

タンブラーによる花こう岩礫の円磨

Abrasion of Granite Pebbles by the Tumbler

澁江 靖弘* 春名 裕介** 森本 美咲***
SHIBUE Yasuhiro HARUNA Yusuke MORIMOTO Misaki

小学5年生は理科で流水の作用を学習して川原の石が流されて丸く小さくなることを理解する。この自然現象を実験的に再現するためにタンブラーを用いた花こう岩礫の円磨実験を行った。花こう岩の石材をハンマーで砕いて得られた試料をタンブリングすることで角張っていた礫が丸くなった。実験方法と実験上の留意点を記すとともに試料の観察結果を示した。

キーワード：タンブラー, 礫, 花こう岩, 円磨

1 はじめに

小学5年生は理科の授業で流水の作用について学習する。この学習において角張っている石が流される過程で丸く小さくなっていくことを知識として持つようになっている。平成27年度に使用された小学5年生用理科教科書中で、角張っている石が流される過程で起きる変化に関する記述内容を以下に列記する。検定済教科書が6社（新興出版社啓林館、東京書籍、大日本図書、学校図書、教育出版、信州教育出版）から出版されていたので、これら6社全部の教科書中での記述内容を示す。引用にあたってはルビを解除しているが、下線や箇条書きのために付されている「●」印や「・」印は省略していない。

(1) 新興出版社啓林館（石浦ほか, 2015, p. 110）

「山の中, 平地, 海の近くでは, 川のはばや水の流れの速さ, 川原の石の形や大きさなどがちがう。山の中では, 大きくてごつごつした石が多く見られ, 平地や海の近くでは, 小さくて丸い石やすなが多く見られる。」

(2) 東京書籍（毛利ほか, 2015, p. 76）

「●土地のかたむきが大きい山の中では, 水の流れが速く, 川はばがせまくなっています。川原には, 角ばった大きな石が, 多く見られます。●平地になるにつれて, 流れがゆるやかになり, 川はばが広くなります。川原には, まるくて小さな石が多くなります。」そして, 「理科のひろば」と題する補足の中で「川原の石が, 山の中では, 角ばって大きい石が多いのに, 平地になると, まるくて小さい石が多くなるのは, どうしてでしょうか。それは, 流れる水のはたらきによって, 川の石が運ばれていくうちに, たがいにぶつかるなどして, われたり, けずられたりするからです。」として石が丸みを帯びる理由を説明している。

(3) 大日本図書（有馬ほか, 2015, p. 103）

「上流の石は大きくて角ばった石が多く, 下流の石は小さくて丸みをもった石が多い。上流の石と下流の石のようすがちがうのは, 流れる水のはたらきによって, 石が流されていくうちに, われたりけずられたりして, 形

を変えたからである。」

(4) 学校図書（霜田ほか, 2015, p. 100）

「川の水は, 川岸をしん食したり, 石や土を運ばんしたりしています。石は運ばれながら石どうしがぶつかり合って角がけずられ, 小さく丸くなっていき, 川原などにたい積します。」

(5) 教育出版（養老ほか, 2015, p. 117）

「資料」と題するコラムの中で「ふつう, 川の上流では大きな石が見られ, 下流では小さな丸い石が多く見られます。これは, 石が流されるうちに, ぶつかってわれたり角が取れたりして, しだいに小さく丸くなるからです。」

(6) 信州教育出版（癸生川, 2015, pp. 108-109）

「・下流に行くにしたがって, だんだん石の角がとれて丸くなっていく。石の大きさも小さくなっていく。・運ばんされていく間に石がけずられていくのかもしれない。」そして「しりょう」と題するコラムの中で「上流から流されてきた石は, 流されていく間に石どうしがぶつかり合ったり, 川底にぶつかったりしていきます。そのときにわれたり, 角がとれたりして, 丸く小さくなっていきます。」と石が丸くなる原因を記している。

以上のようにすべての教科書中で角張っていた石が流されていく過程で丸く小さくなっていくことが記されている。そして, 多くの教科書中で石が丸くなる原因を石がぶつかって角が取れていったためであると記している。教科書中のこれらの記述内容と関連させて, 水の中で石と石がぶつかり合ったり, 石と石がこすれ合ったりすることで丸くなっていくことを実験的に示すことができれば教科書の内容への理解を深めさせることができよう。

水中で礫の角が取れていくことを再現するための実験がこれまでも行われてきた。榊原（2000）は水と礫を入れて蓋をしたポリ瓶を振とうさせて礫を磨耗させる実験を示した。この実験は経費がほとんどかからず教室内でできるものである。しかしながら, ポリ瓶中で試料同士がぶつかるとう試料に亀裂が入り, 試料がやがては砕けて

*兵庫教育大学大学院教科教育実践開発専攻理数系教育コース 教授

**兵庫県宍粟市立河東小学校

平成30年7月10日受理

***広島県福山市立瀬戸小学校

いく可能性が高い。ただし、砕けるだけでは小さくはなっても丸くはなりにくい。実際、榊原(2000)の中では磨耗した礫の形が丸くなっていることが示されていない。松川ほか(2010)は建築用コンクリートミキサーをレンタルして礫の磨耗実験を行った。大きな機械を用いる実験は経費と機械置き場の点から小学校で行う実験としては難点がある。以上のように小学校で行うことができ礫の円磨過程を実感できる実験教材の開発をさらに検討していく必要がある。

本研究ではタンブラーと呼ばれる機器をニチカより購入して実験に使用した(この機器の詳細については後述する)。タンブラーによって角張っている石を丸くする作業をタンブリングと呼んでいる。小学校理科で扱う流水の作用と関連させてタンブラーを用いた実験報告がこれまで行われていないので、本論文では実験方法を詳しく記すとともにタンブリングによって得られた試料の記載を行う。本研究での役割分担は次の通りである。澁江は実験計画全体を立てるとともに研究結果のまとめを担当した。春名と森本は実験を担当した。両名は兵庫教育大学に在学していた平成29年度に実験を行った。

2 実験方法

2.1 試料と準備物

実験に用いた試料はホームセンターで購入した花こう岩の石材である。石材の大きさは縦30cm、横60cm、厚さ2cmである。この石材を一人一枚実験に使用した。当初は、野外で採取してきた岩石を砕くことを試みたが、厚みのある大きな試料を砕くためには相当な時間がかかることが予想できたので、手軽に試料準備ができる石材を使用することにした。

実験に使用した機器、用具およびその他の準備物を次に示す。これらを列記する時に必要に応じて使用した理由、用途、あるいは注釈を括弧内に入れて付す。

【機器】タンブラー(バレルと呼ばれる試料を入れるタンブリング用容器とタンブラーフレームと呼ばれるバレルを回転させる装置の組み合わせ)、乾燥機、電子天秤(試料の質量変化を計測)

【用具と準備物】ハンマー(金槌で代用可能)、軍手(ハンマーを使用する時や試料に付着する粉を洗い流す時に使用)、保護メガネ(石材を砕く時に使用)、コンテナ(屋外で石材を砕く時に必要な用具を入れるために使用するとともに試料に付着する粉を洗い流す時の容器として使用)、ビニール袋(砕いた石材を入れる袋)、ゴム手袋(試料に付着する粉を洗い流す時に森本が使用)、ふるい(目の開きが1.91cm)、アルミバット(試料を乾燥機に入れる時に使用)、道路線引き用スプレー(橙色、黒色、赤色、白色のものを各1本)、古新聞(試料を着色する時に試料の下に敷く)、割り箸(試料全面を着色する時に試料をつかむために使用)、除震用ゴム(タンブラー運転時の騒音軽減)、子供用玩具として市販されている直径4cmで弾性のあるEVA樹脂製ボール(使用目的を考察の箇所記述)

2.2 実験方法

2.2.1 試料の準備

花こう岩の石材を屋外でハンマーを用いて砕いた(図1)。この時、ふるいを用いながら細かく砕き過ぎないようにした。そして、ふるいを通過しなかったものを実験用試料として袋に入れて回収した。

試料準備に当たって単にハンマーで砕いただけであったので、質量変化の測定と関連して問題点が生じた。準備した試料は一つ一つ形が違っている上に大きさも揃ってはいなかった。したがって、試料の大きさと形から考えると春名と森本が使用した試料は同一ではなかった。

兵庫教育大学には岩石切断用カッターが設備として備え付けられている。カッターを用いることで立方体に切断することができ、試料の大きさと形状揃えることができる。岩石切断用カッターを使用しなかった理由は、小学校でもできるように実験を考えたためである。岩石切断用カッターの価格は安い物でも数十万円であり、高価なものだと100万円を超える。このような高価な機器を使用しないことを考えた。また、岩石切断用カッターは児童が自由に出入りできる部屋に設置できる機械ではない。

2.2.2 タンブリング用容器への試料の導入

砕いて袋に入れていた試料をコンテナに移して水洗い



図1 石材と石材を割っている様子

を行った。これによって試料表面に付着している粉を取り除いた。水洗いを素手で行うと指が傷ついたり指で内出血したりする可能性があるため、実験では必ず軍手あるいはゴム手袋を着用した。

水洗いの後、試料をアルミバットに移して110℃に設定した乾燥機内で24時間かけて乾燥させた。乾燥させた試料の中から特徴的な形のものを選び出し、橙色、黒色、赤色、白色の4色に道路線引き用スプレーを用いて全面に着色した。着色した部分がタンブリングによって消失した場合には、試料そのものが磨耗したと見なした。そして、タンブリングを繰り返して着色した試料の外形変化を追った。春名が実験に用いた試料の写真を図2に示す。森本が実験に用いた試料については実験後の試料と比較する時に示す。

4色に着色した合計4試料を加えて試料全体をタンブリング用容器に入れた。タンブリング用容器は硬質ゴム製のもので内部の底面は一辺5.5cmの正十角形で深さが19cmで容積が約4120cm³である。試料量を容器の深さのほぼ3分の2になるようにした。春名が行った実験では試料量が3818.65gであり森本が行った実験では3892.39gであった。試料を入れた後で水を試料全体が浸かる程度まで加えた。

2.2.3 タンブラーの運転と試料の取り出し

試料と水の入った容器に蓋をしっかりと閉めてタンブラーフレームにセットした後で容器を回転させた。容器の回転は毎回24時間続けた(図3)。この時、容器はほぼ2秒で1回転する。

運転開始から24時間後にタンブラーの運転を停止し、容器の蓋を開けて容器内の試料と液体をコンテナに注いだ。図4は蓋を開けた時の様子を示す。剥がれた塗料が浮かんでいた。

試料の入ったコンテナに水を流しながら、剥がれた塗料と試料に付着している粉を洗い流した。この際、砂粒以上の大きさの粒子を洗い流さないで回収した。洗い終わった後で回収した試料をアルミバットに入れて、次の乾燥作業に入った。



図2 春名がタンブリングの実験に使用した試料



図3 実験時のタンブラーの様子

110℃に設定した乾燥機にアルミバットを入れて約24時間乾燥させた。乾燥後に着色していた試料の写真を撮影した。そして同じ色で再び着色した。

乾燥させた試料すべてを目の開きが1.91cmのふるいを通り抜けるものと通り抜けないものに分けて、それらの質量を測定した。このふるいを用いての質量測定は、試料全体が均一に磨耗しているのかどうかを検討するために行った。試料が均一に磨耗していくのなら、ふるいを通過する試料量は増え続けるはずである。

ふるいを通過した試料が選択的に磨耗していくのなら、その後のタンブリングによってもふるいを通過しない試料の質量変化はわずかになる。さらに、洗い流しの作業で砂粒より細かい粒子は失われてしまうので、ふるいを



図4 剥がれた塗料が浮かぶ実験直後の容器内部の様子。赤い矢印は試料を示す。

通過した試料の量も単調に増加しなくなる可能性がある。

質量測定後、タンブリング用容器に試料すべてを入れて、再び24時間回転させた。春名は13回（累計312時間）のタンブリングを行い森本は10回（累計240時間）のタンブリングを行った。

タンブリングを続けていくと試料が小さくなっていったので、一連の実験の途中から容器の容積と固体の体積の比をおおよそ一定にするために直径4 cmの樹脂製ボールをタンブリング用容器に加えた。この時、試料とボールが容器のほぼ3分の2の深さになるようにボールの数を調整した。春名は10回目のタンブリングから樹脂製ボールをタンブリング用容器に入れ森本は7回目のタンブリングから樹脂製ボールを入れた。

3 実験結果と考察

3.1 試料の質量変化

最初の24時間のタンブリングで、春名が行った実験でも森本が行った実験でも試料の質量が200g程度減少した。質量減少は、タンブリングによって試料の一部が粉になり、タンブリング後に行った洗浄作業の過程で粉が洗い流されたことを反映している。そして、洗い流された粉の総量が約200gであったことを示している。この時の試料減量値が最も大きい値であった。2回目以降のタンブリングでは値にばらつきがあるものの減量値は徐々に小さくなり、やがてほぼ一定の値を示すようになった。砂粒以上の大きさの粒子の質量で試料量の変化を表すと、タンブリング168時間以降の減量値は春名の実験で毎回1gから39g、森本の実験で毎回28gから30gであった。

3.2 試料の外形変化

着色試料の外形変化を図5と図6に示す。図5は春名の実験結果であり、図6は森本の実験結果である。図5と図6のいずれでも、実験前の着色試料は全体的に角張っている。1回目のタンブリング後に塗料がほとんど剥がれていることが分かる。元々試料には凹凸があったので窪みの所に塗料が残っていただけである。また、角張った部分が削られ始めている。

図5中で13回目のタンブリング後の写真は、どの着色試料も角が取れて全体的に小さくなっていることを示す。また、1回のタンブリングではどの着色試料でも鋭利な角が部分的に残っていたが13回のタンブリングでこれらがほぼ消失している。図6中でも10回目のタンブリング後の写真は、どの着色試料も角が取れて全体的に小さくなっていることを示す。また、1回のタンブリングではどの着色試料でも鋭利な角が部分的に残っていたが10回のタンブリングでこれらがほぼ消失している。

以上の傾向は着色していない試料でも認められた。森本が使用した実験前の試料全体と5回目のタンブリングを行う前の試料全体の写真を図7として示す。タンブリングの結果、着色しなかった試料も含めて全体的に丸みを帯びていることが分かる。

これまで示してきたことより、タンブラーを用いて礫の円磨実験が可能であると言える。1回のタンブリング

でも礫の角が取れ始めている。タンブリングによって教科書中に記されている石がぶつかって角が取れていったことを実験的に確認することができると言える。

3.3 礫の円磨度

礫の丸さは様々な方法で測定されている（例えば、二川, 1987; 原田, 1999; 保柳ほか, 2004）。高い精度で求めるためには高価な測定機器や測定値を処理するためのコンピュータソフトが必要になる。このために定量性の点では劣るものの簡便な方法が提案されてきた。

二川（1987）は円礫、中間礫、角礫の区分の仕方と関連させて、円磨度を手軽に調べる方法を次のように示している。

円礫：角や稜が全部すり減って表面がすべて曲面になっている礫

中間礫：円礫と角礫の中間で、表面にいくつかの平面が残っている礫

角礫：角や稜のはっきりした角張った礫

この方法は単純ではあるが観察者による判断の違いが生じにくい方法である。二川（1987）の方法で分類すると、タンブリング前の試料は角礫であり、実験で最終的に得られたものは春名の実験でも森本の実験でも中間礫である。

原田（1999）は円磨の程度を表す模式図（超角礫、角礫、亜角礫、亜円礫、円礫、超円礫に区分した図）を示した。この模式図と見比べると実験に用いた礫は角礫に相当し、春名と森本が最終的にタンブリングによって作製した試料は亜円礫である。

保柳ほか（2004）はKrumbein（1941）が考案した円磨度印象図を紹介している。円磨度印象図には0.1刻みで円磨度の見本が示されている。円磨度が0.1であれば角張っており値が大きくなると角が取れたものになっていく。本研究で実験に用いたタンブリング前の試料の円磨度は0.1である。図5中の1回目の結果も円磨度が0.1である。しかしながら13回目のタンブリング後の着色試料の円磨度は0.6あるいは0.5である。図6中の1回目の結果も円磨度は0.1であるが10回目のタンブリング後の着色試料の円磨度は0.6あるいは0.5になっている。

3.4 その他の観察事項

3.4.1 試料中の擦り傷

春名は2回目のタンブリング後に試料平面部の擦り傷を見いだした（図8）。試料がこすれ合った時に付いた傷だと考えられる。擦り傷を付けた試料がどれであるかは不明であるが、擦り傷を付けた試料で尖っていた部分の先端が丸くなったはずである。つまり、図8中の擦り傷は礫の角が丸くなっていく過程を反映しているものだと考えられる。ただし、明瞭な擦り傷が見いだされた試料は少数であった。

3.4.2 試料中の亀裂

森本は2回目のタンブリング後に試料中に亀裂が入り始めたことを観察した（図9）。春名が観察した擦り傷

タンブリングを行う前

1回目のタンブリング後

13回目のタンブリング後



図5 春名が観察した試料の外形変化。スケール中の長い目盛りは10mm 間隔を表す。

に比べて溝が深く、ひび割れに似た様相を示す。ただし亀裂の入った試料は多くはなかった。亀裂が入って試料が割れると小さくなるものの破断面は角張っているはずである。このことから小さくなった試料が、亀裂の広がりによって生じた物であるのかどうかを検討することができる。タンブリング後の試料を見る限りでは亀裂の

所で割れて小さくなった試料は少なかったと考えられる。春名が行った実験でも亀裂の発生による影響は小さかったと考えられるが、タンブリングを行う時に試料に亀裂が入って割れてしまうことを避ける必要があった。つまり、礫が割れて小さくなったとしても、これは本研究の目的である礫の円磨とは関係しない。

タンブリングを行う前

1回目のタンブリング後

10回目のタンブリング後

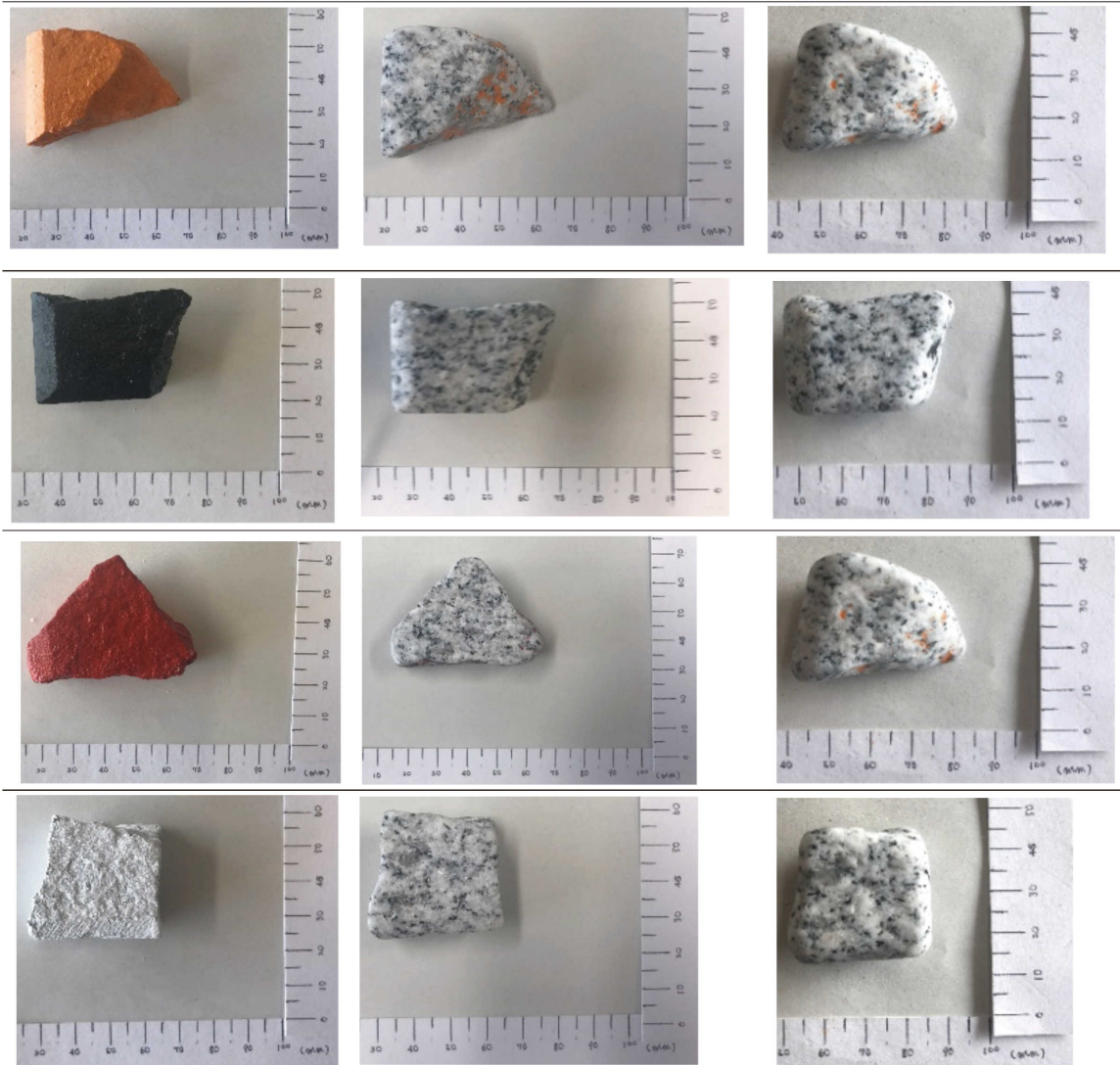


図6 森本が観察した試料の外形変化。スケール中の長い目盛りは10mm間隔を表す。

タンブリング後にふるい分けを行ったと先に記した。力を入れてふるうと試料がぶつかって亀裂が入る可能性があるため、亀裂を観察した後のふるい分けでは、注意深くふるい分けを行った。

亀裂の発生と関連してタンブリング用容器を回転させる時に試料同士が激しくぶつからないような工夫も必要であった。容器内に試料が密に詰まっていると容器が回転しても試料同士はこすれ合うだけであり、試料同士が激しくぶつかり合うことはないはずである。試料の量を増やすことで亀裂の発生を軽減することができよう。試料が容器内の空間を占める割合が小さくなった時に樹脂製ボールを詰めたが、これはタンブリング用容器回転時に試料同士が激しくぶつからないようにするためであった。

3.5 実験方法の簡素化について

今回の実験は長時間に渡るものであり、実験前の準備や実験後の作業にも時間を要した。実験方法を簡素化して短時間で効果的な学習につなげるための工夫が必要である。

これまで示してきた実験結果から実験方法の簡素化を考えると、ふるいを使用しないことと試料の乾燥を行わないことを挙げることができる。

3.5.1 ふるいの使用

本研究では試料のふるい分けを、砕いた石材から実験用試料を選び出す時とタンブリング後に行った。これらのふるい分けの作業を省略することが可能である。

実験用試料を選び出す時に細かく砕かれてしまった試料を取り除くことが試料準備でふるいを使用した理由であった。注意して砕くとともに試料の選別を目で行うことでふるいを使用しないで済ませることができよう。

タンブリング後にふるい分けを行った理由は先に記した。亀裂発生を避けることを考える必要もあるので、注意を払う点を減らす方が実験を行いやすい。

3.5.2 試料の乾燥

試料を乾燥させた理由は、タンブリングの前後での試料の質量変化を乾燥状態で比較するためと塗料で着色するためであった。質量変化を求めることや試料の着色を考えない場合には、乾燥させる手順を省くことができる。

実験前



5 回目のタンブリングを行う前



図7 森本の実験用試料。実験前の試料全体（上）と5回目のタンブリングを行う前の試料全体（下）。

3.6 新学習指導要領との関連

文部科学省は2017年3月に新しい学習指導要領を告示した (http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/news-cs/1384661.htm)。移行措置を経て新しい学習指導要領に基づく学習が2020年4月から全面実施されることになる。そこで、新学習指導要領の中で流水の作用がどのように取り扱われているのかについて簡単に記す。

流水の作用は、現行の学習指導要領と同じく小学5年生で「流れる水の働きと土地の変化」の中で学習することになっている。新学習指導要領は学習内容を次のように定めている。「流れる水の働きと土地の変化について、水の速さや量に着目して、それらの条件を制御しながら調べる活動を通して、次の事項を身に付けることができるよう指導する。ア 次のことを理解するとともに、観察、実験などに関する技能を身に付けること。(ア) 流れる水には、土地を侵食したり、石や土などを運搬したり堆積させたりする働きがあること。(イ) 川の上流と下流によって、川原の石の大きさや形に違いがあること。(ウ) 雨の降り方によって、流れる水の量や速さは変わり、増水により土地の様子が大きく変化する場合があること。イ 流れる水の働きについて追究する中で、流れる水の



図8 試料平面部で見られる擦り傷。矢印の方向に傷がついている。

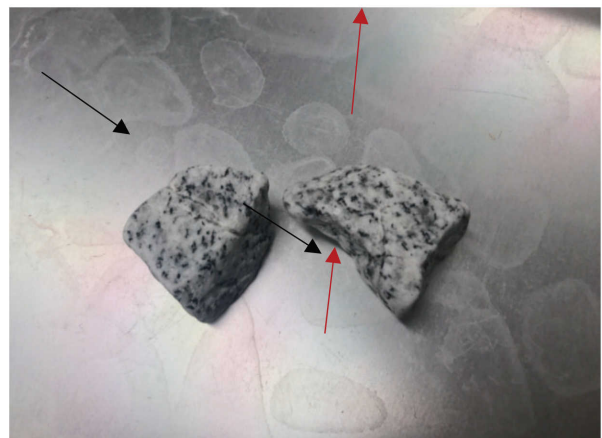


図9 試料中の亀裂。黒と赤の方向に亀裂が入り始めている。試料を載せている容器は粉が付着したアルミバットである。

働きと土地の変化との関係についての予想や仮説を基に、解決の方法を発想し、表現すること。」この引用文中で、(ア) と (イ) の箇所は2008年3月に告示された現行学習指導要領（文部科学省，2008）中の文言と同一である。(ウ)についても「流れる水の速さや水の量が変わり」となっていた箇所の文言が改められているだけである。本研究と直接関連する箇所は「(イ) 川の上流と下流によって、川原の石の大きさや形に違いがあること。」であるので、新学習指導要領においても本研究と関連する学習内容に変更はないと言える。

4 結論

小学校理科5年で扱われている流水の作用の学習の中で川原の石が丸く小さくなっていくことがすべての教科書中で記されている。

花こう岩の石材を砕いたものを使用して、水の中で礫がこすれ合うことで磨耗していく実験をタンブラーを用いて行った。春名が総計312時間、森本が総計240時間の実験を行い、最終的に両名の実験後の試料は表面にいくつかの平面が残ってはいるものの角が磨耗して丸くなった。二川（1987）の区分に基づく、実験前の試料は角礫であり最終的に得られたものは中間礫であった。また、24時間のタンブリングでも礫の角が取れ始めていること

を両名の実験で確認できた。

以上より, タンブラーを用いる円磨実験は流水の作用での学習に適用できると言える。

文献

- 有馬朗人ほか43名 (2015): 新版 たのしい理科 5年。
大日本図書, 東京, 168p。
- 原田憲一 (1999): 層序学と堆積学の基礎。愛智出版,
東京, 386p。
- 癸生川武次 (2015): 楽しい理科 5年。信州教育出版,
長野, 158p。
- 保柳康一・公文富士夫・松田博貴 (2004): 堆積物と堆積岩。共立出版, 東京, 171p。
- 石浦章一・鎌田正裕ほか54名 (2015): わくわく理科 5。新興出版社啓林館, 大阪, 198p。
- Krumbein, W. C. (1941): Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Jour. Sed. Petrol.*, 11, pp. 64-72。
- 松川正樹・江澤圭子・西田尚央 (2010): 礫の磨耗実験による河床礫の分布様式の検討: 秋川-多摩川水系を例として。地学教育, 63, pp. 125-133。
- 文部科学省 (2008): 小学校学習指導要領解説 理科編。大日本図書, 東京, 105p。
- 毛利衛・黒田玲子ほか32名 (2015): 新編新しい理科 5。東京書籍, 東京, 176p。
- 二川正雄 (1987): 川原のレキの調べ方。菅野三郎監修・奥村清編, 「地学の調べ方」。コロナ社, pp. 193-206。
- 榊原雄太郎 (2000): 川原の石ころがここに来るまで。日本地学教育学会教育実践編集委員会編, 「地学教育実践集 第2集」。トータルメディア出版, 東京, pp. 11-13。
- 霜田光一・森本信也ほか34名 (2015): みんなと学ぶ 小学校 理科 5年。学校図書, 東京, 173p。
- 養老孟子・角屋重樹ほか27名 (2015): 未来をひらく 小学理科 5。教育出版, 東京, 198p。