

地学教育

第64巻 第2号(通巻 第330号)

2011年3月

目 次

原著論文

個別実験が可能な地層の堆積モデル教材……利根川浩子・渡辺理文・鎌田正裕…(29～36)

教育実践論文

プラスチック板で作った簡易教材による堆積作用の実験
……………北沢俊幸・川野幸朗・村越直美…(37～49)

学会記事 (51)

日 本 地 学 教 育 学 会

263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33 千葉大学教育学部理科教育教室内

平成 23 年度全国地学教育研究大会
日本学教育学会第 65 回全国大会

(広島大会)【一次案内】

日本地学教育学会 会長 牧野泰彦
全国大会実行委員長 (広島大学) 林 武広

1. 大会テーマ：「改めて地学教育の意義を問う」
2. 日程：10月9日(日)・10日(祝)
3. 会場：広島大学東千田キャンパス (法学部・経済学部夜間主コース校舎)
730-0053 広島市中区東千田 1-1-89 (JR 広島駅より電車 20 分)
4. 日程 (予定, 発表件数, 内容によって変更あり)
10月9日(日)
10:30~11:00 開会行事, 表彰等
11:00~12:00 総会
13:00~16:30 分科会 (口頭発表) (校種別とせず内容系別とする)
分科会：天文・気象系, 地質系, 環境・防災教育系, 教育理論系
16:30~17:30 ポスター発表 コアタイム
18:00~19:30 懇親会 (料亭久里川, 会場より徒歩数分)
10月10日(祝)
9:00~10:30 分科会 (口頭発表)
天文・気象系, 地質系, 環境・防災教育系, 教育理論系
10:40~12:10 パネルディスカッション
テーマ：地学教育への期待—地学で何を伝えるのか—
パネラー：中, 高校の物理, 化学, 生物, 地学教員および社会教育関係
パネラー人選は現在, 検討中
13:00~15:30 分科会 (口頭発表)
天文・気象系, 地質系, 環境・防災教育系, 教育理論系
15:40~ 閉会行事

※巡検は予定せず.

発表申し込みはウェブ (申し込みフォーム作成), 要旨送付はメールで (近日中に開設)
その他, 案内等はウェブ上で行う. 発表要旨は, テンプレートをを用いて作成し, メールにて実行委員会に送付

発表申し込み期限 7月31日, 要旨送付期限 9月1日

5. 大会実行委員会

実行委員長 林 武広 広島大学大学院教育学研究科
副委員長 山崎博史 同上
副委員長 磯崎哲夫 同上
庶務・会計 吉富健一 同上
庶務・会計 匹田 篤 広島大学産学・地域連携センター (総合科学研究科)

委員 広島大学附属校教諭, 公立校教諭, 比治山大学等教員等 10 数名

6. 後援

文部科学省ほか (交渉中)

7. 大会参加費等

大会参加費：2500 円 懇親会費：5000 円
前納のための郵便振替口座を設置

実行委員会事務局

739-8524 東広島市鏡山 1-1-1

広島大学大学院教育学研究科自然システム教育学講座地学研究室

TEL & FAX: 0824-24-7126 (林 武広)

0824-24-7099 (吉富健一)

広島大会ページ

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/geol/esh>

広島大会事務局メール geol@hiroshima-u.ac.jp

個別実験が可能な地層の堆積モデル教材

A Small-Scale Model for an Individual Experiment to Illustrate
How a Stratum Is Formed under Water

利根川浩子^{*1}・渡辺理文^{*2}・鎌田正裕^{*3}

Hiroko TONEGAWA, Masafumi WATANABE and Masahiro KAMATA

Abstract: By using a PVA aqueous solution and glass particles with transparent test tubes, a small-scale stratum model has been developed for use in elementary and junior high school science classes. Since the viscosity of the PVA solution is high, the particle settling velocity is low; students thus have time to observe how a stratum is formed, and can carry out their observations using only a small test tube. The cost of one set is low (less than ¥50), and students can thus make and use their own models. We used this model in science classes of an elementary school for sixth grade students. Most of the responses from the students were positive and it was made clear that the model is educationally effective.

Key words: stratum, sedimentation, small-scale, individual experiment

1. はじめに

平成20年改訂の学習指導要領において学習内容の大幅な見直しが行われた。理科においては小・中学校で授業時間数・学習内容とも増加し、実験・観察や自然体験を一層重視していくことが求められている。

そのなかで、地層の特徴や形成過程については小学校第6学年「土地のつくりと変化」と中学校第1学年「大地の成り立ちと変化」で扱われている。この単元の教科書(吉川ほか, 2005; 三浦ほか, 2005, 2006)に掲載されている実験は必ずしも明瞭な層が観察できないという問題があった。雨どいを用いた堆積実験や、長いアクリル管を使った沈降実験のような装置を用いる実験は器具の準備・片付けに時間がかかり、数をそろえることも難しいため演示実験になってしまうことも多い。流水によって運ばれた泥や砂礫が堆積する様子などは自然界でも目にすることはできず、児童・生徒にとって実感を伴う理解が難しい単元でもある。

そこで、スモールスケールで地層の形成が表現でき

るモデルができれば、児童・生徒が個々にその様子を観察することが可能になり、地層の特徴や形成過程についての理解を深めることにつながると考え、このような教材について検討した。

2. 教材開発の視点

小・中学校の教科書に示されている堆積実験の中で、大型のアクリル管やガラス管を用いた堆積実験を児童・生徒が一人一人実験することができるようスモールスケール化することを考えた。この種の実験において明確な層を形成するためには、1 m以上の長さの管が必要である(萩原ほか, 2008)が、このサイズのものを小・中学校の授業1時間内に繰り返し使用することは容易ではない。また、器具のスケールが大きいため、数種類の粒子の挙動を同時に視野に入れて把握することも児童・生徒には困難である。

そこで今回、次のような特徴を持つモデル教材を開発した。

① 粒子の大きさによる沈降速度の違いを容易に観察できる。

*1 埼玉県狭山市立入間野中学校 *2 東京学芸大学大学院 *3 東京学芸大学
2010年12月13日受付 2011年3月31日受理

② スケールが小さく、液体中を沈降する各種粒子の挙動を一度に視野に入れることができる。

③ 繰り返し実験することができる。

④ 準備・片付けおよび実験方法が容易で、児童・生徒が個々に実験することができる。

⑤ 材料が安価で、入手しやすい。

今回、単層モデルと2回の堆積作用が観察できる「複層」の二つのタイプのモデルを開発したが、単層モデルは、児童・生徒が自分自身で作製・確認することが容易である。

3. モデル教材の開発

(1) 液体の選定

本研究では、沈降管を児童・生徒の手の中で扱いやすいサイズにするため、沈降管の長さを10 cm程度にすることを考えた。このように短い距離でも粒子サイズによる沈降過程の違いを観察できるようにするためには、沈降速度を小さくする必要がある。

密度 ρ_p (kg/m³)、直径 D_p (m) の粒子が、密度 ρ_f (kg/m³)、粘性係数 η (kg/m・s) の液体中を重力加速度 g (m/s²) で沈降するときの速度 v_s (m/s) は次式で求められ、ストークスの公式と呼ばれる (川田, 1969)。

$$v_s = D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g / 18\eta \quad (1)$$

式(1)より、液体の粘性を上げることで粒子の沈降速度を遅くすることができ、短い距離でも粒子サイズによる沈降過程の違いを観察できると考えられる。

本研究では濃度8~10%で市販されているポリビニルアルコール(PVA)洗濯糊を用いて実験した。1 mの沈降管を用いた実験と粒子が沈降するのにかかる時間を同じにするためには、 v_s を1/20にする必要がある。式(1)より、 η を20倍程度にする必要がある。こ

の条件をもとに、オストワルド粘度計を用いてPVA水溶液の水に対する室温における相対粘度を測定したところ、図1の結果が得られた。同図から、PVA水溶液が3.8%以上の質量パーセント濃度であれば、 η が水の20倍以上となることがわかる。そこで、市販されているPVA洗濯糊を濃度4%に希釈して用いた。なお、4% PVA水溶液の密度は約1.03 g/cm³ (実測)であるため、本研究ではこれを水の密度と等しいと見なして扱った。

(2) 粒子の選定

小・中学校の授業で流水による砂や砂礫の堆積を扱う際には、地層を構成する粒の大きさによる沈降速度の違いに着目する。そこで、用いる粒子には同じ密度で大きさのみ異なるものが適しておりここでは研磨剤として市販されているガラスのビーズを使用した。

式(1)より、粒子の密度 ρ_p が一定のとき、粒子の沈降速度はその直径の2乗に比例する。そこで、3種類の粒子の沈降速度に10倍ずつの差が出るよう、ここでは、直径が1 mm, 0.3 mm, 0.1 mmの3種類の粒子を使用した。

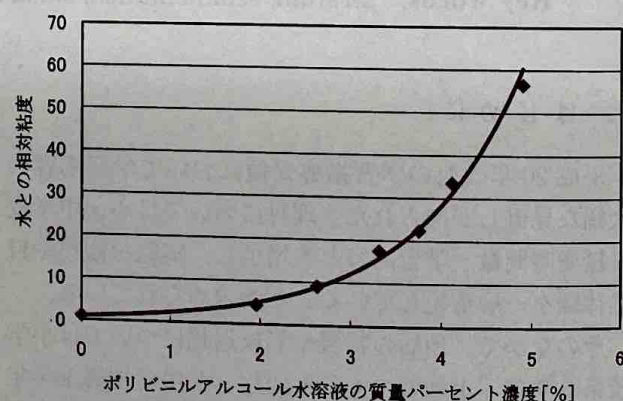


図1 ポリビニルアルコール水溶液の質量パーセント濃度と水の相対粘度

表1 粒子径とレイノルズ数の一致

レイノルズ数	4% PVA 水溶液		水	
	粒子 D_p (m)	終端速度 v_s (m/s)*	粒子 D_p (m)	終端速度 v_s (m/s)*
1.0	1.0×10^{-3}	2.9×10^{-2}	1.1×10^{-4}	8.2×10^{-1}
2.8×10^{-2}	0.3×10^{-3}	2.6×10^{-3}	3.2×10^{-5}	7.3×10^{-2}
1.0×10^{-3}	0.1×10^{-3}	2.9×10^{-4}	1.1×10^{-5}	8.2×10^{-3}

* 終端速度については次式を用いて求めた。

$$v_s = D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g / 18\eta$$

$\rho_p = 2,500 \text{ kg/m}^3$ は粒子密度を表す。

ρ_f, η は、液体密度、粘性係数を表し、水の場合 $\rho_f = 1,000 \text{ (kg/m}^3)$, $\eta = 0.001 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$, PVA水溶液の場合 $\rho_f = 1,030 \text{ (kg/m}^3)$, $\eta = 0.028 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$ とした。

(3) 実物との比較

流体密度 ρ (kg/m³)、粒径 D (m)、終端速度 U (m/s)、粘性係数 η (kg/m · s) のレイノルズ数 (Re) は次式で求められる (堆積学研究会, 1998)。

$Re = \rho DU / \eta$ (2)

今回のモデルでは、粒径 D が 0.1 ~ 1 mm のときの Re は、1 ~ 0.001 の範囲に入る。これは、本モデルで観察できる粒子の挙動は水中を沈降する 0.1 ~ 0.01 mm の粒子の挙動と力学的に相似であることを意味する。計算に用いた諸パラメーターについては表 1 に示す。

本モデルは堆積物粒子の沈降を現象としてとらえることが前提のモデルであるため、授業で活用する際には、児童生徒に自然界における堆積物粒子の沈降速度について説明を加え、地層の写真や動画などと組み合わせることで、実際の沈降速度について説明することが重要だと考えられる。

3. モデル教材の作製方法

モデル教材は単層モデルと、積み重なった粒子の上にさらに粒子が堆積することで地層形成の様子を観察することが可能な「複層」モデルの 2 種類を作製した。

単層モデルは児童・生徒が個々に作製・実験することができるよう、材料は表 2 に示したように安価なものを利用した。また、材料はすべて理科教材店やインターネットショップで簡単に入手することができるものを使用した。

ガラスのビーズは同じ色でできているため、そのまま使用すると粒子径による違いを観察することが困難である。そのため、次のような方法で粒子径ごとに異なる色をつけた (図 2a, b)。

- ① 粒子をポリエチレン袋に入れ、アクリルペンキをスプレーで吹き付ける。

表 2 堆積モデル材料一覧

使用モデル	用途	名称(購入先または製造元)	1本あたりの金額
単層モデル	容器	ディスポーザブルテストチューブ(PS)φ16×100(ハギテック)	約9.9円
		キャップ(PE)15~17φ用(ハギテック)	
「複層」モデル	容器	ディスポーザブルテストチューブ(PS)φ12×75 2本(ハギテック)	約20.3円
		キャップ(PE)11~13φ用(ハギテック) 2個(ハギテック)	
		シリコンチューブ9×12(1m ￥525)10cm(アズワン)	
両モデル共通	粒子(ガラス)	ガラスビーズ01 直径0.09~0.18mm(1kg ￥1,800) (ハギテック)	約21.6円
		ガラスビーズ04 直径0.25~0.50mm(1kg ￥1,800) (ハギテック)	
		ガラスビーズ08 直径0.71~1.19mm(1kg ￥1,800) (ハギテック)	
	液体	PVA水溶液(8%濃度を4%に希釈)10mL(日本合成 ゴーセノール)	約0.5円
	粒子色づけ	油性アクリルカラースプレー3色(ダイソー)	1円未満



a



b

図 2 粒子の染色方法

a: ポリエチレン袋に入れた粒子に油性アクリルスプレーを吹き付け、b: 袋に入れたまま手で粒子全体に色をつける。

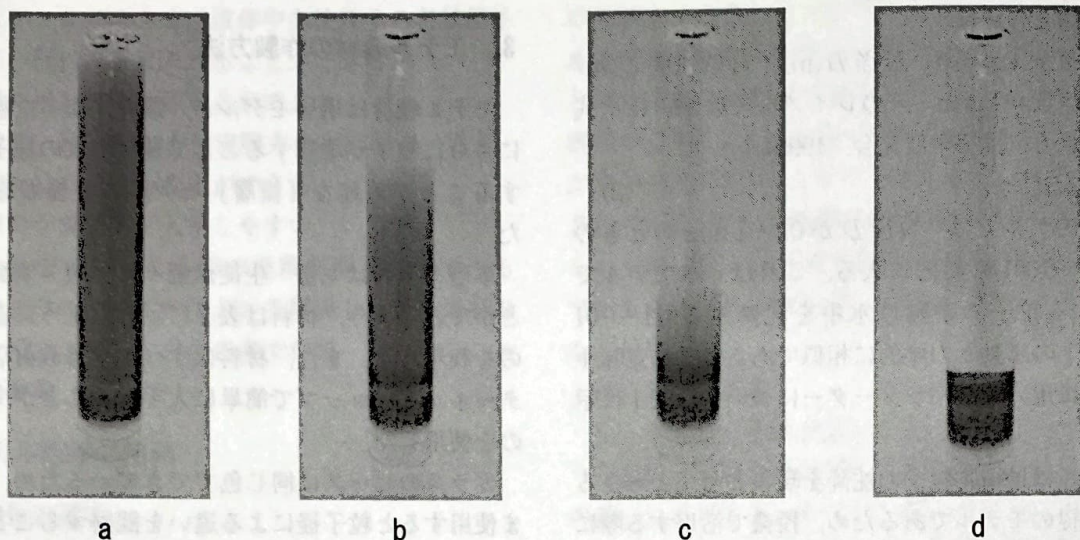


図3 単層モデルで層が形成される様子

a: 振り混ぜた直後, b: 20 秒後, c: 40 秒後, d: 60 秒後.

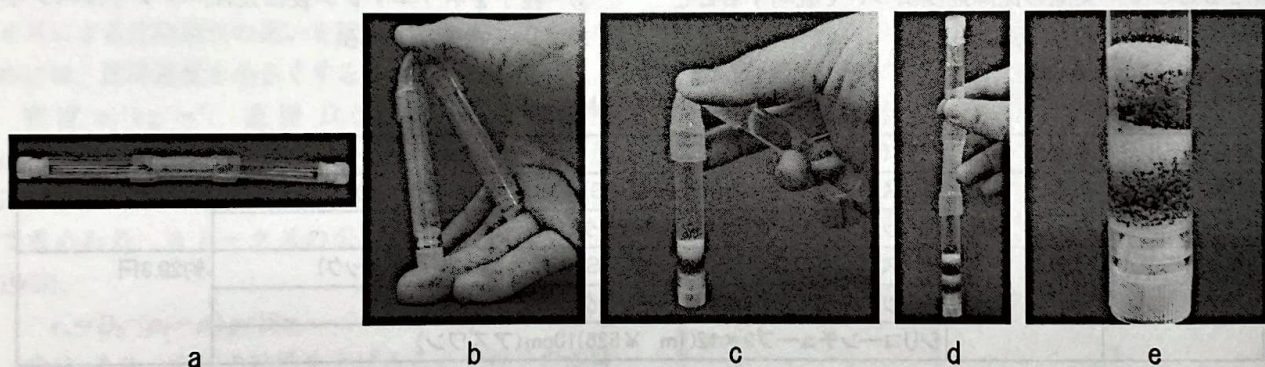


図4 「複層」モデルで層が形成される様子

a: 粒子をモデル全体に広げる, b: シリコン部分で折り曲げて振る, c: 一方のチューブに層を作る, d: シリコン部分を伸ばし, 二つめの層を堆積させる, e: 形成された層.

② 袋の口をひねって閉じ, 粒子全体が着色するようよくもみほぐす.

③ 袋の口を開け粒子全体を乾燥させてから, もういちどもみほぐす.

④ ふるい等でほぐれない粒子を取り除く.

(1) 単層モデル

1) 作製方法

① 着色した各粒子を 4g ずつポリスチレン製テストチューブに入れる.

② 4% PVA 水溶液をチューブの上端から 1.2 cm の高さまで注入する.

③ 空気抜き用の小さな穴を開けたポリエチレン製キャップでチューブにふたをする. キャップを下にして激しく振らなければ水溶液が出てくることはなく, 時間がたつと PVA が乾燥し, 穴をふさぐため, 液漏れの心配はない.

2) 使用方法

粒子が液体中に一様に分散するようモデルをよく振る. このとき, キャップを下にして振ると, PVA 水溶液が穴から出ることがあるため, キャップを上にして振る. 粒子が一様に分散したらキャップを下にして机に立てる. 1 分間観察すると, すべての粒子が沈降し, 分粒された層を形成する (図 3a~d).

(3) 「複層」モデル

1) 作製方法

① テストチューブの底部を切り落とし, シリコンチューブで接続する.

② 一方の口にキャップをし, もう一方の口から着色した各粒子を 4g ずつ入れる.

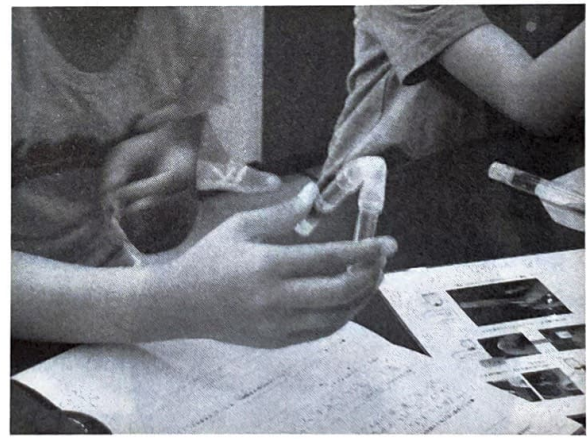
③ 4% ポリビニルアルコール水溶液 10 ml を注入し, シリコン部分を折り曲げた状態でもう一方のキャップをする. このとき, 伸ばしたままでキャップ

表3 授業計画

	学習内容	備考
導入 5分	・材質が同じで大きさのちがう粒をわける方法を考える。	・ケースに入れた粒子を観察する。 ・流体中で大きさごとにわけることができることを伝える。
単層モデルの作成・実験 30分	・単層モデルを作製する。 ・単層モデルの粒子の動きの観察。 ・粒子の沈降速度と大きさの関係を知る。	・1人1つのモデルを作製する。 ・気付いたことをワークシートに記入する。
「複層」モデルの実験・解説 40分	・自然界での粒子の堆積について考える。 ・「複層」モデルを使った観察を行う。 ・地層は下にあるものほど古いことを知る。	・増水時の川の動画を見せる。 ・「複層」モデルは2人に1つ渡す。
まとめ 15分	・粒子の大きさと沈降速度、下に堆積した地層ほど年代が古いことを確認する。	・板書、ワークシートへの記入



a



b

図5 授業実践の児童の様子

a: 単層モデルの堆積の様子を観察, b: 「複層」モデルの堆積の様子を観察。

をすると、折り曲げたときにその内圧の上昇でキャップやシリコン部分が外れることがある。

2) 使用方法

① 図4aのように粒子をできるだけチューブ全体に均一に広げる。

② シリコン部分で折り曲げる。

③ 折り曲げたまま図4bのように粒子が十分に分散するまで振り、口を下にして1本のチューブに図4cのような層を作る。

④ シリコン部分を伸ばし、図4dのようにできた層の上に粒子をさらに堆積させると、図4eのような2層が形成される。

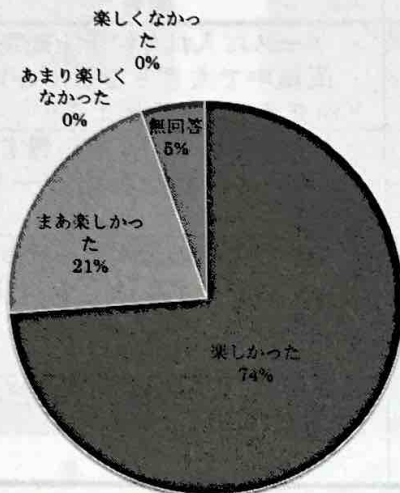
4. 授業実践と評価

(1) 授業実践

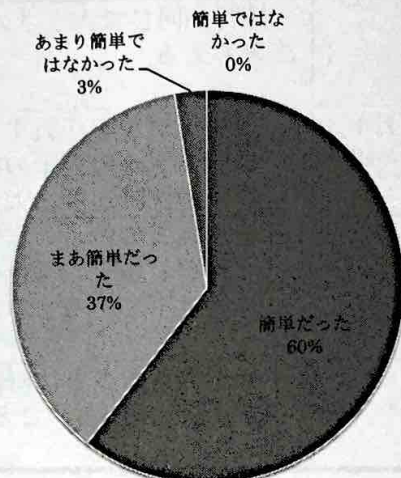
本モデルの有効性を確かめるために、2010年9月14日に東京学芸大学附属世田谷小学校6年生38名の児童を対象に表3のような授業実践を行った。この授業では、単層モデルで実験することで、液体中では粒子径の大きいものほど速く沈降することをとらえさせること、また、「複層」モデルを使用し、堆積した土砂の上にさらに土砂が堆積して地層が形成されることと、地層は下の層ほど古いことを理解させることを目的とした。

単層モデルは、図5aのように一人が一つずつ作製・実験し、複層モデルは二人に一つずつ完成したものを配付し、図5bのように実験した。また、粘性の

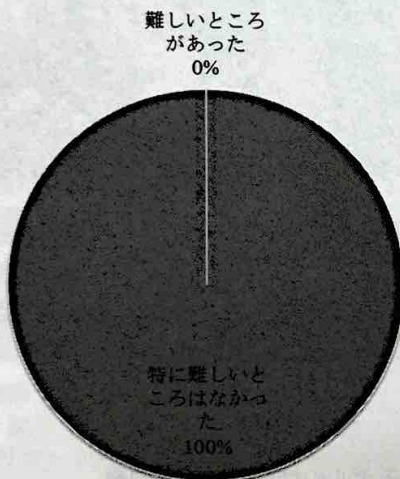
Q1 今日の授業は楽しかったですか？



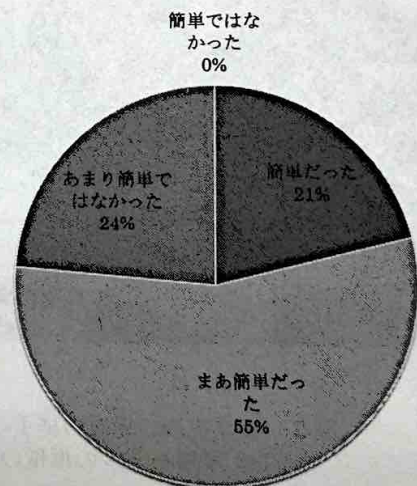
Q2 モデル作りは簡単でしたか？



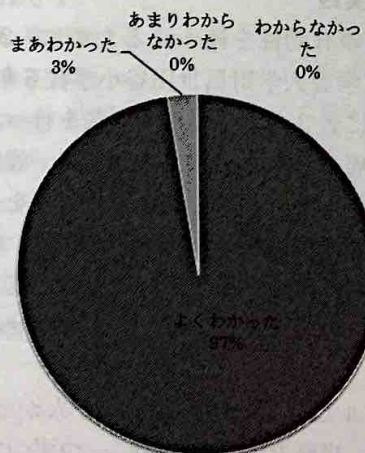
Q3 モデル作りで難しかったところがありますか？



Q4 2層タイプのモデルを使って、重なった層を作ることは簡単でしたか？



Q5 水の中では大きい粒が先で、小さい粒が後に沈むことがわかりましたか？



Q6 地層は下につもっているものの方が古いことがわかりましたか？

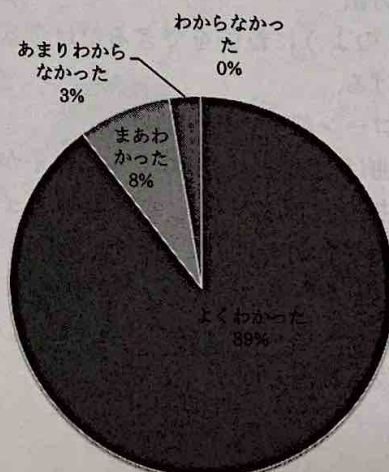


図6 授業アンケートの結果

表4 児童の感想(抜粋)

とても楽しかったです。モデルを作ったことでよくわかりました。
モデルを作ったことで地層についてすごくよくわかった。モデル作りも楽しくできてよかった。
授業はよくわかったし、楽しかった。地層は、下に行くほど、古い。水の中に落ちた粒は、大きいものから順に下にたまる。など、地層についてより、理解を深めることができた。
一層タイプのモデルを作るのが楽しかった。今日はビーズだったけど、前回やった地層のつくり方と全く同じだ。
とても楽しかった。先生が違うこともあるけれど、なんだかいつもとは違うふんいきで良かった。実験はめんどくさいけれど、今日の実験は楽しかった。地層がおもしろい様にできて、おもしろかった。またやりたい、と思った。
ビーズでやると普通の土でやるよりわかりやすく分かれていてよく分かった。
今日の授業はよくわかった。家でもやってみたいと思った。
モデルを使うと、作るのが楽しいし、実験を通して課題についてよくわかった。
カラフルなビーズで実験できて、とても楽しかった。地層についてのいろいろなことが、この実験を通して分かった。プリントに記入することでわかりやすくなった。モデルを作るのはそんなに難しくなく、しかし、楽しくて良かった。ありがとうございました！
今日の授業は勉強になりました。1層のタイプは簡単にできました。でも、2層のタイプがなかなかできませんでした。大変でしたが、すごく楽しかったので良かったです。今日は、ありがとうございました。
土だったら少しわかりにくいこともあったが、ビーズ(色つき)でやることによって、その堆積のちがいというもの良く分かった。また、二重の層もビーズでわかり、楽しかったと思う。
最初には分けられないと思っていたが、モデルを作って層ができてとっても楽しかった。

高い水溶液を使用することで、実際の粒子より沈降速度を遅くできることを説明し、モデルを使用した。

(2) 児童の反応

実践後、児童に授業実践に対するアンケートを実施し、その内容についての分析・集計を行った。授業については、図6にもあるように、95%の児童が楽しかった、まあ楽しかったと回答している。モデル作りに難しいところがあったか、という問いに対して全員が特に難しいところはなかったと答えている。また、水の中では大きい粒が先で小さい粒が後に沈むことが理解できたか、という問いに対し、よくわかったが97%、まあわかったも加えると、全員が理解できたと評価している。

「複層」タイプのモデルについては、76%の児童が重なった層を作ることが簡単だった・まあ簡単だったと評価した。あまり簡単ではなかったと評価した児童も、「たいへんでしたが、すごく楽しかったので良かった」「実験をするとよくわかる」など、感想の中でモデルを肯定的に評価している。地層は下に積もっているもののほうが古いことが理解できたかという問いに対しても、97%の児童がよくわかった・まあわかったと評価している。

児童の感想の一部を表4に示す。「地層のことがよくわかった」「ビーズでやったのがわかりやすかった」という肯定的な記述が多く見られ、モデル教材を使った授業が一定の効果を上げたと考えられる。また、

「モデル作りが楽しかった」「家でもやってみたい」等の感想が見られたことから、ものづくりの体験を通して、児童の興味関心を高めることにもつながっていると考えられる。

6. おわりに

本稿では、堆積の様子を観察する単層モデルおよび「複層」モデルの作製方法と、これらを用いた小学校での授業実践の様子について述べた。

日常では目にすることのできない土砂の堆積の様子を演示実験や班実験で行うことも可能だが、本モデルでは、児童・生徒が個々に繰り返し実験を行うことができ、粒子の大きさと沈降速度の関係や、層の積み重なる様子を自分の目で確認しながらその規則性に気づくことができる。また、中学校での地層の学習においても、このモデルを活用することで地層の広がりや堆積岩の学習につなげることができると考えられる。

引用文献

- 萩原伸子・西田尚央・小河佑太力・松川正樹(2008): 「地層のできかた」を観察する堆積実験の検討. 地学教育, 61, 9-23.
 川田裕郎(1969): 粘度. コロナ社, 東京, 1-4.
 三浦 登・岡村定矩・伊佐公男・市川智史・江里口博・遠藤秀紀・梶田毅一・加藤圭司・川角 博・小池啓一・香西 武・小波秀雄・佐倉 統・左巻健男・島崎邦彦・清水 誠・菅野耕三・鈴木 隆・高橋 修・

- 高島勇二・田中信一郎・丹沢哲郎・辻本昭彦・戸北凱惟・中村 茂・中村雅浩・西野栄正・秦 明德・八田明夫・人見久城・藤田静作・藤田剛志・堀田清史・堀哲夫・前田京剛・松尾基之・松村譲児・三浦郁夫・邑田 仁・毛利 衛・谷田貝秀雄・山路裕昭・結城千代子 (2006): 新編 新しい科学2分野上. 東京書籍, 東京, 71.
- 三浦 登・奥井智久・毛利 衛・石井恭子・石浦 長・岡崎 彰・小倉 康・梶田叡一・春日井一郎・加藤直樹・神田房行・香西 武・小島俊子・斎藤 實・新城和治・鈴木 隆・高家博成・丹沢哲郎・塚谷裕一・土田 理・戸北凱惟・中村 守・能條 歩・秦 明德・久田健一郎・蛭田俊男・藤田静作・堀 哲夫・結城千代子・横山 正・吉田 淳 (2005): 新しい理科6下. 東京書籍, 東京, 5.
- 堆積学研究会 (1998): 堆積学辞典. 朝倉書店, 東京, 439.
- 吉川弘之・大隅良典・石浦章一・鎌田正裕・阿部 治・荒木弘人・入月俊明・大木道則・大野晏且・尾崎浩巳・北野日出男・奥田武彦・小堀志津子・菅井啓之・鈴木清三郎・鈴木善次・鈴木盛久・大東義徹・竹内郁夫・竹内敬人・武村重和・武山哲郎・谷岡義高・塚田庸子・仲井 豊・中谷内政之・西岡正泰・庭野義英・貫井正納・久田隆基・藤井浩樹・松本勝信・松本伸示・村上忠幸・村上長世・森 一夫・家野 等・山崎貞治・若田光一 (2005): わくわく理科6下. 新興出版社啓林館, 大阪, 7-8.

利根川浩子・渡辺理文・鎌田正裕: 個別実験が可能な地層の堆積モデル教材, 地学教育 64 巻 2 号, 29-36, 2011

〔キーワード〕 地層, 堆積, スモールスケール, 個別実験

〔要旨〕 ポリビニルアルコール(PVA)水溶液とガラスの粒子と透明なテストチューブを使い, 小・中学校の理科で活用するスモールスケールの地層モデルを作製した. PVA 水溶液の粘性を上げると粒子の沈降速度が遅くなるので, 子どもたちはどのように地層が作られるのかを短時間に, 小さなテストチューブだけを使って自分自身で確認することができる. 作製の費用も安価で (50 円以下), それゆえ, 子どもたちは自分で使うモデルを自分で作ることができる. このモデルを小学校の第6学年の理科授業で使った. 児童からの反応の多くは肯定的であり, このモデル教材によって地層の形成についてより効果的に学習できると考えられる.

Hiroko TONEGAWA, Masafumi WATANABE and Masahiro KAMATA: A Small-Scale Model for an Individual Experiment to Illustrate How a Stratum Is Formed under Water. *Journal of Education of Earth Science*, 64(2), 29-36, 2011

プラスチック板で作った簡易教材による堆積作用の実験

Experiments of Sedimentation Using Simple Teaching Materials Made of Plastic Boards

北沢 俊幸^{*1}・川野 幸朗^{*2}・村越 直美^{*3}

Toshiyuki KITAZAWA, Koro KAWANO and Naomi MURAKOSHI

Abstract: Two simple teaching materials for school students, designed to observe sedimentation and internal structures of sediments and made with plastic boards, are presented. The first is "Portable Accommodation Space," utilizing a card case filled with sand and water. It is suitable for students to make by themselves and to study grain size and sedimentary structures. The second is a "Mini-flume," 2.3 m in length. This flume is suitable for studying large-scale sedimentation processes, such as delta progradation and evolution of depositional systems in response to sea-level changes. The usefulness of these teaching materials is supported by responses to questionnaires from university students.

Key words: sedimentation, sedimentary structure, delta, plastic board, Portable Accommodation Space, Miniflume

1. はじめに

地層のでき方の学習では、堆積作用の「結果」である地層の観察だけでなく、流水の作用によって土砂を侵食・運搬・堆積する「過程」も観察すると理解しやすい。しかし、河川や海などにおける堆積作用の野外観察だけを行っても、自然現象の複雑さと、地層が形成する時間的・空間的スケールの大きさから、堆積作用の理解が困難である場合が多い。

大学等では、堆積作用を人工的に再現できる水槽や水路を使った実験が行われる。実験は複雑な自然現象の一端を切り出して単純化させ、その本質の理解を容易にする。理科の授業でも実験により目の前で起こる堆積作用を観察することで、野外での地層観察の理解度が高まると期待される。しかし、本格的な実験設備は高価であり、教育現場での導入は困難である。そこで本稿では、PET 樹脂板などのプラスチック板を使って安価、簡便に自作可能な実験装置二つについて述べる。

「携帯堆積空間」は透明カードケースに水、空気、砂を封入して作成する地層の実験装置である(北沢ほか, 2004a, b)。砂の沈降、なだれによる堆積作用、地層の液状化による二次的変形を再現し、地層を断面で観察できる。「堆積空間」とは堆積学の専門用語で、地層の基底面から水面まで、つまり地層が堆積する空間のことである。この実験装置ではカードケースの底から水面までが堆積空間にあたり、携帯できるほど小さいという意味から命名した。携帯堆積空間は作成が容易で、その名のとおり場所を選ばず繰り返し何度でも実験できるのが利点である。学習者自身が粒度(粒の大きさ)の異なる砂に触れながら作成することで、砂の挙動が粒度に大きく支配されること、粒度の違いによって堆積構造(地層の堆積時に形成される縞模様)ができることなどを効果的に学習できる。

持ち運び可能な地層の実験装置にはほかに、ボトルに水と砂やガラスビーズ等の粒子を封入して作成する「小さな水槽」(宮田 1998)、「エッキー」(納口, 1999; 2001)、「エキジョッカー」(宮地・兼子, 2002)など

^{*1} 立正大学地球環境科学部環境システム学科 ^{*2} 開明児童育成クラブ ^{*3} 信州大学理学部物質循環学科
2009年7月13日受付 2011年3月31日受理

が考案されている。これらはボトル内部で砂を沈降させ級化構造を作ったり、地層に振動を与えて液状化を起こさせたりできる。携帯堆積空間でもこれらの装置と同様の実験が行えるが、観察面が平板状で見やすく、露頭観察に近い感覚を得られるのが特徴である。しかし最も重要な相違点は、エッキーなどではすべての砂が一度に浮遊・沈降するのにに対し、携帯堆積空間ではカードケースに封入した気泡を利用して、砂を少しずつ供給できる点にある。これにより、1) 砂が沈降する現象を数分から数十分にわたり継続させること、2) 小規模な砂のなだれを繰り返し起こさせること、3) 級化構造以外にも細かな堆積構造を形成させることが可能である。

本稿では、北沢ほか(2004b)で示した通常サイズの携帯堆積空間の作成法に、それ以後の改良点を加えて述べる。また、見た目のインパクトがあり、授業や普及行事などで見本として使いやすい「携帯堆積空間拡大版」を新たに開発した。携帯堆積空間で観察される現象と堆積構造の専門的解説および露頭で観察される実際の地層との比較は北沢ほか(2004a, b)で述べたため、本稿では簡単な解説にとどめる。

「ミニ水路」は、流水による堆積作用を再現できる実験装置である。河川やデルタ(三角州)の形成、それらの海水準変動に対する応答を立体的に観察できる。教育的な水路実験の例として、目代ほか(2006)や澤田ほか(2009)は産業技術総合研究所の地質標本館が近隣の小学校から受け入れている校外授業について述べている。そこでは水路を使った堆積実験が子どもたちに好評で、見学時に実験を希望する小学校が増えているという。しかしそのような立地条件に恵まれた学校は限られており、学校内で実施可能な水路実験の潜在的需要は少なくないと考えられる。西田ほか(2008)は学校現場で作成可能な簡易実験水槽と、それを用いたデルタの実験を示し、学校教育での活用法を提案している。本稿で述べるミニ水路は、地質標本館や西田ほか(2008)のものに比べると水路幅と断面高が小さいため、実験のダイナミックさではやや見劣りするが、実験時間の短さに大きな利点がある。また教育現場での導入を前提に簡素な作りを目指した。作成時間は1時間程度、水路本体の材料費は数千円である。

地層のでき方を理解するのに実際の河川や海での観察が重要であることは言うまでもないが、携帯堆積空間とミニ水路を用いた実験では、眼前で地層が堆積す

る「過程」を観察でき、自然現象を理解する助けとなる。本稿では携帯堆積空間とミニ水路を教材に用いて我々が実践した、一般向け普及活動、高等学校の授業について述べる。また、携帯堆積空間に関する大学生アンケートの結果に基づき、その教育効果を明らかにする。

2. 携帯堆積空間

(1) 材料と道具

自然砂、カラーサンド(新東陶料株式会社製8号砂を用いたが、市販の園芸用でも可)、透明プラスチック製カードケース(ダイソー製硬質B6版:内厚1mmを用いた)、アクリル樹脂用接着剤(株式会社アクリサンダー製アクリサンダー接着剤を用いた)、透明プラスチック板(株式会社アクリサンダー製エコロジープラスチックPET樹脂板:200×300×1mmを用いた)、浴室用目張り剤(株式会社セメダイン製バスコークを用いた)、ふるい(目開き1φ=500μm, 1.5φ=355μm, 2φ=250μm, 2.5φ=180μm, 3φ=125μm, 3.5φ=90μm, 4φ=63μm)、注射器(針は不要)、洗面器、爪楊枝、台所用洗剤、水道水。

(2) 通常サイズの作り方(図1)

1) 砂(自然砂やカラーサンド)を水洗しながらふるい分けする。使用する粒度は1~1.5φ, 2~2.5φ, 3~3.5φの3種類である(あるいは1.5~2φ, 2.5~3φ, 3.5~4φの3種類でも良い)。北沢ほか(2004b)では使う砂の粒度を1~2φ, 2~3φ, 3~4φと連続させていたが、粒度差がある方が堆積構造をはっきりと識別できる。これより粗い砂を入れると砂粒の動きは見えやすいが、0φ(1mm)より粗い砂粒はカードケース内部で挟まってしまうため適さない。泥が含まれているとカードケース内の水が濁るため砂をよく洗う。砂は地域ごとに色調や鉱物種の構成が異なるため、学校周辺の海岸や河川の砂を使用することで地域学習の教育効果も期待できる。

2) カードケースの接合部に隙間がないか確認する。わずかでも隙間がある場合は浴室用目張り剤でふさぐ。後で砂や水を入れてから補修するより、この時点で隙間をふさぐほうが容易である。隙間に注入した目張り剤が乾かなくても作業を続けて構わない(水は漏れない)。ただし目張り剤をカードケース内部にはみ出るほど多く注入すると、入れた砂がくっついてしまい観察しにくくなるので注意する。

3) 1~1.5φ, 2~2.5φ, 3~3.5φの砂をそれぞれ15g

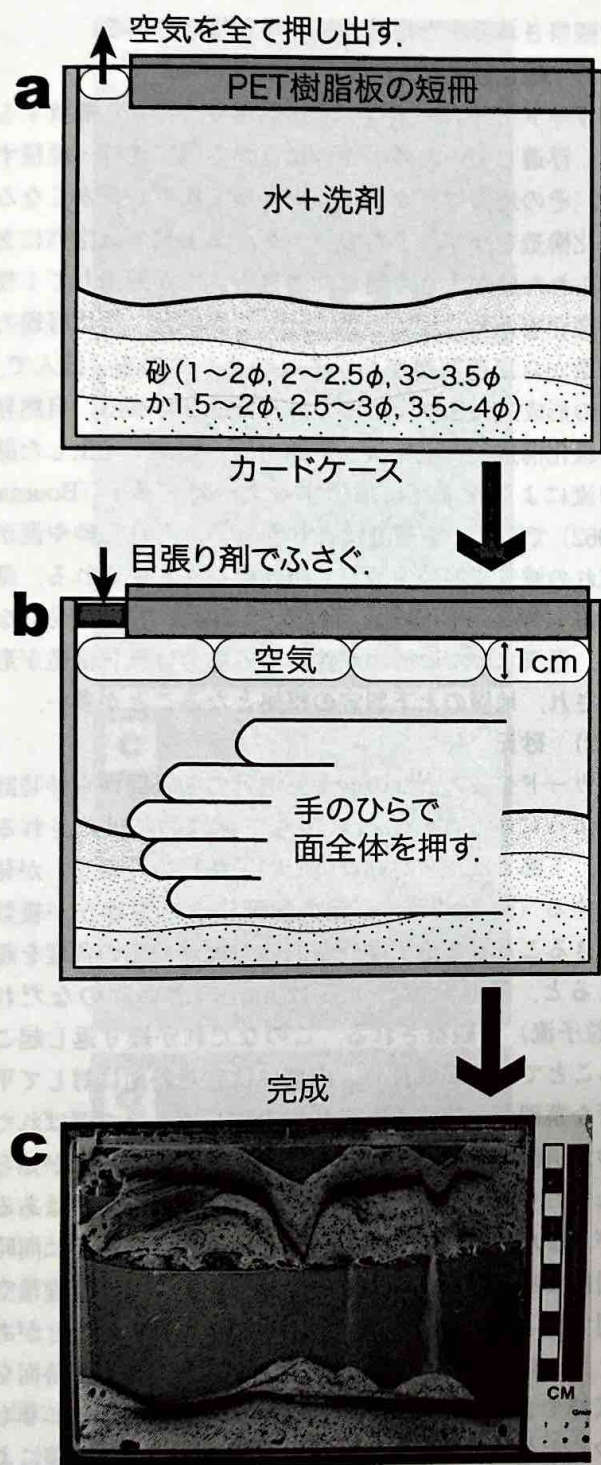


図1 携帯堆積空間の作り方 (B6版の場合)

a) カードケースに砂と水を入れて短冊でフタをし、隙間から空気と余分な水を押し出す。
 b) 空気の量を調節しながら隙間を目張り剤でふさぐ。
 c) 完成した携帯堆積空間。粒度が粗い順に、川砂(黄色と黒のごましお)、豊浦標準砂(黄)、カラーサンド(黒)を用いて作成した。級化構造のグラデーションが観察される。

程度ずつカードケースに入れる(カードケースをつぶした状態の1/3から半分程度まで入れる)。これら3種類の砂は色を変えたほうが堆積構造を観察しやすい。砂を入れた後、静電気です砂が舞い上がりカードケースの入れ口に張り付くのを防ぐため、注射器を用いて砂が湿る程度に水を注入する。また入れ口についた砂をふき取っておく。

4) 金ばさみなどを用いてPET樹脂板(1mm厚)を短冊状(180×8mm程度)に切り、その長辺をカードケースの入れ口と平行に、片端にしっかり密着させて挟む。もう片端にできる隙間は後で水と空気を調整するために開けておく。短冊を入れ口から1~2mm程度外側にはみ出させておくと、次の接着が容易である。カードケースと短冊の間に砂や水が挟まっていると接着できないため、しっかり取り除く。

5) 短冊の両面とカードケースをアクリル樹脂用接着剤で接着する。外側にはみ出した短冊をレールのように利用して接着剤を滴下すると、作業が容易である。接着剤がカードケース内部まで広がるとプラスチックが溶けて白く濁るので注意する。その後、接着剤が乾くまで待つ。

6) 洗面器で水道水と台所用洗剤(軽く泡立つ程度の量)を混ぜ、それを注射器でカードケースの入れ口端の隙間からあふれるまで注入する。洗剤を入れるのは実験時に気泡を長時間分離させておくためである。

7) カードケース両面を手で押し、内壁の中央を軽く密着させてすべての気泡と余分な水を押し出す(図1a)。この状態で少し傾けて、もし水漏れがあれば水を抜いて接着剤や目張り剤で補修する。

8) 壁などにカードケースを手のひら全体で軽く押しつけ、上端の空気層の上下幅を1cm程度に調節する。その状態を保持したまま、爪楊枝を使って入れ口端の隙間に目張り剤を充填してふさぐ(図1b)。カードケース全体の内厚が均等に1mm程度になるのが理想である。以上で「携帯堆積空間」が完成する。

砂と短冊が準備してあれば、2)以降の工程は5分程度である。目張り剤が完全に乾燥するのは1日程度かかるが、乾燥前にカードケースをひっくり返して水漏れや砂の動きを確認する。水や空気の量が適切でないと砂の動きが悪かったり、逆にすべての砂が一度に沈降したりするため、目張り剤を取り除いて再調整する。

ここではB6版のカードケースを用いたが、これより小さいカードケースでも作成できる。その場合の

砂、水、空気の量は適宜調節しなければならない。一方これより大きなカードケースを用いると、水圧でカードケースの厚みが広がってしまい、砂が一度に沈降してしまうため観察に適さない。より大きな観察面を得たい場合は次に示す拡大版を作ると良い。

(3) 拡大版の作り方

ホームセンターなどで売っている透明プラスチック板2枚(株式会社アクリサンデー製エコロジープラスチック PET 樹脂板:200×300×2mm を用いた)を用いて、大きさが A4 版程度で頑丈な携帯堆積空間“拡大版”を作成できる。

1) 通常サイズの携帯堆積空間で用いた厚さ1mmのPET樹脂板で、300×5mmの短冊1枚(底になる)と195×5mmの短冊2枚(左右の壁になる)を作る。

2) 厚さ2mmのPET樹脂板(側板となる)の縁に沿って、1)で作った厚さ1mmの短冊3枚をアクリル樹脂用接着剤で接着して「コ」の字型の枠(底と左右の壁)を作る。枠の継ぎ目に隙間がないようしっかりと密着させる。もう1枚の側板(厚さ2mm)を上から重ねて接着すると、全体の厚さが5mm、内厚が1mmの「大きなカードケース」ができる。

3) 厚さ1mmのPET樹脂板で280×8mmの短冊1枚(フタとなる)を作り、後は上記の通常サイズと同じ工程で作成する。砂は「大きなカードケース」の1/3から半分以下の高さまで入れる。上端の空気層の上下幅が1cm程度になるよう、水と空気の量を調節する。以上で「携帯堆積空間拡大版」が完成する。

なお内厚を2mmとすると、実験中に砂が一度に沈降してしまうため観察に適さない。また厚さ1mmのPET樹脂板を側板に用いると、水圧によって下部が膨らみ、逆に上部はつぶれてしまうため、砂の動きが悪くなる。

(4) 観察

立てた状態のカードケースの上下をひっくり返すと、上部で気泡列に支えられた砂はすぐには崩れず、気泡列の切れ間から少しずつ漏れるように砂が沈降する。下部ではさまざまな美しい堆積構造を作りながら地層が堆積する。カードケースを振り、気泡の大きさを変えることで、砂の供給速度(上部の砂が崩れる速さ)を調節できる。気泡をある程度小さくすると気泡列の切れ間ができやすく、砂の供給量が多くなる。ただしあまり小さくすると、逆に泡の層に砂が支えられ、砂が全く供給されなくなる。以下は携帯堆積空間

で観察される主な堆積作用と堆積構造である。

1) 級化構造

カードケースを振って水を懸濁させてから静置すると、浮遊していた砂が粗いほうから順に沈降・堆積する。その地層は下から上に向かって粒度が細くなる級化構造をなす。またカードケース上部で気泡列に支えられた砂が大きく崩れたときも、水が懸濁して1枚の級化層が形成する(図1c)。この場合、級化層理の枚数から崩落回数がわかる。つまり地層を「読んで」その形成過程を推定するという概念を学べる。自然界の級化構造の典型例は、陸棚斜面の崩壊で発生した混濁流により深海底に堆積するタービダイト(Bouma, 1962)である。混濁流により巻き上げられた砂や泥が流れの減衰に伴い沈降して級化構造が形成される。深海底に限らず、河道、氾濫原、海浜、干潟、浅海など、懸濁水中で碎屑物が沈降する場合は級化構造が形成され、地層の上下判定の根拠となることが多い。

2) 砂丘

カードケース上部の砂が気泡列の切れ間から砂時計のように少しずつこぼれ落ちて継続的に供給されると、下部では左右対称な美しい三角形の「砂丘」が発達する(図1c, 2a)。気泡の配列によって砂丘が複数できることもある。砂丘斜面の勾配が一定の角度を超えると、斜面を流れ下る数mmの薄い砂のなだれ(粒子流)が観察される。このなだれが繰り返し起こることで砂丘が成長し、内部には砂丘斜面に対して平行な葉理が発達する。自然界の砂丘でも風で運ばれた砂が斜面をなだれ落ちて葉理が形成されることが知られており(Hunter, 1977)、水中と大気中の違いはあるが、なだれの現象としては同じである。葉理面は同時面であり、そのときの砂丘斜面を表す。携帯堆積空間でできる砂丘斜面の勾配は約40°に達することがあり、一般的に知られる砂の水中安息角(粒子が斜面を保持できる限界の勾配)(松倉・恩田, 1989)よりも少し大きい。これはカードケース内部の壁面摩擦によるものと考えられる(北沢ほか, 2004b)。

3) フォアセットと斜交葉理

カードケース上部で気泡列に支えられていた砂が抜け落ちると、そこに空間ができ、気泡が入り込む。すると気泡列の切れ間が拡大するため、次々と砂がこぼれ落ち、さらに切れ間が拡大する。こうして砂の供給位置が移動することで、地層が側方に付加しながら堆積する(図2b)。また2)の砂丘の裾野が、砂の供給量の増加に伴い徐々に側方に発達することもある。ど

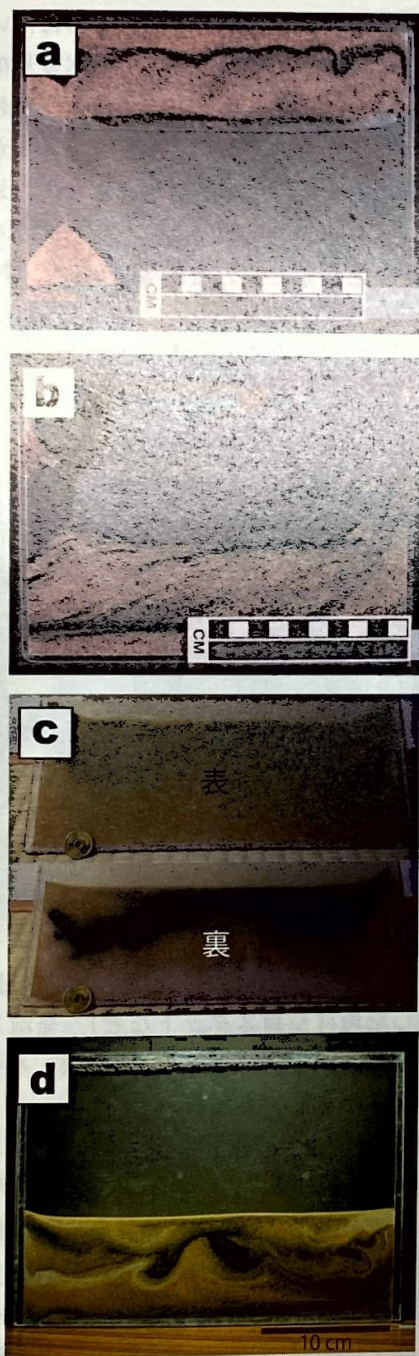


図2 携帯堆積空間による堆積構造

a) 気泡の切れ間からこぼれ落ちる砂の下で発達する砂丘。砂は図1cと同じ。b) 左に向かって発達したフォアセット。内部には斜交葉理が発達する。砂は図1cと同じ。c) A4版の携帯堆積空間拡大版を傾けて砂のなだれを発生させ、表と裏から見たもの。砂は粗い順に、少量の粗粒なカラーサンド(水色)、豊浦標準砂(黄色)、カラーサンド(黒)、ケイ砂(白)の4種類である。表(上面)には粗粒な砂が、裏(底面)には細粒な砂が濃集することから、逆級化構造が形成されたことがわかる。d) 携帯堆積空間拡大版で液状化を起こして作った変形構造。砂は図2cと同じ。



図4 ミニ水路による実験

a) デルタの形成実験。ミニ水路の下流端に堰を入れると海ができ、デルタの発達に伴い平野ができる。b) ミニ水路内のデルタを上から見た写真およびその断面図。細粒なカラーサンド(赤)は浮遊して沖合(右側)まで運ばれる。粗粒な自然砂(平野と斜面に堆積)とカラーサンド(沖合に堆積)のコントラストが観察される。c) デルタの前進の結果、下から順に、沖合で堆積したカラーサンドの薄層、フォアセット、平野で堆積した粗粒な砂の薄層が重なる。d) デルタの形成途中で堰を追加して段階的に水位(海水準)を上昇させて作った段々地形。前進しているのは最も上に位置するデルタだけである。

ちらも砂が斜面をなだれ落ちることで地層が側方に付加・発達しており、このような地層をフォアセットという。自然界のフォアセットは、川底の砂漣（水底の小さな凹凸地形）が下流側に移動してできる高さ数 mm のものから、砂丘の移動に伴う高さ数 m のもの、河口のデルタが沖に向かって前進してできる高さ数十 m 規模のものまでさまざまである。

携帯堆積空間で作ったフォアセットを前進方向と平行な断面で見ると、前進方向に傾いた斜交葉理が発達する。砂丘の葉理と同様に、この斜交葉理も同時期面であり、そのときの地形面を表す。なお携帯堆積空間で観察されるフォアセットは、供給源の移動を伴うため上面が平滑でないなど、自然界の水流によってできるフォアセットとは形態が異なる。したがってフォアセットの本質である、砂がなだれ落ちながら前進する斜面に注目して観察すべきである。

4) 砂のなだれ

上述の砂丘とフォアセットの葉理は、薄い砂のなだれによってできる。カードケース下部に堆積した地層をカードケース面に垂直な軸で回転させて傾けると、より厚い砂のなだれが発生し、その縦断面を観察できる。一方、砂のなだれを上面(表)と底面(裏)から観察するには、カードケース面に平行な軸で回転させて傾ける。なだれが複数発生し、内部で分級（粒度のより分け）が起こりながら流れ下る。カードケースの傾きにより流下速度を調節可能である。堆積した砂を表と裏から観察すると、上面に粗粒な砂が、底面に細粒な砂がそれぞれ濃集しており、分級によって逆級化構造（級化構造とは逆に、1枚の層の中で下から上に向かって粗くなる構造）が形成されている（図 2c）。自然界では砂丘斜面などで発生する粒子流の内部で分級が起こり、逆級化構造を形成することが知られている（Hunter, 1977 など）。このメカニズムとして、ゴマ塩の容器の中で細かい塩だけが下にたまるように、粒子流の中で細かい粒子が粗い粒子の隙間から下に入り込む作用（Middleton and Southard, 1984 など）が一つの大きな要因と考えられている。

5) 液状化

カードケース下部に堆積直後の地層は間隙が多く、そこに大量の水が含まれており軟らかい。やがて圧密によって少しずつ水が抜け、体積が減少し固くなっていく。堆積直後に手で叩いて振動（地震などに相当）を与えると、一度堆積した砂のかみ合わせがほどけ、砂と水が混ざりながら液体のように振る舞う「液

状化」が起こる。間隙水が上へ抜けるのに伴い、地層が変形し、荷重痕や火炎構造などの脱水変形構造が形成される（図 2d）。携帯堆積空間で液状化が起きているときの地層は非常に軟らかく不安定であるが、一度間隙水が抜け出ると以前よりも固くしまった地層となる。液状化を観察するには、堆積直後に間隙水を地層中に閉じこめる「ふた」の役割として、3~3.5φの細粒な砂を少し多めに入れると良い。また明瞭な層理面を持つ厚い地層を変形するとわかりやすい。なお液状化を繰り返し観察したい場合は、カードケース内の気泡を少なめに作成すると、砂の沈降・堆積が速やかに起こる。自然界で実際の地震などで起こる「噴砂」は、液状化により間隙水と一緒に砂が地上に噴出したものである（Gill and Kuenen, 1958）。

3. ミニ水路

(1) 材料と道具

自然砂（粒度は任意だが、 $2\phi=250\mu\text{m}$ より粗い砂が含まれると観察しやすい）、カラーサンド（新東陶料株式会社製 8号砂を用いた）、透明プラスチック板 1枚（株式会社アクリサンデー製エコロジープラスチック PET 樹脂板： $900\times 450\times 1\text{mm}$ を用いた）、アクリル樹脂用接着剤（株式会社アクリサンデー製アクリサンデー接着剤を用いた）、台座（水路の長さに応じて切断した角材や角スタットなど）、発泡スチロール（厚さ 10 mm の板状のもの）、ホース、バケツ。

(2) 作り方と設置（図 3）

1) PET 樹脂板を幅 150 mm ずつに切り分け、 $900\times 150\times 1\text{mm}$ の 3枚にする。

2) それぞれの PET 樹脂板を「コ」の字型に折り曲げて、長さ 900 mm の短い水路を三つ作る。このうち二つは高さ 65 mm、幅 20 mm に、残り一つは高さ 64 mm、幅 22 mm にしておく。折り曲げる際は PET 樹脂板の片面にカッターでわずかに直線状の傷をつけ、その傷で谷折りにすると曲げやすかつ十分な強度が保て、水漏れしない。

3) 幅 22 mm の水路を真ん中にしてその両側に幅 20 mm の水路を 10 mm 程度重ねて連結し、PET 樹脂用接着剤で接着する。作りを単純にするために接着部を 2カ所だけにした。1枚の PET 樹脂板（ $900\times 450\times 1\text{mm}$ ）から約 2.7 m の水路を作成できる（図 3 のミニ水路は長さ 2.3 m である）が、これを複数連結すればさらに長くすることも可能である。

4) 連結した水路の片端に水路幅（20 mm）より少

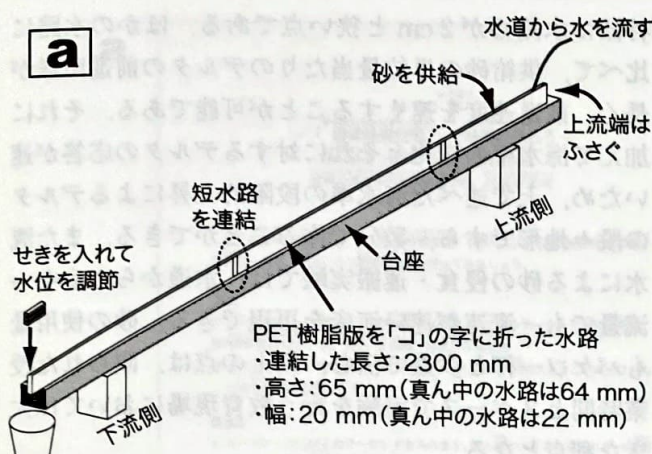


図3 ミニ水路の作り方と設置

a) 概念図。連結によりさらに長くすることもできる。b) ミニ水路の実際の設置と実験の様子 (高校1年理科総合B)。

し幅広く切った発泡スチロール板を詰めてふさぐ。こちらが水路の上流端となる。これにより実験中に水が逆流してこぼれることを防ぐ。

5) 水路のねじれを防ぐため、台座 (角材や角スタットなど) の上に水路を置き、粘着テープで数カ所固定する。以上で「ミニ水路」が完成する。

6) 水路の下流端をバケツや流しにかかるように置き、上流側を少し持ち上げて設置する。これで流路勾配 (河床勾配に相当) を調整する。水道からホースで上流部に水を流し、下流端から排出する。蛇口の調節により流量と流速を調節する。ポンプを用いて下流端のバケツから上流部に水を循環させることも可能だが、流量の調節には電圧調節器などが必要になる。砂の供給は人の手によって行う。水路の下流端から流れ出た砂はバケツにためて回収する。実験の目的に応じて、水路の下流端に水路幅 (20 mm) より少し幅広く切った、高さ 10 mm の発泡スチロール板を重ねて詰

める。これが堰 (せき) となり、下流部に水たまり (海に相当) ができる。発泡スチロールの数 (堰の高さ) によって水位 (海水準に相当) を調節する。

(3) 観察

上記の実験条件を自由に設定して、流水の3作用 (侵食、運搬、堆積) による地形と地層の形成過程を観察する。以下にミニ水路を使ってできる実験例を示す。

1) 流水による砂の侵食・運搬実験

水路勾配を $5\sim 6^\circ$ 程度に設定し、水路の下流端を開放する。上流部に砂山を作って、さらに上流から水をわずかに流す。すると砂山が侵食されて、砂粒が転動しながら下流へ運搬される。水量を増加させると流速が増し、砂山の侵食が進む。また転動する砂に混じって、躍動や浮流する細粒な砂も現れるようになる。このことから流速や粒度によって運搬様式が異なることがわかる。この実験は河床を再現しているが、水路を河川のミニチュアに見立て、上流域の山地侵食と下流への土砂の運搬の様子も再現できる。水量や水路勾配を調節して地形や河川流量の条件を変えられる。

2) デルタ (三角州) の形成

水路勾配を $5\sim 6^\circ$ 程度に設定し、発泡スチロールの堰で下流端を堰止めると「海」ができる。すると上流から「河川」により運搬された砂が海岸線付近に堆積して、海の水位とほぼ同じ高さの「平野」ができる (図4a)。このミニ水路で作られる平野は水面よりわずかに低い。これは幅の狭い水路全体を水が流れており、自然界では平野上の河川にあたる部分を見ているためである。平野の海側には沖に向かって 35° 程度傾斜した斜面が形成され、砂がなだれ落ちながら前進する。その結果、徐々に平野の面積が広がっていくことになる。このように河川により運搬された土砂が河口付近に堆積し、沖に向かって前進するシステムをデルタという。ただしデルタという用語は、海岸線が周りより海側に突き出ている地形に対して使われることもある (例えば Bhattacharya, 2003)。

陸側から海側に向かって順に、平野では粗粒な砂が河床を運搬され、海岸線より海側の斜面では砂のなだれが発生し、より沖合では細粒な砂が浮遊しながら運ばれる様子が観察される。細粒なカラーサンドを混ぜておくと、急斜面 (主に自然砂) と沖合 (カラーサンド) の境界が色の違いとしてはっきり識別できる (図4b)。デルタが沖に向かって前進した結果、地層は下

から上に向かって、沖合で堆積した細粒な砂の薄層、斜面の前進により形成したフォアセット、平野で堆積した粗粒な砂の薄層の順に重なる(図4c)。この重なり方は自然界の典型的なデルタの地層(Gilbert, 1885)と同様である。この実験から、「連続して重なる地層どうしは、互いに隣接した環境が水平方向に移動することで形成される」という「ワルターの法則」を学習することもできる。

3) 海水準変動

デルタの前進により平野が広がった状態で、下流端に堰を追加する。すると海の水位(海水準)が上昇し、デルタの前進が止まり、海岸線が陸方向へ移動する(海進)。海水準の上昇量はわずかでも、平野は勾配が緩やかなために短時間で大部分が水没してしまう。水位が追加された堰を超えると下流端から水があふれ、海水準の上昇が停止する。その海水準に応じて河口では新たなデルタの形成が始まる。逆に堰を外して海水準を低下させると、海岸線が海方向へ移動し(海退)、それまで海面下にあったデルタが陸地となって、侵食が始まる。この実験では、過去の地球で繰り返し起きた海水準変動による地形と地層の形成過程を再現できる。ミニ水路で水位が低いときに形成した平野はいわば海水準が今より100 m以上低かった最終氷期の陸地に相当し、その後の水位上昇によって水没したその平野は、現在の大陸棚に相当する。また逆に水位が高いときに形成した平野はいわば海水準が高かった最終間氷期の平野に相当し、その後の水位低下によりその平坦面が完全に陸化した地形は、海成段丘に相当する。この水路実験から、わずかな海水準変動でも低地環境に及ぼす影響が甚大であることがわかり、未来の地球環境変化を考えるうえでイメージが湧きやすくなる。

もう少し複雑な実験(西田ほか, 2008)として、水位を段階的に上昇させると、そのたびにデルタが上に重なって段々地形を形成する(図4d)。前進中のデルタが、水没により発達が停止したかつてのデルタを追い越すときには、水深が急に深くなるため、フォアセットの厚さが増し、前進速度が落ちるという面白い現象も観察される。

(4) ミニ水路の特徴

これらと同様なデルタの形成と海水準変動の実験は目代ほか(2006)、澤田ほか(2009)、西田ほか(2008)の水路でも行われている。特に定量的なデルタの形成実験は西田ほか(2008)に詳しい。本稿のミニ水路の

特徴は水路幅が2 cmと狭い点である。ほかの水路に比べて、供給砂の単位量当たりのデルタの前進距離が長く、前進速度を速くすることが可能である。それに加えて海水準の変化とそれに対するデルタの応答が速いため、上で述べた海水準の段階的上昇によるデルタの段々地形ですら、数分で作ることができる。また流水による砂の侵食・運搬実験では、水道からの少ない流量でも、流速が速い河床を再現できる。砂の使用量もバケツ一杯と少量で済む。以上の点は、限られた授業時間とスペースで実験を行う教育現場においては大きな利点となる。

4. 実験教材を用いた教育実践

(1) 普及活動

信州大学理学部が毎年夏に行っている一般向け普及行事「信州自然誌科学館」で、2003年から携帯堆積空間を用いて実験を行うブースを出展している(図5)。このブースの狙いは、参加者が粒度の異なる砂に実際に触れ、携帯堆積空間の観察を通して堆積構造のでき方を学ぶことである。このブースを訪れるのは子ども(幼児、小・中学生)のほか、子どもの保護者、大学生も多く、対象者は特に設定していない。ブースで使用する予算は1万円、人員は3名程度である。小さなカードケース(主としてA7~B6版)を使って、2日間で約200個作成する。

あらかじめ自然砂とカラーサンド計十数種類の砂を洗ってふるい分けしておく。1日目に1~1.5φ、2~2.5φ、3~3.5φの砂を、2日目に1.5~2φ、2.5~3φ、3.5~4φの砂を使うことで無駄な砂を減らすことができる。ブースには同じ粒度で色違いの砂どうしをまとめて置いておく。参加者は砂の色合いを考えながら、粒度の粗い砂、中くらいの砂、細かい砂の3種類を自分で選んでカードケースに入れる。ここでは砂を入れすぎないように指導が必要である。使い捨てプラスチックプーンを用いて、各粒度の砂を適量ずつ入れさせた。また一つの粒度で複数色の砂を入れたがる子どもがいるが、入れたときはきれいでも水を注入すると混ざってしまうため、色がよくすみ観察には適さない。堆積構造をよく観察するためには、濃淡のコントラストをつけた組み合わせが良い。子どもには、自然砂より水色、ピンク、黄緑など色鮮やかなカラーサンドで、浮遊するラメを好みで少量加えるのが人気である。大人には自然砂だけの落ち着いた色調のものも人気がある。参加者が砂を入れたカードケースを我々や学生が

a

砂の彩
いさごのいろ
—「携帯堆積空間」で地層を作ろう—
北沢俊幸 (信州大学理学部物質循環学科村越研究室)
信州大学理学部物質循環学科 村越研究室

ねらい
砂と水を封じ込めたカード「携帯堆積空間」を作って、水の中で砂がたまる様子を観察したり、いろいろな模様の地層を作ってみよう。

材料
プラスチックカードケース、川や砂浜の自然砂、園芸用カラーサンド、PET樹脂板、PET樹脂用接着剤、水、台所用洗剤、浴室用目張り剤

※ 砂とカラーサンドはよく洗ってからふるい分けして、粒の大きさに分けたものを何種類か用意します。

作り方
1. カードケースに砂とカラーサンドを入れます。色と粒の大きさをえて2〜3種類入れます。砂の量はカードケースの下から1/3ほどです。入れすぎないように注意しましょう。
2. 短冊状に切ったPET樹脂板をカードケースの口にはさみ、接着剤で張りつけます。このとき片側に1cmほどの隙間を作っておきます。
3. 隙間から水と洗剤を入れます。
4. 砂がうまく落ちるように空気と水の量を調節しながら隙間を浴室用目張り剤でふさぎます。目張り材が乾いたら完成!

観察の仕方
カードを上下にひっくり返してみよう。砂が空気の泡にささえられながら少しずつ落ちる様子が観察できます。落ちた砂は下にたまってきれいな模様の地層を作ります。カードをふって泡を作ると、砂が落ちる量を調節することができます。

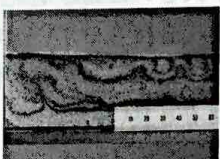
地層を作ってみよう!



砂の粒は大きなものほど速く沈み、小さいものはゆっくり沈みます。また、いろんな場所から砂が落ちたり、一度たまった砂が崩れたりすることで、様々な模様の地層ができます。



砂が斜面を流れ下るとき、大きな粒と小さな粒がより分けられて斜めのしま模様ができます。これを斜交層理といいます。川や海のように水が流れている場所で斜交層理はできます。



たまったばかりの水には砂がほとんど閉じこめられています。カードを指で軽くくたくと、閉じこめられていた水が地層から抜け出て、地層が変形します。地層の時に起こる液状化はこれと同じものです。

!!水がもれることがあるので大切なものの上には置かないように!!

b



c



d



(信濃毎日新聞 2007年8月5日朝刊)

○：信大理学部主催の「信州自然誌科学館」が4日、松本市の信大松本キャンパスで二日間の日程で始まった。科学の楽しさを知ってもらおうと、学科や研究室が約六十の展示・体験コーナーを設け、家族連れなどにぎわった。

○：「携帯堆積(たいせき)空間」のコーナーでは、プラスチックケースに大きな色と色の違う砂と水を入れ、水中で砂がたまる様子を観察し、写真・子どもたちは、さっそくケースを傾け、粒の大きい砂ほど速く沈む様子に見入っていた。

○：今年で三回目の参加という松本市清水中学校三年の栗林梢さん(15)は「毎年新しい発見があって楽しい。理科は苦手だけど、どれも興味かわきます」。

図5 信州自然誌科学館 2007「自然の彩」に出展したブース「砂の彩—「携帯堆積空間」で地層を作ろう—」の様子
a) 案内冊子に掲載したブース解説(北沢・信州大学理学部物質循環学科村越研究室, 2007). b) ブースの案内冊子に掲載したブース解説, カードケースを閉じる道具を並べてお準備. 写真手前から, カードケース, 砂(粒度が粗い順に3種類), カードケースを閉じる道具を並べてお準備. 写真手前では完成間近の携帯堆積空間. c) 当日のブースの様子. 写真奥ではカードケースに砂を入れ, 写真手前では完成間近の携帯堆積空間. d) 完成した携帯堆積空間を観察する子ども(信濃毎日新聞社, 2007)(原図はカラー).

預かり、作り方2)以降の工程を行い完成させる。そして完成した携帯堆積空間を用いて観察の仕方や堆積構造の解説をする。なお経年劣化による水漏れがあるので、注意を促す。

このブースは毎年大人気で、200個のカードケースでは足りないくらいである。前年からのリピーターもいれば、2日間の開催日程を連続で参加するリピーターもいる。子どもも大人も完成した堆積空間をじっと観察し、きれいな砂丘や堆積構造ができると声を上げて喜んでいる。携帯堆積空間拡大版は解説時の見本に用いるほか、看板代わりに展示すると宣伝効果がある。特に液状化実験は観察面が大きいと動きがダイナミックで長く続き、来場者が興味を持ちやすい。学校教育で携帯堆積空間を教材として用いる場合は、作成の全工程を子ども自身に行わせると良いだろう。

(2) 高校理科の授業

携帯堆積空間とミニ水路を用いて、長野県松本市の創造学園大学附属高等学校で2007年に行った理科総合B(1年生)の授業について述べる。

1) 第1回目「流水と地層の観察」

ミニ水路を用いた実験を4クラス(各3~二十数名)で行った。グループ分けはしなかった。45分間授業の最初の5分間で、実験の目的「流速や粒度の違いによる侵食・運搬・堆積作用の変化」を明確にした。次の5分間では、教員が水路の構造を説明し、流水による砂の侵食・運搬実験を行った。次の10分間では、下流端を堰で閉じた水路を河川上流域から海に見立て、上流域の山地侵食、デルタの形成、海水準変動の実験を行った。生徒があっと驚くのは、水位の上昇・低下に伴う沿岸域の急激な環境変化である。残り25分間は、生徒自身がいろいろな条件を設定して自由に実験した(図3b)。すると思わぬ条件設定で面白い結果が得られることがあった。一例として、発泡スチロールの堰を上流から下流まで多数配置する実験を挙げる。初めは堰ごとにダム湖ができるが、上流側のダム湖から順に堆砂で埋まり、下流へ砂が流出する。いずれすべてのダム湖が堆砂で埋まると、どこかに新たな堰を設置しない限りは下流への砂の流出は食い止められない。この実験では実際の砂防ダムで起こっている堆砂とダム能力低下の問題がうまく再現されている。また逆に、ダムの建設によって下流域や海への土砂供給量が激減し、海岸侵食が起こりうるという問題も視覚的によくわかる。その他にも、堰の置き方を工夫したり、水の流量をリズムカルに変化させるなど、

いろいろな実験を行った。通常理科の授業では、このように実験条件を生徒自身が考えて設定できる機会が少ないためか、積極的に実験に参加する生徒が多かった。また、生徒自身による新しい発見の体験という面でも、自由な発想にまかせるこのような実験は重要である。

2) 第2回目「地層と堆積構造」

地層累重の法則、整合と不整合の概念を学び、携帯堆積空間を用いて級化構造と斜交葉理のでき方を観察した。教員が携帯堆積空間拡大版を用いて解説し、生徒には通常サイズの携帯堆積空間を回覧させた。従来の水槽を用いた砂の沈降実験と違い、生徒自身が何度でも級化構造のでき方を詳しく観察できた。時間があれば生徒が実際に砂に触って携帯堆積空間を作ること、粒度に対する理解がさらに深まっただろう。

3) 第3回目「河川が作る景観」

第1回目のミニ水路を用いた実験で再現した河川の全体像を踏まえ、学校近くを流れる奈良井川河川敷で河川中流域の様子と砂州の地層を観察した。また礫を拾い集めて上流域の地質を推定するという、一般的な野外観察も合わせて行った。あらかじめミニ水路で上流の山が侵食されて河川の土砂になることを観察しているため、河原の礫が上流域の地質を反映するという関係を把握しやすかったと思われる。

4) 自然災害

上記の地層の授業と一連ではないが、自然災害の授業でも携帯堆積空間を用いて液状化を観察した。生徒は「液状化」という現象について、地震によって起こるらしいとニュースなどで聞き知っているようであるが、目の前で流動する地層を観察して初めて実感が持てたと言う。自然災害の授業は写真などによる部分が多いが、動的な実験を取り入れ、噴砂の写真と倒壊したビルの写真をつなぐ「現象」を理解することは重要である。また、変形していく地層を見て驚きの声を上げたり、何度も実験したがる生徒たちを見ると、自然災害について負の意識だけを植え付けるのではなく、現象としての面白さに注目させることも理科の一つの役割ではないかと考える。

(3) 大学の実験

2010年に立正大学地球環境科学部環境システム学科の学生実験で携帯堆積空間を用いた実験とアンケート調査を行い、その教育効果を検討した。

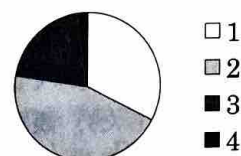
1) 実験内容

学生実験3クラス(各24~29名、約8割が1~2年

表1 携帯堆積空間に関する大学生アンケート結果 (回答者 49 名)

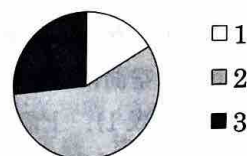
【1】あなたは地層に対する興味がありますか？

1. 非常に興味がある	32.7 %
2. まあまあ興味がある	44.9 %
3. あまり興味がない	20.4 %
4. 全く興味がない	2.0 %



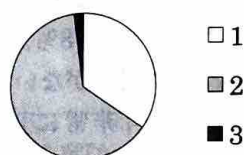
【2】実験装置作成の難易度はどの程度でしたか？

1. 非常に簡単	16.3 %
2. まあまあ簡単	57.1 %
3. やや難しい	26.5 %
4. 非常に難しい	0.0 %



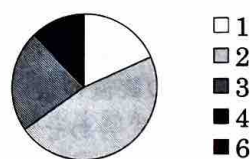
【3】教材として、地層のでき方を理解する学習効果があると思いますか？

1. 非常にある	34.7 %
2. まあまあある	63.3 %
3. あまりない	2.0 %
4. 全くない	0.0 %



【4】実習が終わった後でも、自分で実験装置を使って地層の観察をする事がありましたか？

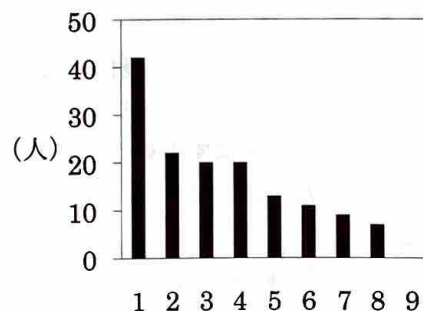
1. よくあった	18.4 %
2. たまにあった	46.9 %
3. あまりなかった	22.4 %
4. 全くなかった	8.2 %
5. 壊れてしまい使えなかった	0.0 %
6. 無回答	4.1 %



【5】自分の理解が深まった、あるいは面白いと思った現象・実験は何ですか？ (選択式、複数回答可)

1. 砂が沈降する様子	42 人
2. 砂山斜面で起こる粒子流	22 人
3. 級化構造のでき方	20 人
4. 地震による砂の液状化と水抜け構造	20 人
5. 粒子流による分級と逆級化	13 人
6. 砂山の形成と安息角	11 人
7. 粒度の概念と、粒度による砂の挙動の違い	9 人
8. フォアセットなど斜交葉理のでき方	7 人
9. その他	0 人

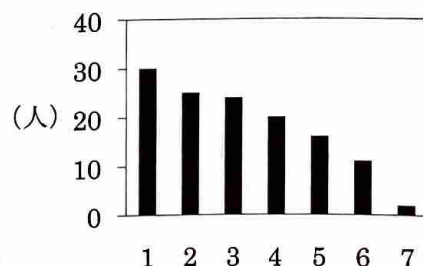
計144 回答



【6】教材として特に優れていると思う点は何ですか？ (選択式、複数回答可)

1. 地層がたまる「動的なプロセス」を観察できる	30 人
2. いつでもどこでも繰り返し実験できる	25 人
3. 作成が容易である	24 人
4. 実際に砂に触れながら自分で作れる	20 人
5. できあがる地層が面白い	16 人
6. 地層について理解が深まる	11 人
7. その他	2 人

計128 回答



生)で、それぞれ約 60 分間かけて携帯堆積空間の作成と観察を行った。学生は地層の観察経験がほとんどない(野外実習はこの後にある)が、ふるい分け法による粒度分析は実習済みである(その砂を用いて携帯堆積空間を作成した)。観察内容は、砂の沈降、級化構造、安息角、粒子流、斜交葉理、液状化などである。実験後は自分の携帯堆積空間を持ち帰らせた。

2) 大学生アンケート結果

後日携帯堆積空間について任意で無記名アンケート調査を行った(表 1)。上記の実験を行った学生 80 名に対して回答者は 49 名であった(回答率約 60%)。

学生の意識に関する質問【1】から、「非常に」「まあまあ」合わせて約 78%が地層に興味がある(逆に言えば約 22%は興味がない)。作成の難易度に関する質問【2】から、「非常に」「まあまあ」合わせて約 73%が簡単に作成できた。学習効果に関する質問【3】から、「非常に」「まあまあ」合わせて約 98%に学習効果があった。地層に興味がない約 22%の学生を含めても大多数が地層について理解度が上がったと思われる。実習後の装置の扱いに関する質問【4】から、「よく」「たまに」合わせて約 65%の学生が持ち帰った後にも観察した。学生に興味を持たせ自主的な観察を促せたことは大きな成果である。理解度・興味が増した現象に関する質問【5】では、約 86%の学生が砂の沈降を挙げ、約 41%以上が粒子流、級化構造、液状化を挙げた。この教材の優位点に関する質問【6】では、6 割以上が動的なプロセスの観察を挙げ、約半数が場所と時間を選ばず実験できること、作成が容易なことを挙げた。以下は自由記述欄に記入された感想である。

〈地層に「非常に興味がある」学生の感想〉

- ・とても便利で使いやすく、地層の興味がさらに湧いた。
- ・なかなか見ることでできない所を手軽に見られる。
- ・楽しみながら理解できる。(同様 2 名)
- ・癒される。
- ・もう少し大きいほうが良い。
- ・他にもいくつか作りたい。

〈地層に「まあまあ興味がある」学生の感想〉

- ・とても楽しく、勉強にもなる。(同様 2 名)
- ・作るのに苦労したが、地層の作り方を自分の目で見て理解することができて良かった。(同様 2 名)
- ・地震が起きた時の地層の動きを見て、地層に対する興味が湧いた。

〈地層に「あまり興味がない」学生の感想〉

- ・これからも使っていけるいい装置だと思う。

〈全体の感想〉

- ・水漏れ改善を求む。(同様 5 名)

以上のアンケートおよび感想から、携帯堆積空間は手軽な実験装置でありながら地層や堆積作用に対する学生の興味を引き出し、理解度を上げる効果が認められた。なお、水漏れを防ぐのが難しいと感じた学生もあり、より時間をかけて丁寧に作る必要があったかもしれない。学習者自身の作成時には水漏れ防止の処置を徹底させる必要がある。

5. 終わりに

堆積作用を学習するための実験教材「携帯堆積空間」と「ミニ水路」の特徴と、これらを用いて実践した普及活動と授業について述べた。地層の野外観察だけでなく、動的な実験により堆積作用を詳細に観察することで、地層の作り方についての理解が深まる。携帯堆積空間は粒度差による砂の挙動の違いと、堆積構造の作り方を詳しく観察するのに優れている。大学生アンケートの結果からも教育効果が確認された。ミニ水路は河川、海、海水準変動などもっと大きな規模の地学現象を再現することに優れ、実験条件を自由に設定させることで生徒の実験への積極的参加と新たな発想を促すことができる。これらの実験教材の作成には特殊な工具や技術を要せず、安価で簡便に作成できることが利点である。

引用文献

- Bhattacharya, J.P. (2003): Deltas and estuaries. In Middleton, G.V. (ed.), *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 195-203.
- Bouma, A.H. (1962): *Sedimentology of Some Flysch Deposits; A Graphic Approach to Facies Interpretation*. Elsevier, Amsterdam, 168 p.
- Gilbert, G.K. (1885): The topographic features of lake shores. *United States Geological Survey, 5th Annual Report*, 69-123.
- Gill, W.B. and Kuenen, P.H. (1958): Sand volcanoes on slumps in the Carboniferous of County Clare, Ireland. *Quaternary Journal of the Geological Society of London*, 113, 441-460.
- Hunter, R.E. (1977): Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24, 361-388.
- 北沢俊幸・村越直美・川野幸朗 (2004a): 「携帯堆積空間」で作る堆積構造。堆積学研究, 60, 1-2.

- 北沢俊幸・村越直美・川野幸朗 (2004b): カードケースを使った堆積構造の観察—携帯堆積空間. 堆積学研究, **60**, 41-46.
- 北沢俊幸・信州大学理学部物質循環学科村越研究室 (2007): 砂の彩—「携帯堆積空間」で地層を作ろう—. 信州自然誌科学館 2007 自然の彩実験解説集, 80-81.
- 松倉公憲・恩田裕一 (1989): 安息角: 定義と測定法にまつわる諸問題. 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 27-35.
- Middleton, G. V. and Southard, J. B. (1984): *Mechanics of Sediment Movement*. SEPM, Tulsa, Okla, 401 p.
- 宮地良典・兼子尚知 (2002): エキジヨッカーによる液状化実験装置. 地質ニュース, **570**, 26-27.
- 宮田雄一郎 (1998): 小さな“水槽”と簡易な堆積実験. 堆積学研究, **47**, 103-105.
- 目代邦康・野田 篤・田村 亨・中澤 努・角井朝昭・中島 礼・井上卓彦・利光誠一 (2006): 水と砂を使った地層・地形の実験. 地質ニュース, **627**, 35-39.
- 西田尚央・伊藤 慎・島野恭史・長谷川裕樹 (2008): 簡易実験水槽を用いた三角州の形成実験. 地学教育, **61**, 157-166.
- 納口恭明 (1999): 自然災害の科学教室—地盤液状化現象の科学手品「エッキー」(1)—. 防災科研ニュース, **129**, 10-11.
- 納口恭明 (2001): 地盤液状化実験ボトル「エッキー」. 防災科学技術研究所研究報告, **61**, 49-53.
- 澤田結基・宮地良典・森尻理恵・吉川秀樹・玉生志郎・青木正博・兼子紗知・古谷美智明 (2009): 地質標本館の小学校見学対応と水路実験. 地質ニュース, **657**, 45-48.
- 信濃毎日新聞社 (2007): 高原調. 信濃毎日新聞, 2007 年 8 月 5 日朝刊, 社会面.

北沢俊幸・川野幸朗・村越直美: プラスチック板で作った簡易教材による堆積作用の実験 地学教育 **64** 巻 2 号, 37-49, 2011

〔キーワード〕 堆積作用, 堆積構造, デルタ (三角州), プラスチック板, 携帯堆積空間, ミニ水路

〔要旨〕 プラスチック板で安価, 簡便に作成できる地層と堆積作用の実験教材二つについて述べる. 一つは透明カードケースに砂と水を封入した「携帯堆積空間」で, 学習者が自作して, 粒度の違いと堆積構造について学習するのに適している. もう一つは「ミニ水路」で, 河川, デルタ, 海水準変動などスケールの大きな地学現象を学習するのに適している. これらの教材を用いて一般向けの普及活動, 高校および大学の授業を実践した. また大学生アンケート調査から携帯堆積空間の教育効果が確認された.

Toshiyuki KITAZAWA, Koro KAWANO and Naomi MURAKOSHI: Experiments of Sedimentation Using Simple Teaching Materials Made of Plastic Boards. *Journal of Education of Earth Science*, **64** (2), 37-49, 2011