

関東下における海洋プレートの温度・脱水分布と微小地震の発生の関連性について

神戸大学 都市安全研究センター/理学研究科 吉岡 祥一

中国科学院 季 穎鋒

メキシコ国立自治大学 Vlad C. Manea

メキシコ国立自治大学 Marina Manea

要旨

関東下では、相模トラフからフィリピン海プレートが北米プレートの下に沈み込み、さらに、日本海溝から太平洋プレートがこれら2つのプレートの下に沈み込んでいる。このような複雑なテクトニクスを有する地域における海洋プレート内の微小地震の発生の、温度・脱水がどのように関与しているかを数値モデリングによって調べた(Ji et al. (2017))。

ここでは、フィリピン海プレートを意図的に取り除き、太平洋プレートのみが沈み込む非現実的なモデル(モデル1)と、両プレートの沈み込みを考慮した現実的なモデル(モデル2)の2つのモデルを構築し、両者の比較を行うことで、フィリピン海プレートが太平洋プレートの温度場・脱水量分布に及ぼす影響を評価した。また、本モデルにより、0Maにおける温度の空間分布が得られるが、その結果と、海洋地殻を構成する含水 MORB(Omori et al. (2009))とスラブマントルを構成するハルツバージャイト(Hacker et al. (2003))の相図を用いて、最大含水量の空間分布を求めた。

その結果、温度分布に関しては、太平洋プレートの上面では、モデル1ではほぼプレート形状の等深度線と平行な温度分布が得られたが、モデル2では、深さ 140 km程度まで逆三角形形状の低温域が生じ、その領域におけるモデル1との温度差は 300°C程度となった。この低温域は、フィリピン海プレートが太平洋プレートに乗り上げている逆三角形形状の接触域で発生しており、フィリピン海プレートが太平洋プレート上面を冷却させる働きをしていることによって生じたものと考えられる。この低温域は太平洋プレート上面から 16 km程度の深さにおいてもその存在が確認され、熱伝導により太平洋プレート内部にまで低温域が広がっていることがわかった。

流れ場に関しては、モデル1では通常の間隙リターンフローがマントルウェッジで見られたが、モデル2では、そのような流れに加えて、フィリピン海プレートと太平洋プレートに挟まれたマントルの領域で時計回りの渦巻き状の流れが生じ、この流れが、接触域の下部から浅部に漏れ出し、フィリピン海プレートを温める役割を果たしていることがわかった。

最大含水量分布に関しても、モデル2では、2つの海洋プレートの接触域で低温となっていることを反映し、そこでは含水鉱物の相転移が遅れ、最大含水量の高い状態が保持されることがわかった。気象庁の一元化データを用いて、1997年10月～2015年2月の期間のM2程

度の海洋プレート内で発生する微小地震の空間分布と最大含水量分布から得られる脱水量分布を比較してみたところ、顕著な相関がみられた。具体的には、太平洋プレートの海洋地殻内の微小地震は深さ 40~60 km で帯状に発生していたが、モデル1、2のいずれにおいても、この地震活動と、ひすい・青色片岩・ローソン石からローソン石・角閃石・エクロジヤイトへの相転移に伴う脱水域とがよく対応していた。また、接触域のやや深部の深さ 250 km 程度でクラスター状に発生している太平洋プレート内の地震活動も、モデル2のハルツバージャイトの脱水域とよく対応していた。これは、2つの海洋プレートの接触域で温度が低下し、その領域で OH 基の形で H₂O がより深部に運ばれ、遅れて発生した相転移に伴う脱水により間隙水圧が高まり、法線応力が低下し、地震が発生しやすくなったものと考えられる。

キーワード: 関東地方、3次元温度モデリング、スラブからの脱水、太平洋プレート、地震活動

参考文献

- Abers, G. A., Nakajima, J., van Keken, P. E., Kita, S. and Hacker, B. R. Thermal-petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates. *Earth Planet. Sci. Lett.* 369, 178-187 (2013).
- Amante, C. and Eakins, B. W. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis (p. 19). Colorado: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division (2009).
- Burkett, E. R. and Billen, M. I. Three-dimensionality of slab detachment due to ridge-trench collision: laterally simultaneous boudinage versus tear propagation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q11012, <https://doi.org/10.1029/2010GC003286> (2010).
- DeMets, C., Gordon, R. G. and Argus, D. F. Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.* 181(1), 1-80, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x> (2010).
- Engdahl, E. R. and Scholz, C. H. A double Benioff Zone beneath the central Aleutians: An unbending of the lithosphere. *Geophysical Research Letters* 4, <https://doi.org/10.1029/GL004i010p00473> (1977).
- Gorbatov, A. and Kostoglodov, V. Maximum depth of seismicity and thermal parameter of the subducting slab: general empirical relation and its application. *Tectonophysics* 277(1-3), 165-187 (1997).
- Hacker, B. R., Abers, G. A. and Peacock, S. M. Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents. *J. Geophys. Res.* 108, 2029, <https://doi.org/10.1029/2001JB001127> (2003).

- Hacker, B. R., Peacock, S. M., Abers, G. A. and Holloway, S. D. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? *J. Geophys. Res.* 108(2030), B1, <https://doi.org/10.1029/2001JB001129> (2003).
- Hasegawa, A., Nakajima, J., Kita, S., Okada, T., Matsuzawa, T. and Kirby, S. H. Anomalous deepening of a belt of intraslab earthquakes in the Pacific slab crust under Kanto, central Japan: Possible anomalous thermal shielding, dehydration reactions, and seismicity caused by shallower cold slab material. *Geophys. Res. Lett.* 34, L09305, <https://doi.org/10.1029/2007GL029616> (2007).
- Hirth, G. and Kohlstedt, D. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists, *Inside the Subduction Factory*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 138, edited by J. Eiler, pp. 83-105, AGU, Washington, D. C. (2003).
- Holt, A. F., Royden, L. H. and Becker, T. W. The dynamics of double slab subduction. *Geophysical Journal International* 209(1), 250-265 (2017).
- Ishise, M., Miyake, H. and Koketsu, K. Dual subduction tectonics and plate dynamics of central Japan shown by three-dimensional P-wave anisotropic structure. *Phys. Earth Planet. Inter.* 244, 49-68 (2015).
- Ji, Y., Yoshioka, S., Manea, V. C., Manea, M. and Matsumoto, T. Three-dimensional numerical modeling of thermal regime and slab dehydration beneath Kanto and Tohoku, Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 332-353, <https://doi.org/10.1002/2016JB013230> (2017).
- Ji, Y., Yoshioka, S. and Matsumoto, T. Three-dimensional numerical modeling of temperature and mantle flow fields associated with subduction of the Philippine Sea plate, southwest Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121, 4458-4482, <https://doi.org/10.1002/2016JB012912> (2016).
- Kamiya, S. and Kobayashi, Y. Thickness variation of the descending Philippine Sea slab and its relationship to volcanism beneath the Kanto-Tokai district, central Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 112, B6 (2007).
- Kincaid, C. and Griffiths, R. W. Laboratory models of the thermal evolution of the mantle during rollback subduction. *Nature* 425(6953), 58 (2003).
- Kincaid, C. and Griffiths, R. W. Variability in flow and temperatures within mantle subduction zones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(6) (2004).
- Matsubara, M., Hayashi, H., Obara, K. and Kasahara, K. Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography. *J. Geophys. Res.* 110, B12304, <https://doi.org/10.1029/2005JB003673> (2005).
- McKenzie, D. P. and Morgan, W. J. Evolution of triple junctions. *Nature* 224, 125-133 (1969).
- Moriyama, T., Tajima, F. and Seno, T. An unusual zone of seismic coupling in the Bonin Arc: the 1972 Hachijo-Oki Earthquakes and related seismicity, *Pageoph*, 129, Nos 1/2 (1989).

- Muller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W. R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9, Q04006, <https://doi.org/10.1029/2007GC001743> (2008).
- Nakajima, J. Seismic attenuation beneath Kanto, Japan: evidence for high attenuation in the serpentinized subducting mantle. *Earth, Planets and Space* 66, 12 (2014).
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone? *Geophys. Res. Lett.* 33, L16309, <https://doi.org/10.1029/2006GL026773> (2006).
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. Cause of M 7 intraslab earthquakes beneath the Tokyo metropolitan area: possible evidence for a vertical slab tear at the easternmost portion of the Philippine Sea slab. *J. Geophys. Res.* 115, B04301, <https://doi.org/10.1029/2009JB006863> (2010).
- Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A. Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity. *J. Geophys. Res.* 114, B08309, <https://doi.org/10.1029/2008JB006101> (2009).
- Nakajima, J., Tsuji, Y. and Hasegawa, A. Seismic evidence for thermally-controlled dehydration reaction in subducting oceanic crust. *Geophys. Res. Lett.* 36, L03303, <https://doi.org/10.1029/2008GL036865> (2009).
- Okazaki, K. and Hirth, G. Dehydration of lawsonite could directly trigger earthquakes in subducting oceanic crust. *Nature* 530, 81-84 (2016).
- Oleskevich, D. A., Hyndman, R. D. and Wang, K. The updip and downdip limits to great subduction earthquakes: Thermal and structural models of Cascadia, south Alaska, SW Japan, and Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104(B7), 14965-14991 (1999).
- Omori, S., Kita, S., Maruyama, S. and Santosh, M. Pressure-temperature conditions of ongoing regional metamorphism beneath the Japanese Islands. *Gondwana Research* 16, 458-469 (2009).
- Peacock, S. M. Serpentinization and infiltration metasomatism in the Trinity peridotite, Klamath province, northern California: implications for subduction zones. *Contrib. Miner. Petrol.* 95 (1987).
- Peacock, S. M., van Keken, P. E., Holloway, S. D., Hacker, B. R., Abers, G. A. and Ferguson R. L. Thermal structure of the Costa Rica - Nicaragua subduction zone: Slab metamorphism, seismicity and arc magmatism. *Phys. Earth Planet. Inter.* 149, 187-200 (2005).
- Schellart, W. P. Quantifying the net slab pull force as a driving mechanism for plate tectonics. *Geophys. Res. Lett.* 31, L07611, <https://doi.org/10.1029/2004GL019528> (2004).

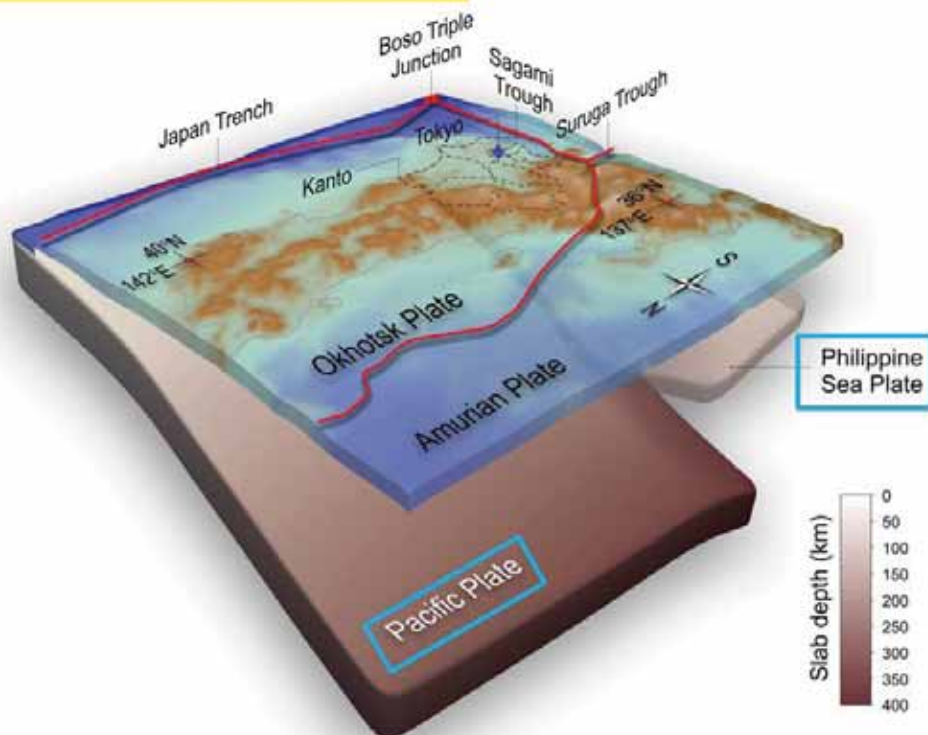
- Sdrolias, M. R. and Muller, D. Controls on back-arc basin formation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7, Q04016, <https://doi.org/10.1029/2005GC001090> (2006).
- Seno, T. Focal mechanism and depth of the 1971 January 3 earthquake (M=5.5) which occurred near the Zenisu ridge off central Honshu –Implications for the Philippine Sea plate thickness beneath the western edge of the Izu Ridge–. *Earthquake (in Japanese)* 40, 629-632 (1987).
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A. E. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *Journal of Geophysical Research* 98, <https://doi.org/10.1029/93JB00782> (1993).
- Takahashi, M. Tectonic development of the Japanese islands controlled by the Philippine Sea plate motion. *Journal of Geography* 115,116-123 (2006).
- Uchida, N., Matsuzawa, T., Nakajima, J. and Hasegawa, A. Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes. *J. Geophys. Res.* 115, B07309, <https://doi.org/10.1029/2009JB006962> (2010).
- van Keken, P. E., Hacker, B. R., Syracuse, E. M. and Abers, G. A. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide. *J. Geophys. Res., Solid Earth* 116, B1 (2011).
- Wada, I. and He, J. Thermal structure of the Kanto region, Japan. *Geophys. Res. Lett.* 44, 7194-7202, <https://doi.org/10.1002/2017GL073597> (2017).
- Wei, S. S., Wiens, D. A., van Keken, P. E. and Chen, C. Slab temperature controls on the Tonga double seismic zone and slab mantle dehydration. *Sci. Adv.* 3, e1601755 (2017).
- Wilson, C. R., Spiegelman, M., van Keken, P. E. and Hacker, B. R. Fluid flow in subduction zones: The role of solid rheology and compaction pressure. *Earth and Planetary Science Letters* 401, 261-274 (2014).
- Wu, F., Okaya, D., Sato, H. and Hirata, N. Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards. *Geophys. Res. Lett.* 34, L18301, <https://doi.org/10.1029/2007GL030763> (2007).
- Yoshii, T. Regionality of group velocities of Rayleigh waves in the Pacific and thickening of the plate. *Earth Planet. Sci. Lett.* 25, 305-312 (1975).
- Yoshioka, S. and Murakami, K. Temperature distribution of the upper surface of the subducted Philippine Sea plate, southwest Japan, from a three-dimensional subduction model: relation to large interplate and low-frequency earthquakes. *Geophys. J. Int.* 171, 302-315 (2007).
- Zhang, Q., Guo, F., Zhao, L. and Wu, Y. Geodynamics of divergent double subduction: 3-D numerical modeling of a Cenozoic example in the Molucca Sea region, Indonesia. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 122, 3977-3998, <https://doi.org/10.1002/2017JB013991> (2017).

関東下における海洋プレートの 温度・脱水分布と微小地震の発生の 関連性について

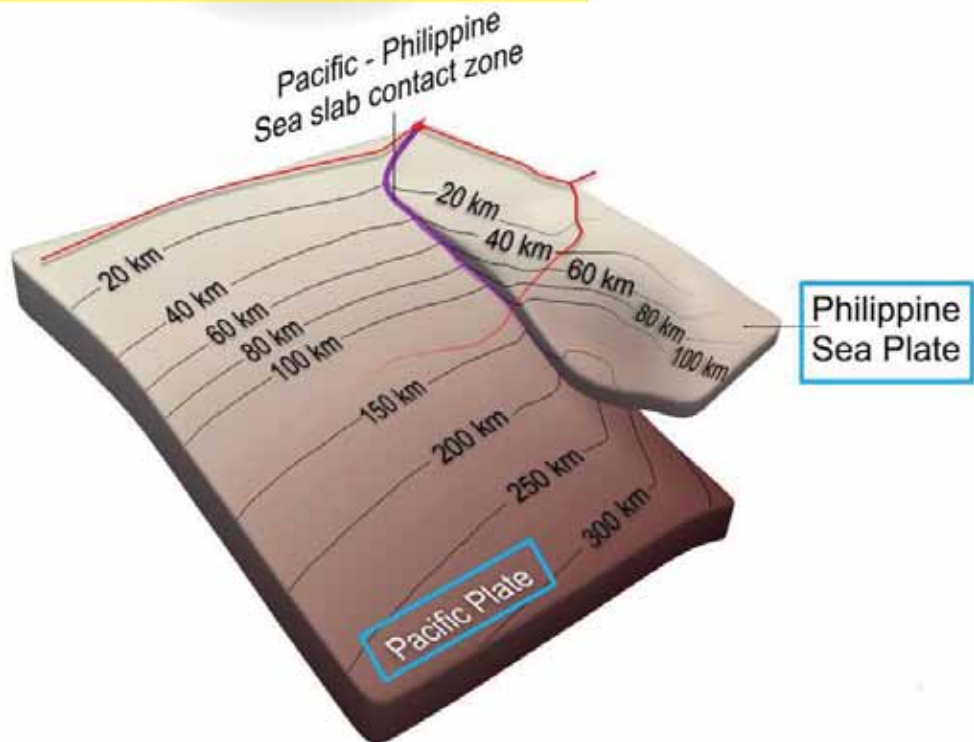
○吉岡 祥一^{1,2}・季 穎鋒¹・Vlad C. Manea³
・Marina Manea³

- 1 神戸大学 都市安全研究センター
- 2 神戸大学 大学院理学研究科
- 3 メキシコ国立自治大学

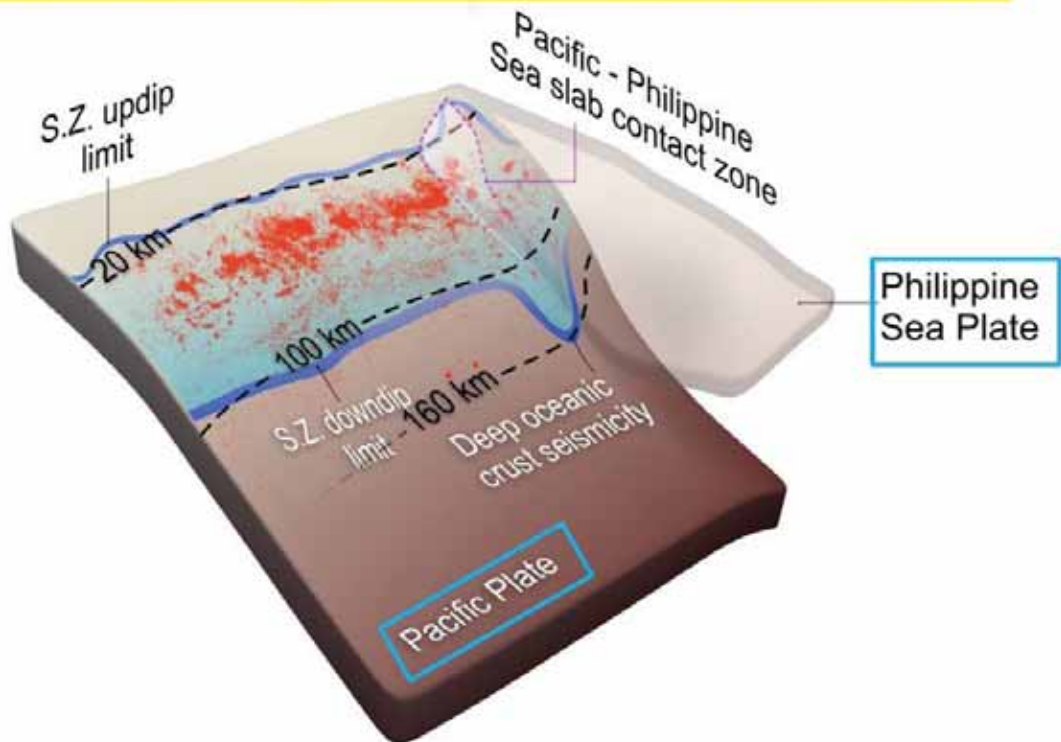
テクトニックマップ



プレート形状モデル



太平洋プレート上面付近の地震発生帯



研究目的

3次元熱対流沈み込みモデルを用いて、
関東下における海洋プレートの沈み込みに伴う
ジオダイナミックなプロセスを理解

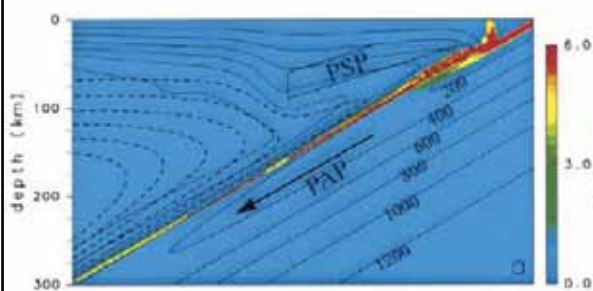
- 複雑な3次元形状のプレート沈み込みに伴う温度場
- 最大含水量・脱水量分布
- マントルウェッジでのマンツルの流れ場



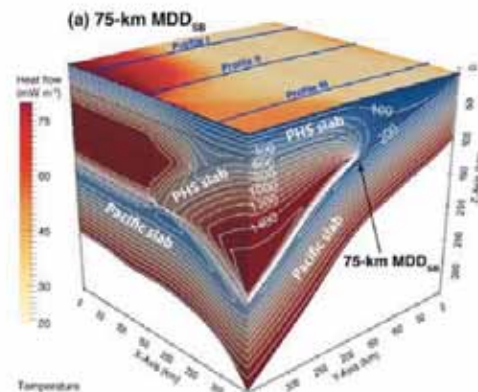
関東下においてプレート間近傍やスラブ内で発生
する微小地震の発生メカニズムの解明に迫る。

先行研究 (1)

- 2次元モデル
Iwamori (EPSL, 2000)
Yoshioka et al. (GJI, 2015)
- 3次元モデル
Wada and He (GRL, 2017)

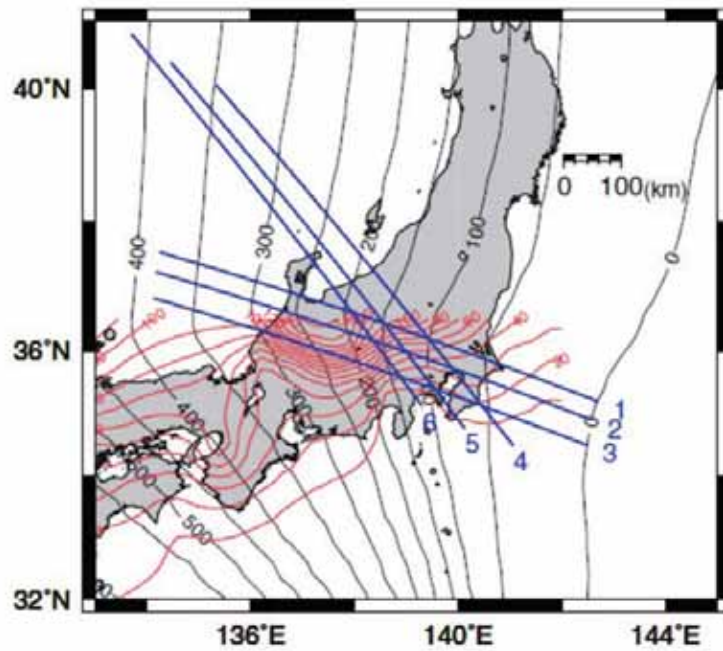


Iwamori (EPSL, 2000)



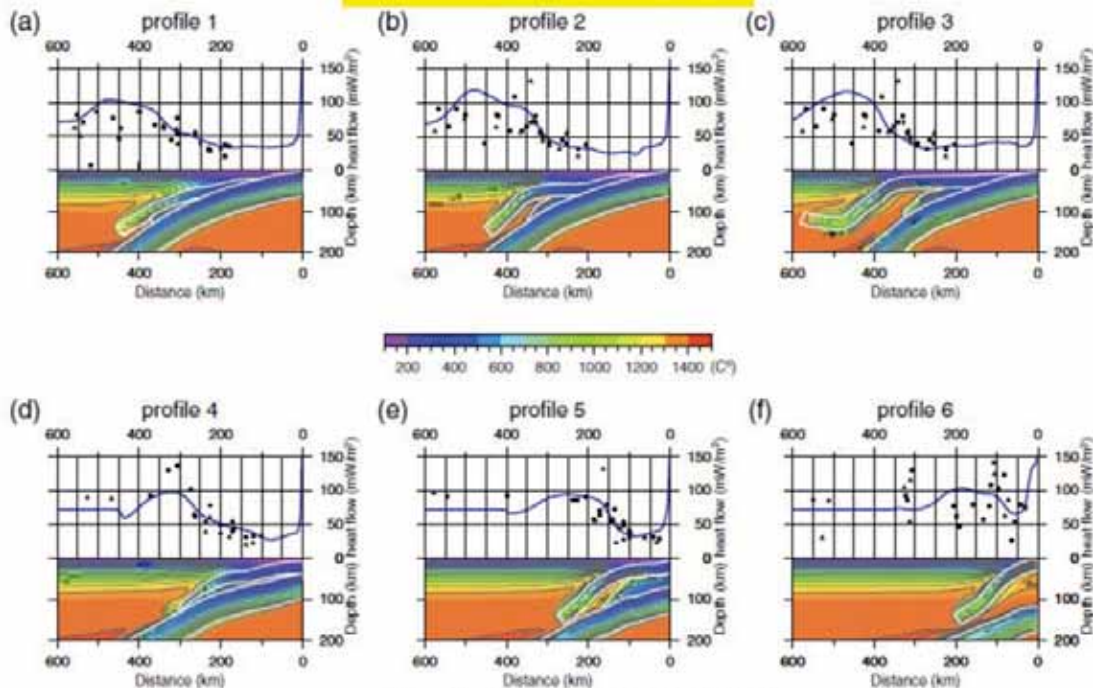
Wada and He (GRL, 2017)

先行研究 (2)



Yoshioka et al. (GJI, 2015)

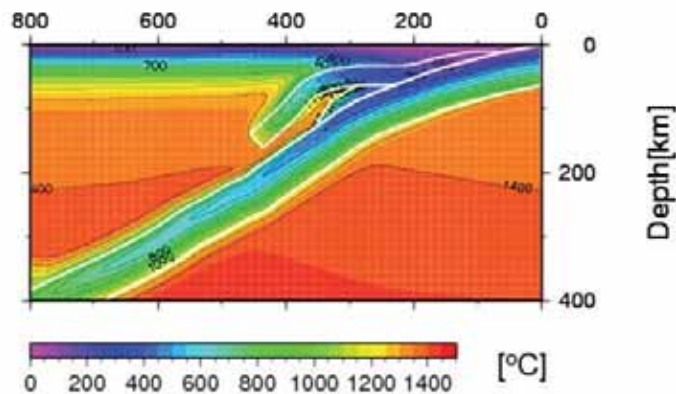
先行研究 (3)



Yoshioka et al. (GJI, 2015)

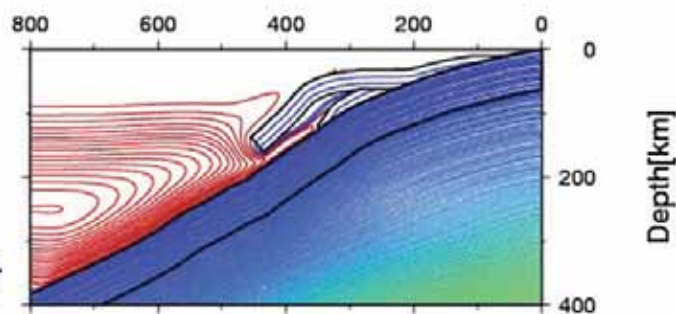
先行研究 (4)

温度場



流れ場

時計回り
反時計回り



Yoshioka et al. (GJI, 2015)

9

何が新しいか？

- 3次元モデル
- 時間依存モデル
- 沈み込み史を考慮
- 動くガイドを導入
- 高密度の地殻熱流量データを使用
- 含水鉱物の相図を用いて、脱水と太平洋プレートのプレート間・スラブ内の地震活動の関連性を検討

手法

3次元箱型熱対流モデルの支配方程式

質量保存則

$$\nabla \cdot [\rho_s(z)\mathbf{v}] = 0$$

非弾性流体近似

運動量保存則

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{i3}\rho_s g \alpha_0 (T - T_s) = 0$$

エネルギー方程式

$$\rho_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \underbrace{k \nabla^2 T}_{\text{伝導}} + \underbrace{\eta (\nabla \mathbf{v})^2}_{\text{粘性散逸}} + \underbrace{\rho g a T v}_{\text{断熱圧縮}} + \underbrace{H_r \rho + \tau \dot{\epsilon}}_{\text{放射性プレート元素の境界で発熱の摩擦熱}}$$

粘性率

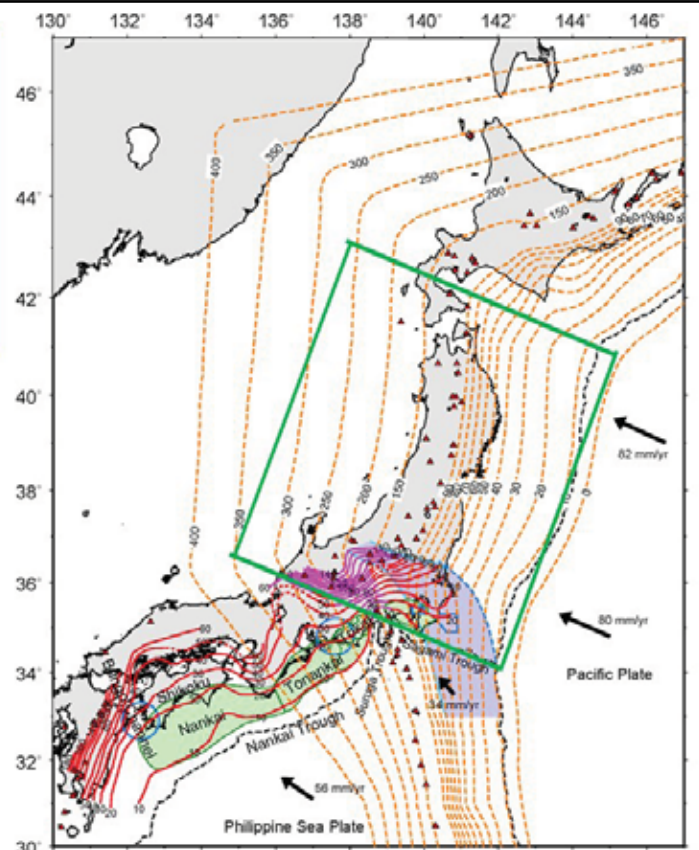
$$\eta = \frac{\eta_{diff} \eta_{disl}}{\eta_{diff} + \eta_{disl}} \quad \eta_{diff, disl} = \left(\frac{d^p}{AC_{OH}^r} \right)^{\frac{1}{n}} \dot{\epsilon}^{1-n} \exp \left[\frac{E + P_c V}{nRT} \right] \text{Burkett and Billen (2010)}$$

モデル構築のために必要なデータ

- 沈み込んだ海洋プレートの形状
- 海溝・トラフにおける沈み込む海洋プレートの年齢
- 海洋プレートの沈み込み史
- 地殻熱流量

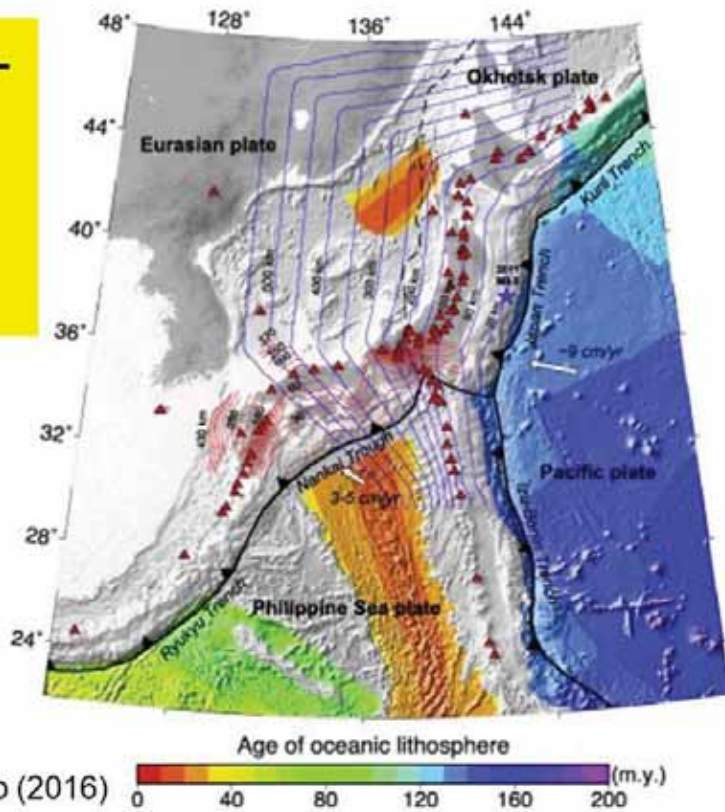
太平洋プレート
とフィリピン
海プレートの
上面の形状

Nakajima and Hasegawa
(2006, 2009)
Kita et al. (2010)

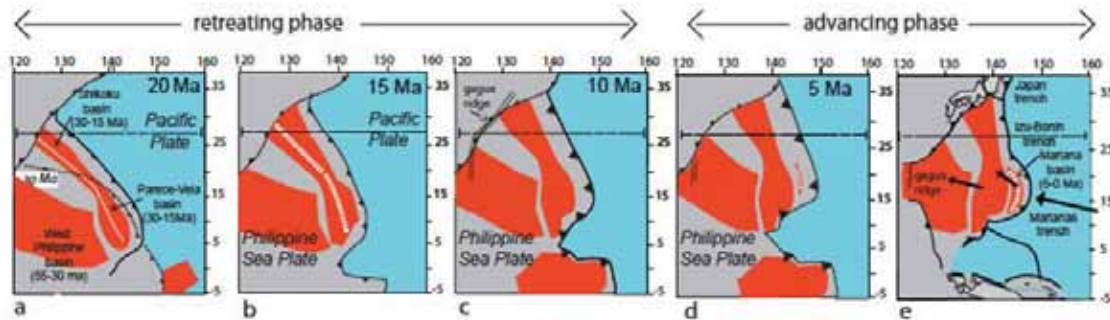


太平洋プレート
とフィリピン
海プレートの
年齢

Image from Liu and Zhao (2016)

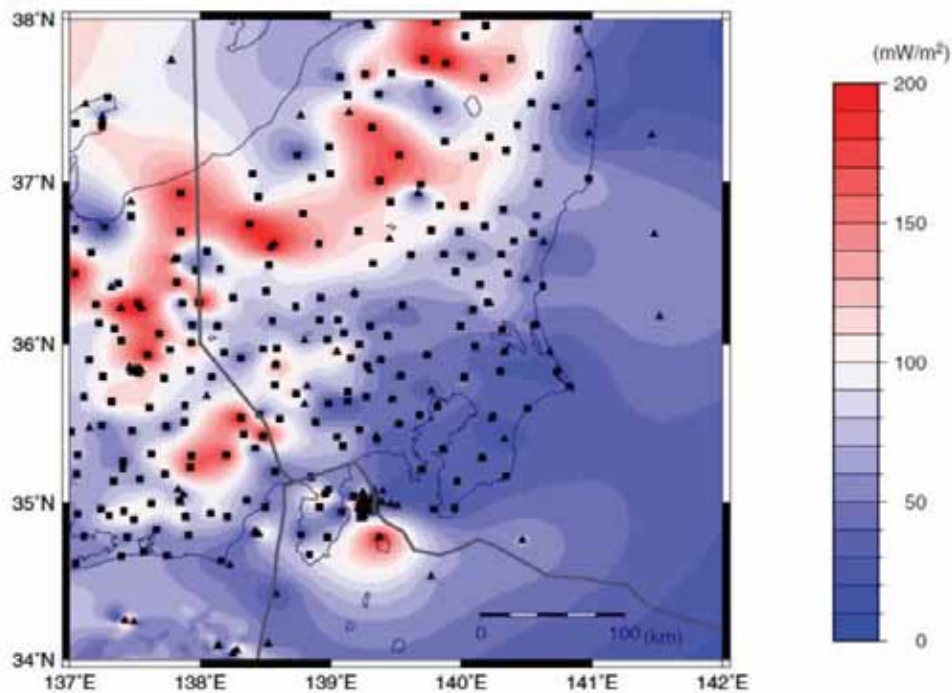


20Maから現在までの太平洋プレートと フィリピン海プレートの沈み込み史



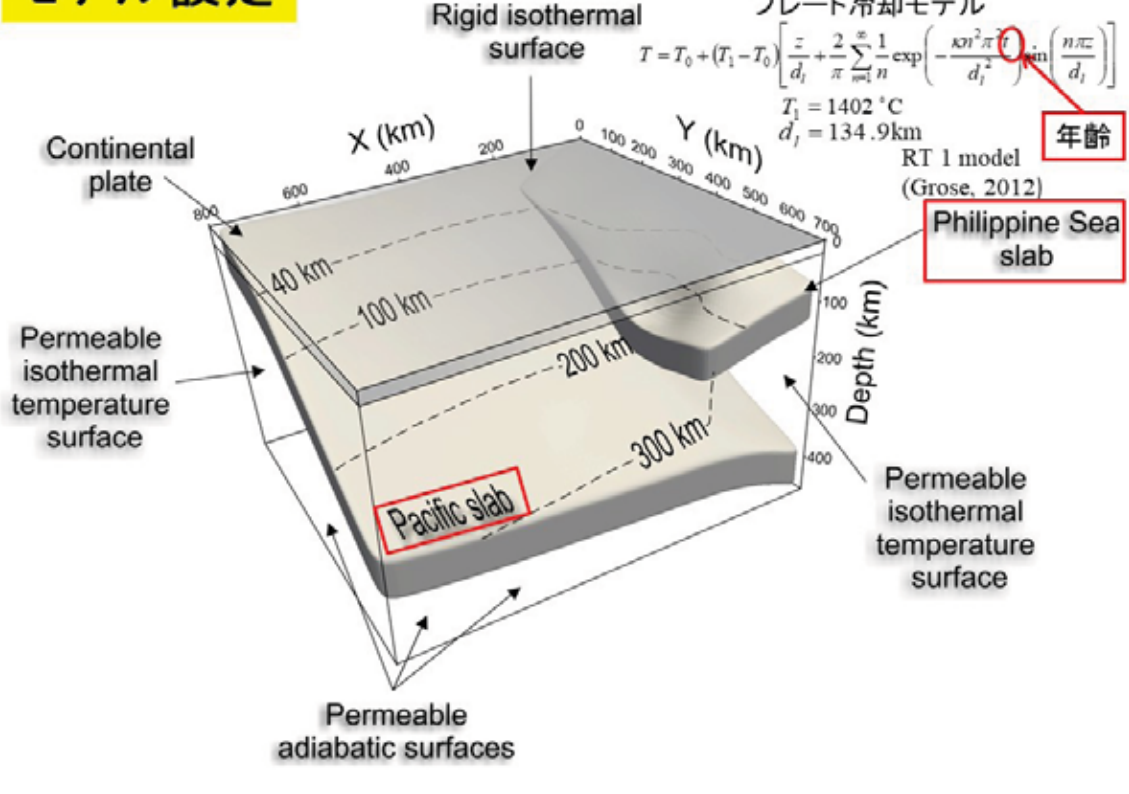
Hall et al. (1995); Faccenna et al. (2017)

地殻熱流量分布

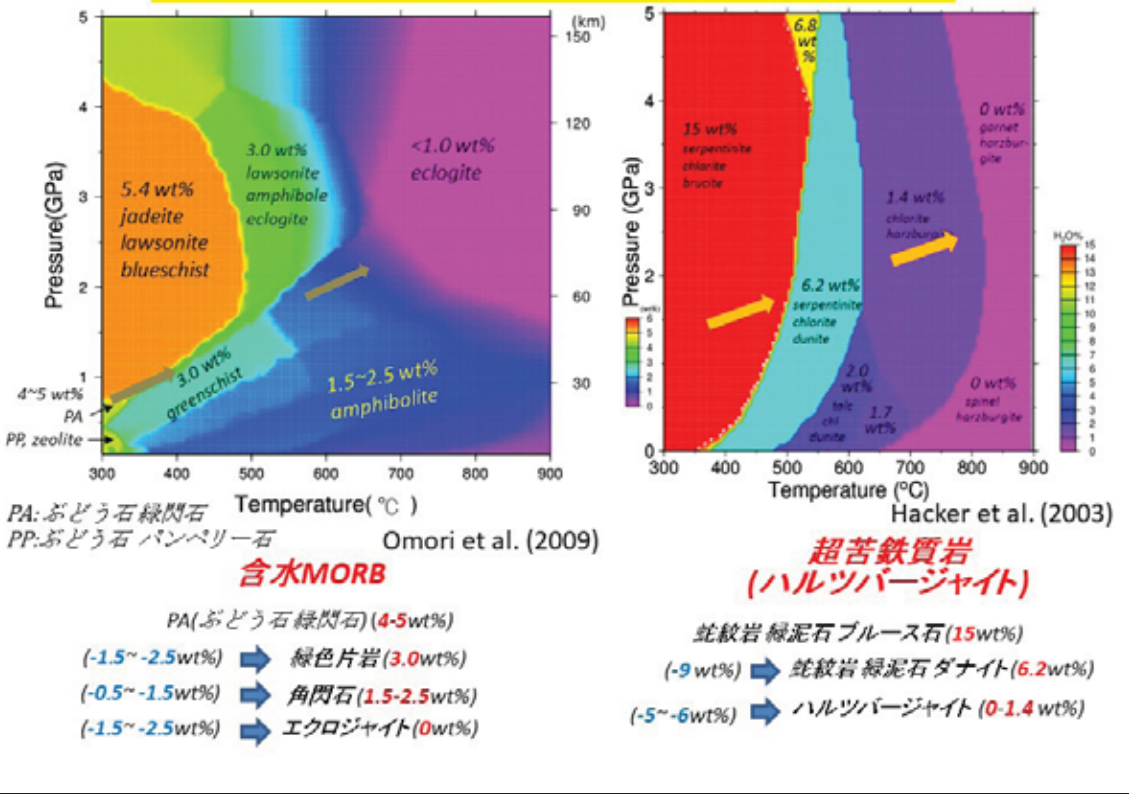


Yoshioka et al. (2015)

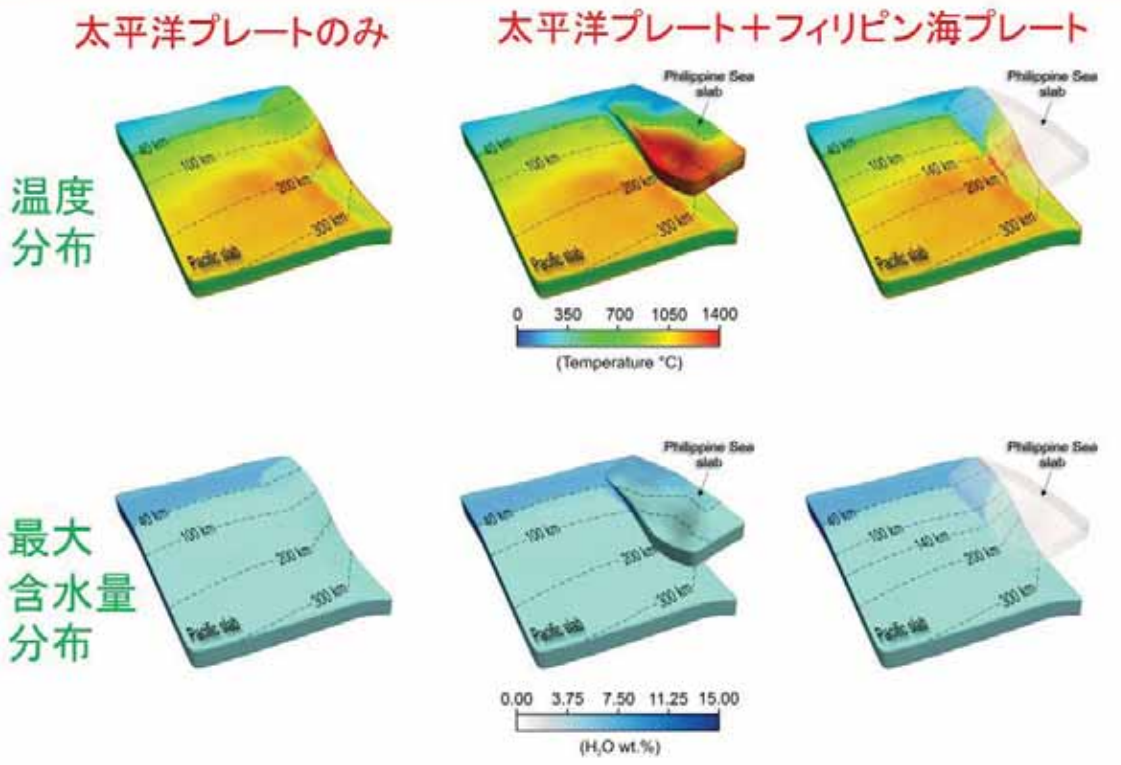
モデル設定



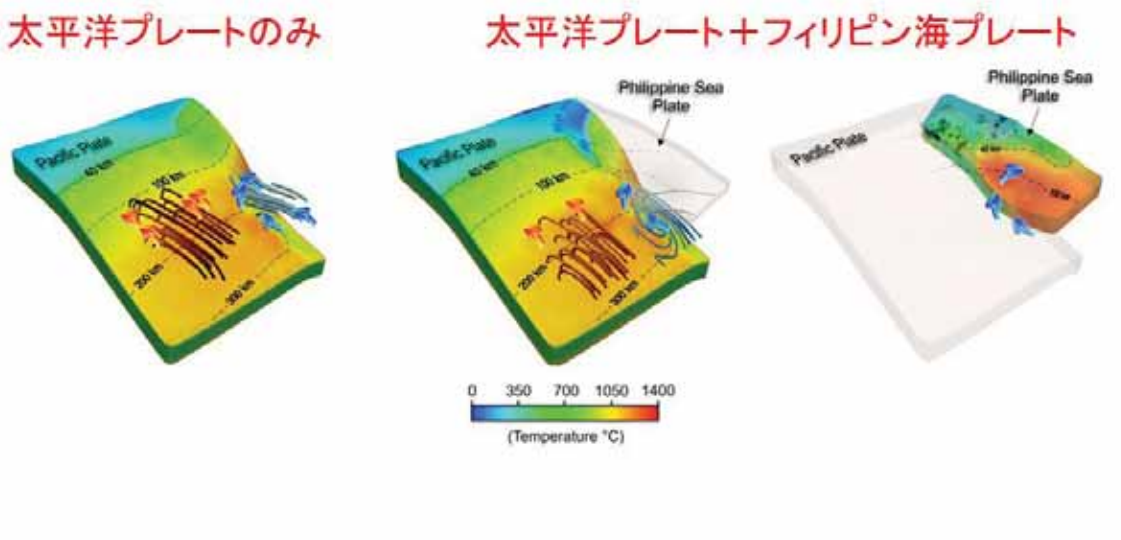
スラブに含まれる含水鉱物の最大含水量の相図



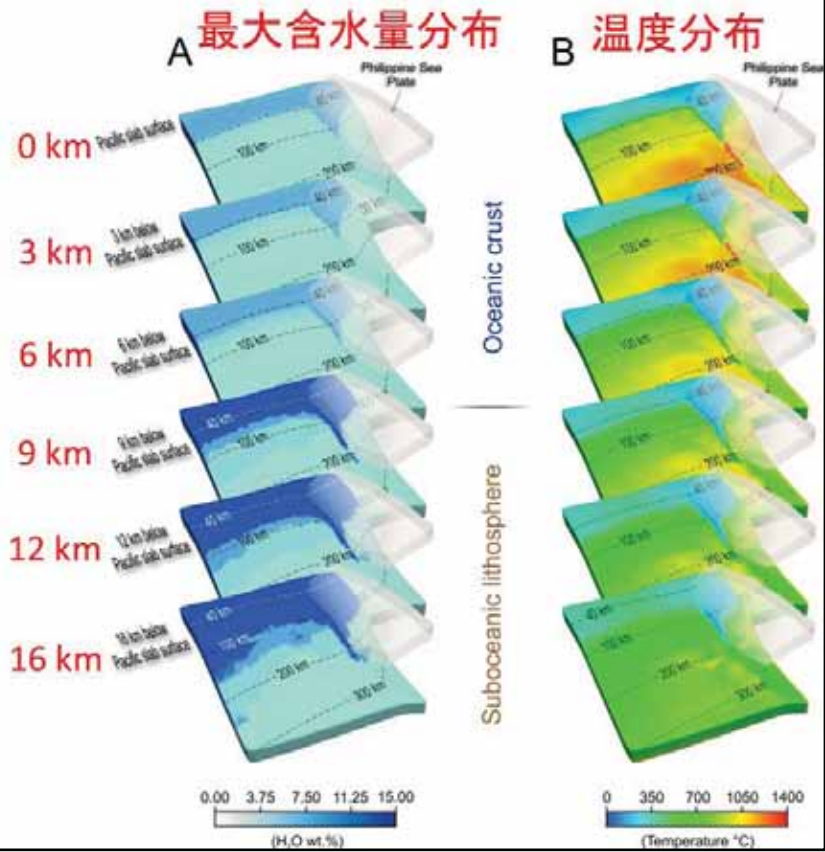
関東下におけるプレート上面での温度分布と最大含水量分布



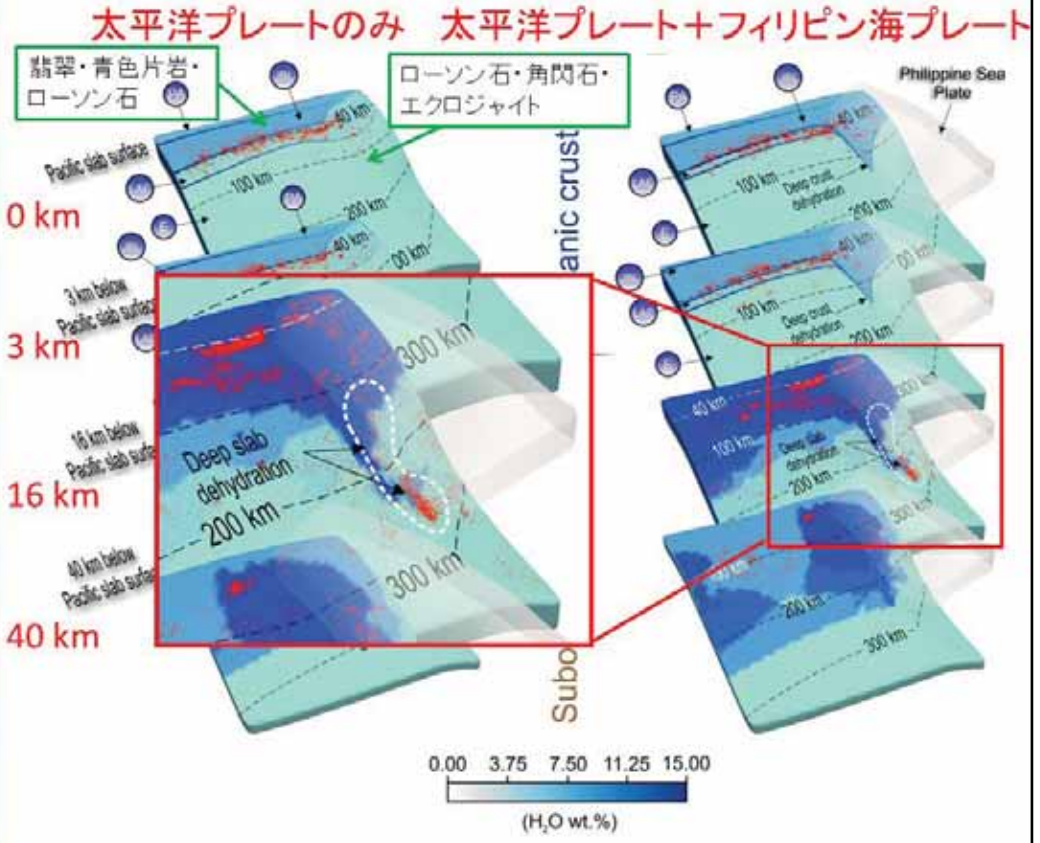
関東下におけるプレート上面付近の温度場と流れ場



関東下における各深さでのスラブ内の温度分布と最大含水量分布

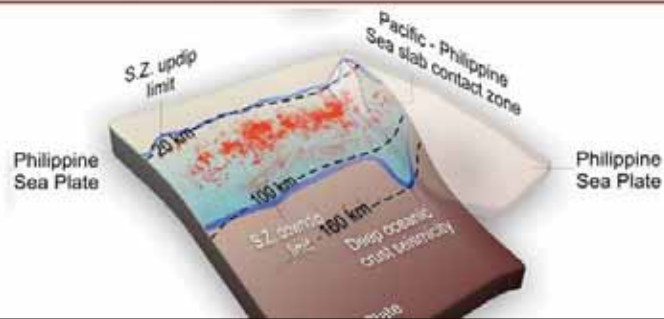


関東下における各深さでの最大含水量分布と微小地震の分布



まとめ

- ・関東下で太平洋、フィリピン海プレートの同時沈み込みに伴う高解像度の3次元温度構造モデリングを実現
- ・太平洋プレートの地殻内地震は、翡翠・青色片岩・ローソン石→ローソン石・角閃石・エクロジャイト相転移に伴う脱水域とよく対応
- ・フィリピン海プレートが太平洋プレートの温度場・最大含水量・微小地震分布に及ぼす影響
 - 太平洋プレートとの接触域で温度が低下
 - 接触域で、 H_2O がより深部に運ばれる
 - 接触域で、より深部に運ばれた H_2O の脱水域と太平洋プレートの深部の地震活動がよく対応



ご清聴
有難うございました。

