

## 原著論文

# 天然記念物「吹割溪ならびに吹割瀑」の溶結凝灰岩中に見出された火山豆石様組織

佐藤興平

気象庁 気象大学校

〒277-0852 千葉県柏市旭町7-4-81

**要旨:** 群馬県北東部追貝付近の片品川には、「吹割溪ならびに吹割瀑」として国の天然記念物および名勝に指定された溪谷があり、観光地として人気を集めている。この溪谷は後期中新世の溶結凝灰岩が片品川の浸食作用により削られてできたもので、平滑な河床の水流が溝状の窪みの両側から流れ落ちる滝で特徴付けられる。この凝灰岩試料の切断面に、火山豆石と推定できる岩片を偶然発見し、鏡下の組織を記載した。この豆石の断面は径8-10mmの円形で、径約3mmの溶結凝灰岩片の核をとりまく微細粒のマントル部分に微弱な2重構造が認められる。これが火山豆石とすると、群馬県では2番目の記載となる。

**キーワード:** 群馬県, 追貝, 片品川, 天然記念物, 吹割溪ならびに吹割瀑, 吹割の滝, 溶結凝灰岩, 中新世, 火山豆石。

## Accretionary lapilli-like texture found in welded tuff from the Fukiware waterfall, a natural monument of Japan, in northeastern Gunma Prefecture

SATO Kohei

*Meteorological College, Japan Meteorological Agency*

*Asahi 7-4-81, Kashiwa, Chiba 277-0852, Japan*

**Abstract:** The Fukiwarekei and Fukiwarenotaki, a natural monument of Japan, is a popular sightseeing spot located in a gorge of the Katashina River, northeastern Gunma Prefecture. The Fukiware gorge was formed by the erosion of Late Miocene welded tuff, and the monument is characterized by waterfalls that are flowing down from both sides of a smooth river bed into a deep gully. An accretionary lapilli-like texture was found on a sawed surface of a specimen collected from the river bed and its microscopic texture was described. The lapillus of 8-10mm in diameter consists of a core of welded tuff fragment of about 3mm and mantle of fine-grained powdery materials with indistinct double zoning. This may be the second description of accretionary lapilli in Gunma Prefecture.

**Key Words:** Gunma. Okkai, Katashina River, natural monument, Fukiwarekei and Fukiwarenotaki, waterfall, welded tuff, Miocene, accretionary lapilli.

### 1. はじめに

火山豆石 (accretionary lapilli) とは、火山噴火の噴煙柱の中で微細な火山灰が凝集してできた球状の固体で、噴火時に降下を確認されることもあるが、多くの場合火山灰質な地層に含まれる径1cm前後の豆状の粒として発見される。凝集の核としては雨滴や氷の粒や岩片が想定され、実際に小岩片を中心に同心円状の縞状構造が観察されることも多い (例えば, Moore and Peck, 1962)。凝集している粉末が微細であることから、苦鉄質火山の噴火の場合はマグマ水蒸気爆発であったことを示唆するので、火山豆石は噴火

様式を知る手掛かりを与えてくれる (中村, 1978)。

興味深い点は火山豆石の強度にある。噴煙中で粉末が凝縮してできたと考えられるにもかかわらず、水中に落下してもバラバラに壊れず、乱泥流に巻き込まれて海底を再移動しても球状の形を保っていると解される例が、例えば三浦半島の中新統三崎層などで広く見られることから (小林洋二, 2006, 私信; 佐藤興平, 未公表資料), 火山豆石のあるものは落下時まで高い強度を獲得していたことが分かる。水中の再移動にも耐えて球形を保ったとみられる火山豆石は、始生代のグリーンストン帯からも報告されており (Boulter, 1987), 強度の高い火山豆石の形成は時代によら

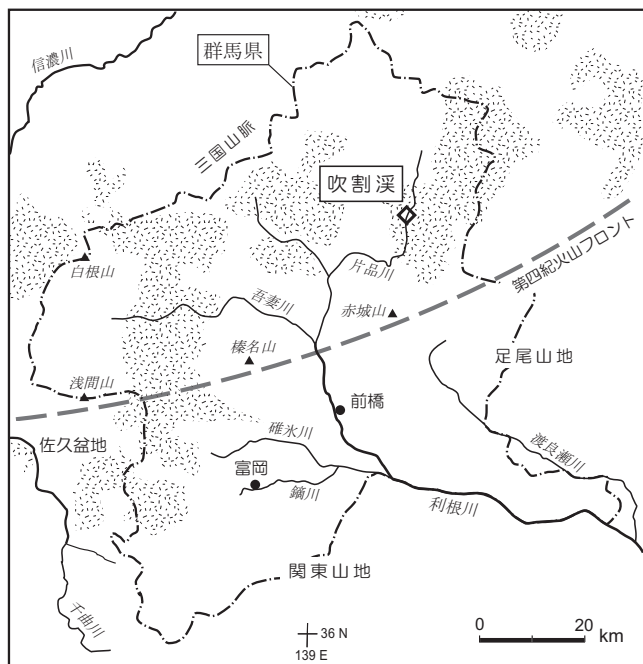


図1. 吹割溪の位置

中新世—鮮新世火山岩類の分布(地質調査所, 1992)を地紋で、代表的な第四紀火山を黒三角で示す。

ない噴火現象の一側面であつたらしい。火山豆石の粉体が凝結するメカニズムとして、水だけでなく石膏 ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) が接合剤の役割を果たした可能性が考えられる。実際にTomita et al. (1985) は1983年の桜島火山の噴火でできた豆石から石膏を検出したと報告している。しかし、火山豆石の形成にいつも石膏が必須の役割を果たしているのかどうか、まだ検討例が少なく凝縮のメカニズムは明確にはなっていない。

群馬県では中新世以降多数の火山活動が起こってきたにもかかわらず、火山豆石発見の報告はほとんど無い。筆者が知る唯一の記載例は、富岡市黒岩に露出する海成中新統に挟まれる凝灰岩層の基底部に産するもので、海底のシルト層の上に降下・堆積したものと考えられる(野村・三田, 2004)。彼らは加藤(1986)が報告した沖縄県海成鮮新統に産する火山豆石との類似性から、氷が膠着剤となって破壊を免れたと推定している。しかし、この解釈には海底に堆積後も固体の状態を維持するために氷点下の海水温を仮定するという無理があるように思われる。

上述のように、火山豆石は噴火時の条件を記録している噴出物のひとつとして興味深いのであるが、その成因は必ずしも判然とせず、今後多くの事例の研究による成因解明が望まれる。ここでは群馬県では2番目の発見例となる可能性のある吹割の滝の火山豆石様組織について報告する。これは観光として訪れた時に採取した小岩片に偶然見出された1個体に過ぎず、成因解明には程遠いのであるが、産状を記載することで今後の調査・研究のきっかけになることを期待したい。

## 2. 吹割溪の地質概略

吹割の滝は群馬県利根郡利根村(現沼田市利根町)追貝の片品川の渓谷にあり(図1)、比較的平坦な河床の水流が溝状の谷の両側から勢いよく流れ落ちる様子が観光客の人気を集めている(図2)。この滝の周辺は、1936年に「吹割溪ならびに吹割瀑」の名称で天然記念物および名勝として指定されており(佐藤, 1992)、県内にある地質系天然記念物の中でも吾妻郡長野原町の川原湯岩脈(1934年指定)に次いで古い国指定5件のひとつである(註1)。

滝の周辺には1km余りにわたって灰色の岩盤が露出し、一帯は吹割溪谷あるいは片品溪谷とも呼ばれる(図2)。この岩盤は今から9百万年ほど前の後期中新世の珪長質火山活動で噴出した火砕流堆積物が固まってできた溶結凝灰岩で、層厚は110-180mとされる(追貝団研グループ, 1969)。上下の凝灰岩質な地層も一括して追貝層群と呼ばれ(追貝団研グループ, 1969; 久保ほか, 1995)、9-8Maの全岩K-Ar年代が報告されている(鷹野ほか, 1996)。片品川の東側にも珪長質な凝灰岩類が広く分布しており、片品川流紋岩類と呼ばれ(註2)、ほぼ同時期の火山活動の噴出物とされる(群馬県地質図作成委員会, 1999)。

追貝層群や片品川流紋岩類は、中生層やこれを貫く白亜紀花崗岩などの先新第三紀の基盤を不整合に被うかこれらと断層で接することが観察されている(追貝団研グループ, 1969; 久保ほか, 1995; 鷹野ほか, 1996)。両者の地表の分布を合わせると東西10km南北15kmを超え、群馬県北東部の重要な地質構成要素となっており(図1)、当時の活発な



図2. 吹割の滝全景(2010年10月)



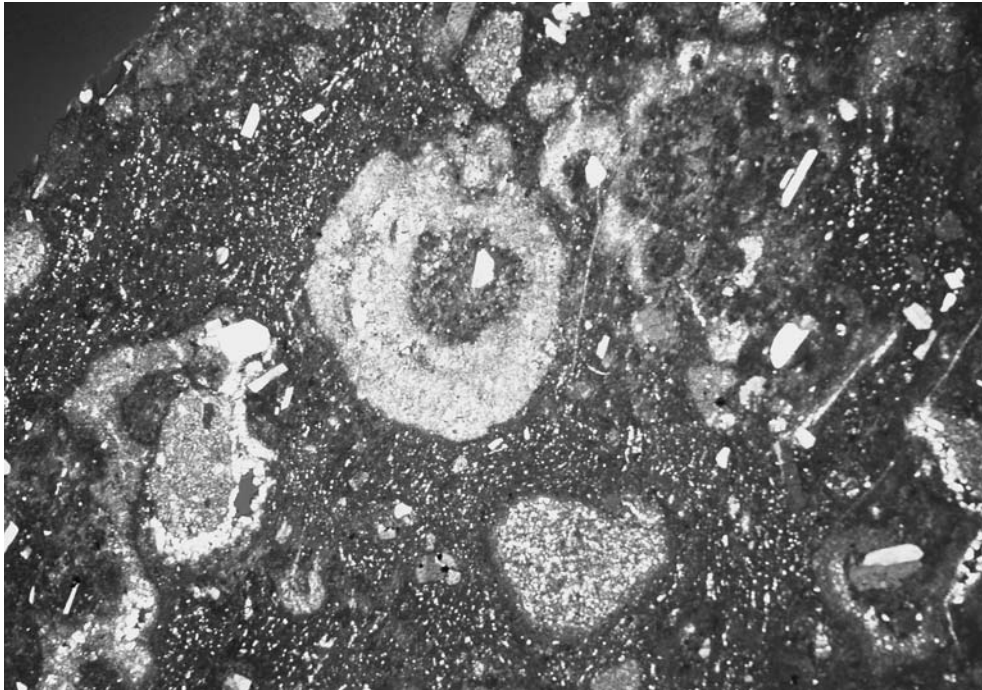


図3. 吹割の滝の凝灰岩試料 (No.09032401) の薄片

3重構造をもつ火山豆石様の丸い岩片が中央部に見られる。写真の左右32mm、上下に置いた偏光板の振動方向を斜交させて薄片のほぼ全域を撮影。ガラス質な部分は暗く、斑晶や微細結晶が明るく写っている。右上－左下方向の鉱物の定向配列に注目。

火山活動が示唆される。これらの地層は溶結凝灰岩を主とし、陸成層は挟まれるが海成層は見られないので（例えば、追貝団研グループ、1969）、堆積の場合は陸上であったと解される。

吹割の滝の周辺の地層については、久保ほか（1995）に詳しい記載がある。これによると、追貝層群の構造は水平に近く、河床に露出する吹割溶結凝灰岩層の上位に重なる全層厚300m余りの凝灰岩層が渓谷の山腹を構成しているという。河床を構成する溶結凝灰岩は、肉眼的には溶結構造の見えない灰色の塊状岩で、変質により部分的に赤色あるいは褐色を呈する。変色域の分布は割れ目に規制されているとみられ、吹割の滝がかかる溝状の谷地形も割れ目に沿う選択的な浸食の結果と思われる（図2）。また久保ほか（1995）によれば、河床の凝灰岩には吸水と乾燥や凍結の繰り返しによって厚さ1-3cmの板状割れ目が発達し、春先には剥離した岩屑が大量に見られるという。このことは、滝の周辺で現在も浸食が急速に進行しつつあることを物語るとともに、このような板状割れ目に規制された侵食が平坦な河床形成の一因となっていることを示唆する。

吹割の滝の周辺の露頭には稀ながら晶洞も認められ、その一部に方解石の自形結晶（約1cm）が見られた。採取した灰色の凝灰岩試料にも小さなレンズ状の空隙（長径<1.5cm）が認められ、その内壁には微細な結晶の群生が観察された（註3）。これらの鉱物を晶出させた熱水変質作用が一带に広く及んでいたと推定される。久保ほか（1995）は、吹割の滝の下流側にある鱗飛の滝より更に下流側は、

特に珪化作用が強くて硬く、幅の狭い峡谷となっていると指摘している。原岩が同じ溶結凝灰岩でも、変質の種類や程度によって微妙な地形の差異が生じたい。

### 3. 火山豆石様組織の見られた試料

火山豆石様組織の見られた試料（No.09032401）は、2009年3月下旬に吹割の滝の近くの河床で拾った灰色の凝灰岩の小片である。この試料は灰色に濃淡はあるものの全体としては塊状で、斜長石と思われる白色鉱物（1-2mm）が散在するが、採取時の試料表面に豆石様組織が見えた訳ではない。たまたま切断した断面に不自然な白色の円形構造が現れ、微かながら同心円状の模様も見られたので火山豆石ではないかと考えて薄片観察に至ったのであり、発見は全くの偶然であった。唯一の試料が小片なので、それ以上切断するわけにもいかず、この円形構造が球体の一部であることを確認したわけではないため、ここでは「火山豆石様」とした。

薄片の写真を図3と図4に示した。図3は薄片のほぼ全域を撮影した写真で、ガラス質な部分は暗く、微細結晶の集合部や斑晶が明るく写っている。薄片の面と溶結凝灰岩の堆積面との関係は厳密には分からないが、斑晶鉱物（主に斜長石、写真では白色）の配列には写真の右上から左下に向かう方向性が認められ、これが堆積面の方向を示すと考えられる。鏡下で観察される溶結構造もこの方向に調和的である（註4）。この写真の中央部に長径10mm、短径8mmの



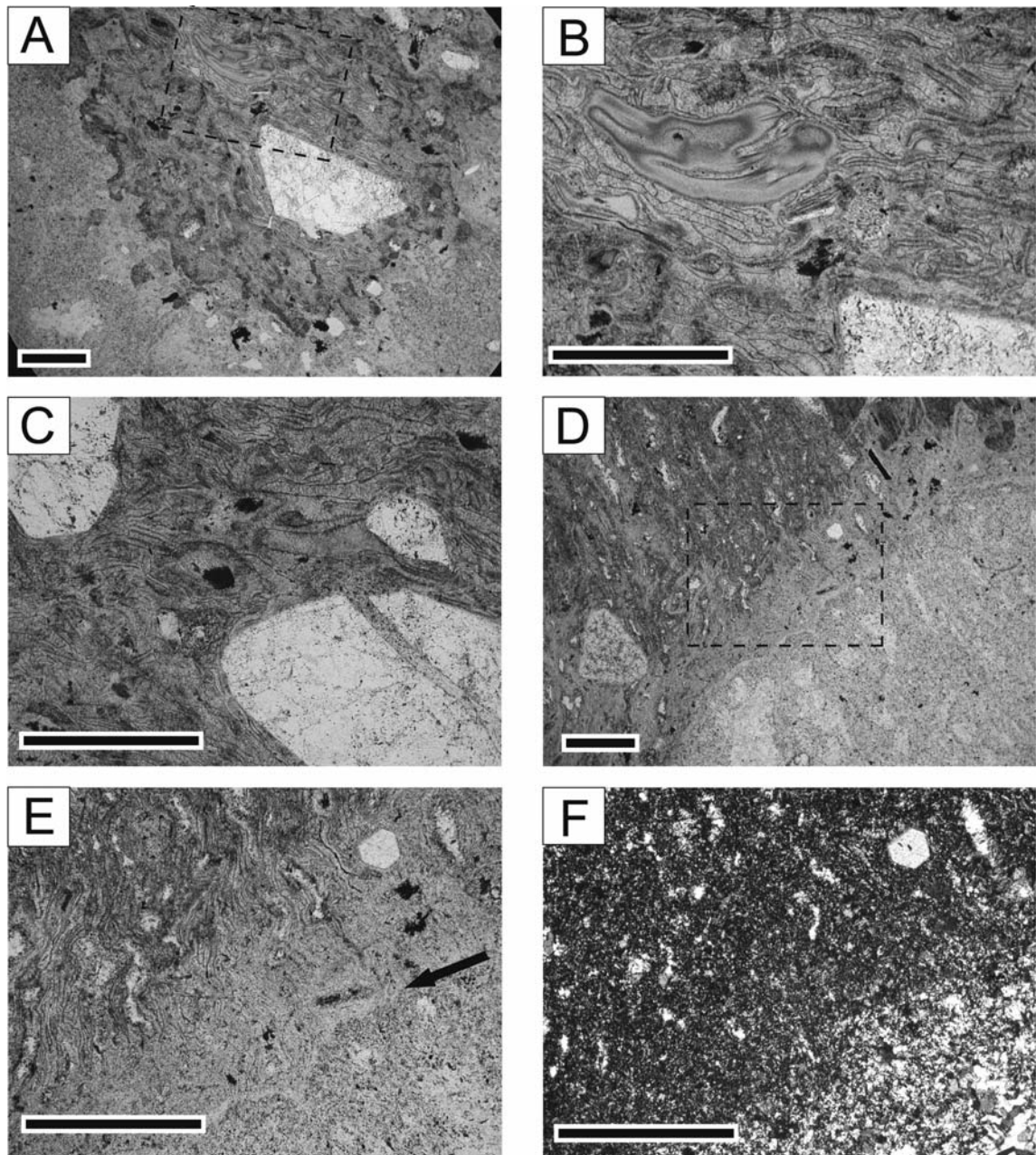


図4. 凝灰岩試料 (No.09032401) の薄片の顕微鏡写真

A) 豆石の核となっている溶結凝灰岩質岩片。斑晶は斜長石。点線の範囲を拡大してBに示す。B) 豆石の核に見られる縞状の溶結構造。写真の範囲をAの点線の枠で示す。C) 図3の写真の右中央部に産するつぶれた軽石の内部構造。斜長石斑晶の周辺にはBに似た溶結構造が見られる。D) 豆石 (右下) と石基 (左上) の境界部。石基に溶結構造が見える。点線の範囲を拡大してEに示す。E) 豆石の周辺に幅100-500  $\mu\text{m}$  の“漸移帯”が、漸移帯と豆石の境界部に幅20-50  $\mu\text{m}$  の“境界層” (矢印) が見られる。写真右上の白い六角形は自形の石英。F) Eのクロスニコル画像 (A-Eは下方ニコルのみ)。写真左下の縮尺を示す黒線はいずれも0.5mm。

円形構造が見られる。以下の記述ではこれを豆石、その周辺を石基と呼ぶ。この豆石の中央には径約3mmの核があり、その周りをとりまくマントル部分に微かながら2重構造が認められる。核は斜長石斑晶を含む凝灰岩で、軽石が押しつぶされたような溶結凝灰岩に特有の組織をもち、詳しく見ると外縁が凹凸に富む (図4写真A, B)。豆石のマントル部分は細粒な結晶質粒子を主とし、一部では石英粒も確認されたが、鏡下では構成物質の同定は困難であった。

豆石をとりまく石基の部分は、径1-6mm程度の岩片とガ

ラス質な物質からなり、岩片の一部には豆石の核とよく似た溶結凝灰岩やマントル部分と似た組織をもつ岩片も認められた (図4写真C)。石基の溶結構造には流動変形を示唆する縞状組織が斑晶近傍で目立つが、豆石や岩片の周辺でも類似のパターンが認められる (図3)。この縞状組織が豆石の外縁部と交差する場合もあるが、次に述べる漸移帯で途切れ、延長部の豆石内部には縞の痕跡が認められない (図4写真D)。豆石と石基の境界部を詳しく観察すると、幅100-500  $\mu\text{m}$  の“漸移帯”が、漸移帯と豆石の境界部には

幅20-50  $\mu\text{m}$ の“境界層”が認められる(図4写真D-F)。これらの構成物が何であるか微細なため確認できていないが、石基の溶結構造が漸移帯で次第に不鮮明になっていく状況から、漸移帯は豆石近傍が石基全体とはいくぶん異なった冷却過程を経たかあるいは二次的に形成されたものと推定される。漸移帯と豆石の境界部は比較的鮮明であるが、境界層は写真D-Fの範囲では鮮明であるものの、豆石の周囲には境界層がはっきりと認められない部分もある。

溶結凝灰岩の組織を示す岩片や石基は、鏡下では緻密で顕著な空隙は認められず、非顕晶質(aphanitic)でクロスニコル下でしばしば球顆状組織の一部とみられる繊維状組織が観察された。再結晶や変質により、初生の火山ガラスは残っていないとみられる。また、豆石にも石基にも比較的粒度の大きな石英粒の集合体が見られ、その一部は連続性の乏しい不規則脈状を呈し緑廉石を伴う(図3)。既に述べたように、試料の一部には内壁に微細な結晶が群生した小規模なレンズ状の空隙が見られる。このような空隙や不規則脈は、溶結凝灰岩として完全に固化した後にできたのではなく、溶結過程の塑性変形でできた空隙の一部あるいは全部が後に変質鉱物で埋められたものである可能性も考えられよう。なお、吹割溶結凝灰層のその他の変質鉱物とされる方解石や緑泥石は(久保ほか, 1995)、この薄片内には見られなかった。

#### 4. 考察と今後の課題

前項に記述した鏡下の特徴から、筆者はこの円形構造が火山豆石の断面であると推定しているが、観察した事例が限られているため断定を避けて「火山豆石様組織」とした。この項では若干の考察を行い、今後の課題を整理しておきたい。

火山豆石と推定する根拠となったのは、主に豆石の形と内部構造であったが、これを取り巻く石基に見られる溶結構造も重要である。火山ガラスの溶結によってできたとみられる縞状組織が、斑晶周辺と同様に豆石周辺でも流動変形を示唆するパターンを示し、この豆石が火砕流の溶結過程でも破壊されないだけの強度をもった固体として挙動したらしいことが推定される。今回観察されたこのような構造は火山豆石以外の成因でも説明できるだろうか。珪長質なガラス質火山岩中にしばしば見出される球状構造としてはスフェルライト(spherulite)が知られているが、これは火山ガラスの脱ガラス化によってできるもので(例えば、Williams et al., 1982)、今回見出された豆石に当てはめることはできない。しかし、溶結やその後の変質過程における何らかの作用でこの円形構造が形成された可能性を消去するには検討が不十分であることも確かであり、複数個体の観察に基づく検証が望まれる。

次に、この豆石の核が溶結凝灰岩片であって軽石ではな

い点も注目される。この豆石が噴煙柱の中で成長した火山豆石であるとすれば、マグマが発泡した軽石ではなく、同源とは思われるものの既に固結していた岩片が噴火でまきあげられて核となったことを意味する。この硬い核は火砕流の溶結時にも豆石の強度を保つ一因となったであろう。あるいは軽石を核とした豆石も形成されたが、破壊されてしまったのかも知れない。今後の研究ではそのような可能性も念頭に置く必要があろう。また、豆石のマントル部分は微細な結晶質粒子を主としガラス質な石基部分とは異なる点も興味深い。この微細粒子は石英や長石と推定されるが鉱物種の同定ができておらず、これらが濃集している原因は残された重要課題のひとつである。豆石をとりまく“漸移帯”は周辺の石基よりも脱ガラス化が進んでいるように思われるが、その原因も不明であり、薄片1枚の範囲にもまだまだ謎が満ちている。

吹割溶結凝灰岩は広い範囲に変質作用が及んでおり、今回の試料にも少なからぬ影響が見られる。今後は複数の試料を対象に、変質の強弱も比較しながら岩石組織の解析を進める必要があるだろう。空隙や晶洞あるいは変質鉱物脈の産状と分布もひとつの手掛かりを与えると期待される。変質をもたらした熱源は未解明であるが、追貝層群を貫く幅数mから数10mのひん岩岩脈の存在も報告されており(久保ほか, 1995)、火砕流自体の熱の他にマグマの貫入活動の影響も考えられる。

ところで、火山豆石に関するこれまでの記載を見ると、同じような粒径の豆石が層理面に沿って並んで産する例が多い。このような密集した産状は、噴煙柱の中で成長した豆石が上昇流の支持を失った時点で一気に降下したことを示唆する。同様なことが吹割の滝の溶結凝灰岩の噴出時にも起こっていたとすれば、今回の試料に似た組織が同一層準で複数発見されると期待される。しかし、豆石は流動しつつある火砕流の上に降下した可能性も考えられる。その場合は凝灰岩中に分散した産状を呈することになるだろう。塊状の凝灰岩から見出された今回の豆石は、そのような状況を浮かび上がらせる。豆石がこのような経過をたどったのだとすれば、火砕流の中を流動したにもかかわらず破壊を免れるだけの強度をもっていたという更に興味深い結論が導かれることになる。同じ薄片内には豆石のマントル部分と似た角の取れた岩片が認められる。これらは、火砕流の流動過程で破壊された豆石の残骸かも知れない。

なお、火山豆石の成因に関しては、噴煙柱の中ではなく雨滴や雹(ヒョウ)が火山灰に被われた斜面を転動してできたという地表形成説も含めて、他にもいくつかの成因説が提案されており(例えば、加藤, 1986; Gilbert and Lane, 1994)、成因は多様であるのかも知れない。吹割の滝の豆石がどのようにしてできたのかを解明することは、それを含む溶結凝灰岩の生成過程解明にもつながるだろう。今後の野外調査での追加的な発見と産状の詳しい観察を期待したい。



## 5. まとめ

群馬県北東部の片品川の溪谷にある天然記念物「吹割溪ならびに吹割瀑」の凝灰岩中に火山豆石様の岩片を偶然発見し、鏡下の特徴を記載すると共に、形成過程に関する若干の考察を試みた。発見個体は1個体のみで立体的な形状を確認できていないので断定を控えたが、これが火山豆石だとすれば群馬県内では2番目の報告となる。

**謝辞：**沼田市教育委員会利根町教育支所からは利根村教育委員会発行の調査報告書のコピーをいただいた。元地質調査所の一色直記博士と産総研地質情報研究部門の鹿野和彦・中野 俊・下司信夫の各博士からは、凝灰岩の組織についてご助言いただいた。物質・材料研究機構名誉研究員の小野 晃博士による丁寧な査読は原稿の改善に大変有益であった。以上の皆様に深謝します。

### <註>

註1) 天然記念物および名勝として指定された正式名称は「吹割溪ならびに吹割瀑」であるが(佐藤, 1992)、本文中では「吹割瀑」に対応する表記としては一般に浸透していると思われる「吹割の滝」(例えば、久保ほか, 1995)を用いた。

註2) 群馬県10万分の1地質図解説書(群馬県地質図作成委員会, 1999)によると、「片品川流紋岩類」は河田(1966)の命名によるとされているが、河田(1966)は「片品流紋岩類」としており、「川」は入っていない。太田・藤田(1993)により、13.5-9.6MaのK-Ar年代が報告されているという。

註3) 採取した試料の空隙に群生する微細結晶は、ルーペによる観察では無色あるいは淡緑色で石英や緑帘石と推定されるが、鉱物種は同定できていない。これらは熱水性と思われるが、もっと高温段階での蒸気相からの晶出鉱物も含まれるかも知れない。

註4) 溶結凝灰岩(welded tuff)は、火砕流を構成していた軽石や発泡した火山ガラス片が堆積後も高温の間に荷重で気泡が押しつぶされ、構成物が密着して空隙率が小さくなった凝灰岩であり、流理構造に似るが長くは

連続しない縞状の組織を特徴とする(例えば、都城・久城 1975, p.94; Williams et al., 1982, p.268; Fisher and Schmincke, 1984, p.214)。ここで用いた「溶結構造」(welded texture, Glossary of Geology, 5th Ed., Neuendorf et al., 2005)は、この縞状組織を指す。

## 文 献

- Boulter, C.A. (1987) : Subaqueous deposition of accretionary lapilli: significance for palaeoenvironmental interpretations in Archean greenstone belts, *Precamb. Res.*, 34:231-246.
- 地質調査所(1992): 100万分の1日本地質図 第3版, 地質調査所.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.U. (1984) : *Pyroclastic Rocks*, Springer-Verlag, Berlin, 472pp.
- Gilbert, J.S. and Lane, S.J. (1994) : The origin of accretionary lapilli. *Bull. Volcanol.*, 56:398-411.
- 群馬県地質図作成委員会(1999) : 群馬県10万分の1地質図, 群馬県, 内外地図株式会社.
- 加藤祐三(1986) : ひょう起源の火山豆石, 地質雑, 92:429-437.
- 河田清雄(1966) : 奥日光流紋岩類一足尾山地北方における白亜紀火山活動一. 地球科学, (84) : 6-13.
- 久保誠二・鷹野智由・小池千秋(1995) : 吹き割れの滝周辺の地質について, 天然記念物および名勝吹割の滝・吹割溪・基本調査事業, 地形・地質調査報告書, 利根村教育委員会発行, p.17-40.
- 都城秋穂・久城育夫(1975) : 岩石学II, 共立全書205, 171pp.
- Moore, J.G. and Peck, D.L. (1962) : Accretionary lapilli in volcanic rocks of the western continental United States, *Jour. Geol.*, 70:182-193.
- 中村一明(1978) : 火山の話, 岩波新書, 228pp.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P. and Jackson, J.A. (eds., 2005) : *Glossary of Geology*, 5th Edition, Am. Geol. Inst., Virginia, 779pp.
- 追貝団研グループ(1969) : 群馬県追貝付近の新第三系, グリーンタフに関する諸問題, 日本地質学会第76年学術大会 総合討論資料, 155-161.
- 野村正弘・三田照芳(2004) : 群馬県富岡市黒岩地域の庭谷層から火山豆石の発見, 群馬県立自然史博物館研究報告, (8) : 103-108.
- 太田直樹・藤田乾一(1993) : 第三紀溶結凝灰岩地域の地質形成史解析とダム地質への適用例. 第4回ダム工学会研究発表講演資料集, 28-30.
- 佐藤興平(1992) : 関東地方の天然記念物, 地質ニュース, (453) : 25-37.
- 鷹野智由・小池千秋・久保誠二(1996) : 群馬県北東部に分布する追貝層群とその放射年代, 日本地質学会第103年学術大会講演要旨集, p.100.
- Tomita, K., Kanai, T., Kobayashi, T. and Oba, N. (1985) : Accretionary lapilli formed by the eruption of Sakurajima volcano. *Jour. Japan. Assoc. Miner. Petrol. Econ. Geol.*, 80:49-54.
- Williams, H., Turner, F.J. and Gilbert, C.M. (1982) : *Petrography An Introduction to the Study of Rocks in Thin Sections*, 2<sup>nd</sup>. Edition, W.H.Freeman & Company, San Francisco, 626pp.