

博士論文（要約）

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
ーフィールド調査とアナログ砂箱実験からの検討ー

(Formation and post-caldera reactivation of caldera boundary faults:
integration of field surveys and analogue sandbox experiments)

三條 竜平

目 次

第 1 章	研究背景・目的	1
第 2 章	研究手法	2
第 3 章	境界断層の初生的形成と地形変化の実験観察	2
第 4 章	赤井川カルデラ後カルデラ期の断層活動と地形変化	3
第 5 章	総合考察	4
第 6 章	結論	5

図目次

図 1.	境界断層の形成と地表変動の解釈図	6
図 2.	赤井川カルデラおよびその周辺の地形判読結果	6

第1章 研究背景・目的

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。よってカルデラ火山活動は、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。

第2章 研究手法

自然界のカルデラの大きさは、直径数 km から数 10 km とオーダーレベルの幅を有する。したがって、自然界のすべてのカルデラを包含するアナログ砂箱実験を行うことはできない。そこで、第5章にて赤井川カルデラ境界断層の地下構造を推定することを踏まえ、第3章の実験では赤井川カルデラ（直径 5–7 km）と同等の直径 10^0 km のカルデラと相似となる条件を設定する。具体的には、直径 10^0 km のカルデラを直径 10 cm 程度（縮尺 1/1 万–1/10 万）で再現する。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（4–10 km）、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（5, 10, 15 cm）設け、それぞれの条件で実験を行う。そして、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、という順序で進める。

第4章のフィールド調査の対象である赤井川カルデラは、カルデラ内に断層変位地形が分布し、かつ後カルデラ期の火山活動が低調であるため、境界断層のテクトニックな再活動を議論するうえで適切と言える。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南東側低下のセンスで変位させている。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となる地形面のマッピング、SEM-EDS を用いたテフラ試料の化学組成分析、テフロクロノロジーによる地形面の編年を行う。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する。以上の結果を踏まえて、赤井川カルデラ後カルデラ期の断層活動と地形変化を復元する。

第3章 境界断層の初生的形成と地形変化の実験観察

本章では、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アナログ砂箱実験を行った。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。マグマ溜まり深度を大きくした場合，ODRF および IDNF の形成に必要なマグマ溜まり収縮量も大きくなる傾向が見出された。しかし，境界断層の形成順（ODRF→IDNF），傾斜方向，変位センスは，マグマ溜まり深度に依らず共通していた。

本研究で得られた新知見として，① マグマ溜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。

第 4 章 赤井川カルデラ後カルデラ期の断層活動と地形変化

本章では，赤井川断層の活動を復元するためにフィールド調査を実施し，その結果を基に同断層の活動とこれに伴う地形変化を復元した。また同断層がカルデラ境界断層起源であり，後カルデラ期の広域応力で再活動したことを，地形学的証拠から論じた。

空中写真，DEM，DSM を用いた地形判読，および地形面構成層の露頭観察の結果，赤井川カルデラ周辺には 2 段の湖成段丘面（湖成段丘面 I; LaI 面，湖成段丘面 II; LaII 面）と，4 段の河成段丘面（高位段丘面; Up 面，中位段丘面 I; MdI 面，中位段丘面 II; MdII 面，低位段丘面; Lo 面）が分布することが分かった（図 2）。また，赤井川断層はカルデラ北西部において，地形的カルデラ縁と概ね平行に円弧状に分布し（図 2），LaII 面，MdI 面，MdII 面を南東側が低下するセンスで変位させることが分かった。そして，MdI 面・MdII 面構成層に含まれる再堆積テフラ粒子の化学組成分析結果から，これは 46 ka の降下テフラが起源であると同定された。すなわち，MdI 面・MdII 面の形

成年代は 46 ka 以降であることが判明した。以上の断層変位地形分布、地形面形成年代、および広域応力場から、後カルデラ期の断層活動は次のように復元される。

- (1) 赤井川断層はカルデラ北西縁に分布し、かつ地形的カルデラ縁と平行する NE-SW 走向であることから、境界断層起源と推定される。
- (2) 当断層は 46 ka 以降に形成された MdI 面・MdII 面を変位させることから、46 ka 以降に活動しており、その鉛直変位量は 9 m 以上、平均鉛直変位速度は 0.2 m/kyr 以上である。
- (3) 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が生じた痕跡はない。
- (4) 赤井川断層は概ね NE-SW 走向であり、この地域の広域圧縮応力軸の方位と直交している。
- (5) 上記 (3) (4) を踏まえると、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。

このように赤井川カルデラでは、後カルデラ期の広域応力によって、境界断層が繰り返し再活動したと考えられる。その結果、カルデラ床が相対的に沈降するような地形変化が続いてきたと解釈される。

第 5 章 総合考察

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。よって実際には、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 結論

本研究は、(1) 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、(2) 赤井川カルデラを対象とした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、(3) 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こと、という3つの目的を設定した。

目的(1)を達成するためのアナログ砂箱実験(第3章)結果に基づく、境界断層の形成過程と地形変化の詳細なモデル化により、ダウンサグおよびトラップドア陥没に関する新知見の獲得ができた。目的(2)を達成するためのフィールド調査(第4章)の結果、赤井川カルデラ境界断層の再活動時期と平均変位速度の算出、地形変化の復元、そして再活動の要因の推定ができた。目的(3)を達成するための、実験とフィールド調査の総合的解釈(第5章)により、赤井川カルデラ境界断層の初生構造と再活動の力学的過程が推定できた。さらに、本研究と既往研究で報告された再活動事例を基に、境界断層再活動の発生条件と様式についても論じた。

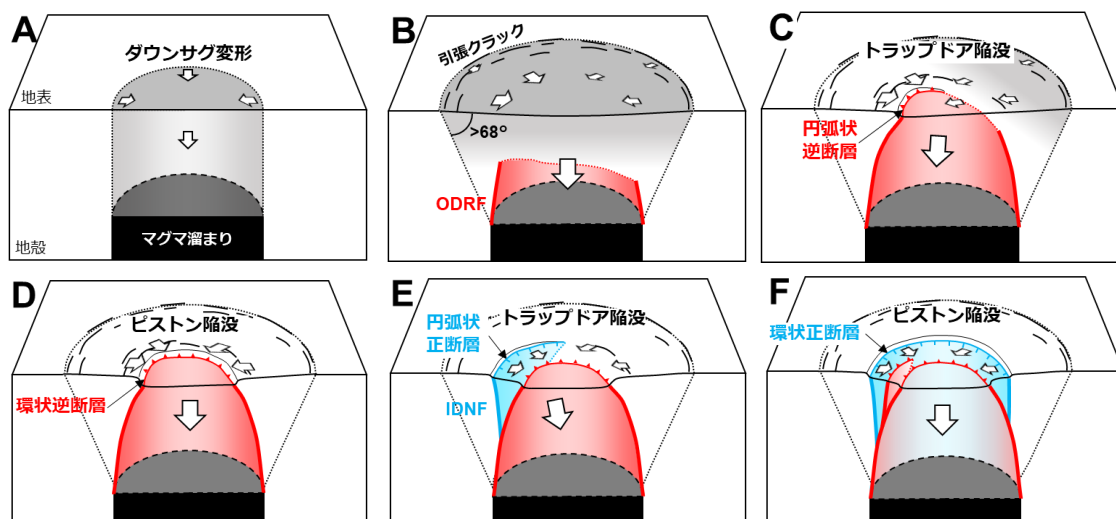


図 1. 境界断層の形成と地表変動の解釈図。
A から F の順で進行する。詳細は本文に記載。

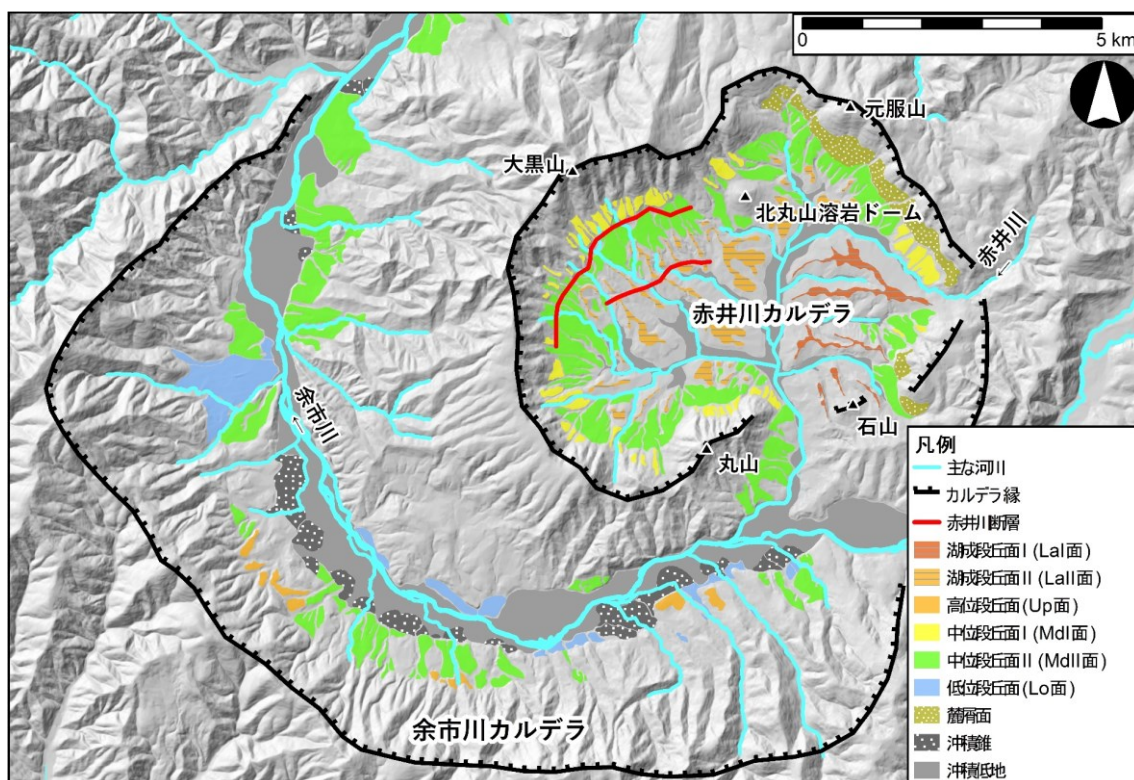


図 2. 赤井川カルデラおよびその周辺の地形判読結果。
赤井川断層は LaII 面, MdI 面, MdII 面を南東側低下のセンスで変位させる。