学位論文題名

Subsurface structure of caldera (cauldron)
and its development

(大規模火山性陥没構造の形成過程)

学位論文内容の要旨

近年においてなお陥没カルデラ地下構造の地球惑星科学的理解は不足しており、大規模な火砕噴火現象を解明する上で大きな問題となっている。詳細かつ定量的な評価により陥没カルデラ構造変化を検討するためには、内部構造の露出したカルデラ火山体における研究が有効である。また、カルデラ形成メカニズムを考える上で、この定量的・理論的な構造の定義が重要視されている。このことから本研究ではいくつかの侵食されたカルデラ火山体(コールドロン：火山性陥没盆地)においてその構造と特性の研究を行った。

東北日本、鮮新世に活動した土呂部カルデラ(径13×6km)中には、カルデラを形成した火砕流堆積物と考えられる土呂部火砕流堆積物Aとそれに引き続く土呂部火砕流堆積物B中に megabreccia block 相の存在が発見された。このカルデラの地下構造は断片化したカルデラ床をもつ piecemeal 型カルデラの特徴を持つ。Megabreccia block 相はカルデラ基盤岩からなる多面体の塊状ブロックで数百mに達する径を持ち、孤立化した状態で火砕流堆積物中に存在する。この block 相における古地磁気研究の結果から、これらの多くは岩石崩落、地すべりなどの斜面崩壊堆積物としてもたらされたことが示唆される。一方あるブロックはカルデラ基盤岩と一致した磁化方位を持ち、磁化方位を保ったまま下方へ沈降したすなわち断片化したカルデラ床であると考えられる。

直径3km以下の小型陥没カルデラの地下構造は一般にじょうご型をもつとされていたが、関東地方北西部に位置する熊倉コールドロン(径2km)は塊状の床をもつ小型コールドロンである。埋積堆積物の総体積は1.7km³程度である。このコールドロン中の塊状基盤岩はコールドロン埋積堆積物によって覆われ、顕著な破碎構造等は認められないにも関わらず、コールドロン外の基盤岩の分布と比較した垂直変位は400mにも達する。従って沈降した塊状床の一部であることを示唆する。

西南日本に位置する熊野コールドロン(径41×23km)には火砕噴火とそれに続くコールドロンの陥没を引き起こしたと考えられる巨大な火砕岩脈が分布する。この火砕岩脈はコールドロンの南縁の弧状断層中に貫入しており、この断層の断層角礫岩と岩脈の地質学的関係から断層の形成中および形成後に岩脈が貫入していることが示された。従って南北の環状断層で境されるコールドロン基盤岩は良く露出した塊状のコールドロン陥没床と考えられる。このコールドロンは北北東-南南西に伸張した楕円状の陥没構造を持ち、piecemeal 型カルデラを特徴づける床の顕著な断片化は認められない。断層中の条線から推測される陥没床の動きは、南から見て時計回りに東へ20°回転しており、ちょうつがい状構造モデルと一致する。コールドロンの構造特性を評価するためにコールドロン周辺に分布する小断層を用いた古応力場の推定を行った結果、放射状と同心円状の最大伸張応力軸(σ_3)の分布が認められ、

これはコールドロン周辺での隆起が起こったことを示唆する。この結果は鉱脈、岩脈、節理を用いた同様の検討からも指示される。さらに、これら小断層群の変位レートをサイズ分布関数の計算により求めたところ、べき指数0.54を示す0.58cm~13cm/年の変位レートが得られた。この値はこれまでに知られている火山-造構性陥没地の変位レートとほぼ一致する。

上記および世界中で報告されているカルデラ(コールドロン)の床の断片形状および断層垂直変位量を用いて、統計的手法によるカルデラ構造の定量的評価を行った。測定された 10^2 ~ 10^4 mオーダーのカルデラ床断片のアスペクト比(平均0.5)とサイズ比(平均0.75)は各々対数軸上で直線回帰され、フラクタル構造であることを示す。従ってカルデラの破碎度(k)は以下に示すカルデラ径(D_c)とその中の最大カルデラ床断片(D_s)によって表すことができる。

$$\frac{D_s}{D_c} = k$$

測定したカルデラ床断片全体のサイズ分布を質量分布に換算すると、実験から得られている2次元物体の垂直方向からの破壊の値に一致し、カルデラ形成メカニズムと調和的である。しかし3次元破壊様式をもつ小型カルデラの場合はこの結果の適用は考慮される必要がある。また断層の垂直変位量のサイズ分布($\epsilon-1$)と上述のサイズ分布の関係からもこの結果の妥当性が示される。熊野コールドロンにおけるpiston cylinder型カルデラの垂直変位量の指数 $\epsilon-1=0.54$ と上述のサイズ分布の指数から、断層垂直変位量を用いたカルデラ構造変化の指数は0.50~1.0(あるいはそれ以上)になる可能性がある。全体的な床の破碎度から見たカルデラ構造は k と $\epsilon-1$ で示されると考えられ、これらはカルデラ構造の変化を起こす要因を議論するのに有効である。

上述の成果から最後に、内部構造の露出したカルデラ火山体において地質構造および断層サイズ分布を計測することにより、そのカルデラの全体的構造や形成過程が定量・物理的に評価でき、個々のカルデラ間の相違が比較できうることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宇 井 忠 英
副 査 助 教 授 新 井 田 清 信
副 査 講 師 川 村 信 人
副 査 助 教 授 鎌 田 桂 子 (神戸大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Subsurface structure of caldera (cauldron) and its development

(大規模火山性陥没構造の形成過程)

近年、大規模な火山性陥没構造（カルデラ）の研究は国際的に見て盛んに行われている。しかし、その多くは岩石学及び地球物理学的な見地から陥没構造やマグマ溜まりの構造を明らかにすることを目的としたものである。この問題を構造地質学的な見地から解明を試みることは未開拓の分野であった。

本論文はこのような状況において、構造地質学的な調査手法とデータ処理を行ってカルデラの浅部地下構造に新たに制約条件を与えることを試みたものである。詳細かつ定量的な評価により陥没カルデラ構造変化を検討するためには、内部構造の露出したカルデラ火山体における研究が有効である。本研究ではいくつかの侵食されたカルデラ火山体(コールドロン：火山性陥没盆地)においてその構造と特性の研究を行った。

東北日本、鮮新世に活動した土呂部カルデラ(径 13×6km)中には、カルデラを形成した火砕流堆積物と考えられる土呂部火砕流堆積物 A とそれに引き続く土呂部火砕流堆積物 B 中に megabreccia block 相の存在が発見された。このカルデラの地下構造は断片化したカルデラ床をもつ piecemeal 型カルデラの特徴を持つ。Megabreccia block 相はカルデラ基盤岩からなる多面体の塊状ブロックで数百 m に達する径を持ち、孤立化した状態で火砕流堆積物中に存在する。この block 相における古地磁気研究の結果から、これらの多くは岩石崩落、地すべりなどの斜面崩壊堆積物としてもたらされたことが示唆される。一方あるブロックはカルデラ基盤岩と一致した磁化方位を持ち、磁化方位を保ったまま下方へ沈降したすなわち断片化したカルデラ床であると考えられる。

直径 3km 以下の小型陥没カルデラの地下構造は一般にじょうご型をもつとされていたが、関東地方北西部に位置する熊倉コールドロン(径 2km)は塊状の床をもつ小型コールドロンである。埋積堆積物の総体積は 1.7km³ 程度である。このコールドロン中の塊状基盤岩はコールドロン埋積堆積物によって覆われ、顕著な破碎構造等は認められないにも関わらず、コールドロン外の基盤岩の分布と比較した垂直変位は 400m にも達する。従って沈降した塊状床の一部であることを示唆する。

西南日本に位置する熊野コールドロン(径 $41 \times 23 \text{ km}$)には火砕噴火とそれに続くコールドロンの陥没を引き起こしたと考えられる巨大な火砕岩脈が分布する。この火砕岩脈はコールドロンの南縁の弧状断層中に貫入しており、この断層の断層角礫岩と岩脈の地質学的関係から断層の形成中および形成後に岩脈が貫入していることが示された。従って南北の環状断層で境されるコールドロン基盤岩は良く露出した塊状のコールドロン陥没床と考えられる。このコールドロンは北北東-南南西に伸張した楕円状の陥没構造を持ち、piecemeal 型カルデラを特徴づける床の顕著な断片化は認められない。断層中の条線から推測される陥没床の動きは、南から見て時計回りに東へ 20° 回転しており、ちょうつがい状構造モデルと一致する。コールドロンの構造特性を評価するためにコールドロン周辺に分布する小断層を用いた古応力場の推定を行った結果、放射状と同心円状の最大伸張応力軸(s_3)の分布が認められ、これはコールドロン周辺での隆起が起こったことを示唆する。この結果は鉱脈、岩脈、節理を用いた同様の検討からも指示される。さらに、これら小断層群の変位レートをサイズ分布関数の計算により求めたところ、べき指数-0.54 を示す $0.58 \text{ cm} \sim 13 \text{ cm/年}$ の変位レートが得られた。この値はこれまでに知られている火山-造構性陥没地の変位レートとほぼ一致する。

上記および世界中で報告されているカルデラ(コールドロン)の床の断片形状および断層垂直変位量を用いて、統計的手法によるカルデラ構造の定量的評価を行った。測定された $10^2 \sim 10^4 \text{ m}$ オーダーのカルデラ床断片のアスペクト比(平均 0.5)とサイズ比(平均 0.75)は各々対数軸上で直線回帰され、フラクタル構造であることを示す。従ってカルデラの破碎度(k)はカルデラ径(D_c)と其中的最大カルデラ床断片(D_s)の比によって表すことができる。

測定したカルデラ床断片全体のサイズ分布を質量分布に換算すると、実験から得られている 2 次元物体の垂直方向からの破壊の値に一致し、カルデラ形成メカニズムと調和的である。しかし 3 次元破壊様式をもつ小型カルデラの場合はこの結果の適用は考慮される必要がある。また断層の垂直変位量のサイズ分布と上述のサイズ分布の関係からもこの結果の妥当性が示される。熊野コールドロンにおける piston cylinder 型カルデラの垂直変位量の指数=0.54 と上述のサイズ分布の指数から、断層垂直変位量を用いたカルデラ構造変化の指数は 0.50~1.0(あるいはそれ以上)になる可能性がある。全体的な床の破碎度から見たカルデラ構造はこれら破碎度(k)と垂直変位量の指数で示されると考えられ、これらはカルデラ構造の変化を起こす要因を議論するのに有効である。

上述の成果から最後に、内部構造の露出したカルデラ火山体において地質構造および断層サイズ分布を計測することにより、そのカルデラの全体的構造や形成過程が定量・物理的に評価でき、個々のカルデラ間の相違が比較できうることを明らかにした。

これを要するに、著者は、大規模火山性陥没構造において火砕流の噴火以前に一旦は隆起したこと、火砕流噴火に伴う陥没過程においてカルデラ床は破碎していないことを論証するという新知見を得たものであり、大規模火山性陥没構造の研究に大きく貢献した。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。