

第4回陥没カルデラワークショップ報告

下司 信夫*・吉田 武義**・小室 裕明***

Report of the 4th Collapse Caldera Workshop in Bolsena Caldera, Italy

Nobuo GESHI*, Takeyoshi YOSHIDA** and Hiroaki KOMURO***

1. はじめに

2012年9月下旬、イタリア共和国中部のラツィオ州ボルセーナにて第4回陥没カルデラ研究集会在開催された。本研究集会は陥没カルデラに関連する様々な現象、たとえば浅部マグマ溜まりの発達、マグマ溜まり陥没プロセス、巨大噴火の推移とその堆積物、カルデラ火山の異常現象などについての議論を行っている。多くのカルデラ火山を有する我が国でもこの分野の研究は数多くなされており、それらの成果は国際的にも高い関心を集めている。わが国からも多くの研究成果が発表され、カルデラや巨大噴火に関する国際的な議論に貢献することを期待したい。

2. 陥没カルデラワークショップ

陥没カルデラワークショップ (Collapse Caldera Workshop) は、IAVCEI に設けられた小委員会の一つで、陥没カルデラやそれを形成する巨大噴火に関する様々な現象を理解することを目的として設置された。陥没カルデラワークショップの第1回の研究集会は2005年10月にスペイン・カナリア諸島テネリフェ島にて開催され、第2回がメキシコ・ケレタロ市郊外(2008年10月)、第3回がフランス・レユニオン島(2010年10月)にてそれぞれ開催された。今回のイタリア・ボルセーナの研究集会はこれらに続く第4回目となる。これまでの研究集会はいずれもカルデラ火山の近隣で行われ、室内における研究発表及び討論のほか、現地における火山地形や噴出

物、カルデラとそれに関連する地質構造の観察に重点を置く巡検が全員参加で行われている。

今回の研究集会は、ローマ・トレ大学の Valerio Acocella 氏を中心とする現地開催委員会、及び各国からの11名のサイエンスコミッショナーによって企画・実施された。研究集会の日程は9月23日~29日で、この間2日間の研究発表及び討論と、3日間にわたる野外巡検が行われた。今回の研究集会上には、13カ国から41名が参加した。このうち、開催国イタリアのほか、米国、オーストラリア、日本、アルゼンチン、カナダ、ポーランド、スペイン、英国からは複数名の参加があった。日本からは、吉田武義、小室裕明、下司信夫の3名が参加した。

研究集会在行われたラツィオ州ボルセーナは、ローマから約80km北西にあり、カルデラ湖であるボルセーナ湖の北東側の湖畔に位置する(Fig.1)。ボルセーナはイタリア半島北部に向かって伸びる旧ローマ街道の一つカッシア街道沿いにあり、古城を中心に中世の石造りの建物がカルデラ壁の斜面にかけて広がっている小さな街である(Fig.2)。

3. 研究発表

研究集会在は2日間にわたって開催された。トピックごとに5つのセッションが設けられ、それぞれ1件の基調講演と数件の関連発表、及び総合討論が行われた。

カルデラの定義と構造についてのセッションでは、

*〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1
産総研第七事業所産業技術総合研究所地質情報研究部門
Geological Survey of Japan AIST, AIST Site 7, 1-1-1
Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567

**〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3
東北大学大学院理学研究科地学専攻
Department of Earth Science, Tohoku University, 6-3
Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578

***〒690-8504 鳥根県松江市西川津町1060
鳥根大学大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane
690-8504

Corresponding author: Nobuo Geshi
e-mail: geshi-nob@aist.go.jp

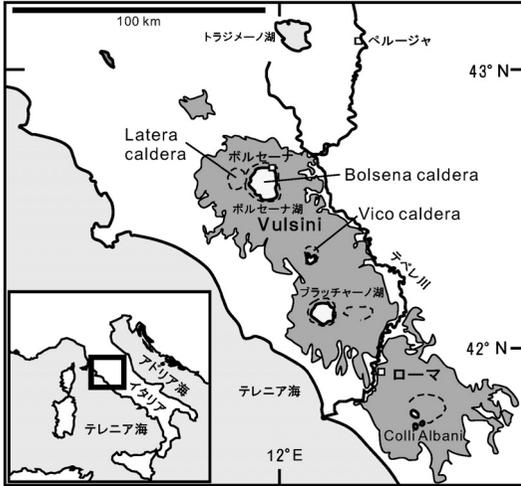


Fig. 1. Generalized geological map of Vulsini volcanic field, including Bolsena, Latera and Vico calderas. Gray-colored areas show approximate distribution of Quaternary volcanic deposit.

Johan Marti ほかによる基調講演で、陥没カルデラの定義について整理が行われ、陥没カルデラとは地下にあるマグマ溜まりがその陥没プロセスを支配している火山性陥没構造に限定して用いるべきであるとの提案がなされた。その他、Peter Lipman ほかによるアメリカ西部の巨大カルデラの再生ドームの形成過程や、Valerio Acocella ほかによるボルセーナカルデラの陥没過程についての議論が行われた。

カルデラ形成と構造進化セッションでは、陥没カルデラのカルデラ壁の不安定性の議論が Nobuo Geshi ほかによる基調講演で行われ、地形的なカルデラのサイズや深さは地表面の不安定性によって大きく変更されるため環状断層のサイズやその変位量といった構造的なパラメータを用いてカルデラを評価すべきであるとの主張がなされた。その他、アナログ実験や数値シミュレーションによるマグマ溜まりや陥没過程の解析が複数の研究発表で紹介され、マグマ溜まりとその母岩の破壊変形プロセスについて議論が行われた。特に、マグマ溜まり近傍の母岩の塑性・脆性変形とその陥没カルデラ形成への影響について活発な議論が行われた。

カルデラ噴出物のセッションでは、Ray Cas ほかによる基調講演が行われ、カルデラは径 100 km に及ぶ巨大カルデラと径数 km の小型のカルデラの二つの端成分があること、これらのカルデラの規模や構造は、カルデラが存在する地殻の年代に規制されている可能性が指摘された。数 100~1000 km³ の珪長質マグマが噴出する巨大



Fig. 2. A : Northern part of the Bolsena Caldera from Bolsena Castle. Wide and gently-sloped caldera rim indicates the down-sag deformation. B : Stone-building church and town-hall, in which the workshop was held. The stone blocks of these buildings are the ignimbrites of Vulsini Caldera Complex.

カルデラは成熟した地殻が発達する地域に分布することから、地殻の成熟度（強度や温度）がカルデラやそれを形成するマグマ溜まりの形成をコントロールしている可能性が指摘された。その他、カルデラ形成に関連した噴出物の解析からカルデラ陥没過程を議論する複数の研究発表が行われ、噴出物の層序や異質礫の分布などからどのようにカルデラ形成噴火を復元するかについての議論が行われた。

カルデラに関連するマグマ溜まりについてのセッションでは Agust Gudmundsson による基調講演が行われ、地殻内部にマグマ溜まりが形成されるプロセスについて議論が行われた。アイスランド等での野外調査の結果を示しながら、シル状の貫入岩体が繰り返しマグマの注入を受けて拡大することにより、マグマ溜まりに発達するという可能性が示された。

カルデラ火山の不安定性のセッションでは、John Stix ほかによる基調講演が行われ、カルデラ火山のマグマ溜まりは開放系であり、苦鉄質マグマの注入が物質的にも

熱的にもマグマ溜まりの不安定をもたらしている可能性が指摘された。その他、さまざまな観測手法を用いたカルデラ火山の変動の解析例が紹介され、特に InSAR を用いた面的な解析結果が多く紹介された。

ポスターセッションでは16件の研究発表が行われた。各ポスターセッションについてはコアタイムの直前に5分間の口頭発表による内容紹介が行われ、その発表内容について参加者全員で共有することができた。一般にすべてのポスターセッション発表に接するのは時間的な制約から難しいが、このショートトークによりすべての発表について理解することが可能となった。

研究集会の最後には総合討論が設けられ、自由討論として本研究集会の成果の総括と、カルデラ火山の理解のために今後必要とされる研究について議論が行われた。議論の結果、カルデラ形成噴火噴出物の特徴や、陥没構造の発達過程については比較的理解が進んでおり、現在までに提唱されているモデルを実例において検証してゆくべき段階であるとされた。一方、陥没カルデラが形成される条件やそのタイミング、巨大噴火の中の陥没の引き金については我々の理解はまだ不十分であり、モデル構築に向けて引き続き探究を進めるべきであるとの意見が多数あげられた。これに関連して、マグマ溜まり中のマグマの諸物性条件、組成分布や温度圧力条件、母岩の諸物性やその時間変化といった地下プロセスと、地上におけるカルデラ形成噴火との関係が今後の重要な研究対象であるとの意見が出された。また、これら陥没カルデラが形成される条件やそのタイミング、陥没を引き起こすマグマ溜まりの物性やその発達過程を理解するためには、噴出物のシーケンスの再検討やマグマの物理的パラメータの決定のための調査が必要であり、現在活動的な火山のみならず、過去のマグマ溜まりである貫入岩体についてもそのような視点での調査が必要であることが指摘された。更に、現在のカルデラ火山の変動についても、マグマシステムの変動という視点での調査と解析が必要であるとの指摘がなされた。カルデラ火山の“unrest”を理解するためには、深部のマグマ活動と浅部に発達する熱水系の活動の両者をあわせて理解しなければならないことが指摘された。

さまざまな視点からの陥没カルデラの形成条件の“一般化”が必要であり、そのためにはデータセットの充実と、異なる分野の情報の融合が必要だとする意見で一致し、今後の陥没カルデラ関連のワークショップの主要なトピックとして意識してゆくというコンセンサスが得られた。

4. 野外討論会

研究集会に引き続き、3日間にわたる野外討論会が開催され、開催地となったボルセーナを含むブルシーニ (Vulsini) 火山地域のいくつかのカルデラ火山 (Fig. 1) を見学した。これらの火山はいずれも、背弧海盆であるテレニア海の拡大に関連する引張テクトニクスに強く支配された火山活動であり、いずれも強アルカリ岩マグマによる火山活動である。

今回の研究集会で観察したイタリア中部の火山の活動は数10万年前であり、活発な噴火活動を続けるイタリア南部カンパニア州のベスピオ火山やシチリア島のエトナ火山に比べると日本ではなじみが薄い。しかし、これらイタリア中部の火山は数10万年~100万年前のカルデラやその噴出物がよく保存されていること、またイタリア内外の多くの研究者による研究が行われ詳細な地質図や多くの論文が発表されているなど、カルデラ火山の研究対象としては劣らず重要である。また、日本では見られないネフェリンやリューサイト斑晶に富む強アルカリ岩の噴出物についても興味深い。

今回の観察対象であるブルシーニ火山群は、ボルセーナ (Bolsena) カルデラとラテラ (Latera) カルデラからなる。ブルシーニ火山群全体の活動はおおよそ0.6~0.1 Maである。その間、ボルセーナカルデラは490~160 kaの間に少なくとも3回の大規模火砕噴火とカルデラ沈降を繰り返し、ラテラカルデラは280~160 kaの間に数回の大規模火砕噴火を繰り返して形成された。またブルシーニ火山群の約30 km南東にはやはり今回の観察対象となったビコ (Vico) 火山がある。ビコ火山の活動は0.4~0.1 Maで、苦鉄質アルカリ岩の活動による成層火山体の形成後、250~150 kaにかけて少なくとも3回の大規模噴火が発生し、それによって山頂部に径約4 kmの小型カルデラが形成された。これらのカルデラの噴出物と陥没構造が野外討論会の主な対象となった。

4-1 ボルセーナカルデラ

初日 (9月26日) はボルセーナカルデラを訪れた。巡検案内者は V.Acocella 氏 (ローマ・トレ大) である。ボルセーナカルデラは南北19 kmの楕円形のカルデラで、北側ほど沈降量の大きいトラップドA型の構造をしている (Acocella, 2007)。ボルセーナカルデラはその外縁部にカルデラを取り囲むような正断層群が発達し、全体として down-sag 型の構造をしている (Acocella, 2007)。ボルセーナの街はずれにおいて、カルデラ周縁部の正断層群の観察を行った (Fig. 3A)。これらの正断層群はボルセーナカルデラ形成時の噴出物を切って発達しており、カルデラの沈降が巨大噴火後も継続的に進行したことを示している (Acocella, et al., 2012)。カルデラ形成時の火

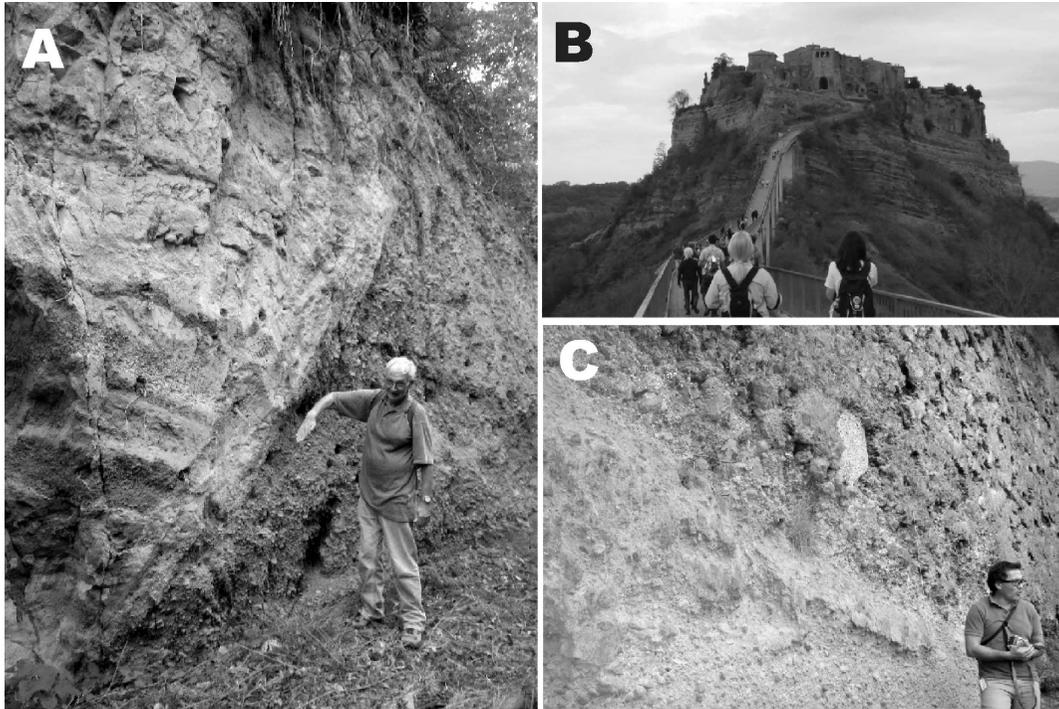


Fig. 3. A : Caldera-related normal faults cutting the pyroclastic layers of syn-collapse pyroclastic flow deposit and post collapse air-fall deposits. Northeastern rim of the Bolsena caldera. B : Civita di Bagnoregio, on the ignimbrite sheet of the Bolsena caldera. C : matrix-supported (lower) and clast-supported (upper) pyroclastic flow deposit from the Vico caldera.

砕流堆積物はボルセーナカルデラ周辺部に広く分布し、差別浸食により溶結部がテーブル状に残存した地形が発達している。今回訪れたチビータ・ディ・バニョレージョ (Civita di Bagnoregio) はボルセーナカルデラの東約 10 km にあり、近郊にあるオルヴィエート (Orvieto) と同様、約 30 万年前にボルセーナカルデラから噴出した溶結火砕流堆積物 (Orvieto-Bagnoregio Ignimbrite) が浸食により凸地形となった残丘地形上に成立した街である (Fig. 3B)。市街地周辺は急崖に囲まれ、常に崩壊の危険に曝されている。ここには“地質と崖崩れの博物館” (Museo Geologico e delle Frane) が存在し、この街を囲む急崖の地質やその安定性、崖崩れの歴史や対策工事についての展示がある。

2 日目 (9 月 27 日) はラテラルカルデラを訪問した。案内者は、D.Palladino 氏 (ローマ・サピエンサ) および G. Giordano 氏 (ローマ・トレ大) である。ラテラルカルデラは、直径 9×7 km の楕円形をしたカルデラである。その北西部にさらに小さなカルデラが存在する。はじめにカルデラ南端のヴァレンターノ (Valentano) の街はずれの展望台からラテラルカルデラを概観しながらその発達過程

について議論を行った。ラテラルカルデラの噴出物の総量はほぼカルデラの凹地形に相当すること、隣接するボルセーナカルデラの沈降がラテラルカルデラの活動と密接に関連しているらしいこと (Acocella, *et al.*, 2012) などが紹介され、隣接した複数のカルデラシステムをつなぐ地下構造について活発な議論が行われた。また、カルデラ内で行われた地熱開発による多数のボーリング結果により、地下約 2 km 付近に閃長岩の貫入岩体が存在することが確認され、これがラテラルカルデラの後期の活動のマグマ溜まりの頂部であると推定されている (Palladino and Simeci, 2005)。地熱開発は地下 1500 m 付近で十分な高温岩体に到達したものの、硫黄化合物を含む湧出ガスの処理の問題から閉鎖に追い込まれたとのことである。

ラテラルカルデラ周辺には時間間隔をおいた複数回の噴火噴出物が見られることから、ラテラルカルデラは火砕噴火を繰り返しながらしだいに成長したと考えられている。ラテラルカルデラの南西でカルデラ形成噴火に伴う降下軽石と火砕流堆積物の繰り返しを観察した。塊状無層理の軽石流堆積物や、斜交層理の発達した堆積物など、火砕流堆積物の様々な堆積構造とその成因について活発

な議論が行われた。

本観察地点はバスの停車地点からアップダウンの続く砂利道を数 km 歩く必要があった。参加者はみな元気に歩いていたが、本ワークショップ参加者中最高齢である Peter Lipman 氏は参加者の中でもすこぶる健脚で、この健脚こそが氏の長年のフィールドワークに基づくカルデラ研究を推進したのだと皆が納得していた。

4-2 ビコ火山

3日目(9月28日)に行われたビコ(Vico)カルデラの野外討論会は、G.Giordano氏(ローマ・トレ大学)とR.Cas氏(モナッシュ大、オーストラリア)の案内で行われた。カルデラ縁からカルデラ地形を俯瞰した後、陥没カルデラ形成に伴う岩片に富む噴出物をカルデラ南縁で観察した。ここでは噴火初期のプリニー式噴火の降下軽石を覆って、多量の異質礫を含む角礫層が発達している。ここではカルデラ形成のタイミングや角礫に富む堆積物の運搬定置過程について議論が行われた。特に、この角礫層は噴出源近傍における降下堆積物なのか、あるいは火砕流堆積物であるのか、それらの区別はどのようにして認識すべきなのか等について議論が行われた。また、角礫層にはリューサイトの巨斑晶が密集した溶岩片が多数含まれており、その成因が参加者の関心を集めていた。

また、カルデラ東側にてビコカルデラから噴出したスコリア流堆積物を観察した(Fig. 3C)。細粒物に乏しく、大型のスパッターが密に分布するスコリア流堆積物と、基質の細粒物に富みやや小型のスパッターが散在するスコリア流堆積物を比較し、その噴出プロセスや定置堆積プロセスとその違いについて議論が行われた。

また、集会最終日の29日には、ローマへの帰途の途中でビコ火山南東山麓のストリ(Sutri)にあるローマ時代の遺跡を見学した。この遺跡は楕円形の闘技場遺跡で、紀元前後に作られたと考えられている。ビコカルデラから15万年前に噴出した最大の火砕流堆積物の溶結凝灰岩を掘削して建造されており、この火砕流堆積物の模式地となっている。遺跡の壁面では基質の細粒物に富みやや小型のスパッターが散在するスコリア流堆積物の堆積構造が明瞭に観察できた。

5. その他、イタリア的研究集会について

研究集会の行われたボルセーナは、中世の街並みが保存された美しい街である。研究集会の拠点となったホテルは湖畔のヨットバーバーに位置し、研究集会はそこから5分ほど歩いた街の中心部にある小さなホール(石造りの教会の一室)で行われた(Fig. 2)。研究集会のプロ

グラムは朝9時から夜までほぼ連続して行われたため街中を散策する機会がほとんど取れなかったのは残念である。それでも参加者の幾人かは会議を抜け出して街中を探索していたらしい。

研究集会の行われたボルセーナとその周辺は、水はけのよい火山性土壌による良質のワインの生産地としても知られている。昼食・夕食にはつねに地元のワインがテーブルに上っていた。特に最終日には夕食後、旧市街にあるエノティカにてワインテイastingパーティーが開催された。ボルセーナ地域から選りすぐりの白・ロゼ・赤ワインがつぎつぎと供されると、それぞれの特徴についてブドウ産地の地質的背景まで含めての紹介が行われ、参加者はカルデラ火山の恵みでもあるイタリア中部のローカルワインを深夜まで堪能した。

6. むすび

今回の陥没カルデラワークショップでは、巨大噴火とカルデラ形成について活発な議論が行われ、カルデラ噴火を引き起こすマグマ溜まりの発達過程や、巨大噴火がどのように発生し、推移し、その結果陥没カルデラがどのような構造発達過程をたどるのかといった陥没カルデラ研究の根本的な問題について意見が交わされた。また将来のカルデラ噴火にむけて、カルデラ火山における変動をどのように理解すべきかといった議論も行われた。これらの議論は今後のわが国のカルデラ火山の活動評価やその巨大噴火研究にとっても重要なトピックである。

次回の第5回研究集会は、ニュージーランド・タウポカルデラ地域にて2014年12月7~11日に開催予定であり、研究発表・総合討論のほか3日間の現地討論会(巡検)が予定されている。また、これに先立つ12月5~7日には、学部学生・大学院生を対象としたトレーニングコースも併せて開催予定である。多くのカルデラ火山を有し、活発な研究がおこなわれているわが国からも積極的な参加を期待したい。

引用文献

- Acocella, V. (2007) Understanding caldera structure and development: an overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth Science Reviews*, **85**, 125-160.
- Acocella, V., Palladino, D.M., Cioni, R., Russo, P., Simeï S. (2012) Caldera structure, amount of collapse and erupted volumes: the case of Bolsena Caldera, Italy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **124**, 1562-1576.
- Palladino, D.M., and Simeï, S. (2005) Eruptive dynamics and caldera collapse during the Onano eruption, Vulcini, Italy. *Bull. Volcanol.* **67**, 423-440.