

# P23. “愚者の黄金” にみる物質循環と岩石・水圏との相互作用

Material Circulation and Interaction with Rocks and Hydrosphere on “Fool’s Gold”

○長谷川 怜思, 山本 晃, 樋口 明良, 堀内 瀬奈 (八千代エンジニアリング)

HASEGAWA Satoshi, YAMAMOTO Akira, HIGUCHI Akiyoshi, HORIUCHI Sena

## 1. はじめに

硫黄や鉄の循環において重要な記録媒体となる黄鉄鉱[FeS<sub>2</sub>]は、世界中で最も普遍的に産出する硫化鉄鉱物のひとつであり、海成の泥質岩をはじめ多くの岩石に含まれている。これまでに筆者らは、堆積物の続成程度が進むと、黄鉄鉱の形態変化とともに脱水過程で水溶性の微量元素が系外へと排出され、物理・化学的に安定な岩石となることを示した<sup>1)</sup>。その後続的研究となる本報告では、各種試験の結果から、黄鉄鉱の生成や形態変化と溶出・水質の特性について報告する。

## 2. 調査の手順

本報告では、形成年代や続成・変成、変質程度の違いによる各種重金属等の含有・溶出特性や岩石と水との反応により生成される水質の特徴や差異を把握すべく、建設発生土や露頭にて採取した試料にて、表-1に示す室内試験を実施した。

表-1 本件で実施した試験項目の一覧

試験項目	試験方法
1 岩石薄片作成・観察	-
2 土壌溶出量試験	H15.3 環境省告示第18号
3 土壌含有量試験(全含有量)	H24.8 環境省告示第120725002号 底質調査方法
4 土懸濁液のpH試験(H <sub>2</sub> O、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	JGS 0211 (精製水、過酸化水素)
5 土懸濁液の電気伝導率試験	JGS 0212
6 無機溶存イオン分析	イオンクロマトグラフ法、酸滴定法

## 3. 室内試験の結果から考察される現象の整理

### 3.1 岩石中における黄鉄鉱の形態バリエーション

薄片の顕微鏡下観察により、岩石中に含まれる黄鉄鉱の形態を、表-2に示す6ステージに分類した。

このうち、「多硫化物態」「フランボイダル態」「変形過程態」「自形結晶態」の4形態は、主に泥質岩中に確認される初生的な黄鉄鉱である。一方、熱水変質等を受けて岩石中において鉱染状に産する黄鉄鉱は、後生の黄鉄鉱に認められるもので、鉱染状を呈するものはその結晶度が低いことが特徴である。さらに熱水変質や鉱化作用の影響をより強く受けた場合には、結晶度が徐々に増し、岩石中に不定形～自形の結晶が発達して、やがて多様な金属鉱物を多含する鉱石となる。

表-2 確認・分類した黄鉄鉱の形態バリエーション

黄鉄鉱の形態	鏡下における特徴	代表写真
1 Polysulphide 多硫化物態	形状はフランボイダル態に近似するも、鉄含有量が少ないため、オープンクロスにて光を透過する。	
2 Framboydal フランボイダル態	直径1 μm ~ 250 μm程度の球状黄鉄鉱の集合体。珪藻や有孔虫の殻内部や有機物片を置換していることが多い。	
3 Metamorphose 変形過程態	複数のフランボイダル態が集合・融合し、立方体～多面体へと変化しつつあるもの。反射光の反射強度に斑がある。	
4 Euhedral 自形結晶態	立方体～多面体といった自形の塊状結晶を呈する。反射光をあてると結晶面全体が均質かつ一面で反射する。	
5 Alteration 変質・鉱染態	岩石中の割れ目等に沿って注入された熱水により岩石中に浸入し、結晶度が低く鉱染状の産状を示す。	
6 Mineralization 鉱化変質態	不定形や立方体～多面体の塊状結晶を呈する。反射光により結晶面全体が均質かつ一面で反射する。	

### 3.2 岩石と水との反応で形成される水質型の特徴

環告 18号溶出量試験検液の無機溶存イオン分析のうち、硫酸イオンと懸濁液のpH、カルシウムイオン、ナトリウムイオンとの相関図を図-1に示す。

本図より、黄鉄鉱の形態と各種水質のグルーピングが概ね調和していることが判る。黄鉄鉱は酸化・水と反応の過程で硫酸を生じるが、岩石と触れた水は「フランボイダル態」に代表される低続成の岩石ではpH9以上のアルカリ、続成程度の上昇によりpH6~8程度の中性、変質を被った岩石でpH3程度の酸性となる。

生成された硫酸は岩石中の方解石、石灰質化石や長石の溶脱によって中和されることが一般的に知られているが、低続成の岩石ではカルシウムイオンが水溶液

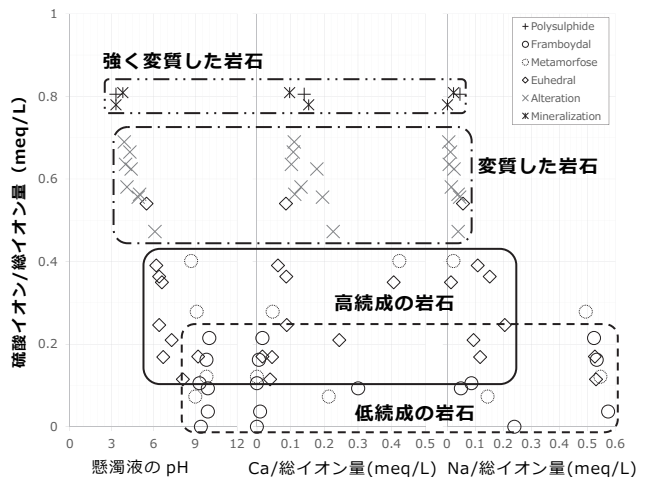


図-1 黄鉄鉱の形態と溶解反応による水質

中にほとんど存在せず、陽イオンはナトリウムイオン主体であった。総イオン量のうちカルシウムイオンが顕著に増加するのは、高続成の岩石あるいは変質を被った岩石のみに限定される。なお、水溶液中には硫酸の中和生成物である石膏等の晶出は認められなかった。

18号溶出量試験検液の無機溶存イオン分析結果から作成したトリリニアダイアグラムを図-2に示す。

本図左下、陽イオン割合では、「フランボイダル態」から「自形結晶態」にかけてはカルシウムイオンのみが増加し、変質を被るとカルシウムイオンとともにマグネシウムイオンが増加する傾向が認められる。

一方右下、陰イオン割合では、「フランボイダル態」で炭酸水素イオンが卓越するのに対して、「自形結晶態」「変質・鉱染態」は、ほぼ硫酸イオンのみから構成されている様子がわかる。

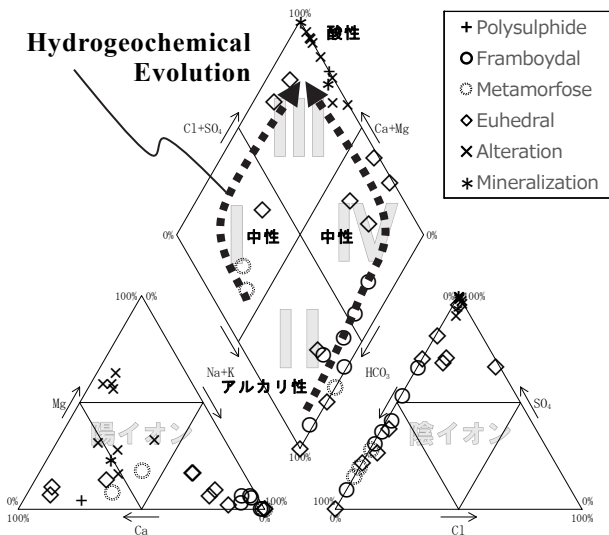


図-2 溶出量試験検液のトリリニアダイアグラム

#### 4. 試験結果から考察する黄鉄鉱と物質循環

##### 4.1 黄鉄鉱の初期生成と続成作用

多様な砕屑フラグメントとともに、海域へと供給された陸源性の有機物や海水中の硫酸イオンを固定した生物遺骸が水底に堆積し、それらが埋没する過程では、微生物による有機物の分解作用によって反応域周辺の溶存酸素減少ともなっており、Ehが低下する。やがてH<sub>2</sub>Sが生じるまで還元されると、近傍の溶存鉄と反応して「フランボイダル態」の黄鉄鉱が生成される。

「フランボイダル態」の黄鉄鉱が卓越する岩石（主に軟岩）は低続成であるために間隙も多く低密度で、膨潤性の粘土鉱物に起因したスレーキングを生じやすい。したがって、岩石の風化過程で水圏へと様々な物質が溶解しやすい条件にあると考えられる。

地層がしだいに地下深くに埋没しながら時間が経過すると、温度・圧力が上昇し、この過程で粒子間隙の減少に伴って、間隙を満たしていた水の移動・脱水が生じ、より強固かつ化学的に安定な岩石へと変化する。

続成作用が進むと、黄鉄鉱の形状も「フランボイダル態」から「自形結晶態」へと変化する。この形態変化にもなると、続成の初期段階では比較的水溶性の物質が各種鉱物や岩石の系外へと排出される。その結果、高溶存物質となった水（地下水）は、岩盤の割れ目や節理等に沿って浸入し、循環年代の若い水循環系から孤立して岩盤中に長期貯蔵される。これら高溶存物質の地下水は、鉱泉水や温泉として慢性疾患や外傷、疲労回復など、我々に恵みをもたらしてくれる。

続成作用がより進み、「自形結晶態」の黄鉄鉱が顕著な岩石は、黄鉄鉱の酸化・水和反応により硫酸が生じて、岩石中のカルシウムが溶脱することによって中和され、結果水溶液は中性を示す。

##### 4.2 後生的な黄鉄鉱をもたらす変質作用

地層が圧密・続成過程ないしは岩盤の割れ目や節理等に高溶存物質となった地下水を保有している状況下で、高熱の貫入岩体等による接触を受けると、熱水変質や交代作用により黄鉄鉱に代表される硫化鉱物が、割れ目や節理に再生成される。低温の熱水変質では結晶度が低く「変質・鉱染態」を、より高温の熱水変質では、「鉱化変質態」の自形結晶となり、黄銅鉱[CuFeS<sub>2</sub>]等を共存するようになる。熱水変質によってもたらされたこれら鉱床は、割れ目（鉱脈）に有用な元素が集積することで効率的に金属資源を得やすいというメリットがある。一方で、これら岩石の風化過程では、pH3程度の酸性水や、生物にとって有害な自然由来重金属等を含む水を生じる。

#### 5. 今後の課題

「土壤汚染対策法の一部を改正する法律」が平成31年4月1日から全面的に施行され、自然由来重金属等を含む土壌・岩石等に対しては、リスクに応じた規制の合理化が進むことが予想される。土壤汚染対策法の適用を受けない自然由来重金属等を含む土壌・岩石等に対しては、「建設発生土が有する潜在的なリスクを適切に評価・見抜くこと」や「適正管理の下での利用」が鍵となる。そのためには、地域資源として自然由来重金属等の起源や、その循環系を科学的な観点から理解・俯瞰し、その場が施工によってどう変化するのかを推察する洞察力が求められるので、引き続き、建設発生土の有効活用や適正処理を視野に、検証事例を増やして持続可能な社会に向けて貢献したいと考える。

#### 文献

1) 長谷川怜思・大塚智久・山本 晃・堀内瀬奈 (2018) : 海成泥岩の続成程度に着目した物理・化学特性の研究 -特に自然由来重金属等の溶出特性について、(一社)日本応用地質学会 平成30年度研究発表会, pp.175-176.