

## 南九州におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う 2次元温度構造モデリング

神戸大学 都市安全研究センター/理学研究科 吉岡 祥一  
神戸大学 都市安全研究センター 末永 伸明  
防災科学技術研究所 松本 拓己  
神戸大学 都市安全研究センター 季 穎鋒

### 要旨

日向灘では、1996年10月と12月の2つのプレート境界地震に伴う余効すべりが見出されている。九州では、低周波地震や深部低周波微動はほとんど見出されていないが、宮崎県の太平洋岸下で深部低周波微動の集中域が存在することが指摘されている。このような地震イベントの発生メカニズムの解明に向けて、同地域において、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う時間に依存する2次元箱型温度構造モデリングを行った。その結果、フィリピン海プレート上面の余効すべりが発生した領域の温度は、約300~350°Cと求まった。深部低周波微動が発生しているマントルウェッジ域での温度は450~650°Cと推定された。また、含水MORBと超苦鉄質岩の相図を用いて沈み込むフィリピン海プレート内の含水率の空間分布も推定した。その結果、余効すべりが発生した領域では、脱水を伴う顕著な相転移は認められなかったが、深部低周波微動の発生域の直下の海洋地殻で、ローソン石-青色片岩が、ローソン石-エクロジヤイトに相転移し、脱水している可能性が見出された。得られた含水量の分布は地震波トモグラフィーから得られた $V_p/V_s$ 比の分布と調和的であった。以上のことより、余効すべりはプレート境界での温度条件によって制御されており、プレート境界での固着~安定すべりの遷移領域の上限付近で発生しているものと考えられる。他方、深部低周波微動の発生を引き起こす主要因を決定することは困難であった。しかしながら、深部低周波微動の発生域では、高い $V_p/V_s$ 比が南九州下の深さ30~40 kmで水平に広がっていることを考慮すると、温度と脱水の両方ともが深部低周波微動の発生に重要な役割を果たしていると考えられるかもしれない。

キーワード: 2次元温度モデリング、深部低周波微動、余効すべり、スラブからの脱水、地殻熱流量

## 参考文献

- Ashi, J., Tokuyama, H., Taira, A., 2002. Distribution of the methane hydrate BSRs and its implication for the prism growth in the Nankai Trough. *Mar. Geol.* 3110, 1-15.
- Ashi, J., Tokuyama, H., Ujiie, Y., Taira, A., 1999. Heat flow estimation from gas hydrate BSRs in the Nankai Trough, implications for the thermal structure of the Shikoku Basin. *Suppl. EOS Trans.*, AGU 80 (46), T12A-02.
- Burkett, E.R., Billen, M.I., 2010. Three-dimensionality of slab detachment due to ridge trench collision: laterally simultaneous boudinage versus tear propagation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q11012. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GC003286>.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.* 181, 1-80.
- Gorbatov, A., Kostoglodov, V., 1997. Maximum depth of seismicity and thermal parameter of the subducting slab: general empirical relation and its application. *Tectonophysics* 277, 165-187.
- Grose, C., 2012. Properties of oceanic lithosphere: revised plate cooling model predictions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 333-334, 250-264.
- Hacker, B., Abers, G., Peacock, S., 2003. Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H<sub>2</sub>O contents. *J. Geophys. Res.* 108. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JB001127>.
- Hirose, F., Nakajima, J., Hasegawa, A., 2008. Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *J. Geophys. Res.* 113, B09315.
- Honda, S., 1997. Mantle dynamics II—mechanics, in Iwanami-koza. *Earth and Planetary Science 10 Dynamics of the Earth's Interior*. Iwanami-Shoten, Tokyo, pp. 73-121 (in Japanese).
- Hyndman, R., Wang, K., Yamano, M., 1995. Thermal constraints on the seismogenic portion of the southwestern Japan subduction thrust. *J. Geophys. Res.* 100, 15373-15392.
- Idehara, K., Yabe, S., Ide, S., 2014. Regional and global variations in the temporal clustering of tectonic tremor activity. *Earth, Planets and Space* 66. <http://dx.doi.org/10.1186/1880-5981-66-66>.
- Ito, K., 1990. Regional variations of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland-earthquakes. *J. Phys. Earth* 38, 223-250.
- Kimura, G., Hashimoto, Y., Kitamura, Y., Yamaguchi, A., Koge, H., 2013. Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid 4 crustal growth in SW Japan. *Tectonics* 33, 1219-1238.
- Matsubara, M., Obara, K., 2011. The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a

- strong velocity gradient with the Pacific plate. *Earth Planets Space* 63, 663–667.
- Matsumoto, T., 2007. Terrestrial heat flow anomaly at non-volcanic area in Southwest Japan based on the NIED hi-net. Japan Geoscience Union Meeting 2010, T154-001 (in Japanese).
- Nakajima, J., Hasegawa, A., 2007. Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: slab geometry and its relationship to arc magmatism. *J. Geophys. Res.* 112, B08306.
- Omori, S., Kita, S., Maruyama, S., Santosh, M., 2009. Pressure-temperature conditions of ongoing regional metamorphism beneath the Japanese Islands. *Gondwana Res.* 16, 458-469.
- Research Group for the Quaternary Tectonic Map, 1968. Quaternary tectonic map of Japan. *Quat. Res.* 7, 182-187 (in Japanese).
- Segall, P., Bugrmann, R., Matthews, M., 2000. Time-dependent triggered afterslip following the 1989 Loma Prieta earthquake. *J. Geophys. Res.* 105, 5615-5634.
- Shiono, K., 1988. Seismicity of the SW Japan arc—subduction of the young Shikoku Basin. *Mod. Geol.* 12, 449-464.
- Sibson, R.H., 1982. Fault zone models, heat flow and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 72, 151-163.
- Suenaga, N., Yoshioka, S., Matsumoto, T., 2016. Relationships among temperature, dehydration of the subducting Philippine Sea plate, and the occurrence of a megathrust earthquake, low-frequency earthquakes, and a slow slip event in the Tokai district, central Japan. *Phys. Earth Planet. Inter.* 260, 44-52.
- Takahashi, M., 2006. Tectonic development of the Japanese Islands controlled by Philippine Sea plate motion. *J. Geogr.* 115, 116-123 (in Japanese with English abstract).
- Takenaka, S., Sanshadokoro, H., Yoshioka, S., 1999. Velocity anomalies and spatial distributions of physical properties in horizontally lying slabs beneath the Northwestern Pacific region. *Phys. Earth Planet. Inter.* 112, 137-157.
- Tanaka, A., Yamano, M., Yano, Y., Sasada, M., 2004. Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan, digital geoscience map DGN P-5. *Geol. Surv. Jpn* 56, 1191-1194.
- Turcotte, D., Schubert, G., 2002. *Geodynamics*, Second edn. Cambridge University Press, New York, pp. 249-254.
- van Keken, P., Hacker, B., Syracuse, E., Abers, G., 2011. Subduction factory: 4. Depth dependent flux of H<sub>2</sub>O from subducting slabs worldwide. *J. Geophys. Res.* 116. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JB007922>.
- Wein, A., 2001. Seismological constraints on the mechanism of deep earthquakes: temperature dependence of deep earthquake source properties. *Phys. Earth Planet. Inter.* 127, 145-163.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of the generic mapping tools released. *EOS Trans. AGU* 79, 579.
- Yabe, S., Ide, S., 2013. Repeating deep tremors on the plate interface beneath Kyushu, southwest

- Japan. *Earth Planets Space* 65, 17-23.
- Yagi, Y., Kikuchi, M., Sagiya, T., 2001. Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 in Hyuga-nada, Japan. *Earth Planets Space* 53, 793-803.
- Yamano, M., 2004. Heat flow data in and around Japan, digital geoscience map DGM P-5. *Geol. Surv. Jpn* 603, 42-45 (in Japanese).
- Yoshioka, S., 2007. Difference in the maximum magnitude of interplate earthquakes off Shikoku and in the Hyuganada region, southwest Japan, inferred from the temperature distribution obtained from numerical modeling — the proposed Hyuganada triangle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 263, 309-322.
- Yoshioka, S., Sanshadokoro, H., 2002. Numerical simulations of the deformation and dynamics horizontally lying slabs. *Geophys. J. Int.* 151, 69-82.
- Yoshioka, S., Suminokura, Y., Matsumoto, T., Nakajima, J., 2013. Two-dimensional thermal modeling of subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan. *Tectonophysics* 608, 1094-1108.
- Yoshioka, S., Toda, M., Nakajima, J., 2008. Regionality of deep low-frequency earthquakes associated with subduction of the Philippine Sea plate along the Nankai Trough, southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.* 272, 189-198.

# 南九州におけるフィリピン海 プレートの沈み込みに伴う 2次元温度構造モデリング

吉岡 祥一<sup>1,2</sup>・末永 伸明<sup>1</sup>・松本 拓己<sup>3</sup>・季 穎鋒<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学都市安全研究センター

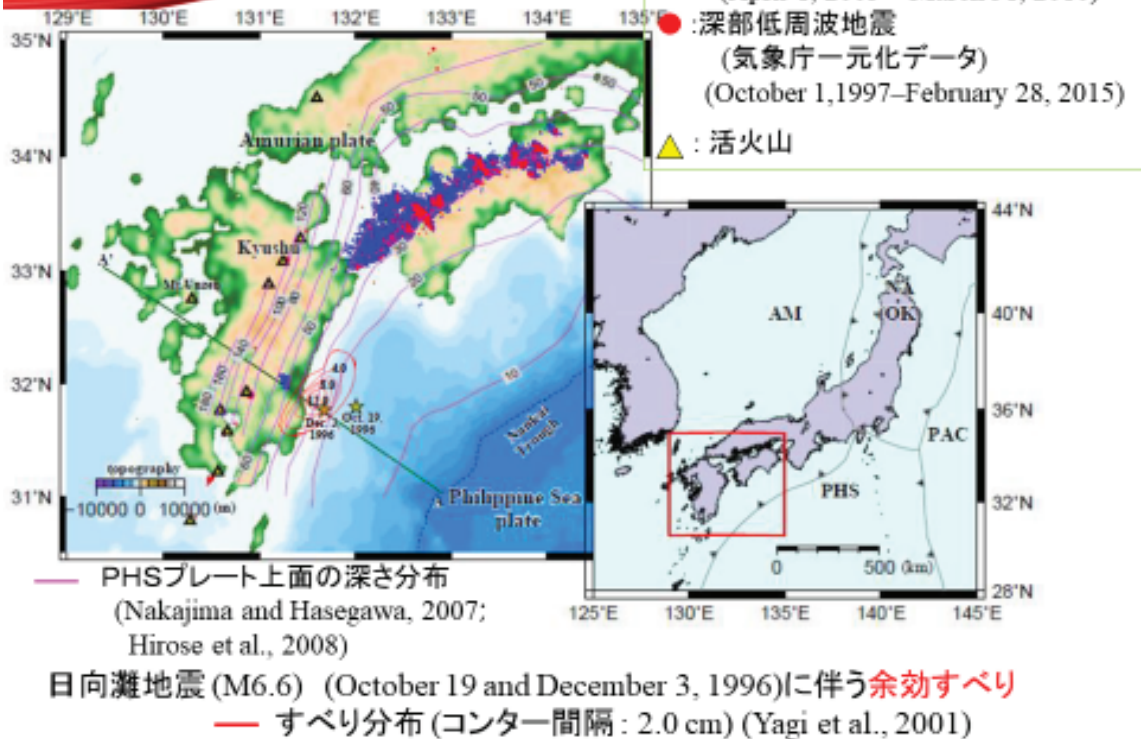
<sup>2</sup> 神戸大学理学研究科惑星学専攻

<sup>3</sup> 防災科学技術研究所

Suenaga et al., Tectonophysics, 2018

1. はじめに
2. 研究目的
3. データ
4. 支配方程式
5. モデル
6. 結果
  - 6-1. 温度分布、流れ場、地殻熱流量
  - 6-2. (通常)地震の空間分布
  - 6-3. 沈み込むプレート内の含水量分布
7. まとめ

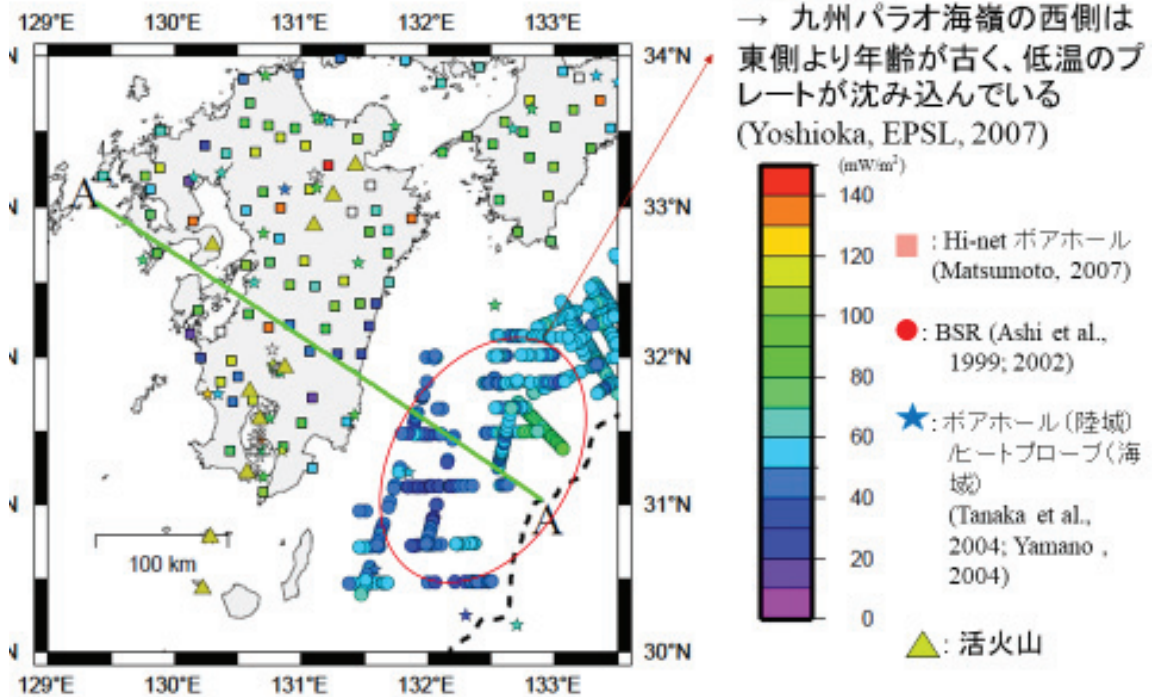
## 1. はじめに



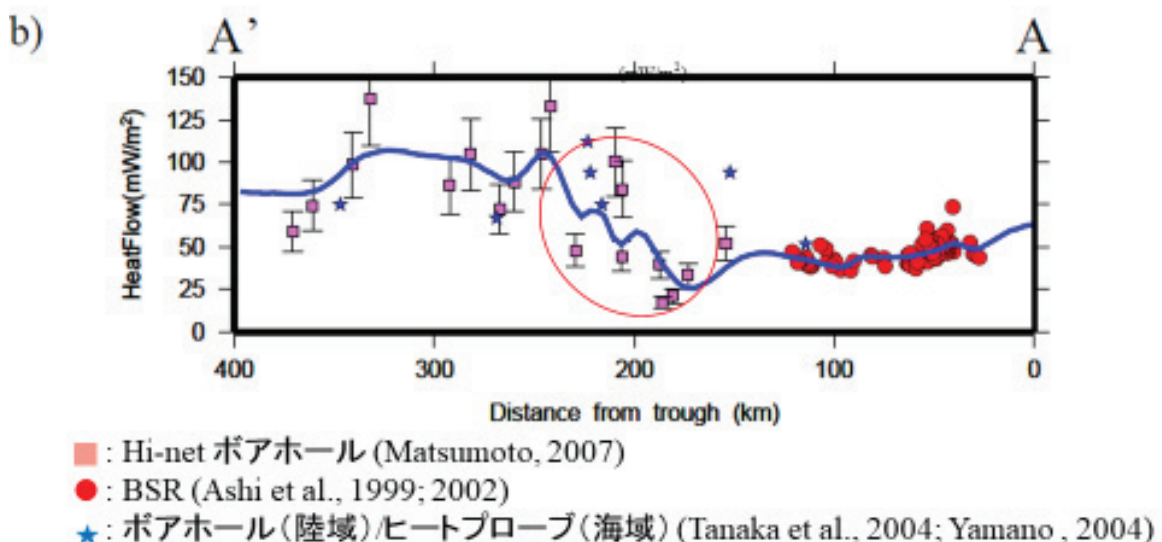
## 2. 研究目的

- ・高密度で分布する地殻熱流量データを用いて南九州におけるプレートの沈み込みに伴う温度構造を高精度で推定
- ・同地域において数値計算によって推定された温度構造・スラブ内の含水量(脱水量)分布と余効すべり・深部低周波微動の関連性を検討

### 3. データ



### 3. データ



陸域に向かって地殻熱流量が急激に増加  
 → 第四紀の隆起に伴う温度変化を導入

## 4. 支配方程式

### 運動方程式

$$\frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \left[ 4\eta \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \right] + \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \left[ \eta \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \phi \right] = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho_0 g \alpha T)$$

### エネルギー方程式

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + v \rho_0 g \alpha T + 4\eta \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \right)^2 + \eta \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right)^2 + H_r + \rho C_p U_c \frac{\partial T}{\partial z} + \tau \varepsilon$$

粘性率 (Burkett and Billen, 2010)

$$\eta = \frac{\eta_{diff} \eta_{disl}}{\eta_{diff} + \eta_{disl}} \quad \eta_{diff,disl} = \left( \frac{d^p}{AC_{OH}^r} \right)^{\frac{1}{n}} \varepsilon^{(1-n)/n} \exp \left[ \frac{E + P_{lc} V}{nRT} \right]$$

## 第四紀の隆起・沈降に伴う温度変化

Taking the erosion and sedimentation effect in the energy equation into account,

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \eta (\nabla v)^2 + \rho g \alpha T v + H_r \rho + \tau \varepsilon + \rho C_p v_e(x, y) \frac{\partial T}{\partial z}$$

Fukahata and Matsu'ura (2000); Yoshioka et al. (2013)

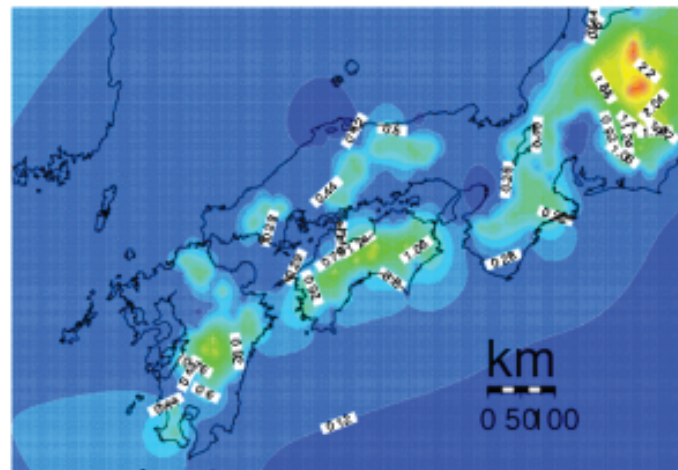
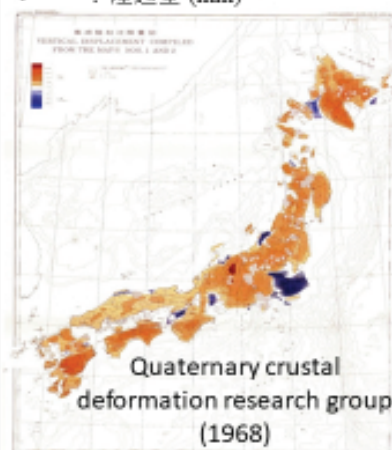
Temperature change caused  
by surface erosion and sedimentation

$$v_e(x, y) = 2 \times 10^{-6} Uq - 0.37$$

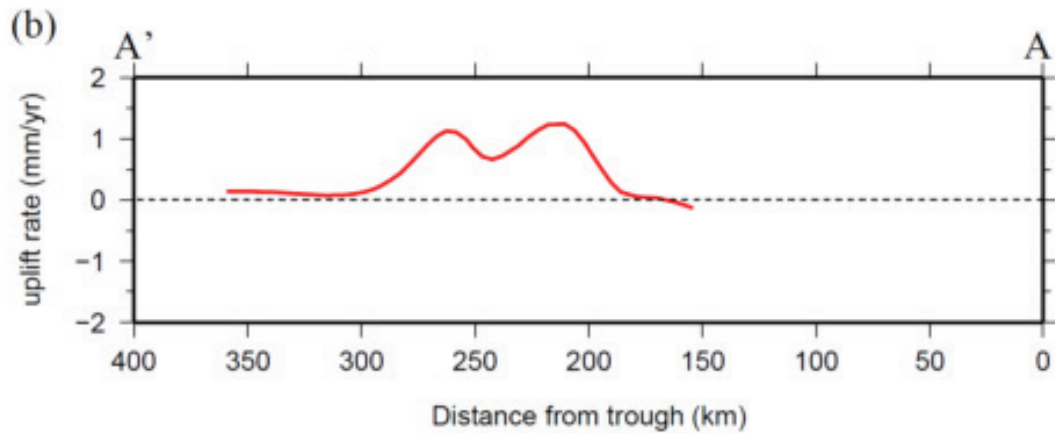
$v(x, y)$ : 隆起速度 (mm/yr) (Yoshikawa, 1974)

$Uq$ : 隆起量 (mm)

### 隆起・沈降速度の空間分布

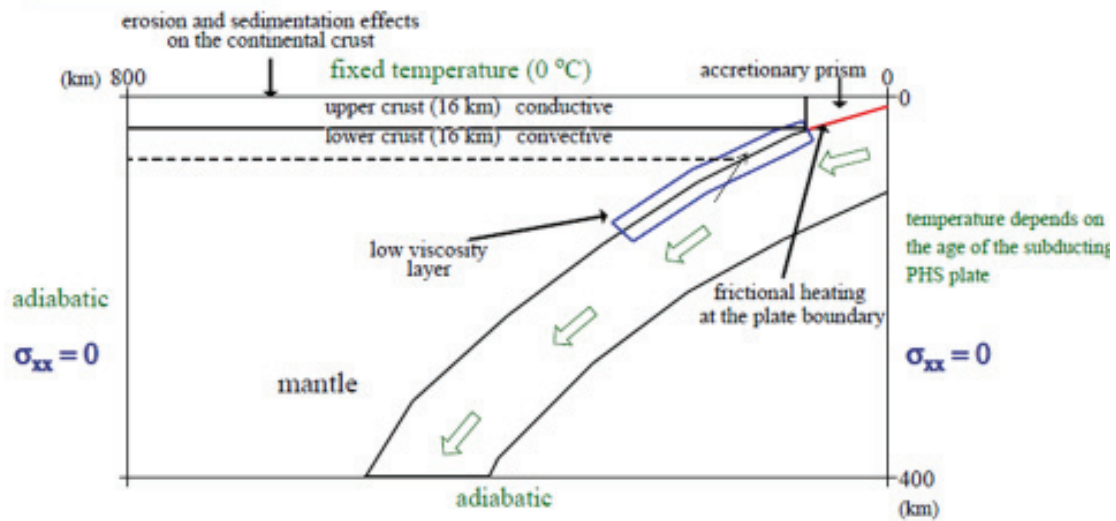






隆起速度  $\left\{ \begin{array}{l} > 0 \rightarrow \text{地殻熱流量 増加} \\ < 0 \rightarrow \text{地殻熱流量 低下} \end{array} \right.$

## 5. モデル

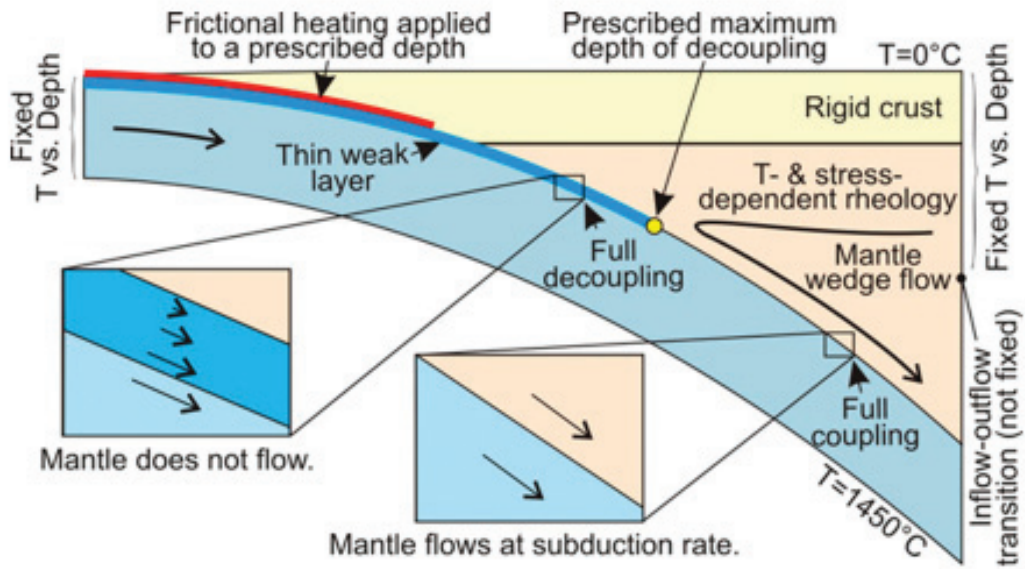


右側 温度境界条件 (プレート冷却モデル)      時間依存するトラフでの年齢

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \left[ \frac{z}{d_i} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{\lambda n^2 \pi^2 t}{d_i^2}\right) \sin\left(\frac{n\pi z}{d_i}\right) \right]$$

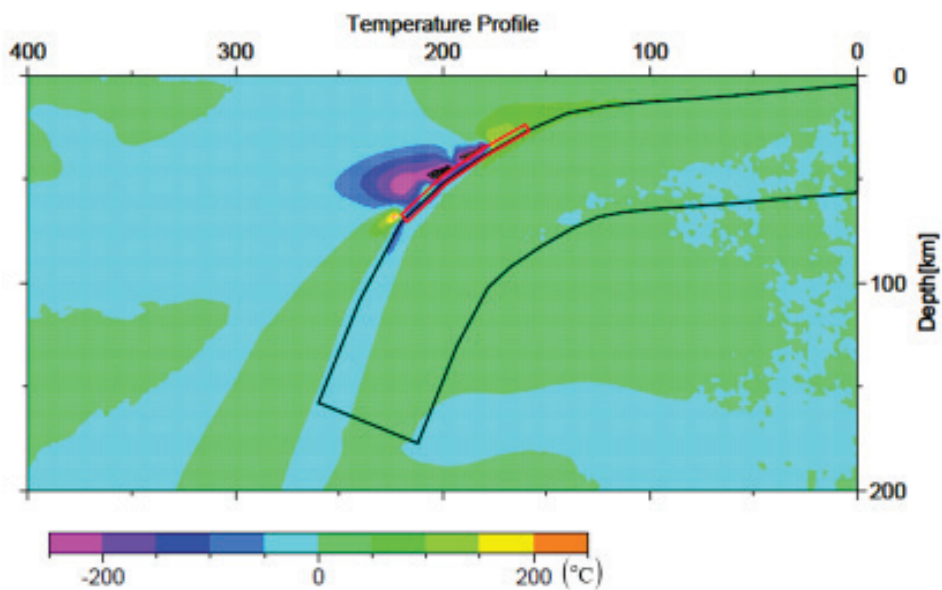
$T_1 = 1402 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $d_i = 134.9 \text{ km}$   
 RT 1 model (Grose, 2012)

### 先行研究 (スラブマントルデカップリングモデル)

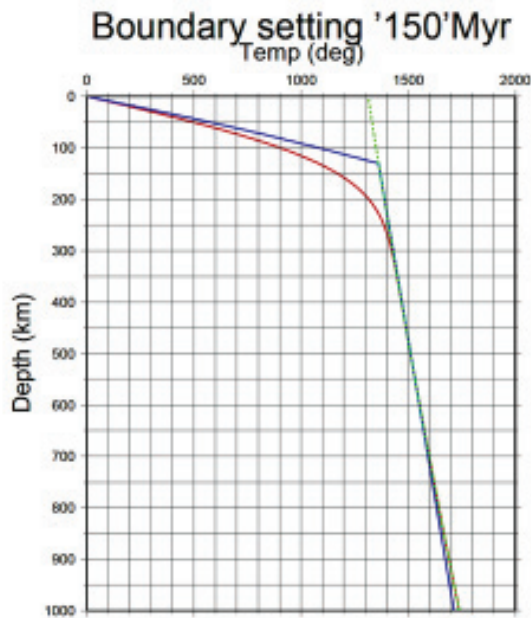


Wada and Wang (2009)

### 低粘性層を導入したモデルと導入しないモデルの温度差



## トラフ軸で与えた温度の深さ分布



### プレート冷却モデル

(Turcotte and Schubert, 2002)

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \left[ \frac{z}{d_t} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 t}{d_t^2}\right) \sin\left(\frac{n\pi z}{d_t}\right) \right]$$

### 半無限冷却モデル

(Yoshioka and Murakami, 2007)

$$T = T_0 \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{\frac{kt}{\rho C_p}}} \right) \times \exp\left(\frac{g\alpha}{C_p}(z - z_0 \times 10^3)\right)$$

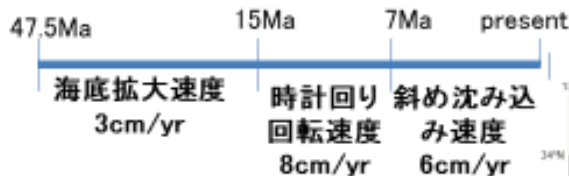
### 2つのモデルの温度差

- ・若い(暖かい)沈み込み帯  
→ 両者でほとんど違いはない
- ・古い(冷たい)沈み込み帯  
→ 両者で顕著な違い

—: プレート冷却モデル  
—: 半無限冷却モデル

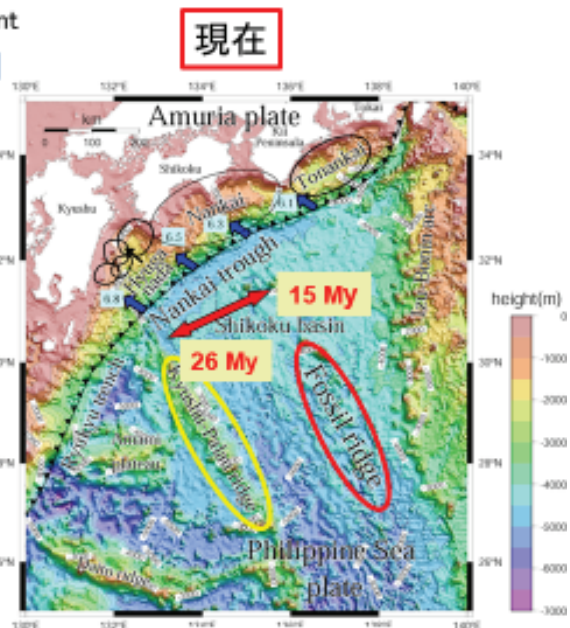
## フィリピン海プレート北部の海底年代の分布

シミュレーションの対象時間



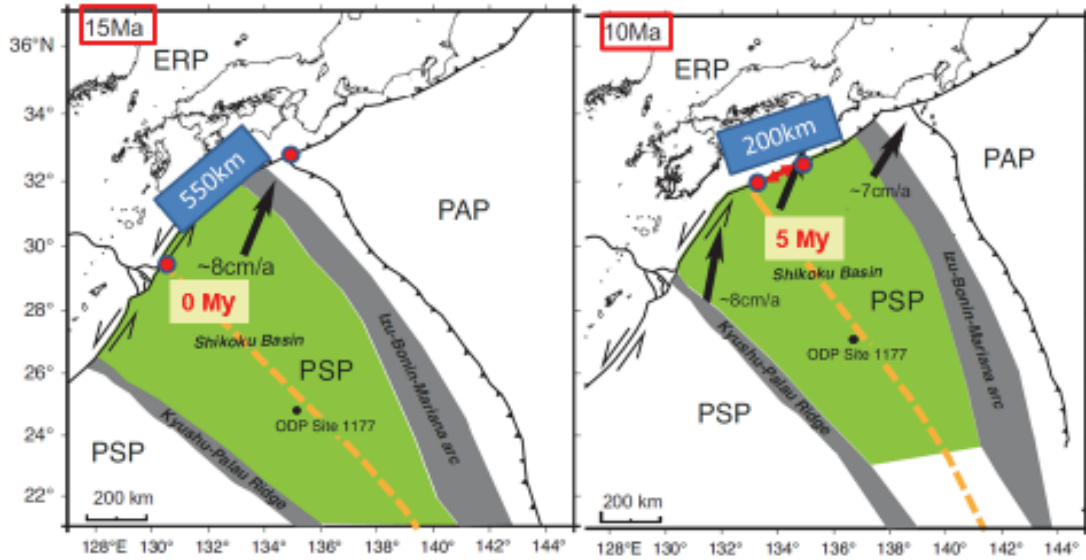
地磁気縞模様異常から推定されたフィリピン海プレート北部の海底年代 (Okino et al., 1999)

- 南海トラフにおけるフィリピン海プレートの年齢と厚さは一定ではない。
- フィリピン海プレートは冷却しながら沈み込んでいる



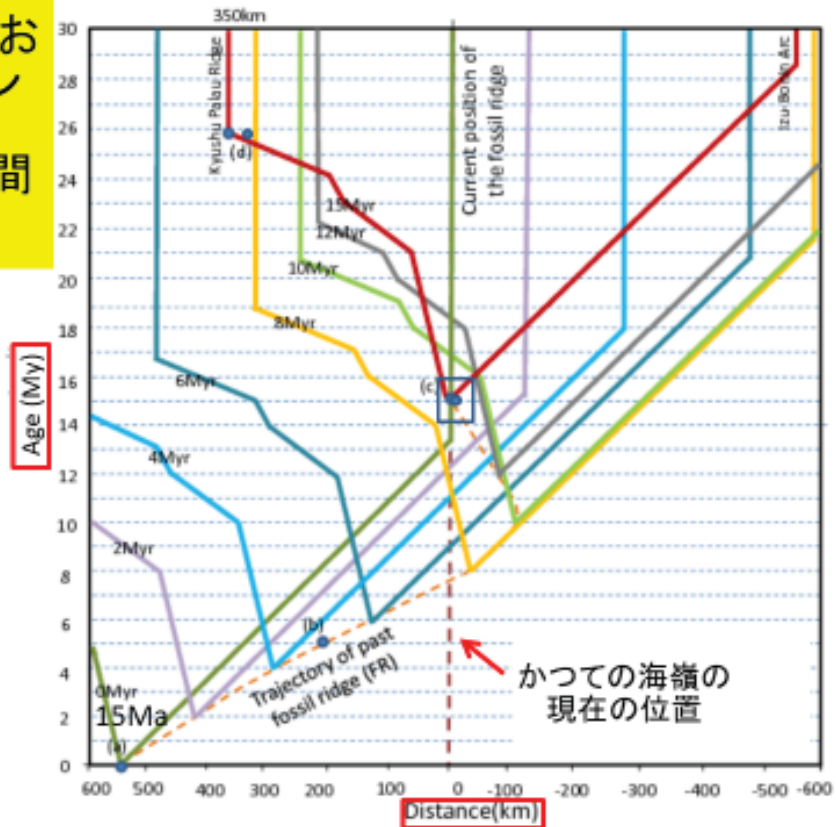
Yoshioka (2007)

## 西南日本における沈み込み史



(Mahony et al., 2011; Clift et al., 2013)

南海トラフにおけるフィリピン海プレートの年齢の時空間分布



## フィリピン海プレートの沈み込み史

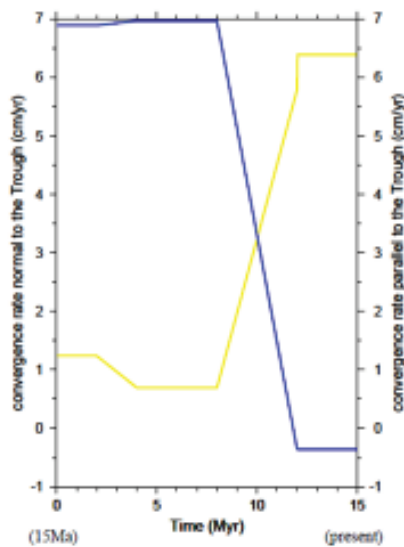
Kyushu district (profile A-A')

期間 (Ma)	沈み込み縦方向速度成分 (cm/y)	沈み込み横方向速度成分 (cm/y)	横方向移動距離 (km)	Ridgeからの距離 (km)	合成速度 (cm/y)	沈み込み角度 (A-CL from N)		
15-14	1.155	6.859	68.595	646.457	7	-24.5	clockwise Rotation	
14-13	1.155	6.940	137.896	577.863	7	-24.5		
13-12	0.974	6.894	206.932	508.461	7	-26.0		
12-11	0.792	6.923	276.164	439.525	7	-27.5		
11-10	0.610	6.948	345.642	370.294	7	-29.0		
北内海溝の長さ (km)	436.43							
10-9	0.610	6.948	415.120	300.816	7	-29.0	counterclockwise Rotation (PS-EU) Demets et al. (2010)	
9-8	0.610	6.948	484.598	231.337	7	-29.0		
8-7	0.610	6.948	554.076	161.859	7	-29.0		
7-6	2.542	5.110	605.180	92.381	5.79	-8.0		
6-5	4.240	3.792	643.105	41.277	5.79	13.1		
5-4	5.373	1.969	662.794	3.352	5.79	34.1		
4-3	5.789	-0.117	661.622	-16.337	5.79	55.2		
3-2	6.394	-0.505	656.567	-15.164	6.4	58.5		(PS-AM) Demets et al. (2010)
2-1	6.394	-0.505	651.512	-10.110	6.4	58.5		
1-0	6.394	-0.505	646.457	-5.055	6.4	58.5		
南内海溝の長さ (km)	380							

## 5. モデル

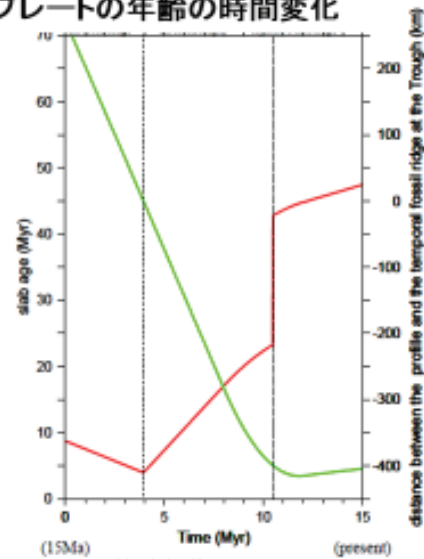
### フィリピン海プレートの沈み込み史

南海トラフにおけるプレート収束速度の時間変化



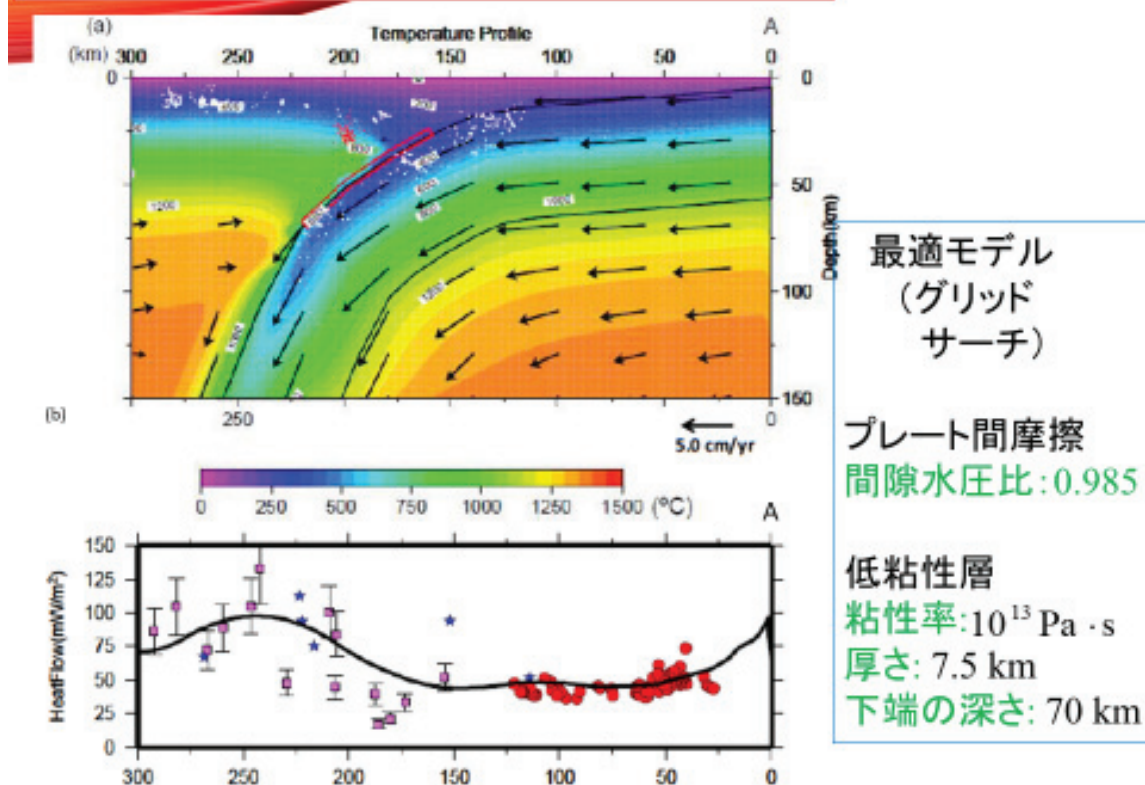
— : トラフ軸に対する収束速度の法線成分  
— : トラフ軸に対する収束速度の平行成分

南海トラフにおけるフィリピン海プレートの年齢の時間変化



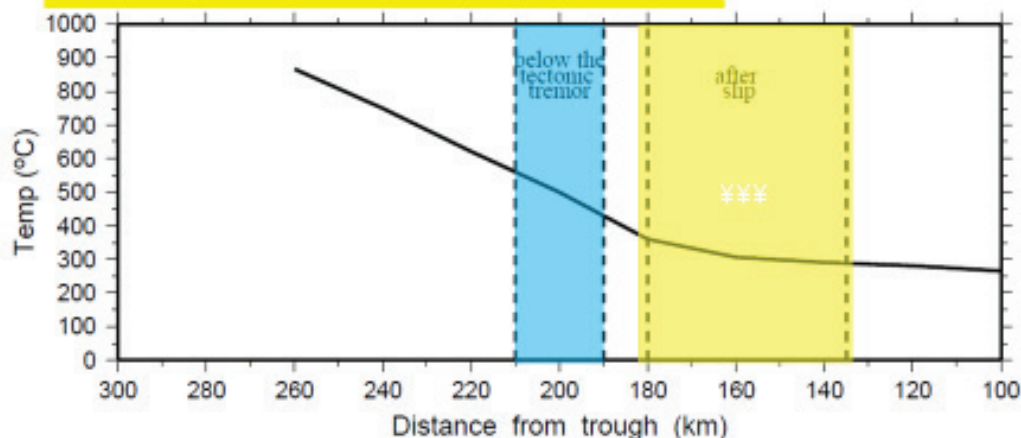
— : 海底年代  
— : 測線A-A'とかつての海嶺との距離

## 6-1. 温度分布、流れ場、地殻熱流量



## 6-1. 温度分布、流れ場、地殻熱流量

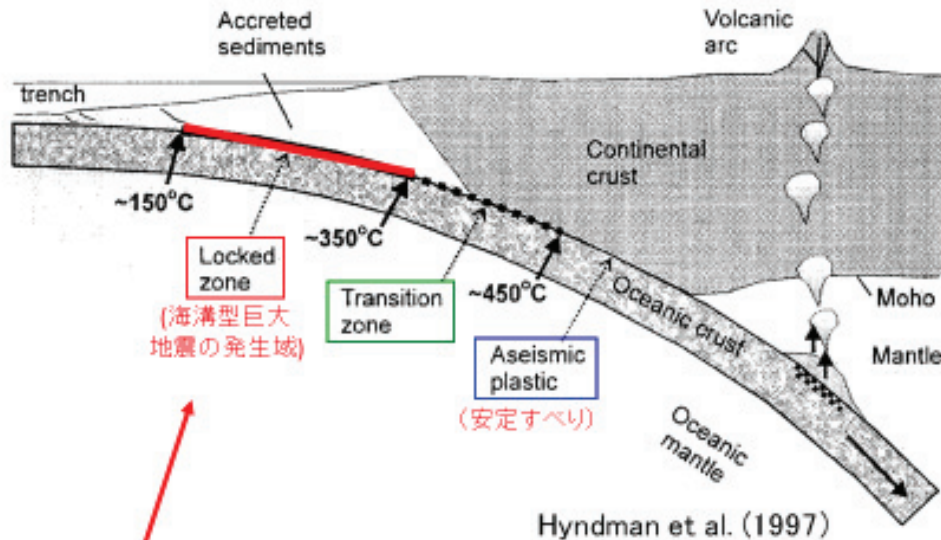
### プレート上面の温度分布



- ・余効すべりの発生域でのプレート境界の温度範囲  
 300°C~350°C → 地震発生域の下端付近  
 (Hyndman et al., 1997)
- ・マントルウェッジ内の深部低周波微動の発生域の温度範囲  
 450°C~650°C

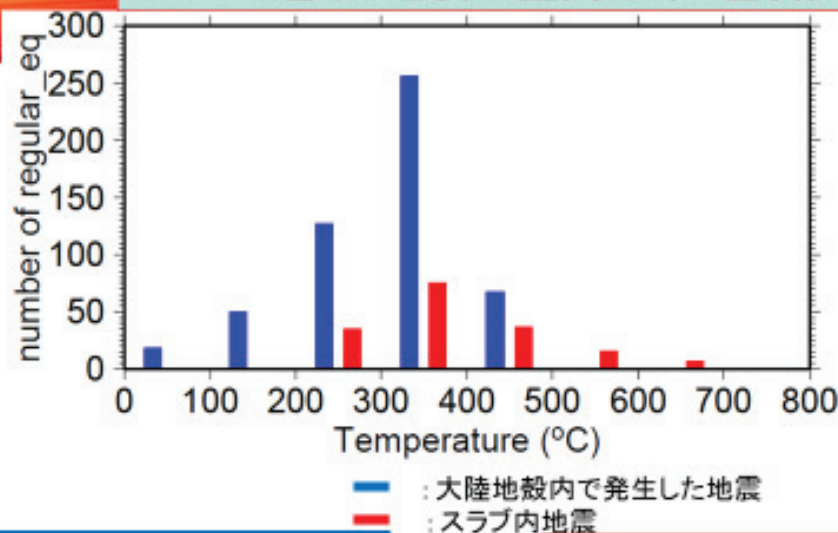
## 6-1. 温度分布、流れ場、地殻熱流量

Relationship between generation of megathrust earthquakes and thermal structure in a subduction zone



海溝型巨大地震の地震発生域は温度構造によって支配される

## 6.2 (通常)地震の空間分布(温度依存性)



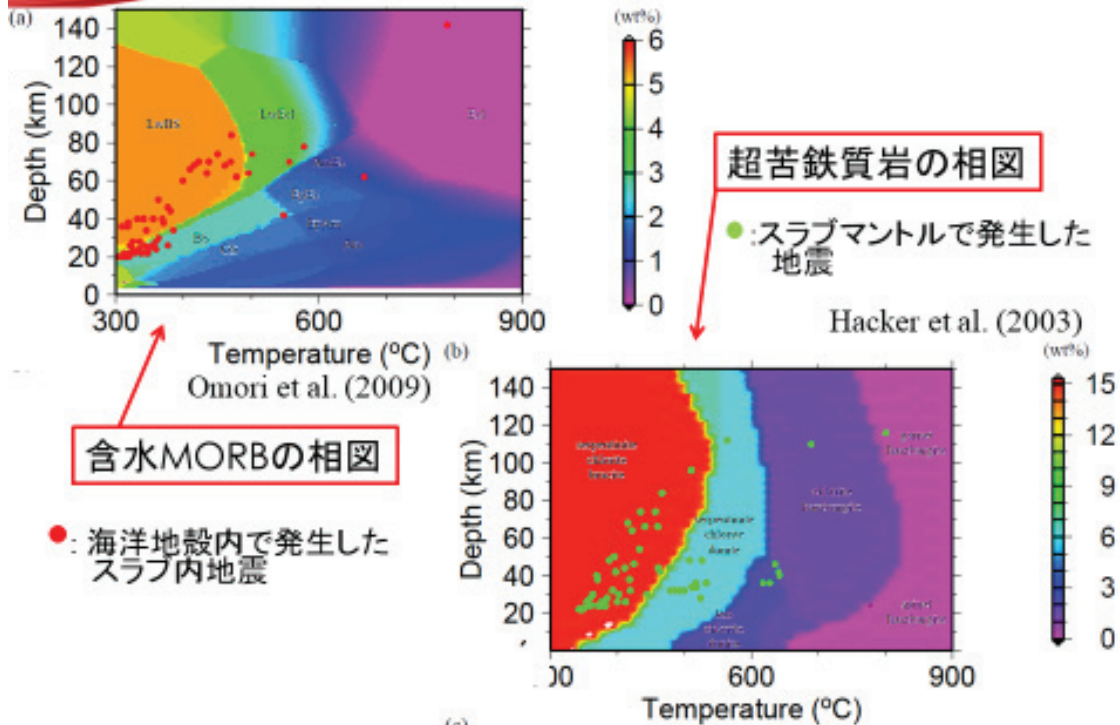
大陸地殻内で発生した地震

上限の温度 : 450°C  
 先行研究 (300-400°C)  
 (e.g., Sibson (1982); Ito (1990))

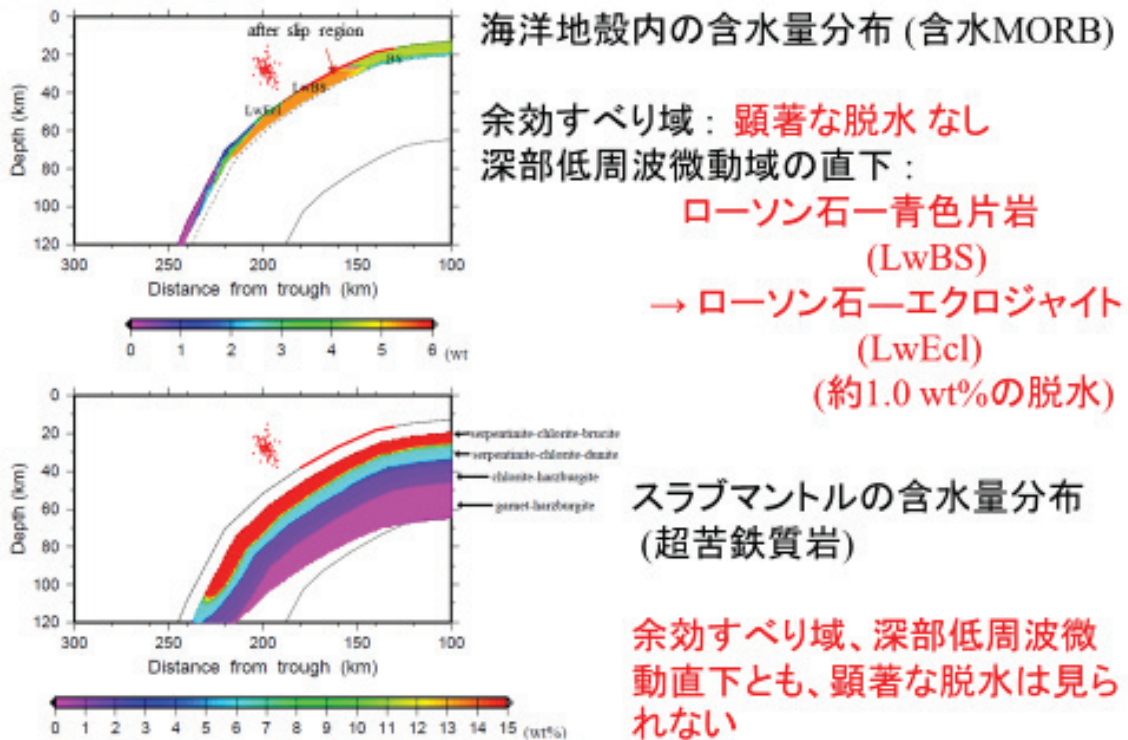
スラブ内地震

下限の温度 : 250°C  
 上限の温度 : 650°C  
 先行研究 (650°C)  
 (Gorbatov and Kostoglodov, 1997)

## 6-2. (通常)地震の分布

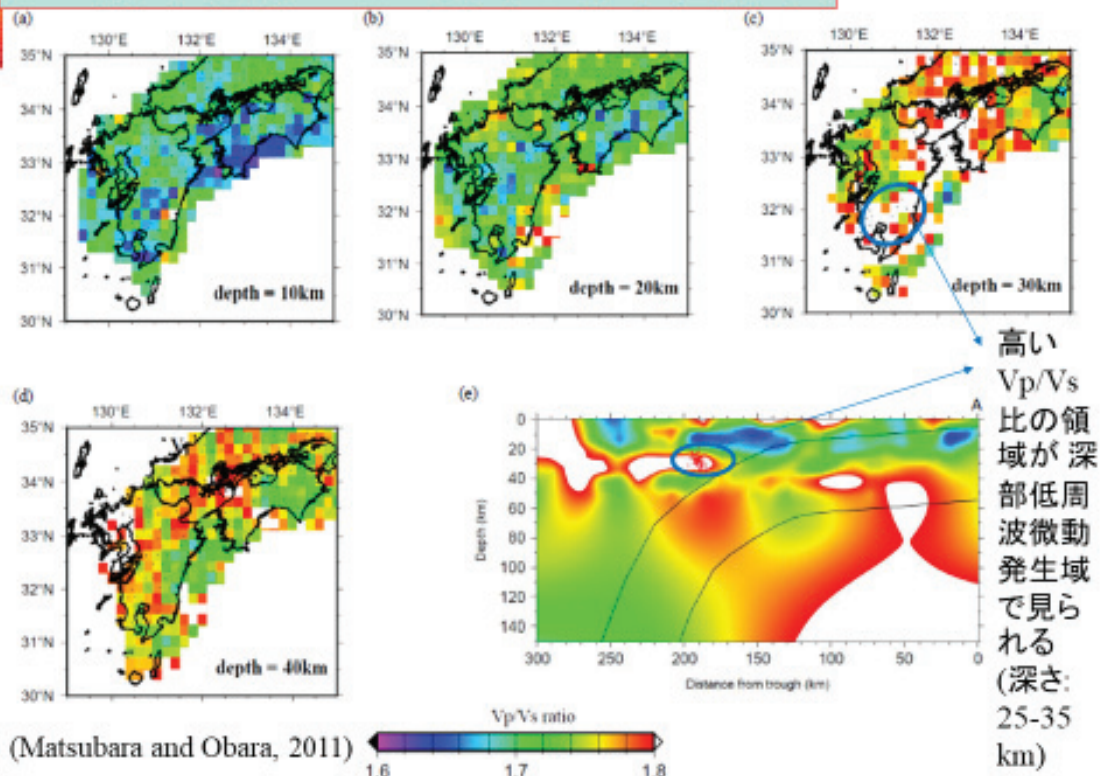


## 6-3. 沈み込むプレート内の含水量分布





### 6-3. 沈み込むプレート内の含水量分布



### 7. まとめ

- 1996年日向灘地震の余効すべりの発生域での温度範囲
  - 300°C~350°C
  - 地震発生域の下端付近(脆性—塑性転移境界付近)
- 上記余効すべりの発生域直下
  - 含水鉱物の相転移に伴う顕著な脱水は見られない
- マントルウェッジ内の深部低周波微動の発生域の温度範囲
  - 450°C~650°C
- 深部低周波微動発生域直下の海洋地殻内で1.0 wt %の脱水
  - ← ローソン石—青色片岩から  
ローソン石—エクロジヤイトへの相転移

