

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22340126

研究課題名(和文)スラブ沈み込みに伴う日本列島下の温度分布・物質循環と地震学的微細構造の関連性

研究課題名(英文) Relationship between temperature distributions and material circulation associated with subduction of oceanic plates and seismological detailed structures beneath the Japanese Islands

研究代表者

吉岡 祥一 (Yoshioka, Shoichi)

神戸大学・都市安全研究センター・教授

研究者番号：20222391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)： Hi-netの地殻熱流量データを用い、西南日本の隆起・沈降域でそれぞれ地殻熱流量が大・小となることを示した。2次元箱型熱対流モデルを構築し、プレート境界での摩擦熱と削剥・堆積による温度変化の効果により、上記のような地殻熱流量の分布が説明できることを示した。2つの海洋プレートを同時に沈み込ませることができるモデルを開発し、関東地域の低地殻熱流量がフィリピン海プレートの沈み込みによるものであることを示した。

また、基盤観測網で得られた地震波形データを用いて、九州地方の三次元P波減衰構造を推定し、前弧側のマントルウェッジが蛇紋岩化し、背弧側のマントルウェッジに高減衰域が分布することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： Using Hi-net borehole data, we showed that heat flow values are high and low in the uplifted and subsided regions, respectively, in southwest Japan. Constructing a 2D box-type thermal convection model, such heat flow distribution can be explained by the effects of frictional heating on the plate interface and temperature increase and decrease due to erosion and sedimentation, respectively. Developing a 2D box-type thermal convection model with subduction of two oceanic plates simultaneously, we elucidated that low heat flow in the Kanto district can be brought by subduction of the cold Philippine Sea plate.

Using seismic waveforms obtained by nationwide seismic network in Japan, we estimated a 3D attenuation structure for P-waves in the Kyushu district. Based on the results, we concluded that fore arc mantle wedge is serpentinized, and high attenuation areas are distributed in the back arc mantle wedge.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：温度構造 地殻熱流量 熱対流モデル 西南日本 関東地方 地震波減衰 蛇紋岩 脱水

1. 研究開始当初の背景

近年の高感度地震観測網 (Hi-net) の全国的な整備、及びトモグラフィ法による地震波データ解析により、日本列島下に沈み込む海洋プレートとマントルウェッジの地震学的構造が鮮明にイメージされるようになってきた。Nakajima et al. (2001)は、東北日本下のマントルウェッジ内にスラブにほぼ平行に傾斜したシート状の低速度域を見出し、火山のマグマ供給に関連した上昇流の流路とみなした。彼らは、海洋プレートからマントルウェッジに放出された水が上昇流に取り込まれ、部分熔融を引き起こすと考えた。また、Nakajima and Hasegawa(2004)のS波スプリッティングの解析から、東北日本の島弧火山より前弧側では、プレートの沈み込み方向とほぼ直交に、背弧側ではそれとほぼ平行に、振動するS波が速く到着することが明らかにされている。

また、中島は関東地方で太平洋プレートの海洋性地殻が深さ 120-150km まで低速度であることを見出した。低速度域が深く及んでいる範囲が、フィリピン海・太平洋の両プレートが接触している領域とよく対応していることから、そこではマントルウェッジから太平洋プレートへの熱供給が妨げられ、太平洋プレートが低温のまま深部まで沈み込んでいると推測した。国外での類似の研究もあるが、日本のような高密度・高感度の地震観測網のデータを使った研究は皆無であり、中島らの大量のデータを用いた高分解能の速度構造の研究成果は国内外の研究者の注目を集めている。

一方、西南日本に沈み込んでいるフィリピン海プレートは、若く温かいため、海洋性地殻内の含水鉱物は深さ 40-60km 程度で脱水反応を起こし、周囲に水を放出すると考えられている。深さ 40km 付近ではプレート境界で発生していると考えられている深部低周波地震 (微動) やスロースリップイベントも発見されている (Obara, 2002 ; Obara and Hirose, 2006)。Yoshioka, Toda and Nakajima(2008)は九州東部、四国西部、紀伊半島で3次元不均質速度構造モデルに対して深部低周波地震の震源再決定を行い、深部低周波地震がプレート境界付近で発生していることを示した。また、任意形状のスラブの沈み込みに伴う温度計算コードを開発し、数値シミュレーションと海洋性地殻の含水鉱物の相図を用いて、深部低周波地震が脱水反応と関係して発生している可能性があり、海洋性地殻の脱水域と深部低周波地震の発生深度がよく対応していること、深部低周波地震が発生する温度が 400-500 °C であることを指摘した。

また、上述の深部低周波地震やスロースリップイベントの発見をもたらした Hi-net は地中深部での観測孔を用いたものであるが、松本はこの観測孔を使って数年にわたって地殻熱流量の観測・データ整備を行ってきた。このデータは従来の地殻熱流量データに比べ、空間的に均一、高密度、高精度のデータであり、日本列島の陸域の地殻熱流量分布の理解が格段に進んだ (Matsumoto, 2009)。

このように、沈み込む海洋プレートに関しては、その不均質構造や地震発生機構の理解が進みつつあ

るものの、プレートの沈み込みに伴うマントルウェッジ内の流れや、海洋性地殻から脱水した水がどのようにマントルウェッジに供給され、循環するのはほとんどわかっていない。また、吉岡と松本は Hi-net の地殻熱流量が従来のポアホール地殻熱流量よりも有意に高いことを見出した。したがって、従来のデータを拘束条件として推定されてきたプレートの沈み込みに伴う温度分布 (例えば Hyndman et al., 1995) は全面的に見直す必要がある。本研究で、さらなる地震波解析と温度計算コードの高度化を行い、Hi-net の高い地殻熱流量データに合致するモデルを構築することで、地震学的微細構造とスラブの沈み込みに伴う温度分布・物質循環 (特に水) の関連性に関する研究が飛躍的に発展する可能性が高まる。

2. 研究の目的

本研究では、西南日本と関東地方の2地域に着目し、以下の3点を解明することを最終目標とする。

(1) スラブの沈み込みに伴う温度場

これまでも日本列島下のスラブの沈み込みに伴う温度分布の推定は行われてきた。しかしながら、用いた方程式・プレート形状・地殻熱流量データ等に問題があり、温度構造を全面的に見直す必要がある。特に、Hi-net の高い地殻熱流量データを説明するためには熱源が必要で、本研究では、吉岡らが開発を進めてきた熱と流れの数値シミュレーションコードをさらに発展させ、スラブ沈み込みに加えて、中島らのトモグラフィによって示唆されている大規模なホットプルームを考慮したモデルを開発し、従来とは大きく異なるスラブ沈み込みに伴う温度構造モデルを提案する。

(2) スラブの沈み込みに伴う海洋性地殻からの脱水とその後の水のゆくえ

地震波解析を用いて、波形の相関から計算した走時差を用いた double-difference トモグラフィ法による不均質構造の推定と、スラブ内地震のプレート上面での変換波の振幅情報から推定したインピーダンス比から、海洋性地殻の脱水状況を探る。海洋性地殻の脱水が原因とされている深部低周波地震が、なぜ西南日本で発生し、東北～関東地方で発生しないのかの原因を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、

(1) 2次元箱型の海洋プレートの沈み込みに伴う温度・流れの数値計算コードを開発し、数値シミュレーションを実施する。Hi-net の高い地殻熱流量データを説明できる、高精度、かつ現実的な温度分布モデルを構築する (吉岡)。

(2) 波形相関から計算した走時差データを用いた double-difference トモグラフィ、S波スプリッティングなどの地震波解析を行う。(中島)

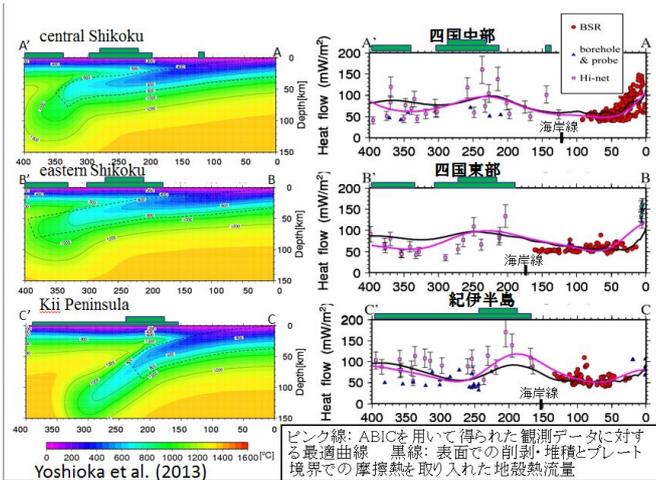
(3) (1) と(2) を有機的に融合し、総合的に解釈

することで、西南日本、関東の2地域における地震学的微細構造と温度分布・流れ場の関連性を明らかにする。

4. 研究成果

2次元箱型熱対流モデルを構築し、日本列島下の温度構造モデリングを行った。その際、これまでこのようなモデリングで使用されたことのなかったHi-netの地殻熱流量データを用いた。これにより、得られた温度構造の空間分解能が著しく向上した。その結果、西南日本では、南北方向に短波長の変動が見出され、紀伊山地や四国山地などの隆起地域では地殻熱流量が大きく、瀬戸内海などの沈降地域ではその値が小さいことを示した。このようなデータを説明するため、プレート境界での摩擦熱と隆起・沈降に伴う削剥・堆積による温度上昇・低下の効果を扱えるプログラムを開発し、従来のモデルに取り込んだ。その結果、上記の短波長の変動は後者の効果によってうまく説明できることを示した(下図)。

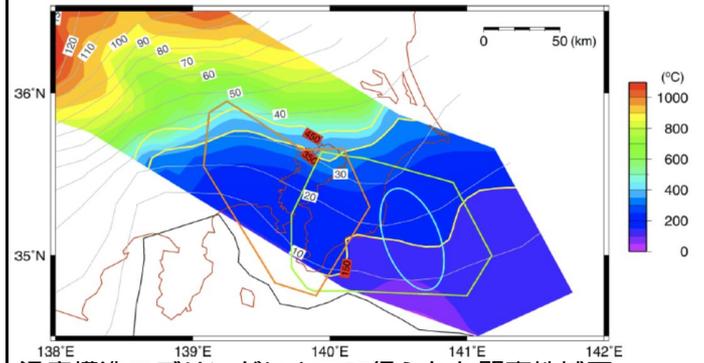
また、上記の地殻熱流量データから関東地方では、低地殻熱流量地域が広がっていることを見出した。この地域には、太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込んでおり、このような状況をモデル化するため、従来の1つの海洋プレートが沈み込むモデルを発展させ、2つの海洋プレートを同時に沈み込ませることができるプログラムを開発した。そのモデルを関東地域に適用し、同地域の低地殻熱流量は主として低温のフィリピン海プレートの沈み込みによるものと結論づけた(下図)。



(左図) 温度構造モデリングによって得られた西南日本におけるフィリピン海プレート沈み込みに伴う温度分布上面の温度分布(カラー)、プレートの沈み込み方向に沿った温度分布。

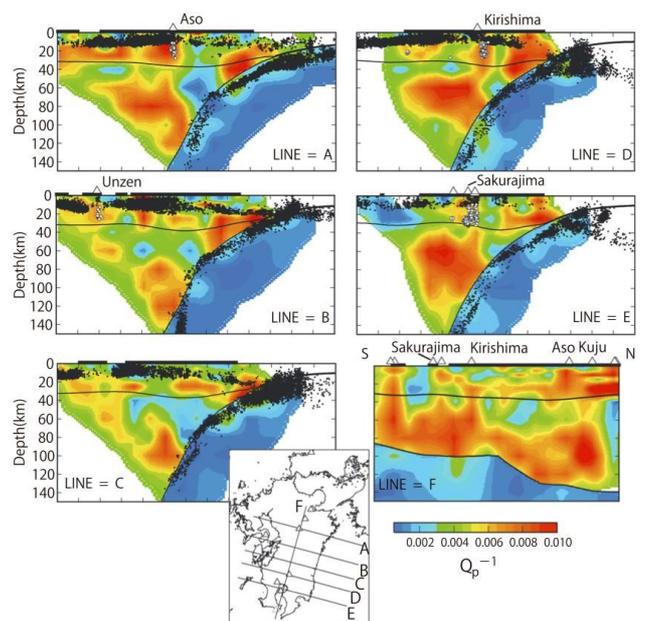
(上図) 四国中部を横切る鉛直断面内。(中図) 四国東部を横切る鉛直断面内。(下図) 紀伊半島を横切る鉛直断面内。(右図) 左図の測線における観測と計算による地殻熱流量分布。赤丸: BSRのデータ。青三角: ポアホールまたはヒートプローブのデータ。ピンク四角: Hi-netのデータ。(上図) 四国中部を通る測線。(中図) 四国東部を通る測線。(下図) 紀伊半島を通る測線。

(中図) 四国東部を通る測線。(下図) 紀伊半島を通る測線。



温度構造モデリングによって得られた関東地域下のフィリピン海プレート上面の温度分布(カラー)。オレンジ色、黄緑色、水色の線で囲まれた領域は、それぞれ、1923年大正関東地震のすべり域と1703年元禄関東地震の北西側のすべり域、1703年元禄関東地震の南東側のすべり域、SSEの発生域を表す。灰色の線はプレート上面の等深度線を表す。

また、地震波形の解析では、基盤観測網で得られたデータを用いて、九州地方の三次元P波減衰構造を推定した。その結果、前弧側のマントルウェッジは蛇紋岩化していること、背弧側のマントルウェッジには部分熔融域と解釈できる高減衰域が分布することが明らかになった。ただし、地表に火山の分布しない九州中部(阿蘇から霧島にかけて)下では、深さ40-60kmの減衰は小さいという特徴があり、非火山地域ではモホ面直下までメルトが連続的に上昇してきていないことを示唆している(下図)。



A~Fの6つの測線に沿うP波減衰構造の鉛直断面図。黒線はモホ面とプレート境界を表す。また、白丸、黒丸はそれぞれ低周波地震、通常の地震である。白三角は活火山である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計16件)

Saita, H., J. Nakajima, T. Shiina and J-I. Kimura, Slab-derived fluids, fore-arc hydration, and sub-arc magmatism beneath Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1658-1693, 2015. Doi:10.1002/2015GL063084

Ji, Y. and S. Yoshioka, Effects of slab geometry and obliquity on the interplate thermal regime associated with the subduction of three-dimensionally curved oceanic plates, *Geoscience Frontiers*, 6 Issue 1, 61-78, 2015. doi:10.1016/j.gsf.2014.04.011

Yabe, S., S. Ide and S. Yoshioka, Along-strike variations in temperature and tectonic tremor activity along the Hikurangi subduction zone New Zealand, *Earth, Planets and Space*, 66, 142, doi:10.1186/s40623-014-0142-6

Kaneshima, S. and S. Yoshioka, Dominant role of temperature on deep earthquake mechanics for the Tonga slab near the bottom of the upper mantle, *Earth, Planets and Space*, 66, 138, doi:10.1186/s40623-014-0138-2, 2014 (招待論文).

Kita, S., J. Nakajima, A. Hasegawa, T. Okada, K. Katsumata, Y. Asano and T. Kimura, Detailed seismic attenuation structure beneath Hokkaido, northeastern Japan: Arc-arc collision process, arc magmatism and seismotectonics, *J. Geophys. Res.*, 119, Issue 8, 6486-6511, August 2014, doi:10.1002/2014JB011099

Shiina, T., J. Nakajima, G. Toyokuni and T. Matsuzawa, Guided wave observations and evidence for the low-velocity subducting crust beneath Hokkaido, northern Japan, *Earth, Planets and Space*, July 2014, 66-69, doi:10.1186/1880-5981-66-69

Kimura, J-I. and J. Nakajima, Behavior of subducted water and its role in magma genesis in the NE Japan arc: A combined geophysical and geochemical approach, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 143, 165-188, 2014, doi:10.1016/j.gca.2014.04.019

Nakajima, J., Seismic attenuation beneath Kanto, Japan: Evidence for high attenuation in the serpentinized subducting mantle, *Earth, Planets and Space*, 66, 12, doi:10.1186/1880-5981-66-12,

Yoshioka, S., Y. Suminokura, T. Matsumoto and J. Nakajima, Two-dimensional thermal modeling of subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan, *Tectonophysics*, 608, 1094-1108, 2013, doi:10.1016/j.tecto.2013.07.003

Nakajima, J., S. Hada, E. Hayami, N. Uchida, A. Hasegawa, S. Yoshioka, T. Matsuzawa and N.

Umino, Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constrains on mantle dynamics and arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 118, 5838-5855, 2013, doi:10.1002/2013JB010388

Yoshioka, S. and Y. Matsuoka, Interplate coupling along the Nankai Trough, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data: Effects of subducting plate geometry and spacing of hypothetical ocean-bottom GPS stations, *Tectonophysics*, 600, 165-174, 2013, doi:10.1016/j.tecto.2013.01.023

Fujita, E., T. Kozono, H. Ueda, Y. Kohno, S. Yoshioka, N. Toda, A. Kikuchi and Y. Ida, Stress field change around the Mount Fuji volcano magma system caused by the Tohoku megathrust earthquake, Japan, *Bull Volcanol*, 75: 679, 1-14, 2013, doi:10.1007/s00445-012-0679-9

Hasegawa, A., J. Nakajima, T. Yanada, N. Uchida, T. Okada, D. Zhao, T. Matsuzawa and N. Umino, Complex slab structure and arc magmatism beneath the Japanese Islands, *J. Asian Earth Sci.*, 78, 277-290, 2013, doi:10.1016/j.jseaes.2012.12.031

Nakajima, J., K. Yoshida and A. Hasegawa, An intraslab seismic sequence activated by the Tohoku-oki earthquake: Evidence for fluid-related embrittlement, *J. Geophys. Res.*, 118, 3492-3505, doi:10.1002/jgrb.50246, 2013.

Nakajima, J., N. Uchida, T. Shiina, A. Hasegawa, B.R. Hacker and S.H. Kirby, Intermediate-depth earthquakes facilitated by eclogitization-related stresses, *Geology*, 41, 659-662, 2013, doi:10.1130/G33796.1

Shiina, T., J. Nakajima and T. Matsuzawa, Seismic evidence for high pore pressure in the oceanic crust: Implications for fluid-related embrittlement, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2006-2010, doi:10.1002/grl.50468, 2013.

[学会発表](計22件)

青木 朝美・吉岡 祥一・金野 圭祐, 2012年12月7日三陸沖地震に伴う津波の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月20日, 幕張メッセ(千葉県).

季 穎鋒・吉岡 祥一, 曲面スラブの沈み込みに伴う温度場・流れ場・地殻熱流量の3次元数値モデリング, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月20日, 幕張メッセ(千葉県).

季 穎鋒・吉岡 祥一・松本 拓己, 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度・流れ・地殻熱流量の3次元数値モデリング, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月21日, 幕張メッセ(千葉県).

金野 圭祐・吉岡 祥一, 断層のステップ部における動的破壊の相互作用の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 2013年5月22日, 幕張メッセ(千葉県).

Yingfeng Ji, Shoichi Yoshioka and Takumi Matsumoto, Three-dimensional numerical simulations of temperature, fluid flow and heat flow associated with subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan, AOGS Annual Meeting, 2013 年 6 月 28 日, Brisbane(Australia).

Shoichi Yoshioka and Yoshiko Matsuoka, Slip distributions of three slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data, IAHS-IAPSO-IASPEI, 2013 年 7 月 25 日, Gothenburg(Sweden).

Yingfeng Ji, Shoichi Yoshioka and Takumi Matsumoto, Three-dimensional numerical simulations of temperature, fluid flow and heat flow associated with subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan, ERI workshop program "Study on occurrence mechanism of slow earthquakes: Toward resolving the relationship between slow earthquakes and megathrust" 2013 年 9 月 18 日, 東京大学地震研究所(東京都).

中島 淳一・羽田周平・速水絵里佳・内田直希・長谷川昭・吉岡 祥一・松澤暢・海野徳仁, 東北地方の三次元 P 波減衰構造と島弧マグマ活動 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 7 日, 神奈川県民ホール(神奈川県).

金野 圭祐・吉岡 祥一, 差分法を用いたマルチスケール動的断層破壊シミュレーションの試み, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 7 日, 神奈川県民ホール(神奈川県).

吉岡 祥一・松岡美子, 豊後水道下で発生した長期的のスロースリップイベントについて 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 9 日, 神奈川県民ホール(神奈川県).

季 穎鋒・吉岡 祥一・松本拓己, 西南日本におけるプレート境界面の摩擦係数と放射性元素の空間分布が地殻熱量に与える影響 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 9 日, 神奈川県民ホール(神奈川県).

末永 伸明・吉岡 祥一, 東海地域におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場の数値シミュレーション 日本地震学会 2013 年度秋季大会, 2013 年 10 月 9 日, 神奈川県民ホール(神奈川県).

Shoichi Yoshioka and Yoshiko Matsuoka, Slip distributions of three slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, inferred from new inversion analyses of GPS data, AGU fall meeting, 2013 年 12 月 12 日, San Francisco(America).

末永 伸明・吉岡 祥一・松本 拓己, 東海地域におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場・脱水と想定東海地震・SSE・LFE との関連性, KANAME 平成 25 年度研究集会, 2014 年 2 月 27 日, 東京大学地震研究所(東京都).

吉岡 祥一・松岡美子, 豊後水道下で発生する長期的のスロースリップイベントについて, KANAME 平

成 25 年度研究集会, 2014 年 2 月 27 日, 東京大学地震研究所(東京都).

Yoshioka, S., Y. Ji and T. Matsumoto, Thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate in southwest Japan, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 2014.4.28, PACIFICO Yokohama(神奈川県)(招待講演).

Yingfeng Ji and Shoichi Yoshioka, 3D numerical modeling of thermal regime and mantle flow associated with subduction of the two oceanic plates, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 2014 年 4 月 28 日, PACIFICO Yokohama(神奈川県).

Shoichi Yoshioka, Yingfeng Ji and Takumi Matsumoto, Thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate in southwest Japan, Japan Geoscience Union Meeting 2014, 2014 年 4 月 28 日, PACIFICO Yokohama(神奈川県).

末永 伸明・吉岡 祥一・松本 拓己, 東海地域におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う温度場・脱水と想定東海地震・SSE・LFE との関連性, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 2 日, パシフィコ横浜(神奈川県).

Shoichi Yoshioka, Yingfeng Ji and Takumi Matsumoto, 3D thermal modeling associated with subduction of the Philippine Sea plate in southwest Japan, IASPEI-LACSC, 2014 年 7 月 24 日, Bogota(Colombia).

① Nobuaki Suenaga, Shoichi Yoshioka and Takumi Matsumoto, Relationships among temperature, dehydration, and the occurrence of a megathrust earthquake, LFEs, and a SSE in the Tokai region, central Japan, AOGS 2014 in Sapporo, Japan., 2014 年 8 月 1 日, Royton Sapporo Hotel(北海道).

② Nobuaki Suenaga, Shoichi Yoshioka and Takumi Matsumoto, Relations among temperature, dehydration of the PHS plate, and the three seismic events in the Tokai district, Joint Workshop on Slow earthquakes: "The prospects for studies of slow earthquakes toward Nankai Megaquake predictions and disaster preventions", 2014 年 9 月 9 日, Kyoto University (京都府).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 祥一 (YOSHIOKA, Shoichi)

神戸大学・都市安全研究センター・教授

研究者番号: 20222391

(2) 研究分担者

中島 淳一 (NAKAJIMA, Junichi)

東北大学・理学(系)研究科(研究員)・准教授

研究者番号: 30361067