

短報 Short Report

デジタル式帯磁率測定器を用いた河川砂の帯磁率測定：
理科教材としての河川砂の新たな可能性について

多々納 葉¹・久森洸希²・江川 宣³・平谷篤史⁴・山崎博史^{5,6}

Measuring the Magnetic Susceptibility of River Sand: New Possibilities for River Sand as a
Science Teaching Material

Yo TATANO¹, Koki HISAMORI², Sen EGAWA³, Atsushi HIRATANI⁴ and Hirofumi YAMASAKI^{5,6}

要旨：河川砂が岩石サイクルの中で多様化することを示す事象として砂鉄に着目し、その濃集程度の違いが帯磁率に反映されると考えた。デジタル式帯磁率測定器 KT-10 v2 を用いて河川砂の帯磁率を測定するための条件を検討して測定手順としてまとめ、斐伊川水系上流部において試行的に帯磁率測定を実施した。河川砂と周辺に分布する岩石の帯磁率を比較すると、河川砂の帯磁率は、やや低い値を示す一方で岩石の帯磁率では認められない高い値を示すこともあり、バイモーダルな度数分布を示す可能性が示唆された。このことは河川砂の多様化と関連付けることができ、帯磁率に着目した河川砂の理科教材としての活用可能性が示唆された。

キーワード：河川砂、デジタル式帯磁率測定器、岩石サイクル、理科教材、ESD

Abstract: This study focuses on iron sand as an indicator of the diversification of river sands in the rock cycle. Magnetic susceptibility was applied as an indicator of differences in the degree of iron sand concentration. Conditions for measuring the magnetic susceptibility of river sands were studied and summarized as a measurement procedure using a digital magnetic susceptibility meter. Magnetic susceptibility experiments were conducted in the upper reaches of the Hii River system in Shimane Prefecture, Japan. Comparing the magnetic susceptibility of river sand with that of the surrounding rock, the susceptibility measurements differed between sand and rock, indicating a potential bimodal frequency distribution linked to the diversification of river sands. As a result, we recommend using river sands as a science teaching material for magnetic susceptibility.

Keywords: river sand, digital magnetic susceptibility meters, rock cycle, science teaching material, ESD

I. はじめに

砂は岩石の風化生成物であり、地圏の構成物の一つとして地球表層の岩石サイクル（後述）の枠組みの中に位置付けられる。このことに関連して、川村ほか（2012）は「砂粒の様々な鉱物種は、陸上の過去の地層や火山をつくる岩石を給源とし、それが主に水を媒体として風化・侵食・運搬・堆積を経たものであること、これは長時間にわたって地球表層の水圏～地圏上部の循環している一端であること、が理解の趣旨であり、そこには水や元素の循環と同様に、物質の循環が

基本的視座として据えられるべきであろう」と述べている。これは、砂を用いた学習指導の視点として、砂の特徴を個々の事象として理解するだけでなく、岩石サイクルのような物質循環の枠組みの中に位置付けて理解することの重要性を指摘したものと考える。また、学習素材としてみた時、小・中学校理科において砂は最も身近な教材の一つであるが、集合体としての砂の挙動が取り上げられることが多く、直接砂粒を観察する内容は少ないとも指摘した（川村ほか、2012）。そうした中、砂粒の色の違いに着目すること

1 島根県政策企画局広聴広報課：Shimane-ken POLICY PLANNING BUREAU Public Relations Division

2 兵庫県立須磨東高等学校：Hyogo Prefectural Suma Higashi High School

3 リョービ株式会社：Ryobi Limited

4 広島県立海田高等学校：Hiroshima Prefectural Kaita Senior High School

5 広島大学名誉教授：Professor emeritus at Hiroshima University

6 広島大学総合博物館客員研究員：Visiting researcher at Hiroshima University Museum

で、粒径の違いや構成について調べる学習を想定することができるとの報告もある（龍・渡邊，2014）。

人間生活との関わりから見ると、砂は重要な資源・資材として活用されているものの、近年では、資材（コンクリート、アスファルト、ガラス、電子機器）としての砂不足が顕在化しているとの指摘がある（Torres et al., 2017 など）。その要因は人間活動と自然環境との関連を考慮する必要があるなど複雑であり、砂不足は単一の解決策を持たない。こうした課題に対して理科教育の立場からアプローチするとき、前述した岩石サイクルの中での砂の位置付けや川村ほか（2012）の指摘を踏まえれば、地球表層を移動する砂に着目してシステム思考の育成を目指す環境保全や持続可能な開発のための教育（ESD）に関連した学習文脈構築の可能性が指摘できる。そこで本研究では、このような学習文脈構築のための基礎研究として、河川砂の多様化を示唆する事項として砂鉄の含有量に関連する河川砂の帯磁率に着目した。

本稿ではデジタル式帯磁率測定器を用いて砂質堆積物の帯磁率を測定するための測定条件を検討し、測定手順としてまとめた。また、この測定手順により河川砂の帯磁率測定を試行的に実施し、測定結果の学習素材としての活用可能性を検討した。

II. システム思考と岩石サイクル

1. 理科教育におけるシステム思考育成と持続可能性

近年、持続可能な社会の構築に向けて、持続可能な開発目標（SDGs）が提示され、社会全体に多様な取り組みが広がりつつある。社会の持続可能性を考えるとき8つのコンピテンシーが必要とされ（UNESCO, 2017）、それらのうちシステム思考コンピテンシーは、単一の解決策を持たない、一見構造化されていない複雑な問題に対処するために求められる能力と説明される（高橋・ホフマン，2019）。

日本の学校教育においても平成29・30年度告示の学習指導要領において、その前文で「持続可能な社会の創り手」の育成がうたわれている。その実現に向けては、中等教育の主目的である資質・能力の育成において、分離独立した知識を相互に関連づけ、機能的に構造化された知識へとその質を変容させ、知識基盤社会の中での活用に結びつけることが求められていると考える。理科教育においても、系統的な学習による基本的な知識・技能の習得と探究的な学習を組み合わせた枠組みの構築により、知識の質的向上への対応が図られているところである。

理科教育では、自然事象の結果と原因を科学的な知

識や論理に基づいて関連づけながら事象全体を理解させるため、段階的・系統的に多様な学習活動が提供される。しかしながら、特に地学領域においては、扱われる自然事象の時間的・空間的スケールは多様であり、結果と原因の時間的・空間的位置関係も一様ではない。すなわち、結果と原因がほぼ同時に同じ場所で生じる場合だけでなく、過去にある場所で受けた原因により生じた結果が、現在はその場所とは異なる場所に存在していることがある。あるいは原因が結果を生み、その結果が原因となって新たな結果に繋がるという連鎖を想定することで理解される事象も存在する。このような自然事象の複合性が認識されていないと、対象とする事象について、多面的に捉えることなく一面的な見方による理解に止まることが予想され、またそのような見方を繰り返すことにより一面的な見方が定着することが危惧される。このための対応として、要素間の相互作用や関係を理解・予測するための能力（センゲほか，2014）とされる学習者のシステム思考能力（system thinking abilities）という考え方（Orion and Libarkin, 2014）を内在する地球システムアプローチの適用が考えられる（Scherer et al., 2017）。

理科教育において持続可能な社会を担う人材育成を図るための一つの方策として、システム思考能力の育成を基軸としたアプローチが想定できよう。私たちの身の回りにあり、自分自身もその中に組み込まれているシステムは複雑でダイナミックなシステムである。したがって、その中で生じる多様な課題に対応するためには、理科教育において科学的知識の習得を図り、システム思考を基軸として複合的な自然事象を多面的に捉え、相互作用や関連を考慮しながら自然事象を科学的に理解する方法や態度の育成を図ることが持続可能な社会を担う人材育成に繋がると考える。

2. 岩石サイクル

地球表層の物質循環の一つに岩石サイクル（rock cycle）がある。岩石サイクルは、地殻構成物が多様な地質学的作用を受けて火成岩、堆積岩、変成岩と形を変えながら循環していることと捉えられる（図1）。風化生成物を主な構成物とする堆積岩全体の化学組成については、多様な構成岩類の存在比の見積りでの不確実性や生物起源の構成物のため先行研究での想定にはばらつきが認められるが、マグマを起源とする火成岩全体の平均化学組成と概ね類似している（Mason, 1966）。このような岩石の化学組成の捉え方は、岩石サイクルの考え方と調和的である。

岩石サイクルの中で、地表付近で風化・侵食された

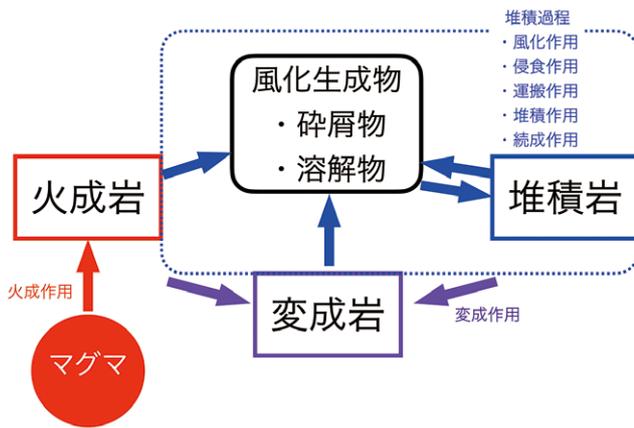


図1 岩石サイクルの概念図

後背地の岩石が風化生成物となり、その後堆積岩となる過程（堆積過程）は水や空気による侵食・運搬・堆積の各作用が大きく関わっている。そのため、堆積過程は地球システムにおいては地圏と水圏及び気圏との相互作用の枠組みの中に位置付けられる。

岩石サイクルを理解することは、岩石サイクルを地球表層における一連の事実としてではなく一つのシステムとして理解できることであり（Kali, 2003）、地球のさまざまな物質の形成を説明するプロセスと生成物の長期にわたる因果関係のシーケンスを再構築する能力を有していることである（Kali et al., 2003）。このような理解のためには、このサイクルが地質学的時間（deep time）の中に位置付けられるので、通時的思考に関連したディープタイムの論理的理解（Dodick and Orion, 2003a, 2003b）や理科学習における通時的な見方（山崎, 2021；山崎ほか, 2020）が必要である。

3. 岩石サイクルと人間活動

堆積過程は岩石サイクルの中で特定の要素が濃集する過程と捉えることができ、また、その結果として堆積岩の多様性が創出される。堆積岩全体としての平均化学組成は、前述の通り火成岩のそれと概ね類似する。しかし個々の堆積岩をみると、それぞれ特徴的な化学組成を有している（Mason, 1966 など）。このことは、後背地の岩石が風化・分解され、その結果生成された風化生成物が、運搬作用等一連の作用を受けて粒径、比重、風化耐性等により選別され、特定の要素（鉱物等）が濃集した結果と捉えられる。このような過程により有用な鉱物（元素）が濃集すると堆積鉱床として認識され、岩石サイクルと人間活動との関わりが生まれる。例えば、茨城県友部丘陵に分布する第四系友部層では浅海堆積物中に砂鉄が濃集した砂鉄鉱床の胚胎が認められ、かつては稼行されていた（坂本・

宇野沢, 1979)。また、茨城県八千代町尾崎前山の製鉄遺跡では、製鉄の原料となる砂鉄は近傍を流れる鬼怒川河岸に多く産し、旧河道の近くには金山、金田などの地名も残っている（茨城県, 1985）。

一方、岩石サイクルの一部をなす“自然”の堆積過程により濃集した砂鉄の利用にとどまらず、人為的な砂鉄濃集過程を構築して製鉄が営まれた例もある。中国地方で行われたたたら製鉄（岩永, 1956）は、花崗岩や閃緑岩など、酸性または中性の深成岩が風化した土壌を水洗い（比重採鉱）することによって得られる砂鉄を木炭炉で製錬する製鉄業である（土居, 1965）。原料となる砂鉄は花崗岩類の中にごくわずかしが含まれていないため、鉄穴（かんな）流しと呼ばれる方法で採取された（貞方, 1982）。鉄穴流しは、風化した花崗岩類の風化土層を大量に掘り崩して水路に落とし、その中に含まれている微量の砂鉄を水選比重選鉱によって採集するものと定義されている（貞方, 1985）。鉄穴流しはきわめて大量の土砂を掘り崩すため、たたら製鉄の核心地域となっていた斐伊川などの上流各地では鉄穴流しによる大規模な地形変化が生じた（貞方, 1985）。また、鉄穴流しにより廃棄された土砂の多くは河道を流れ下り本川の河床を上げることで人間生活に影響を与えたことや結果として河口洲を拡大し新田開発に繋がったことが指摘されている（貞方, 2007）。

III. 河川砂の帯磁率測定

1. 河川砂の帯磁率

ある物質に磁場 H を与えると磁化する。磁化の強度を M 、与えられた磁場の強さを H としたとき、 H が弱ければ $M = \chi H$ の関係があり、そのときの比例定数 χ を帯磁率または磁化率という（先山, 2005 など）。鉱物はその磁性により強磁性鉱物、常磁性鉱物、反磁性鉱物に分けられ、岩石の帯磁率の大きさはそれらの量によって支配される。しかし火成岩の場合、現実に帯磁率の値に影響を与えるのは一般に強磁性鉱物の量のみで、その主体は磁鉄鉱である（先山, 2005）。したがって本研究では、火成岩分布域内を流れる河川砂の帯磁率は火成岩由来の磁鉄鉱の量を反映しているものと考えられる。

2. デジタル式帯磁率測定器を用いた河川砂の簡易帯磁率測定

河川砂を測定対象とした帯磁率計の測定限界範囲（帯磁率計動作時に生じる磁場の範囲に相当）について、携帯用帯磁率計（モデル K2：EDA

INSTRUMENTS INC. 製) を用いて河床堆積物の帯磁率を測定した小坂・小川 (1993) を参考に検討した。また、測定値の扱いについては、携帯型初磁化率計 (Kappameter KT-9) を用いて野外で帯磁率を測定した星・太田 (2012) を参考に、1 測定点で 12 回測定し、算出した平均値をその試料の帯磁率とした。以下その詳細について述べる。

1) 測定器

本研究では広島大学教育学部地学研究室所有のデジタル式帯磁率測定器 KT-10 v2 (株式会社レアックス製) を使用した (図 2A)。本測定器の測定部は 10 kHz の LC 発振回路とコイルからなり、最大感度は 1×10^{-6} SI unit である。

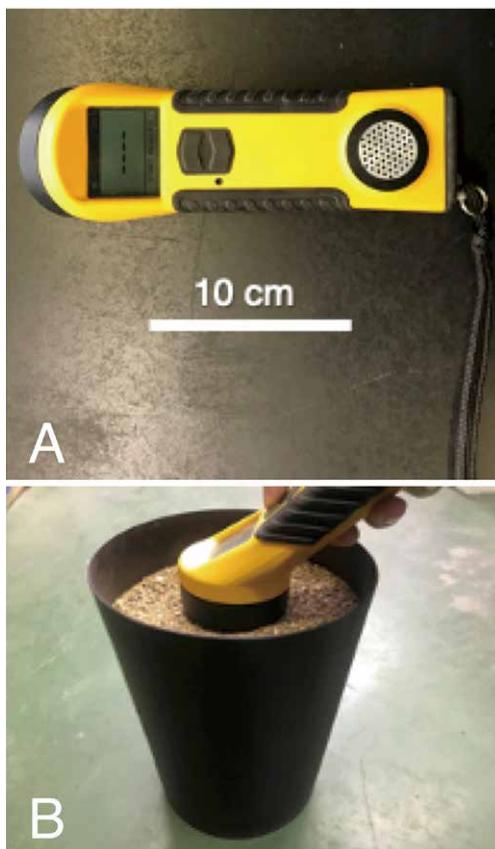


図 2 デジタル式帯磁率測定器 KT-10 v2 (A) と砂質堆積物の帯磁率測定 (B)

表 1 河川砂 (帯磁率 0.50×10^{-3} SI unit) 中に金属画鋸を置いたときの帯磁率測定結果

測定は各位置で 12 回ずつ測定し、その平均値を測定値とした。文字 (A-M) と数字 (1-6) は図 3 に対応し、金属画鋸の位置を示す。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	0.495	0.504	1.23	1.85	5.76	10.1	10.6	10.2	5.34	2.05	1.28	0.501	0.498
2	0.499	0.501	0.525	0.607	2.05	5.02	5.65	5.01	2.03	0.583	0.529	0.502	0.501
3	0.499	0.498	0.508	0.598	0.64	1.7	1.82	1.59	0.75	0.582	0.503	0.499	0.501
4	0.498	0.487	0.495	0.56	0.625	0.909	0.94	0.89	0.664	0.554	0.501	0.504	0.498
5	0.497	0.487	0.501	0.503	0.556	0.712	0.71	0.689	0.576	0.497	0.501	0.503	0.498
6	0.496	0.489	0.499	0.502	0.498	0.501	0.5	0.498	0.495	0.5	0.501	0.497	0.498

($\times 10^{-3}$ SI)

2) 帯磁率計の測定限界範囲の検討

KT-10 v2 による帯磁率測定は、その測定部を対象物に密着して行う (図 2B)。河川砂を測定対象とするとき、対象物のサイズについて帯磁率計の測定限界範囲 (水平方向と垂直方向) を決定し、その結果を満たす容器に砂を入れて測定する必要がある。

水平方向の測定限界：河川砂 (帯磁率 0.50×10^{-3} SI unit) 中に直径 1 cm の金属画鋸を埋めて帯磁率を測定した。測定結果 (表 1) を基に図 3 中に帯磁率を等値線で示した。センサーから約 5.5 cm 離れると金属画鋸が帯磁率に影響を与えず、測定値は概ね砂の帯磁率を示した。従って、KT-10 v2 の水平方向の測定限界はセンサーから 5.5 cm 離れたところ、すなわちセンサーを中心とした直径 11 cm の円周と判断される。

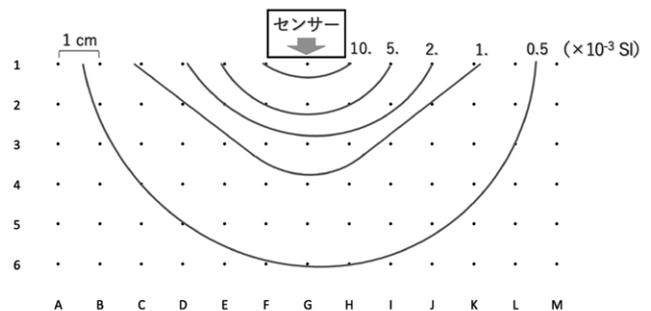


図 3 金属画鋸の位置を変えて測定した帯磁率の等値線
黒点 (・) は金属画鋸 (直径 1 cm) の位置を示す。

垂直方向の測定限界：河川砂 (帯磁率 0.50×10^{-3} SI unit) の中に厚さ 0.1 mm の鉄板 (岩田製作所 シムプレート 鉄 TF100-150-01) を水平に敷き、1 cm 間隔で深さを変えて測定した。測定結果は図 4 の通り、センサーから 10 cm 以上離れると鉄板が帯磁率に影響を与えず、測定値は概ね砂の帯磁率を示した。従って、KT-10 v2 の鉛直方向の測定限界はセンサーから 10 cm の深さであると判断される。

以上から、KT-10 v2 を用いて河川砂試料の帯磁率測定を行うとき、直径 11 cm、深さ 10 cm 以上の試料サイズが必要であり、その条件を満たすプラスチック容器に河川砂を入れて測定することが適当と判断した。

3) 測定手順

2) の結果を踏まえた河川砂の試料採取から帯磁率測定までの手順を以下に示す。

- ① 川底の砂をスコップで掻き乱しながら掬い取ってポリ袋に入れ、水を抜く。試料採取量は 950 cm^3 (約 2 kg) 以上を目安とする。
- ② 河川砂を室内に持ち帰り、恒温器に入れて十分乾

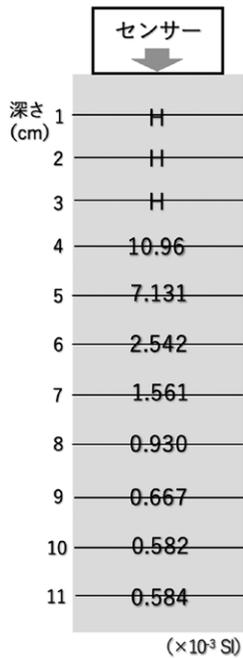


図4 河川砂（帯磁率 0.50×10^{-3} SI unit）中に鉄板を水平に埋めたときの帯磁率測定結果
数値は測定値，Hは測定限界を超えたことを示す。

乾燥させる。

- ③ 直径 11 cm，深さ 10 cm 以上のプラスチック容器に②を圧縮しながら入れ（両手で5回程度押さえつける），上面を平にする。
- ④ KT-10 v2 のセンサーを測定面に接触させて帯磁率を 12 回測定し（図 2B），平均値を算出してその河川砂の帯磁率とする。

IV. 河川砂の帯磁率

1. 調査地

調査地は中国地方中央部，島根県の斐伊川上流域である（図 5A）。中国地方には白亜紀末から古第三紀

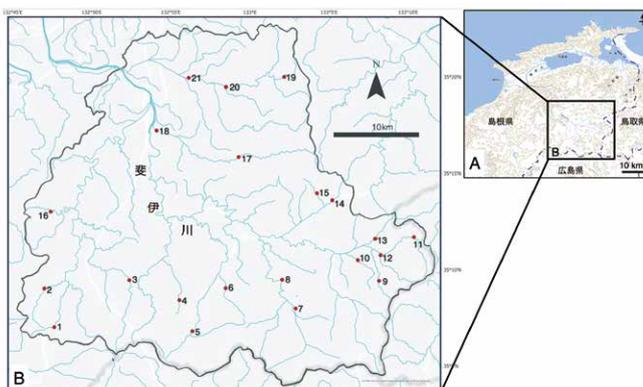


図5 調査地域位置図（A）と河川砂採取地点位置図（B）
A：黒枠の部分（B）＝調査地域，地理院地図（<https://maps.gsi.go.jp>）に加筆，B：青線＝河川，赤丸と番号＝採取地点と地点番号。

に活動した花崗岩類が広く分布し，南から領家帯，山陽帯，山陰帯に区分されている（Ishihara, 1971；Murakami, 1974；飯泉ほか，1985；Imaoka et al., 2011）。斐伊川流域には山陰帯花崗岩類が分布する。また，帯磁率は領家・山陽帯から山陰帯に向かって上昇し（金谷・石原，1973），一般に前者がチタン鉄鉱系，後者が磁鉄鉱系に大別される（Ishihara, 1977）。その境界の帯磁率の値は，Ishihara（1990）は 100×10^{-6} emu/g（ $= 2.7 - 3.5 \times 10^{-3}$ SI unit）としたが， 1.0×10^{-3} SI unit 程度または 0.5×10^{-3} SI unit 程度とするのが妥当（石渡ほか，2011）との指摘もある。

中国山地は洋式製鉄による鉄鋼生産が急増する 19 世紀末に至るまでわが国最大の製鉄業地域であり，たたら製鉄が各地で盛んに行われていた（岩永，1956）。斐伊川流域はその主要な地域の一つで，多数の鉄穴流し跡地が確認されている（貞方，1982）。

2. 帯磁率調査

本研究では，前章で述べた測定手順により，斐伊川水系の 21 地点（図 5B）で河川砂を採取し，その帯磁率を測定した。また，河川砂採取の際，デジタル式帯磁率測定器 KT-10 v2 を用いて調査地内の複数の露頭で岩石の帯磁率も測定した。

3. 結果

河川砂試料採取地点の緯度・経度と帯磁率測定結果を表 2 に示す。河川砂の帯磁率は調査地全体では $1.59 \times 10^{-3} - 50.28 \times 10^{-3}$ SI unit の範囲内であった。なお，本稿では河川砂との比較のための岩石の帯磁率については，斎藤ほか（1977）に基づく風化度判定で A（未風化岩，ハンマーで打診すれば澄んだ音を出す）と B（開口した亀裂や節理はないが，部分的に多少変質している。ハンマーで打診すれば澄んだ音を出す）に分類した岩石の測定値のみを提示し，詳細は別に報告する。

河川砂と岩石の帯磁率を便宜的に 5×10^{-3} SI unit 毎に階級区分したときの度数分布は河川砂の方が低い値を示すことが多いが，概ね一致した（図 6）。また，相対度数分布（図 7）では河川砂は最小値の階級（ $0-5 \times 10^{-3}$ SI unit）が 6 割を占め，岩石の帯磁率に比べて低い値に偏っていた。しかし一方で，河川砂のみ飛び抜けて高い値の階級（ $55-60 \times 10^{-3}$ SI unit）の試料が確認された。

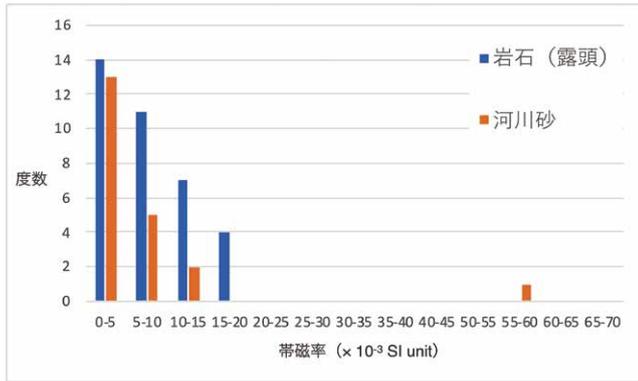


図 6 帯磁率測定値の階級区分毎の度数分布

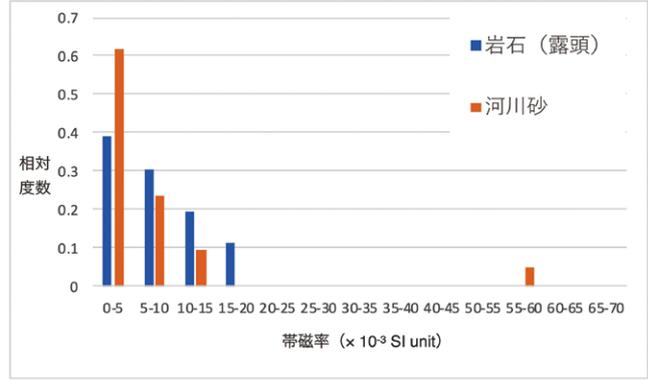


図 7 帯磁率測定値の階級区分毎の相対度数分布

表 2 斐伊川流域の河川砂帯磁率測定地点と帯磁率

河川名	地点	試料番号	緯度	経度	帯磁率 (× 10 ⁻³ SI) [標準偏差]
八重山川	1	2020101811	35.116817	132.794014	8.16 [1.09]
三刀屋川	2	2020101810	35.150322	132.783505	7.13 [0.62]
吉田川	3	2020101814	35.157402	132.872898	4.04 [0.13]
矢入川	4	2020101702	35.140229	132.925869	2.14 [0.04]
阿井川	5	2020101701	35.113293	132.939374	5.48 [0.65]
奥湯谷川	6	2020101703	35.150634	132.974417	5.59 [0.11]
大馬木川	7	2020101707	35.132904	133.048229	1.59 [0.03]
	8	2020101706	35.157827	133.033877	50.28 [3.89]
福頼川	9	2020101709	35.156814	133.135934	2.78 [0.32]
蔵屋川	10	2020101708	35.174882	133.113707	12.93 [0.32]
斐伊川	11	2020101712	35.194763	133.172655	4.06 [0.05]
山郡川	12	2020101710	35.179014	133.137554	2.74 [0.24]
山奥川	13	2020101711	35.193379	133.13199	4.65 [0.06]
亀嵩川	14	2020101713	35.226666	133.086809	7.02 [0.10]
	15	2020101714	35.232629	133.07058	2.41 [0.15]
松笠川	16	2020101809	35.216755	132.790228	3.56 [0.36]
久野川	17	2020101803	35.263966	132.988115	1.89 [0.09]
	18	2020101808	35.286853	132.901593	4.87 [0.14]
赤川	19	2020101805	35.333129	133.036049	5.11 [0.18]
	20	2020101806	35.324515	132.974713	4.60 [0.06]
	21	2020101807	35.332356	132.935483	11.73 [0.21]

V. 考察

河川砂中の砂鉄の濃集と運搬・堆積作用には密接な関係がある。河川においては運搬・堆積作用により、粒度や比重により運搬粒子は分級・選別される（原田・萱場, 2015）。向井ほか（1968）は、河川や海浜の堆積物の砂鉄濃集分布についての検討を行い、流水量が少ない場所（例えば、降水量が少ない時期の下流域）においては着磁率（河川堆積物中に含まれる着磁砂の重量百分比）が高くなるという傾向を示し、河川中の砂鉄は流水量が少ない限定的な場所に濃集するとした。

調査地域の帯磁率の測定結果は、河川の運搬・堆積作用による特定構成物の濃集を示唆する。帯磁率は、

例外はあるものの岩石に比べて河川砂の値が低い（図6）。このことは、岩石とそれを由来とする河川堆積物では構成鉱物の割合が異なることを示している。また、河川砂の帯磁率は最低値の階級の相対度数が6割を占め、低い値に偏る一方で、岩石の測定値には見られないほど高い値も存在する。この結果は、測定数を増やすなど今後さらに検討する必要があるが、周辺の岩石に比べて河川砂の帯磁率はより低い値とより高い値に偏るバイモーダルな度数分布特性を持つ可能性を示唆する。そうであれば、河川砂の帯磁率は、多様な起源を持つ風化生成物が運搬・堆積作用により混ざり合い、さらに軽鉱物と重鉱物（磁鉄鉱）に比重選別されること、すなわち堆積過程において構成物が選別

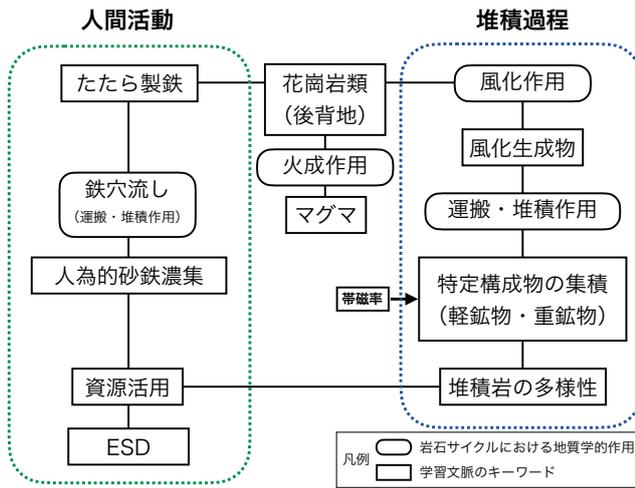


図8 河川砂を理科教材として活用するための砂鉄に着目した堆積過程の枠組みと人間活動

され特定の鉱物に濃集することと関連付けて考えることができよう。

河川砂を理科の学習素材として活用するとき、砂粒の直接観察と岩石サイクルの枠組みを意識することの重要性が指摘されている(川村ほか, 2012)。この指摘に基づいて、砂粒に含まれる重鉱物としての砂鉄に着目し、調査地域における岩石サイクルの一環としての堆積過程の枠組みを図8のように想定した。この堆積過程の中で形成される砂鉄は、たたら製鉄の原料として人間活動とも密接な関係にある(岩永, 1956)。このため河川砂の構成物である砂鉄に注目することで、大地の構成物が時間の経過とともに場所や形態を変え、結果として地質学的な多様性を生み出すことにつながるという岩石サイクルの一端を理解するための学習文脈が想定される。例えば、1) 図8の堆積過程における特定の鉱物の集積に関連して、含まれる砂鉄の量に注目して河川砂を観察し、その結果を帯磁率により可視化する、2) 周辺の岩石に比べて河川砂の帯磁率はより低い値とより高い値に偏ることに気づき、その理由として運搬・堆積作用と関連づけて考察する、3) さらに、この考察内容を基に、堆積岩の多様性形成を岩石サイクルの中で理解する、という学習活動の構成である。また、それに加えて、人為的に濃集された砂鉄が有用な資源として活用されることや人為的な濃集過程(鉄穴流し)とその周辺での地形変化を関連づけること、さらに不用物の下流への流出と下流域の地形発達への影響を関連づけて考察するなど、自然と人間活動との関わりについて環境保全やESDの視点から学習文脈を構築できるものと考え。

【謝辞】

本稿は筆頭著者の卒業研究(広島大学教育学部自然系コース)を基に執筆したものである。試料収集では横田彩氏に協力いただいた。また帯磁率測定器について先山徹氏にご助言いただいた。本研究はJSPS科研費17H00820, 19K02708, 19K03144の助成を受けた。記して感謝申し上げる

【文献】

- 飯泉滋・沢田順弘・先山徹・今岡照喜(1985): 中国・四国地方の白亜紀〜古第三紀火成活動—火成岩類の対比を中心として. 地球科学, 39, 372-384.
- 石渡明・佐藤勇輝・久保田将・濱木健成(2011): 磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系花崗岩の帯磁率の境界値—鬼首カルデラ周辺の例. <http://geosociety.jp/faq/content0337.html> (2023/8/21参照).
- 茨城県(1985): 茨城県史編集委員会(監修)『茨城県史 原始古代編』. 茨城県, 617p.
- 岩永実(1956): 鑛製鉄の生産構造. 多田文男・石田龍二郎(編集)『現代地理学講座7 生産の地理』, 河出書房, 東京, 267-294.
- 金谷弘・石原舜三(1973): 日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化. 岩石鉱物床学会誌, 68, 211-224.
- 川村寿郎・音喜多美保子・羽入由香・渡辺順三・名和玲子・佐藤秀樹(2012): 宮城県内の海浜砂の鉱物組成と給源—理科教材のための基礎資料. 宮城教育大学紀要, 47, 85-93.
- 小坂和夫・小川進(1993): 携帯用帯磁率計による河床堆積物の帯磁率測定—誤差の評価と測定例. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No. 28, 83-90.
- 斎藤実・横瀬広司・青柳省吾・山田宣良(1977): 岩石の風化度の数量的表示法について. 香川大学農学部学術報告, 28(60), 135-141.
- 坂本亨・宇野沢昭(1979): 茨城県中部, 友部丘陵の第四系. 地調月報, 30(5), 269-283.
- 先山徹(2005): 近畿地方西部〜中国地方東部における白亜紀〜古第三紀火成岩類の帯磁率—一帯配列の検討と歴史学への適用. 人と自然, No. 15, 9-28.
- 貞方昇(1982): 斐伊川流域における鉄穴流しによる地形変化. 地理学評論, 55(10), 690-706.
- 貞方昇(1985): 山陰地方における鉄穴流しによる地形変化と平野形成. 第四紀研究, 24(3), 167-176.
- 貞方昇(2007): 鉄穴流しに由来する中国山地・臨界平野の景観変容とその今日的意義. 歴史地理学, 49(1), 44-51.
- ピーター, M. センゲ・ネルダ, キャンブロン=マッケイブ・ティモシー, ルカス・ブライアン, スミス・ジャニス, ダッ

- トン・アート, クライナー (著)・リヒテルズ直子 (訳)
(2014): 『学習する学校』, 英治出版.
- 高橋敬子・ホフマン, トーマス (2019): システム思考コンピテンシーをどのようにして強化するのか?—日本の気候変動教育における学習手法「ミステリー」の可能性. 環境教育, 29(2), 2–14.
- 土居進一郎 (1965): 備北山地のたたらによる地形改変. 地理科学, 4, 15–20.
- 原田守啓・萱場祐一 (2015): 河川中上流域の河床環境に関する研究動向と課題. 応用生態工学, 18(1), 3–18.
- 星博幸・太田貴子 (2012): 領家変成帯に産する高い初帯磁率を示すアプライト岩脈. 豊橋市自然史博物館研報, 22, 1–12.
- 向井清人・小野寺公兎・丸山修司 (1968): 国東半島東部地域の海岸地形と海浜堆積物について—とくに打上げ砂鉄の濃集変化 (付) 海浜, 河川堆積物の鉱物組成. 地質調査所月報, 19(5), 285–310.
- 山崎博史 (2021): 大学生による河川景観写真の読解結果からみた自然景観の通時的な見方の育成の必要性. 地学教育, 73(4), 43–53.
- 山崎博史・武永有岐子・杉田泰一 (2020): 大学生や高校生は火成岩の形成を通時的に捉えているか?—火成岩に関する教科書の記述内容と質問紙調査結果の検討. 地学教育, 72(3), 93–105.
- 龍智将・渡邊重義 (2014): 小学校理科教材としての海岸・河口の砂—「色」に注目した理科教材の研究. 日本科学教育学会研究会研究報告, 29(1), 13–18.
- Dodick, J. and Orion, N. (2003a): Cognitive factors affecting student understanding of geologic time. *Journal of Research in Science Teaching*, 40, 415–442.
- Dodick, J. and Orion, N. (2003b): Measuring student understanding of geological time. *Science Education*, 87, 708–731.
- Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, T., Itaya, T., Kagami, H. and Iizumi, S. (2011): K–Ar age and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster: Implications for Eocene–Oligocene thermo-tectonic reactivation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2), 509–533.
- Ishihara, S. (1971): Model and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner Zone of Southwest Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, 77, 441–452.
- Ishihara, S. (1977): The magnetic-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293–305.
- Ishihara, S. (1990): The inner zone batholith vs. the outer zone batholith of Japan: evaluation from their magnetic susceptibilities. *Univ. Mus., Univ. Tokyo, Nature and Culture*. No.2, 21–34.
- Kali, Y. (2003): A virtual journey within the rock-cycle: A software kit for the development of systems-thinking in the context of the earth's crust, *Journal of Geoscience Education*, 51(2), 165–170.
- Kali, Y., Orion, N. and Eylon, B. (2003): Effect of knowledge integration activities on students' perception of the earth's crust as a cyclic system. *Journal of research in science teaching*, 40(6), 545–565.
- Mason, B. (1966): *Principles of geochemistry 3rd. ed.*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Murakami, N. (1974): Some problems concerning late Mesozoic to early Tertiary igneous activity on the Inner side of Southwest Japan. *Pacific Geology*, 8, 139–151.
- Orion, N. and Libarkin, J. (2014): Earth system science education. In Lederman, N.G., and Abell, S.K., eds., *Handbook of research on science education*, vol. II. New York: Routledge, 481–496.
- Scherer, H. H., Holder, L. and Herbert, B. (2017): Student Learning of Complex Earth Systems: Conceptual Frameworks of Earth Systems and Instructional Design. *Journal of Geoscience Education*, 65(4), 473–489.
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K. and Liu, J. G. (2017): A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357, (6355), 970–971.
- UNESCO (2017): *Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives*, Paris, 62.

(2023年8月31日受付)

(2023年11月24日受理)