

論文の内容の要旨

論文題目 カルデラ境界断層の形成および後カルデラ期における再活動に関する
研究—フィールド調査とアナログ砂箱実験からの検討—
(Formation and post-caldera reactivation of caldera boundary faults:
integration of field surveys and analogue sandbox experiments)

氏 名 三條 竜平

カルデラは火山活動により地下のマグマ溜まりが収縮し、その天井をなす岩盤が自重で沈降することで生じる陥没構造である。カルデラ形成噴火は火山活動の中でも特に大規模で、火山災害を広範囲にもたらすと同時に、全球規模の環境変化を引き起こす。よってカルデラ活動は、火山地域の地形・地質構造発達史の復元のみならず、火山防災や地球環境変動予測の観点でも重要な現象である。

カルデラの辺縁には、陥没構造を限る環状断層（境界断層）が存在し、これが変位することでカルデラ陥没が生じる。しかし、境界断層は堆積物に埋積され、その構造と運動を直接観察することは困難である。このため、境界断層の形成を縮小再現するアナログ砂箱実験が行われてきた。その結果、境界断層とカルデラ地形は（１）断層を伴わない地殻のたわみ下がり、（２）カルデラの外側に傾斜する環状逆断層、（３）カルデラの内側に傾斜する環状正断層、の順で発達することが分かってきている。そして近年の画像解析技術の普及で、実験のより詳細な解析が可能となった。そこで本研究は第一に、画像解析を用いたアナログ砂箱実験により、境界断層が形成される過程と、これに伴う地表の変動を詳細に観察することを目的とする。

境界断層は、カルデラ形成以後の時代（後カルデラ期）に、広域応力により再活動することが指摘されている。地表を変位させる断層の再活動は、地震災害を引き起こす可能性が高い。しかし、この現象の具体的な研究例は乏しく、その普遍性や、これに伴う地形変化はよく分かっていない。そこで、フィールド調査により、後カルデラ期の広域応力による境界断層の再活動と、これに伴う地形変化を究明することを、本研究の第二の目的とする。ここではカルデラ内に活断層が分布し、当該現象の発生が疑われる、北海道赤井川カルデラを対象とする。

そして第三の目的として、アナログ砂箱実験で再現された境界断層の構造を基に、赤井川カルデラ境界断層の三次元構造を推定するとともに、境界断層が地殻中の不連続面としてはらき、再活動に至る条件について論じる。

第１章では、以上の研究背景と目的を述べ、本論文の構成を示した。本論文は６章で構成され、第２章は研究方法の説明、第３章は、アナログ砂箱実験による境界断層の形成過程と地表変動の三次元的観察、第４章は、フィールド調査による赤井川カルデラ境界断層のテクトニックな再活動による地形変化の解明、第５章は、アナログ砂箱実験とフィールド調査を基にした、赤井川カルデラ境界断層の地下構造の推定と再活動プロセ

スの考察、第 6 章は全体のまとめである。以下この順で記述する。

第 2 章では、第 3 章のアナログ砂箱実験、および第 4 章のフィールド調査の実施方法を述べた。第 3 章のアナログ砂箱実験の主目的は、赤井川カルデラ境界断層の地下構造の推定であるから、赤井川カルデラと同等の直径 10^0 km のカルデラと相似となるように実験条件を設定した。また、赤井川カルデラ活動時のマグマ溜まりの深度を推定し、それを包含するように実験でのマグマ溜まり深度を 3 段階設定した。また、地下の境界断層の形成・運動と地表変動とを対応付けるために、カルデラの断面と平面の同時観察が可能な実験装置を構築した。実験は、PIV ソフトを用いた断面と平面それぞれのベクトル解析による運動状態の観察、SfM ソフトで作成した DSM の判読による地形変化の観察、これら解析結果を踏まえた三次元構造の発達過程の解釈、という順序で進めた。赤井川カルデラの北西縁には、地形的カルデラ縁と平行に赤井川断層が分布し、後カルデラ期の扇状地面を垂直変位させている。そこで第 4 章では、空中写真等の判読による断層変位地形と変位基準面のマッピング、テフクロノロジーによる変位基準面の編年を行った。そして断層変位量を地形面の年代で除することで、平均変位速度を算出した。

第 3 章のアナログ砂箱実験において、地表面と断面で観察された地殻の運動状態、ならびに、地形変化の総合解釈は図 1 の通りである。マグマ溜まりの収縮量が大きくなると、図 1A から図 1F の順で、地下の構造と地表の変動が生じる。

図 1A：マグマ溜まり直上における断層を伴わない地殻のたわみ変形（ダウンサグ）。

図 1B：マグマ溜まり肩部での砂箱の外側に向かって傾斜する逆断層（Outward-Dipping Reverse Fault; ODRF）の発生。地表のダウンサグ域の拡大、同域内の最大水平速度分布位置の収束。

図 1C：ODRF 一部の地表到達と円弧状逆断層の成立、および円弧状逆断層に向かう地表の傾動（トラップドア陥没）。

図 1D：ODRF 全体の地表到達と環状逆断層の成立、および地表の鉛直下方への変位（ピストン陥没）。

図 1E：ODRF 上盤側における、カルデラ内側へ傾斜する高角正断層（Inward-Dipping Normal Fault; IDNF）の発生と円弧状正断層の成立。断層内側ブロックの斜め下方への変位（トラップドア陥没）。

図 1F：IDNF の全周への伝播と環状正断層の成立。断層内側ブロックのピストン陥没。

本研究で得られた新知見として、① マグマ溜まりの初期収縮とともに、ダウンサグ域の面積は拡大するものの、収縮量が閾値を超えると最大変位速度の現れる位置は伏在 ODRF 近傍へ局在化する、② マグマ溜まりの均一な収縮時にも、ODRF および IDNF の形成初期にトラップドア陥没が生じる、の 2 点が挙げられる。とくに前者は、ダウンサグ変形の成長を、カルデラ噴火の前駆現象として位置づける足掛かりを与えうる。また、後者は、報告事例の多いトラップドア陥没を生じさせた地下の断層構造や、マグマ溜まり収縮量を推定するための新たな根拠を与えうる。このように、カルデラ活動期における地表変動の解析が、カルデラ噴火の発生時期や規模、マグマ溜まりの動態の解明に有用である可能性が示された点は、とくに意義深い。

第 4 章では、赤井川断層の活動を復元するために実施したフィールド調査の結果を記載し、同断層の活動性を評価した。

赤井川カルデラ外輪山麓には 2 段の扇状地面が分布する。これらの扇状地面の形成年代は、扇状地面構成層に含まれる再堆積テフラの年代から、いずれも 46 ka 以降と判断される。

赤井川断層は、カルデラの北西縁に分布し、地形的カルデラ縁と概ね平行して円弧状に伸びる。こうした赤井川断層の位置と走向は、当断層がカルデラ境界断層であることを示唆する。当断層は前述の扇状地面を、南東側（カルデラ内側）低下のセンスで変位させ、また変位の累積性も認められる。以上より、赤井川断層は後カルデラ期に繰り返し活動した境界断層であると解釈できる。そして 46 ka 以降の断層変位量は最大 9 m 以上、平均変位速度は 0.2 m/kyr 以上と求められた。

赤井川カルデラでは 46 ka 以降、マグマ溜まりの収縮をもたらすような火山噴火の痕跡はない。また赤井川断層は概ね NE-SW 走向で、この地域の広域圧縮応力軸の方位と直交する。よって赤井川カルデラ境界断層の再活動は、マグマ溜まりの収縮ではなく、広域圧縮応力が原因と考えられる。そして後カルデラ期に再活動が繰り返されることで、カルデラ床が相対的に沈降してきたと解釈される。

第 5 章ではまず、砂箱実験結果を基に赤井川カルデラの地下構造を推定した。赤井川カルデラの沈降量を実験スケールに換算すると、ODRF は生じるものの IDNF の形成までは至らない量（図 1 の B から D）となる。すなわち当カルデラの境界断層は ODRF から成り、赤井川断層（境界断層の北西部分）は北西傾斜の逆断層と解釈される。この北西傾斜の逆断層に NW-SE 方向の広域圧縮応力が加わることで、断層面を縦ずれ変位させるせん断応力が生じ、再活動に至ったと考えられる。このように、砂箱実験とフィールド調査を組み合わせることで、カルデラ境界断層の形成から、テクトニックな再活動に至る過程を論じることができた。

つづいて、境界断層の初生的構造の差異による再活動様式の変化、そして再活動現象の普遍性を考察した。まず沈降量の大きいカルデラで生じる IDNF は、圧縮応力場の下で横ずれ変位すると考え、テクトニックな再活動の報告がある宮城県鬼首カルデラは、その例にあたることを論証した。またカルデラ充填堆積物の厚さと地震の規模によっては、境界断層の再活動は必ずしも断層変位地形として現れない。したがって実際には、現在知られているより多くのカルデラで再活動が生じている可能性を指摘した。

第 6 章では、以上で述べた第 3 章から第 5 章までの結果を要約し、結論とした。今後はマグマの流動や広域応力を取り入れたアナログ砂箱実験や、境界断層の再活動事例の蓄積により、境界断層の形成から再活動に至る一連のプロセスのさらなる理解と、関連するハザード評価への応用が期待される。

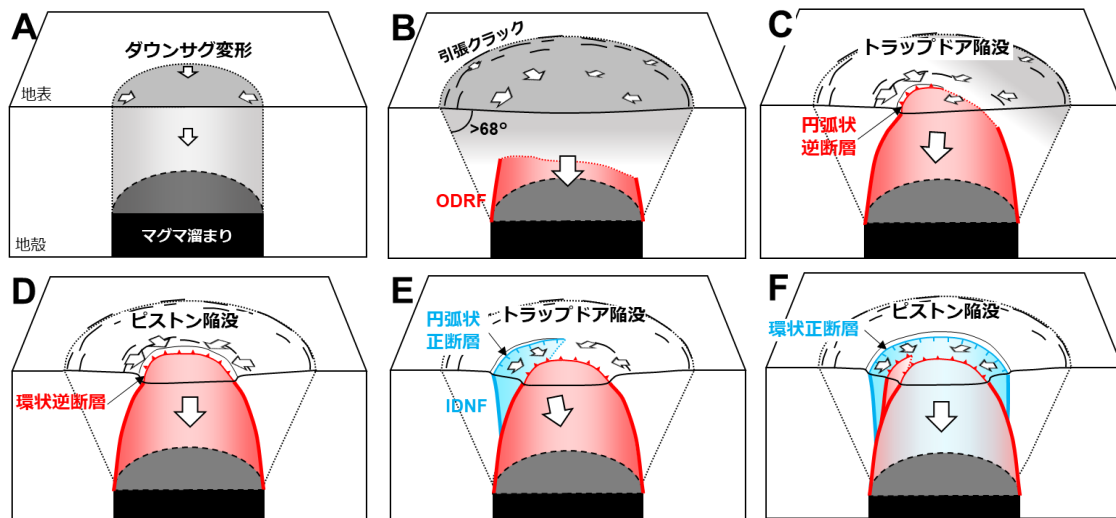


図 1. 境界断層の形成と地表変動の解釈図.
A から F の順で進行する. 詳細は本文に記載.