

# 沈降促進剤として鉄粉を用いる濁水処理に関する基礎的検討

近藤 俊介<sup>\*1</sup>・海野 円<sup>\*1</sup>・根岸 昌範<sup>\*1</sup>・高畑 陽<sup>\*1</sup>

**Keywords** : sedimentation accelerator, iron powder, alkaline turbid water, coagulation and sedimentation treatment, mountain tunnel

沈降促進剤, 鉄粉, アルカリ濁水, 凝集沈殿処理, 山岳トンネル

## 1. はじめに

トンネル工事などで濁水処理設備を設置するための場所が限られている場合には、狭隘なスペースに設置できるコンパクトな処理装置が必要であり、そのためには処理効率の向上が課題となる。凝集沈殿処理を効率化する手法として、凝集過程で沈降促進剤として粒径が 0.1~0.2mm 程度のマイクロサンドを添加する処理技術が検討されている<sup>1), 2)</sup> (図-1)。マイクロサンドの添加により、図-2 に示すように比重の大きい沈降促進剤を核としたフロックが形成され、フロックの沈降速度が大きくなることで、清澄な処理水が迅速に得られる。フロックと共に沈降したマイクロサンドは、湿式流体分級装置であるサイクロンによって粗粒分として回収され、沈降促進剤としてそのまま循環利用されている。本技術は、以前から浄水場や工場排水などに適用されていたが、近年、建設現場における濁水処理での適用が進められている。

筆者らは、汚染地下水の拡散防止技術である透過性地下水浄化壁工法の反応剤や吸着剤として、鉄粉を適用する方法について検討してきた<sup>3), 4)</sup>。また、鉄粉が磁性体である特性に着目し、泥水式シールド工事等で発生する泥水中に鉄粉を混合して自然由来の砒素等を吸着させ、小型磁選機で回収して繰り返し利用する一連の浄化技術を確立している<sup>5), 6), 7)</sup>。本技術は、既存の処理設備に磁選機を搭載した反応槽を組込むだけであるため、占有面積がほとんど変わらないコンパクトな処理システムを構築できる。

本報では、鉄粉が砂より比重が大きく、泥水中から鉄粉を容易に回収できることに着目し、凝集沈殿処理

における鉄粉の沈降促進剤としての適用性について検討するため、処理濁水の pH 適用範囲、フロック形成過程での帯電状況、フロックの沈降性などに関して基礎的な知見を得るために室内試験を実施した結果について述べる。

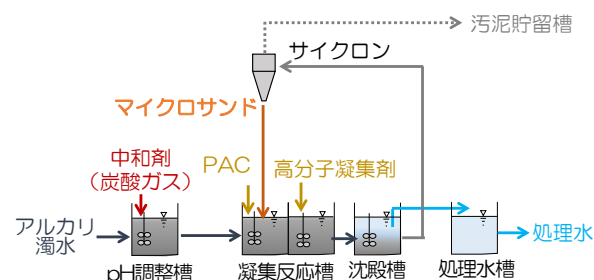


図-1 マイクロサンドを用いる凝集沈殿方法

Fig.1 Coagulation and sedimentation method using microsand

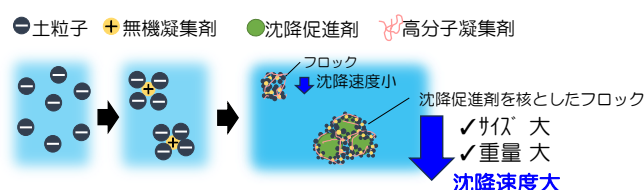


図-2 沈降促進剤を用いるフロック形成フローの概念図

Fig.2 Conceptual diagram of flocculation flow using sedimentation accelerator

## 2. 鉄粉が利用できる濁水の pH 範囲の検討

### 2.1 目的

鉄粉の効果を把握するため、PAC および高分子凝集剤を用いる通常の凝集沈殿処理に鉄粉を沈降促進剤として加える凝集試験を実施した。山岳トンネル工事で

\*1 技術センター 社会基盤技術研究部 環境研究室

発生する濁水を想定し、pH がアルカリ側に変動した場合の適用性について詳しく検討した。

## 2.2 試験方法

供試濁水は、山岳トンネル工事で発生した実濁水（pH 8.5）で、SS 濃度 1,500 mg/L に調整して用いた。濁水の pH をアルカリ領域に調整するため、1N 水酸化ナトリウム（以降、NaOH とする）、および普通ポルトランドセメント（以降、セメントとする）を用いた。セメントを用いた理由として、山岳トンネルから発生する濁水は、吹き付けコンクリートの洗い水などに含まれるセメント成分の影響でアルカリ性になる場合が多いためである。

試験フローを図-3 に示す。凝集剤は、無機凝集剤として PAC（協和総業製）、高分子凝集剤はアニオン系材料（タイポリマー TA-360、大明化学工業製）を 1000 mg/L に希釈した溶液を使用した。鉄粉は高圧水アトマイズ法によって製造された重金属浄化用鉄粉（53NJ、神戸製鋼製）を用い、目開き 45  $\mu\text{m}$  篩の通過分のみ使用した。静置後の上澄み水はシリンジチューブで採取し、TBD700（アズワン社製）で濁度を測定した。

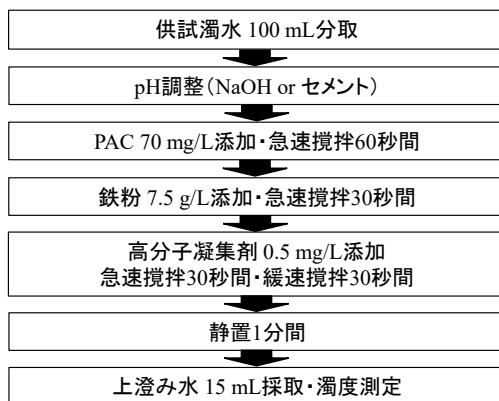


図-3 凝集試験フロー

Fig.3 Procedure of laboratory coagulation test

## 2.3 試験結果

濁水の pH と処理後の上澄み水の濁度の関係を図-4 に示す。pH 9.9 以上のアルカリ性の濁水に鉄粉を添加した条件では、鉄粉未添加の条件に比べて濁度が低くなった。また、鉄粉未添加の条件で濁水の pH を 10 付近に調整した条件、および鉄粉の有無にかかわらず濁水の pH を 11.5 付近に調整した条件では、いずれも NaOH よりセメントを用いて pH 調整した条件で上澄み水の濁度が低かった。以上の結果から、同じ pH であってもセメントを添加して pH 調整した条件では、NaOH で pH 調整した条件よりも上澄み水の濁度が低くなる傾向が

確認された。また、セメントを用いて pH を 11.5 付近に調整した濁水では、鉄粉を添加することにより、pH が中性付近の濁水を処理した場合と同等の濁度の清澄な上澄み水が得られることが示された。

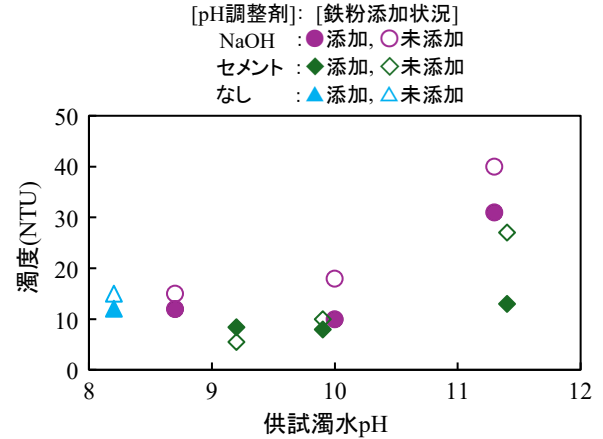


図-4 供試濁水の pH と処理後の濁度

Fig.4 Initial pH values of the test turbid water and the turbidity after treatment

## 3. フロック形成過程の帯電状況

### 3.1 目的

鉄粉を沈降促進剤として用いた場合に凝集沈殿を促進させる機構として、導電体である鉄粉がフロックの帯電状況に影響し、荷電中和を促している可能性が考えられる。そこで、フロック形成過程の帯電状況やその変化について、凝集過程における粒子・フロックだけでなく、鉄粉懸濁溶液のゼータ電位を確認した。

### 3.2 試験方法

フロック形成過程のゼータ電位の測定フローを図-5 に示す。山岳トンネル現場の濁水を坑外に移送する際の中継タンクに堆積した泥土を蒸留水と混合して濁水を作成した（SS 濃度約 1,700 mg/L、濁度 600~650 NTU）。試験に用いる供試濁水は、表-1 に示す 3 ケースを使用した。アルカリ性の供試濁水は、NaOH またはセメントを用いて pH を調整した。無機凝集剤として PAC（直治薬品製）を使用し、鉄粉は前章の試験と同様の処理を行ったものを使用した。また、各ステップでの攪拌は、pH 調整時のみペンシルミキサーを用いて、以降はガラス棒で実施した。各材料添加・攪拌後のゼータ電位は、電気泳動光散乱方式（ELS）ゼータ電位測定装置（Litesizer 500, Anton Paar 製）を用いて測定した<sup>8)</sup>。

鉄粉のゼータ電位は、蒸留水を用いて作成した鉄粉混合溶液（5wt %）を、超音波方式ゼータ電位測定装置

(DT-300, Dispersion Technology 製)<sup>9)</sup>で測定した。検液は、水酸化カリウムまたは塩酸を滴定して pH を変化させ、合計で 37 点測定した。

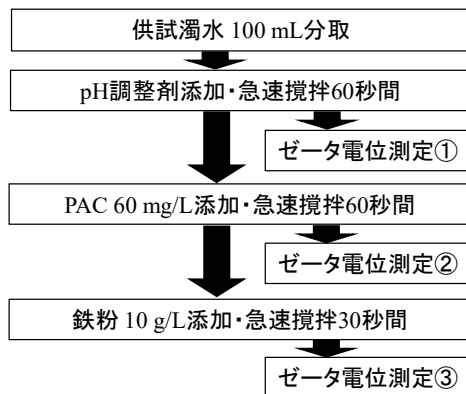


図-5 ゼータ電位測定フロー

Fig.5 Procedure for evaluating changes in zeta potential

表-1 試験ケース一覧

Table 1 List of test cases

Case	pH 設定条件	pH 設定範囲	pH 調整剤
Case 1	中性	7.0~7.5	なし
Case 2	アルカリ性	11.7~12.1	NaOH
Case 3	アルカリ性	11.7~12.1	セメント

### 3.3 試験結果および考察

#### 3.3.1 フロック形成過程の帯電状況

フロック形成過程でのゼータ電位の変化を図-6 に示す。一般的に、粒子のゼータ電位の絶対値が 0 に近い状態は荷電中和が生じ、粒子同士が引き寄せられ凝集しやすい状態となる。pH 調整剤として NaOH を添加した Case 2 では濁水中のゼータ電位の絶対値が pH 調整を行っていない Case 1 と比較して上昇した。一方、Case 3 ではセメントの添加によりゼータ電位の絶対値が減少した。これより、セメントの添加により荷電中和が促進され、濁質が凝集しやすい状態になったと考えられた。PAC 添加後は、pH が中性条件の Case 1 のみゼータ電位の絶対値が減少し、荷電中和が促進された。一方で、アルカリ調整した Case 2, Case 3 ではゼータ電位の値に有意な変化が見られなかった。本結果より、PAC による荷電中和はアルカリ性条件下では生じにくいことが示された。また、鉄粉の添加後は、いずれの条件でもゼータ電位の有意な変化は確認されなかったことから、鉄粉が荷電中和へ貢献する可能性は低いと考えられた。

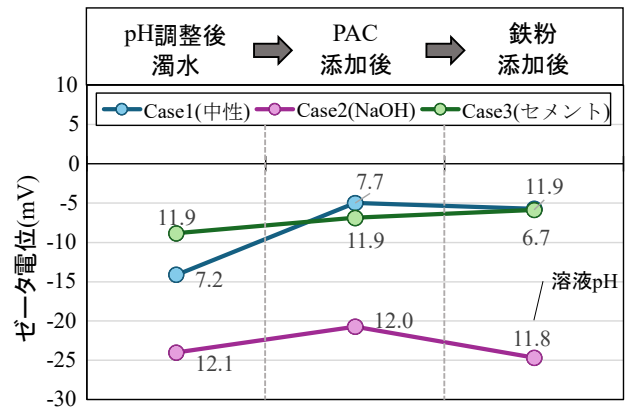


図-6 フロック形成過程のゼータ電位

Fig.6 Charges in zeta potential along the flocculation process

#### 3.3.2 鉄粉の帯電状況

水中に懸濁させた鉄粉の pH とゼータ電位の関係を図-7 に示す。pH が中性からアルカリ領域において、鉄粉のゼータ電位は概ね-15~-5 mV であり、前述した供試濁水と同程度の負電荷を有していた。そのため、3.3.1 で示すように濁水に鉄粉を添加しても、ゼータ電位の絶対値が 0 mV 付近にシフトするような荷電中和は生じないと考えられた。使用した鉄粉は金属鉄粉で導電性があるものの、ごく表面は空気酸化した状態となっており、水中では表面に水酸化鉄を形成することでマイナスに帯電すると推測された。なお、鉄粉の表面帯電がプラスに変化する等電点は pH 4.9 であり、これより酸性側では金属体から  $\text{Fe}^{2+}$  の溶出が生じていると考えられる。一般に腐食反応が顕著に生じる pH は 4 以下とされる<sup>10)</sup>が、処理水中への鉄イオン溶解リスクを回避するためには、pH が 5 を下回らないように管理する必要があると考えられる。

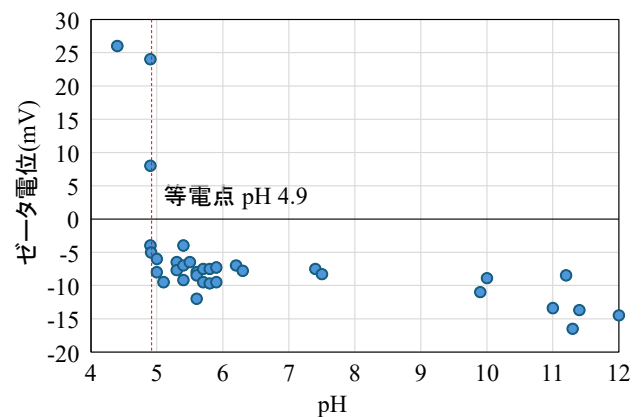


図-7 鉄粉のゼータ電位

Fig.7 Zeta potential of iron powder

## 4. 鉄粉添加による沈降促進効果

### 4.1 目的

鉄粉を沈降促進剤として使用することによるフロックの固液界面の沈降速度（フロックと上澄み水との界面の時間あたりに沈降する距離）を高める効果を把握するため、セメントを含むアルカリ性の濁水に対して凝集沈殿処理を行い、固液界面の沈降速度を光透過法で測定して評価した。

### 4.2 試験方法

表-1 の Case 3 として作製したアルカリ性濁水に対して図-5 のフローに則って処理した後に、2.2 で用いた高分子凝集剤を 0.5 mg/L 添加して急速攪拌、緩速攪拌を 30 秒間ずつ実施した。鉄粉末添加（Case 3-1）と鉄粉添加（Case 3-2）の 2 条件で、緩速攪拌終了直後のフロックの沈降挙動を、自然沈降光透過方式分散性評価装置（LUMiReader PSA, LUM Japan 製）<sup>1)</sup>を使用して測定した。本方法は、試料を入れたセルに一定の光を通過させ、時間経過に伴う光透過度の変化をリアルタイムで連続的に記録することができる。

### 4.3 試験結果

図-8 は沈降速度の自然対数に基づいて算出した沈降速度に対する分布密度であり、特定の沈降速度範囲で粒子がどれだけ分布しているかを示す。Case 3-2（鉄粉添加）は Case 3-1（鉄粉未添加）と比較して、沈降速度が大きな領域に多くの粒子が含まれていた。沈降速度の分布中央値は、Case 3-1 で 83.9  $\mu\text{m/s}$ 、Case 3-2 で 201.3  $\mu\text{m/s}$  であり、相対的な差は約 2.4 倍であった。本結果より、鉄粉を添加することで、フロックの沈降速度が速くなることを定量的に確認した。

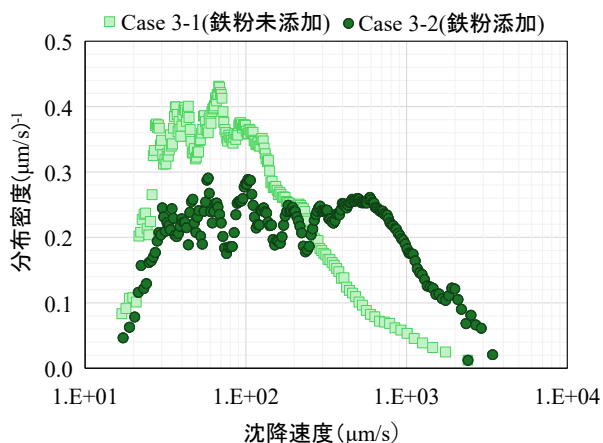


図-8 沈降速度と分布密度

Fig. 8 Settling velocity and distribution density

## 5. おわりに

本報では、鉄粉を沈降促進剤として適用できる可能性とそのメカニズムについて検証した結果をとりまとめた。本検討で得られた知見を次に列記する。

- ・ PAC の荷電中和効果は中性域に限定される一方で、セメントが存在する条件では、アルカリ性でも荷電中和効果が確認され、鉄粉を添加することにより pH が 11.5～12.0 の高アルカリ領域でも中和処理を行わずに濁水の処理を行える可能性があることが示された。
- ・ 鉄粉にはフロックの形成を促す荷電中和効果を確認できなかったが、鉄粉がフロック中に含まれることで、物理的な沈降促進効果が高まることを確認した。

今後、これらの知見をもとに、セメント由来のアルカリ性の濁水に対して図-9 に示す凝集沈殿処理システムの開発を進めていく予定である。

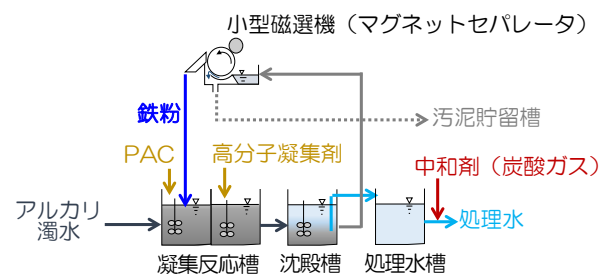


図-9 鉄粉使用時の凝集沈殿方法

Fig.9 Coagulation precipitation treatment method using iron powder

## 参考文献

- 1) 大浦正美：高速凝集沈殿処理（アクティブプロセス）に関する研究，環境技術，Vol.34，No.10，pp.703，2005.
- 2) 久野清人：東京都区部で取り組む合流改善対策-高速ろ過・高速凝集沈殿・臭素系消毒技術の導入-，環境技術，Vol.35，No.10，pp.707-708，2006.
- 3) 根岸昌範・今村聡・篠原直規・池上和広・末岡徹・長藤哲夫：揮発性有機塩素化合物の原位置浄化手法～高濃度汚染域への零価鉄粉の応用～，地球環境シンポジウム講演論文集，8巻，pp.57-62，2000.
- 4) 根岸昌範・伊藤雅子・高畑陽：透過性地下水浄化壁の長期耐久性評価と浄化材中の微生物群評価事例，地盤工学ジャーナル，Vol.20，No.1，pp.73-80，2025.
- 5) 太田綾子・海野円・根岸昌範・高畑陽・西田 与志雄：自然由来砒素を含む泥水の浄化技術に関する検討-可溶性砒素の鉄粉吸着と磁力回収による汚染泥水処理システムの適用性検討-，大成建設技術センター報，第 48 号，2015，

- No.45, 2015.
- 6) 高畑陽・根岸昌範：小型磁選機を用いる汚染スラリーの浄化方法，地盤工学会誌，Vol. 65，No. 7，pp. 32-33，2017.
  - 7) 高畑陽・海野円・近藤俊介・根岸 昌範：泥水式シールドから発生した砒素汚染泥水の鉄粉を用いる浄化技術の検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 15，No. 3，pp. 479-486，2020.
  - 8) Ryutaro Usukawa・Kimiya Sato・Yuji Hotta・Mikinori Hotta：Functions of glycerol in the tape-casting process: Revealing with AFM colloid probe measurements, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.133, No.10, pp.166-169, 2025.
  - 9) 武田真一：超音波を用いる新しい界面測定, Electrochemistry. 76 巻, 10 号, pp.768-772, 2008.
  - 10) Uhlig H.H. and Revie R.W. (松田精吾, 松島巖 訳)：腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, pp.92-123, 1989.
  - 11) 武田真一：濃厚粒子分散系の実用的特性評価法, 日本接着学会誌, Vol.56, No.5, pp.172-181, 2020.