

## 鳴子温泉のバイオマットにおける化学合成微生物と鉱物との関係：嫌気好気微生物共存に鉱物が果たす役割

Role of minerals for coexistence of aerobic and anaerobic microorganisms in microbial mat in the Naruko hot spring area.

# 宮木 慎太郎[1], 掛川 武[1], 中沢 弘基[2]  
# Shintaro Miyaki[1], Takeshi Kakegawa[2], Hiromoto Nakazawa[3]

[1] 東北大・理・地球物質, [2] 東北大、理、岩鉱

[1] Tohoku Univ, [2] IMPE., Tohoku Univ., [3] Div. Earth Sci., Tohoku Univ.

### 目的及び背景

化学合成細菌が引き起こす生物学的・地質学的現象には初期生命活動及び生命の起源に関する情報が含まれている可能性がある。化学合成細菌に関する生物学的研究の例は多くある一方、天然の系での化学合成細菌が引き起こす地質現象（鉱物形成・酸化還元反応）に関する研究例は少ない。そこで、本研究では化学合成細菌バイオマットを例に取り、そこでの火山ガス代謝系や、鉱物形成プロセスを地球化学的・鉱物学的に明らかにすることを目的としている。

宮城県鳴子温泉では酸性からアルカリ性にかけての温泉が多数湧出し、湧出口近くには多種多様なバイオマットが存在している。その中で、潟沼に自噴する温泉（pH：6.1~7.6、水温：58~63度）には硫黄酸化細菌を主体にしたバイオマット（硫黄芝）が存在する。鳴子温泉のバイオマットはこのように単純な現象の系から成るため、バイオマット内の諸現象を捉えやすいという利点がある。硫黄芝は太さ数mm長さ数cmの繊維状の“芝”の束によって形成されており、温泉水が流れる側溝中5メートル位の範囲で認められる。このバイオマットに対してさまざまな観察（顕微鏡、SEM、TEMによる）、元素分析（XGT、EDSによる）及び同位体分析を行った。なお、このバイオマットには若干の硫酸還元菌が認められている（Mori et al., 2001）。

### 結果

(1) 繊維状組織の集合体であるバイオマトの表面と内部では鉱物の結晶度が異なる。表面では主にアモルファス状の硫黄、珪素、炭素、アルミニウムが認められた。一方内部では主にこれらの元素が結晶化した自然硫黄、硫化鉱物、トリディマイト、石英が主に認められた。生物的染色（オスミウム固定及び酢酸ウラン染色法）を施したバイオマトのTEMによる観察によれば、表面は内部より圧倒的に生物量が多いことが分かった。内部では結晶度が卓越しており、また規則正しく配列した硫黄結晶の隙間に微生物が生息している事も分かった。(2) シリカ鉱物の結晶度には多様性が認められる。硫黄酸化細菌表面で結晶化が卓越している。(3) バイオマトに含まれる硫化鉱物と自然硫黄の硫黄同位体組成はそれぞれ4.2~5.4パーミル、7.3~10.2パーミルであり、温泉水中に含まれる硫化水素と硫酸の硫黄同位体組成はそれぞれ0~3パーミルと8.6~14.0パーミルである。(4) バイオマトには表面部と内部に硫化鉱物が認められ、特に内部に多く分布している。さらに球状の形態を示すものが普遍的に認められる。

### 考察

(1) アモルファス状物質が卓越するバイオマト表面部分がまさに成長フロントであり、ここで活発な硫黄酸化が行われていることが分かる。さらに、種種鉱物を形成するための成分の濃集がこのフロントで起こっていることが分かる。(2) シリカ鉱物はアモルファス状物質から結晶度のいい微粒石英を経て、大型の石英やトリディマイトに変化するが、この結晶度や粒径の変化は硫黄芝の成長と共に進行するようである。(3) 硫化鉱物はその形態と硫黄同位体組成から、無機のプロセスではなく生物のプロセス（硫酸還元菌による）によって形成された可能性がある。自然硫黄は硫黄同位体組成から、唯一硫黄酸化細菌による酸化プロセスによって生成されたことが分かる。そして、硫黄芝内部ほど自然硫黄の配列性が良くなり、それぞれの結晶の光学的方位も揃う。この結晶の配列性と光学的方位性の一致も微生物によるものと考えられる。(4) このバイオマトでは硫黄酸化細菌による酸素を用いた硫黄酸化反応が活発に行われており、非常に酸化環境が広がっている。そのような環境で、還元環境で安定存在できる硫化鉱物が存在していることから、バイオマトでは局所的な還元環境を形成する機構が存在していると考えられる。

硫酸還元菌と硫黄酸化菌は異なる酸化還元状態で生存していることが知られる。特筆すべきは、本研究で扱ったバイオマトでは両者が共存し、なおかつそれぞれの微生物が異なった酸化還元状態で鉱物形成を行っているということである。このバイオマト内に見られるアモルファスシリカやジェル状シリカが局所的に両者の酸化還元境界を作り上げることにより、両者の共存を可能にしていると解釈した。

これらは、バイオマト内では鉱物化という現象を介して生存環境の異なる生物どうしの共存が普遍的に存在し得る可能性を示す。また、初期地球において嫌気微生物及び好気微生物は別々に進化してきたと考えられているが、実際には鉱物化作用によって好気性及び嫌気性生物の共存・共進化が起こっていた可能性があり、鉱物が

初期地球で重要な役割を果たしていた可能性を示す。