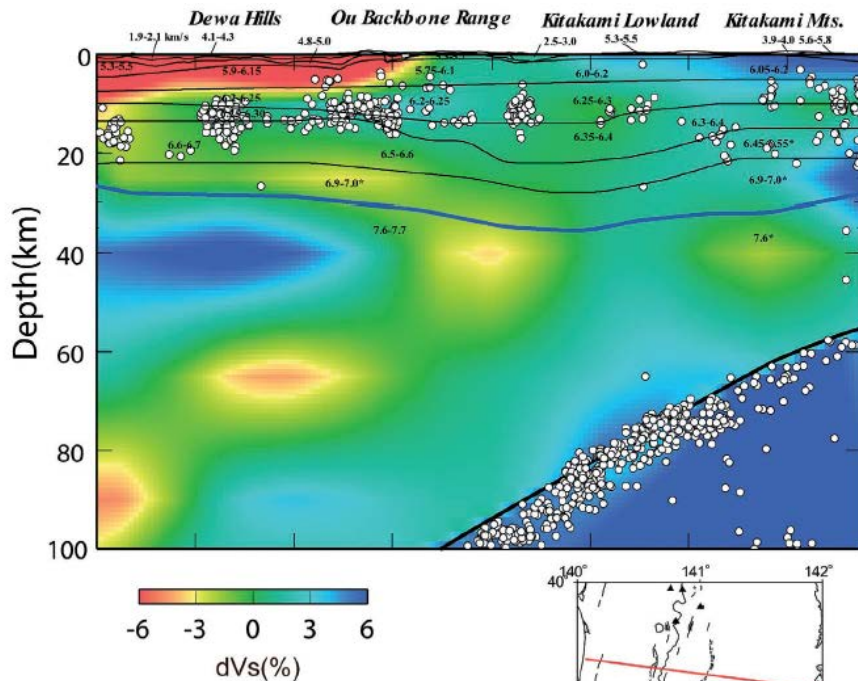


R1: Juan de Fuca
R2a,b: Farallon
Lithosphere (craton)
C1a-d: Beneath Moho
streaky conductors
C2(a): UM conductor
GFTZ: Great Falls
Tectonic Zone (suture)

(Meqbel et al., 2012
EMIW abstract)



鳥海山はオーバーターンがない？



Hasegawa et al., (2008)
J. Geograph (in Japanese)

Orgin. from Nakajima et al.,(2001)
Iwasaki et al., (2001)

Modified from Hasegawa & Nakajima (2004)

地殻内でオーバーターン

[課題] 地殻は粘性率が高いので、異なった原動力を考えないといけない。

まとめ

命題

長谷川・中島モデルイメージ？

➡ Slab Subparallel 高伝導＋背弧火山下の高伝導

本多・吉田モデルイメージ？

➡ ウェッジマントルが全般的に高伝導
(Honda & Yoshida, 2005) の Step Model

答え

第三のモデル