

領域略称名： 地殻流体
領域番号： 2108

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「地殻流体：その実態と沈み込み変動への役割」

(領域設定期間)

平成21年度～平成25年度

平成26年6月

領域代表者 高橋栄一

東京工業大学大学院・理工学研究科・地球惑星科学専攻・教授

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3 - 4 頁
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5 - 6 頁
3. 研究領域の設定目的の達成度	7 - 10 頁
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11 頁
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	12 頁
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	13 頁
7. 総括班評価者による評価	14 - 15 頁
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16 - 18 頁
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	19 - 24 頁
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	25 頁

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

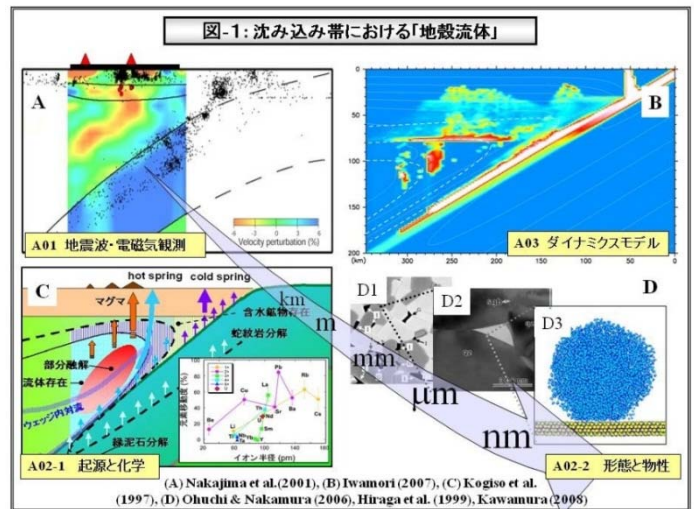
研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 【研究領域の目的及び全体構想】

2000 年以降世界の地球科学で「地殻流体」に対する関心が急速に高まり、専門誌（Geofluids）が刊行され国際会議が毎年開催されるようになった。それまで諸外国の研究者は、堆積盆、地熱帯、鉱床脈など地球表層付近における「地殻流体」と岩石の相互作用を、「資源」「エネルギー」「環境」の立場から活発に研究していた。一方、複数のプレートがせめぎ合う『地球上で最も激しい変動帯』に位置する日本列島は、沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートに由来する熱水フラックスを受け、「地震発生」および「マグマ火山活動」などの変動現象に「地殻流体」が深く関わっていることが様々な証拠から明らかにされつつあった。深部由来流体の成因と役割を解明するには、諸外国の研究のように深さ 10km 以浅の流体だけを扱うのではなく、沈み込むプレート・マントルウエッジ・地殻を一つの系とみなし、地殻流体の『根』から研究を行う必要がある。さらに、水溶液-マグマ-超臨界流体-固体の振る舞いを、ミクロな構造・素過程からマクロな発生・移動にいたる幅広いレンジで研究せねばならない。（領域計画書より抜粋）

本領域（新学術領域研究「地殻流体」）では、複数のプレートが沈み込む場所に位置する日本列島を、沈み込み変動を研究する地球上でもっとも恵まれたフィールドと考え、地震学・地球電磁気学・高温高压実験・岩石学・鉱物物理学・地球化学・鉱床学・水文地質学・地球ダイナミクスなど多様な研究分野の研究者をメンバーとする学際融合研究チームを組織した。日本の地球惑星科学は小規模な専門別学会に別れ、相互コミュニケーションに乏しいことが弱点とされてきた。この弱点を克服すべく本領域は個別専門領域を超えた学際融合研究体として組織した（メンバーの所属は 10 学会以上に及ぶ）。このような学際融合研究チームは世界的にも例が少ない。

本領域では、沈み込み帯の各場所に存在する流体相の実態とそれが沈み込み変動に果たす役割を、学際的な研究手法を用い、水溶液の分子構造から日本列島の水循環までのマルチスケールで解明することを目指した。我々は地殻および最上部マントルに存在する流体を総称して「地殻流体」と呼ぶことを新たに提案した。地殻流体には  $H_2O$  を中心とするさまざまな組成の C-H-O 流体、シリケートメルトなどが含まれる。地震・火山・地殻変動など顕著で巨大スケールの沈み込み変動に対する従来の研究を、「鉱物粒界に存在するミクロな流体相の役割」という新たな視点から再構成するところに本プロジェクトの特色がある。東北日本の東西断面の地震波トモグラフィーによって得られる低速度異常構造（図 1 A）は  $H_2O$  の効果で融点が低下し、マントルが部分融解した部分と解釈されている。日本列島は沈み込むプレートに含まれる含水鉱物の脱水分解反応により供給される流体によりいわば蒸し焼きの状態にある（図 1 C）。沈み込むプレートの脱水により発生した流体の移動およびマグマ生成を予測する数値シミュレーション結果（図 1 B）は、地震波トモグラフィーの特徴をよく説明する。（領域計画書より抜粋）



### 【各計画研究の 5 年間の研究目標】

**A01-1 地震波で診る地殻流体** 火山近傍の地震活動活発域に地震観測点を設置し、詳細なトモグラフィーを実施する。さらに、この強化された観測網を利用して散乱体の分布と性質を把握する。A01-2 班により推定される 3 次元比抵抗分布とも比較することにより、これらの地殻流体の分布を詳細に推定する。得られた地殻流体の分布と地震波速度構造の特徴との相関と、広域のトモグラフィー結果を元に、日本列島全域の地殻流体の分布を推定する。

**A01-2 地殻流体の電磁イメージング** 火山近傍の下部地殻までの詳細 3 次元比抵抗構造の推定、上部マントルから地殻までの広域 3 次元比抵抗構造の推定、3 次元比抵抗構造モデリングコードの開発、流体相を含む地殻・マントル岩石の高温高压比抵抗測定と流体相輸送速度の推定、流体相単独の高温高压比抵抗測定、地殻流体が引き起こすと考えられている地震ダイナモ現象（地震波によって電磁場変動が励起される現象）の理論構築を目指す。

**A02-1 地殻流体の起源と化学** 沈み込み帯に存在する流体の化学組成と安定条件を、高圧実験と天然岩石の分析・解析によって決定する。具体的には、ダイヤモンドアンビル装置と放射光 X 線回折による流体と含水鉱物との相平衡関係の高温高圧その場決定、高圧型変成岩・カンラン岩の鉱物共生解析によるスラブと地殻中での流体の化学組成の解読、変成岩・カンラン岩の軽元素濃度・流体包有物の化学分析による天然の流体の分布の解読などを実施する。

**A02-2 地殻流体の形態と物性** 電子状態計算に基づく分子シミュレーションによって鉱物-流体間の界面エネルギーを求め、そこから幾何学的に平衡な流体の量と形状を計算する。弾性波速度や電気比抵抗などの岩石物性は、岩石の粒間に存在する地殻流体の量と形態（微細構造）によって支配される。この両者の関係をアナログ実験や弾性モデルによって理解し、地球物理学的観測量から地殻流体の実体（体積分率・分布形状等）を解明する。

**A03 地殻流体の発生と移動のダイナミクス** 沈み込むスラブ-マントル-地殻を一体の系として扱い、流体の発生と移動を物理的・化学的に相互作用する固液二相流として定式化する。沈み込むスラブから直接供給されている可能性がある有馬型塩水、スラブ由来流体とマントルの化学反応生成物としての火山岩、深部由来流体の化石としての鉱床・熱水系の調査・サンプリング、化学・同位体分析を行い、地殻流体の物質源と発生場所を特定する。さらに U-Th 放射非平衡解析に基づき、流体発生から定置までの時間を制約する。

#### 【領域全体としての 5 年間の研究目標と成果】

**Geofluid Map の作成**：「どこに、どのような組成の地殻流体が、いかなる形態で、どれだけ存在するかを表わす地球内部の地図」を“Geofluid Map”と呼ぶ。詳細 Geofluid Map の作成を目標として鳴子周辺（鬼首や栗駒火山、及び 2008 年岩手宮城内陸地震震源域も含む）で精密な 3 次元観測を地震波と電磁波の両方で実施した。地震波観測および既存の電磁気 MT 観測、および火山岩や深層地下水の地球化学観測から、日本列島規模の広域 Geofluid Map を作成した。このような試みは世界初であると同時に、以下に述べるダイナミクス、変動現象理解に向けた基礎を提供するものであった (P. 7-9 参照)。

**Geofluid Dynamics の創生**：Geofluid Dynamics の創生を目指して沈み込むスラブから地表に至るまでの流体の発生・移動を物理的・化学的に相互作用する固液二相流として定式化した。同時に、深部由来流体の分布と性質を、火山岩、有馬型塩水・温泉水、鉱床・熱水系の調査と分析によって詳細にキャラクター化し、地殻流体の発生源と移動過程を制約した。Geofluid Map による流体分布と、A02 研究から得られる流体-岩石系の化学反応と物性を、A03 研究の観測・数値シミュレーションと融合させ、地殻流体と変動現象の関係をつなぐ Geofluid Dynamics の基礎を構築した (P. 10 参照)。

**沈み込み変動に地殻流体が果たす役割の解明**：地震観測・MT 観測・地下水の地球化学データなどに基づき、日本列島の多くの場所で地下構造と地殻流体分布を考察した。その結果、古く冷たい太平洋プレートが沈み込む東北日本と若く温度の高いフィリピン海プレートが沈み込む西南日本では地殻流体の循環様式が大きく異なることが判明した (P.10 参照)。また 2011 年 3 月 11 日に起きた東北地方太平洋沖地震 M9 によって日本列島の地震活動が一変した。我々はその結果を解析し、地震発生と流体の関係をプレート境界で起きる巨大地震から内陸地震まで次々と明らかにした (P. 11 参照)。

#### 【5 年間の研究達成】

本研究の関連研究者は延べ 75 人（公募研究 16 件を含む）、大学院生は 40 人に及んだ。毎年の全体研究発表会に加えて国際シンポジウム 7 件、国内シンポジウム 19 件を主催し、5 年間で 678 件の学術論文（うち 652 編は査読有）を生み出した (P.19-23 参照)。複数の計画をまたぐ融合研究は 25 編の論文を出版し、現在もその数は飛躍的に増加中である。総括班は日本鉱物科学会誌『岩石鉱物科学』（2011 年）、日本地球化学会誌『地球化学』第 46 巻 4 号（2012 年）でそれぞれ「地殻流体特集号」を組んだ。また、Springer が出版する日本地球惑星科学連合の英文国際誌 EPS (Earth Planets & Space) で 特集号 Geofluid Processes in Subduction Zones and Mantle Dynamics、編集長：川本竜彦を 2014 年 6 月現在刊行中である（受理 17 件、査読中 22 件）。さらに研究成果を学生や一般に普及する目的で、東大出版会から単行本「地殻流体と沈み込み変動（仮題）」を 2015 年に刊行する予定で準備を進めている。

領域発足時には馴染みのない言葉であった本領域の略称「地殻流体」は、5 年間に広範囲で使用されるようになり専門用語として定着した (P.24 に詳細)。さらに、英語略称 Geofluid の概念も従来の地下水に加えてマントル深部由来の流体も含むように意味が拡大した。プレートの沈み込み帯で起こる地震・火山・地殻変動などを深部由来の流体相の役割から研究する本領域の手法と、地球物理・地質学・岩石鉱物・地球化学などの広範な学際融合チームで研究する本領域のスタイルとは、招聘した著名な外国人研究者を驚かせ全員から極めて高い評価を得た。また、本領域はサマースクールなどを通じて学際融合的な研究手法に大学院生が慣れ、視野の広い研究者として育つよう最大限に努力した。その結果、きわめて多くの若手研究者を輩出し、地球科学研究コミュニティの発展に大きく貢献した (P.12 に詳述)。

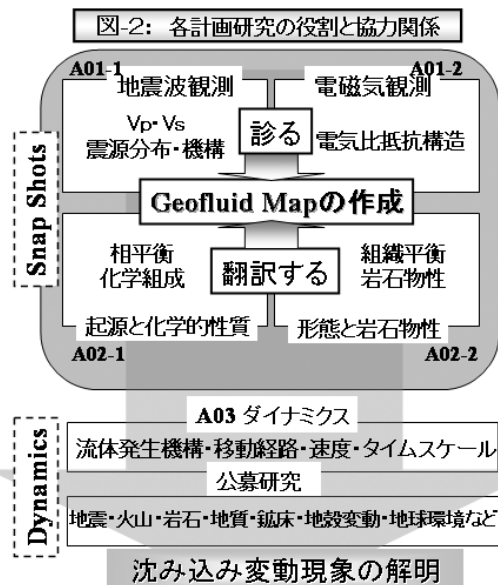


## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### 基本研究戦略

地殻流体の起源・実態・役割を解明するために、手法を異にする3つの研究項目（A01 観測班, A02 実験・翻訳班, A03 ダイナミクス班）を置いた。観測と実験・翻訳の各項目中に、研究対象の異なる2つの計画研究を配置した（図-2）。**流体相の分布を地球物理観測に基づいて解明するには、弾性波速度が流体量のほか温度・圧力・鉱物組成により複雑に変化するため、従来の地震波トモグラフィーだけでは不十分である。一方、岩石の電気比抵抗は流体成分の有無により最大4桁変化する。そこで本領域では同一地域において地震波観測および電磁気MT観測を最高精度で実行し、それらのデータから地下の流体分布を読み出すことを計画した。**電磁気MT観測は観測装置と解析手法の制約からこれまで2次元構造解析が主であったが、本領域では地震波トモグラフィーと直接比較するために3次元MT観測を実施し、新たなインバージョンコードを開発しつつその結果を解析した。地震波トモグラフィーについてはVp, Vsに加えて新たに減衰率 $Q^{-1}$ の構造も求めた。さらに、これらの**地震波、電気比抵抗の観測データを解釈して地下の流体分布を読み出すための『流体を粒界に含む岩石の物性(PROMモデル)』**を分子シミュレーション、高温高压実験、天然岩石の観察に基づいて構築した。総括班はこれらの融合研究を円滑に進めるため頻りに総括班会議を開催した(電子メールによる総括班内部のメール連絡は5年間で1360回に達した)。



### （地震波 A01-1）と（電磁気 A01-2）の共同観測

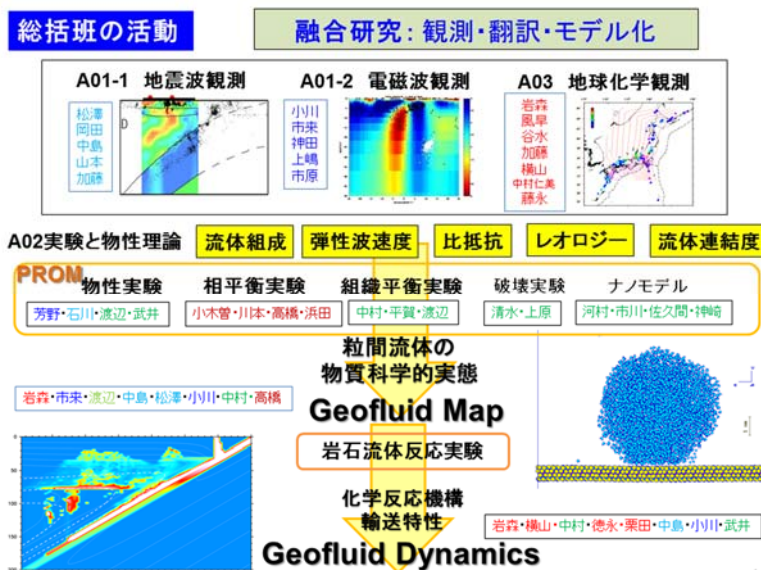
異なる手法で地殻流体の3次元分布を解明する目的で、地震波班（A01-1）と電磁気班（A01-2）が協力して鳴子火山周辺で稠密な観測を実施した。A01-2の市来（H21：東工大・特別研究員）はH22年4月より東北大学理学研究科助教に異動し、A01-1の松澤らとA01-2の小川らによる地震波・電磁気共同観測のかけ橋となり活躍した。さらに、A01-2の小川（東工大）は、東北大学大学院において非常勤講師として平成22（2010）年度の「地殻物理学特論I」の講義を担当し、電磁探査手法の基礎から応用を解説した。これにより、A01-1の地震観測・研究に参加している東北大学の院生が総合的な解析に挑戦する基礎を作ることができた。A02-2の中村は、本地域の地質および岩石学的情報から推定される鳴子火山・鳴子カルデラの地下構造についての情報を提供し、観測データの解釈をサポートした。（P.7参照）

### （観測 A01）と（実験 A02）の連携

電磁気観測により発見された地殻内の高電気抵抗層の起源を解明するため、A01-2の芳野・藤田らおよびA02-2の中村・渡辺・河村・佐久間らは、 $H_2O-NaCl$ 系流体とそれを粒界に含む岩石の微細構造と電気抵抗を高圧実験および分子シミュレーションの手法で解明した（P.8参照）。地震波速度と、岩石中の地殻流体の含有量および形態の関係を精密に明らかにするため、武井・渡辺らは理論的・実験的研究を行った。このほか、観測と実験の項目をまたいだ連携研究が数多く実施された。

### （ダイナミクス A03）と（観測 A01）・（実験 A02）との連携

A03の岩森・栗田らはA01の中島・小川・市来、A02の小木曾・中村・渡辺・松影・高橋らと共同して、地震・電磁気共同観測結果、および流体を含む**岩石の物性モデル（PROM）**に基づき、本領域の目指す地殻流体分布図



**(Geofluid Map)作成のアルゴリズムを完成した。**その結果、宮城県北東部の観測結果を用いて、Geofluid Map 作成に初めて成功した (P. 9 参照)。さらに、A03 の岩森・風早・中村・横山・加藤・藤永らは**日本列島の地下水・火山岩・鉱床鉱物を分析し、列島規模の流体組成分布図を作成した** (P. 9 参照)。この流体分布を、A01 の地震トモグラフィー並びに低周波地震震源分布と比較することにより、日本列島内の地殻流体発生と循環経路を解明する共同研究を進めた。このほか、**ダイナミクスと観測・実験の項目をまたいだ数多くの共同研究が実施され Geofluid Dynamics 創生への道を開いた** (P. 10 参照)。

#### 公募研究と計画研究の連携

公募研究の市原は A01-2 の小川らが進める**東北日本陸域の電気比抵抗測定を補完する海域の電気比抵抗測定を進め、陸域と海域の比抵抗測定結果を統合することができた**。また公募研究の片山は A02-2 と連携し蛇紋岩の透水係数に強い異方性があることを実証し、水の移動がプレート境界付近に限られることを予想した。公募研究の岡本らは超臨界水に対する SiO<sub>2</sub> の溶解度の温度圧力依存性を水熱実験によって詳細に調べた結果、**地殻深部より上昇して来た熱水から、中部地殻においてシリカ成分が多量に析出して割れ目をシールすることが明らかとなり、A01-1 が地震観測で求めた S 波散乱体の起源が解明された**。また公募研究の中久喜は A03 と連携し、流体-マントルの対流の強い相互作用を、大規模流体力学計算に基づき世界で初めてモデル化し、地殻流体がダイナミクスに与える影響を解明した。

#### 総括班融合研究センターの役割

総括班では領域全体を活性化し分野を横断した融合研究を強力に推進するため、**融合研究センターを東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻内に設けた**。融合研究センター長の河村雄行教授は平成 22 年 4 月から岡山大学環境理工学部へ異動したが引き続き融合研究センター長を務め、全国の大学・研究機関に所属する合計 75 名のメンバーの融合研究推進に努めた。融合研究センターには 3 人の特任助教、2 名の特別研究員を配置し、5 つの計画研究と総括班との連携に努めた。**融合研究センターは合計 25 回の融合研究セミナーを東京工業大学、京都大学などで開催した。また合計 10 回のワークショップを東京工業大学、東北大学、京都大学、産総研などを会場に開催した**。融合研究センターの活躍の結果、領域全体から 5 年間に 25 編の学術論文が複数の計画研究のメンバーを著者として出版された。

#### 国際シンポジウムの開催

総括班は合計 7 回の国際シンポジウムを開催した。(詳細は P.24 参照)



#### 国際シンポジウム Geofluid-3: Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones

2014 年 2 月 28 日-3 月 3 日東京工業大学デジタル多目的ホール 参加者総数 135 名(内、招聘外国人研究者 12 名、地殻流体研究メンバー 70 人、大学院生 40 人)。2012 年に三朝町で開催した国際シンポジウム **Geofluid-2** の外国人招聘者 10 人(うち 6 名は **Geofluid-3** にも再来日)と合わせ、世界の指導的研究者から極めて高い評価を受けた。主な招聘者は D. McKenzie (ケンブリッジ大)、J. Blundy (ブリストル大)、S. Kirby (USGS)、R. Burgmann (UC-バークレイ)、P. Wannamaker (ユタ大)、M. Schmidt (スイス連邦工科大)、T. Churikova (ロシア科学アカデミー)、J. Hermann (オーストラリア国立大)、R. Sibson (オタゴ大)、Yong-Fei Zheng (中国科学技術大) Yigang Xu (中国科学院広州地球科学研究所所長) など。



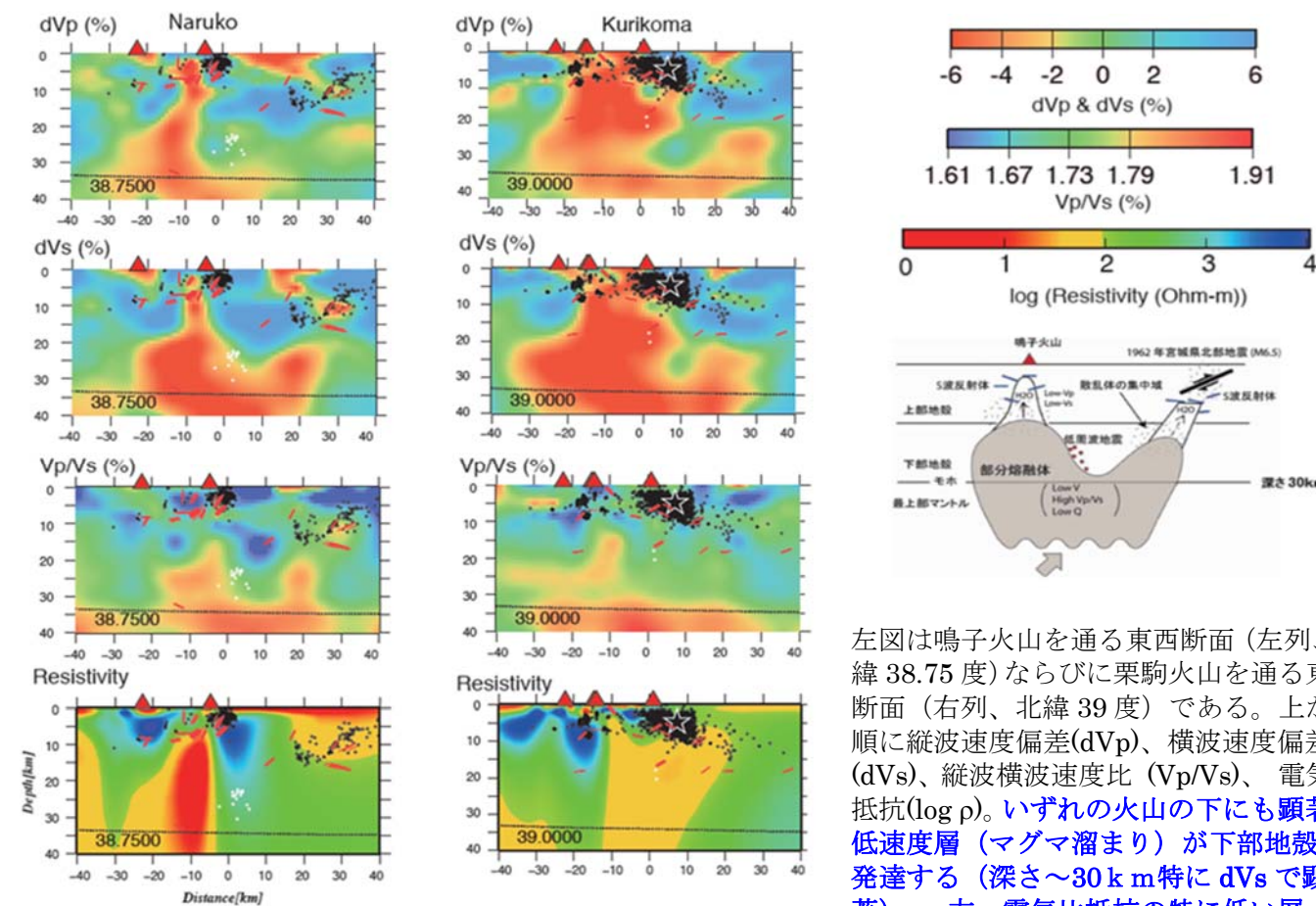
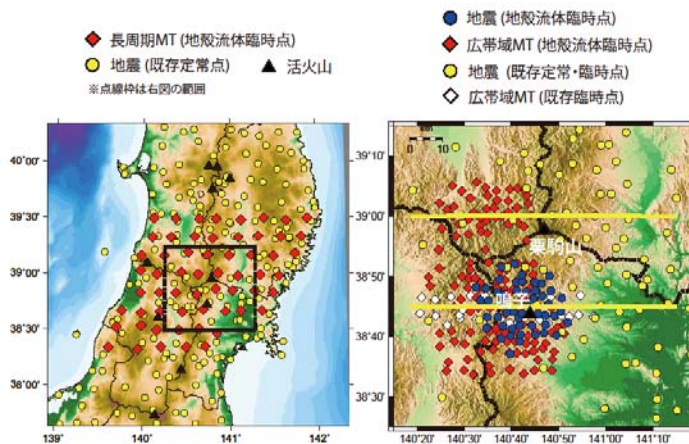
### 3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

以下に詳述するように、研究領域として当初設定した研究計画は十分に達成され、それに加えて当初計画になかった複数の融合研究による成果も上がった。

#### 1.地震波・電磁波同時アレイ観測による東北日本の地下構造解明（A01-1, A01-2 の融合研究）

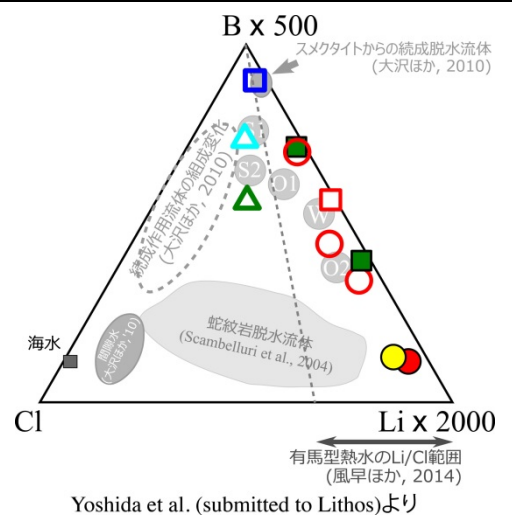
鳴子火山周辺を研究の模式地として捉えて、地震観測および電磁気観測を同時に実施することによって、地震波速度構造と比抵抗構造をとともに3kmの解像度で解明し、マントルから地殻上部に至る地殻流体の3次元的な分布や化学組成を定量的に解明することを目指した。地震観測は平成21年度より鳴子周辺に50観測点を展開した。電磁気観測は、これまで地殻を対象とした広帯域MT観測を鬼首カルデラおよび鳴子火山周辺で合計145点展開し、マントルを対象とした長周期MT観測を59観測点で展開した（右図）。このように地震波と電磁波による稠密な観測で地殻およびマントルの3次元構造解析が行われたことは世界的にも例がなく、我々はこれを用いて沈み込み帯火山フロント直下における地震・火山の構造および流体の分布を解明した。



左図は鳴子火山を通る東西断面（左列、北緯 38.75 度）ならびに栗駒火山を通る東西断面（右列、北緯 39 度）である。上から順に縦波速度偏差(dVp)、横波速度偏差(dVs)、縦波横波速度比 (Vp/Vs)、電気比抵抗(log ρ)。いずれの火山の下にも顕著な低速度層（マグマ溜まり）が下部地殻に発達する（深さ～30 km特に dVs で顕著）。一方、電気比抵抗の特に低い層（連結した高濃度塩水に富む岩石層）は下部地殻のマグマ溜まりより上の地殻中部（深さ 20-10 km 付近）に発達している。赤線は流体がシート状に貯留した S 波の散乱体で、下部地殻から舌状に伸びる低比抵抗層（流体を粒界に多く含む岩石）の頂上部に発達している。領域発足時の地殻流体分布予想（右下解説図、領域計画書の図-3）が概ね正しいことが観測から実証された。さらに、鳴子火山の下で流体濃度が特に高いことが明らかになった（左最下図、赤色部）。

## 2. 深部由来流体の組成と起源 (A02-1, A03 の融合研究)

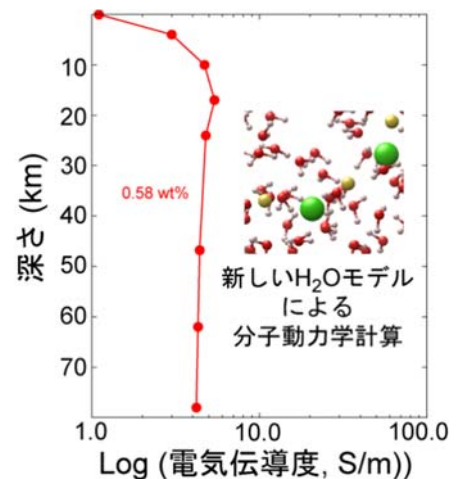
沈み込み帯で発生する流体の化学組成を明らかにするために、A02-1 班が中心となって、沈み込み帯深部で形成された変成岩・カンラン岩に含まれる流体包有物の化学分析と岩石の相平衡解析、および、流体への微量元素分配実験を行った。三波川変成岩中の流体包有物の化学組成分析と、ホストの変成岩の精密な相平衡解析からは、**変成作用時に存在した流体が高い塩濃度を持つだけでなく、その Li/B 比が変成作用の温度圧力の上昇とともに変化する**こと (右図)、その温度圧力が沈み込むスラブの温度圧力にほぼ一致することが明らかとなった (Yoshida et al., 2011)。**カンラン岩捕獲岩の流体包有物の化学分析からは、海水よりも塩濃度の高い流体がマントルウェッジに存在することが判明した** (Kawamoto et al. 2013 PNAS)。ダイヤモンドアンビル装置と放射光 XRF を用いた、メルト-流体間高圧その場合微量元素分配実験からは、塩濃度の高い流体により多くの微量元素が溶け込むこと、その微量元素の濃度パターンが、沈み込み帯で噴出するマグマの微量元素組成と整合的であることが明らかとなった。(Kawamoto et al., *in press*)。これらの研究により、**沈み込み帯深部に存在する流体が沈み込むスラブ由来の高塩濃度の流体であること、その流体が沈み込み帯の火成活動に寄与していることが、物的証拠を基に初めて明らかにされた。**



## 3. 塩水およびそれを粒界に含む岩石の物性解明

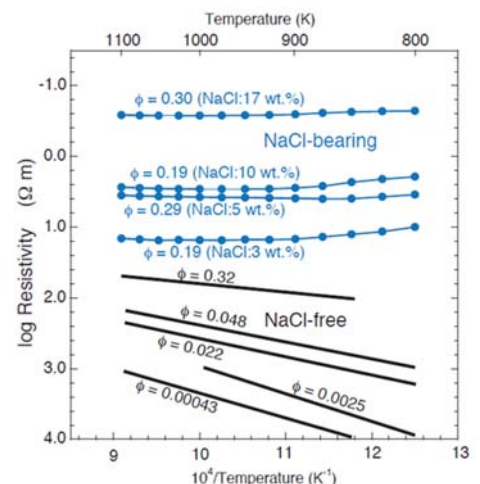
### 3.1 塩水の分子動力学計算 (A02-2, A01-2 の融合研究)

塩水の電気伝導度は、電磁気観測の結果を説明する上で必要な物性値であるが、実験の困難さから低圧、低塩濃度のデータしか存在しなかった。A02-2 の佐久間・河村は **1 GPa, 1000 K をはるかに超える温度・圧力で使用でき、塩との相互作用を精密に再現できる H<sub>2</sub>O モデルを新たに開発**し (Sakuma et al. *J. Chem. Phys.*, 2013)、H<sub>2</sub>O-NaCl 流体の分子動力学 (MD) 計算を実施した。この新しい H<sub>2</sub>O モデルは、条件に応じて点電荷の値が変化し (電荷変動型)、分子内振動も取り入れている。**右図に MD 計算によって得られた H<sub>2</sub>O-NaCl (0.58 wt%) 流体の電気伝導度の深さ変化を示す。**この結果から、H<sub>2</sub>O-NaCl 流体の電気伝導度は、深さ 10~20 km で地表面付近よりも 1 桁大きな極大値を持ち、その後ほぼ一定値を取ることがわかる (Sakuma et al., 投稿準備中)。電磁気観測では、一般に深さ 10~20 km 付近に電気伝導度の極大値を持つことでは MD 計算と整合的であるが、その極大値は地表付近と比べて 2 桁程度大きい。**電磁気 MT 観測で発見された低比抵抗帯を説明するためには、高塩濃度の流体が岩石粒界を連結していることが必要である。**



### 3.2 塩水を含む岩石の電気伝導度測定 (A01-2, A02 の融合研究)

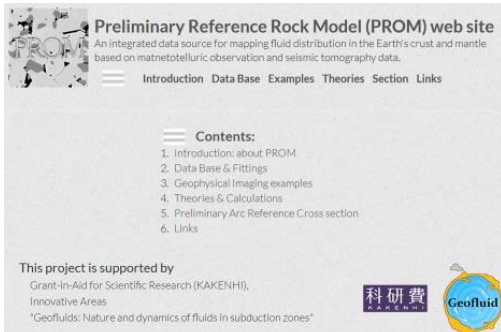
地殻内の流体量を推定するためには、流体単体の電気比抵抗値 (3.1) に加えて、岩石の粒間に流体が含まれる系での電気比抵抗値が必要である。そこで A01-2 芳野らは、**地殻岩石の模擬物質として石英と曹長石を用い、水を含む岩石の電気伝導度測定を 1GPa において多様な温度で実測**した (Shimojuku et al., 2012, 2014)。右図は石英+水 (青線は塩水) の実験結果で、系が NaCl を含むときに水の場合に比べ岩石の電気伝導度が大幅に増加した。アルカリ性分を含む曹長石+水の系では、流体が NaCl を含まない場合でも、電気伝導度がかかなり高くなるが、地殻で観察される高電気伝導度異常の値には足りない。**鳴子火山下の中部地殻の高電気伝導度(低比抵抗)異常 (P.7 左下図、log p=0~1) を説明するためには、濃い塩水が粒界に 10%以上存在する必要がある。**塩濃度の増加に対して電気伝導度は上昇するが、その絶対値は塩水の電気伝導度から推定される値に比べて小さくなる傾向が見られた。これは鉱物と共存する塩水中のイオンはイオン対を形成したり、結晶表面に吸着し、電気伝導度を下げるためと考えられる。本実験によって、岩石中の流体量を見積もる際に、純粋な塩水単体の電気伝導度のみに基づくと流体量を過小評価する可能性があることが見出され、流体量のより高精度な評価への道が開けた。





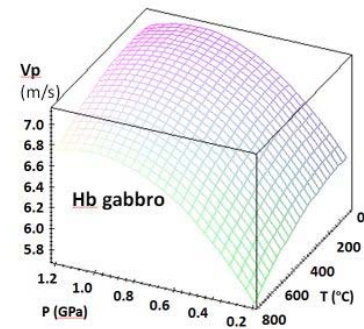
### 3.3 PROMモデルの構築 (A01, A02、A03の融合研究)

A01-1, A01-2 班が地球物理学観測によって取得した物性値は、流体量とともに岩石の種類（岩相）の関数である。よって **Geofluid Map** を作成するには、**岩相ごとの物性値をコンパイルした PROM (Preliminary Reference Rock Model : 標準岩石モデル)** を構築する必要があった。A02-2 班が中心となってこの作業を進めた。不足していた物性データは、A02-1, A02-2 の分担者による新たな実験的研究によって補完するとともに、観測地域の岩相をよりの確に制約するため、地質学的・岩石学的な情報を効果的に組み入れる方法を考



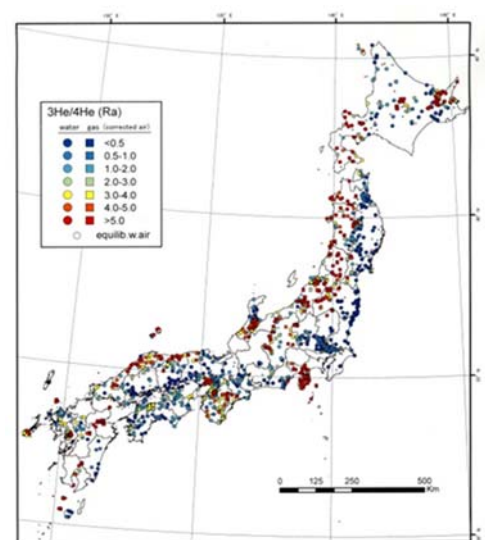
案した。PROM はこれらの過程を通じて、計画研究間の融合研究を効果

的に推進するための求心力を持った仕組みとして機能したと同時に、その結果は4つの計画研究をまたいだ共同研究に活用され、領域をあげての共著論文として公表の準備が進んでいる (Hoshide et al. 2014, Iwamori et al., 2014; Geofluid-3; in prep.)。PROM データベースは、関連分野の研究者にとって有用性が高いと考えられることから、web site において公開し、随時更新を行っている。(左図 <http://www.nornir.co/member/01prom/index.html>)



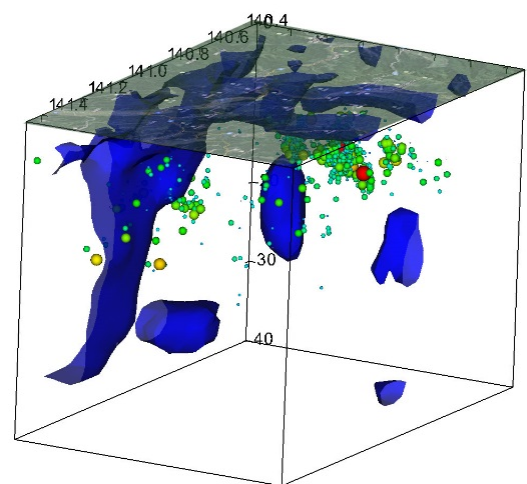
### 4. 地殻流体の地球化学的キャラクタリゼーション (深部流体の Geofluid-Map)

A03 計画研究では、地殻流体の分布と性質を、(1) スラブから直接由来した可能性のある深部由来流体、特に有馬型温泉水、(2) スラブ由来流体の寄与が定量的に検出されつつある日本列島の火山岩、特に初生的玄武岩、(3) 深部由来流体の化石としての鉍床、特に大規模鉍脈型鉍床である豊羽鉍山の調査と分析、によって詳細にキャラクタリゼーションし、地殻流体の発生源、組成、分布を制約することを目的とした。(1)については、右図のように日本列島全域を覆う温泉水・深部地下水のマッピングが完成し(右図)、非火山性地域においても、深部高温起源と考えられる濃い塩水(有馬型塩水、 $^3\text{He}/^4\text{He}$  が低い特徴を併せ持つ、右図の赤点)が広く分布し、『塩水』が地殻流体の普遍の実態の一つであることが明らかとなった(風早 他, 2014)。(2)についても、Pb-Nd システムティクスに基づく日本列島全域のスラブ流体分布と量が制約され、テクトニックセッティングとの強い関連性が判明した(Nakamura & Iwamori, 2013; Kimura & Nakajima, 2014)。(3)では、世界で初めて鉍床鉍物の Pb-Nd-He 同位体比測定に成功し、重金属そのものが、沈み込むスラブに起源をもつ可能性が明らかとなった(Fujinaga et al., in prep.)。



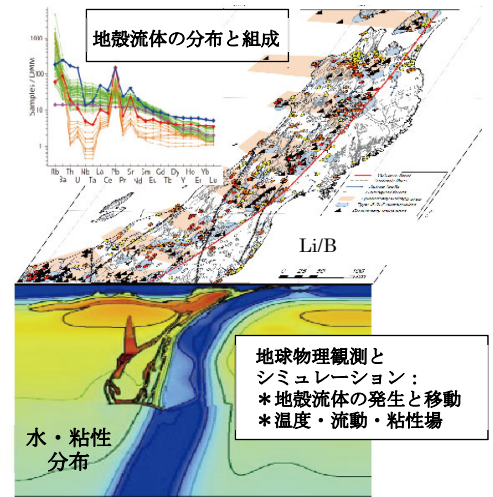
### 5. Geofluid-Map の作成 (領域計画書記載の融合研究—1)

東北地方鳴子地域における世界最高レベル稠密観測により得られる地震波速度、電気伝導度の3次元構造を、翻訳辞書としての固液複合系岩石物性の実験・理論的制約モデル(PROM)と合わせることで、地殻流体の分布をとらえることを目的とした。(1) 温度、圧力、流体の量と塩濃度(またはマグマ Na 量)、等価アスペクト比、連結閾値、岩質を与えて、地震波速度および電気伝導度を導くフォワードモデルの構築、(2) (1)に基づくインバージョン手法の構築(熱流量やシミュレーションから制約される地温勾配、およびマグマまたは観察から推定される5%塩水を地殻流体組成と仮定)、(3) これらに基づく地殻および最上部マントルにおける地殻流体の分布とその幾何形状の推定、を行った。その結果、右図の流体分布構造(青色部分)が得られ、その幾何形状パラメーターから、地殻流体が浸透流、クラックおよび低連結度の水溜り等、多様な形態で存在することが推定された(Iwamori et al., in prep.)。



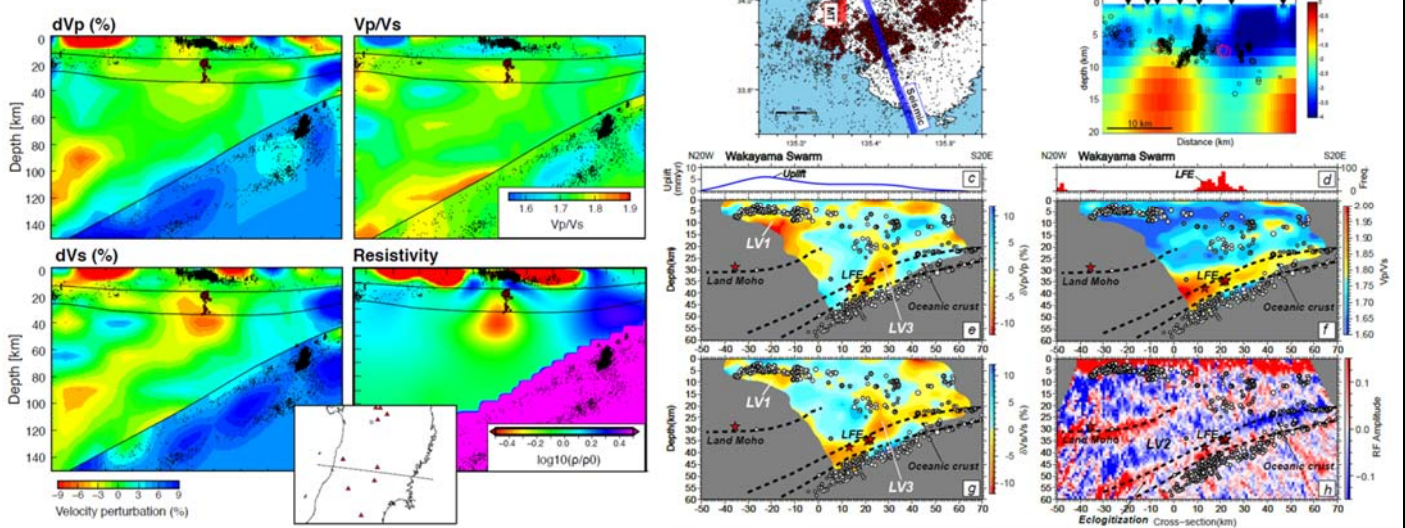
## 6. Geofluid Dynamics の創生 (領域計画書記載の融合研究—2)

岩石実験・地球化学分析に基づく地殻流体の起源と組成、及び地震・電磁気・岩石物性研究の融合による Geofluid Map を、**固液 2 相流としての流体・元素の輸送モデル**を介して統合し、**沈み込み帯全体におよぶ地殻流体の動的イメージ (Geofluid Dynamics) の創出を目的とした**。その結果、(1)有馬型塩水は、それを特徴づける  $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  組成に加え、Pb-Sr 同位体比がスラブ由来流体とほぼ一致すること (Kusuda et al., in revision)、(2) 島弧火山岩や鉱脈鉱床を特徴づける微量元素組成・同位体比、および U-Th 放射非平衡は、少なくとも**スラブ由来流体の一部が上昇中に周囲の岩石とほとんど反応を行うことなく比較的短時間 (~数万年以下) で上昇した可能性が高いこと** (Ikemoto & Iwamori, 2014; Yokoyama et al., in prep.)、(3) 地震・電磁気・岩石物性研究の融合解析は、地殻流体が浸透流、クラックおよび低連結度の水溜り等、多様な形態で存在すること、(4) 流体生成・移動—低粘性鉱物形成—マントルの対流・温度の強い相互作用 (Horiuchi & Iwamori; Nakakuki et al., in prep.)、などが示され、地殻流体の発生から湧出に至る全体像が提案される (右上図: 地表での観測と地下の動的シミュレーションを合成)。



## 7. 流体循環から見た東北日本弧と西南日本弧の相違 (A01, A02, A03 の融合研究)

本領域では日本列島のいくつかの場所の断面を描いて地殻流体が地震活動・火山活動など沈み込み変動に果たす役割を解明した。(下図) は鳴子火山を通る東北日本の東西断面、(右図) は紀伊半島の和歌山を通る南北断面である。



長周期 MT 観測 (P. 7 参照) の結果を従来の地震波トモグラフィーと合わせ、東北日本のウェッジマントルおよび島弧地殻に関する**地震波速度・岩石比抵抗の島弧スケールでの 3 次元構造を世界で初めて解明することができた (上左図)**。表層部の地下水に富む堆積岩層を除くと、電気比抵抗の低い領域は火山直下の S 波速度が最も遅い領域と良い一致を示す。この低速度層は最上部マントルから地殻下部に発達するマグマ溜りに相当する。反対に**前弧側のウェッジマントルは抵抗が高く流体が侵入していないことを示唆する**。これは深層地下水の He 同位体比から見た Geofluid Map (P. 9 中段) で、**前弧側では He 同位体比の高い深部流体がほとんど見られないことと一致する**。東北日本においては沈み込む海洋プレートの温度が低いため、海洋プレートからの脱水は、プレートの上面が約 80km に達する付近までほとんど起こらず、脱水した水の多くはプレート上面に形成される蛇紋岩によりマントル深部まで運ばれ、深さ 120 km 以深で分解しマントルに流体を放出すると考えられる。

一方、西南日本では MT 構造探査は 2 次元のデータしか得られていないが、地震波トモグラフィーと MT 探査の結果を比較するため紀伊半島 (和歌山地域) の南北断面を示す (上右図 加藤愛太郎・2014EPS 投稿中)。西南日本では沈み込む**プレートが若く温度が高いため、脱水はプレートの上面が 40km に達する付近で起こり、間隙水圧の上昇により発生すると考えられる顕著な低周波地震 (LFE) がプレート上面で起きている**。深層地下水の Geofluid Map によると紀伊半島から大阪平野にかけて深部由来の流体 (有馬型塩水) が広く分布している。これらの観察事実から、**西南日本では火山前線よりはるかに海溝に近い前弧側のウェッジマントルおよび地殻も東北日本の前弧に比べ流体に富む**と考えられる。



#### 4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

##### (1) 計画の問題点と対応策

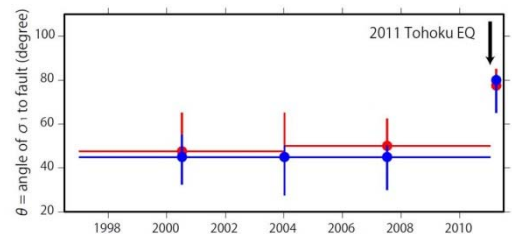
研究出発時に指摘された「観測」と「他研究項目」の連携を強化するため、計画研究 A01 の分担者に高温高压実験の研究者を加えたほか、総括班のイニシアティブのもと、A01(観測)、A02(実験)、A03(ダイナミクス)の研究者を束ねた融合研究セミナーやワークショップを頻繁に開催して分野間の連携強化に努めた。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、計画研究の一部は甚大な被害をこうむった。計画研究 A01-1 では大学の建物被害に加えて、東北地方に張り巡らせた地震観測網が寸断され、その迅速な復旧に全精力を注いだ。幸い本研究で導入した装置はいずれも無事であった。東京工業大学を会場として2011年3月17日～19日に第1回の国際シンポジウム Geofluid-1 を開催する予定で、外国人招聘者12人もすでに来日直前であったが巨大地震とそれに続く原発の事故により講演会は中止し、すでに完成していた講演予稿集を用いた書面開催とした。このような東北地方太平洋沖地震による被害があった一方で、本領域の中間評価コメントでも求められたように、巨大地震は本領域の研究を飛躍的に進める契機となった。以下は、領域計画書記載の融合研究—3『内陸地震・火山活動・地殻変動に地殻流体が果たす役割の解明』に相当する。

##### (2) 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震 (M9.0) に起因する新たな研究

東北地方太平洋沖地震の発生前後の地震活動や構造について詳細な検討を行い、下記の通り、プレート境界や内陸、スラブ内部ともに流体の存在のために強度が低くなっている所で地震が発生している可能性が高いことが確かめられた。

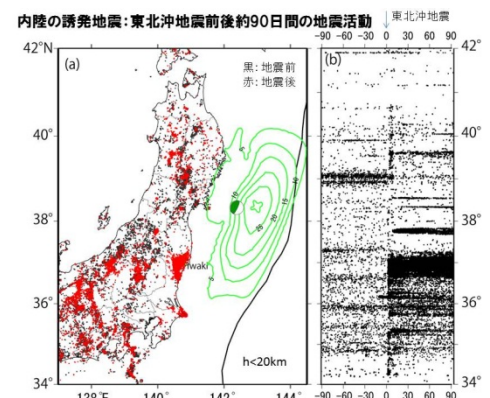
###### 2-1. プレート境界と上盤プレートの強度

東北地方の太平洋沖では逆断層型の地震が卓越していたが、東北地方太平洋沖地震の後は正断層型の地震が数多く発生するようになった。応力テンソルインバージョンによって本震前後の応力場を推定し、それと本震による応力変化とを比較した結果、プレート境界では最大剪断応力で20MPa程度 (Hasegawa et al., 2011)、太平洋沖の上盤プレートの地震発生域では10MPa程度以下 (Hasegawa et al., 2012) しか強度がないことが明らかになった (右上図)。このことは巨大地震の震源断層のかなりの部分が高压の地殻流体で満たされていたことを示している。



###### 2-2. 内陸地震発生域の強度

東北地方太平洋沖地震のあと、内陸で発生する地震の活動度は本来低下するはずであるが、逆に活発化した場所が多数存在している (右下図)。これらはこれまでのような東西圧縮の発震機構解とは異なっており (Okada et al., 2011)、福島県のいわき付近では正断層型の地震も発生した (Kato et al., 2013)。応力テンソルインバージョンによって推定された応力の主軸方向の回転から、内陸の地震の強度は極めて小さいと推定される (Yoshida et al., 2012)。地形効果等もすべて考慮すると、内陸の地震発生域の強度も最大剪断応力で20MPa程度以下と推定され (Yoshida et al, in prep.) その断層も地殻流体で満たされているらしい。



###### 2-3. 内陸の地震発生域における流体の拡散

東北地方太平洋沖地震の後に内陸で活発化した地震活動を詳細に調べた結果、地震活動が次第に拡散したり、あるいは場所を移動していることがわかった。これはこれらの内陸地震が高間隙圧の影響で発生し、流体の移動によって地震活動も移動していることを示していると考えられる。この仮説が正しいとすれば、地震発生域の透過率 (permeability) は  $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  程度であると推定される (Okada et al., submitted)。

###### 2-4. スラブ内地震と流体

東北地方太平洋沖地震発生後の2011年4月7日に深さ66kmで発生したM7.1の地震の震源域では、地震の前から地震波速度が遅かったことが明らかになった。このことから、スラブ内に流体が分布しているところで強度が下がっていて、そこが太平洋沖地震の後の応力変化によって大地震を発生させたと考えられる (Nakajima et al., 2011)。

###### 2-5. 巨大地震のアスペリティー

清水以知子らは2011年に東北沖で発生した巨大地震(M9)の原因を知るため、公表されている地球物理学的観測結果と岩石の摩擦・破壊・流動特性およびH<sub>2</sub>O流体の物理化学的効果を総合して、沈み込みプレート境界断層の強度モデルを作成した。M9震源域は石英の脆性変形域の高強度部分にあり、流体に乏しい宮城沖を中心に巨大なアスペリティーが形成されていたと考えられることが分かった (Shimizu, 2014)。



## 5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

本領域では学際融合による地殻流体研究コミュニティー育成に最大限の努力を払った。総括班は大学院生や学部生向けのサマースクールを毎年開催し、地殻流体領域のメンバー、融合研究センターの特任助教に加えて久城育夫(東大名誉教授)、長谷川昭(東北大名誉教授)らに講師を依頼した。期間内に本領域が雇用した若手研究者は総括班融合研究センターの特任助教3名、PD2名をはじめ、領域全体で延べ17名に及んだ。そのほとんどが領域終了時には大学または研究機関の教員・研究員に採用されている(下欄参照)。この結果は、本領域から地球物理学・地質学・岩石鉱物学・地球化学などの幅広い学際的視野を持つ有能な若手研究者が多数育ったことが理由であると考えている。



サマースクールで講演する久城育夫(東大名誉教授)およびグループ討論

## 6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

### 電界放出型走査電子顕微鏡（FE-SEM）（東北大学理学系地学専攻） 中村美千彦

『本装置は、分子動力学により得られる粘土鉱物のナノスケールでの構造を実証的に確認することや、岩石鉱物試料・実験産物の高分解能観察に使用することを目的として導入され、東北大学のほか、岡山大学・東京工業大学の研究分担者等により（震災直後の期間を除き年間約 200 時間）活用されてきた。その結果、微視的な物質科学と地震・火山現象のダイナミクスを結びつける研究が可能となり、具体例としては、断層粘土の構造と流体輸送特性の研究、マグマの脱水結晶化作用の研究等の成果に結びついた（e.g. Sakuma, Kawamura et al., 2012; Mujin and Nakamura, 2014）。このように、総括班の主導する Geofluid Dynamics の創生に有効に活用され、今後も、マンツルの蛇紋岩化反応実験の投稿論文修正作業や、流体包有物の急冷結晶分析に基づく地殻流体組成の推定などに幅広く利用される見込みである。』

### 表面電離型質量分析計（TIMS）（東京工業大学地球惑星科学専攻） 横山哲也

『本装置は沈み込み帯における流体やマグマの起源と移動のメカニズムを定量的に評価するため、天然岩石試料のウラン・トリウム放射非平衡、および放射性起源同位体（ストロンチウム・ネオジム・鉛）を測定することを目的として導入された。主として東京工業大学の研究分担者により活用され、使用時間は年間約 500 時間であった。主要な研究成果としては、東北日本火山岩のウラン・トリウム放射非平衡を高精度で測定し、スラブ由来流体の島弧横断方向への組成変動を明らかにしたこと（Yokoyama et al., in prep.）、および三波川変成帯の塩基性片岩の Sr-Nd-Pb 同位体組成を測定することで、変成作用中の流体による元素移動を定量化したこと（Uno et al., 2014）などである。これらの成果は総括班が主導する Geofluid Dynamics の創生と深く関連し、今後も火山岩のウラン・トリウム放射非平衡分析を中心に広く活用されることが予想される。』

### 長周期 MT 観測システム（東京工業大学火山流体研究センター） 小川康雄

『本装置はマンツルの 3 次元比抵抗構造探索のために導入された。地球磁場変動（3 成分）および電場変動（水平 2 成分）を、1 秒サンプリングで計測するシステムである。磁場センサーはフラックスゲート型磁力計である。消費電力が 0.9W 以下であり、地球電磁場の微小な変動を、高精度で長期間にわたり観測することが可能である。東北大学、東京工業大学、東京大学、京都大学の研究分担者および海洋研究開発機の連携研究者に有効利用された。11 式からなる本システムを用いて、東北地方中央部の 20km グリッド観測点（59 観測点）において、それぞれ各観測点で 2-3 ヶ月にわたり観測を実施することによって、上部マンツルの 3 次元比抵抗構造を解析することができた（Ichiki et al., in prep.）。得られた比抵抗構造は、総括班の主導する“Geofluid map 作成”に有効に活用された。今後もマンツルの 3 次元比抵抗構造解析のために、広く利用されることが期待される。』

### 地震観測システム（東北大学 地震・噴火予知研究センター） 松澤暢

『本システムは短周期地震計やロガー、広帯域地震計等から構成され、主として宮城県の鬼首・鳴子周辺の地震活動と地下構造の解明のために使用された。約 4 年間の観測データの解析により、鬼首・鳴子の深部から浅部にかけて明瞭な低速度域を発見し（Okada et al., submitted）、本研究領域で実施された様々な実験および同地域の比抵抗構造推定の結果との比較解析から、総括班の最重要課題である地殻流体の分布の推定に成功した。さらに、本観測データに基づく詳細なメカニズム解の推定から、この付近での差応力が 20MPa 以下と極めて低いことも示し（Yoshida et al., in prep.）、地殻流体による間隙圧の上昇が地殻の強度を下げていることも実証した。この観測データは今後、他の研究用途にも有効利用され、また観測システムも他の地域における地殻流体の分布の把握に活用される予定である。』

### 物性測定用高温高压実験装置（富山大学理学部地球科学科） 渡辺了

『本装置は、岩石内における流体の存在形態を電気伝導度、弾性波速度等の物性その場測定から明らかにすることを目的として導入された。実験では合成岩塩を使用し、温度圧力条件を変えた電気伝導度測定から、粒界水が幅広い条件で存在することを示し、地殻流体の理解に貢献してきた（Watanabe and Kitano, 2014）。一回の実験が数百時間を要するため、共同研究に活用することは難しかったが、岩塩（塩化ナトリウム）という単純な物質を採用したことにより、理論的研究と実際の岩石についての研究を橋渡しする役割を果たしてきたと考えている。領域終了後は、含水岩塩の実験のほか、高温高压における流体の電気伝導度測定、水への岩石の溶出実験などの共同研究に活用される見込みである。』

### フェムト秒レーザー（海洋開発研究機構・高知コア研究所） 谷水雅治

『本装置はレーザーを岩石試料に集光照射し、数  $\mu\text{m}$  の鉱物から掘削された微細粉末の元素存在度や同位体比を測定する目的で導入され、海洋研究開発機構や東京大学の研究分担者等により活用されてきた。その結果、日本のような沈み込み帯上の島弧での様々な地質学的現象に地殻流体が関与する可能性が、微視的にも確認された。具体的には鉱脈性熱水鉱床の生成において、微視的なスケールでの堆積物起源の物質とマンツル起源の物質との流体を介した混合が、鉛同位体比の変動から確認された（若木&谷水, 2014）。このことは、熱水鉱床中の金属元素が地球の極表層に由来するという従来の概念とは異なり、地殻深部からの金属元素の供給を示唆するもので、地殻流体の新たな描像を提起するものである。今後は断層運動に伴う流体-岩石間の化学反応によってできる微細鉱物の元素分配の同定による温度推定などの用途で、研究コミュニティに活用される見込みである。』

## 7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

### 評価コメントー1

本研究領域は、地震や火山活動などの変動現象に深く関わる「地殻流体」を研究対象とし、水溶液－マグマ－超臨界流体－固体の振る舞いを、ミクロな構造・素過程からマクロな発生・移動にいたる幅広いレンジで研究することにより、沈み込むプレートに由来する地殻流体の起源・実態・役割を解明することを目的とする。さらに、領域全体の5年間の研究目標として、1) Geofluid Map の作成、2) Geofluid Dynamics の創生、3) 沈み込み変動に地殻流体が果たす役割の解明を掲げた。この目的・目標を達成するために、5つの計画研究班を組織し、互いに連携しながら意欲的に研究を推進してきた。その結果、研究は非常に順調に進み、今後につながる数多くの研究成果が得られた。公表論文数が678編にのぼることは、その一つの表れである。

各計画研究班は、それぞれ設定した目標に向かって着実に研究を進めてきた。A01-1班は地震波での地殻流体分布の推定、A01-2班は地殻流体の電磁イメージングを目指し、鳴子火山周辺で実施した地震・電磁気同時アレイ観測に基づき、世界的にも例のない高解像度の地震波速度・比抵抗構造を求め、火山フロント直下のこの領域の流体相の分布を明らかにした。A02-1班は地殻流体の起源と化学組成、A02-2班は地殻流体の形態と物性を明らかにすることを目指して研究を進め、沈み込み帯深部に存在する流体がスラブ起源の高塩濃度の流体であること、それが火成活動に寄与していることを明らかにした。さらに、分子動力学計算などから塩水およびそれを粒界に含む岩石の物性解明を進め、電磁気観測で得られた低比抵抗域が、連結した高濃度塩水に富む岩石層であることを明らかにした。また、Geofluid Map 作成に不可欠なPROM（標準岩石モデル）を構築した。A03班は地殻流体の発生とダイナミクスの解明を目指して研究を進め、深部流体のGeofluid Mapとして日本列島全域の温泉水・深部地下水マップを作成するとともに、非火山性地域を含み、塩水が地殻流体の普遍の実態の1つであることを示した。

総括班が指導性を発揮し意識的に取り組んだこともあり、計画研究間の連携もうまく機能したようである。それは、多くの共同研究が生まれたことに表れている。これらの共同研究も、目的・目標を達成する上で極めて重要な成果に結びついた。PROMを翻訳辞書として、観測から得られた地震波速度・比抵抗構造から、鳴子火山下のGeofluid Mapを作成した。得られた流体分布の幾何形状パラメータから、浸透流、クラック、低連結の水溜りなど、流体が多様な形態で存在すると推定された。また、Geofluid Mapによる流体分布、流体－岩石系の化学反応と物性、数値シミュレーションを融合させ、地殻流体の発生と移動経路、速度を制約し、Geofluid Dynamicsの基礎を構築した。さらに、地震・電磁気・地球化学データに基づき、東北日本と西南日本とで地殻流体の循環様式が大きく異なること、地震に伴う応力場の変化から、地殻流体が断層強度の低下に決定的に重要な役割を果たしていることを明らかにするなど、沈み込み変動に果たす地殻流体の役割の解明を進めた。

以上のように、本研究領域は、当初の目的・目標に照らして、十分な成果を上げたと評価される。地震学・地球電磁気学・高温高圧物性・岩石学・鉱物物理学・地球化学・鉱床学・水文地質学・地球ダイナミクスなど、他に類をみない極めて広い研究分野の研究者を糾合し、単一の学問分野だけでは解決の困難な課題に果敢に挑戦し、沈み込み変動に地殻流体の果たす役割について、理解を格段に深めたと言える。これは、沈み込み帯に位置し、地震や火山活動の影響を避けることができない日本にとって、とりわけ意味があり、当該学問分野や関連分野にも大きなインパクトを与えつつある。

平成26年6月5日

総括班評価担当・東北大学名誉教授  
長谷川 昭



## 評価コメント-2

日本列島は典型的なプレート沈み込み変動帯であり、プレート境界の巨大地震に加えて内陸直下の大地震がしばしば発生し、火山活動も活発である。これまでは、地球物理学、岩石鉱物学、地球化学などの地球科学専門分野の個別の研究を通して、地震や火山などの地学現象の解明が進められてきた。そうした中で、地球内部ダイナミクスを支配する極めて重要な要素として地殻及びマントルに存在する流体が注目され始めていたが、流体の実態や地震や火山現象との関わりについては、個別の専門領域内では断片的な描像が得られるにすぎず、日本列島全体を俯瞰しつつ詳細かつ総合的な姿を描くには至らなかった。このような専門分化の傾向は我が国における小規模な専門別学会の乱立を反映しており、長い間我国の地球科学の弱点とされてきた。この弱点を克服すべく本領域は日本列島における地殻・マントルの流体に焦点を当て、個別専門領域を超えた学際融合研究として組織されたものであり、「地殻流体」として新学術領域の形成につながったと評価できる。本学際研究の特徴は、水溶液－マグマ超臨界状態－固体の振舞いを、ミクロな構造・素過程からマクロな流体発生・移動まで幅広く研究することにより、多彩な分野の研究者を結集していることである。ミクロ面では鉱物粒界に存在する流体相の役割の実験的・理論的研究であり、マクロ面では地震波速度構造や比抵抗構造を解明する地震観測・電磁気観測などである。以下では具体的な成果の一つを取り上げ、ミクロな構造・素過程の研究による流体の物性の理解を通して地殻・マントル中の地震速度構造と比抵抗構造の具体的描像が得られつつあるかを概観する。

地震波トモグラフィと比抵抗イメージングは共通の課題、地殻流体の分布を目指しており、両者の連携により現実的な描像を確立することが期待されてきた。これまではいくつかの2次元断面モデルを求め、それらを3次的に配置することで全体像を見ようとしていたが、この手法では限界がある。とくに電磁イメージングにおいては、2次元構造と3次元構造では電磁リスポンスが異なり、従来の2次元構造の寄せ集めでは誤った解釈になる場合がある。そのため本領域研究では東北地方の内陸地震発生域及び活火山域を対象に地震・電磁気観測点を数多く配置することによって信頼性の高い3次元構造を導き、低速度層や低比抵抗層を通して流体の分布を明瞭に把握することに成功している。その結果、地震波速度構造と比抵抗構造で共通するところとそうでないところが判別できることがわかり、これまでの基本的考え方に修正が必要であることを指摘している。一方、ミクロな力学的、電磁氣的物性の実験的、理論的研究からも流体の存在形態に関する研究が進み、ミクロな描像とマクロな描像を描き出すことにも成功している。それによると、地震学的には流体量を、電磁氣的には流体の連結状態を見ていることになり、両者を合体することで流体の存在形態（孤立状態か、連結状態か）に関する新たな情報が得られることがわかり始めたのである。これらは地震発生過程や火山噴火過程解明のための物理的基礎なすものであり、我国のみならず世界における今後の研究を先導するものとして注目される。

本領域研究では若手研究者の育成にも力を入れており、研究会などにおいて異なった分野の大学院生等が熱心に議論をしている姿をよく見かけた。その中から多くの優秀な若手研究者が育ったことは本領域研究の大きな成果として評価したい。こうした狭い個別の専門分野を超えた視野の広い若手研究者が、今後の我国を代表する地球科学研究者として、広く世界で活躍するものと確信している。

平成26年6月6日  
総括班評価担当・東京工業大学名誉教授  
本蔵 義守

## 8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎または計画研究毎に整理する〕（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

### 総括班：地殻流体：その実態と沈み込み変動への役割

総括班の役割とその研究成果については項目 2 および 3 に詳述した。

#### 計画研究 A01-1：地震波で診る地殻流体

Nakajima et al. (2013) は、東北地方の詳細な 3 次元減衰構造を推定し、マントルウェッジ中に傾き下がる高減衰域を初めて明確に示した(右図)。

Shiina et al. (2013) は、PS 変換波から沈み込んだ海洋性地殻内の地震波速度を詳細に推定し、地震活動の活発な領域では相転移に伴う水が地震波速度を低下させていることを指摘した(左図)。

小菅・他 (2012) は、東北地方太平洋沖地震の後に東北地方で活発化した地震活動は流体の影響によるものであることの証拠を示した。

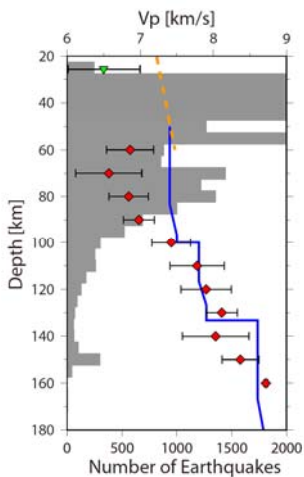
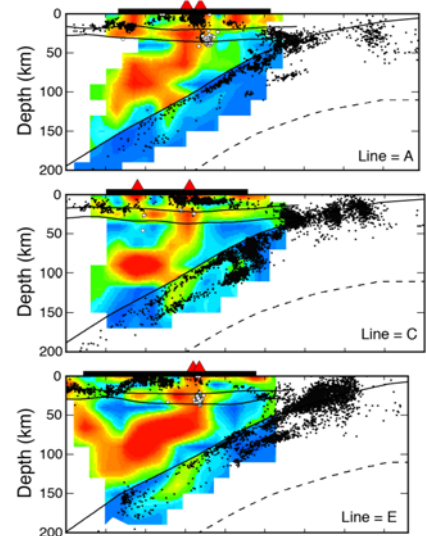
Takahashi (2012) は散乱波を用いて、東北地方浅部の減衰構造と短波長の不均質性について詳細に調べ、火山の下では高減衰となっていることを示した。

Omuralieva et al. (2012) は地震発生域の下限の詳細な分布を日本列島全体について詳細に調べ、その下限が温度と水の存在によって規定されていることを示した。

Ariyoshi et al. (2012) は、高間隙圧の存在のもとで生じる超低周波地震の移動現象を数値シミュレーションで再現し、超低周波地震の移動速度や活動度が巨大地震の前に変化する可能性があることを示した。

Matsumoto et al. (2010) は地震波速度トモグラフィの結果の解釈の基礎となる、岩石の弾性波速度を詳細に推定した。

Kato et al. (2010) は、和歌山周辺の群発地震活動を調べ、これが流体の存在と密接に関わっていることを示した。



#### 計画研究 A01-2：地殻流体の電磁イメージング

Kanda and Ogawa(2014)は、東北地方北部の 37 グリッド観測点における地磁気変換関数データを解析し、低比抵抗異常の 3 次元的な分布を解明した(右上図)。

Ichihara et al. (2014), Ogawa et al. (2014, in revision)は、東北地方中部の内陸地震発生域が高比抵抗異常域であることを 3 次元比抵抗モデルによって示した。

Koyama et al. (2014)は 3 次元比抵抗構造解析プログラムを新たに開発し、オーストラリア大陸のマントル遷移層の比抵抗構造に不均質が存在することを指摘した。

Honkura et al. (2013, Nature Comm.)は、1999 年 Izmit 地震の巨大内陸地震の前に比抵抗変化が存在することを示し、地震発生前の流体の急激な移動の証拠をとらえた。

Ichihara et al. (2013)は東北地方太平洋沖地震の津波に伴って発生した電磁場変動を、震源域での海底 MT 観測装置でとらえることに成功し、電磁場データから津波の伝搬方向を解明できることを示した。

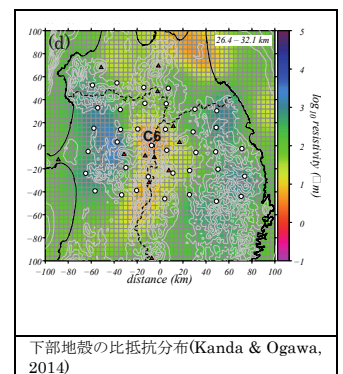
Heise et al. (2013)は、ニュージーランド北島において、流体の存在が沈み込み帯のプレート間カップリングを規制するという仮説を支持するデータを取得した。

Hata et al. (2012)は、九州におけるネットワーク MT 観測データの解析によって、沈み込むプレート上面での脱水による低比抵抗の存在と火山の分布する位置との対応を示した。

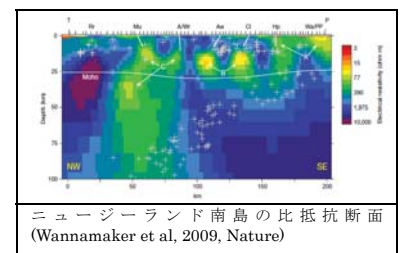
Toh et al. (2011)は、北西太平洋の海底電磁気観測点において Kuril 地震の津波による電磁場変動を観測した。

Kanda et al. (2010)は、口永良部島火山の熱水系を 2 次元比抵抗構造モデルから解明した。

Wannamaker et al. (2009)は、広帯域 MT 法データの 2 次元構造解析によって、ニュージーランドの横ずれ断層帯で、プレート上面における脱水で供給された地殻流体が、断層の深部延長に流体溜まりを形成し、地震時にそれが解放されることを推定した(右下図)。



下部地殻の比抵抗分布(Kanda & Ogawa, 2014)



ニュージーランド南島の比抵抗断面(Wannamaker et al, 2009, Nature)

## 計画研究 A02-1：地殻流体の起源と化学

(項目 3 に既述の成果は除く)

Miyoshi et al. (2014)は、北海道神居古潭帯の岩内岳由来の蛇紋岩化の詳細な岩石記載により、蛇紋岩化反応における磁鉄鉱と水素の発生がシリカの供給によって促進されることを明らかにした。Yamazaki et al. (2014)は、新たに開発して短周期振動システムを、放射光 X 線と高圧発生装置と組み合わせ、結晶体の蛇紋石の非弾性特性を高温高圧下で測定した。その結果、右図に示されているように、蛇紋石 (アンチゴライト) はカンラン石に比較して減衰が大きく、また、少量の粒間の流体による非弾性効果も大きいことが明らかになった。

Matsukage et al. (2014)は、地殻の代表的構成鉱物である斜長石の弾性波速度を高温高圧でその場測定し、沈み込むスラブ地殻中での含水鉱物分解に伴う弾性波速度変化を明らかにした。Yoshida and Hirajima (2012)は、**変成岩中の流体包有物の形状の解析から流体包有物の形成ステージを読み取り、変成作用の最高温度圧力時の情報を流体包有物が保持していることを明らかにした。**

Okamoto and Arakawa (2011)は、三波川変成岩の変成条件と岩石組織との関係を解析し、白雲母 (フェンジャイト) の分解条件を越えるところで、放出される流体の組成が著しくシリカに富む組成に変化することを示した。Kawamoto et al. (2010)は、**マルチアンビル装置と放射光 XRF 分析を用いた、流体-メルト間の微量元素分配高圧その場分析の手法を確立し、ダイヤモンドアンビル装置を用いた同種の実験をより高圧へ拡張する道を拓いた。**

Kogiso et al. (2009)は、**沈み込むスラブ中の含水鉱物の分解条件からスラブの温度構造を推定する方法論を提案し、東北日本沈み込み帯の温度構造と流体分布に関する新たなモデルを提唱した。**

Kawamoto et al. (2010)は、**マルチアンビル装置と放射光 XRF 分析を用いた、流体-メルト間の微量元素分配高圧その場分析の手法を確立し、ダイヤモンドアンビル装置を用いた同種の実験をより高圧へ拡張する道を拓いた。**

## 計画研究 A02-2：地殻流体の形態と物性

(※印は領域内の共同研究による。項目 3 に既述の成果は除く。)

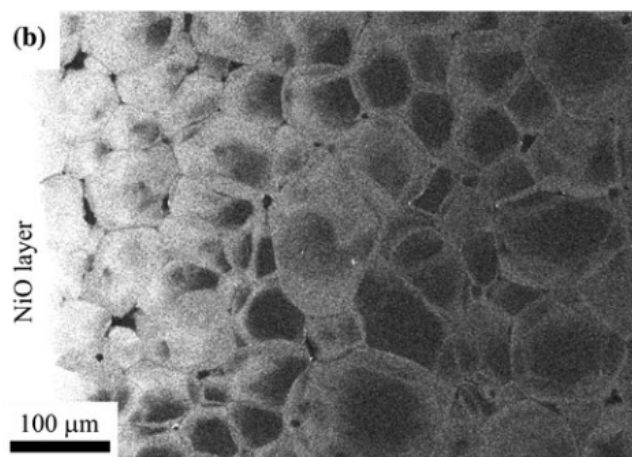
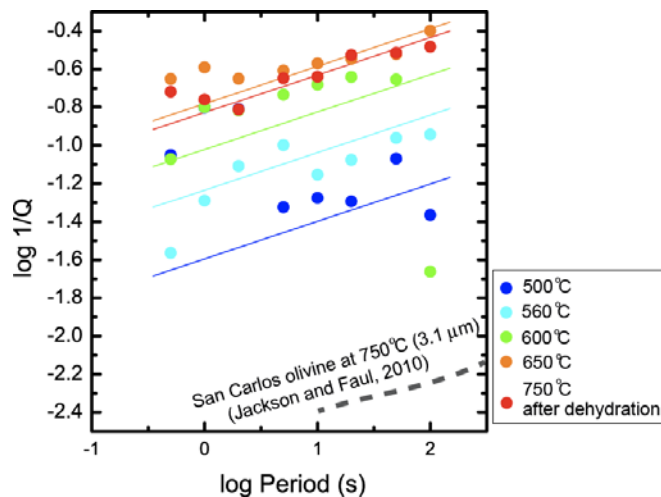
Watanabe et al. (2014) は、**蛇紋岩など異方性の強い鉱物を含む岩石の弾性波速度の正確な計算法を考案し、A01-1 班が描く地震波トモグラフィから、楔型マンツルの含水域を推定することを可能とした。**さらに、Watanabe & Higuchi (2013)は、高温高圧下において岩塩-水系の弾性波速度・電気比抵抗の同時測定により、結晶粒界の水が 2 次元薄膜状に存在することが明らかになった。Sakuma (2013)は、**雲母表面への水の吸着エネルギーを分子動力学 (MD) 計算により求め、断層粘土の摩擦挙動をナノスケールから理解することに成功した。**

Yoshimura & Nakamura (2013)は、近年世界各地の沈み込み帯で発見された CO<sub>2</sub> fluxing (地殻深部から浅部へ二酸化炭素に富む流体がマグマ供給系を通じて大規模に輸送される現象) の定式化に成功した。Ichikawa (2012)は、多孔質体中の流体輸送現象の均質化法による理論体系を確立した。Kanzaki et al. (2012)は、沈み込み帯深部に水を運搬しうる含水鉱物相 (K-cymrite) の OH 局所構造を NMR 分光法により明らかにした。Takahashi, Uehara, Shimizu et al. (2011)は、スラブ内地震などに重要な、高温下における蛇紋石ガウジの摩擦挙動を実験により明らかにした (※)。

McCarthy, Takei & Hiraga (2011)は、新たに開発した実験装置により、**多結晶体の地震波の減衰と散乱を幅広い周波数帯で定式化することに成功し、A01-1 班の観測から地震波地殻流体の量を正確に見積もる理論的基礎を築いた (※)。**Sakuma & Kawamura (2011)は、雲母-水の界面構造の MD 計算に成功し、粘土鉱物の摩擦挙動や流体輸送特性の基礎を構築した (※)。

Ohuchi, Nakamura et al. (2010)は、**かんらん岩-水反応における化学輸送の素過程を高温高圧実験によって調べ、従来考えられていたような結晶内拡散よりも、結晶粒成長・粒界移動に伴う溶解・析出作用が支配的であることを明らかにした (右図：明色が元素交換した部分)。**

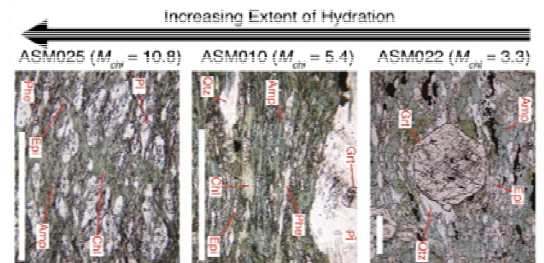
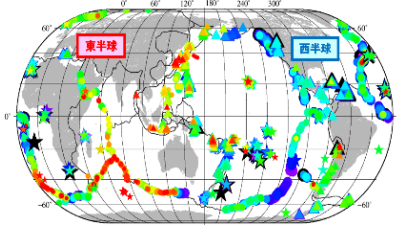
Takei & Holtzman (2009)は、粒界接触度に基づく固液二相系の粘性構成則を構築した。河村と市川は、粘土鉱物に富む媒体中の水の輸送現象の均質化法によるシミュレーション法を開発した (※)。





## 計画研究 A03：地殻流体の発生と移動ダイナミクス

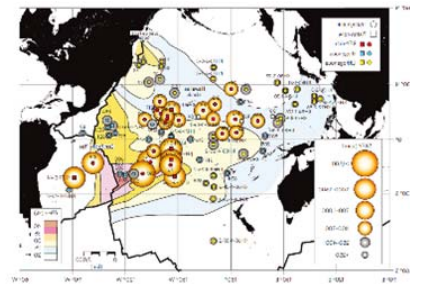
Uno et al. (2014)は、地殻流体と島弧地殻の反応過程を、世界を代表する広域変成帯である三波川地域において主成分・微量元素・同位体組成を用いて詳細に検証し、流体の移動と反応が大規模な物質輸送と変形を引き起こしていることを初めて定量的に示し、**地殻流体が地質学的時間スケールでも重要な変動要因となっていることが明らかとなった** (右図)。



Iwamori & Nakakuki (2013)は、沈み込み帯の観測とシミュレーションに基づいて地殻流体の発生・輸送過程を総括し、島弧下マントルでの浸透流とクラックの共存、背弧での水プルーム生成、スラブ沈み込みに伴う遷移層や下部マントルへの水輸送の量や時間スケールを示した。**プレート沈み込みに伴**

**う地球深部への水輸送は、Iwamori & Nakamura (2012)が発見した地球マントルの親水成分量が東西半球で系統的に異なる構造** (左図) を生み出す原因と考えられる。

一方、Ohwada et al. (2012)及び Aichi and Tokunaga (2011)は、噴火/噴気や資源貯蔵に関わる地表に近い浅所での発泡現象に注目し、それぞれ地球化学的観測あるいは熱力学理論計算に基づいて含ガス地殻流体の挙動、系に注目し、活火山周辺および石油・天然ガス貯蔵領域での、地殻流体・ガスの移流・拡散範囲やその濃度および流量に関する定量的理解や評価方法を提示した。また、**海洋性地殻流体と呼びうる海嶺熱水の研究に端を発し、太平洋広域の海底に REE 鉱床** (右図) を発見したのもこの年である (Kato et al., 2011)。



沈み込み帯の地殻流体・火山生成と物質循環については、Richard & Iwamori

(2010), Kimura et al. (2009), Nakamura & Iwamori (2009)など、日本列島周辺での観測に基づく世界をリードする成果があると同時に、比較的新しいトレーサーであるリチウムや窒素を用いた地殻流体の起源と移動についての研究成果 (例えば、Nishio et al., 2010; Mitchell et al. 2010) も得られ、統合的理解が進んだ。

## 公募研究の主な成果

**海底電磁気観測からのアプローチ**：市原 (海洋研究開発機構) は東北日本の陸域観測を補完し、全体像を見るために、太平洋及び日本海で海底電磁気観測を行った。**前弧域では、太平洋プレートはその上部に水を多く含むが、沈み込み後に大部分が脱水する事がわかった。**背弧域では、太平洋プレートの脱水による低比抵抗領域が広がる事がわかった。

**沈み込み帯での流体循環モデルの構築**：従来、沈み込み帯でプレートの脱水分解により放出された水の動的挙動には不明な点が多かった。Kawano & Katayama (2011)は、楔型マントル底部 (沈み込むプレートの上盤側) で片理が発達していると思われる**蛇紋岩の透水係数に強い異方性があることを実証し、水の移動がプレート境界付近に限られることを予想した。**さらに、求めた透水係数を用いて、沈み込み帯の浸透率構造を推定し、新たな流体循環モデルを構築した。

**地殻内の熱水循環構造の解明**：島弧の中部地殻には、珪化岩層に富み地震波を強く反射する、いわゆるブライトレイヤーが存在することが知られていた。Saishu, Okamoto et al. (2014)は、超臨界水に対する SiO<sub>2</sub> の溶解度の温度圧力依存性を水熱実験によって詳細に調べた。その結果、**地殻深部より上昇して来た熱水は、中部地殻においてシリカ成分を多量に析出させることが明らかとなり、深さ 10 km 付近に頻繁に見られる S 波散乱体 (P. 7 参照) の成因並びに地殻内の熱水循環構造が解明**された。

**蛇紋岩化反応の進行過程の解明**：海洋底における蛇紋岩化作用は、地球内部に水を運搬する主要なプロセスであり、スラブ内地震の発生メカニズムの理解にも重要である。Ogasawara, Okamoto et al. (2013)は、カンラン岩の熱水変成実験を行い、蛇紋石形成反応の体積変化に伴う亀裂の形成と、水の供給との相互作用を調べ、**海洋底での蛇紋岩化作用の進行過程を明らかにした。**この研究は、A02-1 小木曾らが示した天然の蛇紋石の分布の特徴をうまく説明し、これらの研究を合わせることで、熱水循環場での岩石の含水化の詳細が解明された。

**沈み込み帯におけるマントルの流動と地球深部流体輸送の統合モデル**：中久喜 (広島大学) は**流体-マントルの対流の強い相互作用を、大規模流体力学計算に基づき世界で初めてモデル化**し、地殻流体がダイナミクスに与える影響 (沈み込み速度・角度、背弧海盆形成、海溝移動、スタグナントスラブ形成など) が明らかとなった。さらに、全地球規模の物質・エネルギー循環にどのような影響を及ぼすか、現在研究が進行している。

## 9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年次をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

研究期間内にメンバーが出版した学術論文の総数は 678 編に及んだ。その代表的なものを以下に掲載する。詳細リストは[地殻流体ホームページ](http://www.geofluids.titech.ac.jp/) (<http://www.geofluids.titech.ac.jp/>) を参照されたい。粒界に流体を含む岩石の物性を予測する **PROM モデルのデータベース**は (<http://www.nornir.co/member/01prom/index.html>) から公開している(P.9 参照)。また、Springer のオープンアクセスジャーナル **Earth, Planets and Space 特集号"Geofluid Processes in Subduction Zones and Mantle Dynamics"**掲載の論文は以下の URL からダウンロードすることができる。(<http://www.earth-planets-space.com/series/GPSZ>) (P.4 参照)。

### 複数の計画班をまたぐ融合研究の成果

学術論文 25 編のうち代表的な論文 10 編を記載

- \*Sakurai M., N.Tsujino, H.,Sakuma, K.,Kawamura, E.,Takahashi, E. Effects of Al content on water partitioning between ortho-pyroxene and olivine: Implications for lithosphere-asthenosphere boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014.in press 査読有
- \*Shimojuku, A., T. Yoshino, D. Yamazaki, Electrical conductivity of brine-bearing quartzite at 1 GPa: implications for fluid content and salinity of the crust. *Earth, Planets Space*, 66, 2, 2014. doi: 10.1186/1880-5981-66-2 査読有
- \*Kimura J.-I., Nakajima J., Behaviour of subducted water and its role on the arc magma genesis in the NE Japan arc: A combined geophysical and geochemical approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*, doi: 10.1016/j.gca.2014.04.019, 2014. 査読有
- \*Sakuma, H., Ichiki, M., Kawamura, K., Fuji-ta, K., Prediction of physical properties of water under extremely supercritical conditions: A molecular dynamics study, *J. Chem. Phys.*, **138**, 134506, 2013. 査読有
- \*Kawamoto, T., Kanzaki, M., Mibe, K., Matsukage, K.N., Ono, S., Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism, *PNAS*, **109**, 18695-18700, 2012. 査読有
- \*Yoshino, T., A. Shimojuku, S. Shan, X. Guo, D. Yamazaki, E. Ito, Y. Higo, K. Funakoshi, Effect of temperature, pressure and iron content on the electrical conductivity of olivine and its high-pressure polymorphs, *J. Geophys. Res.*, **117**, B08205, 2012. 査読有
- \*Noritake, F., K. Kawamura, T. Yoshino, E. Takahashi, Molecular dynamics simulation and electrical conductivity measurement of Na<sub>2</sub>O·3SiO<sub>2</sub> melt under high pressure; relationship between its structure and properties *J. Non-Cryst. Solids*, **358**, 3109-3118, 2012. 査読有
- \*Guo, X., Yoshino, T., Katayama, I., Electrical conductivity anisotropy of deformed talc rocks and serpentinites at 3GPa. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **188**, 69-81, 2011. 査読有
- \*Shimojuku, A., T. Yoshino, D. Yamazaki, T. Okudaira, Electrical conductivity of fluid-bearing quartzite under lower crustal conditions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **198-199**, 1-8, 2012. 査読有
- \*片山郁夫・平内健一・中島淳一, 日本列島下での沈み込みプロセスの多様性, 地学雑誌, **119**, 205-223, 2010. 査読有

### 計画研究 A01-1

学術論文 108 編のうち代表的な論文 25 編を記載

- \*Nakajima, J., Seismic attenuation beneath Kanto, Japan: Evidence for high attenuation in the serpentinized subducting mantle, *Earth Planets Space*, **66**, accepted (currently online only), doi:10.1186/1880-5981-66-12, 2014. 査読有
- \*Takahashi, T., K. Obana, Y. Yamamoto, A. Nakanishi, S. Kodaira, Y. Kaneda, The 3-D distribution of random velocity inhomogeneities in southwestern Japan and the western part of the Nankai subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 2246-2257, 2013. 査読有
- \*加藤愛太郎, 稠密地震波観測に基づく地震発生と地殻流体, 地球化学, **46**, 191-203, 2013. 査読有
- \*Kato, A., T. Okada, M. Kosuga, (25 名中、1,22,23 番目), Imaging the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, doi:10.1002/grl.50104, 2013, 査読有.
- \*Shiina, T., J. Nakajima, T. Matsuzawa, Seismic evidence for high pore pressure in the oceanic crust: Implications for fluid-related embrittlement?, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2006-2010, 2013. 査読有
- \*Nakajima, J., K. Yoshida, A. Hasegawa, An intraslab seismic sequence activated by the Tohoku-oki earthquake: Evidence for fluid-related embrittlement, *J. Geophys. Res.*, **118**, 3492-3505, 2013. 査読有
- \*Nakajima, J., S. Hada, E. Hayami, N. Uchida, A. Hasegawa, S. Yoshioka, T. Matsuzawa, N. Umino, Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, **118**, 5838-5855, 2013. 査読有
- \*Hasegawa, A., J. Nakajima, T. Yanada, N. Uchida, T. Okada, D. Zhao, T. Matsuzawa, N. Umino, Complex slab structure and arc magmatism beneath the Japanese Islands, *J. Asian Earth Sci.*, **78**, 277-290, 2013. 査読有
- \*小菅正裕, 他 3 名, 2011 年東北地方太平洋沖地震後の東北地方北部での誘発地震活動, 地震 2, **65**, 69-83, 2012. 査読有
- \*長谷川昭・中島淳一・内田直希・梁田高広・岡田知己・趙大鵬・松澤暢・海野徳仁, 沈み込み帯の地震発生機構—地殻流体に規定されて発生する沈み込み帯の地震—, 地学雑誌, **121**, 128-160, 2012. 査読有
- \*Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Inuma, Y. Ito, Y. Asano, Stress before and after the 2011 Great Tohoku-oki earthquake, and induced earthquakes in inland areas of eastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L03302, 2012. 査読有
- \*Takahashi T., Three-dimensional attenuation structure of intrinsic absorption and wide-angle scattering of S-waves in northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, **189**, 1667-1680, 2012. 査読有
- Omuralieva, A., \*A. Hasegawa, T. Matsuzawa, J. Nakajima, T. Okada, Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis, *Tectonophysics*, **518-521**, 93-105, 2012. 査読有
- \*Hasegawa, A., K. Yoshida, Y. Asano, T. Okada, T. Inuma, Y. Ito, Change in stress field after the 2011 great Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **355-356**, 231-243, 2012. 査読有
- \*Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, A. Hasegawa (8 名中 8 番目), Migration process of very low-frequency events based on a chain-reaction model and its application to the detection of preseismic slip for megathrust earthquakes, *Earth Planets Space*, **64**, 693-702, 2012. 査読有
- \*Takahashi T., K. Obana, S. Kodaira, D. Suetsugu, N. Takahashi, S. Kamiya, Y. Tamura, Random inhomogeneities in the northern Izu-Bonin arc estimated by tomographic inversion of peak delay times of S-wave seismograms, *J. Geophys. Res.*, **116**, B03303, 2011. 査読有

- \*Nakajima, J., A. Hasegawa, S. Kita, Seismic evidence for reactivation of a buried hydrated fault in the Pacific slab by the 2011 M9.0 Tohoku Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L16318, 2011. 査読有
- \*Okada, T., J. Nakajima, T. Matsuzawa, A. Hasegawa (9名中4,6,8番目), Shallow inland earthquakes in NE Japan possibly triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 749-754, doi:10.5047/eps.2011.06.027, 2011. 査読有
- \*Hasegawa, A., K. Yoshida, T. Okada, Nearly complete stress drop in the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 703-707, 2011. 査読有
- \*Yamamoto, M., H. Sato, Multiple scattering and mode conversion revealed by an active seismic experiment at Asama volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, **115**, B07304, 2010. 査読有
- \*Okada, T., N. Umino, A. Hasegawa, Deep structure of the Ou mountain range strain concentration zone and the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, NE Japan - Seismogenesis related with magma and crustal fluid, *Earth Planets Space*, **62**, 3, 347-352, 2010. 査読有
- Matsumoto, Y., \*M. Ishikawa, M. Terabayashi, M. Arima, Simultaneous measurements of compressional wave and shear wave velocities, Poisson's ratio, and Vp/Vs under deep crustal pressure and temperature conditions: Example of silicified pelitic schist from Ryoke Belt, Southwest Japan, *Island Arc*, **19**, 30-39, 2010. 査読有
- \*Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Matsuzawa, Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner : Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **290**, 415-426, 2010. 査読有
- \*Takahashi, T., H. Sato, T. Nishimura, K. Obara, Tomographic inversion of the peak delay times to reveal random velocity fluctuations in the lithosphere: method and application to northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, **178**, 1437-1455, 2009. 査読有
- \*Nakajima, J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, T. Matsuzawa, Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting Pacific slab beneath Hokkaido, Japan: Evidence for dehydration embrittlement as a cause of intraslab earthquakes, *Gondwana Res.*, **16**, 470-481, 2009. 査読有
- 計画研究 A01-2** 学術論文 111 編のうち代表的な論文 25 編を記載
- \*Koyama, T., 他 2 名, Three-dimensional electrical conductivity structure beneath Australia from inversion of geomagnetic observatory data - Evidence for lateral variations in transition-zone temperature, water content, and melt, *Geophys. J. Int.*, **196**, 3, 1330-1350, 2014. 査読有
- \*Shimajuku, A., T. Kubo, T. Kato, T. Yoshino, M. Nishi, T. Nakamura, R. Okazaki, Y. Kakazu, Effects of pressure and temperature on the silicon diffusivity of pyrope-rich garnet. *Phys. Earth Planet. Int.*, **226**, 28-38, 2014. 査読有
- \*Kanda, W., Ogawa, Y., Three-Dimensional Electromagnetic Imaging of Fluids and Melts Beneath the NE Japan Arc Revisited by Geomagnetic Transfer Function Data, *Earth Planets Space*, **66:39**, 2014 (in press). 査読有
- \*Aizawa, K., T. Koyama, H. Hase, M. Uyeshima, W. Kanda, Y. Ogawa (14名中14番目), Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima volcanoes as inferred from broad-band magnetotelluric data, *J. Geophys. Res.*, **119**, 2014. 査読有
- \*Yoshino, T., T. Katsura, Electrical conductivity of mantle minerals: Role of water in conductivity anomalies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **41**, 605-628, 2013. 査読有
- \*Patro, P.K., M. Uyeshima, W. Siripunvaraporn, Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data, *Geophys. J. Int.*, **192**, 58-66, 2013. 査読有
- \*Matsushima, M., Y. Honkura, M. Kuriki, Y. Ogawa, Circularly polarised electric fields associated with seismic waves generated by blasting, *Geophys. J. Int.*, **194**, 200-211, 2013. 査読有
- \*Kaya, T., T. Kasaya, S. B. Tank, Y. Ogawa, M. K. Tuncer, N. Oshiman, Y. Honkura, M. Matsushima, Electrical characterization of the North Anatolian Fault zone in the Marmara Sea, Turkey by ocean Bottom electromagnetic method, *Geophys. J. Int.*, **193**, 664-677, 2013. 査読有
- \*Honkura, Y., N. Oshiman, M. Matsushima, S. Baris, M. Kemal Tunçer, S. Bülent Tank, C. Çelik, E. T. Çiftçi, Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone, *Nature Commun.*, **4**, doi:10.1038/ncomms3116, 2013. 査読有
- \*Heise, W., Y. Ogawa(6名中6番目), Changes in electrical resistivity track changes in tectonic plate coupling, *Geophys. Res. Lett.*, **40**:1-5. 2013. 査読有
- \*Zhang, L., T. Koyama, H. Utada, P. Yu, J. Wang, A regularized three-dimensional magnetotelluric inversion with a minimum gradient support constraint, *Geophys. J. Int.*, vol.189, no.1, pp. 296-316, 2012. 査読有
- \*Zhang, B., T. Yoshino, X. Wu, T. Matsuzaki, S. Shan, T. Katsura, Electrical conductivity of enstatite as a function of water content: implications for the electrical structure in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **357-358**, 11-20, 2012. 査読有
- \*M. Hata, N. Oshiman, R. Yoshimura, Y. Tanaka M. Uyeshima, Fluid upwelling beneath arc volcanoes above the subducting Philippine Sea Plate: Evidence from regional electrical resistivity structure, *J. Geophys. Res.*, **117**, B07203, 2012. 査読有
- \*Yoshino, T., Noritake, F., Unstable graphite films on grain boundaries in crustal rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **306**, 186-192, 2011. 査読有
- \*Toh, H., K. Satake, Y. Hamano, Y. Fujii, T. Goto, Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory, *J. Geophys. Res.*, **116**, B02104, 2011. 査読有
- \*Ichihara, H., M. Uyeshima, Y. Ogawa (12名中6番目), A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L09301, 2011. 査読有
- \*K. Fuji-ta, T. Katsura, M. Ichiki, T. Matsuzaki, T. Kobayashi, Variations in electrical conductivity of rocks above metamorphic conditions, *Tectonophysics*, **504**, 116-121, 2011. 査読有
- \*Yoshino, T., T. Katsura, D. Yamazaki, E. Ito, Electrical conductivity of mantle peridotite at the uppermost lower mantle condition. *J. Phys. Conf. Ser.*, **215**, 012102, 2010. 査読有
- \*Yoshino, T., Laboratory electrical conductivity measurement of mantle minerals. *Survey in Geophysics*, **31**, 163-206, 2010. 査読有
- \*Kanda, W., M. Utsugi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, I. Fujii, T. Hasenaka, N. Shigeno, A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **189**, 158-171, 2010. 査読有
- \*Yoshino, T., D. Yamazaki, K. Mibe, Well-wetted olivine grain boundaries in partial molten peridotites in the asthenosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 167-173, 2009. 査読有



- \*Wannamaker, P.E., T.G. Caldwell, G. R. Jiracek, V. Maris, G.J. Hill, Y. Ogawa, H. M. Bibby, S. B. Bennie, W. Heise, Fluid and deformation regime of an advancing subduction system; Marlborough, New Zealand, *Nature*, **460**, 733-736, 2009. 査読有
- \*Ichiki, M., K. Baba, H. Toh, K. Fuji-ta, An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese Islands, and continental East Asia, *Gondwana Res.*, **16**, 545-562, 2009. 査読有
- \*Honkura, Y., Y. Ogawa, M. Matsushima, S. Nagaoka, N. Ujihara, T. Yamawaki, A model for observed circular polarized electric fields coincident with the passage of large seismic waves, *J. Geophys. Res.*, **114**, B10103, 2009. 査読有
- \*Aizawa, K., Y. Ogawa, T. Ishido, Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *J. Geophys. Res.*, **114**, B01208, 2009. 査読有

**計画研究 A02-1** 学術論文 121 編のうち代表的な論文 22 編を記載

- \*Kawamoto, T., Mibe, K., Bureau, H., Reguer, S., Mocuta, C., Kubsy, S., Thiaudière, D., Ono, S., Kogiso, T., Large ion lithophile elements delivered by saline fluids to the sub-arc mantle. *Earth Planet Space*, in press. 査読有
- Miyoshi, A., \*T. Kogiso, N. Ishikawa, K. Mibe, Role of silica for the progress of serpentinization reactions: Constraints from successive changes in mineralogical textures of serpentinites from Iwanaidake ultramafic body, Japan, *Am. Mineral.*, **99**, 1035-1044, 2014. 査読有
- \*小木曾哲, 水が地球を動かす. 京都大学総合博物館企画展「海」実行委員会編, 『海は百面相』. 京都通信社, 22-23, 2013. 査読無
- \*川本竜彦, 海と火山をつなぐマントルウェッジ流体, *科学*, **83**, 1366-1372, 2013. 査読無
- \*平島崇男, 吉田健太, プレートテクトニクスと固体圏をめぐる水, 京都大学総合博物館企画展「海」実行委員会編『海は百面相』. 京都通信社, 24-27, 2013. 査読無
- \*Tsuchiya, S., T. Hirajima, Evidence of the lawsonite eclogite facies metamorphism from an epidote-glaucophane eclogite in the Kotsu area of the Sanbagawa belt, Japan. *J. Miner. Petrol. Sci.*, **108**, 166-171, 2013. 査読有
- \*Kawamoto, T., M. Yoshikawa, Y. Kumagai, M. H. T. Mirabueno, M. Okuno, T. Kobayashi, Mantle wedge infiltrated with saline fluids from dehydration and decarbonation of subducting slab. *PNAS*, **110**, 9663-9668, 2013. 査読有
- \*Hiraiuchi, K., I. Katayama, Rheological contrast between serpentine species and implications for slab-mantle wedge decoupling, *Tectonophysics*, **608**, 545-551, 2013. 査読有
- \*Hiraiuchi, K., S.A.M. den Hartog, C.J. Spiers, Weakening of the slab-mantle wedge interface induced by metasomatic growth of talc, *Geology*, **41**, 75-78, 2013. 査読有
- \*Hamada, M., M. Ushioda, T. Fujii, E. Takahashi, Hydrogen concentration in plagioclase as a hygrometer of arc basaltic melts: Approaches from melt inclusion analyses and hydrous melting experiments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **365**, 253-262, 2013. 査読有
- Arakawa, M., \*K. Okamoto, K. Yi, M. Terabayashi, Y. Tsutsumi, SHRIMP U-Pb dating of zircons related to the partial melting in a deep subduction zone: Case study from the Sanbagawa quartz-bearing eclogite, *Island Arc*, **22**, 74-88, 2013. 査読有
- \*岡本和明, 小林まさよ, 荒川幸, 福村成哉, 沈み込み帯深部で発生する脱水流体と地震性破壊, *地球化学*, **46**, 205-215, 2012. 査読有
- \*小木曾哲, 岩森光, 横山哲也, 「地殻流体」によせて. *地球化学*, **46**, 189-190, 2012. 査読無
- \*Yoshida, K., T. Hirajima, Annular fluid inclusion found from a quartz vein intercalated with metapelites from the Besshi area, SW Japan. *J. Miner. Petrol. Sci.*, **107**, 50-55, 2012. 査読有
- \*Kamimura, K., T. Hirajima, Y. Fujimoto, Finding of prehnite-pumpellyite facies metabasites from the Kurosegawa belt in Yatsushiro area, Kyushu, Japan. *J. Miner. Petrol. Sci.*, **107**, 99-104, 2012. 査読有
- \*Yoshida, K., Hirajima, T.(8名中8番目), Fluid inclusions with high Li/B ratio in a quartz vein from the Besshi area of the Sambagawa metamorphic belt: implications for deep geofluid evolution. *J. Miner. Petrol. Sci.*, 106, 164-168. 2011. 査読有
- \*Orozbaev, R.T., Yoshida, K., Bakirov, A.B., Hirajima, T., Takasu, A., Sakiev, K.S. Tagiri, M., Preiserwite and högbomite within garnets of Aktyuz eclogite, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan. *J. Miner. Petrol. Sci.* **106**, 320-325. 2011. 査読有
- \*Mibe, K., T. Kawamoto, K.N. Matsukage, Y. Fei S. Ono, Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism. *PNAS*, **108**, 8177-8182, 2011. 査読有
- Fujimoto, Y., \*Y. Kono, T. Hirajima, M. Ishikawa, M. Arima, P-wave velocity and anisotropy of lawsonite and epidote blueschists: Constraints on wave transportation along subducting oceanic crust. *Phys. Earth Planet. Inters.*, **183**, 219-228, 2010. 査読有
- \*岡本和明, 青木一勝, 丸山茂徳, 四国中央部三波川変成帯のテクトニクス, *地質学雑誌*, **115**, 補遺, 37-49, 2009. 査読有
- \*Maruyama, S., Hasegawa, A., Santosh, M., Kogiso, T., Omori, S., Nakamura, H., Kawai, K., Zhao, D., The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic-metasomatic factory in subduction zones, *Gondwana Res.*, **16**, 414-430, 2009. 査読有
- \*Kogiso, T., Omori, S., Maruyama, S., Magma genesis beneath Northeast Japan arc: A new perspective on subduction zone magmatism, *Gondwana Res.*, **16**, 446-457, 2009. 査読有

**計画研究 A02-2** 学術論文 85 編のうち代表的な論文 26 編を記載

- \*Shimizu, I. Rheological profile across the NE Japan interplate megathrust in the source region of the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planets Space*, accepted, 2014. 査読有
- \*Uehara, S., M. Takahashi, Evolution of permeability and microstructure of shear zone in Neogene siliceous mudstone, *J. Struct. Geol.*, **60**, 46-54, 2014. 査読有
- \*Mujin, M., M. Nakamura, A nanolite record of eruption style transition, *Geology*, in press. 2014. 査読有
- \*Watanabe, T., 他2名, A new calculation method for calculating seismic velocities in rocks containing strongly dimensionally anisotropic mineral grains and its application to antigorite-bearing serpentinite mylonites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **391**, 24-35, 2014. 査読有
- \*Yoshimura, S., Nakamura, M., Flux of volcanic CO<sub>2</sub> emission estimated from melt inclusions and fluid transport modelling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 497-503, 2013. 査読有
- \*Watanabe, T., Higuchi, A., A new apparatus for measuring elastic wave velocity and electrical conductivity of fluid-saturated rocks at various confining and pore-fluid pressures, *Geofluids*, doi:10.1111/gfl.12050. 2013. 査読有
- \*Takei, Y. R. F. Katz, Consequences of viscous anisotropy in a deforming, two-phase aggregate. Part 1. Governing equations and linearized analysis, *J. Fluid Mech.*, **734**, 424-455, 2013. 査読有
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, \*K. Kanagawa, A. Inoue, Contrasting hydrological and mechanical properties of hemipelagic and turbidite

- muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism, *Tectonophysics*, **600**, 63-74, 2013. 査読有
- \*Sakuma, H., Adhesion energy between mica surfaces: Implications for the frictional coefficient under dry and wet conditions, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **118**, 6066-6075, 2013. 査読有
- \*Uehara, S., Shimamoto, T., Okazaki, K., Funaki, H., Kurikami, H., Niizato, T., Ohnishi, Y., Can surface samples be used to infer underground permeability structure? A test case for a Neogene sedimentary basin in Horonobe, Japan, *Int. J. Rock Mech. Min.*, **56**, 1-14, 2012. 査読有
- \*Kanzaki, M., Xue, X., Amalberti, J., Zhang, Q., Raman and NMR spectroscopic characterization of high-pressure K-cymrite  $KAlSi_3O_8 \cdot H_2O$  and its anhydrous form kokchetavite, *J. Miner. Petrol. Sci.*, **107**, 114-119, 2012. 査読有
- \*Ichikawa, Y., Selvadurai, P., Transport phenomena in porous media: Aspects of micro/macro behavior, Springer-Verlag, 2012. 著書
- \*Yoshimura, S., M. Nakamura, Carbon dioxide transport in crustal magmatic systems, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **307**, 470-478, 2011. 査読有
- \*Takahashi, M., S. Uehara, K. Mizoguchi, I. Shimizu, K. Okazaki, K. Masuda, On the transient responses of serpentine antigorite gouge to stepwise changes in slip velocity under high-temperature conditions, *J. Geophys. Res.*, **116**, B10405, 2011. 査読有
- \*Takei, Y., K. Fujisawa, C. McCarthy, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 1. The apparatus, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008382, 2011. 査読有
- \*Sakuma, H., T. Kondo, H. Nakao, K. Shiraki, K. Kawamura, Structure of Hydrated Sodium Ions and Water Molecules Adsorbed on the Mica/Water Interface. *J. Phys. Chem. C*, **115**, 15959-15964, 2011. 査読有
- \*Sakuma, H., K. Kawamura, Structure and dynamics of water on  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cs^+$ ,  $H_3O^+$ -exchanged muscovite surfaces: A molecular dynamics study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **75**, 63-81, 2011. 査読有
- Morodome, S. \*K. Kawamura, Systematic study of montmorillonite swelling behavior for exchangeable cations measured up to 150°C by in situ X-ray diffractometry *Clays and Clay Minerals*, **59**:165-175, 2011. 査読有
- \*McCarthy C., Takei, Y., T. Hiraga, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 2. The universal scaling of polycrystalline materials, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008384, 2011. 査読有
- \*Kameda, J., Yamaguchi, A., Saito, S., Sakuma, H., Kawamura, K., and Kimura, G., A New Source of Water in Seismogenic Subduction Zones, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L22306, 2011. 査読有
- \*Watanabe, T., Advances in Interpretation of Geological Processes, in Spalla, M. I., Marotta, A. M. Gosso, G. eds, Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming halite rocks: inference from electrical resistivity, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **332**, 69-78, 2010. 査読有
- \*Takei, Y., Stress-induced anisotropy of partially molten rock analogue deformed under quasi-static loading test, *J. Geophys. Res.*, **115**, B03204, 2010. 査読有
- \*Ohuchi, T., M. Nakamura, K. Michibayashi, Effect of grain growth on cation exchange between dunite and fluid: implications for chemical homogenization in the upper mantle, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **160**, 339-357, 2010. 査読有
- \*Kanzaki, M., Crystal structure of a new high-pressure polymorph of topaz-OH, *Am. Mineral.*, **95**, 1349-1352, 2010. 査読有
- \*Takei, Y., Holtzman, B. K., Viscous constitutive relations of solid-liquid composites in terms of grain boundary contiguity: 1. Grain boundary diffusion control model, *J. Geophys. Res.*, **114**, B06205, 2009. 査読有
- Choi, J.H., Faisal Anwar, A.H.M., Kawamura, K., \*Ichikawa, Y., Transport phenomena in kaolinite clay: Molecular simulations, homogenization analysis and similitude law. *Int. J. Numer. Anal. Met. Geomech.*, **33**, 687-707, 2009. 査読有

**計画研究 A03** 学術論文 170 編のうち代表的な論文 23 編を記載

- \*Uno, M., H. Iwamori, H. Nakamura, T. Yokoyama, T. Ishikawa, M. Tanimizu, Elemental transport upon hydration of basic schists during regional metamorphism: geochemical evidence from the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *Geochem. J.*, 29-49, 2014. 査読有
- \*風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口 桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, *日本水文科学会誌*, **44**, 3-16, 2014. 査読有
- \*Ikemoto, A., H. Iwamori, Numerical modeling of trace element transportation in subduction zones: implications for geofluid processes. *Earth Planet and Space*, **66**, 26, doi:10.1186/1880-5981-66-26, 2014. 査読有
- \*Iwamori, H., Nakakuki, T., Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle. In: *Physics and Chemistry of the Deep Earth* ed. S. Karato, Elsevier, Amsterdam, 446-468, 2013. 査読有
- \*Kashiwabara, T., R. Toda, K. Fujinaga, T. Honma, Y. Takahashi, Y. Kato, Determination of Host Phase of Lanthanum in Deep-sea REY-rich Mud by XAFS and m-XRF using High-energy Synchrotron Radiation. *Chem. Lett.*, doi:10.1246/cl.130853, 2013. 査読有
- \*Nakamura, H., Iwamori, H., Generation of adakites in a cold subduction zone due to double subducting plates, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **165**, 1107-1134, 2013. 査読有
- \*Ueki, K., Iwamori, H., Thermodynamic model for partial melting of peridotite by system energy minimization, *Geochim. Geophys. Geosyst. G3*, doi:10.1029/2012GC004143, 2013. 査読有
- \*Sakuyama, T., W. Tian, J.-I. Kimura, 他 9 名, Melting of a stagnant slab in the mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China. *Chem. Geol.* doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.09.012, 2013. 査読有
- \*Asaoka, S., Y. Takahashi, Y. Araki, M. Tanimizu, Comparison of antimony and arsenic behavior in an Ichinokawa river water-sediment system, *Chem. Geol.*, **334**, 1-8, 2012. 査読有
- \*Hanyu, T., Gill J.B., Tatsumi Y., Kimura, J.-I., 他 8 名, Across- and along-arc geochemical variations of lava chemistry in Sangihe arc: Various fluid and melt slab fluxes in response to slab temperature. *Geochim. Geophys. Geosyst. G3*, **13**, doi:10.1029/2012GC004346, 2012. 査読有
- \*Iwamori, H., Nakamura, H., East-west mantle geochemical hemispheres constrained from Independent Component Analysis of basalt isotopic compositions, *Geochem. J.*, **46**, e39-e46, 2012. 査読有
- \*Aichi, M. Tokunaga, T., Thermodynamically consistent anisotropic constitutive relations for a poroelastic material saturated by two immiscible fluids. *Intern. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **48**, 580-584, 2011. 査読有
- \*Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T. and Iwamori, H.: Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, **4**, 535-539, 2011. 査読有
- \*Kuritani, T., Ohtani, E., Kimura, J.-I., Intensive hydration of the mantle transition zone beneath China caused by ancient slab stagnation. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGeo1250, 2011. 査読有

- \*Ohwada, M., K. Kazahaya, 他 7 名, Passive degassing of magmatic volatiles from Iwate volcano, NE Japan, based on three-dimensional measurement of helium isotopes in groundwater, *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2011JB008532, 2011. 査読有
- \*Tokunaga, T., Shimada, J., Kimura, Y., Inoue, D., Mogi, K. Asai, K., A multiple-isotope  $\delta^{37}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  approach to reveal the coastal hydrogeological system and its temporal changes in western Kyushu, Japan. *Hydrogeol. J.*, **19**, 249-258, 2011. 査読有
- \*Iwamori, H., F. Albarede, H. Nakamura, Global structure of mantle isotopic heterogeneity and its implications for mantle differentiation and convection, *Earth Planet. Sci. Lett.*, doi:10.1016/j.epsl.2010.09.014. 2010. 査読有
- \*Mitchell E., K. Kazahaya 8 名中 8 番目, Nitrogen sources and recycling at subduction zones: Insights from the Izu-Bonin-Mariana arc, *Geochim. Geophys. Geosyst. G3*, Q02X11, doi:10.1029/2009GC002783, 2010. 査読有
- \*Nishio, Y., Okamura, K., Tanimizu, M., Ishikawa, T. Sano, Y.: Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, 567-576, 2010. 査読有
- \*Richard, G.C., Iwamori, H., Stagnant slab, wet plumes and Cenozoic volcanism in East Asia. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **183**, 280-287, 2010. 査読有
- \*Kato, Y., Suzuki, K., Nakamura, K., Hickman, A. H., Nedachi, M., Kusakabe, M., Bevacqua, D. C. Ohmoto, H.: Hematite formation by oxygenated groundwater more than 2.76 billion years ago. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **278**, 40-49, 2009. 査読有
- \*Kimura, J.-I., 他 5 名, Arc Basalt Simulator ABS version 2, a simulation model for slab dehydration, fluid-mantle reaction, and fluid fluxed mantle melting for arc basalts: modeling scheme and application. *Geochim. Geophys. Geosyst. G3*, **10**, Q09004, 2009. 査読有
- \*Nakamura, H., Iwamori, H. Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs, *Gondwana Res.*, **16**, 431-445, 2009. 査読有

**公募研究** 学術論文 83 編のうち代表的な論文 13 編を記載

- \*Okamoto, A., Musya, M., Hashimoto, Y., Tsuchiya, N., Distribution of  $\text{CO}_2$ -fluids in the Shimanto belt on Muroto Peninsula, SW Japan: possible injection of magmatic  $\text{CO}_2$  into the accretionary prism. *Earth, Planets and Space*, in press. 査読有
- Saishu, H., Okamoto, A., Tsuchiya, N. The significance of silica precipitation on the formation of the permeable-impermeable boundary within Earth's crust, *Terra Nova*, published online, 2014, DOI: 10.1111/ter.12093 査読有
- \*Nakakuki, T., E. Mura, Dynamics of slab rollback and induced back-arc basin formation, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 287-297, 2013. 査読有
- \*Katayama, I., Iwata, M., Okazaki, K. Hirauchi, K. Slow earthquakes associated with fault healing on a serpentinized plate interface. *Scientific Reports*, **3**, doi:10.1038/srep01784, 2013. 査読有
- \*Ichihara, H., Y. Hamano, K. Baba, T. Kasaya, Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **382**, 117-124, 2013. 査読有
- \*Katayama, I., Terada, T., Okazaki, K., Tanikawa, W. Episodic tremor and slow slip potentially linked to permeability contrasts at the Moho, *Nature Geoscience*, **5**, 731-734, 2012. 査読有
- \*Yamamoto, J., K. Otsuka, N. Hirano, H. Kagi, Retentivity of  $\text{CO}_2$  in fluid inclusions in mantle minerals, *Euro. J. Mineral.*, **23**, 805-815, 2011. 査読有
- \*Sumita, I., Y. Ota, Experiments on buoyancy-driven crack around the brittle-ductile transition, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **304**, 337-346, 2011. 査読有
- \*Morishita, T., K. Tani, H. Shukuno, Y. Harigane, A. Tamura, H. Kumagai, E. Hellebrand, Diversity of melt conduits in the Izu-Bonin-Mariana forearc mantle: Implications for the earliest stage of arc magmatism. *Geology*, **39**, 411-414, 2011. 査読有
- \*Hirono, T., Tanikawa, W., Implications of the thermal properties and kinetic parameters of dehydroxylation of mica minerals for fault weakening, frictional heating, and earthquake energetics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **307**, 161-172, 2011. 査読有
- \*Okamoto, A., H. Saishu, N. Hirano, N. Tsuchiya, Mineralogical and textural variation of silica minerals in hydrothermal flow-through experiments: Implications for quartz vein formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **74**, 3692-3706, 2010. 査読有
- \*Nakakuki, T., M. Tagawa, Y. Iwase, Dynamical mechanisms controlling formation and avalanche of a stagnant slab, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **183**, 309-320, 2010. 査読有
- \*Katayama, I., Kurosaki, I., Hirauchi, K., Low silica activity for hydrogen generation during serpentinization: an example of natural serpentinites in the Mineoka ophiolite complex, central Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **298**, 199-204, 2010. 査読有

## 総括班が開催した「地殻流体全体研究発表会」並びに「サマースクール」:

- 地殻流体キックオフ会議 2009年9月23日~25日 東北大学川渡セミナーハウス、参加者80名(うち学生・院生20名)
- 2009年度地殻流体研究会 2010年3月25~26日 産総研・別棟大会議室、参加者100名(うち学生・院生20名)
- 2010年度「地殻流体研究会」並びに「サマースクール」 2010年9月10日~13日 ラフォーレ修善寺、参加者103名(うち学生・大学院生45名)。
- 2011年度「地殻流体研究会」並びに「サマースクール」(2011年9月17日~19日 岩手県花巻市 湯の杜ホテル志戸平) 77名(うち学生・院生が25名)参加。口頭発表23件、ポスター発表27件。
- 2012年度「地殻流体研究会」(2013年3月1日~4日 静岡県伊豆市 ラフォーレ修善寺) 93名参加(うち、学生・院生は31名) 2013年度は国際シンポジウム Geofluid-3 を全体研究発表会とした。
- 2012年11月13-16日、2013年10月8-10日「サマースクール」を「火山流体討論会」と共同開催(あすなろの里・千葉県)

## 総括班が主催した主な国内シンポジウム(下記のほか12件):

- 2012年度日本地球惑星科学連合大会 (2012年5月20日~25日 幕張メッセ国際会議場)
  - ・流体と沈み込み帯のダイナミクス (コンピーナー: 岡本 敦・川本 竜彦・片山 郁夫)
  - ・沈み込み帯における地震発生と流体の役割 (コンピーナー: 木村 学・高橋 栄一・井出 哲・松澤 暢)
- 2013年度日本地球惑星科学連合大会特別セッション (2013年5月19日~24日 幕張メッセ国際会議場)
  - ・流体と沈み込み帯のダイナミクス (コンピーナー: 岡本 敦・川本 竜彦・片山 郁夫)
- 2014年度日本地球惑星科学連合大会特別セッション (2014年4月28日~5月2日 パシフィコ横浜)
  - ・地殻流体: その分布と変動現象への役割 (コンピーナー: 中村 美千彦・佐久間 博・市来 雅啓・高橋 努)



## 総括班が主催した国際シンポジウム：

- 国際シンポジウム Geofluid-1: 2011年3月17～19日 東工大・デジタル多目的ホール、参加予定者120名（うち招聘外国人11名、学生・院生60名）。直前に発生した東日本大震災のため Geofluid-1 講演会は中止し、参加者全員に講演要旨(冊子)を郵送してメールで意見交換することにより紙面成立とした。
- 国際地球物理学連合 IUGG2011 特別セッション (2011年7月4日 オーストラリア・メルボルン)  
"Fluids in the crust and mantle: Geodynamic and seismological consequences-geophysical and geological constraints"コンビナー：小川康雄・Grant Caldwell (New Zealand)
- 米国地球物理学連合 AGU2011 特別セッション "Role of fluids in subduction processes" (2011年12月8～9日 サンフランシスコ・モスコーンセンター) コンビナー：岩森光・Anne Pommier・高橋栄一
- 国際合同シンポジウム Misasa-2012 and Geofluid-2 (2012年3月18日～21日 鳥取県三朝町・三朝町総合文化ホール・三朝町営国民宿舎プランナールみささ) 岡山大学地球物質研究センターと共同開催。合計170名（うち新学術側招聘外国人10人）
- 2013年度日本地球惑星科学連合大会特別セッション (2013年5月19日～24日 幕張メッセ国際会議場)  
・国際セッション "Geofluids and their roles in dynamics of the Earth's interior" (コンビナー：岩森光・Stephen Kirby・高橋栄一)
- 国際火山学・地球内部化学協会学術総会 2013年大会 (IAVCEI2013) (2013年7月20日～24日 かがしま県民交流センター) 特別セッション "Volatiles, fluids, and melts in magmatic and metamorphic processes"  
(「地殻流体」に関するコンビナー：岩森光・中島淳一・木村純一・川本竜彦・浜田盛久)
- 国際シンポジウム Geofluid-3: Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones (2014年2月28日～3月3日 東京工業大学デジタル多目的ホール) 延べ135名参加。(うち招聘外国人12名、研究分担者・研究協力者合計75名、院生40名)。

## アウトリーチ活動等

- 薩摩硫黄島防災訓練住民説明会 2009年10月13日 神田径「最近の薩摩硫黄島の火山活動について」参加者は100人弱。
- International Forum for Sustainable Asia and Pacific (2010年7月13日 横浜パシフィコ) の公開セッション” Coping strategies for groundwater under threat” におけるパネリスト。徳永朋祥 ” Temporal change of groundwater-related problems in urban geosphere A case example from Tokyo”。
- 富山大学地域連携推進機構産学連携部門第5回イブニング技術交流サロン (2010年12月3日 カナルパークホテル富山) 渡辺了「地震と水の関係」、参加者数：学外から8名の参加。
- 東京工業大学公開講演会 (2011年5月18日、東工大田町イノベーションセンター) 岩森光「地球内部の変動とダイナミクス」、参加者数95名
- 平成23年度大田区民大学・第14回東京工業大学連携講座フォローアップ講座 (2011年10月31日) 岩森光「地球のダイナミクス」
- 東北大学大学院理学研究科出前講座 (2011年5月19日フォレスト仙台) 松澤暢ほか3名「3・11地震と放射性物質の拡散について」、来場者数：420名、
- 平成23年度大田区民大学・第14回東京工業大学連携講座 (2011年6月1日)  
高橋栄一「地球深部からの水が地震・火山活動を起こす」、参加者約80名、
- 平成23年度大田区民大学・第14回東京工業大学連携講座 (2011年6月8日) 岩森光「地球のダイナミクス」、参加者約80名、
- 2011 スーパーサイエンスハイスクール講師 (2011年6月10日 神奈川県立柏陽高校) 木村純一「マグマの発生と火山噴火」。
- 東京工業大学公開講演会「東工大の最先端研究」(2011年7月27日)「地球深部の水と大地の変動」講演者：高橋栄一
- 東京工業大学公開講演会「東工大の最先端研究」(2011年11月16日) 小川康雄「電磁波でみる地震火山そして南極」
- 蔵前工業会すずかけ台ゼミ (蔵前工業会神奈川県支部主催) 2012年3月10日「地球深部からの水が地震・火山活動を起こす～大震災から1年を振り返って」講演者：高橋栄一
- NHK スペシャル MEGAQUAKE I 第一回 「次の巨大地震をつかめ：人類の果てしなき闘い」  
2010年1月10日 NHK 放映 2012年3月31日再放送松澤暢 出演・執筆
- あかがね倶楽部講演会「東日本大震災から1年：地球内部の変動と地震」  
2012年3月13日古河電工あかがね倶楽部 講演者：岩森光
- NHK スペシャル MEGAQUAKE II 第一回 「いま日本の地下で何が起きているのか」  
2012年4月1日 NHK 放映 松澤暢 出演・執筆
- 一ツ橋フォーラム「文理共鳴・東工大の最先端科学技術」一ツ橋大学如水会講演会「地球内部の変動とダイナミクス」  
2012年6月5日 如水会館 講演者：岩森光
- さいたま市立岸中学校 道徳講演会「地球と地震 ～家庭と地域の防災について～」  
2013年2月15日 さいたま市文化センター 講演者：岩森光
- NHK スペシャル MEGAQUAKE III 「次の直下地震はどこか～知られざる活断層の真実～」  
2013年4月7日 NHK 放映 小川康雄・上嶋誠 出演
- 六花会 (早稲田大学理工学部産業界OB会) 講演会「地球内部の変動と地震」2013年6月6日 日本工業倶楽部 講演者：岩森光
- 「地下深部の水～地震や火山噴火を起こす黒幕の姿を見てみよう～」科研費成果公開事業 2013年8月3日 中村美千彦
- 奇跡の地球物語—有馬温泉 名湯を生み出す地球エネルギー 2013年12月1日 テレビ朝日系放映風早康平・川本竜彦出演

## 10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

●「地殻流体」概念の創生と普及：地震・火山など沈み込み帯の変動現象を、それぞれの現象の背後にある流体の役割に着目するために、沈み込み帯に存在する流体を表す言葉として、「地殻流体」というそれまであまり使用されていなかった言葉を採用した。英語名としては2000年から学術誌にも採用されている Geofluid（ただし諸外国の用例は地下10kmより浅い地下水や熱水を指していた）をあてた。領域の発足した2009年「地殻流体」は検索総数が100件以下であったが領域終了時には数万件までに増加し、地球内部に分布する流体の総称として広く用いられるようになった。2014年5月23日現在の検索ヒット件数は：

検索結果「地殻流体」：google：58800件 yahoo：58600件 MSN：71900件（プロジェクト前は100件以下）

検索結果「Geofluid」：google：28200件 yahoo：28000件 MSN：47200件（プロジェクト前は不明）

●地殻流体研究コミュニティの育成：本領域の関係者が中心となり、各学会において、地殻流体に関するセッションが設置され、沈み込み帯の変動現象に果たす流体の役割について活発な議論がなされてきた。東北地方太平洋沖地震直後の2011年度日本地震学会においては、巨大地震発生に及ぼす地殻流体の役割が2つのスペシャルセッションで議論された。日本鉱物科学会においては、2011年以降、毎年、「火成作用と流体」セッションが立ち上げられ、流体によって引き起こされる火成作用について、物質科学に基づく議論が行われている。日本鉱物科学会誌『岩石鉱物科学』の第39巻6号（2010年）と第40巻3号（2011年）で特集号「地殻流体：その岩石物性と化学輸送への役割」が生まれ、合計6本の論文が掲載された。さらに、日本地球化学会誌『地球化学』第46巻4号（2012年）において特集号「地殻流体」が生まれ、5本の論文が掲載された。そのほか、日本水文学会誌でも特集号「地殻流体研究に果たす水文学の役割」が生まれ、第43巻4号（2013年）、第44巻1号（2014）および今後発行予定のもう一号に、合計8本の論文が掲載される。これらの活動は、これまで各学会のレベルにおける「水」や「流体」の研究の学際化を促進し、その結果、地殻流体に関する研究が、本領域外でも活発に進められるようになった。例えば、日本地球科学連合大会において、「流体」をキーワードとしたセッションは、この数年間、2～3立ち上げられてきており、そのうち少なくとも1つは本領域外の研究者によって招集されていた。2014年大会においては、「流体」をキーワードとする本領域外の研究者によって召集されたセッションは一気に3つへと増加した。このことは、地殻流体研究コミュニティが大きく広がったことを示す。

### ●地震予知への波及効果

本研究の成果により、プレート境界、内陸、スラブ内のすべてについて、地震発生域の岩石破壊強度が極めて低いことが明らかになった。プレート境界と内陸については、最大剪断応力が20MPa程度以下と、乾燥した岩石の破壊強度の約1/10以下となっていることが明らかになった。このことは、地震発生のポテンシャル評価を考えるうえで極めて重要な成果である。また、このような強度の低いプレート境界でもM9の地震が発生するということは、世界のどのような沈み込み帯でもM9の地震の可能性を意味しており、日本のみならず海外の地震災害軽減のためにも重要な知見が得られたと言えよう。

### ●REE資源探査への波及効果

東大・加藤、JAMSTEC・岩森（当時、東工大）らが太平洋の広域で発見した深海底泥REE鉱床（通称、REE泥；Kato et al., 2011, Nature Geoscience）は、海洋底の大火山山脈である海嶺での熱水活動、いわば海洋性地殻流体が地球表層の元素バジェットに及ぼす影響を調べる過程で見出されたものであり、その後さらに、日本の排他的経済水域内南鳥島周辺における6000ppmを超えるREE泥の発見や、それらの揚泥、資源開発としての可能性に発展しつつある。このように、本研究領域での地球化学的手法や元素輸送現象の捉え方は、最新の資源問題とも結びつき、科学コミュニティのみならず、社会問題や国の政策に基礎的情報と理解を提供するという観点で大きく貢献している。

### ●放射性廃棄物地層処分への波及効果

放射性廃棄物地層処分の安全性評価においては地層の安定性の評価に加えて、地震、火山活動の長期的予測に基づく評価が重要である。東北地方太平洋沖地震の発生により使用済み核燃料廃棄物・放射線汚染瓦礫の地層処分は国家的課題となった。風早康平（産総研）らが本計画で明らかにした深層地下水マップはスラブ起源の深部流体の上昇域を明確に示すもので、放射性廃棄物地層処分に関する重要な安全評価項目の一つとしてすでに注目されている。このように「地殻流体」の成果は、長期予測に必要な地震、火山の発生メカニズム等やスラブ起源流体の上昇域の分布解明等に関する最新の科学的知見を提供するという観点で大きく貢献している。また、河村・市川（岡山大環境理工）らによる粘土鉱物に関する実験・分子シミュレーション・ナノマイクロマクロ挙動解析は処分場の人工バリアシステム・地下水・岩盤間隙水（地殻流体）3者の長期挙動を精密に予測するために有用で、NUMOやその関係機関、企業などから多くの共同研究依頼を受けている。