

九州のグラーベンと内在コールドロン群との関係 - とくに先行隆起との関連について -*

久保田喜裕 **

Genetic relationship between graben and clustered cauldrons in Kyushu, Japan -With special reference to pre-collapse uplifting-*

KUBOTA Yoshihiro**

Abstract Relationship between Beppu-Shimabara graben and Kagoshima graben with cauldrons in them are examined with special reference to uplifting preceding collapse.

Collapse style of cauldrons in Kyushu is similar to Motojuku double collapse type cauldrons that occurred before and after the volcanism. In scale model experiments radial fracture system at the central uplift area and “tilted topography” surrounding the collapse were observed. “Connecting fractures” were formed at the same site if uplift areas are more than one. With rise of magma, collapse seems to occur but if the conduit of magma is not reached to the surface, no collapse after eruption occurs. Therefore, whether or not two-stage collapse is formed depends on the volume of magma outpouring to the surface. When multiple large-scale calderas are formed, large depression surrounding the calderas would be created.

The shape of the depression is controlled by the arrangement of magma chambers. When the chambers are formed as chain, elongated depression like Kagoshima graben is formed. If cluster of chambers are created wide depression like Beppu-Shimabara graben is formed.

Key Words : Kyushu, Kagoshima Graben, Beppu-Shimabara Graben, scale model experiments, clustered cauldrons, polygonal collapse, collapse caldera, pre-collapse uplifting, a large tectonic depression

はじめに

堆積盆地の形成機構は地質学の根本に関わる古くて新しいテーマである。近年、リフトやグラーベンといった“溝状”の堆積盆地の形成を地殻の水平伸張に求める研究が多く論じられている（たとえば、長谷ほか編 1993, Morley ed. 1999）。一方、堆積盆地の形態には、“多角形～環状”のものも存在する。マグマ活動に起因するとされる陥没盆地（藤田 1967, 1973；本宿団体研究グループ 1968, 1970 など）や陥没カルデラ（例えば、Williams 1941, Smith and Bailley 1968, Lipman 1976）がそれである。

日本列島ではかつてから指摘されているグラーベン構造として、九州の別府－島原グラーベン（松本 1979）と鹿児島グラーベン（露木 1969）があげられる。近年、別府－島原グラーベンは、多田（1993）、岡田（1993）によって、コンチネンタルリフトバレーとして位置づけられた。また、九州の二つのグラーベンには、それぞれその内側に基盤ブロックの沈降・陥没帯（玉生 1985）、コールドロン群（久保田 1986）の存在が指摘されている。これまで、これらのグラ-

ベンとコールドロンの形成機構は互いに切り離され、個別に検討されてきたように思われる。藤田（1990, 1992）は、日本列島のグラーベンは陥没盆地が群生した結果、そのようにみえるだけではないかと指摘した。筆者はかつて、九州のコールドロン群の形成と金鉱脈裂か系との関係を検討するなかで、コールドロンの連鎖としてグラーベンの形成が一元的に説明できる可能性を指摘した（久保田 1989b）。

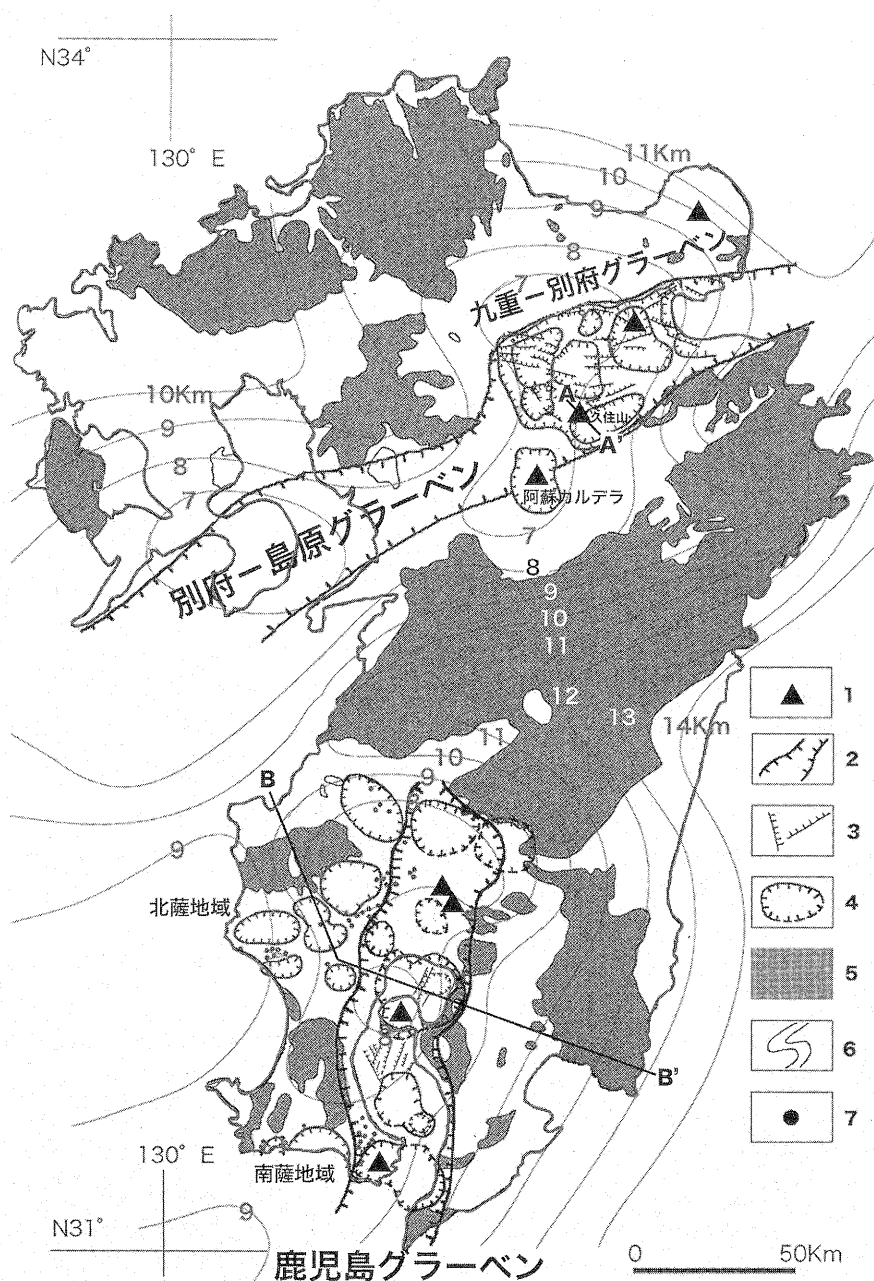
ところで、松原ほか（1989）、松本（1993）は、別府－島原グラーベンの形成機構に関して、プレート運動に伴う水平伸張を重視する見方（鎌田 1985, 木戸 1991, 1993, 鎌田・小玉 1993, 多田 1993 など）と、グラーベン形成に先行する隆起・垂直運動を重視する見方（松本 1979, 1993, 松原ほか 1989, 久保田 1991）の大きく二つに分けられるとした。また、このようなグラーベンやコールドロンなどの陥没機構の見解の相違は陥没に先行する隆起運動の存否に直接的に反映され（藤田 1972, 1973 など）、その研究には、陥没以前に地殻上層部の「曲隆現象」があるのか、あるいは「水平伸張」のみで陥没するのか、すなわち陥没に先立つ「先行隆起」の有無の検討が重要であると指摘した。

2005 年 9 月 8 日受付。2006 年 3 月 3 日受理。

* 2004 年第 32 回万国地質学会議（フィレンツェ、イタリア）で一部を発表。

** 新潟支部、新潟大学理学部自然環境科学科、〒950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050

Faculty of Science, Niigata University, 8050 Ikarashi 2-no cho, Niigata, 950-2181 Japan.



第1図 九州におけるグラベンとコールドロン、およびキュリー点深度の分布。Kubota (2005) を一部改変。キュリー点深度は新エネルギー総合開発機構 (1982)。

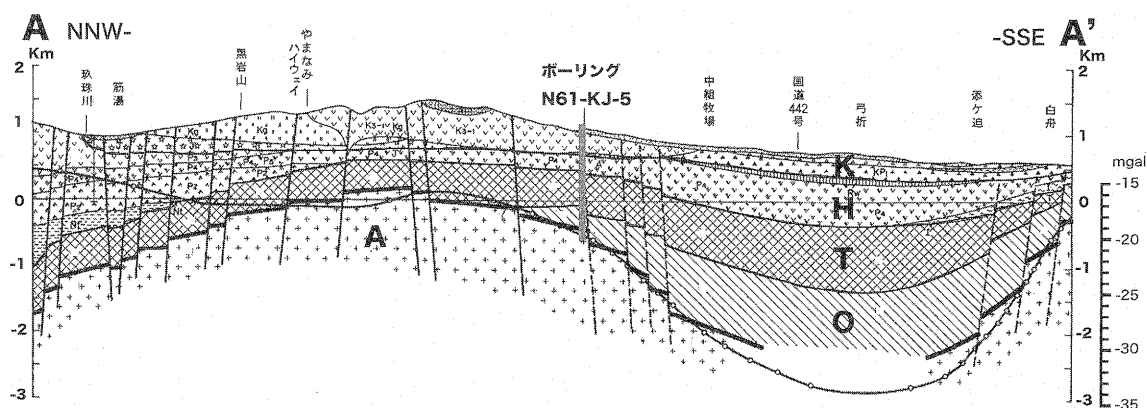
凡例 1: 第四紀火山, 2: グラベン, 3: 断層, 4: コールドロン, 5: 先新第三系基盤, 6: キュリー点深度 (等高線間隔は 1km), 陸上の白色部は新第三系～第四系分布域, ▲は活火山。A-A', B-B' はそれぞれ第2図および第7図の断面位置。

Fig.1 Distributions of grabens, cauldrons, and the Curie point depths in Kyushu, adapted from Kubota (2005). Curie point depth from NEDO (1982)

1: Quaternary volcano, 2: Graben, 3: Fault, 4: Cauldron, 5: Pre-Neogene basement, 6: Curie point depth (contour interval 1 km), White areas on land overlain by Neogene to Quaternary system. ▲: active volcano. A-A' and B-B': locations of cross sections for Figs 2 and 7.

本稿は以上のような背景から、九州のグラベンと内在するコールドロン群の成因的關係について、とくに堆積盆地形成に先立つ先行隆起現象の検討を重視し、フィールドの地質現象とスケールモデル実験結果をもとに考察したものであ

る。なお、本論で用いるコールドロン (cauldron: Smith and Bailey 1968) の用語は、「陥没の形態や規模、現在の陥没地形の有無などは問わず、マグマ活動に起因して形成された陥没構造 (多くは火山活動をとまなう) の総称」(小室 1986)



第2図 九州中部地域における久住コールドロンの地質断面。(新エネルギー総合開発機構 (1988) に加筆)。

A: 朝地深成岩類, O: 大野火山岩類, T: 鯛生層群, H: 豊肥・豊後火山岩類, S: 九重火山岩類・阿蘇火山噴出物, 丸印の付いた実線はブーゲー異常値を示す (1mgal 間隔). A-A' 断面位置は第1図。

Fig.2 Cross section of Kuju cauldron in central Kyushu, modified from NEDO (1988)

A: Asaji plutonic rocks, O: Ono volcanic rocks, T: Taio group, H: Hohi and Bungo volcanic series, S: Kuju volcanic series and Aso volcanic products, solid lines with circle Bouguer anomalies (interval 1 mgal). Location of cross section A-A' cross shown in Fig. 1.

として用いる。

グラーベンと内在コールドロン群の陥没様式

別府-島原グラーベンと鹿児島グラーベンは、それぞれ九州中部と南部に位置している (第1図)。いずれの地域も、鮮新-更新世の中〜酸性の陸上火山活動が活発な地域で、現在の火山-地熱地帯に引き継がれている (松本 1977 など)。

別府-島原グラーベン

別府-島原グラーベンは、構造的不連続から三分され、最も東方のものを九重-別府グラーベンと呼称されている (松本 1977)。九重-別府グラーベンは活火山-地熱地帯で、全体として -30mgal におよぶ箱型の負のブーゲー異常域をなし (笹田 1984 ほか)、内部には径 10〜20km、縁辺との重力差が 20mgal 前後におよぶ環状の低異常域が分布している。それらのいくつかは、地熱探査用ボーリングデータと重力基盤の解析深度によって、2500m 以上におよぶ基盤の陥没構造とされ (駒澤・鎌田 1985 ほか)、鮮新-更新世の火山活動に関係したコールドロン群と考えられている (久保田 1991, 第1図)。

松本 (1984) は別府-島原グラーベンの形成について、中新世以降の隆起・撓曲→深部断裂→火山活動の大きく3回の繰り返しのによって形成されたとした。また、松本 (1993) では、別府-島原グラーベン形成に伴う火山活動を三期に区分し、I〜III期で火山活動の様式が異なることを指摘した。すなわち、第I期 (中新世中〜後期) および第II期 (鮮新世〜更新世中期前半) では陥没の基底に不淘汰角礫岩層や炭層を挟在する湖水堆積層が分布し、火山岩類はその上位に発達することから、陥没に遅れて火山活動が生ずるのに対して、第III期 (更新世中期後半〜完新世) では膨大な火山活動後

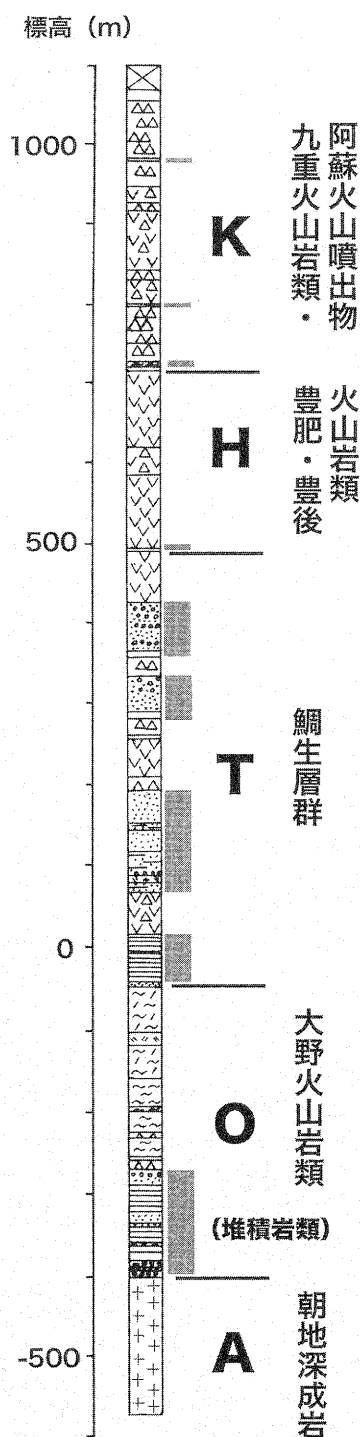
に陥没している、とした。

実際、九重-別府グラーベン南部のコールドロン縁で掘削した地熱ボーリング (N61-KJ-5 孔: 新エネルギー総合開発機構 1988, 第2図) では、基盤 (朝地深成岩) 直上に炭層を挟在する中新統の礫岩・砂岩・泥岩などの湖沼成堆積物 (大野火山岩類下部) が分布し、火山岩 (大野火山岩類上部) はその上位を覆っている (第3図)。この地層は、基盤にアバットしつつ、盆地内部へ向かって急激に層厚を増し、盆地の外側には分布していない (第2図)。このことから、盆地形成後に盆地内部を埋積した堆積物といえる。鮮新統の鯛生層群も基底部は堆積岩からなり、火山岩はその上位に堆積岩を挟在しながら覆っている。地層は盆地内部でやや厚いが、外側にも分布していることから、堆積域が周辺へオーバーラップしたことが分かる。これに対して、更新統の火山岩類 (豊肥・豊後火山岩類, 九重火山岩類・阿蘇火山噴出物) は、基底にわずかに堆積岩が見られるだけで、そのほとんどが火山噴出物からなる。豊肥・豊後火山岩類 (更新世前期〜中期) は盆地側で厚くなるが、九重火山岩類 (更新世後期〜完新世) は盆地縁で噴出し火山体を形成している。以上のことは火山活動に先行して一次の盆地 (陥没) が、続く火山活動後に二次の盆地 (陥没) が続いて生じたことを示している。

鹿児島グラーベン

鹿児島グラーベン内部には径 20km 前後の陥没カルデラが南北に連鎖しており (第1図)、それらは各々 20mgal 以上におよぶ強い低ブーゲー異常域に一致している (久保田 1986)。また、鹿児島グラーベン西方の北薩・南薩地域にも、鮮新-更新世に形成された径 10km 前後のコールドロン群が指摘されている (第1図, 久保田 1986, Kubota 2001 ほか)。

早坂 (1987) は、鹿児島グラーベン発生前後の火山活動は



第3図 九州中部久住山地域におけるボーリング (N61-KJ-5) の地質柱状図。新エネルギー総合開発機構 (1988) に加筆

A～Kは第2図と同。灰色部は堆積岩類の分布。その他の地質を表す模様は火山噴出物を示す

Fig.3 Geologic log for N61-KJ-5 drilling in Kuju Mtn., central Kyushu, modified from NEDO (1988).

Letter symbols ditto Fig.2. Grayish colored parts: distribution of sedimentary rocks, other geologic symbols volcanic products.

きわめて弱いことを指摘し、鹿児島湾西縁の断層運動の時期は、照国火砕流 (2.9Ma) 噴出後から花倉層 (数10万年前) 堆積前とした。また、陥没カルデラの形成は、膨大な海成層、花倉層 (層厚580m) 堆積後に、湾内で生じた大規模火山活動の後の更新世末とした (第4図)。これは大規模な火山活動に先行して一次陥没が発生し、火山活動ののちに二次陥没 (陥没カルデラ) が形成されたことを示唆している。

以上のことから、いずれのグラーベンにおいても、火山活動の前と後にそれぞれ第一次の先火山性陥没と第二次の後火山性陥没が続いて生じたことが示唆される。

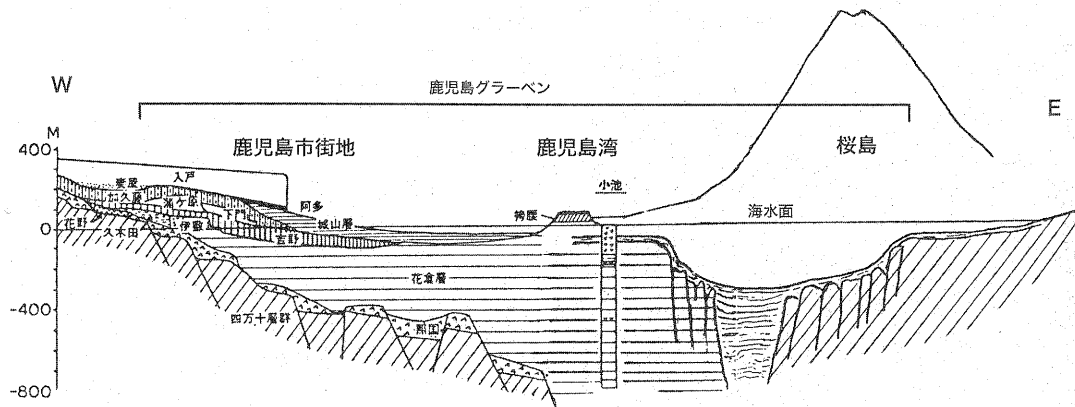
先行隆起運動により形成される断裂系

ここでは、九州のグラーベンとコールドロン群との成因的關係について、とくに隆起運動に伴う断裂系に着目し、二つの連鎖するコールドロンを想定したスケールモデル実験結果 (久保田 1989a, b) をもとに考察する。なお、単体のコールドロンの形成をマグマ性のダイアピルの運動にもとめるスケールモデル実験は小室・藤田 (1980) によって先駆的になされており、この実験においても基本的な考えが踏襲されている。

放射状断裂系と“隆起地形”、“連結断裂系”の形成

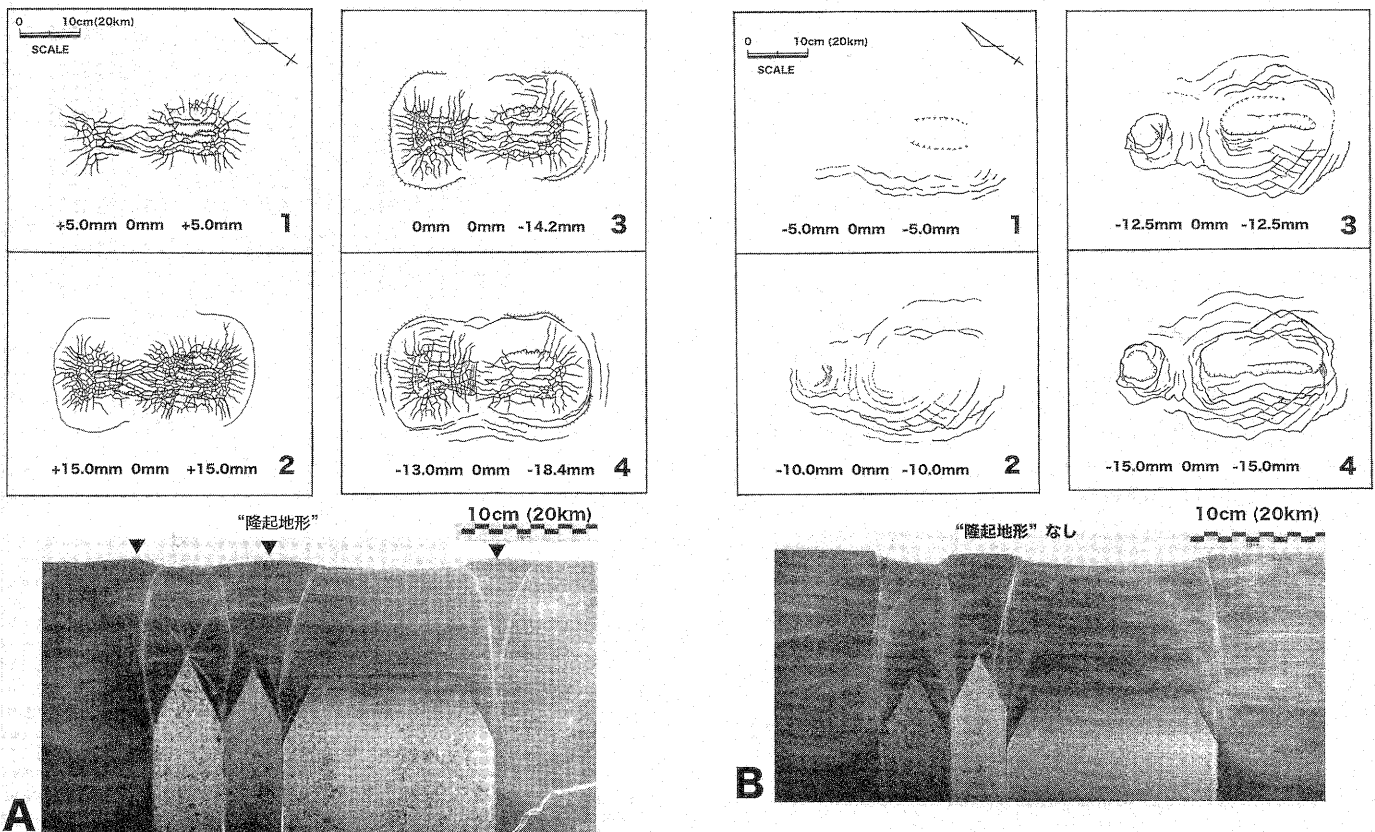
本宿陥没盆地では、火山活動に先立つ多角形状の“先火山活動陥没”と、その内部に火山活動後の楕円状の“後火山活動陥没” (陥没カルデラ) の二つが共存している (本宿団体研究グループ 1970)。この本宿型二重コールドロンと断裂系の形成過程を想定し、大きさの異なるふたつの石膏製ダイアピルを上昇させたのち、両者を下降させた (第5-A図)。

ダイアピルの上昇に伴い、表層は放射状と同心円状の断裂系により亀甲状に割れ、隆起頂部に多角形状の陥没凹地 (先火山活動陥没) が形成された。凹地内は大小にブロック化し凹凸が著しい。陥没凹地外縁には、アンチセティックな断裂による傾動地塊状の地形的高まり (以後“隆起地形”という：第5-A図軟X線写真断面) が形成された。また、両陥没凹地を連結する小規模なグラーベン状の断裂系 (以後“連結断裂系”という) も同時に形成された (第5-A図1～2)。つぎに、マグマの大量噴出によるマグマ溜まりの収縮・天盤の地下陥没による陥没カルデラの形成を想定して、両ダイアピルをそれぞれ下降させた。両ダイアピルの直上には一次の陥没凹地と同じかやや大きい二次の陥没凹地 (後火山活動陥没-陥没カルデラ) が形成された。陥没凹地の外形は角が取れ、底部の凹凸も均されてはいるが、一次陥没の多角形状の外形と凹凸のある底部の形態はそのまま残った。両カルデラ凹地の外側には一周り大きいグラーベン状凹地が形成された (第5-A図3～4)。それぞれの陥没凹地外縁には、ダイアピル上昇時の放射状断裂系、“連結断裂系”および“隆起地形”が残った。



第4図 鹿児島湾の東西方向の地質断面. 早坂(1987)に一部加筆

Fig.4 E-W geologic cross section of Kagoshima Bay, modified from Hayasaka (1987)



第5図 1:200,000 スケールモデル実験による連鎖陥没構造と断裂系の形成過程. 久保田(1989a)に一部加筆

A: 連鎖する本宿型二重陥没, B: 連鎖するカルデラ陥没. ▼印は“隆起地形”

Fig.5 Formation of chained-cauldrons and fracture pattern in 1:200,000 scale model experiment, modified from Kubota (1989a)

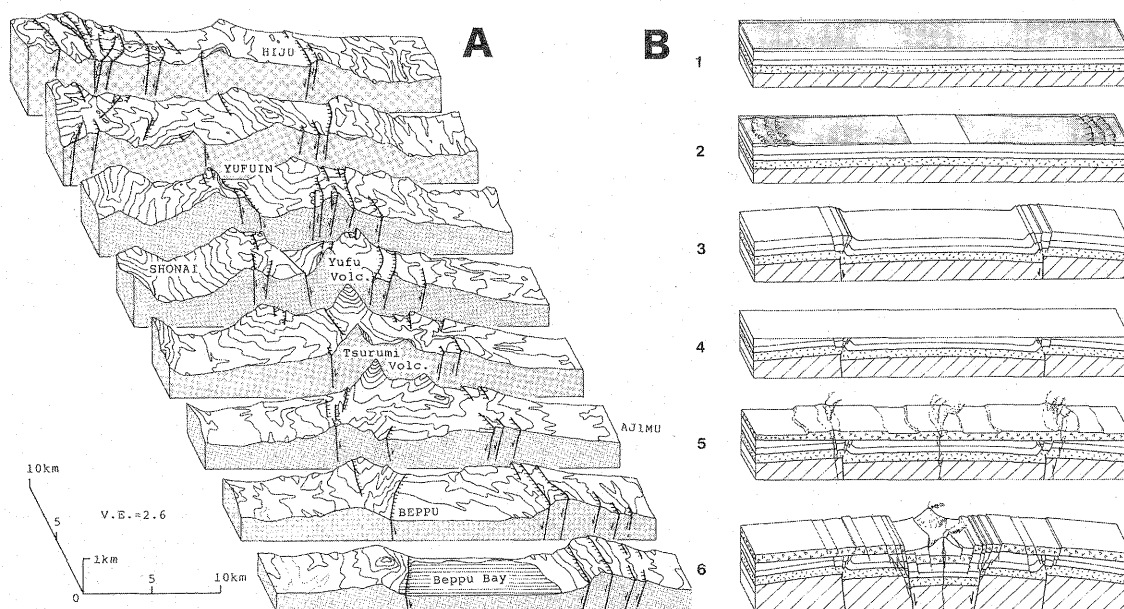
A: Chained Motojuku-type double collapses, B: Chained caldera collapses. ▼: “Uplift topography”

連鎖する陥没カルデラとグラーベン状凹地の形成

陥没カルデラでは、大規模な噴火によりマグマ溜まりの上部が空洞になって地表が陥没するとされている (Williams 1941 など)。この陥没カルデラが複数連鎖した場合に形成される断裂系をみるため、大きさの異なるふたつの石膏製ダイ

アピルを同時に下降させた (第5-B図)。

ダイアピルの下降とともに、外側から内側へ断裂が伝播し、最後にそれぞれのダイアピルのほぼ直上に明瞭な陥没凹地 (後火山活動陥没 - カルデラ陥没) が形成された。これらの陥没凹地の外縁は平坦で、“隆起地形”は形成されなかつ



第6図 別府-島原グラベン東部のブロックダイアグラムと形成過程。(松原ほか(1989)による)。

A: アンチセティックな断層群によって傾動地塊化された現地形(“隆起地形”), B: 形成過程モデル

Fig.6 Block diagram of eastern part of the Beppu-Shimabara Graben, after Matsubara et al. (1989)

A: Present landform tilted by antithetic faults, : "uplift topography", B: Tectonic history model

た。陥没凹地の底部は平坦で、中央には狭長な溝状凹地が形成された。両陥没凹地の外周には、一周り大きい陥没凹地が形成された。この凹地の外縁にも“隆起地形”は形成されなかった。この実験から、複数の陥没凹地を取りまく一周り大きい陥没凹地の形態は、マグマが連鎖した場合にはグラベン状の凹地に、マグマが広く散在・群生した場合には広がりをもった凹地になることが予想される。

異なった方法によるスケールモデル実験の再現性

小室・藤田(1980)では、ピストン製のマグマを上昇・下降させることにより、単体の陥没形成を再現した。小室(1992)では複数のマグマの上昇による陥没形成の実験を行った。Marti et al. (1994)は、マグマにみたてた風船の膨張・収縮、収縮のみ、膨張・収縮・再膨張、および二つの連鎖した収縮のみによる陥没形成の実験を行った。Roche et al. (2000)は、さまざまな形状の管に充填したシリコン製マグマの吸引による陥没形成の実験を行った。Walter and Troll (2001), Troll et al. (2002)は、風船のマグマの膨張・収縮による陥没の実験を行った。いずれの結果も、単体のマグマの実験では、隆起時に放射状断層系と“隆起地形”が形成されている。また、複数のマグマの実験では、隆起時には陥没凹地の間に“連結断層系”が形成されている。

Acocella et al. (2004)はリフトと内在する単体のカルデラを再現した。実験では、まず水平に設置された板をスライドさせリフトを形成し、続いてリフトの下に設置されたシリコン成マグマのピストンを下げたのち上げ、再生カルデラを復

元した。個々の実験で形成された断層系のパターンは上記の実験と大きく違わない。この実験では、前提条件として、カルデラ形成は水平伸張によるリフト形成の後とされている。実験結果では、リフト縁にもカルデラ縁にも、放射状断層系や“隆起地形”は形成されなかった。

以上のことから、マグマの上昇・収縮時には、実験方法・材料物性の差を越えて、ほぼ同様の断層系が形成されるといえよう。とくに、陥没凹地外縁の放射状断層系や“連結断層系”、“隆起地形”の形成は、マグマの上昇、すなわち隆起運動の地質・地形現象への反映とみられる。

フィールドにおける“隆起地形”と

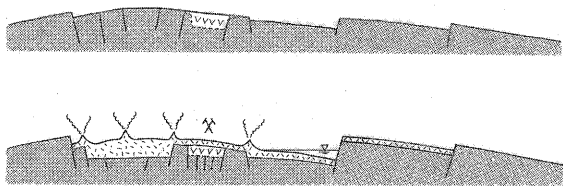
“連結断層系”

前述のスケールモデル実験結果からは、一次陥没(先火山活動陥没)に先行する隆起運動により、放射状断層系や“隆起地形”が、また複数の隆起部間には“連結断層系”が形成され、続く運動の後にも残されることがわかった。このような放射状断層系や“隆起地形”、“連結断層系”は実際のフィールドではどのように現れているのであろうか。

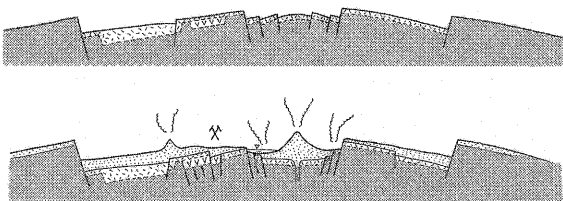
別府-島原グラベン

別府-島原グラベン東部の九重-別府グラベン内においても、各コールドロンを連結するように東西系の“連結断層系”が多数みられる(第1図)。これらの断層系のパターンは、小室(1992)のスケールモデル実験による、二つの

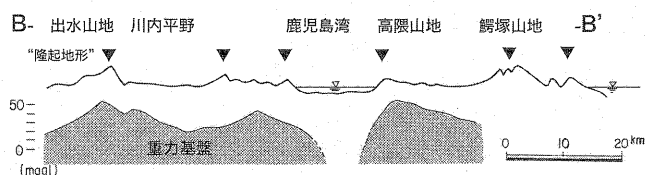
<鮮新世～前期更新世>



<後期更新世>



<鹿児島グラーベン周辺の地形断面と重力構造>



第7図 鹿児島グラーベンの鮮新 - 更新世の構造発達史と曲隆構造を示す地形断面。久保田 (1986) を一部加筆。

▼印は“隆起地形”の位置。B-B' 断面の位置は第1図。

Fig.7 Tectonic history during Plio-Pleistocene and upwarping topography of cross section in Kagoshima Graben, modified from Kubota (1986).

▼: “uplift topography”. Location of B-B' cross section shown in Fig. 1.

マグマの上昇時に形成された平行断層系に酷似している。松原ほか (1989) は、グラーベン北縁の詳細な地質図と共役断層、スランブ構造の解析から、応力分布と地層の活動方向を述べ、別府 - 島原グラーベンは曲隆運動 (先行隆起) の頂部に発生した陥没構造とし、構造発達史を復元している (第6図)。そこでは、アンチセティックな断層により傾動地塊化された“隆起地形”が現地形のブロックダイアグラムに明瞭に表れている。内在コールドロン群との直接的な関係については言及していないが、グラーベン内は複雑にブロック化していることを指摘した。

鹿児島グラーベン

鹿児島グラーベンでは、早坂 (1984, 1987) により湾内で船上音波探査が行われており、湾奥部の始良カルデラと中央部の阿多北カルデラの間には南北系のグラーベン状断層系が報告されている (第1図)。この断層系は隆起時に陥没凹地を連結して形成される“連結断層系”の形態と相似である。

久保田 (1986) は、鹿児島グラーベンとコールドロン群は

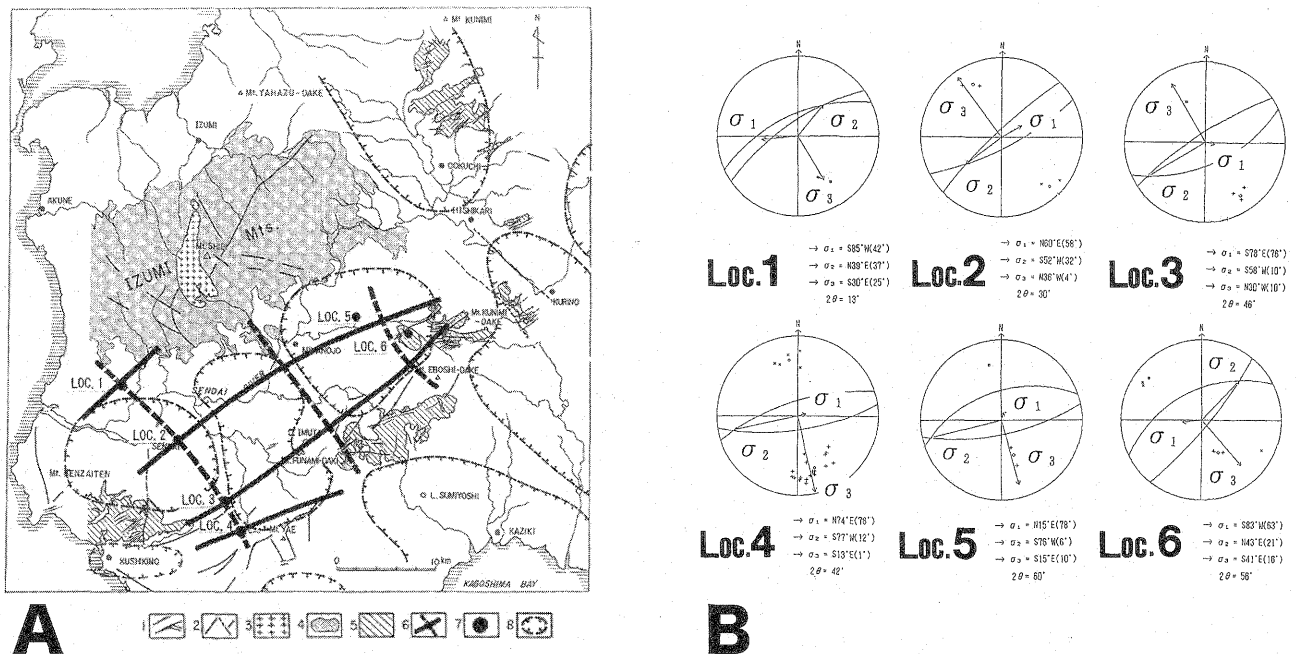
先行隆起を伴う火山活動の東進により形成されたと指摘した (第7図) が、現在の地形断面には傾動地塊状の明瞭な“隆起地形”が表されている。これに対し、宮下 (1995) は、北薩地域は隆起運動を伴わない水平引張によるグラーベン形成の場としたが、引用データの誤用や漏れがあるなかで、既存データの再解釈にとどまり、十分な論理展開に至っていない。北薩地域 (第1図) では、コールドロンを埋積した泥岩の共役断層解析から、陥没後も隆起運動が続いたことがわかっている (第8図, 金属鉱業事業団 1991)。また、この地域の衛星画像から判読したリニアメント (第9図, 丸山・久保田 1992) には、各々のコールドロンと複数のコールドロン間には、隆起運動を示唆する放射状リニアメント (放射状断層系) と連結リニアメント群 (“連結断層系”) が明瞭である。

連鎖コールドロン群からグラーベンの形成へ

以上のように、盆地縁辺の放射状断層系や“連結断層系”、“隆起地形”の存在は、いずれも隆起運動で形成される地形・地質現象であり、隆起を伴わない水平伸張では形成されない。また、コールドロン群を取り巻く一周り大きい陥没凹地は、連鎖したマグマの噴出によるカルデラ陥没時のみ形成される。

実験からは、マグマの上昇に伴い、すぐさま地表は隆起し、引張場におかれ陥没する。その際、ダイアピルから延びる断層は、まだ地表の断層と結合していないため、マグマは噴出できない (小室・藤田 1980)。このことは地形の侵食・開析のすすんだ新第三系の火山フィールドで多数実証されている (吉谷ほか編 1979, 藤田ほか編 1989 ほか)。すなわち、陥没盆地の基盤直上には湖沼成堆積物が覆い、火山噴出物はさらにその上位を覆うこと、両者は基盤にアバットすることから、火山活動は陥没におくれて盆地内部で発生した (藤田 1967, 1973 ほか)。したがって、マグマの上昇につれて、まず火山活動に先行する一次陥没 (先火山活動陥没) が発生し、後のマグマ噴出後にカルデラ型の二次陥没 (後火山活動陥没) が発生するという前後関係になる。換言すれば、カルデラ陥没は先火山活動陥没に先立つことはない。本宿型二重コールドロンはこのタイプの典型を意味している。

九州のグラーベンにおいても、上記の議論から、中新・鮮新世～更新世にかけて、火山活動前後の二つの様式の陥没が推定される。陥没が一次で終わるか、二次まで続くかは、上昇するマグマの供給量や規模に規制されるのであろう。もしマグマの供給が少なければ、一次陥没のみで終わり、マグマの供給が大量で長期にわたれば、大規模噴火により一次陥没は破壊され、直上に大型の二次陥没 (陥没カルデラ) が生ずる。二次陥没の規模が大きい場合には、一時陥没の外形は破壊されるが、隆起時に形成された陥没底の凹凸、放射状断層系、“隆起地形”、“連結断層系”などは残される。本宿型コールドロンでは一次陥没の内部に小規模な二次陥没が

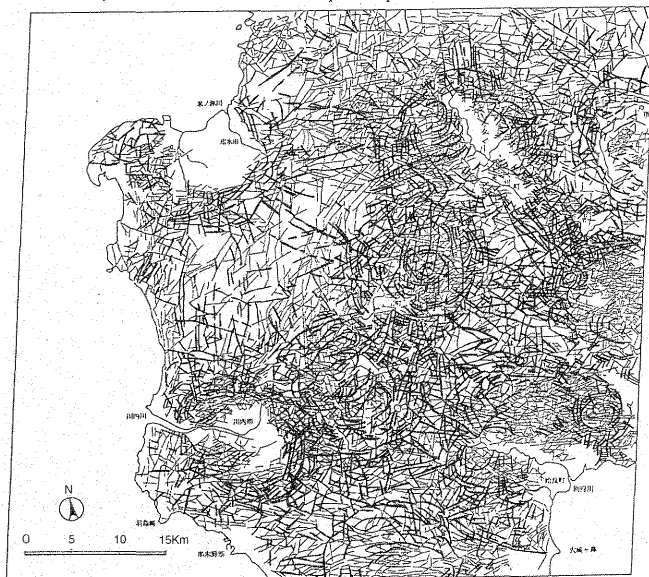


第8図 南九州北薩地域における泥岩の共役断層による応力軌跡. 金属鉱業事業団 (1991) による

A: 1: 金鉱脈, 2: 断層, 3: 第三紀花崗岩類, 4: 四万十層群, 5: 北薩古期安山岩類, 6: 応力軌跡 (σ_1 は高角, 実線は σ_2 , 破線は σ_3), 7: 共役断層位置 (Loc.1~6), 8: 低ブーゲー異常域. B: 共役断層系のステレオ投影図 (ウルフネット下半球). Loc.1~6 の位置は B 図. σ_1 は最大圧縮主応力, σ_2 は中間主応力, σ_3 は最大引張主応力.

Fig.8 Stress distribution based on conjugate faults in mudstone in the scale model experiments for Hokusatsu area, southern Kyushu, after MMAJ (1991).

A; 1: gold veins, 2: faults, 3: Tertiary granitoid, 4: Shimanto group, 5: Hokusatsu old andesitic rocks, 6: stress distribution (σ_1 : high angle, σ_2 : solid line, σ_3 : broken line), 7: location of conjugate faults (Loc.1-6), 8: low Bouguer anomaly area. B; Stereographic projection of conjugate faults (Wulff net, lower hemisphere). σ_1 : maximum compressive principal stress, σ_2 : intermediate principal stress, σ_3 : maximum tensile principal stress



第9図 南九州北薩地域における衛星画像のリニアメント分布. (丸山・久保田 (1992) による).

スポット衛星立体視画像から抽出した各コールドロン群に対応する環状構造と放射状および連結リニアメント群.

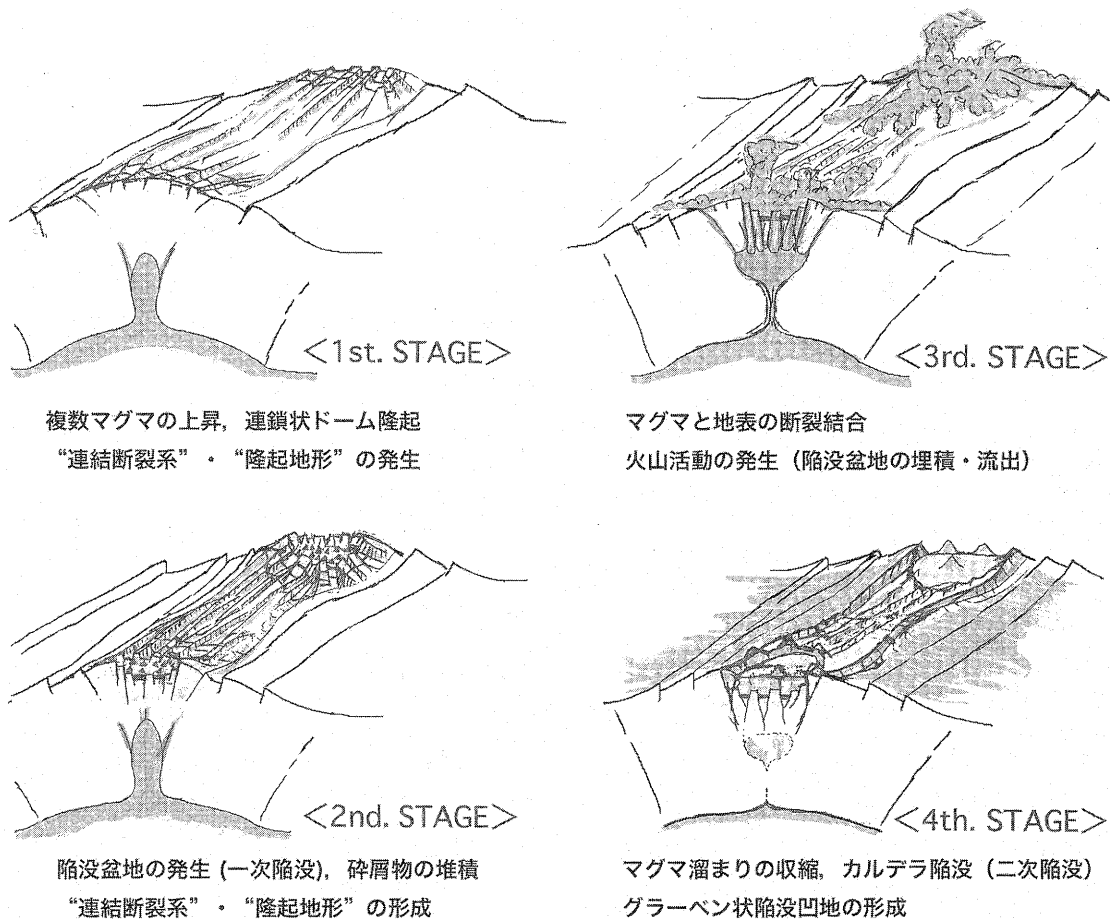
Fig.9 Distribution of lineaments on satellite images in the Hokusatsu area, southern Kyushu, after Maruyama and Kubota (1992).

Circular structures coincide with cauldrons, radial and connected lineaments, using SPOT stereoscopic satellite images.

みられるが, これはマグマの供給がそれほど多くなかったことによるものと推定される. 一次陥没で終了したコールドロン群は各々の隆起の頂部が陥没するだけで, それらを取り巻くような一周り大きい陥没凹地は形成されない.

鹿児島グラーベンは狭長な陥没凹地内にコールドロンが連鎖配列している. 九重-別府グラーベンは, 鹿児島グラーベンに比べ, いくらか広がっているが, そこにはコールドロン群が散在配列している. すなわち, マグマが連鎖配列し, 大規模カルデラ陥没が生じた場合には, グラーベン状凹地が形成され, 広がりをもって散在配列した場合には, 広がりをもった陥没凹地が形成されと考えられる. このように, 地表における最終的な陥没凹地の形状は, マグマの分布・配列形態や, マグマを供給するマントル溶融帯の形態に規制されるのであろう. このことは鹿児島グラーベンが琉球弧方向であるのに対して, 別府-島原グラーベンがそれと大きく斜交した本州弧方向であることに現れている. すなわち, 両者の方向は, 鮮新-更新世の火山岩類の分布域と調和的であり, キュリ一点深度 (新エネルギー総合開発機構 1982) から推定される現在の地下の高温域にも調和的である (第1図).

以上のことから, マグマが同じ場所に長期にわたり大量に供給された場合に, 連鎖・群生するコールドロンからグラーベンへと陥没の形態が変化すると考えられる. すなわち, 1)



第10図 連鎖するコールドロン群によるグラーベンの形成過程。（Kubota（2005）に一部加筆）。

Fig.10 Formation process of graben through clustered cauldrons, modified from Kubota (2005).

複数マグマの上昇 - 地殻のドーム状先行隆起 - “連結断裂系”と“隆起地形”の形成，2) 一次陥没（先火山活動陥没） - 湖沼成碎屑物の堆積，3) マグマと地表の断裂の結合による火山活動と盆地の埋積，4) 大規模噴火によるマグマ溜まりの収縮・地下陥没 - カルデラ型二次陥没（後火山活動陥没）の形成 - 空洞化した連鎖・群生マグマ溜まりの引き込みによる大陥没 - グラーベンないしは広がりをもった陥没凹地の形成，といった過程が提起される（第10図，Kubota 2005）。

まとめ

九州に分布する別府 - 島原グラーベンと鹿児島グラーベン，それらに内在するコールドロン群との成因的関連について，フィールドデータやスケールモデル実験をもとに，とくに陥没に先立つ先行隆起現象に着目し検討した。結論は以下のとおりである。

(1) 九州の二つのグラーベンに内在するコールドロン群の陥没様式は，火山活動に先行する一次陥没（先火山活動陥没）と，その後の大規模火山活動に続くカルデラ型の二次陥没（後火山活動陥没），すなわち本宿型二重コールドロンに類似して

いる。

(2) スケールモデル実験によると，一次陥没を発生させたマグマの上昇は，地表の隆起部に放射状断裂系や，盆地縁辺部に傾動地塊状の“隆起地形”を形成した。このマグマが複数の場合にはそれぞれの隆起部を連結する“連結断裂系”が形成された。すなわち，これらは隆起運動を示唆する地形・地質現象といえる。

(3) マグマの上昇により地表はすぐさま引張場におかれ，一次陥没が生ずるが，マグマと地表の断裂系は連続していないため，マグマ噴出後に形成される陥没カルデラが先行することはない。一次陥没で終わるか，二次の陥没カルデラが生ずるかは，マグマの供給量や規模に規制されられると考えられる。

(4) 複数の大規模なカルデラ型陥没が生じた場合には，カルデラ群を取り巻くように一回り大きい陥没凹地が形成される。この大規模陥没凹地の形態は，マグマの配列形態に規制され，連鎖する場合には鹿児島グラーベンのような狭長な陥没凹地へ，広がりをもって散在・群生した場合には九重 - 別府グラーベンのような幅のある陥没凹地へ転化する。

謝 辞 構造コロキウムの故藤田至則会員，松本徭夫会員は

じめ、メンバーの方々には常日頃、御批判、励ましをいただいている。豪州の Dong R. Choi 博士には多大な御支援をいただいている。金属鉱業事業団（現石油天然ガス・金属鉱物資源機構）および関係者の方々には当時の調査・解析に当たって御支援頂いた。小室裕明会員、足立久男会員には厳しくも心ある御批判と多くの御教示を賜った。以上の方々にここに記して感謝する次第である。

文 献

- Acocella V, Funicello E, Marotta E, Orsi G and de Vita S (2004) The role of extensional structures on experimental calderas and resurgence. *Jour Vol Geo Res*, 129: 199-217.
- 藤田至則 (1967) グリーンタフ変動発生期に関する地質学的諸問題. 地質雑, 73: 106.
- 藤田至則 (1972) グリーンタフ変動と地向斜の発生～発展期の法則. 伊豆半島, 東海大学出版会, 13-33.
- 藤田至則 (1973) 日本列島の成立. 築地書館, 東京, 258p.
- 藤田至則 (1990) 新版 日本列島の成立. 築地書館, 東京, 259p.
- 藤田至則 (1992) 日本列島後期新生代の変動からみた別府島原帯に関する討論. 松本征夫教授記念論文集, 113-118.
- 藤田至則・高浜信行・小室裕明・雁沢好博・村上允英編 (1989) 陥没 - その構造・機構・応用 -. 地団研専報, 36: 291p.
- 長谷義隆・小野晃司・渡辺一徳・竹村恵二編集 (1993) 中部九州後期新生代の地溝. 地質学論集, 41: 192p.
- 早坂祥三 (1984) 鹿児島地溝. 九州の火山と基盤構造, アーバンクボタ, 22: 19-22.
- 早坂祥三 (1987) 鹿児島湾の地質構造. 九州の後期新生代火山活動をめぐる諸問題, 地団研専報, 33: 225-233.
- 鎌田浩毅 (1985) 九州中北部における火山活動の推移と地質構造. 地調報告, 264: 33-64.
- 鎌田浩毅・小玉一人 (1993) 火山活動構造性陥没地としての豊肥火山地域とその形成テクトニクス. 地質学論集, 41: 129-148.
- 木戸道男 (1991) 「九重 - 別府地溝」の形成史と火山活動および形成機構. 構造地質, 37: 63-74.
- 木戸道男 (1993) 「九重 - 別府地溝」北西縁部の地質構造発達史. 地質学論集, 41: 107-127.
- 金属鉱業事業団 (MMAJ) (1991) 日本列島リニアメント解析 - 環状構造の意義と金銀鉱床胚胎場に関する解析 (その5) -. 平成2年度鉱物資源探査技術開発調査報告書, 59-123.
- 駒澤正夫・鎌田浩毅 (1985) : 豊肥地域の重力基盤構造. 地質調査所報告, 264: 305-333.
- 小室裕明 (1986) 火山性陥没構造の二つの形式. シンポジウム「陥没と隆起」, 地球科学センター設立準備室, 119-130.
- 小室裕明 (1992) 火山構造性陥没の形成条件に関する実験的検討. 火山と岩石の探求, 松本征夫教授退官記念論文集, 119-123.
- 小室裕明・藤田至則 (1980) グリーンタフ造山における陥没盆地の発生機構 - 陥没形成のメカニズムに関するスケールモデル実験 -. 地質雑, 86: 327-340.
- 久保田喜裕 (1986) 南九州北薩地域における金銀鉱床の生成とその造構史的背景. 鉱山地質, 36: 459-474.
- 久保田喜裕 (1989a) 南九州北薩地域における金銀鉱脈鉱床の生成とその造構史的背景 (その2) - スケールモデル実験による検討 -. 鉱山地質, 39: 123-138.
- 久保田喜裕 (1989b) 南九州の陥没構造と金銀鉱床 - スケールモデル実験による再現 -. 地団研専報, 36: 261-275.
- 久保田喜裕 (1991) : 金鉱床胚胎場としての火山性陥没構造の重要性. 鉱山地質, 41: 379-386.
- Kubota Y (2001) Late Cenozoic gold veins and volcanic collapse tectonics in the island arc junctions of the Japanese islands. *Geotectonica et Metallogenia - Special Issue for the 21th century international symposium on activated tectonics and metallogeny-*, 25: 85-92.
- Kubota Y (2005) Relationship between grabens, cauldrons, and fault systems in Kyushu, Japan - Formation of a graben and fault systems through clustered cauldrons-. *Bollentino della Geologica Italiana*, special volume, 5: 159-168.
- Lipman PW (1976) Caldera-collapse breccias in western San Juan Mountains, Colorado. *GSA Bull*, 87: 1397-1410.
- Marti J, Ablay G J, Redshaw L T, and Sparks R S J (1994) Experimental studies of collapse calderas. *Jour Geol Soci, London*, 151: 919-929.
- 丸山裕一・久保田喜裕 (1992) 金鉱床探査地域の選定を目的とした衛星リニアメント解析手法の検討. 日本写真測量学会年次学術講演会 (要旨), 179-182.
- 松原則昭・矢野孝雄・松本征夫 (1989) 別府 - 島原地溝に北接する地域における西柄撓曲の形成過程. 地団研専報, 36, 175-190.
- 松本征夫 (1977) 九州におけるグリーンタフ変動と島弧変動の火山活動. 地団研専報, 20: 257-264.
- 松本征夫 (1979) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, 16: 127-139.
- 松本征夫 (1984) 北・中部九州における後期新生代火山活動の特性 - とくに地溝性陥没構造との関係 -. 地質学論集, 24, 199-212.
- 松本征夫 (1993) 別府 - 島原地溝の発送とその後の発展および課題. 地質学論集, 41: 175-192.
- 宮下 敦 (1995) 北薩地域の浅熱水性金銀鉱床はカルデラに伴って形成されたか?. 資源地質, 45: 313-321.
- 本宿団体研究グループ (1968) 群馬県本宿地域のグリーンタフ層内で発見された二重陥没構造とその意義. 地球科学, 22: 32-36.
- 本宿団体研究グループ (1970) グリーンタフ変動の研究. 地団研専報, 16, 95p.
- Morley CK (ed) (1999) *Geoscience of rift systems-Evolution of East Africa*. AAPG studies in geology 44, Ameri Associ Petro Geol, 242p.
- 岡田博有 (1993) 東シナ海堆積盆地と中部九州地溝. 地質学論集, 41, 163-173.
- Roche O, Druitt T H, and Merle O (2000) Experimental study of caldera formation. *Jour Geo Res*, 105: 395-416.
- 笹田政克 (1984) 豊肥地域の基盤地質構造. 地熱, 21: 1-11.
- 新エネルギー総合開発機構 (1982) 昭和56年度全国地熱資源総合調査報告書 キュリー一点法調査 (九州及び東北), 128p.
- 新エネルギー総合開発機構 (1988) 昭和61年度地熱開発促進調査総合解析報告書 久住地域 (第二次), 18, 239p.
- Smith RL and Bailey RA (1968) Resurgent cauldrons. *Studies in Volcanology*, GSA Mem, 116: 613-662.
- 多田 堯 (1993) 九州地方州中部地方の地殻変動とテクトニクス - 別府 - 島原地溝の分裂拡大 -. 地質学論集, 41: 1-12.
- 玉生志郎 (1985) 豊肥地熱地域の層序と地質構造 - 主に坑井データに基づいて -. 地調報告, 264: 115-142.
- Troll V R, Walter T R and Schmincke H U (2002) Cyclic caldera collapse: Piston or piecemeal subsidence? Field and experimental evidence. *Geo Soc America*, 30: 135-138.
- 露木利貞 (1969) 九州地方における温泉の地質学的研究 (第5報) 鹿児島地溝内の温泉 - 特に温泉貯留体について. 鹿児島大学理学部紀要, 2: 85-101.
- Walter T R and Troll V R (2001) Formation of caldera periphery faults: an experimental study. *Bull Volcanol*, 63: 191-203.
- Williams H (1941) Calderas and their origin. *Bull Dept Geol Sci, Univ Calif Publ*, 25: 239-346.

吉谷昭彦・藤田至則・松本征夫・吉村尚久・山内靖喜編集 (1979)

陥没盆地 - その形成と形態 -. 地質学論集, 16, 229p.

久保田喜裕. 2006. 九州のグラーベンと内在コールドロン群との関係 - とくに先行隆起との関連について -. 地球科学, 60, 229-239.

KUBOTA Yoshihiro. 2006. Genetic relationship between graben and clustered cauldrons in Kyushu, Japan -With special reference to pre-collapse uplifting- (Chikyu Kagaku), 60, 229-239.

要 旨

九州に分布する別府 - 島原グラーベンと鹿児島グラーベン, およびそこに内在するコールドロン群との成因的関連について, 陥没に先立つ先行隆起現象に着目し検討した.

九州のコールドロンの陥没様式は, 火山活動に先行する一次陥没と, 火山活動に後れて発生するカルデラ型の二次陥没という, 本宿型二重コールドロンに類似している. スケールモデル実験によると, マグマの上昇は地表を隆起させ, 隆起部に放射状断裂系や, 盆地縁辺部に傾動地塊状の“隆起地形”を形成した. このマグマが複数の場合にはそれぞれの隆起部を連結する“連結断裂系”が形成された. すなわち, これらは隆起運動を示唆する地形・地質現象といえる. マグマの上昇により地表はすぐさま一次陥没が生ずるが, マグマと地表の断裂系は連続していないため, マグマ噴出後に形成される陥没カルデラが先行することはない. 一次陥没で終わるか, 二次の陥没カルデラが生ずるかは, マグマの供給量や規模に規制されと考えられる. 複数の大規模なカルデラ型陥没が生じた場合には, カルデラ群を取り巻くように一回り大きい陥没凹地が形成される. この大規模陥没凹地の形態は, マグマの配列形態に規制され, 連鎖する場合には鹿児島グラーベンのような狭長な陥没凹地へ, 広がりをもって散在・群生した場合には九重 - 別府グラーベンのような幅のある陥没凹地へ転化する.