

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800246

研究課題名(和文)沈み込み帯熱水循環の数値モデリング：地震発生帯の温度圧力条件の推定に向けて

研究課題名(英文) Numerical modeling of subduction zone hydrothermal circulation: Toward understanding temperature-pressure condition of the seismogenic zone

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込み帯の地震活動は沈み込んだプレートの温度構造に影響を受ける。日本海溝や南海トラフの海側では、プレート年代から予想されるよりも高い熱流量が観測されている。本研究課題では、熱流量とプレートの温度構造との関連を調べるために、透水層内の水循環を考慮した一連の数値計算を行った。日本海溝の高熱流量は、地震学的情報を元に「透水層が海溝軸に向かって厚くなる」と考えることで説明できる。南海トラフの室戸沖から熊野沖にかけて熱流量が低くなることは、トラフ底の付近の水平方向の水循環で説明することが出来る。

研究成果の概要(英文)：Seismic activity of the subduction zone is affected by the temperature structure of the subducted oceanic plate. On the seaward of the Japan Trench and the Nankai Trough, heat flow values higher than expected from the plate age have been observed. This research project aims to elucidate relationships between the heat flow and the temperature structure. Anomalous heat flow around the Japan Trench is able to explain fluid circulation in an aquifer that thickens toward the trench axis. Gradual decrease in the heat flow from the Muroto to the Kumano districts can be explained by fluid flow below the trough floor along the strike of the subduction zone.

研究分野：地球惑星物理学

キーワード：熱水循環 沈み込み帯 日本海溝 南海トラフ 数値シミュレーション 温度構造

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯の地震発生帯を特徴づける要素の一つは沈み込み帯の温度構造である。温度は、岩石の変形様式(脆性変形、塑性変形)を変えるとともに、堆積物に含まれる粘土鉱物の脱水反応に關与する(たとえば Hyndman et al., 1995)。したがって、沈み込むプレートの温度構造を考えることは、地震発生帯の物理化学的な条件を明らかにすることにつながる。沈み込む直前のプレートの温度構造は、大洋底の熱流量が年代と關連づくこと(たとえば Stein and Stein, 1995)から、第一義的にはプレートの年代(中央海嶺で作られてから沈み込み帯にやってくるまで)に依存すると予想される。このことを確かめるには、海底面で地殻熱流量を測定すれば良い。地殻熱流量は、海底面  $1\text{ m}^2$  あたりの放出量で、熱輸送が熱伝導だけで起こっていると仮定すればプレート内部の温度構造が分かる。

日本海溝および南海トラフの海側の熱流量は、プレート年代から予想されるよりも高いことがわかってきた。日本海溝では、海溝の海側  $150\text{ km}$  の範囲で、プレート年代  $135\text{ Ma}$  から期待される  $50\text{ mW/m}^2$  に対して、観測された熱流量は最大で  $120\text{ mW/m}^2$ 、平均でも  $70\text{ mW/m}^2$  程度である(Yamano et al., 2008, 2014)。また熱流量の値にばらつきが大きいのも特徴であり、研究を開始した時点で、数  $\text{km}$  の空間スケールを持つ熱流量異常が、2箇所観測されていた。本研究を開始した後、三陸沖で集中的な観測が行われた。その結果、熱流量のばらつきは、空間スケール数  $\text{km}$  程度の変動であることがわかった。変動は沈み込みの方向だけでなく海溝と平行な方向にも起こっていて、熱流量異常がパッチ状であることがわかりつつある。

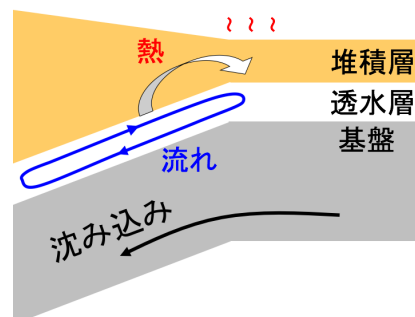
南海トラフでは、室戸沖(プレート年代  $15\text{ Ma}$ )のトラフ底の狭い範囲(沈み込みの方向にして  $20\text{ km}$  程度)で  $200\text{ mW/m}^2$  を越える熱流量が観測されている(Yamano et al., 2003)。プレート年代から期待される熱流量は  $120\text{ mW/m}^2$  程度であるから、2倍程度の熱流量異常があることになる。一方、室戸から約  $200\text{ km}$  東側の熊野沖(年代  $20\text{ Ma}$ )では、プレート年代から期待される値とさほど変わらない熱流量が観測されている(Kinoshita et al., 2008)。なお本研究を開始した後、室戸沖と熊野沖の中間の領域でも熱流量の観測が行われた。その結果、室戸沖の熱流量異常と熊野沖の年代通りの熱流量との間で、空間スケール  $50\text{ km}$  程度で熱流量が変化することがわかった。同様に、室戸沖とその西側にある足摺沖(年代  $20\text{ Ma}$ )にかけての観測も行い、熱流量異常は室戸と足摺の間でなくなることがわかった。

以上のように、日本周辺の沈み込み帯では、熱流量は年代だけでは決まらない要素がある。これは、沈み込むプレートの温度構造は、年代以外の要因で決まっていることを意味する。プレートの温度を変える要因として、

これまでに様々な原因が考えられてきた。そのひとつである火成活動(海底火山)は、確かに熱流量を上げるが、マグマだまりの熱源は深いことが多く、数  $\text{km}$  のスケールの熱流量異常を説明することは噴出直後のような状態を除いて難しい(Yamano et al., 2008)。このことは、本研究課題の中で行われた研究でも確かめられている(Ray et al., 2015)。

温度構造を変えるもうひとつの原因に割れ目内の間隙水の循環がある。高温の熱水循環はプレートが作られる中央海嶺で起こるものが有名であるが、循環自体は堆積物に覆われた古いプレートの中でも起こる。従来、プレート年代が  $65\text{ Ma}$  程度になると堆積物が厚くなることで熱水の流路が制限されて熱水循環が停止する、と素朴に考えられてきた(たとえば Stein and Stein, 1995)。しかしあらためて観測を見直してみると、 $100\text{ Ma}$  を越えるプレートでも堆積物の下で弱いながらも熱水循環は起こることがわかってきた(たとえば Fisher and Von Herzen, 2005)。つまり海洋底ではどこでも熱水循環が起こっている可能性がある。熱水循環が起こる部分(堆積物の直下の部分)は「透水層」を呼ばれている。浸透率(流れやすさ)の実測から、通常、透水層の厚さは  $500\text{ m}$  程度と考えられている(Fisher, 1998)。

南海トラフ室戸沖の熱流量異常に関しては、沈み込んだ後のプレート内の循環で説明するモデルが提案されている(Spinelli and Wang, 2008; 下図)。彼らは、透水層が沈み込んだ後も透水性を保っていると考えた。計算によると、透水層に沿った空間スケール数  $100\text{ km}$  の水循環が起こり、内部の熱(と水)が沈み込む海洋プレートの最上部に沿って汲み上げられる。ただし室戸沖の観測を説明するには  $10^{-9}\text{ m}^2$  という海嶺軸並みの値(Fisher, 1998)が必要である(室戸沖は昔の海嶺が沈み込んでいる場所なので高い浸透率を採用することは不可能ではない)。この水循環の結果として、プレート深部の温度は下がり、海溝付近の温度は上がる。したがって海溝付近の熱流量は増加することになる。この循環に因る温度の低下は  $100$  程度であり、等温線が  $50\text{ km}$  程度陸側に移動することになる(Spinelli and Wang, 2008)。地震発生帯の場所が温度で決まっているなら、陸側に移動することになる。このように、室戸沖に関しては、熱流量と温度構造との間に明瞭な關連が付いた。



## 2. 研究の目的

室戸沖の熱流量異常についてはプレートに沿った水循環で説明できるとして (Spinelli and Wang, 2008)、他の沈み込み帯で同じモデルが成り立つかどうかは必ずしも明らかではない。例えば、海嶺が沈み込んでいるわけではない日本海溝の高い熱流量については、非常に高い浸透率を要求する Spinelli and Wang (2008) のモデルをそのまま当てはめて良いだろうか？

本研究課題では、様々な沈み込み帯の内部の温度構造を観測から制約できるようなモデルを作ること为目标とする。とくに、近年盛んに観測が行われるようになった沈み込み帯近傍の熱流量と内部の温度構造を関連付けること为目标とする。このことで地震発生帯の周辺の物理化学的条件を議論する足がかりを得る。温度構造が明らかになった後、そこで起こる化学反応にも興味がある。たとえば地震発生帯を特徴づける化学反応に粘土鉱物の脱水反応 (温度依存) があり、脱水に寄って間隙水圧がコントロールされる。そこで、化学反応を扱うことも目標とする。

## 3. 研究の方法

(1) 水循環を中心とした各種の数値モデリングを行う。本研究課題の枠組みにおいて、数値計算コードの開発を行う。なお、研究開始後に研究対象地域で詳細な熱流量調査が行われたことにより、モデルの枠組みに変更が生じた。特に集中的な熱流量観測が行われたことで、熱流量の3次元的な広がりや、細かなスケールの熱流量異常の存在がわかってきた。このため、研究の主眼を、沈み込み帯の温度構造の理解を中心とすることとした。温度構造が分かったあとの化学反応の取扱については、各種のモデル (モジュール) の開発を行ったが、実観測との比較までは行わなかった。これについては今後の課題としたい。以下、開発したモデルについて記す。

有限要素法を用いた沈み込み帯の熱輸送モデル：沈み込み帯は形状が複雑であるため、不規則形状に対応したモデリングが必須である。3次元の取扱も行う。水循環の取扱は、循環を陽に解く (浸透流としての扱い) 方法と、循環を高い熱伝導率で置き換える方法の両方を用いる。後者はより短い時間で計算が行えるが、物理的な裏付けが不十分なので、前者と比べつつ計算を行う。

有限差分法を用いた水循環モデル：透水層の一部だけを切り取るなどの簡略化を行う場合、差分法の取扱が優れている。化学反応などの複雑な過程を取り込むことも簡単に行える。

2種類の方法を用いた地盤の粘弾性変形モデル：ひとつは線型粘弾性の変形を扱う有限要素法モデルで、もうひとつは粒子法と差分法を複合した有限変形の粘弾塑性モデル

である。変形を司る岩石物性は温度に依存するため、求めた温度構造を入力として変形を計算する枠組みを取る。

化学モデル：沸騰を扱うためのモデルを開発した。南海トラフではかつて中央海嶺そのものが沈み込んでいたと考えられており、このような場合に起こる水循環を説明するためのモデルとなる。沸騰によって生じた塩濃度の高い水が透水層にそって沈み込み帯の深部に落下することが示唆されるところまでを扱った。

(2) 熱流量探査、地震学的探査の結果を参考として、水循環の考察を行う。次神学的には、基盤面の凹凸、割れ目・断層の進展などが分かる。この情報と、熱流量探査で得られた情報を総合する。研究成果 (1) で示すように、本研究に独自の考え方である「プレートが海溝軸の近くで曲げられることで、透水層が海溝軸に向かって厚くなる」という仮定がある。これは、地震学的な探査からの示唆にもとづいている。

## 4. 研究成果

(1) Fujie et al. (2013a, 2013b) は、日本海溝および千島海溝の海側 150 km の領域で、海洋プレート最上部の  $V_p/V_s$  が大きい領域が海溝軸に向かって厚くなっていることを報告している。これは、割れ目や間隙水の分布が海溝軸に向かって増していることを示唆している。興味深いことに、日本海溝で熱流量異常が観測されている範囲と、この低速度層が発達する範囲は似通っている。

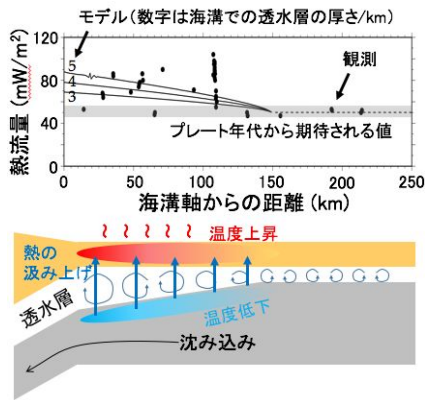
そこで、日本海溝を念頭に置いて、透水層が海溝軸に向かって厚くなる系での計算を行った。水循環を扱うために浸透流として流れを解くことを行った。また、透水層が時間とともに厚くなることを簡単に扱うために、計算グリッドが時間とともに変化することを扱う技法を用いた。まず簡単のために、透水層が時間とともに一様に厚くなる場合を考えた。この他の場合については (3) の研究でも扱った。

計算の結果、熱流量は時間とともに高くなり、観測を平均的に説明できることがわかった。このモデルでは、厚くなりつつある透水層の下側の領域で温度が下がり、上側で温度が下がる。このため、透水層が厚くなりつつある領域では熱流量が高くなるのである。結果は浸透率の値にはあまりよらず、平均的な海洋プレート最上部程度の値でも、日本海溝の観測を説明できる程度の熱流量異常を作り出すことが出来ることがわかった。

なおこの結果 (Kawada et al., 2014) に関して、学術誌発行団体のページにおいてサイエンスライターの手による解説記事が書かれている (英文)。



<https://eos.org/research-spotlights/bending-plate-provides-unexpected-heat-source>

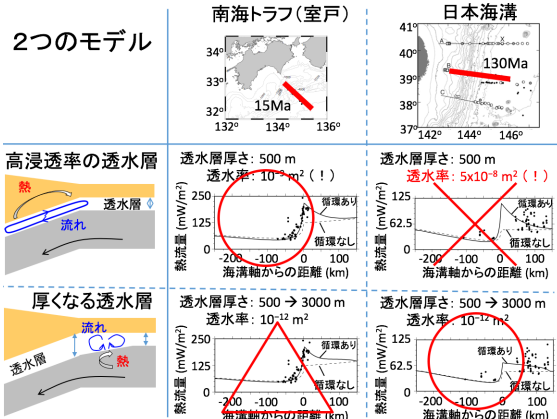


(2) 熱水循環が沈み込み帯全体の温度構造をどのように変えるかを調べるためのモデリングを行った。この研究を行うために、沈み込み帯全体を扱うための、沈み込み帯直交した方向の2次元熱輸送モデルを開発した。ここで開発したモデルは、熱水循環(熱対流)を陽に含むことはせずに、熱水循環を高い熱伝導率で置き換える方法(たとえばDavis et al., 1989)を用いた。沈み込み帯の熱モデリングでは、Spinelli and Wang (2008)がこの方法を用いている。彼らのスケージングは実用的に広く用いられているが、その根拠は必ずしも明確ではない。本研究に平行して、実際の流れを計算するモデルを開発して確かめてみたが、確かに彼らのスケージングは沈み込み帯のモデルで成り立っているようである。今回は彼らのスケージングを用いたが、この物理を解明することは今後の重要な研究課題となる。

開発したモデルを用いて日本海溝および南海トラフについての熱構造モデリングを行った。Spinelli and Wang (2008)の高浸透率モデルを南海トラフの室戸沖に適用した場合、海嶺軸に匹敵する高い浸透率を用いることで、観測された熱流量が説明できることが確かめられた。この結果は彼らが得たものと基本的に同一である。同モデルを日本海溝に適用すると、これまでに実測されている浸透率の上限より一桁以上大きな値を用いないと観測が説明できないことが分かった。したがって、Spinelli and Wang (2008)のモデルは、日本海溝にはそのまま適用できないことが明らかになった。他方、南海トラフの熊野沖では顕著な熱流量異常はなく、浸透率は相当に小さいことが予想される。この差異については(4)の研究でも扱った。

研究成果(1)と同様に、透水層が海溝軸に向かって厚くなる場合のモデル化も行った。まず日本海溝に対してモデルを適用すると、標準的な海洋プレート最上部の浸透率を用いた場合でも、海側の高熱流量異常を平均的に説明できることが分かった。このモデルでは、厚くなりつつある透水層の下側の領域で温度が下がり、上側で温度が下がる。この

ため、透水層が厚くなりつつある領域では熱流量が高くなるのである。同モデルを南海トラフに適用した場合、やはり熱流量は高くなる。しかし現在のところ、南海トラフではVp/Vsが大きい領域は観測されておらず、南海トラフでこのモデルが成り立つかどうかは明らかではない。

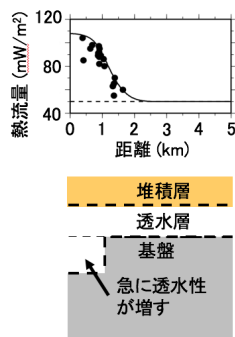


(3) 本研究を開始した後、日本海溝において集中的な熱流量観測が行われた(山野ほか2014など)。その結果、高熱流量異常が空間スケール数 km で増減することがわかった。この観測結果は、熱流量が海溝軸に向かって平均的に高くなるという Kawada et al. (2014)の結果とは必ずしも整合的でない。そこで、割れ目が深部に向かって侵入していくという描像を念頭に置いて、透水層が部分的に厚くなる場合モデル化した。

まず薄い断層上の割れ目の中の定常的な循環を考えた(Ray et al., 2015)。ここでも間隙水の流れを陽に解くことを行った。計算の結果、割れ目内の流れがその直上に鋭い熱流量ピークを作ることができることが分かった。この熱流量ピークの大きさは割れ目の幅程度であり、観測された空間スケールや異常の大きさとは必ずしも整合的でない。なおこの研究では、基盤面(堆積物と海洋プレートの間の境界)の凸凹が熱流量の分布に与える影響を調べることで、この効果が部分的には熱流量異常に寄与し得ることも示した。

そこで、割れ目が形成した直後の時間発展も考えることにした。つまりある瞬間に割れ目が形成したとして、その後の水循環と熱輸送を解くのである。計算の結果、割れ目が急にできた後の水循環は、割れ目の内部にあった熱を一気に上向きに輸送するために大きな(底面からの熱流量の2倍程度)熱流量異常を引き起こすことがわかった(下図)。また、割れ目は、割れ目の周囲の広い領域の熱を輸送するため、熱流量異常は長い期間(百万年程度)持続することが分かった。なお、割れ目が次々に進展する場合、最初の割れ目は大きな熱流量異常を引き起こすが、2番目に起こる割れ目ではより小さい熱流量異常しか生じない。これは、最初の割れ目が周囲の熱を放出していることと整合的である。このモデルによると、海溝から離れた場

所（最初に割れ目が形成する場所）でより大きな熱流量異常が期待される。現在の観測密度ではまだ確定的なことは言えないが、大きな熱流量は海溝から 100 km 程度離れた場所に多いことから、本モデルが成り立っていることを示唆する。この点については、さらに観測が進めば明らかになるはずである。



(4) 南海トラフでは、室戸沖と熊野沖のコントラストを説明することが求められている。トラフ底の熱流量については、室戸沖から東に 100 km 程度は熱流量が高く（プレート年代から期待される値の 2 倍程度）、そこから 50 km 程度かけて標準的な値に下がり熊の沖に至る。この空間スケール 50 km 程度の熱流量コントラストを説明するために、2 種類のモデル化を行った。

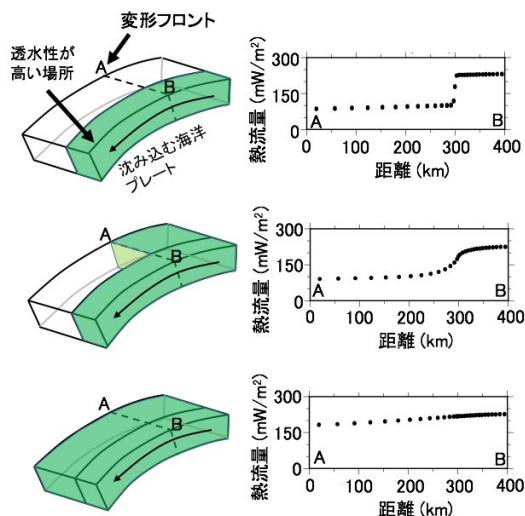
室戸沖から熊野沖にかけての沈み込み帯の全体を含む領域を対象としたモデル化を行うために(2)で開発したモデル（水循環を高い熱伝導率で置き換える）を 3 次元に拡張した。室戸沖では Spinelli and Wang (2008) の水循環が起こる高い浸透率を与えた。熊野沖の浸透率についてはパラメータとした（図の上パネル）。

まず熊野沖の浸透率が小さい場合、室戸沖の熱流量は高くなり、熊野沖の熱流量は年代から予想されるとおりとなった。両者の間の領域では熱流量は急速に変化し、2 次元の結果をそのまま並べたのとほぼ同じ結果が得られた。これは観測と整合的ではない（図の上段）。次に熊野沖の浸透率が（Spinelli and Wang, 2008）の水循環が起こせるほど）大きい場合、室戸沖と熊野沖の熱流量はなめらかに変化する（熊野沖でも熱流量異常が生じる；図の下段）。これもまた観測と整合的でない。最後に熊野沖の海側では浸透率が高く、陸側では浸透率が低い場合の計算も行った。この場合、室戸沖では熱流量が高く、熊野沖では熱流量が標準的で、両者の中間の領域で数十 km スケールで熱流量が低下するという結果が得られた（図の中段）。これは観測と整合的である。

この結果が意味することを明らかにするため、トラフ底に沿った方向の 2 次元の熱対流を扱うモデルを開発した。室戸沖では Spinelli and Wang (2008) の循環が起こっていると仮定し、循環の結果付け加わる熱を計算領域の半分に内部熱源として与えた。計算領

域のもう半分では熱源はない。浸透率が小さく流れが弱い場合、熊野沖と室戸沖とのあいだには熱流量のコントラストが生じる。浸透率をだんだん大きくしていくと、中間の領域の対流セルが横に伸び、室戸沖と熊野沖の間になめらかな熱流量コントラストが生じるようになる。横方向のセルの大きさが 50 km になるには、海嶺軸の程度の高い値が必要となる。高い浸透率は、前提とした Spinelli and Wang (2008) の結果とは矛盾しない。

このような循環が起こることは、浸透率に異方性があると考えることと同じことである。室戸沖では沈み込み方向に浸透率が高いため沈み込んだ先から熱を汲み上げる循環が起こる。熊野沖ではむしろ沈み込みに平行方向の浸透率が高いため、熱の汲み上げは起こらないが、隣の領域で熱が汲み上げられていると、その熱を水平方向に運ぶことは出来る。このような浸透率構造の違いはテクトニクスに依存していると考えられる。この観点からの研究は今後の課題としたい。



## 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 3 件)

- L. Ray, 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. (査読あり)
- M. Yamano, H. Hamamoto, Y. Kawada, and S. Goto (2014), Heat flow anomaly on the seaward side of the Japan Trench associated with deformation of the incoming Pacific plate, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 407, 196-204, doi:10.1016/j.epsl.2014.09.039. (査読あり)

Y. Kawada, M. Yamano, and N. Seama (2014), Hydrothermal heat mining in an incoming oceanic plate due to aquifer thickening: Explaining the high heat flow anomaly observed around the Japan Trench, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 1580-1599, doi: 10.1002/2014GC005285. (査読あり)

[学会発表](計 11件)

Y. Kawada and M. Yamano, Modeling the observed heat flow variation along the Nankai Trough between the Muroto and Kumano transects, SIT12-P08, JpGU2016, Makuhari-Messe, Chiba, Japan. (2016/5/23)

山野 誠, 川田 佳史, 笠谷 貴史, 後藤 忠徳, 市原 寛, 日本海溝海側における海洋地殻の破碎と間隙流体循環 熱流量測定と電磁気探査による温度構造と流体分布の研究, *ブルーアース* 2016, 東京海洋大学, 東京都品川区. (2016/3/9)

Y. Kawada and M. Yamano, Hydrothermal Heat Transport within an Abruptly Formed Permeable Slot: An Application to Heat Flow Peaks Observed at the Japan Trench Offshore of Sanriku, 2015 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA. (2015/12/15)

山野 誠, 川田 佳史, 濱元 栄起, 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, 神戸市. (2015/10/28)

M. Yamano, Y. Kawada, L. Ray, and H. Hamamoto, Multiple-scale heat flow anomalies seaward of the Japan Trench associated with deformation of the incoming Pacific plate, IUGG 2015 General Assembly, Prague, Czech Republic. (2015/6/30)

川田 佳史, 山野 誠, 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, SCG64-27, JpGU2015, 幕張メッセ, 千葉市. (2015/5/28)

山野 誠, 川田 佳史, 濱元 栄起, 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, SCG64-26, JpGU2015, 幕張メッセ, 千葉市. (2015/5/28)

Y. Kawada, M. Yamano, and N. Seama, Hydrothermal Heat Mining Due to the Aquifer Thickening Toward the Trench Axis: A Model for Explaining High Heat-flow Anomalies on the Seaward Side of the Japan Trench, AOGS2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan. (2014/8/1)

川田 佳史, 山野 誠, 島 伸和, 東北日本の熱流量異常を説明する熱モデル: 海溝軸

に向かって厚くなる透水層内で起こる熱水循環による熱の汲み上げ, SCG67-18, JpGU2014, 幕張メッセ, 千葉市. (2014/5/2)

M. Yamano, Y. Kawada, H. Hamamoto, and S. Goto, High heat flow anomaly seaward of the Japan Trench associated with deformation of the subducting Pacific plate, SIT05-14, JpGU2013, Makuhari-Messe, Chiba, Japan. (2013/5/21)

Y. Kawada, M. Yamano, and N. Seama, Thermal subduction-zone model including hydrothermal circulation in an aquifer that thickened toward the trench axis, SIT05-12, JpGU2013, Makuhari-Messe, Chiba, Japan. (2013/5/21)

[図書](計 0件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: