北八ヶ岳地獄谷における季節的火口湖の出現と越年氷塊の形成

清水 長正^{*1}・山川 信之^{*2}・池田 明彦^{*3}・大和美佐枝^{*4}・山田 祐子^{*5}
柿下 愛美^{*6}・石井 正樹^{*7}・島立 正広^{*8}

キーワード 火口湖, 越年氷, 風穴, 北八ヶ岳

I. はじめに

北八ヶ岳麦草峠付近の標高 2,100 m ほどの亜高山帯針葉樹林の中に、地獄谷とよばれる直径 100 m にも満たない掘鉢状の火口がある（第 1 図）。その火口底では夏季に氷塊が存在することが知られている（河内, 1974）。これは火口底の岩塊間に生じた風穴現象に因るもので、氷塊は越年することもある。さらに、この火口に生じる

特異な現象として、年によっては初夏の頃に 2～3 箇月程度火口湖が出現する。

地獄谷火口のこれらの概要については、2009～2011 年の観測結果をすでに報告した（清水ほか, 2012）。本稿では、その後に実施したインターバル撮影や水位計などによる火口湖の変化の記録も加え、2009 年～2014 年の 6 年間にわたる、地獄谷火口底の氷塊とそこに一時的に生じた火口湖について観測結果をまとめた。それらの結果に基づき、火口湖の出現の要因と越年氷との関係について考察した。

II. 地獄谷火口の概観

地獄谷火口は、北八ヶ岳麦草峠から北へ約 400 m の標高 2,130 m 付近の針葉樹林中に位置する。火口は直径約 90 m の円形で、深さ 25～37 m の掘鉢状を呈し、火口底は標高 2,108 m である。1:2,5000 地形図「蓼科」には、凹地を示す 2,130 m の等高線（閉曲線）と地獄谷の注記がある（第 1 図）。

火口縁から外周側へ水平距離 150 m ほどの範囲はゆるやかな高まりを呈し、その融岩（両輝石

第 1 図 北八ヶ岳、地獄谷火口の位置
1:2,5000 地形図「蓼科」

^{*1} 早稲田大学人間科学部（非） 〒 359-1192 所沢市三ヶ島 2-579-15

^{*2} 駒澤大学文学部地理学科（非） 〒 154-8524 世田谷区駒沢 1-23-1

^{*3} 品川区役所 〒 140-8715 品川区広町 2-1-36

^{*4} 岡谷市役所 〒 394-8510 岡谷市幸町 8-1

^{*5} 霧ヶ峰自然教室 〒 393-0000 長野県下諏訪町八島湿原 10618

^{*6} 池の平ホテル & リゾーツ 〒 391-0392 長野県立科町芦田八ヶ野 1596

^{*7} 長野県庁 〒 380-0837 長野市南長野字幅下 692-2

^{*8} 麦草ヒュッテ 〒 391-0301 茅野市北山 8241-1

第2図 地獄谷火口の東西断面
清水ほか (2012) を簡略化

安山岩)が周辺の熔岩(角閃石デイサイトなど)と異なることから、凹地は独立した小さな火山活動の火口跡と考えられている(河内, 1974)。この両輝石安山岩(地獄谷熔岩)について、 109 ± 7 kaのK-Ar年代が測定されている(松本ほか, 1999)。

現地での実測により、地獄谷火口の東西断面図を作成した(第2図)。火口の西側から南側にかけての火口壁の比高は約35 mであり、その上部には両輝石安山岩からなる高さ約8 mの急崖が幅約80 mにわたって露出する。急崖基部から火口底までは傾斜 $30 \sim 40^\circ$ の岩塊斜面が続く。一方東側の火口壁は比高25 m、傾斜 $25 \sim 35^\circ$ で、上部に急崖はみられない。東側から火口底に下るルート沿いの表層では、径数10 cm程度の安山岩の角礫が混在する細粒な火山碎屑物が認められる。

火口底は直径10 mほどの広がりがあり、火口壁下部から火口底にかけての表層には最大径4 mに及ぶ安山岩の岩塊が堆積している。火口底の南側には岩塊間に空隙が多く、一部では岩塊下がトンネル状をなす部分もある。こうした小規模な火口内では細粒物質を欠く岩塊が堆積することがあ

り、風穴現象が生じやすい典型的な地形のひとつとされている(清水・澤田, 2015)。火口底南寄りでは、夏季まで氷塊が残る。また、この風穴現象により、夏季の火口内は底部ほど低温である。そのため気温が上昇する昼間には火口底に霧がかかった状態になることがあり、火口縁と火口底との比高25 mの間で、 10°C ほどの気温差が生じることも観測されている(清水ほか, 2012)。

火口底では、融雪時(5月)から夏季にかけて一時的に火口湖が出現することがある。この火口湖の水深は最大4 m程度である(第2図)。

火口周辺から火口内部にかけての植生は、シラビソを主とする亜高山帯針葉樹林が発達するが、火口内の斜面下部ではこれらが低木化し、火口底から比高5 m以下の範囲では森林を欠いている。夏季に氷塊が残る火口底南寄りの火口壁基部では岩塊表面をミズゴケ類がマット状に覆い、一部でコケモモが生育する。このように火口内においては、植生の垂直分布が局所的に逆となっている。火口底付近の森林を欠く範囲は火口湖となって湛水する範囲とおおよそ一致することから、風穴による冷気の影響に加え、火口湖の出現が火口底周辺

における森林成立の阻害要因と推定される。

III. 地獄谷火口における気温・地温変化

1. 観測方法

地獄谷火口では、2009年10月から2014年12月にわたる6年間の気温・地温を継続測定した。気温の測定は、東側の火口縁上で地表から1.5mの高さで、風穴や火口湖の影響を受けにくい位置を選んだ。地温は、火口底南寄りの例年夏季まで氷塊が残存する岩塊間の地表で測定した。温度ロガーはT&D社のTR-51A, TR-52を使用し、測定間隔は1時間とした。

2. 観測結果

観測期間中の気温と地温の変化を第3図に示す。

各年とも夏季の最高気温は20℃を超え、その中の最高値は2014年7月の23℃であった。一方、冬季の最低気温は2012年2月と2013年2月、2014年3月に-20℃以下を記録したが、2010年と2011年は-20℃に達しなかった。火口縁の年平均気温は、2010年が3.0℃、2011年が2.1℃、2012年が1.7℃、2013年が2.2℃、2014年が1.9℃であった。

火口底の地温に関しては、2014年を除き冬季には-12~-13℃まで低下した。一方、夏季～秋季の地温は、2010年と2012年、2014年で0℃を多少上回ったが、2011年と2013年には0℃以下で推移した。これらの地温観測結果は、2011年と2013年では火口底の地表部が通年にわたって凍結していたことを示唆している。

IV. 火口湖の出現と氷塊の存続

1. 観測方法

地獄谷における火口湖の出現と氷塊についての調査は、2009年7月19日に目視・実測・温度ロガーなどにより開始、2011年4月29日からインターバル撮影を、2012年6月20日からは投込み式水位計による計測を実施した。以上の調査は、おおむね2014年8月まで継続させた。インターバルカメラはBrinno社製ガーデンウォッチカムで4時間ごとの撮影、投込み式水位計はOnset社製Hobo 20ウォーターレベルロガー（温度センサー付き）を使用し2時間ごとの計測とした。

2. 観測結果

以下に、2009年から2014年までの6年間の火口湖の出現と火口底の氷塊の状況について述べ

第3図 2009年～2014年の地獄谷火口における気温と地温の変化

る。

1) 2009 年

7 月 19 日に火口底に水面が認められず、この年は火口湖が出現しなかったと思われる。10 月 25 日に $150 \times 40 \times 10$ cm の氷塊が火口底南寄りの岩塊間に残存していた。以降、翌 2010 年初夏までの火口底の地温が 0°C 以下であったことから(第 3 図)、氷塊は翌 2010 年へ越年したとみられる。

2) 2010 年

目視と標尺による計測により、5 月 3 日に火口底の雪面上に径 2 m と 3 m の 2 つの水面が出現し、5 月 28 日に径 15 m 深さ 3.7 m の湖へと発達した。この状態は 7 月 18 日まで続いたが、その後 7 月 28 日までに 40 cm 水位が低下した。火口湖の消滅した時期は確認できなかったが、存続期間は 5 月～8 月上旬の約 100 日間程と推定される。9 月 11 日に $15 \times 10 \times 4$ cm の氷塊が火口底に残存しているのを確認した。しかし、この氷塊は 11 月 3 日までに融解し、越年氷にはならなかった。

3) 2011 年

4 月 29 日から 7 月 17 日までのインターバル撮影結果では、この期間に消雪は進んだが、湛水状態は記録されなかった。7 月 17 日でも残雪があり、岩塊間には直径 30 cm 以上の氷柱が多数見られた。10 月 29 日に岩塊間に $90 \times 70 \times 20$ cm の氷塊が残存し(写真 1)、その後の地温推移(第 3 図)から、この氷塊は翌 2012 年へ越年したとみられる。

4) 2012 年

5 月 27 日から 8 月 24 日までのインターバル撮影結果では、5 月末以降 7 月末日まで火口湖の最高水位が維持されていた。その後水位は徐々に低下していたが、8 月 22 日に急速な水位低下が生じ、8 月 23 日には水域は消滅した。また、この年は、6 月 23 日に投込み式水位計を湖底に設置し、湖の水位変化を計測した。第 4 図には 7 月 20 日か

写真 1 火口底の岩塊間の越年氷(2011 年 10 月 29 日)

スケールは左右 50 cm (電子版ではカラー)

ら 8 月 29 日までの水位と水位計設置地点の温度変化を示した。その結果、6 月 23 日には水深 4.2 m で最大水位にあった火口湖が、その後は徐々に減水を開始し、8 月 1 日に水深 3.3 m、8 月 22 日 16 時に水深 2.1 m となり、翌 23 日正午には水深 0 m となり消滅した。これは、インターバル撮影結果と調和的である。湖水は約 20 時間で一気に減水・消滅したことが明らかとなった。火口湖の出現開始時期は不明であるが、2010 年や 2013 年(後述)、2014 年(後述)の例をみると、5 月上旬に出現している。2012 年の場合もこれらから推定すると、火口湖の存続期間は 5 月～8 月の少なくとも 100 日間程度と推測される。一方、氷塊は、9 月 1 日までに融解していた。

火口底に設置した水位計付属の温度計による測定結果(第 4 図)から、火口湖の消滅前後にあたる 7～8 月の温度変化をみると、 0°C 付近で推移していたものが 7 月 23 日に 0.7°C ほど上昇した後、8 月上旬は 0°C 前後で、その後は 1°C を上回った状態で推移している。しかし、湖が消滅した 8 月 23 日に突然 0.5°C ほどの低下が認められ、その後は 1°C を上回ることなく推移した。この変化は、水と氷塊が混在する中に置かれていた水位計が 7 月 23 日に水中に完全に解放された後に湖底の水温を記録するようになり、8 月 23 日の火口湖消滅により地表に現れた後は、大気中で地表面の温度を記録していたことを示すと考えられる。同様の温度変化は 2010 年 8 月にも現れていた(清水

ほか、2012)。

5) 2013 年

4月29日から8月12日までのインターバル撮影結果では、5月17日に水域が雪原上に出現し始め、23日には火山湖が最大となり、25日に消滅した。火山湖の存続期間は5月中の8日間のみで、雪原上に現れた火山湖が数日後に雪原上で消えるという状況であった。その後、融雪が進んでも水域は出現しなかった。氷塊は夏季を通して存続し、11月2日に至っても100×90×20 cmの氷塊が岩塊間に残存していた。火山底の地温(第3図)をみる限り、氷塊は翌2014年へ越冬したとみなされる。

6) 2014 年

4月28日から8月26日までのインターバル撮影結果によると、5月10日に水域が出現し、5月27日に火山湖は最大となった。その状態は7月23日まで継続したが、24日には急速に水位が低下し、25日の朝までには湖は消滅した(写真2)。火山湖の存続期間は5月～7月の76日間となった。

火山湖出現以前の4月28日に、火山底の深さ2 mの積雪に穴をあけ、積雪下に水位計を設置した。その時点で積雪下には水深10 cm程度の水が溜まっていた(第5図)。

第6図に、4月29日以降の水位および水位計設置地点の温度変化を示した。これによると、4月29日以降水位上昇が続き、5月29日には水深3.5 mに達した。それ以後は多少の上下動はあったものの、この状態が7月22日まで続いた。翌23日に急速に水位が低下、36時間後の25日に水位は数 cm まで低下し、火山湖はほぼ消滅した。

11月8日の火山底には85×68×19 cmの氷塊が残存していた。地温は同日のみ0.1℃に上昇したが、この日以外は秋～冬を通じて0℃以下で推移しており、氷塊は越冬したとみられる。

写真2 2014年の火山湖の推移
(電子版ではカラー)

第4図 2012年7～8月の地獄谷火口湖の水位と水底・地表温度の変化

第5図 火口底の積雪下における水位計の設置状況(2014年4月28日)

第6図 2014年の地獄谷火口湖の水位と水底温度の変化

V. 火口湖の出現と越冬氷塊との関係

季節的な火口湖の出現は北海道の大雪山白雲岳火口でも知られており、そこでは毎年初夏まで残存する凍土層が不透水層となって融雪水を蓄え、その凍土層が融解すると急速な排水が生じ、数日のうちに湖が消滅するという(高橋, 1995, 高橋・清水, 2016)。2012年と2014年の地獄谷火口湖の消滅がそれぞれ20時間と36時間の比較的短期間に起こったことは、不透水層となっていた凍土層の融解によって、白雲岳と同様に排水が一気に進

んだためと考えるのが妥当であろう。

2009年7月～2014年12月の6年間における氷塊の存続期間と火口湖の出現期間を第7図に示す。両者の推移をみると、火口湖が初夏以降2箇月以上にわたって存続した年の秋季には、火口底の氷塊が融解する。一方、火口湖が全く出現しないか、あるいは短期間のみ出現する年は、氷塊が冬季まで残され越冬するという関係が認められる。このことは火口湖が長期間存在すると火口底の氷塊の融解が促進されることを示唆する。

これに対し、火口底で氷塊が越冬した翌年には

第7図 2009年～2014年の地獄谷火口底における氷塊の存続期間・火口湖の出現期間と地温変化

火口湖が出現するという関係も認められた。氷塊の残存と不透水層となる火口底の凍土の存続についての関係は不明だが、氷塊が発達し越冬した翌年は、おそらく凍土も夏季まで存続したと推定される。そのため、雨水や融雪水を蓄えて火口湖が、2か月以上にわたり存在したのであろう。このように、地獄谷火口湖の長期存続と越冬氷塊形成との間には、隔年ごとに交互に生じるという周期的関係があるように考えられる。

なお、2013年には5月に8日間という短期間のみ火口底の雪原上に水域が出現している。これに先立つ4月上旬の火口底での地温推移をみると一時的な急上昇が生じており、気温上昇もみられる（第3図）。このような融解期の急激な地温上昇は降雨によりもたらされる場合がある¹⁾。地獄谷でも、降雨により促進された融雪水がその後の気温低下によって積雪中に氷層が形成され、それが不透水層となり雪原上での一時的な水域の出現に結び付いたと考えられる。

また、2014年は火口湖が出現したにもかかわらず例外的に氷塊が越冬したが、これはその年の火口湖の存続期間がやや短かったことや残雪量が多かったことなどの要因が推定される。

VI. ま と め

以上、地獄谷の火口湖と氷塊の関係について、次のようにまとめられよう。

- 1) 初夏に火口湖が2箇月以上の長期間にわたって存続する年は、火口底に残る氷塊は秋までに融解することが多く、翌年は火口湖が出現しない。
- 2) 火口湖が長期間存続しない年は、秋遅くまで氷塊が残存し翌年へ越冬する。そして初夏を迎えるころに火口湖が長期間にわたって存続する。
- 3) 地獄谷では、1)の火口湖の出現と2)の氷塊の越冬とが、2年間で交互に生じている。

本稿の内容は2014年日本地理学会春季学術大会および2014年日本雪氷学会雪氷研究大会で発表した。調査にあたっては平成25年度東京地学協会助成金（研究・調査課題：中部日本における風穴の凍結期間と地下水の観測）の一部を使用した。

（2020年7月20日 受理）

注

1) 地獄谷の南東約 16 km に位置する野辺山（標高 1,350 m）では 4 月上旬に合計 90 mm を超える降水量が記録されている（気象庁ホームページ）。この降水日の気温（平均気温 3.6 ~ 7.4℃）からみて、降水の多くは降雨であったと考えられる。

文 献

河内晋平（1974）：蓼科山地域の地質。地域地質研究報告（5 万分の 1 図幅）東京（8）第 24 号，地質調査所。
松本哲一・宇都浩三・水野清秀（1999）：蓼科山地域

に分布する北八ヶ岳火山岩類の K-Ar 年代。日本火山学会 1999 年度秋季大会講演要旨集，20, 20。
清水長正・山川信之・石井正樹・藤森美佐枝・遠藤海斗（2012）：北八ヶ岳，地獄台火口底の水塊と一時的な火口湖。地学雑誌，121, 359-366。
清水長正・澤田結基編（2015）：日本の風穴—冷涼のしくみと産業・観光への活用。古今書院。
高橋伸幸（1995）：凍土の融解期における大雪山白雲岳火口湖の消滅。北海道地理，69, 49-55。
高橋伸幸・清水長正（2016）：大雪山白雲岳山頂部の周氷河地域における火口湖の形成と消滅。日本地理学会発表要旨集，90, 107。

The Relations between Seasonal Crater Lake Appearance and Perennial Ground-ice Development in Jigokudani-crater, Kita-Yatsugatake, Central Japan

Chousei SHIMIZU^{*1}, Nobuyuki YAMAKAWA^{*2}, Akihiko IKEDA^{*3}, Misae OWA^{*4},
Yuko YAMADA^{*5}, Manami KAKISHITA^{*6}, Masaki ISHII^{*7}
and Masahiro SHIMADATE^{*8}

Jigokudani Crater is located at the altitude of 2,100 m a.s.l. in the subalpine zone of northern area of the Yatsugatake volcanic chain (Kita-Yatsugatake). The relations between seasonal crater lake appearance and ground-ice development under the algific environment of talus slope in the crater were observed through 6 years from 2009 to 2014. The crater lake appeared during more than two months in early summer of 2010, 2012 and 2014 and ground-ice disappeared in autumn in each year except 2014. On the other hand, perennial ground-ice was formed in 2009, 2011, 2013 and maintained until next summer, and crater lake appeared. These periodic phenomena suggest that the appearance of crater lake depends on the frozen ground as an impermeable layer represented by ground-ice which was maintained from former year.

Key words : crater lake, ground-ice, algific talus slope, Kita-Yatsugatake

^{*1}Faculty of Human Sciences, Waseda University, 2-579-15, Mikashima, Tokorozawa 359-1192, Japan

^{*2}Department Geography, Komazawa University, 1-23-1, Komazawa, Setagaya 154-8524, Japan,

^{*3}Shinagawa City Office, 2-1-36, Hiromachi, Shinagawa 140-8715, Japan

^{*4}Okaya City Office, 8-1, Saiwai-cho, Okaya 394-8510, Japan

^{*5}Nature department of Kirigamine, 10618, Yashima-shitsugen, Shimosuwa 393-0000, Japan

^{*6}Ikenotaira Hotel & Resorts, 1596, Ashida-hatsukano, Tateshina 391-0392, Japan

^{*7}Nagano Prefectural Office, 692-2, Habashita-minaminagano, Nagano 380-0837, Japan

^{*8}Mugikusa Hutte, 8241-1, Kitayama, Chino 391-0301, Japan