

鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

序論

早稲田大学本庄高等学院の位置する埼玉県本庄市大久保山、そこで赤褐色に変色した小川を発見した。先行論文により調査したところ、こうした川は赤川と呼ばれ、そこに生息する鉄バクテリアという微生物が原因となっていることが分かった。そこで、まずは基礎データの収集を目的として、小川の水に焦点をあてて溶融元素等の分析を行った。また、周辺の地理に関する文献調査を行ったところ、大久保山の小川に鉄バクテリアが生息している理由を明らかにすることができた。さらに、生息している鉄バクテリアについても電子顕微鏡を用いた観察を行うと同時に、エネルギー分散型X線分析装置による組成分析によってそのバクテリアに見られる特徴を調査し、それらの結果を踏まえた上で種の同定を試みた。その後、文献調査の際に鉄バクテリアの作る赤褐色の沈殿物は水酸化鉄(Ⅲ)であるとの記載があったことと、組成分析の際に鉄の存在が確認できたことから、その鉄

を回収するための実験を行った。その結果、鉄を得ることに成功し、鉄バクテリアの作る沈殿物から鉄を得る際の化学反応式と熱化学方程式を立てることができた。このことをもとに、資源の回収を視野に入れて社会における鉄バクテリアの利用法について考察する。本論文は、今後の鉄バクテリアの研究における基礎資料となると同時に、環境問題を踏まえた上で、バクテリアを利用した資源の回収技術への応用につながることを期待するものである。

小川の調査

2.1 小川の位置と様子

早稲田大学本庄キャンパスは、埼玉県本庄市に位置する浅見丘陵と呼ばれる丘陵地帯に約86万 m^2 にわたって広がっている。早稲田大学本庄高等学院は、そうした広大なキャンパス内の大久保山と呼ばれる区画に位置している。大久保山を散策している際に、図2.1-1¹⁾に赤くプロットした地点にて



図2.1-1 早稲田大学本庄キャンパス内における鉄バクテリアの生息する小川の位置

鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

赤褐色の小川を発見した。この地点は早稲田大学本庄高等学院が所有する畑となっており、作物の栽培が行われている場所である。その畑の東側には畑に散布するための水が引かれている淡水の透き通った小川が流れている。

図2.1-2及び図2.1-3は発見した赤褐色の小川の様子を撮影したものである。2つの写真から赤褐色の水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿が多量に堆積していることが分かる。図2.1-2に見える水の表面の膜は鉄の酸化皮膜であり、溶存鉄が空気にふれて酸化したことによって生じたものと考えられる。図2.1-3に見られるように、鉄バクテリアの集落も所々に形



図2.1-2 赤褐色の小川



図2.1-3 鉄バクテリアの集落

成されている。また、図2.1-4に示すように、赤褐色の小川は畑の東側を流れている淡水の透き通った小川に合流しており、この合流地点の先に鉄バクテリアの存在は認められない。これは合流したことで溶存鉄の濃度が低下したためと考えられる。透き通った小川が山の頂上付近にその源泉をもっているのに対して、この赤褐色の小川は図2.1-5に示すように地下から湧き出している。水が湧き出している付近では赤褐色の沈殿があまり見られないことから、地上に現れて酸素と触れたことにより鉄バクテリアが活動を始めているものと考えられる。またこのことから、生息している鉄バクテリアは好気性であるといえる。尚、この赤褐色の川の全長は30mほどであり、川幅は50cmほどである。



図2.1-4 赤褐色の小川と通常の川の合流地点



図2.1-5 小川の水の湧き出し口

2.2 水の分析（溶融元素・溶存酸素・pH・電気伝導率）

早稲田大学環境保全センターにおいて、赤褐色の小川の水に含まれる溶融元素をICP発光分光分析とイオンクロマトグラフィーによって分析した。参考値として水道基準の値と共に、その結果を表2.2-1と表2.2-2に示す。尚、表中の「N.D.」という記載は濃度がほぼ0.0000であることを意味しており、またデータの有効数字は小数点以下一桁までである。それぞれの表から、カドミウムや鉛といった有害金属は少ない一方で、水道基準の17.5倍の鉄と142倍ものマンガンが含まれていることがいえる。鉄は、鉄バクテリアの作用によってその大半が水酸化鉄（Ⅲ）の形で沈殿しているため、地上に現れる前の原水にはより多くの溶存鉄が含まれていることが考えられる。

さらに、溶存酸素計DO-5509（ケニス株式会社）を用いて小川の水の溶存酸素濃度の測定を行った結果、溶存酸素濃度は9.6mg/lであり、そのときの小川の水温は19.0℃であった。水温が19.0℃のときの水道水の溶存酸素濃度は9.9mg/lであったことから、赤褐色の小川の溶存酸素濃度に関しては水道水と比べて大きな違いはないといえる。このことも、生息している鉄バクテリアが好気性である

ことを示している。尚、溶存酸素計DO-5509の仕様は以下の通りである。

測定範囲：0～20mg/l

精度：±0.4mg/l（校正後23.5℃にて）

分解能：0.1mg/l

温度補正：0～40℃ 自動補正

使用環境：0～50℃ 80%RH以下

また、水質検査器ウォーターテスト（ケニス株式会社）を用いてpHと電気伝導率を測定した結果、pHは6.2、電気伝導率は530μSであった。pHが6.2という値を示したことは、鉄バクテリアが弱酸性の環境で生育するという八木正一氏の報告²や矢木修身氏の報告³等に一致している。アルカリ性の条件下では、鉄が容易に自然酸化されてしまい鉄バクテリアが利用しにくくなるため、弱酸性の環境が適しているのである。小川の水の電気伝導率の530μSという値について、水温が19.0℃のときの水道水の導電率は398μSであったことから、小川の水は溶け込んでいる多量のイオンの影響で導電率が高くなっていると考えられる。尚、水質検査器ウォーターテストの仕様は表2.2-3の通りである。

表2.2-1 ICP発光分光分析による赤褐色の小川の水の分析結果[p.p.m]

元素	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
小川の水	0.3242	N. D.	0.0146	0.0063	5.248	7.109	N. D.	N. D.
水道基準	0.2	0.01	0.05	1.0	0.3	0.05	0.01	1.0

表2.2-2 イオンクロマトグラフィーによる赤褐色の小川の水の分析結果[p.p.m]

元素	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	NO ₃	SO ₄
小川の水	5.976	0.506	9.081	25.065	0.020	4.801	0.494	2.783
水道基準	200	—	300（硬度）		0.8	200	10	—

鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

表2.2-3 水質検査器ウォーターテストの仕様

	pH	導電率	水温
測定範囲	0.0~14.0 pH	0~1999 μ S	060 $^{\circ}$ C
	pH	導電率	水温
検出単位	0.1 pH	1 μ S	0.1 $^{\circ}$ C
精度	\pm 0.2 pH	\pm 2%F.S	\pm 1 $^{\circ}$ C

2.3 水に高濃度の鉄やマンガンが含まれる地形的理由及び歴史的事実

2.2の赤褐色の小川の水に含まれる溶融元素の分析の結果で示したように、赤褐色の小川の水には高濃度の鉄やマンガンが含まれている。これは小川の位置する丘陵地帯の地形が大きく影響しているものと考えられる。図2.3-1⁴の赤く囲まれた部分を見ると分かるように、小川が流れている地点は他の地点よりも標高が低くなっている。そのため雨が降ると、地中にしみ込んだ雨水は地中に存在する鉄やマンガンを溶かし、この地点に集まるのである。また、図2.3-2⁵に示すように、この地点からは平安時代後期の製鉄炉址も複数発見されている。雨水に溶けた鉄が集まるために土壤に高濃度の鉄が含まれるという地形的特徴をもったこの地点で、平安時代には鉄の生産が行われていたようだ。

そもそも埼玉県本庄市では、現在は行われていないものの、古くは鉄の採掘・生産が行われていたようである。『日本歴史地名体系第一巻 埼玉県の地名』（有限会社平凡社出版センター）を紐解くと、本庄市の地名にその名残があることが分かる。見玉町の金屋や上里町の高久保などがそれである。また、神川町の金鑽神社は金属や鉱山の神である金山彦尊を祀っており、その御霊代は火鑽金⁶である。この社名の「金鑽」は「金砂」から転じたものと考えられており、金砂は砂鉄を意味することから、土壤に存在している砂鉄を採掘して炉と鞆

を用いて鉄を生産する「たたら製鉄」のような事業が行われていたことが想像できる。以上のことから、低い標高と本庄市の鉄を多く含んだ土壤という条件が重なって、小川の水に高濃度の鉄が含まれるようになり、鉄バクテリアの生息に適する環境が作られたといえる。

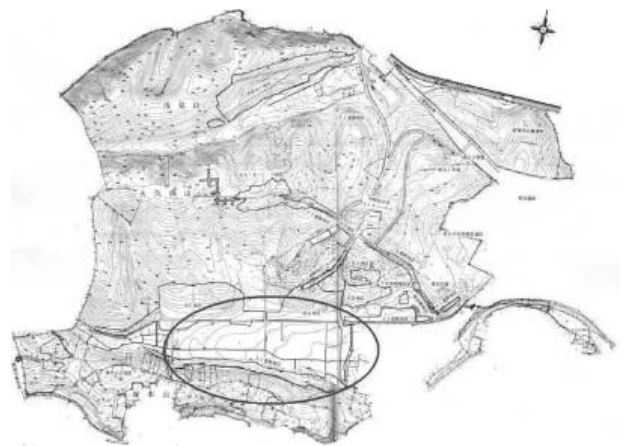


図2.3-1 大久保山地形図

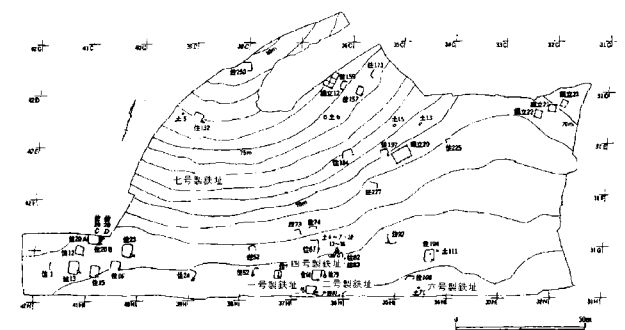


図2.3-2 平安時代後期の製鉄炉跡

生息する鉄細菌の分析

3.1 走査型電子顕微鏡による観察

小川の水を汲み、2日ほど置いた後、底に生じた茶褐色の沈殿物をこまごめピペットで吸い取り、ドライヤーを用いて乾燥させて、白金を蒸着させた後に早稲田大学本庄高等学院の走査型電子顕微鏡で観察した。その結果、図3.1-1に示す、幅が一定で真っ直ぐな糸状の形態を持つ鉄細菌の存在が確認された。ただし、正確には写真は鉄細菌の本体細胞ではなく、それが作り出した鞘であると考えられる。写真から計測すると、この鉄細菌（鞘）の長さは $91.8\mu\text{m}$ 、幅は $1.8\mu\text{m}$ である。

図3.1-2,3は小川の底の赤褐色の沈殿物を自然乾燥させ、独立行政法人物質・材料研究機構の走査型電子顕微鏡で観察したものである。鉄細菌のからだに付着している水酸化鉄(III)に着目すると、直径 $0.3\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$ の球形を成している様子が分かる。図3.1-3に見られるように、この1つ1つの球が合わさって大きな塊が形成されていくようだ。また、表面をよく観察すると、この球も細かい粒の集まりであることが分かる。八木正一氏⁷がMouchet氏と高井雄氏の研究を引用して説明しているが、鉄を酸化凝集するのは鞘、柄、皮膜など、鉄細菌の細胞外ポリマーであるとされている。このような球形の状態は、そうした細

胞外ポリマーの触媒が核となってその周囲に水酸化鉄(III)が集凝されたためにできたと考えることができる。

3.2 エネルギー分散型X線分析装置による組成分析

独立行政法人物質・材料研究機構にて鉄細菌の元素分析像をエネルギー分散型X線分析装置により撮影した。その結果を図3.2-2～図3.2-5に示す。図3.2-1は試料として用いた鉄細菌（の鞘）及び付着物の分布を示している。図3.2-1と図3.2-2、図3.2-3を比較すると、それぞれの分布が一致していることから、鉄細菌とその付着物が鉄と酸素を取り込んでいることが分かる。酸素の分布が付着物を含めた試料全体の分布と一致したことは、3.1で述べた細胞外ポリマーが鉄の酸化凝集を行っていることの一つの証拠といえる。一方で、図3.2-4の炭素の分布や図3.2-5のアルミニウムの分布と鉄細菌の分布に相関は見られなかった。反応している部分は、サンプルを載せた台やサンプルを貼り付けたテープの成分による影響と考えられる。鉄細菌のからだは炭素であるが、その分布が鉄細菌の分布と一致しなかったことについて、これは鉄細菌のからだ小さいために炭素の含有量も微小であったことが理由として挙げられる。

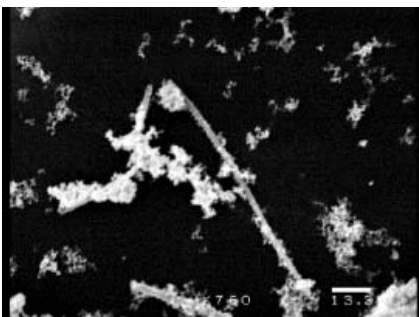


図3.1-1 発見した鉄細菌（鞘）

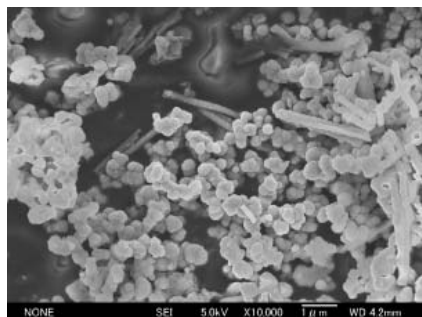
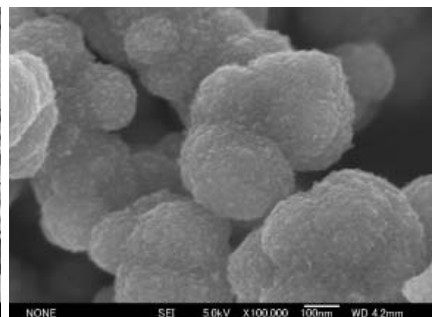


図3.1-2(左),3(右) バクテリアのからだの付着物



鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

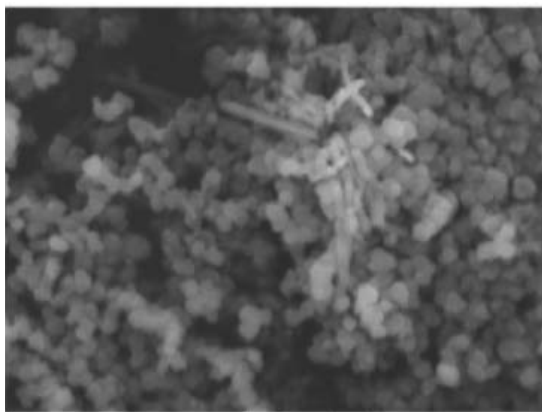


図3.2-1 鉄バクテリアと付着物の分布

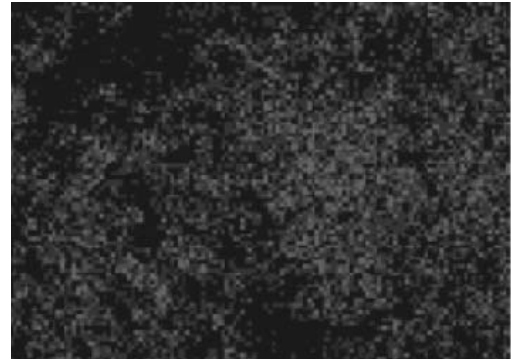


図3.2-2 鉄の分布



図3.2-4 炭素の分布



図3.2-5 アルミニウムの分布



図3.2-3 酸素の分布

さらに、独立行政法人物質・材料研究機構にてエネルギー分散型X線分析装置によって、鉄バクテリアの定性分析を行った。その結果を図3.2-6に示す。先ほどの元素分析像も考慮すると、アルミニウムや炭素は台やテープの成分であると考えられるため、やはり鉄と酸素の存在が確認できる。図3.2-6には珪素の存在も見られるが、Mouchet氏の報告⁸に鉄バクテリアの除鉄は高濃度の珪素を含む地下水に適しているとの記載があることから、珪素も鉄バクテリアが体内に取り込んでいる物質であると考えられる。一般にバクテリアは珪酸塩などの栄養塩を利用して繁殖することから、鉄バクテリアも他のバクテリアと同様に珪素を体内に取り込んでいると考えられる。また、鉄バクテリアの中には鉄だけではなくマンガンも体内に取り込む種があるが、分析の結果マンガンは検出されなかつ

たため、分析の試料として用いた大久保山の小川に生息していた鉄バクテリアは鉄のみを酸化する種であったことが言える。

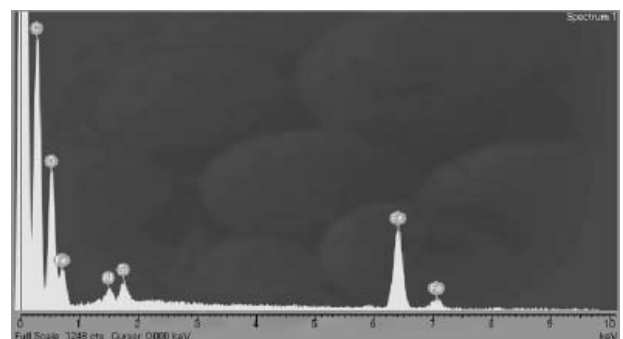


図3.2-6 鉄バクテリア及び付着物の定性分析の結果

鉄バクテリアの作る沈殿物からの鉄の精製実験

4.1 ガスバーナーによる加熱実験

3.2で行った分析の結果から、鉄バクテリアが小川の水に含まれる高濃度の鉄をからだに吸着していることが分かった。そこで、この鉄を回収するために沈殿物をガスバーナーで加熱する実験を行った。4.1.1では沈殿物に炭素を混ぜたものと混ぜていないものをそれぞれ加熱し、炭素の有無による沈殿物の化学変化の違いを調べる実験について述べる。4.1.2では、質量の異なる沈殿物を入れた試験管を用意し、それぞれの試験管を加熱することで、質量の違いによる沈殿物の化学変化の違いを調べる実験について述べる。

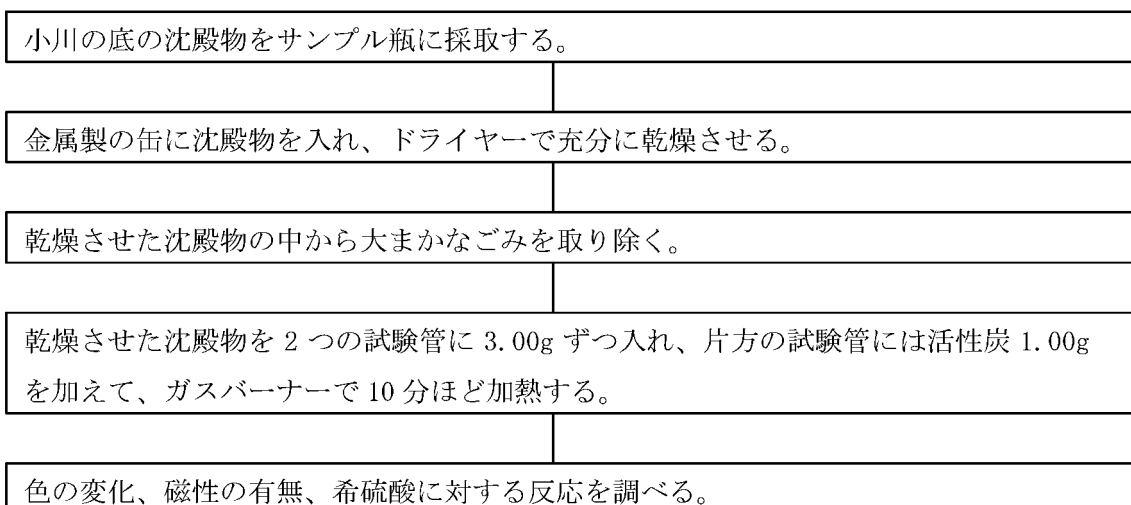
4.1.1 炭素の有無による沈殿物の化学変化の比較実験

小川の底の沈殿物を3.00g、活性炭を1.00g入れた試験管（試験管Aとおく）と、小川の底の沈殿物のみを3.00g入れた試験管（試験管Bとおく）を用意し、それぞれをガスバーナーで加熱して化学変化

の違いを比較した。小川の底の沈殿物はドライヤーで乾燥させてから実験に用いた。この実験の手順はFlowchart4.1.1-1に示す。加熱の際に生じた水が試験管の内部の物質と共に試験管から噴き出すことがあるので、急な加熱は避けた方が良い。

実験の結果は表4.1.1-1に示した通りである。試験管A内の物質は炭素が混在しているため過熱前は黒色であったが、加熱後も変化は見られなかった。また、試験管B内の物質は、加熱前は乾燥した沈殿物の色である茶色であったが、加熱後も試験管Aと同様に変化はなかった。これに対して、加熱後には、試験管A、B共に加熱前にはなかった磁性をもつようになった。しかし、どちらも希硫酸に対する反応は示さなかった。尚、加熱した際には、どちらの試験管内の沈殿物からも水が生じていた。この実験結果を考慮すると、以上の変化は沈殿物そのものの変化であって、炭素は反応に影響していないといえる。そこで、沈殿物自体の化学反応をより詳しく調べるために、炭素は混ぜずに質量の違いによって沈殿物がどのように変化するかを調べる4.1.2の比較実験を行った。

Flowchart4.1.1-1 炭素の有無による沈殿物の変化の比較実験の手順



鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

表4.1.1-1 炭素の有無による沈殿物の変化の比較実験の結果

	試験管A	試験管B
加熱前の色	黒色	茶色
加熱後の色	黒色	茶色
磁性の有無	有	有
希硫酸に対する反応	無	無

4.1.2 質量の違いによる沈殿物の化学変化の比較実験

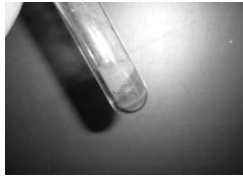
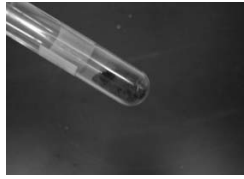
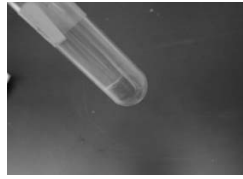
炭素を混ぜずに、乾燥させた沈殿物3.00g、1.00g、0.25gを量り取り、それぞれを試験管に入れた。(順に、試験管C、試験管D、試験管Eとおく)それぞれの試験管を4.1.1と同様にガスバーナーで加熱して、色の変化、磁性の有無、希硫酸に対する反応を調べた。

実験の結果は表4.1.2-1に示す。質量に応じて、上部が茶色で下部が黒色、全体が黒色、全体が茶色の3種類の物質を得た。3種類の物質とも磁性を持っていたが、希硫酸に対する反応は見られなかった。4.1.1と同様に加熱した際には、どの試験管

内の沈殿物からも水が生じていた。

反応の際に水が生じていたことから、沈殿していた水酸化鉄(Ⅲ)が熱分解されて何らかの酸化鉄が生じたものと考えられる。『岩波理化学辞典第5版』(長倉三郎、井口洋夫、江沢洋、岩村秀、佐藤文隆、久保亮五)により、磁性を持つことと希硫酸に対する反応が無いことから酸化鉄(Ⅲ)であると判断し、Formula1の化学反応式を立てた。酸化鉄(Ⅲ)には加熱時の条件によって色が変化する性質がある。試験管Dと試験管Eにおいて色の違いが生まれた原因は、試験管内の沈殿物の質量に対する相対的な酸素の量の違いによるものと考えられる。また、試験管Cで上部が茶色くなり下部が

表4.1.2-1 質量の違いによる沈殿物の化学変化の比較実験の結果

	試験管C	試験管D	試験管E
加熱前の色	茶色	茶色	茶色
加熱後の色	上部：茶色 下部：黒色	黒色	茶色
磁性	有	有	有
希硫酸に対する反応	無	無	無
写真			

黒くなった理由については、上部は酸素に触れていた一方で下部が触れていなかったことが挙げられる。4.1.1の試験管Bと4.1.2の試験管Cは試験管内の沈殿物の質量が3.00で等しいにも関わらず色の変化の点において異なる結果が得られた。どちらの試験管でも相対的な酸素量は等しいと考えられるから、この違いは加熱時のガスバーナーの炎の温度の違いによると考えられる。

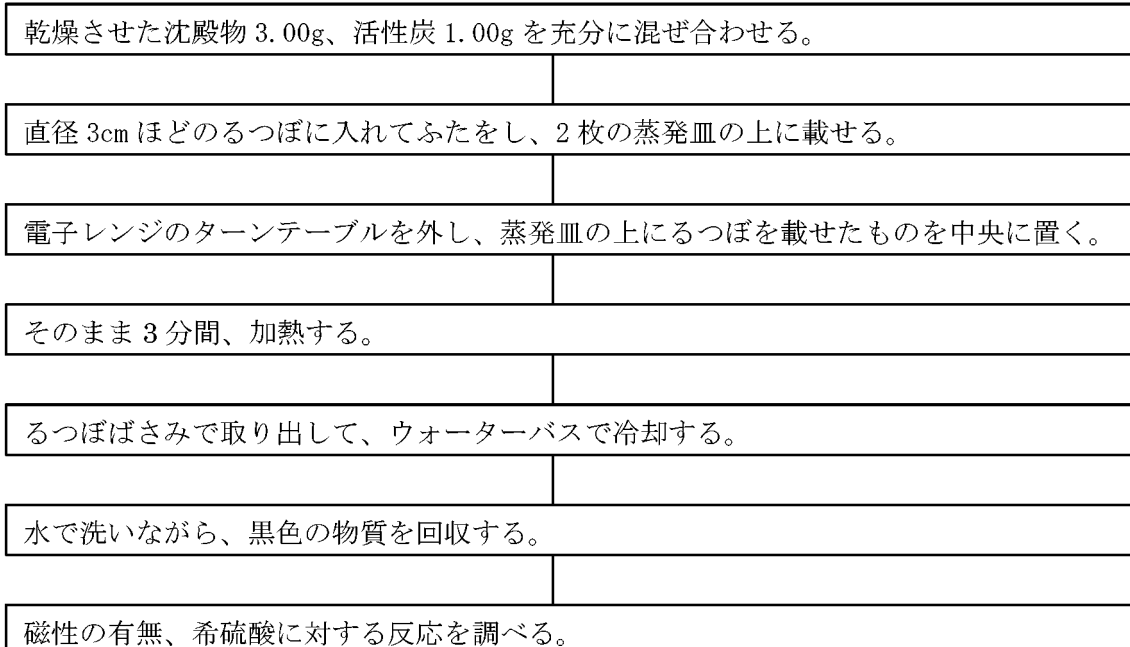
4.2 電子レンジによる加熱実験

次に炭素を混ぜて電子レンジにより沈殿物を加熱する実験を行った。これは杉原和男氏の瞬間「たたら法」⁹を応用したものである。たたら法とは、鞆を使い木炭の熱によって砂鉄を銑鉄に還元するという伝統的な製鉄の手法である。瞬間「たたら法」は電子レンジを用いることでこのたたら法と同じように、酸化鉄の還元を実現している。この瞬間「たたら法」を鉄バクテリアの作り出した水酸化鉄(Ⅲ)から鉄を得る目的で応用した。この

実験の手順はFlowchart4.2-1に示す。また、実験で使用した電子レンジの仕様は表4.2-1に示す。この実験では、加熱された炭素がるつぼから噴出することや、電子レンジの内部が高温になるために内部が焦げたり扉が変形したりすることがある。また、内部で火花が散って電子レンジが壊れることがあるので十分に注意が必要である。実験を行う場合は、専用に電子レンジを購入するか廃棄する予定のものを使うことを勧める。

実験の結果、図4.2-1に示す物質が得られた。磁性を持ち希硫酸に溶けて水素を発生したことから、この物質の主成分は鉄であると考えられる。構成元素を調べるために、独立行政法人物質・材料研究機構で、エネルギー分散型X線分析装置を用いてこの物質の定性分析を行った。この結果は図4.2-1に示す。グラフからは、やはり鉄の極めて大きなピークが見られる。カルシウムと珪素のピークも見られるが、これは水に溶けていたものが沈殿して混入したものと考えられる。尚、アルミニウム

Flowchart4.2-1 電子レンジによる加熱実験の手順



鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

は資料を載せた台の成分である。

電子レンジによる加熱実験で得られた物質が鉄であると判断できることから、この結果をもとに化学反応式を考える。4.1.2のFormula1を考慮すると、電子レンジの熱でまず水酸化鉄(Ⅲ)が熱分解されて酸化鉄(Ⅲ)になり、これがFormula2の反応によって生じた一酸化炭素で還元されてFormula3に示すように鉄が生じたといえる。

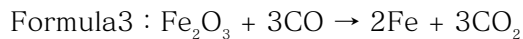
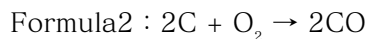


表4.2-1 電子レンジの仕様

名称	RE-T13-W-5P
メーカー	SHARP
定格電圧	100V
定格周波数	50Hz
定格消費電力	1270W
定格高周波出力	あたため 700W/解凍 200W 相当
発振周波数	2450MHz
外形寸法	幅 460mm/奥行 368mm/高さ 275mm
加熱室有効寸法	幅 300mm/奥行 335mm/高さ 175mm



図4.2-1 電子レンジによる加熱で得られた物質

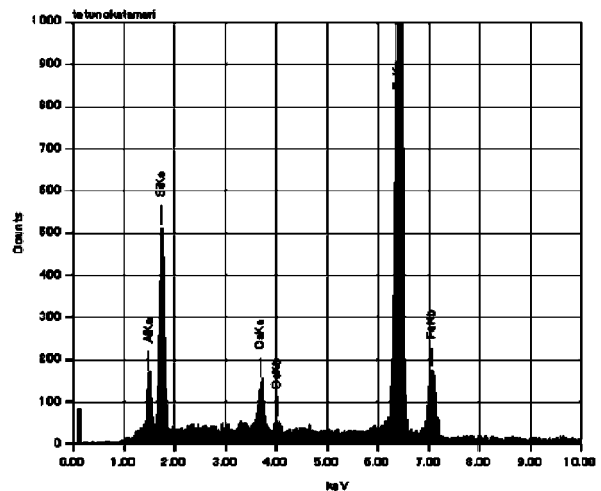
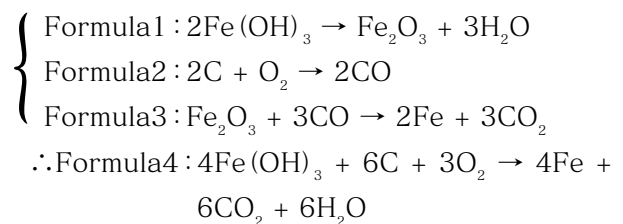


図4.2-2 実験で得られた物質の組成分析の結果

4.3実験から得られる化学反応式及び熱化学方程式

4.3.1化学反応式

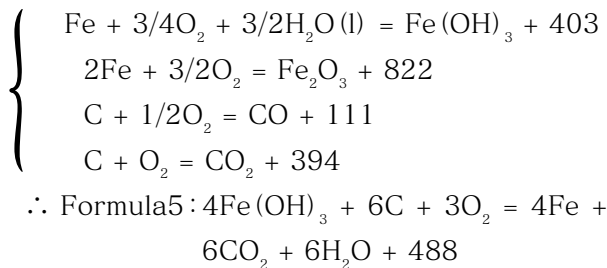
4.1及び4.2の実験で得られたFormula1～Formula3の式を再び以下に示す。これらの式をもとに全体の化学反応式を考える。



この化学式を考慮すると、1.00gの水酸化鉄(Ⅲ)から 5.23×10^{-1} gの鉄が得られることが分かる。

4.3.2熱化学方程式

4.3.1で得られたFormula4の化学反応式をもとに熱化学方程式を導く。以下の式において、特に指定が無い場合、物質の状態は $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ 、 $\text{Fe}(\text{s})$ 、 $\text{C}(\text{s})$ 、 $\text{O}_2(\text{g})$ 、 $\text{CO}(\text{g})$ 、 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ とする。また、熱量の単位はkJとする。熱量の値は『化学便覧 基礎編II 改訂5版』(社団法人日本化学会)に基づく。



Formula5は発熱反応であるから、酸化鉄(Ⅲ)を還元するのに必要な炭素の量のみの発熱量で水酸化鉄(Ⅲ)も還元することができるといえる。

結論

鉄バクテリアを利用した浄水処理は、濾過速度が遅いことと水処理後に残る水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿の処理に手間がかかるといった欠点を抱えていたが、鉄バクテリアが鉄を沈着するのにより効率が良い濾過層の開発が進み濾過速度が大幅に改善させたことと、「ダイレクト表洗」と呼ばれる技術の開発によって水酸化鉄沈殿の処理も容易になったことから、近年国内外の上水道施設での導入が広がっている。特に、凝集剤等の薬品の使用が不要であり、建設費・維持費を削減できることから、発展途上国での導入が期待されている。また、鉄の人体に対する毒性が問題になることはないものの、鉄分が多いと、水に臭味や色が生じたり、配管内に析出して水の流れを妨げたりする問題や、鉄を栄養塩とする植物プランクトンが増殖して赤潮が発生するといった問題が起こることから、工場排水や鉱山排水を鉄バクテリアを利用して処理すれば、環境負荷の低減にも繋がるといえる。

しかし、鉄バクテリアを利用して水の処理を行った際の沈殿物は乾燥汚泥として湾などの埋立地に他の乾燥汚泥と同様に廃棄されているという現状がある。全廃棄物に占める乾燥汚泥の割合は47%にも上るが、そのうち肥料などの形で再資源化されているものは僅かに8%である。生物や干潟の保

護、及び景観を残すといった点においてもそうした有機汚泥の削減が望まれている。通常の水処理の際に生じる有機汚泥は多量の薬品を含んでいるため、その資源化は難しい。しかし、鉄バクテリアを利用して水処理を行った場合、残る汚泥は資源である鉄を含む水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿である。本論文で行った実験の結果、その沈殿物は加熱によって鉄鉱石と同じ成分である酸化鉄(Ⅲ)に変化することが分かった。また、熱化学方程式より、酸化鉄(Ⅲ)を鉄に還元するのに必要な量の炭素があれば、その発熱量のみで水酸化鉄(Ⅲ)は酸化鉄(Ⅲ)に変わることがいえる。つまり、鉄バクテリアの作る水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿物は、特別な施設を建設しなくても製鉄所にて鉄鉱石を還元すると全く同様の原理で鉄に変えることができるといえる。鉄バクテリアを水処理に利用している京都府城陽市の水処理施設のデータをもとに、実際に鉄バクテリアの沈殿物から年間得られる鉄の量を算出してみると、処理水：5550m³/day、原水中の溶存鉄：0.34mg/l、浄水中の溶存鉄：0.03mg/l未満より、年間で産出される鉄の量は(5550×10³)×(0.34−0.03)×365=627982500[mg]=628[kg]となる。また、この鉄の質量をもとに水酸化鉄(Ⅲ)として水処理施設で生じた沈殿物の質量を算出すると、Fe(OH)₃：106.85g/mol、Fe：55.85g/molであるから、106.85×628÷55.85=1201.5[kg]=1.2[t]となる。このことから、年間で1.2tの乾燥汚泥を削減できるといえるが、鉄の価格が約25円/kgであることから、鉄の資源としての価値は僅かに1万5700円である。

ところで、ガスバーナーの加熱実験の際に酸化鉄(Ⅲ)が得られたが、これは錆止め、着色剤、研磨剤としての需要があるベンガラα-Fe₂O₃や紙幣・インク・カードに用いられる磁性酸化鉄γ-Fe₂O₃

鉄バクテリアの工業化の可能性

早稲田大学本庄高等学院 3年 坂本広樹

とも同じ成分である。これらの価格も鉄とほぼ変わらず約25円/kgであるから、水酸化鉄(Ⅲ) 1.2トンからは約897kgの酸化鉄(Ⅲ)が得られることを考えると、この場合は2万2425円の価値になる。しかも、水酸化鉄(Ⅲ)から酸化鉄(Ⅲ)を得る場合は加熱すれば良いだけであるから、鉄に還元する場合のように炭素にコストがかかることや反応後に地球温暖化の原因物質の一つである二酸化炭素が発生することはない。

整理すると、鉄バクテリアを利用した水処理施設で生じる水酸化鉄(Ⅲ)の沈殿は鉄に還元するよりも酸化鉄(Ⅲ)に還元して利用した方がコストが安くなり、環境負荷も小さいといえる。もっとも現段階で鉄バクテリアの沈殿物の資源化を試みるのはコスト的に厳しいものと思われる。全国的にさらに鉄バクテリアの水処理面での利用が広がれば、必然的に沈殿物の量も多くなり、その資源化が課題となるであろう。そうした場合に、環境問題に取り組む企業を中心として、鉄バクテリアの作る水酸化鉄(Ⅲ)を工業に適する形の酸化鉄(Ⅲ)に変えるための最適な加熱温度の模索といった技術開発が行われて、沈殿物から酸化鉄(Ⅲ)の生産が行われるようになることが理想である。

環境問題が深刻化している今日、薬品を使わずに生物のサイクルの中で自然に近い水が得られる鉄バクテリアを利用した水の浄化法は環境に優しい水処理技術として、浄水施設のみならず鉱山廃水など高濃度の鉄を含む水の処理の際には大いに活用すべきである。また、その結果生じた沈殿物を α -Fe₂O₃または γ -Fe₂O₃の酸化鉄(Ⅲ)の形で資源として再利用すれば、ゼロエミッションが確立され、鉄バクテリアは社会においてより有用なものとなるといえる。今回行った実験で、鉄バクテリアの沈殿物から鉄や磁性酸化鉄(Ⅲ)が得られたことで鉄バクテリアの沈殿物を資源化できる可

能性が生まれたところに本論文の大きな意義があった。この可能性については今後も検討していくつもりである。

参考文献

- ・環境技術研究協会：「環境技術」別刷Vol.30 NO.12 特集・生物処理による地下水の上水処理技術(2001)
- ・矢木修身：バクテリアの話8 鉄バクテリア
- ・早稲田大学本庄校地文化財調査室：大久保山Ⅶ 早稲田大学(1999) pp.252~261,279~285
- ・有限会社平凡社出版センター：日本地名体系第一一巻 埼玉県の地名 株式会社平凡社(1993) pp.688~757
- ・岡本一雄：さきたま文庫・61金鑽神社 株式会社さきたま出版会(2003)
- ・環境技術学会：環境技術 4月号Vol.33(2004) pp.26~39
- ・長倉三郎、井口洋夫、江沢洋、岩村秀、佐藤文隆、久保亮五：岩波理化学辞典第5版株式会社岩波書店(1998)
- ・杉原和男：瞬間「たたら法」
<http://web.kyoto-inet.or.jp/people/sugicom/kazuo/neta/bake28.html>
- ・社団法人日本化学会：化学便覧 基礎編Ⅱ 改訂5版 丸善株式会社(2004)
- ・日本水道協会：日本の水道生物 一写真と解説—日本水道協会(1993) pp.169~178
- ・日本水道協会：上水試験法(2001) pp.638~642
- ・日本水道協会：上水試験法 解説編(2001) pp.867~870
- ・山中健生：無機質だけで生きてゆける細菌 共立出版株式会社(1987) pp.1~19,64~71

- ・ 田村多喜男、綱井孝司、石丸豊、中田章見雅：鉄バクテリアを利用した生物炉過法による地下水中の除鉄・除マンガンの開発 (1998)
- ・ 城陽市上下水道部：鉄・マンガンの対策:鉄バクテリアの処理について
- ・ 城陽市上水道部：城陽の水道 (2003)
- ・ 読売新聞社：鉄バクテリア浄水法 増える導入自治体 (2001年12月27日)
<http://www.mars.sannet.ne.jp/katasuirou/yomiuri.htm>

謝辞

早稲田大学環境保全センターの新井智氏には、鉄バクテリアに関する論文を集めていただいた。同センターの入江政幸氏、海部淑江氏には、イオンクロマトグラフィーとICP発光分光分析による小川の水の溶融元素の分析をしていただいた。独立行政法人物質・材料研究機構の溜池あかね氏には、鉄バクテリア及び電子レンジによる加熱実験で得られた物質のエネルギー分散型X線分析装置による組成分析をしていただいた。京都府城陽市上下水道部工務課の綱井孝司氏には、京都府の城陽市における鉄バクテリアを利用した水処理に関する質問にご回答いただき、同水処理施設に関する資料や論文を送付していただいた。「京都パスカル」「京都市青少年科学センター」指導課指導主事の杉

原和男氏には、瞬間「たたら法」の本論文への記載を許可していただいた。

以上、多くの方々の温かいご協力とご支援により本論文を書き上げることができた。ここに心から感謝の意を述べる。

追補

本論文は本庄国際リサーチパーク研究推進機構が主催する環境大学校で紹介され、水問題に対する関心を集めるといった目的において、自然環境の保全運動に役立てられている。

1. <http://www.mapfan.com/mfwtop.html>より引用した。
2. 八木正一：鉄バクテリアを利用した除鉄、除マンガン処理について
環境技術学会：「環境技術」別刷Vol.30 NO.12特集・生物処理による地下水の上水処理技術 (2001) のpp.7～11に収録されている。
3. 矢木修身：バクテリアの話8 鉄バクテリア
4. 早稲田大学本庄校地文化財調査室：大久保山Ⅶ からの引用であるが、標高の低い地点を赤丸で囲ってある。
5. 早稲田大学本庄校地文化財調査室：大久保山Ⅶ からの引用であるが、「製鉄址」のフォントを赤に変えている。
6. 火打ちに使う鉄のこと。火打ち金。
7. 八木正一：鉄バクテリアの除鉄機構とその応用の紹介
環境技術学会：環境技術 4月号Vol.33 (2004) のpp.26～31に収録されている。
8. Mouchet,P: From conventional to biological removal of iron and manganese in France, J.AWWA (1992)
9. <http://web.kyoto-inet.or.jp/people/sugicom/kazuo/neta/bake28.html>を参照した。