

平成30年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03715

研究課題名(和文) 沈み込むプレート上層部における間隙流体循環の解明と巨大地震発生帯への影響の評価

研究課題名(英文) Study of pore fluid circulation in the uppermost part of the subducting plate and its influence on seismogenic zone of large thrust earthquakes

研究代表者

山野 誠 (YAMANO, Makoto)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60191368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：日本海溝海側の太平洋プレート上において、地殻熱流量が3～5 kmのスケールで顕著な増減を繰り返すことを明らかにした。この短波長変動は、海溝近傍でのプレートの曲がりによる海洋地殻の破碎、それに伴う流体循環の発達、不均質に進行することを示すものと考えられる。また、同じく日本海溝海側の海底電磁気探査データから比抵抗構造を求めることにより、太平洋プレートの上部における水の存在、その海溝へ向かっての変化に関する情報を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We revealed that heat flow significantly varies at a scale of 3 to 5 km on the incoming Pacific plate seaward of the Japan Trench. The short-wavelength heat flow variation can be attributed to heterogeneity in development of fractures and fluid circulation in oceanic crust due to bending of the plate near the trench. We also estimated the electrical resistivity structure seaward of the Japan Trench using electromagnetic survey data and could obtain information on water distribution in the upper part of the Pacific plate and its variation toward the trench.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：日本海溝 太平洋プレート 海洋地殻 流体循環 地殻熱流量 電磁気探査 沈み込み帯 温度構造

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 日本海溝海側の高熱流量異常

沈み込む海洋プレートの温度構造は、沈み込み帯の温度構造を支配する主要な要素の一つである。日本海溝では、海溝海側の太平洋プレート上で、海底年齢から予測される値に比べて有意に高い熱流量が観測されており、沈み込むプレートの温度構造に異常がある可能性を示唆している。この高熱流量の広がり原因を調べるため、2007~2010年に北緯38~40度付近で観測調査を行った。その結果、この範囲では海溝海側斜面からアウターライズにかけて熱流量が高く、ばらつきが大きいこと、高熱流量は海溝軸から150km付近までに限られることが判明した(文献[1])。

高熱流量の原因になり得るものとして、海溝海側斜面に発達する正断層に沿った間隙水流動、プチスポット火成活動(日本海溝海側での特異なプレート内火成活動、文献[2])がある。しかし、これらによる異常は断層や火山体の近傍に限られることから、観測された広範囲の熱流量異常の主要な原因ではないと考えられる。

### (2) 地震波速度構造の異常

日本海溝・千島海溝の海溝海側において、地震波速度構造が海溝軸に向かって変化することが明らかにされている(文献[3]等)。すなわち、海溝軸近傍で海洋地殻内のP波速度( $V_p$ )、S波速度( $V_s$ )が低下、 $V_p/V_s$ が増加し、異常を示す部分は海溝軸に向かって厚さを増す傾向を示している。この速度異常は、沈み込みに伴う太平洋プレートの曲がりにより、海洋地殻に亀裂が生じて水が入り込んだことを示すものと考えられる。速度構造の変化が始まるのは海溝軸から150km付近で、日本海溝海側における高熱流量の範囲とほぼ一致しており、熱流量異常が海洋地殻の破碎に関係することを示唆している。

### (3) 海洋地殻内の流体

海洋地殻最上部には透水率が高い層(厚さ数百m)があることが知られており、この透水層内における流体の循環は、海洋プレート表層部の熱輸送に重要な役割を果たしている。最近では、沈み込んだ海洋地殻内での流体循環が熱を輸送する可能性が指摘されており、四国東部沖の南海トラフ底における高熱流量異常は、この流体循環によると解釈されている(文献[4])。

一方、海洋プレートによって沈み込み帯に持ち込まれる水は、地震活動やマグマ生成に大きく影響すると考えられる。沈み込む前の海洋プレートに水が入り込む過程を調べるには、電磁気探査で浅部の比抵抗構造を求めることが有効である。これには、自然電磁場変動による長周期の探査に加えて、人工電流源による短周期の探査が必要となる。中米海溝における人工電流源探査では、海溝海側で海洋地殻~マントル最上部に低比抵抗が検出さ

れ、断層に沿って水が入り込んでいると推定されている。国内でも同様な探査に使用できる人工電流源の開発が進められている。

## 2. 研究の目的

日本海溝海側で観測される地震波速度構造と地殻熱流量の異常は、「沈み込みに伴う太平洋プレートの変形で地殻が破碎し、透水性が増して間隙流体循環により深部から熱が輸送される」というモデル(間隙流体循環モデル)で大局的には説明できる(文献[5])。本研究の目的は、このモデルを新たな観測と数値計算によって検証すること、さらには、間隙流体循環がプレート境界面付近の温度・流体分布に及ぼす影響を評価することである。このため、以下の3点を研究の焦点とする。

### (1) 熱流量測定による間隙流体循環モデルの検証

日本海溝・千島海溝海側の、地震波速度構造が得られている測線上で熱流量測定を行う。また、速度構造から推定される海洋地殻透水層の厚さ変化が、流体循環と熱輸送の変化を介して表面熱流量に及ぼす影響を、数値モデリングによって求める。得られた熱流量の実測値と計算値を比較することにより、「間隙流体循環モデル」の妥当性を検討する。

### (2) 電磁気探査による海洋地殻内流体分布の解明

同じ測線上で電磁気探査を行い、海洋地殻の比抵抗構造とその異方性を調べる。これを地震波速度構造と組み合わせ、プレート変形で生じた亀裂(水)の形状やつながり方に関する情報を得る。それに基づいて地殻の含水率・透水率の空間変化を求め、「間隙流体循環モデル」を検証・改良する。また、海溝海側で海洋地殻に水が入る過程について考察する。

### (3) 間隙流体とその循環が地震発生帯に及ぼす影響の評価

(1)、(2)で得た熱流量、含水率・透水率の分布を制約条件として、流体循環の効果を含めた熱モデル計算を行い、沈み込む前のプレート上層部、またプレート境界面(地震発生帯)付近の温度構造を求める。さらにその温度構造を用いて、海洋地殻に入り込んだ水がどのように沈み込み、深部でどのように放出されるかを推定する。また、南海トラフ等、他の沈み込み帯において、流体循環による熱輸送が地震発生帯に及ぼす影響との比較も行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 作業モデル

日本海溝海側における高熱流量異常の成因について、作業仮説として以下の「間隙流体循環モデル」を考え(図1)。「沈み込みに伴う海洋プレートの曲がりによって海洋地殻上部が破碎し、破碎はしだいに深い層へ進行する。これにより透水層の厚さが増し、間隙流

体循環が地殻深部から熱を効率的に汲み上げて、海底面の熱流量を高める。」

このモデルを観測によって検証し、また必要に応じて修正するという形で研究を進めた。

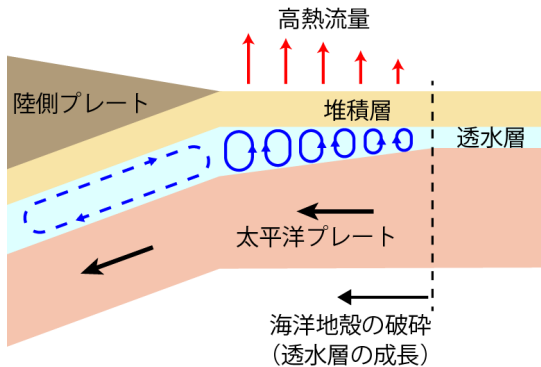


図1 海溝付近における海洋地殻の破碎による「間隙流体循環モデル」

### (2) 地殻熱流量測定

水深 7000 m まで使用可能な深海用熱流量プローブや温度センサの製作を進め（従来の機器は耐圧 6000 m）、日本海溝及び千島海溝の海溝軸近傍まで測定が行えるようにする。

測定装置を吊り下げたまま、船を移動させながら海底への貫入を繰り返す方式により、数百 m 間隔での高密度の測定を行う。その間、音響信号を用いて船と測定装置の相対位置を決め、海底地形や断層構造と測定点の位置関係を把握する。

### (3) 海底電磁気探査

探査の主な対象は、海底面から約 10 km の範囲であり、特に海洋地殻上部の比抵抗構造を求めることが重要である。これには短周期の電磁場変動の観測が必要であるが、水深が深いため、電離層起源の自然電磁場変動は短周期成分が大きく減衰する。このため、以下の 2 種類の探査法を組み合わせて用いる。

#### ① 人工電流源探査

長さ数百 m の電極ケーブルを海底直上（高度～50 m）で曳航して電磁信号を送信し、短周期に対応した海底電位磁力計（OBEM）、または海底電位計（OBE）により受信する（探査深度：数十 m～数 km）。探査地域ごとに複数の受信機を数 km 間隔で設置し、直交する 2 方向に電流源を曳航して、比抵抗構造の異方性や局所的な変化を調べる。

#### ② 自然電磁場探査

OBEM を、測線に沿って数十 km 間隔で設置する。2～3 か月以上の期間、電離層起源の自然電磁場変動を観測する（探査深度：数 km～100 km）。

## 4. 研究成果

### (1) 観測機器の改良

海底熱流量測定の精度を高めること、また

堆積物に貫入する際の抵抗が小さく、壊れにくいものにするを旨とし、従来よりも細くてセンサ数の多い温度プローブと、それに対応する計測回路の開発を行った。海中での動作試験を行いながら製作を進めてきたが、現状では海中での測定値が不安定になることがあり、さらに改良を加える予定である。

また、ピストンコアラー等に取り付けて熱流量測定に使用できる小型温度計については、耐圧水深が 7000 m のものを新たに製作した（従来のものは 6000 m 耐圧）。これにより、日本海溝や千島海溝の海溝軸近傍での熱流量測定が可能となった。

### (2) 観測調査航海

2015 年～2017 年に、3 回の調査航海（「新青丸」KS-15-16、KS-16-15、「よこすか」YK17-13）により、熱流量測定、海底電磁気探査（人工電流源、自然電磁場）を実施した。測定点、観測点の位置を図 2 に示す。

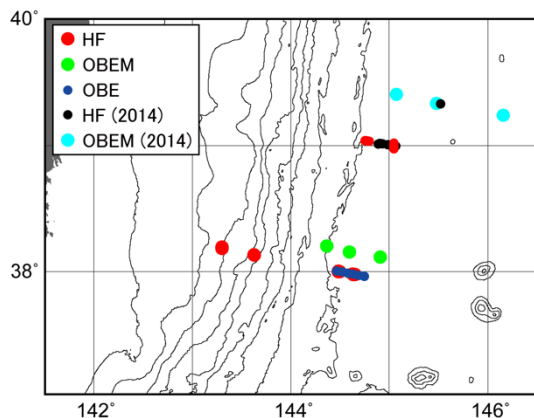


図2 本研究において、および 2014 年に実施した熱流量測定（HF）、電磁気探査の観測地点

### (3) 日本海溝海側における短波長熱流量変動

日本海溝海側の高熱流量域における、大きな変動について詳しく調べるため、北緯 39 度付近の OUTER RISE 上で高密度の熱流量測定を実施した。これは、本研究に先立つ 2014 年から取り組み始めた課題である。2014 年には、海溝に直交する東西方向の測線に沿って、海溝軸から 60～80 km の付近で数百 m 間隔の測定を行っており、熱流量が 3～5 km のスケールで急激な増減を繰り返すことが判明した。

本研究では、この東西測線と交わる方向には熱流量がどう変化するかを調べるため、南北方向の測線で数百 m 間隔の高密度測定を行った（KS-15-16 航海）。その結果、南北方向（海溝軸や断層の走向に平行）にも、東西方向（構造と直交）と同様に、熱流量が数 km スケールで大きく変化することが明らかになった。

また、より海溝軸に近く、正断層が発達する地域における熱流量の変動についても調べた。具体的には、北緯 38 度付近、39 度付近において、顕著な崖地形を示す断層を横断する測線に沿って測定を実施したところ（KS-15-

16、KS-16-15 航海)、いずれも断層付近で海底地形(崖)の影響では説明できない変化が観測された。これらの局所的な変動の原因として、断層に伴う流体の流れが考えられるが、その検証にはさらに多くの測定が必要である。

千島海溝海側では、海溝に向かって明瞭な地震波速度構造の変化が認められており、熱流量分布を日本海溝と比較することは、「間隙流体循環モデル」を検証する上で非常に重要である。2016年のKS-16-15航海において、千島海溝海域での熱流量測定を計画していたが、海況不良のため実施できなかった。これは、今後取り組むべき重点課題の一つである。

#### (4) 太平洋プレート上部の比抵抗構造

##### ① 既存のデータの解析

本研究以前に、日本海溝海域で行われた海底電磁気探査のデータ解析を進めた。北緯38度付近で海溝を東西に横断する測線については、OBEMを用いた自然電磁場探査データの解析により、アウターライズの海溝寄りでは深さ10 km以浅の領域が低比抵抗であることが明らかになった。これは、沈み込む前の太平洋プレートの海洋地殻が大量の水を含んでいることを示唆している。

また、本研究に先だて2014年に、北緯39.5度付近のアウターライズ上において予備的な人工電流源探査を実施した。電流源からのシグナルを、海底面上のOBEMで捉えた電場強度の距離減衰から、探査地点近傍の海洋地殻上部が低比抵抗であることが推定された。この結果も、地殻浅部に流体が存在することを示唆するものである。

2014年に同じ地域で実施した自然電磁場探査データの解析によっては、太平洋プレートの上部数十 km が、アウターライズの海溝寄りにおいて、海側に比べて低比抵抗であることが判明した。これは、プレートの変形に伴って、マントル内の水の分布に変化が生じたことを反映している可能性がある。

##### ② 海底電磁気探査

2017年に、北緯38度付近の日本海溝海側海域において、人工電流源を用いた電磁気探査を実施した(YK17-3航海)。海溝に直交する方向に6台のOBEを約4 km間隔で設置し、その上を通過して電流源を約30 km曳航し、電流送信を行った。短い測線ではあるが、6000 m近い大水深において本格的な人工電流源探査に成功したのは、初めてのことである。この探査測線は、これまでに地震波速度構造や反射法地震探査断面が得られている測線にあり、顕著な正断層を横断している。得られたデータを解析することで、海洋地殻最上部の比抵抗が、断層や速度構造に対応してどのように変化しているかが、明らかになる見込みである。

また、この人工電流源探査の約20 km北側で、自然電磁場探査のためのOBEM3台を2016年に設置し(KS-16-15航海)、2017年に

回収した(YK17-3航海)。これは、①に記した北緯38度付近における比抵抗構造を、さらに詳細に調べることを目的としたもので、海溝軸に向かっての構造変化の情報が得られることが期待される。

#### (5) 流体循環と熱輸送のモデル

##### ① 日本海溝海側海域

本研究の基礎となる「間隙流体循環モデル」において、透水層の厚さが海溝に向かって一様に増すとすると、日本海溝海側の広域的な高熱流量(高い平均値)を説明することができる(文献[5])。その一方、高熱流量域における観測値は大きなばらつきを示し、特に(3)に記した高密度測定によっては、3~5 kmのスケールでの急激な増減が明らかになった。このような短波長の変動は、海底下浅部に起因すると考えられる。

そこで、海洋地殻の構造には形成過程等で生じた不均質性があることから、プレートの曲がりによる破碎も不均質に進行するというモデルを考えた(図3、文献[6])。透水層の厚さや透水率の値が場所によって異なれば、流体循環で汲み上げられる熱の量に違いが生じ、海底面での熱流量も大きく変動する。

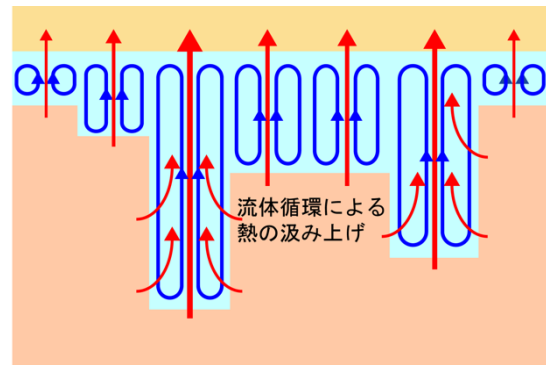


図3 不均質に破碎された海洋地殻での流体循環により、熱流量の短波長変動を説明するモデル

この不均質な破碎過程の効果については、透水層の厚さが部分的に急激に増加したと仮定した、流体循環と熱輸送の数値計算がなされ、観測されたような数 km スケールの熱流量変動が生じることが示されている(文献[6])。これらの結果は、アウターライズ上で観測される熱流量の変動が、海洋地殻破碎の進行状況を反映している可能性を示すものである。

##### ② 南海トラフ

南海トラフにおいては、1.の(3)に記したように、沈み込んだ海洋地殻内での流体循環により、トラフ底(海溝軸付近)における高熱流量異常が生じると推定されている(文献[4])。実際に南海トラフ底で観測される熱流量は、地域による変化が大きく、特に東経136度付近を境にして、西側の高い値から東側の低い値へ緩やかに変化することが明らかになっている(文献[6])。また136度付近では、沈み込

むフィリピン海プレート（四国海盆）海洋地殻の構造も東西に変化することが知られている。

本研究では、この熱流量分布と海洋地殻構造の関係に着目し、海洋地殻上部の透水層内の流体循環を含めた熱モデル計算を行った。その結果、透水率が等方的でなく、透水率の値自体と異方性が東経 136 度付近を境に変化するとした場合に、観測される熱流量分布を説明できることが示された。この透水率構造の境界は、四国海盆の形成時に拡大方向と速度が変化した場所に対応している。すなわち、プレートの形成過程に由来する海洋地殻の構造が、流体循環を介して沈み込み帯の温度構造に影響する可能性があると考えられる。

#### (6) まとめ

日本海溝アウターライズを中心に、地殻熱流量測定と電磁気探査を実施し、既存のデータの解析やモデル計算を行うことにより、プレートの曲がりによる海洋地殻の不均質な破碎、プレート上層部における水の存在やその変化について、重要な情報が得られた。しかしながら、熱と電磁気による情報を有効に結びつけるには至っておらず、本研究で新たに得たデータの解析を進めるとともに、さらに観測調査を行うことが必要である。

一方、海溝近傍での流体流動と熱輸送の過程の解明を進めるには、地球物理学的観測（地震、熱、電磁気等）に加えて、物質科学的調査（地質、岩石、地球化学等）や実験によるアプローチも重要である。これらの幅広い分野が互いに連携し、また対象とする地域を広げた、より総合的な研究への発展を目指している。

#### <引用文献>

- [1] Yamano, M. et al., 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 407, 196-204.
- [2] Hirano, N. et al., 2006, *Science*, 313, 1426-1428.
- [3] Fujie, G. et al., 2013, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 88-93.
- [4] Spinelli, G. A. and K. Wang, 2008, *Geology*, 36, 887-890.
- [5] Kawada, Y. et al., 2014, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 1580-1599.
- [6] 山野誠・川田佳史, 2017, *地学雑誌*, 126, 147-161.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計 3 件)

- ① 山野誠, 川田佳史 (2017), 海溝近傍の熱流量異常—海洋地殻内の流体循環による熱輸送—, *地学雑誌*, 126, 147-161, doi:10.5026/jgeography.126.147 (査読有) .
- ② 森下知晃, 藤江剛, 山野誠, 中西正男, 尾鼻浩一郎, 中村恭之, 斎藤実篤, 小平秀一, 木村純一, 黒田潤一郎, 小野重明 (2017),

古い海洋プレートの沈み込み直前での屈曲断層形成に伴う加水作用解明に向けた海洋掘削計画概要, *地学雑誌*, 126, 247-262, doi:10.5026/jgeography.126.247 (査読有) .

- ③ Ray, L., Y. Kawada, H. Hamamoto, and M. Yamano (2015), Multiple-scale hydrothermal circulation in 135 Ma oceanic crust of the Japan Trench outer rise: Numerical models constrained with heat flow observations, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16, 2711-2724, doi:10.1002/2015GC005771 (査読有) .

##### [学会発表] (計 20 件)

- ① 山野誠, 川田佳史, 濱元栄起 (2018), 熱流量分布から推測されるプチスポット火山体を通しての流体循環, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ② 川田佳史, 濱元栄起, 山野誠 (2018), 日本海溝アウターライズ域のさらに海側にあるプチスポットで起こる水循環・熱輸送: フラックス推定と数値モデリング, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ③ 佐藤真也, 後藤忠徳, 笠谷貴史, 市原寛, 山野誠 (2018), 日本海溝アウターライズ領域における太平洋プレートの比抵抗構造, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- ④ 山野誠, 川田佳史 (2017), 紀伊半島沖～四国沖南海トラフ底の熱流量分布: 四国海盆の地殻構造との関係, 日本地震学会 2017 年度秋季大会.
- ⑤ Yamano, M., Y. Kawada, and M. Yamashita (2017), Heat flow distribution along the Nankai Trough floor correlated with the crustal structure of the incoming oceanic plate, IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly 2017.
- ⑥ Kawada, Y., M. Yamano, and X. Gao (2017), Modelling three-dimensional hydrothermal heat transport around the Nankai Trough, IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly 2017.
- ⑦ Kawada, Y. and M. Yamano (2017), A review of hydrothermal heat transport models explaining high heat-flow anomalies observed near the Japanese Islands, JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- ⑧ Yamano, M., Y. Kawada and M. Yamashita (2017), Heat flow distribution along the Nankai Trough floor: Correlation with the structure of the incoming oceanic crust, JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- ⑨ Ichihara, H., T. Kasaya, T. Goto, K. Baba, and M. Yamano (2017), Towards electrical

resistivity imaging around outer-rise bending normal faults off the Japan trench, JpGU-AGU Joint Meeting 2017.

- ⑩ Yamano, M., Y. Kawada, and Xiang Gao (2016), Heat flow variation along the Nankai Trough floor correlated with the structure of the Shikoku Basin oceanic crust, American Geophysical Union Fall Meeting 2016.
- ⑪ 山野誠, 川田佳史, 濱元栄起, 後藤秀作 (2016), Local heat flow variations seaward of the Japan Trench: Implications for development of fractures in the oceanic crust, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- ⑫ 後藤忠徳, 笠谷貴史, 川田佳史, 市原寛, 山野誠 (2016), Crustal resistivity structure of Pacific plate just before subduction using marine controlled-source electromagnetic surveys, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- ⑬ 川田佳史, 山野誠 (2016), Modeling the observed heat flow variation along the Nankai Trough between the Muroto and Kumano transects, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- ⑭ 市原寛, 笠谷貴史, 馬場聖至, 山野誠 (2016), 2011 年東方沖地震発生域における比抵抗構造～特に海溝軸方向の比抵抗構造変化について～, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- ⑮ Ichihara, H., T. Kasaya, K. Baba, and M. Yamano (2016), Electrical resistivity distributions of the 2011 Tohoku-oki earthquake based on marine electromagnetic data, European Geosciences Union General Assembly 2016.
- ⑯ Kawada, Y. and M. Yamano (2015), Hydrothermal heat transport within an abruptly formed permeable slot: An application to heat flow peaks observed at the Japan Trench offshore of Sanriku, American Geophysical Union Fall Meeting 2015.
- ⑰ 山野誠, 川田佳史, 濱元栄起 (2015), 日本海溝海側における熱流量異常: 海洋地殻の破碎と間隙流体循環, 日本地震学会 2015 年度秋季大会.
- ⑱ Yamano, M., Y. Kawada, L. Ray, and H. Hamamoto (2015), Multiple-scale heat flow anomalies seaward of the Japan Trench associated with deformation of the incoming Pacific plate, 26th IUGG General Assembly.

⑲ 山野誠, 川田佳史, 濱元栄起 (2015), 日本海溝アウターライズにおける熱流量の高密度測定: 海洋地殻の破碎と間隙流体循環, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.

⑳ 川田佳史, 山野誠 (2015), 部分的に厚くなる透水層内の水循環: 日本海溝アウターライズの km スケールの熱流量異常を説明するモデル, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山野 誠 (YAMANO, Makoto)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 60191368

### (2) 研究分担者

後藤 忠徳 (GOTO, Tadanori)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 90303685

笠谷 貴史 (KASAYA, Takafumi)  
海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究  
開発センター・主任技術研究員  
研究者番号: 90373456

川田 佳史 (KAWADA, Yoshifumi)  
東北大学・災害科学国際研究所・助教  
研究者番号: 50402558

### (3) 連携研究者

上嶋 誠 (UYESHIMA, Makoto)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 70242154

武井 康子 (TAKEI, Yasuko)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 30323653

市原 寛 (ICHIHARA, Hiroshi)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・助教  
研究者番号: 90553074

小平 秀一 (KODAIRA, Shuichi)  
海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究  
開発センター・上席研究員  
研究者番号: 80250421

後藤 秀作 (GOTO, Shusaku)  
産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部  
門・主任研究員  
研究者番号: 10378557