

急勾配水路における乾燥粉体流の特性

Characteristics of Granular Flow in an Inclined Open Channel

木藤賢一*・平野宗夫**・橋本晴行***

By Ken-ichi KITOU, Muneo HIRANO and Haruyuki HASHIMOTO

The experiments of granular flow were made in an inclined open channel under three kinds of bed condition ; one was a rough fixed bed and the others were smooth fixed beds of plywood and acrylic board. Vertical velocity profile, surface velocity and depth of the flows were measured by using a high-speed video camera.

Uniform velocity profile is observed on the smooth beds, while high shear flow on the rough bed. The ratio of surface velocity to friction velocity doesn't change with an increase in the ratio of flow depth to grain diameter on the smooth beds. On the other hand, the former ratio increases with the latter ratio on the rough bed. The ratio of average velocity to friction velocity has almost same value as that for debris flow.

keyword ; granular flow, debris flow, intergranular stress, pyroclastic flow, debris avalanche

1. 緒言

1990年11月17日雲仙普賢岳が198年振りに噴火した。翌年5月24日からは水無川本川沿いに火砕流が頻発し出し、6月3日には大規模火砕流が発生して大惨事となった。火砕流はその後おしが谷、赤松谷方向に流路を変えながらも、頻発しており、今なお多くの人々が避難生活を余儀なくされている。

さらに、198年前の噴火においては眉山が崩壊し、15,000人もの死者を出す大災害となったが、今回の災害においても同様の事態が懸念されている。

火砕流や崩壊などの現象を明らかにするためには、まず開水路における粒子のみの流れについて、その挙動や抵抗則などを知る必要がある。このような流れの構成則に関する理論的研究は数多くあるが^{1)、2)、3)}、抵抗則や輸送濃度などに関する研究はほとんど皆無である。

本研究は、まず開水路底面粗度、粒子の径、水路勾配などを種々変化させて粉体流を発生させ、その挙動を観察する。次にその観察結果を基に流れの流速分布、表面速度、流速係数、輸送濃度を調べる。最後に類似な現象である土石流と比較し、考察を行う。

* 学生員 九州大学大学院 工学研究科
(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科
(同 上)

*** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科
(同 上)

2. 実験

2. 1. 実験方法

実験に用いた水路は、幅15cm、長さ5.0mの側面がアクリル製の変勾配水路（図-1）で、水路勾配を $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ まで変化させることができる。水路の上流端には砂を蓄えるホッパーが設けてあり、ホッパーの底板を開くことにより粉体流を発生させることができるようになっている。そして、ホッパーの底板の開き角度を調節することで、供給砂量を調節できる。実験に用いた砂は、粒径 $d_m=0.17\text{mm} \sim d_m=4.4\text{mm}$ で、それぞれはほぼ均一粒径であり、天日または炉乾燥により乾燥させた状態にしている。河床条件には、滑面としてベニヤ板又はアクリル板を敷いたものと、粗面として実験砂と同じ砂を貼り付けたベニヤ板を敷いたものを用いた（表-1）。

比較的大きい粒径の粉体流（ $d_m=1.9\text{mm}$ 、 $d_m=4.4\text{mm}$ ）では、発生した流れを水路下流端から0.5mの位置で水路側面から高速度ビデオで撮影し、層厚 h や流速分布を測定した。比較的小さな粒径の粉体流では流速分布の解析が困難なため、着色砂礫（ $d_m=1.24\text{mm}$ 又は $d_m=1.9\text{mm}$ ）をトレーサーとして用いた。着色砂礫は流下する粉体より粒径が大きいため、逆グレイディングが発生し、そのほとんどは表面付近に現れる。それを利用して流れの表面を高速度ビデオで撮影し、表面流速を求めた。同時に水路側面からも撮影し、層厚 h を測定した。また、下流端では流れが定常となつてから、流れを採取し、単位幅流砂量 q_s を求めた。

2. 2. 実験結果

(a) 流下形態

粉体流の流下形態は、図-2に示しているように4つの形態に分類できる。まず粗面上での粉体流では、以下ようになる。比較的緩勾配では、水路に粒子が堆積して、定常な流れは形成されないが、ある程度の勾配になると、堆積層の上に定常な流れが形成され、その流れは明瞭な表面をもった層状流れとなる（図-2（I））。勾配を上げると、堆積層のない層状流れになり（図-2（II））、さらに勾配を上げると、流れの下層部では層状流れとなるが、上層部では粒子が跳ねて分散した流れとなり、流れの表面も不明瞭となる（図-2（III））。さらに急勾配になれば、流れの全層にわたって粒子が分散して流れる（図-2（IV））。

滑面上では、堆積層を伴った層状流れ（図-2（I））は形成されず、勾配を上げれば層状流れ（図-2（II））から、層状流れと分散（図-2（III））、分散した流れ（図-2（IV））となっていく。

流砂量による影響としては、勾配の増加とともに流下形態が層状から分散へと変化するのとは変わらないが、流砂量が増加すれば、それぞれの流下形態が現れるクリティカルな勾配も大きくなる。

また、粒径による影響としては、比較的大きい粒径の砂は緩い勾配でも流れやすく、また、勾配を少し上げるだけで分散しやすくなる。

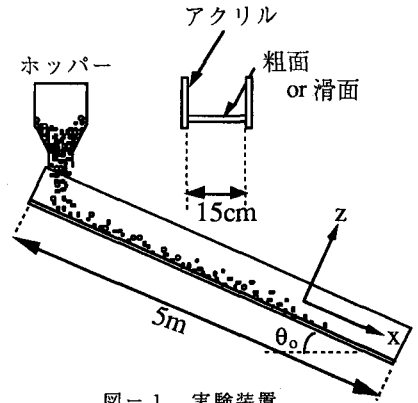


図-1 実験装置

表-1 実験条件

粒径 d_m (mm)	0.17	0.29	0.8
	1.9	4.4	
河床	滑面（ベニヤ板） 滑面（アクリル板） 粗面		
流砂量 q_s (cm ² /sec)	45 ~ 400		

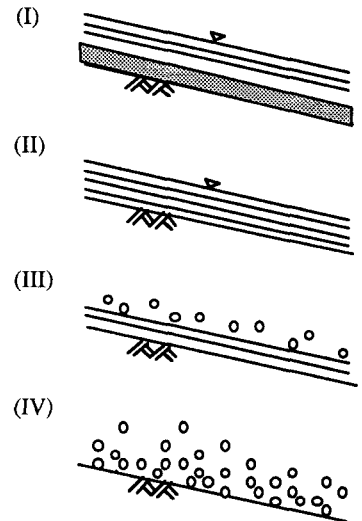


図-2 流下形態

一方、粒径が小さくなると、それぞれの流下形態が形成されるクリティカルな勾配が大きくなり、分散しにくくなる。

(b) 流速分布

粉体流は、その流下形態により流れの表面が明瞭でない場合もあるので、層厚を以下のように定義する。層状流れの粉体流は表面付近まで粒子は整然と流れているので、その表面までを層厚とする。一方、分散した粉体流では表面付近の個々の粒子は飛び跳ねている。しかし流れを瞬間ごとに観察すれば、下層部の粒子は跳ねてはいるものの周りの何個かの粒子と接して流れており、粒子が飛び跳ねている表面付近とは様相が異なっている。そこで層厚としては、粒子が隣接する粒子と相互作用を及ぼし合っているような層の厚さを流れの層厚と定義する（図-3）。

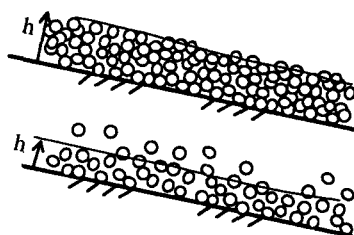


図-3 層厚の定義

図-4 は、滑面（ベニヤ板）上での流速分布を流下形態別に見たものであるが、層状流れでの流速分布は顕著な速度勾配を示すのに対して、流れが層状から分散に変化するにつれて、一様な流速分布となる。図-5 は、滑面及び粗面上での粉体流の代表的流速分布である。河床が、粗面から滑面（ベニヤ板）、滑面（アクリル板）になるに従い、底面付近でのすべりが大きくなり、流速分布も変曲点をもつやや上に凸の分布から、やや下に凸の一樣分布に変化する。

(c) 表面流速

表面流速 u_s と摩擦速度 $u_* (= \sqrt{g h \sin \theta_0})$ の比 u_s/u_* と層厚粒径比 h/d の関係を図-6 に示している。 u_s/u_* の値は、同じ河床上での流れでは流下形態による違いはほとんど見られない。河床条件の違いによる影響としては、粗面上での流れにおいて、層厚粒径比 h/d が大きくなるに従い u_s/u_* は大きくなるが、滑面上ではベニヤ板、アクリル板とも、ほぼ一定で 1.0 の値になっている。

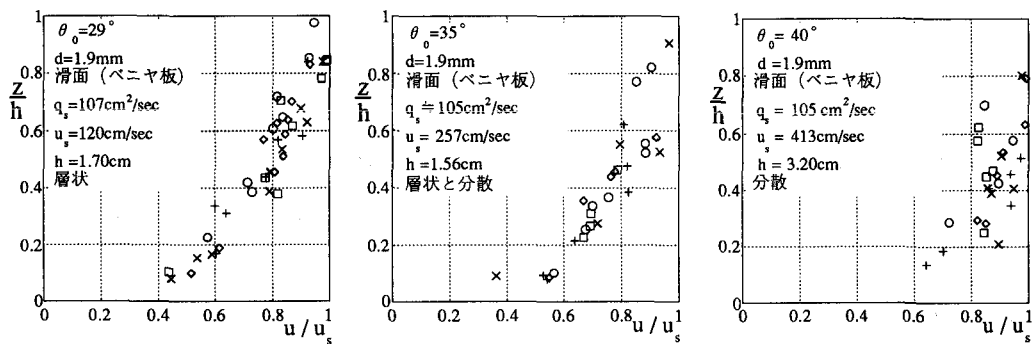


図-4 流下形態別に見た流速分布

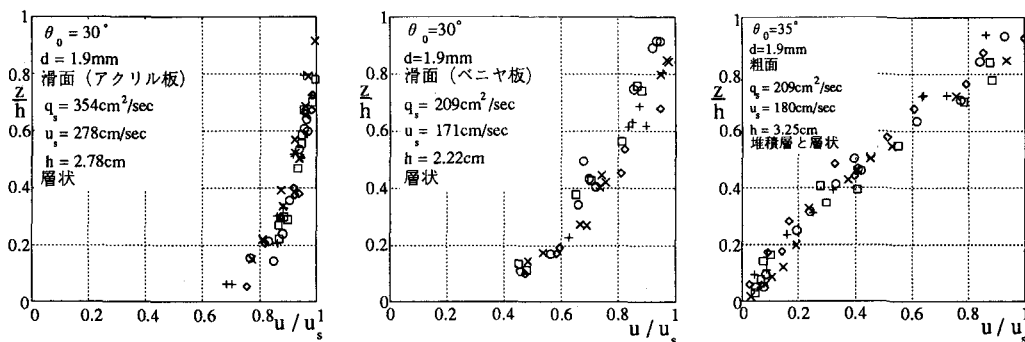


図-5 河床条件別に見た流速分布

(d) 流速係数、

輸送濃度 $\frac{u_s}{u_*}$

図-7は、流速係数

$\bar{u}/u_*$ と層厚粒径比 h/d と

の関係を示したものである。流速係数 $\bar{u}/u_*$ は、同じ河

床上の流れにおいても層状

流れより分散した流れの方

が大きくなっている。また、

表面流速・摩擦速度比

u_s/u_* は河床条件による影

響が比較的小さかったが、

流速係数は河床が粗面から

滑面 (ベニヤ板)、滑面 (アクリル板) になるに従い、大きな値とな

っている。さらに、粗面の場合、層厚粒径比の増加とともに流速係数も

増加しているのがわかる。

図-8には、輸送濃度 C_T と水路勾配の関係を示している。流砂量

を一定として勾配を上げると、輸送濃度は減少していくのがわかる。こ

れは、流れが層状から分散した流れになるに従い、輸送濃度は小さく

なっていくことを示している。流砂量が少ないときには、勾配の増加

による輸送濃度の減少も大きい、流砂量が多くなるにつれ、勾配の

増加による輸送濃度の減少も小さくなる。すなわち、流砂量が増加す

れば、流れは分散しにくくなっていく。

(e) 土石流との比較

図-9は、土石流における流速係数と水深粒径比の関係⁴⁾を

示している。流速係数は、河床による影響をうけ、粗面から滑

面 (ベニヤ板)、滑面 (アクリル板) になるに従い、その値が

2 から 20 へと大きくなっている。また、粗面では層厚粒径比

の増加とともに流速係数は大きくなっている。図-10は、土

石流における流速分布を示したものである。移動床では底面

で流速0となるが、滑面固定床では、すべりが生じ、流速分布は

一様分布に近づく。いずれの特性も層状流れの粉体流と類似し

た特性であることが分かる。

3. 層状流れの解析

粉体流の応力に関する研究は、Bagnold

の研究⁵⁾以来、多くのものが提案されて

いる。まず、Bagnoldは回転2重円筒を用

いた実験を行い、粒子の衝突に関する物

理的考察を加えて、速度勾配の2乗に比

例する応力式を提案した。椿・橋本・末

図-6 表面流速・摩擦速度比と

層厚粒径比の関係

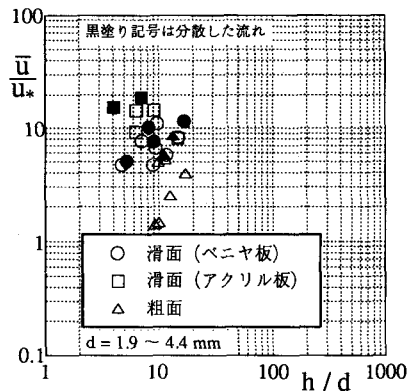
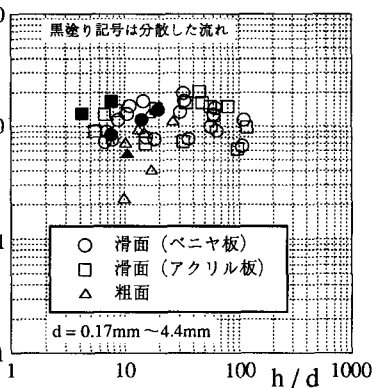


図-7 流速係数と層厚粒径比の関係

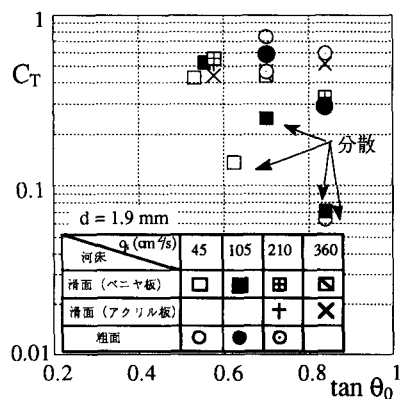


図-8 輸送濃度と水路勾配の関係

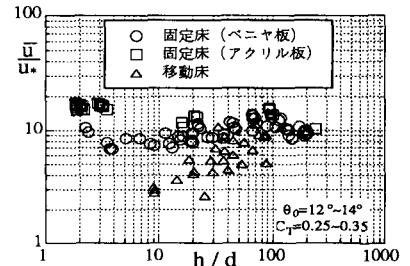


図-9 土石流における流速係数

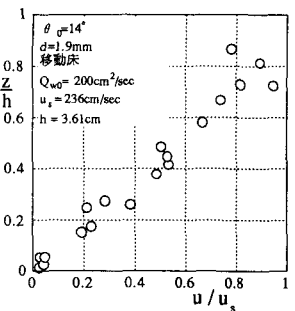
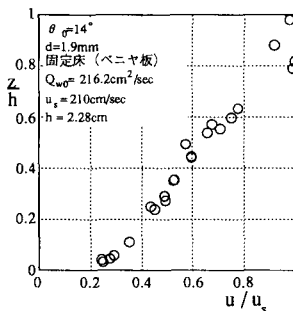


図-10 土石流における流速分布

次⁶⁾は、高濃度の土石流において運動量輸送の観点から応力を決定しようとして、粒子間力を、衝突力と接触力とに分けて応力を求めている。金谷¹⁾は粒状体の構成式をミクロな粒子運動を考慮して解析している。

これらの研究はそれぞれに難点が含まれているが、椿・橋本・末次の式は、現象を忠実にモデル化を行っている点に特徴があり、層状流れの粉体流にも適用可能なモデルであるため、以下の解析ではこのモデルを用いる。

2次元等流状態の層状流れを考え、流下方向と垂直方向のつりあい式をたてると、

$$\sigma C g \sin \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial z} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$$-\sigma C g \cos \theta_0 + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad \text{----- (2)}$$

となる。ここに、 σ_{xx} 、 σ_{zz} はそれぞれせん断応力、垂直応力で、 C は粒子濃度である。せん断応力、垂直応力として、椿らの式⁶⁾を用いれば、

$$\sigma_{xx} = K_M \sigma d^2 \frac{(C/C^*)^2}{1-C/C^*} \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad \text{----- (3)}$$

$$\sigma_{zz} = -\frac{1}{\gamma} \sigma_{xx} - K_p \frac{C}{C^*} \frac{C - C_s}{C_s} \quad \text{----- (4)}$$

と表される。ここに、 K_p は接触力に関する係数、 μ は摩擦係数で、

$$K_M = \frac{\pi}{6} (0.0762 + 0.102\mu) \beta^2 k_M, \quad \gamma = \frac{0.0762 + 0.102\mu}{0.0898 - 0.067\mu}$$

である。(2)式と(4)式を用いて、 $\eta (=z/h) = 0$ で $C = C^*$ 、 $\eta = 1$ で $C = C_s$ の境界条件で解くと、濃度分布を規定する式として、

$$\eta = \left\{ 2 \left(1 - \frac{C}{C^*} \right) + \frac{C_s}{C^*} \ln \frac{C}{C^*} \right\} \frac{\chi}{\psi} \quad \text{----- (5)}$$

を得る。ここに、

$$\psi = \frac{\gamma - \tan \theta_0}{\gamma}, \quad \chi = \frac{K_p}{C_s \sigma g h \cos \theta_0}$$

である。更に、(1)式と(3)式を用いて、 $\eta (=z/h) = 0$ で $u = 0$ 、

$\eta = 1$ で $u = u_s$ の境界条件で解くと、流速分布を規定する式として、

$$\frac{u}{u_s} = \int_C^{C^*} F(C) dC \bigg/ \int_{C_s}^{C^*} F(C) dC \quad \text{----- (6)}$$

$$F(C) = \frac{2C - C_s}{C} \sqrt{\frac{(C - C_s)(1 - C/C^*)}{C/C^*}}$$

となる。ここに、 u_s 、 C_s は表面流速及び表面濃度、 C^* は最密充填濃度である。また、表面流速・摩擦速度比としては、

$$\frac{u_s}{u_*} = \frac{1}{\sqrt{K_M}} \frac{h}{d} \left(\frac{\chi}{\psi} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{C^*} \int_{C_s}^{C^*} F(C) dC \quad \text{----- (7)}$$

となり、(6)式を更に積分すれば、流速係数として、

$$\bar{u} = \frac{1}{\sqrt{K_M}} \frac{h}{d} \left(\frac{\chi}{\psi} \right)^{\frac{5}{2}} \frac{1}{C^*} \int_{C_s}^{C^*} \frac{2C - C_s}{C} \left(\int_C^{C^*} F(C) dC \right) dC \quad \text{----- (8)}$$

輸送濃度としては、

$$C_T = \int_{C_s}^{C^*} (2C - C_s) \left(\int_C^{C^*} F(C) dC \right) dC \bigg/ \int_{C_s}^{C^*} \frac{2C - C_s}{C} \left(\int_C^{C^*} F(C) dC \right) dC \quad \text{----- (9)}$$

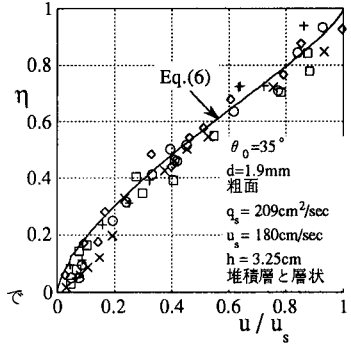


図-1.1 流速分布の計算値（粗面）

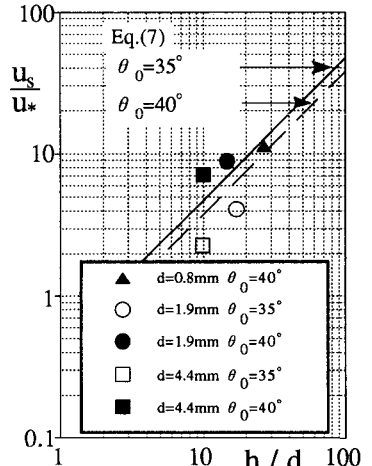


図-1.2 表面流速・摩擦速度比の計算値（粗面）

を得る。図-11～14は実験値との比較を行ったものである。計算の際、境界条件を $\eta=0$ で $u=0$, $C=C_0$ としており、これは粗面において堆積層を伴った層状流れに相当し、この条件を満たしている実験値だけをプロットしている。また、計算に用いる諸係数は土石流の研究で求められた値⁶⁾とした。輸送濃度の評価に若干の問題が残るが、流速分布や流速係数の理論式は、実験結果を良く説明している。

図-6の滑面上での実験値 u_s/u_* と計算値(式(7))を比較すると、層厚粒径比の小さな領域においては実験値が計算値より大きくなっている。これは底面での境界条件の差異による。それに対して層厚粒径比の大きな領域においては実験値が計算値より小さくなっている。これは粉体流が土石流と同様に乱流の様相を呈していることによると考えられる。

4. 結語

火砕流や崩壊は土砂やれきの流れであり、その挙動を知るため、開水路において粉体流を発生させた。粉体流の流下形態は4つに分類でき、その形態は、水路勾配、流砂量、粒径や河床粗度により規定されることを明らかにした。そして、粉体流の流動特性を調べ、土石流との類似性を見いだした。最後に土石流において求められた粒子間応力式を用いて粉体流の流動式を導いた。流動式には、河床での境界条件の問題や、輸送濃度の評価に問題が残るものの良好な結果を得ている。最後に、実験やデータ整理に際し、多寶徹(現・ハザマ)および本学部生の江口健一並びに山下広秋の3氏には多大の助力を受けた。また、本研究は一部文部省科学研究費重点領域研究(2)「火砕流の流動機構とその到達範囲の予測に関する研究」(代表者 九州大学助教授 橋本晴行)の補助を受けた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金谷健一：粒状体の流動，流体力学，Vol. 14, No. 12, pp641-648, 1978.
- 2) Ogawa, S., Umemura, A. and Oshima, N.: On the equations of fully fluidized granular materials. Z. angew. Math. Phys., Vol.31, 1980.
- 3) Savage, S.B. and Jeffrey, D.J.: The stress tensor in a granular flow at high shear rates. J. Fluid Mech., Vol.110, 1981.
- 4) 平野宗夫・橋本晴行・福富章・田熊幸二・パルー・ムハマド・サレー：開水路における高濃度流の無次元パラメーター，第36回水理講演会論文集，pp221-226, 1992.
- 5) Bagnold, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 225, pp49-63, 1954.
- 6) 椿東一郎・橋本晴行・末次忠司：土石流における粒子間応力と流動特性，土木学会論文報告集，No. 317号，pp79-91, 1982.

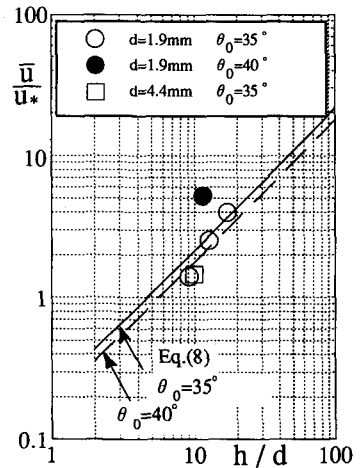


図-13 流速係数の計算値(粗面)

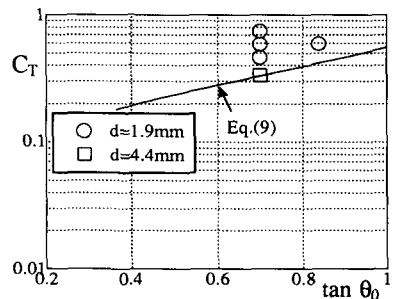


図-14 輸送濃度の計算値(粗面)