

沈降式粒度分析装置の使用法と分析結果の特徴

田村 嘉之*・中山 勝博*

Guide for a grain-size analyzer with a settling tube system, and characteristics of its analysis

Yoshiyuki Tamura and Katsuhiko Nakayama

Abstract

A grain-size analyzer with settling tube system was established. A personal computer controls this system and process data.

We measured the grain-size distribution of same samples by three kinds of measuring method; the sieving method, sedimentation method with Emery tube, and sedimentation method with this analyzer. Samples are standard glass spheres (0.177-0.250mm) and beach sand. Analyzing grain size distribution is the moment method. No significant difference among three measuring methods recognized on standard glass spheres. However, the arithmetic mean of beach sand given by this analyzer is approximately 0.4 phi, which is finer than that by the other methods. On sieving method, platy particle may readily pass diagonally through mesh. The other hand, concentrated sample may accelerate settling velocity in Emery tube. Thus size determination by these two methods is coarser. The analyzer in the present study is less susceptible to these factors. Further, this analyzer has high possibilities to connect with the hydrometer technique, and its measurement time is short in comparison with the other methods.

Key words : arithmetic mean, Emery tube, grain size distribution, sedimentation method, settling tube system, sieving method.

はじめに

堆積物を調べる様々な手法において、構成粒子の粒度を分析することは最も基本的かつ重要なことである。島根大学理学部地質学教室では、粒度分析を効率的かつ系統的に行なう目的で1993年度に正豊製作所製沈降式粒度分析装置 (MT-S150) を設置した。本装置は、伊勢屋 (1985) が示した粒度分析装置をパソコンによるオンライン化した改良型装置である。本報告では、この装置の機構および分析手順の概要を示し、従来の手法での粒度分析結果との比較から、本装置による粒度分析結果の特徴を明らかにする。

粒度の分析手法と粒度係数の算出方法

1. 分析手法

* 島根大学理学部地質学教室
Department of Geology, Faculty of Science, Shimane University, Matsue, 690 Japan

現在、広く用いられている粒度の分析手法には、計測法、篩振盪法、沈降法がある。計測法は粒子の大きさを計測する手法で、礫などの粗粒物質の直接計測や固結堆積物の薄片や研磨面での計測で用いられる。篩振盪法は規格の明らかな篩を振盪し試料を分離する手法で、主に未固結砂粒の分析に用いられる。沈降法は粒径と沈降速度との関係から試料を沈降させて粒度を求める手法で、主に未固結砂泥の分析に用いられる。このうち、沈降法にはピペット法、比重計法、エメリー管法 (容積分析法)、天秤法 (質量分析法)、濃度測定法、圧力変化法などがある (碎屑性堆積物研究会, 1983)。ピペット法・比重計法・濃度測定法・圧力変化法はシルトから粘土サイズの試料に適している。一方、砂からシルトサイズの試料の分析に有効的な手法はエメリー管法と天秤法であり、本装置は天秤法を採用している。

2. 粒度係数の算出方法

測定結果の処理方法のうち粒度係数の算出について

は、積算統計法（モーメント法）と図解法の2種類があり、詳細については Friedman & Jhonson (1982) や 砕屑性堆積物研究会 (1983) にまとめられている。図解法は、グラフに描かれた曲線を基に粒度係数を算出する方法で、Folk & Ward (1957) の式が一般に用いられている。一方、積算統計法は、本装置で採用した方法であり、算術平均からの偏差を n 乗した値の平均値、すなわち算術平均のまわりの次の積率（モーメント）で各粒度係数を求める方法である。粒度係数は、算術平均（平均粒径）、標準偏差値（淘汰度）、歪み度、尖り度で、粒度を ϕ 値で表わすとすると、それらは次の式で求められる。

Ma：算術平均 (arithmetic mean)

$$Ma = dm_{\phi} = \sum p d_{\phi} / 100$$

d_{ϕ} ：任意の粒径（一般に各階級中央値）

dm_{ϕ} ：算術平均（粒径）

p ：粒径 d_{ϕ} の頻度（百分率）

Mn：算術平均のまわりの n 次の積率

$$Mn = \sum p (d_{\phi} - dm_{\phi})^n / \sum p$$

σ_{ϕ} ：標準偏差値 (standard deviation)

$$\sigma_{\phi} = (M_2)^{1/2} = \left\{ \sum p (d_{\phi} - dm_{\phi})^2 / 100 \sigma \right\}^{1/2}$$

Sk $_{\phi}$ ：歪み度 (skewness)

$$Sk_{\phi} = (M_3)^{1/3} / (M_2)^{1/2} = \sum p (d_{\phi} - dm_{\phi})^3 / 100 \sigma_{\phi}^3$$

K $_{\phi}$ ：尖り度 (kurtosis)

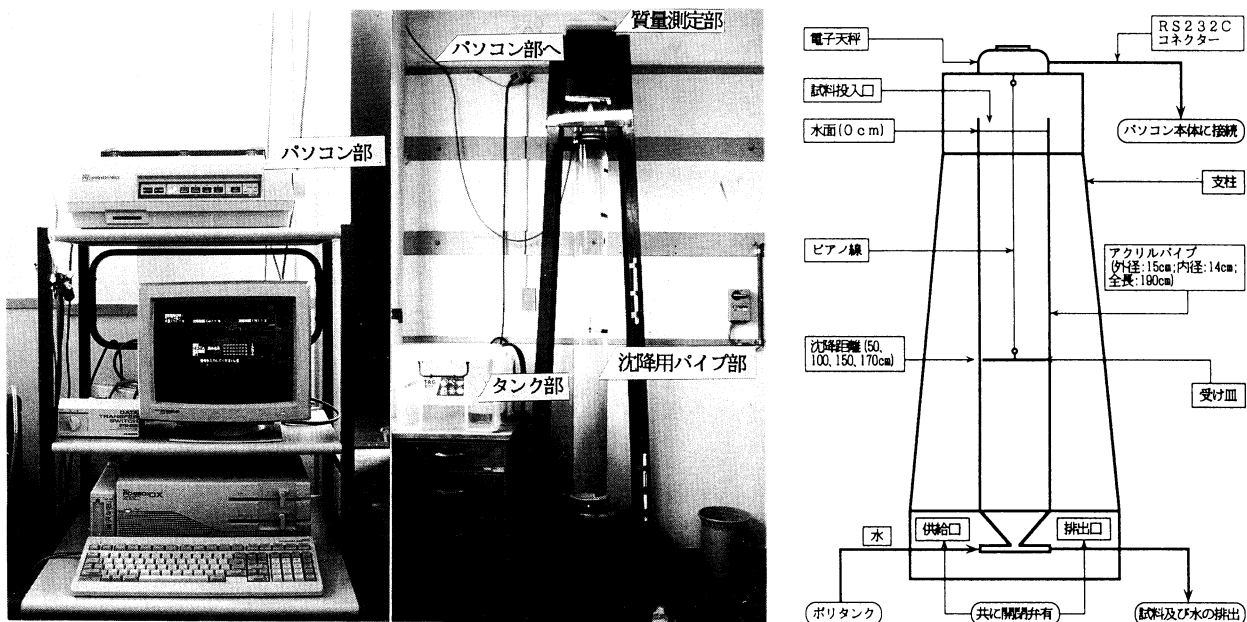
$$K_{\phi} = (M_4)^{1/4} / (M_2)^{1/2} = \sum p (d_{\phi} - dm_{\phi})^4 / 100 \sigma_{\phi}^4$$

装置の機構と分析方法

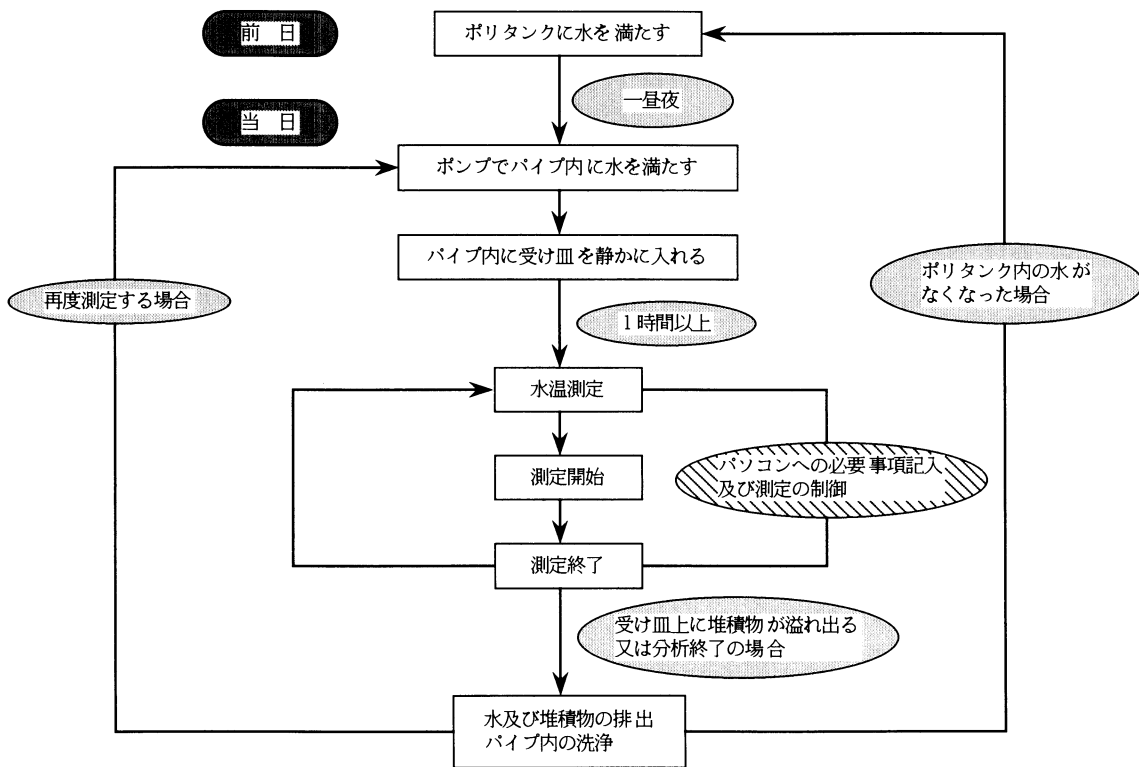
1. 機構

本装置は、タンク部、沈降用パイプ部、質量測定部、パソコン部の4つに区分できる（第1図）。タンク部は、パイプ部に供給するための水を貯める部分である。沈降用パイプ部は試料を沈降させる部分である。パイプは全長190cm、外径15cm、内径14cmである。パイプの下端部には開閉弁のついた水の供給口、排出口がある。質量測定部は、沈降してきた試料を受ける受け皿（直径13.8cm）と、そこでの試料の質量を測定する電子天秤（島津製作所製電子天秤 EB-330H-A）からなる。受け皿は、任意の長さで設定されたピアノ線によって電子天秤と接続されている。さらに電子天秤は、インターフェース IFB-101A と RS232C（パラレル）を使用してパソコンと接続され、プログラムに沿って測定値がパソコンに送信できる。パソコン部は粒度測定と測定結果の統計処理を行なう部分である。パソコンは、本体（NEC PC-9801 DX）とプリンター（日本語シリアルプリンター：NEC PC-PR101/60）からなる。

パソコンによる粒度測定と制御、統計処理を行なうプログラムは N88 日本語 Basic を用いて作成されている。プログラムは、粒度測定部、統計処理部、データ読み込み（書き込み）部で構成される。粒度測定部は、水温、沈降距離、測定時間などの入力と電子天秤で測定された数値をパソコン側に入力させるプログラムである。統計処理部は上述の積算統計法に基づいて各粒度係数を算出するプログラムである。データ読み込み部は、測定結果



第1図 沈降式粒度分析装置の全景とシステム



第2図 分析手順

の保存指示のプログラムである。

2. 分析手順

本装置の分析手順を第2図・第3図に示す。ここでは分析装置本体部（タンク部、パイプ部、測定部）とパソコン部を分けて手順を示す。

分析装置本体部の操作手順

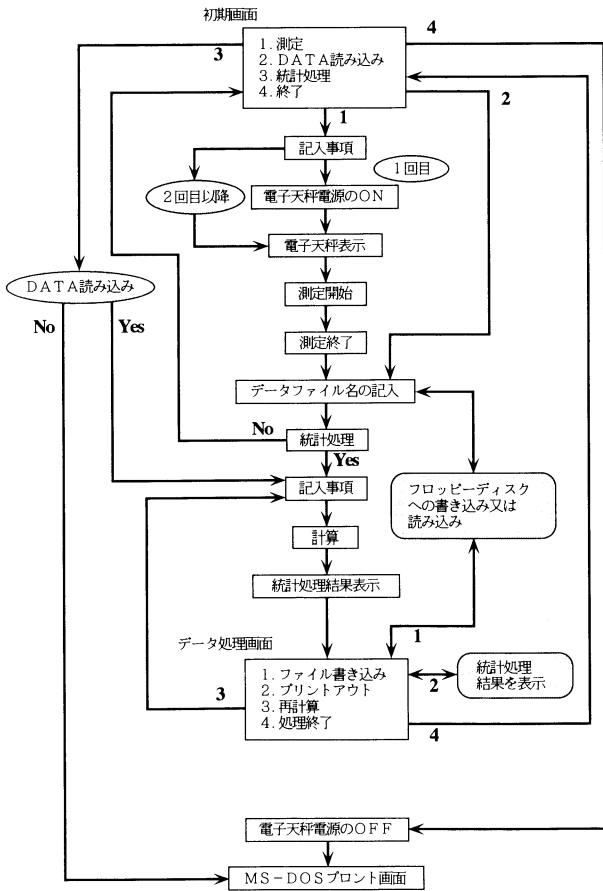
- ① 測定前日にタンクに水を満たし1昼夜置く。この作業は、水温を室温に近づけ、タンク内の水温を一定にする目的で行なう。
- ② タンク内の水をパイプ内に注入する。このとき、気泡を入れないように注意を払う。
- ③ パイプ内に任意の長さのピアノ線をつけた受け皿を静かに沈める。
- ④ パイプ上部に設定した基準線（0 cm）に水面を合わせる。
- ⑤ 受け皿が水面に対して水平になるように微調整する。受け皿が斜めの状態では、受け皿に堆積した試料が再移動してしまう危険性があり、十分な測定を行なうことはできない。
- ⑥ パイプ内の水の対流の止まるのを待つため、⑤までの作業を終了した後、1時間以上経過してから測定を始める。
- ⑦ 粒度測定直前に水温を測定する。

- ⑧ 測定に必要な事項をパソコン側に入力後、試料を投入し測定を開始する。試料投入時は、できるだけ水面の揺れを生じないように注意を払う。
- ⑨ 測定終了後、水温に変化のないことを確認した後、パソコン側の作業を行なう。
- ⑩ 受け皿上の試料が溢れ出るまでは、⑦～⑧の操作を繰り返すことによって連続した測定ができる。
- ⑪ 測定終了後、受け皿を静かにパイプから出し、水を抜き、パイプ内を洗浄する。
なお、複数の試料の測定時において、受け皿から試料が溢れ出始めた場合、測定を中止し、⑪の作業を行なった後に②からの操作を行ない測定を再開する。

パソコン部の操作手順

パソコン部の制御の流れを第3図に示す。

- ① 「分析装置本体部の操作⑥」の作業終了後パソコン本体の電源を入れ、粒度測定プログラムを立ちあげる。
- ② パソコン部のモニター画面上に初期画面が表示されたら、「測定」を選択する。
- ③ 「分析装置本体部の操作⑦」の後、サンプル名・水温（℃）・沈降距離（cm）・測定時間（分）を順次入力する。沈降時間については、測定する試料のおよその粒度および沈降距離から、Gibbs *et. al.* (1971) の表を



第3図 パソコン部の制御の流れ

参考にして設定する。

- ④ 最初の測定ならば「Y」を、そうでなければ「N」をそれぞれ入力する。その後、モニター画面に電子天秤側の数字が表示されるので、測定者はキーボードより0調整を行なう。
- ⑤ 測定開始の合図 (beep 音) の後、測定を開始。測定中は、電子天秤で測定された値が時間毎にパソコン本体に入力される。測定の時間間隔は、時間経過とともに長くなるように設定している。
- ⑥ 測定終了後、モニター画面上に累積曲線が表示される。
- ⑦ 測定したデータをデータファイルへ書き込む。
- ⑧ 統計処理を画面上で選択し、粒度係数を算出させる。統計処理では、PHI 間隔、粒子密度の入力を行なう。処理結果の打ち出し例を第1表に示す。
- ⑨ 引き続いて測定を行なう場合、②からの作業を繰り返す。測定を全て終了する場合、必ず初期画面に戻り「終了」を選択する。これによって、電子天秤側の電源を OFF にする信号を送ることになる。

粒度測定の手法間格差

1. 方法

本装置による粒度分析結果の特徴を明らかにするために、同一試料を用いて、本装置による天秤法の粒度分析とともにエメリー管法、篩振盪法による粒度分析を行

ファイル名: YUMI1
 サンプル名: 弓ヶ浜1
 測定日時: 93/04/24 15:29:28
 出力日時: 93/04/24 19:08:04

FINAL TIME : 280.18 sec FINAL WEIGHT : 1.6920 g
 WATER DENSITY : 0.99799 g/cm3 DYNAMIC VISCOSITY: 0.01011 cm/sec

PHI	WT(g)	IWR(%)	TWR(%)	P*I	MOM1	MOM2	MOM3	MOM4	I*MOM2	I*MOM3	I*MOM4
0.00	0.000	0.01	0.01	0.000	-1.833	3.361	-6.161	11.295	0.034	-0.062	0.113
0.50	0.003	0.16	0.17	0.080	-1.333	1.778	-2.370	3.160	0.284	-0.379	0.506
1.00	0.078	4.45	4.62	4.450	-0.833	0.694	-0.579	0.482	3.090	-2.574	2.145
1.50	0.681	35.62	40.24	53.430	-0.333	0.111	-0.037	0.012	3.956	-1.318	0.439
2.00	1.524	49.82	90.06	99.640	0.167	0.028	0.005	0.001	1.385	0.231	0.039
2.50	1.674	8.90	98.96	22.250	0.667	0.445	0.296	0.198	3.957	2.638	1.759
3.00	1.684	0.57	99.53	1.710	1.167	1.361	1.588	1.853	0.776	0.905	1.056
3.50	1.688	0.23	99.76	0.805	1.667	2.778	4.630	7.718	0.639	1.065	1.775
4.00	1.692	0.24	100.00	0.960	2.167	4.695	10.172	22.041	1.127	2.441	5.290
Total				183.325					15.247	2.947	13.122

Ma : 1.833 SGM : 0.390 SK : 0.495 K : 5.644

第1表 処理結果のプリント例

WT: 累積質量, IWR: 各粒径の頻度 (質量百分率), TWR: 累積質量百分率, P*I: PH×IWR, MOM1-4: PHI-Ma の1~4次の積, I*MOM2-4: IWR×MOM2-4 (各カラム下の Total は2~4次の積率), Ma: 算術平均, SGM: 標準偏差, SK: 歪み度, K: 尖り度.

なった。今回使用した試料は、標準ガラスビーズ（規格：2.0～2.5φ，0.177～0.250mm）と弓ヶ浜半島の海浜砂の2種類である。

本装置の分析では、沈降距離を100cm，測定時間は標準ガラスビーズについて2分間，海浜砂について5分間にした。試料は約3gにした。エメリー管法は、測定をビデオ撮影をして、その後ビデオを再生しながら碎屑性堆積物研究会（1983）に示された粒径－沈降時間を参照して測定した。試料は秤量して3gに行なった。篩振盪法は、篩の間隔を0.5φ間隔で設定したものを10分間振動器にかけて振盪した。使用した試料は、120gとした。

本装置を使用した方法とエメリー管法において、測定は各試料3回行なった。篩振盪法では各試料1回の測定とした。粒度係数は全ての手法について積算統計法を用い、粒度の間隔は0.5φとした。

2. 結果

測定結果を第2表に示す。標準ガラスビーズの算術平均（平均粒径値）については、本装置による分析値が若干粗い値を示したものの、3手法ともに算術平均（平均粒径値）2.195～2.386φと0.2φ差の範囲の値となった。また、Folk & Ward (1957) の分級度・尖り度の評価

表から判断して、分級度は非常に良く、尖り度は極めて突出といえる。海浜砂の算術平均（平均粒径値）については、標準ガラスビーズより大きな手法間格差が現われた。すなわち、本装置による天秤法での算術平均（平均粒径値）は、篩振盪法とエメリー管法のそれに比較して約0.4φ程度の細粒な値を示した。分級度は良い、ないしやや良いといえ、尖り度は極めて突出という値となった。なお、いずれの場合においても歪み度は著しい正から著しい負までの幅広い値となった。

考 察

今回の測定において同一試料にもかかわらず、明かな差の現われた値については、次のように考える。

はじめに歪み度であるが、この値が広い範囲を示したことは扱った試料と統計処理の方法の問題であろう。今回は分級度の非常に良い標準ガラスビーズと分級度の良い～やや良い海浜砂という試料を扱った。当然、粒度分布の累積曲線は極めて急勾配となる。今回の統計処理では、篩を0.5φ間隔で組み合わせたために統計処理は粒度間隔0.5φとした。しかし、このような分級度の良い試料の場合は、統計処理における粒度間隔は小さい方が望ましい。実際、今回測定したもののうち、天秤法については粒度間隔を0.1φに小さくすると歪み度のばらつきは小さくなる。より小さな粒度間隔で統計処理する点からすると図解法を用いた方がよいとみられる。ただし、パソコンにこの方法を組み込もうとすると大幅なプログラム変更が必要となる。

次に、海浜砂の試料について本装置を用いた天秤法による粒度が他の方法に比較して細粒となったことについては次の要因が考えられる。第1は粒子の形状である。測定した海浜砂は実体顕微鏡で観察する限りでは、かなり球形度も円磨度も高いのであるが、標準ガラスビーズのそれらに比較すれば劣る。このため篩振盪法では少々粗くなる傾向が現われると考えられる。第2はエメリー管法の問題点である。天秤法では試料投入を平板状の補助板を使い試料を瞬時に投入するのに対し、エメリー管法では投入時の試料に厚さがあり、試料の頂部は水面に達するまでに多少の時間を要するとともに水面に達した時に初速度を有してしまうことになる（仮に厚さ3cmの乾燥試料であれば、その頂部が水面に達するのに0.07秒、初速度77cm/sとなる）。初速度を持つことは粗粒の方にずれることを意味する。一方、今回エメリー管法と天秤法ともに3gの試料を分析したが、エメリー管は管内径が21mmであり、本装置の管内径140mmに比較して小さく、単位時間内、単位体積内に管を通過する粒子数はエメリー管法の方が多い。粒度の異なる多粒子が沈降す

[標準ガラスビーズ]

	Ma	SGM	SK	K
篩 振 盪 法	2.292	0.184	1.619	10.550
エメリー管 1	2.341	0.193	1.650	3.722
2	2.348	0.305	0.338	3.445
3	2.386	0.242	0.531	2.413
本 装 置 1	2.278	0.145	1.718	10.773
2	2.251	0.182	-0.920	14.385
3	2.195	0.228	-1.822	9.109

[海浜砂]

	Ma	SGM	SK	K
篩 振 盪 法	1.086	0.646	0.318	4.017
エメリー管 1	1.042	0.572	0.863	5.738
2	1.123	0.517	1.440	6.295
3	1.060	0.563	0.421	3.446
本 装 置 1	1.438	0.385	0.247	4.104
2	1.452	0.412	0.114	4.152
3	1.421	0.404	-0.141	5.332

第2表 分析結果

Ma：算術平均，SGM：標準偏差，SK：歪み度，
K：尖り度。

る場合、水の抵抗に対し細粒物質が粗粒物質の影に入り、単粒子の時よりも速く沈降することがある (Lindholm, 1987)。エメリー管法では管内径が小さいために、このようなことが本装置の管よりも頻繁に発生し、測定が粗粒の方にずれていると考えられる。エメリー管法の場合、粒度のそろった標準ガラスビーズ試料では他の手法に比較して若干の細粒傾向を示すことを考えあわせると、初速度の問題よりも細粒物質が粗粒物質の影に入ることが測定に大きな影響を与えるとみられる。多粒子の試料の沈降においては、単粒子の沈降に比較して沈降速度が速くなることは Channon (1971) にも述べられており、彼は特に粗粒試料の分析において、より広い口径の沈降管が必要であると述べている。いずれにしても以上の理由から本装置による天秤法では、粒度がより細粒な値を示したと考えられる。正確には、本装置による天秤法の分析結果がより細粒となるのではなく、エメリー管法、篩振盪法による分析結果が、若干粗い値を示すのではないかと考えられる。

次に本装置の特性について考察する。標準ガラスビーズ試料の測定をみる限り、3手法は同様な値となる。本装置での天秤法は、篩振盪法と比較して粒度間隔の制約は受けない点で優れている。また、エメリー管法に比較して、試料投入時の初速度を0に近付けられること、異なる粒度の試料（一般に試料は全て粒度は異なる）において細粒物質の沈降速度にあたる影響が小さいことにおいて優れている。そして、測定時間が短い。また、沈降式であるので泥質砂試料において比重計法と整合的につなぎ合わせる分析が可能である。現時点において、本装置は精度、測定の手軽さ、他の分析手法と連続した分析という点で優れていると判断できる。など、今後の問題点として、本学には光電管式の細粒物質用粒度分析装置（セイシン社製、SK レーザーアナライザー）が設置されており、本装置との整合的な分析を行なうための手法を検討したい。

追 記

本稿の投稿中に岸・公文（1993）によって、本学と同じシステムの粒度分析装置が紹介された。彼らによると標準ガラスビーズ（2.75~3.00φ）において、本装置を用いた測定が0.2φ程度、他の手法より粗くなる傾向を示しているが、少なくとも筆者らの測定においては、そのような傾向はみられなかった。また、彼らは同一試料について本装置による分析と比重計法による分析をつなぎ合わせる手法を明らかにしている。

文 献

- Channon, R. D., 1971, The bristol fall column for coarse sediment grading. *J. Sed. Petrol.*, 41, 867-870.
- Folk, R. L. and Ward, W., 1957, Brazos river bar ; a study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 30, 1-58.
- Friedman, G. M. and Johnson, K. G., 1982, *Exercises in sedimentology*. John Wiley & Sons, NY, 208p.
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D. and Link, D. A., 1971, The relationship between sphere size and settling velocity. *J. Sed. Petrol.*, 41, 7-18.
- 伊勢屋ふじこ, 1985, 沈降式粒度分析の手引き. 筑波大学水理実験センター報告, 9, 115-128.
- 岸 誠一・公文富士夫, 1993, 沈降天秤法と比重計法の組合せによる泥質砂堆積物の粒度分析法. 堆積学研究会報, 38, 101-106.
- Lindholm, R. C., 1987, *A Practical Approach to Sedimentology*. Allen & Unwin, London, 154-183.
- 碎屑性堆積物研究会（編）, 1983, 堆積物の研究法. 地学団体研究会, 東京, 377p.