茂野 博* : 「奈良県入之波温泉に発達するトラバーチンの堆積過程」へのコメント (様々な観点から)

Hiroshi Shigeno * : Comments on the paper "Depositional processes of travertine developed at Shionoha hot spring, Nara Prefecture, Japan" from various viewpoints.

はじめに

地表～地下浅部で温泉水・湧水など (以下, 多くの場合に「流体」と呼ぶ) から生成・固着・沈殿・堆積する鉱物 (一部に生物の生成物・遺骸などを含む; ここでは「沈殿物」と呼ぶ) は, 学術的のみならず応用的 (資源利用, 環境保全など) にも興味深い対象である (例えば, 茂野, 1995). 最近では微生物学, 地球環境学, 気候変動学などの立場から, 特に炭酸塩沈殿物について研究が鋭意進められている.

高島・狩野 (2005) による論文「奈良県入之波温泉に発達するトラバーチンの堆積過程」は, 日本の比較的大きな温泉水起源の炭酸塩沈殿物の一つについて, 地質学, 地球化学, 鉱物学的な各種手法に基づく総合的な調査・研究の結果を新たに報告しており, 全体としては学術的な価値を十分に含んでいる. しかし, 空間的・時間的に複雑な現象に対して, 十分には記載・分析・考察が行われていない部分が見受けられる. 本説ではそれらの問題点を指摘するとともに, より良い理解を指向した議論を行う. なお, 本説のおわりにでは, 高島・狩野 (2005) の報告についてより多様, より基礎的な観点から3つの参考意見を述べた.

本説では議論の混乱を避けるために, (1) 流体から生成しつつある鉱物 (生成物; 浮遊性のものを含む) と流路上に固着・堆積した鉱物 (沈殿物; 生物起源のものを含む) との区別に留意した. また, (2) 流体からの鉱物生成の反応速度 (化学的に定義される), 特定の場における単位時間当たりの鉱物の生成量 (速度), 沈殿物の成長速度などの区別にも留意した. そのため, 表現が若干くどくなっている場合があることをご容赦願いたい.

議 論

高島・狩野 (2005) による入之波温泉の沈殿物の記載・分析・考察について, 本説では特に以下の4点を議論する.

- (1) 沈殿物全体のマクロな成長速度の見積り.
- (2) 非定常的な温泉水の化学組成の変化とその原因.
- (3) 地点5.0の特異性 (沈殿物段差の存在) とその原因.
- (4) 縞状組織 (日輪?) の生成機構.

1. 沈殿物全体のマクロな成長速度の見積り

高島・狩野 (2005) では, 入之波温泉の湧出～沈殿～流出系の全体についてマクロな化学収支計算が行われていない. この概括的な手法は, 容易であると同時に非常に有力であり, 沈殿物成長速度の野外実測結果の検証の目的で適用が不可欠であろう.

高島・狩野 (2005) によれば, 入之波温泉の湧出量は毎分約 500 L とされており, 流動系の湧出～流出間の Ca 濃度の変化は平均的に 240 mg/L 程度である. したがって, 系全体の炭酸塩鉱物の生成量は毎分 0.3 kg 程度と見積もられ, 年間の沈殿物生成量は概略 80 m³ と推定される (CaCO₃ 以外の鉱物の沈殿量を無視し, 空隙水などを含む沈殿物の密度を 2 g/cm³ と仮定). 一方, 高島・狩野 (2005) の Fig. 1C に基づけば, 沈殿物の分布面積は概略的に 350 m² (70 m × 5 m) 程度である. したがって, その全域に沈殿物が一様に成長していると仮定すれば, 沈殿物の厚さの増加は年平均 23 cm 程度と計算される.

高島・狩野 (2005) の地点 5.0 における沈殿物の成長測定値に基づく～20 cm/年の推定値は, この値とオーダー的に一致しており, 入之波温泉の炭酸塩沈殿物の平均的な成長速度に近いと考えられる. しかしながら, これは後述するように偶然の一致の可能性があり, 一測定値をもって系全体の成長速度を代表するとすれば, 論理的ではない.

2. 非定常的な温泉水の化学組成の変化とその原因

高島・狩野 (2005) では, 長さ約 70 m の流路に沿った 3～9 点の温泉水の化学組成が 2002 年 4 月～2004 年 4 月の間に合計 6 回分析されているが, 考察に利用されているデータはその一部に限られている. 今回筆者は, 高島・狩野 (2005) の Table 1 と Fig. 3 を検討し, 温泉水の化学組成の空間的・時間的な変化を図化してみた (Figs. 1, 2). 特に Ca 濃度の変化について, Fig. 2 では流体中の保存性が高い Cl 濃度を用いて地表水 (Cl・Ca 濃度が低い) の混入と炭酸塩沈殿物の生成の 2 過程が及ぼす影響を区別化し, 前者の効果が比較的小さいことを示した.

Fig. 1 と Fig. 2 によれば, 本流動系の湧出～流出間で Ca 濃度は「非定常的な変化」を示していることが明らかである. したがって, 炭酸塩沈殿物の成長速度も非定常的に変化していると考える必要がある. しかし, これらの時間変化が周期的であるのかランダムであるのか, どのような周期・変動幅であるのかなどについては不明である.

この非定常性の原因については, 様々な可能性がある. し

2006年6月16日受付. 受理.

* 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 (地質調査総合センター)
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan
H.Shigeno,hiroshi-shigeno@aist.go.jp

Fig. 1. Diverse temporal changes of Ca and Cl concentrations with increasing distance from the discharge well at the Shionoha hot springs (data are after Takashima and Kano (2005, Table 1 and Fig. 1C)). Sampling points are shown in a simplified and integrated manner by combining the two water flow paths.

かし、(1) 地点 1.0 においては化学組成が一定性を持つことから、湧出温泉水の化学組成の変化に帰することは難しい。また、(2) 流路 2 分岐後の地点 3.0 の流水と浴槽からの流水 (BT) の化学組成が比較的高い相関性を示す (Fig. 1 参照) ことから、温泉利用による人工的な影響も考えにくい。そのほかに原因を求めれば、(3) 生物活動の影響、(4) 地表混入水の影響 (上述)、何らかの (5) 気象的現象の影響、(6) 天文的現象の影響なども可能性として考えられるが、それらを支持するデータは見当たらない。

筆者がより可能性が高い原因として指摘したいのは、(7) 温泉水の湧出量の変化とこれに伴う流体の流速変化である。すなわち、鉱物生成の反応速度は一定と仮定しても、流速が遅ければ (流体の平均滞在時間が長い) 沈殿物は温泉湧出地に近い位置に集中して、逆に速ければ遠い位置にも継続して形成されるであろう。この仮説の検討に必要な流量と流速の変化について、報告されているデータ (湧出量, 毎分約 500 L のみ) は非常に限られている。しかし、地下~坑井口で多量のガスの分離・放出を伴うような温泉では、短期的~長期的に大きな流量・流速の変動が生じることはありそうなことである。

3. 地点 5.0 の特異性 (沈殿物段差の存在) とその原因

高島・狩野 (2005) の Fig. 1C (記号で表示) によれば、比較的大きな沈殿物ドーム (ドーム (凸状地形) よりも崖、滝あるいは段差と呼ぶ方が適当) が温泉湧出地から比較的近い位置に、分湯に対応して 2 つ存在する。その一つは、温泉湧出地から主水系に沿って約 20 m の距離に発達しており、自然の谷地形に繋がっている。もう一つは引湯した入湯施設 (浴槽ほか) の下流側に分布しており (高さ 4 m 程度)、この上を流れる流体 (排水) は上記の谷に合流している。この 2

Fig. 2. Diverse temporal changes of the relationships of Ca and Cl concentrations with increasing distance from the discharge well at the Shionoha hot springs (data are after Takashima and Kano (2005, Table 1)). Refer to Fig. 1 and the text for the explanation, especially for carbonate deposition and surface-water dilution.

つの沈殿物段差よりも下流では、斜面の傾斜度は小さく、固結度が低い沈殿物が卓越する傾向にある。この 2 つの沈殿物段差は温泉湧出地の近傍に存在しており、その発達には沈殿物の成長速度が速い場合には必然的である。

しかし、高島・狩野 (2005) の Fig. 1C には崖状の記号では示されていないが、温泉湧出地から約 60 ~ 70 m も下流の地点 5.0 にも高さ 2 m 程度の段差 (小滝) が分布しており (Fig. 2E に写真)、沈殿物の固結度が高いと記述されている。したがって、地点 5.0 については、本地域の流動系下流の中では特異な環境にあるものと推測される。

沈殿物段差 (ドームを含む) の生成の場としては、前述した温泉湧出地近傍が最も一般的であるが、それ以外の場合がある。特に、堰が生成して (例えば、初期地形、地滑り、倒木、人工的な構造物などによる) 上流側にプールが発生する場合には、段差が成長する可能性が高い。その理由は、プールによって流体の滞留時間が大きく上昇する結果、プールの水中・水面で生成した生成物から生じる沈殿物の成長速度は、水深に応じて大きく増加するためである。堰の上部・前面部では流れの擾乱などによって、沈殿物の成長速度は大きい傾向を持つと考えられる。したがって、堰の上部の成長がプール底の成長より速い場合には、より高い堰とより深いプールの組み合わせが次第に上方に成長して行くこととなる。何らかの原因によって堰とプールの成長が停止した後、あるいはプールが埋まった後は、段差の上流に沈殿物テラスが分布することとなる。

上述したように堰・段差の上部・前面部では、大きな沈殿物成長速度が生じる可能性がある。しかし、注意する必要があるのは、この速い成長速度は流動-沈殿系のごく一部に分布することである。高島・狩野 (2005) の地点 5.0 は、上

記の特異的に成長速度が大きい地点に該当していた可能性がある。その場合には、その成長速度は系全体の代表値と見なすことはできず、データの表示・説明には特別の注意が必要である。

4. 縞状組織（日輪？）の生成機構

高島・狩野（2005）は、地点 5.0 において 41 日間の実験で全体の厚さが 19 mm、約 40 組の縞状組織を持つ沈殿物が生成したことを観察し（Fig. 6I）、これを日輪と解釈した。その成因について、高島・狩野（2005、考察 4.）では生物活動が強く示唆されており（これを成因（1）とする）、人工的な影響については可能性に触れているのみである。しかし、この実験については報告が一例に過ぎず、日数—成長層数の関係は偶然であった可能性があり、現状では日輪と結論付けることは危険であろう。また、成因についても様々な可能性が考えられ、今後のより多数の測定点における検討が望まれる。

本説では、上記の縞状組織が生成した原因について定性的に 2 つの可能性を指摘する。その一つは、（2）上記 2. に述べた流体の流量—流速の変化による流体化学組成と沈殿物成長速度の空間—時間変化に基づく可能性である。しかし、その時間変化の周期・振幅などは現状では不明であるため、ここではその可能性の指摘に留める。

もう一つは、（3）人工的な影響が非常に大きい可能性である。高島・狩野（2005）に記述されているように上記の浴槽の清掃が毎日夜間に行われていれば、浴槽内で温泉水の長時間滞在によって生成した多量の炭酸塩沈殿物（大部分は流体中で成長した極細粒のものであろうが、浴槽壁などで成長し擦り取られた粗粒のものも含まれよう）が比較的短時間にまとまって排水として放出されて、流路を流下し、その途中で堆積する可能性が高い。上記 1. のマクロな化学収支計算法を用いれば、温泉水の半分が浴用利用されているとして、年間の沈殿物生成量は最大 40 m³ に達する可能性がある。したがって、上記 3. で可能性を述べた地点 5.0 における堰とプールの発達—テラスへの変化についても、その影響を大きく受けているはずである。

高島・狩野（2005）に記述されている縞状組織（日輪？）は、杉の葉状に成長して行くものが卓越する白色層と細粒結晶が集積したものが卓越する灰色層とからなるようである。上記（3）の仮説に基づけば、前者は自然の自成性のもの、後者は夜間に浴槽から放出され流下した沈殿物が堆積した人工的寄与が大きなものである可能性が指摘される。前者については、高島・狩野（2005）が指摘するように生物活動が何らかの寄与をしており、主に昼間に成長している可能性があるが、現状では詳しい議論は困難である。

ま と め

高島・狩野（2005）による論文「奈良県入之波温泉に発達するトラバーチンの堆積過程」は、日本の比較的大きな温泉水起源の炭酸塩沈殿物の一つについて、新たに地質学、地球化学、鉱物学的な各種手法に基づく総合的調査・研究結果を報告しており、全体としては学術的な価値を十分に含んでい

る。しかし、空間的・時間的に複雑な現象について、十分に記載・分析・考察が行われていない部分が見受けられる。本説では、特に（1）沈殿物全体のマクロな成長速度の見積り、（2）非定常的な温泉水の化学組成の変化とその原因、（3）地点 5.0 の特異性（沈殿物段差の存在）とその原因、（4）縞状組織（日輪？）の生成機構について議論した。

温泉水・湧水から生成する沈殿物については、時空間 4 次元に複雑に変化しているため、全体と部分との関係に注意して記載・分析・考察を行う必要がある。沈殿物の全体的な成長速度は、主に温泉水・湧水の湧出量、鉱物の過飽和濃度、鉱物生成の反応速度によって規定される。しかし、部分的な成長速度は、個々の環境によって異なり、温泉湧出地からの距離、流体の流速・滞在時間、流れの擾乱などによって大きく変化する（例えば、茂野, 1995; Shigeno, 1998）。したがって、両者の関係を明瞭に理解し、両者を区別した上で総合化した論述が必要である。また、定量的な議論のためには、上記の物理的データの取得・解析が不可欠であり、特に非定常的な環境ではなおさらである。将来的には、炭酸塩沈殿物への坑井掘削や断面作成を通じた観察・測定による、4 次元の時空間的な実態解明が望まれるところである。

お わ り に

ここでは、上述した本説の主要な論点から離れて、より多様な観点からより基礎的な 3 点について参考意見を述べる。

（1）高島・狩野（2005）は、冒頭「島弧というテクトニックセッティングにある日本列島では、活発な火山活動に伴い温泉が多く存在し、そのため、トラバーチンが良く発達する。」と述べている。しかし、これは客観的に妥当とは言えない。

陸域において大規模な炭酸塩沈殿物が生成するためには、その基本条件として大規模な炭酸塩岩類の分布と酸性流体の供給が必要である。日本列島では、現在の活発な火山—マグマ活動によって後者の供給は大きい。地質発達史的な背景によって前者の分布には恵まれていない。すなわち、日本列島の主要部は地質時代を通じて主に付加体添加域にあり、熱帯—亜熱帯域の陸棚成の広域的・大規模な炭酸塩堆積物の分布に乏しい（海洋島起源の礁成炭酸塩岩体の付加を除く）。

世界には陸棚成炭酸塩岩類が広域的に分布する国があり（イタリア、トルコ、中国、アメリカ合衆国など）、第四紀のトラバーチン—トッファが大規模（オーダー的に長さ数 km × 幅数 100 m × 厚さ数 10 m）に発達している火山地域—非火山地域が存在する（例えば、茂野, 1995）。これらの地域に比較すれば、日本各地のトラバーチン—トッファは小規模であると言わざるを得ない。しかし、日本列島では多様な地表—地下環境を反映して小規模ながら多様なものが分布しており、特異的な地形、気候、社会などの環境によって侵食、破壊なども速いという特性を持つのではないだろうか？

国土の基盤的な情報としてこれらについての実態の把握・生成機構の理解などを進めることは必要である。また、観光資源としての保存・利用、環境保全・災害防止などの応用的な目的で、個別の地域の研究も重要である。しかし、科学的

な調査・研究においては、客観的な記述が必要であろう。

(2) 陸域で生成する炭酸塩沈殿物の分類は複雑で、現状では体系的な統一化はされていない(例えば, Pentecost, 2005)。高島・狩野(2005, 考察 2. と 4.) は、トラバーチンとトゥファの分類をその生成流体の特性・起源を基準とする方法によっているが、この方法は世界的に必ずしも広く受け入れられている訳ではないことに注意する必要がある。一般的にトラバーチンに温泉水起源のものが多く、トゥファに湧水起源のことが多いことは事実であろうが、温泉水－鉱泉水－湧水の分類は必ずしも容易ではない(温度・化学組成の基準などは各国で法的・学術的に異なる)という問題もあり、地域的に歴史的・慣用的に用語が使用されている場合などにはそれを尊重する配慮が必要であろう。

両者の分類は、従来記載的に用いられてきた沈殿物の性状(主に緻密さ・硬さ)に基づく方法が、分かり易く有用性が高い。生成流体に関しては温泉水起源炭酸塩沈殿物(沈殿物の性状によってトラバーチン、トゥファなどの使用が可; 湧水起源についても同様)、さらに必要があれば土壌 CO₂ 起源－湧水起源炭酸塩沈殿物(同様)などのように記述すれば十分ではないだろうか? また、沈殿物の生成について生物活動の寄与度の定量的な推定は難しい場合が多いが、特に必要な場合には生物起源炭酸塩沈殿物(同様)などのように記述すればよいと思われる。

(3) 本説で述べたように、炭酸塩沈殿物の成長速度は空

間的・時間的に変動が激しい場合がある。したがって、その成長を議論する場合には、多数の点での継続的な測定が望まれる。同時に、測定方法にも注意が必要である。高島・狩野(2005)による地点 5.0 での成長速度の測定実験には問題点があり、改良された実験の実施が望まれる。それは、測定基準の釘などを流れの中に置くことによって擾乱が発生し、狭い範囲で特異的に CO₂ の放出、炭酸塩の生成、生成物の付着・沈澱などが急激に生じている可能性がある点である。

高島・狩野(2005)の Fig. 6I には、地点 5.0 において成長が観察された沈殿物の切断面写真が示されているが、上記の徴候が認められる。また、残念ながらこの写真では、41 日間に成長したとされる約 40 組の「日輪?」を明瞭に数えることができない。

謝 辞 本説を取りまとめるに当たり、産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門の佐々木宗建氏に原稿について有益な議論を頂いた。記して感謝します。

文 献

- Pentecost, A., 2005, *Travertine*. Springer, Berlin, 445p.
茂野 博, 1995, 温泉沈殿物による棚田状テラス生成の機構と数値シミュレーション. 地熱, **32**, 317-336.
Shigeno, H., 1998, Competitive pool growth model and numerical simulation for morphological diversity of hot-spring mineral deposits. *Proc. 9th Internat. Symp. on Water-Rock Interaction*, 913-916.
高島千鶴・狩野彰宏, 2005, 奈良県入之波温泉に発達するトラバーチンの堆積過程. 地質雑, **111**, 751-764.