鉱物の微生物学的処理

高 森 隆 勝*

1. は じ め に

最近、複合材料の開発が盛んで、大きな成果が収められており種々の分野で活用されてきており、金属工学におけるその貢献はまことに大きいものがある。一方、生産と資源のリサイクルとは車の両輪のようではなければならない時代に入ってきており、開発における新たな課題が生じてきている。特に、複合材料の場合、そのリサイクルには一般論は通用しないくらいもあると考えられ、それぞれの種類ごとに多角的なアプローチが必要となるであろう。このようなアプローチの一つとして微生物学的な処理も考えに入れておかなければならないものと考えられる。

自然界には、金属と深い関わりをもって生息している微生物の種類は極めて多く、多様な働きをしていることは良く知られているところである。これら微生物の作用のうちの極めて僅かなものが鉱物の処理や水に含まれている無機物の処理に利用されている。微生物を利用するこれらの技術も、まだ緒についたばかりという状態であるといっても過言ではないであろう。

無機物の処理に微生物の機能を最も積極的に利用しているのは、バイオハイドロメタラジの領域である。著者は以前に本会報にその一端を述べる機会が与えられた⁽¹⁾。また、最近他の雑誌⁽²⁾にバイオハイドロメタラジについて簡単な紹介を行った。そこで、本稿ではこれらに述べ得なかった事柄のうちの幾つかについて述べることにする。

先の解説⁽¹⁾では、「微生物による鉱物処理の速度は、微生物の増殖速度と密接に関係している。」と述べ、対数増殖期における若干の事柄について紹介した。これに関連して、本稿では最初に、増殖とそのためのエネルギー消費の関係について概略を述べ、次いで、金属硫化物の微生物学的浸出の挙動、および高温で生育する微生物について若干の説明を行う。ここで取り上げる反応は主として酸化反応

であるので、還元反応に係わる微生物の一例について最後に触れる。

2. 微生物の増殖とエネルギー消費

微生物は、その増殖のために必要なエネルギーや細胞を形成するための原料を外界から獲得する必要がある。その仕方などによって、無機物に係わりをもつ微生物は、4種類に大別される。すなわち、光合成無機栄養生物、化学合成無機栄養生物、嫌気性呼吸従属栄養生物、そして混合栄養生物である。

光合成無機栄養生物として、光のエネルギーを使って炭酸同化を行う緑色植物、すなわち、葉緑素により二酸化炭素を澱粉に光合成して生育している植物は我々に最もなじみの深いものである。微生物としては、紅色硫黄細菌や緑色硫黄細菌など良く知られている。

バイオハイドロメタラジの領域で最も中心的な働きをしている微生物は、先に⁽¹⁾述べたように、*Thiobacillus ferrooxidans* である。この微生物は化学合成無機栄養生物(chemolithotroph)、あるいは化学独立栄養生物(chemoautotroph)と呼ばれる種類に属している。化学合成無機栄養微生物は、酸化され得る無機化合物をエネルギー源とし、二酸化炭素、重炭酸イオン、炭酸イオンを炭素源として有機炭素化合物を合成して増殖している。実験的に微生物を選択的にかつ効率よく培養するために、*Thiobacillus ferrooxidans* の場合には9 K培地が用いられている⁽¹⁾。その組成には全く有機物は含まれていない。

生体内反応でエネルギー伝達の媒介をする重要な化合物はATP(アデノシン三リン酸)であり、生体内反応における脱水素反応で水素原子の受け渡しの役割を果たしている助酵素はビリジヌクレオチド、すなわちNADおよびNADPである。NADは水素受容体すなわち酸化型であり、水素供与体すなわち還元型はNADHと表す。また、NADPが水素を受け取るとNADPH₂となる。

Thiobacillus ferrooxidans は酸性条件下で第一鉄イオンを第二鉄イオンに酸化する。すなわち、この微生物にとってのエネルギー源は第一鉄イオンであるとするのが、最も一般的な理解である。

一方、Ingledew ら⁽³⁾は、菌株は酸性の条件下で成育す

* 北海道大学名誉教授
Microbiological Treatment of Minerals; Takakatsu Takamori (Professor Emeritus, Hokkaido University)

Keywords: biohydrometallurgy, microorganism, growth, electron transport system, thiobacillus ferrooxidans, bacterial leaching, thermophile, sulfate reducing bacterium
1992年3月6日受理

るが、菌体内の pH は 5~6 であり、菌体内外のこの大きな水素イオン濃度差が微生物のエネルギー獲得に大きく寄与しているとする考えを提案している。そこでは、第一鉄イオンより得られた電子が膜を通して細胞内部に送られるのと平行して、液相からプロトン (H^+) と酸素が電子と同一方向に送られる。そして、最終的に電子が酵素によって酸素に渡され、液相から運ばれてきた水素イオンと反応して水が形成される。図 1 にそのモデルを示す。

ここでは、*Thiobacillus ferrooxidans* の増殖のためのエネルギーの問題について、最も一般に理解されているところを簡単に紹介することとする。

式(1)のようにして取り込まれた電子は、電子伝達系と呼ばれる電子の伝達運搬に関与する一連の反応系を経由して最終的に酸素に渡される。

この電子伝達系で、電子は酸化還元電位の低い物質から高い物質へと順次伝達され、その間に自由エネルギーが放出される。この電子伝達系と共役して、無機リン酸 (P_i) と ADP (アデノシン二リン酸) から高エネルギーの ATP を生成する反応、すなわち、酸化的リン酸化反応によって、その放出されたエネルギーは ATP として固定される。

図 1 *Thiobacillus ferrooxidans* の酸化的リン酸化の模式図⁽³⁾。

一般によく知られているミトコンドリアの場合の電子伝達系と ATP の生成について図 2 に示す。

第一鉄イオンの酸化によって得られた電子はビリジヌクレオチドの還元にも用いられる。この反応では、ATP の持つ高エネルギーリン酸結合のエネルギーが消費される。

この $NADPH + H^+$ は ATP とともに二酸化炭素の固定に用いられる。

式(8)で形成された 3-phosphoglyceraldehyde を出発物質として核酸、蛋白、リッピッド、ポリサッカライドなど菌体を構成している種々の有機物が作られる。

Lees ら⁽⁴⁾は、pH 1.5~3 の範囲において、第一鉄イオン酸化によって得られるモル自由エネルギー ΔF (kcal/mol) は、式(9)の関係で表されることを示した。

$$\Delta F = -1.3(7.7 - pH - 0.17) \quad (9)$$

筆者らがよく用いた液相条件である pH 2.3 の場合は、 $\Delta F = -28.5$ kJ/mol となる。ATP の加水分解による標準自由エネルギーは -29.3 kJ/mol⁽⁵⁾ であるから、この値は ATP の 1 mol を合成するために必要なエネルギーに対応した値である。

1 mol の炭素を 100% の効率で固定するために必要なエネルギーを 502.1 kJ⁽⁶⁾ とすると、約 17.6 mol の第一鉄イオンが 1 mol の炭素を固定するために酸化されなければならない。

Silverman ら⁽⁵⁾は *Thiobacillus ferrooxidans* によって炭素を固定するときの自由エネルギーの効率は対数増殖期後期において、20.5% 程度としている。この効率を想定すると、1 mol の炭素を固定するためには約 86 mol の第一鉄

図 2 ミトコンドリアにおける電子伝達系⁽⁵⁾。

イオンが酸化されなければならない。

これらのことから明かなように、増殖のために必要なエネルギーを得るためには、*Thiobacillus ferrooxidans* は多量の鉄を酸化しなければならない。

微生物工学では、微生物の培養において基質消費量に対する生成菌体量の割合を菌体収率という。*Thiobacillus ferrooxidans* の場合に二価鉄イオンの消費量に対する生成菌体量の割合を考えるならば菌体収率はよくない。しかし、増殖単位菌体量当たりの二価鉄イオン酸化量を考えるならば大きな値である。バイオハイドロメタラジの領域では *Thiobacillus ferrooxidans* による二価鉄イオンの酸化を期待する場合が多いから菌体収率が低いことは一応問題にはならないであろう。しかし、平均世代時間(対数増殖期において、菌体数が2倍に増殖するに要する時間 td)は一般には(25~29)ks から 18 ks 程度であり、大腸菌などに比べると遅く比較にならない。これは独立栄養細菌であることによると考えられる。 $td = \ln 2 / \mu$ の関係がある。ここに μ は比増殖速度である。比増殖速度 μ は次式によって定義されている。 $\mu = (1/X) (dX/dt)$ ここに、 X は対数増殖期のある時間 t における菌体濃度である。

反応槽を完全混合槽と仮定すると、平均滞留時間は比増殖速度(μ)の逆数となる。*Thiobacillus ferrooxidans* は固相表面に付着しやすい性質をもっているから、適当な担体を用いることによって菌体が水とともに系から流出するのを防ぎ得る。すなわち、比増殖速度(μ)によって規制される液の平均滞留時間に影響を与えないようになし得ることは注目されるべきことである。一方、増殖速度の速い菌体を得るため遺伝子組み換えの研究も行われており、白鳥ら⁽⁷⁾は、*Thiobacillus ferrooxidans* の遺伝子組み換えに成功しており、その展開が期待されている。

Thiobacillus ferrooxidans は第一鉄イオンを酸化する鉄酸化酵素を持っている。これはこの微生物特有の大切な酵素である。この鉄酸化酵素の他に、硫黄：第二鉄イオン酸化還元酵素(SFORase)があることを杉尾ら⁽⁸⁾は明らかにした。この SFORase は、硫黄を亜硫酸に酸化することと第二鉄イオンを第一鉄イオンに還元することを共役的に触媒している酵素である。このことは、元素硫黄があれば、鉄酸化酵素によって酸化形成された第二鉄イオンは第一鉄イオンに再生還元され、繰り返しエネルギー源として利用され得ることを示すもので、鉄濃度が極めて低い場合でも、硫黄があればこの微生物はエネルギーを得ることができることを示している。また、元素硫黄が、SFORase によって酵素的に酸化されることによって生じた亜硫酸イオンは、非酵素的に金属イオンを還元する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ことが明らかにされた。硫黄がある時に *Thiobacillus ferrooxidans* によって Mn(IV) が還元される機構を図3に示す。

微生物による金属硫化物などの浸出事象は、微生物が増殖のエネルギーを得るために起こるものであるから、その浸出速度は増殖速度に依存している。生体内では種々の物

図3 硫黄があるときの *Thiobacillus ferrooxidans* による Mn(IV) の還元機構⁽⁹⁾。

質の間で絶えず化学反応が起こっており、それぞれの化学反応にはそれぞれ別の酵素が働いている。これは酵素の基質特異性とされているものである。実験室的に合成することが極めて厄介な物質を常温常圧水溶液系で速やかに合成することを可能にする酵素が注目されるのは当然であり、必要とされる物質の合成に関与する酵素を大量に微生物を使って製造するための研究は最近の注目されている傾向である。また、前述のように、微生物体内で起こっている酵素反応の主目的は増殖のためである。この目的による規制から酵素反応を開放し、より合理的にかつ生産目的に対応し得るようにするための研究も進められている。これらは、それぞれの生産に適した酵素の固定とバイオリアクター開発の研究につながっている。

3. 黄銅鉱の微生物による浸出挙動

金属硫化物が微生物によって浸出される機構には大別して間接浸出機構と直接浸出機構の2種類がある。

Thiobacillus ferrooxidans による金属硫化物の浸出において、金属硫化物中に含まれている鉄がこの微生物によって第二鉄イオンに酸化されるとき、この第二鉄イオンは酸性条件下で強い酸化剤として働き金属硫化物が浸出される。すなわち、式(1)により酵素的作用によって生成された第二鉄イオンにより、次式のように非酵素的に金属硫化物が酸化浸出される。

式(10)によって還元された第一鉄イオンは、再び式(1)によって第二鉄イオンに再生酸化され酸化剤として働く。この場合、微生物は金属硫化物の浸出に直接係わらないが、浸出のための酸化剤である第二鉄イオンの生成に貢献している。このような浸出の機構は間接浸出機構と呼ばれている。他の興味あるものとしては、*Aspergillus niger* に代表される *Aspergillus* 属や *Penicillium* 属には錯化剤を生成し細胞外に放出するものがあることが見いだされている。ある金属が鉱物として結晶を構成しているより

も、生成された錯化剤によってその金属イオンのキレート形成した方が、安定であるならば、その金属は鉱物から溶かされることとなる。Groudev ら⁽¹¹⁾は、砂に含まれている鉄の酸化物を *Aspergillus niger* を用いて浸出除去する実験を行い良好な結果を得ている。この微生物は従属栄養細菌であり、彼らはエネルギー源および炭素源として廃糖蜜を用いている。廃糖蜜は産業廃棄物であるが、その使用は地域的に厳しい制約を受けるものであろう。

一方、微生物が直接的に金属硫化物に作用して浸出が行われることも見いだされている。鉱物表面に微生物が密に付着し、影響を受け易い結晶格子が酵素的酸化によって壊され、金属が溶出する。*Thiobacillus ferrooxidans* による合成銅藍 (CuS) の浸出において、酵素阻害剤を加えたものと、加えなかったものについて比較実験を行い、酵素消費量、および Cu^{2+} と SO_4^{2-} 両イオンの生成量を測定し、直接浸出機構を直接的に実証した⁽¹²⁾報告もある。

処理原料としての金属硫化物には、一般に鉄が含まれているから、現実の微生物学的な浸出は、間接浸出機構と直接浸出機構の両者によってその浸出が進行しているものと考えられる。

Thiobacillus ferrooxidans を用い黄銅鉱精鉱について著者ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が行ったいくつかの浸出実験結果に基づいて、浸出の挙動をみることにする。浸出時間の経過とともに浸出液の pH、および浸出液中の銅イオン濃度がどのように変化したかの代表的な例を図 4 と図 5 に示した。pH 変化を示した図 4 で櫛型に変化が示されている部分がある。この櫛型は、約 86 ks 毎に測定された浸出液の pH が先端部の pH (すなわち、pH が上昇している) であり、下端部の pH は、浸出過程で上昇した分だけ硫酸を加えて初期 pH に調整した時の pH 値を示している。すなわち、櫛型を示している部分は水素イオンを消費する反応による浸出過程である。この初期の水素イオンを激しく消費する過程

図 5 黄銅鉱の *Thiobacillus ferrooxidans* による浸出過程における溶出銅イオン濃度の経時変化(各段階の終点で浸出液のみ更新)⁽¹³⁾。

で、図 5 にみられるように、銅イオン濃度は大きく増加している。すなわち、銅イオンを浸出する反応では水素イオンが消費されることを示している。この過程で起こっていると考えられる主な反応を式(11)および式(12)に示す。

微生物による第一鉄イオンの酵素的な酸化と、そこに形成された第二鉄イオンによる S^{2-} の酸化、すなわち間接浸出機構が主となって進行しているものと考えられる。この考えに基づいて黄銅鉱の主な浸出反応を示したものが次式である。

pH の上昇が見られなくなった段階で、浸出液のみを新しくして浸出実験を継続すると pH は徐々に低下し、次いで大きな低下を示している。この間銅イオン濃度の変化は、前段階に比して極めて鈍化しており浸出速度が遅くなっている。この段階では、式(12)によって表面に形成された硫黄が酵素反応によって酸化され硫酸が生成する反応、すなわち、微生物による直接浸出機構による硫黄の酸化が主として進行していると考えられる。この段階での鉄の挙動をみると、前段階で pH の上昇に伴い沈澱した第二鉄が pH の低下に伴って溶解し、時間経過とともに全鉄濃度は大きく増加する傾向を示している。一方、第一鉄イオン濃度は極めて低い値を示していた。これは微生物にとって、硫黄：第二鉄イオン酸化還元酵素の働きが必要とされる条件に合致していたのは興味あるものであった。pH が十分低下した段階で、再び浸出液のみを新しくして浸出実験を続けると、再び水素イオンを激しく消費し銅の浸出速度が高くなる現象が現れ、次いで pH 低下の現象が続いた。これらの現象から、初期には間接浸出機構による浸出が主となって浸出が進行し、その結果、表面に硫黄が生成

図 4 黄銅鉱の *Thiobacillus ferrooxidans* による浸出過程における液相 pH の経時変化(各段階の終点で浸出液のみ更新)⁽¹³⁾。

図6 *Thiobacillus ferrooxidans* 単独による黄銅鉱の浸出過程⁽¹⁴⁾(図7の実験の対照実験)。

されると直接浸出機構による硫黄の浸出が主となるというサイクルで浸出が順次繰り返して進行して行くように考えられる。そこで、硫黄のみをエネルギー源とする *Thiobacillus thiooxidans* を *Thiobacillus ferrooxidans* に共存させ、両微生物の活性が十分高い条件で浸出実験を行ったところ、pH 変動は殆ど無く、銅の浸出はより良く進行することが明らかとなった。図6は *Thiobacillus ferrooxidans* 単独での対照実験結果である。図7は両微生物共存の場合の浸出実験結果である。

Thiobacillus ferrooxidans による黄鉄鉱の浸出過程における鉱物表面の時間的変化をX線電子分光分析によって調べた結果、浸出の初期において、鉱物表面に硫黄が形成されることが認められた⁽¹⁵⁾。

4. 好熱好酸性細菌

浸出速度をさらに向上させるためには、高温で活発な酸化反応を行い得る微生物が望ましい。このような微生物として注目されているのは、*Sulfolobus* 属の微生物である。*Sulfolobus acidocaldarius* は、pH 0.9~5.8(至適 pH 2~3)、温度 328~358 K(至適温度 343~348 K)で元素硫黄を硫酸に酸化し得ることが見出だされている⁽¹⁶⁾。この微生物は全鉄濃度 1~200 ppm で、その50%が第一鉄イオンで

図7 *Thiobacillus ferrooxidans* と *Thiobacillus thiooxidans* との共存による黄銅鉱の浸出過程⁽¹⁴⁾。

ある酸性の温泉で見出だされた⁽¹⁷⁾。この微生物は 353~358 K で第一鉄イオンを酸化し得る。しかし、363 K では酸化し得なくなる。また、第一鉄イオンを酸化し得るだけでなく、黄鉄鉱(FeS_2)、黄銅鉱(CuFeS_2)、輝水鉛鉱(MoS_2)などをも酸化し得る。

卵白で我々が経験しているように、温度が高いと蛋白の凝固が起こるのではなかろうかとの懸念を抱く。蛋白の定性試験の一つに蛋白の熱凝固反応を利用するものがある。そのときの加熱温度は 333~353 K とされている⁽¹⁸⁾。これより考えても好熱性細菌が生産する蛋白質は特異であり熱安定性が高いものである。特に、好熱性細菌の耐熱性酵素は注目を集めている。他の細胞成分も熱安定性が高い。耐熱性のある成分は同時に物理的刺激また化学的刺激に対して高い耐性を持っており、生体膜は浸透圧に対して耐性があるといわれているのは興味深いところである。

Sulfolobus は、また、モリブデン耐性が高いといわれており、*Thiobacillus ferrooxidans* はモリブデン耐性にはやや問題があることを勘案すると、モリブデンの浸出には特に注目される。

Sulfolobus は好熱性、好酸性、好気性で独立栄養的に増殖するが、この独立栄養的増殖は少量のイースト・エクストラクトの添加によって促進される。このような性質とも関連し、石炭の脱硫では、この *Sulfolobus* が無機・有機両

硫黄除去の可能性を示すものと期待されている⁽¹⁹⁾。

5. 微生物による金属硫化物の形成

最近面白い出来事にぶつかった。ゴルフ場の造成工事の途中で酸性の水を生じ、工事が中断され原因の究明がなされた。ゴルフ場の水捌けを良くするため砂を多量に使用する工事の段階でこれが生じたので、使用した砂を調べたところ、その中に硫化鉄が含まれていることが明らかとなった。海生の砂の場合に良く見られる現象であるとのことであった。

北アメリカの蒸発岩鉱床と呼ばれているものに、岩塩、石膏、硫黄などの鉱床がある。大洋からほとんど遮断された湾状の浅海で蒸発が進行するに従って新しい海水が流入し、塩分が蓄積されて行き、非常に大規模な蒸発岩鉱床が生ずると考えられている(海水を蒸発させると、方解石、石膏、岩塩、カリ岩塩の順に晶出する)。このようにして形成された岩塩の鉱体のうち地表に現れた鉱体では、地下水が岩塩を溶脱し溶けにくい石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)が残る。湿地帯や酸素に乏しい地下水に生息しているある種のバクテリアは、石膏が地下水に溶解して生じた硫酸イオンを硫化水素に変える。この硫化水素は、一部は地表に逸散するが、一部は酸化されて自然硫黄と呼ばれる単体の硫黄となる。蒸発岩鉱床での硫黄の鉱床の形成はこのように考えられている。また、この硫化水素は第一鉄イオンと敏感に反応し、極めて低い鉄濃度でも硫化鉄を形成する。これは次のような簡単な計算でも明らかである。

$$[\text{Fe}^{2+}][\text{S}^{2-}] = 1 \times 10^{-19} \quad (14)$$

$$[\text{HS}^-][\text{H}^+]/[\text{H}_2\text{S}] = 1.1 \times 10^{-7} \quad (15)$$

$$[\text{S}^{2-}][\text{H}^+]/[\text{HS}^-] = 1 \times 10^{-15} \quad (16)$$

であるから、次式の関係がある。

$$[\text{Fe}^{2+}][\text{H}_2\text{S}]/[\text{H}^+]^2 = 9.1 \times 10^2 \quad (17)$$

pH 7 の水中に 10^{-2} mol/m^3 の硫化水素が含まれているときは、その水に第一鉄イオンが $9.1 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3$ あれば、硫化鉄の沈澱が出現し得ることを示している。CdS, CuS, PbS, ZnS, NiS, SnS などの溶解度積は、FeS よりもはるかに小さい値である。Baas Becking Geobiological Laboratory⁽¹⁾では、微生物の作用による硫化鉱物鉱床の生成について研究が行われていた。

このような鉱床形成に関与している微生物は硫酸還元菌である。この微生物は嫌気性呼吸従属栄養生物に属している。すなわち、酸素の存在する環境では生息できず、生活活動に必要なエネルギーを酸素を使わずに得ている。また、栄養素として有機物質を必要とし、これを基にして生育に必要な他の有機物を再合成して生命活動を行っている。硫酸還元菌のエネルギー源は乳酸、ピルビン酸などの有機物が主なものであり、エネルギー源から得た電子の受容体として酸素を用いることができず、硫酸イオンを電子受容体としている微生物である。温度 298~308 K、中性

表 1 培地組成⁽²⁰⁾。

構成成分	(kg/m ³)
K ₂ HPO ₄	0.5
NH ₄ Cl	1.0
NaCl	0.824
FeCl ₂ ·nH ₂ O	0.006
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.0825
チオグリコール酸	0.01
L-アスコルビン酸	0.01
酵母エキス	0.5
乳酸ナトリウム	3.0
CaSO ₄ ·2H ₂ O	2.3
蒸留水	1.0 m ³

pH 付近で良く生育する。硫酸還元菌の培養に用いる代表的な培地組成を表 1 に示す。

乳酸を用いた場合の硫酸還元反応は次式のように示される。

著者ら⁽²⁰⁾は湖沼の底泥から硫酸還元菌を採取して実験に用いた。そこには多くの有機物があり、かつ嫌気的な環境である。自然界において、特に鉱床形成に至までの働きをしている硫酸還元菌のエネルギー源および炭素源となる有機物はどのようなものであろうか。硫酸還元菌が生息している周辺にある石油鉱床がまず考えられる。この場合、他の従属栄養細菌が、そこから生ずる炭化水素を硫酸還元菌が用い得るような有機化合物に変換している。その働きに依存して硫酸還元菌が生育していると考えられている。一方、メタンを還元力の源として用い得る硫酸還元菌も報告⁽²¹⁾されている。

硫酸イオンが硫化水素にまで還元されるのには、幾つかの生物化学的反応が連続して進行していると考えられている。

硫酸イオンは還元される前に、まず ATP sulfurylase という酵素の作用の基で、次式のようにエネルギーを得なければならない。

ここに APS は adenosine 5'-sulfatophosphate であり、PP は無機の pyrophosphate である。

この反応で生じた PP は pyrophosphatase という酵素の作用で、次式のように加水分解されるので、式(19)の反応は右方向に進行する。

このようにして生成された APS は、APS reductase の酵素作用の基で直接亜硫酸イオンに還元される。

これに続く硫化水素への還元過程については、まだ明確にはされていないが、実験結果より、次のような過程が考えられている。

bisulfite reductase の酵素作用の基で、trithionate が生

成し、

trithionate reductase の酵素作用の基で、thiosulfate が生成し、

thiosulfate reductase の酵素作用の基で、 HS^- が生成する。

硫酸還元菌としては、*Desulfovibrio desulfuricans* および *Desulfovibrio vulgaris* などが、一般に良く知られている。

6. お わ り に

膨大な数の微生物が自然界で種々の営みを行っており、我々の生存に必要な元素の循環も微生物に依存している。これら微生物の中に無機化合物の分解、あるいは無機化合物の生成に寄与しているものも少なくない。これらのうち、二、三の微生物を取り上げて、その性質の若干について述べた。それぞれは金属との関わりをもった微生物であるが、金属工学の立場からするならば殆ど関係の無い事柄であったと考えられる。しかし、金属工学に近い分野の課題について微生物学的なアプローチが種々の面からなされている。我々の分野の文献に報告された一、二の例を挙げるならば次のようなものもある。金属化合物を純金属に還元するための作因としての微生物代謝産物という研究⁽²²⁾があり、一例として、揮発性の代謝産物による金、白金、パラジウムの高純度元素金属粒子の生成について述べている。また生体高分子による銅の biocorrosion の研究⁽²³⁾もある。

ここでは、著者の関心の深い領域の問題について、若干の紹介を行った。先にも述べたように、複合材料のリサイクルのための処理技術は一般に難しい問題を含んでいると考えられる。複合材料の性能が産業界で十分活用されるためには、リサイクルのための処理技術が確立されていることが必要であるという時代が近い将来に来到と考えられる。その処理技術対策をたてるための一つのアプローチとして微生物学的処理も考慮される必要があろう。そのような場合には、著者がここに紹介した立場はやや近いところにあるのではなかろうかと考えられる。

微生物学的処理など微生物が関与する問題に関心をもつ

研究者・技術者が増え、新たな分野で新たな進展が生ずることを期待するものである。

文 献

- (1) 高森隆勝：日本金属学会会報，**24**(1985)，257.
- (2) 高森隆勝：金属，**アグネ**，**61**，No. 11 (1991)，53.
- (3) W. J. Ingledew, J. C. Cox and P. J. Halling: *FEMS Microbiol. Lett.*, **2**(1977)，193.
- (4) H. Lees, S. C. Kwok and I. Suzuki: *Can. J. Microbiol.*, **15**(1969)，43.
- (5) 合葉修一，永井史郎：生物化学工学——反応速度論——，科学技术社，(1978)，21.
- (6) M. P. Silverman and D. G. Landgren: *J. Bacteriol.*, **78**(1959)，326.
- (7) 白鳥寿一，竹島聡之，井上千弘，草野友延：日本農芸化学会大会講演要旨，(1991)，332.
- (8) T. Sugio, T. Katagiri, K. Inagaki and T. Tano: *Biochim. Biophys. Acta*, **973**(1989)，250.
- (9) T. Sugio, Y. Tsujita, K. Hirayama, K. Inagaki and T. Tano: *Agric. Biol. Chem.*, **52**(1988)，185.
- (10) T. Sugio, Y. Tsujita, T. Katagiri, K. Inagaki and T. Tano: *J. Bacteriol.*, **170**(1988)，5956.
- (11) S. N. Groudev, F. N. Genchev, V. I. Groudeva, E. C. Petrov and D. J. Mochev: *Recent Progress in Biohydrometallurgy*, Ed. by G. Rossi and A. E. Torma, Associazione Mineraria Sarada, Italy, (1983)，441.
- (12) P. A. D. Rickard and D. G. Vanselow: *Can. J. Microbiol.*, **24**(1978) 998.
- (13) 高森隆勝，笹木圭子，恒川昌美，平島 剛：資源・素材学会誌，**106**(1990)，173.
- (14) 高森隆勝，山本琢也，笹木圭子，恒川昌美，平島 剛：資源・素材学会誌，**106**(1990)，611.
- (15) 金野英隆，笹木圭子，恒川昌美，高森隆勝，古市隆三郎：分析化学，**40**(1991)，608.
- (16) T. D. Brock, K. M. Brock, R. T. Belly and R. L. Weiss: *Arch. Mikrobiol.*, **84**(1972)，54.
- (17) T. D. Brock, S. Cook, S. Petersen and J. L. Messer: *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **40**(1976)，493.
- (18) 農芸化学実験書，第二巻，京都大学農学部農芸化学教室編，産業図書，(1984)，55.
- (19) F. Kargi and J. M. Robinson: *Biotechnol. Bioeng.*, **26**(1984)，687.
- (20) 岡村明彦，森田博志，鶴井雅夫，高森隆勝：北海道大学工学部研究報告，(1983)，No. 115, 1.
- (21) A. T. Panganiban, T. E. Patt, W. Hart and R. S. Hanson: *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**(1979)，303.
- (22) G. J. Olson, F. E. Brinkman and K. L. Jewett: *Biotech. in Minerals and Metal Processing*, Ed. B. J. Scheiner, F. M. Doyle and S. K. Kawatora, Society of Mining Engineers, Inc. Littleton, Colorado, (1989)，39.
- (23) A. K. Gianotto, J. G. Jolley, G. G. Geesey, P. L. Wichlacz, M. R. Hankins and R. B. Wright: *ibid.*, 45.