

# 博士論文概要

## 論文題目

Paleostress analysis using deformation microstructures of the Late Cretaceous granitoids in Chubu region, Southwest Japan

西南日本中部地方に分布する後期白亜紀花崗岩類に発達する変形微細構造を利用した古応力解析

申請者

Takuto	KANAI
金井	拓人

Department of Earth Sciences, Resources and Environmental Engineering, Research on Structural Petrology

2016年11月

西南日本には後期白亜紀花崗岩類（領家-山陽花崗岩類）が広く帯状に分布する。本研究では中部地方に分布する花崗岩類を対象に，花崗岩類に発達する変形微細構造を利用して古応力解析を行い，プレート収束に伴う広域応力場との関連性を議論した。本研究ではまず，石英に発達するヒールドマイクロクラック（HC）を用いて HC 形成時の古応力方向を推定した。HC は破断面が流体によって癒合された，開口幅 10  $\mu\text{m}$  以下の割れ目であり，顕微鏡下では流体包有物の配列面として観察される。HC を構成する流体包有物の均質化温度から推定される捕獲温度と花崗岩類の冷却曲線を組み合わせると HC の形成時期を推定することができる。HC などの開口性のクラックは最小主応力 ( $\sigma_3$ ) 軸に垂直な方向ほど形成されやすいため，従来の研究では HC の極の最大集中方向を  $\sigma_3$  軸の方向とする古応力解析がなされてきた。この手法は近年拡張され，方向分布の形状から中間主応力 ( $\sigma_2$ ) 軸や最大主応力 ( $\sigma_1$ ) 軸の方向をも推定できるようになった。また，HC 群が複数の応力を記録している場合に，それぞれを分離検出することも可能となった。本研究は，この新しい岩脈法を初めて HC の解析に応用したものである。次に，愛知県豊田市足助町を中心に NE-SW 方向に発達する足助剪断帯から古応力方向ならびに変形条件を推定した。足助剪断帯は前述した HC の形成と同時期に活動したと考えられ，HC と異なる手法で古応力方向を推定できる。その一つは剪断帯の運動像であり，もう一つは剪断帯に伴うシュードタキライト中の杏仁構造を充填する方解石の変形双晶を用いるものである。また，マイロナイト化したシュードタキライトに含まれる再結晶石英の組織を用いて変形温度や差応力などの変形条件についても検討した。これらの結果をもとに，花崗岩中の HC および足助剪断帯の運動像と方解石の変形双晶から推定された古応力方向を比較し，白亜紀末から古第三紀初期における東アジア東縁部の広域応力場について議論している。

第 1 章は序論として研究目的やその意義について述べている。

第 2 章は地質概説として，領家-山陽花崗岩類の火成活動および変形作用，また本研究で推定された広域応力場を議論する上で関連する中央構造線 (MTL) の活動について先行研究のレビューを行っている。

第 3 章は岩脈法の原理および HC に適用する場合の解析手順について述べ，定方位試料から得られた古応力について議論している。本章ではまず，新しい岩脈法を HC に適用するために，HC の方向分布を正確に推定する手法を開発した。三次元空間内のすべての方向の HC をユニバーサルステージを用いて観察するためには，定方位試料を直交 3 方向から観察する必要がある。しかし，この方法では次の 3 つの要因に起因する HC の観測頻度の偏りを補正する必要がある。その要因とは，HC の観察しやすさが薄片との交角に依存して変化すること，HC の方向によって 2 方向の観測方向から観察できる HC と 1 方向の観測方向からしか観測できない HC が存在すること，HC を観察する際の観測面積が 3 方向でそれぞれ異

なることである。本研究ではこの観測頻度の偏りを補正する方法を検討した。

次に長野県天竜村から飯田市周辺の MTL 近傍 (マイロナイト帯を除く MTL から 2.1–4.5 km の範囲), および愛知県新城市から岐阜県土岐市にわたり MTL から 2.1–59.5 km の広域で採取した花崗岩類を対象に古応力解析を行った。解析には劈開の影響を無視できる石英に発達した HC を利用した。HC を構成する流体包有物の捕獲温度の推定に基づくと, HC は 75–65 Ma に形成されたと考えられる。MTL 近傍の 2 地域で推定した  $\sigma_3$  軸の平均方向 (沈下方向 / 沈下角) はそれぞれ  $146.0^\circ / 10.3^\circ$  および  $308.2^\circ / 6.4^\circ$  を示し, 花崗岩体北縁地域 (MTL から約 60 km) で推定した  $\sigma_3$  軸の平均方向は  $259.9^\circ / 7.5^\circ$  を示した。また, MTL から離れるほど  $\sigma_3$  軸の方向が反時計回りに回転する傾向が明らかとなった。 $\sigma_2$  軸および  $\sigma_1$  軸の方向は MTL からの距離との相関は認められず, 広域的な特徴は明らかにできなかったが, 岩体の違いによらず約 10 km の範囲内の試料同士では集中を示す。

第 4 章では足助剪断帯の変形微小構造を利用して, 活動時の古応力方向を推定するとともに, 温度や差応力といった変形条件についても検討した。本章ではまず, マイロナイト化したシュードタキライト中の動的再結晶石英から変形条件を推定した。マイロナイトの複合面構造は正断層成分を含む左ずれのセンスを示し, 剪断帯の姿勢と線構造の方向から推定される  $\sigma_1$  軸および  $\sigma_3$  軸の方向 (沈下方向 / 沈下角) は  $183^\circ / 63^\circ$  および  $310^\circ / 14^\circ$  を示した。動的再結晶石英の結晶方位分布から推定される変形温度および変形機構は, 約  $300^\circ\text{C}$  において転位クリープと粒界すべりの変形機構遷移条件付近で変形が進行したことを示し, 平均粒径から推定される差応力は 110–130 MPa を示した。次に, シュードタキライト中の杏仁構造を充填する方解石の変形双晶を利用して変形条件を推定した。双晶面の姿勢と双晶の方向分布から推定される  $\sigma_1$  軸および  $\sigma_3$  軸の方向 (沈下方向 / 沈下角) は  $228^\circ / 55^\circ$  および  $320^\circ / 1^\circ$  を示し, 双晶の形態から推定される変形温度および双晶形成率から推定される差応力は  $150\text{--}200^\circ\text{C}$  および 40–80 MPa を示した。母岩の伊奈川花崗閃緑岩の冷却曲線と変形時の温度条件を比較すると, 石英の塑性変形は約 70 Ma に, 方解石の双晶変形は約 50 Ma に生じたと考えられる。剪断帯が破砕–塑性遷移領域で繰り返し変形を被ったことや, 方解石の変形双晶から推定された主応力軸の方向が, 方解石の双晶変形以前に形成された小剪断帯の姿勢および線構造の方向と調和的であることから, 足助剪断帯は 70–50 Ma の間, SSE 方向に高角に沈下する  $\sigma_1$  軸および NW–SE 方向に低角に沈下する  $\sigma_3$  軸を持つ古応力場で変形したと結論された。

第 5 章では各章での議論をもとに白亜紀末から古第三紀初期における領家–山陽花崗岩中の広域応力場について議論した。HC の形成時期 (75–65 Ma) と足助剪断帯の活動時期 (70–50 Ma) は一部で重複しており, 足助剪断帯周辺の HC および足助剪断帯中の変形構造から推定された  $\sigma_3$  軸が同様の方向を示すことが明ら

かになった。すなわち HC から推定された  $\sigma_3$  軸は試料スケールの古応力ではなく、剪断帯の形成のようなマクロスコピックな変形にまで影響を与えた広域古応力を反映している可能性が高い。そこで、HC から推定した  $\sigma_3$  軸の方向が 75–65 Ma の広域古応力場を記録しているとみなして、その形成要因について考察した。

地殻の広域応力場は第一次オーダーでプレート境界にかかる応力に規定されると考えられている。東アジア東縁の古地理図を復元する研究は数多くなされており、HC 形成時期には MTL に対して反時計回りに 60–70° の方向にイザナギプレートが沈み込む説や、MTL に対して反時計回りに 80° の方向に太平洋プレートが沈み込む説などが考えられている。花崗岩体北縁地域で推定された  $\sigma_1$  軸および  $\sigma_2$  軸は MTL に対して反時計回りに 70° の方向に走向を持つ大円上に分布しており、この大円の走向とプレート収束方向がおおむね一致することは、 $\sigma_1$  軸および  $\sigma_2$  軸の方向がプレート収束に伴う圧縮の影響を受けた可能性を示唆する。この場合  $\sigma_3$  軸の方向は大円の極すなわち MTL と平行な方向に集中すると考えられる。

一方、MTL 近傍で推定された古応力はプレート収束に伴う圧縮では説明できない。そこで、MTL の活動史との関連性を検討した。MTL は 63–58 Ma (市之川時階) に正断層運動の活動が知られており、この活動によって領家帯と三波川帯が接合したと考えられている。この正断層をもたらず応力場は、MTL 近傍の領家帯中の HC から推定された、MTL と直交方向の  $\sigma_3$  軸と調和的である。HC の形成時期 (75–65 Ma) は市之川時階よりも古いものの、MTL 近傍では市之川時階の運動の準備段階として MTL に直交する方向に  $\sigma_3$  軸をもつ伸張応力場が発達していた可能性が今回新たに明らかとなった。本研究の結果からは市之川時階の正断層運動がいかにして引き起こされたかを結論することはできないが、三波川変成岩の上昇過程と関連して、MTL に直交する伸張応力が作用していた可能性を示唆する。

以上より、HC から推定される  $\sigma_3$  軸の方向は、プレート収束方向の影響による MTL と平行方向の集中と、MTL の正断層運動に関連する古応力の影響による MTL と直交方向の集中とのせめぎ合いで決まっていると考えられる。後者の影響は MTL からの距離が離れるほど弱くなると考えられ、それを反映して HC から推定された  $\sigma_3$  軸の方向が MTL からの距離と弱い相関を示したと結論づけられる。

要約すると、本研究では後期白亜紀花崗岩類に発達する変形微細構造を利用して古応力解析と変形条件の推定が行われ、白亜紀末から古第三紀初期の広域応力場が推定された。その結果、MTL から離れた地域ではプレート収束の影響を、MTL 近傍の地域では市之川時階の MTL の正断層運動に関連する古応力の影響をより強く受けたと結論づけられた。市之川時階の正断層運動に関する研究は三波川帯の変形解析からの知見が主であったが、正断層運動の原因となる古応力の方向を領家花崗岩から直接的に明らかにしたことは本研究の最も重要な成果である。

## 早稲田大学 博士 (理学) 学位申請 研究業績書

氏名 金井 拓人 印

(2017年2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
論文	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <u>金井拓人</u>・山路 敦・高木秀雄, 2014, 混合ビンガム分布を適用したヒールドマイクロクラックによる古応力解析: 中部地方の領家花崗岩類における例. 地質学雑誌, <b>120</b>, 23-35.</li> <li><u>金井拓人</u>・森山功二郎・向吉秀樹・高木秀雄, 2015, 岩石薄片の SEM-EBSD 分析における試料前処理条件の紹介: 石英および方解石の例. 地質学雑誌, <b>121</b>, 421-427.</li> <li>○ <u>Kanai, T. and Takagi, H.</u>, 2016, Determination of the stress conditions of the ductile-to-brittle regime along the Asuke Shear Zone, SW Japan. <i>Journal of Structural Geology</i>, <b>85</b>, 154-167.</li> <li>○ <u>金井拓人</u>・高木秀雄, 中部地方の後期白亜紀花崗岩中に発達するヒールドマイクロクラックを用いた古応力解析: 特に中央構造線と直交方向に沿った変化について. 地質学雑誌, 掲載決定.</li> <li><u>綿貫峻介</u>・<u>金井拓人</u>・坂 秀憲・高木秀雄, 青森県白神山西部に発達する入良川マイクロナイト帯の変形. 地質学雑誌, 掲載決定.</li> </ul>
講演	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <u>金井拓人</u>・会沢辰介・高木秀雄, 2012, 中部地方南部の領家花崗岩中のマイクロクラックを用いた古応力場の復元. 地球惑星科学連合大会 2012, SCG68-P07.</li> <li>○ <u>金井拓人</u>・高木秀雄・山路 敦, 2013, 中部地方領家花崗岩中に発達するヒールドマイクロクラックによる新岩脈法を用いた古応力状態の復元. 日本地質学会第 120 年学術大会 R15-P-12.</li> <li>高木秀雄・佐藤隆恒・原田 尚・<u>金井拓人</u>・星 博幸, 2013, 丹沢トータル岩および富士川深成岩類中の石英のマイクロクラックから推定した古応力場の復元. 伊豆衝突帯地質研究サミット.</li> <li>高田亜以子・<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2014, 関東山地三波川帯長瀬地域における石英脈の三次元方位と方解石の変形双晶を用いた古応力場解析. 日本地質学会第 121 年学術大会, R15-P-3.</li> <li>○<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2014, 足助剪断帯のシュードタキライトに発達するアミグデールを充填する方解石の変形双晶を用いた古応力解析. 日本地質学会第 121 年学術大会, R15-P-4.</li> <li><u>金井拓人</u>・向吉秀樹・高木秀雄, 2015, SEM-EBSD を用いた結晶方位解析における試料前処理条件の検討: 花崗岩中の石英結晶を例に. 地球惑星科学連合大会 2015, SSS29-P04.</li> <li>○<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2015, シュードタキライトとマイクロナイトを利用した足助剪断帯変形環境の推定. 地球惑星科学連合大会 2015, SCG57-24.</li> <li>田野孝太朗・<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2015, 断層岩に含まれる石英のカソードルミネッセンスのスペクトル特性. 日本地質学会第 122 年学術大会, R12-P-3.</li> <li>池谷昌美・<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2015, 画像解析に基づく脆性断層岩中石英粒子の粒度分布の推定. 日本地質学会第 122 年学術大会, R12-P-19.</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>綿貫峻介・坂秀憲・<u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2016, 青森県白神山地西部に発達するマイロナイト帯の変形環境の推定. 地球惑星科学連合大会 2016, S-MP43-P12.</p> <p>田野孝太郎・<u>金井拓人</u>・綿貫峻介・高木秀雄, 2016, マイロナイトに含まれる再結晶石英のカソードルミネッセンスのスペクトル特性. 日本地質学会第 123 年学術大会, R12-P-4.</p> <p>○ <u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2016, 中部地方の領家花崗岩中に発達するヒールドマイクロクラックを用いた古応力解析：特に中央構造線と直交する方向での変化について. 日本地質学会第 123 年学術大会, 120, R14-O-7.</p>
その他 (紀要論文)	<p><u>金井拓人</u>・高木秀雄, 2015, SEM-EBSD 法の測定結果から結晶軸の方向を求める R 言語用関数. 学術研究 (自然科学編), 63, 1-11.</p>
その他 (講演)	<p><u>金井拓人</u>, 2016, 結晶方位解析に基づく岩石の変形環境の推定. EBSD セミナー2016, オックスフォード・インストゥルメンツ株式会社.</p>