

堆積物流体力学解析装置

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新妻, 信明 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000377

堆積物流体力学解析装置

新 妻 信 明¹

Hydrodynamic analyzer for sediments

Nobuaki NIITSUMA¹

Abstract The behavior of sand vary hydro-dynamically with the Reynolds Number range from 1 to 1000 for grain size and settling velocity, corresponding from laminar flow to turbulent flow. Hydrodynamic analyzer is newly developed using small inner diameter settling tubes, four sets of photo-detector, and computerized auto-handling and analysis, for the reconstruction of the sedimentary environments based on the special hydrodynamic characters of sand and sandstone. The four detectors can measure the changes in the settling velocities just after the sample is dropped and caused by the hydrodynamic interaction with small inner diameter tube.

The analyzed results are shown on the computer display during the analysis. The analyzer is enough compact to use at sampling field and field station. The photo-detector is composed of high luminous emission diode and phototransistor. Logarithm of the detected signal of phototransistor corresponds well with the amount of passing sand grains. The dispersion correction is made on the detected signal for the distances from falling position to detectors.

The glass beads experiments show that settling velocity can be converted to the grain-size using equations of Stokes, Allen, Karman and Newton. Two equations for the conversion are inserted into the four equations, based on the relation of the flow resistance and Reynolds Number. Using these equations, weight base contents are calculated from the detected signals.

The measurements using the new analyzer show following results. 1) The grains of beach sand from the surf zone have normal distribution for the settling time, not for the logarithm of the grain size. 2) The sandstone of the submarine fan-delta sedimentary sequence in the North Fossa Magna can be classified into five types using the grain-size distribution on the logarithm of the grain size and hydrodynamic behavior. 3) Special behaviors are detected in the hydrodynamic behavior for turbidites and sediments with strong bioturbations in the submarine fan-delta sedimentary sequence.

Key words; sand, grain-size distribution, Reynolds Number, hydrodynamic interaction, settling tube, settling velocity, beach sand, turbidite, bioturbation

堆積物解析の問題点

堆積物は、泥・砂・礫に3大区分できるが、堆積物を構成する粒子が水中を沈降する際に粒子周囲に生じる流れは、泥の場合には層流、礫の場合には乱流であり、砂の場合には Reynolds 数が1-1000と層流から乱流への遷移帯に当たる。この遷移帯は流体力学において最も興味深い領域であるが、砂の堆積物中に占める割合が大きいことは、この特殊な流体力学的特性として捉えることも

可能であろう。

堆積物としての砂の岩相は多様であり、堆積時の流体力学的特性を反映しているものと予測されるが、一般には中央粒径を基準にした粗粒・中粒・細粒砂と淘汰の良し悪し、砂よりも細粒な泥や粗粒な礫の混入度合いなどを利用して区分・記載を行っている。これらの区分・記載は、堆積時の流体力学的状態を知るための手掛かりとなるものの間接的であり、より直接的な解析法の確立が待たれている。

¹静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷 836

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: senniit@ipc.shizuoka.ac.jp

砂の流体力学的挙動には粒子の粒径・比重・粒形が総合的に働くため、粒径のみに頼る区分・記載法には限界がある。砂の粒径のみならず比重・粒形を総合した流体力学的特性を捉える方法としては、砂粒子の沈降速度を利用する方法があり、沈降法としてこれまでも使用されている。砂は、堆積時に単一粒子として挙動するのではなく、粒子群として供給・運搬されており、周囲の粒子と流体力学的相互作用を行っている。これらの相互作用についての情報を堆積物から解読できれば、堆積状態についての解析を飛躍的に向上させることが可能になる。粒子間の流体力学的相互作用を解析するには、堆積物全体の流体力学的解析が必要であるが、個別粒子と同様、沈降法が流体力学的解析に利用できる。

沈降法による堆積物の測定においては、試料投入による乱れが生じるほかに、沈降管内壁との流体力学的相互作用が起こる。堆積物を沈降させると、沈降速度の相異によって分離・拡散するために、流体力学的相互作用が変化し、沈降速度も変化する。この沈降速度の変化が、流体力学的相互作用を解析するための基礎資料として使用できる。

堆積物の流体力学的解析法

従来から堆積物の解析に沈降管を用いた測定が行われてきたが、沈降管との相互作用を避けるために、できるだけ大口径沈降管が使用されてきた (Gibbs *et al.*, 1971; Gibbs, 1972)。堆積物粒子が沈降する場合、沈降する粒子と同じ体積の水が上方に入れ代らなければならない。この粒子沈降を補償する上昇流は、沈降管径などの流体力学的特性に依存するが、沈降粒子群中に対流などを引き起こす。内壁との相互作用と沈降補償上昇流は、大口径の沈降管を使用しても存在するとともに、砂粒子周囲には層流-乱流遷移状態の渦が常に生じ、周囲の粒子に多大な影響を与えることから、本報告ではこれらの相互作用を定量的に測定し、堆積物の流体力学的解析に使用することを提案する。相互作用は沈降管径が小さければ小さいほど顕著なので、小口径の沈降管が有利となる。ただし、試料を沈降させるために、少なくとも試料粒径の数倍は必要である。相互作用の沈降管径による相異は、径の異なる沈降管を用いて比較測定することによって定量的に解析できる。

野外調査と密着した測定解析の重要性

測定用試料は従来、野外の地質露頭や堆積現場から採取され、実験室に持ち帰られて測定・解析がなされている。試料採取時に得られる情報は限られており、最適な位置から試料が採取されたかどうかは、測定・解析後に判明することが多い。しかし、その結果を基に、試料の再採取が行われることは稀である。測定機を野外に持ち出したり、野外の宿所に持ち込み、試料採取時あるいは採取した日に宿所で測定ができれば、その測定・解析結果に基づき、試料の再採取を行うことが可能になり、最適な試料採取による最良の測定結果を得ることができる。また、調査域を拡大する際の調査・試料採取方針の決定に重要な役割を果たすことが期待できる。この要請に答えるため、測定機の大きさは、野外に持ち出したり宿所に持ち込める程度で、性能が安定し、操作が簡便で、測定中あるいは測定直後に解析結果が表示・印刷などの形で得られることが望まれる。

従来、用いられてきた大口径沈降管を用いる測定には大実験室を必要としていたが、小口径沈降管による流体力学的相互作用を測定する装置であれば小型でこれらの要請に答えることができる。近年の電子部品・計算機の発達によって、小型で信頼性の高い装置によって計算機制御による自動測定が可能になってきている。これらの要請を満たす装置を考案・製作したので報告する。

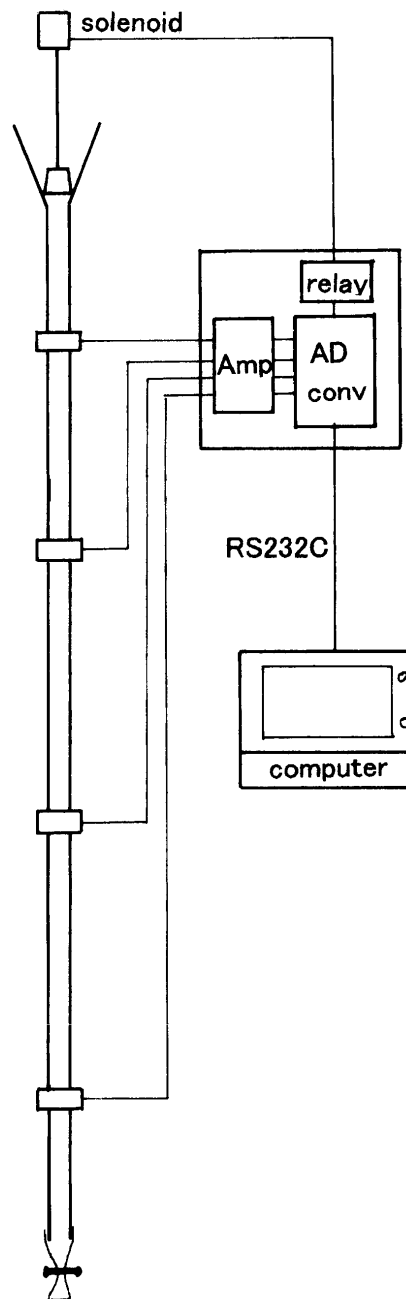


図1 堆積物流体力学解析装置の構成. Schematic diagram of hydrodynamic analyzer for sediments.

表 1 インク濃度に対する堆積物流体力学解析装置の遮光測定器出力. Quantitative responses of the photo-detectors of the hydrodynamic analyzer for sediments on the concentration of ink solution.

測定位置 detector	完全遮光出力(V) complete shaded	無遮光出力(V) no shade	インク濃度 concentration of ink				
			1	1/2	1/4	1/8	1/16
1	0.020	5.825	2.220	1.120	0.602	0.280	0.136
2	0.015	5.990	2.232	1.114	0.596	0.275	0.135
3	0.000	4.525	2.480	1.118	0.601	0.275	0.132
4	0.022	3.105	2.375	1.122	0.582	0.260	0.131

装置の概要

本装置は、流体力学的相互作用が期待される細い沈降管に遮光量測定器 4 個を設置して、降下粒子の遮光量を測定する。遮光量は RS232C 回線で計算機に送付する。試料投入部は、沈降管上部に切断・接着した径 6 cm のプラスチック製漏斗と試料止めゴム栓からなり、RS232C 信号による計算機制御でゴム栓を電磁石で引き上げて試料を投入する。計算機は、本装置用に Borland 社 Turbo C++ TCW5 によって開発された Windows 98 用プログラム Sed1 により、測定制御および測定結果の解析・表示を測定と同時に進行 (図 1, 2)。

本装置の遮光量測定部は、光源部と受光部から構成される。光源には高輝度緑色発光ダイオードを用い、供給電源は定電流ダイオードによって定電流化し、一定の光度を保持するよう配慮した。受光部にはフォトトランジスタを用い、受光量によって変化するトランジスタ電流を線形 IC 回路によって電圧に変換し、測定出力とする回路を作成した。

遮光量に対応する電圧は、ユニオンデータ社の Analogue /Digital 変換器 UAD-RC から RS232C 回線

によって計算機に送られる。この A/D 変換器の変換速度は 1 秒間に 12 回程度で、5 mV 分解能があり、切り換えながら 4 箇所での遮光量を測定する。

本装置は、同一遮光量測定器を装着した外管の内側に細い内管を挿入することによって、異なる径の沈降管における同一条件での堆積物沈降測定を可能にしている。用いた沈降管の内径は内管が 8 mm、外管が 12 mm で、長さはいずれも 750 mm である。外管について遮光量測定器の位置を任意に設定できるが、本報告における測定には 100・250・450・650 mm を使用し、赤・緑・青・紫色で表示した。内管挿入時には、試料投入位置が 3 mm 上方に移動するために、各測定器の距離は 3 mm 増加する。

Sed1 は、測定結果の解析において、遮光曲線を粒径の対数および沈降速度について選択でき、遮光曲線についても遮光濃度および遮光濃度から算出された重量濃度を選択表示できる。

測定時間は、試料の粒径組成によるが、5 分から 10 分を要し、測定結果は、保存ボタンを押すと、コマ区切りのテキストファイル (CSV ファイル) 形式で保存され、市販の表計算ソフトで読み出し・編集が可能である。保存

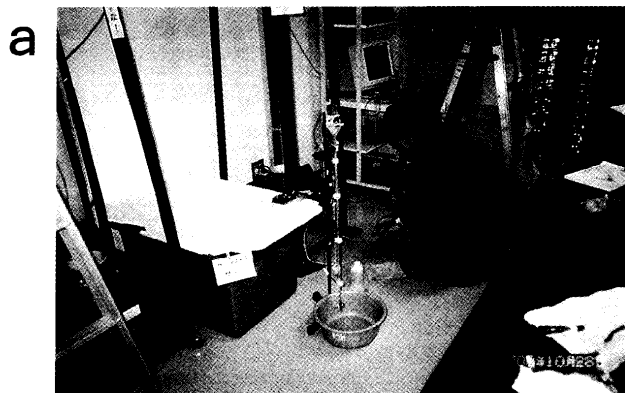


図 2 堆積物流体力学解析装置. Hydrodynamic analyzer for sediments.

- 信州大学理学部に設置されている大口径沈降管の前に置かれた堆積物流体力学解析装置と保柳康一博士. Comparing with large diameter settling tubes of Shinshu University.
- 長野県金熊川で採取された試料の宿所における測定. Analysis at the field station.

された CSV ファイルは, Sed1 によって, 測定時と同様に, 解析・図形表示・印刷が可能である。

本装置は, 試料採取のために長野県の北部フォッサマグナ地域を訪れた際に, 宿所の流し脇に搬入・設置され, 試料を採取した日に測定に使用され, その可搬性と測定性能の簡便性・安定性が確認された (図2b)。

試料濃度と遮光量

発光ダイオードの光を受けてフォトトランジスタ出力電圧がどのように変化するかを知るために, 沈降管に黒インクを数滴たらした水を入れて, 4箇所の遮光量測定器の出力を測定した (表1)。発光ダイオードの光を遮断した時のフォトトランジスタ出力電圧は, 4つの測定器では異なり, 0-22mV であり, 遮光量測定の際に, 出力電圧から差し引いた。黒インクの入っていない水についての出力は, トランジスタの特性によって 3.1V から 5.99V と測定器によって 2 倍に及ぶ差があるが, この無遮光時の出力の対数と黒インク液測定出力の対数との差を算出すると, 原液については 2.2 から 2.4, 半分に希釈すると 1.11 から 1.12, 1/4 で 0.58 から 0.60 とインク濃度に良く対応した値を示すことが明らかになったのでこの対数差を遮光濃度と呼ぶことにする。

遮光濃度の測定には, 発光ダイオード電流を切った完全遮光状態と無試料発光状態の基準光量を測定し, 基準光量の対数と測定光量の対数の差を算出する方式を採用した。この方式では, 基準光からの減光割合を測定するため, 発光ダイオードの輝度やフォトトランジスタの受光特性そして沈降管の汚れによる減光等の影響を受けず, 相互比較できる遮光曲線を得ることができる。

沈降に伴う遮光濃度拡散補正

沈降管に堆積物試料を投入して遮光量変化を測定すると, 各測定器の測定光範囲を沈降通過粒子が遮光する量が測定される。10 cm (赤)・25 cm (緑)・45cm (青)・65 cm (紫) に設置した測定器によって測定される遮光濃度曲線 I を, 横軸に試料投入してからの経過時間 T を取って表示すると, 最上位の測定器 (赤) から順次下の測定器に試料粒子が沈降する様子が示される (図3a)。ここに示す遮光曲線は, 細粒部を洗浄して除いた長野県金熊川の試料について 8 mm 沈降管を使用して測定したものであり, 下位測定器の曲線ほど遮光曲線 I の高さが減少していることが明瞭に示されている。

沈降速度が異なる粒子群が測定光範囲を通過する際には, 沈降距離に比例して, 粒子間の距離は増大する。4箇所の測定器は同一のものを使用しており, 測定光範囲は一定なので, 沈降距離が短い最上部の測定光範囲に同時に入っていた粒子も, 沈降距離が増加するとともに粒子間の距離が増大し, 下位の測定光範囲に入らなくなり, 遮光量 I は沈降距離に反比例して減少する。沈降距離の増大に伴う遮光濃度の減少を補正するために, 試料投入位置から各測定器までの距離と最上位 (赤) の測定器までの距離の比を各遮光濃度に乗ずる沈降拡散補正を施したところ, ほぼ同程度の高さになり, 沈降拡散補正についての仮定が成立していることが明らかになった (図3b)。今後, 遮光濃度については沈降拡散補正を施すこととし, 沈降拡散補正を行ったものを遮光濃度 L , あるいは遮光濃度曲線と呼ぶことにする。

図3bの横軸は沈降時間 T の対数であるが, 図3cは,

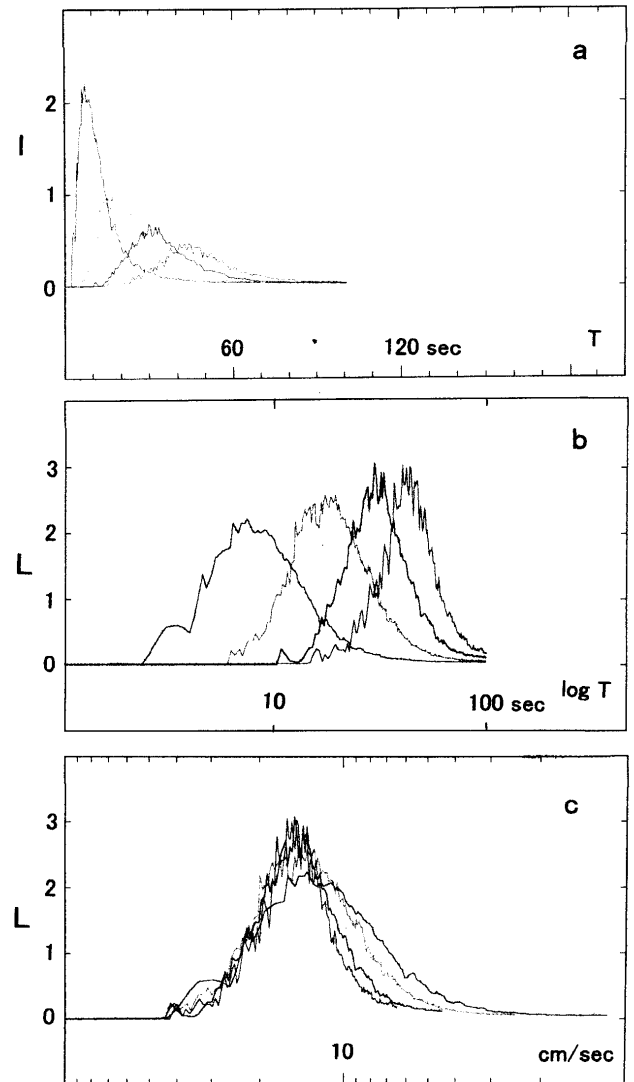


図3 遮光量の沈降拡散補正. Dispersion correction.

曲線の色は遮光量測定器距離に対応し, 赤 (10cm)・緑 (25 cm)・青 (45cm)・紫 (65cm). 試料は細粒部を除去した長野県北安曇郡金熊川の砂岩. The colors of curves are correspond to the position of the detectors as red (10cm), green (25cm), blue (45cm) and purple (65cm).

a. 縦軸は遮光量 I . 横軸は試料投入してからの時間 T (sec). 上位の測定器から順次, 試料が通過する様子が分かる. 上位の測定器による遮光量が大きい. Vertical axis [I] corresponds to the logarithm of the signal from the detector, relating to the amount of the grain shades crossing detector. Horizontal axis [T] corresponds to time. The signal of upper detector counts of the crossing grains earlier and higher.

b. 縦軸は測定器距離に比例する係数を乗じ, 沈降拡散補正をした遮光量 L . 横軸は試料投入後の時間 T の対数. 遮光曲線 L の高さがほぼ同じになり, 正規分布の形態をもつ. Vertical axis [L] corresponds to cross-area base concentration which is the corrected value for dispersion on [I] using the reciprocal of the detector position. Horizontal axis [$\log T$] corresponds to the logarithm of time [T]. The heights of curves are changed to be comparable after the dispersion correction.

c. 縦軸は沈降拡散補正をした遮光量 L . 横軸は沈降速度 (cm/sec) の対数. 4つの遮光曲線がほぼ同じになり, 重なり合う. Horizontal axis corresponds to the logarithm of the settling velocity, calculated from the time and position of the detector. All curves are well overlapped.

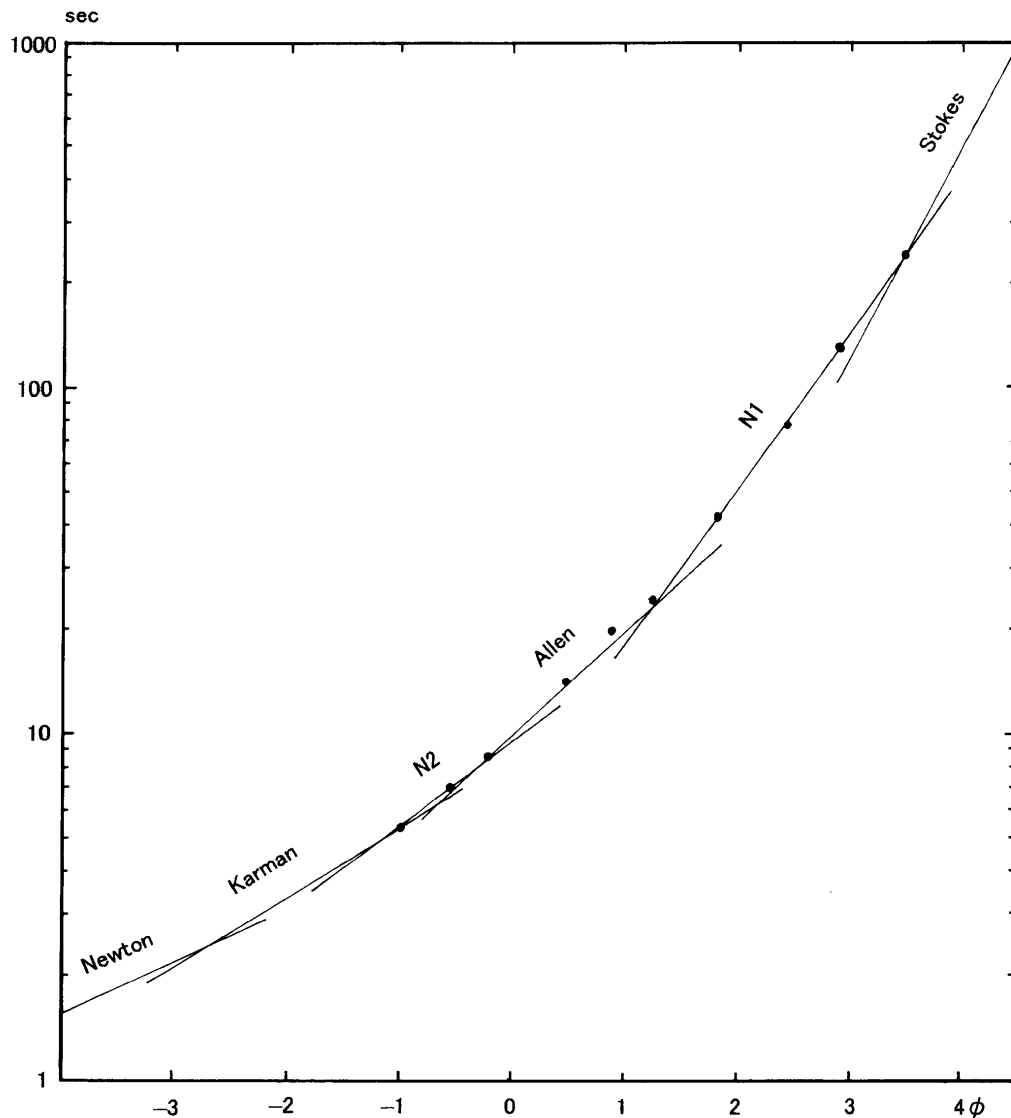


図4 粒径と140cm沈降時間の関係. Grain-size and settling time for 140cm.

線は、水温 15°C 、粒子比重 $\rho=2.513$ について表2のStokes, N1, Allen, N2, Karman, Newtonの式により算出したもの。黒点はガラス玉による実測値(新妻, 1971)。Lines of Stokes, N1, Allen, N2, Karman and Newton correspond to the equation in Table 2 for 15°C of water temperature and 2.513 of grain density. Points show measured values on glass beads (Niitsuma, 1971).

横軸を沈降速度 V の対数で取ったものであり、4つの曲線が良く一致しており、横軸に沈降速度を取ることが極めて有効であることが分かる。青・紫の下位2つの曲線は良く一致しているが、上位の緑、最上位の赤と系統的に峰の幅が低沈降速度側に広がっている。この系統的な変化は試料投入口に近い沈降管上部では試料粒子密度が高く粒子相互作用が大きいために沈降速度が減速し、45cm程度沈降するとこのような作用が小さくなるという粒子間相互作用の影響を判定することができる。

沈降速度と粒径

試料を投入し、沈降管に取り付けた測定器によって遮光量の経時変化を測定すると、試料粒子はそれぞれの沈降速度に従って測定位置を通過する。投入口から測定位置までの距離と測定時間から、試料粒子の沈降速度を正

確に求めることが可能であり、沈降速度が変化しなければ、横軸を沈降速度に遮光濃度曲線を表示すると、どの位置で測定した遮光曲線も同じになるはずである。もし、遮光曲線が異なっていれば、沈降過程で沈降速度が変化したことを判定することができる。以上のことから、流体力学的解析のために測定結果を表示するには、沈降速度についての遮光曲線を比較することが最も良い方法といえる。

Taira & Scholle (1977) は、沈降速度の対数 τ を堆積物の粒径解析に使用することを提唱した。しかし、水中における粒子の沈降速度は、水温によって変化することから、水温が異なれば τ 値は異なってしまう。沈降速度は水の粘性によって変化するので、水温と粘性係数の関係から粒子沈降速度を求めることができれば、任意の水温における沈降速度を算出することが可能になる。 -1ϕ から 4ϕ までの砂の粒径範囲における粒径と沈降

表2 粒径と沈降速度との関係式. The equations on the settling velocity and grain size.

沈降速度 = (2/3/C · 密度差/流体密度 · 重力加速度) ^G · 動粘度 ^N · 粒径 ^D							
cm/s		(2.64-1)/1	980cm/s ²	0.00897cm/s	cm		
equation		Stokes	N1	Allen	N2	Karman	Newton
parameter <i>n</i>		-1	-4/5	-1/2	-1/3	-1/5	0
constant <i>C</i>		12	14	5.5	2.33	1	1/5
parameter on force <i>G</i>		1	5/6	2/3	3/5	5/9	1/2 $G = 1 / (2+n)$
parameter on viscosity <i>N</i>		-1	-2/3	-1/3	-1/5	-1/9	0 $N = n / (2+n)$
grain size <i>D</i>		2	3/2	1	4/5	2/3	1/2 $D = (1-n) / (2+n)$
boundary (15°C)							
Reynolds Number		0.463	22.5		173	574	3134
grain size (ϕ)		3.47	1.23		-0.24	-1.20	-2.67
(mm)		0.090	0.426		1.18	2.30	6.36

速度の関係は、重力と粒子表面の摩擦力が釣り合っ等速運動をする Stokes の式の範囲から重力と慣性力が釣り合う Newton の式 (Impact の式とも呼ばれる) の範囲の間に存在し、沈降速度は粒径の 2 乗から 1/2 乗に急変する特殊な範囲となっている。この粒径範囲は、流体力学的には、粒子が沈降する際の周囲の水が層流状態から乱流状態に急変する範囲に当たっている。この領域においては、Allen の式と Karman の式が提唱されており、これらの沈降速度に関する測定結果を解析した鶴見 (1932) は、沈降速度を力・動粘度・粒径の項の積として表現する一般式を導き、それぞれの項のべき数を $G \cdot N \cdot D$ とすると、乱流状態の指標である Reynolds 数と沈降粒子に対する水の抵抗との関係と次数解析によって

$$G+N+D=1 \quad [\text{cm}] \quad 2G+N=1 \quad [\text{sec}]$$

の関係が成立することを明らかにし、報告されている実験結果から係数を求めて 4 式を定式化することに成功した。これら 4 式については、ガラス玉を用いた沈降実験によって確かめられている (新妻, 1971)。

沈降する粒子は、これら 4 式で算出される沈降速度の中で最も遅い沈降速度で沈降する。しかし、この 4 式ではそれらの中間域が不連続であるため、鶴見の定式化を利用して 2 つの新たな沈降速度の式 N1・N2 を今回挿入した (表2, 図4)。

この 6 式で算出される最も遅い沈降速度が実際の粒子の沈降速度となる。これらの式には、水温変化に伴う動粘度の項が含まれているので、任意の水温における沈降速度と粒径の関係を導くことが可能である。

砂の粒径範囲は、沈降速度が粒径の 2 乗から 1/2 乗に大きく変化するので、従来から用いられている粒径の対数 ϕ を横軸にし、その粒径から算出される沈降速度に従って遮光曲線を表示し、算出沈降速度も付すことにする。一般の水中堆積物は、粒径の対数に正規分布をするが、海岸砂のように沈降速度に正規分布する堆積物もあるので、Sed1 では横軸を粒径の対数の他に沈降速度の逆数も選択できるようにしてある。沈降速度の逆数としては、10cm 沈降に要する時間を秒数で表示する。

遮光濃度と重量濃度

遮光濃度 L は粒子断面積と粒子数に比例して増大するが、粒子断面積は粒径の 2 乗に比例するので、同一遮光濃度でも細粒の場合には粒子数は多く、粗粒の場合には粒子数は少ない。粒子の重量については、粒径の 3 乗に比例するために、同一遮光濃度においても、粗粒の場

合には重量が大きく、細粒の場合には重量が小さくなる。堆積物に対する流体力学的作用が粒子の表面積に対して働くか、粒子の重量に対して働くかは、個別に判定すべきであるので、粒径 2ϕ の断面積-重量関係を基準にし、遮光濃度 L を重量濃度 W に換算し、縦軸に遮光濃度と重量濃度を選択できるようにしてある。重量濃度は、 2ϕ よりも粗粒部については遮光濃度よりも拡大され、細粒部については縮小される。遮光濃度を用いた場合には遮光濃度曲線と呼び、重量濃度を用いた場合には単に濃度曲線と呼ぶことにする。

堆積物試料の測定

測定には汲み置きして室温と平衡にした水道水を用いた。測定は、完全に計算機制御されているので、本装置のために開発した測定駆動・解析プログラム Sed1 を読み出す。4 つの測定器位置を入力し、発光ダイオード電流を止めて完全遮光状態の出力を測定し、入力する。測定試料としては、小指爪半分程度の量を直径約 20mm の 5 cc スチロール棒瓶に入れ、試料が浸る程度に水を入れ、アクリル三角棒の先で潰して砂粒子を分散させる。棒瓶の 1/3 程度まで水を加え、蓋をして 3 分間超音波洗浄を行い、試料投入部に洗浄ピンを使用して入れる。計算機に水温を入力し、発光ダイオードによる無試料状態の出力を測定した後、試料投入・測定ボタンを押すと自動的に測定が開始され、刻々と 4 つの測定器の出力が計算機画面に表示される。終了釦を押すと測定が終了する。測定結果の表示においては、縦横軸の範囲を縮小・拡大できる他に、縦軸については、遮光濃度と重量濃度を選択でき、遮光濃度曲線あるいは濃度曲線を表示することができる。横軸については粒径の対数 ϕ の他に沈降速度についても表示できる。これらの表示図形は、印刷釦によって印刷できる。測定結果は、保存釦を押すと、コマ区切りのテキストファイル (CSV ファイル) 形式で保存される。保存された CSV ファイルは、Sed1 によって、測定時同様、解析・図形表示・印刷が可能である。測定後、試料は沈降管中の水とともに洗い流し、洗浄する。

沈降管における流体力学的相互作用および微細粒子の凝集

沈降管における沈降実験において起こる相互作用としては、1) 試料投入の際に、粗粒部が先頭冠 Front Cap を形成して落下し、沈降中に分散する現象; 2) 沈降粒

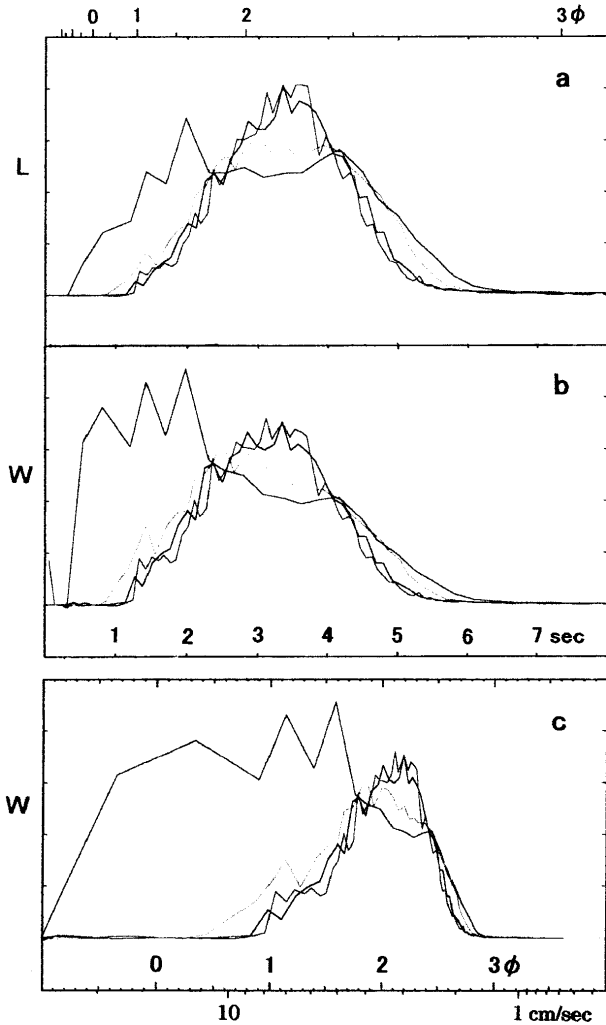


図5 銚子半島屏風ヶ浦海岸波打ち際の砂鉄。Measured results on the iron sand of surf zone at beach of Byoubugaura, Choshi Peninsula.

粒径の対数には正規分布せず、沈降時間（沈降速度の逆数、10 cm 沈降するのに要する時間）に正規分布している。曲線の色は遮光量測定器距離に対応し、赤（10cm）・緑（25cm）・青（45cm）・紫（65cm）。The grains of iron sand are normal distribution on the settling time for 10 cm, not on the logarithm of the grain size.

- 縦軸は沈降拡散補正をした遮光濃度 L 。横軸は10cm沈降に要する時間。Vertical axis [L] corresponds to cross-area base grain concentration. Horizontal axis corresponds to the settling time for 10cm.
- 縦軸は遮光濃度から換算して求められた（重量）濃度 W 。横軸は10cm沈降に要する時間 T 。Vertical axis [W] corresponds to concentration in weight base, based on the equations of settling time and grain-size.
- 縦軸は濃度 W 。横軸は粒径の対数 ϕ 、粒径に対応する沈降速度 V も示してある。Horizontal axis corresponds to the logarithm of grain size, accompanied with corresponding settling velocity.

子補償上昇流による対流と、対流前線 Convection Front の形成と分散する現象；3）微細粒子が凝集し、凝集前線 Coagulation Front の形成；4）粒子群と上澄みの境界、末尾 Tail の形成とその沈降；などがある。

これらの現象は、本装置において沈降速度および遮光量の変化として定量測定でき、これらの変化が管径の相異によってどのように変化するかも定量化することが可

能である。

海岸砂試料の測定

測定試料：千葉県銚子半島屏風ヶ浦テトラポット防波堤内側の波打ち際の砂鉄。

銚子半島屏風ヶ浦の波打ち際には波浪によって洗い残された砂鉄が斜交葉理を持って堆積している。この砂鉄についての 8 mm 沈降管による測定結果を、横軸を沈降速度の逆数（10 cm 沈降に要する時間 T ）とした遮光濃度曲線 L にすると（図6 a）、青・紫は T が 3.3 sec（沈降速度 30cm/sec）に極大を持つ細粒側に多少歪んだ正規分布型曲線となる。縦軸を重量濃度とする濃度曲線 W にすると歪のない正規分布型曲線になる（図6 b）。青・紫の下位 2 つの測定位置では殆ど同じ曲線を示すが赤・緑の上位 2 つの測定位置では系統的に粗粒側に大きく裾を引いている。この変化は沈降速度が沈降とともに減速していることを示しており、急激な試料投入による、試料の降下と、高粒子密度と補償上昇流による粒子の対流の影響による。

横軸を粒径の対数 ϕ 、縦軸を重量濃度 W で表示すると（図6 c）、細粒側に著しく歪んだ曲線となる。

海底扇状地堆積体試料の測定

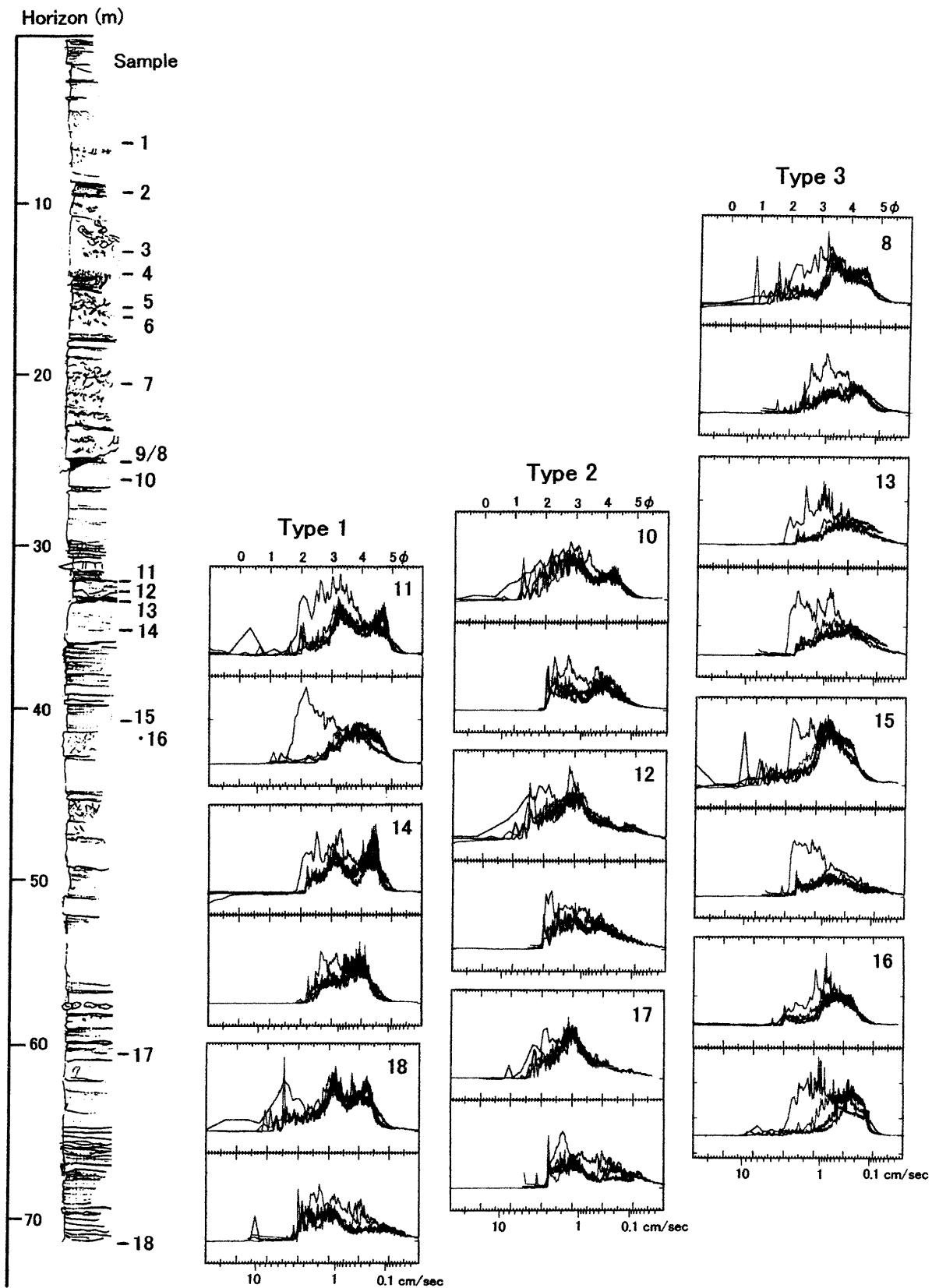
測定試料：試料採取地域は、長野県北安曇郡八坂村大姥山西方 1.5km、犀川支流金熊川流域の林道沿いの高府向斜南西翼部である。この地域の堆積物は、後期中新世小川層中部に当たり、深海成の泥岩・砂岩泥岩互層から浅海成の礫質砂岩へ遷移する岩相を持つ（図6）。この層準は、小川層上部に挟在する 6.1Ma の高桑凝灰岩（Niitsuma *et al.*, 2001）の約 250m 下位に当たる。この地域は、北部フォッサマグナ地域と呼ばれ、日本海拡大に伴って形成された開裂深海盆を陸域から供給された膨大な量の堆積物が海底扇状地を形成しながら埋積したと考えられており（志岐・立石, 1991）、下位より、深海成泥岩からなる別所層、青木層、小川層、浅海から陸成の柵層と埋積・浅海化の層序を有している。

これらの堆積物については、シーケンス層序学的検討が行われている（渡辺ほか, 1995）。本研究に使用した試料を採取した 70m の層準範囲は、シーケンス境界 SB1 を被う最大海進後の高海水準期堆積体とされる大陸斜面泥の上を被うファンデルタ堆積物下部に対比され、次のシーケンス境界 SB2 は高桑凝灰岩の層準付近にあるとされている。

対象とした層準範囲では上から 25m の層準で岩相は急変しており、この層準より上位では、生痕が著しく発達する砂岩・泥岩から構成され、細礫を含む砂岩もある。この層準より下位では、泥岩に葉理の発達する砂岩が挟在し、採取層準範囲下部では 2-10cm の厚さの砂岩泥岩互層となり、砂岩は泥岩の上面を一部削り込み、級化層理など混濁流の特徴を有している。

金熊川で採取した 18 試料について、内管・外管を用いた測定を行った結果、5 つの型に分けることに成功した（表 3, 図 6）。これらの型について、試料採取層準が下位から上位に向かい産出した順に 1 から 5 と番号を付けた。

分類は、下位 2 つの青・紫測定器による濃度曲線に現われる極大と極小を基準とし、3.0-3.5 ϕ あるいはそれより細粒部に主極大のある細粒なグループと、3.0-3.5 ϕ に極小のある粗粒なグループに 2 分でき、それらは更に、



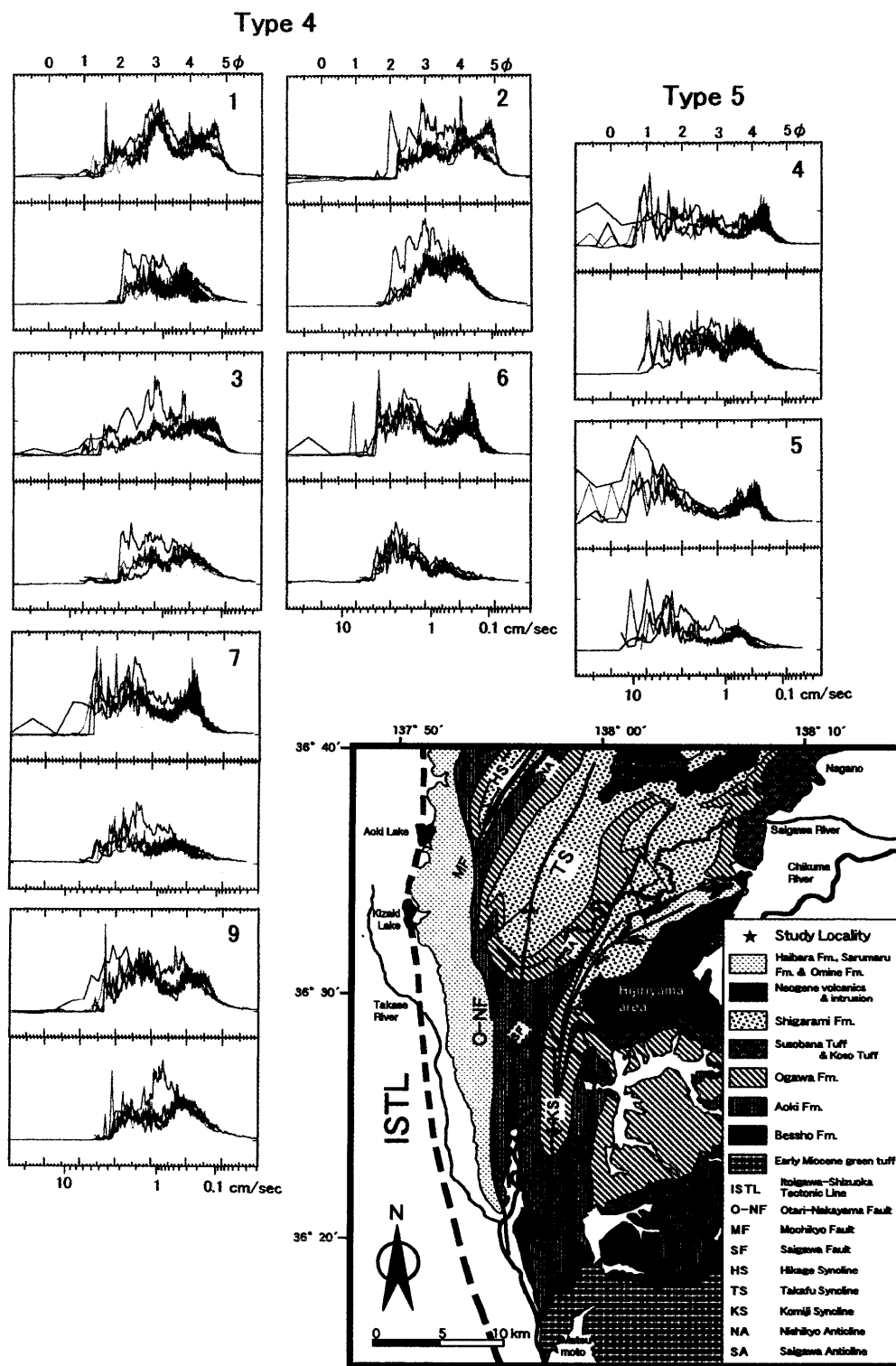


図6 長野県北安曇郡八坂村大姥山西方金熊川流域の小川層中部の地質柱状図・試料採取層準・濃度曲線・型区分. Sampling horizons, geologic columnar section, classification of type, and measured curves with hydrodynamic analyzer for sediments on Neogene submarine fan-delta sedimentary sequence of middle part of the Ogawa Formation, in North Fossa Magna, central Japan.

曲線の色は遮光量測定器距離に対応し、外管については赤 (10cm)・緑 (25cm)・青 (45cm)・紫 (65cm) であり、内管について3 mm長い、濃度曲線の横軸は粒径の対数φで対応する沈降速度も表示してある。各グラフ右上の数字が試料番号で、上のグラフが内径8mmの内管測定、下が内径12mmの外管測定結果。The colors correspond to the detector positions as red (10cm), green (25cm), blue (45cm), purple (65cm). The number at the upper right corner in upper graph is sample number. The upper graph is the measured result with smaller diameter settling tube with 8mm inner diameter, and lower graph with 12mm inner diameter.

表3 北部フォッサマグナ長野県北安曇郡金熊川流域の砂岩の型区分と濃度曲線の極大・極小流径(ϕ). 上欄が内径8mm, 下欄が12mmの沈降管. 括弧内の粒径は存在しない試料もある. Maximal and minimal grain size of the sandstone samples taken from Neogene submarine fan-delta sedimentary sequence of middle part of the Ogawa Formation, in North Fossa Magna, central Japan. Upper row corresponds to 8mm and lower to 12mm inner diameter settling tube. Grain size in parenthesis appears in not all samples.

型	試料数(番号) Type] number of samples(sample)	極大 maximal	[凝集極大]; [coagulation maximal];	極小 minimal
5]	2(5,4)	1.1-1.4 1.5-2.7	[4.1-4.4] ; 3.6-3.8	3.1-3.6 2.9-3.2
4]	6(7,3,1,6,9,2)	(1.4-1.7) 2.3-3.2 2.1-3.0	[4.2-4.9] ; 3.5-3.6 [3.8-4.0] ;	3.3-3.6 3.1-3.4
3]	4(15,8,16,13)	(1.6-2.4) (2.4)	3.4-3.5 ([4.1-4.6]) ; 3.5-3.6 ([4.1-4.3]) ;	2.6-2.8 (3.8) 2.7 (3.8)
2]	3(12,10,17)	2.8-3.1 2.3-3.0	([4.2]) ; 3.7 [4.0] ;	(3.6) 3.2-3.8
1]	3(18,11,14)	(1.5-2.1)	3.1-3.3 [4.4-4.8] ; 3.1 3.9 [4.0] ;	3.6-4.0 3.3-3.8

1・2・3型と4・5型に細分できる(表3). 細粒なグループでは最上部測定位置の赤曲線が明瞭な対流前線形成のために早期に立ちあがる特徴を示しており, 粗粒なグループでは4つの測定位置における遮光曲線が類似する特徴を有している. この分類に用いた極大・極小粒径は, 内管・外管(表3の上・下)ともにほぼ同じであった. 凝集極大は, 内管測定において顕著で, 1・4・5型において4.0-4.9 ϕ の位置に現われる.

1型

3.1-3.3 ϕ に主極大を持ち, 1.5-2.1 ϕ に副極大を持つ. 4.4-4.8 ϕ に凝集極大を持つ. 主極大は, 粒径の対数に正規分布する濃度曲線を示している. 4型と青・紫曲線に類似するものもあるが, 対流前線の形成が早く赤曲線が粗粒部に著しい極大を形成することが異なる. 内管では試料突入が赤測定部まで到達するが, 外管では側方にも拡大できるために赤測定部に到達するのに時間がかかり, 対流前線の形成が外管では遅れる.

2型

2.3-3.1 ϕ に主極大を持ち, 4.2 ϕ 付近に凝集極大を持つこともある. 対流前線による赤曲線の早期立ちあがり明瞭である. 内管では対流前線が次第に形成されるのに対し, 外管では明確な対流前線が形成され, 赤曲線の急激な立ち上がりとなる. 先頭冠は形成され多少加速するが, ほぼ等速で沈降管下部まで沈降する. 外管の内径が先頭冠形成維持に適合しているためにこのような差が生じるものと考えられる.

3型

3.4-3.6 ϕ に主極大を持つことを特徴とし, 1.6-2.4 ϕ に小さな副極大を伴う. 対流前線による赤曲線の粗粒部極大が著しい. 内管・外管ともに, 対流前線形成により赤曲線が早期に立ちあがる様子は同じであるが, 対流による同一粒子の遮光によって赤測定部の遮光が内管よりも外管において著しい. 外管径が対流維持に適合しているからであろう.

4型

2.1-3.2 ϕ に主極大を持ち, その粗粒側で1.4-1.7 ϕ の副極大に連続することを特徴としており, 4.2-4.9 ϕ に凝集極大を持つ. 凝集極大と主極大の間には3.1-3.6 ϕ に極小が存在する. 凝集極大を除いて, 4つの測定位置でほぼ類似する遮光曲線を与える.

5型

1.1-2.7 ϕ に主極大を持ち, 4.1-4.4 ϕ に凝集極大を持つ. 主極大と凝集極大の間の2.9-3.6 ϕ に極小を持つ. 凝集極大を除いて, 4つの測定位置でほぼ類似する遮光曲線を与えるが, 外管では試料投入時に側方に広がるために減速し, 沈降とともに加速するが, 内管では広がることができず最上部測定位置まで試料が突入することから差が生じる.

測定結果についての流体力学的考察

海岸砂

海岸砂は, 2 ϕ に単一極大を持つが, 粒径の対数に対して正規分布型の濃度曲線をもたず(図5c), 沈降速度の逆数である沈降時間に対して正規分布型の濃度曲線を持つことから明確に判定することが可能である(図5b). この砂は押し波・引き波によって巻き上げられた砂粒子が堆積するか, 運び去られるかという淘汰過程を常に受けていることを反映していると言えよう. 濃度曲線の極大に当たる沈降速度は3cm/秒であり, 試料を採取した海岸は防波堤の内側で, 直接の波浪は蒙らないことから, この沈降速度が堆積物上面の流速に対応していることが予想される. 測定される正規分布の中央沈降速度が, 砂鉄の運搬時の流速に依存しているのか, 他の粒子が除去されて淘汰される時の流速に依存するののかについては今後の検討が必要である. 波打ち際の海岸砂についての沈降時間に対する遮光曲線が正規分布型であることは, 新妻・目加田(1972)において仙台湾の海岸砂について報告されており, 波打ち際の海岸砂について一般的な特徴といえよう.

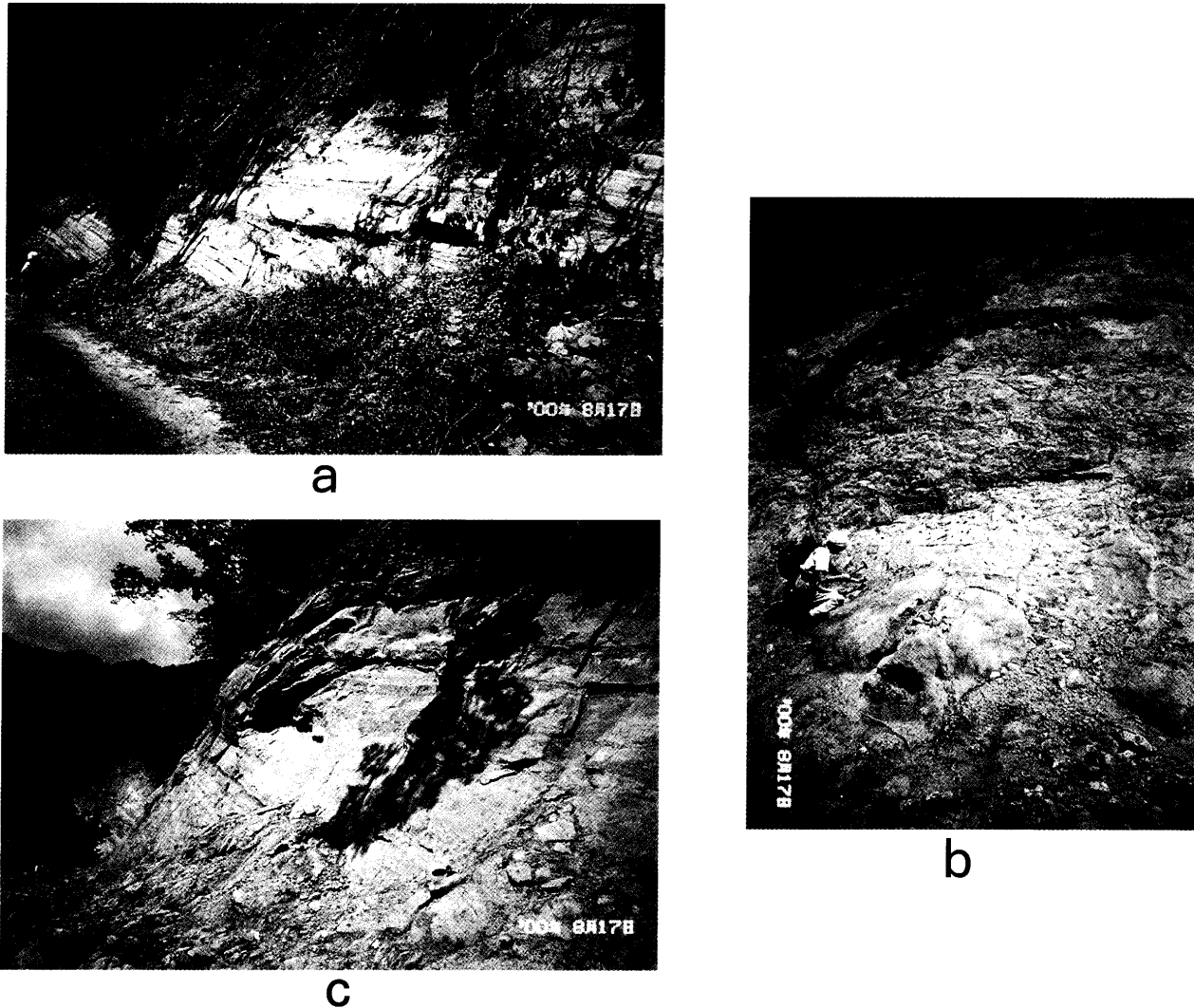


図7 長野県北安曇郡八坂村大姥山西方金熊川流域林道における試料採取層準下部の砂岩。The outcrops of Neogene submarine fan-delta sedimentary sequence of middle part of the Ogawa Formation, in North Fossa Magna, central Japan.

a. 成層した砂岩露頭。層準55mから70mまでの範囲で、試料17・18(1・2型)が採取された。Stratified sandstone sequence in horizon from 55 to 70m. Sample 17 of Type 2 and sample 18 of Type 1 were collected.

b. 塊状砂岩(試料10; 2型)の上位に葉理の発達する砂岩(試料8; 3型)があり、その上を生痕が顕著に発達する砂岩(試料9; 4型)が重なる。層準18mから27mの範囲で、採取しているのは試料9。Sequence of the massive sandstone (sample 10 of Type 2), laminated sandstone (sample 8 of Type 3) and bioturbated sandstone (sample 9 of Type 4) from lower to upper in the horizon 18-27m. The sampling horizon is sample 9.

c. 小礫を含み、下位の砂岩(試料6; 4型)を削り込み斜交葉理の発達する砂岩(試料5; 5型)。層準10mから25mの範囲。Cross-laminated sandstone with pebble (sample 5 of Type 5) cuts underlying sandstone (sample 6 of Type 4) in the horizon 10-25m.

海底扇状地堆積体

北部フォッサマグナの海底扇状地堆積体についての測定によると、細粒グループと粗粒グループに2分でき、それらが更に5つの型に区分できることが明らかになった。

1・2・3型の細粒グループの試料は、柱状図の25.1mの層準より下位に、4・5型の粗粒グループは上位にしか産出しない(図6)。このグループの変化は、25.1mの層準において堆積場の流体力学的な状態が急変したことを示している。

この層準よりも下位では、生痕は殆ど発達せず、成層構造が明瞭であり、下部ではタービダイト砂岩として挟在する(図7a)。砂岩には平行葉理が発達するものと塊

状のものがある。平行葉理が発達する薄いタービダイト砂岩は1型、50cm以上の厚さで塊状ないし不規則な葉理の砂岩は2型、葉理が発達する10cm程度の砂岩は3型に属し、それぞれ異なった流体力学的状態のもとに運搬・堆積したことを物語っている。これら全ての砂において試料沈降時に細粒部が一体となり対流前線を形成して対流を継続し、上部測定器の濃度曲線粗粒部に極大を形成することは、これらの砂が個々の粒子として供給されたのではなく、混濁流として供給されたことを示唆している。

この層準よりも上位は、生痕が良く発達する砂岩であり(図7b)、斜交葉理を持ち、礫を混入する層準もある(図7c)。粗粒グループの砂において、礫が混入し、下

位を削り込み斜交葉理の発達する砂岩は5型に属し、生痕が発達する塊状な砂岩は4型に属する。両型ともに3.0-3.5φに極小を持つことは、この極小粒径の沈降速度である1cm/秒程度の底層流によって堆積物が選択的に洗われていたことを示唆している。生痕の著しい発達は、この堆積場が生物活動に適していたことを示しているが、生物による攪乱が極小形成に重要な役割を果たしたことも予測される。生物攪乱によって堆積物粒子が水中に放出されれば、底層流による淘汰・運搬が効率的に行われる。沈降管の4位置での濃度曲線に差が見られないことは、底層流のある海底で生物によって繰返し攪乱、放出され、個々の粒子が淘汰されたことを示唆している。凝集極大の形成は、生物活動に必要な有機物とともに運搬された微細粒子と関係しているであろう。

沈降管径による相異

海底扇状地堆積体については、内径8mmの内管と内径12mmの外管を用いて測定を行った結果、以下のような相異が測定された。

外管においては、先頭冠と沈降補償対流前線が10cmの測定器では区別できないが、内管では区別でき、試料投入による試料突入が内管では短距離で遮られ、先頭冠と対流前線が分離するが、外管では分離しないためである。

沈降補償対流の規模は、外管が大きく、内管は小さいが、対流が沈降粒子の粒径分布を乱す規模で発達すれば試料の粒径組成をおおひ隠し、問題がある。内管の方が対流の規模が小さいので堆積物粒径組成に対応しやすい。

細粒粒子は水中で凝集し、大きな粒子となるが、凝集した粒子の沈降速度は凝集前の沈降速度から変化する。凝集によって末尾が明瞭に形成されるのは、ある粒径より細粒であれば、沈降速度が増大するためであるが、より粗粒な粒子については、表面が不規則な形態になり、摩擦抵抗が大きくなり、沈降速度が減少することもある。内管では、対流層が限定されて形成され、その上部に凝集層が形成されるが、外管では対流層が大規模に発達するためにこの区別が不鮮明になることと、内管では狭い範囲に凝集する粒子の密度が高いために凝集の程度が高いという相異がある。

まとめ

1. 砂は堆積物中で特殊な流体力学的位置を占めており、その解析には沈降法を用いる必要がある。
2. 沈降管と堆積物試料との流体力学的相互作用は、流体力学的解析に重要な情報を与えてくれる。
3. 砂の流体力学的解析には、相互作用の大きい細い沈降管が有利である。
4. 沈降管との相互作用を解析するために、遮光量測定器を細い沈降管の4箇所に設置し、沈降に伴う沈降速度の変化を測定できる装置を製作した。
5. Windows 98用の測定制御・解析・表示・印刷・結果保存のためのプログラムを開発した。
6. 開発された装置は小型で信頼性が高く、野外調査の宿所に搬入・設置・測定に十分な性能を発揮できることが確認された。
7. 遮光量測定器の出力と沈降粒子の遮光量・濃度について定量化することに成功した。
8. 水中における沈降粒子の粒径と沈降速度について、Stokes・Allen・Karman・Newtonの式に加え、2

つの式を導入し、砂の粒径範囲の沈降速度を算出することに成功した。

9. 海岸波打ち際の砂は、沈降時間に対して正規分布する粒径を有している。
10. 海底扇状地堆積体については、5つの型に区分することができ、それぞれの型と岩相との関係、流体力学的相互作用の検討によって、混濁流により供給された堆積物であるか、底層流と生物攪乱によって淘汰された堆積物であるか判別可能であることが示された。

謝 辞

地質学会・堆積研究会において本装置について多くの方々に討論していただき、装置の開発・測定結果の処理について貴重な示唆を得ることができた。特に東京大学海洋研究所の平朝彦博士には沈降法による堆積物解析について討論いただき、本装置の名称についてもご意見をいただいた。信州大学理学部の保柳康一博士には堆積物解析法について討論いただくとともに、長野県の北部フォッサマグナ堆積体のシーケンス層序について現地において討論いただいた。

本装置の試作の出発点となった遮光測定部の作成は、静岡大学理学部における2000年度前期の「地球生物圏進化学実験Ⅰ」の課題として取り上げられ、電子部品の選定・購入・回路試作には履修生の渡辺聡氏が貢献した。

本研究は、文部省科学研究費補助金萌芽的研究「自動粒度分析機によるシーケンス層序の流体力学的解析」(課題番号10874070)によって行われたものである。

本報告をまとめるに当たり、静岡大学教育学部地学教室の大塚謙一博士・理学部地球科学教室の生形貴男博士には査読をお願いし、また、Mudhusoodhan Satish-Kumar博士には英文の校閲をいただくとともに沈降管の製作を手伝っていただいた。

以上の方々に御礼申し上げる。

引用文献

- Gibbs R. J., Matthews M. D. & Link D. A. (1971), The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, **41**, 7-18.
- Gibbs R. J. (1972), The accuracy of particle-size analysis utilizing settling tubes. *Journal of Sedimentary Petrology*, **42**, 141-145.
- 鶴見一之 (1932), 沈降速度の理論及実験. 土木学会誌, **18**, 1059-1094.
- 新妻信明 (1971), 自動粒度分析機—堆積物解析用として. 東北大学理学部地質学古生物学教室邦文報告, no. 72, 23-36.
- 新妻信明・目加田義正 (1972), 自動粒度分析機による堆積物の解析. 岩井淳一記念論文集. 201-208.
- Niitsuma S., Niitsuma N. & Saito K. (2001, in press) *The Island Arc*.
- 志岐常正・立石雅昭 (1991), フォッサマグナオラーコジン説について. 上田誠也教授退官記念論文集—活動的縁辺域一, 月刊地球, 号外3, 106-112.
- Taira A. & Scholle P. A. (1977), Design and calibration of a photo-extinction settling tube for grain size analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, **47**, 1370-1360.
- 渡辺大輔・西村瑞恵・保柳康一 (1995), 相対的海水準変動に支配されたファンデルタシステムの堆積シーケンス—北部フォッサマグナ長野県地域の中新統・鮮新統一. 地質学論集, **45**, 189-207.