

間欠泉の噴出機構の研究の現状と展望

鏡 裕 行¹⁾

(平成 27 年 9 月 23 日受付, 平成 27 年 9 月 26 日受理)

A Review and Perspective of Research on Spouting Mechanism of a Geyser

Hiroyuki KAGAMI¹⁾

1. 間欠泉の噴出機構の研究の歴史

1.1. 間欠泉の噴出機構の研究の黎明

間欠泉の噴出機構の研究の歴史は古く、1811年にイギリスの地質学者 Mackenzie が行ったアイスランドでの間欠泉の調査に端を発する (Mackenzie, 1811; Björnsson, 2005; Mackenzie, 2011)。この中で Mackenzie は、地下の噴出管の底の近くの空洞に蒸気が集まり、突然蒸気が噴出管の中に押し出されることで噴出が起こると述べている。日本においては、本多と寺田が熱海温泉の大湯間欠泉の観測とモデル実験に基づき、やはり噴出管の地下深くに空洞の存在を仮定する理論モデルを提案した (Honda *et al.*, 1906)。これらは“空洞説”とよばれている。

一方、間欠泉の噴出機構のもう一つの有力な説は“垂直管説”とよばれるもので、1847年にドイツの化学者 Bunsen によって提唱された (Bunsen, 1847)。これは、特に地下空洞の存在を仮定せず、垂直な噴出管のみを仮定し、管内で地熱により加熱された地下水が沸点に達すると、沸騰により発生した水蒸気の気泡の上昇に伴い管内の水が押し上げられ湧出が始まり、これらによる管内の水圧低下がさらに気泡の急激な発生を促し噴出が生じるというものである。なお、野口は、鳴子間欠泉での各イオンの変化量に基づき、垂直管説を支持する論文を発表した (野口, 1941)。

1.2. 間欠泉の種類

間欠泉は、噴出する水の温度によって (その発生機構の違いによって)、間欠沸騰泉と間欠泡沸騰泉の2つに分けられる。前者は、沸点に達した熱水が勢いよく高く噴出するのに対し、後者は、沸点に達していない比較的低温の水が噴出し、噴出時の水頭の高さも前者に比べるとずっと低い。規模的にも、存在数でも、前者の方がメジャーといえるかも知れない。前者の例としてはアメリカ

¹⁾ 藤田保健衛生大学医学部 〒470-1192 愛知県豊田市香掛町田楽ヶ窪 1-98. ¹⁾ School of Medicine, Fujita Health University, 1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Totoake, Aichi 470-1192 Japan. E-mail kagami@fujita-hu.ac.jp, TEL 0562-93-2578, FAX 0562-93-4593.

カのイエローストーンの間欠泉, 後者の例としては島根県の木部谷間欠泉などが挙げられる.

ところで, 1. 1. で挙げた黎明期の間欠泉の噴出機構の研究は, いずれも間欠沸騰泉の方を対象としている. メジャーな方が先に研究対象になるのは当然ともいえ, 間欠泡沸泉の噴出機構の研究の黎明は, あと数十年待たねばならなかった.

1. 3. 間欠泡沸泉の噴出機構の研究の始まり

私自身は, 長年, 主に間欠泡沸泉の噴出機構の研究に携わってきたため, 本稿も, 間欠泡沸泉の方にやや重みを置いた内容になってしまうことをご容赦願いたい, 上述のように, 間欠泡沸泉は間欠沸騰泉に比べてマイナーであることもあり, 間欠泡沸泉の噴出機構に関する研究はあまり多くなく, 岩崎による研究が始まりと考えられる (岩崎, 1944 ; Iwasaki, 1962). 岩崎は, Fig. 1 に示すような, 地下空洞を仮定したいくつかの間欠泡沸泉のモデル実験系を用いて多くの実験を行い, Fig. 1 のように高圧ガスを注入することで, 噴出口から間欠的に水を噴出させることに成功した. そして岩崎は, 低温の水とガスを噴出する間欠泡沸泉の場合は, 地下にガスを蓄える空洞が必要なため, 上記の垂直管説では説明できないと述べている (岩崎, 1944). そして岩崎は, ガス収支の議論から, 間欠泡沸泉の休止時間 T_1 と噴出時間 T_2 に関して, 水 (またはガス) の供給レート L と水 (またはガス) の噴出レート M を用いて, 次のような式を導いている (岩崎, 1944 ; Iwasaki, 1962).

$$T_2/T_1 = \frac{L}{M-L} \tag{1}$$

この式は, 簡潔に間欠泡沸泉の休止と噴出の周期に関して要点をまとめているが, 岩崎は, 噴出周期が地下空洞体積などの系の様々な物理量 (パラメタ値) によってどのような影響を受けるかといった噴出周期の様々なパラメタ依存性, 噴出時や休止時に水頭がどのような時間変化をするかといった噴出ダイナミクスには触れていない.

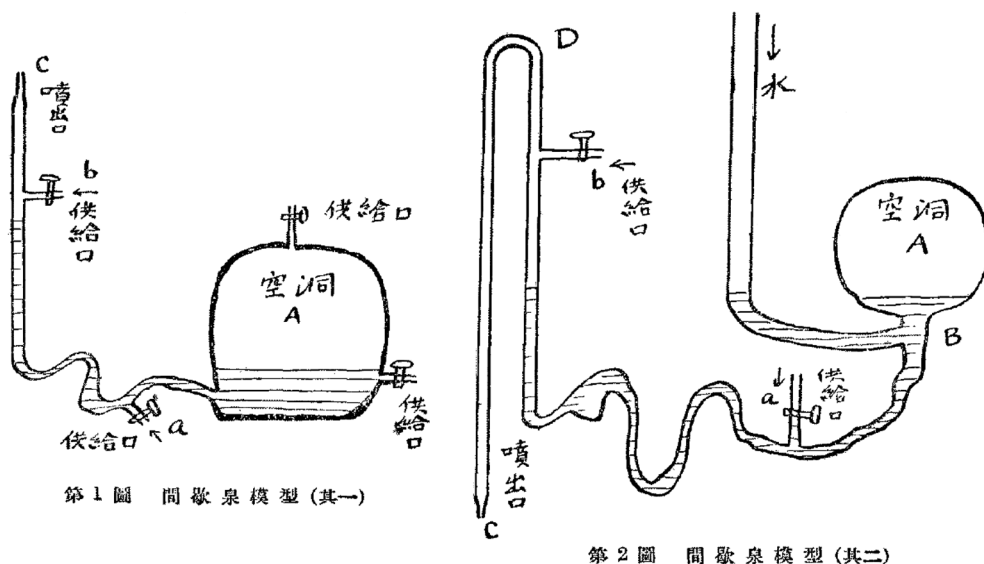


Fig. 1 Indoor model experiment devices designed by Iwasaki (Iwasaki, 1944)

2. 間欠泉の噴出機構の研究の現状

2.1. 観測的, 地質学的研究

最近の, 観測的手法により間欠泉の噴出機構を論じた研究としては, 石井らによる研究が挙げられる(石井, 2006). 石井は, 国内の2カ所の間欠泡沸泉について多くの観測を行い, 過去および最近数年の休止時間, 噴出時間の観測データから回帰直線を求め, そのグラフから, 間欠泉の寿命を論じている. なお, 石井は, この手法により, 山形県の広河原間欠泉の寿命を, 「2015年に噴きっぱなしになって, 2017年に噴出が止まってしまう」と予想しているが, 本稿執筆時の2015年9月下旬現在, 広河原間欠泉はまだ噴きっぱなしにはなっていない. 今後の動向が注目される.

海外の最近の観測的手法による間欠泉の噴出機構に関わる研究としては, Belousovらによるカムチャツカの Geysir Valley の間欠泉の地下の CCD カメラを用いた撮影による研究が興味深い(Belousov *et al.*, 2013). Belousovらは, 間欠泉の地下深くに下した CCD カメラによって, 多数の Bubble trap の存在を確認し, 少なくとも Geysir Valley の間欠泉は, 岩崎(Iwasaki, 1962)や鏡(Kagami, 2010)(後述)がモデルで仮定している地下空洞が存在するタイプであると結論づけている.

なお, 鏡は, 地下空洞の存在を裏付けるべく, 地質踏査による調査を行い, 崖錐堆積物と温泉水の相互作用により, 地下に小さな空洞のネットワークが形成され, それにより大きな空洞体積が実現しようと述べている(Kagami, 2007).

2.2. 実験的研究

近年, 石井ら(石井, 2006), 片瀬ら(片瀬他, 1999)による間欠沸騰泉, 間欠泡沸泉の室内モデル実験が行われた. いずれも, 丸底フラスコ, ガラス管, ロート等を用いた簡便な装置から成り, 間欠泡沸泉の室内モデル実験なら, 適切な指導環境があれば, 中学生でも実験が可能である(鏡, 2009). 実験方法等の詳細は, 石井の解説(石井, 2006)が詳しい. また, 実験装置の概略図を, Fig. 2に示す. Fig. 2の左側のガラス管から噴出した水は, ロート等を用いて右側のガラス管からフラスコ内に戻るようになっている.

特に, 片瀬らは, この実験により, 噴出周期の様々なパラメータ(フラスコ内の空洞体積, ガス供給レート, ガラス管の長さ, ガラス管の断面積等)依存性を明らかにした. フラスコ内の空洞体積, ガラス管の長さ, ガラス管の断面積等は, 実際の間欠泡沸泉では, それぞれ地下空洞体積, 地下空洞までの深さ, 噴出管の断面積等に相当する. この実験結果の説明が, 後述の鏡による間欠沸騰泉の噴出モデルの導出(Kagami, 2015a; Kagami, 2006; Kagami, 2010)の動機となった.

2.3. 理論的研究

上記の片瀬らの室内モデル実験の結果を説明するため, 鏡は, 間欠泡沸泉の静力学モデルを導出した(Kagami, 2015a; Kagami, 2006). これは, フラスコ(地下空洞)内のガスが等温変化するというのみを仮定して数理モデル化したもので, 片瀬らの室内モデル実験の結果が全て説明される.

その後, 鏡は, 上述のように, 岩崎の理論が噴出ダイナミクスには触れていないことを鑑み, 片瀬らの室内モデル実験と, 石井による追

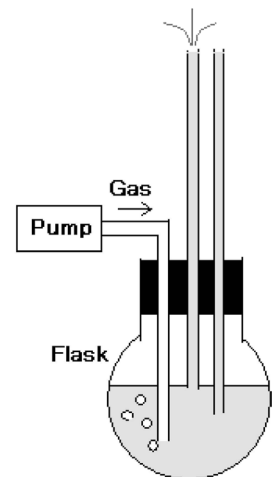


Fig. 2 An illustration of the device of the indoor model experiments

加実験 (石井, 1999) に基づき, 間欠泡沸泉の動力学モデルを構築した (Kagami, 2006 ; Kagami, 2010). このモデルでは, 噴出前, 噴出管中の水柱は表面張力により支えられているが, フラスコ (地下空洞) 内のガスの圧力に抗しきれなくなると, 表面張力というたがが外れ, 噴出に至ることになる. なお, 実際の間欠泡沸泉においては, この“たが”に相当するものは表面張力のみである必要はなく, 静止摩擦力など, 噴出しようとする水柱を地下空洞内のガス圧から支えている力の合力と考えればよい. この“たが”の力の大きさが大きいほど, 噴出が始まったときの水柱の上昇速度が大きいことになる.

このことを含め, 鏡は, このモデルの数値計算から, 噴出時の水頭の時間変化の様々なパラメータ値依存性を明らかにするとともに, 水頭の時間変化を観測結果と比較することにより, 様々な地下パラメータ値 (地下空洞体積, 空洞までの深さ等) を予測することが可能になることを示した (Kagami, 2006 ; Kagami, 2012a). さらに鏡は, 地下のガス供給源を複数仮定することにより, 不規則に噴出する間欠泡沸泉の噴出ダイナミクスが再現できることを示した (Kagami, 2012a). これにより, あらゆるタイプの間欠泡沸泉の噴出ダイナミクスが説明できることとなった.

他にも, 鏡は, 間欠泡沸泉のより正確な噴出ダイナミクスを再現すべく, 溶存ガスの気化の効果 (Kagami, 2009), 地下の複雑な流路の効果 (Kagami, 2010) 等についても論じている.

間欠沸騰泉のモデルに関しては, 鏡が, 地下空洞の存在を仮定しないモデルを提案している (Kagami, 20012b).

3. 間欠泉の噴出機構の研究の今後の展望

3.1. 間欠泉の噴出モデルの精確化: 休止・噴出の機構の詳細な理解へ向けて

間欠泡沸泉の水頭の時間変化を細かく見ると, 水頭の上昇時に比べ, 下降時はその勾配が急峻になる等の細かな特徴がいくつか見える. また, 管内の温度検層の結果, 管内において地下水の流入が示唆される結果が得られている (石井, 2006). このような細かな噴出ダイナミクスの特徴, 休止と噴出のモード間の遷移時の様子, 観測的事実等を取り込んだ, 噴出モデルの精確化が, 今後必要である.

これを受けて, 鏡は, 地下水の流入の効果等を考慮した噴出モードから休止モードへの遷移への考察 (鏡, 2014), 噴出時における気泡の効果 (鏡, 2015) 等について考察している.

3.2. 間欠泉の噴出モデルに基づく工学的提言: 間欠泉の資源維持

間欠泉の寿命は, イエローストーンの間欠泉のように非常に長いものも存在するが, 短い場合が少なくなく, かつては 50 m の高さまで噴出したといわれる諏訪湖の間欠泉や, 寺田らの研究でも有名な熱海の大湯間欠泉は, 今では自噴せず, 機械の動力による人工間欠泉となっている. 温泉の枯渇は自然の摂理といえばその通りであるが, 観光等で訪れる人々にとっては, 間欠泉が自噴しているのか人工的に噴出しているのかは, 得られる感動という点では, 雲泥の差といえる. そのため, 間欠泉の噴出モデルに基づいて, 枯渇する前に工学的な施工を行い, その噴出を維持させることができれば, 間欠泉の資源維持という観点から, 重要な意味を持つと考えられる.

これに関しては, 鏡が, これまでの間欠泡沸泉の動力学モデルに基づき, 間欠泡沸泉の噴出の衰えから, それに対する工学的施工を行った結果噴出の高さが回復する一連の様子を, 数値計算で再現する試みを行っており, 近々発表する予定である (Kagami, 2015b).

3.3. 他分野, 他の現象への応用

火山学の分野では, 間欠泉が, 火山の現象と酷似しているとの認識から, 火山現象の理解のための間欠泉のモデル実験が始まっている (Toramaru, 2013). したがって, 東日本大震災以後, 日本各地で火山活動の活発化がみられる今日, 温泉学の立場から, 火山学の分野に, 間欠泉の研究成果を応用していくことは有効かつ重要である.

また, 最近, 土星探査機カッシーニの観測から次々に新しい事実が明らかになっているが, その中で, 衛星エンケラドゥス表面の氷の下に広がる海が星全体を覆っており (NASA, 2015), またその海底には摂氏 90 度以上の熱水環境が存在することが明らかとなった (Hsu *et al.*, 2015 ; Kerr, 2014 ; Iess *et al.*, 2014). この熱水の海への噴出, またエンケラドゥス表面の氷から宇宙空間に噴出する水のダイナミクスを考える際, 間欠泉の噴出機構の研究成果が役立つ可能性がある.

また, 東日本大震災に伴う原子力発電所の事故を受け, 原子力発電所から生成される核廃棄物の地層処分は是非についての検討が喫緊の課題となっているが, これに大きな示唆を与え得るものとして, 約 17 億年前の現在のガボンのオクロにおいて存在したとされる天然原子炉 (Kuroda, 1956 ; De Laeter *et al.*, 1980 ; Meshik *et al.*, 2004) が注目されており, この地における核分裂生成物の分布の正確な調査が望まれる. この天然原子炉では, 中性子の減速材として働く地下水の流入と加熱による噴出が間欠的に起こっていたとされ, この間欠泉による核分裂生成物の拡散を見積もることは, 地下深部における核物質の拡散を見積もる上で大変重要である. 上記の核廃棄物の地層処分を検討する上でも, これまでの温泉学の分野における間欠泉の噴出機構に関わる研究成果を応用した議論は, 非常に重要と考えられる.

謝 辞

間欠泉の噴出機構の研究の今後の展望の部分で触れた土星の衛星エンケラドゥスに関する部分とオクロにおける天然原子炉に関する部分に関しては, 香川大学工学部の岩本直樹教授からご教授, ご助言いただいた内容を大変参考にさせていただいた. ここに記して深く感謝申し上げます.

引用文献

- Belousov, A., M. Belousova, A. Nechayev (2013) : Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework : Implications for the geyser mechanism. *Geology*, **41**, 387-390.
- Björnsson, A. (2005) : Development of Thought on the Nature of Geothermal Fields in Iceland from Medieval Times to the Present. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005*.
- Bunsen, R. (1847) : *Physikalische Beobachtungen ueber die haupt- sachlichsten Geisir Islands*. Poggendorffs *Annalen*, **72**, 159-170.
- De Laeter, J.R., K.J.R. Rosman, C.L. Smith (1980) : The Oklo Natural Reactor : Cumulative Fission Yields and Retentivity of the Symmetric Mass Region Fission Products. *Earth and Planetary Science Letters*, **50**, 238-246.
- Honda, K., T. Terada (1906) : On the geyser in Atami, Japan. *Phys. Rev.*, **22**, 300-311.
- Hsu, H.-W., F. Postberg*, Y. Sekine*, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horanyi, A. Juhasz, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer, R. Srama (2015) : Ongoing hydrothermal activities with Enceladus. *Nature*, **519**, 207-210 (12 March 2015).

- Iess, L., D.J. Stevenson, M. Parisi, D. Hemingway, R.A. Jacobson, J.I. Lunine, F. Nimmo, J.W. Armstrong, S.W. Asmar, M. Ducci, P. Tortora (2014) : The Gravity Field and Interior Structure of Enceladus. *Science*, **344**, 78-80 (4 April 2014).
- 石井栄一 (1999) : 鏡が間欠泡沸泉の動力学モデルを構築する際、石井が詳細なモデル実験を鏡の前で実演した。このとき、噴出管中の水柱がフラスコ下部の滞留水から分離してもすぐには噴出に至らないことを鏡が発見し、このことが鏡による動力学モデルの構築の大きなヒントとなった。
- 石井栄一 (2006) : 間欠泉の発生と消滅のメカニズム。大沢信二編, 「温泉科学の新展開」, ナカニシヤ出版, 京都, 131-148.
- 岩崎岩次 (1944) : 間歇泉の地球化学的研究 (第三報)。日本化学会誌, **65**, 640-644.
- Iwasaki, I (1962) : Geochemical Investigation of Geyser in Japan. *Bull. Tokyo Institute of Technology*, **46**, 1-54.
- 鏡 裕行 (2006) : 児童生徒を対象とした間欠泡沸泉の噴出ダイナミクスの観測と室内モデル実験によるその理解。「科学教育にルネッサンスを一教育分野キャリアパス実現に向けて—」プロシーディングス, 日本物理学会, 55-62.
- 鏡 裕行 (2014) : 噴出状態と休止状態間の遷移と地下水の流入を考慮した改良された間欠泡沸泉の動力学モデル。日本温泉科学会第 67 回大会講演要旨集, O-08, 2014 年 9 月 5 日。
- 鏡 裕行 (2015) : 間欠泡沸泉の噴出時における気泡の効果。日本温泉科学会第 68 回大会講演要旨集, O-15, 2015 年 9 月 11 日。
- Kagami, H. (2006) : Explanations of spouting dynamics of a geyser (periodic bubbling spring) and estimation of parameters under it based on a combined model combining the mathematical model (a static model) and the improved dynamical model of one. *Advances in Geosciences*, **4**, 191-197.
- Kagami, H. (2007) : Verification of the combined model of a geyser (periodic bubbling spring) by underground investigation of Kibedani geyser. *Advances in Geosciences*, **6**, 203-213.
- Kagami, H. (2009) : A modified combined model of a geyser induced by inflow of gas : considering evaporation effect of gas dissolved in hot spring water. *Advances in Geosciences*, **11**, 37-43.
- Kagami, H. (2010) : An extended dynamic model of a geyser induced by an inflow of gas (2) : effects of various shapes and repeated expansions and contractions in an underground watercourse. *Data Science Journal*, **9**, IGY110-IGY120.
- Kagami, H. (2012a) : Three-source dynamical model for estimating parameters for irregularly spouting geysers induced by gas inflow. *Advances in Geosciences*, **29**, 145-156.
- Kagami, H. (2012b) : A dynamical model of a geyser induced by boiling : an application of the dynamical model of a geyser induced by inflow of gas. *Water resources and wetlands" Conference proceedings, Tulcea, Romania, 14-16 September 2012*, 55-58.
- Kagami, H. (2015a) : A static model of a geyser induced by gas inflow. *Proceedings of 2015 Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry*, (in the print).
- Kagami, H. (2015b) : Protection of geysers as tourism and environmental resources : Applications of the dynamical model of a geyser induced by gas inflow. *World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, Japan, 29 November—2 December 2015*, (accepted).
- 片瀬正浩, 遠藤敏之, 吉田裕之, 石井栄一, 前田直樹 (1999) : 間欠泡沸泉の室内モデル実験。

1999年度関東学院大学工学部研究発表講演論文集, 99-100.

- Kerr, R.A. (2014) : Cassini Plumbs the Depths of the Enceladus Sea. *Science*, **344**, 17 (4 April 2014).
- Kuroda, P.K. (1956) : On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals. *Journal of Chemical Physics*, **25**, 781-782.
- Mackenzie, G.S. (1811) : *Travels in Iceland in the summer of the Year 1810*. Thomas Allan and Co. (Edinborgh).
- Mackenzie, G.S. (2011) : *Travels in the Island of Iceland, during the Summer of the Year 1810*. Cambridge University Press.
- Meshik, A.P., C.M. Hohenberg, O.V. Pravdivtseva (2004) : Record of Cycling Operation of the Natural Nuclear Reactor in the Oklo/Okelobondo Area in Gabon. *Physical Review Letters*, **93**, 182302.
- NASA (2015) : Cassini Finds Global Ocean in Saturn's Moon Enceladus. 16 September 2015. (<https://www.nasa.gov/press-release/cassini-finds-global-ocean-in-saturns-moon-enceladus> 2015年9月22日閲覧)
- 野口喜三雄 (1941) : 本邦間歇泉の化學的研究 (其三) 鳴子間歇泉の研究 (第三報). *日本化學會誌*, **62**, 723-729.
- Toramaru, A., K. Maeda (2013) : Mass and style of eruptions in experimental geysers. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserches*, **257**, 227-239.