

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21109002

研究課題名(和文)地震波で診る地殻流体

研究課題名(英文)Geofluid investigated from seismic waves

研究代表者

松澤 暢(Matsuzawa, Toru)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20190449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 93,600,000円、(間接経費) 28,080,000円

研究成果の概要(和文)：宮城県の鳴子火山周辺で稠密な臨時地震観測を行い、顕著な地震波低速度域を発見した。この低速度域の直上では地震活動が活発であり、比抵抗や岩石実験から推定した弾性波速度との比較から、この低速度域の生成原因は主として水によるものと推定した。和歌山周辺で行った臨時観測からも同様の結果を得た。また、これらの低速度域が地震波の高減衰域にも対応していることを明らかにした。さらに、沈み込んだ海洋性プレート内部の地震波速度構造を詳細に調べ、地震活動の活発な領域において水が大量に存在している可能性が高いことも明らかにした。これらの結果はいずれも、沈み込み帯での地震発生に水が重要な役割を果たすことを示している。

研究成果の概要(英文)：We installed a dense seismograph array around Naruko volcano, and found a conspicuous low-velocity zone, above which seismicity was very active. We conjectured that this low-velocity zone showed the existence of water there based on the comparison with an electric conductivity distribution and elastic wave speeds estimated from rock experiments. We obtained similar results from seismic observation data around Wakayama. We found that seismic waves were strongly attenuated in these low-velocity zones. We also investigated seismic velocity in the descending oceanic plates and found evidences for the existence of water in seismically active regions. All these results indicate that water is playing an important role in generation of earthquakes in subduction zones.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地殻流体 地震発生過程 マグマ生成過程

### 1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯の地震・火山活動を説明する仮説として、「下部地殻軟化モデル」(Hasegawa et al., 2009) が提唱されていた。これは、海溝から沈み込んだ海洋性プレートが H<sub>2</sub>O 等の流体を深部に持ち込み、それがマントルウェッジ内に入り込んで上昇してマグマを生成させ、そのマグマが上昇して火山を作り、またマグマによる熱が下部地殻を局所的に軟化させてその直上に歪・応力を集中させ、マグマが固化することによって放出される流体が上部地殻の強度を下げて内陸地震の発生に至るとするものである。また、スラブ内地震も「脱水脆性化仮説」(例えば Kirby et al., 1996) で説明でき、さらにプレート境界も間隙圧が高い可能性が指摘されていた(例えば Hasegawa et al., 2011)。

### 2. 研究の目的

本研究では、沈み込む海洋性プレート(スラブ)から地殻に至る広範囲の流体の分布と地震発生との関係を、他の班の協力のもと総合的に明らかにすることを目的とした。これらが解明されれば、地震発生ポテンシャルの評価にも役立てることができ、さらには沈み込み帯のテクトニクス の 解 明 に も 役 立 て ら れ る と 考 え ら れ る。

### 3. 研究の方法

宮城県鳴子火山周辺に高密度臨時地震観測網を展開し、また、地震活動が活発な和歌山周辺でも臨時地震観測網を設置する。また、岩石実験により様々な岩石の弾性波速度を詳細に調べる。これらの観測データから、地下の流体の分布を調べ、地震・火山活動と流体との関係を推定する。また、低周波地震や地震波散乱構造と流体との関係を、地震波形解析によって調べ、さらにプレート境界型地震と流体との関係もシミュレーションに基づき調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) 鳴子周辺の地殻流体

本研究においては宮城県北部から山形県北部にかけての鳴子火山を中心とする領域において、鳴子火山周辺域での地殻流体の分布を明らかにする目的で、観測点間隔 3km 程度の 50 点からなる稠密地震観測を 2010 年より開始した。この領域近傍においては 1996 年鬼首地震(M5.9)や 2008 年岩手・宮城内陸地震(M7.2)などの規模の大きな地震も発生している。この稠密地震観測データを使用し、地震波トモグラフィによる地震波速度構造の推定を行った結果を図 1 に示す(Okada et al., 2014)。鳴子から鬼首にかけての領域の下には顕著な低速度域が存在しており、A01-2 班によって求められた低比抵抗域と良い対応を示す。そのすぐ上で地震活動が活発で、かつ地震反射面が密に分布していることがわかる。それより前弧側の低速度域は、概

ね 1962 年や 2003 年の宮城県北部地震の震源断層の分布する領域に対応し、西に傾き下がる低速度域となっている様子が見てとれる。栗駒山や 2008 年岩手・宮城内陸地震付近についても同様の傾向が見て取れ、地震の活発な領域は、深部に低速度域が発達している領域の直上の高速度域の中であることと、その周辺に地震波反射面が多数分布していることがわかる。断層が地震としてのすべりをおこす条件として、高い間隙流体圧が指摘されており、このような低速度域と地震波反射面は、流体の存在を示していると考えられる。

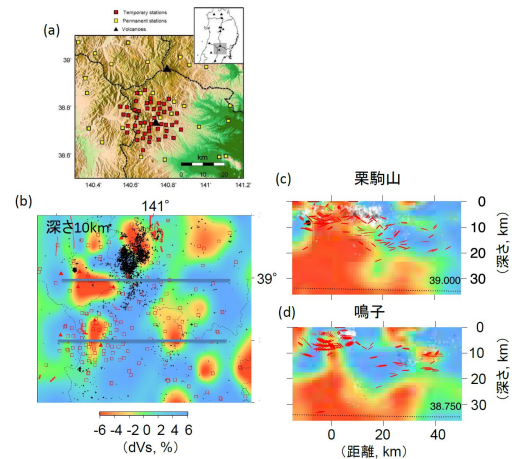


図 1. (a) 鳴子火山周辺の観測点分布図。赤四角は本研究による臨時観測点、黄四角は定常観測点、黒三角は活火山を示す。(b) 鳴子火山付近の深さ 10km の S 波速度偏差(Okada et al., 2014)。赤四角は使用した観測点、黒十字は深さ 7-13km の震源分布を表す。(c) 栗駒山付近を通る東西鉛直断面図。赤線は地震波反射面(堀・他, 2004)を示す。白丸は 2011 年東北地方太平洋沖地震以前、黒丸は東北地方太平洋沖地震以後に発生した地震の震源分布を表す。(d) 鳴子火山付近を通る東西鉛直断面図。

#### (2) 和歌山周辺の地殻流体

2010 年 11 月下旬から 2011 年 6 月下旬にかけて、和歌山地域を横断する長さ約 90km の南北測線上に、計 86 点からなる稠密地震計アレイを展開し、このデータからトモグラフィ解析・震源決定とレシーバー関数解析を行った(図 2)。和歌山地域の地震活動域はその下限が活縁辺部に比べて浅くなり、上に凸状の形状を示す。地震発生域の深部延長部には、顕著な低速度体が存在し、下部地殻全体が低速度を示す(図 2 右, Low-V1)。紀伊半島南部の前弧域の地殻下部でも、沈み込むスラブから解放された流体と考えられる低速度域がイメージングされた(Low-V2)。これらの低速度域はいずれも、過去に取得された比抵抗構造における低比抵抗域に対応しており、流体の分布を見ていると考えられる。また、紀伊半島南部で低速度層として見える海洋性地殻は、和歌山地域の深部(深さ 45-55 km)で、高速度層へ変化する。これは海洋性

地殻内の玄武岩が脱水変成作用によりエクロジヤイト化していることを意味する。低周波地震・微動域の海洋性地殻内は低速度・高ポアソン比 (Low- $V_3$ ) で特徴づけられ、東海・四国西部で見られている特徴と一致する。

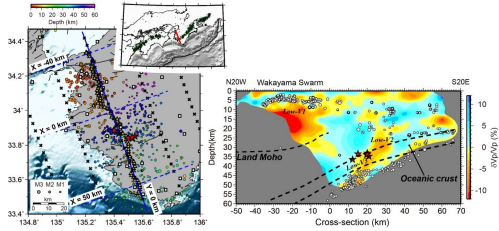


図 2. (左図)和歌山地域に設置した稠密地震観測アレイの分布 (黄三角) とトモグラフィー解析に用いた地震の分布 (丸印)。トモグラフィー解析に使用したグリッド配置を×印で示す。(右図)アレイ測線直下の P 波速度構造の深さ断面。速度は各深さの平均値からの偏差で示す。灰色丸印は再決定震源、赤星印は再決定された低周波地震の位置を表す。レーザー関数解析から推定された海洋性地殻と陸のモホ面の位置を黒破線で示す。

### (3) 東北地方スラブ内の地殻流体

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の発生から約 1 ヶ月後の 4 月 7 日に宮城県沖で M7.1 の逆断層型のスラブ内地震が発生した。トモグラフィー解析によって得られた地震波速度構造を図 3 に示す (Nakajima et al., 2011)。余震はスラブマントル最上部の地震波低速度域の中で生じている。解析に用いたデータは東北地方太平洋沖地震発生前の地震であり、M7.1 の地震の震源域付近は東北地方太平洋沖地震の発生以前から低速度異常であったことになる。1993 年釧路沖地震 (M7.8) と 2003 年宮城県沖地震 (M7.1) の 2 つのスラブ内地震も破壊の開始点および余震は低速度域内に分布することが知られており、M7 クラスのスラブ内地震はアウトライズで形成された大規模な正断層の再活動によって生じていることが強く示唆される。

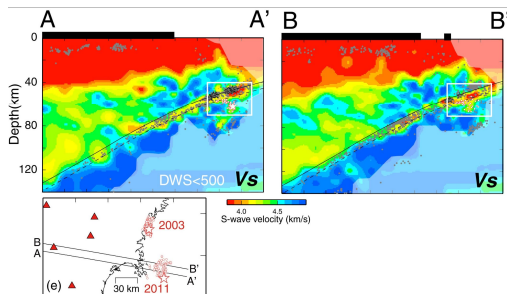


図 3. 2011 年 4 月 7 日に発生したスラブ内地震 (M7.1) 震源域周辺の S 波速度構造 (Nakajima et al., 2011)。断面図の範囲を挿入図に示す。図中の黒線、黒破線はそれぞれ太平洋プレートの上境界面と海洋性モホ面 (地殻の厚さを 7km と仮定) を、白星と白丸はそれぞれ本震と余震を表す。

東北地方のスラブ内地震に見られる太平洋プレート上部境界での PS 変換波の走時を用いて、海洋性地殻の P 波速度構造を推定した (Shiina et al., 2013)。その結果、図 4 で示したように、P 波速度は前弧側で 6.5-7.5 km/s、背弧側で 7.5-8.5 km/s であり、火山フロント下を境に速度が大きく変化することが明らかになった。また、深さ 60-100km の地殻の速度は含水化した MORB から期待される速度よりも遅く、含水鉱物に加えて自由水があることが示唆される。さらに、上面地震帯の活動は地震波速度が特に低速度な深さ範囲で活発であり、このことは、スラブ内地震の発生に高間隙圧水が重要な役割を果たしているというモデルを強く支持する。北海道でも、沈み込んだ海洋性地殻にトラップされた P 波の走時から、同様の結論が得られている。

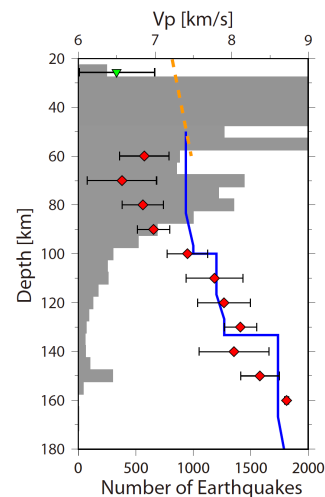


図 4. PS 変換波から推定された沈み込んだ海洋性地殻の P 波速度分布 (Shiina et al., 2013)。10 km の深さごとの海洋性地殻の P 波速度の平均値について、本研究結果を赤菱形で、Ito et al. (2005) による構造探査結果を緑逆三角で示す。青線は MORB から期待される P 波速度 (Hacker et al., 2003)、橙破線は実験的に求めたローソン石青色片岩の P 波速度 (Fujimoto et al., 2010) の分布を示す。灰色のヒストグラムは、一元化震源カタログによる、海洋性地殻内で発生した地震の頻度分布を表す。

### (4) その他の成果

2011 年東北地方太平洋沖地震の後、秋田県森吉山周辺をはじめ東北地方では様々な場所で地震活動が活発化した。これについて詳しく解析したところ、これらの地震のメカニズム解は通常の東西圧縮の逆断層とはなっていないことが多く、また地震活動域が次第に移動した例が多いことが明らかになった。これらのことは、間隙圧が高いために強度が低く、また地殻流体の拡散によって地震発生域が移動したことを示唆する。

またトモグラフィーよりも短波長の不均質を解明するために、散乱波の解析により不

均質強度の解析や減衰構造の推定が行われ、地震波速度トモグラフィーから得られている火山の下の低速度域は高減衰域となっていることが明らかになり、やはり地殻流体の存在を示している可能性が高くなった。

トモグラフィーの結果から流体の量を推定するためには、母岩の地震波速度のみならず、実際に流体を含んだ岩石の地震波速度のデータが重要となる。このような観点から弾性波速度の測定実験も行われて貴重なデータが得られている。

さらに、プレート境界の間隙圧の大きさを推定するために、プレート境界のゆっくり滑りについてのシミュレーションも行われ、巨大地震の発生前には、ゆっくり滑りの活動が活発化し、特に浅部のゆっくり滑りの変化が顕著であることが明らかになった。

## 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 85 件)

Obana K., T. Takahashi, T. No, Y. Kaiho, S. Kodaira, M. Yamashita, T. Sato and T. Nakamura, Distribution and migration of aftershocks of the 2010 Mw 7.4 Ogasawara Islands intraplate normal-faulting earthquake related to a fracture zone in the Pacific plate, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, accepted (currently online only), doi:10.1002/2014GC005246, 2014.

(査読有)

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)

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, doi:10.1016/j.jseaes.2012.12.031, 2013.

(査読有)

Nakajima, J., S. Hada, E. Hayami, N. Uchida, A. Hasegawa, S. Yoshioka, T. Matsuzawa, and N. Umino, Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 118, 5838-5855, doi:10.1002/2013JB010388, 2013. (査読有)

Nakajima, J., K. Yoshida, and A. Hasegawa, An intraslab seismic sequence activated by the Tohoku-oki earthquake: Evidence for fluid-related embrittlement, *J. Geophys. Res.*, 118,

3492-3505, doi:10.1002/jgrb.50246, 2013. (査読有)

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

Takahashi, T., K. Obana, Y. Yamamoto, A. Nakanishi, S. Kodaira, and 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, doi:10.1002/jgrb.50200, 2013. (査読有)

Uchida, N., and T. Matsuzawa, Pre- and post-seismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 81-91, doi:10.1016/j.epsl.2013.05.021, 2013. (査読有)

(査読有)

Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, J.-P. Ampuero, R. Nakata, T. Hori, Y. Kaneda, R. Hino, A. Hasegawa, 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, doi:10.5047/eps.2010.09.003, 2012. (査読有)

Kato, A., T. Igarashi, Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L15301, doi:10.1029/2012GL052220, 2012. (査読有)

Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 335, 6069, 705-708, doi:10.1126/science.1215141, 2012. (査読有)

Omuralieva, A., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, J. Nakajima, and 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, doi:10.1016/j.tecto.2011.11.013, 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, doi:10.1111/



- j.1365-246X.2012.05438.x, 2012. (査読有)
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Okada, T. Iinuma, 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, doi:10.1029/2011GL049729, 2012. (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, doi:10.5047/eps.2011.06.007, 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, doi:10.1029/2011GL048754, 2011. (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, doi:10.1029/2010JB007691, 2011. (査読有)
- Uchida, N., T. Matsuzawa, Coupling coefficient, hierarchical structure, and earthquake cycle for the source area of the 2011 Tohoku earthquake inferred from small repeating earthquake data, *Earth Planets Space*, 63, 675-679, doi:10.5047/eps.2011.07.006, 2011. (査読有)
- Kato, A., S. Sakai, T. Iidaka, T. Iwasaki, N. Hirata, Non-volcanic seismic swarms triggered by circulating fluids and pressure fluctuations above a solidified diorite intrusion, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L15302, doi:10.1029/2010GL043887, 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, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.038, 2010. (査読有)
- 21 Matsumoto, Y., M. Ishikawa, M. Terabayashi, M. Arima, Simultaneous measurements of compressional wave and shear wave velocities, Poisson's ratio, and  $V_p/V_s$  under deep crustal pressure and temperature conditions: Example of silicified pelitic schist from Ryoke Belt, Southwest Japan, Island Arc, 19, 30-39, doi:10.1111/j.1440-1738.2009.00695.x, 2010. (査読有)
- 22 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, doi:10.5047/eps.2009.11.005, 2010. (査読有)
- 23 Reynard, B., J. Nakajima, H. Kawakatsu, Earthquakes and plastic deformation of anhydrous slab mantle in double Wadati-Benioff zones, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24309, doi:10.1029/2010GL045494, 2010. (査読有)
- 24 Tripathi, J. N., H. Sato, M. Yamamoto, Envelope broadening characteristics of crustal earthquakes in northeastern Honshu, Japan, *Geophys. J. Int.*, 182, 988-1000, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04657.x, 2010. (査読有)
- 25 Uchida, N., S. H. Kirby, T. Okada, R. Hino, A. Hasegawa, Supraslab earthquake clusters above the subduction plate boundary offshore Sanriku, NE Japan: Seismogenesis in a graveyard of detached seamounts?, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JB006797, 2010. (査読有)
- 26 Yamamoto, M., and H. Sato, Multiple scattering and mode conversion revealed by an active seismic experiment at Asama volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, B07304, doi:10.1029/2009JB007109, 2010. (査読有)
- 27 Nakajima, J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, and 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 Research*, 16, 470-481, doi:10.1016/j.gr.2008.12.010, 2009. (査読有)
- 28 Nakajima, J., Y. Tsuji, and A. Hasegawa, Seismic evidence for thermally-controlled dehydration reaction in subducting oceanic crust, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03303, doi:10.1029/2008GL036865, 2009. (査読有)

有)

- 29 Takahashi, T., H. Sato, T. Nishimura, and 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, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04227.x, 2009. (査読有)

[学会発表](計 98 件)

Kato, A. and K. Obara, A variety and interplay of slip behaviors along plate interface before and after the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake(招待講演), 2013 AGU Fall meeting, 2013年12月13日, San Francisco, 米国.  
Kosuga, M., Earthquake clustering and seismic scattering possibly related to geofluid near the Moriyoshi-zan volcano in the Akita Prefecture, northeastern Japan, 2012 AGU Fall meeting, 2012年12月6日, San Francisco, 米国.  
Ishikawa, M., Stepwise changes in  $V_p$ ,  $V_s$  and  $V_p/V_s$  in gabbroic rocks, 2012 AGU Fall meeting, 2012年12月6日, San Francisco, 米国.  
Matsuzawa, T., K. Shimamura, T. Okada, and N. Uchida, Unusual rupture pattern of off-Kamaishi repeaters after th 2011 Tohoku earthquake, 2012 AGU Fall Meeting, 2012年12月4日, San Francisco, 米国.  
Nakajima, J., N. Uchida, A. Hasegawa, T. Shiina, B. R Hacker, and S. H Kirby, Facilitation of intermediate-depth earthquakes by eclogitization-related stresses and  $H_2O$ , 2012 AGU Fall meeting, 2012年12月4日, San Francisco, 米国.  
高橋 努, 高周波数地震波の散乱及び減衰に着目した地下構造イメージングに関する研究(招待講演), 日本地震学会 2012年度秋季大会, 2012年10月17日, 函館.  
Nakajima, J., and A. Hasegawa, Deep seismic structure beneath the Japanese Islands(招待講演), 日本地質学会第119回学術大会, 2012年9月16日, 堺  
高橋努, 地殻・最上部マントルにおけるランダムな速度ゆらぎ及び内部減衰の三次元構造 ~ 次元圧縮に基づく地下構造の地球物理学的解釈 ~ (招待講演), 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 2011年5月26日, 千葉  
加藤愛太郎, スロー地震発生域の構造(招待講演), 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 2011年5月22日, 千葉.  
中島淳一 地震波トモグラフィで診る日本列島下の上部マントル構造(招待講演), 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 2010年5月23日, 千葉.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

[http://www.geofluids.titech.ac.jp/a01\\_1.html](http://www.geofluids.titech.ac.jp/a01_1.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松澤 暢 (MATSUZAWA, Toru)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 20190449

### (2) 研究分担者

加藤 愛太郎 (KATO, Aitaro)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号: 20359201

岡田 知己 (OKADA, Tomomi)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 30281968

中島 淳一 (NAKAJIMA, Junichi)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 30361067

山本 希 (YAMAMOTO, Mare)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 30400229

石川 正弘 (ISHIKAWA, Masahiro)  
横浜国立大学・環境情報研究院・教授  
研究者番号: 70232270

小菅 正裕 (KOSUGA, Masahiro)  
弘前大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 90142835

高橋 努 (TAKAHASHI, Tsutomu)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部  
ダイナミクス領域・研究員  
研究者番号: 90435842

### (3) 連携研究者

有吉 慶介 (ARIYOSHI, Keisuke)  
独立行政法人海洋研究開発機構・地震津  
波・防災研究プロジェクト・研究員  
研究者番号: 20436075