

令和元年6月9日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02998

研究課題名(和文) 地形・地質学，地球物理学，地球化学データによる地殻変動の予測に関する総合的研究

研究課題名(英文) Prediction of crustal deformation: models integrating geological, geochemical, and geophysical data

研究代表者

梅田 浩司 (Umeda, Koji)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60421616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：1997年鹿児島県北西部地震の震源域および2011年福島県浜通りから茨城県北部における群発地震域(以下，群発地震域)の2つの地域において，温泉井から採取した流体のヘリウム同位体を測定した結果，前者はマントル流体，後者は非マントル流体と考えられる深部流体が寄与している。さらに，これらの地域において地震波トモグラフィーおよびMT観測による比抵抗構造解析を実施した結果，流体の存在に起因する地殻構造の不均質性が存在することが明らかになった。さらに，流体の分布を反映した粘弾性モデルの数値実験によると，地殻構造の不均質性は，最近の地震活動のみならず，数万年以上の地殻変動にも影響している可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究によって内陸地震を引き起こす断層の構造や活動様式は，いわゆる深部流体の存在による地殻構造の不均質性に強く依存していることが明らかになった。そのため，高レベル放射性廃棄物処分に係るサイト選定にあたっては，概要調査で得られた地質学的なデータのみならず，地球物理(地震波速度構造，比抵抗構造)，地球化学(流体やガスの同位体化学組成)データを適切に組み合わせることにより，対象地域において深部流体の存否や分布範囲，起源などを把握していくことが極めて重要となる。

研究成果の概要(英文)：Helium isotope data acquired from gas and water samples around the seismic source region indicate that mantle fluids and metamorphic fluids contribute to triggering the Kagoshima earthquake doublet and the Fukushima Hamadori earthquake swarms, respectively. Seismic tomography and magnetotelluric soundings defined a geophysical anomaly with low seismic velocity and low resistivity clearly visible beneath the source regions, strongly supporting the existence of structural heterogeneities of the crust due to aqueous fluids. Numerical simulation of crustal deformation using viscoelastic crustal structure models suggest that structural heterogeneities in the lower crust could cause not only recent fault movement revealed by GPS, but also crustal deformation from geological results.

研究分野：地質学

キーワード：地殻変動 深部流体 地層処分

1 . 研究開始当初の背景

2000 年鳥取県西部地震をはじめとして、日本列島周辺で近年発生した M6 クラス以上の多くの内陸地震は、これまで認識されてきた活断層から離れた地域に生じており、いわゆる“未知”の活断層によって引き起こされたものと考えられている。これらに関連する震源断層をすべて明らかにすることは困難であるが、その存否の可能性を科学的かつできる限り定量的に示す努力を払うことが、福島第一原子力発電所事故のような大規模複合的自然災害の低減にとって不可欠となる。沈み込み帯で発生する地震には、主にプレート境界地震、スラブ内地震および上盤プレートの内陸地震の 3 つがあるが、これらのいずれの地震についても発生過程には流体が極めて重要な役割を果たしていると考えられている。このうち、内陸地震については、上昇してきた流体が下部地殻の強度を低下させ、その上の地殻に応力が集中して破壊が生じるといったモデルが提唱されている。さらに、これらの流体によって下部地殻のみならず上部地殻も局所的に非弾性変形が生じるため、地殻全体としての変形を一様化する過程で、非弾性変形領域の周辺で大きな内陸地震が発生すると考えられている。

地殻構造の不均質性を引き起こしている深部流体の分布やその起源については、最近になっていくつかの研究成果が報告されている。このうち流体の分布については、地震波速度構造などによって推定されるケースが多い。さらに、岩石の比抵抗値は流体の量およびその連結度によってオーダ (~ 8 桁) で変化することから、最近では地磁気・地電流観測 (MT 観測) による比抵抗構造解析が特に有効であると考えられている。我が国においても M6 以上の内陸地震震源域を中心に MT 観測が行われているが、このうち東北日本の横手盆地東縁断層、北上西縁断層、1962 年宮城県北部地震震源域、糸魚川 - 静岡構造線北部、2007 年能登半島地震震源域などでは、流体の存在を示唆する低比抵抗体が、低角逆断層型である震源断層の下位に見出されている。また、国土地理院による GPS 稠密観測によると糸魚川 - 静岡構造線北部の低比抵抗体の上位には顕著な短縮歪が生じている。以上のことから、内陸地震を引き起こす断層の構造や活動様式は、流体の存在による地殻構造の不均質性に強く依存していることが示唆される。

地殻中に存在する流体の起源については、マグマが冷却・固結する際に放出されるマグマ水のほか、スラブ起源流体や続成脱水流体、変成脱水流体などが知られている。これらの深部流体の起源については、従来の酸素・水素同位体や Li, B, Cl 濃度による区分が試みられているが、上部マントルからもたらされたマグマ水やスラブ起源流体と地殻内で発生した続成、変成脱水流体の違いについては、流体に含まれるガスの希ガス同位体によって容易に識別できる。また、上部マントルから地震発生層まで低比抵抗体が認められる地域では、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の高いマントル流体の寄与が大きい地下水が賦存しているのに対して、低比抵抗体が下部地殻に留まっている地域では、その関与が小さい。すなわち、地殻の不均質構造やそれに伴う非弾性変形を引き起こす流体には少なくともマントル流体と非マントル流体の 2 つがある。しかしながら、これらの 2 つの流体が地震活動や地殻変動の及ぼす影響の違いについては明らかにされていない。

2 . 研究の目的

本研究では、過去に $M > 6$ の内陸地震の発生した震源域のうち、マントル流体が寄与している地域および非マントル流体が寄与している地域の 2 つの地域を抽出し、その地域の地殻構造の不均質性を地震波トモグラフィー、MT 観測による比抵抗構造解析を解明する。また、GPS 観測による高空間分解能な地表変位解析を行うことにより、測地学的な特徴を明らかにする。さらに、地殻の不均質構造を反映した粘弾性モデルによる過去から現在までのシミュレーションを通じて、長期的な非弾性変形が内陸地震の発生や第四紀地殻変動に至るプロセスを解明する。

3 . 研究の方法

過去に M6 以上の地震が発生した地域として、1997 年鹿児島県北西部地震の震源域および 2011 年福島県浜通りから茨城県北部における群発地震域 (以下、群発地震域) の 2 つの地域を選定した。この地域の地殻の不均質構造を把握するため、地震波トモグラフィー、MT 法観測および比抵抗構造解析を実施した。また、不均質構造に寄与する流体の起源を明らかにするため、温泉井より流体を採取し、そこに含まれる希ガス同位体の測定を行なった。本研究では、過去に $M > 6$ の内陸地震の発生した震源域のうち、マントル流体が寄与している地域および非マントル流体が寄与している地域の 2 つの地域を抽出し、その地域の地殻構造の不均質性を地震波トモグラフィー、MT 観測による比抵抗構造解析を解明する。また、GPS 観測による高空間分解能な地表変位解析を行うことにより、測地学的な特徴を明らかにする。さらに、地殻の不均質構造を反映した粘弾性モデルによる過去から現在までのシミュレーションを通じて、長期的な非弾性変形が内陸地震の発生や第四紀地殻変動に至るプロセスを解明する。

4. 研究成果

(1) 2011年福島県浜通りから茨城県北部における群発地震域

2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）以降、福島県浜通りから茨城県北部にかけての地域では、震源の浅い正断層型の発震機構を特徴とする内陸地震の活動が始まり、現在も茨城県北部の活動域を中心にやや活発な活動が続いている。この地域ではこれまで目立った地震がほとんど知られておらず、東北沖地震が誘発した地震活動と考えられている。特に、東北沖地震の1か月後の4月11日には、いわき市付近の深さ約5kmを震源とするMw6.7の地震が発生したが、その際には明瞭な地表地震断層が生じた。また、この地震の発生直後からいわき市内の数カ所で温泉が湧出し、地震から4年以上経過した時点でも異常湧出は続いている。この地域の温泉井からヘリウム同位体を測定したところ、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は地震の前後で大きな変化は認められず、大気の数以下であった。そのため、この地域に関与している流体は非マントル流体と考えられる。

この震源域の地殻構造を明らかにするため、震源域を北西-南東方向に横断する約90kmの測線で観測を行った。さらに、N30°E走向に直交する方向と平行な方向の2種類の見掛比抵抗と位相を求め、インバージョンによって深さ30kmまでの2次元電気伝導度構造を推定した。この付近の大局的な地質構造境界である棚倉構造線を境に中生代の堆積岩類や花崗岩類からなる足尾帯と阿武隈帯が分布しているが、ここでは電気伝導度の低い領域となっている。これに対して、群発地震が発生している地域の深さ15km以深に、数 Ωm の高い電気伝導度を示す領域が地震の分布と極めて整合的に存在している。また、地震波速度構造の解析(Tong et al., 2012, Solid Earth)でもほぼ同じ場所に地震波速度の低い領域が存在していることが明らかにされている。次に、地震波速度構造および比抵抗構造をもとに、群発地震の活動域の下に流体が存在すると考え、ここを粘弾性体（粘性率 $1 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ のMaxwell粘弾性体）として二次元有限要素法によるシミュレーションを実施した。その結果、地殻流体分布域の上部で鉛直上向きの変位（隆起）が卓越するといった地形変化に関する傾向の他、深部流体分布域の直上では圧縮場である一方で、それ以浅では伸張場であるとの地殻応力場に関する特徴が認められた（図1）。これらの結果は、MIS5eの海成段丘から求めた過去10万年間の隆起量(Suzuki, 1989, Geogr Rept Tokyo Metropol Univ.)によると震源域が周辺に比べて長期的な隆起場になっていることや現在の応力場の特徴(Yoshida et al., 2015, Geophys. J. Int.)を定性的に再現していることから、地殻内に存在する流体が地殻の不均質性と10万年にも及ぶ長期的には地殻変動に影響していることを示唆している。

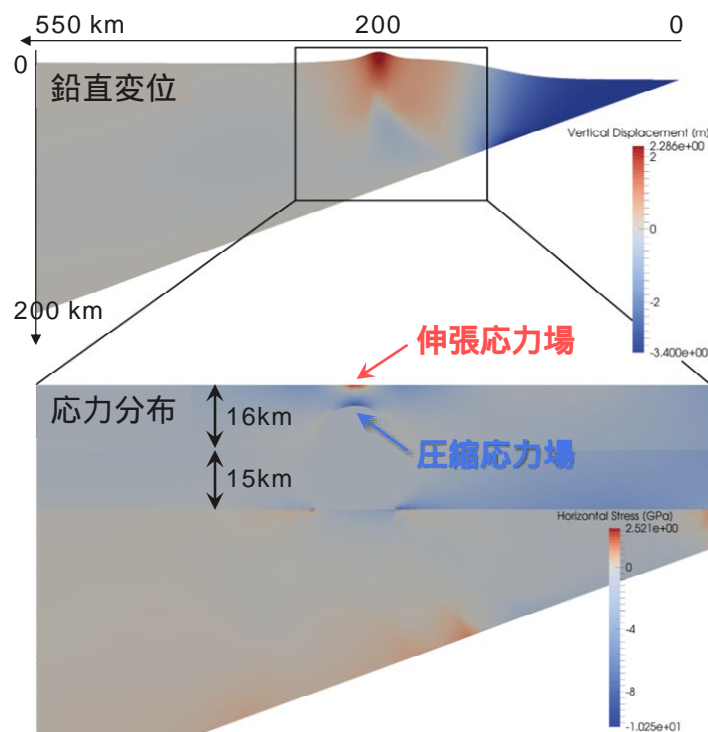


図1 100年後の応力分布

(2) 1997年鹿児島県北西部地震震源域

1997年鹿児島県北西部地震（M=6.5, 6.3）やその周辺で発生した1961年吉松地震（M=5.5）、1968年えびの地震（M=6.1）、1994年大口地震（M=5.7）などの発震機構は、東-西～西北西-東南東方向の高角左横ずれを示すことを特徴とする。この地域の地殻構造を把握するためMT

観測および三次元比抵抗構造解析を行った。その結果、地下 10 km 以深から上部マントルに達する東西方向に延びる低比抵抗体が存在し、その周辺（高比抵抗体との境界部）に上記の地震が発生していることが明らかになった。また、この低比抵抗体は、白亜紀の四万十層群や中新世の紫尾山花崗閃緑岩の地域に位置するが、ここで採取した地下水の溶存ガスや遊離ガスに含まれるヘリウム同位体比（ $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比）は、大気の 4 倍以上の値を示す。このことは、低比抵抗体は地殻内に侵入したマントル起源の流体によって生じたものであることを示唆する。

一方、震源域周辺では 2016 年から 10 地点の GNSS 観測点を設置し、現在まで観測を行なっている。これらのデータと既存の GNSS データによると震源域から東に伸びる領域において $10^{-7}/\text{yr}$ を超える地震の発震機構と整合的なせん断ひずみ速度が観測されているが（図 2）、これまでに明瞭な活断層が認識されていない。また、九州北部では地質学的歪み速度と測地学的歪み速度が調和的であるのに対して、震源域周辺では東西方向に延びるせん断歪み速度が著しく大きい。このことは、この地域が（地質学的に）最近になって地殻変動の傾向が大きく変わったことを示唆する。

以上の結果は、低比抵抗体の原因となる流体の侵入によってせん断帯の下部地殻では東西方向の歪みが生じ、それが弾性体である上部地殻に変形を及ぼしていることを示している。ここでは、せん断帯の深部にブロック境界となるすべり面が存在すると仮定し、半無限弾性媒質中の鉛直横ずれ断層の断層運動モデルの適用を試みた。このモデルは、断層をはさむ両側のブロックが剛体的な運動をし、その浅部延長の地殻が固着することによって、断層周囲に弾性変形が生じるという三次元のモデルである。これによって測定学的な観測結果の再現を試みた。実際のシミュレーションでは、低比抵抗体が存在する深さ 15km 以深を低粘性領域と仮定した粘弾性体（粘性率 $1 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の Maxwell 粘弾性体）とし、15km 以浅は弾性体とした。その結果、低粘性領域を仮定した鹿児島県北西部地震の余震域では、局所的にせん断ひずみ速度の大きな領域（ $2 \sim 4 \times 10^{-7}/\text{yr}$ ）が現れ、それらが地殻深部から地表へと繋がる様子が認められた（図 3）。以上の結果は、地殻内に存在する流体がその周辺の地殻変動に関与していることを示唆する。

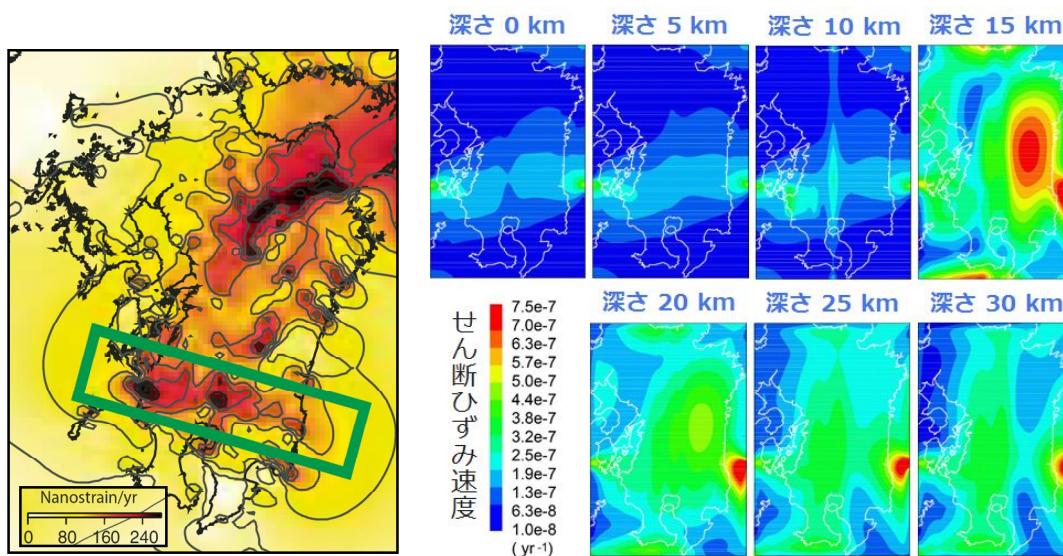


図 2 GNSS で観測した歪み速度分布

図 3 30000 年後の歪み速度分布

(3) まとめ

1997 年鹿児島県北西部地震の震源域および 2011 年福島県浜通りから茨城県北部における群発地震域（以下、群発地震域）の 2 つの地域において、温泉井から採取した流体のヘリウム同位体を測定した結果、前者はマントル流体、後者は非マントル流体と考えられる深部流体が寄与している。マントル流体が卓越している地域は、地震活動や地殻変動が活発な場所が多いが、非マントル流体である続成脱水流体、変成脱水流体などは、より長期の地質プロセスの中で形成されるため、必ずしも変動が大きい地域に認められるわけではない（2011 年福島県浜通りから茨城県北部における群発地震は東北沖地震によってトリガリングされたものであり、震源域は東北沖地震の発生前では静穏であった）。

さらに、これらの地域において地震波トモグラフィーおよび MT 観測による比抵抗構造解析を実施した結果、流体の存在に起因する地殻構造の不均質性が存在することが明らかになった。さらに、流体の分布を反映した粘弾性モデルの数値実験によると、地殻構造の不均質性は、最近の地震活動のみならず、数万年以上の地殻変動にも影響している可能性が示唆された。以上のことから、原子力施設の耐震安全性評価や地層処分サイトの選定などといった数万年以上の地質リスクの予測・評価に際しては、地形・地質、地球物理、地球化学に関する総合的な調査によって対象とする地域の地殻の不均質性を把握することが極めて重要となる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- Triahadini, A., Aizawa, K., Teguri, Y., Koyama, Y., Tsukamoto, K., Muramatsu, D., Chiba, K., Uyeshima M. (2019) Magnetotelluric transect of Unzen graben, Japan: Conductors associated with normal faults, Earth. Planets and Space, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1004-z>, 71, 28, 2019.03. (査読有)
- Hata, M., Uyeshima, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Yoshimura, R. (2018) Three Dimensional Electrical Resistivity Distribution Beneath the Beppu Shimabara Graben With a Focus on Aso Caldera, Southwest Japan Subduction Zone, J. Geophys. Res., 123, 6397-6410. (査読有)
- 梅田浩司 (2017) 飯豊山は噴火するか? - 地質, 地球物理, 地球化学データから見た飯豊山下の深部構造 -, 青森地学, 62, 1-3. (査読無)
- Sueoka, S., Shimada, K., Ishimaru, T., Niwa, M., Yasue K-I., Umeda, K., Danhara, T. and Iwano, H. (2017) Fission-track dating of faulting events accommodating plastic deformation of biotites, J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, 1848-1859. (査読有)
- Umeda, K. (2016) Localized extensional tectonics in an overall reverse-faulting regime, Northeast Japan. Geosci. Lett., 2, 1-12. (査読有)
- 梅田浩司, 浅森 浩一 (2016) 地球科学の原子力安全への貢献 (その 1) 地球科学からみた地殻流体と地層処分技術への応用, 日本原子力学会誌, 58, 110-114. (査読有)
- 末岡 茂, 梅田浩司, 安江健一, 丹羽正和, 島田耕史, 石丸恒存, 檀原 徹, 岩野英樹, 八木公史 (2016) 複数の熱年代学的手法に基づいた江若花崗岩敦賀岩体の冷却・削剥史, 地学雑誌, 125, 201-219. (査読有)
- Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K-I., Ishimaru, T. and Umeda, K. (2016) Thermal constraints on clay growth in fault gouge and their relationship with fault zone evolution and hydrothermal alteration: Case study of gouges in the Kojaku Granite, Central Japan, Clays and Clay Minerals, 64, 86-107. (査読有)
- Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A. Kobori, K. and Hama, Y. (2015) Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, J. Geophys. Res., 120, 2279-2291. (査読有)

〔学会発表〕(計11件)

- 渡部 豪, 雑賀 敦, 浅森浩一, 島田顕臣, 梅田浩司 (2018) 九州南部のせん断帯における GNSS 観測 (続報). 日本地球惑星科学連合 2018 年.
- 高島 麗, 梅田浩司 (2018) 下北半島の温泉の地球化学. 日本地球惑星科学連合 2018 年.
- 木下雄介, 小川康雄, 市來雅啓, 藤田清士, 山口 覚, 梅田浩司, 浅森浩一 (2018) 3 次元電磁イメージングによる紀伊半島深部の流体分布. 日本地球惑星科学連合 2018 年.
- 渡部 豪, 浅森浩一, 奥山 哲, 雑賀 敦, 梅田浩司 (2018) 地殻流体の存在を考慮した地殻変動シミュレーションの試み. 日本地球惑星科学連合 2018 年.
- 梅田浩司, 浅森浩一 (2018) 飯豊山地下のマグマの存在: 火山になれなかった山. 日本火山学会 2018 年度秋季大会.
- 梅田浩司 (2018) 福島県浜通りから茨城県北部における群発地震の震源域は東北沖地震以前に予見できたか?. 日本地質学会第 125 年学術大会.
- 梅田浩司, 浅森浩一, 雑賀 敦, 西村卓也 (2017) 山陰ひずみ集中帯におけるヘリウム同位体比. 日本地球惑星科学連合 2017 年 (招待講演)
- 浅森浩一, 濱 友紀, 梅田浩司, 田中秀実 (2017) 2014 年長野県北部地震 (Mj 6.7) の震源域における比抵抗構造の推定. 日本地球惑星科学連合 2017 年
- 木下雄介, 小川康雄, 齋藤全史郎, 野口里奈, 藤田清士, 山口 覚, 梅田浩司, 浅森浩一, 市來雅啓 (2017) 紀伊半島の MT 法による 3 次元地殻流体分布. 日本地球惑星科学連合 2017 年.
- 渡部 豪, 浅森浩一 (2017) 日本列島における地質学的ひずみ速度の推定. 日本地球惑星科学連合 2017 年.
- 渡部 豪, 浅森浩一, 梅田浩司, 雨宮浩樹, 野村勝弘, 中司 昇 (2016) 熊本地震に伴う南九州南部のせん断帯における地殻変動. 日本地球惑星科学連合 2016 年

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 浅森浩一

ローマ字氏名: ASAMORI Koichi

所属研究機関名：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
部局名：核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター
職名：研究副主幹
研究者番号（8桁）：80421684

研究分担者氏名：上嶋 誠
ローマ字氏名： UYESHIMA Makoto
所属研究機関名：東京大学
部局名：地震研究所
職名：教授
研究者番号（8桁）：70242154

(2)研究協力者
研究協力者氏名：渡部 豪
ローマ字氏名：WATANABE Tsuyoshi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。