

火山碎屑物の沈降速度とその意義

増本 亜紀*・中山 勝博**

Settling velocity of volcanoclastics and its significance

Aki Masumoto* and Katsuhiko Nakayama**

Abstract

Volcanoclastics falling velocity is estimated by measurements with settling tube. Samples are obtained from the Pliocene Ohtani and Souri volcanic ash layers in the Tokai Group. In terms of content, volcanic glass and pumice predominate in these layers. In the Ohtani volcanic ash, mean specific gravity of volcanic glass is 2.25 which is higher than that of pumice (1.15). In the Souri volcanic ash, mean specific gravity of volcanic glass and pumice suggests 2.25 and 1.50 respectively. Particle falling velocity of the Ohtani and Souri volcanic ash can be described by following formulas.

$$Cd=26+24/Re, W=[-9 \eta + \{81 \eta^2 + 156 \rho a^3 (\sigma - \rho) g\}^{0.5}] / 39 \rho a$$

$$Cd=3.4+24/Re, W=[-18 \eta + \{324 \eta^2 + 81.6 \rho a^3 (\sigma - \rho) g\}^{0.5}] / 10.2 \rho a$$

where σ and ρ are the particle and fluid densities respectively, g is the acceleration due to gravity, η is fluid dynamic viscosity, Re is grain Reynolds number, a is the particle radius, Cd is non-dimensional drag coefficient, and W is the falling velocity. These formulas mean the transition to turbulence is promoted at a lower Reynolds number than for the corresponding smooth spherical particles. More poorly sorted bed-forms can be explained by these formulas, which suggest that more varied grains in diameter can be deposited under a small range of falling velocity.

Key words: settling velocity, volcanoclastics, drag coefficient

はじめに

粒子の沈降速度の研究は、古くは Stokes(1851)や Rubey(1933)などからはじまる。基本的に粒子は、媒体中で粒子にかかる重力と摩擦力がつり合い、最終的には等速沈降していくことが知られている。この時、媒体や粒子密度などの条件が一定であれば、粒子がある程度大きくなると乱流の効果によって、粒径の増大に対する沈降速度増加分が小さくなる。そこで、実際に粒子の沈降を測定し回帰させ、粒径と沈降速度の関係が与えられている。この関係式は土木工学会編(1985)などに示されるように従来より数多く提案されてきている。これらの公式で普及度の高いものに Gibbs et al. (1971) による公式(ギブスの公式と呼ぶ)があり、島根大学地質学教室に設置されている沈降式粒度分析装置(伊勢屋, 1985;

田村・中山, 1993)においてもギブスの公式が粒度分析解析用の公式としてインストールされている。

しかし、ギブスの公式も含め、ほとんどの沈降速度の公式は表面の滑らかな球粒子を前提としたものである。球以外の粒子の形状、表面粗度が沈降速度に及ぼす影響については Allen(1984)にレビューされているが、これまでの研究では、発泡した火山ガラスなど特異な形状の火山碎屑物の沈降速度を的確には表現できない。たとえば、Cole and Stanley(1994)などでは、よく発砲し細片化したプレート状の火山ガラスの沈降に対し、Komar and Baba(1984)の雲母粒子の沈降速度式を適用し、運搬・堆積作用を議論している。

一方で、火砕流などの火山活動と直接結び付いた災害とともに、土石流といった火山碎屑物の雨水や河川水による2次移動による災害発生が社会問題となっている現状がある。短時間で爆発的な火砕流に比較して、ニュース性には劣っているとされるものの、一度噴火に伴って堆積した火山碎屑物は、その後長期間に渡って2次移動による災害をもたらすことを忘れてはならない。

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

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

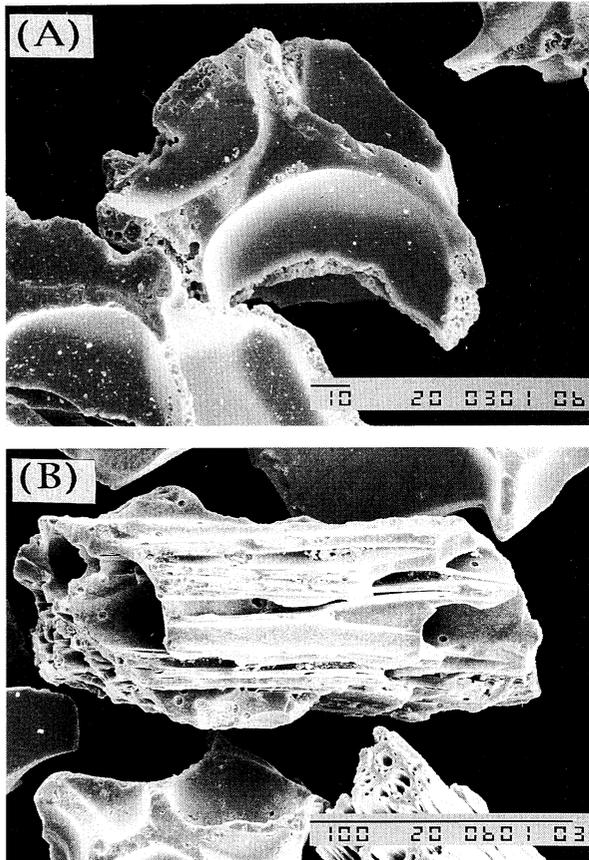


Fig. 1. SEM photomicrographs of the glass shards. (A): the Ohtani volcanic ash. The scale is 10 μm . (B): the Souri volcanic ash. The scale 100 μm .

火山碎屑物にどのような2次移動が起こりえるかを防災の観点から予測する意味においても、火山碎屑物の運搬・堆積過程をより定量的に明らかにする意味においても、直接火山碎屑物の沈降速度を測定し、沈降速度式を導くことは必要不可欠である。

本研究では、2つの異なる火山碎屑物を対象に、それぞれの沈降速度曲線を沈降チューブを使った測定から求め、その曲線の意義について考察する。

測定対象

本研究で対象とした火山碎屑物は東海層群中にはさまれる大谷火山灰層と佐布里火山灰層である。東海層群は中部日本の伊勢湾の丘陵に分布する後期中新世～前期更新世の河湖成層である。このうち伊勢湾東岸の東海層群には数多くの降下火山灰やその2次移動堆積物がはさまれ、直径が2 cm を越える軽石が多量に含まれる堆積相が認められるものとして対象の2層がある。

両火山灰層の記載岩石学的特徴は中山・古澤(1989)にまとめられている。それによると大谷火山灰は火山ガラスと軽石と極少量の結晶からなり、火山ガラスは丸く発泡した型(Fig.1 A)が多く、その屈折率は1.4968~1.4999、

重鉱物として黒雲母まれにジルコンがあるとされている。佐布里火山灰層は火山ガラスと軽石と少量の結晶からなり、火山ガラスは繊維状に発泡した型(Fig.1 B)が多く、その屈折率は1.4979~1.4997、重鉱物としては黒雲母と角閃石が優勢で他に斜方輝石やジルコンがあるとされている。

なお、大谷火山灰層相当層は、岐阜県中津川付近で火砕流堆積物が認められている (Nakayama et al., 1994) 上、新潟県や富山県にも分布する (黒川・富田, 1995)。黒川・富田(1995)は、その火山噴火は中部山岳地域での活動と推定している。佐布里火山灰層については噴出源等まだ明らかにされていないが、筆者らは現在その堆積相解析を進めており、大谷火山灰層同様、中部山岳での噴出の可能性を考えている。

筆者らが、この2つを測定対象としたのは次の3つの理由による。第1に両火山灰層とも、構成している火山碎屑物がある特定の形状をした火山ガラスと軽石からなり、混合2粉体モデルとしてとらえやすいことである。第2に両火山灰層は東海層群において極めて連続がよく、沈降速度曲線から考えられる堆積モデルと実際の堆積相との検討が容易であることである。第3点は火山災害に対する防災の観点である。少なくとも大谷火山灰層は中部山岳での噴火活動によってもたらされたものであり、現在の対比から考えると、その噴火活動は中部日本全体を数 m の厚さの火山碎屑物で覆いつくすほど大きなものであったといえる。そのような大規模噴火でもたらされた火砕物がどのように運搬・堆積したかを明らかにすることは、大規模噴火に引き続く火山碎屑物の2次移動による災害予測・防災に貢献できるということである。

測定方法と結果

測定では沈降速度の測定の前に密度の測定を行なった。測定は重液 (プロモホルム) と比重ガラス、比重浮標を用いた。測定結果を Table 1 に示す。結果として、粒子密度は2 Φ より細粒なものは、かなり一定した値を示し、-1 Φ より粗い粒子も比較的一定した値を示した。一方で、2~-1 Φ の粒子は密度の幅がかなり広いといえる。これは、2 Φ より細粒なものはほとんど火山

Table 1. Grain specific gravity of the Ohtani and Souri volcanic ash.

		Specific gravity (g/cm ³)
Ohtani	volcanic glass	2.60 - 2.25 - 2.00
	pumice	1.70 - 1.15 - (1.00)
Souri	volcanic glass	2.60 - 2.10 - 1.80
	pumice	1.80 - 1.50 - (1.00)

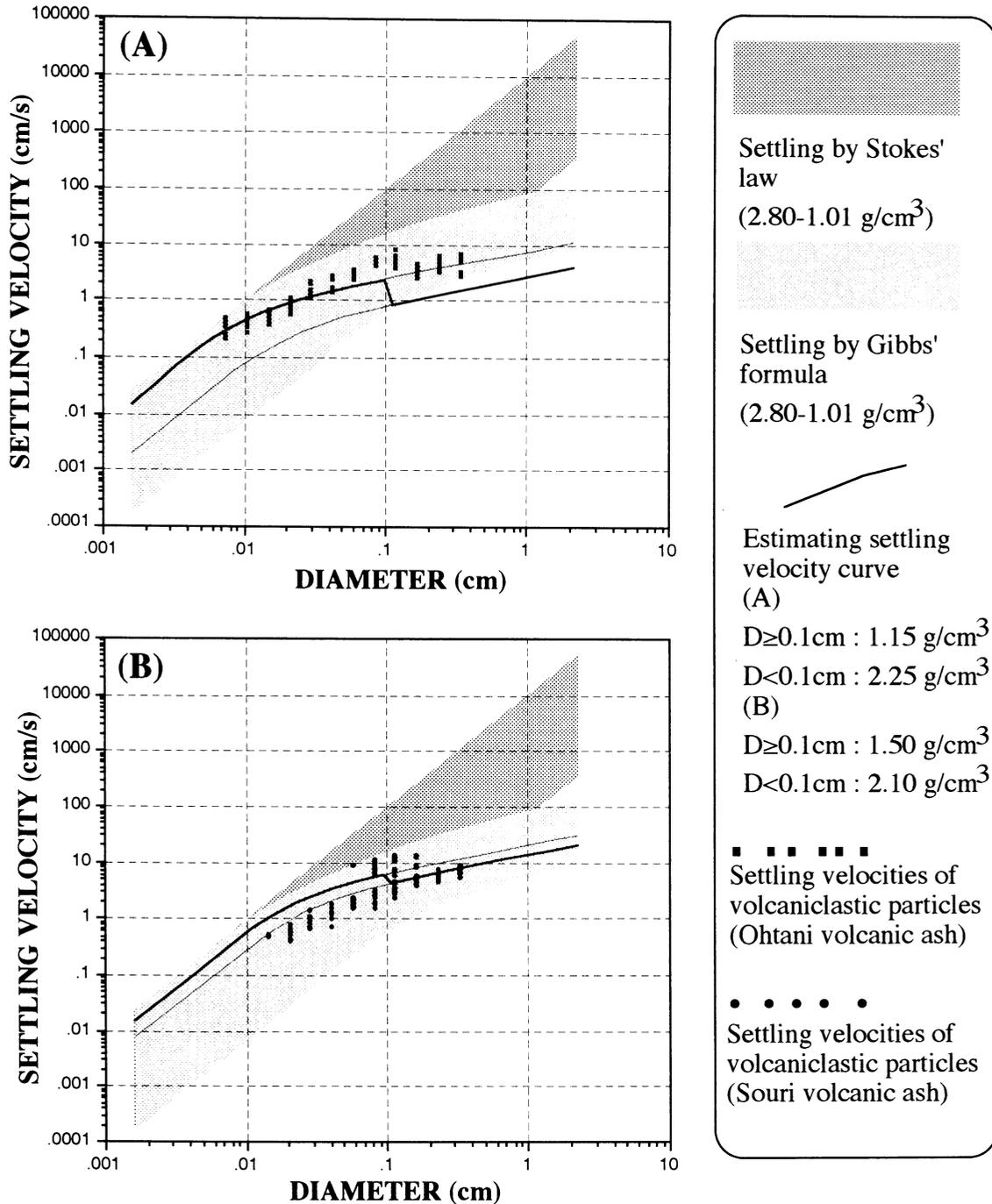


Fig. 2. Settling velocity versus grain diameter showing volcanic glass grain data, Stokes' and Gibbs' equations. (A): the Ohtani volcanic ash, (B): the Souri volcanic ash.

ガラスからなっており、 -1Φ より粗いものはほとんど軽石で構成されているためとみられる。両者は水浸時に前者が淡灰色になるのに対し、後者は白色を維持することから区別できる。 $2 \sim -1 \Phi$ の粒子は、軽石と火山ガラスがかなり混在している。ここで、肉眼的印象によって軽石が明らかに多くなるのは 0Φ より粗い粒子の場合と判断できた。よって、大谷火山灰の 0Φ 以下の細粒子の密度は 2.25 g/cm^3 、 0Φ より粗い粒子の密度は 1.15 g/cm^3 、また、佐布里火山灰の 0Φ 以下の細粒子の

密度は 2.10 g/cm^3 、 0Φ より粗い粒子の密度は 1.50 g/cm^3 とできる。

粒子の沈降速度については、 $4 \sim -2 \Phi$ の範囲の試料を用い、内径 14 cm で長さ 190 cm の沈降管に純水を満たし、そこでの水面 $-110 \sim -160 \text{ cm}$ までの沈降時間から求めた。これは、予察の実験により、 -60 cm において沈降粒子は沈降（終）速度 (terminal falling velocity) に達していると判断できたが、測定の容易さを考え、 $-110 \sim -160 \text{ cm}$ までの測定とした。また、測定用粒子に

については、 0Φ 以下の細粒の粒子については水浸時に淡灰色となる火山ガラス粒子を、 0Φ より粗粒な粒子については水浸時においても白色の軽石粒子を用いた。ただし、軽石はあらかじめ水を入れたビーカーで沈むものだけを選択した。

沈降速度の測定結果を Fig.2 に示す。これらから、粒子沈降速度曲線の式を次のようにして求めた。

粒子の沈降速度 W (terminal falling velocity)は、沈降媒体中での粒子に働く重力 F_g (force due to particle immersed weight)と媒体が粒子を鉛直上方に引く流体坑力 F_d (force due to fluid drag)のつり合った状態で起きている。ここで、 g :重力加速度、 σ :粒子密度、 ρ :媒体密度、 a :粒子半径、 C_d :坑力係数(non-dimensional drag coefficient)、 η :動粘性係数とすると、

$$F_g = 4 \pi a^3 (\sigma - \rho) g / 3 \quad (1)$$

$$F_d = C_d \pi a^2 \rho W^2 / 2 \quad (2)$$

となり、(1)=(2)より次式を得る。

$$W^2 = 8 a (\sigma - \rho) g / 3 C_d \rho \quad (3)$$

(3)式において、一般に十分に小さくて丸い粒子では、層流状態での沈降となり、坑力係数と粒子レイノルズ数 Re ($Re = 2 a W \rho / \eta$)との関係は、

$$C_d = 24 / Re \quad (4)$$

で示され、これを(3)式に代入し次式となる。

$$W = 2 a^2 (\sigma - \rho) g / 9 \eta \quad (5)$$

この関係式が、いわゆるストークス則である。

一方、粒子が大きいなどの理由で沈降粒子の背後に乱流を生じる場合は、坑力係数 C_d は $C_d = X + 24 / Re$ という形式で表されうる。 X は定数が与えられたり、粒子レイノルズ数の関数として与えられたりする。Rubey (1933)は、 $X=2$ として次式を得た(ルビー則)。

$$C_d = 2 + 24 / Re \quad (6)$$

$$W = [-9 \eta + \{81 \eta^2 + 12 \rho a^3 (\sigma - \rho) g\}^{0.5}] / \rho a \quad (7)$$

さらに Gibbs et al. (1971) は、彼らの測定に基づいてルビー則を改良しギブスの公式を得ている。

$$W = [-3 \eta + \{9 \eta^2 + \rho a^2 (\sigma - \rho) g (0.0015476 + 0.19841 a)\}^{0.5}] / \rho (0.011607 + 0.14881 a) \quad (8)$$

Fig. 2 には、今回測定した粒子の沈降速度のプロットとともに、媒体(水中)を沈降する粒子のストークス則とギブスの公式で示される範囲を示している(粒子密度は $2.80 \sim 1.01 \text{ g/cm}^3$ とした)。ここで火山砕屑物の粒子沈降速度が、かなりの細粒部から横軸に低角なトレンドを示すが、これは粒子が Fig. 1 に示すように、所々が尖突した極めて特異な形状をしており、乱流が極小さな粒子の沈降から生じているものと見られる。この様なことは Graf(1971)が「粒子の表面の粗度が増すと、より小さな粒子レイノルズ数においても乱流が発生するようにな

る」という指摘に一致する。火山砕屑物の沈降速度曲線の式について、本論では Fig. 2 にプロットした測定値をもとに、

$$C_d = X' + 24 / Re \quad (9)$$

として、測定結果を回帰させ X' を求めることによって明らかにした。結果として、沈降速度の関係式は大谷火山灰の場合で次式になった。

$$C_d = 26 + 24 / Re \quad (10)$$

$$W = [-9 \eta + \{81 \eta^2 + 156 \rho a^3 (\sigma - \rho) g\}^{0.5}] / 39 \rho a \quad (11)$$

また、佐布里火山灰の場合では次式となった。

$$C_d = 3.4 + 24 / Re \quad (12)$$

$$W = [-18 \eta + \{324 \eta^2 + 81.6 \rho a^3 (\sigma - \rho) g\}^{0.5}] / 10.2 \rho a \quad (13)$$

議 論

得られた沈降速度の式から第1にいえることは、Fig. 2にもよく現われていることであるが、「ある沈降速度範囲内で沈降できる粒子の粒径の多様性が大きい」こと

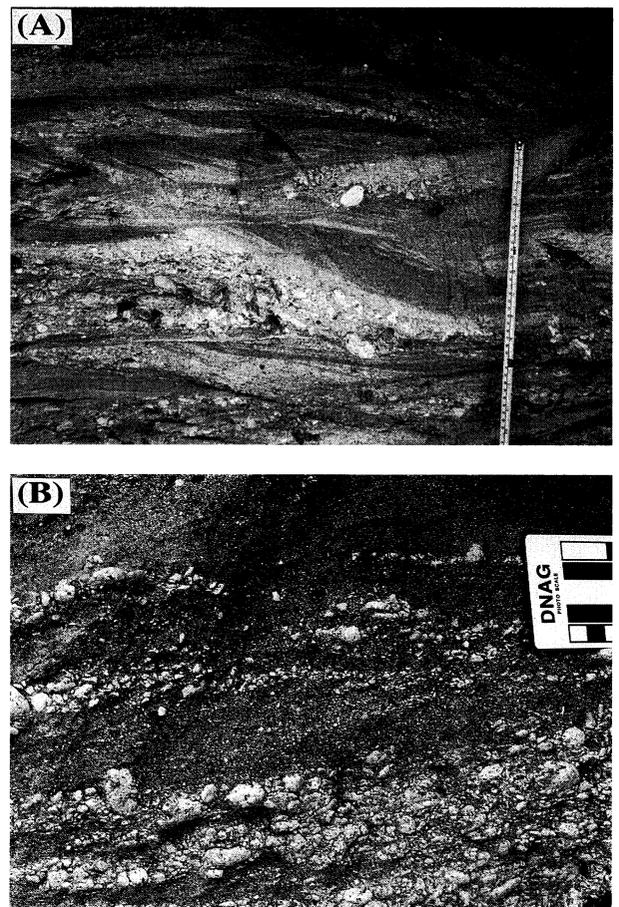


Fig. 3. Outcrop photos. (A): 3 D dunes of the Ohtani (Ueno; local name) volcanic ash at Tokadai, Kasugai City. (B): Dunes of the Souri volcanic ash at Itayama, Handa City. Note the both large pumice and sand sized volcanic glass are arranged on the same lamination.

である。すなわち、石英粒砂のような密度が一定でより球に近い形状をしている堆積物に比較して、より不淘汰なベッドフォームが形成されることを示している。野外の堆積相にその実例がある。Fig. 3 は、両火山灰層にみられる3D デューンによる斜交層理であるが、他の堆積物ではみられない径1 cm以上の軽石と砂サイズの粒子とが同一ラミナ上に並んでいる。通常、3D デューンによる斜交層理の発達する層の淘汰は比較的よい。一部の砂礫質な堆積物においては一見淘汰の悪い3D デューンによる斜交層理層が存在するものの、それらは葉理毎の淘汰に注目すると決して淘汰が悪いわけではない。

さらに、今回の沈降速度の式が明らかになったことにより、今後、次のような運搬時の運動形態の予想が可能となる。はじめに、両火山灰層にはデューンやリップルなどのベッドフォームのみられない塊状（一部で不淘汰）堆積物が見られる。それらを粒度分析し軽石粒と火山ガラス粒の2粉体の混合粒子としてHarding(1949)や井口・目崎(1974)に従った構成集団の分離を行なう。次に、分離を行なった2集団が、今回求めた沈降速度の式を用い、互いに近い沈降速度値を示せばhydraulic平衡な運搬過程が期待でき、一方で、2集団が粒子分散圧平衡に近いようであれば、それは土石流に代表されるような運搬過程が期待できることになる。ちなみに、2つの異なる密度の粒子からなる粉体の分散圧の同等性はSallenger(1979)によって、より重い粒子の粒径 HD_m 、より軽い粒子の粒径 LD_m 、より重い粒子の密度 σ_H 、より軽い粒子の密度 σ_L として、 $HD_m=LD_m(\sigma_L/\sigma_H)^{0.5}$ という関係式で示される。そこで、今回測定した試料のうち、粗粒な軽石と細粒な火山ガラスの混合した堆積物について、この関係式に近いかどうかを判断すればよい。

このような運搬過程の議論は、火山灰層の堆積相記載に基づいた試料を採取し粒度分析した上で具体的に検討する予定である。

文 献

- Allen, J. R. L., 1984, *Sedimentary structures: their character and physical basis*. Elsevier, Amsterdam, 633 p.
- Cole, R. B. and Stanley, R. G., 1994, *Sedimentology of subaqueous volcanoclastic sediment gravity flows in the Neogene Santa Maria Basin, California*. *Sedimentology*, **41**, 37-54.
- 土木工学会編, 1985, *水理公式集*. 土木工学会, 東京.
- 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.
- Graf, W. H., 1971, *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill, New York, 513 p.
- Harding, J. P., 1949, The use of probability paper for the graphical analysis of polymodal frequency distributions. *Jour. Marine Biol. Ass.*, New series, **28**, 141-153.
- 井口正男・目崎茂和, 1974, 沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(II). *地理学評論*, **49**, 545-556.
- 伊勢屋ふじこ, 1985, 沈降式粒度分析の手引き. 筑波大 水理実験センター報, **9**, 115-128.
- Komar, P. D. and Baba J., 1984, Grain-size analyses of mica within sediments and the hydraulic equivalence of mica and quartz. *Jour. Sed. Petrol.*, **54**, 1379-1391.
- 黒川勝己・富田裕子, 1995, 新潟地域のZnp-Ywg火山灰とPM火山灰(氷見層群)および大谷・阿漕火山灰(東海層群)との対比 —中央日本における鮮新世の広域火山灰の検出—. *日本地質学会第102年学術大会講演要旨*, 312.
- 中山勝博・古澤 明, 1989, 瀬戸層群と常滑層群の火山灰層. *地質雑*, **95**, 189-208.
- Nakayama, K., Yoshikawa, S., Nagahashi, Y., Satoguchi, Y., Kono, K., 1994, Pyroclastic flow deposits intercalated in the Upper Cenozoic Tokai Group, Central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan.*, **100**, 880-883.
- Rubey, W. W., 1933, Settling velocities of gravel, sand, and silt. *Ame. Jour. Sci.*, **25**, 325-338.
- Sallenger, A. H. Jr., 1979, Inverse grading and hydraulic equivalence in grain flow deposits. *Jour. Sed. Petrol.*, **49**, 553-562.
- Stokes, G. G., 1851, On the effect of the internal friction on the motion of pendulums. *Cambridge Philo. Trans.*, **9**, 8-106.
- 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. *島根大地質研報*, **12**, 17-22.