

## レーザー回折式粒度分布測定装置の使用法と分析結果の特徴

中山 勝博\*・草野 高志\*\*

### Guide for a laser diffraction particle size analyzer, and its data characteristics

Katsuhiko Nakayama\* and Takashi Kusano\*\*

#### Abstract

This paper describes the introductory guide for a laser diffraction particle size analyzer (SALD-3000S; Shimadzu Co., Ltd.), and discuss the comparison of data obtained from different analytical methods and analyzers. SALD-3000S is available for any sand and mud material, and its measurement range covers from 0.08 to 3000  $\mu\text{m}$ . SALD-3000S has several advantages such as simple suitability of a laser axis, and real-time modulation of sample bulk concentration, in comparison with previous laser diffraction particle size analyzers. Measurements of well-known diameter samples coincide with true values of diameter. Measurements of sand-mud samples with three different grain analyzers of a settling-tube grain sizer, the previous laser diffraction particle size analyzer (measurement range: 0.1–192  $\mu\text{m}$ ), and SALD-3000S, suggests that SALD-3000S provides the most precise and is the simplest to measure.

**Key words:** laser diffraction particle size analyzer, SALD-3000S, grain size distribution

#### はじめに

堆積物を調べるにあたり、構成粒子の粒度分析は最も基本的かつ重要な事項である。島根大学総合理工学部地球資源環境学科には、これまでに粒度分析用装置・器具として、振篩分析装置と各種ふるい、エメリー管、ピペット法用のメスシリンダーなどの器具、沈降管式粒度分析装置（正豊製作所 MT-S 150；伊勢屋，1985；田村・中山，1993），それに 0.1~192  $\mu\text{m}$  を測定範囲とするレーザー回折式粒度（分布）分析装置が導入されている。しかし、これらの装置では、泥質砂のような粒径分布の広い試料や火山ガラスと軽石といった粒子密度の大きく異なる火山砕屑物試料については、別々の装置で測定した結果をつなぎ合せて 1 つの分析結果とするなどの作業が必要であった。これらを行うには、測定時間にかなりの時間を要する上、そのつなぎ合せについて、測定精度に直接影響するような様々な問題が存在した（Komar and Cui, 1984；岸・公文，1993）。

これらの問題を根本的に解決するには、測定範囲が大きく、粒子密度の規制を受けない粒度分布分析装置の導入が必要であった。幸い、本年、測定範囲が 0.08~3000

$\mu\text{m}$  (3 mm) までのレーザー回折式粒度（分布）分析装置（島津製作所 SALD-3000S）を教室に導入することができた。これによって、泥流堆積物や火山砕屑物の粒度分析を飛躍的に正確かつ短時間に行うことが可能となった。

本報告では、SALD-3000S の基本的な操作手順、それに同一試料を SALD-3000S と既存装置で測定した結果の比較について述べる。なお、本装置は再堆積した火山砕屑物の運搬・堆積機構を定量的に解析するために導入されたものであり、発泡のよい軽石など粒子密度が 1.0  $\text{g}/\text{cm}^3$  未満の粒子の測定にも対応できるように乾式ユニットも導入した。本教室には、（既存のものも含めて）湿式・乾式の粒子密度測定装置も入っている。火山砕屑物を対象にした乾式と湿式での粒子密度・粒径分布測定結果とその特性については別稿で行う予定である。

#### レーザー回折式粒度分析装置（SALD-3000S）

##### 1. 原理

レーザー回折式粒度分析装置の一般的な事項については、公文・志岐（1998）に説明されている。レーザー回折式粒度分析装置は、「粒子はその大きさに応じて、一定の角度で光を回折する」というフラウンホーファー回折と「波が、その波長に比べてあまり大きくない粒子に当たると粒子を中心として周囲に広がる散乱光が生じる」というミー散乱に基づいた粒度分布の測定装置であ

\* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

\*\* 島根大学大学院理学研究科地質学専攻 Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

る。実際には、水などの媒体内に測定試料を投入し、十分に攪拌された状態で、レーザーを透過させる試料セルに試料を送りこみ（ポンプで循環させ）、レーザー光の回折・散乱をセンサーで読み込み粒度分布に換算するということになる。ここで、注意しなければならないことは、ここで測定される粒径は、基本的に粒子の長軸ということになる。また、基本的に粒子体積頻度で測定される。

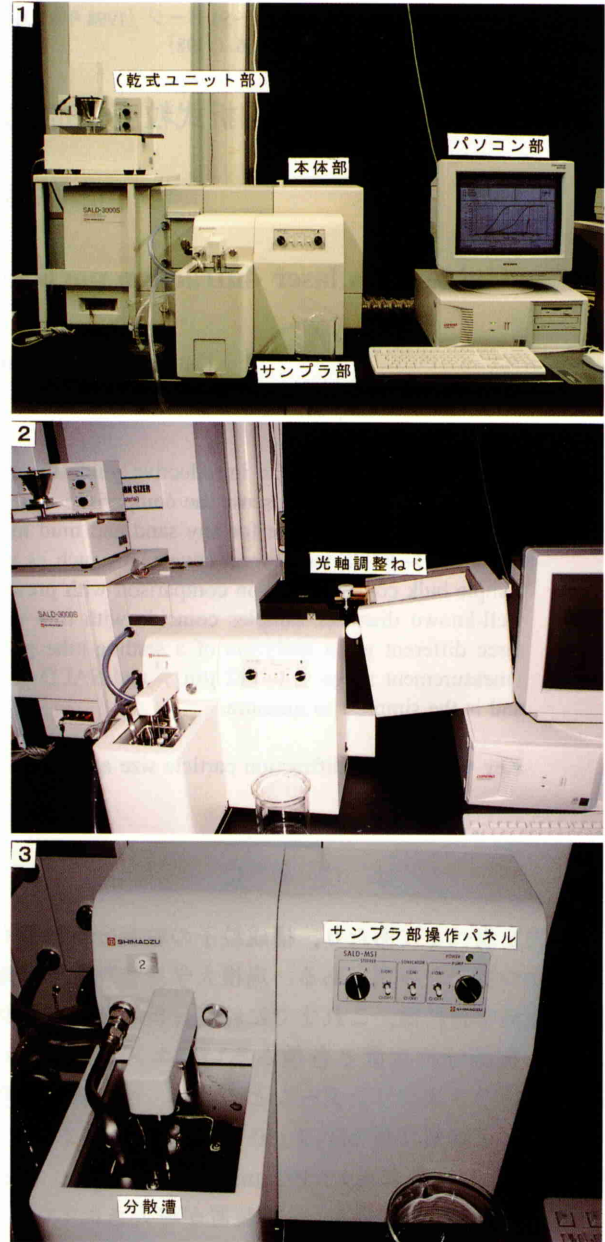
SALD-3000S の場合、試料セルを通過する試料に波長 690 nm の半導体レーザーを透過させ、その回折・散乱光の位置と強度を多層構造のセンサ（実際には 76 素子の翼型前方センサ、1 素子の側方センサ、2 素子の後方センサがある）で受信し、頻度分布に置き換えて表示される。Agrawal et al. (1991) は、この測定方法に関して、特に細粒部の信頼性に問題を指摘している。しかし、メーカー側も問題解決に対応できる技術開発と基礎資料を十分に得ている。本教室に既存のレーザー回折式粒度分析装置も含め従来のレーザー回折式粒度分析装置では、測定粒子径の上限は 500  $\mu\text{m}$  程度であったが、SALD-3000S では、収束レンズから前方センサまでの距離を十分とるなどして大粒径による微小回折も捕らえられるようにしている。実際、SALD-3000S が開発されるまでの段階で最も大きな粒径まで測定できた島津製 SALD-2000（測定範囲：0.03～2000  $\mu\text{m}$ ）の横幅が 71 cm であったのに対し、SALD-3000S では横幅 95 cm となっており、その幅の拡大は試料セル前方の収束レンズから前方センサ部までの距離を長くしたためと考えられる。

## 2. 操作方法

SALD-3000S は、レーザーやセンサの入った本体部、サンプルを攪拌し本体部に送り込んだり排出したりするサンプル部、それにこれらを制御し演算を行うパソコン部から構成される（第 1 図）。その他、オプションとしての乾式ユニットや集塵機もある。パソコンには基本的に測定・データ表示・データ管理などの標準機能の入った「Wing-1」がインストールされていればよい。他に多元処理機能の付いた「Wing-2」、統計処理や時系列処理といった拡張機能の入った「Wing-3」もある。さらに乾式ユニットを使用する場合は「WingSALD-3000S（ドライ測定用）」をインストールしなければならない。これらのソフトはウインドウズ 95 上での正常動作が保証されている。

標準的な測定手順は次のようにまとめられる。メーカーから提供されている標準操作の流れ図を第 2 図に示す。

① 本体部の電源を入れ、サンプル部の操作パネル（第 1 図 3 参照）上のスイッチが全て OFF されていること

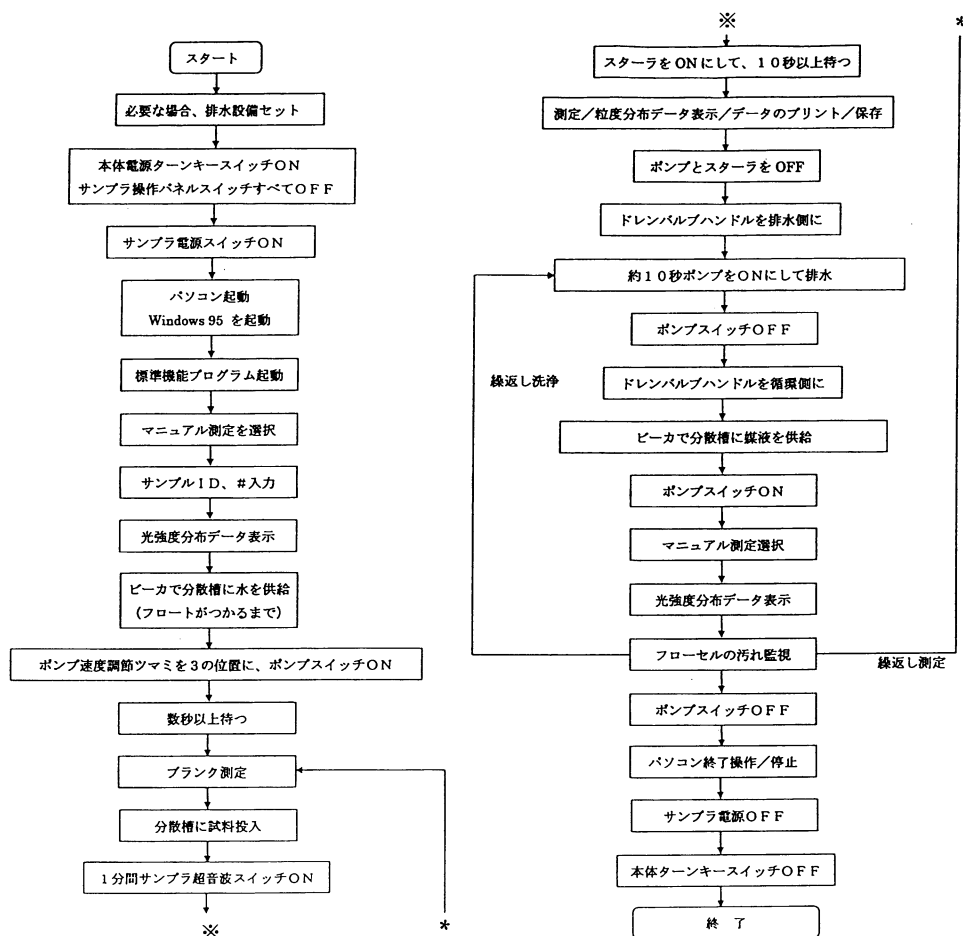


第 1 図 レーザー回折式粒度分析装置 (SALD-3000S)。1：全景。2：本体部右カバーを開いた様子、光軸調整ねじが 2 本認められる。3：サンプル部の拡大写真。サンプル部操作パネルには、左から順にスターラ、超音波洗浄機、ポンプのスイッチと速度調節つまみが認められる。分散槽の中央奥に見えている白いものが、超音波洗浄機の作動の可否を判断するフロート。

を確認した上でサンプル部の電源を入れる。

② パソコンを起動し、「Wing-1」を開く。

③ 第 2 図では、ここで「マニュアル測定」を選択となっているが、動作環境、特に光軸調整が正常であることを確認するため「診断・調整」を選択する。「マニユ

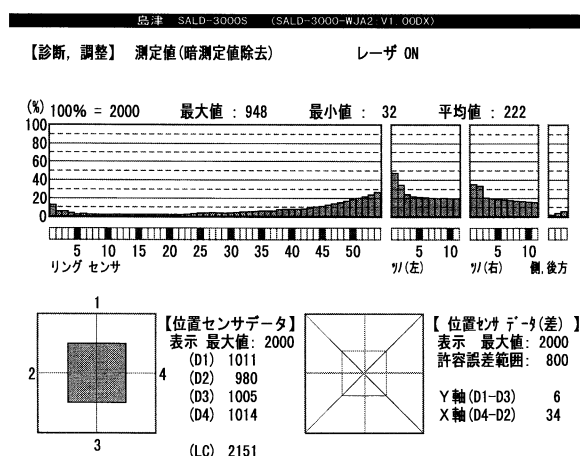


第2図 標準的な操作手順（取扱説明書による）。

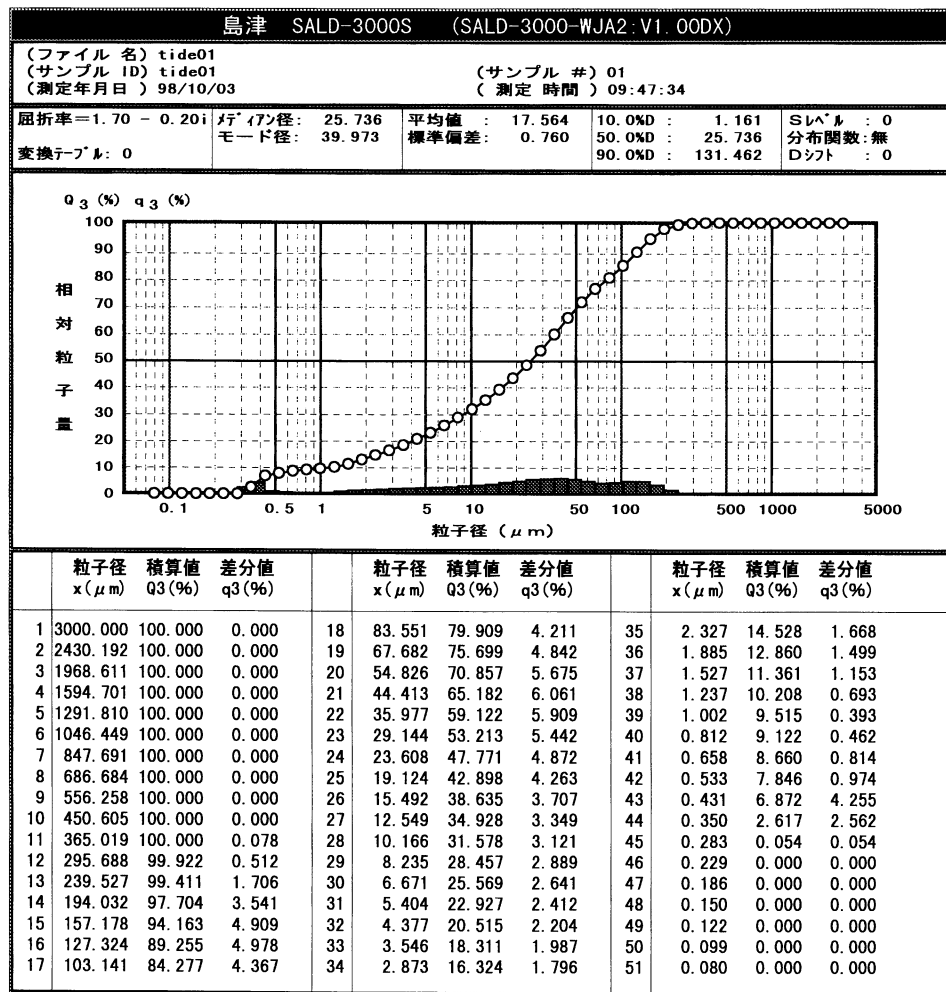
アル測定」を押しても「診断・調整」を押してもパソコンと本体部との通信が始まる。

④ 「診断・調整」で光軸（位置センサデータ）を確認する。許容範囲内であれば問題ない。第3図に「診断・調整」における画面表示（実際にはそれをプリントアウトしたもの）の例を示す。ここで光軸調整は、本体部の右カバーを開くと調節ねじがあり、それを回転させることによって可能である（第1図2）。サンプリング時間の関係で数秒以下のタイムラグがあるものの、ほぼリアルタイムで光軸調整が可能である。これは、教室に既設のレーザー回折式粒度分析装置の光軸調整が基本的にユーザーでは行えなかったこと（実際には診断用のフロジをメーカーから譲り受ければ、時間はかかるもののユーザーでも調整可能）と比較して、大変に容易であるといえる。

⑤ 「マニュアル測定」を選択し、サンプル番号などを入力する。すると光強度分布データが表示される。



第3図 「診断・調整」メニュー。光軸は、下の2つの正方形にモニタされる。本体部の光軸調整ねじを回すとそれに対応して左の正方形の中の網掛け部分、そして右の正方形内の縦線と横線が変化し、光軸の調整を行うことになる。



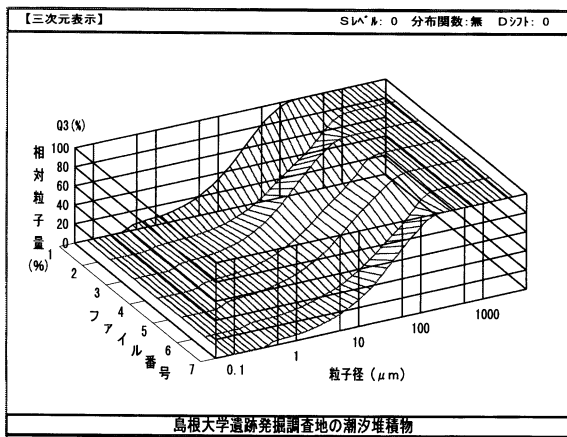
第4図 測定結果の例。

- ⑥ サンプラ部の分散槽に媒体（ほとんどの場合は水）を入れる。分散槽にはスターラとともに超音波洗浄作動の可否を判断する白いフロートがあるので、フロートが全てつかるまで水を入れる（第1図3参照）。
- ⑦ サンプラ部の操作パネルにおいて、ポンプ速度調節つまみを3以下のレベルにして（モーターに急激な負担がかからないようにするため）、ポンプスイッチを入れる。以下、ポンプやスターラのスイッチのON/OFFに関しては、同じ理由で速度調節レベルを下げて操作すること。
- ⑧ 数秒待ってからブランク測定を行う。ブランク領域内であれば、次の手順に入るが、そうでなければ⑪～⑬で述べる洗浄作業を行う。
- ⑨ 分散槽に試料（あらかじめ水で混濁液状にしたもの）を投入して測定を行う。ここで標準的な測定としては、1分間の超音波洗浄と10秒以上のスターラ攪拌が示

されている。しかし、試料によっては、それよりも長く超音波洗浄を必要とする場合もある。超音波洗浄が粒径分布にどのように影響しているかという例は、測定方法は異なるものの公文（1990）などに示されている。また、試料に応じてポンプ速度を上げる必要がある。マニュアルには「比重が小さく粒子半径が数十μm程度であればポンプレベルは4～5」と示されている。分散剤についても、マニュアルに標準的なものが示されている。

本装置の特色の1つとして光強度分布がほぼリアルタイムに表示され、適正な範囲であれば「測定領域」の文字も表示されることが挙げられる。このため適正な濃度の試料投与が大変に容易である。

「測定領域」となったところで「測定」を選択すると、粒度分布測定が行われ第4図に示すようなシートが得られる（出力データには、いくつかのフォーム選択が可能である。「第4図」はデフォルト状態で出力した）。



第5図 複数の測定結果を比較した例。これは、鳥根大学遺跡発掘調査に伴って露出した潮汐堆積物の砂質部（3試料）と泥質部（4試料）を粒度分析し、「Wing-3」を使って三次元表示させたもの。ファイル番号の1～7番は、厚さ10cm内に見られた砂質部と泥質部の試料を下位から順に並べたもの。「Wing-3」の三次元表示機能では、この三次元ブロックの観測点を変えたり、ファイルの間隔を柱状間隔に合わせて変える、あるいは、表示されている文字フォントを変えたりといった表現操作は不可能。基本的にこれを市販ドロソフトなどに落としてから表現に手を加えなければならない。

- ⑩ 測定結果を表示させたら、プリントアウト、保存を行い洗浄作業に入る。
- ⑪ ポンプとスターラのスイッチを切り、サンプル部の左に付いているレバーを「排水側」に回し、ポンプスイッチを再び入れ排水する。排水後、ポンプスイッチを切り、先のレバーを「送込側」に回し、分散槽に水を入れ、ポンプスイッチを入れる。
- ⑫ 「マニュアル測定」を選択し。光強度分布データを表示させる（ダミーのサンプル番号を入れればよい）。光強度分布が⑨の状態に比較し、かなり下がっていることが確認できる。しかし、⑪の一回の洗浄で全てのセンサでゼロまで下がることは殆どない。
- ⑬ ⑫の光強度分布データ（モニタリング）はそのままの状態にし、⑪の洗浄作業を3～4回行う。マニュアルでは10%前後の低レベルまで下がればよいとしているが、3～4回洗浄を行うと全てのセンサでほとんどがゼロまで下がる。この状態まで洗浄した後、CRT画面上の「キャンセル」を選択し、光強度分布のモニタを終了させる。
- ⑭ 測定試料が複数ある場合は、この状態から⑨にもどる。
- ⑮ ポンプスイッチを切り、パソコンを終了させ、サン

プル電源を切り、本体部の電源を切る。これで測定および操作を終了する。

必要に応じて、「Wing-2」や「Wing-3」を使い統計処理を行う（第5図に一例を示す）。

### 測定結果の比較

本装置の信頼性を確認するため既知粒径のガラスビーズと粒径分布の広いことが予想できる潮汐堆積物とみられる泥質砂～砂質泥（鳥根大学遺跡発掘調査で出現した完新世のもの）について各装置間の測定結果比較を行った。

#### 1. ガラスビーズ

標準ガラスビーズ（規格：2.25～2.50φ, 0.210～0.250mm）を沈降管式粒度分析装置と本装置とで各3回測定した。結果を第6図に示す。なお、このガラスビーズをSEM像で粒径の再チェックをしたところ、30粒子で粒径は0.202～0.264mm、30粒子径の平均粒径（算術平均値）は0.233mmであった。また、既設のレーザー回折式粒度分析装置は測定範囲が0.1～192μmであり、このガラスビーズの測定はできなかった。

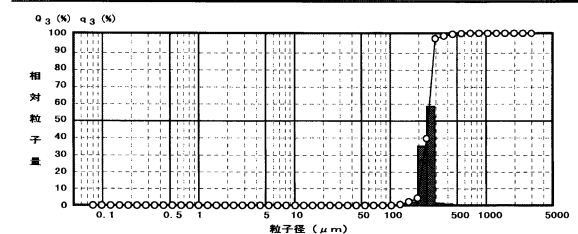
第6図からわかるように、SALD-3000Sでは、若干粗粒に、沈降管式粒度分析装置では若干細粒にシフトした値が得られた。しかし、いずれも10%未満のずれであり、筆者らとしては、両者とも再現性が良好なよい測定値であったと判断している。

#### 2. 泥質砂～砂質泥

ここで測定試料としてのものは、潮流によるベッドロー

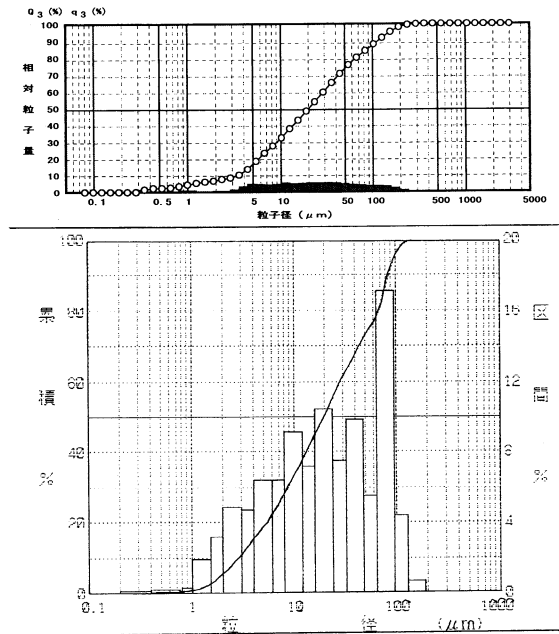
	測定回数	メディアン径	モード径	平均粒径	標準偏差	歪度	尖度
SALD-3000S	1回目	249.179	266.130	245.026	0.077	---	---
	2回目	242.890	266.130	238.809	0.082	---	---
	3回目	243.056	266.130	238.954	0.082	---	---
沈降管式粒度分析装置	1回目	---	---	227.50	0.49	-3.55	17.41
	2回目	---	---	222.00	0.60	-3.31	13.81
	3回目	---	---	213.50	0.25	-3.29	32.71

径の単位はμm、SALD-3000Sは体積累積曲線を基準として算定している。沈降管式粒度分析装置は重量累積曲線を基準としてモーメント法による算定をしている。



第6図 標準ガラスビーズの測定結果。上段の表は各3回の測定結果を示したもの。下図は、SALD-3000Sの3回目の測定における粒径分布図。

測定回数	メディアン径	モード径	平均粒径	10%径	90%径	標準偏差
SALD-3000S						
1回目	20.719	32.381	18.157	3.414	107.875	0.619
2回目	20.405	26.231	18.305	3.385	114.404	0.625
3回目	19.978	26.231	17.331	3.097	103.272	0.633
既設レーザー回折式粒度分析装置						
1回目	20.16	—	—	2.91	85.98	0.76
2回目	18.18	—	—	2.48	81.84	0.88
3回目	19.88	—	—	2.83	84.33	0.78



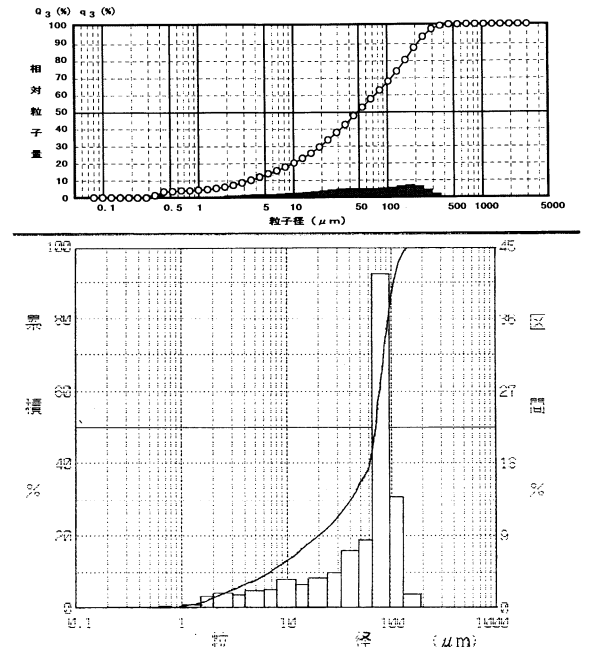
第7図 (砂質) 泥の測定結果. 既設のレーザー回折式粒度分析装置による測定値と本装置によるそれとはよく一致している. 上段は両装置を使つての各3回の測定結果. 粒径の単位は $\mu\text{m}$ . 中段は, SALD-3000S による2回目の測定結果の粒度分布. 下段は, 既設のレーザー回折式粒度分析装置による2回目の測定結果の粒度分布.

ドとして形成されたとみられる泥質砂(露頭観察では極細粒砂と判断できる)と「なぎ」の時に浮遊・沈降によって形成されたとみられる(砂質)泥である. いずれの試料も分散在としてヘキサメタリウム酸ナトリウム 0.2 wt% を加え, 1分間の超音波洗浄をしたものを投与試料とした. 以下は, 同一試料における測定結果であるが, 泥質泥と砂質泥の積み重なりに従った粒度分析結果は第5図に示している.

はじめに(砂質)泥を既設のレーザー回折式粒度分析装置(測定範囲 0.1~192  $\mu\text{m}$ )と本装置で各3回測定した. 測定結果を第7図に示す. 真の値は不明であるが, 筆者らとしては再現性がよく機種差も少なく, 両者ともよい測定結果を示していると判断する. なお, この試料は細粒であるため, 沈降管式粒度分析装置を使用することはできなかった.

次に泥質砂の測定を行った. ちなみにこの種の試料は

測定回数	メディアン径	モード径	平均粒径	10%径	90%径	標準偏差
SALD-3000S						
1回目	50.453	174.636	36.288	3.465	218.769	0.723
2回目	49.630	174.636	35.962	3.302	232.819	0.734
3回目	46.977	174.636	35.090	2.949	216.065	0.730
既設レーザー回折式粒度分析装置						
1回目	70.55	—	—	6.73	102.13	0.40
2回目	67.97	—	—	5.84	101.30	0.43
3回目	72.38	—	—	5.33	102.56	0.44
沈降管式粒度分析装置						
1回目	—	—	138.70	—	—	0.51
2回目	—	—	125.87	—	—	0.34
3回目	—	—	135.84	—	—	0.55



第8図 泥質砂の測定結果. 上段は3つの装置を使つての各3回の測定結果(沈降管式粒度分析装置では重量百分率をもとにモーメント法で解析しており, それ以外は体積百分率をもとにしている). 粒径の単位は $\mu\text{m}$ . 中段は, SALD-3000S による1回目の測定結果の粒度分布. 下段は, 既設のレーザー回折式粒度分析装置による1回目の測定結果の粒度分布.

粒径分布幅が大きく, 従来の測定装置で最も測定が難しかったものである. 試料に対して測定装置が適当であるかどうかの議論は別にして, この試料は SALD-3000S の他, 既設のレーザー回折式粒度測定装置, そして, 沈降管式粒度測定装置を使用し, 各装置で各3回の測定を行った. 結果を第8図に示す. 測定結果を見ると, 各測定装置毎では3回の測定結果が比較的一定しているものの, 全体としてみたときの差異は大きい. すなわち, 装置毎に得られる結果は大きく異なる. この理由については次の考察で述べる.

### 考 察

#### 1. 他の装置と比較しての SALD-3000S の特徴

ここで今回行った測定結果から, 泥質分のない堆積物は

であれば、ガラスビーズの測定結果からわかるようにSALD-3000Sと沈降管式粒度分析装置で、泥堆積物であれば、SALD-3000Sと既存のレーザー回折式粒度分析装置で精度の高い粒度分析測定が可能といえる。ただし、測定時間はいずれの場合もSALD-3000Sの方が短い。

今回の測定で最も慎重に考えなければならないのは、泥質砂の測定結果である。結論からいえば、この試料の場合、SALD-3000S以外の測定値は信頼性が低いといえる。もし、SALD-3000Sを使わないならば、泥質部と砂質部をあらかじめ分離しておき、それぞれを別々の方法（泥質部は既存のレーザー回折式粒度分析装置、砂質部は篩か沈降管式粒度分析装置）で測定しおいて「つなぎ合せ」作業を行うしかない。既に述べているように「つなぎ合せ」作業では精度が落ちてしまう。

沈降管式粒度分析装置の問題点は次のようにいえる。この装置の場合、試料投与用の円盤（詳しくは田村・中山（1993）参照）に試料を付着させる段階で、粒径偏在をしないようにさせることが難しい。その上、沈降粒子の集団効果により細粒子が単粒子沈降時に比較して大きな沈降速度を持つこともある（これは、軽く丸めたティッシュを載せた本を手を持ち、適当な高さから手放してみるとよく理解できる。ティッシュは本と等しい速度で落下する）。今回の測定で得られた平均粒径は「粒径が最頻出するモード径にいくらかの細粒部のバイアスのかかった値」といった定性的な評価しか与えられないのである。立ち戻って考えるならば、そもそも沈降管式粒度分析装置はGibbs式（Gibbs et al., 1971）をインストールしてあり、泥の様な細粒子の測定はできないのである。

一方、0.1~192  $\mu\text{m}$  を測定範囲とする既存のレーザー回折式粒度分析装置では、192  $\mu\text{m}$  以上の粒子を192  $\mu\text{m}$  と読み取ってしまうため測定結果が真の値を現さなくなっている。さらに、この装置については以前からポンプモータの出力の問題があり、実質的に数十  $\mu\text{m}$  より大きな粒子の測定はかなり難しかった。その問題とは、ポンプの出力が小さくて数十  $\mu\text{m}$  より大きな粒子をそれより細粒な粒子と均質を保って循環させることができないという問題である。試料セルに投与した試料が適当な濃度である時は、このことはあまり問題にせず測定できる。しかし、試料投与が多量で高濃度となった時、一部排水して水を加えて濃度を薄くすると、細粒部が選択的に流れ落ちてしまうのである。さらに、ポンプ出力が小さいため洗浄回数を多くしなければ数十  $\mu\text{m}$  以上の大粒子を排出できないという問題もあった。ちなみに、SALD-3000Sでは、ポンプを最大出力にした場合、径2 mmのガラスビーズも他の試料の時と同じように3~4

回の洗浄で（モニタを見る限り）完全に洗い流すことができた。

以上からして、SALD-3000Sは、いかなる泥・砂試料であっても十分な精度を持って粒度分析測定を行える装置と判断できる。繰り返しになるが、SALD-3000Sの最大の特徴は、その測定可能な粒子径の範囲が0.08~3000  $\mu\text{m}$  と極めて広いことである。

## 2. ユーザーからみた改善が望まれる点

現段階は本装置を導入した直後であり、測定もあまり多く行っていない。しかし、これまでの測定においてもユーザー（測定者）側からみたくつかの改善が望まれる点があるので、以下に示しておく。

第1にソフトウェアについてである。導入した装置には「Wing-1~Wing-3」までが入っている「WingSALD-3000S DX」がインストールされている。これで、測定は十分に行えるが、図表表現が論文に添付する図にまでは対応できない。その例については、第5図の説明にも一部示した。その他にも、2次元表現での多元処理した場合に各累積曲線に白黒印刷でも認識しやすいよう線の種類を破線や点線に変換したくなるわけであるが、それにも対応していない。メーカー側からすれば、市販ソフトにベーストして処理してもらいたいといったところかと理解できる。乾式測定用ソフトも含めてソフトウェアは決して安価なものではない。確かに販売できる数が限定されているが、よりレベルの高いソフトを期待してやまない。さらに、現在、SALD-3000Sには英語バージョンが準備されていない。これも早期に解決してもらいたい問題である。

第2にハードの問題である。この報告に示したように液体媒体で測定している限りにおいては、大変に便利な装置である。しかし、これを乾式ユニットにして測定しようとする大変に苦勞する。それは、乾式ユニット用の部品の取り替える時（特に湿式の試料セルを乾式測定ボックスに取り替える時）、止め具などの扱いが難しいことにある。これは、単純なハードのレイアウトで克服できる点が多いと判断できる。乾式ユニットを重視しない製品開発であったのではないかと疑わしくなることもある。

第3は本装置による測定を正式な分析規格として認定されるようメーカー側にも努力を望む点である。これについては私も含めて研究者も努力しなければならないのかもしれない。

第4はやはり価格の問題である。ソフトウェアのところでも述べたが、本装置をフルセットで購入するにはかなりの予算を要する。もっと安価になり、より広い分野

で使用されるようになると第3の問題も解決されていくのではないかと考える。

以上、ユーザーからみた改善点も述べたが、いずれにしても本装置がこれまでの粒度分析装置に比較して優れていることは明らかである。

#### 文 献

- Agrawal, Y. C., McCave, I. N. and Riley, J. B., 1991, Laser diffraction size analysis. In: Syvitski, J. P. M. (ed.) *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge Univ. Press, 119–128.
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D. and Link, D. A., 1971, The relationship between sphere size and settling velocity. *Jour. 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み合わ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.
- Komar, P. D. and Cui, B., 1984, The analysis of grain-size measurements by sieving and settling-tube techniques. *Jour. Sed. Petrol.*, **54**, 603–614.
- 公文富士夫, 1990, 泥質堆積物の粒度分析における超音波篩分析と比重計法の比較. 堆積学研究会報, **33**, 57–61.
- 公文富士夫・志岐常正, 1998, 機器分析による粒度測定. 公文富士夫・立石雅昭編, 新版碎屑物の研究法. 地学双書, **29**, 308–314.
- 田村嘉之・中山勝博, 1993, 沈降式粒度分析装置の使用法と分析結果の特徴. 島根大学地質学研究報告, **12**, 17–22.

(受付：1998年10月12日，受理：1998年10月20日)