

人工湿地を用いた重金属含有酸性廃水の処理について

北海道立地質研究所 環境地質部 ○荻野 激
遠藤 祐司
高橋 良

湿地による水質浄化は、湿地を構成している水・土壌・植物および微生物・細菌が持っている自然の浄化能力を利用して行われるため、低コストで、省エネルギーといった優れた利点を持っている。地質研究所では、この湿地による処理を、有害金属成分を含んだ酸性廃水に活用することを目指し、人工的に造成した湿地(人工湿地)に酸性水を導入し、酸性水の水質変動、人工湿地内での金属成分の挙動等を調査した。その結果、廃水を人工湿地に導入することで廃水中の鉄(Fe)・アルミニウム(Al)で60%以上、銅(Cu)が20%程度除去されることが明らかとなった。また6年間、金属成分の除去効果が維持されていることを確認した。

キーワード:人工湿地、酸性廃水処理、金属成分、自然浄化、省エネルギー

1. はじめに

湿地は、植物、水、土壌および微生物・細菌によって構成されており、それぞれが水質浄化機能を有している。IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control(2000)によれば、植物には、有害物質の取り込み・吸着・有機物分解・ろ過機能のほか、蒸発散効果・土壌への酸素供給・微生物などの生息環境形成等の機能があるとさ

れている。また、水には、蒸発・希釈・錯形成の機能が、土壌には、イオン交換・吸着・キレート化・化学的分解のほか、微生物などの生息環境の提供という機能がある。微生物・細菌は、植物の根圏・水中および土壌中に生息し、有害物質などの酸化還元をおこなう機能を持っている¹⁾(図-1参照)。

湿地による廃水処理は、このような構成物の持つそれぞれの浄化機能や構成物同士の相互作用を活用する。湿地を利用する廃水処理法は、構成物の持つ自然の機能を利用するため、薬剤などを用いる従来の処理法と比較して、低コスト・

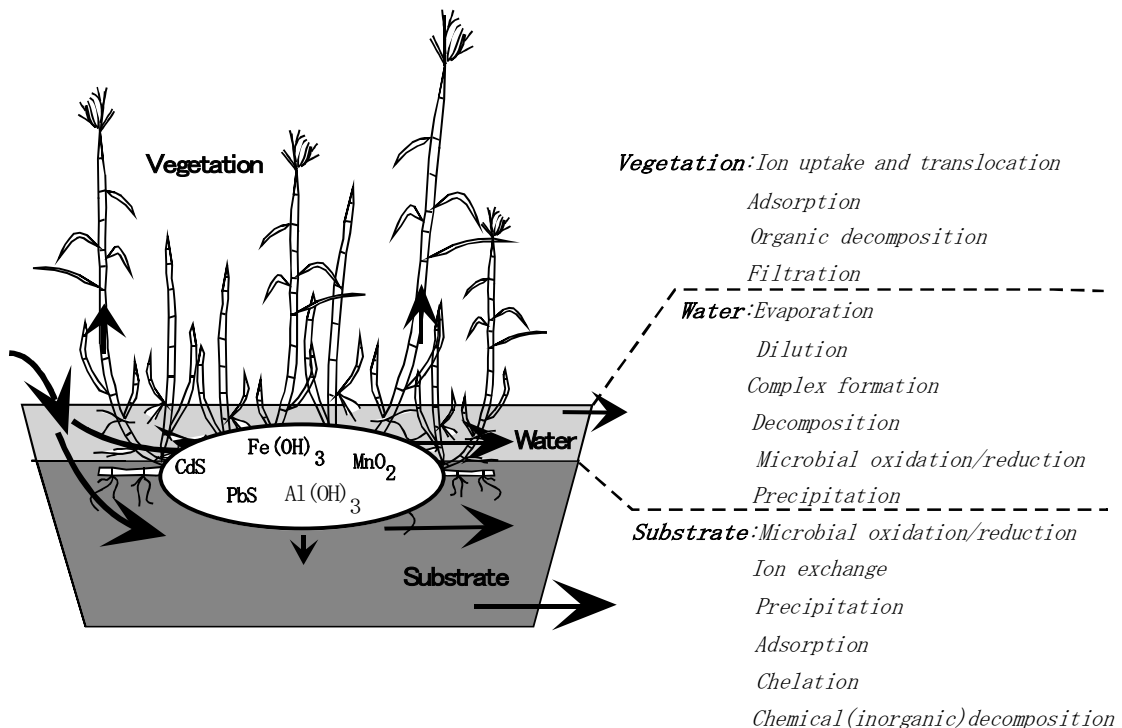


図-1 湿地の浄化機能

省エネルギーおよびメンテナンスフリーなどの利点がある。さらに、処理にあたって、電力などのエネルギーを必要とせず、また大型の処理施設を必要としないため、環境に対する負荷がほとんどないという優れた面を有している。

このように湿地による廃水処理は、省コストで、環境に対する負荷が少なく環境重視の21世紀にふさわしい方法といえる。これらのことから欧米では、1970年代から湿地を利用した廃水処理法の研究・開発が始められており、現在、生活排水・工場排水および鉱山廃水等の各種廃水に対して、湿地を利用した水処理が数多くおこなわれている^{1),2)}。

北海道立地質研究所では、2002年度から、鉄、亜鉛などの金属成分を含む酸性廃水の処理に人工湿地を活用するための調査研究を開始した。この研究では、人工湿地を流下することによる酸性廃水のpHの変化、金属成分の挙動および酸性廃水による人工湿地植物の影響等について実証試験を実施している。本報告では、pHや金属成分濃度の変動を中心に、酸性廃水に対する人工湿地処理の効果について述べる。

2. 研究概要

廃水処理に活用される人工湿地には2つの型がある^{1),2)}。一つは、表面流型 (Free Water Surface Flow:FWSF) 人工湿地で、廃水が主に湿地表面を流れるタイプで、廃水の浄化は酸化的環境で主に行われる。FWSFは、湿地の造成が比較的容易で、費用も少ななくてすむが、処理に必要な湿地面積が大きくなる。もう一つは、浸透流(伏流)型(Sub-surface Flow:SF又はSSF) 人工湿地で、湿地内部に廃水(排水)を導入し、湿地土壌中を流すタイプで、主に還元的環境で浄化が進行する。SSF(SF)は、浄化に必要な湿地面積がFWSFよりも小さくてすむが、逆に湿地の造成費がより高くなる傾向がある。

本研究の人工湿地は、造成しやすいことやコスト面などからFWSF人工湿地とした。人工湿地は、研究フィールド内の地表面を1m以上掘削して、底面と周囲を粘土層で固め、フィールド周辺の土壌とヨシの地下茎を含んだヨシ原の土壌を敷き詰めて造成した。湿地の形は上流側に膨らんだ変形楕円型をしている。湿地全体の面積は約400 m²で、その内を沈砂池区(約90m²)と、ヨシ等が繁茂している湿地区(約310m²)に分けている(図-2)。粘土層の厚さは約30cm、湿地土壌の厚さは、約70cmである。水深は、通常5~10cm程度に保たれている。人工湿地は、2001年11月にほぼ完成したが、その後石積みにより沈砂池区と湿地区に分けるための改良や流入・流出口の改良などをおこない、最終的には、2002年7月に完成した。この人工湿地には、ズリ堆積場から滲出している酸性水(平均(n=50)流量:23L/min、pH:3.0、鉄(Fe):45mg/l、マンガン(Mn):100mg/l及びアルミニウム(Al):244mg/lなど)を、周辺の沢水に合流させた後、合流点から約700mの距離をもつ開水路を流下させてから導入している。酸性水と沢水の混合は、1)

酸性水を希釈して湿地導入前にpHを上げる(植物の保護)、2)酸性水中のFe・Alを水酸化物として沈殿させる、などのためにおこなっている。流入量は、毎分71~474ℓ(平均流入量:183ℓ/min)で沢水、降雨および融雪の影響により大きく変動する。

人工湿地の水質変動調査(水質モニタリング)は、2002年5月から、湿地に導入する水(流入水)と湿地から流出する水(流出水)についておこない、2002~2004年度はほぼ1ヶ月に一度、2005年以降は3~4ヶ月に一度の頻度で実施した。モニタリング項目はpH、流量、水温、電気伝導度(EC)、懸濁物質(SS)濃度および金属成分濃度(鉄(Fe)、マンガン(Mn)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)及びアルミニウム(Al)等)などである。なお金属成分では、採水時に吸引濾過をおこない、全濃度と溶存態濃度を分けて分析している。

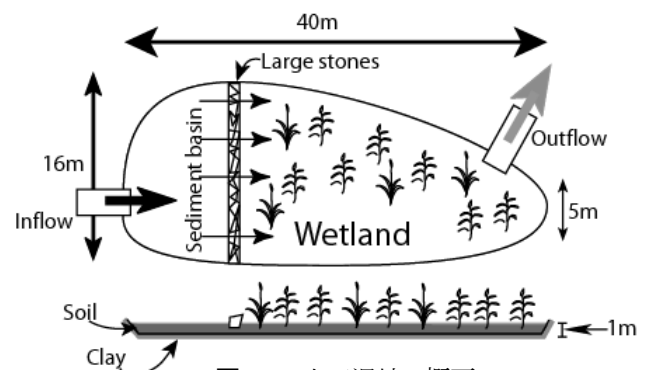


図-2 人工湿地の概要

写真は、2006年7月に湿地の流入口付近より撮影

3. 結果と考察

(1) pHの変動

図-3に流入水のpHと流出水のpHの変動と、流入水pH(In-pH)と流出水pH(Out-pH)の比(pH比)の変動を合わせて示す。流入・流出水のpHは、流入水pH:4.3~7.8、流出水pH:4.2~7.3と、合流させている沢水の影響を受け、変動幅が大きく、いずれも酸性から中性付近までと広い範囲で変動している。pH比を見てみると1.0以下になっていることが多くなっている。これは流出水pHが、流入水pHと同程度か、より低下していることを示している。またこの傾向は、流入水pHが酸性

～中性付近のいずれの場合でも見られており、FWSF(表面流型)人工湿地では、酸性廃水のpHを中和する効果はほとんど認められず、逆にそのpHを低下させる場合があることを示している。

このpHを低下させる要因としては、1) 流入水中のFe、Al等が湿地内で水酸化物を生成する(例えば、 $Fe^{3+}+3OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_3$)ことでpHを低下させる、2) pHの低下は夏期によく見られることから、植物の生育との関連性(酸性物質の放出)、などが考えられる。しかし、まだいくつか不明な点もあり今後もpH低下の要因については検討が必要と考えている。

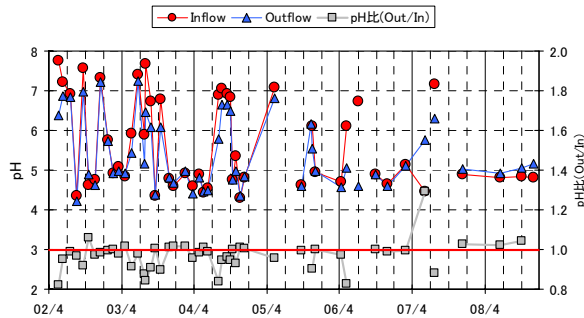


図-3 pHの推移

(2) 金属成分の変動

a) 金属成分濃度(全濃度)の変動について

金属成分の全濃度(鉄(Fe)、マンガン(Mn)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)およびアルミニウム(Al))について、流入水濃度と流出水濃度の関係を示す(図-4)。

Fe 濃度では、図中に示している等濃度線(流入水濃度=流出水濃度を示す線)より下にプロットされているのがほとんどである。これは、流入時の濃度よりも流出時の濃度が低下していることを示しており、人工湿地を流下することで流入水中のFe濃度が低下していることが確認できる。

Mn では、一部の例外を除きはっきりとした濃度低下は認められない。

Cu・Zn は、流入水濃度が低濃度の場合(Cu:0.7mg/l 以下、Zn:0.3mg/l 以下)に等濃度線より下側にプロットされることが多く、濃度の低下効果が認められる。それ以上の濃度になるとほとんどが等濃度線上に乗り、濃度低下の効果は見られない。

Al は、Fe 同様に等濃度線より下にほとんどがプロットされており、濃度の低下効果が高いことが明らかである。

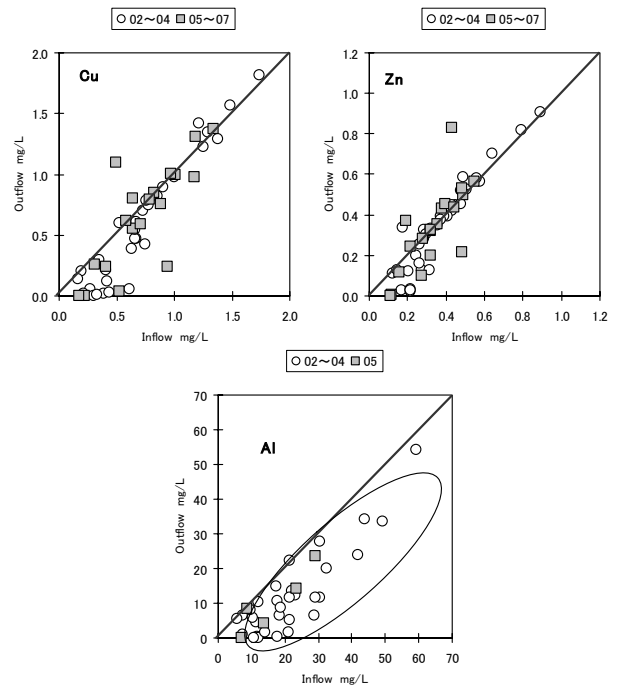
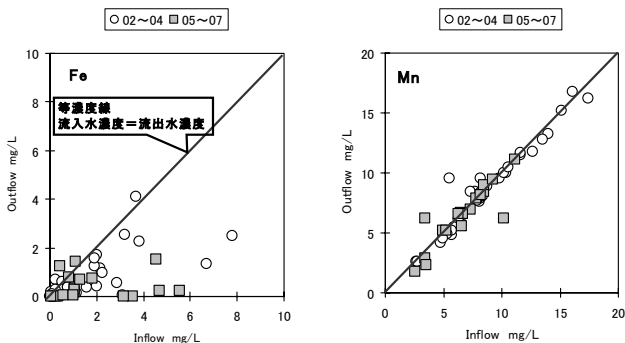


図-4 流入水と流出水の金属成分濃度の関係

また各金属成分でモニタリング期間前半(2002~2004 年度)と後半(2005~2007 年度)とに分けて図示しているが、各成分とも上記の傾向に変化は認められない。

b) 金属成分の非溶存態濃度と負荷量除去率について

金属成分では、全濃度(Total)と溶存態(dissolved)濃度とを分けて分析し、この分析値から非溶存態(particulate)濃度(全濃度-溶存態濃度)を求めている。

図-5に、各成分毎に流入水の全濃度、非溶存態濃度および

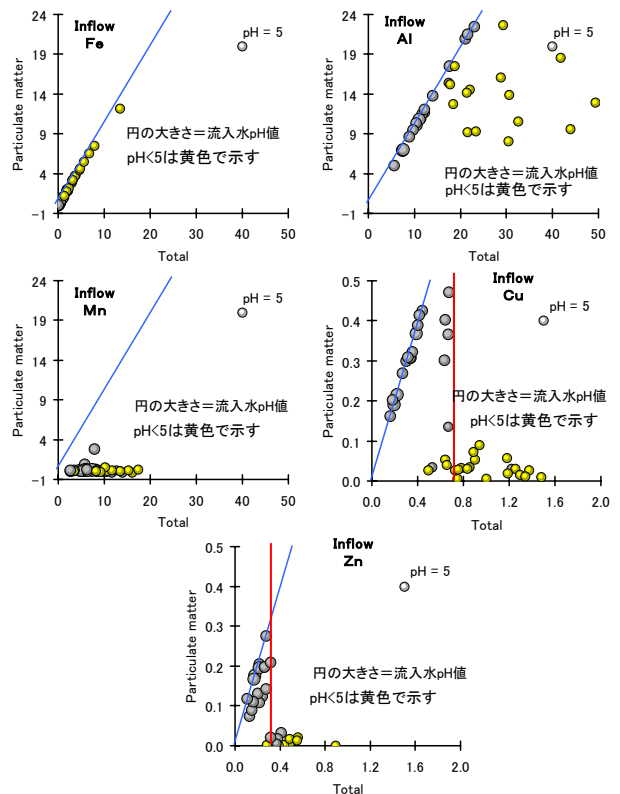


図-5 流入水の非溶存態濃度、全濃度および pH の関係

びpHとの関係を示す。この図では、pH5以下と、それ以上とに色分けしている。

Feは、ほとんどの場合で全濃度＝非溶存態濃度(図中の青線)となっており、人工湿地には非溶存態で流入していることがわかる。またpHの値(図中の円の大きさ)にもほとんど影響されていない。

Alでは全濃度＝非溶存態濃度となる場合と、高濃度(20mg/l以上)で非溶存態の割合が減少する場合の2つの傾向が見られる。前者では、多くがpH5以上で、後者は5以下である。

Mnでは、非溶存態での流入がほとんど無く、常に溶存状態で流入している。

Cu・Znについては、Alと同じような傾向を示し、濃度が低く(Cu:0.7mg/l以下、Zn:0.3mg/l以下)、pHが5以上の場合、全濃度＝非溶存態濃度(図中の青線)に近くなる。一方、濃度が高く(Cu:0.7mg/l以上、Zn:0.3mg/l以上)、pH5以下では非溶存態の割合は大きく減少する。

これらのことから金属成分の湿地における濃度の低下効果と、流入水中における非溶存濃度の割合とは、強い相関が見られる。すなわち、非溶存態濃度の割合が高いFeおよびAlは、湿地による濃度低下が顕著である。一方、常に非溶存態濃度の割合が小さいMnでは、ほとんど認められない。またCuおよびZnでは、濃度低下の効果が認められる時の濃度と、非溶存態濃度の割合が高くなる濃度が一致している。

次に、流入・流出水の流量と成分濃度から負荷量(g/min: 濃度g/L×水量L/min)を求め、SSと金属成分の負荷量除去率(%:(流入負荷量－流出負荷量)／流入負荷量×100)を計算した。この結果、モニタリング期間の平均除去率は、SS:72%、Fe:65%、Mn:19%、Cu:40%、Zn:28%およびAl:60%となった。成分毎でばらつきが見られるが、いずれもある程度の除去率が得られており、人工湿地による除去効果が認められる。またモニタリング期間を通して効果が持続されており、6年間の運用による効果の低下は確認されなかった(図-6)。

負荷量除去率ではSSと、金属成分の非溶存態濃度が高い成分(Fe・Al)で、除去率が60%以上と特に高くなった。一方で非溶存態濃度が低い成分(Mn・Cu・Zn)ほど除去率が低くなっており、濃度の低下効果と同様に、非溶存態の形成度合いにより除去率に差が出ていると推測できる。

前述したように、湿地流入前にズリ堆積場からの酸性水(pH=約3)を周辺の沢水と合流させることで湿地流入水のpHを4.3～7.8に上げている。FeとAlは、この範囲内のpHで水酸化物(Fe³⁺:Fe(OH)₃、Al:Al(OH)₃)の非溶存態となりやすい。さらにFeについては、沢水との合流後に開水路を流下することによって、Feが水酸化物になりやすい状態(Fe³⁺)に促進していると考えられる。一方でMn、CuおよびZnでは、さらにpHが上がらなければ非溶存態の形成は起こりにくい³⁾。ただし、CuおよびZnは一定の条件(低濃度、pH5以上)の下で、主としてFeの酸化物(オキシ酸や水酸化物)等に吸着することによって非溶存の状態になっていると考えられる(図-7)⁴⁾。

以上のようなことから、濃度の低下および負荷量除去率の

効果の要因としては、SS成分と共に、非溶存態となった金属成分が、植物による濾過効果や、ゆっくりと湿地内を滞留することによる沈降効果を主な要因として除去されたことによるものと推測される。したがって、人工湿地による金属成分の除去効果をより高めるには、金属成分を可能な限り非溶存態にすることが重要と考える。さらに、植物の十分な生育、湿地内の滞留時間の確保などが適切に行われることも重要である。

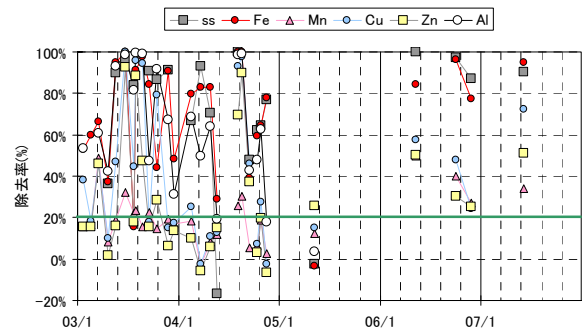


図-6 負荷量除去率(%)の推移

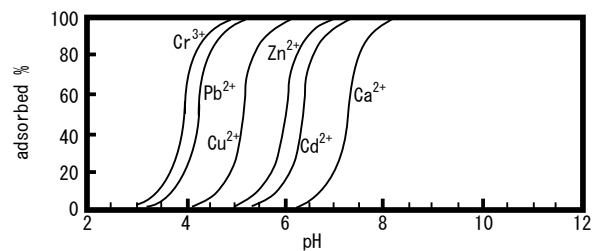


図-7 pH における金属成分(陽イオン)の鉄酸化物への吸着(THE GEOCHEMISTRY OF NATURAL WATERS⁴⁾より抜粋)

4. まとめ

人工湿地による酸性廃水中の金属成分処理に関する調査研究で以下のことが明らかとなった。

- 表面流型(Free Water Surface Flow:FWSF)人工湿地ではpHの上昇効果はあまり期待できない。
- 負荷量除去率はSS、金属成分共にある程度の除去率を示しており、特にSS、FeおよびAlでは60%以上の除去率となった。
- FWSF人工湿地による金属成分除去には、成分の非溶存化を進めることが重要で、非溶存態の割合が高ければ除去効果も高くなる。
- 6年間の試験期間一定の除去効果が継続しており、長期の使用が十分にできる可能性が高い。

5. おわりに

地質研究所では、本試験地のほかに、道北の休廃止鉱山において、人工湿地による坑廃水処理の実用化に向けた実証試験を実施している(2006年～)。道北の試験地では、FWSF人工湿地と、さらにSF(SSF)人工湿地を造成して、2つの型の人工湿地による実証試験を実施している⁵⁾。また本研究の試験結果を参考に、FWSF人工湿地ではpHの中和効果があまり期待できないことから、希釈以外で湿地導入前に簡易的にpHを中和する方法についても試験を重ねている⁶⁾。

本試験地での実証試験開始から6年以上経過し、その間人工湿地による金属成分を含んだ酸性廃水の処理に関する研究が道内外で盛んに行われるようになってきた。本試験地の人工湿地は、国内で初めての酸性廃水中の金属成分処理用の湿地であり、国内における貴重なフィールドである。今後も、処理効果等の長期的な持続性を検証する上で、ここでの水質モニタリング等の継続的な調査が必要と考えている。

謝辞：この調査研究を進める上で、函館土木現業所江差

出張所河川係の方々には、人工湿地の造成・管理および現地調査に際し、多大なご協力をいただいた。また当所職員の方々には現地作業にご協力をいただいた。ここに記して以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control (2000) : Constructed Wetlands for Pollution Control — Processes, Performance, Design and Operation — . Scientific and Technical Report, 156 p, 2000.
- 2) 周 勝, 細見正明 : 人工湿地に関する研究と利用の動向, 用水と廃水, Vol. 50, p133-142, 2008.
- 3) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構鉱害防止支援業務グループ : 坑廃水処理の原理, 38p, 2006.
- 4) James I. Drever: THE GEOCHEMISTRY OF NATURAL WATERS, 436 p, 1997.
- 5) 荻野 激 : 平成 19 年度第二回鉱害環境情報交換会資料集.
- 6) 荻野 激, 遠藤祐司, 高橋 良 : 日本応用地質学会平成 20 年度研究発表会講演論文集.