

バイオミネラリゼーションからみた微生物の進化と地球環境

田崎和江*

Examination of the evolutionary processes of biomineralization in microorganisms and the environmental earth sciences using electron microscopy

TAZAKI, Kazue*

Abstract

Observation of modern and fossils specimens using electron microscopy have shown the evolutionary processes of biomineralization in various microorganisms under the primitive Earth and the present environments. The primitive Earth consisted of an oxygen-free atmosphere and rocky surfaces rich in dissolved iron, manganese, and sulfur ions, in as much as the present hot springs with colorful short-lived microbial mats containing heat-resistant enzymes. Clay minerals are the most likely candidates responsible for affecting the synthetic reaction of microorganisms as catalyzes in the Earth's surfaces. Presently, advances in biotechnology and biomedicine have made bacteria indispensable for industrial and medical forces. Undoubtedly, humans have become the most significant agent modifying the Earth's surface. Microorganisms look after the humans, and they will help human life in the planet Earth, such as mining geological resources, executing bioremediation to treat water pollution, and using pollutant-degrading bacteria in cleaning up soils.

Key words : biomineralization, bioremediation, electron microscopy, environmental earth sciences, evolution, microorganisms.

1. はじめに；化石研究会におけるバイオミネラリゼーションの研究

化石研究会は井尻正二、大森昌衛らにより設立されて以来、50年間常に新しい視点の研究をリードしてきた。その歩みを簡単に紹介する。1969年に、渡部はWilbur教授とともに各国の主な研究者に呼びかけて、1970年に西ドイツのボン大学で第1回のバイオミネラリゼーション国際会議を開催した。この会議後、4年ごとに行なわれて来た国際会議も、2008年に中国で10回目が開催されている。医学、歯学分野での石灰化の基礎研究を中心として、理学、水産学、農学、考古学、応用古生物学、応用鉱物学、環境科学を含むバイオミネラリゼーションに関する多くの研究集会がもたれて来た。化石研究会は会の創設以来、国内外の研究集会に携わり、研究成果の発表の場を提供して来た。1998年には化石研究会と中国の研究者が中心

となってアジア地域研究集会を開催した。さらに2007年11月には、中国アモイで第3回のアジア地域研究集会が開催され盛会であった。化石研究会発足当時は硬組織そのものの研究が主であったが、次第に遺伝子、細胞、結晶学、溶液化学、無機・有機化学、物理化学へと発展し、近年は、地球環境問題解決への糸口や医学薬学への貢献など、応用範囲が広がって来た。

そして、2007年7月の化石研究会誌は、〈バイオミネラリゼーション、その機構と進化〉を特集号として組んだ。その中には、無脊椎動物の硬組織中のタンパク質とその進化（更科、2007）、魚類のエナメル質とエナメルイド（笹川・石山、2007）、エナメル質組織進化と細胞学的背景（小澤、2007）、イワガキ（*Crassostrea nippona*）殻体中に含まれる有機基質タンパク質の *in vitro* 結晶形成実験による機能解析（池田ほか、2007）、X線溶液散乱法による *nacrein* の構

2009年7月3日受付、2009年8月6日受理

*〒920-1108 石川県金沢市俵町ヲ甲16

Wo-Ko 16 Tawara, Kanazawa, Ishikawa 920-1108, Japan

造解析 (法月ほか, 2007), アコヤガイ真珠層と稜柱層の形成に関する新規タンパク質の一時構造 (野川ほか, 2007). 温泉水のバイオマットにおける放射性元素の濃集 (藤沢・田崎, 2007), 中部更新統浜松累層産ナウマンゾウ化石について (安井ほか, 2007), 青森県陸奥湾から産出した長鼻類化石 (島口, 2007), First description of left valve of *Chlamys ingeniosa ingeniosa* (Yokoyama) from the Middle Miocene of Japan (Nomura and Tazaki, 2007) の研究成果が収められている. 化石研究会の創始者の一人である大森 (2007) は, かつて無脊椎動物のバイオミネラリゼーション, とくに生物発達史におけるバイオミネラルが作る無脊椎動物の硬組織の起源と発達について研究してきた. 最近, 藻類の細胞組織の内外には非晶質の炭酸カルシウムが, 石灰藻の細胞膜の中には方解石の結晶があることを明らかにした. これらの成果は動物, 植物にかかわらず, 生体内に産出する炭酸塩鉱物がその進化の過程と密接に関連していることを示している. また, アコヤガイやイケチョウガイのカルサイトーアラゴナイト問題は遠藤 (2008) が分子生物学の視点で, Tazaki and Morii (2008) は電子顕微鏡とテトラサイクリンを使ったイケチョウガイの実験生体鉱物学の視点で成長過程と環境中の Mn 濃度の変化をあきらかにした.

本研究では, 化石研究会50周年記念を機会に, 電子顕微鏡を駆使した微生物における μm , nm オーダの現世バイオミネラリゼーションについて, 筆者の最近の成果を報告する. 地球における生命の進化, とくに微生物の進化と自然環境との相互作用について考察する. ここ50年における電子顕微鏡の発展は著しく, バイオミネラリゼーションの研究を飛躍的に発展させた. 電子顕微鏡は生物と無機物の境界である生体鉱物化作用とその進化の過程を追跡することができる. 電子顕微鏡は細胞レベルの観察と分析で生命の起源とその進化の周辺に限りなく近づくことができるツールの一つである.

2. 地球の歴史における微生物のバイオミネラリゼーションと環境の変遷

地球の年齢は約46億年, 生命の起源は40億年前と考えられており, 藍菌によるストロマトライトが35億年前の先カンブリア代の地層に見られている (大谷・掛川, 2005; 中沢, 2006; Schop, 2006). 藍菌は地球上最初の底生生物であり, 発生後間もなくバイオミネラリゼーションが始まったと言われている. すなわち, 生物制御起因によるバイオミネラリゼーションは先カンブリア代に始まった可能性がある (渡部, 1997). また, 磁性細菌による磁鉄鉱の結晶の小塊や

マンガン細菌の化石もこの時代に見つかっており, 先カンブリア代の終わり頃には, 石灰質の硬組織をもった生物が爆発的に出現した. また, 炭酸カルシウムを持つ海綿類や軟体動物が5億2,000万年前くらいに出現している (渡部, 1997).

地球の海洋は先カンブリア代にはカルシウムは少なく炭酸ソーダが主であり, 次第にアルカリ性となり pH 8 になると塩化ナトリウム海洋となり, カルシウムの濃度も高くなり, 現在はほぼ世界中の海洋が pH 8 である (渡部, 1997). 生命は40億年前の地球の表面, すなわち海の世界で生まれ, 40億年近くにわたって進化して来たと言われている. 海水中には, 粘土鉱物の超微粒子がコロイドとなって浮遊しており, それらが有機分子を吸着・凝集して海底に沈殿している. 血液などの体液は太古の海水成分に類似しており, 海水が生物体内に取り込まれたとする所以である. 原始的な動物の体液ほど海水に近い組成を持ち, 血液の pH は生命が海に起源したことの証明とも言われている. なお, 人間の血清や尿には, Fe (血清0.3ml 中: 男60~160 $\mu\text{g}/\text{dl}$, 女50~140 $\mu\text{g}/\text{dl}$), Fe (尿5ml 中: 15~157 $\mu\text{g}/\text{dl}$), Cu (血清0.3ml 中: 78~131 $\mu\text{g}/\text{dl}$), Zn (血清0.5ml 中: 59~135 $\mu\text{g}/\text{dl}$), Hg (尿1ml 中: 25.0 $\mu\text{g}/\text{dl}$) が含まれている (中西ほか, 2008).

一方, 深海底に生息する微生物も重金属を多くもち, 呼吸やエネルギー代謝に重金属を使用している (大島, 1995; 三枝ほか, 1995; 渡部, 1997; 大谷・掛川, 2005). ブラックスモーカーには地球内部からもたらされた多量の重金属が含まれ, 黒鉄鉱を作ることになる. 海底熱水活動で噴出される金属元素は硫黄と結びつき, 硫化鉱物として海底に沈殿する. 海水中の硫酸イオンも熱水で温められ, 石膏や硬石膏ができる. さらに, その周辺は高温, 高圧の条件下にありながら, 熱水環境は生命誕生の場であったといわれている (田崎ほか, 1999). 古い岩石中には, 貝殻や魚, 植物などの化石が肉眼でも容易に認識できるが, 微生物化石は電子顕微鏡なしには見つけることができなかつた. 電子顕微鏡により, 微生物化石がチャート, 玄武岩, 堆積岩などの古い岩石中で見つかったことにより, 古い生命体が微生物であったことを決定づけた (秋山ほか, 1995; 大谷・掛川, 2005). すなわち, 微生物は熱水環境中の金属イオンを固定し, 地球の元素循環に密接に関連していることから, 微生物のバイオミネラリゼーションは初期地球における生命誕生と進化の歴史を知る鍵となった. さらに, 生体鉱物の視点から, かつて, 火星に生命が存在したのか, 存在する可能性はあるのかの議論がされている (Tazaki et al., 2008d).

1996~7年の<しんかい2000>の調査潜航により伊平屋の熱水サイトの硫化チムニーの表面からSを主とし、Fe, Zn, Cuなどを細胞内外に濃集している桿菌(硫酸還元菌)がコロニーを形成しているのが認められ、その細胞周辺には低結晶性のバライト(重晶石: BaSO₄)が形成されていた(田崎ほか, 1999). 西オーストラリア, ピルバラ地塊産の世界最古(35億年前)のストロマトライト化石にはシアノバクテリアの姿はなく, 中央海嶺周辺の熱水性堆積物の一部であったという. しかし, このストロマトライト様構造は層状の重晶石鉱床を密接に伴うことから二次的に強い変質作用を被ったと考えられる. なぜならば, 伊平屋の深海底の重晶石を作るバクテリアと同様に, 鹿児島薩摩イオウ島の海底熱水温泉に生息するバクテリア, 赤湯温泉水中の鉄バクテリア, 北海道オンネトー湯の滝のマンガンバクテリア, 島根県銅ヶ丸鉱山の銅バクテリアなど今まさにつくられつつある現生の層状ストロマトライトを見ることができるところからである(田崎, 2009a). このことは, 過去の生物からだけではなく, 現世から過去に遡る観察も必要であることを示している. 微生物の代謝活動により生み出された生体鉱物は鉱床を作ると同時に, 微生物はより高度なものへと進化し, 生命の維持に必要な構造としてバイオミネラリゼーションを行っていると考えられる(田崎, 2009a). すなわち, 山岸(2008)の研究によれば, 現在の海底熱水噴出孔周辺には化学合成細菌に依存した生態系があり, 現存する好熱菌遺伝子のアミノ酸の一つを祖先生物のアミノ酸に変換することができた. さらに改変した遺伝子を基に大腸菌を利用してたんぱく質を作ったところ, できた祖先型改変たんぱく質はもとの好熱菌たんぱく質よりもさらに高い耐熱性をもっていた. この実験結果は全生物の共通祖先が超好熱菌であることを意味している.

3. なぜ高温で生きられる温泉バクテリアを研究するのか

すべての生命体は, 従属栄養生物と独立栄養生物に分類される. 独立栄養生物は, 太陽の光や酸化還元作用などのエネルギーを得ている. 地球上に最初に生物が現れた頃, 酸素はなんでも酸化させてしまう猛毒であったが, 次第に酸素をエネルギーとして利用する呼吸細菌が現れた. その代表的な微生物がS, Mn, Feを酸化, 還元して生きられる微生物である. ほとんどすべての生命体は体の中にSを蓄えており, かつ, 硫化鉱物は太古の海底熱水環境に一般的に存在し触媒としての機能を持っていた. 現在も化学反応をエネルギー源とする独立栄養化学合成生物は高温の温泉が噴き出している場所に生息し, 赤, 白, 緑, 黒, 黄色な

どのバイオマットを作っている(Tazaki *et al.*, 2003; 田崎・盛一2004; 佐藤・田崎, 2004; Tazaki *et al.*, 2006b; 高橋・田崎, 2008). バイオマットはアイスランドやアメリカのイエローストンなどの間欠泉を始めとし日本各地の温泉地帯に多く認められる(田崎, 2009a). この中で微生物はH₂S, 水, 堆積物の中で鉄と反応して黄鉄鉱を作っている. また, 秋田県玉川温泉や台湾の北投温泉では放射能を持つ北投石も微生物により作り出されている(藤沢・田崎, 2007; Tazaki, 2009a). 火山列島日本には無数の温泉や地熱地帯がある. 深海底まで潜らなくとも, 陸上にいながらにして, 地球深部の酸素のない熱水の中でH₂とCO₂からメタン(CH₄)を生成して生きる微生物の生態系およびバイオミネラリゼーションの研究ができる. また, 微生物を培養しなくても, 温泉から採取した試料はそのまま電子顕微鏡で観察分析でき, かつ, 微生物が内因や外因により変化する様子を短時間で観察できるメリットもある.

1977年, Woeseによって, メタン細菌は原核生物とも真核生物とも異なる第3の独立した生物群として, バクテリア(真正細菌), 古細菌(Archaeobacteria), ユーカリア(真核生物)が提案された. メタン細菌の生育環境が地球の原始大気に似ていることによる. 古細菌はメタン細菌, 高度好塩細菌, 好酸性好熱細菌, 超好熱細菌(90℃以上で生育可能)の4つの群からなる. 超好熱細菌は地熱地帯や陸水の温泉からも分離されており, イオウを代謝する物が多い. 古細菌の細胞表層構造は, 真正細菌のようなペプチドグリカンでできた細胞壁を持たない特徴がある. また, 古細菌の細胞膜脂質はエーテル型脂質であり, 古細菌の判定に用いられる(石川, 1987; 大島, 1995; 金川, 2008; 山岸, 2008). エネルギー獲得の方法は発酵, 呼吸, 光合成の三種類であり, カルシウムはカルシウム結合タンパク質として細胞内外に貯蔵され, また遊離イオンとして生物活動に関与している. なお, 日本科学者会議(1995)は現代進化論の特集号で, 化学進化から生物進化へ, 細胞の進化, 進化論の展開などについて討論している.

4. 電子顕微鏡写真でみる微生物とウイルス

地球の表面の水圏に, 酸素をエネルギーとして利用する呼吸細菌が現れた. その代表的なものが, マンガン酸化細菌や鉄酸化細菌であり, しばしばノジュールをつくる(Tazaki and Hattori, 2009). 地球上のほぼどこにでも居る独立栄養菌であるが, 水中のpH, 溶存酸素, 酸化還元電位, 電気伝導度温度の異なる環境で *Gallionella ferruginea*, *Leptothrix ochracea*, *Toxothrix trichogenes* が生息している(佐藤・田崎,

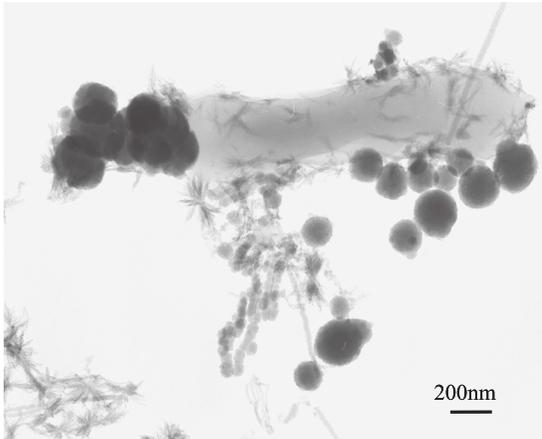


図1 金沢大学調整池の赤褐色のバイオマットから採取した鉄酸化細菌の透過型電子顕微鏡写真。nm サイズの鉄の微粒子が細胞壁に濃集している。

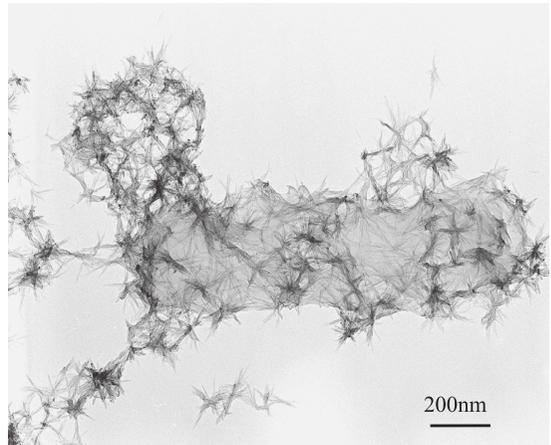


図2 金沢大学調整池の赤褐色のバイオマットから採取したマンガン酸化細菌の透過型電子顕微鏡写真。ネット状のマンガン繊維が細胞を覆っている。

2004；田崎・盛一，2004；Takashima *et al.*, 2008)
(図1，2)。

微生物を宿主とするウイルスの電子顕微鏡写真を図3に示した。地球上に生物が現れ，その進化にともなってウイルスが現れた。ウイルスはDNAまたはRNAのどちらかしかもっていない。進化を考える場合，どちらが先かが問題になる。現在は<RNAからDNA>という進化過程で議論が進められているが，その中間段階を自然界で見つける必要がある。有機物やタンパク質が次世代を生み出せるかどうかによって，生物に進化できるかどうか位置づけられ，高温で生きられるウイルスの進化にもつながる。平湯温泉のウイルスの超薄切片はその意味からも貴重な電子顕微鏡写真である。生物の遺伝情報を複製し，保持するのは核酸であり，核酸にはDNAとRNAがある。普通の生物では，DNAが遺伝子情報の複製保持を行っているが，ウイルスの中にはRNAをその遺伝子情報として持っているものがある。例えば，インフルエンザウイルスやエイズウイルスは，その遺伝子としてRNAを持っている。最も原始的な原核生物（モネラ）は核質を構成する1本のDNA分子を無糸分裂によって2つの娘細胞に分配する。

近年，インフルエンザのウイルスには，タフミルがききにくい耐性ウイルスが世界中で広がっている。細胞内に侵入したウイルスが大量に複製された後，ほかの細胞へと感染を広げる。2009年に感染が広がった豚インフルエンザは，遺伝子解析から，北米の豚に11年前に登場したウイルスが，11年かけて感染を繰り返す，鳥と人と豚の3種類混合したタイプという。家畜の大型化や国際化が影響し変異が起きやすくなった可能性がある。新型の豚インフルエンザのウイルスは細

長いインゲンのような形をしていることが電子顕微鏡で明らかになった。ところが，当初，アメリカ疾病対策センターが公表したインフルエンザウイルスの電子顕微鏡写真は球形であった（Walsh and Fischbach, 2009；Soares, 2009）。それは遠心分離機による処理でちぎれたウイルスの断片であった。この事件は電子顕微鏡の前処理がいかに大切かを物語っている。私たちはこのような遠心分離をせずに，現状のままの試料を超薄切片にして電子顕微鏡で観察するので，宿主とウイルスの共生関係をとらえることができた（図3）。急速凍結法を電子顕微鏡観察に応用すると，細胞の微細構造を壊すことなく，分子のレベルで観察できる。

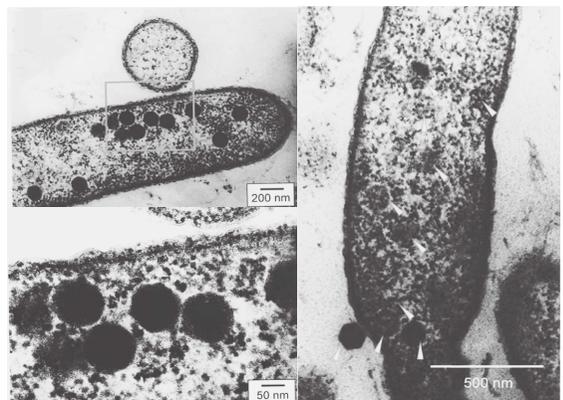


図3 岐阜県平湯温泉における高温の源泉に形成された白色バイオマット（イオウ芝）の超薄切片の透過型電子顕微鏡写真。イオウ還元細菌の細胞内にウイルスが生息している。桿菌細胞の横断面と縦断面（左上），その拡大（左下），ウイルスが細胞内で増殖し，外に吐き出されるプロセスが見える（右，矢印）。

5. 医学、歯学系分野での生体鉱物の研究

近年、硬組織中の有機基質タンパク質成分をコードする特異的な遺伝子が次々に発見されて、徐々に有機基質の内容が明らかになってきた。硬組織の進化に関する研究では、無脊椎動物の有機基質タンパク質の進化が分子レベルで明らかになった。魚類の歯と鱗は構造や組織がよく似ているが、現在繁栄している硬骨魚の真骨類の鱗ではエナメル質・エナメロイドや象牙質は退化し、単純な骨組織のみの骨鱗となっている。化石研究会会員によって、歯、骨、結石などについての研究成果が上がっている（化石研究会、2007）。

ここで、生体の組織はいずれも、微生物とは無関係な環境で生体鉱物が形成される訳ではない。口腔、内臓など子宮、卵管を除くすべての臓器に微生物が存在しうる環境にある。水が存在するところには微生物が生存できるからである。リン酸カルシウムからなる歯や骨は微生物にとっても栄養豊富な場所である。また、ヘルペスウイルスにみられるように、神経を伝わってウイルスは移動し、親から子供に遺伝している。グローバル化で混血が進む前に集められたモンゴロイド系少数民族の血液中に成人T細胞白血病を起こすウイルスが発見された。このウイルスを縄文人やアンデス先住民の共通祖先が持っていた。一方、ウイルスは細胞の中でしか増えられないため、新薬の候補が効くかどうかを試すには時間がかかるので、superbugs にきく novel antibiotics の開発がいそがれていた（Walsh and Fischbach, 2009）。ところが、インフルエンザウイルスの変異種にタミフルや新薬が効くかどうかをパソコンの計算で簡単に求める方法が近年開発されたので、実際のウイルスを使わずに開発する候補が絞れるようになった。

一方、ここ50年間の延命治療技術、人工血管、ペースメーカー、カテーテルなどの技術の進歩には目を見張る物がある。しかし、ほぼ90%近い水を含んでいる肉体に人工物を入れるので、当然その周辺や内部にはウイルスやバクテリアがとりつき、微生物被膜を形成する。それによる管の閉塞や誤作動がおこり、機能は低下または停止する。たった7～15分の微生物の酸によるエッチングで組織が劣化し、中心に球状構造ができ、その周囲を層状構造が取り囲む現象が起こる（Hermida and Casariego, 2009）。人体内でのバイオミネラリゼーションは今後の課題であるが、2008年にノーベル賞をとった緑青の蛍光色により生体中の細胞を蛍光色で見ることが出来るようになった。さらに、さまざまな理学療法が開発されてきたが、その一つに Microbe Therapy がある。Bacillus subtilis による木片の発酵熱を利用した＜enzyme baths＞が痛みにも効くという。温泉がなくとも、ハイテクノロジーに

より作られた微生物入りの＜暖かくなる袋＞が開発されている（Canby, 1993）。

6. 微生物の電子顕微鏡観察と遺伝子工学的観察

地球上の至る所に生息する微生物の世界と微生物のかくれた役割を解き明かすツールが電子顕微鏡である（Canby, 1993）。光学顕微鏡では見えない個々の細胞構造と営みを見ることができ、生体鉱物化作用の研究には不可欠である。細胞の内外に形成された鉱物を直接観察することは論より証拠である。ミクロンからナノメートルの高倍率の電子顕微鏡写真を見るだけでも未知の微生物の進化の謎解きに参加できる。臨場感あふれる電子顕微鏡写真に加え化学組成と鉱物組成が同時に理解できるこの研究手法の進化は光学顕微鏡中心の50年前とは大きく異なる。医学的なバイオミネラリゼーションの研究はさまざまな電子顕微鏡の開発によってさらに発展した。例えば従来の走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、フィールドエミッション型透過型分析電子顕微鏡に加え、All-in-One microscope, Life Science Imaging Systems, Dual-Axis Electron Tomography, 3-Axis Nano-positioning System, Helium-Ion Microscopy (0.24nm) などがあり、時間がかかっても3～4種類の方法を用いて質の高いデータで討論することが原則である。特に、微生物の研究で重要なことは、急速凍結法や超薄切片で生きている細胞の状態を正確に観察することである。進化の問題解決に必要であれば、古生物学や地質学のみならず、鉱物学、分子生物学、分子遺伝学、構造生物学などどんな分野の技術でも身につけることである。さらに、生命現象の解明には医学、薬学、工学の基礎知識も必要となる。最近では工学の手法を遺伝子工学で実践する＜合成生物学＞が注目されている。これまでの微生物学は、分解して、各遺伝子やたんぱく質の働きを調べたが、＜合成生物学＞では逆に、遺伝子システムを組み立てて作ることで、生命現象の解明に迫ることができる。近代のパソコンやインターネットの進歩により、バイオテクノロジーが創造した合成生物の進化の方向はより複雑化するのであろうか。

一方、今年は進化論を唱えたダーウインの生誕200年である。種の形成、分化、生命の起源と進化の謎を解くために、多くの研究者は遺伝子レベルでも実験を行っている（日本科学者会議、1995；山岸、2008）。進化の謎を化石試料から探るには数に限度があるので、大腸菌などを使った実験で、今の生物が生き残った謎解きや普遍的な原理を導き出そうとしている。＜温故知新＞および＜温新知故＞の両側から攻めるやり方は、化石研究会創設時の50年前に、井尻正二会員が提唱していた＜実験古生物学＞であり、実際に彼は

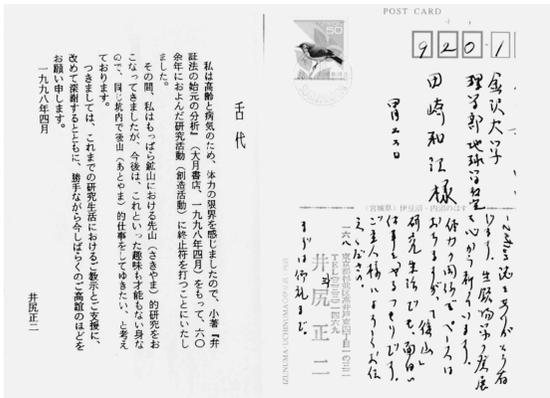


図4 井尻正二会員による著書『弁証法の始元の分析』の舌代(左)と手紙(右)。

犬の歯胚を移植する実験を行っていた。井尻(1998)は『弁証法の始元の分析』の著書の中で、生物における<適応と特殊化>という現象は<適応は特殊化であり、特殊化は適応である>と述べている(図4)。また、体位の対称性について、これらの進化は、生物を構成する高分子・細胞・組織・器官といった各構成単位(階層)にあらわれる変異とよばれる偶然性と、一般に生存競争といわれる対立物の闘争(広義)によってもたらされたものである。

近年、電子顕微鏡と分子生物学を組み合わせた方法が展開されている。遠藤(2008)はアミノ酸配列が解明されたアコヤガイの貝殻基質の一つ、アスペインの遺伝子発現の分布を染色する方法で、カルサイトーアラゴナイト問題に取り組んでいる。また、Hermida and Casariego(2009)もバクテリアによるバイオポリマーの劣化を電子顕微鏡で明らかにしている。Canby(1993)はさまざまな環境に生息するバクテリアの電子顕微鏡写真を公表し、“Bacteria teaching old bugs new tricks” “People are finally becoming aware of the potential” “We look after the bugs, and they will help us look after planet Earth” というように地球環境学的視野でミクロンレベルの微生物の進化を電子顕微鏡写真で示している。

7. 微生物の進化と地球環境問題

世界を旅して、ダーウィンが『種の起源』にまとめた進化論から150年たった。現在もなお、種は刻々と<進化>を続けている。特に近年の地球環境の変化は激しく、私たちは進化の実験室の中にいる。人間の活動による大気汚染、水汚染、土壌汚染が進んだ現在の地球環境を修復するのは依然として微生物であり、微生物は隠れた主役である(Tazaki *et al.*, 2004; Tazaki and Asada, 2007; Tazaki *et al.*, 2008c, 田

崎, 2008; 田崎ほか, 2009; 田崎, 2009b)。遺伝子が進化を解く鍵となっていく現代でも、生きている微生物の挙動、生態系、鉱物化作用を知ることは、地球環境の変遷を探るとともに、環境修復の手立てを知ることにつながる。環境修復をしながら進化した微生物は死して生体鉱物となり歴史に刻まれる。現代の重金属環境汚染を浄化する微生物はその昔バイオミネラリゼーションにより黒鉄鉱床、金、銀、銅、鉄鉱床を作った(Tazaki *et al.*, 2005b)。同様のことが、火星についても言えるかもしれない(Tazaki *et al.*, 2008d; Schmitt, 2009)。タンザニアの金鉄鉱床で抽出に使った水銀や砒素による汚染(Tazaki *et al.*, 2008a; 田崎, 2009a)、神通川のカドミウム汚染によるイタイイタイ病(田崎, 2009a)などもバイオミネラリゼーションを応用することにより環境修復が可能である。

また、1997年のナホトカ号重油流出事故による汚染された海岸の浄化は、人力でとりきれなかった重油は<重油分解細菌>にまかせられることが明らかになった(Tazaki, 2003; 2008; Tazaki *et al.*, 2006c)。その場合、粘土の親水性と親油性を利用し、粘土鉱物を油分解細菌に加えてやることにより、急速に分解が進行することも判明した(Chaerun *et al.*, 2005, 2007; Tazaki and Chaerun, 2008b)(図5)。その重油分解細菌は他所から培養して現地に散布する必要はなく、油汚染現場で増殖している土着の菌を使用すればよいことも明らかになった。野外の岩石表面に付着した重油は土着の重油分解細菌により数年で無害なパラフィンに変化する(Tazaki *et al.*, 2006c; Tazaki and Chaerun, 2008b)。水中での重油流出事故の場合、油膜の上にいち早く粘土の粉末を散布することで、自然の微生物による油の分解力を加速することができる(Canby, 1993)。さらに、原油を含む温泉水中で生じた銅藍の生体鉱物の発見は、まさにこれらの油汚染の研究と温泉バイオマットの研究成果が合体したものである(脇元・田崎, 2006)。

この重油事故のとき、分解細菌と粘土鉱物との研究成果から、再度、粘土が微生物誕生に果たした役割(ケアンズ・スミスの鑄型構造説)が有力である可能性が強いと感じ始めた。粘土鉱物は有機物に親和的な唯一の物質であり、アミノ酸やヌクレオチドなどさまざまな有機質を吸着させ、アミノ酸の重合やペプチド結合を促進するので、粘土鉱物が微生物と関与したことを示す室内実験が多く行われた(Shimoyama *et al.*, 1978; 中沢, 2006)。生物圏と粘土圏はほとんど重なっており、地表や海底など粘土と水があるところには、必ず生物がいる。過去の生命起源説に粘土の鑄型構造が考えられなかったことが不思議である。地球-粘土-水-微生物の相互反応でバイオイモゴライ

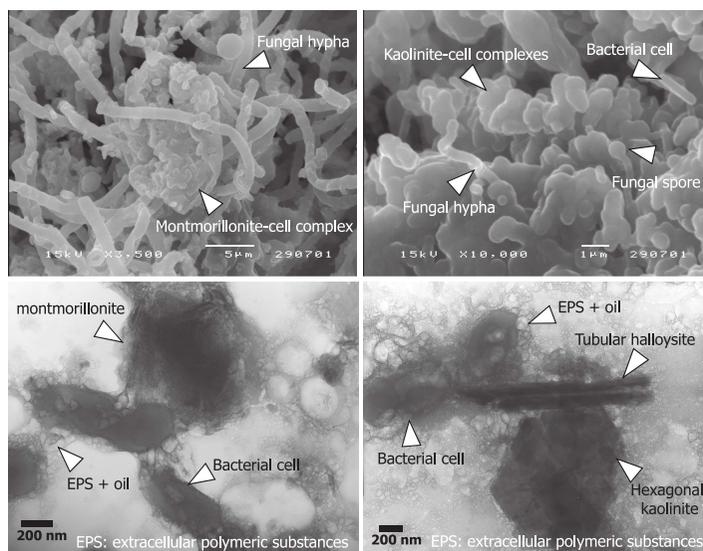


図5 ナホトカ号重油流出事故(1997)の重油分解細菌と粘土鉱物(モンモリロナイト)との反応を示している走査型電子顕微鏡写真(左上)および透過型電子顕微鏡写真(左下), バクテリアの細胞壁を取り囲む細胞外高分子有機物と重油(EPS+oil)との反応が認められる。一方, バクテリアと菌糸類と粘土鉱物(カオリナイト)の混合物が重油の分解を促進することを示す走査型電子顕微鏡写真(右上)とバクテリア細胞が(EPS+oil)や粘土鉱物(管状ハロイサイト, 六角板状カオリナイト)と混合して重油を分解している様子を示す透過型電子顕微鏡写真(右下)。

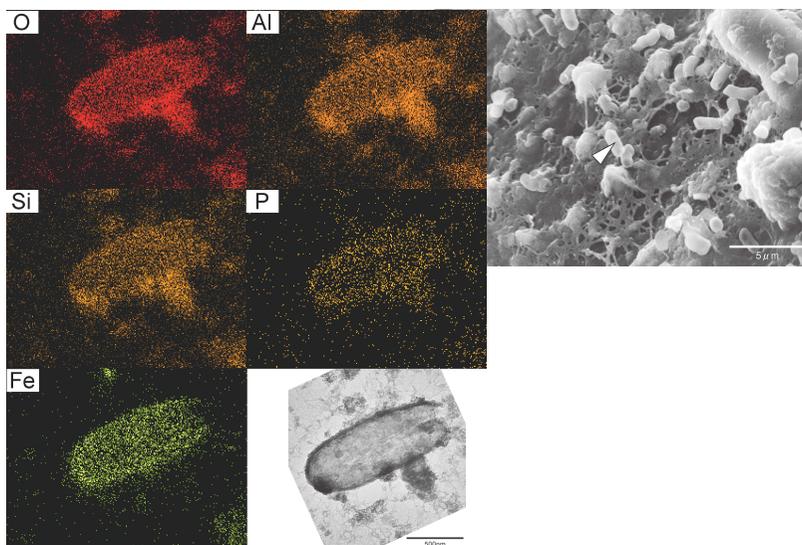


図6 鳥取県倉吉市秋喜の大山火山灰(倉吉バミス)を自然培養実験した結果, バクテリア細胞に繊維状のイモゴライトが形成したことを示す透過型分析電子顕微鏡写真(左, 中)。透過画像とイオン濃度分布写真(左, 中)および走査型電子顕微鏡写真(右)。バクテリア細胞の組成であるPにイモゴライトの組成を示すAl, Si, Feの酸化物が濃集している。

ト, バイオハロイサイトが形成される(Tazaki, 2005a; 2006; Tazaki *et al.*, 2006a; 田崎, 2009a)(図6)。さらに(伊牟田・田崎, 2008)は, 微生物, カオリン鉱物, 硫黄鉱物の共生について公表している。人工粘土鉱物(層状復水酸化物)は医薬成分の細胞への輸送に関連した研究へと発展している。

8. 進化と種の多様性問題

人間からみたら極限環境や汚染環境でも, 微生物はその環境を利用して, エネルギーを得て, 種々の生体鉱物を作ってきた。すなわち, 長い地球の歴史の中のいかなる環境下でも, 微生物は種々のイオンを取り込み, 濃集し, 蓄積し, 生体鉱物化作用を行ってきた。

この性質は持続可能であり、長い歴史の中で微生物は進化している。しかし、人間が地球上でさまざまな活動を始めてから、急速に地球環境が変化し、それにとまなう微生物の進化も加速している。すなわち、酒、しょうゆ、チーズなどの食料品や洗剤の微生物利用から始まり、野菜などの遺伝子組み換え、医薬品、除草剤、微生物兵器、核実験による生体への影響、活性汚泥法による下水道処理、汚染環境修復微生物の開発など多種多様である。DNA はヒトも微生物も共通に持っており、進化論は近年、分子レベルでの遺伝子解析を武器に、進化学へと動きはじめている。

生物の多様性が人間に利益をもたらす実例がある。約4億5千万年前のカナダの地層から見つかったカプトガニは現在もほとんど姿を変えずに生息している。その血液成分が細菌の毒素を検出する試薬に今も医療現場で使われている。カプトガニが地球上から減ってしまったら、人類は有用な薬を手に入れることができなかつた。人類はDNAを解析し、生命を操作する技術まで手に入れた。しかし、人類の手による地球の温暖化をはじめとする地球環境の変化は、良くも悪くも生物の進化と多様性>に大きく関与していることは疑いの余地がない (Tazaki *et al.*, 2008c; Tazaki *et al.*, 2009)。これからどのような進化をたどるのか、コンピューターでシミュレーションする研究が多くなっている。また、微生物学者の大半は純粋培養した微生物を研究対象にしているが、微生物集団はブラックボックスであり、微生物を一匹ずつ分離すると90%以上が増殖しない (金川, 2008)。真正細菌も古細菌も純粋培養できた細菌だけのデータであるから、実際の多様性はもっと大きい。環境がらみの自然環境中における微生物集団の科学的認識と解析の難しさがある。

2005年6月および2009年4~5月に著者はタンザニアのビクトリア湖と周辺の小規模金鉱床の調査を行った。金は水銀とアマルガムを作るために水銀が河川を汚染するが、そのなかに水銀に耐性のある微生物が電子顕微鏡でとらえられた。大気中では水銀を付着した粘土の埃が1000kmも飛ぶことが明らかになった。

(Tazaki *et al.*, 2008a)。また、ビクトリア湖にはシクリッドというカワスズメ科の魚がおり、多様な湖底地形に適応しながら500~1000種類に進化してきたといわれている。ビクトリア湖では、生物の進化を目の当たりにすることができるので、生物多様性の宝庫として<ダーウインの箱庭>と呼ばれていた。ところが、1950年代に人間がスズキ目アカメ科の淡水魚ナイルパーチをビクトリア湖に放流したため、1980年代には在来種のシクリッドが急激に減少した。ナイルパーチのグローバル化による生態系の破壊と湖の環境悪化は、人類が与える種の変化と多様性の問題として深刻

である。最後に、私をバイオミネラリゼーションの研究に導いてくださったカナダの恩師ファイフ先生の言葉を引用したい。

Relationship to Global Change; There is no doubt that man has become the most important agent modifying the surface of our planet (Fyfe, W. S. 1981 私信)。

9. まとめ

化石研究会は創設以来、バイオミネラリゼーション分野の研究を世界的にリードして来た。発足当時は硬組織の研究が主であったが、次第に遺伝子、細胞、結晶学、溶液化学、無機・有機化学、物理化学へと発展し、近年は、地球環境問題解決への糸口や再生医療など応用範囲が広がって来た。ここ50年における電子顕微鏡の発展は目覚ましく、化石および現生の微生物についての進化とバイオミネラリゼーションの研究を飛躍的に発展させた。電子顕微鏡は細胞レベルの生体鉱物化作用と進化の過程を追跡し、生命の起源に限りなく近づくことができるツールの一つである。本研究では、電子顕微鏡を駆使した現生の微生物における μm , nm オーダのバイオミネラリゼーションを紹介した。微生物のバイオミネラリゼーションは初期地球における生命の誕生とともに始まり、進化の歴史を知る鍵である。海底熱水噴出孔周辺には化学合成細菌に依存した生態系があり、桿菌(硫酸還元菌)の細胞には重晶石が形成し、現代のストロマトライトを見ることができる。これは、全生物の共通祖先が超好熱菌であることを意味している。また、温泉や地熱地帯には耐熱細菌の細胞中にウイルスが生息している。近年、人間活動による地球環境汚染(重油流出事故、鉱山廃水、大気・水・土壌汚染など)を修復する微生物の実態が明らかになった。特に、重油汚染現場に生息する重油分解細菌に粘土を混ぜることにより急速に分解が進む事実は、原始地球に生命が誕生した時の粘土の役割を感じさせる。微生物は生物・遺伝子工学や医学分野での応用・利用が顕著であり、DNAはヒトも微生物も共通に持っていることから、進化論は分子レベルでの遺伝子解析を武器に、進化学へと動きはじめている。

引用文献

秋山雅彦・犬塚則久・上田哲郎・小幡喜一・神谷英利・小寺春人・後藤仁敏・三枝春生・高安克己・福田芳生 (1995) 化石と生物進化, 地学団体研究会編, 新版地学教育講座6, 東海大学出版会, 195頁。
Canby, T. Y. (1993) Bacteria teaching old bugs new tricks. *National Geographic* **184**, 36-61.

- Chaerun, S.K., Asada, R. and Tazaki, K. (2005) How kaolinite plays an essential role in remediating oil-polluted seawater. *Clay Minerals* **40**, 481-491.
- Chaerun, S.K., Asada, R. and Tazaki, K. (2007) Biodegradation of heavy oil from the Nakhodka oil spill by indigenous microbial consortia. *International Journal of Applied Environmental Sciences* **2**, 19-30.
- 遠藤一佳 (2008) カルサイト—アラゴナイト問題に挑む—分子生物学で迫る生体鉱物学最大の難関. *Japan Geoscience Letters* **4**, 6-7.
- 藤沢亜希子・田崎和江 (2007) 温泉水のバイオマットにおける放射性元素の濃縮. 化石研究会誌 **40**, 56-62.
- Hermida, E. and Casariego, V. (2009) Morphology of plastic deformation and fracture of a biodegradable biopolymer. *Microscopy and Analysis, January*, 13-16.
- 伊牟田みはる・田崎和江 (2008) 鹿児島県入来カオリン鉱床における微生物被膜の形成. 粘土科学 **47**, 82-92.
- 石川 統訳 (1987) 生命の起源を解く七つの鍵. (A. G. ケアンズ・スミス著), 岩波書店, 245頁.
- 井尻正二 (1998) 弁証法の始元の分析. 大月書店, 102頁.
- 池田大介・高倉大輔・佐俣哲郎 (2007) イワガキ (*Crassostrea nippona*) 殻体中に含まれる有機基質タンパク質の *in vitro* 結晶形成実験による機能解析. 化石研究会誌 **40**, 37-44.
- 金川貴博 (2008) 環境問題と微生物の生態. 日本の科学者 **43**, 32-37.
- 化石研究会 (2007) 特集—バイオミネラリーゼーション—その機構と進化. 化石研究会誌 **40**, 1-104.
- 中西準子・小野恭子・蒲生昌志・宮本健一 (2008) カドミウム. 丸善株式会社, 369頁.
- 中沢弘基 (2006) 地球の起源—地球が書いたシナリオ. 新日本出版社, 221頁.
- 日本科学者会議編 (1995) 特集—現代進化論の諸相. 日本の科学者 **30**, 573-591.
- 野川ちひろ・小原万美・小澤めぐみ・佐俣哲郎 (2007) アコヤガイ真珠層と綾柱層の形成に関する新規タンパク質の一次構造. 化石研究会誌 **40**, 48-51.
- Nomura, M. and Tazaki, K. (2007) First description of left valve of *Chlamys ingeniosa ingeniosa* (Yokoyama) from the Middle Miocene of Japan. *Journal of Fossil Research* **40**, 84-89.
- 法月美智子・高倉大輔・佐藤 衛・佐俣哲郎 (2007) X線溶液散乱法による nacrein の構造解析. 化石研究会誌 **40**, 45-47.
- 大森昌衛 (2007) 花粉学とバイオミネラル. 徳永重元博士献呈論文集, 87-92.
- 大島泰郎 (1995) 生命は熱水から始まった. 東京化学同人, 141頁.
- 大谷栄治・掛川 武 (2005) 地球・生命; その起源と進化. 共立出版, 196頁.
- 小澤幸重 (2007) エナメル質組織進化と細胞学的背景. 化石研究会誌 **40**, 15-36.
- 三枝春生・高安克己・福田芳生 (1995) 化石と生物進化; 新版地学教育講座 6 巻, 195頁.
- 更科 功 (2007) 無脊椎動物の硬組織中のタンパク質とその進化. 化石研究会誌 **40**, 2-5.
- 笹川一郎・石山巳喜夫 (2007) 魚類のエナメル質とエナメロイド. 化石研究会誌 **40**, 6-14.
- 佐藤一博・田崎和江 (2004) 中性 pH に生息する *Leptothrix ochracea* の鉄濃集作用. 環境技術 **33**, 467-475.
- Schmitt, H. (2009) From the Moon to Mars. *Scientific American, July*, 24-31.
- Schopf, J.W. (2006) The first billion years: When did life emerge? *Elements* **2**, 229-233.
- 島口 天 (2007) 青森県陸奥湾から産出した長鼻類化石. 化石研究会誌 **40**, 80-83.
- Shimoyama, A., Blair, N. and Ponnampertuma, C. (1978) Synthesis of amino acids under primitive Earth conditions in the presence of clay. *Origin of Life: Proceedings of the second ISSOL meeting and the fifth ICOL meeting*, 95-99.
- Soares, C. (2009) Eyes on the Swne. *Scientific American, July*, 9-10.
- 高橋直人・田崎和江 (2008) 地すべりを反映する地下水, 微生物, 粘土の特徴. 粘土科学 **47**, 168-177.
- Takashima, C., Kano, A., Naganuma, T. and Tazaki, K. (2008) Laminated iron texture by iron-oxidizing bacteria in a calcite travertine. *Geomicrobiology Journal* **25**, 193-202.
- 田崎和江・佐藤 努・俵 健二・山村 健 (1999) 熱水環境におけるバイオミネラリーゼーション. 月刊海洋, 号外 No.19, 211-216.
- Tazaki, K., Rafiqul, I. ABM, Nagai, K. and Kurihara, T. (2003) FeAs₂ biomineralization on encrusted bacteria in hot springs: an ecological role of symbiotic bacteria. *Canadian Journal of Earth Science* **40**, 1725-1738.
- Tazaki, K. (2003) *Heavy oil spilled from Russian Tanker "Nakhodka" in 1997: Towards eco-responsibility*, Earth Sense. 21st Century COE Kanazawa University, Takakuwa Art Printing Co. Ltd., 440pp.
- 田崎和江・盛一眞吾 (2004) 鉄マンガン酸化バクテリアによる鉄マンガン集積構造のメカニズム. 環境技術 **33**, 284-291.
- Tazaki, K., Wakimoto, R., Minami, Y., Yamamoto, M.,

- Miyata, K. and Sato, K. (2004) Transport of carbon-bearing dusts from Iraq to Japan during Iraq's War. *Atmospheric Environment* **38**, 2091-2109.
- Tazaki, K. (2005a) microbial formation of halloysite-like minerals. *Clays and Clay minerals* **53**, 224-233.
- Tazaki, K., Okuno, M. and Fyfe, W.S. (2005b) Proof for bio-sedimentation in Carajas's BIF. *Pedologist* **49**, 99-108.
- Tazaki, K. (2006) Clays, microorganisms, and biomineralization. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G., and Lagaly, G. (eds) *Handbook of clay Science*, Chapter **9**, pp.477-497.
- Tazaki, K., Morikawa, T., Watanabe, H., Asada, R. and Okuno, M. (2006a) Microbial formation of imogolite. *Clay Science* **12**, 245-254.
- Tazaki, K., Okuno, M., Furumoto, M. and Watanabe, H. (2006b) Biomineralization of pisoliths in hot springs. *Materials Science and Engineering* **C26**, 617-623.
- Tazaki, K., Watanabe, H., Chaerun, S.K., Shiraki, K. and Asada, R. (2006c) Hydrocarbon-degrading bacteria and paraffin from polluted seashores 9 years after the *Nakhodka* oil spill in the Sea of Japan. *Acta Geologica Sinica* **80**, 432-440.
- Tazaki, K. and Asada, R. (2007) Transmission electron microscopic observation of Mercury-bearing bacterial clay minerals in a small-scale Gold Mine in Tanzania. *Geomicrobiology Journal* **24**, 477-489.
- Tazaki, K., Asada, R., Watanabe, H., Shiraki, K., Iwai, T., Wakimoto, R., Songo, A.M. and Muhongo, S.M. (2008a) Clays and bacteria carry important role to release Hg from small scale Au mine near Lake Victoria, Tanzania. *The Scientific Reports of Kanazawa University* **52**, 1-26.
- Tazaki, K. and Chaerun S.K. (2008b) Life in oil : Hydrocarbon-degrading bacterial mineralization in oil spill-polluted marine environment. *Frontiers of Materials Science in China* **2**, 120-133.
- Tazaki, K. (2008) Oil spill accidents and the hydrocarbon degrading bacteria in Korea and Japan. Proceedings of Taeon International Environmental Forum 2008, 1-4.
- Tazaki, K. and Morii, I. (2008) Microbial immobilization of Si, Mn, Fe, and Sr ions in the Nacreous layer of *Sinohylophis schlegeli* and environmental factors. *Earth Science Frontiers* **15**, 54-65.
- Tazaki, K., Kido, T., Baba, N. and Suzuki, S. (2008c) Acid rain harms world heritage buildings and human health in Vietnam. In: Roglesfield, L. G. (ed) *Acid Rain Research Focus*, pp.125-142, Nova Science Publisher, Inc..
- Tazaki, K., Okuno, M. and Furumoto, M. (2008d) Hot springs and life in Mars. In: Costas, L.A. (ed) *Planet Mars Research Focus*, pp.105-115, Nova Science Publishers, Inc..
- 田崎和江 (2008) 露天の足湯・岩山装置に形成したバイオマットとバイオクレー. *粘土科学* **47**, 240-254.
- 田崎和江・鈴木祐恵・藤沢瑛子 (2009) 韓国泰安半島における油流出事故による環境汚染—2008年1月の砂海岸と岩海岸における浄化方法. *地球科学* **63**, 29-40.
- 田崎和江 (2009a) Microbial mats; their bio-mineralization and bioremediation バイオマットと環境制御. 高桑美術印刷株式会社, 228頁.
- 田崎和江 (2009b) 日本海の孤島からみた地球環境 ; 大気中の微粒子を取り込むバイオマット中の微生物. *粘土科学* **48**, 27-42.
- Tazaki, K., Asada, R., Lindenmayer, Z.G., Shirotori, T., Vargas, J.M., Nowatzki, C.H. and Coelho, O.W. (2009) Life inhabits rocks : Clues to rock erosion from electron microscopy of pisolite at a UNESCO heritage site in Brazil. *International Journal of Earth Science* **98**, 227-238.
- Tazaki, K. (2009a) Observation of microbial mats in radioactive hot springs. *The Scientific Reports of Kanazawa University* **53**, 25-37.
- Tazaki, K. (2009b) Oil spill off the Taeon Peninsula, South Korea, on December 7th, 2007-surveys one month, ten months, and one year after the accident. *The Scientific Reports of Kanazawa University* **53**, 1-23.
- Tazaki, K. and Hattori, T. (2009) Bacterial contribute to precipitation of Manganese nodules in freshwater environments : An electron microscope study of experimental biomineralization by cultured bacteria. *The Scientific Reports of Kanazawa University* **53**, 39-54.
- 脇元理恵・田崎和江 (2006) 原油を含む温泉水における銅藍の生体鉱物化作用. *地球科学* **60**, 275-286.
- Walsh, C.T. and Fischbach, M.A. (2009) New ways to squash superbugs ; Scientists are using new tools and tactics in the race to discover novel antibiotics. *Scientific American*, July, 32-39.
- 渡部哲光 (1997) バイオミネラリーゼーション ; 生物が鉱物をつくることの不思議. 東海大学出版会, 東京, 180頁.
- 山岸明彦 (2008) 生命の起源と初期進化. *Japan Geosciences Letters* **4**, 6-7.
- 安井謙介・高橋啓一・野嶋宏二・中島康子 (2007) 中部更新統浜松層産ナウマンゾウ化石について. *化石研究会誌* **40**, 63-79.