

流水の侵食作用を実証できる「おうけつ（甌穴）モデル」について

菊池郡合志小学校 麻生 弘幸

1. はじめに

現行の学習指導要領では、流水の働きに関する内容は、小学校第4学年C区分で扱っている。目標は、「地面を流れる水や川の様子を観察し、流れる水が土地を変化させる働きを調べることができるようにする。」とある。また、「この内容の学習に当たっては、(中略—麻生) 直接観察したり、調べたりすることが大切である。しかし、川を上流から下流まで一貫して観察することは難しい。そこで、映像などの資料を活用したり、流水実験の結果をもとにしたりして、(中略—麻生) とらえられるようにする。」(小学校指導書理科編) とある。

ところで、この流水実験に関しては、「大規模な設備では可能だが、2m以下の長さの急な傾斜の樋の上を砂を流したところで自然の川の諸現象が観察できないことは自明(田村, 1980)」「砂に水を流して削れるのを見せて侵食と言っても意味がない(堀川, 1980)」などの問題点が指摘されてきた。また、津川(1981)は、流水実験や視聴覚的な方法による指導もそれなりの効果を上げているが、「子どもたちにとっては飛躍した考えをしいられる」「経験乏しい子どもたちは、受け身の立場に立たされる」などの問題がないとはいえないと指摘している。そして「身近にある実際の川の侵食作用の中から素材を開発し教材化して、子どもたちが実験などを通して具体的に調べる活動を工夫したほうがよりよい効果を上げるのではないか」という仮説をたて、流水の侵食作用で実証可能な現象として甌穴を取り上げ指導方法を工夫し、成果を上げている。しかし、使用した甌穴モデルの材質(軽石を加工)が野外での様子とは異なり、

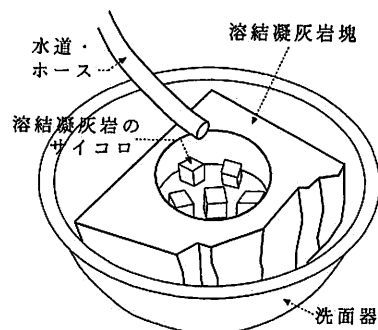


図1 身近にある実際の川の侵食現象
“甌穴”を室内実験で再現できる
「おうけつモデル」

また実験結果を穴の内壁のペンキの僅かなはげ具合で確かめなければならなかった。

そこで今回は、津川(1981)のモデルをさらに進めて、野外の甌穴の姿によりマッチするような材料(溶結凝灰岩)を用いてモデルを製作し、実験・観察の方法を工夫・改善し、短時間で確実に結果がわかり、その侵食のメカニズムを実証することができる教具を開発することにした。併せて、甌穴を使って流水の働きの授業を展開するための補助教材も整え、開発した「おうけつ(甌穴)モデル」(図1)を授業で利用し、その有効性を確かめた。なお、これらの教材・教具は、平成6年度熊本県科学研究所展示会に出品したものである(麻生, 1995)。

この報告をまとめるに当たっては、熊大教育学部の田村 実教授には終始ご指導と励ましを頂き、渡辺一徳助教授には多大なご教示を頂いた。熊大附属小・島木浩次教諭には授業実践に当たり協力して頂いた。心より感謝申し上げます。

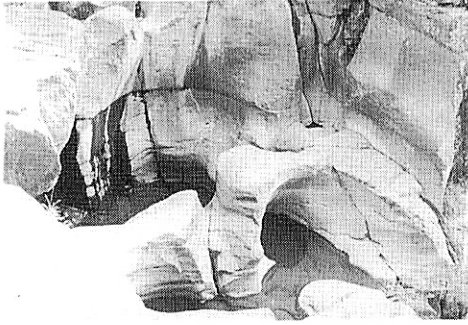


写真 - 1 御船町七滝の甌穴（直径3m以上）

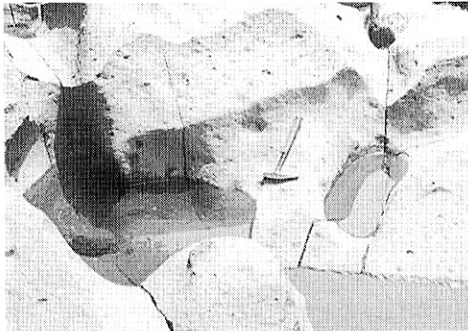


写真 - 2 河床の岩石の節理や凹み（七滝）



写真 - 3 甌穴に流れ込む水の動き（菊池渓谷）

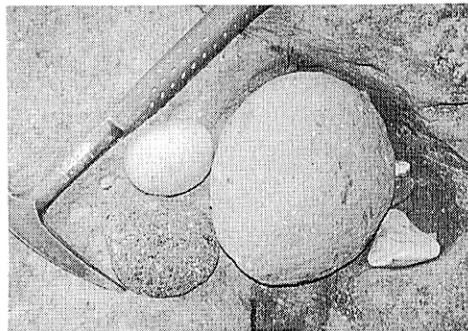


写真 - 4 甌穴底に残存する円礫（七滝）

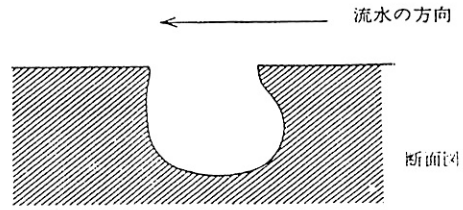


図2 甌穴の断面形の例（池田，1973）

2. 甌穴について

(1) 甌穴とは何か？

甌穴^{かめあな}、ポットホールともいう。川底や川岸のかたい岩面にできる大きな円形の深い穴（写真 - 1、図2）で、渦動流説によれば、次のようにしてできると説明される（池田，1973；伊藤，1979；平凡社，1970）。まず、河床の岩石に割れ目や節理、凹み（写真 - 2）などがあると、局部的に流水の侵食作用が集中し、弱い部分が速く削られて窪みができる。そこへ流れ込む水は渦（渦動流）を生じ（写真 - 3）、丁度ドリルのような侵食力が働き円形の穴へと拡大する。これが洪水時などには上流からの多くの粘土や砂礫を含んだ水が激しく内壁にぶつかることになり、穴の拡大をさらに促進していき、大きなものは直径・深さとも数mにも及ぶ。（ニューヨーク州のCold-water峡谷には、悪魔のジョッキと呼ばれる直径10m、深さ20mもの大甌穴がある；八釜調査会，1984）。甌穴形成のための研磨具として砂礫の役割は多大である。

なお、その他の甌穴の成因として水理工学で研究された空洞化説（流水中の局部的低圧部に生じた水蒸気泡の崩壊時の衝撃波による侵食）なども唱えられている（八釜調査会，1984）。

甌穴は、熊本県内では、菊池渓谷、御船町七滝、小国町土田滝・下城滝、矢部町通潤橋下、人吉市釜の奥戸（天然記念物）、八代市東町水無川、熊本市河内町岩戸観音下などの他、各地に多数見られる。

(2) “磨石”にまつわる問題

平水時の甌穴の底部には、ほぼ同形同大の中型円礫がしばしば見出される(写真-4)。そして、あたかもこの礫は、その甌穴に捕獲されて以来、半永久的にその甌穴内にとどまり、穴形成のための“磨石”として作用したかのような誤解を招く解説文等が少なくない。

しかし、「磨石の大きなものが深い甌穴の中で利用されることはほとんどない。砂礫のような小物体に作用する遠心力が穴の形成にあずかる(伊藤, 1979)」という指摘がある。また、活動中の甌穴では、平水時に礫の堆積があっても、洪水時に流水の運搬力が増大すれば、内部の堆積はすっかり入れ替わることもでき、注意が必要である。つまり現在見られる円礫については、最後の増水期の流水の上昇流の力よりも重い礫だけが底に残存していると認識すべきであろう。

3. 「おうけつモデル」について

(1) Alexander (1932) の水理実験

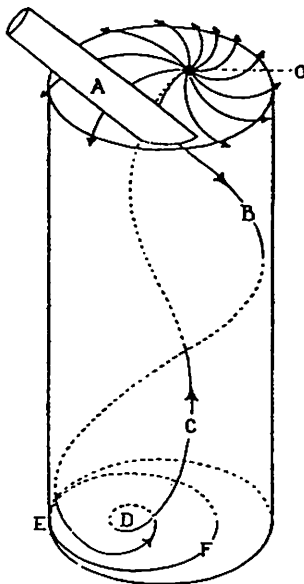


図3 Alexander (1932) の実験装置
(八釜調査会, 1984)

Alexander(1932)は、甌穴を生ずる条件を明らかにするために次の実験を行った。その水理実験と渦動流説は、伊藤(1979)によって詳細に紹介されている。

まず、ガラスの円筒の上端に入水管を引き、入射角を自由に換えられるような装置(図3)を作った。

円筒の内壁に沿うように流水を注ぐと、円筒内に螺旋状の渦動流(図3のA→B→D→C→O)を生じるが、入水管の入射角が60°の時、渦動流の回転数が最も多く、回転エネルギーが最大となる。そして30°~70°の間であれば、回転エネルギーは高く推移する。ところが入射角がその範囲を外れ、20°、80°になると、回転エネルギーが50~60%に急に減少する。

また入射角が一定の時、円筒の深さが口径に等しい時、回転エネルギーが最大となる。深さが口径の2倍になると回転エネルギーは、61%に、3倍になると41%に、4倍になると22%に減少する。これは、実際の甌穴でも深さと直径は、ほぼ等しいものが多い(池田, 1973)こととも一致する。

(2) 「おうけつモデル」の特長

以上のようなAlexander(1932)の実験結果や実際の甌穴の産状を参考に開発したものが今回の「おうけつモデル」(図1)である。入射角や口径と深さの比を回転エネルギーが最大になるように決め、材料も野外の甌穴に近いものを用いている。水を注ぐと穴の中に渦動流が生じ、中のサイコロ状の小石が回転しながら内壁にぶつかり、穴と小石の双方が削られて削りかすが出てくるというものである。

このモデルの特長として、

- 材料を入手しやすい。
- 誰にでも製作できる。
- 侵食の結果を削りかすの量で確認できる。ことが挙げられる。以下の項目で各内容を説明する。

(3) 材料及び準備物について
材料及び主な準備物は次の通りである。

- ㊸弱溶結の溶結凝灰岩塊
(いわゆる阿蘇の^{いす}灰石、径20cm以上)
- ㊹洗面器 (または丸型水槽など)
- ㊺ホース
- ㊻スプレー式ペンキ (AとBの2色)
- ㊼段ボール (30cm×30cm以上、
中央に直径7cmの穴をあけたもの
その他 [㊽散水用ノズル、㊾電動岩石
カッターまたは鋸、㊿鑿])

熊本県内で見られる甌穴の多くは、阿蘇火砕流堆積物の強溶結の溶結凝灰岩でできた河床に生じている。それでモデルの材料には、同じ溶結凝灰岩でも硬さが適当で加工がしやすく、実験結果も現れやすいと考えられる「㊸弱溶結の溶結凝灰岩」を選び、今回は菊水町のAso-4火砕流堆積物の採石場から得たものを利用した。この岩石は、中部九州では“灰石”と呼ばれ、石材として古くから利用されてきたものである。(有名な‘臼杵の石仏’・‘八女の石灯籠’などに使われている。)現在でも、菊池川流域、緑川流域、氷川流域、天草郡五和町、福岡県、筑後川上流域、大分県国東半島などで石材として盛んに切り出され加工されている(渡辺, 1989)。灰石は熊本県及び周辺の広い範囲にわたって分布しており、各地で「おうけつモデル」製作に適した岩石を得ることができる。

「㊹洗面器」と「㊻スプレー式ペンキ (AとBの2色)」の色については、実験結果が分かりやすいように別々の色にするとよい。今回は、㊹がピンクの時は㊸はA:黄とB:青、㊹が青の時は㊸はA:黄とB:赤、の組合せにした。

また、「㊽散水用ノズル」を「㊺ホース」の先につけるとつけない時より一割程度少ない水量でも実験可能な一定の鋭い水流を持続

することができ、あれば便利である。しかし、㊸だけでも十分結果が現れる。「㊹電動岩石カッターまたは鋸・㊿鑿」については、岩石加工を石材店等に依頼できれば、不要である。

(4) 作り方

図1のように構造は単純なので、気軽に製作できる。

① まず「㊸弱溶結の溶結凝灰岩塊」を切断・加工して、「㊹洗面器」に入れるモデル本体と穴に入れる研磨具のサイコロ数個を作る。本体の直径は㊹にすっぽり入る大きさ(15cm位)に、高さは㊹の深さよりやや大きくするとよい(10cm位)。サイコロの一辺の長さは1.0~1.5cmが良い(理由は後述)。

② できた本体の上面中央に直径・深さとも7cm程度の穴を掘る。

③ 本体の穴の底と内壁を「㊻スプレー式ペンキA」で薄く着色する。その際、穴以外の部分にペンキが付かないよう本体を「㊺中央に直径7cmの穴を空けた段ボール」で覆って作業をする。

④ サイコロの表面を「㊻スプレー式ペンキB」で薄く着色する。

⑤ 着色部分が乾燥したら本体を洗面器に静かに(ぶつけて破片などを出さないように)収め、サイコロ(3~5個)を本体の穴に入れてできあがりである。

(5) 実験方法・結果と留意点

ホースで水を穴の中に注ぎ込むと野外の甌穴と同様に渦流が生じ、穴の中の研磨具のサイコロは回転し始める。すぐに水はモデル本体から、そして洗面器からオーバーフローしていく。30秒~3分間続けると洗面器の底には、水と共に本体をオーバーフローしてきた削りかすが貯まっていく(写真-5)。この削りかすの中には、AとBのペンキの色が付いているものが観察される(写真-6)。このことから、穴と研磨具(サイコロ)の両方の

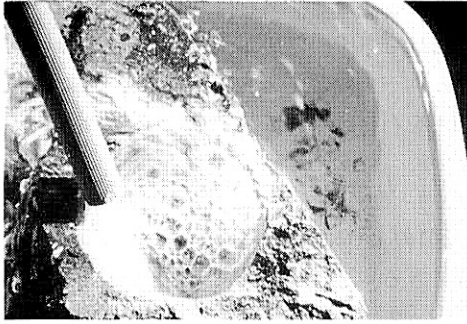


写真-5 渦流と洗面器底の削りかす(30秒後)



写真-6 削りかす(10分後, 写真横幅3cm)

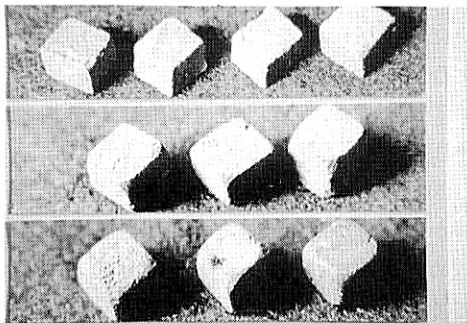


写真-7 研磨具(サイコロ)の削られ方
(上から30秒後, 5分後, 10分後)

削りかすがあることが容易に確認できる。この削りかすの量は時間と共に増えていく。また5~10分間も続ければサイコロ自身も角がはっきり削られていることが観察される(写真-7)。

以上の実験結果の現れ方を表1にまとめた。(無着色サイコロを研磨具として用いた場合も比較のために載せている。着色しない方がより早く全体に丸くなる。しかし、削りかすに色がついていないため、どの削りかすも研磨具(サイコロ)のものか確認できないことになる。)

以下、「おうけつモデル」利用上の留意点を述べる。

- 水流の強さ…約10ℓ/分もあれば容易にサイコロが回転し(毎分80~150回転)、十分結果が現れる(内径8mmのホース使用時)。もし回転しない場合は、水量よりも水流の当て方に問題があると考えてよい。

- 水流の当て方…斜め下方に向かって、内壁に沿うように水流を注ぎ入れるとよい。その際の入射角が30°~70°の時が渦動流の回転数、回転エネルギーが大きくなる(Alexander, 1932)。

- 穴に入れる研磨具の種類…研磨具として「実際に七滝の甌穴に入っていた安山岩礫(径2.5cm)」、「津川(1981)が用いた軽石ボール(径3cm・水に沈むもの)」、「様々の大きさの溶結凝灰岩のサイコロ」を用いて予備実験を行った。その結果、安山岩礫と一辺が2cm

表1 「おうけつモデル」実験結果の現れ方

| | 30秒後 | 1分後 | 3分後 | 5分後 | 10分後 |
|-----------------|------|-----|-----|-----|------|
| 穴の削りかすが出る | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 着色サイコロの削りかすが出る | ○ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 着色サイコロの頂点が削られる | × | × | △ | ◎ | ◎ |
| 着色サイコロの辺が削られる | × | × | × | △ | ◎ |
| 無着色サイコロの削りかすが出る | × | × | × | × | × |
| 無着色サイコロの頂点が削られる | △ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 無着色サイコロの辺が削られる | × | △ | ○ | ◎ | ◎ |

略号：◎…はっきり確認できる、○…確認できる、△…何とか確認できる、×…確認できない

以上のサイコロはかなり強い水流でも回転させるのは難しかった。またサイコロの一边が1cmを下回ると渦動流の勢いで穴からはじき出されることが多くなってしまった。

それに対して、軽石ボールと一边が1.0～1.5cm程度のサイコロはよく回転した。そのうち研磨具自身も削られることがより分かりやすく、また、実際の甌穴にも溶結凝灰岩礫はしばしば入っていることから、「1.0～1.5cm程度の溶結凝灰岩のサイコロ」を採用した。(実験後に各自でサイコロ(研磨具)の様子を観察できるように、実験班の人数分のサイコロを穴に入れておくとよい。)

4. 補助教材について

(1) 自作ビデオ

授業の導入部に使うことを主目的に七滝の甌穴群を紹介するビデオを自作した。内容は七滝までの道のりを紹介する部分と七滝の甌穴群の産状を観察する部分からなる。

(2) 拡大写真

児童に甌穴の成因を考えさせる際の提示資料として増水時と渇水時の写真を拡大カラーコピーした。特に実際の甌穴に流れ込んでいる水の動きのわかる写真(写真-3)は不可欠である。これらにより流水の働きと研磨具としての砂礫の存在に目を向けさせたい。

(3) レンガ投入実験について

【目的】 レンガを七滝の甌穴内に置いて実験礫とし、実際の甌穴内での流水位の変化に伴う砂礫の侵食・挙動に関する資料を得る。さらに、その結果を甌穴を扱う授業に活かす。

【方法】 1994年5月18日に図4のように高度(相対水位)の異なる4カ所の甌穴㉗・㉘・㉙・㉚にレンガを投入し、6月16・29日、9月30日にレンガの様子の経過観察をした。

【結果と考察】 観察の結果、図4に書き入れたようにレンガは変化した。その間に流水位が矢印のように変化したと考えられる。

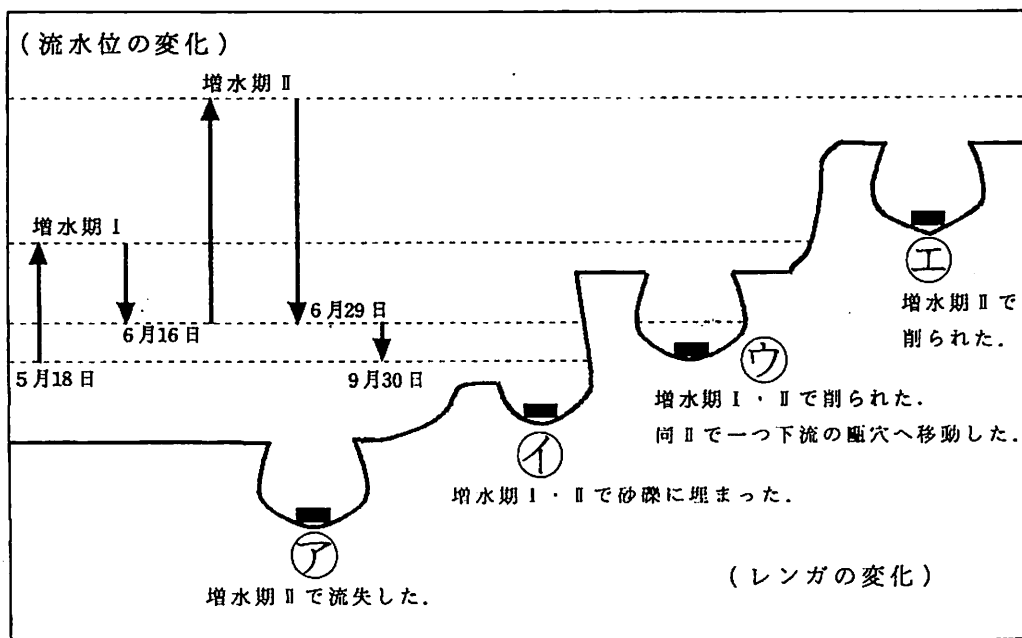


図4 レンガを投入した甌穴の模式断面図(川の横断面の一部を表す。)

予想流水位の変化を矢印で、レンガの変化を文で加筆した。

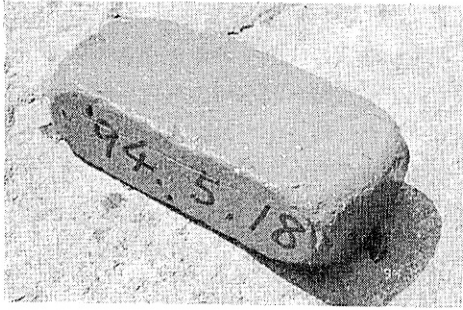


写真-8 甌穴㊦(図4)内で削られたレンガ
(29日目の様子)

また、レンガや砂礫が移動したり(表紙写真)、流失したりしたことや、新しい砂礫が供給されたことから、活動中の甌穴では砂礫の交替が頻繁に起こっていると考えられる。

【授業へ活かす】㊦の角が円磨されたレンガ(写真-8)は回収し資料とした。これは「おうけつモデル」のサイコロ(研磨具)自身が削られることに対応し、モデル実験と実際の甌穴での現象を結びつけるよい補助教材となろう。現地学習が可能な場合、教師があらかじめ甌穴にレンガを投入しておき、その後の現地学習の際、児童にレンガの回収・観察をさせるという利用法も考えられる。

5. 授業に利用した成果

小学校第4学年「流れる水の働き」の単元で「川の水は川原の岩を削る働きがあることを『おうけつモデル』を使って調べることができる」を本時の目標として授業を行った。

授業ではまず、上記の補助教材の「ビデオ」と「写真」を用いて甌穴とはどんなものかをつかませ、その成因を予想させた。次に「おうけつモデル」を用いて実験し、そのでき方確かめ学習シート(図5)に記録させた。まとめには「写真」と「実際の甌穴内で削られたレンガ」を用いて時間的・空間的見方を広げた。また授業後に「おうけつモデル」を使った実験についてアンケート調査を行った。

グループ(3~4人)で一つの「おうけつモデル」を使って実験したが、10分間で全員(38人)が甌穴のでき方・流水の侵食作用を確かめることができた。また学習シートやアンケート調査の結果(表2, 表3)からも「おうけつモデル」の有効性(使いやすい・考えやすい・分かりやすい)がうかがえた。

6. おわりに

以上のように地域の素材が十分活かせ、今回の教具を利用することで児童の手で実証が可能な流水の作用として、「甌穴」はすばらしい教材であると考えられる。(ちなみにNHK教育テレビの小学4年理科の番組「はてなをさがそう」でも甌穴が取り上げられている。)また、小学4年では、通潤橋・五老ヶ滝方面へ見学旅行に行く学校も多いので、その機会に甌穴の現地学習を組み合わせることも可能であろう。たくさんの方々「おうけつモデル」を知っていただき、活用していただければ幸いである。

表2 「おうけつモデル」実験についてのアンケート集計結果(38人中)

| | とても | だいたい | あまり | ぜんぜん |
|--------------------------|-----|------|-----|------|
| 今日の実験は楽しかったですか。 | 31人 | 4人 | 2人 | 1人 |
| 今日の実験に使った道具は使いやすかったですか。 | 24人 | 11人 | 2人 | 1人 |
| 今日の実験に使った道具はうまく結果が出ましたか。 | 24人 | 11人 | 2人 | 1人 |

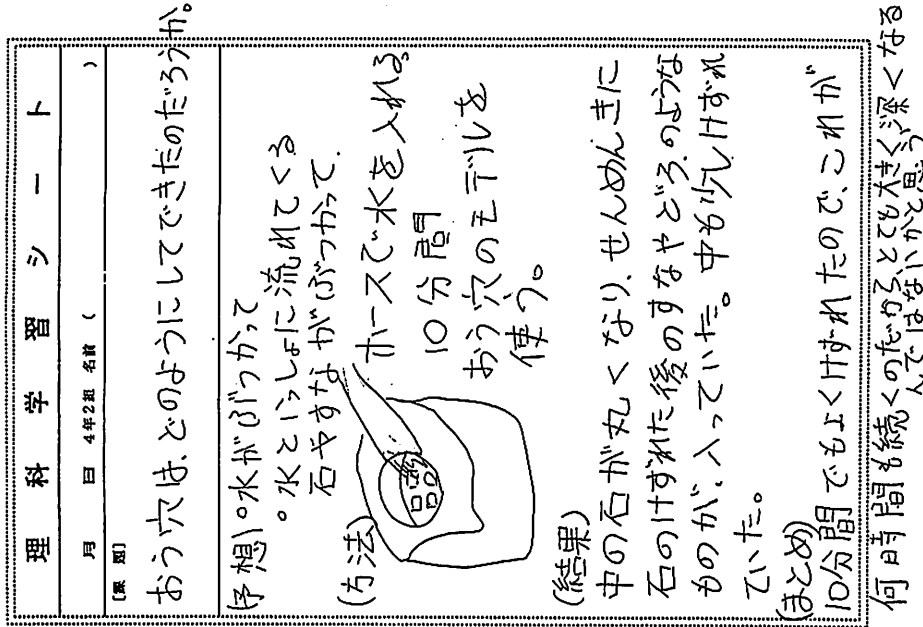


図5 学習シート記入例

表3 アンケート回答例

(○：よい点, ●：よくない点)

【問1】 実験の楽しかったことは？

- サイコロを入れる前と後の様子や洗面器に残っているかけらを観察するところ。
- 実際に削れ方やその後の様子などが詳しくわかったこと。
- 川に行かないとできないことが、学校でできた。
- 石を水を使って削るところが楽しかった。
- 石がみるみるうちにかけていったから。
- 時間が少なかった。

【問2】 モデルの使いやすかったところは？

- 穴の中で石が回って削れていく様子がよく見えた。
- 洗面器にかけらがたくさん出てきたので、どれだけ削れたかがわかりやすかった。
- 穴の所が黄色に塗ってあったので、色をとれた所は削れたということがわかった。
- 簡単に実験できる。
- 時々、サイコロが飛び出してしまった。
- 運ぶときにちょっと重かった。
- 洗面器が小さくて少し使いにくかった。

引用文献

- Alexander, H. S.(1932)Pothole Erosion. *Jour. Geol.*, **40**, 305-337.
- 麻生弘幸(1995)短時間で流水の侵食作用を実証できる教具「おうけつ(甌穴)モデル」. 平成6年度私たちの科学研究, 熊本県立教育センター, 140-141.
- 平凡社(1970)地学事典. 平凡社, 1540p.
- 堀川治城(1980)流水とそのはたらきを調べる実験について. 熊本地学会誌, **64**, 10-18.
- 池田 孝(1973)流水の作用とpot hole. 地学教育, **26**, 62-66.
- 伊藤隆吉(1979)日本のポットホール. 古今書院, 132p.
- 文部省(1989)小学校指導書理科編. 116p.
- 田村 実(1980)素材の教材化. 熊本地学会誌, **64**, 2.
- 津川清治(1981)甌穴を利用した侵食作用の指導. 熊大附属小研究紀要, **34**, 60-63.
- 渡辺一徳(1989)石材としての阿蘇溶結凝灰岩. 熊本地学会誌, **91**, 6-12.
- 八釜調査会(1984)特別天然記念物「八釜の甌穴群」調査報告書. 八釜調査会, 187p.