

自作濁度計を用いた土砂の沈降実験の教材化

(理科教育講座) 池田 秀彦
(理科教育講座) 渡邊 重義
(理科教育講座) 高橋 治郎

Development of experiments on soil sedimentation using a hand-made turbidity mater

Hidehiko IKEDA, Shigeyoshi WATANABE *and* Jiro TAKAHASHI

(平成20年6月11日受理)

Summary

The soil sedimentation process examined using a hand-made turbidity mater. This simple device consists of a full-color light emitting diode and a phototransistor. The value of output voltage represents the turbidity of soil suspension in sedimentation. Through the sedimentation experiments we demonstrated the mad content in soil, the variety of soil, and the effect of salt for sedimentation rate. In this study we could develop a convenience device to inquire the function of running water and the components of soil in surroundings.

キーワード

堆積 (sedimentation), 粒度 (grain size), 沈降 (sedimentation), 自作濁度計 (hand-made turbidity mater), フォトトランジスタ (phototransistor), 地域学習 (inquiry on nature of region)

I. はじめに

小・中学校の理科学習において、地球の構造に関する「流水のはたらき」「土地のつくりと変化」は地学分野の中心的内容の一つであり、系統的なカリキュラム配列がなされている。「流水のはたらき」では、河川の侵食・運搬・堆積作用が扱われ、その堆積に関する学習は地層のでき方の学習に発展する。つまり、堆積の学習は、地学領域の系統的な学習を結び付ける接点に位置づけられる。

堆積作用は、小学校では河川の観察、雨の日の校庭の観察、土でつくった山を用いた川のモデル実験、流水による堆積のモデル実験を通して学習するが、中学校でも簡単な堆積のモデル実験が行われることがある。堆積のモデル実験は小・中学校の理科学習における定番の実験であり、生徒は堆積した土砂の粒子が大きい方が下方にあり、上方に向かって徐々に粒子が小さくなっていることを観察して、水による分粒作用を学ぶ。この実験では、使用する土砂の種類にもよるが、実験直後は細かな粘土が浮遊した状態で水が濁っていることが多く、透明になるまでに1日以上かかることがある。これは、流水だと細かい土砂が遠くに運ばれることを推論するための大切な情報になる。しかし、そのような細かな粘土やシルトが沈降するプロセスを連続的に観察するには長時間を必要とする。また、水による土砂の分粒実験は、沈降分析として土の粒度試験に用いられるものであり、児童・生徒実験としても方法を工夫すれば、身の回りの土を調べるための分析実験として実施することができるであろう。

そこで、本研究では、水による土砂の運搬および堆積のプロセスをより探究的に調べるための実験を開発することを目的にして、水の濁りの程度を調べる濁度計を自作し、それを用いて地域の河川流域の土砂や地質の異なる堆積土砂を材料にした沈降実験を行った。

II. フォトトランジスタを用いた濁度計の作製

1. 濁度計の作製

容器に土砂と水を入れて懸濁させたあとで静置すると、粒径の大きなものほど沈降速度が速く、先に沈殿する。シルトや粘土などは直ちに沈殿することはない、水を濁らせる。濁った水は、それら細かな粒子が少しずつ沈殿するにつれて透明になる。このような土砂が沈降するプロセスは、一定時間ごとに写真を撮影したり、ビデオカメラで録画したりすることで観察可能になるが、濁度計を用いれば、①濁りの程度の数値化、②データロガーと組み合わせた使用による経時変化の記録、さらに③データのグラフ化による沈降過程の分析などが行える。

水の濁度は、水中に浮かぶ微粒子の量によって決まる。微粒子の量が多いと濁度が大きくなり、光の透過量は減少する。光の透過量を測定するには、一定の強さの光をサンプルに照射し、散乱や反射によって減少する光の強さを測定すればよい。濁度計は小・中学校の理科実験室に常備されている装置ではないが、理科学習での使用を

目的として、赤色発光ダイオード等を光源にして光センサーに CdS 光伝導セル (紺野 1995), 光電池 (田中・山下 2004, 田中ら 2005), フォトトランジスタ (松森 1990) を利用した簡易比色計や濁度計の作製が行われている。そこで、本研究では、それらの自作の装置を参考にして、光源に光の種類を変えられるフルカラー 3 色発光ダイオード (GB-339RPGBC, ピーク発光波長470, 525, 636nm) を用い、光センサーには集光率の高いフォトトランジスタ (東芝社 TPS603A, ピーク感度波長800 nm) を用いて簡易濁度計を作製することにした。3 色発光ダイオードのピーク発光波長域とフォトトランジスタの分光感度特性を図1に示す。

濁度計の作製においては、①費用が安価で比較的簡単に製作できる、②電源電圧が安定している (LED の純電圧に近い値)、③受光装置からの出力電圧がテスターで測定できる、④蒸留水での補正を行なえるように内部抵抗を可変できるという条件を満たすように回路の構成を考えた (図2)。自作濁度計では、一般的なサイズの

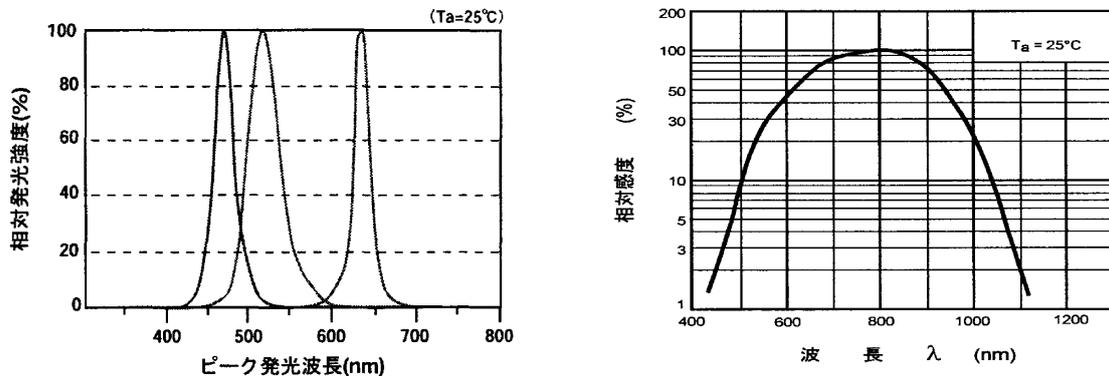


図1 フルカラー3色発光ダイオードの発光波長域 (左) とフォトトランジスタの分光感度特性 (右)

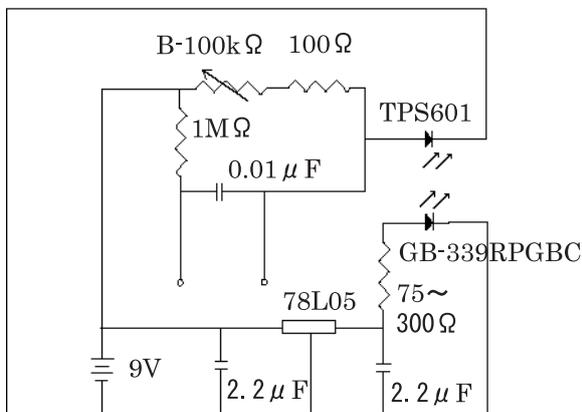


図2 発光部と受光部の回路図

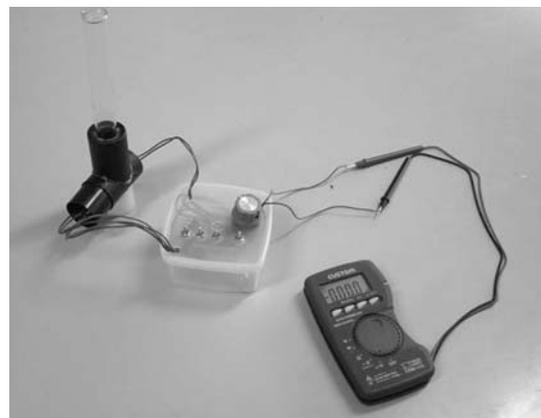


図3 自作濁度計

試験管（口径18mm，長さ180mm）をサンプルに用いて測定できるようにした。そこで，試験管をそのまま挿入できる側光部を黒色のフィルムケースを加工して作製した（図3）。発光部と受光部を結ぶ光軸は試験管の底から約1.5cmの高さになるようにした。回路の基盤は食品用のプラスチック容器の蓋の部分に固定して，電源となる9V電池が収納できるようにした。なお，長時間の測定を行なう場合は，電池の電圧が低下することが予想されるので，電源装置に接続して使用した。この自作濁度計の作製に要した材料費は約1,000円であり，比較的安価なものになった。

2. 自作濁度計の性能の検証

自作濁度計の性能を検証するために，炭酸カルシウムを用いて出力電圧による濁度の測定を試みた。炭酸カルシウムは水に難溶（溶解度1.4mg/100g，25℃）のため，水に入れると白濁する。そこで，水（1dm³）に炭酸カルシウム（1.0g，2.0g，3.0g，4.0g，5.0g，6.0g，7.0g，8.0g，9.0g，10.0g）を加えて分散濃度の異なる標準液を調製した。ここではこの分散濃度を濁度の値とする。標準液は試験管に入れてよく攪拌してから測光部に挿入した。濁度の測定は，光源に3色発光ダイオ

ードの赤色を用いて，フォトトランジスタからの出力電圧の測定には電圧センサーを取り付けたデータロガーのエコラボ（中村理科社）を用いて行った。

測定結果を図4に示す。時間経過に伴って出力電圧が上昇しているが，これは炭酸カルシウムの粒子が沈降して光軸上の濁度が低くなっているためである。最も濃度が低い1.0gdm⁻³では実験開始後から約10分で出力電圧が一定になり，炭酸カルシウムがほとんど沈殿してしまったことがわかる。それ以上の濃度では，濃度が高くなるにつれてグラフの傾きが小さくなっており，出力電圧の違いは標準液の濁度に関連していると考えられる。

次に炭酸カルシウムの標準液（濃度調整は0-3.0gdm⁻³では0.2gごとに，それ以上の濃度では1.0gごとに行った）を用いて，試験管を挿入してから2分以内に出力電圧の測定を行った。この操作を各濃度について5回ずつ行い，その平均値から濁度と出力電圧の検量線を作成した（図5）。出力電圧は，炭酸カルシウムの分散濃度が大きくなるにつれて減少したが，0-0.8gdm⁻³，0.8-2.2gdm⁻³，2.2-10.0gdm⁻³の各区間において高い相関係数が得られた。したがって，自作濁度計によって測定できた出力電圧は，土壌の沈降を定量的に示すことができることがわかった。

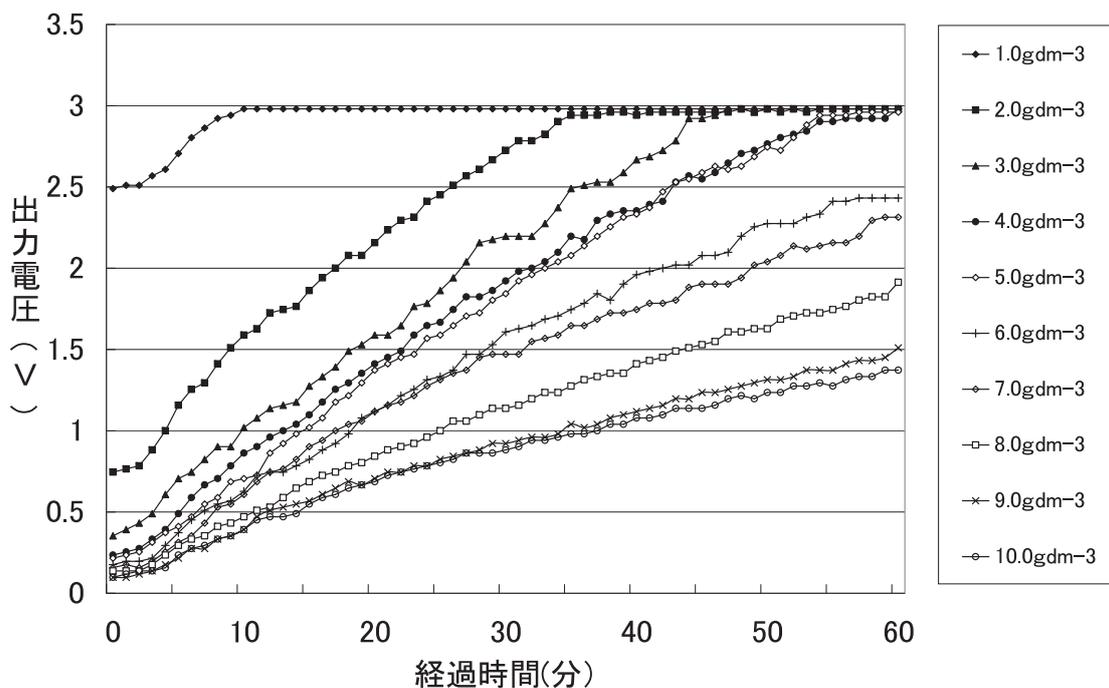


図4 炭酸カルシウム標準液を用いたときの自作濁度計の出力電圧

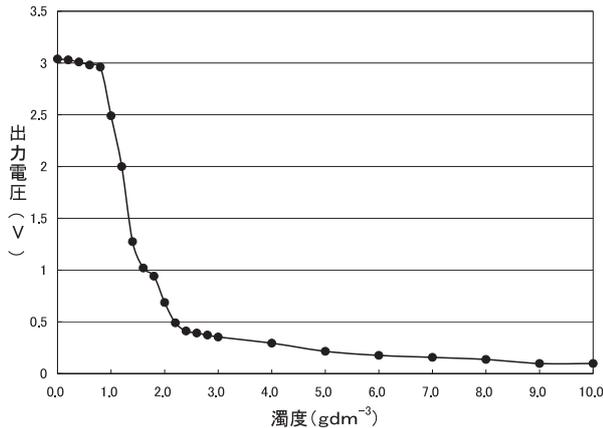
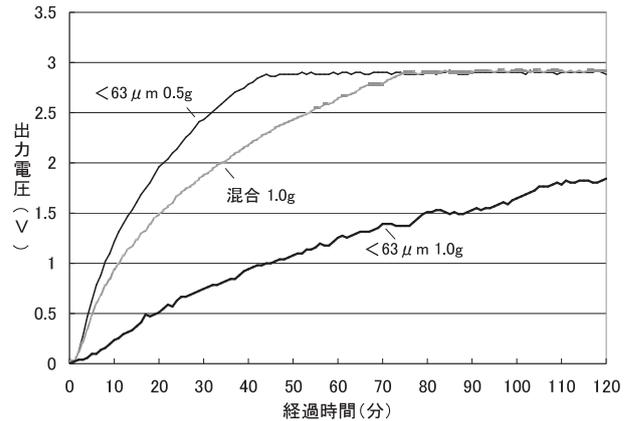


図5 炭酸カルシウム標準液を用いたときの自作濁度計の検量線

図6 泥 (<63 μm) および泥と砂礫の混合物の濁度変化

Ⅲ. 河川流域の土砂を用いた沈降実験

1. 土砂の粒径と沈降速度 (実験1)

(1) 目的

野外で採集した土砂を材料にして沈降実験を行うときに必要な基礎的なデータを得るために、異なる粒径の土砂で沈降実験を行い、自作濁度計の出力電圧の変化を調べる。

(2) 方法

粒径の異なる土砂を得るために、松山平野を流れる1級河川の重信川の河口を採集場所に選択した。重信川の河口から約1km上流の川口大橋付近の中州を採集地点として、地表から約10cm下の土砂を採集した。採集した土砂は、250 μm 、125 μm 、63 μm のメッシュのふるいにかけて、粗粒砂・礫 (>250 μm)、中粒砂 (250–125 μm)、細粒砂 (125–63 μm)、泥 (<63 μm) に分けた。

自作濁度計の光源には3色発光ダイオードの赤色光を用いて、入力する電圧を電源装置で9Vに設定した。測定を始める前に、水だけを入れた試験管を設置したときの出力電圧が3.0Vになるように調整した。そして、各粒径のサンプル1.0gを水10cm³が入った試験管に入れ、十分に振って攪拌してから自作濁度計に設置して出力電圧を測定した。

(3) 結果と考察

粒径が63 μm よりも大きい粗粒砂・礫、中粒砂、細粒砂は、測定後10秒以内に出力電圧がほぼ3.0Vになった。したがって、試験管の水面近くにあった粒子でも約10cmを沈降して、試験管中のほとんどの粒子が沈殿してしま

ったことがわかる。粒径が63 μm より小さな泥の場合は、測定開始から1分後でも出力電圧はほぼ0Vであり、その後、少しずつ上昇していった(図6)。これらの結果は、土砂を用いた沈降実験では、粒径が63 μm より小さな泥(極細粒砂・シルト・粘土)の含有量が濁度の変化に影響することを示している。そこで、水に入れる泥(<63 μm)の量を半分(0.5g)に減らした場合と、0.5gの泥と0.5gの粒径が63 μm より大きな土砂(採集した土砂から<63 μm の泥を除いたもの)を混合した場合で同様の実験を行った(図6)。その結果、泥の量が0.5gに比べて1.0gの方が出力電圧の上昇速度が遅く、ほぼ3.0Vになる時間は2倍以上かかった。また、泥の量が同じ0.5gでも同量の砂礫0.5gを混合したものが出力電圧の上昇がやや遅くなった。このことより、異なる大きさの粒子が混在する場合は、泥の粒子と砂礫の粒子の相互作用により、63 μm より大きな粒子も濁度変化に影響するのではないかと考えられる。泥の量が0.5gのときのグラフをみると、40分後には出力電圧が3.0V近くになったが、測定時間内に出力電圧が完全に3.0Vに達することはなかった。これは、図5が示すように本実験で用いた自作濁度計では、分散濃度が低いときの濃度の変化に対する出力電圧の変化が小さいこと、土砂中の粘土分の一部が電荷を帯びたコロイド粒子になって浮遊していることが原因になっていると考えられる。

2. 泥の分散濃度と濁度変化（実験 2）

（1）目的

沈降実験において、泥の分散濃度の違いが濁度変化に及ぼす影響を調べる。

（2）方法

実験 1 で調整した泥の量を 0.2 g, 0.4 g, 0.6 g, 0.8 g, 1.0 g と変化させ、10cm³の水が入った試験管に入れて、分散濃度の異なるサンプルを準備した。それぞれをよく攪拌したあと、実験 1 と同じ方法で濁度の経時変化を調べた。比較のために、重信川の河口の土砂 1.0 g を用いて同様の実験を行った。

（3）結果と考察

泥の分散濃度と自作濁度計の出力電圧の関係を図 7 に示す。泥の分散濃度が大きくなるにつれて、出力電圧が約 3.0V になるのに要する時間が長くなり、出力電圧の変化を表すグラフの傾きが緩やかになった。重信川河口の土砂 1.0 g で実験を行ったときは、図 7 f のような結果になった。実験 1 と 2 の結果から、重信川河口から採集した土砂には、粒径が 63 μ m より小さな泥が約 80% 含まれていることが推察できる。

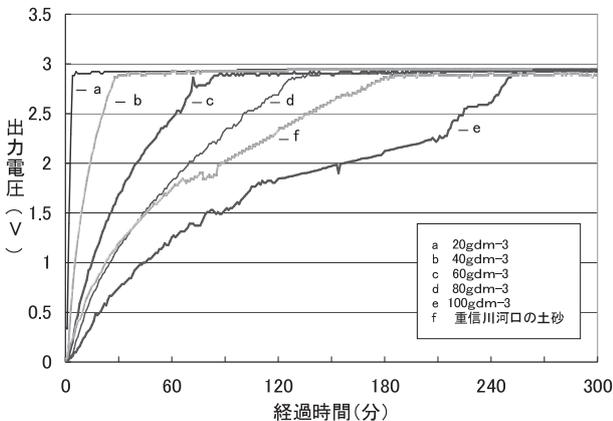


図 7 泥 (<63 μ m) の分散濃度と濁度変化

3. 重信川流域の土砂を用いた沈降実験（実験 3）

（1）目的

重信川の河川流域の土砂を用いて沈降実験を行った結果が、川の水による侵食・運搬・堆積作用を考察するためのデータとして利用できるかを調べる。

（2）方法

重信川およびその支流を調査対象にして、川の水の影

響を受けている場所の土砂を採集した（採集日：2004年10月10日）。採集場所は、重信川の①河口域、②川口大橋、③出合大橋、④中原河橋、⑤森松大橋、⑥久谷大橋、⑦上村大橋、⑧上重信川橋、⑨横河原大橋、⑩大畑地区、⑪木地地区の11地点と、重信川支流の砥部川の⑫麻生地区、石手川の⑬市坪橋、表川の⑭表川橋の3地点とした（図 8）。土砂は、川の中央部にあるレンズ状の中州を採集地点にして、地表の約 10cm 下から採集した。沈降実験は実験 1 と同じ方法で行った。

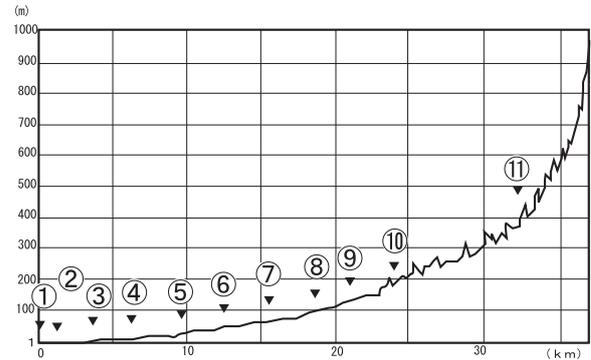
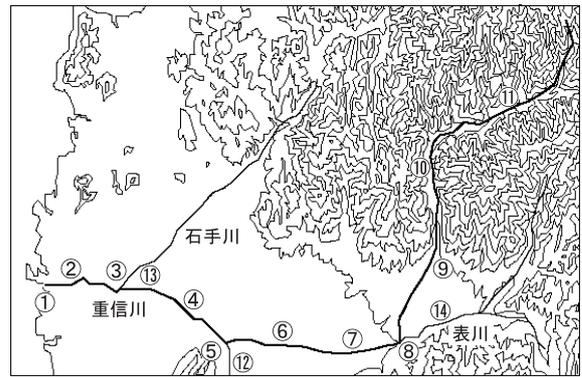


図 8 重信川流域における土砂の採集地点

（3）結果と考察

土砂を採集した場所は、重信川の水のはたらきによって土砂が堆積した場所であるが、水の流れの速い上流や中流では常に侵食・運搬作用も働いている。また、河床を広げるような人為的な土木工事の影響を受けている可能性もある。本実験の調査場所のうち重信川では下流から④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪の 8 地点、支流では⑫⑬の 2 地点において採集した土砂は、沈降実験の開始から約 30 秒後には出力電圧が約 3.0V になった。つまり、粒径が 63 μ m より小さい泥をほとんど含んでいなかったことがわかる。①②③⑧の採集地点の土砂では、実験開始から 10 分間に

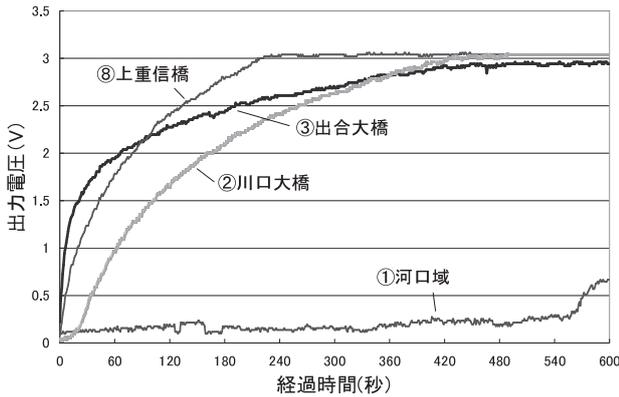


図9 重信川流域の土砂の沈降実験における濁度変化1

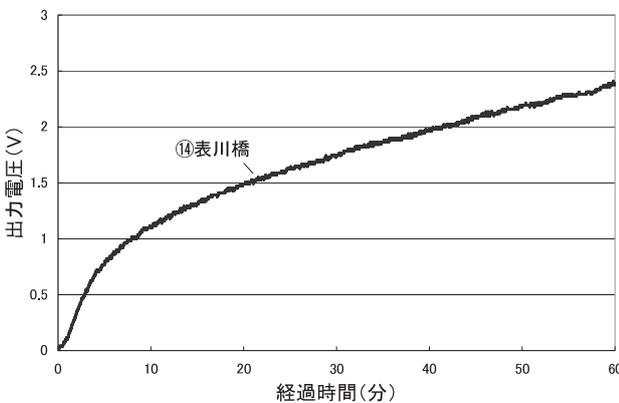


図10 重信川流域の土砂の沈降実験における濁度変化2

図9のような出力電圧の変化を示した。下流の3地点において土砂に泥が含まれていることは川の堆積作用を示す結果とみなされるが、⑧の上重信橋付近でも②③と同じようなグラフが得られた。つまり、重信川が山間部から松山平野に下ってきた中流域において、下流と同じ程度の泥が含まれていたことがわかる。上重信橋は重信川と表川の合流地点のため、表川の⑭の地点の土砂について調べたところ、図10のような濁度変化となり、重信川下流の②③の地点よりもよりの大量の泥を含んでいることがわかった。このことから、⑧の地点の泥は重信川本流ではなく、表川から運搬されてきたものと推察される。

IV. 堆積土砂を用いた沈降実験

1. 堆積土砂中の泥を用いた沈降実験（実験4）

(1) 目的

川の水による侵食・運搬作用を受けていない堆積土砂を材料に用いたときの沈降実験の濁度変化を調べる。

(2) 方法

松山市周辺で見られる代表的な地質の中から、安山岩質堆積土（東温市白猪滝）、花崗岩質堆積土（松山城城山）、和泉層群泥層（松山城城山）の土砂を沈降実験に使用した。土砂は、植物が生育していない岩石路頭付近を採集場所にして、地表の約10cm下から採集した。採集した土砂は63 μ mのメッシュのふるいにかけて、泥（<63 μ m）のサンプルを実験に用いた。沈降実験は実験1と同じ方法で行い、実験1で使用した重信川の河川流域の堆積土砂と比較した。

(3) 結果と考察

種類の異なる堆積土砂中の泥（<63 μ m）を用いて沈降実験を行った結果、図11のような濁度変化がみられた。流水による侵食・運搬・堆積作用を受けている土砂に比べると、岩石が風化した土砂に含まれる泥は、自作濁度計の出力電圧がほぼ3.0Vになるまでに要する時間が2倍以上かかった。また、和泉層群泥岩土の泥を用いたときは、不安定な濁度変化を示した。一方、火山岩由来の安山岩質堆積土の泥を用いたときの濁度変化は安定していた。以上のことより、粒径が63 μ mより小さな泥でも、採集場所の地質の違いによって濁度変化に違いが生じることがわかる。このような濁度変化の差異は、極細粒砂・シルト・粘土の割合や粘土鉱物の違いなどが原因ではないかと考えられる。

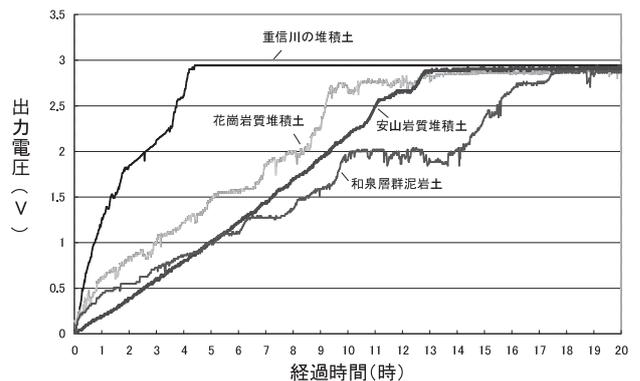


図11 堆積土砂中の泥（<63 μ m）の沈降実験における濁度変化

2. 水の塩分濃度と沈降速度（実験5）

(1) 目的

汽水域および海水域の塩分濃度が泥の堆積作用に与える影響について調べる。

(2) 方法

実験4で使用した安山岩質堆積土、花崗岩質堆積土、和泉層群泥岩土から得た泥 (<63 μ m) を材料にして、塩分濃度が異なる食塩水を用いて沈降実験を行った。基本的な方法は実験1と同じであるが、NaClを用いて食塩水の濃度を重量パーセントで0.0%、0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%に変えた。

(3) 結果と考察

粒径の小さな粘土等の粒子は、水中で負の電荷を帯びたコロイドとして浮遊しているが、電解質を加えると凝集して沈殿する(凝析作用)。したがって、食塩水の濃度が高くなると、この凝析作用が大きくなり、濁度の変化も大きくなると考えられる。本実験では、3種類のすべての土質において塩分濃度が高くなると、自作濁度計の出力電圧の上昇が大きくなるという結果を得た。図12は和泉層群泥岩土の泥を用いたときの濁度の変化を示している。他の2種類の堆積土でも同様の結果を得たが、安山岩堆積土の場合は、0.5-5.0%の間の違いが小さく、花崗岩堆積土の場合は、0.5%と1.0-5.0%の違いが大きかった。実際の下流域での堆積作用には潮の干満など複雑な要因が関係していると考えられる。しかし、このような泥の沈降実験を通して、河口域の干潟に泥が多く堆積されている原因は、流れが緩やかになることだけでなく、河川水に含まれる塩分濃度の変化が関係していることを考察できる。

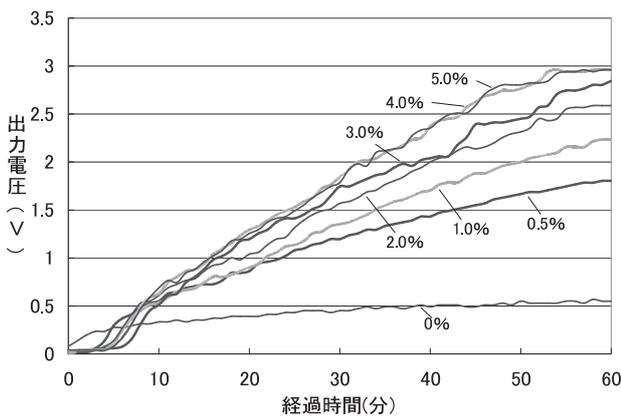


図12 食塩水を用いた泥 (<63 μ m:和泉層群泥岩層) の沈降実験における濁度変化

VI. おわりに

本研究で作製した濁度計を用いた土砂の沈降実験は、川の流水のはたらきや、身の回りの土を調べる方法として利用できることがわかった。土砂は混合物であり、採集場所によって組成が異なるため、濁度計の結果を安易に土質等の違いに結び付けるのは危険である。また、自作濁度計では出力電圧は濁度の目安になるが、精密な定量化は困難である。しかし、自作濁度計は安価であり、泥水中の泥が沈降する経過が示せることや、土砂に含まれる泥の含有量、土質の違い、泥の沈降に及ぼす塩分濃度の影響などを調べられることがわかった。本実験では実施しなかったが、食塩の代わりにミョウバンを使用すれば、昔から行われてきた水の浄化方法について調べることができる。

自作濁度計は、地域の自然環境を調べるためのツールとして、材料や方法を工夫することで様々な利用できる可能性がある。また、定番であった堆積実験を発展させ、学習者の目をモデル実験から自然の川のはたらきへと向けることが期待される。機械工作が得意な生徒であれば、濁度計の作製から学習を始めることもできる。本研究は、地域環境を調べるための新たな方法の提案であり、今後の課題として濁度計の精度の向上と地域学習として活用法の検討があげられる。

謝 辞

濁度計の作製については、菅家惇名誉教授(愛媛大学)から助言をいただいた。土砂の採集や分析では、佐野栄教授(愛媛大学)の支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

付 記

本論文は、筆頭著者の池田秀彦が平成17年度修士論文研究として行ったものであり、渡邊重義が加筆・修正を加えた。

文 献

紺野 昇 (1995) パソコンを用いた自作比色計による環境調査, 化学と教育, 43(8), 527-538.
 田中謙介・山下伸典 (2004) 自作装置による環境水の濃度測定—環境学習を支援する教材開発—, 理科教育学

研究, 45(1), 63-69.

田中孝志・小池 守・石川綾子・高津戸秀 (2005) 生徒
が授業時間内に製作できる太陽電池を用いた簡易比色
計, 理科の教育, 54(10), 58-89.

松森弘治 (1990) LED を光源に使った光電比色計, 全
国理科教育センター研究協議会編, 身近な素材を生か
した化学教材の研究, 東洋館出版社, 226-227.