

1888年磐梯山水蒸気爆発に関するノート

— (1) 爆発源の位置と噴出方向に関する再検討 —

浜口博之*・植木貞人**

(2012年1月20日受付, 2012年6月4日受理)

Notes on the 1888 Phreatic Explosion at Bandai Volcano

(1) The Re-examination of the Location of Explosive Source and Direction of Outbursts

Hiroyuki HAMAGUCHI* and Sadato UEKI**

The 1888 phreatic explosion of the Bandai volcano, northeastern Japan, has not been completely explained as yet. The statements and interpretations in the leading article of Sekiya and Kikuchi (1890) were mainly based on circumstantial evidence collected by eyewitnesses including the authors and local residents as well as by the survey of collapsed crater. The inference of the authors that the hydrothermal fluid might be located beneath Kobandai-san has not been examined or verified as yet.

We attempted to qualitatively validate this inference by considering a simple physical model with a pressurized spherical cavity within an elastic half space. The underground model parameters were deduced from currently observed three-dimensional velocity structure underneath the volcano as well as from recent volcano-seismic information. We evaluated the spatial distributions of the maximum tensional stresses along the free surface as well as along the circumference of the cavity. We assumed that when the tensile stress exceeds the tensile strength of the host rock, tensional fractures would form, and consequently, hydrothermal liquid would escape from the cavity.

Detailed comparisons of the numerical evaluation with the reported observations by Sekiya and Kikuchi (1890) and others confirmed that the explosive source was not located beneath Kobandai-san (the collapsed mountain) but beneath the Numano-taira (the old crater). This result provides counter-evidence for Sekiya and Kikuchi's inference and is contrary to the popular belief motivated by their inference.

Key words: Phreatic explosion, Bandai volcano, Explosion crater, Bulge structure, Directed outburst

1. ノートについての序言

磐梯山噴火は1888(明治21)年7月15日に起きた。噴火直後に現地を踏査したPalmer(1894)はその印象を「近年日本で起きた最大の悲劇であり、そして世界の歴史の中で最も驚くべき火山爆発の1つとして記憶に残るものである」と述べている。水蒸気爆発の規模は世界最大級のものであった(Barberi *et al.*, 1992)。それから120余年が経過しているが、この噴火過程を論じた現在の論

文の中には未だ相反した解釈が散見される(浜口, 2010)。また、水蒸気爆発や山体崩壊のメカニズムについても多くの未解明な事柄が残されたままになっている(中村・青木, 1993)。

噴火が起きた明治の中期には、今日のように計器観測にもとづく客観的データはなかった。噴火解明の手掛りとなる残されたデータは現地の人々の目撃情報とわずかな写真、それに直後に現地入りした研究者自身によって

* 〒981-3122 宮城県仙台市泉区加茂 2-6-2
2-6-2 Kamo, Izumi-ku, Sendai, Miyagi 982-3122, Japan.

** 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6
東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測
センター

RCPEVE, Graduate School of Sciences, Tohoku University,

6-6 Aoba Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578,
Japan.

Corresponding author: Hiroyuki Hamaguchi
e-mail: hamaguti@cello.ocn.ne.jp

得られた状況証拠に限られている。1群の科学者達の中に噴火の瞬間を目撃した人は1人もいない、彼らはその当時の火山学や岩石学などの知識を頼りに噴火後の現況の観察・調査に加え2,3の観測を実施した。現地の人々も待ち構えて噴火を見たわけではなく、突発的な爆発から来る恐怖心を持って現象を見ている。

科学的に「見る」、「観察する」という本来の性質については科学哲学者 N. R. ハンソン (1982) の著書中の重要な指摘がある。例えば、「見る」(seeing) と我々が呼ぶものは視覚の経験と我々の知識の合成にほかならない。また、「見た」ことを言語として表現する際にはその個人の経験を背景とした解釈が入る、「画像は真でも偽でもないが、それを元にした科学的な言明には真か偽がある」、「事実は仮説に基づいて選択されねばならない。あるいはもっと強く言えば、事実は、われわれがその事実の最も際立った特性と見なすものを、その事実を把握するのに用いる仮説から取り出すのである」。これらの指摘を参考にしつつ、磐梯山噴火の観察記録、中でも特に重要な文献 (Sekiya and Kikuchi, 1890) に記載された内容を再検討するのが本論の目的の1つである。

磐梯山噴火に関する現地の人々の目撃情報は視覚の経験と個人々の知識のフィルター作用を通し変形され複雑な情報になっている可能性がある。これらの目撃情報を収集して研究者のこぼれで解釈し語られる時にはさらに2次的な変質を受ける。和田 (1888) や関谷・菊池 (1888) の官報報告文中に記載された「事実」と見做されている目撃情報には「見る」という行為に潜む無意識のあるいは意識的な情報操作が含まれている。従って、これらの論文内容を引用したり、「事実」と思われる事柄を抽出して後世の研究者がモデル構築する場合には、さらなる操作の影響が混入するのは避けたい。このように主観的な要素の入りこみ余地のある「見る」ことによって収集されたデータにもとづかざるを得ない制約が、磐梯山の諸問題を未解明のまま今日に至らしめた要因の1つである。また、もう1つの別の問題としては1888年磐梯山噴火のような大規模な水蒸気爆発が世界的に見ても稀にしか起きないという研究上の制約が解明を困難にしている側面も見逃せない。明治以降で最大の災害をもたらした火山噴火にもかかわらず、わが国の専門学会誌「火山」には、災害関連の論説 (北原, 1998) を除き、磐梯山の1888年水蒸気爆発機構を扱った論文は1編も見当たらないのは、このような背景的要因が作用しているのかも知れない。

これまでの磐梯山の研究の変遷を概観すると残された課題が改めて明らかになる。最も重要と思われる点は噴火直後の官報に和田 (1888) が「火口は2つ」との見解を

示したのに対して関谷・菊池 (1888) はそうではないと不同意をあらわし「火口は1つ」との見解を提出したことであろう。お雇い外国人教師などの報告・論文には多彩な観察や解釈があったが、それらが議論の俎上に載せられることもなかった。2つの見解のどちらが妥当かの検証が不十分なまま、その後は Sekiya and Kikuchi (1890) の論文内容が定説とみなされ、それをベースにして新しい解釈が次々に提案されてきたのが実情であろう (浜口, 2010)。

「見る」という主観の入り込む余地を残したデータをもとに取りまとめられた報告書や論文中に記載された事実と仮説、観察と解釈、仮定と断定などの中身については今日の火山学の知見や情報をもとに再検討・再評価を行う必要がある。このノートでは「見る」という視覚感に依存したデータをもとに進展した研究過程で見過ごされた問題点を個別に整理し、報告文、論文や資料の中に見られる問題点を取り上げ、何回かに分けて今日的視点から再評価を試みる。この小論はその第1報であり、水蒸気爆発源に関する関谷・菊池 (1888) に見られる熱水溜りに関する異なった2つの推測やそれらをもとにした Sekiya and Kikuchi (1890) の作業仮説 (後述) を最近の知見をもとに検証する。次報以降では、磐梯山の問題に潜むジレンマの在所とそれを乗り越える方策などを議論する予定である。

2. 関谷・菊池の論文にみる推測と解釈の問題点

噴火直後に帝国大学 (関谷清景・菊池 安)、農務省地質局 (和田維四郎・大塚専一)、内務省地理局 (和田雄治・大塚豊信) の3機関の研究者が現地調査を行った。噴火3日後に現地入りしたため、自分の目でじかに噴火の瞬間を見た研究者は1人もいないことには留意する必要がある。それぞれの研究者は高々数週間という短期間に独自に火口観察、聞き取り調査、測量や諸観測を行った。調査結果の速報は和田 (1888) と関谷・菊池 (1888) がそれぞれ独立に官報に載せたが、それらの中に違うことを「見た」内容が報告されている。また関谷と菊池は共同研究を行い、連名とそれぞれ単名で論文・報告書を6編公表しているが、単名の報告書内容には両氏が違ったことを「見て」、それぞれ異なった推測を述べているところがある。このように「見る」ことを主体にした研究手法にもとづく事実認定とその解釈には随所にくいちがいが認められる。

カルデラ火口の測量を実施し水蒸気爆発を当時のレベルで徹底的に調べ、爆発の因果に言及した Sekiya and Kikuchi (1890) の論文は後世の研究者にとって基本的で準拠すべきものに位置づけられてきた。彼らが示したスケッチを含む調査内容とその解釈やモデルは、その後の



Fig. 1. Photograph-based sketch of the horseshoe-shaped crater as seen from the north, three weeks after the eruption and at a distance of 9 km. The original photograph was taken by W. K. Bruton. The right-hand peak is O-Bandai and the left-hand one is Kushigamine. Numano-taira (old crater) and mud flow along Biwasawa are hidden behind the new crater's rim and cannot be seen in this sketch.

図 1. 磐梯山の北方に開いた馬蹄形火口、噴気列、岩屑なだれの様子。噴火から3週間後に北北西の細野辺りから Bruton が撮影した遠望写真より菊池 安がスケッチしたもの (Sekiya and Kikuchi, 1890 の図 XXI)。

磐梯山水蒸気爆発のイメージを定着させた(下鶴, 1988)。後世の研究者(例えば, 守屋, 1980)の論文にはこの噴火イメージを発展的に解釈し, いかに山体崩壊が起きたのかを検討したものが多く, しかしそこには巨大な水蒸気爆発がなぜ起きたのかという遡行的に原因を追求する問題意識が希薄であり, Sekiya and Kikuchi (1890) の作業仮説から導かれた噴火イメージに拘束され, それから抜け出せない姿が垣間見られる。新しい視点から磐梯山水蒸気爆発の原因に迫るには彼らの導入した仮定や仮説, 事実認識などの根幹部分を掘り下げて再検討する必要がある。Sekiya and Kikuchi (1890) よれば, 1888 年の水蒸気爆発は上方に噴出した水煙, 東南方向へ枇杷沢を流下した土石流と猛烈な爆風 (blast, hurricane, gust という単語が英語論文では混用されている) 並びに, 北方への山体崩壊に伴う大規模な岩屑なだれ (デブリ・アバランシェ) など噴出場所や噴出物の性質などが異なり大変複雑な様相を呈している。

関谷 (1888) と菊池 (1888) がそれぞれ単名で発表した講演の口述記を読むと, 二人は噴火の原因や火口位置について異なった見解を述べている。しかし連名の英語論文 (Sekiya and Kikuchi, 1890, P.140) では二人の異なる見解が統合され, 「During the long period of rest, the original crater now known as Numano-taira, has in large measure, lost its crater-like form by the disintegration of surrounding walls. In such case, it often happens that subsequent eruptions take place at other parts of the mountain, breaking open new chasms along other lines of weakness.」という作業仮説に敷衍され, 2 人の見解の相違が止揚され, 外見的には矛盾が隠されたままになっている。彼らは小磐梯山を山体崩壊させた今回の噴火はまさにこの作業仮説通り起きたも

のであったと断定し, 水蒸気爆発の本源 (熱水溜まり) は馬蹄形カルデラ火口の直下に存在すると解釈した。彼らの論文には目撃情報をもとにした「事実」に関する記述が多く載せられているが, この作業仮説に整合しない現象, たとえば枇杷沢方向の土石流や爆風等は本質を離れた「支流」と位置づけられ, 最終的にその存在が解釈の視野の外に置かれている。

複雑な現象を扱う場合, 関連する要因をすべて拒まずに受け入れるのではなく, 注目する要因以外は切り捨てる手法が好まれることは科学史の中によく見られる分析的思考である。しかし, 彼らの単純化した断定的な選択と解釈は後々一世紀に渡り磐梯山水蒸気爆発の理解が混乱に陥る遠因となったと筆者は考える。

見逃していけないことは, 仮説や仮定の内容は当時の学問レベルや研究者の知識の関数であることである。Sekiya and Kikuchi (1890) が導入した作業仮説は著者の主観的な思い込み (推測的推論) である可能性も否定できない。従ってこの仮説は今日の火山学の知見をもとに検証されねばならない。地表面を「見る」ことによって収集された当時の観察事実の真偽について反証する証拠を提出することは噴火から 1 世紀余を経過している今日では困難である。しかし地下に隠された事実にもとづき仮説の妥当性を検証することは不可能ではない。この小論では彼らの仮説にもとづく小磐梯山直下の熱水・水蒸気溜まりのイメージが正しいかどうかを最近の地下構造や地震活動の知見をもとに簡単な圧力源モデルをもとにして定量的に検証する。

3. 馬蹄形カルデラのスケッチ像に潜む問題点

1914 年の磐梯山を訪問した Jagger (1930, 1931) は彼の

編集するニュースレターの巻頭写真に Sekiya and Kikuchi (1890) の馬蹄形カルデラ地形、噴気活動、岩屑なだれのスケッチ (Fig. 1) を2度にわたって載せている。また最近の内外の教科書 (例えば, Francis, 1993; 中田, 1997) にもこのスケッチが掲載されていることが多い。この構図は1888年水蒸気爆発現象の「部分」を表示したスケッチであるが、現象の「全体」があたかもこのようなものであったとの錯視を読者に誘引し、現象の「部分」を切り取ったスケッチであることを忘れさせる。知識は視覚から入力される場合が多く、このスケッチに秘められた非言語的な印象形成は計り知れない影響を及ぼしている。Fig. 1のスケッチからは崩壊地形の背後に位置する沼ノ平や枇杷沢で起きた出来事を全く覗き知ることはできない。従ってこれら「見えない」地点で起きた諸現象が読者の心象からフェードアウトするのは避けがたい。

複雑の事象を科学的に取り扱う際、「全体」から重要と思われる「部分」を抜き出し、その他の要因を切り捨てて考察を進めるやり方はよくあることである。1888年の水蒸気爆発に伴う顕著な表面現象には、①垂直に上昇する15~20回の水煙、②南東方向に噴出した土石流と爆風、③山体崩壊と北方への岩屑なだれ (デブリ・アバランシェ) の3つの現象がごく短時間の内にほぼ切れ目なく続発したことが知られている。Fig. 1のスケッチは最後の現象③を描いたもので、爆発の初期に出現した①、②の現象が描写されずに、きれいに切り捨てられている。このように「部分」だけに焦点を当てる手法は後世の研究者 (守屋, 1980; Yonechi, 1988; 関口・他, 1994) にも踏襲され今日に至っている。Macdonald (1972) の教科書には「The explosions took place on the northern flank of the mountain」と描かれ、すべての爆発が北麓で起きたものと誤認されている。水蒸気爆発の全体像を考察する代わりに切り取られた「部分」に焦点を当てる思考プロセスが、磐梯山噴火過程の真の理解の妨げになり、研究が「袋小路」に入り込む契機となっていると筆者には思われる。「画像は真でも偽でもないが、それを元にした科学的な言明には真か偽がある」というハンソン (1982) の喝破は含味に値する。

4. 水蒸気爆発の全体像

Fig. 1の構図は、噴火発生から3週間後に磐梯山の北方約9kmの地点からW.H. Brutonが撮影した写真をもとに菊池 安がスケッチ化したものである (Sekiya and Kikuchi, 1890)。しかし今回の水蒸気爆発を一望に見渡せ全体を視覚的に把握できる場所はこの撮影位置ではない。なぜならこの場所からは沼ノ平や枇杷沢を遠望することができないからである。最適な位置は爆発現象全体

を鳥瞰的に眺め渡すことのできる大磐梯山の山頂近傍である。この位置から爆発の実況を目撃した一人の登山者 (引用の際は「彼」と呼ぶ) がいた。その目撃情報はBruton (1888) が母国の写真雑誌に投稿した記事中に掲載されている。写真家の視点からこの視覚情報を高く評価している。登山者が聞き取り調査に対して述べた俯瞰的目撃情報は水蒸気爆発過程の全体像を把握するのに欠かせないものを含んでいる。浜口 (2010) が紹介したBruton (1888) の内容の要約を参考のため以下に引用する。

「取材に応じたほとんどの人々は轟然たる爆発音と震動以外には何も語るることができなかった。その中でただ1名の者、そして私 (Bruton) が思うには彼だけが噴火の全ての出来事を冷静に記憶に残しているように思えた。彼は視覚で得た情報についてももっとも統一的に説明が出来た。噴火が起きたとき彼は磐梯山の中央の峰の風上の山側の高いところにいた。彼は噴火を見たとき自分は狐につままれていると判断し、最適な行動は冷静になって気を落ち着かせることだと自分に言い聞かせた。そこでタバコに火をつけゆっくり吸った。次の瞬間に眼下を俯瞰すると自分の生まれた村 [引用者注釈: 旧磐瀬村 (Fig. 2 地図参照)] が埋没されているのが見えた。この間にも彼は轟音を聞き震動を感じている。それから次の瞬間に磐梯山の大部分が丸ごと上方に持ち上げられ、そして山が下方の谷の方に流れ下るのが見えた。同時に電光の筋が山からあらゆる方向に放射され、大量の水蒸気雲が空中を満たした。その水蒸気の中に白い何ものかが急激に上下運動しているのを見た」。関谷・菊池 (1888) が報告の中で「最初蒸気ノ噴出セシ際ニハ柱状ヲナシテ空ニ顕レタリ。(中略) 其高サハ凡ソ大磐梯山ニ等シカリシト」と書かれた部分を彼 (登山者) は、はるかにダイナミックに、しかもリアルに捉えている。大磐梯山への登山道の中腹にいたと思われる彼にとって眼前に忽然と現れた巨大な柱状の水煙はあまりにも非日常的な突発現象であり、しかも生まれてこの方経験したことのない出来事のため、「狐につままれた」と隠喩を用いてしか説明のしようがなかったと推察される。この目撃情報は水蒸気爆発プロセスの全体像を知る上で視覚感を通じて得られた第一級の1次情報である。

この引用文から噴火過程を考察する上で重要な点を整理すると;

1) 彼 (登山者) の居場所は大磐梯山への登山道上であり、風下側に起こる現象の時系列変化を目の当たりの光景として目撃していること。2) 最初に「狐につままれた」時のようなわけの分らぬ現象 (たぶん大磐梯山とほぼ等しい高さに上昇する水煙と思われる) の出現に驚倒しているが冷静さを保っていること。3) その直後に枇



Fig. 2. Index map of Bandai volcano. K: Kaminoyu spa, N: Nakanoyu spa, S: Shimonoyu spa, Y: Kusayu spa, H: fissure or depression at Hikage. Solid circle: top of the subterranean bulge structure. Solid triangle: peak of principal hills. Hatched eclipse: Numano-taira (old crater).

図 2. 磐梯山周辺の地名表示. K: 上ノ湯, N: 中ノ湯, S: 下ノ湯, Y: 草湯, H: 日蔭の裂隙. 黒丸: バルジの頂点. 矢印 A: 図 1 のスケッチの視線方向, 矢印 B: 図 3 のスケッチの視線方向.

杷沢の東方の生まれた場所(旧磐瀬村, Fig. 2 参照)を眼下に観察し土石流に襲われている様子を確認していること. 4) 引き続いて, 山全体が膨んだこと, そして小磐梯山が下方にすべり出したことを目撃し, それとほぼ同時に電光を伴って水蒸気の噴出が起きたこと. 5) プリューム(主に水蒸気)の上昇運動の詳細をその外側の至近距離で目撃していること, にまとめられよう.

この簡潔な時系列記述は磐梯山噴火 100 年後の 1980 年に起きたセントヘレンズ火山噴火の瞬間を撮影した G. Rosenquist 氏の映像 (Voight, 1981) に匹敵する視覚情報であるように思える.

長瀬川の東側の位置も爆発現象の全体を目撃する位置としては絶好の場所である. 土石流から辛うじて助かつ

た旧磐瀬村在住の吉田 (1890) は, 大・小磐梯山, 榎ヶ峰, 赤埴山, 並びに杷沢の溪谷と沼ノ平火口を東方から見た噴火全体像を「磐梯山噴火之図」として 1 枚のカラーのスケッチに残した (Fig. 3). この構図の中身は多少デフォルメされ, 大きさや形などの精度は劣るが, 水蒸気爆発で起きた全体像をダイナミックに描写している点で価値がある. 作者が「噴火實如斯」と図中に短いコメントを追加しているように, 沼ノ平, 杷沢, 小磐梯山で起きた出来事の規模の大小や土石・岩屑の流れの分布, 表層土壌に開いた大小の穴の存在などが図示されている. 大磐梯山の東側急斜面と沼ノ平の崖面が赤色に着色され, 周辺と異なった様子が描かれている. この描写は柱状をなし垂直に立ち上った水煙に赤味を帯びた表層土壌の噴出物が含まれていたことを示唆する. また大磐梯山の山頂東斜面に降り注いだものの一部が沼ノ平から溢れて杷沢に向かって流れ落ちている様子を示唆する. これは噴出口が山頂崖面の東側に位置することを物語っている. 従って沼ノ平は活動が停止した旧噴火口ではなく, 今回活動した火口の 1 つであったことを如実に示している. これは和田 (1888), Wada (1889), 大塚 (1890) の主張とも調和する. いずれにしても「磐梯山噴火之図」に描かれた構図は 1888 年の水蒸気爆発のダイナミクスを理解する上で包括的な説明の必要性を示すものである.

5. 水蒸気爆発モデル

爆発の位置, なかなく最初を目撃された水煙の発生場所や東麓に被害をもたらした土石流や爆風などの発生位置などを再検討することは爆発現象の全体像を解明する上で必須な事項である. それなしには 1888 年磐梯山水蒸気爆発のシナリオを正しく描くことはできない.

今日では火山を対象とした探査技術も格段に向上し浅部の地殻構造や熱水の存在を計測することが可能になった. Yamawaki *et al.* (2004) は 3 次元地震波速度構造探査結果から沼ノ平直下の浅部に凸のふくらみ(バルジ)を持つ甲殻構造の存在を明らかにし, 加えて甲殻構造の頂上部にある地震空白域の存在, 並びに空白域の周辺部に発生する低周波微小地震の存在を指摘するなど沼ノ平火口浅部の特異な構造や地震活動の空間分布の特徴を明らかにした. これらの地下構造を手掛かりに Sekiya and Kikuchi (1890) の作業仮説とその背景にある関谷・菊池 (1888) の推測にもとづく熱水溜りのイメージを定量的に検討する.

「今仮ニ該山ノ中心ニ一ノ動力アリテ」という関谷・菊池 (1888) のイメージにしたがって水蒸気爆発源を半無限弾性体内の球状模型として表す. 半無限弾性体内に



Fig. 3. Illustrative sketch of the eruption belching forth debris and mud flow as seen from the east. This was painted by C. Yoshida, a local inhabitant, who narrowly escaped being death in mud flow. This sketch is attached to the old document “The history of eruption of Aizu-Bandaisan” (Yoshida, 1890). By courtesy of Fukushima Museum.

図 3. 長瀬川の東側から見た噴火活動の描写。図の左端に「噴火實如斯」(噴火の実体はこのようなものであった)とのコメントが記されている。沼ノ平に一面に広がる泥土、枇杷沢の中間点から流出する泥流、小磐梯山(点線)の崩壊と水平方向の岩屑なだれの全体象が描かれる(吉田, 1890)。福島県博物館所蔵「会津磐梯山噴火之由来」資料による。

半径 (R)、地表から球の中心までの深さ (d)、内部に一様な圧力 (P) が作用している球状圧力源モデルを想定する (Fig. 4)。水蒸気などの火山性流体が球体の外に移動・噴出するには開口割れ目を伴う破壊の出現が必須である。簡単のために以下の議論では地殻応力等の外部からの作用はないものとする。半無限媒質の表面に働く引張り応力 (σ_x) と球表面に働く引張り応力 (σ_n) は;

$$\sigma_x = -4P \frac{R^2(x^2 - d^2 + R^2)}{(x^2 + d^2 + R^2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_n = P(1 + 2\tan^2 \varphi) \quad (2)$$

で与えられる (Savin, 1961)。ここで Fig. 4 のように球の中心を C 、球面上の任意の点を Q 、原点を A とし、線分 AQ と AC となす角を φ とする。

明らかに、 σ_x は球の直上の原点 A ($x=0$) で最大値をとる。また、 $x = \pm\sqrt{d^2 - R^2}$ で σ_x はゼロとなり、これより小さな x 値では引張り応力、大きな x 値では圧縮応力となる。点 A での引張り応力の最大値は (3) 式のように非常に簡単な関係で表される。一方、圧力が作用する球の

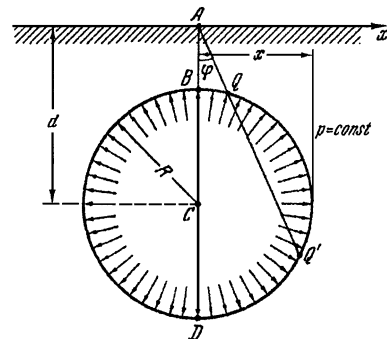


Fig. 4. Model of a pressure source. The surroundings of a cavity are assumed to be an isotropic elastic medium (after Savin, 1961). R : radius of the cavity, d : depth of the cavity below the surface and P : uniform internal pressure.

図 4. 水蒸気爆発の圧力源モデル。均質な半無限媒質中に半径 R の球状圧力源を想定し、表面から球の中心の深さを d 、内部圧力を P とする (Savin, 1961 より引用)。

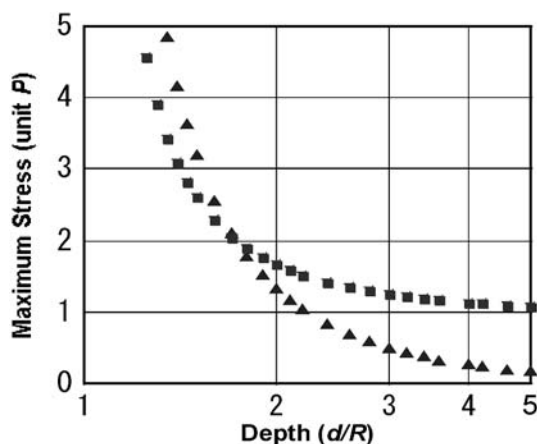


Fig. 5. Variations of the maximum tensile stresses as a function of depth (d/R). Solid triangle (\blacktriangle) is the maximum stress $(\sigma_x)_{\max}$ at the surface and solid square (\blacksquare) does $(\sigma_n)_{\max}$ along the periphery of the cavity. The both stresses are identical to $2P$ at $d/R=1.73$.

図 5. 半無限媒質の表面に作用する引張り応力の最大値 $(\sigma_x)_{\max}$ (\blacktriangle), 並びに球表面に作用する引張り応力の最大値 $(\sigma_n)_{\max}$ (\blacksquare). $d/R=1.73$ で両者の値は等しくなる.

外周表面での最大応力は線分 AQ が球と接線をなす角度 φ で最大値をとり, (4) 式のように d と R の簡単な関係で与えられる. また, 球の直上の外周点 ($\varphi=0$) では応力は常に一定値 P を取る.

$$(\sigma_x)_{\max} = 4P \frac{R^2}{d^2 - R^2} \quad (3)$$

$$(\sigma_n)_{\max} = P \frac{d^2 + R^2}{d^2 - R^2} \quad (4)$$

この簡単なモデルの示唆する重要な点は球状圧力源の深さと半径によって最大応力の出現する位置が決められていることである.

これらの式に従って半無限媒質の表面並びに球の表面での最大応力を計算した結果を Fig. 5 に示す. 半無限媒質表面での最大引張り応力 $(\sigma_x)_{\max}$ は, 深さ $d/R < \sqrt{3}$ の領域では球の外周に作用する最大引張り応力 $(\sigma_n)_{\max}$ を超えて最大の応力値を示す. その値は d/R の減少とともに増大し, d/R が 1 に近づくると発散する. 同様な傾向は $(\sigma_n)_{\max}$ にも認められる. $d/R = \sqrt{3}$ では $(\sigma_x)_{\max} = (\sigma_n)_{\max} = 2P$ となり, 2つの表面に作用する引張り応力は球に作用する内部圧力の 2 倍に増幅される. この増幅効果は破壊のメカニズムを考える上で重要な因子である. 上記に示した関谷・菊池 (1888) のイメージの続きの文章は「四方二射出セントスト定メハ必スヤ其力ハ抵抗力

ノ最弱キ方面ヲ求ムヘシ, 是小磐梯山ノ北方露面ヲ成ス所ノ最弱キ方ニ於テ壊缺ヲ来セシ所以ナリ]. 関谷・菊池の直感的なイメージに潜む誤診は「四方二射出セントスト」の位置が周辺の媒質の特性 (強度) に依存するとの判断したことにある. 破壊力学からは射出の位置は, 圧力源 (球) の深さと半径に関連する角度 φ に依存している. 関谷・菊池の時代にはこのような知識を知る由もなかったので見逃したのは当然である.

開口割れ目破壊の発生条件として次式を導入する (Gudmundsson, 1988);

$$P_l + P_e \geq |\sigma_3| + T \quad (5)$$

ここで, P_l : 地殻荷重圧 (地圧), P_e : 球の表面に作用する応力, $|\sigma_3|$: 最小圧縮応力地殻荷重圧, T : 岩石固有の引張り強度.

通常は, $P_l \approx |\sigma_3|$ が近似的に成り立っているので, (5) 式は $P_e \geq T$ の条件を満たせば破壊が発生し火山性流体の流出が開始すると読み替えられる. 岩石の引張り強度 T は破碎岩, ダイクなどを含む複合岩体などでは $T \approx 1$ MPa, 新鮮な花崗岩など $T \approx 10 \sim 50$ MPa (Touloukian *et al.*, 1981) の報告があるが, 火山の浅部を構成する岩としては $T \approx 1 \sim 6$ MPa (Gudmundsson, 1988) と見積もられている. ここでは T の目安として 6 MPa を採用する.

定量的に評価する際には球状圧力源がどこに, どの深さに, どれくらいの大きさで存在するかが問題となる. 磐梯山では 1997 年に人工地震を用いた大規模構造探査が実施され, 浅部 3 km までの 3 次元構造が明らかにされた (Yamawaki *et al.*, 2004). おもな特徴は, (1) 沼ノ平直下に顕著な盛り上り構造 (甲殻構造; carapace structure) が認められ, その膨らみ (バルジ) の頂点 (以下バルジの頂点という) は大磐梯山頂北東約 450 m の沼ノ平の西端に位置すること (Fig. 6 参照). (2) 馬蹄形カルデラ火口や沼ノ平旧火口では表層の低速度層の厚さが薄く, 最近の噴火で地形が崩壊・侵食を受けていること, (3) 沼ノ平から離れた地域ではほぼ成層構造をなしていること, などが挙げられる (浜口, 2010). さらに 1998 年と 2000 年の低周波地震を含む群発地震活動分布 (Yamawaki *et al.*, 2004), 沼ノ平近傍で $1 \sim 2 \Omega \cdot \text{m}$ の低比抵抗分布 (井上・他, 1995) から, 沼ノ平の浅部に天水の貯留している可能性が明らかになった. これら諸々の空間分布図に 1888 年水蒸気爆発の噴気孔配列や大穴の存在 (Sekiya and Kikuchi, 1890), 日蔭の裂罅 (割れ目火口) の位置を追加して総合的に 1 枚の地図上に描くと Fig. 6 のように 1888 年の噴気孔等の割れ目列と最近の群発地震群の配列がバルジの頂点を中心に放射状に分布していることなどが明らかになった (浜口, 2010). また, 3 次元地下構

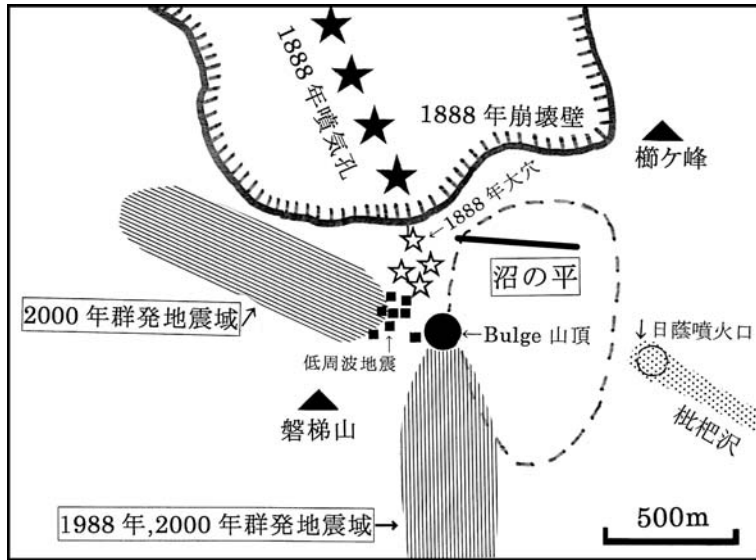


Fig. 6. Synthetic map of characteristic features and activities observed in 1888 and in 1888–2000. Arched line: sharp cliff of new crater, broken line: periphery of Numano-taira (old crater), solid triangles: principal peaks, solid stars: principal streaming fissures in the crater, solid line: low resistivity area ($1\sim 2\ \Omega\cdot\text{m}$), solid circle: top of the underneath bulge structure, solid squares: low frequency volcanic earthquakes, shaded portion: distribution of high frequency earthquake swarms in 1988 and 2000 (after Hamaguchi, 2010).

図 6. 沼ノ平の地下にあるバルジの頂点 (黒丸), 1888 年噴気孔列 (黒星印), 1888 年大穴 (白星印), 枇杷沢の日蔭の裂罅 (白丸), 1988 年と 2000 年の群発地震 (斜線), 低周波地震 (黒四角) 並びに低比抵抗地帯 (横棒) (浜口, 2010 より引用)。

造探査から明らかにされた甲殻構造は, Fournier (1999) の提唱するマグマの後退・冷却に伴う甲殻構造の内部に蓄積された熱水溜りの空間パターンと非常に類似した形状をしていることがわかった。従って磐梯山の場合には熱水溜まりはバルジの頂点近傍に潜んでいる可能性が示唆される。

3次元地下構造, 低比抵抗分布, 群発地震の空白域分布 (Nishimura *et al.*, 2002), バルジの頂点の位置などを参照し, 球状圧力源は沼ノ平にあり, その深さと半径をそれぞれ $d=1\text{ km}$, $R=0.5\text{ km}$ と見積もり, Savin (1961) のモデルに当てはめ磐梯山における引張り応力分布を推定する。Fig. 5 から $d/R=2$ に相当する最大引張り応力を読み取ると, 球の直上の半無限表面で $1.3P$, 球の外周部 ($\varphi=30^\circ$) で $1.7P$ を得る。初期圧力 P の絶対値はわからないが, Fowler (1990) による過熱水の爆発のシミュレーションの結果の値 $P=8.8\text{ MPa}$ を目安として採用すれば, 上記の値はそれぞれ 11 MPa , 15 MPa と求まり, 前述の岩石強度 $T=6\text{ MPa}$ を超える。すなわち半無限の媒質中にある圧力源を想定し過熱水が何らかの原因で水蒸気爆発を起こすと, 球の直上の地表面と球の外周部の $\varphi=30^\circ$ に相当する 2 箇所独立に割れ目が同時に発生す

ることが推論される。前者の応力は圧力源の真上の沼ノ平に開口割れ目を発生させる。また後者は圧力源表面の $\varphi=30^\circ$ の地点に開口割れ目を作る。最小の引張り応力 (最大の圧縮応力) は $(\sigma_n)_{\text{max}}$ に直交しているからこの開口割れ目は球表面から媒質中をほぼ直線的に伝播し地表面に割れ目を作り, 水蒸気などを斜め横方向に噴出すると解釈される。以上のことは沼ノ平の直下に 1 つの球形圧力源が存在し, その圧力値が媒質の破壊強度を超えた場合は, 鉛直上方と斜め横方向に同時に水蒸気等の火山性流体を噴出する現象の蓋然性を示す。この結果は Sekiya and Kikuchi (1890) に記述された観察結果である鉛直に上昇する水煙と横方向に噴出し山体崩壊を誘引した現象の位置と噴出方向を論理的に説明する。

モデルの背景となる甲殻構造の形状やその位置データは最近の 3次元構造探査から定量的に推定されたもので任意性の入りこむ余地はほとんどない。多少の任意性が残るのは圧力源としての球の深さと半径の見積もりであるが, これらの数値も構造モデルによる制限から大きく変わることはない。

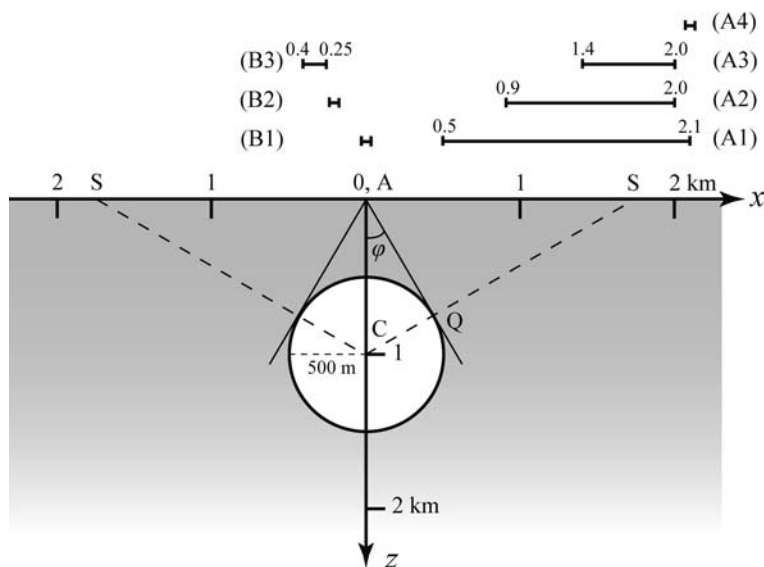


Fig. 7. Plot of distributions of the characteristic traces (A1~4, B1~3) observed in 1888 onto a cross-section of the source. The letters A and S along the free surface indicate the emergence points of tensile fractures deduced from the assumed model parameter of $d = 1$ km and $R = 0.5$ km. The following information except B2 is picked out from the map or sketch of Sekiya and Kikuchi (1890).

A1: distribution of steam fissures in the horseshoe-shaped crater.

A2: distribution of fissure or depression at Hikage in Biwasawa.

A3: distribution of four hot springs (Kaminoyu, Nakanoyu, Shimonoyu and Kusayu spa) on the NW side of Bandai volcano.

A4: hill of Maruyama (or Marumoriyama) damaged by serve wind blast; trees left standing being as naked as electric poles.

B1: nameless short-lived hot spring (spa) at an elevation of 1675 meters.

B2: fissure or cliff painted on the map in Kikuchi (1889).

B3: large hole with water at the bottom observed in Numano-taira.

図 7. モデルから推定される引張り応力 (最大値) により期待される地表面での割れ目の位置 (A, S) と Sekiya and Kikuchi (1890) の地図等から読みとった爆発現象の出現範囲の比較. (A1): 馬蹄形カルデラ内の噴気孔, (A2): 枇杷沢の日蔭の裂罅, (A3): 上の湯, 中の湯, 下の湯, 草湯の分布, (A4): 丸山 (丸森山), (B1): 標高 1675 m の“無名”の温泉, (B2): 菊池の地図にある割目, (B3): 1888 年の大穴. 詳しくは本文参照.

6. 議 論

6-1 モデルと水蒸気爆発現象の対比

3次元地下構造をもとに熱水溜りを仮定し, それを球状圧力源とみなして作用する最大引張り応力が破壊強度を超えるとき, 割れ目から火山流体の噴出が起きるとのシナリオをもとにモデル構築した. このモデルから演繹的に推測される割れ目の位置を, 1888年の水蒸気爆発に際して観察された出来事と対比する.

地表面の最大引張り応力はバルジの頂点にもとめられ, そこは沼ノ平火口の西端に位置し, そこに割れ目火口の出現が予想される. また球状圧力源の深さと半径の条件 ($d/R=2$) のもと出現する開口割れ目が斜め横方向に伝播すると仮定した場合, 割れ目はバルジの頂点から $x=1.8$ km の位置で地表に現れることが導かれる. Fig. 7は球状圧力源の位置, $(\sigma_n)_{\max}$ に対応する $\varphi=30^\circ$ の球面位

置を直線的に外挿した線分 CS を書き加えたグラフ上に, Sekiya and Kikuchi (1890) の地図から読み取った, (A1) 馬蹄形カルデラ内の噴気地点の分布範囲, (A2) 枇杷沢の日蔭の裂罅, (A3) 上・中・下の湯, 草湯位置, (A4) 丸山 (丸森山), (B1) 沼ノ平の無名の温泉位置 (標高 1675 m), を図示してある (Fig. 2 参照). また菊池 (1888) の地図から読みとった, (B2) 割れ目の位置, (B3) スケッチから読みとった沼の平の大穴, もあわせて表示してある. 横軸はバルジの頂点からの水平距離 (x) である. 各々の地点の方位は無視し, 頂点からの計ったそれぞれの分布範囲を横線で示してある. Fig. 7は球状圧力源モデルを当てはめた数値 ($d=1$ km, $R=0.5$ km, $\varphi=30^\circ$) から推定される開口割れ目位置が空間分布 (A1)~(B3) に示した水蒸気爆発に伴う様々な観察結果を包括的に説明できることを示している. すなわち;

(1) $(\sigma_n)_{\max}$ の地表への投影点は $x=1.8$ km であるのに対して、馬蹄形カルデラ内の噴気は $x=0.5\sim 2.1$ km に分布する。

(2) 沼ノ平の東崖に端を發し枇杷沢に沿う日蔭の裂罅(割れ目)は $x=0.9\sim 2.0$ km に分布する。

(3) 過去に起きた爆発で出来た噴火口跡と大塚 (1890) が解釈した上の湯、中の湯、下の湯は $x=1.6\sim 2.0$ km にほぼ直線的に分布する。草湯は $x=1.4$ km に位置する。

(4) 爆風で樹木が電柱ようになった丸山 (丸森山) は $x=2.1$ km に位置する。

(5) Sekiya and Kikuchi (1890) の地図に示された無名の“温泉”(標高 1675 m) はバルジの頂上に当たる $x=0$ km の位置にある。菊池 (1888) の地図に図示されている北西-南東の方位をもつ破裂(割れ目?)は $x=0.2$ km の南西に位置する。

以上の (1)~(4) の現象はそれぞれの方角は異なるが地下のバルジの頂点からほぼ等距離に位置し、水蒸気等の火山性流体が噴出していることが共通している。(2) に述べた枇杷沢の日蔭の裂罅に付いては注釈を必要とする。和田 (1888) と大塚 (1890) は枇杷沢に「日蔭の噴火口」と自ら命名した割れ目火口が存在することを認めているが、彼らの地図にはその場所の記載はない。一方、Sekiya and Kikuchi (1890) は和田と大塚の主張を否定し、枇杷沢には激しい噴出の跡を示す火口は存在しないと断定しているにもかかわらず、自ら作成した最終版(英語論文)の地図には裂罅らしき地形を記載している。関谷・菊池がこの枇杷沢の地形を自ら直接調査をしていないことは Knott and Smith (1890) が述べており、間接的に入手した情報にもとづき地図化したものと推察される。大塚 (1888) は日蔭の裂罅を土石流の源とみなし地図化している。いずれにしても日蔭の裂罅の位置、形体、噴出物に関しては不確定な要素がある。噴火から 1 年後に枇杷沢を詳細に調査した Knott and Smith (1890) は日蔭の裂罅の認められる近傍に限られた範囲にある樹木は小石の連続砲撃で乱打され、風の方向に樹皮がはがれ、折れ曲がり倒れて、根こそぎ引き抜かれた状況にあることから強力な爆発 (outburst) の襲撃がその原因であったことを報告している。このような状況証拠と割れ目の位置を考慮すると和田 (1888) や大塚 (1890) が認定した日蔭の裂罅(開口割れ目火口)は南東方向に向かった爆風の本源であった可能性が高い。ここを爆風の源と認めれば枇杷沢の南東方にある渋谷や白木城 (Fig. 2 参照) に集中した爆風被害も無理なく説明される。(3) に示した丸山の樹木が電柱のようになり枝や葉が引きちぎられていることや中の湯の小屋が半壊していることなどは北西方向にも弱い爆風が発生したことを示唆している。

(5) に述べた“無名の温泉”の存在はバルジの頂上位置 $x=0$ km に当たり地表の引っ張り応力の最大値の出現する場所である。しかし明治 41 年編纂の陸地測量部の地図には温泉の記載は無く、噴火直後の短い期間に噴出した“短命の温泉”であった可能性が想定される。元来、沼ノ平の凹地には多数の沼があって、噴火前には常に硫黄の蒸気を放散していた所(大塚, 1890)である。このような状況証拠とモデルから必然的に導かれる結果を考えると鉛直に立ち昇った水煙の噴出が最も起こりやすい場所は沼ノ平であることが推論される。

Sekiya and Kikuchi (1890) が「A dense column of steam and dust shot into the air, making a tremendous noise. Explosions followed one after another, in all to the number of 15 or 20, ...」と表現した有感地震の最中に発生した 15~20 回の水煙は $x=0$ km 近傍で発生し、沼ノ平の下部に灌漑した低温の天水を伴って鉛直方向に噴出したものであったと解釈される。また、「The last explosion, however, is said to have projected its discharge almost horizontally, towards the valley on the north」と表現される最後の爆発は、球状圧力源表面 $\phi=30^\circ$ に対応する開口割れ目から流出した高温の火山性流体が減圧発泡しながら斜め方向に離れた場所(小磐梯山北麓)に噴出した結果と理解すれば随伴現象としての山体崩壊も無理なく理解される。また山体崩壊後にカルデラ内から立ち上る噴煙の存在 (Fig. 1 参照) は、熱水溜りで減圧発泡がしばらく継続したと考えればこのモデルで説明可能である。

しかし、Sekiya and Kikuchi (1890) の表現内容が爆発の全容を記載したものではないことに留意しなければならない。上記の英文内容に目を通した後に投稿した大塚 (1890) の論文にはこの英文内容に相当する記載として次のような異見の記述が見られる。「磐梯山爆裂シ黒煙柱状ヲナシテ(中略)昇騰セリ。(中略)其ハ枇杷沢ニ向テ発シ又同時ニ沼ノ平ヨリ昇煙セシモノノ如シ。或ハ云フ最終ノ爆発ハ枇杷沢ニ向ヒタリト」。ここに記述された最後の爆発源は北麓に噴出した割れ目走行から約 120° E の走行を持つ枇杷沢の日蔭の裂罅に対応している。多様な状況証拠が残されている中で「最終ノ一発ノミ北ニ向ヒテ横ニ抜ケタリ」という目撃情報に過度のウエイトを掛けて解釈しようすると水蒸気爆発という複雑な現象の本質を見誤る恐れがある。

重要なことは沼ノ平直下の深さ 1 km に半径約 0.5 km の熱水溜りの圧力源が存在すれば、1888 年噴火活動の全体像、すなわち、カルデラ火口に認められる開口割れ目、枇杷沢の下流に見られる爆風現象、圧力源の直上の沼ノ平に噴出口を持つ水煙の現象などの空間配置が無理なく説明されることである。このことは沼ノ平の直下のバル

ジ構造の中に爆発源（熱水溜まり）があるとする我々のモデルを検証するものであると同時に、関谷・菊池（1888）の小磐梯山直下に熱水溜まりが存在するとの推測や Sekiya and Kikuchi (1890) の作業仮説に暗黙のうちに内包されている熱水溜りのイメージへの反証にもなっている。

6-2 関谷・菊池の仮説とその後のモデルの背景にあるもの

関谷・菊池（1888）は観測にもとづく異なる推理をまとめる必要を感じ、 Sekiya and Kikuchi (1890) では2節で述べたように「長い休止期間の後の噴火は、旧火口から離れた弱線に沿って新しい火口から噴火する」との作業仮説を導入し、1888年水蒸気爆発の原因究明を試みた。この仮説は関谷・菊池（1888）の中で述べられている「小磐梯山の地下に爆発源がある」との関谷の直感的推測と「今回の破裂は旧噴火口のアトリオであり、沼ノ平に接した環壁の一部である小磐梯山の背部に爆発の源がある」との菊池の観察にもとづく推測の間にある見解の矛盾に整合性を持たせた折衷的なものである。英文論文ではこの作業仮説にもとづき原因と結果について述べ、爆発源は小磐梯山の直下に熱水溜まりにあり、そこから北方へ向かった岩屑なだれを本流とみなし、南東方向への爆風と土石流を支流ととらえ、「火口は1つ」であるとの結論を導いた。

守屋（1980）、Yonechi（1988）、関口・他（1994）、Yamamoto *et al.*（1999）が提案した噴火モデルは、 Sekiya and Kikuchi (1890) のこの結論を既定の事実として推論を発展させたものである。個々の論文で議論されている内容はそれぞれ異なるが、熱水溜まりの位置を固定的にとらえていることは共通している。これらの認知プロセスは科学史の中にしばしば見られる「仮説が事実ヲツクル」(ハンソン、1982) に該当している事例のように思われる。いずれも「火口は1つ」という Sekiya and Kikuchi (1890) の認知バイアスを含む基本的な認識の延長上に噴火メカニズムの解釈を発展させたものであることは留意する必要がある。

茂野（2004）は地熱研究者の視点から従来のモデル（上述の守屋（1988）等）には共通の疑問点があると指摘する。その背景は1888年噴火を小さな水蒸気爆発によって誘発された大規模な地すべりとしてモデル化すると熱水系の寄与が過少評価されていることへの危惧がある。そこで茂野は噴火以前に高温火山ガス系（沼ノ平）と高温熱水系（小磐梯山）の2つのソース源があるという前提のもとに爆発には火山ガスや高温熱水など火山性流体の寄与を主因とした斬新な概念モデルを提出している。しかし、このモデルに含まれる前提や解釈は自明なこと

でもなく、また噴火当時の状況証拠と整合しない部分も散見される。例えば、噴火前に小磐梯山直下に高温熱水系が存在するとの前提には必然性が認められない。この前提は関谷・菊池（1888）の「今仮ニ該山（小磐梯山）ノ中心ニーノ動力アリテ…」という仮定と本質的には同じものであり、 Sekiya and Kikuchi (1890) の基本的認識を共有しているように思われる。

Fig. 1 のスケッチに示された山体崩壊、岩屑なだれ、水蒸気噴出などの地表に見られる現象はその下部に熱水溜まりの存在を想像させる事実であるが、それらは状況証拠にすぎない。当時は「見る」(seeing) という観察がおもな手段であり、今日からみれば主観的な要素の入りこむ可能性の多いデータをもとに噴火過程を議論するほかはなかった。また当時の火山学は萌芽の時代であり、知識の集積も貧弱であった。小磐梯山が崩壊するという驚くべき光景を眼前にして、その原因となる爆発源が小磐梯山の直下に存在するに違いないと断定したことは当時としては止むを得ない選択であったかもしれない。

この小論で展開した議論にもとづけば爆発源は小磐梯山でなく沼ノ平の直下のバルジの内部にあると断定される。このことは菊池（1888）の観察にもとづく「小磐梯ノ名アリシ山峯ノ背部ニ於テ其ノ源ヲ存シ…」という推理が1888年の水蒸気爆発源の核心を突いていたことを物語っている。また磐梯山の噴火史をとりまとめた Nakamura (1978) の見解「The sequence of activity of Bandai volcano is of the most simplest type. Almost all of the activities has been occurred at the summit crater」もバルジの頂点が過去の噴火活動の空間的に一致することを示す点から再評価されるべき内容である。

7. 結 論

1. 磐梯山の諸問題を未解決のまま今日に至らしめた原因は、分野の異なる研究者の「見る」(seeing) という網膜を通じて入手される主観的な要素の入りこみ易いデータにもとづく議論の整理や作業仮説の検証がなされないまま、 Sekiya and Kikuchi (1890) の爆発源に関するイメージが定説化したことにある。

2. 最新の地下構造等のデータをもとに球状圧力源モデルを構築し Sekiya and Kikuchi (1890) の仮説の検証を行った結果、小磐梯山直下に爆発源があるとの彼らの推論は反証された。

3. 爆発源は沼ノ平の地下のバルジ構造の内部にある。仮定した球状圧力源パラメータ（深さ1 km, 半径0.5 km）によって1888年に観測された水煙、爆風、岩屑なだれ等の現象の出現位置と噴出方向が論理的に説明されることを明らかにした。

4. 垂直に立ち昇った水煙の位置は沼ノ平火口、土石流と爆風の源の位置は枇杷沢の日蔭の噴火口であると断定された。また、小磐梯山を崩壊させ北方に岩屑なだれを起こした原因は爆発源から斜め方向に伝播した開口割れ目の出現によるものであることが判明した。

謝 辞

宇都宮大学教授の中村洋一氏には建設的な議論をして頂きました。また枇杷沢や沼ノ平の野外調査に際しては磐梯山記念博物館副館長の佐藤 公氏にご協力を頂きました。「会津磐梯山噴火之由來」の資料閲覧では福島県博物館より多大な便宜を受けました。査読者の鹿児島大学小林哲夫教授ならびに匿名査読者のコメントは、原稿の改善に役立ちました。また、編集担当の橋本武志博士には原稿内容の全般について綿密な検討を頂きました。本研究の一部は、東京大学地震研究所予知公募研究（課題番号 2911）より支援を受けました。以上の方々並びに機関に深い感謝の意を表したい。

引用文献

- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C. (1992) A review on phreatic eruptions and their precursors. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **52**, 231-246.
- Bruton, W. K. (1888) Photographing the great eruption at mount Bandai, Japan. *British J. Photography*, **35**, 617-619.
- Fournier, R. O. (1999) Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic epithermal environment. *Economic Geology*, **94**, 1193-1211.
- Fowler, G. R. (1990) Vapor detonations in superheated fluids. In *Adiabatic waves in liquid-vapor systems* (Meier, G. E. A. and Thompson, P. A. eds.), Springer-Verlag, Berlin, 405-416.
- Francis, P. (1993) **Volcanoes; A planetary perspective**. Oxford Univ. Press, Oxford, 443p.
- Gudmundsson, A. (1988) Effect of tensile stress concentration around magma chambers on intrusion and extrusion frequencies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **35**, 179-194.
- 浜口博之 (2010) 磐梯火山の水蒸気爆発に関する温故知新. 震災予防, **230**, 25-35.
- ハンソン, N.R. (1982) 知覚と発見: 科学的探究の論理, (上), (下). ハンプリー, W.C. 編, 野家啓一・渡辺博 訳, 紀伊国屋書店, (上) 320p, (下) 372p.
- 井上 純・川上則明・高杉真司・田中耕平・竹内睦雄 (1995) MT 法による磐梯山の比抵抗構造. 磐梯火山—防災の進展に向けて—, 火山地域における土砂災害発生予測手法の開発に関する国際共同研究, 31-41.
- Jagger, T. A. (1930, 1931) *The Volcano Letter*. Hawaiian Volcano Observatory, Nos. 301, 1 and 323, 1.
- 菊池 安 (1888) 磐梯山破裂実況. 東京地学協会報告, **10**, 5-34.
- 北原そ子 (1998) 磐梯山噴火に関する災害情報の社会史的な分析. 火山, **43**, 297-321.
- Knott, C. G. and Smith, S. M. (1890) Notes on Bandai-san. *Trans. Seismol. Soc. Japan*, **13**, 223-257.
- Macdonald, G. A. (1972) **Volcanoes**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N. J., 510p.
- 守屋以智雄 (1980) "磐梯式噴火"とその地形. 西村嘉助先生退官記念地理学論文集, 古今書院, 214-219.
- 中田節也 (1997) 火山噴出物と噴火の推移予測. 火山とマグマ (兼岡一郎・井田喜明編), 東大出版会, 158-178.
- Nakamura, Y. (1978) Geology and petrology of Bandai and Nekoma volcanoes. *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, Ser. 3, **14**, 67-119.
- 中村洋一・青木謙一郎 (1993) 磐梯山の 1888 年噴火についての最近の研究から得られた知見. 火山災害の規模と特性. 文部省科学研究費自然災害特別研究報告書, 101-110.
- Nishimura, T., Ueki, S., Yamawaki, T., Tanaka, S., Hashino, H., Sato, M., Nakamichi, H. and Hamaguchi, H. (2002) Broadband seismic signals associated with 2000 volcanic unrest of mount Bandai, northeastern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **119**, 51-59.
- 大塚専一 (1890) 磐梯山噴火調査. 地質要報, **11**, 143-171.
- 大塚信豊 (1888) 明治 21 年 7 月 15 日岩代国磐梯山噴火の記. 気象集誌, 38-44, 206-211.
- Palmer, H. S. (1894) **Letters from the land of the rising sun**. Ganesha Pub., London, 87-112.
- Savin, G. N. (1961) **Stress concentration around holes**. Pergamon Press, New York, 430p.
- 関口辰夫・大谷知生・原口和政・稲澤保行・岩崎純子 (1994) 1: 15,000 火山地形分類図「磐梯山」について. 地図, **32**, 24-33.
- 関谷清景 (1888) 磐梯山破裂の話. 東洋学芸誌, **85**, 493-499, 529-537.
- 関谷清景・菊池 安 (1888) 磐梯山破裂実況取調報告. 官報 (明治 21 年 9 月 27 日), 271-275.
- Sekiya, S. and Kikuchi, Y. (1890) The eruption of Bandai-san. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, **3**, 91-172.
- 茂野 博 (2004) 火山防災と地熱開発の協力 - 磐梯山 1888 年噴火 (水蒸気爆発) 災害を例に考える. 地熱エネルギー, **29**, 17-32.
- 下鶴大輔 (1988) 磐梯山の概要. 地学雑誌, **97**, 243-255.
- Touloukian, Y. S., Judd, W. R. and Roy, R. F. (1981) **Physical properties of rocks and minerals**. McGraw-Hill, New York, 548p.
- Voight, B. (1981) Time scale for the first moments of the May 18 eruption. *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper*, **1250**, 69-86.
- 和田維四郎 (1888) 磐梯山噴火調査概略. 官報 (明治 21 年 8 月 15 日), 156-157.
- Wada, T. (1889) Der ausbruch des Bandai-san im Juli 1888. *Mitt. Deutsch. En Gesellschaft Nat. U. Volk. Ostasiens*, **5**, 69-74.
- Yamamoto, T., Nakamura, Y. and Glicken, H. (1999) Pyroclastic density current from the 1888 phreatic eruption of Bandai volcano, NE Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **90**, 191-207.

- Yamawaki, T., Tanaka, S., Ueki, S., Hamaguchi, H., Nakamichi, H., Nishimura, T., Oikawa, J., Tsutsui, T., Nishi, K., Shimizu, H., Yamaguchi, S., Miyamachi, H., Yamasato, H. and Hayashi, Y. (2004) Three-dimensional P-wave velocity structure of Bandai volcano in northeastern Japan inferred from active seismic survey. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **138**, 267-282.
- Yonechi, F. (1988) When did Mt. Kobandai vanish during the 1888 eruption? -Additional discussion for “the plural collapses hypothesis”-. *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, 7th Ser., **38**, 1-9.
- 吉田丑蔵 (1890) 会津磐梯山噴火之由来. 福島県博物館蔵.
- (編集担当 橋本武志)