

プレカンブリアン・パーク「湯の滝」へようこそ -微生物が作るマンガン鉱床が語る地球環境学-

三田直樹¹⁾

1. はじめに

NASAが「隕石中に微生物らしい構造物を発見」と発表し、火星に生物が存在した可能性の是非をめぐって多くの人がロマンを感じたことでしょう。しかし、今のところ、広大な宇宙に存在する無数の星たちの中で、生命が宿る惑星は「私たちが住む水の惑星、地球」だけのようにです。その地球の中で生命が存在できるのは、空気・大陸・海洋・陸水などの非常に限られた奇跡的な環境ですが、人類はそれを破壊し続け、他の生物も巻き込んで自らの首をしめつつあります。

世界中が環境問題に悩んでいる今こそ、地球と生命の共進化の歴史を見つめることで、現在と将来を考えなくてはならないと私は考えています。46億才の地球の不思議さを実感させる「天然のタイムマシン」に皆さんを案内しましょう。微生物だけが活躍していた先カンブリア時代の巨大鉱床誕生の秘密にせまり、近代生活に不可欠なこれら金属資源について考えてみたいと思います。

そして、天然のタイムマシンが見いだされた経緯から現状、さらにはその過程ではぐくまれた環境保護の取り組みなどについて、回想的にまとめてみました。今後の対応の一助となれば幸いです。

現在のところ、湯の滝の微生物による鉱床生成現象の研究が発展し、山積みになっている乾電池などのマンガン再生・再利用や、鉱山廃水・生活用水の浄化など、難しい問題の解決に役立つ活用方法(特許出願中)が検討されてきました(三田・加藤, 1999)。地元の足寄町では、世界でも珍しい「湯の滝の、生きたマンガン鉱床」を天然記念物に



第1図 「湯の滝」の学術的価値と環境保護問題を初めて報じた、十勝毎日新聞(1990年11月9日)の記事。

するための準備も進んでいます。

本誌の表紙と口絵も参考にしてください。

1) 地質調査所 地殻化学部

キーワード: 現生, 現世, マンガン鉱床, プレカンブリアン, 湯の滝, 足寄町, 阿寒国立公園, 微生物, 環境, 浄化, リサイクル, 天然記念物

2. プレカンブリアン・パークとは？

多くの人々を魅了したSF映画のジュラシック・パークは、根強い人気の恐竜という絶滅した太古生物を主人公にしています。これを先端科学の力で蘇らせたものの、結局は人知の及ばない結末を迎えるというストーリーでした。また、ロストワールドは、滅んだはずの恐竜が類似環境の未開の地に生存していたというSF映画で、2つとも空想科学の世界のお話でした。

これらに対し、阿寒国立公園の湯の滝は、工業技術院の複数の研究所と北大理学部からなる共同研究チームが発見した、プレカンブリアン・パークともいふべき存在です(三田, 1997a)。というのは、湯の滝は、温泉水に溶けているマンガンイオンが、マンガン酸化細菌という特殊な細菌によって二酸化マンガンの沈澱に変化し、その鉱物が沈積生長しつづける「生きた鉱床」だからなのです(第1図)。今から5億7,500万年前よりも昔の世界が先カンブリア時代(Precambrian プレカンブリアン)です。その原始海底で二酸化マンガンの巨大鉱床が誕生したと考えられてはいますが、生成メカニズムは謎でした(マガキャン, 1979)。

「湯の滝」の現象の生物地球科学的な総合研究(Mita *et al.*, 1994; Usui and Mita, 1995, 三田・加藤, 1999)によって、

- (1) 世界に稀な、二酸化マンガンの鉱物が生成中の場で、突出して世界最大である。
- (2) 原始地球で誕生した巨大マンガン鉱床の生い立ちを語る、生きた鉱床である。
- (3) ここでは特殊な微生物たちが、鉱物を作り出している。
- (4) 地上の鉱床(原始の海で誕生)と深海の鉱床も、微生物が作った可能性がある。
- (5) 湯の滝の微生物が世界の環境保全や資源リサイクルに貢献可能である。

などの知見が得られました。

数億年前～約30億年前にかけて誕生した巨大マンガン鉱床が、南アフリカ、オーストラリア、中国、カナダ、ロシアなどで知られています。過去の時代にできた鉱床のなかに、鉱物を作った当時の細菌の姿を見つけるのは無理ですが、現実にも同様の現象が起きている湯の滝では、鉱物を作り出す



第2図 西オーストラリアのシャーク湾奥にあるハメリングール海岸に群生する、現世のストロマトライト。

マンガン酸化細菌という微生物がひっそりと棲んでいます。このことは、約35億年前の海辺で藍藻(らんそう、シアノバクテリアともいう)という光合成微生物が、地球で最初に酸素ガスを生産しながら炭酸カルシウムを沈着生長させた産物であるストロマトライト化石に対して、生きている化石的な存在のストロマトライト群落(第2図)が西オーストラリア海岸で発見されたのと同じような、素晴らしい価値があると言えるでしょう。

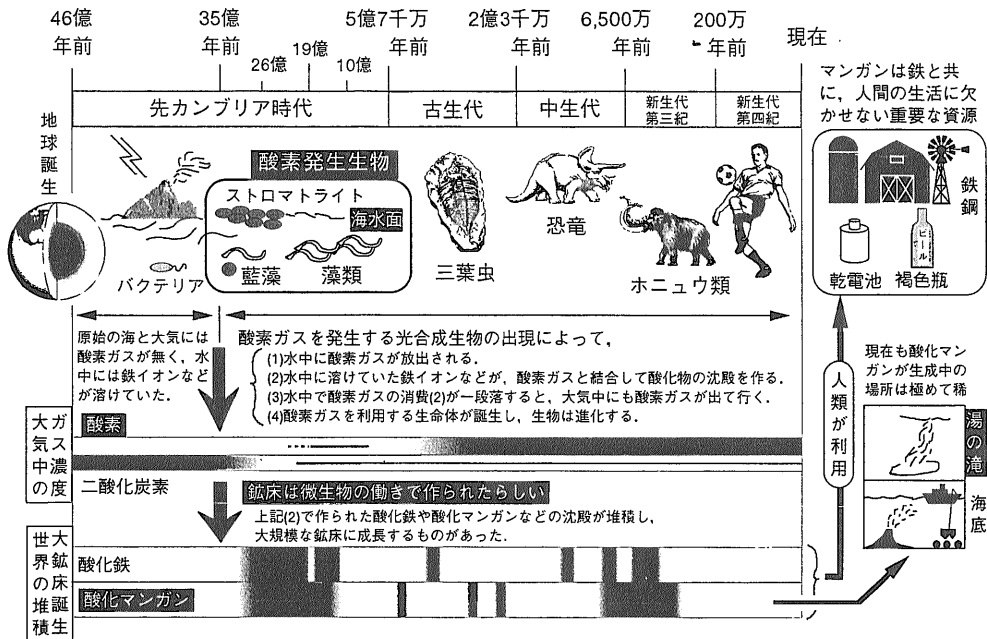
第3図に示した「地球と生命の共進化の概念図」をじっくりながめ、頭の中で時間と空間をかけぬけて、全体像の概略をつかんでみましょう。

3. 近代社会を支えるマンガンとは？

マンガンは白っぽい光沢がある金属元素ですが、天然には金属マンガンは存在せず、ほとんどが黒い酸化マンガンとして存在しています。湯の滝で生まれている黒いものの正体は、二酸化マンガんです。この物質が乾電池に使用されていることは、一般によく知られていますが、実は、それは用途全体の10%程度なのです。そこで、多くの人にとって意外かもしれない、マンガンの用途を示します。日本での鉱石の、主な用途は、

- | | |
|----------------|--------|
| (1) 製鉄用マンガン合金鉄 | 130万トン |
| (2) 乾電池用二酸化マンガ | 14万トン |
| (3) その他 | 2万トン |

で、「その他」の中には一般には知られていませんが、



第3図 地球と生命の進化の概念図(三田, 1995a, 1995b).

・窯業原料(うわ薬, タイルの着色, ビール瓶など褐色瓶の着色)
・薬品(殺虫剤, 肥料, 飼料添加物)
など身近な例が含まれており, 重要な電子部品にも使われています。マンガンはかつて日本でも採掘されましたが, 今では輸入に頼っていて, 備蓄が義務づけられている稀少金属(rare metal レア・メタル)資源でもあります。

4. 不思議な鉱床との遭遇

1980年代の半ばのことです。地質調査船白嶺丸に乗って太平洋の海底熱水活動(温泉地帯に鉱床ができている現象)を調査していた私たちに, 北海道大学の針谷宥教授から「世界でも希な, 二酸化マンガンの沈殿している場所が, 北海道の秘境にある」という興味深い情報が入ってきました。

第3図を見るとわかるように, 近代社会を支える重要な鉱物資源である二酸化マンガンと酸化鉄は, 遙か昔の地質時代に誕生した巨大鉱床から採掘されていますが, その成因はまだよく判っていません。このため, 現在も生成現象が起きている場所に解明の糸口を求めて探索していました。しかし, 地上には小規模な少数例しかなく, 深海にある類似の

鉱床生成の場を調べていたものの研究が非常に困難だっただけに, 針谷先生からの知らせはとても貴重でした。

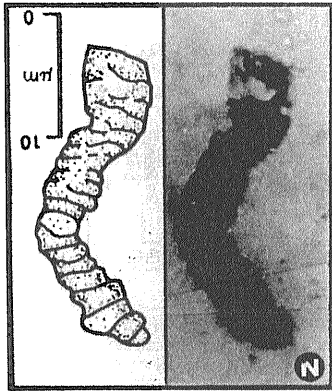
初めて現地を訪れた時に, 言葉では語り尽くせないほどの感動がありました。このような場面を目にできるとは驚きで, その後の研究に情熱を注ぐことになったのです。その後, 当地を訪れた多くの研究者が, 同様な印象を抱いたそうです。

しかし, ここには後述の「温泉=入浴」という, 大きな問題が待ち受けていました。

5. 原始微生物の進化と環境変革が産んだ巨大鉱床

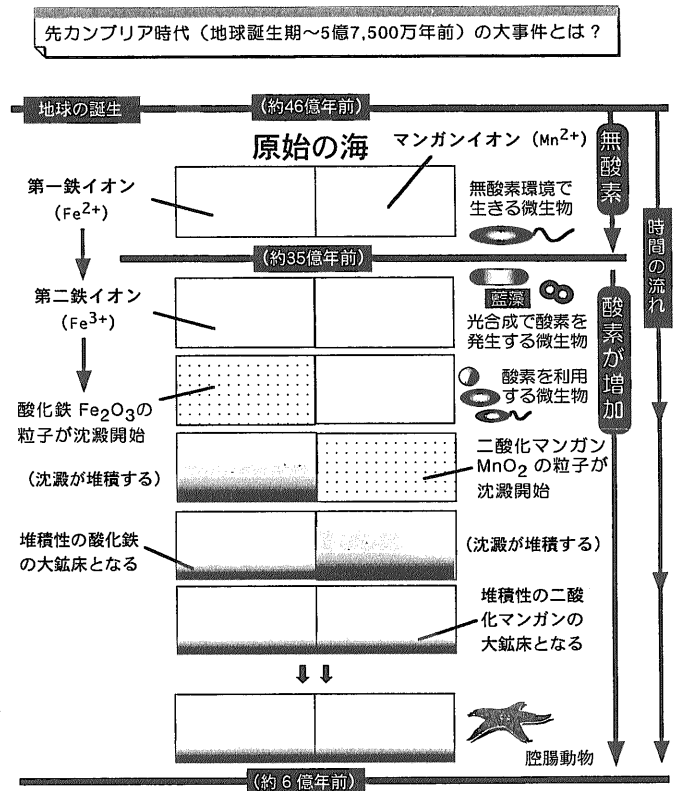
今から約46億年前に誕生したと言われる地球の歴史の中で, 水は微生物から始まって大型生物に至るまでの多様な生命体を育ててきました。そしてまた, 地球は気の遠くなるような長い年月をかけて化石燃料資源や金属資源を創り出してきました。その中でも鉄鋼の原料として近代文明を支えている酸化鉄や酸化マンガンの鉱床は有限の金属資源ですが, その形成には水と微生物が深く関わっているとみられています。

前述のように, 陸上に存在する鉄やマンガンの酸化物の鉱床は昔の海底で誕生したと考えられてい



第4図 最古の化石である藍藻の顕微鏡写真とイラスト (Schopf, 1996).

第5図
先カンブリア時代の「地球と生命の進化と、鉱床誕生の概念」の想像図 (三田, 1997a).



ますが、どのようにしてできたかはよく判っていませんでした。そのうえ、深海に眠る膨大な鉄とマンガン資源の成因も、まだよく判っていないのです。これらの謎を解き明かすための重要な鍵となるのが、「生きている酸化マンガン鉱床、湯の滝」で、最近の研究によって、微生物が大きな役割を果たしていることが判ってきました。まるで「生きている化石」に出会ったようなものなのです。

6. はるか35億年前にタイムトラベル

私たちの生活の必需品である鉄とマンガンの原料が誕生するきっかけとなった大事件が発生したのは、まだ、微生物しか生存していなかったと考えられている、先カンブリア時代(5億7,500万年前から地球誕生期までの期間)のことです。

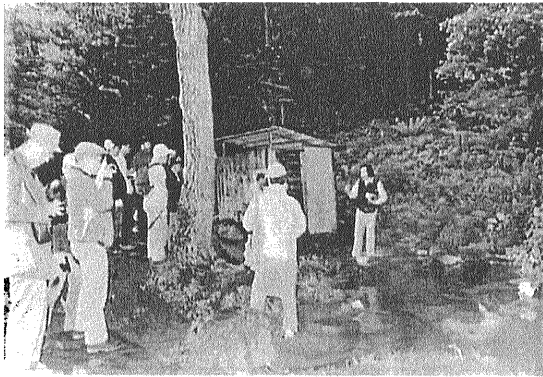
はるか35億年前、「光合成をして酸素を放出する」微生物である藍藻(らんそう、シアノバクテリアともいう)が、ストロマトライトという石灰質の集合体を作りました。藍藻は地球で最初の酸素を発生した生命体と考えられています。地球生命体の最古

の化石(第4図)は、35億年前のストロマトライトから発見された藍藻です。酸素が発生する前の無酸素の世界では「嫌気性微生物」が繁栄していましたが、藍藻による酸素の発生を境にして彼らは衰退の一途をたどったとみられています。それに代って、酸素を利用する「好気性微生物」が繁栄するようになり、微生物王国は大きな変化をとげたのでした(Margulis and Sagan, 1986)。

第5図に示したように、藍藻が発生した酸素は、それまでの原始の水に溶けていた鉄やマンガンのイオンと結合して、酸化鉄や酸化マンガンの沈澱を生じ、やがて大規模な鉱床が誕生したと考えられています。しかし、これらの形成メカニズムはよく判っていないのが現状でした。今も続く「湯の滝」のマンガン生成現象を研究することで、原始地球で起きたいろいろな出来事の謎解きに貢献できると考えられているのです。

7. 露天風呂開発と学術的価値をめぐる問題

オンネトー湯の滝は、温泉と滝が多い我が国でも非常に珍しい、温泉そのものが滝になっている



第6図 万国地質学会議 (IGC-92) の専門家による、1992年9月の視察 (撮影：足寄町役場)。足寄町役場が設置した看板は、すぐに壊された。今では禁止されているが、当時はこんな入浴がひっきりなしで、調査不能なことがよくあった。



場所です。北海道内には、この他に温泉の滝として有名なカムイワッカ滝 (知床半島) がありますが、泉質は異なります。この特色が、湯の滝の不思議な現象にとつての悲劇の始まりでありました。

針谷先生が久しぶりに湯の滝を訪れてみると、白い玉砂利が敷かれた「源泉池と人工滝壺」が出現しており、「脱衣所付きの露天風呂」への入浴が奨励されていました。先生は、まさか「国立公園の特別地域」でこんな開発がされるとは想像もしていなかったのでびっくり仰天し、早速 (1988年)、足寄町役場に保護保全をお願いする手紙を送りました。

私たちが調査打合わせで町役場を訪れると、新しく引き継いだ担当課長の西川静香氏が、針谷先生の手紙への対応を検討していたところでした。まもなく役場・営林署・観光協会への説明会 (足寄町主催) が開かれ、学術的重要性は理解されたものの、観光協会は斜面の泥を除去して滝壺や源泉池なども整備した経緯があるだけに露天風呂への愛着が強く、すぐに保護への動きとはなりません。この状況が最初の新聞記事 (第1図) になりました。

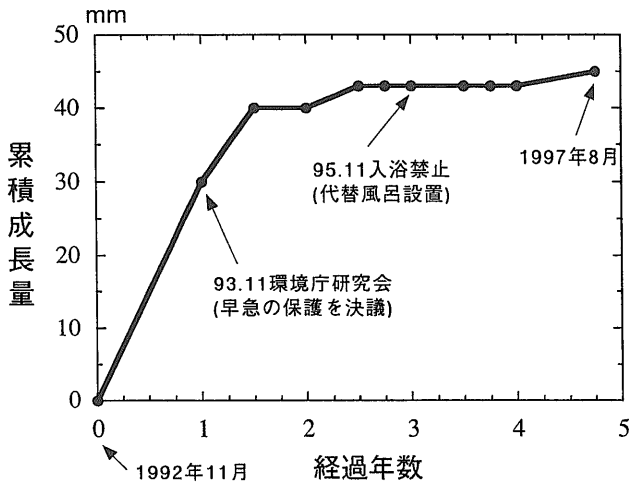
入浴が奨励され、適切な情報を知らされないままに多くの観光客がひんぱんに入浴し、「湯の滝」の巧妙な微生物生態系が破壊されてきたのでした。尾瀬のある群馬県に生まれ育った私は、小学生の頃から自然保護の重要性を学校や社会から学

んでいましたので、何年にも渡って阿寒国立公園の湯の滝で目にし続けた光景 (第6図) は、心痛の極みでした。

8. 保護への長い道のり

その後、足寄町の依頼で観光協会に学術的価値と保護の重要性を理解してもらうためのわかりやすい資料を何度か提供していましたが、足寄町教育委員会の澤村寛博士 (古生物学) をはじめとする地元の有識者の人々が、学術的価値を関係者にわかりやすく説明し続けてくれました。これに加えて、湯の滝近くに住む人達が当初から示してくれた研究への理解と声援が、研究者たちに苦悩を乗り越えさせる原動力になったのでした。

ようやく1993年11月になって、湯の滝利用の在り方研究会 (環境庁主催) で関係者の意見が一致し、天然記念物指定を目指して早急に保護する方針が採択されました。ところが、代替風呂が設置された1995年11月まで源泉の入浴は続きました。第7図から判るように、かつて年間2-3cmも成長した「特殊な微生物生態系による鉱物生成現象」はこの時すでに停止し始めていたのです。ダメージ回復の兆候は、1997年8月の調査でようやく確認されましたが、従来のような活動状況に戻るのには時間がかかりそうです。これは、尾瀬において、木道の無い時代に踏み荒された湿原が荒廃してしまって、



第7図 湯の滝の斜面に設置した容器への二酸化マンガン沈着量の変化(三田, 1999)。

未だに回復しないという話と似たようなことなのかもしれません。

このように苦難の道が続いたものの、1996年5月には湯の滝園地ミニビジターセンターが十勝支庁によってオープンして、解説パネル(和文・英文)が足寄町によって展示されました。同時に環境庁から解説パンフレット(和文・英文)も発行されました。これらの原稿執筆を関係研究者が快諾したのは、言うまでもないことです。

9. 自然観察会がスタート

1994年の春、私と阿寒国立公園管理官が調査の打合わせをしているうちに「オンネトー湯の滝で、自然観察会を実施したらどうか」という話になりました。当時の針谷先生は、多忙な理学部長職にあったのですが、「研究内容を一般の人達に判りやすく説明することは大事ですから」と快く引き受けてくださり、私と二人で説明することになりました。やがて三浦裕行先生が針谷先生から解説役を引き継ぎ、自然観察会(第8図)は毎年行われるようになりました。日独共同研究で湯の滝を訪れたドイツの研究者たちも、足寄町教育委員会の主催する特別講座で、湯の滝の世界的な意義を語ってくれました。この時の合同調査の様子は、NHKニュースで全国に放映されましたので、ご記憶の方もいらっしゃるでしょう。そして、1996年11月には工業技術院資源環境技術総合研究所の若手研究員である林



第8図 十勝の理科教諭の「湯の滝」野外研究会を報じた北海道新聞(1995年11月12日)。

秀博士が、米国イエローストーン国立公園について講義してくれました。研究者も自然の中で勉強させてもらっているという、謙虚な姿勢で臨んでいることが紹介され、多くの人が感動したのです。

観察会では、(1) 湯の滝で作られている二酸化マンガンという鉱物は現代社会を支える重要な資源で、(2) 人類は先カンブリア時代に誕生した巨大な二酸化マンガン鉱床を採掘利用しているが、(3) この鉱物の生成メカニズムはまだよく判っておらず、(4) 現在もこの鉱物が生成しているのを研究できる場合は世界で希であり、(5) 湯の滝の現象が世界最大規模で他を大きく引き離していることや、(6) 最近の研究によって微生物がこの鉱物を作り出していることが判明(口絵を参照)したこと等を、全員参加の化学実験もまじえて、わかり易く説明しています。

10. 地球の不思議さに感動

観察会の参加者たちは、小学生から大人まで多岐に渡っています。何組かの親子連れもあって、親子の良いコミュニケーションの機会にもなるようです。また、道東・道北地域の学校の先生が、教え子を連れて参加し、私の説明や実験へのアドバイスやアシスタントもしてくださることもあり、お互いに勉



第9図
湯の滝の温泉細菌で乾電池リサイクルする研究を報ずる朝日新聞「科学欄」(1999年1月20日)。

強になっています。

参加者は、水中のマンガンイオンを無機化学的に二酸化マンガンに変えるには、強アルカリ性と溶存酸素が必要なことを、現地における全員参加の簡単な実験で学びます。そして、弱酸性の温泉水から実際に沈澱している不思議さに、気付いてくれます。単離して純粋にしたマンガン酸化細菌の菌株を用いた微生物実験の結果を示されることによって、この細菌が沈澱を生成している事実に驚き、自然の仕組みの巧妙さに感動して、それを解明した科学の素晴らしさを実感してくれます。自然を大切にしたい気持ちが、一層熟成されたように思いました。

ところが、針谷先生が1997年4月に、そして林博士も1997年9月に逝去されてしまいました。観察会の関係者と参加者の悲しみは大きいですが、二人の伝えてくれたものが多くの人の心に育って行くこと信じています。

11. 自然科学が人を育て、環境をまもる

よく理科離れという言葉が聞かれますが、もっと理科を学びたいという強い雰囲気を観察会で感じています。ある時、参加した高校生から「このような

勉強はどの大学にいけばできますか?」と質問されました。私は気軽に「〇〇大学の△△教授なら、最適かもしれませんね」と回答したのですが、申し訳ないことに、このやりとりをすっかり忘れていました。それから3年後、その教授から「三田さんの調査に同行したいと希望する積極的な学生がいるのだが、良いですか?」との依頼がありました。やがてこの学生が当時の高校生だったことを知って、教授と私は互いに驚いたことがあります。

調査に同行した彼は、大学での勉強に一層熱心になり、1998年夏の青少年のための科学の祭典(東京・科学技術館)では、地質学会の地質学普及教育実行委員会が企画した、太古の地球への招待シリーズの「その1. 鉄とマンガンのひみつ」に、スタッフとして参加してくれました。同時に、自然観察会に参加した十勝自然史研究会の皆さんも祭典に協力してくださって、私と共同研究者たちはもとより、地質学会の関係者も事の成り行きに感動したのでした。このことは、神戸信和博士が日本地質学会の学術大会で、地学教育の実践例(神戸, 1998)として発表してくださいました。

このように、国立公園で地球科学と生物科学を一体化して普及啓発することは、理科が一層身近

なものとなると同時に、環境問題を解決する姿勢を自発的に育てることにもなると思います。そして自然に出会って素直に感銘する心が育てば、科学的センスを身につけた心優しい人が増えて行くのではないのでしょうか。

12. 野生生物との接触に注意

数年前までは、湯の滝駐車場にキタキツネを見ることはありませんでした。しかし、観光客が持ち込む餌をゴミ箱に求めて、出没が目立つようになっています。特に、北海道外の人には、キタキツネが恐ろしいエキノコックスの宿主であることをほとんど認識せず、非常に危険です。実際に、湯の滝の駐車場でキタキツネに餌を与えながら触っている観光客に、注意することもよく経験しています。また、逆に、このようないわゆる観光キツネが車にはねられ死亡するケースが多発し、無意識あるいは「善意」の自然破壊は、湯の滝に限らず国立公園での焦眉の問題となっています。

13. おわりに

私たちは「高度に発展した現代の文明が、大切な資源を急速に消費した上に成り立っている」ことに気付いています。こころ優しい科学的な視点で、この奇跡の星を大切に守って行きたいものです。それには、ここで学んだような生物地球科学的な視点が、一般に浸透していることが重要だと思います。第9図に、私たち研究者からのメッセージの一例を紹介します。

また、国立公園は法律によって自然が保護されていることを、読者の皆さんもご承知のことと思います。学術研究でも、地元関係機関とよく相談しながら厳正な手続きをした上で、環境庁からの公式許可を得て実施しています。許可書と腕章などを携行し、自らも自然保護に十分な注意を払わなくてはなりません。私たちの調査でも、足寄町役場、足寄町教育委員会、足寄動物化石博物館、十勝支庁、林野庁、環境庁などの諸機関の皆さんの理解とご協力を戴きながら、円滑に行われてきました。

とくに、湯の滝の近くの住民の皆さんには、調査の手伝いや激励をしていただきました。冬期の積雪

時の調査は、同博物館の館員や町民の皆さんのご協力無くしては達成できませんでした。ここに研究チームを代表して謝意を表します。また、本稿の執筆にあたって助言をしていただいた金井豊主任研究官に感謝します。

文 献

- 神戸信和・三浦恵美・内野冷四郎・捧直 仁・近藤聡宏・坂本洋典・平山大地(1998):生涯学習における地学教育を論ずる—科学技術館の科学の祭典に参加して—。日本地質学会第105年学術大会講演要旨集, 301.
- マガキャン, イー・ゲー(1979):金属資源鉱床の生成—鉱床の広域分布法則—, 現代工学社(岸本文男 訳).
- Margulis, L. and Sagan, D. (1986): *Microcosmos: Four billion years of microbial evolution*. Summit Books, New York.
- 三田直樹(1995a):陸の秘境や深海底でのマンガン鉱床生成現象に挑む—地球科学者と生命科学者のチームワーク—. SCIENCE & TECHNONEWS TSUKUBA, no.34, 22-23.
- 三田直樹(1995b):原始地球の出来事を理解する鍵—世界でも稀な「生きている酸化マンガン鉱床, オンネトー湯の滝」—. 月刊地球, Vol.17, no.7, 464-498.
- 三田直樹(1997a):地球の不思議にせまるツアー—やさしい実験と35億年前へのタイムトラベル—. 第18回科学教養講座(通商産業省工業技術院), 55-61.
- 三田直樹(1997b):国立公園における地球科学の普及啓蒙活動の重要性. 地質学雑誌, 第103巻, 第10号, 1012-1013.
- 三田直樹(1999):湯の滝の現状と問題点. 足寄町オンネトー湯のマンガン生成緊急調査報告書(足寄町教育委員会), 29-34.
- 三田直樹・針谷 宥・臼井 朗・丸山明彦・東原孝規・中嶋 健・金井 豊・三浦裕行・伊藤 孝,(1994):生きている酸化マンガン鉱床「湯の滝」. 地質学雑誌, 第100巻, 第10号, XXV-XXVI.
- 三田直樹・金井 豊・鈴木邦夫・岡崎智鶴子・大石由樹子・鈴木俊基・尾山洋一(1998.7.25-26):太古の地球への招待—その1—鉄とマンガンのひみつ—. 青少年のための科学の祭典, ガイドブック. 科学技術館
- 三田直樹・加藤義重(1999):新規微生物共生体による水中のマンガン除去. 日本化学会第76春季年会, 講演予稿集.
- Mita, N., Maruyama, A., Usui, A., Higashihara, T., Hariya, Y., (1994): A growing deposit of hydrous manganese oxide produced by microbial mediation at a hot spring, Japan. *Geochemical Journal*, Vol.28, no.,2, 71-80.
- Schopf, J. W. (1996): Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life. *Science*, Vol. 260, 640-646.
- Usui, A. and Mita, N. (1995): Geochemistry and mineralogy of a modern buserite deposit from a hot spring in Hokkaido, Japan. *Clays and Clay Minerals*, Vol.43, no.1, 116-127.
- MITA Naoki (1999): Welcome to a unique Precambrian Park, the Yunoto-taki Falls—Knowledge of microbial formation of a living manganese ore deposit relates to save earth's environment—.

<受付: 1999年1月14日>