

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340127

研究課題名(和文)地震断層における熱圧化履歴の地球化学的・岩石学的評価

研究課題名(英文) Development of a geochemical and petrological method for retrieving records of thermal pressurization occurred in the seismic faults

研究代表者

石川 剛志 (ISHIKAWA, Tsuyoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・研究所長

研究者番号：30270979

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,100,000円

研究成果の概要(和文)：地震時の断層滑りを大きく拡大させる要因である熱圧化を、個々の地震断層が過去に経験したかどうかを評価するための手法として、断層の岩石の化学分析を検討した。米国のコディアック付加体中のプレート境界断層および長野県の中央構造線の活断層について、熱圧化の前提となる高温(250～>350℃)の水(流体)が地震時に存在した化学的証拠を分析により示した。また、地震時の断層滑りを再現する室内実験に基づき、高温流体が断層の岩石の化学組成を変化させることを立証した。300℃を超える温度条件では断層の岩石の化学組成変化はモデル計算による予想と概ね一致し、断層の熱圧化履歴の化学的評価法構築に向けて前進した。

研究成果の概要(英文)：For assessing whether the faults experienced thermal pressurization (TP), which may lead to a marked reduction in fault strength during seismic slip, the validity of geochemical and petrological analyses of fault rocks was examined. Chemical analyses for the deformed rocks from a fossil plate-boundary fault in the Kodiak accretionary complex, USA, and from an active fault of the Median Tectonic Line in the Nagano area, Japan, revealed occurrence of coseismic fluid-rock interactions at high temperatures (250 to >350 deg. C) required for TP. Frictional experimental works also demonstrated that coseismic interactions with high-temperature fluids can produce detectable chemical anomaly in the fault rocks. At the temperatures higher than 300 deg. C, chemical anomaly observed in the fault rocks is consistent with that predicted by model calculation, indicating that the present method is useful for evaluating coseismic physicochemical processes in the fault, including TP.

研究分野：地球化学・岩石学

キーワード：自然災害 地震 地球化学 地質学 断層

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震時の断層内で摩擦発熱による間隙水圧上昇(熱圧化: thermal pressurization)が生じると、断層の力学的強度が動的に著しく低下することが、理論的・実験的な研究から明らかになっている。南海トラフ等の付加体における巨大地震発生の際、断層内で熱圧化が生じれば、破壊伝播の促進により海底付近での断層変位量が増大し、巨大津波発生の引き金となることが懸念される。しかし、個々の断層帯が過去の地震において熱圧化を経験したかどうかを判断するための物的証拠を得ることは容易ではないのが現状である。

(2) 研究代表者らのグループは、1999年台湾集集地震(Mw7.6)で活動したチェルンブ断層試料の化学分析を行い、断層岩の化学組成の変化から、地震時に350以上の水(流体)と断層岩が反応していたことを明らかにした(Ishikawa *et al.*, Nature Geoscience, 2008)。このことは地震時に熱圧化が生じたことを強く示唆しており、断層岩の化学分析による熱圧化履歴の評価への道が拓かれた。しかしながら、地震時の断層内の温度や流体岩石比、反応速度論的效果、鉱物組成が断層岩の化学組成に与える影響を評価するための基礎的データが不足している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震断層から採取された断層岩の微量元素・同位体分析および鉱物組成分析に基づき、断層が過去に熱圧化を経験しているか否か、また、その際の温度上昇がどの程度であったかを定量的に評価する新手法を確立することである。

本研究は、地震断層から採取された断層岩の分析により「熱圧化が付加体を含む沈み込み帯のどの部位でどのような構造地質学背景で生じるのか」、「どの断層が熱圧化の履歴を持ち津波を発生させる危険性があるのか」を評価する方法論の確立に向けた一歩と位置づけられる。

3. 研究の方法

(1) 試料の採取・選定

本研究の推進に当たり、化学分析用として下記の試料を使用した。

台湾チェルンブ断層掘削計画(TCDP)で得られた断層の掘削コア試料

コディアック付加体の化石断層帯の露頭から採取された断層岩試料

長野県大鹿村の中央構造線の活断層から採取された断層岩試料

統合国際深海掘削計画(IODP) Exp.316 (NanTroSEIZE)で採取された南海トラフ巨大分岐断層の掘削コア試料

IODP Exp.343 (JFAST)で採取された日本海溝プレート境界断層の掘削コア試料

その他、断層岩の地球化学的解析に必要な基礎データを取得するための堆積物、海洋地

殻、熱水等の試料

(2) 分析法

本研究における試料分析は下記の方法で行った。分析はすべて高知コアセンターにおいて行った。

微細構造の観察: 走査型電子顕微鏡(SEM)

鉱物組成分析: 粉末X線回折装置(XRD)

主成分元素分析: 蛍光X線分析装置(XRF)

微量元素分析: 誘導結合プラズマ質量分析装置(ICPMS)

同位体分析: 表面電離質量分析装置(TIMMS)、または、多重検出器誘導結合プラズマ質量分析装置(MC-ICPMS)

(3) 高速摩擦実験

地震時の断層滑りによる流体岩石相互作用と断層岩の化学組成変化を実験的に再現するため、高知コアセンターの流体制御型摩擦試験機を用いた高速摩擦実験を行った。

4. 研究成果

(1) 既存データの再検討と問題点の抽出

研究の開始に当たり、地震時の断層内流体岩石相互作用について断層岩の分析から得られた従来の知見を取りまとめ、現状の把握と問題点の抽出、研究戦略の構築を行った。

断層岩の地球化学的解析は有望な手法であるものの、様々な構造地質学的背景を持つ断層に関するさらなるデータの集積と、温度や反応速度論的效果が与える影響の評価の精密化が必須であることが示された。本成果は学会誌「地球化学」に総説論文として掲載された(石川・廣野, 2012)。

(2) コディアック付加体の化石プレート境界断層の研究

アラスカのコディアック付加体(ジュラ紀~始新世)には、かつて地震発生帯深度のプレート境界断層であったと推定される断層帯が露出している。この断層帯から採取された岩石について微量元素分析とストロンチウム同位体分析を行った。その結果、断層滑り帯の岩石には、母岩に比べ、ルビジウム(Rb)、セシウム(Cs)の著しい減少とストロンチウム(Sr)の増加が認められた(図1)。

これらの化学組成変化は350におけるモデル計算の結果(図中の3本の線)と概ね一致し、地震時に350かそれ以上の高温での流体岩石相互作用が断層内で生じたことが明らかとなった。当時の地震断層帯の透水率は明らかでないが、それが十分に低ければ熱圧化を生じた可能性が高い。

また、断層岩におけるストロンチウムの増加は、ストロンチウム同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)の明瞭な減少を伴っており、下盤プレートの玄武岩地殻($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.706$)から供給された流体が地震時の断層帯に存在したことが明らかとなった。

本成果は国際誌「Earth, Planets and Space」

に論文として掲載された (Yamaguchi, Ishikawa *et al.*, 2014)

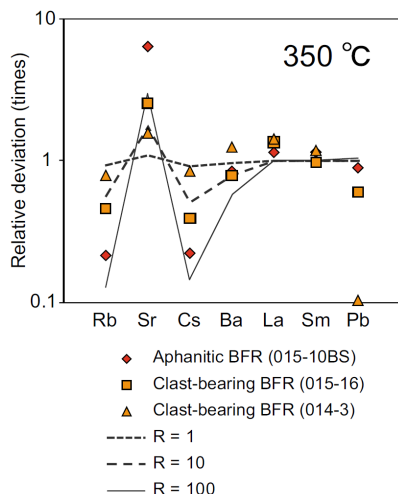


図1 コディアックの断層滑り帯の微量元素組成。母岩の値を1としてある。折れ線はモデル計算値。

(3) 中央構造線の活断層帯の研究

中央構造線は、日本を代表する大規模活断層の1つである。長野県大鹿村における中央構造線の最新の活断層帯について、微細構造の観察、鉱物組成分析、主成分・微量元素分析とストロンチウム同位体分析を行った。

その結果、断層滑り帯は破壊により形成された径1マイクロメートル未満の超微細粒子からなり、周囲に比べて特異的にリチウム (Li) 含有率とストロンチウム同位体比が高いことが判明した (図2)。モデル計算により、この活断層は高ナトリウム・高リチウムの有馬型深部流体の存在下で、地震時に最高250 の流体岩石相互作用を経験し、熱圧化も生じた可能性があることが判明した。

本成果は、国際誌「Earth, Planets and Space」に論文として掲載された (Ishikawa *et al.*, 2014)

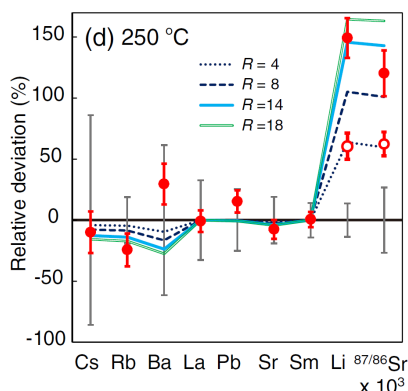


図2 中央構造線の断層滑り帯の微量元素・同位体組成。母岩の値に対する増減 (%) で示してある。折れ線はモデル計算値。

(4) 南海トラフ付加体巨大分岐断層の研究

IODP Exp.316 (NanTroSEIZE) では南海トラフの巨大分岐断層が掘削されており、滑り帯のビトリナイト反射率分析から、摩擦発熱

を伴う地震性の滑りを起こしたことが明らかとなっている (Sakaguchi *et al.*, Geology, 2011)

この断層滑り帯試料について微量元素・同位体分析を行ったところ、母岩との間に有意な化学組成の違いは認められなかった (図3)。モデル計算と反応速度論的解析により、もし地震時に摩擦発熱に伴う流体岩石相互作用が起こったとすれば、温度は150 ~ 250 程度でなければならないことが明らかとなった。

流体岩石相互作用は捉えられなかったものの、滑り帯の温度に制約を与えた本成果は国際誌「Tectonophysics」に論文として掲載された (Hirono, Ishikawa *et al.*, 2014)

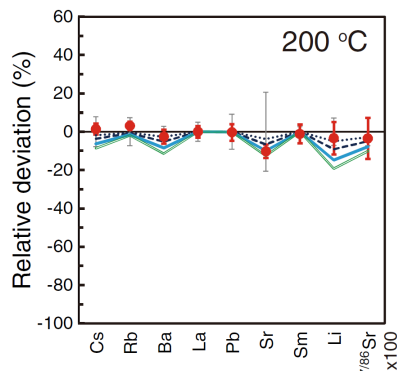


図3 南海トラフ巨大分岐断層滑り帯の微量元素・同位体組成。母岩の値に対する増減 (%) で示してある。折れ線はモデル計算値。

(5) 日本海溝プレート境界断層の研究

IODP Exp.343 (JFAST) では、2011年東北地方太平洋沖地震で巨大津波を生じさせたプレート境界断層の最浅部が掘削された。研究代表者は JFAST に乗船研究者として参加し、断層帯から採取された岩石と間隙水について主成分・微量元素分析と同位体分析を行った。

間隙水の化学組成の垂直変化に基づき、JFAST 掘削孔の温度計測においてプレート境界断層で検出された約0.3 の正の温度異常は地震時の摩擦熱によるものと断定し、地震時の断層の動的摩擦係数が非常に小さかった (約0.08) ことを明らかにした。地震時の熱圧化を示唆し、巨大津波発生機構の理解につながる本成果は、Science 誌に掲載された (Fulton *et al.*, 2013)

また、断層岩と間隙水の分析に基づき、地震時に断層内で熱圧化が生じたとすれば、それは空間的に極めて狭い領域に集中して起こったことを示す予察的データを得た。

(6) 地震時の流体岩石相互作用を実験的に再現する研究

台湾チェルンブ断層掘削で得られた断層周囲の母岩を細粒化して模擬断層岩試料を作成し、間隙水圧制御下で地震時の断層滑りを再現する高速摩擦実験を行った。生成された断層岩について微量元素分析を行った。

その結果、断層滑りに伴う摩擦発熱で断層帯の温度が 300 以上に達した場合、高温の流体岩石相互作用により断層岩中のリチウム濃度が明瞭に低下することを、世界で初めて実験的に明らかにした(図4)。

また、検出されたリチウム濃度の低下は、これまで本研究で構築してきたモデル計算および反応速度論的解析から予想される結果と整合的であり、それらの見積りの正しさが確認された。

本摩擦実験では、実験中に熱圧化が生じた可能性が高い。熱圧化を伴う 300、40 秒の 1 回の地震性滑りに相当する条件下で、断層岩の微量元素組成が変化することを立証した本成果は、国際誌「Geophysical Research Letters」に論文として掲載された(Tanikawa, Ishikawa *et al.*, 2015)。

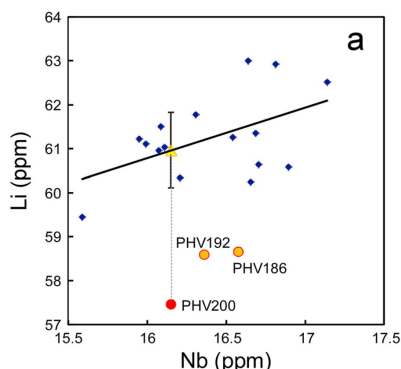


図4 高速摩擦実験で得られた模擬断層岩のリチウム(Li)、ニオブ(Nb)含有率。実験番号付きの丸印は温度が 300 を超えた試料を示す。

(7) 地震時の滑りによる断層岩の破壊とメカノケミカル効果の研究

チェルンプ断層滑り帯の微細構造の観察により、最新の滑り面には地震時の破壊により、1マイクロメートル未満の超微細粒子が多数生じていることが明らかとなった(図5)。研究成果(3)で認められた中央構造線活断層の超微細粒子も同様のものである。

また、イライトを用いた摩擦試験により、地震時の滑りによる断層物質の破壊がメカノケミカル効果により断層の滑り特性に影響を与えることが明らかとなった。

地震時の超微細粒子形成による固体表面積の増大やメカノケミカル効果は、高温流体岩石作用による断層岩の化学組成変化を促進する要因になっている可能性がある。

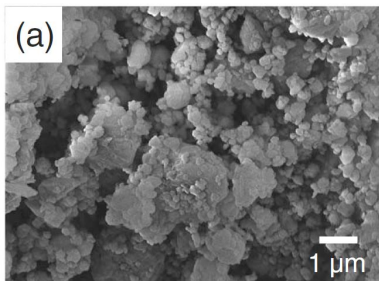


図5 1999年集集地震で生じたチェルンプ断層の最新断層滑り帯のSEM画像。

これらの成果は国際誌「Geophysical Research Letters」に論文として掲載された(Hirono *et al.*, 2013; 2014)。

(8) 基礎データ取得のための堆積物・海洋地殻・熱水等の研究

地震断層の化学的解析に必要な基礎データを取得するため、下記の研究を行い、それぞれ国際誌に掲載された。

IODP Exp. 333により南海トラフ南側から採取された四国海盆堆積物(堆積年代は700万年前~現在)についてストロンチウム・ネオジウム・鉛同位体分析を行い、沈み込みにより将来断層帯に持ち込まれる堆積物の同位体的特徴と供給源の長期変動を明らかにした(Saito, Ishikawa *et al.*, 2015)。また、堆積物・海洋地殻・熱水のホウ素同位体比の基礎データを取得した(Yamaoka, Ishikawa, *et al.*, 2012; Yamaoka *et al.*, 2014; 2015; Kubota, Yokoyama, Ishikawa, *et al.*, 2014; 2015)。

(9) 今後の展望と課題

地震時の断層帯における高温の流体岩石相互作用がもたらす組成変化について総合的な考察を行った。300 以上においては、天然の断層試料の分析結果、高速摩擦実験試料の分析結果、化学平衡を仮定したモデル計算の結果、および反応速度論的解析の結果は概ね一致し、地震時の流体岩石相互作用の判定手法として断層岩の化学分析が有効であることを明らかにすることができた。断層における熱圧化履歴の評価法構築に向けて大きな一歩を踏み出したと言える。

一方で、300 未満の場合においては、本研究の手法は、中央構造線の活断層のように特殊な化学組成の流体が関与する場合を除き、流体岩石相互作用の履歴を検出できない場合が多いことが分かった。より低温にも適用できる手法の開発が課題である。ホウ素やリチウムの同位体比を用いた手法がその候補となり得ると考えている。

取りまとめた成果については、国際学会「Goldschmidt 国際会議」2014年大会、日本地球惑星科学連合2015年大会、国際研究集会「Symposium on subduction zone earthquakes in Nankai Trough & Japan Trench」(2016年)で招待講演を行った。

<引用文献>

- Ishikawa, T. *et al.*, 2008, Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault. *Nature Geoscience*, 1, 679-683.
- Sakaguchi, A. *et al.*, 2011, Seismic slip propagation to the updip end of plate boundary subduction interface faults: Vitritin reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores. *Geology*, 39, 395-398.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 19 件)

- Tanikawa, W., Ishikawa, T., Honda, G., Hirono, T. and Tadaï, O., 2015, Trace element anomaly in fault rock induced by coseismic hydrothermal reactions reproduced in laboratory friction experiments. *Geophysical Research Letters* (査読有), 42, doi:10.1002/2015GL063195.
- Saitoh, Y., Ishikawa, T., Tanimizu, M., Murayama, M., Ujiie, Y., Yamamoto, Y., Ujiie, K. and Kanamatsu, T., 2015, Sr, Nd, and Pb isotope compositions of hemipelagic sediment in the Shikoku Basin: Implications for sediment transport by the Kuroshio and Philippine Sea plate motion in the late Cenozoic. *Earth and Planetary Science Letters* (査読有), 421, 47-57. doi:10.1016/j.epsl.2015.04.001
- Yamaoka, K., Matsukura, S., Ishikawa, T. and Kawahata, H., 2015, Boron isotope systematics of a fossil hydrothermal system from the Troodos ophiolite, Cyprus: water-rock interactions in the oceanic crust and subseafloor ore deposits. *Chemical Geology* (査読有), 396, 61-73. doi:10.1016/j.chemgeo.2014.12.023
- Kubota, K., Yokoyama, Y., Ishikawa, T. and Suzuki, A., 2015, A new method for calibrating a boron isotope paleo-pH proxy using massive *Porites* corals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (査読有), 16, doi:10.1002/2015GC005975.
- 加藤尚希, 廣野哲朗, 石川剛志, 大谷具幸, 2015, 阿寺断層田瀬露頭における断層ガウジの鉱物学的・地球化学的特徴. 活断層研究 (査読有), 43, 1-16. <http://jsaf.info/html/journals.html>
- Ishikawa, T., Hirono, T., 以下 9 名, 2014, Geochemical and mineralogical characteristics of fault gouge in the Median Tectonic Line, Japan: evidence for earthquake slip. *Earth, Planets and Space* (査読有), 66:36, doi: 10.1186/1880-5981-66-36.
- Hirono, T., Ishikawa, T., 以下 6 名, 2014, Re-evaluation of frictional heat recorded in the dark gouge of the shallow part of a megasplay fault at the Nankai Trough. *Tectonophysics* (査読有), 626, 157-169. doi:10.1016/j.tecto.2014.04.020
- Yamaguchi, A., Ishikawa, T., Kato, Y., Nozaki, T., Meneghini, F., Rowe, C., Moore, J. C., Tsutsumi, A. and Kimura, G., 2014, Fluid-rock interaction recorded in black fault rocks in the Kodiak accretionary complex, Alaska, *Earth, Planets and Space* (査読有), 66:58, doi: 10.1186/1880-5981-66-58.
- Hirono, T., Kameda, J., Kanda, H., Tanikawa, W. and Ishikawa, T., 2014, Mineral assemblage anomalies in the slip zone of the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake: Ultrafine particles preserved only in the latest slip zone. *Geophysical Research Letters* (査読有), 41, doi:10.1002/2014GL059805.
- Maekawa, Y., Hirono, T., Yabuta, H., Mukoyoshi, H., Kitamura, M., Ikehara, M., Tanikawa, W. and Ishikawa, T., 2014, Estimation of slip parameters associated with frictional heating during the 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake by vitrinite reflectance geothermometry. *Earth, Planets and Space* (査読有), 66:28, doi:10.1186/1880-5981-66-28.
- Kubota, K., Yokoyama, Y., Ishikawa, T., Obrochta, S. and Suzuki, A., 2014, Larger CO₂ source at the equatorial Pacific during the last deglaciation. *Scientific Reports* (査読有), 4, 5261, doi: 10.1038/srep05261.
- Yamaoka, K., Hong, E., Ishikawa, T., Gamo, T. and Kawahata, H., 2014, Boron isotope geochemistry of vent fluids from arc/back-arc seafloor hydrothermal systems in the western Pacific. *Chemical Geology* (査読有), 392, 9-18. doi:10.1016/j.chemgeo.2014.11.009
- Fulton, P. M., Brodsky, E. E., Kano, Y., Mori, J., Chester, F., Ishikawa, T., Harris, R.N., Lin, W., Eguchi, N., Toczko, S. and the Exp. 343/343T and KR13-08 Scientists, 2013, Low coseismic friction on the Tohoku-oki fault determined from temperature measurements. *Science* (査読有), 342, 1214-1217. doi: 10.1126/science.1243641
- Ujiie, K., et al., (Ishikawa, T.が 40 名中 20 番目), 2013, Low coseismic shear stress on the Tohoku-oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science* (査読有), 342, 1211-1214. doi: 10.1126/science.1243485
- Chester, F. M., et al., (Ishikawa, T.が 37 名中 23 番目), 2013, Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Science* (査読有), 342, 1208-1211. doi: 10.1126/science.1243719
- Lin, W., et al., (Ishikawa, T.が 37 名中 29 番目), 2013, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science* (査読有), 339, 687-690. doi: 10.1126/science.1229379
- Hirono, T., Tanikawa, W., Honda, G., Kameda, J., Fukuda, J. and Ishikawa, T., 2013, Importance of mechanochemical effects on fault slip behavior during earthquakes. *Geophysical Research Letters* (査読有), 40, 2988-2992, doi:10.1002/grl.50609.
- 石川剛志, 廣野哲朗, 2012, 断層岩の微量元素組成・同位体組成からみた地震時の流体岩石相互作用. 地球化学 (査読有), 46, 217-230.

http://www.geochem.jp/journal_j/contents/046.html

Yamaoka, K., Ishikawa, T., Matsubaya, O., Ishiyama, D., Nagaishi, K., Hiroyasu, Y., Chiba, H., and Kawahata, H., 2012, Boron and oxygen isotope systematics for a complete section of oceanic crustal rocks in the Oman ophiolite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (査読有), 84, 543-559. doi:10.1016/j.gca.2012.01.043

[学会発表](計12件)

Ishikawa, T., Evaluation of coseismic processes in fault zones based on geochemical analyses of fault rocks. Symposium on subduction zone earthquakes in Nankai Trough & Japan Trench, 2016年2月12日, ERI, University of Tokyo (東京都文京区).

石川剛志・氏家恒太郎・松岡淳・永石一弥・川合達也, 断層岩の微量元素分析に基づく摩擦溶融の評価. 日本地質学会第122年学術大会, 2015年9月13日, 信州大学(長野県長野市).

石川剛志, 沈み込み帯の断層における地震時の流体岩石相互作用:断層岩の化学分析からのアプローチ. 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2015年5月25日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市).

Ishikawa, T., Matsuoka, J., Kameda, J., Mori, J. and Chester, F., Boron isotope constraints on fluid-rock interactions in the shallow megathrust at the Japan Trench. AGU 2014 Fall Meeting, 2014年12月19日, San Francisco, USA.

石川剛志・廣野哲朗・松多範子・河本和郎・藤本光一郎・亀田純・西尾嘉朗・前川由佳・本多剛, 中央構造線の断層帯における地震時の流体岩石相互作用と深部流体の寄与. 2014年度日本地球化学会年会, 2014年9月18日, 富山大学(富山県富山市).

Ishikawa, T., Matsuoka, J., Kameda, J., Mori, J. and Chester, F., Trace element and isotope characteristics of core samples from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). AOGS 2014, 2014年8月1日, Royton Sapporo Hotel(北海道札幌市).

Ishikawa, T., Evaluation of coseismic fluid-rock interactions in fault zones based on trace element and isotope analyses of fault rocks. Goldschmidt Conference 2014, 2014年6月12日, Sacramento, USA.

石川剛志・松岡淳・亀田純・J. Mori・F. Chester, JFAST コア試料の微量元素・同位体組成から見た日本海溝地震断層帯の地球化学的特徴. 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年4月28日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市).

Ishikawa, T., Matsuoka, J., Mori, J., Chester, F., Eguchi, N., Toczko, S. and Expedition 343

Scientists, Geochemical characteristics of core samples from IODP Expedition 343, Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). AGU 2013 Fall Meeting, 2013年12月12日, San Francisco, USA.

石川剛志・松岡淳・J. Mori・F. Chester・江口暢久・S. Toczko, JFAST 掘削コア試料の微量元素組成. 日本地質学会第120年学術大会, 2013年9月15日, 東北大学(宮城県仙台市).

Ishikawa T., Sample, K., Takai K., et al., Boron and strontium isotope systematics of interstitial water from IODP Expedition 343, Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). AGU 2012 Fall Meeting, 2012年12月3日, San Francisco, USA.

石川剛志・J. Sample・高井研ほか, IODP 第343次研究航海(JFAST)で採取された間隙水試料の地球化学分析 - 予察的結果. 日本地質学会第119年学術大会, 2012年9月16日, 大阪府立大学(大阪府堺市).

[その他]

プレス発表

東北地方太平洋沖地震における巨大地震・津波発生メカニズムの解明～地球深部探査船「ちきゅう」の科学成果が「SCIENCE」誌に3編同時掲載～

http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20131206/

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 剛志 (ISHIKAWA, Tsuyoshi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・研究所長
研究者番号: 30270979

(2)連携研究者

廣野 哲朗 (HIRONO, Tetsuro)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 70371713