

【課題番号】 2024#01

【研究テーマ】 マグネシウム合金を用いたオキシ水酸化鉄の還元による地下水排水管の目詰まり除去について—室内実験によるアプローチ—※

【採 択 者】

佐藤穂高（新潟大学理学部 4 年）

【要旨】

地すべりの抑制には横ボーリング工による地下水排除が有効とされるが、泥岩を基岩とする地すべり地では、オキシ水酸化鉄（以下、鉄スライム）による排水管の目詰まりが深刻な問題となっている。近年、スライム防止・除去材としてマグネシウム合金管（以下、マグネシウム管）の導入が試行され、その効果とともに、鉄スライムの変質による黒色物質の生成が観察された。本研究は、鉄スライムの還元反応によって生成する黒色物質の化学的生成条件を解明することを目的とし、酸化鉄(III)試薬および実際に採取した鉄スライムを用いた室内実験を実施した。

研究手法としては、①調査地における水質分析および鉄スライム・黒色物質の採取、②室内実験による pH および酸化還元電位（ORP）の経時変化の追跡、③現地および室内実験で得られた黒色物質の X 線回折分析による比較を行った。

室内実験では、マグネシウム管の溶解により水溶液がアルカリ性を示し、マグネシウムのイオン化が抑制されたため、pH を制御する条件を設けた。その結果、pH を制御した条件下でのみ黒色物質の生成が確認され、生成物は X 線回折分析により、現地と同様に黄鉄鉱および磁鉄鉱を主成分とすることが明らかとなった。

Eh-pH 図の解析より、主要な反応はマグネシウムのイオン化による電子供給に伴う Fe^{3+} の還元であることが示唆される。マグネシウム管の溶解に伴う pH 上昇を抑制し、酸性から中性の環境を維持することが反応継続に不可欠である。また、現地の流水条件は、pH の自然な制御およびマグネシウム管との接触機会の増加を通じて黒色物質の生成を促進する環境にあると考えられる。

【研究成果・まとめ】

本稿では、①現地調査、②バッチ法を用いた黒色物質の生成実験、③X 線回折分析の結果に基づき得られた知見を報告し、考察（④～⑥）を行う。

①現地調査

新潟県上越市に位置する沖見地すべりおよび戸沢地すべりの 2 地点を調査対象とした。排水管内で鉄スライムが生成される現象について、それぞれの水質を分析した結果、沖見地すべりでは硫酸型、戸沢地すべりでは炭酸水素型の水質が確認された。現地では、排水の水質項目の測定および鉄スライムならびに黒色物質の採取を実施した。

pH（＝水素イオン濃度）および ORP（＝酸化還元電位）は携帯型測定器を用いて現地で計測し、S-Fe（＝溶存鉄濃度）および T-Fe（＝全鉄濃度）については、o-フェナントロリン法による比色分析を実施してデータを収集した。

さらに、採取した鉄スライム中に存在する鉄酸化細菌の同定を、（一財）上越環境科学センターに依頼した。分析の結果、沖見地すべりでは *Gallionella* 属が優占しており、戸沢地すべりでは *Gallionellazoku* 属に加えて *Leptothrix* 属の存在も確認された（図-1）。

※報告書の内容に基づいて、採択時の課題を改題した。



図-1 沖見地すべりと戸沢地すべりの鉄スライムの特徴

② 室内実験

室内実験では、現地で採取した鉄スライムに対して3通りの除去材の組み合わせを用いて、黒色物質の生成を試みた(図-2)。予備実験において、マグネシウム管の溶解によって水溶液がアルカリ性を示すことが判明したが、マグネシウムはアルカリ性水溶液中では反応しにくく、イオン化による電子の放出が抑制される。そこで、本実験ではpHを制御しない条件と、pH制御を行う条件の2系統を設定した(図-3)。

その結果、pH制御を行った条件下において、マグネシウム管表面に黒色物質の生成が確認された。また、除去材にステンレス管を組み合わせたBおよびCの条件では、導線により上部が接続されたC条件において、ステンレス管表面にも黒色物質の付着が観察された(図-4)。

これらの結果から、想定通りマグネシウムのイオン化に伴って供給される電子によって、鉄スライム中のオキシ水酸化鉄が還元される反応が、黒色物質生成において重要な役割を果たしていることが示された。

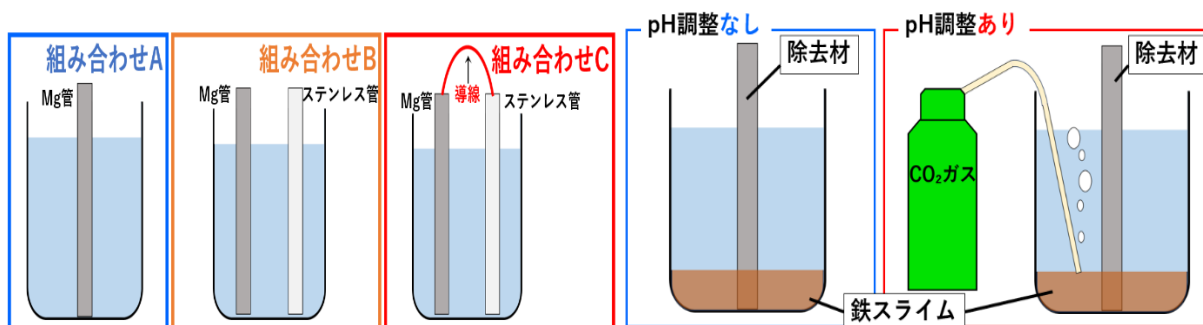


図-2 除去材の組み合わせ

図-3 2条件の実験の概略図

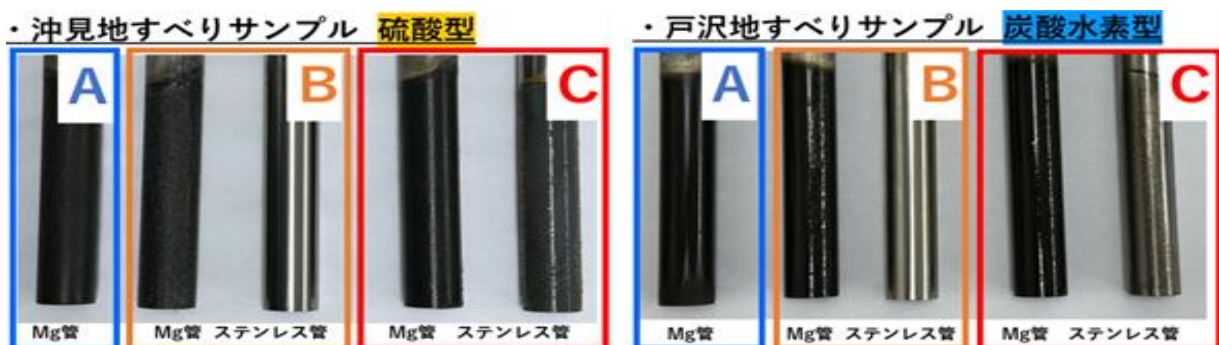


図-4 pHの制御を行った実験後の各除去材の様子

③ X線回折分析

X線回折分析により、現地で採取した黒色物質と、室内実験にて生成された黒色物質の鉱物学的組成を比較した（表-1）。その結果、両者はいずれも黄鉄鉱および磁鉄鉱を主成分としており、室内実験における黒色物質の生成が、現地で観察された変化を再現可能であることが確認された。

表-1 現地と実験室での黒色物質の比較

		母岩由来	除去材由来	鉄スライム由来		
		スメクタイト	MgSO ₄ Mg(OH) ₂	Fe ₃ O ₄	FeS ₂	FeCO ₃
現地	沖見地すべり	○	×	○	○	×
	戸沢地すべり	—	—	—	—	—
実験室	沖見地すべり	×	○	○	○	○
	戸沢地すべり	×	○	○	○	○

これら①～③の結果、および pH と ORP の追跡データに基づいて作成した Eh-pH 図（図-5）を踏まえ、黒色物質の無機化学的生成条件を検討した。主要な反応は、マグネシウム管を構成するマグネシウムのイオン化に伴い供給される電子によって、鉄スライム中の Fe³⁺が Fe²⁺へ還元される過程である。この還元プロセスを持続させるには、マグネシウム管の溶解によって上昇する pH を適切に抑制し、酸性から中性域の環境を維持することが不可欠である。

また、黒色物質がマグネシウム管の表面でのみ生成されたことから、同表面では還元反応がより顕著に進行しており、溶液中の ORP 値よりも局所的に低い酸化還元電位が発生していることが示唆される。

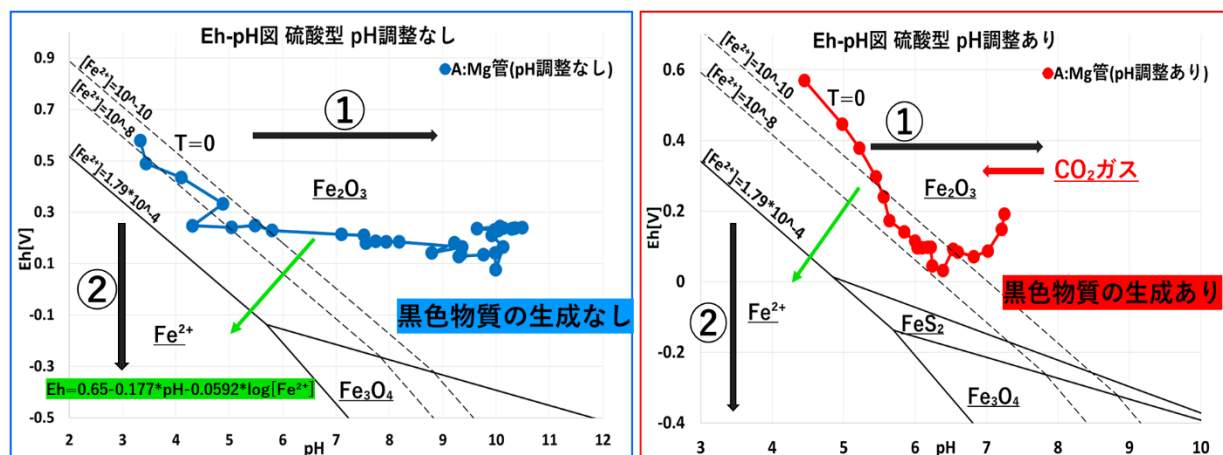


図-5 沖見地すべりの鉄スライムを用いた実験の Eh-pH 図。左が pH の制御なしの場合、右が pH の制御ありの場合

④ 現地環境との比較検討

現地と室内実験環境との比較により、黒色物質生成に影響を及ぼす因子について以下の点が明らかとなった。

現地では、マグネシウム管を用いた除去材の設置箇所に常時弱酸性の地下水が供給されている。この地下水はマグネシウム管と十分に反応する前に排出されるため、pH の急激な上昇が抑制され、マグネシウムの反応性が維持されやすい。一方、室内実験では水溶液が容器内を循環するため、最終的にアルカリ性に傾き、マグネシウムの反応性が著しく低下する。

さらに、黒色物質の形成には、オキシ水酸化鉄中の Fe^{3+} を Fe^{2+} に還元する反応が必須であるため、これらの知見からも、pH の制御が生成促進において最も重要な因子であると判断される。

⑤ 除去材と水の接触効率の検討

黒色物質生成に関わる除去材と水の接触効率についても検討を行った。現地では排水管の孔口から 10m の長さの除去材が設置されており、表面積も大きいため、流入する地下水は短時間で広範囲の除去材と接触する。一方、室内実験では 1/50 スケールである 20cm の除去材を使用しており、水が循環して小さい面積の除去材と繰り返し接触している。

このような接触機会の差異は、黒色物質の生成速度および生成量に影響を与える要因と考えられる。

⑥ 黒色物質生成の化学的結論

最後に、黒色物質のうち黄鉄鉱の生成については、硫黄を含む反応系の検討が今後の課題であるが、本研究では磁鉄鉱の生成に着目し、以下の結論を得た。

- (1) マグネシウム還元作用により Fe^{3+} が Fe^{2+} へと還元されることが黒色物質（磁鉄鉱）生成の鍵である。
- (2) 還元反応を持続させるには、pH を酸性～中性の範囲に保つ必要がある。
- (3) マグネシウム管表面では還元反応が顕著であり、局所的に強い還元環境が形成される。
- (4) Fe^{2+} と Fe_2O_3 が反応し、 Fe_3O_4 （磁鉄鉱）が形成される。
- (5) 現地では流水により反応済みの水が速やかに排出され、新たな地下水が継続的に供給されることで、pH の上昇を伴わずにマグネシウム管と水との反応が進行している。

【参考文献】

- 1) 土橋昌平・邊志切琢磨・渡邊尚史・森岡泰助・青木隆茂・渡部直喜, 2023, 孔口へのスライム付着予想の指標となる水質測定項目について, 日本地すべり学会誌, **61**, 3, 84–90.
- 2) Emerson, D., Moyer, C. L., 1997, Isolation and Characterization of Novel Iron–Oxidizing Bacteria that Grow at Circumneutral pH, Applied and Environmental Microbiology, **63**, 4784–4792.