

第5回陥没カルデラワークショップ報告

長谷川 健*・下司 信夫**・石川 敦代***

A Report of 5th International Workshop on Collapse Calderas, Taupo, New Zealand

Takeshi HASEGAWA*, Nobuo GESHI** and Nobuyo ISHIKAWA***

1. はじめに

2014年12月7~11日、ニュージーランド北島のタウポ湖において第5回陥没カルデラワークショップが開催された。陥没カルデラワークショップ(Collapse Caldera Workshop)とは、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。第1回は2005年にスペイン・カナリア諸島テネリフェ島にて、第2回はメキシコ・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)、そして第4回はイタリア・ボルセーナで開催された。今回のタウポも含め、いずれもカルデラ地域で開催されており、研究集会とセットで野外巡検を行うのが慣例となっている。タウポ湖(面積は616km²で国内最大)は、世界屈指の活動的カルデラ地域であるタウポ火山帯(Taupo Volcanic Zone: Fig. 1)を代表するカルデラであり、最近では約1,800年前にタウポ火砕流(Taupo ignimbrite)を噴出する大規模噴火を発生している(Wilson, 1993)。現在も地熱活動が盛んであり、温泉も抱える観光地である。

今回の研究集会は、「カルデラ火山と社会との関わり(Caldera Volcanism and Society)」といったテーマのもと、カンタベリ大学のCole Jim教授やGNSサイエンスのFournier Nico氏らを中心とするLOC委員会、及び各国のサイエンスコミッショナーによって企画・実施された。5日間の日程のうち、2日目と3日目(12/8, 9)に研究集会を行い、初日(12/7)と4,5日目(12/10, 11)は野外巡検

を行った。またワークショップに先立つ12月5~7日の日程で、主として学生を対象としたトレーニングコースも実施された。今回のワークショップには、12カ国から68名の参加者が集まった(トレーニングコース受講者は22名)。日本からは20名もの参加があり、この数は開催国であるニュージーランドと同数であった。ほかに、オーストラリア、米国、英国、アイスランド、ドイツ、グルジア、メキシコ、ブラジル、チリ、台湾からの参加があった。研究集会の集合日(12/7)に行われたアイスブレイカーは、トレーニングコースの打ち上げも兼ねて行われ、壮麗な湖畔を眺めながら、和気あいあいとした雰囲気の中で交流が行われた(Fig. 2-A)。

2. 研究発表

研究集会は、タウポ湖畔のMillennium Hotelにて、2日間にわたって開催された。「1. Physical Setting and Volcanology」, 「2. magma processes」, 「3. Resources related to calderas」, 「4. Unrest」といった4つのテーマが設けられ、それぞれのテーマで口頭・ポスター発表が行われた。口頭発表件数は37件であり、テーマ1から4の順に1会場で行われ、全員参加型の議論が展開された。ポスター発表は1日目の口頭発表終了後、こちらも1会場の全員参加型で行われた。ポスター発表件数は14件であり、発表時間帯にドリンクが提供されたこともあって、各ポスターの前で活発な議論が展開された。

テーマ1「Physical Setting and Volcanology」の口頭発表

*〒310-8512 水戸市文京2-1-1
茨城大学理学部地球環境科学領域
Department of Earth Sciences, College of Science, Ibaraki University, 2-1-1, Bunkyo, Mito 310-8512, Japan.

**〒305-8567 つくば市東1-1-1
産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ
Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Higashi, Tsukuba,

Ibaraki 305-8567, Japan.
***〒690-8504 松江市西川津町1060
島根大学大学院地球資源学研究所
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue city, Shimane 690-8504, Japan.

Corresponding author: Takeshi Hasegawa
e-mail: hasegawt@mx.ibaraki.ac.jp

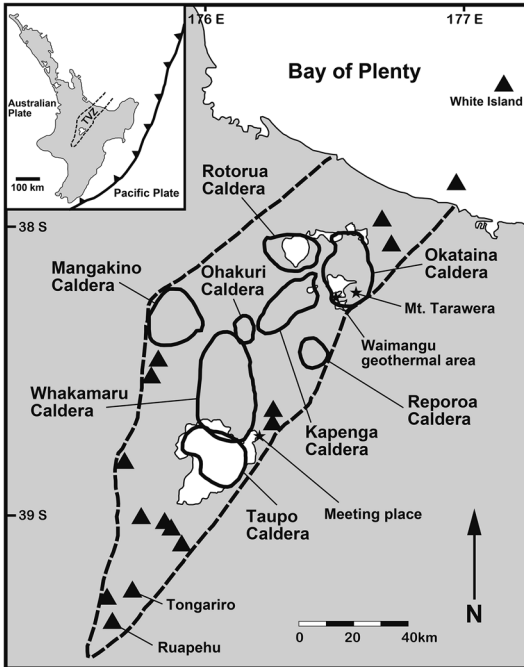


Fig. 1. Index map showing the location of Taupo Volcanic Zone (dashed lines) and structural boundaries of calderas (solid circles), modified from Cole *et al.* (2014). The outline of TVZ is from Houghton *et al.* (1995). Black triangles show sites of andesite cones. Water bodies (lakes and ocean) are shown by white pattern. Inset map shows the location of TVZ within the North Island of New Zealand and their relationships to subduction of the Pacific plate beneath the Australian plate.

内容は、「A. Taupo Volcanic Zone (以下, TVZ)」、「B. Structure」、「C. Deposits」の3つのセッションに細分され、まず、最初のAセッションではGNSおよびカンタベリ大学の研究者らによってTVZの概要が紹介された。最新の研究成果とともに、2018年の完成を目指す高解像度の地質図作成プロジェクトについても、Leonard Graham 他から紹介があった。続くBセッションでは、まずDe Silva Shanaka 他によって、インドネシアのトバ・カルデラなどを例に、カルデラ形成後の再生ドームの上昇率やタイミングについて、それを見積もることの重要性や方法などが発表された。続いて、Grosfils Eric や Browning John and Gudmundsson Agust から、カルデラの構造を支配する環状断層に関する地質学的あるいは地球物理学的研究が発表された。ほかにはNemeth Karoly 他が、小型カルデラの例として、サウジアラビアのマール群を紹介した。Cセッションでは、まずGeshi Nobuo から、カルデラ陥没が開始するための条件として、火砕流に先立つ

プリニー式噴火の噴出率に着目した研究成果が紹介された。その他、Komuro Hiroaki からは数値シミュレーションによる火砕流の堆積構造の解析、Ray Cas 他からは中生代という非常に古い地質時代にみられる溶岩様の大規模水中火砕流について報告がなされた。Self Stephen and Maeno Fukashi からは、大規模噴火が発生しても陥没カルデラを生成しない例が紹介され、そのメカニズムについて、マグマだまりの構造や深さなどに関連した議論がなされた。Kobayashi Tetsuo からは、約7,300年前の鬼界カルデラ噴火時に発生した巨大な地震や津波の地質学的な証拠が紹介された。

テーマ2の「magma processes」では、まずLipman Peter が、南部ロッキー山脈に共存する火砕流とバソリスを例に、巨大な珪長質マグマが、噴出するか深成岩となるかを決定する条件について、ジルコン年代を用いたマグマ供給率などから議論した。Nakagawa Mitsuhiro 他は、始良カルデラ形成時のマグマ供給系について、先行するプリニー式噴火と大規模火砕流を供給した珪長質マグマはそれぞれ異なる系からなることを指摘した。そのほか、Bégué Florence 他からTVZで発生したRotoruaとOhakuriの同時カルデラ形成噴火について、Shane Philip 他からは後タウポ・カルデラ火山活動についての岩石学的研究が発表された。「ひとつのカルデラ下に複数の珪長質マグマが存在する」ことを示唆する研究成果が多いことを受けて、それらのマグマの同位体比は異なるのかどうか、そのようなマグマ系モデルを単純なメルトのタンクで説明できるのか、マッシュ状の地殻を想定するべきか、などといった議論が行われた。

テーマ3の「Resources related to calderas」では、まずCole Jim 他がTVZにおける地熱システムの概要を説明し、続いてChambefort Isabelle 他やBertrand Ted 他によって、TVZにおけるカルデラと地熱地帯の空間的關係について、地質学的、地球化学的および地球物理学的視点から総合的な議論が行われた。ほかに、アメリカのLake City Calderaにおける熱水系やグルジアの白亜紀層にみられる水蒸気噴火堆積物などについて発表があった。

テーマ4の「Unrest」では、まずLeonard Graham 他によって、将来TVZにおいて必ず起こるであろうカルデラ噴火について、それが発生した際の影響を今から正確に評価することの重要性が強調された。続いて、歴史時代におけるTVZの大規模噴火やタウポ湖の津波災害などについての発表、および現在ニュージーランドで進められている防災対策のための組織づくりなども紹介された。最後に、オーストラリアのKanawinka ジオパークにおける取り組みも紹介された。

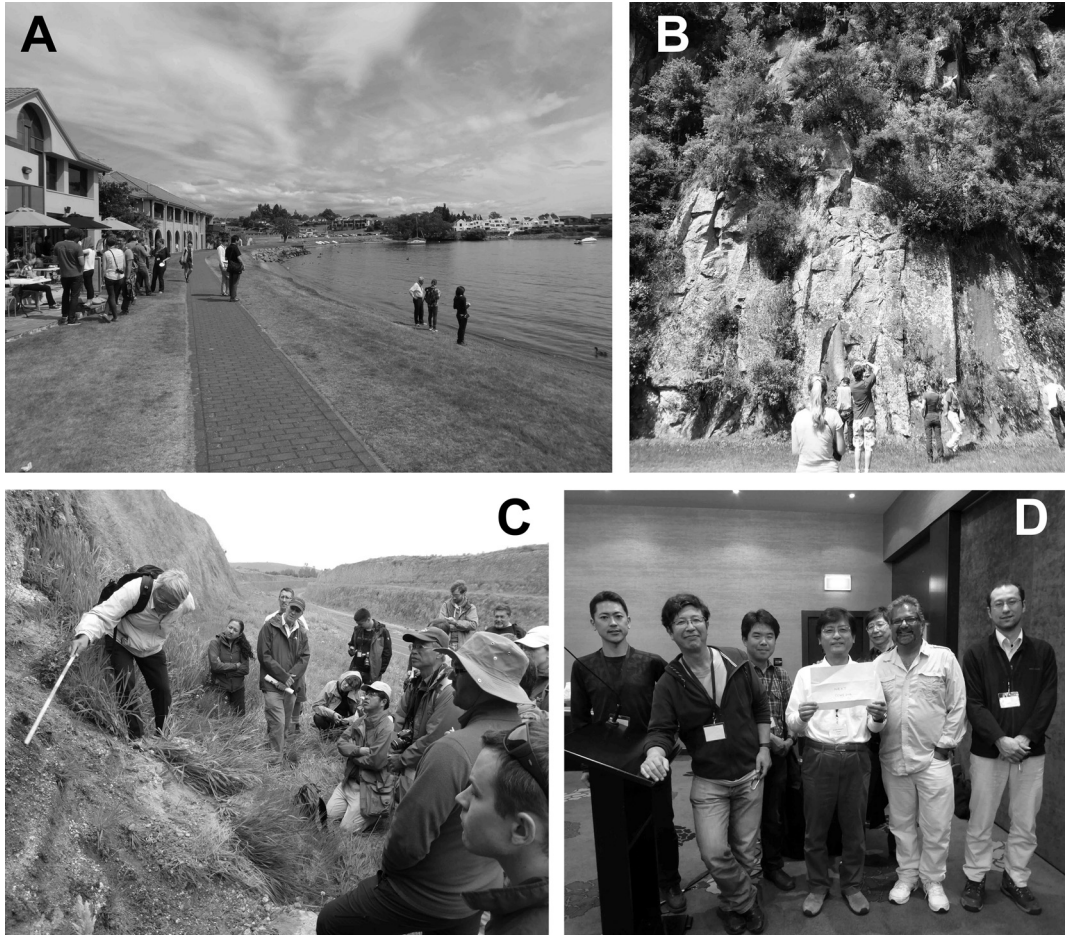


Fig. 2. A: Lake side of Taupo Caldera where the workshop was held. B: Outcrop of Whakamaru ignimbrite that shows more than 100 m thick welded facies. C: There was some discussions about the eruption sequence of 1.8 ka Taupo Ignimbrite in front of the outcrop. D: Commissioners and Japanese LOC members smiling with the winning ticket for the next host of the workshop.

3. 野外巡検

巡検 1 (12/7): TVZ カルデラ群の地形・地質概観

初日には、貸切バスで移動しながら、TVZのカルデラ群を概観する巡検が行われた。案内者は、カンタベリー大学の Cole Jim, Ashwell Paul らである。タウポ湖を出発して北上し、まずはTVZ中央部を構成する巨大なカルデラである Whakamaru Caldera を対象とした。380~350 ka に 1000 km³ におよぶ大規模火砕流を複数回噴出して形成された、径 30 km 以上の巨大なカルデラである (Houghton *et al.*, 1995)。最初の地点では、カルデラ内 (といっても広大な羊の放牧地) から周囲の地形を眺望した。しかし、解説を聞きながらも、多くの参加者は目の前の風景に明瞭なカルデラ地形を認識できないことに戸惑いを隠せない様子であった。TVZのカルデラ群は更新世のカルデ

ラであるが、現在も活発な引張場であり沈降が激しい。また、次々に新たな大規模火砕流が過去の噴出物や地形を被覆することから、教科書でみるような典型的なカルデラ地形を見せないようである。続いて Maraetai Dam で、Whakamaru Caldera 形成時に噴出した Whakamaru ignimbrite を観察した (Fig. 2-B)。柱状節理の発達した層厚約 100 m におよぶ溶結した火砕流堆積物が観察でき、その規模の大きさを伺うことができた。露頭の前では、堆積構造を議論するものや、斑晶鉍物組合せについて案内者に質問するものなど、それぞれの興味のままに時間を過ごしていた。さらに北上して Rotorua Caldera に近づくと、本カルデラの形成噴火である Mamaku ignimbrite (~290 ka) が観察できた。この火砕流は、南隣の Ohakuri Caldera を形成した Ohakuri ignimbrite と同時に噴出した

らしく、案内者によると、時間間隙をおかずに両者が堆積する露頭があるようだ。今回はその露頭を観察できなかったのが残念であった。続いてTVZ北部を構成するRotorua Calderaに到着。後カルデラドーム群のひとつであるNgongotaha溶岩ドームの頂上からロトルア湖とそこに開ける街を一望しながら昼食をとった。ロトルアをあとにして、折り返し南下しながら、まずはWaimangu地熱地帯を観察した。ここは1886年6月10日に起きたTarawera噴火で形成された割れ目火口の南西端にあたり、その後も数回の噴火被害を受けた。活発な噴気活動・地熱活動は今も続いている。展示資料や案内者の説明から、当時の噴火がマオリらの生活に与えた影響を知ることができた。さらに南下しながらReporoa Calderaを観察し、タウポ湖に戻る。途中、バスの中では、TVZにある多数の火砕流堆積物を野外で見分ける際のポイントについて質問と回答が交わされた。

巡検2 (12/10): タウポ・カルデラ

巡検2と後述の巡検3は、参加者を2つのグループに分けて、それぞれ日にちを入れ替えて行われた。巡検2は、Taupo Caldera北東方の狭い地域を見て回る短い巡検であった。案内者は、GNSサイエンスのLigour Geoffらである。まずは、タウポ湖北岸の高台から南を向かい、タウポ湖を眺望する。天気が良いと、南方に続くTongariroとRuapehuの安山岩質成層火山が見えるが、この日はあいにくの雨であった。眺めが悪いながらも、TVZの地質および構造について概説があり、さらにTaupo Calderaを形成したOruanui ignimbrite (26.5ka) および Taupo ignimbrite (18ka) の特徴についても説明があった。Oruanui ignimbriteは、マグマ破碎度が非常に大きく、非溶結で火山豆石を含むなどの特徴から、マグマ水蒸気噴火の産物と考えられている(Wilson *et al.*, 2006)。続いてHuka fallにて、Oruanui ignimbriteの下位にあたる湖成堆積物を観察した。ここは轟音とともに流れる迫力ある滝を見られる観光地でもある。次に高速道路沿いの巨大な切り割りに露出するTaupo ignimbriteを観察した。巡検案内書にある写真は、下位にOruanui ignimbriteも見える良好な全面露頭であるが、現在は植生に覆われ非常に露出が少ない。ここでは、Taupo噴火の開始時に発生・堆積した降下火山灰および降下軽石層と、それを覆う火砕流堆積物が観察できた。各々が気の向くままに30分程度露頭を観察した後、Cas Rayによって火砕流の流動性タイプなどについて説明がなされた。さらにCas Rayの突然の指名によりKobayashi Tetsuoが大規模噴火に伴って発生した地震の痕跡について説明を行った(Fig. 2-C)。続いてFive Mile Bayにおいて、古タウポ湖の段丘に露出する巨大な軽石ブロック(径約2m×4m)

を観察した。これはTaupo噴火の最終フェーズで貫入したデイサイト溶岩の被殻部が当時のタウポ湖を浮きながら漂着して堆積したものである。実際に触ってみると発泡度が悪く、これが本当に水に浮くのか?という疑問の声も上がった。ここでHasegawa TakeshiとGeshi Nobuoは、人頭大の本軽石試料を採取してバスに持ち込み、最終ストップであるWhakaipo Bayで、実際にタウポ湖に本試料を投入してみようと提案した。Whakaipo Bayに着き、浮くかどうかの問いに参加者がYesとNoに分かれ、いざ実験開始。見た目に緻密な岩石が見事にタウポ湖に浮上すると、一度に歓喜の声が上がった。当日の巡検を締めくくる良いイベントとなった。

巡検3 (12/11): TVZ北部地域

TVZ北部を構成するRotoruaおよびOkataina Caldera周辺を対象に、主に熱水活動や地熱施設を見学する巡検であった。案内者はGNSサイエンスのBradley Scottらである。Okataina地域では、Tarawera火山を含む複数の後カルデラ溶岩ドーム群が形成されている。巡検中はこれらについて、同時期のテフラも用いた高解像度の編年と噴火史構築の成果(たとえば、Nairn., 2002)が紹介された。ドームごとに細かく色塗りされた地質図や、層厚数十メートルの降下軽石を直接覆う溶岩ドームの露頭写真に、参加者が感嘆した。Kuirau Parkでは、湯気が立ち上る大小の湖沼群を回り、TVZの地熱活動の活発さを肌で感じることができた。湖沼ごとに水質が異なるという説明に対し、その成因についての質問や議論が交わされる場面もあった。2001年に公園内で発生した熱水噴火についても、当時の生々しい説明やその痕跡を見ることができた。Ngatamariki地熱地帯では地熱発電所を見学した。ニュージーランド国有電力会社であるMighty River Powerが運営する、世界最大級の地熱バイナリー発電所である。今回は特別に敷地内に入れてもらい、地熱を電力に変換するプロセスを従業員に詳しく解説してもらった。本発電所を含め、Mighty River Power社の地熱発電所はニュージーランド全電力の約10%をまかなっているそうである。帰路の車窓からは、リフト帯であるTVZに無数に発達した正断層が作る地形を、幾度か観察できた。

4. 最終総合討論

最終日の夜にはドリンクを飲みながらの総合討論の場が設けられ、本研究集会の総括と展望、そして次回開催地について議論が行われた。カルデラ火山を理解するためには、ある分野だけが重要ということはなく、今後多角的視点によるアプローチを目指すことが確認され、その意味でも、全員参加型の発表会および野外巡検の形

式は継続すべきとする意見が多数を占めた。野外巡検においては、今回、露頭で地層を観察できる地点が少なかったことを受け、次回以降は十分に露頭観察できる巡検を要望する声もあがった。また、今回は参加者が多かったため巡検を2コースに分けて実施したが、全体で討論するためには一つのコースに全員参加するのが望ましいという意見も出された。いずれにしても、現地における野外討論の重要性が再認識された。また、若手研究者の育成の点でも、本ワークショップとセットで学生をターゲットとしたトレーニングコースを行うことの有効性も確認された。次回開催地については、候補地としてギリシア・サントリーニカルデラ、アメリカ西部、北イタリアのドロミテ山塊などが挙げられたが、今回日本人参加者が非常に多かったことなどを受けて、最終的に日本・北海道の開催が決定した。開催地決定の瞬間は、参加者全員から喜びの拍手が贈られた。

総合討論後には、トレーニングコースを修了した学生たちに Cole Jim 教授より、修了証と温かい抱擁が与えられた。なお今回のトレーニングコースには、社会人である Kaneko Katsuya も参加したが、研究者にとっても有意義なコースであったとコメントを残してくれた。修了証授与式の後には、見事、次回ワークショップの誘致を勝ち取った日本 LOC メンバー (Fig. 2-D) とコミッショナーとの間で、具体的な場所や時期、内容などについて熱心に相談する場面があった。

5. さいごに

今回の陥没カルデラワークショップは、地球上で最も盛んに珪長質マグマを生成し、活動的なカルデラ群を有する TVZ で行われた。TVZ に関しては、高時間分解能のテフラ層序に基づいた、カルデラの構造地質学的、岩石学・地球化学的あるいは地球物理学的研究が互いに緊密な連携をもちながら展開されており、各国の参加者にとっても大きな刺激となったと思われる。その他、各国の研究者がそれぞれのケーススタディーを持ち寄り、カルデラの活動度評価やその方法論、噴火から陥没に至る具体的なプロセス、カルデラ噴火の前兆あるいは噴火に付随する地震・津波などの諸現象の理解、噴火直前に地下に存在する大規模珪長質マグマの構造、といったトピックについて、最新の知見とそれに基づく有意義な議論が交わされ、個々のフィールドの実例をもとに、カルデラ火山のより一般的な理解にむけて前進することができたと思われる。そして、今回のテーマである「カルデラと社会との関わり」に沿って、カルデラが育む地熱活動の理解・活用とともに、将来起こりうる巨大噴火の予測・防災対策といった、人類が直面する問題について特

に深い議論がなされた。最近ではわが国でも、カルデラ噴火の予測研究やそれが産業・インフラに与える影響評価などについて、本格的な取り組みが行われ始めている。社会的にもカルデラ研究に目が向けられ始めているタイミングで、次回、本ワークショップが日本で行われることは、我々火山研究者にとって非常に良い機会であろう。北海道開催の具体的な場所は未定であるが、時期的には2016年の夏が有力である。LOCメンバー内ではトレーニングコースの充実を図る声も高く、ぜひコース受講学生をはじめ、国内から多くの参加者がいることを期待したい。最後に、今回参加した大学院生の感想文を載せて本報告の締めくくりとしたい。上記の報告では伝えきれなかった現地の雰囲気を知る一助になれば幸いである。

6. 参加学生による感想文 (島根大学大学院修士課程 1年 石川敦代)

ワークショップ開催地であるタウポ湖畔には、別荘やモーターが立ち並ぶ。タウポの町を出ると丘陵が広がり、時折羊や牛などが放牧されている。ワークショップが開催された季節は夏に当たり、日差しこそ強いが気温そのものは20℃前後と過ごしやすい気候であった。

2日間にわたった研究発表は、1日目ではセッション 1. Physical Setting and Volcanology の口頭発表に加えてポスターセッションが行われ、2日目はセッション 2. magma processes, セッション 3. Resources related to calderas, セッション 4. Unrest に関する発表が行われた。ニュージーランド・タウポで開催されたので、タウポカルデラやタウポ火山帯に関する研究発表が多かった。他にはメキシコの貫入岩体や日本の鬼界カルデラなど、世界各地の陥没カルデラに関する研究を発表されていた。

ポスターセッションでは、セッションの分類に関係なくポスターを貼り、約2時間行われた。飲み物を飲みながら各自興味あるポスターへ行き、発表者からそれぞれ詳しい説明を聞いて質問していた。堅苦しくなく談笑しながら討論しており、とても和やかな雰囲気だった。

全ての研究発表が終わった後、バーベキューが催された。バーベキューの準備が終わるまで、桟橋で夕日を眺めながら雑談する者や先にビールを飲み始める者もいた。また、セーリングも体験でき、バーベキューが始まるまでの余暇時間も大いににぎわった。バーベキューが始まってからは、それぞれが好みのものを取り味わった。

フィールドトリップ I では、タウポに分布するイグニンプライトの露頭やワカマルカルデラの西の縁、ロトルアカルデラの外観を観察し、最後にタウポカルデラを一望できる展望台に行った。特に印象に残ったのはマラエタイダムで観察できるワカマルイグニンプライトの露頭

である。道沿いに広く露頭が露出しており、イグニンプライトの大規模噴出を窺い知れた。

フィールドトリップⅡでは、あいにくの雨であった。フカ滝の外観を見、タウポイグニンプライトの露頭を観察した後、ワカイボ湾に行き巨礫の軽石を観察した。雨で低い気温の中、参加者たちは着込みながら露頭を叩き、カルデラ堆積物のサンプル採取を行っていた。

フィールドトリップⅢでは、プケタラタドームの外観を観察した。クイラウ公園では多くの泥温泉や温泉を見ながら地熱システムとその特徴についての説明を聞きながら進んだ。オハアキ発電所の中を見学させて頂き、地熱システムと発電について詳しい説明を受けた。

巡検3日、研究発表2日のカルデラワークショップの日程は、世界中の地質学者が参加し、議論し合うのを肌で感じ、非常に濃密で刺激になるものであった。国際的なワークショップなので、当然英語の説明・議論になり自分の語学力では理解が及ばず話の筋を追うのもやっとなところもあったが、他の日本からの参加者の方から説明して頂いたり、案内者の方が個人的にゆっくりと解かりやすい英語で説明して下さったりととても親切にして頂いた。

今回、私はポスターセッションを行なった。岡山県のコールドロンと推定される地域に対し重力探査・解析を行なった結果をまとめたものである。正直、国際的な場では日本のほんの一地域など気にも留められないのではないかと不安に思いながら参加していた。だが、多く

の方が話しかけてくださり、討論することで研究結果に対し新たな知見が得られ、とても貴重な体験となった。

最後に、日程中ずっとお世話になった開催者・参加者の皆様と、カルデラワークショップへの参加を誘っていただいた小室先生、ともに参加した研究室の皆様へこの場を借りて感謝申し上げます。

引用文献

- Cole, J. W., Deering, C. D., Burt, R. M., Sewell, S., Shane, P. A. R. and Matthews, N. E. (2014) Okataina Volcanic Centre, Taupo Volcanic Zone, New Zealand: A review of volcanism and synchronous pluton development in an active, dominantly silicic caldera system. *Earth-Science Reviews*, **128**, 1-17.
- Houghton, B. F., Wilson, C. J. N., McWilliams, M. O., Lanphere, M. A., Weaver, S. D., Briggs, R. M. and Pringle, M. S. (1995) Chronology and dynamics of a large silicic magmatic system: central Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geology*, **23**, 13-16
- Nairn, I. A. (2002) Geology of the Okataina Volcanic Centre, scale 1: 50, 000. Institute of Geological and Nuclear Science, Lower Hutt, New Zealand.
- Wilson, C. J. N. (1993) Stratigraphy, chronology, styles and dynamics of late Quaternary eruptions from Taupo volcano, New Zealand. *Phil. Trans. Roy. Soc. London.*, **A 343**, 205-306.
- Wilson, C. J. N., Blake, S., Charlier, B. L. A and Sutton, A. N. (2006) The 26.5 ka Oruanui eruption, Taupo volcano, New Zealand: Development, characteristics and evolution of a large silicic magma body. *J. Petrol.* **47**, 35-69.