

自動粒度分析機

—堆積物解析用として—

新 妻 信 明*

I. はじめに

碎屑性堆積物 (clastic sediments) を構成する粒子の粒度組成を解析するためには従来いろいろな方法があった。堆積物の粒度組成は、構成粒子が供給、運搬され、そして堆積するまでの流体力学的状態（いわゆる堆積環境）に支配される。したがって、堆積物の粒度組成を詳細に解析すれば、その堆積物が堆積した時の堆積環境を判断することができるはずである。しかし、従来の粒度分析法や解析法には、原理的にも、方法論的にも、技術的にも多くの問題があり、堆積環境の推定についての十分な成果をあげてきたとはいえない。この論文では、従来の粒度分析法と解析法を検討して、より望ましい分析法について考察し、それに基づいて新しく作製した自動粒度分析機について述べる。

この研究に当たり、東北大学畑井小虎教授は諸般にわたり便宜を計って下さり、岩井淳一教授は堆積学上の御助言を下された。金谷太郎助教授は研究内容・方法について討論して下さい、中川久夫博士および木村勝弘氏は論文作成にあたり助言して下さい。目加田義正氏には測定実験に協力していただいた。国際キリスト教大学の服部陸男博士（当時東北大学）は常に堆積学上の研究方法・内容および粒度分析について助言・討論して下さい。オランダ Rijks 大学の L.M.J.U. van Straaten 教授は、堆積学上の種々の問題や粒度分析方法について討論して下さい。また、仙台天文台小坂由須人博士をはじめ同台職員の方がたには、自動粒度分析機の製作にあたり便宜を計っていただいた。以上の方がたにお礼を申し上げる。

II. 従来の粒度分析法についての問題点

従来一般に行なわれてきた粒度分析法は 2 つの種類に大別できる。

1) 構成粒子の幾何学的な粒径を規準として測定・分析を行なう方法。たとえば、篩い分け法や顕微鏡法などがある。

2) 構成粒子の終端沈降速度 (terminal settling velocity) を規準として測定・分析を行なう方法。たとえば、ピペット法、ビーカー法、比重計法、沈降天秤やエメリー管法などがある。

この 1) と 2) は測定法の原理からみると性格が全く異なり、1) では構成粒子の形態や比重などが完全に無視されることになるが、2) ではそれらの諸性質が沈降速度の差として反映される。構成粒子が堆積環境のなかで、供給、運搬そして堆積するまでに受ける流体力学的作用がどのような性質のものであるかははっきりしないが、詳細な堆積環境の推定を行なうためには、そのような流体力学的運動の 1 つである構成粒子の沈降速度による分析法の方が、構成粒子の幾何学的粒径だけによる分析法よりも有効であると考えられる。

* 東北大学教養部地学科

しかし、現在、最も一般的に行なわれている粒度分析法は、 4ϕ よりも粗粒なものについては、1)の篩い分け法を用い、 4ϕ よりも細粒なものについては2)のピペット法を用いている。このように全く性格の異なる方法を併用する理由は、分析に要する時間の問題と技術的制約があるためである。すなわち、篩い分け法で細粒子部をとり扱うには、粒子間の凝集や水の表面張力および粘性のために篩が目づまりを起こしてしまい、実用的でない。顕微鏡法では細粒子についても測定可能であるが、分析に時間がかかりすぎ、極細粒子については電子顕微鏡の使用などの高度な技術が必要になるからである。また、 4ϕ よりも粗粒な構成粒子についての沈降法による分析は、沈降速度が大きいので、長い沈降管と正確な時間の測定を必要とする。そのため、このような分析法はあまり一般的でなかった。このように全く異なる原理にもとづいた方法の併用は、粒度組成の流体力学的意義づけや、分析結果から堆積環境を推定するためにも好ましいものではない。

堆積学的研究においてエメリー管 (Emery, 1938; Poole *et al.*, 1951; Poole, 1957) やウッズホール式粒度分析機 (Schlee, 1966) などの沈降法による 4ϕ よりも粗粒な粒子の分析法は、篩い分け法による分析時間の短縮を目的として考案されてきた。これらの分析法は従来の篩い分け法の代用であって、沈降法の規準であるべき沈降速度は、篩い分け法による粒径に関する積算曲線と見かけ上一致するように対応させて、各粒径ごとに決定されてきた (Emery, 1938; Poole *et al.*, 1951; Schlee, 1966)。このようにすれば、一応全粒径に関して同じ種類の分析法、すなわち沈降法で粒度分析を行なうことができるが、原理的に異なる篩い分け法によって得られた積算曲線と沈降法によって得られた積算曲線を比較して沈降速度を決定し、その沈降速度にもとづいて堆積物を分析するのでは、沈降法独自の流体力学的基礎にたっているという利点が失われてしまう。また、エメリー管による粒度分析では試料投入と一定時間ごとの沈積量の読みとりを短時間のうちに行なわなければならないが、これは技術的に決して容易なことではない。しかも、沈積量の読みとり段階で各種の測定誤差を生ずる可能性がある。ウッズホール式粒度分析機はそれらの作業を自動化することによって欠点を補っている。

このような 4ϕ よりも粗粒な構成粒子の沈降法による粒度分析は、いずれも、その結果が沈降速度に関する積算曲線の形で表わされてしまうという弱点と、篩い分け法のように分析後、試料を各粒径ごとに区分して回収することができないため各粒径ごとの粒子の組成を検討できない弱点を持つ。

III. 従来の粒度組成解析法の問題点

従来の一般的な粒度組成の解析法は、粒径に関する積算曲線を統計的に処理して、粒度組成の特性をあらわす係数 (Md, M_z , So, Sk, Kg など) を求める方法である (Inman, 1952; Folk and Ward, 1957 など)。この解析法は、粒度組成は本来粒径の対数に関して正規分布をとるはずであるという前提に立ち、粒径に関する積算曲線を4点あるいは6点で代表させ、その正規分布からのずれを上述の諸係数で表現している。しかしながら、実際の堆積物の粒度分布は、しばしば、いわゆる bimodal type あるいは polymodal type やさらに不規則な型を示し (たとえば Hattori, 1968 の Table 3), 粒径の対数に関して正規分布していないことが多い。上述の解析法には多くの問題があるが、とくに堆積物の粒度分布が粒径の対数に関して正規分布すべきものであるという前提から発想されている点に最も大きな問題があるであろう。

このように正規分布していない粒度組成をもった堆積物を上述の方法で解析することは、無意味であると考えられるばかりでなく、粒度組成が持つ堆積学的な諸性質を見失わせる結果になる。したがって、木村 (1967) が指摘したように、粒度組成の表示法は、なまのまの粒径に関する頻度分布曲線をもってし、それらを比較して粒度組成の特徴をつかみ、その特徴に従って各試料の粒度

組成を区分するのが最も妥当な方法と考えられる。この方法は、無用な積算や計算をはぶくとともに、粒度組成の細部を明らかにし、それら相互の比較をしやすくすることができる。また、この方法は粒度組成のもつ流体力学的な意味を読みとることも可能にすると考えられる。

以上の考察をまとめてみると、最もよい粒度分析法は粒径に関する頻度分布曲線を直接的にしかも連続的に与える方法であると結論できる。

IV. 自動粒度分析機

a) 自動粒度分析機作製の目的

前述のごとく従来の粒度分析法には問題点が多く、粒度組成による堆積環境の解析や粒度組成の流体力学的な意味づけを行なうには、根本的な分析法自体の問題のために結論をあいまいにしてしまっていた。そのような問題を解決するためには、次のような条件を充分満足する粒度分析法を新たに開発する必要がある。

1) 沈降法を採用し、全粒径にわたって一貫した方法で分析するために、粗粒な構成粒子の分析も沈降法で行なう。

2) 分析に要する時間を短縮し、試料を処理する能力をあげる。

3) 分析の操作を簡便にし、しかも分析者の個人差や測定誤差がはいらぬようにできるだけ自動化する。

4) 分析の結果は直接的にしかも連続的な粒径に関する頻度分布曲線と与えられる。

5) 分析した試料を各粒径ごとに分取することができ、粒径ごとの粒子の組成を検討できる。

これらの条件を満足する自動粒度分析機を製作したので以下に述べる。

b) 自動粒度分析機の原理および構造

この分析機は、大きく分別装置、粗粒部分分析機と細粒部分分析機に分けられ、分析作業のすべてを機械化し、測定結果は全粒径に対して光透過沈降法を用い、光量変化を自記させて得るので、沈降時間に関する頻度分布曲線を連続的に得ることが可能である (Fig. 1).

分別装置は、分析時間を短縮するため試料を細粒部と粗粒部に沈降法で分別する装置であり、37 cm の沈降管からなっている (Fig. 2).

粗粒部分分析機は 160 cm の沈降管・計量部と分取部からなる。計量部は沈降管内を通過する粒子が遮光する光量の変化を光電導セルで電気的变化に変え、自記電圧計でその電気的变化を自記させて、連続的に時間に関する頻度分布曲線を得る方式を採用した。分取部は沈降時間の差を利用して、各粒径ごとに自動的に区分して回収する部分であり、堆積物の構成粒子を各粒径ごとに分取できるので、構成粒子の種類を各粒径ごとに検討することが可能である。

細粒部分分析機は遠心分離器をつかう光透過遠心沈降法を採用して、分析に要する時間を著しく短縮し、測定結果は粗粒部分分析機と同様光電導セルを使って、沈降時間に関する頻度分布曲線を連続的に自記電圧計で自記させる方法を採用した。

以下に分析機の細部の構造と操作法を述べる。

c) 分別装置

分別装置は分析時間を短縮するため、試料を細粒部と粗粒部に分別する装置である (Fig. 2).

この装置は内径 35 mm、長さ 37 cm のプラスチック製沈降管の上端に Poole (1957) の試料投入装置を付し (Fig. 2-a)、沈降管の上から 35 cm のところに内径 6 mm のガラス管 (細粒部分別管; Fig. 2-b) を、さらに沈降管の最下部に内径 10 mm のガラス管 (粗粒部分別管; Fig. 2-c) を接合したもので、接着にはエポキシ樹脂を用いた。試料投入装置 (Fig. 2-a) は径 65 mm のプラスチック

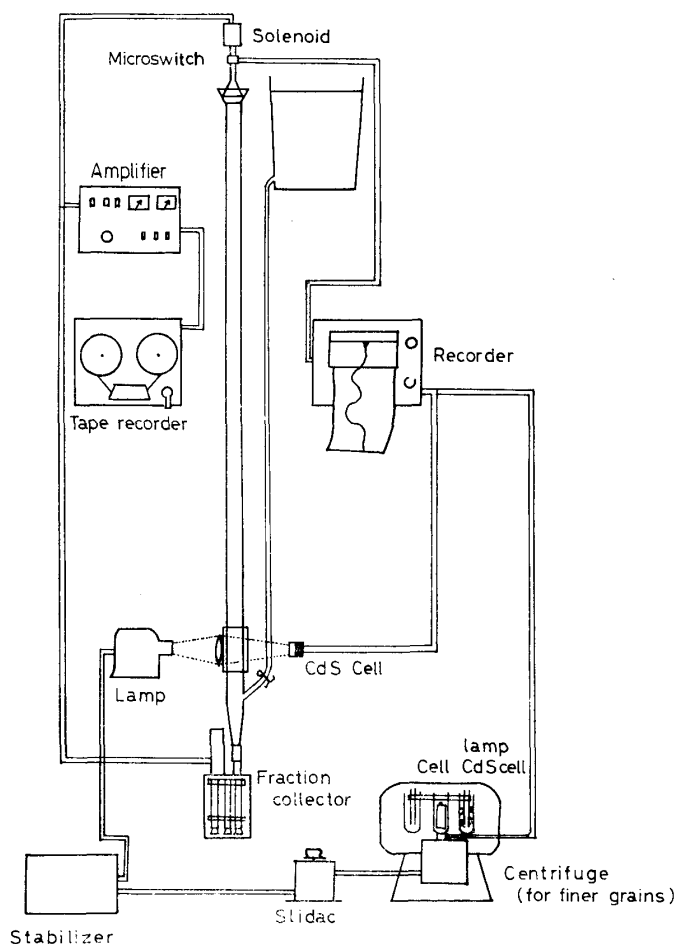


Fig. 1. The automatic grain-size analyser.

製漏斗を上下に切断し、その片方を沈降管に接着し、もう片方は試料中の微細粒子の漏出を防ぐためにゴムを接着して試料を保持する部分とした。

この装置の操作は、まず細粒部分別管と粗粒部分別管の先端にゴム管をつけ、ゴム管をそれぞれピンチコックで止めて、分別装置に水を満たす。次に試料を投入部に入れ、試料の全量が同時にしかも一様に落下するように、試料保持部を持ち上げて試料を投入する。粒径と沈降速度の関係はあらかじめ求めておき、分別しようとする粒径の粒子が35cm沈降するのに要する時間が経過したときに、細粒部分別管のピンチコックを開き、その粒径よりも細粒な部分を分別し、粗粒な部分は粗粒部分別管から取り出す。実際にこの分別を行なうと沈降距離が短いため、細粒部粒子が粗粒部に混入するが、これはあとで粗粒部分析機で再び分別するから問題にならない。

d) 粗粒部分析機

粗粒部分析機は構成粒子を沈降させるための沈降管部と、構成粒子が沈降してある点を通る時の粒子の量を計量する計量部と、沈降してきた試料を各粒

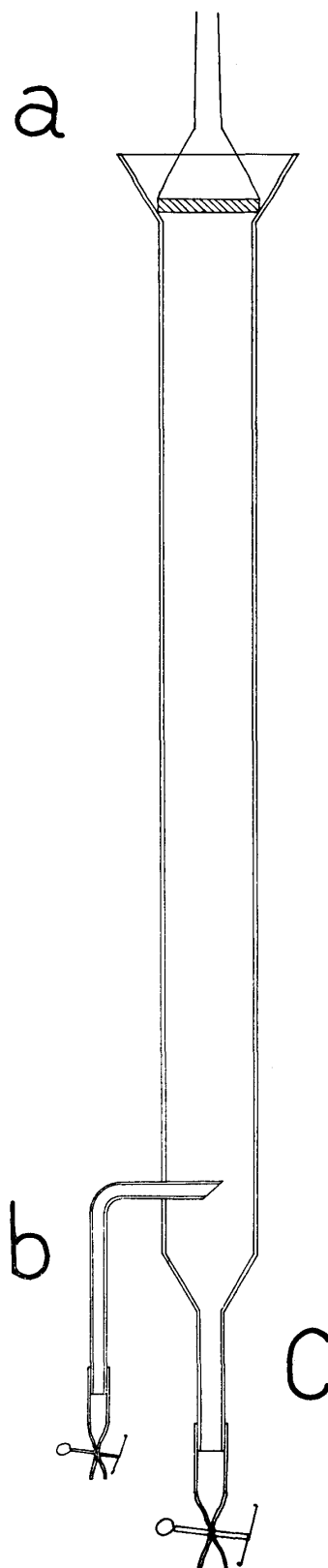


Fig. 2. The device used to separate the finer from the coarser grains.

径ごとに区分して回収する分取部の3つの部分からなる (Fig. 1).

沈降管部は内径 19 mm 長さ 160 cm のガラス製沈降管を主体とし、前述の分別装置と同様に、その上部に Poole (1957) の試料投入装置をつけ、これにさらに電磁石を取りつけて、試料を自動的に投入できるようにしたものである。沈降管に水を満たすには、水温を安定させるために高いところに貯水槽を置き、内径 8 mm のビニール管でそれと沈降管下部の枝管をつなぎ、水を導く。このように沈降管の下部から水を送れば、沈降管の中の水に気泡がはいるのを防ぐことができる。

計量部は、光源部と受光部からなる。光源部は鉄共振型定電圧装置で安定した電源とファンのついたプロジェクターを使用して、充分安定した光を送ることができる。受光部は硫化カドミウム光電導セル (CdS セル) を使用した。CdS セルの受光面の直径は 25 mm で、この受光面に光を集めるために、沈降管の光源部側に直径 85 mm のレンズをとりつけ、さらに、光が沈降管を通過するときに散乱するのを防ぐために沈降管を包む角型の水槽をとりつけた。また受光部は鉄共振型定電圧装置を通した電流をトランスで適度に減圧 (この場合 7 V) し、整流してその電圧を CdS セルと 3 個の抵抗器とのブリッジにかけ、この電圧が沈降管の計量部を通過する粒子の量によって変化するさまを自記電圧計 (東亜電波, 2TD 型) で記録させる。

分取部は沈降管の下端にとりつけ、各粒子の沈降に要する時間の差によって、沈降管中を沈降してきた粒子を分別するフラクシオンコレクター装置である。分別回収しようとする粒径の粒子がこの沈降管を沈降するのに要する時間を経過したときにモーターでコレクターを順送りにおき変える。このモーターを回転させて試料を分取するための時間は、電磁リレーと共鳴する周波数 (ここでは 45 cycle/秒) のシグナルをテープレコーダーに録音して記憶させた。このシグナルを増幅器で増幅し、電磁リレーを働かせ、フラクシオンコレクターを自動的にモーターで回転させ、マイクロスイッチを使って次のコレクターが沈降管の直下に送られるようにしてある (Fig. 3).

また、テープレコーダーには始動のシグナルも録音してあり、これによって、自動的に試料投入部の試料保持部を持ち上げ、自記電圧計の記録紙の回転を始めさせる。このようにして試料を試料投入部に入れ、テープレコーダーのスイッチを入れれば、試料は自動的に時間に関する頻度分布曲線を与え、沈降時間ごとに分別される。

e) 細粒部分析機

従来の細粒部の粒度分析法にはピペット法、比重計法、沈降天秤法などがあるが、いずれも 1 つの試料を分析するのに 1~2 日もかかり、しかもその結果は沈降時間に関する積算曲線であった。

この自動粒度分析機には、遠心分離機 (佐久間, 90 A 型) をつかう遠心沈降法を採用して分析に要する時間を著しく短縮し、また、分析結果を自記させるため、粗粒部分析機と同じ光透過法を用い、その結果は粒径に関する頻度分布曲線として表わすようにした。

この光透過遠心沈降法では粒径に関する頻度分布曲線を得るために、沈降管中の一定距離をへだてた 2ヶ所の粒子濃度の差を連続的に自記させる方法をとった。沈降液 (たとえば蒸留水) に試料を懸濁させ、それを沈降管に入れ、角速度 ω の遠心機に t 秒間かけると回転軸からの距離 x_2 の所での最も粗粒な粒子の粒径 Dpx_2 は

$$Dpx_2 = \sqrt{\frac{18\mu}{t\rho\omega^2} \ln \frac{x_2}{x_1}}$$

で表わされる。ここで、 μ は沈降液の粘性係数、 ρ は粒子と沈降液の比重の差、 x_1 は回転軸から沈降液の表面までの距離である。同じ t 秒後において回転軸からの距離 x_3 の所では同様に、最も粗粒な粒子の粒径 Dpx_3 は

$$Dpx_3 = \sqrt{\frac{18\mu}{t\rho\omega^2} \ln \frac{x_3}{x_1}}$$

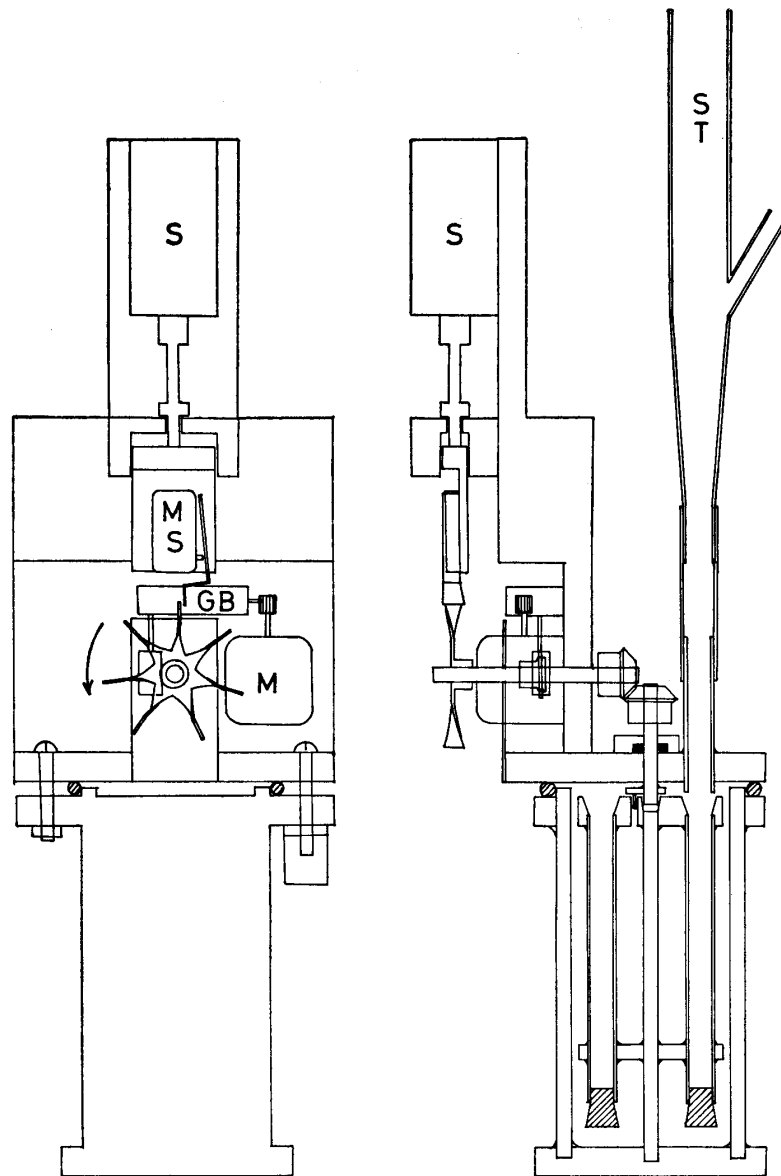


Fig. 3. Fraction collector in the automatic grain-size analyser for coarse grains (5 φ).
S: solenoid, ST: settling tube, M: mortor, MS: microswitch GS: gear box.

で表わされ、ある時間 t における x_2 と x_3 の所での最も粗粒な粒子の粒径の比は

$$\frac{Dp x_2}{Dp x_3} = \sqrt{\frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{\ln \frac{x_3}{x_1}}}$$

で表わされる。ここでは x_1, x_2, x_3 は定点であるから $Dp x_2$ と $Dp x_3$ の比率は常に一定である。 Dp を ϕ 単位でとるならば、 $Dp x_2 \phi - Dp x_3 \phi$ は常に一定である。また、 x_2 における遮光量は、 $Dp x_2$ よりも細粒な粒子の量に比例するから、 x_2 と x_3 における遮光量の差は、 $Dp x_2$ と $Dp x_3$ の間の粒径をもつ粒子の頻度をあらわす。したがって、 x_2 と x_3 における 光量の差を連続的に記録計で描かせれば、その曲線は、一定の粒径範囲 ($Dp x_2 \phi - Dp x_3 \phi$) で実際の粒径に関する頻度分布曲線を移動平均したものになる。この分析機では、 $x_1=47$ mm, $x_2=89$ mm, $x_3=120$ mm とし、 $Dp x_2 \phi$

$-Dp_{x_3} \phi$ は 0.27ϕ である。 x_2 と x_3 における遮光量の差は、それぞれの位置に固定した米粒電球の光を沈降管を通して、2個の抵抗とブリッジに組んだ CdS セルで受けて、2個の CdS セルの抵抗の差を電圧に変えた。このブリッジの出力はしんちゆう・カーボンブラッシュで遠心機外に導き、自記電圧計（東亜電波、2TD型）で電圧変化を記録させた。ブリッジにかける電圧と米粒電球のための電源は、遠心機内に組みこんだ2個の乾電池（単一1.5V）である（Fig. 4）。

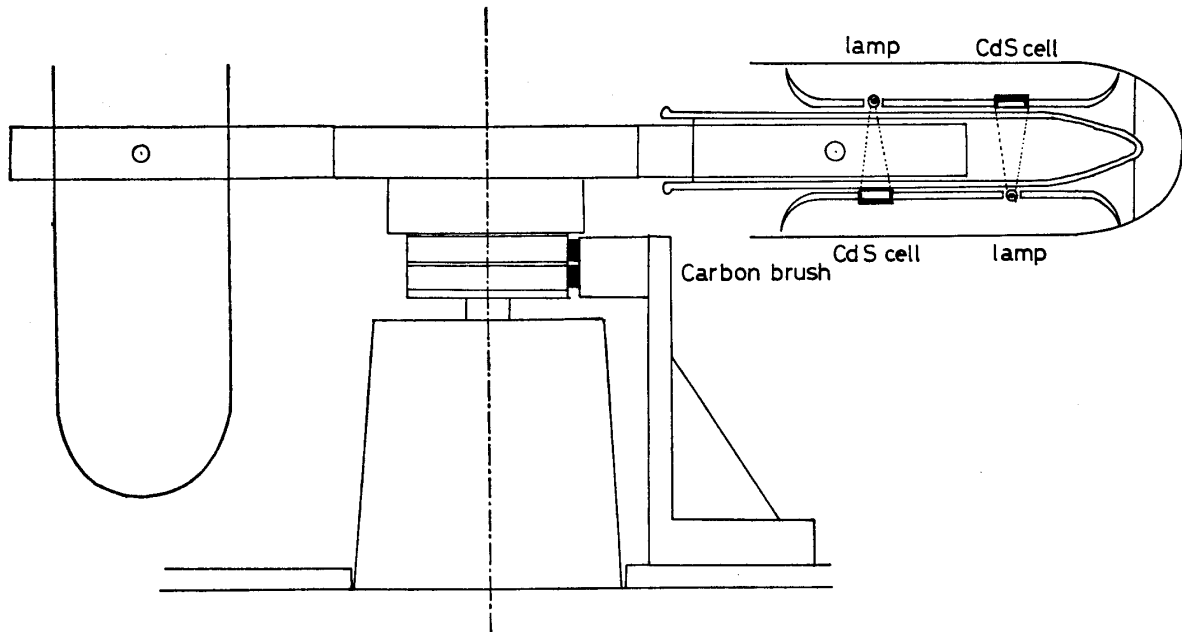


Fig. 4. The automatic grain size analyser for fine grains (4 φ).

遠心機の電源は、鉄共振型定電圧装置で安定化し、それをスライダックで調整して与え、遠心機の回転数はストロボスコープで測定して一定に保つ。遠心機は電源を入れてから、一定の回転数に達するのに時間がかかるが、その間の回転数の増加状態をストロボスコープで測定した結果、この遠心機ではいつも一定の変化をしていることがわかった（Fig. 5）。したがって、電源を入れたときからの時間と回転数の増加の関係から、各粒径の粒子の沈降時間を算出することができた。算出の際には、沈降管の傾斜も考慮した。

このようにして、細粒部の粒度分析機は、一様に懸濁させた試料液を沈降管の定めた高さまで入れ、遠心機と自記電圧計を同時に始動させれば、自動的に粒径に関する頻度分布曲線を記録する。

V. 沈降速度の測定

沈降法による堆積物の粒度分析において、粒径と沈降速度の関係を検討することはきわめて重要である。前述のように従来の粗粒部についての沈降法は篩分け法の代用であったため、一般に粒子の比重や形態はほとんど無視され、篩分けして得られた積算曲線とを見かけ上一致するように対応させて各粒径の粒子の沈降速度を決定してきた（Emery, 1938; Poole *et al.*, 1951; Schlee, 1966）。しかし、分析法の原理から考えると篩分け法による積算曲線と沈降法による積算曲線は、試料を構成する各粒子の形態と比重が一定でない場合には、互いに一致することは期待できない。また、堆積物の粒度組成の堆積学における意義を考えると、粒子の比重や形態を無視することはできないであろう。本論文の方法においては、粒度分析の結果が粒度組成の流体力学的な意味づけのために有効であることを目標においているので、粒子の比重や形態が流体力学的性質として加味さ

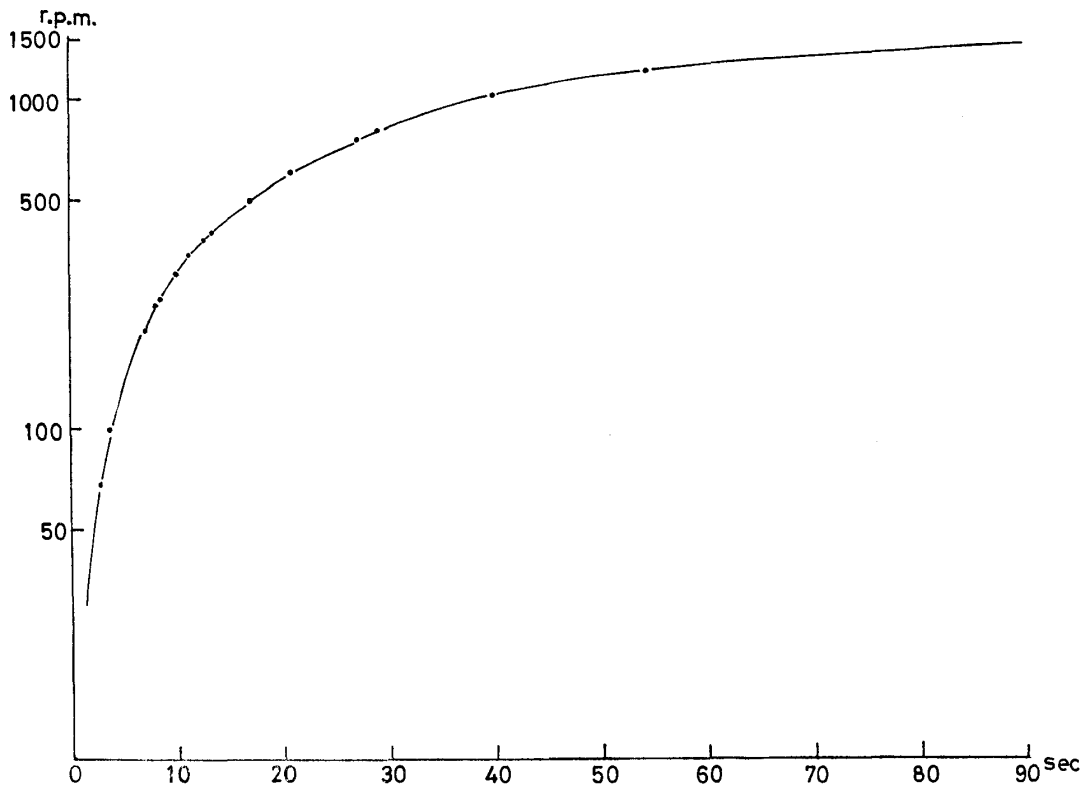


Fig. 5. Curve showing the increase of the number of rotations (in minutes) with time after the start of the centrifugation.

れている沈降速度に粒度分析の基準をおく。このため、本方法における基礎的な事項として一定の形態と比重をもった粒子の各粒径に関する沈降速度を求め、これに関連したいくつかの問題を検討してみた。

Poole (1957) はエメリー管とガラス球とを使って、このような測定をし、単一の粒子の沈降速度を正確に求めたが、実際に堆積物の試料を分析する場合に必要な量の粒子群の沈降速度については、測定法自体に問題を残している。

ここでは、ガラス球と前述の自動粒度分析機を用いて、ガラス球の各粒径に対する沈降速度を求め、さらに、沈降液の温度変化が粒子の沈降速度に与える影響を検討した。ガラス球は一定の比重と形態をもち、この種の測定にあたって理想的な粒子である。この実験に用いたガラス球につき、ピクノメーターで測定した比重は 2.51 である。 $-1.0\sim 3.5\phi$ のガラス球を Ro-Tap シェーカーで 0.5ϕ ごとに篩い分け、顕微鏡でそれぞれのフラクションの境界粒径（最大径と最小径）を求めた上で、それぞれのフラクションを粗粒部分分析機で分析し、それぞれのフラクションについての沈降時間に関する頻度分布曲線を得た (Fig. 6)。この曲線から境界粒径のガラス球の沈降速度を算出することができる (Fig. 7)。

沈降液の水温による粒子の沈降速度の変化は上記のガラス球をつかって、水温 10.0°C 、 15.0°C 、 18.0°C 、 19.5°C と 22.0°C のそれぞれについて測定した。

これらの測定結果はそれぞれの水温における境界粒径のガラス球の沈降速度がカルマンの法則とストークスの法則に従うことを示している (Fig. 7)。そこで、カルマンおよびストークスの法則を使ってガラス球から一般に沈降速度の基準として使われている石英球への比重の補正を行ない、境界粒径のガラス球の沈降速度から、その粒径の石英球（比重 2.65）の沈降速度を算出した。この石英球の沈降速度を基準にして自動粒度分析機で得た沈降速度を石英球の粒径に換算することがで

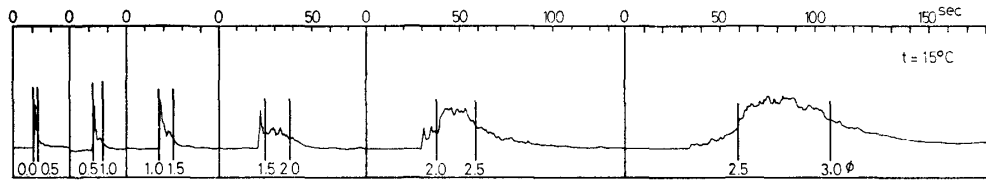


Fig. 6. Frequency curves of the control samples composed of glass balls of known size and proportion.

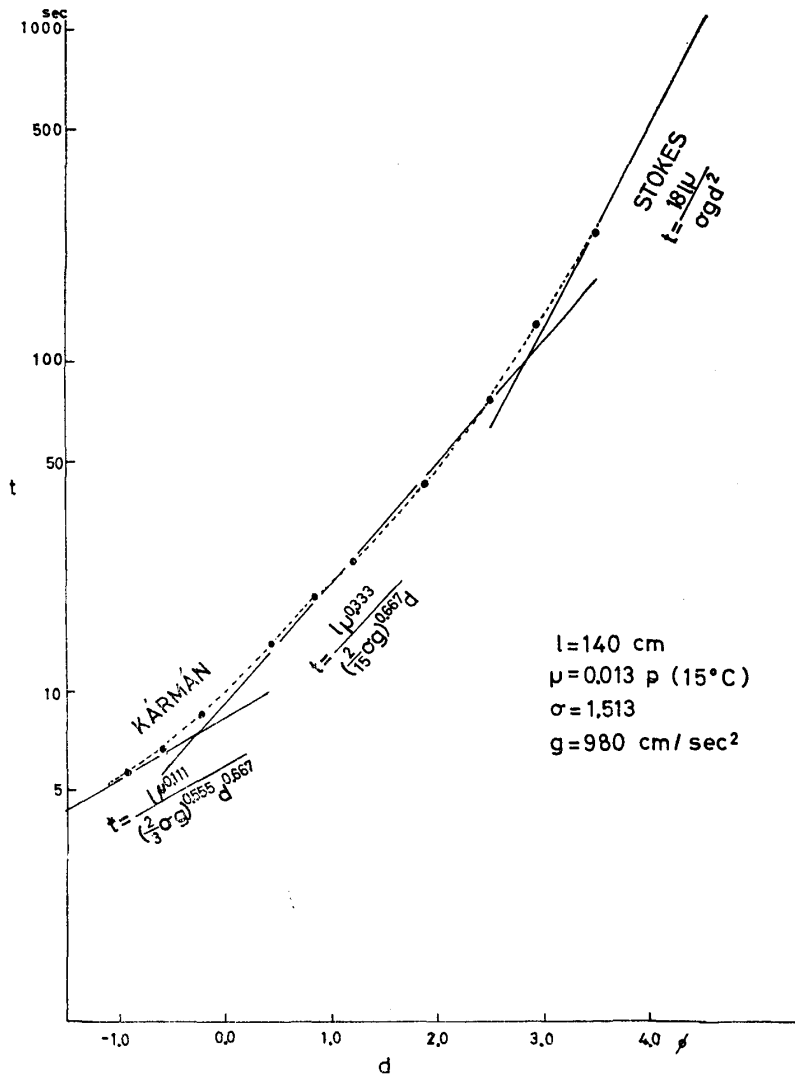


Fig. 7. Settling velocity of glass balls.

きる。つまり、ある粒子の粒径はその粒子と同じ沈降速度をもつ石英球の粒径で示されるということになる。3.0φよりも細粒の粒子については、ストークスの法則が成り立ち、沈降速度から粒径を算出することができる。このようにして求めた水温 2°C ごとの、各粒径の石英球粒子 (比重 2.65) が 130 cm 沈降するのに要する時間を Table 1 に示した。今後、各粒子の沈降速度から粒径を換算する場合この関係を使用することにする。

なお、粗粒部分析機によるこれらの測定は、一応同じ水温の蒸留水と水道水でそれぞれ行なったが、両者の間には全く差がなかったから、以後の測定には水道水を用いた。

Table 1. Settling time of quartz balls (density: 2.65) of various sizes through the 130 cm high water column at 0–30°C water temperature. (Time unit in seconds).

water temperature °C	diameter of quartz balls (density: 2.65) in ϕ												
	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0	5.6	7.3	9.8	14.0	21.0	31.3	49.3	86.0	166	325	640	1270	2530
2	5.5	7.2	9.6	13.9	20.5	30.9	48.0	82.0	159	309	605	1210	2410
4	5.4	7.1	9.5	13.7	20.1	30.0	46.8	78.0	152	292	577	1150	2300
6	5.4	7.0	9.4	13.5	19.9	29.5	45.5	76.0	145	276	542	1090	2180
8	5.3	6.9	9.3	13.4	19.5	28.9	44.2	73.5	139	262	517	1035	2075
10	5.2	6.8	9.3	13.2	19.1	28.4	43.0	71.0	133	248	487	985	1965
12	5.2	6.7	9.2	13.0	18.9	27.8	42.0	68.0	127	235	460	925	1870
14	5.1	6.6	9.0	12.8	18.6	27.1	41.0	66.0	122	223	437	880	1775
16	5.0	6.5	8.9	12.6	18.3	26.6	40.0	64.0	116	212	412	840	1695
18	5.0	6.4	8.8	12.5	18.0	26.0	39.0	62.0	111	200	390	797	1600
20	4.9	6.3	8.7	12.4	17.6	25.4	38.0	60.0	106	190	370	757	1525
22	4.9	6.2	8.6	12.2	17.3	25.0	37.0	58.0	101	180	359	720	1450
24	4.8	6.1	8.5	12.0	17.0	24.3	36.0	56.6	97	170	330	680	1360
26	4.8	6.0	8.4	11.9	16.7	23.9	35.2	54.5	92	162	310	640	1300
28	4.7	6.0	8.3	11.7	16.4	23.4	34.4	52.5	88	153	295	610	1235
30	4.6	5.9	8.2	11.5	16.1	22.9	33.5	51.5	85	146	280	580	1175

VI. 遮光量と粒子量との関係

遮光量と粒子量の関係がこの分析機でどのようにになっているかを検討しておく必要がある。この検討のために、ガラス球・石英とカーボランダムのおのおのについて0から3 ϕ の粒径範囲の粒子を0.5 ϕ ごとに篩い分けし、各フラクションの重量を一定にした後、その試料を混合してさらに粗粒部分分析機で1 ϕ ごとに分別し、それぞれのフラクションの重量を一定にしてから、再び混合して、粗粒部分分析機で遮光量を検討した。このようにして得られた遮光量による頻度分布曲線は、粒径が細粒部になるにしたがって一様に増加する (Fig. 8)。遮光量は試料が粒径ごとに同一体積 (重量) であれば、得られる頻度曲線は粒径の平方根に逆比例するはずであるが、ここに得られた曲線は沈降に要した時間の平方根に比例して増加する曲線とより良く適合することがわかった (Fig. 8)。

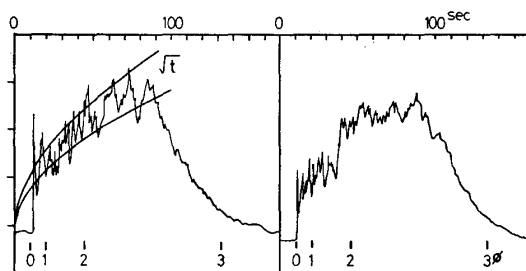


Fig. 8. Frequency curves of the control samples composed of quartzose sand of known size (0 to 3 ϕ) and known proportion of each 1 and 2 g. (left and right) at each 1 ϕ in 250 and 500 mV in range of the recorder. The 2 lines in the right figure increase in proportion to the square root for settling time.

同一粒径の粒子を2倍にした場合に分析機の頻度曲線が正確に2倍になるかということは、定量的な解析するためには重要な事項である。各1 ϕ ごとの粒径1gずつの試料と2gずつの試料を分析して得られる頻度分布曲線は全粒径に関して正確に2倍になっていることが確かめられた。したがって、この分析機の描く頻度分布曲線は十分に定量的な解析に耐えると結論できる (Fig. 8)。

VII. あとがき

この論文で述べた自動粒度分析機は現在考えられる粒度分析および解析のための要求をほぼ満たしていると考えられる。この分析機のそれらの利点のうち、堆積学的に最も重要な点は、沈降時間に関する頻度曲線が直接しかも自動的に得ることができることであろう。従来は分析結果が数値として現われてきていたので、種々の集計や作図をしなければ、分析した堆積物の粒度分布を知ることができなかったが、この分析機では分析と同時に頻度分布曲線が得られる。このことは、堆積物に作用している種々の要因を直観的にしかも定量的に判断することを助け、堆積物の解析や堆積物の粒度組成の流体力学的解明に非常に有効な手段となると考えられる。

引用文献

- Emery, K.O., 1938, Rapid method of mechanical analysis of sand. *Jour. Sed. Petrol.*, v. 8, no. 3, p. 105-111, 5 figs.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River Bar, a study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sed. Petrol.*, v. 27, no. 1, p. 3-26, 19 figs.
- Hattori, M., 1967, Recent sediments of Sendai Bay, Miyagi Prefecture, Japan. *Tohoku Univ., Sci. Rep., 2nd ser. (Geol.)*, v. 39, no. 1, p. 1-61, 33 figs., 5 tabs.
- Inman, D.L., 1952, Measures for describing the size distribution of sediments. *Jour. Sed. Petrol.*, v. 22, no. 3, p. 125-145, 9 figs., 5 tabs.
- 木村春彦, 1967, 碎屑性堆積に関する実験堆積学的問題点, 討論資料—堆積学に関する諸問題. 地質学会, p. 153-158.
- Poole, D.M., 1957, Size analysis of sand by a sedimentation technique. *Jour. Sed. Petrol.* v. 27, no. 4, p. 460-468, 6 figs., 2 tabs.
- , Butcher, W.S. and Fisher, R.L., 1951, The use and accuracy of the Emery settling tube for sand analysis. *Beach Erosion Board Tech. Mem.*, no. 23, p. 1-11, 7 figs., 2 tabs.
- Schlee, J., 1966, A modified Woods Hole rapid sediment analyser. *Jour. Sed. Petrol.*, v. 36, no. 2, p. 403-413.

Automatic Grain-size Analyser for Sedimentological Investigation

Nobuaki Niitsuma

Abstract

The methods for grain-size analysis are discussed and new instruments for the purpose are described. Analysis should be made automatically and within a short time on all of the grain-sizes of the sediments by a sedimentational technique in order to avoid possible technical errors. The result of the analysis should be recorded directly as a continuous frequency curve of the grain-sizes and the fractions of the sediments should be collected for further analysis.

The newly designed instruments include a separator, and two automatic grain-size analysers for both coarse and fine grains (Figs. 1 and 2). The instruments include electronic recorders to obtain automatically the continuous frequency curves of the grain-sizes of the sediments during the analysis.

To save time for grain-size analysis, the apparatus separates the sediment samples into fractions of grains coarser and finer than 5ϕ . The apparatus consists of a plastic tube, 35 mm in inner diameter and 37 cm in length with a funnel in the top and glass tubes in the middle part and at the bottom of the cylinder. The grains of the sediments accumulate in the tubes separately according to their settling rates in the cylinder filled with water.

The main part of the analyser for grains coarser than 5ϕ consists of a glass tube of 19 mm in inner diameter and 160 cm in length with a funnel at the top, a collector at the bottom, and the measuring equipment located around the lower part (Fig. 2). The stopper of the funnel is removed automatically by an electromagnet. The measuring equipment consists of a projector charged with stabilized electricity and a CdS-cell receiver which transmits the light value projected through the glass tube to the electronic recorder. The collector comprises seven rotative cylinders which are stopped at the bottom of the tube in turn by a microswitch (Fig. 3).

The glass tube is filled with water pouring from the lower part. The prepared sample of sediments in the funnel is thrown into the tube. The sediment grains settle at different rates according to their shapes and weights. The shading effects of the falling grains are recorded continuously by the CdS-cell receiver. The grains are deposited separately according to their settling rates in the successive cylinders of the collector intermittently rotating at the bottom of the tube. Each part of the analyser works under control of signals recorded on tape.

The analyser for the grains finer than 4ϕ is set in the centrifuger. It consists of a test tube with measuring equipments at two levels which are connected with the electronic recorder. The electronic recorder automatically draws the curve of the differences in the shading effects of the settling grains at the two levels of the tube filled with distilled water in which the grains are suspended. The curve drawn by the recorder represents the frequency curve of grain-sizes (Fig. 4). The changes in the rotation of the centrifuger are known by the repeated measurements (Fig. 5).

The settling velocities of glass balls of 2.51 in density ranging from -0.1 to 3.5ϕ in size were examined by the analyser as a reference for the interpretation of the curves drawn by the automatic grain-size analyser. The balls were sieved at intervals of 0.5ϕ by a Ro-Tap shaker and the maximum and minimum diameters in each fraction of the sieved grains were measured under a binocular microscope. The fractions of the glass balls were analyzed at water temperature of 10.0, 15.0, 18.0, 19.5 and 22.0°C. The settling velocities of the grain-sizes of every fractions are shown on the curves of Fig. 6. The result of the measurement shows that the settling velocity of the glass balls of the size ranging from -1.0 to 3.5ϕ coincides well with that calculated by the equations of Kármán and Stokes (Fig. 7). The table 1 shows the times for settling of quartz balls of 2.65 in density, which are used usually as standard grains in sedimentology, through the water column 130 cm high at 2°C intervals of water temperature, which was calculated from the measured velocities of the glass balls after density correction by the equations of Kármán and Stokes. This table gives the sizes of the quartz balls equivalent to various grains settled in water at the same velocity.

Some technical problems on the automatic grain-size analyser are mentioned in the text.