

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02985

研究課題名(和文) 製鋼スラグを利用した藻場再生用施肥材から海域への鉄溶出特性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of characteristics of iron elution from fertilizer using steelmaking slag for restoring seaweed beds in coastal areas

研究代表者

山本 光夫 (Yamamoto, Mitsuo)

東京大学・海洋アライアンス・特任准教授

研究者番号：30361512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：製鋼スラグと堆肥(腐植物質)を混合した鉄分供給ユニットを利用した藻場再生技術の実用化に向けて、技術の基盤をなす鉄溶出特性の解明を目指した基礎データの蓄積を行った。実験室内及び300L水槽での鉄溶出試験及び河川・海域の水質環境調査の結果、鉄溶出は還元条件下が有利であり、スラグと堆肥の混合により鉄の還元溶出に関わる嫌気性微生物の活性化をもたらすことが示された。また海域に供給される陸域由来の鉄は有機物の挙動と関連があり、河川流域の土地利用が影響していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、沿岸生態系修復を目的とした環境技術の実用化へつなぐとともに、未利用資源の有効活用というリサイクル工学の観点で、学術的意義及び社会的意義がある。また、広く製鋼スラグの海域利用に向けての基盤データとして提供が可能である点でも意義があると考えられる。一方で、河川流域の土地利用が鉄や有機物の動態、そして河川・海域環境に影響を与える可能性が示されたことから、沿岸生態系保全の面でも学術的意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：The seaweed restoration method using the mixture of steelmaking slag and compost containing humic substances (slag-compost fertilizer) has been developed. The research goal was to understand the characteristic of iron elution from the slag-compost fertilizer toward practical use of this method. Iron elution tests with small plastic containers and 300L tanks were examined. The field investigations in river and coastal areas for estimating the dynamics of iron and organic matter were also conducted. It was found that iron elution was promoted under reducing conditions and mixing of slag and compost resulted in the activation of anaerobic microorganisms in the fertilizer contributed to reductive iron elution. In addition, the results of the field investigation indicate that the dynamics of iron and organic matter in river water, which are related to river and coastal environments, are strongly influenced by the land use in the basins.

研究分野：環境化学工学

キーワード：環境技術 沿岸生態系保全 鉄 環境資材 バイオマス 製鋼スラグ 腐植物質

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本や世界各地の沿岸域において、大型の海藻群落(藻場)が衰退・消失する「磯焼け」の問題が深刻となっており、藻場修復・造成への対策が進められている。磯焼けの発生要因としては海水温の上昇、ウニや植食性魚類による食害、栄養塩不足等があるが、森・川・海のつながりの観点から陸域由来の鉄供給量の減少(溶存鉄不足)に着目した藻場再生技術^[1]が注目されている。本技術は、転炉系製鋼スラグと堆肥(腐植物質)を混合した施肥材である「鉄分供給ユニット」を海岸等に設置することで、有機態鉄を海域に供給して藻場修復・造成を目指すもので、実用化に向けて日本各地で実証試験など産学連携の取り組みが進められており、実証試験成果のとりまとめや技術導入手法・手順の検討が行われている。一方で基礎研究では、鉄と腐植物質の錯形成能に関する検討^[2]や鉄分供給ユニットの溶出特性評価^[3]をはじめ多くの研究が行われているが、特に技術の基盤をなす鉄溶出特性の更なる解明が必要となっており、安定的な鉄溶出に及ぼす微生物・バクテリアの役割理解やスラグ表面状態の解析によって藻場再生技術改良に必要な基礎データの蓄積が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、藻場再生技術の実用化に向けて、最適な鉄分供給ユニットの設置方法の確立及び鉄溶出速度の増加と持続的供給手法の確立を目指して、鉄分供給ユニットからの海域への鉄溶出特性の解明と海域における鉄の存在形態を明らかにすることを目的とした。また藻場再生技術だけに留まらず、製鋼スラグの海域利用のための基盤となる基礎データ蓄積を目標とした。目標達成に向けて、(1) 溶出条件等の違いによる鉄溶出特性変化に関する基礎的検討、(2)パイロット試験を基にした鉄溶出挙動の検討、(3)フィールドにおける鉄溶出過程の検討と鉄の存在形態に関する調査、の3つのテーマで研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 溶出条件等の違いによる鉄溶出特性変化に関する基礎的検討

鉄分供給ユニットは海岸汀線に埋設されるため、還元条件下での溶出特性を明らかにすることが必要である。ここでは、海水の酸化還元状態の違いが鉄分供給ユニットからの鉄溶出速度と寿命に与える影響を評価するために、室内鉄溶出試験を行った。具体的には、製鋼スラグと堆肥を用いて、鉄溶出試料 A、B、C を製鋼スラグ 4.55 g の体積 (V) を基準として作製した。A はスラグのみ (V)、B はスラグ (V/2) + 堆肥 (V/2)、C は堆肥のみ (V) の条件である。ポリ容器に人工海水 (SEALIFE) 250 mL を入れ、DO 濃度を曝気 (酸素及び窒素) により調整した。DO 濃度は 15 mg/L、8 mg/L、2 mg/L とし、温度は 297 K 一定として試料 A~C、そしてブランクについてそれぞれ 3 条件の DO 濃度で試験を行い、3 日間ごとに人工海水を入れ替え、30 日間にわたって実験を行った。海水の pH の測定のほか、全鉄、溶存鉄の濃度を UV-2700 (SHIMADZU) を用いて吸光光度法^[3]で測定した。また A~C に加えて他の材料の溶出特性をみることでスラグと堆肥の特性をより明らかにするために、リモナイト (褐鉄鉱) も試料 D として含めた場合の溶出試験を行ったほか、Na₂S により硫化水素を発生させ、DO=0 mg/L にした条件での検討も行った。

溶出試験結果後の製鋼スラグについて、鉄溶出時の酸化還元状態の違いによる鉄存在形態に関する知見を得るために、⁵⁷Fe メスバウアー分光法にて分析を行った。メスバウアースペクトルの測定には TOPOLOGIC SYSTEMS MFD-110D 型のスペクトロメーターを使用し、 γ 線源として 1.10 GBq ⁵⁷Co/Rh を用いた。試料を透過した 14.4 keV のガンマ線を 4~7 日間測定することにより、メスバウアースペクトルを得た。得られたスペクトルは、個々のピークの形状をローレンツ型の曲線とし、その線形結合によるカーブフィッティングを行った。

(2) パイロット試験を基にした鉄溶出挙動の検討

実海域を模擬した鉄溶出特性評価を海域環境の異なる 2 箇所でも同時に並行して行った。北海道増毛町の海岸近くと長崎県対馬栽培漁業センター内に設置された 300L の水槽を利用し、2016 年 6 月上旬から約 6 カ月間にわたって実施した。試料は、製鋼スラグのみ、堆肥のみ、製鋼スラグ : 堆肥 = 1 : 1 (鉄分供給ユニットと同じ組成) の 3 種類を用い、 V_0 における製鋼スラグ 3,000g の体積 (V_0) を基準として、 $V_0/2$ 、 V_0 、 $2V_0$ も同体積 (各 V_0) になるようにした。 V_0 は 2 組作製し、実海水を流量約 1.2 L/min で供給して海水交換を行いながら、3 カ月後、6 カ月後にそれぞれ試料を取り出し、製鋼スラグ表面状態及び堆肥中のフミン酸 (HA) の変化について評価・検討を行った。製鋼スラグの分析には (1) と同様に ⁵⁷Fe メスバウアー分光法を用い、スラグに含有する鉄の化学種分析を行った。一方で、HA については、凍結乾燥した試料から IHSS 法に準じて抽出し、構造解析を行った。UV-vis 吸光スペクトル及び TMAH 熱分解 GC/MS 法によって HA の構造的特色を検討した。

(3) フィールドにおける鉄溶出過程の検討と鉄の存在形態に関する研究

最初の実証試験が行われた北海道北西部の増毛町の河川・海域における鉄 (全鉄 (T-Fe)、溶存鉄 (D-Fe)) と有機物 (全有機炭素 (TOC)、溶存有機炭素 (DOC)) の分布について、2016 年 7 月~2018 年 7 月の 2 年間にわたり調査を行った。これは河川・海域における鉄と有機物の存在量 (濃度) の関係を明らかにし、(1)、(2) の結果とも合わせて、鉄の存在形態として有機態

鉄に着目して藻場形成など沿岸環境に与える影響を考察するためである。図1に示す増毛町内の信砂川(NS)、朱文別川(SM)、箆別川(HB)、暑寒別川(SK)、ボンオタルマナイ川(PO)、ニナイベツ川(NB)、大別茹川(OB)の7河川の河口域において、2016年7月~2018年7月の2~3カ月ごとに河川水の採水とその水質分析を行った。分析項目は、全鉄(T-Fe)、溶存鉄(D-Fe、 $\phi < 0.45 \mu\text{m}$)、全有機炭素(TOC)、溶存有機炭素(DOC、 $\phi < 0.7 \mu\text{m}$)を中心に栄養塩(窒素、リン)及び水温、塩分等の測定も合わせて行った。なお、鉄は(1)と同じく分光光度法、有機物は全有機炭素計、栄養塩は栄養塩自動分析装置により測定した。

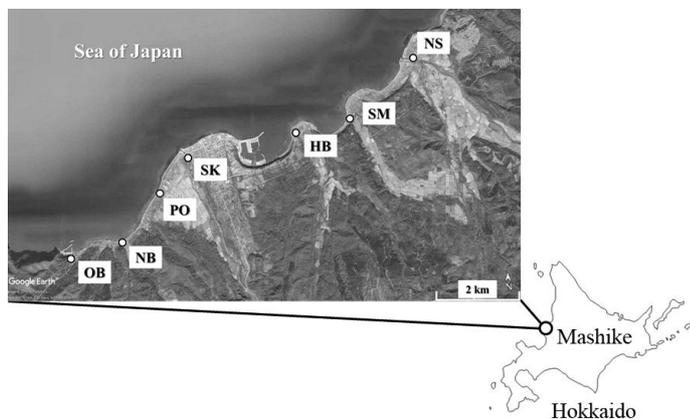


図1 調査測点図(北海道増毛町)

4. 研究成果

(1) 溶出条件等の違いによる鉄溶出特性変化に関する基礎的検討

ここでは、試料A~Cの結果を中心に報告する。図2に実験の30日間の全鉄と溶存鉄の溶出量を示すが、鉄の溶出量は、全鉄、溶存鉄ともにC(Compost) > B(Slag + Compost) > A(Slag)の順で多いことが確認された。これは既往研究^[3]と同様の結果であるが、試料Cは鉄溶出速度が速いものの鉄含有量が少ないため、鉄溶出速度と鉄溶出寿命の両者の観点から、製鋼スラグと堆肥の混合物が藻場再生用施肥材としては有利であると考えられる。この傾向は、DO濃度(酸化還元状態)が変化しても同様であることが本研究で新たに確認された。その上で、本実験では試料A~Cのすべてにおいて、海水への溶存鉄溶出量及び全鉄溶出量はDO濃度が高くなるにつれて減少することがわかった。これは、DO濃度が高い場合、同試料において鉄(II)イオンが鉄(III)イオンに酸化される速度が速くなるためであると考えられる。試料A~Cに加え試料Dとしてリモナイト(体積V/3)を用いて同様の実験を行った結果、DO濃度の変化にかかわらず、全鉄の溶出量はリモナイト > 堆肥 > スラグ + 堆肥 > スラグの順であった。これはリモナイトの鉄(酸化鉄)含有量が22%と堆肥よりも圧倒的に多い上に、腐植物質も含まれているため(分析により確認)有機態鉄の形で溶出しやすいものと考えられる。さらに試料Dにおいても低DO濃度(還元状態)の方が鉄溶出量は多いことが示された。

次に製鋼スラグ表面の分析結果であるが、図3に製鋼スラグのメスバウアースペクトルの一例を示す。鉄化学種として、 $\alpha\text{-Fe}$ (Fe metal)、Magnetite、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} の4種類が確認された。Magnetiteには2つのセクステットが重なって見えるが、これは元々Magnetite中に2つの鉄の化学状態が存在するからである。堆肥中には、Magnetiteとは異なるMagnetic成分、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} の3種類が確認された。また、リモナイト中には、大きな磁気緩和を示すスペクトルが

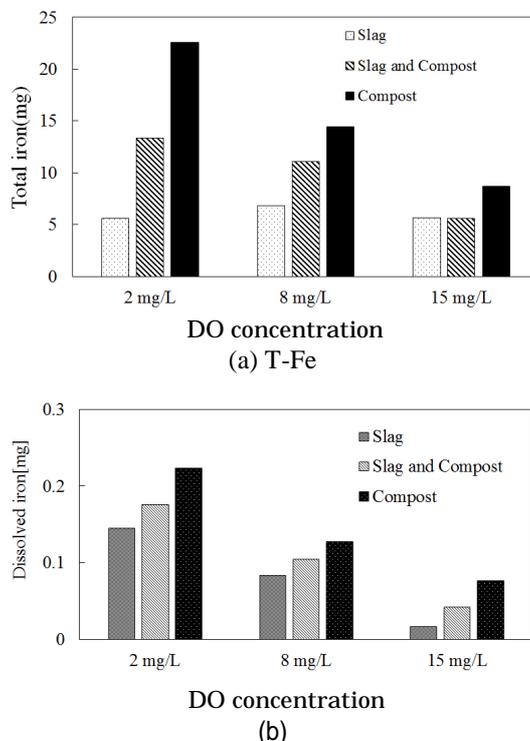


図2 試料から溶出した鉄重量(30日間)

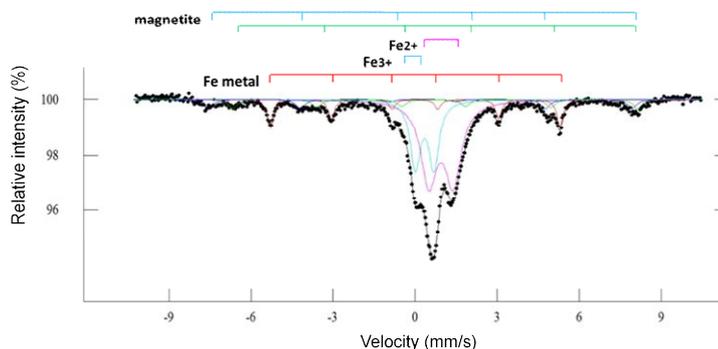


図3 メスバウアースペクトルの例(製鋼スラグ)

見られたが、これを含めて全ての鉄は3価の状態であった。なお、いずれの試料も実験期間を通じて新たな化学種の出現は確認されなかった。

4条件のDO濃度で30日間人工海水中に入れた試料A~Cにおける鉄化学種の相対面積を算出したが、そのうちFe²⁺、Fe³⁺成分のみに着目した上で、Fe²⁺/Fe³⁺比を取った結果を図4に示した。製鋼スラグ、堆肥、スラグ+堆肥のいずれの試料についても、低DO濃度(還元状態)の方がFe²⁺/Fe³⁺比が大きいこと分かった。このことは、低DO濃度の方が人工海水中への鉄溶出量が多いことと良く一致した結果といえる。

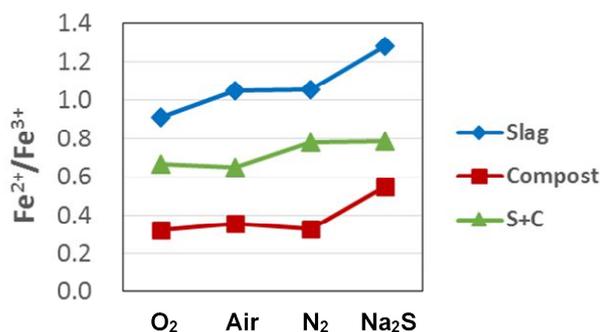


図4 スペクトルにおけるFe²⁺/Fe³⁺比

本実験により、施肥材(鉄分供給ユニット)はできるだけ還元条件下に設置することが鉄溶出促進の点から重要であることが示唆された。北海道増毛町における実証試験^[1]では、鉄分供給ユニットは海岸汀線に埋設しており、還元条件下で海域への鉄供給がなされたといえ、本研究は設置方法(埋設)の妥当性を支持する結果であるともいえる。

(2)パイロット試験を基にした鉄溶出挙動の検討

製鋼スラグ分析: 試料中の製鋼スラグには4種類の鉄化学種(α -Fe, magnetite, Fe²⁺, Fe³⁺)が存在することが確認された。これは(1)の結果とも一致する。Fe²⁺とFe³⁺の各試料における含有割合とその変化を表したのがTable 1である。製鋼スラグの評価であるため、試料とのみ示した。なお、試料名は、実施箇所(M: 増毛, T: 対馬)・材料(S: slag, C: compost)・設置経過期間(月)で表した。例えばMSC6は増毛での試験開始後6カ月後の試料を指す。試料ととも6カ月の方が3カ月よりもFe²⁺の割合が減少し、Fe³⁺が増加していることが示され、スラグ表面からのFe²⁺の溶出が示唆された。

表1 各試料中の鉄化学種(Fe²⁺, Fe³⁺)の含有割合(%)と変化

Sample	Mashike		Tsushima		
	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Sample	Fe ²⁺	Fe ³⁺
MS3	46.1	24.7	TS3	36.6	23.1
MS6	35.3	29.3	TS6	30.8	32.4
MSC3	46.8	26.4	TSC3	38.6	29.7
MSC6	35.6	32.8	TSC6	33.1	37.7

試料ととの傾向に大きな違いはないが、Fe³⁺の値に着目するとMSCとTSCの両方で3カ月、6カ月共にFe³⁺の相対比が増加していること、また α -Feやmagnetiteについても試料とで傾向性に違いが出ており、堆肥が影響を及ぼしている可能性が考えられる。

表2 各試料におけるHA含有量と吸光特性

Types of the fertilizer	Density ^a (g mL ⁻¹)	Yields (g L ⁻¹)	-HA		
			UV-vis parameters ^b		
			E ₆₀₀	E ₂₈₀	E _{ET} /E _{bz}
S0	1.69	-	-	-	-
C0	0.672	28.6	0.768	22.0	0.631
SC0	1.27	13.4	-	-	-
MS3	1.69	-	-	-	-
MS6	1.71	-	-	-	-
MC3	0.637	21.2	0.785	22.5	0.615
MC6	0.655	21.7	0.731	22.3	0.618
MSC3	1.45	6.83	0.678	20.4	0.588
MSC6	1.50	3.58	0.708	19.8	0.573
TS3	1.68	-	-	-	-
TS6	1.71	-	-	-	-
TC3	0.651	24.2	0.813	23.7	0.626
TC6	0.639	23.2	0.854	24.7	0.615
TSC3	1.52	2.94	0.795	19.4	0.580
TSC6	1.51	1.84	0.861	20.4	0.560

^a The value was measured by means of 50 mL volumetric flask.

^b The values were estimated from the absorbances (cm⁻¹) of 50 mg L⁻¹ HA in 0.1 M phosphate buffer (pH 7.0).

- Not extracted.

HA構造分析: 各試料の密度(g mL⁻¹)、HA含有量及びUV-vis吸光パラメータ(E₆₀₀, E₂₈₀, E_{ET}/E_{bz})を表2に示す。MS及びTSからは、HAは抽出されず、MC及びTCでは、水槽試験に使用した後もHAの含有量及びUV-visパラメータに大きな変化はみられなかった。これはHAが溶出しなことを示唆している。一方、MSC及びTSCでは、各UV-visパラメータの減少が見られ、またHA含有量の大幅な減少から、MSC及びTSCでは、試験中にHAの分解反応が起きていると考えられる。試料よりも鉄溶出速度が促進

されるが^[4]、その過程においては製鋼スラグの存在によってHAの分解(芳香環などの共役系が減少)が伴われていることが示唆された。

図5に増毛での水槽試験施肥材由来のHAのパイログラムを示す。No.2(Methanesulfonic acid, methyl ester)及び15(Phenol, 2-methoxy-4-vinyl)は、初期HAになく、施肥後のHAすべてで検出された。これらの化合物は、硫酸還元菌の代謝生成物及びリグニン化合物の生分解物と考えられる。その他、MCでは施肥前後での熱分解生成物及びその組成に大きな変化は見られなかった。No.3(2,4-Dimethyl-heptane), 5(Benzene, 1,2,3-trimethyl-), 8, 16, 及び18(n-Methyl-1-decene), 及び31(Hexadecen-1-ol)は、施肥後のMSCでのみ検出された。No.3, 5, 8, 16, 及び18は、嫌気性微生物による芳香族化合物の生分解生成物と考えられ、No.31は嫌

気性微生物の代謝生成物と考えられる。また、施肥後の MSC では、No. 32 (Octadecenoic acid, methyl ester) の顕著な増加がみられた。これは、嫌気性微生物に特有の不飽和脂肪酸であるバクセン酸の増加によるものと考えられる。これらの微細構造変化から、MSC では硫酸還元菌などの嫌気性微生物の活動が活発になっており、HA の芳香族化合物が代謝分解されていると考えられた。対馬の試料でも同様の傾向がみられ、この結果は、HA の含有量変化及び UV-vis 吸光特性の変化における考察とも一致する。さらに、MSC 試料からは海水条件下で鉄を還元溶出させる嫌気性微生物

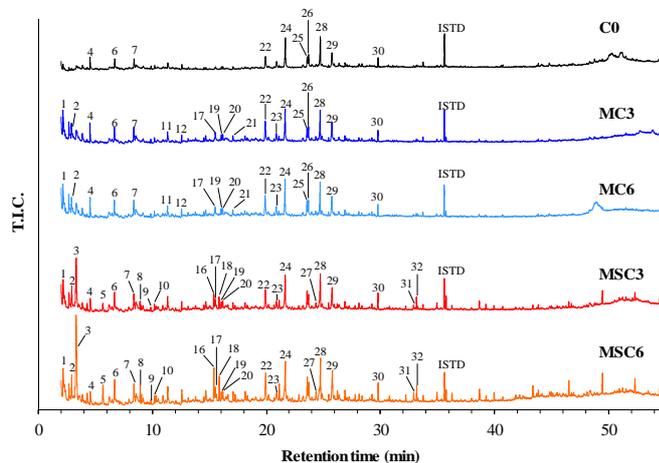


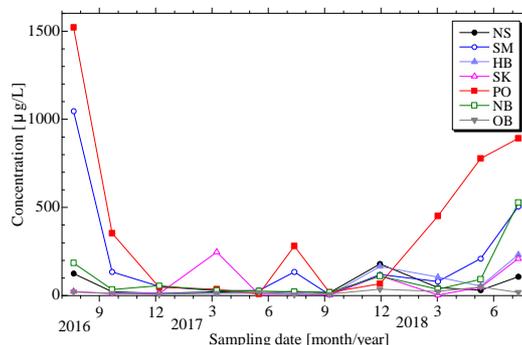
図6 水槽試験(増毛)の試料より抽出されたHAのパイログラム

(*Exiguobacterium oxidotolerans*) も検出されている^[5]。以上のことから、製鋼スラグと堆肥の混合は、施肥(埋設)環境下で鉄の還元溶出に関わる嫌気性微生物の活性化をもたらすと考えた。また堆肥中のHAは海水中へ溶出しませんが、微生物の代謝に寄与していると考えられる。

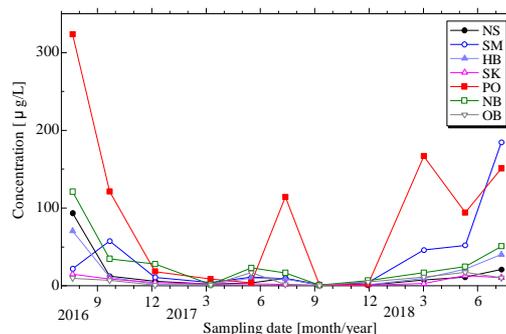
(3) フィールドにおける鉄溶出過程の検討と鉄の存在形態に関する研究

ここでは、鉄(T-Fe, D-Fe)と有機物(TOC, DOC)の結果を中心に記述する。図7は、T-Fe及びD-Feの調査期間中の濃度変化を示したものである。これをみると、T-FeにおいてはPOの濃度が期間を通じて最も高く、SMもまた高い傾向であることがわかる。一方で、D-Feについても同様の傾向を示し、POが最も高く、SMも比較的高くなっている。季節変動については明瞭な傾向が出ているとは言いが、少なくとも7月は鉄濃度が高いということが示された。

一方で有機物についても、鉄と同様の結果が得られた。TOC及びDOCともに調査期間を通じてPO及びSMの分析値が他の地点よりも大きいことが確認された。これは、鉄と有機物の挙動には関係性があり、河川からの鉄供給は主に有機態鉄の形で供給されることを示唆しているといえる。その上で、土地利用との関係性に着目すると以下のような考察が可能である。POの上流域には水田が大きく広がっており、SMも同様の土地利用となっている(図1)。特にポンオタルナイ川(PO)については、暑寒別川(SK)から人工的に取水した河川水が水田域一帯に流れ込んだ後に、その農業排水が集積して河口域に流れ込んでいる。POとSKのT-Fe、D-Feの季節変動は大きく異なっており、河川流域の土地利用が鉄及び有機物の変動に影響を与えることが示唆された。



(a) T-Fe



(b) D-Fe

図7 各河川における鉄濃度(T-Fe, D-Fe)の季節変動

(1)~(3)の結果についてまとめると、室内溶出試験とパイロット試験(水槽試験)から、鉄分供給ユニットからの鉄溶出は還元条件下の方が有利であり、その意味でも海岸汀線への埋設は設置方法として適していることが示された。その上で、製鋼スラグと堆肥の混合によりスラグ表面のFe(III)がFe(II)に還元され、施肥環境下で鉄の還元溶出に関わる嫌気性微生物の活性化をもたらすことが考えられた。また河川・海域環境調査からは、海域に供給される陸域由来(河川)の鉄は有機物の挙動と関連があり、河川流域の土地利用が水質環境、そして海域環境にも影響していることが示唆された。

< 引用文献 >

- [1] M. Yamamoto, M. Fukushima, E. Kiso, T. Kato, M. Shibuya, S. Horiya, A. Nishida, K. Otsuka, and T. Komai, "Application of Iron Humates to Barren Ground in a Coastal Area for Restoring Seaweed Beds," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **43**(7), 2010, 627-634.

- [2] M. Yamamoto, A. Nishida, K. Otsuka, T. Komai, and M. Fukushima, "Evaluation of the binding of iron(II) to humic substances derived from a compost sample by a colorimetric method using ferrozine," *Bioresource Technology*, **101**(12), 2010, 4456-4460.
- [3] M. Yamamoto, M. Fukushima and D. Liu, "The Effect of Humic Substances on Iron Elution in the Method of Restoration of Seaweed Beds using Steelmaking Slag," *ISIJ International*, **52**(10), 2012, 1909-1913.
- [4] M. Yamamoto and D. Liu, "Effects of Organic Matter on Acceleration of the Iron Elution Rate from Steelmaking Slag," *ISIJ International*, **56**(10), 2016, 1884-1888.
- [5] A. Aneksampant, A. Tanaka, X. Tu, H. Iwai, M. Yamamoto, K. Nakashima and M. Fukushima, "Roles of microbial activity and anthraquinone-2,7-disulfonate as a model of humic substances in leaching of iron from hematite into seawater," *Analytical Sciences*, **34**(11) (2018) 1303-1308.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

H. Iwai and M. Yamamoto, "Influence of Land Use on the Structural Feature of Sedimentary Humic Acids in Rivers in Northwest Hokkaido, Japan," *Analytical Sciences*, **35**(6), 2019, (in press, DOI: 10.2116/analsci.18P373, 査読有).

M. Matsuo, K. Shozugawa, M. Yamamoto, D. Liu, H. Iwai, R. Okumura, Y. Iinuma and K. Takamiya, "Instrumental Neutron Activation Analysis of the Steelmaking Slag, Compost and Their Mixtures in Artificial Seawater with Various Redox Conditions," KURRI Progress Report, 2018, 2019 (in press, 査読無).

A. Aneksampant, A. Tanaka, X. Tu, H. Iwai, M. Yamamoto, K. Nakashima and M. Fukushima, "Roles of Microbial Activity and Anthraquinone-2,7-disulfonate as a Model of Humic Substances in Leaching of Iron from Hematite into Seawater," *Analytical Sciences*, **34**(11), 2018, 1303-1308 (DOI: 10.2116/analsci.18P147, 査読有).

山本光夫、南克哉、劉 丹、製鋼スラグを利用した藻場再生技術における鉄溶出促進に寄与する有機物特性の検討、化学工学論文集、**43**(4)、2017、245-251 (DOI: 10.1252/kakoronbunshu.43.245, 査読有)

〔学会発表〕(計 12 件)

山本光夫、劉 丹、山口 聖、岩井久典、海域環境への河川の影響理解に向けた鉄および有機物の季節変動と土地利用の関係性評価、化学工学会第 84 年会、2019.

山本光夫、松尾基之、岩井久典、劉 丹、藻場再生用施肥材からの鉄溶出機構の検討 1 - 製鋼スラグとフミン酸の特性変化、日本腐植物質学会第 34 回講演会、2018.

岩井久典、山本光夫、松尾基之、劉 丹、藻場再生用施肥材からの鉄溶出機構の検討 2 - TMAH-py-GC/MS によるフミン酸の微細構造解析、日本腐植物質学会第 34 回講演会、2018.

岩井久典、山本光夫、松尾基之、劉 丹、海水浸漬による鉄施肥材中の堆肥フミン酸の構造変化、日本分析化学会第 67 年会、2018 .

M. Yamamoto, H. Iwai, A. Yamaguchi and D. Liu, "Seasonal changes of iron in rivers and relation to structural features of humic acids in their sediments of the northwest of Hokkaido, Japan," 19th International Conference of International Humic Substances Society (2018).

山本光夫、岩井久典、山口聖、劉 丹、北海道北西部における海域環境への河川の影響評価、平成 30 年度日本水産学会春季大会、2018.

劉 丹、木戸可純、山本光夫、藻場再生用施肥材からの鉄溶出特性に及ぼす溶存酸素濃度の影響、化学工学会第 49 回秋季大会、2017.

M. Yamamoto and D. Liu, "Effects of iron complexes generated by mixing steelmaking slag with composts on the growth of a brown alga, *Eisenia bicyclis*," The 17th Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE 2017), 2017.

山本光夫、劉 丹、製鋼スラグからの鉄溶出促進に影響する有機物の特性、化学工学会第 82 年会、2017.

A. Tanaka, A. Aneksampant, H. Iwai, M. Fukushima, M. Yamamoto and S. Tanaka, "Elution behaviors of iron from hematite to seawater during the oxidative polymerization of humic precursors," 18th International Conference of International Humic Substances Society, 2016.

A. Aneksampant, X. Tu, A. Tanaka, M. Fukushima, H. Iwai and M. Yamamoto, "Effect of anthraquinone-2,7-disulfonate as a humic analogue on microbial leaching of iron from hematite into seawater," 18th International Conference of International Humic Substances Society, 2016.

栗原真悠子、小豆川勝見、山本光夫、松尾基之、海水環境下における製鋼スラグ中の鉄の化学状態に関する研究、2016 年度日本地球化学会第 63 回年会、2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：劉 丹

ローマ字氏名：LIU, Dan

所属研究機関名：有明工業高等専門学校

部局名：創造工学科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60390530

研究分担者氏名：松尾 基之

ローマ字氏名：MATSUO, Motoyuki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院総合文化研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10167645

研究分担者氏名：岩井 久典

ローマ字氏名：IWAI, Hisanori

所属研究機関名：大阪府立大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：70733765

研究分担者氏名：福嶋 正巳

ローマ字氏名：FUKUSHIMA, Masami

所属研究機関名：北海道大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40344113