

火山ガスの化学分析は世界や日本で誰が最初に行なったか？

野津 憲治*

(2015年10月27日受付, 2015年11月26日受理)

Who Analyzed Volcanic Gases in the World and in Japan for the First Time?

Kenji Notsu*

1. はじめに

火山ガスはマグマに溶解していた揮発性成分が脱ガスして地表から大気へ放出される気体である。地表に至る経路で別起源ガスの混入を受けることも多く、火山ガスの化学組成はこのような二次的な現象も含めて火山活動の推移を反映し、噴火現象にも密接に関連することから、火山観測の中で重要な役割を担っている(野津, 1997; Oppenheimer, 2003)。

火山ガスの化学的研究の歴史について、松尾(1975, 1979)は、世界最初の分析は、Élie de Beaumont(1847)によるイタリアの火山ガスの分析であると書いており、松尾(1995)はそれより古い分析の可能性を示唆しているが、具体的には書いていない。一方、1995年にイタリアで開かれたINHIGEO(International Commission on the History of Geological Sciences)のシンポジウム“Volcanoes and History”では、1790年頃にはイタリアのBreislakが火山ガス分析を行っており(Newcomb, 1998)、BreislakはSpallanzaniの火山研究旅行の際にCampi Flegrei火山の噴気の共同研究を行ない、定量的な化学分析をユージオメーター(装置については本稿2章に記述)を用いて行なったこと(Capuano *et al.*, 1998)が発表された。Young(2003)も、Breislakの噴気分析の経緯と結果を取り上げている。

本稿では、Breislakが行なった世界最初と思われる火山ガスの化学分析について、時代背景、分析法、結果の評価などを述べる。さらに、火山ガスの化学分析が明治以降の日本の火山学の中でどのように始まったかについても述べる。

2. 18世紀後半のBreislakによる火山ガス分析

火山ガスの分析は、近代化学における気体の発見と密接に関係する。気体は定まった形も体積もないため、古代から「空気」として一括して扱われていた。色々な「空気」があることは古代から認識されており、イオウを燃した時に生ずる気体も知られてはいたが、それも「空気」であった(都築, 1966)。AD79年のイタリア、ベスピオ火山の噴火で、古代ローマの博物学者、軍人、政治家のGaius Plinius Secundus(大プリニウス)が噴火にまきこまれて死亡したが、その最期の様子を記述した甥のGaius Plinius Caecilius Secundus(小プリニウス)はその死因について、

「私が思うに、噴火ガスが濃くて叔父は喉を塞がれ、息が詰まったのでしょう」(國原, 1999)

と書いている。硫黄臭のある火山ガスの存在を示唆しているが、それ以上踏み込んだ探求はその当時ではできなかった。

気体状物質を一括した「空気」には色々な種類の気体が存在することをはじめて示したのは、気体という物質形態を“Gas”と命名したvan Helmontで、1640年の頃である(都築, 1966)。しかし、この考えは急速には受け入れられず、およそ一世紀を要して、18世紀後半に気体物質の発見が相次いだ。この時代はフロギストン説が信じられており、1754年にBlackが固定空気(二酸化炭素)を発見したのを皮切りに、1766年にCavendishが可燃性空気(水素)、1772年にRutherfordがフロギストン化空気(窒素)、1774年にPriestleyが脱フロギストン空気(酸素)を発見した(アシモフ, 2010)。ただし、酸素は1771

*〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836
静岡大学防災総合センター
Center for Integrated Research and Education of Natural
Hazards, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku,

Shizuoka 422-8529, Japan.

e-mail: k.notsu@nifty.com

年に Scheele が火の空気として発見していたことが後になってから分った。火山ガスを構成する主要な気体成分である二酸化硫黄 (1774 年, Priestley), 硫化水素 (1776 年, Scheele), 塩化水素 (1774 年, Priestley) もこの頃発見され (都築, 1966), 火山ガスの化学組成分析を行なう基盤がようやく整ったことになる。これらの気体成分の発見時期は、フロギストン説から脱却して近代的な気体化学が確立する Lavoisier による「化学要論」の刊行 (1789 年) の前夜に相当する。

Scipione Breislak (1748 生-1826 没) はローマに生まれ、シシリーで幼少期を過ごし、ローマに戻って自然科学を学び、ナポリへ移り住んだ。イタリア火山学の先駆者の一人と評されており、火山に関して火山岩や地質、鉱物を対象にただけではなく、噴気孔から出る気体にも興味を持ち、火山ガスの採取法を工夫し、火山ガスや凝縮水の分析を行った (Newcomb, 1998)。イタリア火山学の先駆者の一人に名を連ねている Lazzaro Spallanzani (1729 生-1799 没) は、自ら勤める博物館の展示品を収集するため 1788-1790 年に両シシリー王国と北アペニン地方に研究旅行を行なった (Vaccari, 1998)。最初にベスピオ火山で噴火を観察したあと、ナポリ周辺に移動し、Solfatara を訪れた次に Grotta del Cane (英訳 Dog's Cave) を訪れた。この洞窟は古代ローマ時代から知られており、犬のような小動物が入ると呼吸できなくなり死に至ることがあるので Grotta del Cane と命名された、Campi Flegrei 火山の噴気が充満している場所である。Spallanzani はこの気体に興味を持ち、その正体を明らかにするために、Breislak と共同研究を行ったのである。二人はそれぞれ別の課題を分担し、Spallanzani が気体の生物への生理学的な影響の研究を行なう一方で、Breislak は気体の化学分析を行なった。

Breislak が Grotta del Cane で行なった調査研究は、全 6 巻から成る Spallanzani の旅行記 (Spallanzani, 1792-97) の第 1 巻第 3 章 (p. 89-114) に詳しく書かれている。この旅行記はイタリア語で書かれたが、直ちに英訳版、仏訳版、独訳版が出版され、英訳版 (Spallanzani, 1798) は、1972 年に復刻版が作られたので、原文に当たることができる。Spallanzani (1798) の中で噴気の化学分析の記述は、Breislak が分析結果を報告する 1790 年 11 月 20 日付けの長文の手紙をそのまま掲載することで、示されている。以下に、分析値を報告している部分の英訳版の記述を原文のまま示す。

When exposed in a eudiometer to nitrous gas, an absorption took place, to about the 10/100 of the quantity. In a phial filled with this air, and continued with the mouth immersed in water for fifteen days, the water slowly rose until it occupied 40/100:

it may, therefore, be concluded that the relative quantities of the different gases which compose the mephitic air of the Grotta del Cane are as follows: 10/100 of vital air, or oxygenous gas, 40/100 of fixed air, or carbonic acid, and 50/100 of phlogisticated air, or azotic air; or perhaps it is a mixture of carbon acid and atmospheric air, with a small quantity of azotic gas, more than is contained in the atmospheric air.

分析された気体が、フロギストン説で使われる名称と新しい名称と併記されているのは、1790 年という時代背景を反映しているのであろう。分析結果をまとめると、全体積の 10% が活性空気 (=酸素), 40% が固定空気 (=二酸化炭素), 50% がフロギストン化空気 (=窒素) である。さらに、酢酸鉛を用いる硫化水素の検出を行なったが、検出できなかったと報告されている。気体分析の方法として、酸素はユージオメーターを使い、二酸化炭素は吸収法によっている。ユージオメーターは 18 世紀に普及し 19 世紀には使われなくなった「空気の良さ」を示す分析装置 (橋本, 2005) で、Breislak は硝空気 (NO) と分析ガスを反応させ、気体体積の減少を測定する硝空気ユージオメーター (Capuano *et al.*, 1998) を用いて、酸素の定量を行なった。Spallanzani は Breislak からの分析結果の報告を受け、分析値は分析試料が空気の混入を受けていることを示しているので、気体試料採取の方法に問題があったとの見解を述べ、空気が混入しない噴気試料の採取法を提案している (Spallanzani, 1798)。なお、一世紀以上経てから採取分析された Grotta del Cane の噴気の組成は、体積比で CO₂ が 67.1-73.6%、N₂ が 21.1-26.4% であった (Majo, 1927)。

Newcomb (1998) によれば、18 世紀後半にイタリアで活火山に関心が高まったのにはいくつかの理由があり、その一つに Lavoisier による新しい化学を自然界に存在する大気以外の気体に応用することであったとされる。18 世紀後半は気体化学が革命的に進展した時期で、大気組成も精密に測定されるようになり、地表大気組成と異なる Grotta del Cane の噴気の化学組成に関心が向かうのは、当然に成り行きのように思われる。1788-1790 年頃行なわれた Breislak の火山噴気の定量分析は、大気成分の混入は明らかで、採取方法に問題があることは Spallanzani (1798) が指摘している通りであるが、火山噴気の世界最初の分析としての歴史的価値は色褪せない。また、火山から硫黄を含む気体が放出されていることは古代から知られていたが、火山から二酸化炭素が放出されていることをはじめて明らかにした意義も強調しておきたい。

3. 19世紀の火山ガス分析

1883年から1924年まで41年間USGS（アメリカ地質調査所）に在任したF.W.Clarkeは、当時得られた色々な地球物質の化学分析データを収集し、“The Data of Geochemistry”を出版し（Clarke, 1908）、その後も改訂を続け第5版（Clarke, 1924）まで出版した。初版のClarke（1908）の第8章は「火山ガスおよび火山昇華物」をまとめており、最も古い化学分析としてBunsen（1853）によるアイスランドの火山ガスの分析結果を掲載している。キルヒホッフと共同のスペクトル分析やRb, Cs元素の発見、ブンゼンバーナーなど化学分野で卓越した業績をもつBunsenが、デンマーク政府の命を受け、1845年に大噴火したHekla火山の調査を1846年に行った（Oesper and Freudenberg, 1941；山岡, 1954）。Bunsen（1853）では、その際に採取した火山岩の分析結果だけでなく、火山ガスや温泉水の分析結果も報告している。なおClarke（1908）の脚注には、「火山ガスの化学的研究はBunsen（1853）以前にも、Élie de Beaumont（1847）がある」と書かれており、松尾（1975, 1979）が最初の分析にあげていることと符合する。

19世紀中にはBunsen（1853）以降、アイスランド以外にもイタリア、ギリシャ、コロンビア、アゾレスなどの火山で火山ガスの化学組成が測られ、分析データはClarke（1908, 1924）、Allen（1922）にまとめられている。この時代の火山ガスの化学的な研究の進展は、松尾（1995）を参照して欲しい。しかし当時の火山ガス分析は最大成分である水蒸気の定量が行われていないなど化学分析としても不十分で、それらのデータを現在測られているデータと同列に扱うことはできない。

4. 19世紀～20世紀初頭の日本における火山ガスの記載

ヨーロッパで火山ガスの化学分析が始まった頃、日本は江戸時代で、蘭学を通して西洋の近代科学が入り、火山性温泉水の化学分析が行なわれた。1823（文政6）年に長崎出島のオランダ商館医官として来日したシーボルト（Philipp Franz Balthasar von Siebold）は、薬剤師として1825（文政8）年から派遣されたビュルガー（H.Burger）による雲仙岳、阿蘇山、霧島山など九州の火山性温泉水の分析結果を自らの著書に記述している（シーボルト, 1977）。日本で最初の近代化学を紹介する書となる「舎密開宗」を1837（天保8）年から出版した宇田川榕菴は、1828（文政11）年から温泉水の分析を行い、「諸国温泉試談」を著した（柴田, 1965；大沢, 2009）。このように19世紀前半には火山性温泉水の分析が行なわれたが、火山ガスの分析の記録はない。

日本の火山学は、明治に入って多くのお雇い外国人教

師が来日した時代に始まる。1876（明治9）年に英国から工部省工学寮教師として来日したミルン（John Milne）は、日本の地震学の基礎を築いたことで知られるが（上野, 1968）、火山の観察も多く行ない、日本列島の50あまりの火山の地形、地質、噴火史をまとめた（Milne, 1886）。ミルンは日本で最初の活火山リストを編纂したことからして日本の火山学の元祖と言えるであろう。

ミルンは来日直後の1876（明治9）年の年末から始まった伊豆大島三原山の噴火に際し、1875（明治8）年にドイツから来日し東京開成学校の教授に雇われたナウマン（Edmund Naumann）、東京開成学校助教の和田維四郎と1877（明治10）年1月に調査に赴いた。わずか1日だけの調査であったが、Milne（1877）とNaumann（1877）はそれぞれ自国の学術雑誌に調査報告を発表し、そのほかナウマンのドイツ語報告の和田による邦訳が日本の学術雑誌に掲載された（ナウマン・和田, 1877）。なお、この報告には和田の著名入の火山全般の解説が加えられている。ミルン、ナウマンらの噴火の観察記録には、山頂火口内に形成された噴石丘の中央や周辺からの火山ガスの放出が記述されており、Milne（1877）は“sulphureous smell”、Naumann（1877）は“Schwefeldämpfen”と記載している。ナウマン・和田（1877）では、

「又凹底ヨリ（噴火口ヨリ稍々遠キ處）忽然綠黄煙ノ昇騰スルヲ見タリ想ウニ是レ硫蒸氣ナラン此他硫黄蒸氣ノ噴出スルモノ極メテ稀ナリ」

と書かれており、ガスを採取し化学分析を行なったとは思われない。同じ論文の中で和田が書いた「火山畧説」の中で、火山ガスは、

「而シテ發スル所ノ氣ハ水蒸氣、硫化水素、亞硫酸、硫黄、鹽化水素、炭酸、水素、硼酸等各一ナラス就中硫黄ノ噴火口邊ニ散漫スルモノアリ又噴出スル蒸氣ノ分解ニ遇フテ食鹽、礪砂（著者注：塩化アンモニウムの古名）、鹽化鎂等ヲ成ス」

と説明されており、1870年代にすでに日本の研究者に火山ガスの化学組成の知識はあったことが分る。三原山の火山ガスの観察もそのようなバックグラウンドのもとで行なわれたのであろう。最近になって金（2013）は、1877（明治10）年1月の伊豆大島噴火調査に1874（明治7）年に英国から来日して東京開成学校で化学を教授したアトキンソン（Robert William Atkinson）も参加していたことを明治初期の公文書調査で見つけ、アトキンソンが火山ガスの化学分析を行なった可能性を示唆している。アトキンソンの日本での活動については研究が進んでいるが（上野, 1968；ユネスコ東アジア文化研究センター, 1975；塩川, 1977）、伊豆大島の調査の記述を見つめることはできなかった。アトキンソンの伊豆大島噴火

調査での役割は、今後の史料研究を待たねばならない。

日本の火山研究は、1880年代のミルンによる調査のあと、1891年の濃尾地震を機に1892年に設置された震災予防調査会による全国火山地質調査に引き継がれた。1896年から1921年までに34編の火山調査結果が震災予防調査会報告に掲載され（日本地学史編纂委員会、2003）、この間に起きた火山噴火の現地調査報告も掲載された。火山調査報告には、火山噴気の記述もなされており、山崎（1896）による伊豆大島火山の調査報告では、火口底や火口壁の隙間から出ている火山ガスについて、

「気体噴出物中主要ナルモノハ水蒸氣ニシテ其他又亞硫酸瓦斯、硫化水素瓦斯等ヲ噴出す」

と記されている。水蒸気にSO₂とH₂Sとが噴出していることを述べているが、SO₂やH₂Sの含有量も検知方法も書かれていないので、ガスの臭いから判断したのではと思われる。同じような硫黄を含む噴気は、榛名火山（岩崎、1897）、箱根火山（平林、1898）、阿蘇火山（伊木、1901）、那須火山（松田、1901）、硫黄岳（焼岳）火山（加藤、1913）、草津白根火山（大橋、1914）で報告されているが、化学分析の記述はない。

樽前山は1909年に中規模のマグマ噴火を起こした。震災予防調査会の委託を受けた大井上（1909）は、溶岩噴出後3週目にドームの観察を行ない、

「（溶岩の）塊岩間ヨリ發スル蒸氣中ニハ硫黄、亞硫酸瓦斯臭ヲ混ズ」

と報告している。この時、米国の火山学者ジャガー（Thomas A. Jagger）も同行し、噴気孔に熱電対温度異計を差し込み熔岩の温度を測定し、最高457℃を得た。ジャガーは1912年にハワイ火山観測所を設立し、1940年まで所長を務め、火山ガスの総合論文も発表している（Jagger, 1940）が、この時に火山ガスの分析を行った記録はない。

5. 日本における最初の火山ガスの化学分析

我が国で最も古い火山ガスの化学分析の報告は柴田（1917）によってなされた。札幌在住の柴田狷介は樽前山の1917年水蒸気爆発の直後に3回登頂し、噴出するガスを現場で分析し、蒸留水に溶かして持ち帰り農科大学農芸化学教室で分析した。その結果を、

「今回噴出の瓦斯は重に硫化水素にしてなほ亞硫酸瓦斯を混ず、又水蒸氣を多量に含めりこれ等三種のものの混合割合は噴汽口によりて異なり、この外鹽素瓦斯などを含めるにあらずやと細心なる分析をなししもその痕跡だに見るを得ざりき（原文のまま）」

と述べているが、分析方法や定量値の記述はない。噴出

現場では放射能測定も行なったが、良い結果は得られなかったと記されている。

分析方法や定量値が書かれている最も古い報文は、菅沼（1929）による那須殺生石の周囲から噴出するガスの毒性に関する研究である。噴出ガスを「苛性曹達の酸液」に吸収して分析し、体積比でH₂S 4.3%、CO₂ 17.3%、および水蒸気微量が得られ、残りはガス採取の際混入した空気起源のN₂、O₂であった。

1930年代には、野口（1935）による浅間火山、地獄谷噴気の化学分析、富永（1935）による樽前山火口と大雪山噴気孔から噴出するガスの分析、朝比奈・泉（1937）による焼山火山の噴気の化学分析が報告されている。朝比奈・泉（1937）では凝縮水を定量した後に残余ガスをHempelの方法（特定のガス成分を選択性の高い吸収材で吸収して定量する方法）で分析し、さらに残ったガスを燃焼定量した。野口（1935）も水上置換で採取した噴気をHempelの方法で分析し、残ったガスを燃焼定量した。

第5版（Clarke, 1924）まで刊行された“The Data of Geochemistry”は、第6版が1963年に刊行され、その中の第K章は「火山発散物」にあてられている（White and Waring, 1963）。日本から発表された火山ガスの分析値も数多く掲載されており、その中で最も古いデータは野口（1935）による浅間火山、地獄谷噴気の分析値である。このことは、日本の火山ガスの化学分析が1930年代になってようやく世界のデータと比較できるレベルに到達したことを物語っているであろう。

6. ま と め

火山ガスの化学分析は18世紀末にはイタリアで行なわれていた。Breislakが1790年頃にCampi Flegrei火山のGrotta del Caneに充満する噴気の化学分析をユージオメーターなど使って行ったことが、Spallanzaniの研究旅行の記録（Spallanzani, 1792–1797）に記されている。分析結果は試料中に空気の混入が顕著であることを示したが、火山からCO₂が放出していることを初めて示した。日本では、19世紀後半に近代的な火山学が導入され、当時の火山調査には火山ガスの記述も見られる。最も古い火山ガスの化学分析の記録は、柴田（1917）による樽前山の火山ガスの分析で、H₂SとSO₂と水蒸気の混合比が噴気孔ごとに異なることを述べているが、分析法や定量値の記述がない。分析法や定量値の記述がある最古の分析は、菅沼（1929）による那須殺生石の噴気の分析である。

謝 辞

1995年に開催されたINHIGEO (International Commis-

sion on the History of Geological Sciences) のシンポジウム “Volcanoes and History” の資料, 論文集は, 諏訪兼位名古屋大学名誉教授にお借りした。また, 日本の火山ガスの化学分析の歴史について野上健治東京工業大学教授から情報提供頂いた。2名の査読者(日下部実岡山大学名誉教授, 橋本武志北海道大学教授)には, 本稿の修正にあたって有益なコメントをいただいた。以上の方々に深く感謝致します。

引用文献

- Allen, E. T. (1922) Chemical aspects of volcanism with a collection of the analyses of volcanic gases. *J. Franklin Institute*, **193**, 29-80.
- 朝比奈貞一・泉 末雄 (1937) 火山化学 (第3報) 焼山火山調査第2報. 気象集誌II, **15**, 64-87.
- アシモフ, I. (玉虫文一・竹内敬人 訳) (2010) 化学の歴史. ちくま学芸文庫ア-32, 筑摩書房, 東京, 328p.
- Bunsen, M. R. (1853) Recherches sur la formation des roches volcaniques en Islande. *Ann. Chim. Phys. (Ser.3)*, **38**, 215-288.
- Capuano, C., Cavalchi, B., Davoli, V. and Manzini, P. (1998) Eudiometric measures at the end of 18th century. Air quality of the Dog Cave from Lazzaro Spallanzani's travel in the two Sicilies. In *Volcanoes and History* (Morello, N. ed.), 55-63. Proc. 20th INHIGEO Symp., Brigati, Genova.
- Clarke, F. W. (1908) **The data of Geochemistry**. USGS Bull. 330. Gov. Print. Office, Washington, 716p.
- Clarke, F. W. (1924) **The data of Geochemistry Fifth Edition**. USGS Bull. 770. Gov. Print. Office, Washington, 841p.
- Élie de Beaumont, M. (1847) Note sur les émanations volcaniques et métallifères. *Bull. Soc. Géol. France* 2nd Ser., **4**, 1249-1333.
- 橋本毅彦 (訳) (2005) ユージオメーター. 「科学大博物館一装置・器具の歴史事典一」(橋本毅彦・梶 雅範・廣野喜幸監訳), 745-747. 朝倉書店, 東京.
- 平林 武 (1898) 箱根熱海兩火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, **16**, 3-78.
- 伊木常誠 (1901) 阿蘇火山調査報文. 震災予防調査会報告, **33**, 3-90.
- 岩崎重三 (1897) 榛名火山及ヒ角落火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, **11**, 140-180.
- Jagger, T. A. (1940) Magmatic gases. *Am. J. Sci.*, **238**, 313-353.
- 加藤鉄之助 (1913) 硫黄岳 (焼岳) 火山地質調査報告. 震災予防調査会報告, **75**, 27-73.
- 金 光男 (2013) 1877 (明治10)年ナウマン・和田維四郎・ミルンによる伊豆大島火山噴火調査. 地質学史懇話会会報, **40**, 41-45.
- 國原吉之助 (訳) (1999) プリニウス書簡集: ローマ帝国一貴紳の生活と信条, 講談社学術文庫 1367. 講談社, 479p.
- Majo, E. (1927) I fenomen vulcanici della grotta del Cane (Campi Flegrei) in rapporto alle variazioni atmosferiche. *Bull. Volcanol.*, **4**, 84-92.
- 松田 繁 (1901) 那須火山地質調査報文. 震災予防調査会報告, **36**, 3-68.
- 松尾禎士 (1975) 火山ガスの化学—火山ガスから何が分るか—. 火山, **20**, S319-S329.
- 松尾禎士 (1979) 火山ガス. 「火山」(横山泉ほか編), 121-132. 岩波講座地球科学 7, 岩波書店.
- 松尾禎士 (1995) 火山ガス. 「火山の事典 (初版)」(下鶴大輔ほか編), 155-164. 朝倉書店.
- Milne, J. (1877) A visit to the volcano of Oshima. *Geol. Mag. Decade II.*, **4**, 193-199.
- Milne, J. (1886) The volcanoes of Japan. *Trans. Seismol. Soc. Japan*, **9**, 1-184.
- Naumann, E. (1877) Die vulcaninsel Ooshima und ihre jüngste eruption. *Zeit. Deutsch. Geol. Gesell.*, **24**, 364-391.
- ナウマン, E. (和田維四郎訳) (1877) 大島火山記. 學藝志林, **1**, 1-48.
- Newcomb, S. E. (1998) Early volcanology and laboratory. In *Volcanoes and History* (Morello, N. ed.), 441-458. Proc. 20th INHIGEO Symp., Brigati, Genova.
- 日本地学史編纂委員会 (2003) 日本地学の展開 (大正13年~昭和20年) <その3>—「日本地学史」稿抄. 地学雑誌, **112**, 131-160.
- 野口喜三雄 (1935) 本邦火山の地球化学的研究 (其一) 浅間火山山頂及び其附近に於ける噴出瓦斯竝に湧出水の研究 (第一報). 日本化学會誌, **56**, 1495-1510.
- 野津憲治 (1977) 火山ガスからマグマの動きを知る. 「火山とマグマ」(兼岡一郎・井田喜明 編), 139-157. 東京大学出版会, 東京.
- Oesper, R. E. and Freudenberg, K. (1941) Bunsen's trip to Iceland: as recounted in letters to his mother. *J. Chem. Educ.*, **18**, 253-260.
- 大橋良一 (1914) 草津白根火山地質調査報告. 震災予防調査会報告, **78**, 1-47.
- 大井上義近 (1909) 樽前岳噴火実況調査報告. 震災予防調査会報告, **64**, 1-23.
- Oppenheimer, C. (2003) Volcanic degassing. In *The Crust* (Rudnick, R. L. ed.), 123-166. *Treatise on Geochemistry* Vol. 3, Elsevier, Amsterdam; Tokyo.
- 大沢真澄 (2009) 江戸時代, 温泉水の化学分析の進展について. 日本医史学雑誌, **55**, 143.
- シーボルト, P. F. (中井晶夫・斎藤 信 訳) (1977) 長崎から小倉への旅. 「日本」第2巻, 203-230. 雄松堂書店, 東京.
- 柴田狷介 (1917) 樽前新噴火の際における瓦斯. 地質学雑誌, **24**, 467-468.
- 柴田雄次 (1965) 日本化学略史. 化学教育, **13**, 155-167.
- 塩川久男 (1977) R. W.アトキンソン—生涯と彼による上水水質分析について—. 化学史研究, **6**, 20-24.
- Spallanzani, L. (1792-97) **Viaggi alle Due Sicilie e in alcune patri dell'Appennino**. Pavia, Baldassarre Comini, 6 Vol.
- Spallanzani, L. (1798) **Travels in the two Sicilies, and some parts of the Apennines**. London, G. G. and J. Robinson, 4 Vol. (315p. + 389p. + 402p. + 379p.)
- 菅沼市藏 (1929) 我邦に於ける温泉地帯より噴出する瓦斯及び二三の火山瓦斯に就いて, 並びに今井氏の質疑に就いて. 地質学雑誌, **36**, 387-392.

- 富永 齊 (1935) 火山噴出物の化学的研究. 日本学術協会報告, **10**, 420-422.
- 都築洋次郎 (1966) 化学史: その思想と技術. 朝倉書店, 東京, 259 p.
- 上野益三 (1968) お雇い外国人. 第3. 鹿島研究所出版会, 東京, 258 p.
- Vaccari, E. (1998) Lazzaro Spallanzani and his geological travels to the "Due Sicilie": the volcanology of the Aeolian Islands. In *Volcanoes and History* (Morello, N. ed.), 621-651. Proc. 20th INHIGEO Symp., Brigati, Genova.
- White, D. E. and Waring, G. A. (1963) Chapter K. Volcanic Emanations. In *Data of Geochemistry Sixth Edition* (Fleischer, M. ed.). GS Prof.Pap. 440-K, US Gov. Print. Office, Washington, 27 p.
- 山岡 望 (1954) プンゼンの88年. 内田老鶴圃新社, 東京, 282 p.
- 山崎直方 (1896) 大島火山調査報文. 震災予防調査会報告, **9**, 33-53.
- Young, D. A. (2003) **Mind over Magma: the Story of Igneous Petrology**. Princeton University Press, 686 p.
- ユネスコ東アジア文化研究センター(編) (1975) 資料御雇外国人. 小学館, 東京, 524 p.
- (編集担当 橋本武志)