

JAERI-M

6004

サンプリング用直線配管内のエアロゾル
沈着率計算図

1975年2月

松井 浩・大畠 勉・吉田 芳和

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

サンプリング用直線配管内のエアロゾル沈着率計算図

日本原子力研究所東海研究所保健物理安全管理部

松井 浩・大畠 勉・吉田芳和

(1975年2月5日受理)

サンプリング用配管内のエアロゾル沈着率を容易に計算できるようにするため、これまでに成立することが明らかになった沈着の式によって、沈着率計算図を作成した。

図は、水平直線管における単分散エアロゾルの沈着率を、粒径、管長、流速の種々の値に対して示し、密度、管径については、本図からの換算法を示した。また、多分散エアロゾルおよび垂直直線管、曲管などの扱い方にも簡単に言及した。

Charts for Calculation of Deposition Fraction of
Aerosol Particles in the Straight Sampling Pipe

Hiroshi MATSUI, Tsutomu OHATA and Yoshikazu YOSHIDA

Division of Health Physics and Safety, Tokai, JAERI

(Received February 5, 1975)

Charts, based on the equations of particle deposition confirmed by experiment, are presented for rapid calculation of the deposition of aerosol particles in the sampling pipe.

The deposition fraction of monodisperse aerosol particles in the horizontal straight pipes are indicated in the charts, with particle size, pipe length, flow velocity as the parameters. The procedures for calculating the deposition fraction for the densities of particles and pipe diameters from the charts are also given. The treatments of polydisperse aerosol particles, vertical straight pipe, and bent pipe are briefly explained.

目 次

1. はじめに	1
2. 計算方法	1
2.1 層流域	1
2.2 乱流域	2
3. 沈着率の計算	4
3.1 沈着率計算図	4
3.2 適用範囲	4
4. 適用範囲の拡張	5
5. 計算例	6
6. あとがき	6
参考文献	7

1. はじめに

放射線管理において、室内または排気系の放射性エアロゾルの濃度をできるだけ正確に評価するためには、サンプリング配管へのエアロゾル沈着率を推定し、沈着がほとんど無視できるような条件でサンプリングするか、沈着が無視できない場合には、配管への沈着を最小にするような条件でサンプリングし、測定された濃度を補正することが必要である。^{(1)~(8)}

直線管内のエアロゾル沈着に関しては、これまでに提案されている沈着の式によって、層流・乱流を通して、サブミクロン以上の粒子の沈着率を係数 2 以内の精度で推定できることが知ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾れている。しかしながら、乱流域に対する計算式は、いずれも、複雑であるため、現場の作業と並行して沈着率を算出・推定することは非常に困難である（日常のエアロゾル・サンプリングに採用されている流量はほとんどの場合が乱流域にあたる）。

計算の手数をできるだけ軽減するため、筆者らは、これまでに成立の確認された沈着の式によつて代表的なサンプリング条件に対して沈着率を計算し、沈着率推定のための計算図を作成した。

本報では、単分散粒子の水平直線管における沈着率を示した。垂直直線管、曲管および多分散粒子に対しては目下検討中であるが、未確定の要因もあるので、それらについては暫定的な取扱い方を記述しておいた。

2 計 算 方 法

沈着率を支配する因子は、粒子の密度および粒径、配管の径および長さ、流速、温度、圧力、湿度、電荷など多数あるが、ここでは、エアロゾルは、室温、1気圧の空気中にあり、電荷お⁽⁶⁾⁽⁷⁾よび湿度の影響はないものとした。また、他の因子（粒子の密度、粒径、管径、管長、流速）についても、できるだけパラメータをまとめるか、あるいは一つのパラメータに対する図から他の条件に対する適用法を示すことにより、図の数を少なくした。

層流域に対しては、重力沈降および拡散の式により、乱流域に対しては、外挿式によつて沈着率を計算した。

2.1 層 流 域

重力沈降による沈着率を F_g 、拡散による沈着率を F_d とするとき、管内での沈着率 F_{lam} は次式で求められる。

$$F_{lam} = F_g + F_d - F_g F_d \quad (1)$$

重力沈降による沈着の式 (F_g)⁽¹⁾⁽³⁾

$$F_g = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\alpha \beta + \sin^{-1} \beta - 2 \alpha^3 \beta \right) \quad (2)$$

1. はじめに

放射線管理において、室内または排気系の放射性エアロゾルの濃度をできるだけ正確に評価するためには、サンプリング配管へのエアロゾル沈着率を推定し、沈着がほとんど無視できるような条件でサンプリングするか、沈着が無視できない場合には、配管への沈着を最小にするような条件でサンプリングし、測定された濃度を補正することが必要である。^{(1)~(8)}

直線管内のエアロゾル沈着に関しては、これまでに提案されている沈着の式によって、層流・乱流を通して、サブミクロン以上の粒子の沈着率を係数 2 以内の精度で推定できることが知ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾れている。しかしながら、乱流域に対する計算式は、いずれも、複雑であるため、現場の作業と並行して沈着率を算出・推定することは非常に困難である（日常のエアロゾル・サンプリングに採用されている流量はほとんどの場合が乱流域にあたる）。

計算の手数をできるだけ軽減するため、筆者らは、これまでに成立の確認された沈着の式によって代表的なサンプリング条件に対して沈着率を計算し、沈着率推定のための計算図を作成した。

本報では、単分散粒子の水平直線管における沈着率を示した。垂直直線管、曲管および多分散粒子に対しては目下検討中であるが、未確定の要因もあるので、それらについては暫定的な取扱い方を記述しておいた。

2 計 算 方 法

沈着率を支配する因子は、粒子の密度および粒径、配管の径および長さ、流速、温度、圧力、湿度、電荷など多数あるが、ここでは、エアロゾルは、室温、1気圧の空气中にあり、電荷お⁽⁶⁾⁽⁷⁾よび湿度の影響はないものとした。また、他の因子（粒子の密度、粒径、管径、管長、流速）についても、できるだけパラメータをまとめるか、あるいは一つのパラメータに対する図から他の条件に対する適用法を示すことにより、図の数を少なくした。

層流域に対しては、重力沈降および拡散の式により、乱流域に対しては、外挿式によって沈着率を計算した。

2.1 層 流 域

重力沈降による沈着率を F_g 、拡散による沈着率を F_d とするとき、管内での沈着率 F_{lam} は次式で求められる。

$$F_{lam} = F_g + F_d - F_g F_d \quad (1)$$

重力沈降による沈着の式 (F_g)⁽¹⁾⁽³⁾

$$F_g = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\alpha \beta + \sin^{-1} \beta - 2 \alpha^3 \beta \right) \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\frac{3 Z L}{4 D_c U} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \beta = \sqrt{1 - \alpha^2}$$

$$Z = \frac{g \rho_p d_p^2}{18 \eta} \left(1 + 2A \frac{\lambda}{d_p} \right)$$

$$A = A_0 + B \exp \left(-\frac{C d_p}{2 \lambda} \right)$$

$$A_0 = 1.25, \quad B = 0.44, \quad C = 1.10$$

拡散による沈着の式 (F_d)⁽²⁾⁽³⁾

$$F_d = 1 - [0.819 \exp(-3.657x) + 0.097 \exp(-22.3x) \\ + 0.032 \exp(-5.7x) + 0.027 \exp(-12.3x) \\ + 0.025 \exp(-750x)]$$

$$x = \frac{\pi D L}{Q}$$

$$D = \frac{\kappa T}{3 \pi \eta d_p} \left(1 + A \frac{2 \lambda}{d_p} \right)$$

ここで、 ρ_p ：粒子の密度、 d_p ：粒子の直径、 D_c ：管の直径、 L ：管の長さ、 U ：流速、
 Q ：流量、 g ：重力加速度、 η ：気体の粘性係数、 λ ：気体分子の平均自由行程、 κ ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度である。

2.2 乱流域

乱流拡散だけによる沈着率を F_t とするとき、外挿法による乱流域の沈着率 F_{turb} ⁽⁶⁾⁽⁷⁾ は、層流域に対する沈着率の式 F_{lam} を乱流域にまで外挿して、次のように与えられる。

$$F_{turb} = F_t + F_{lam} - F_t F_{lam}^{*1)} \quad (4)$$

ここで F_t は次式で与えられる。

$$F_t = 1 - \exp \left(- \frac{4 K L}{U D_c} \right) \quad (5)$$

式(5)において、乱流拡散による粒子の沈着速度 K には、Beal の式を用いた。⁽⁸⁾ 粒子の無次元停止距離 S^+ を用いて次のように与えられる。

*1) エアロゾル粒子の粒径が大きい場合 ($d_p \gg 0.1 \mu m$) には、 $F_{lam} = F_g$ になる。

(i) $0 \leq S^+ < 5$

$$\frac{U^*}{K} = \frac{14.5}{3} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3} F\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) - \frac{14.5^2}{1.5 h^+} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} G\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right)$$

$$+ \left[5 + \frac{50}{\nu h^+} (D - 0.959\nu) \right] \ln \left(\frac{D + 5.04\nu}{D + 0.04\nu} \right)$$

$$- \frac{250}{h^+} + \frac{1 - 13.73 \sqrt{f/2}}{\sqrt{f/2}} \quad (6)$$

$$F\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) = \frac{1}{2} \ln A_1 - \frac{1}{2} \ln A_2 + \sqrt{3} \tan^{-1} A_3 - \sqrt{3} \tan^{-1} A_4$$

$$G\left(\frac{\nu}{D}, S^+\right) = -\frac{1}{2} \ln A_1 + \frac{1}{2} \ln A_2 + \sqrt{3} \tan^{-1} A_3 - \sqrt{3} \tan^{-1} A_4$$

$$A_1 = \frac{\left[1 + \frac{5}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \right]^2}{1 - \frac{5}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} + \left(\frac{5}{14.5}\right)^2 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3}}$$

$$A_2 = \frac{\left[1 + \frac{S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} \right]^2}{1 - \frac{S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} + \left(\frac{S^+}{14.5}\right)^2 \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3}}$$

$$A_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{10}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} - 1 \right]$$

$$A_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{2S^+}{14.5} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{1/3} - 1 \right]$$

(ii) $5 \leq S^+ < 30$

$$\frac{U^*}{K} = 5 \left[1 + \frac{10}{\nu h^+} (D - 0.959\nu) \right] \ln \left[\frac{D + 5.04\nu}{D + \nu \left(\frac{S^+}{5} - 0.959\right)} \right]$$

$$- \frac{10}{h^+} \left(6 - \frac{S^+}{5} \right) + \frac{1 - 13.73 \sqrt{f/2}}{\sqrt{f/2}}$$

(iii) $S^+ \geq 30$

$$\frac{U^*}{K} = 1 - 13.73 \sqrt{f/2} \quad (8)$$

ここで、 $S^+ = SU^*/U$ 、 S ：粒子の停止距離、 ν ：気体の動粘性係数、 $U^* = U\sqrt{f/2}$ 、
 f ：ファンシングの管摩擦係数、 $h^+ = D_c U^*/\nu$ 、 D ：ブラウン運動による粒子の拡散係数
 である。

計算において用いた定数は、 $T = 298.2^\circ\text{K}$ (25°C)、および1気圧に対して $\eta = 1.81 \times 10^{-4}$
 $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$ 、 $\rho_{\text{air}} = 1.19 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ (25°C) である。また、計算は、 $d_p = 0.5 \sim 30 \mu\text{m}$ 、
 $\rho_p = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、 $L = 50 \sim 10000 \text{ cm}$ 、 $U = 1 \sim 10^4 \text{ cm}/\text{sec}$ の範囲に
 対して、FACOM 230-60によって行った。

3. 沈着率の計算

3.1 沈着率計算図

Figs. 1~13 に、管径 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、密度 $\rho_p = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、粒径 $d_p = 0.5 \sim 30 \mu\text{m}$ に対する
 流速と沈着率の関係を、管長 L をパラメタとして示した。沈着率は管入口を通過するエアロゾル
 の全量に対する管内沈着量の比で示される。

Figs. 14, 15 には、管長 $L = 300 \text{ cm}$ における沈着率と流速の関係を、管径をパラメタとして
 示した。これらは $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 以外の配管内の沈着率を算出するときに利用される。

Figs. 16~18 には、参考図として、流量、流速、管径、レイノルズ数の間の相互関係を示し
 た。

3.2 適用範囲

沈着率推定の精度：計算式(1)~(8)は、サブミクロンよりも大きい粒子に対して係数 2 以内で⁽⁶⁾⁽⁷⁾
 沈着率を推定できることが実験的に確認されている。したがって、本報の計算図も係数 2 程度
 の精度で沈着率を推定するのに役立つ。

粒径範囲：粒径が小さくなると、レイノルズ数 $Re \approx 2000$ に対応する流速において、沈着率
 曲線に不連続点が現われる。これは乱流域の沈着に対してブラウン運動の影響が現われるため
 である。計算上、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子に対してはもっと大きい不連続点が生ずるが、それについ
 ては、さらに実験的確認が必要と考えられるので、本報では、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子に対して計
 算図を作成した。 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ に対しては、すべてが $0.5 \mu\text{m}$ の粒子と見なして沈着率を推定
 しても、過少評価にはならない。 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子はブラウン運動による拡散沈着が支配的
 になるので、それに対する沈着の式を用いる必要がある。

粒径が大きくなると、流速の大きい所で再飛散が生ずるので、実際の沈着率は計算値よりも
 小さくなる場合がある。しかし、そのような特殊な場合を除いては、非常に短かい配管でも、
 大部分のエアロゾルが沈着してしまうので、配管を通してのサンプリングは $20 \sim 30 \mu\text{m}$ (ρ_p

(iii) $S^+ \geq 30$

$$\frac{U^*}{K} = 1 - 13.73 \sqrt{f/2} \quad (8)$$

ここで、 $S^+ = SU^*/U$ 、 S ：粒子の停止距離、 ν ：気体の動粘性係数、 $U^* = U\sqrt{f/2}$ 、
 f ：ファニングの管摩擦係数、 $h^+ = D_c U^*/\nu$ 、 D ：ブラウン運動による粒子の拡散係数
 である。

計算において用いた定数は、 $T = 298.2^\circ\text{K}$ (25°C)、および1気圧に対して $\eta = 1.81 \times 10^{-4}$
 $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$ 、 $\rho_{\text{air}} = 1.19 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ (25°C) である。また、計算は、 $d_p = 0.5 \sim 30 \mu\text{m}$ 、
 $\rho_p = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、 $L = 50 \sim 10000 \text{ cm}$ 、 $U = 1 \sim 10^4 \text{ cm}/\text{sec}$ の範囲に
 対して、FACOM 230-60によって行った。

3. 沈着率の計算

3.1 沈着率計算図

Figs. 1~13 に、管径 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、密度 $\rho_p = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、粒径 $d_p = 0.5 \sim 30 \mu\text{m}$ に対する
 流速と沈着率の関係を、管長 L をパラメタとして示した。沈着率は管入口を通過するエアロゾル
 の全量に対する管内沈着量の比で示される。

Figs. 14, 15 には、管長 $L = 300 \text{ cm}$ における沈着率と流速の関係を、管径をパラメタとして
 示した。これらは $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 以外の配管内の沈着率を算出するときに利用される。

Figs. 16~18 には、参考図として、流量、流速、管径、レイノルズ数の間の相互関係を示した。

3.2 適用範囲

沈着率推定の精度：計算式(1)~(8)は、サブミクロンよりも大きい粒子に対して係数 2 以内で⁽⁶⁾⁽⁷⁾沈着率を推定できることが実験的に確認されている。したがって、本報の計算図も係数 2 程度の精度で沈着率を推定するのに役立つ。

粒径範囲：粒径が小さくなると、レイノルズ数 $Re \approx 2000$ に対応する流速において、沈着率曲線に不連続点が現われる。これは乱流域の沈着に対してブラウン運動の影響が現れるためである。計算上、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子に対してはもっと大きい不連続点が生ずるが、それについては、さらに実験的確認が必要と考えられるので、本報では、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の粒子に対して計算図を作成した。 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ に対しては、すべてが $0.5 \mu\text{m}$ の粒子と見なして沈着率を推定しても、過少評価にはならない。 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子はブラウン運動による拡散沈着が支配的になるので、それに対する沈着の式を用いる必要がある。

粒径が大きくなると、流速の大きい所で再飛散が生ずるので、実際の沈着率は計算値よりも小さくなる場合がある。しかし、そのような特殊な場合を除いては、非常に短かい配管でも、大部分のエアロゾルが沈着してしまうので、配管を通してのサンプリングは $20 \sim 30 \mu\text{m}$ (ρ_p

$= 1 \text{ g/cm}^3$ の場合) までの粒径が上限となる。

管径範囲: 理論的には、管径に対する制限は与えられないが、大きい管径、たとえば、1 m またはそれ以上の管径にも第2章の計算式が適用できるかどうかは実験的に確認されていない。本報はサンプリング配管を対象としており、管径は、せいぜい数 10 cm までを適用範囲としている。

粒子の密度: $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ 以外の粒子については、次章のようにして沈着率を算出する。

4. 適用範囲の拡張

粒子の密度 $\rho_p \neq 1 \text{ g/cm}^3$ の場合: 本報で扱う粒径 $d_p \geq 0.5 \mu\text{m}$ (重力沈降支配領域) に対して、計算式中に含まれるカニンガムの補正項(式(2)中の A)を無視すると、 ρ_p と d_p とはすべての式の中に $(\sqrt{\rho_p} d_p) = D_a$ のまとまった形で含まれることになる。この因子は、とりもなおさず、空気力学的粒径である。したがって、どんな密度の粒子でも、空気力学的粒径 (D_a) を求め、 D_a に等しい粒径の $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ に対する計算図を用いて、沈着率を推定することができる。

管径 $D_c \neq 2.5 \text{ cm}$ の場合: もし、 ρ_p = 一定、 d_p = 一定ならば、沈着率を最小にする流速(U_m) は D_c に関係なく一定になる(Figs. 14, 15 参照)。また、管径 D_c に対する沈着率の変化率は流速が变ってもほぼ一定であるので、 $D_c \neq 2.5 \text{ cm}$ に対する沈着率の推定は、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する計算図を用いて次のように行うことができる。

まず、目的とする流量 Q から管径 D_c に対する管内の平均流速 (U) を求める。Fig. 14 または 15 を用いて、流速 U における目的の管径 (D_x) に対する沈着率 $F(D_x)$ と $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する沈着率 $F(2.5)$ を求め、その比 $R_f = F(D_x)/F(2.5)$ をとる。目的とする沈着率 (F_0) は、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する計算図から流速 U に対する沈着率 $F(2.5)$ を読みとり、 $F_0 = R_f \cdot F(2.5)$ として得られる。

垂直管における沈着: 理論的には、重力の効果は無視され、沈着率も水平管に比べて非常に小さくなる筈であるが、実際には、曲管を通過した流れは大きく乱され、理論値よりもかなり大きい沈着を示すことが、筆者らの実験によって確認されている。従って、当分の間、過大評価になることを前提として、水平管と同じ計算式で沈着率を推定するのがよいと考えられる。

曲管における沈着: 粒子の沈着は、粒径、密度、流速、管径、曲管の曲率半径などによって異なるが、粒径に関しては、近似的に、 $F \propto d_p^{2-3}$ で変化することが理論的に推定される¹⁰⁾。また密度 $\rho_p = 1.4 \text{ g/cm}^3$ 、管径 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、吸引流量 $Q = 50 \sim 200 \ell/\text{min}$ の場合、一つの曲管部あたり、 $d_p \approx 4 \mu\text{m}$ の粒子の沈着率は $F \approx 1\%$ になる。従って、沈着率は、この値を基準として、上記の関係式により目安値を求めることができる。

多分散粒子の沈着: 粒度分布のパラメタの一つである質量中央径 (MMD) または空気力学的質量中央径 (MMAD)^{*注2)} を用いるとき、それと同じ粒径をもつ单分散粒子の沈着にはほぼ等しくな

*注2) 単分散粒子の場合は、 $MMAD = D_a (= \sqrt{\rho_p} d_p)$ になる。

$= 1 \text{ g/cm}^3$ の場合)までの粒径が上限となる。

管径範囲: 理論的には、管径に対する制限は与えられないが、大きい管径、たとえば、1 m またはそれ以上の管径にも第2章の計算式が適用できるかどうかは実験的に確認されていない。本報はサンプリング配管を対象としており、管径は、せいぜい数 10 cmまでを適用範囲としている。

粒子の密度: $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ 以外の粒子については、次章のようにして沈着率を算出する。

4. 適用範囲の拡張

粒子の密度 $\rho_p \neq 1 \text{ g/cm}^3$ の場合: 本報で扱う粒径 $d_p \geq 0.5 \mu\text{m}$ (重力沈降支配領域) に対して、計算式中に含まれるカニンガムの補正項(式(2)中の A)を無視すると、 ρ_p と d_p とは、すべての式の中に $(\sqrt{\rho_p} d_p) = D_a$ のまとまった形で含まれることになる。この因子は、とりもなおさず、空気力学的粒径である。したがって、どんな密度の粒子でも、空気力学的粒径 (D_a) を求め、 D_a に等しい粒径の $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ に対する計算図を用いて、沈着率を推定することができる。

管径 $D_c \neq 2.5 \text{ cm}$ の場合: もし、 ρ_p = 一定、 d_p = 一定ならば、沈着率を最小にする流速(U_m) は D_c に関係なく一定になる(Figs. 14, 15 参照)。また、管径 D_c に対する沈着率の変化率は流速が变ってもほぼ一定であるので、 $D_c \neq 2.5 \text{ cm}$ に対する沈着率の推定は、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する計算図を用いて次のように行うことができる。

まず、目的とする流量 Q から管径 D_c に対する管内の平均流速(U)を求める。Fig. 14 または 15 を用いて、流速 U における目的の管径(D_x)に対する沈着率 $F(D_x)$ と $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する沈着率 $F(2.5)$ を求め、その比 $R_f = F(D_x)/F(2.5)$ をとる。目的とする沈着率(F_0)は、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ に対する計算図から流速 U に対する沈着率 $F(2.5)$ を読みとり、 $F_0 = R_f \cdot F(2.5)$ として得られる。

垂直管における沈着: 理論的には、重力の効果は無視され、沈着率も水平管に比べて非常に小さくなる筈であるが、実際には、曲管を通過した流れは大きく乱され、理論値よりもかなり大きい沈着を示すことが、筆者らの実験によって確認されている。従って、当分の間、過大評価になることを前提として、水平管と同じ計算式で沈着率を推定するのがよいと考えられる。

曲管における沈着: 粒子の沈着は、粒径、密度、流速、管径、曲管の曲率半径などによって異なるが、粒径に関しては、近似的に、 $F \propto d_p^{2-3}$ で変化することが理論的に推定される。¹⁰⁾ また、密度 $\rho_p = 1.4 \text{ g/cm}^3$ 、管径 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、吸引流量 $Q = 50 \sim 200 \ell/\text{min}$ の場合、一つの曲管部あたり、 $d_p \approx 4 \mu\text{m}$ の粒子の沈着率は $F \approx 1\%$ になる。従って、沈着率は、この値を基準として、上記の関係式により目安値を求めることができる。

多分散粒子の沈着: 粒度分布のパラメタの一つである質量中央径(MMD)または空気力学的質量中央径(MMAD)^{*注2)}を用いるとき、それと同じ粒径をもつ单分散粒子の沈着にはほぼ等しくな

*注2) 単分散粒子の場合は、MMAD = $D_a (= \sqrt{\rho_p} d_p)$ になる。

ることが、ICRP肺モデル⁽¹⁾および筆者らの実験によって示されている。従って、多分散粒子の沈着率は、そのMMAIDに等しい粒径を用いて計算図から推定することができる。
その他：粒径、流速および管長については、本報の計算図の内挿または外挿によって沈着率を推定できる。

5. 計 算 例

粒径 $d_p = 3 \mu\text{m}$ からなる酸化プルトニウムエアロゾルを、管径 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、長さ $L = 5 \text{ m}$ のサンプリング管を用いて、流量 $Q = 200 \ell/\text{min}$ でサンプリングする場合の管内のエアロゾル沈着率は次のように算出される。

粒子の密度 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ (PuO_2) であるから、空気力学的粒径 D_a は

$$D_a = \sqrt{\rho_p} d_p = \sqrt{11.46} \times 3 = 10.15 \mu\text{m}$$

となる。流速 U は、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ に対しては Fig. 16 から、

$$U = 170 \text{ cm/sec}$$

$D_c = 2.5 \text{ cm}$ と $D_c = 5 \text{ cm}$ に対する沈着率比 R_f は、Fig. 14 から、

$$R_f = \frac{F(5.0)}{F(2.5)} = \frac{3.4 \times 10^{-2}}{6.6 \times 10^{-2}} = 0.52$$

$D_a = d_p \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ における沈着率は、Fig. 10 より $F(2.5) = 0.4$ であるので、 $D_a \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ における沈着率は

$$\begin{aligned} F(5.0) &= R_f \cdot F(2.5) \\ &= 0.52 \times 0.4 = 0.21 (21\%) \end{aligned}$$

参考までに、 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ 、 $d_p = 3 \mu\text{m}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ に対して、電算機によって求めた沈着率は、 $F(5.0) = 23\% (22.92\%)$ である。

6. あとがき

本報は、単分散粒子の空気力学的粒径 (D_a) が $0.5 \mu\text{m}$ より大きい場合の、水平直線管における沈着率計算図を示し、適用範囲の拡張についてその手法を示した。今後、さらに、 $D_a \leq 0.5 \mu\text{m}$ 、多分散粒子、垂直管および曲管を含む総合的な沈着率計算図が必要とされる。それらについては、現在、検討中である。

ることが、ICRP肺モデル⁽¹⁾および筆者らの実験によって示されている。従って、多分散粒子の沈着率は、そのMMAIに等しい粒径を用いて計算図から推定することができる。

その他：粒径、流速および管長については、本報の計算図の内挿または外挿によって沈着率を推定できる。

5. 計 算 例

粒径 $d_p = 3 \mu\text{m}$ からなる酸化プルトニウムエアロゾルを、管径 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、長さ $L = 5 \text{ m}$ のサンプリング管を用いて、流量 $Q = 200 \ell/\text{min}$ でサンプリングする場合の管内のエアロゾル沈着率は次のように算出される。

粒子の密度 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ (PuO_2) であるから、空気力学的粒径 D_a は

$$D_a = \sqrt{\rho_p} d_p = \sqrt{11.46} \times 3 = 10.15 \mu\text{m}$$

となる。流速 U は、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ に対しては Fig. 16 から、

$$U = 170 \text{ cm/sec}$$

$D_c = 2.5 \text{ cm}$ と $D_c = 5 \text{ cm}$ に対する沈着率比 R_f は、Fig. 14 から、

$$R_f = \frac{F(5.0)}{F(2.5)} = \frac{3.4 \times 10^{-2}}{6.6 \times 10^{-2}} = 0.52$$

$D_a = d_p \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、における沈着率は、Fig. 10 より $F(2.5) = 0.4$ であるので、 $D_a \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ における沈着率は

$$\begin{aligned} F(5.0) &= R_f \cdot F(2.5) \\ &= 0.52 \times 0.4 = 0.21 (21\%) \end{aligned}$$

参考までに、 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ 、 $d_p = 3 \mu\text{m}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ に対して、電算機によって求めた沈着率は、 $F(5.0) = 23\% (22.92\%)$ である。

6. あとがき

本報は、単分散粒子の空気力学的粒径 (D_a) が $0.5 \mu\text{m}$ より大きい場合の、水平直線管における沈着率計算図を示し、適用範囲の拡張についてその手法を示した。今後、さらに、 $D_a \leq 0.5 \mu\text{m}$ 、多分散粒子、垂直管および曲管を含む総合的な沈着率計算図が必要とされる。それらについては、現在、検討中である。

ることが、ICRP肺モデル⁽¹⁾および筆者らの実験によって示されている。従って、多分散粒子の沈着率は、そのMMA Dに等しい粒径を用いて計算図から推定することができる。

その他：粒径、流速および管長については、本報の計算図の内挿または外挿によって沈着率を推定できる。

5. 計 算 例

粒径 $d_p = 3 \mu\text{m}$ からなる酸化プルトニウムエアロゾルを、管径 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、長さ $L = 5 \text{ m}$ のサンプリング管を用いて、流量 $Q = 200 \ell/\text{min}$ でサンプリングする場合の管内のエアロゾル沈着率は次のように算出される。

粒子の密度 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ (PuO_2) であるから、空気力学的粒径 D_a は

$$D_a = \sqrt{\rho_p} d_p = \sqrt{11.46} \times 3 = 10.15 \mu\text{m}$$

となる。流速 U は、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ に対しては Fig. 16 から、

$$U = 170 \text{ cm/sec}$$

$D_c = 2.5 \text{ cm}$ と $D_c = 5 \text{ cm}$ に対する沈着率比 R_f は、Fig. 14 から、

$$R_f = \frac{F(5.0)}{F(2.5)} = \frac{3.4 \times 10^{-2}}{6.6 \times 10^{-2}} = 0.52$$

$D_a = d_p \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 2.5 \text{ cm}$ 、における沈着率は、Fig. 10 より $F(2.5) = 0.4$ であるので、 $D_a \cong 10 \mu\text{m}$ 、 $U = 170 \text{ cm/sec}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ における沈着率は

$$\begin{aligned} F(5.0) &= R_f \cdot F(2.5) \\ &= 0.52 \times 0.4 = 0.21 (21\%) \end{aligned}$$

参考までに、 $\rho_p = 11.46 \text{ g/cm}^3$ 、 $d_p = 3 \mu\text{m}$ 、 $Q = 200 \ell/\text{min}$ 、 $D_c = 5 \text{ cm}$ 、 $L = 500 \text{ cm}$ に対して、電算機によって求めた沈着率は、 $F(5.0) = 23\% (22.92\%)$ である。

6. あとがき

本報は、単分散粒子の空気力学的粒径 (D_a) が $0.5 \mu\text{m}$ より大きい場合の、水平直線管における沈着率計算図を示し、適用範囲の拡張についてその手法を示した。今後、さらに、 $D_a \leq 0.5 \mu\text{m}$ 、多分散粒子、垂直管および曲管を含む総合的な沈着率計算図が必要とされる。それらについては、現在、検討中である。

参考文献

- 1) J.W. THOMAS : J. Air Poll. Control Assoc., 8, 32 (1958).
- 2) N.A. FUCHS ; The Mechanics of Aerosols, p. 205 (1964), Macmillan, Pergamon Press.
- 3) J.W. THOMAS ; Proceedings of a Symposium on Instruments and Techniques for the Assessment of Airborne Radioactivity in Nuclear Operations, IAEA, Vienna, p. 701 (1967).
- 4) 吉岡直哉, 金岡千嘉男, 江見 準; 化学工学, 36, 1010 (1972).
- 5) 松井 浩, 吉田芳和, 高橋武士; 保健物理, 6, 89 (1971).
- 6) H. MATSUI, Y. YOSHIDA, M. MURATA, and T. OHATA : J. Nucl. Sci. Technol., 11 (7), 300 (1974).
- 7) 松井 浩, 大畑 勉, 吉田芳和; 保健物理, 9, 143 (1974).
- 8) S.K. BEAL : Nucl. Sci. Eng., 40, 1 (1970).
- 9) To be published
- 10) To be published
- 11) ICRP Task Group on Lung Dynamics : Health Phys., 12, 173 (1966).

List of figures

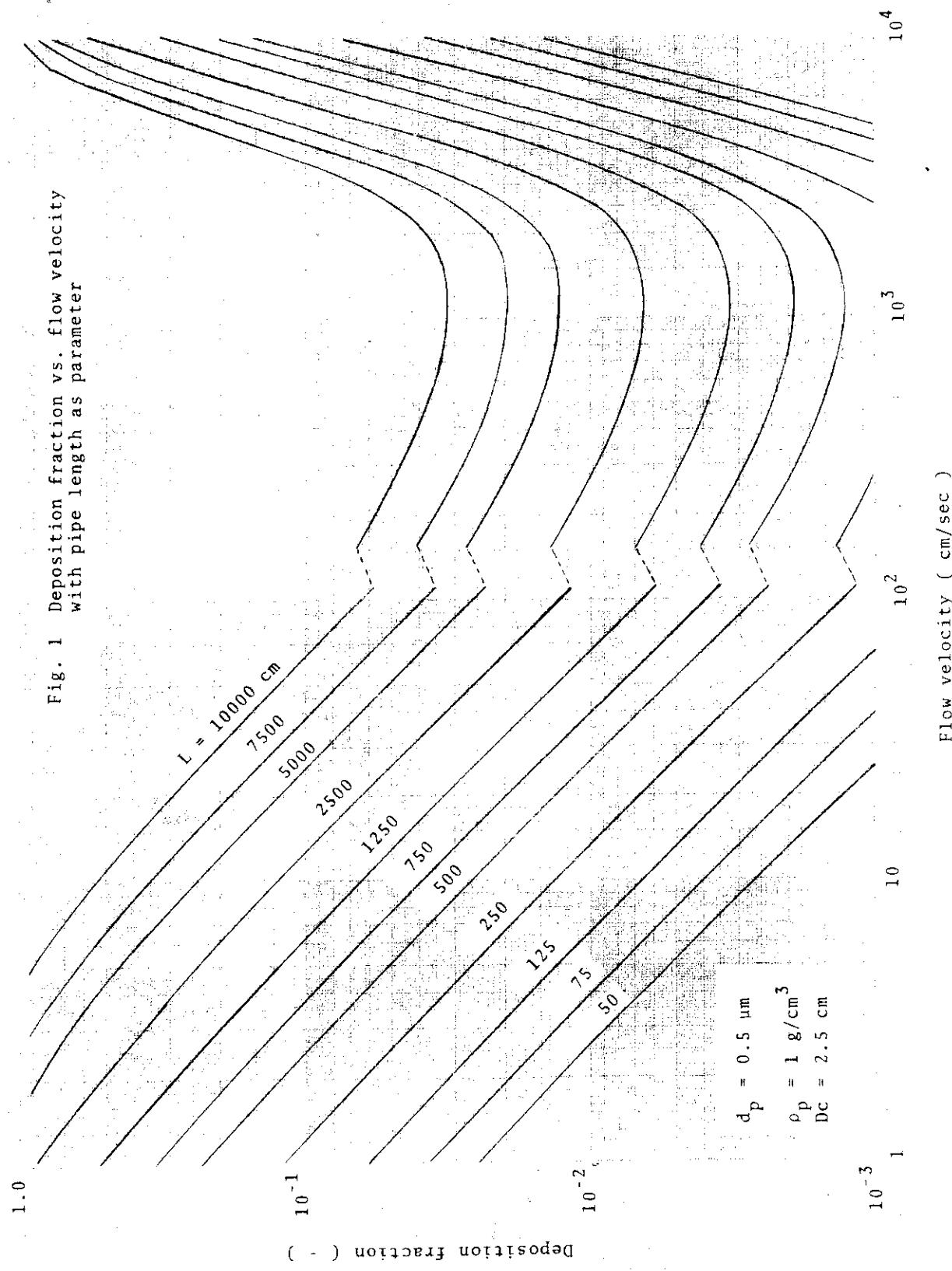
F: deposition fraction, U: flow velocity

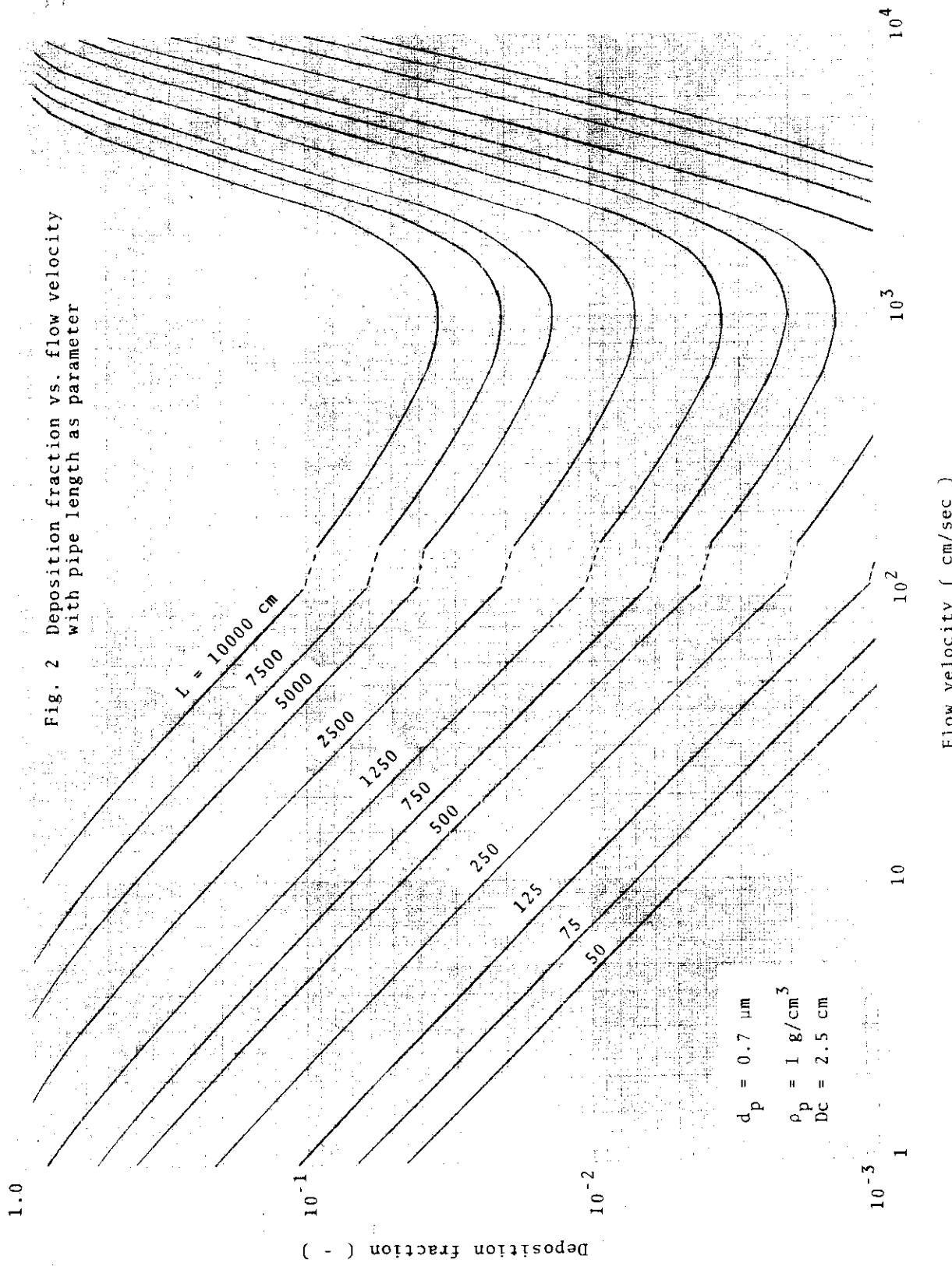
d_p : diameter of particle, ρ_p : density of material

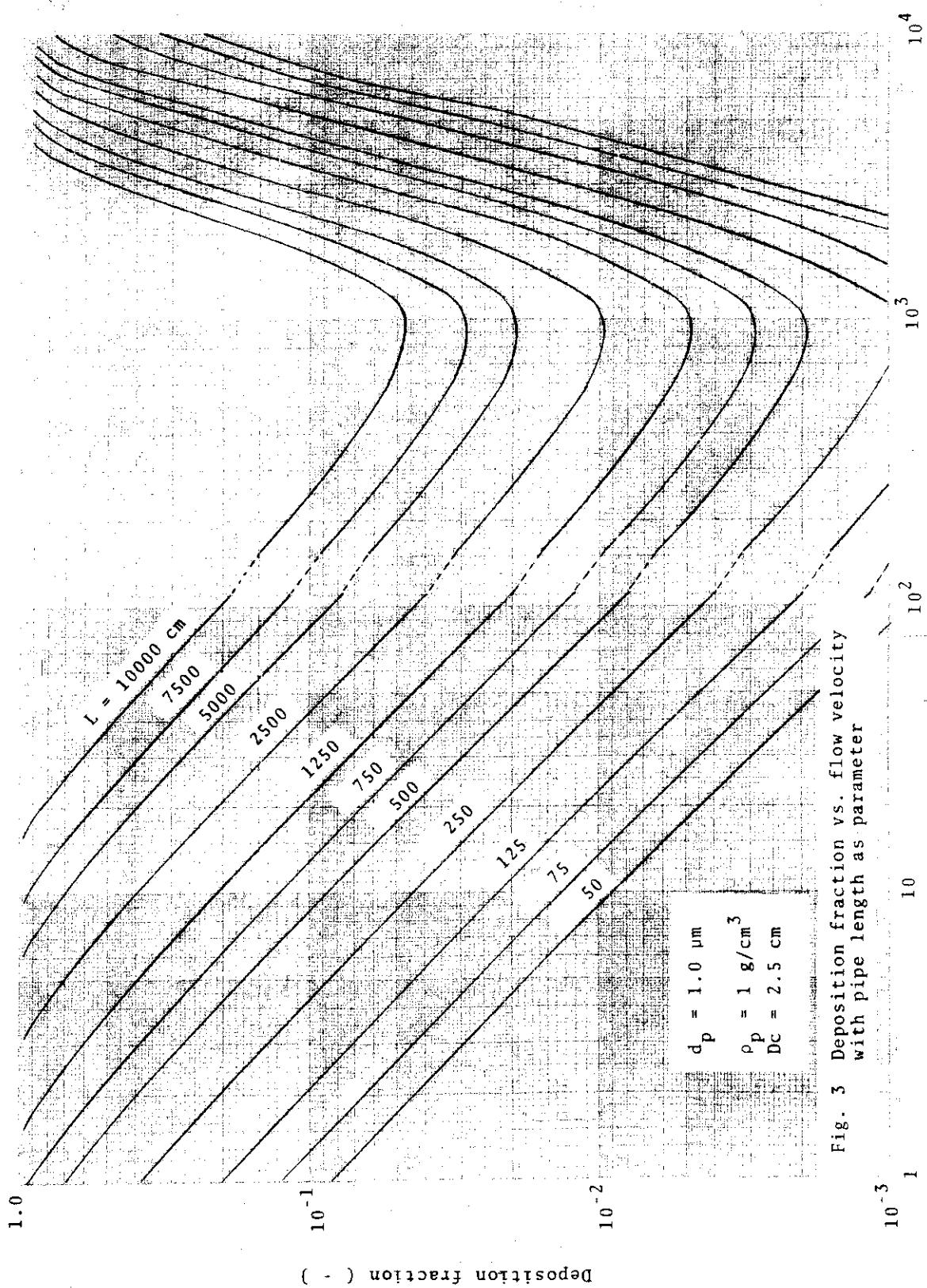
D_c : diameter of pipe, L: length of pipe

Re: Reynolds number, Q: flow rate

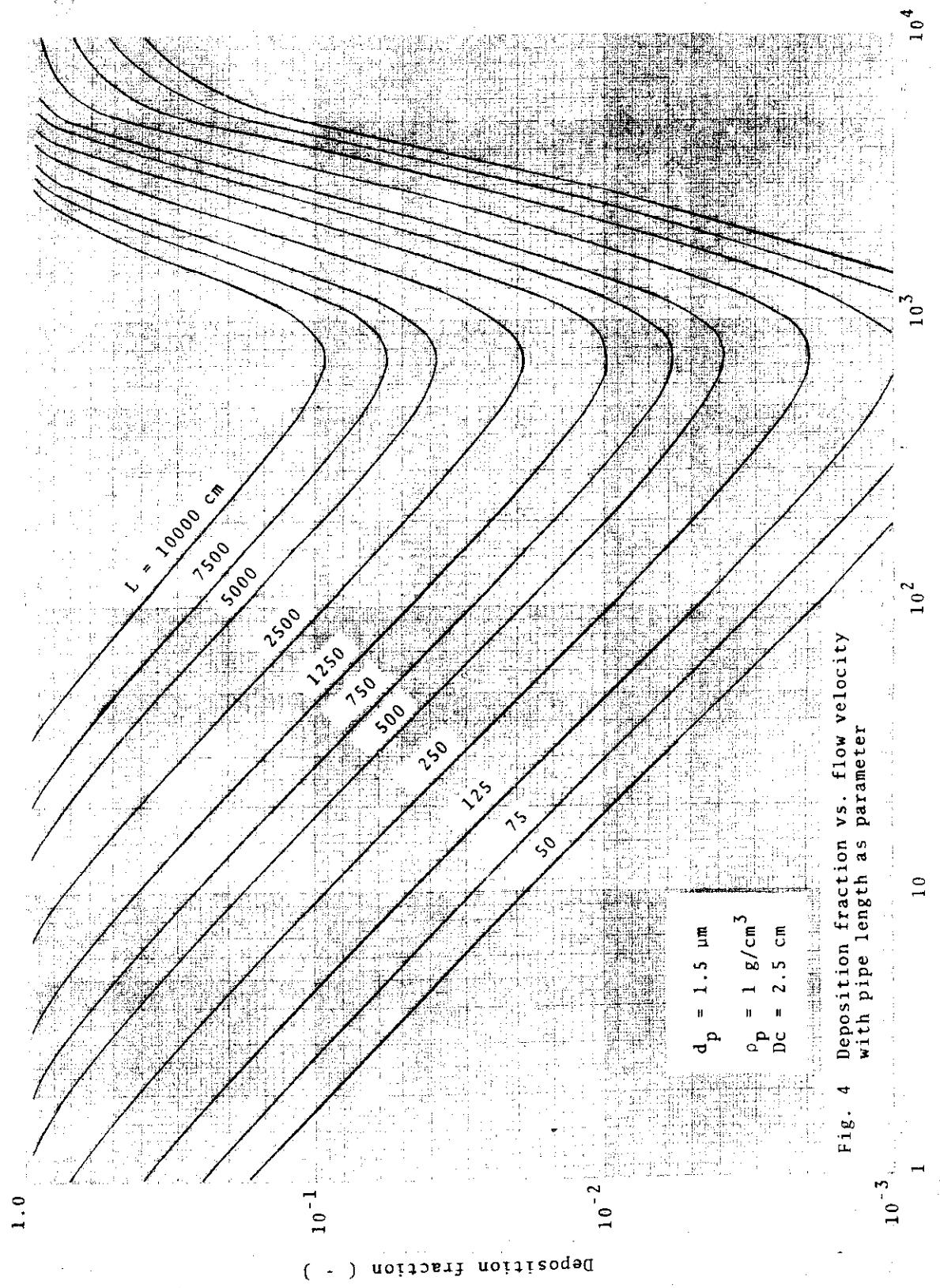
Fig. No	Relation	d_p (m)	ρ_p (g/cm ³)	D_c (cm)	L (cm)
1	F - U	0.5	1	2.5	50 - 10000
2	F - U	0.7	1	2.5	50 - 10000
3	F - U	1.0	1	2.5	50 - 10000
4	F - U	1.5	1	2.5	50 - 10000
5	F - U	2	1	2.5	50 - 10000
6	F - U	3	1	2.5	50 - 10000
7	F - U	4	1	2.5	50 - 10000
8	F - U	5	1	2.5	50 - 7500
9	F - U	7	1	2.5	50 - 5000
10	F - U	10	1	2.5	50 - 1000
11	F - U	15	1	2.5	50 - 500
12	F - U	20	1	2.5	50 - 250
13	F - U	30	1	2.5	50 - 125
14	F - U	5	1	0.6 - 10	300
15	F - U	1	1	0.6 - 10	300
16	U - Q	-	-	0.6 - 10	-
17	U - Re	-	-	0.6 - 10	-
18	Re - Q	-	-	0.6 - 10	-

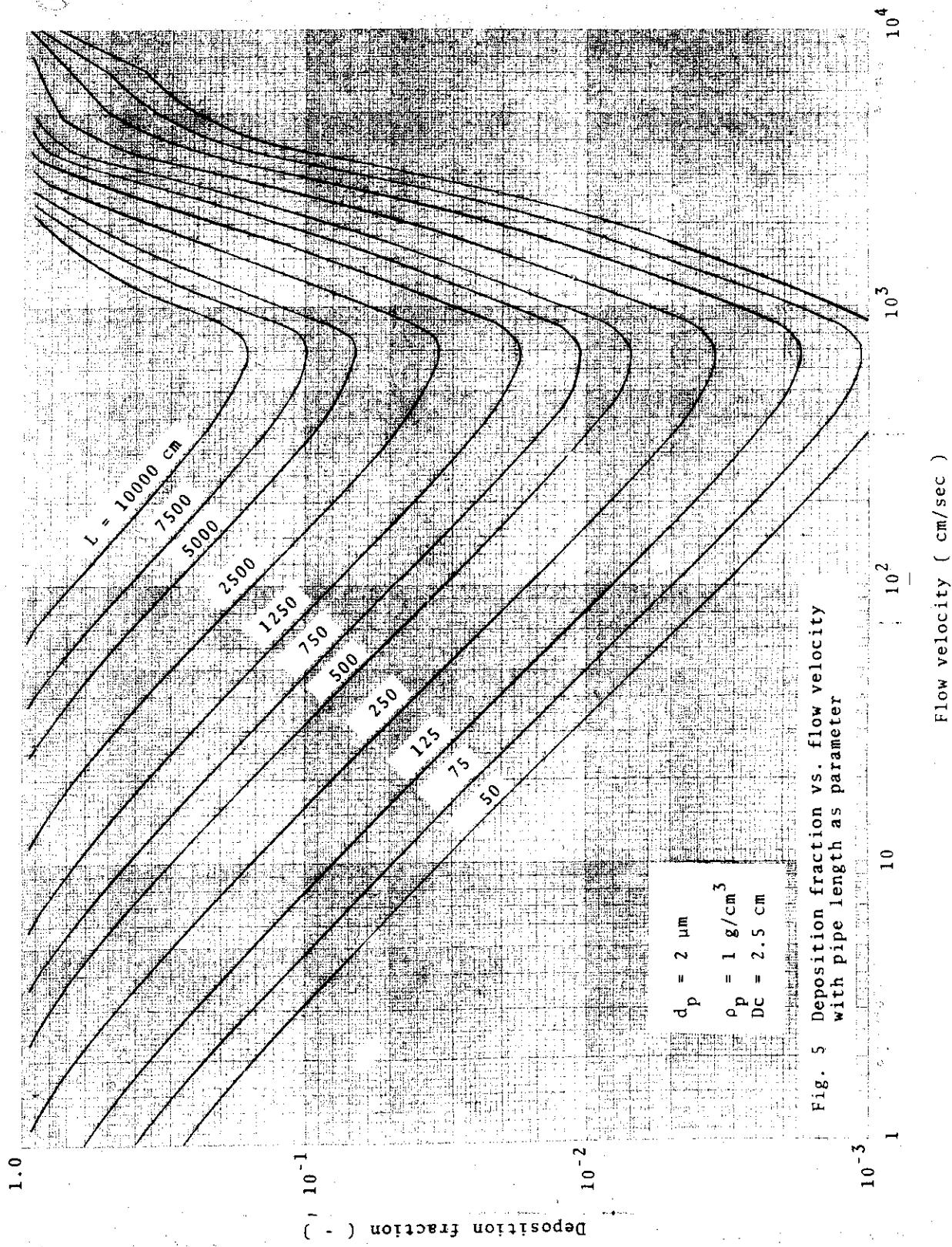






Flow velocity (cm/sec)





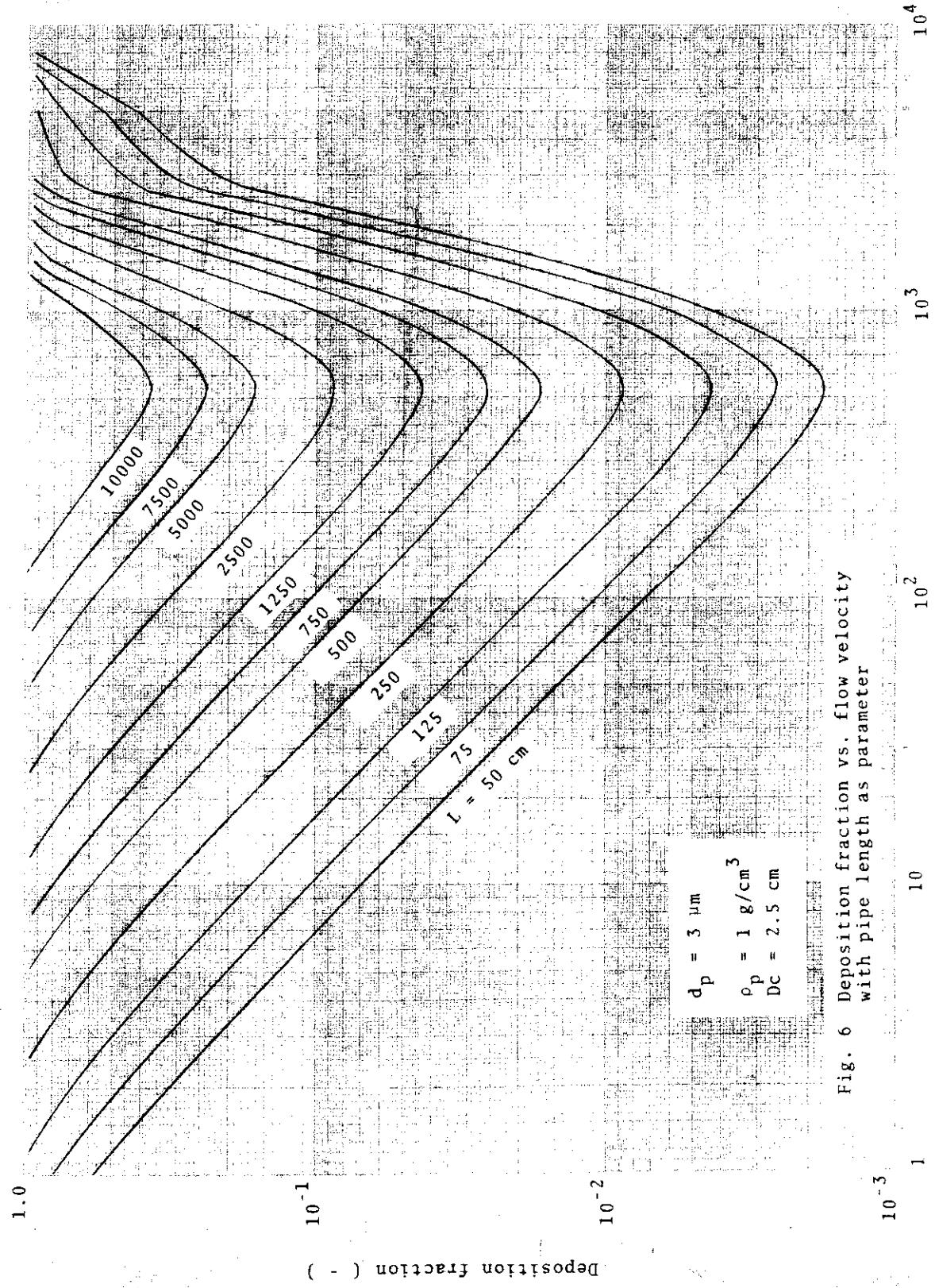


Fig. 6 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter

Flow velocity (cm/sec)

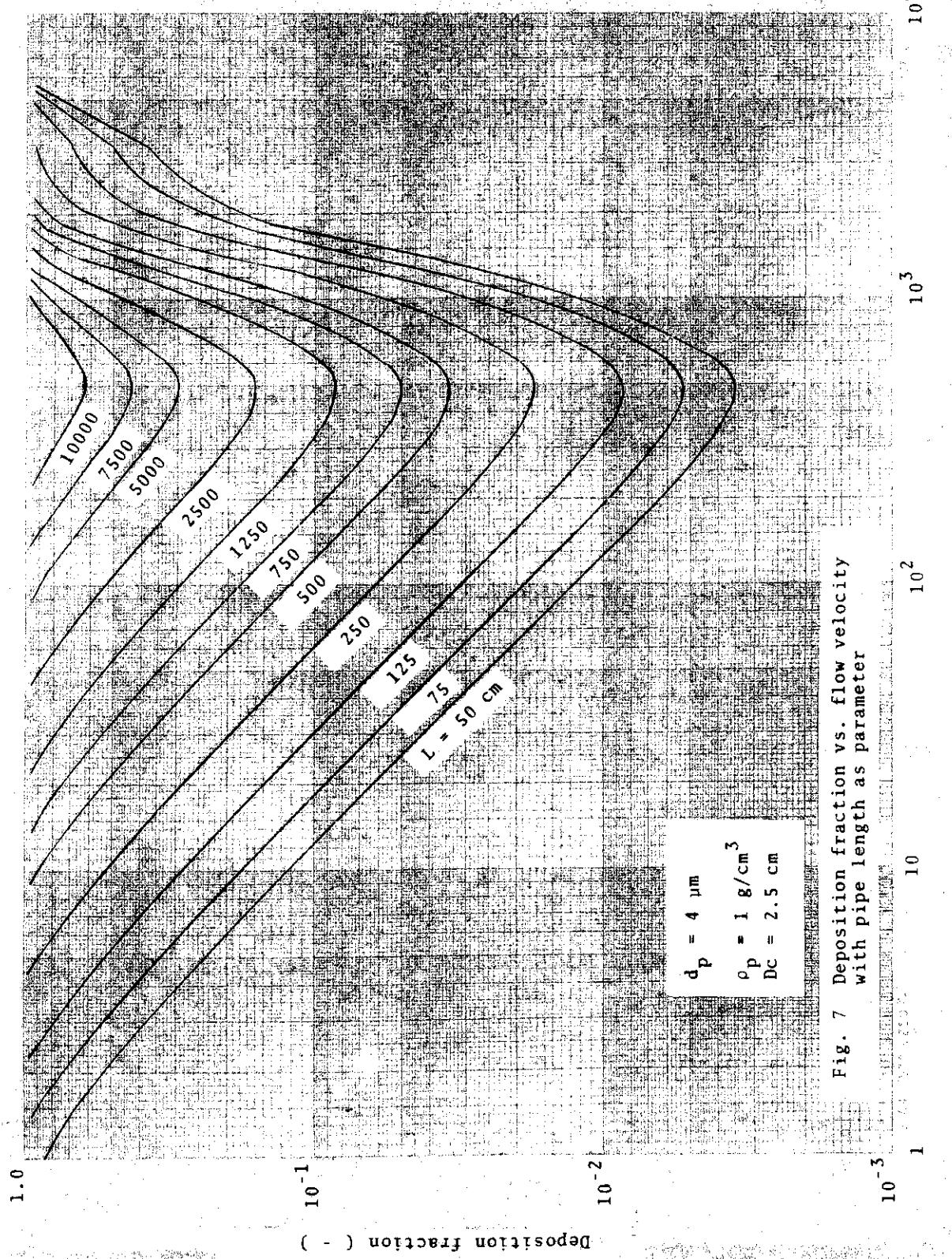


Fig. 7 Deposition fraction vs. flow velocity with pipe length as parameter

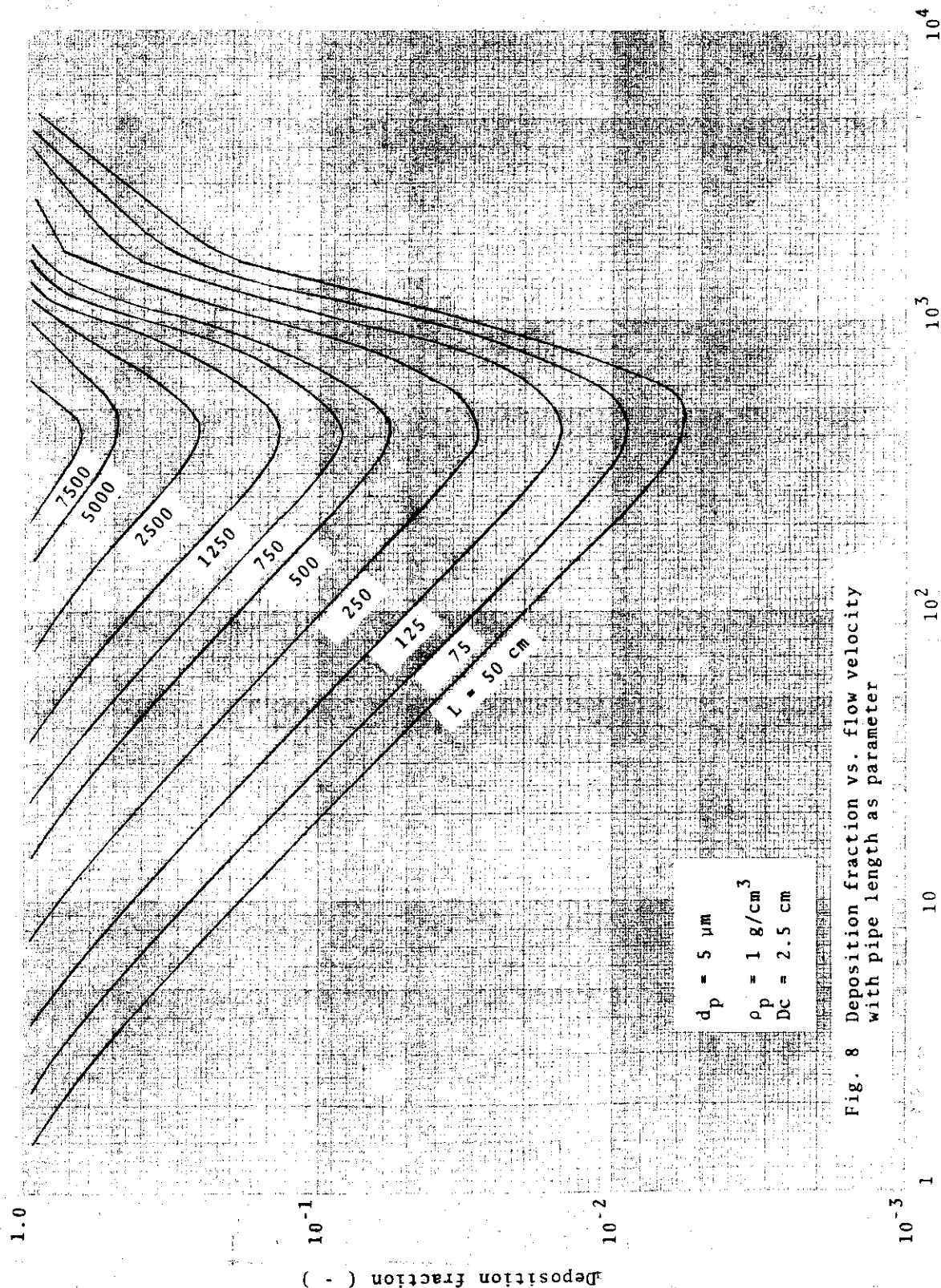


Fig. 8 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter

Flow velocity (cm/sec)

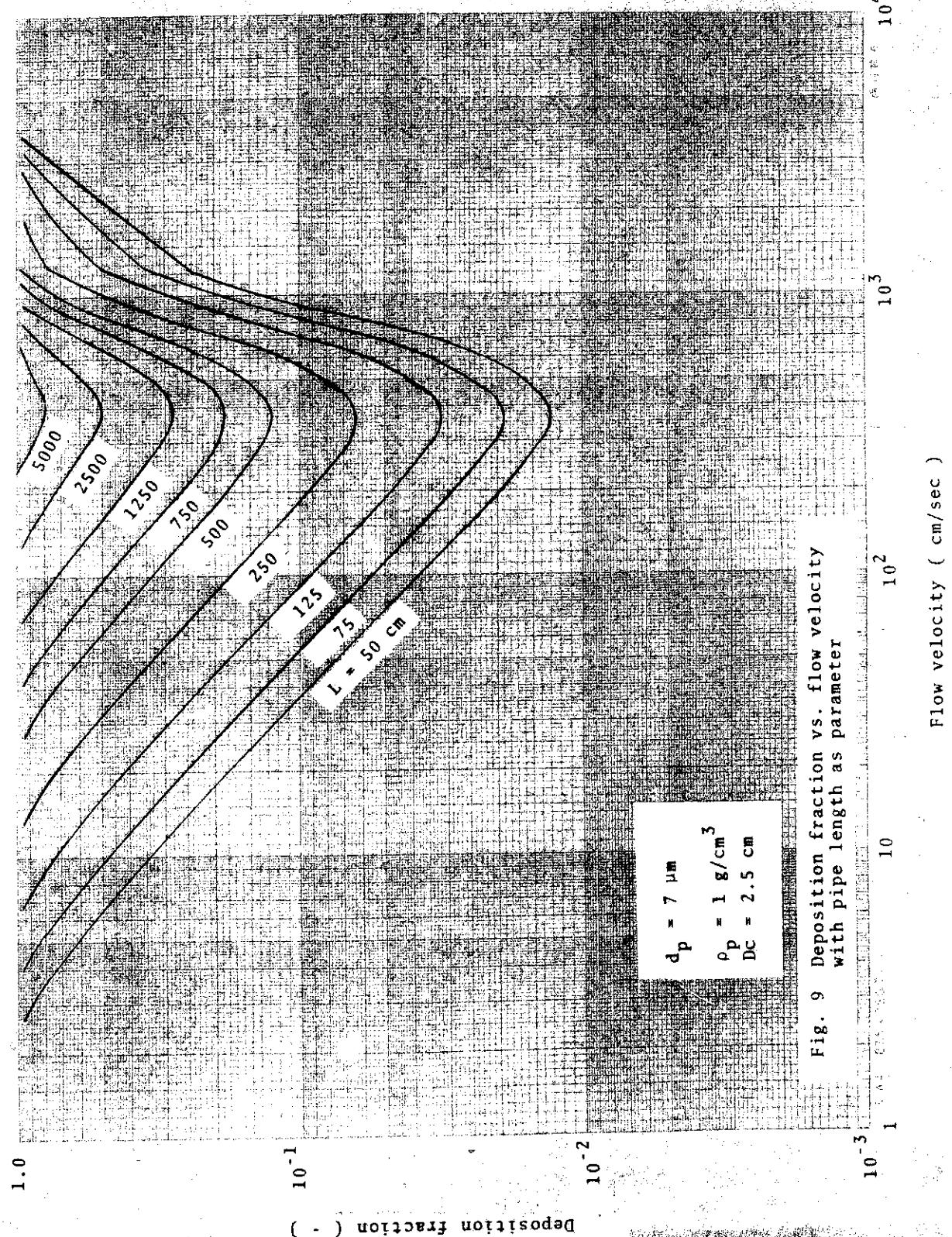


Fig. 9 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter

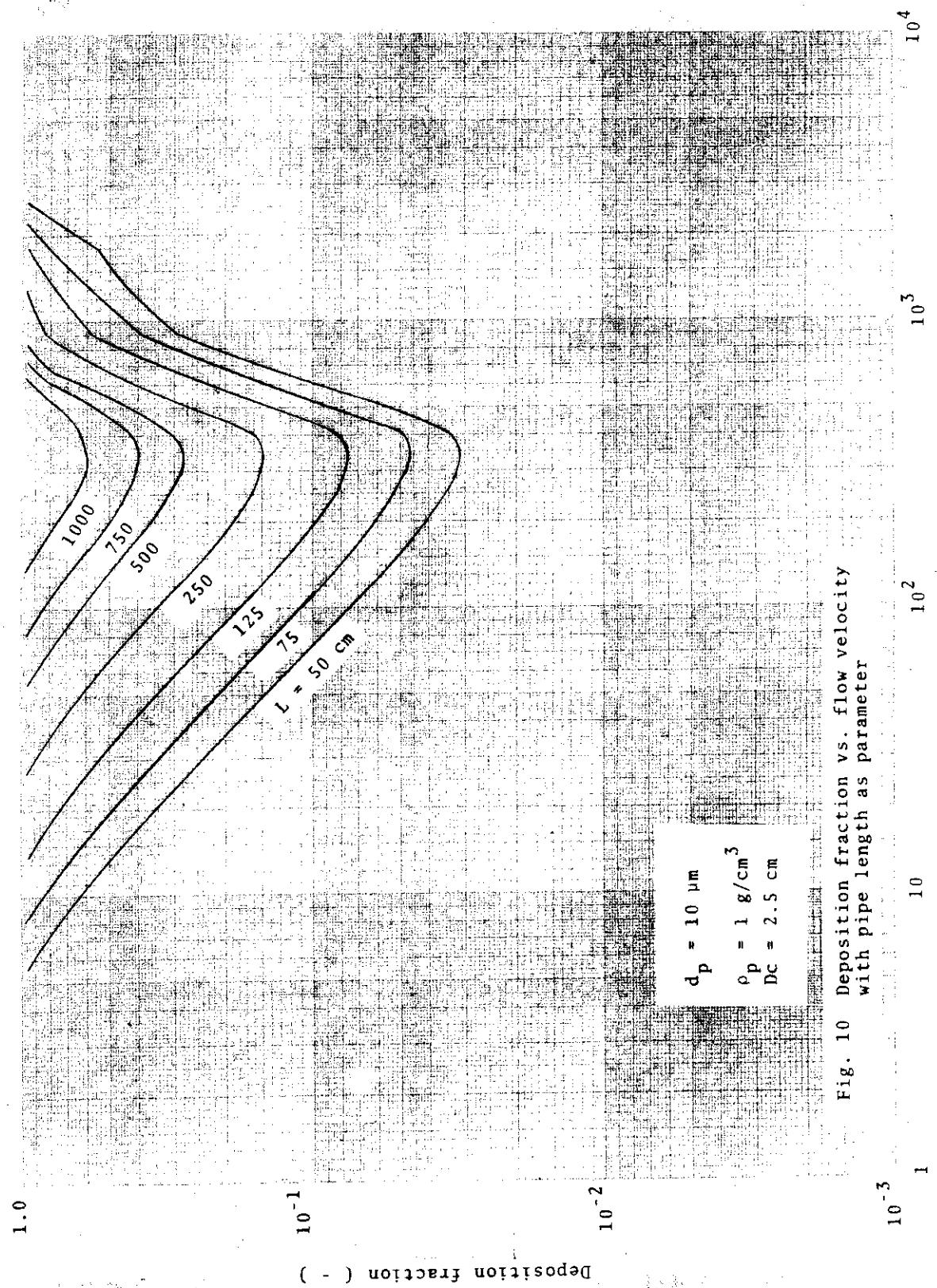


Fig. 10 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter

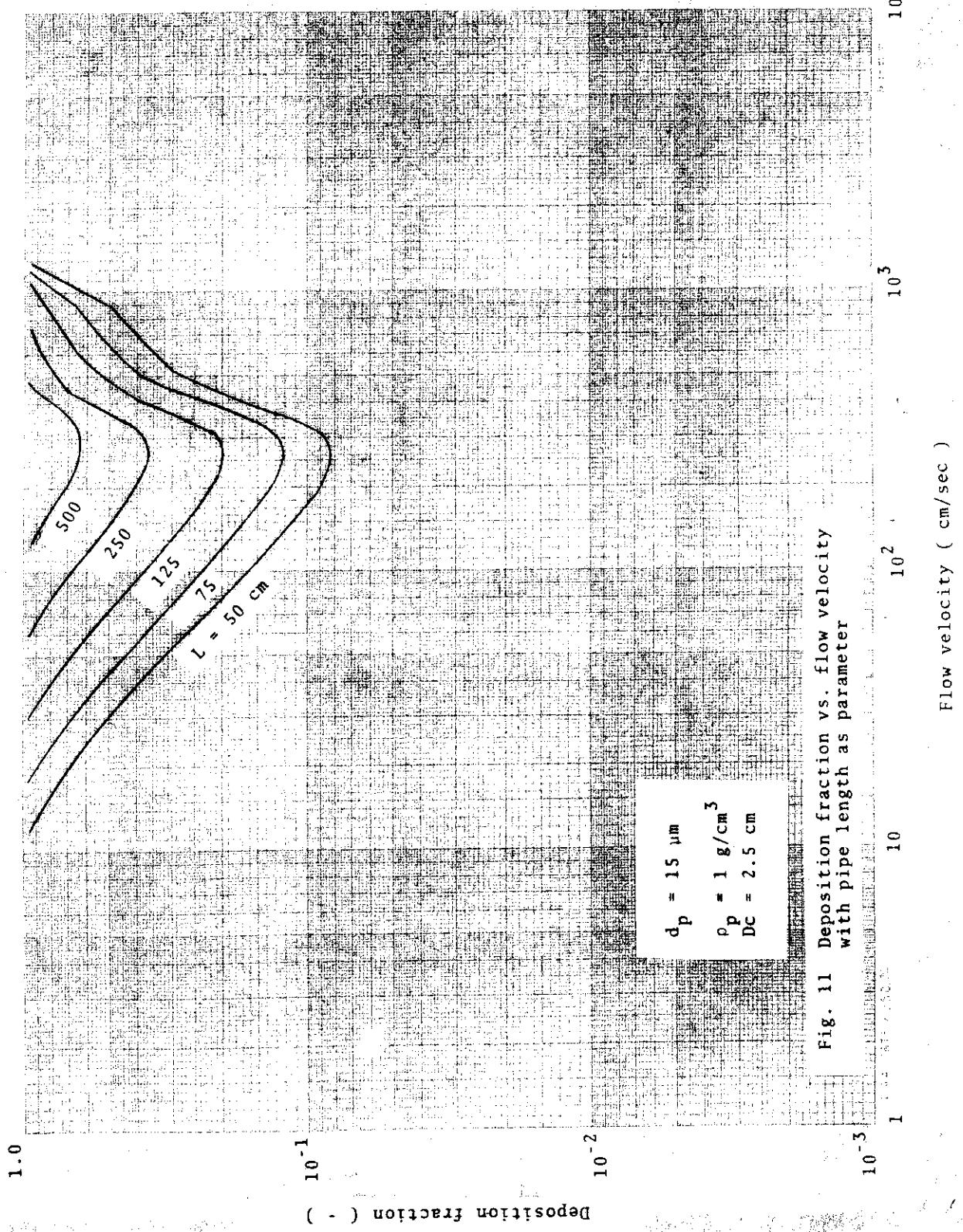


Fig. 11 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter

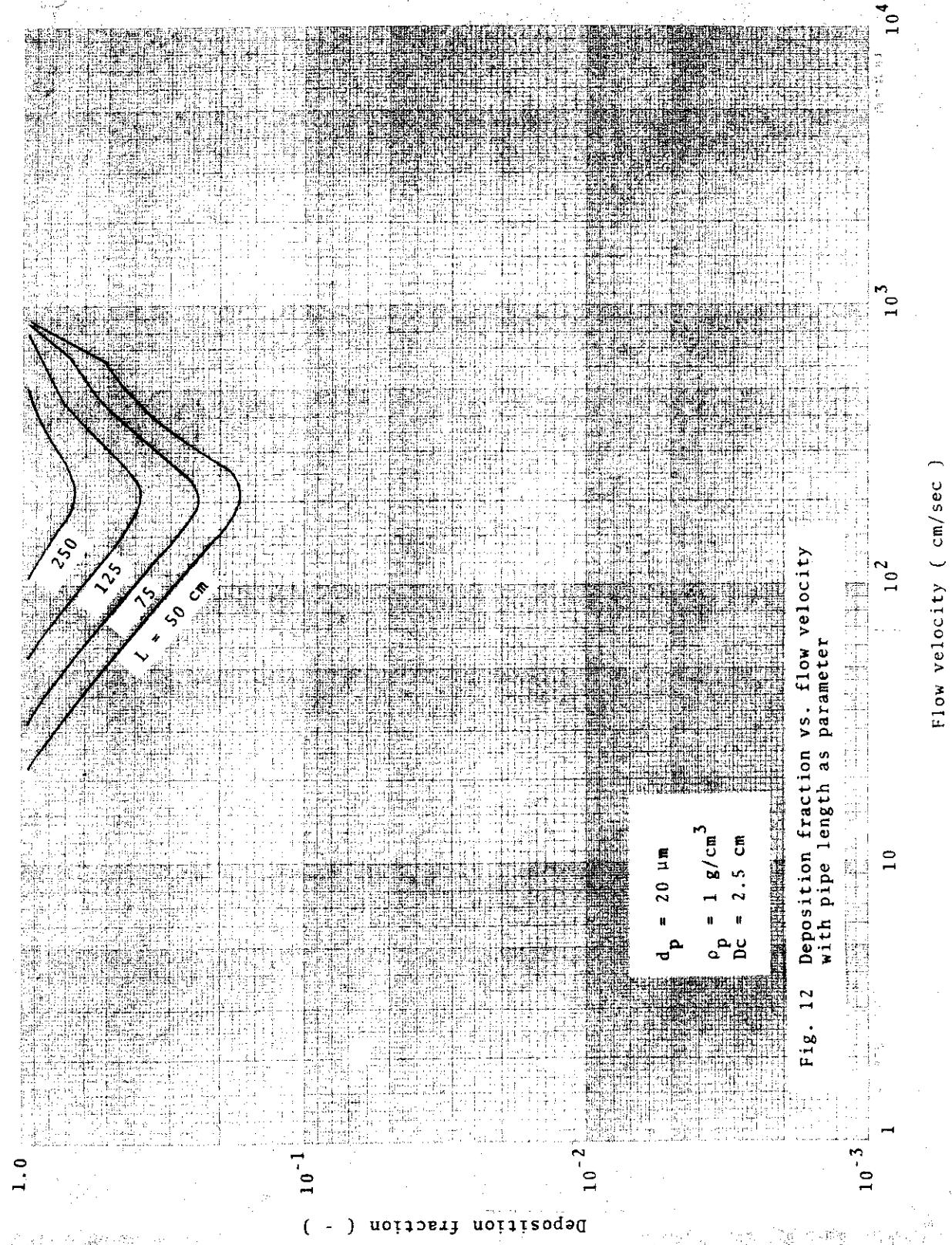
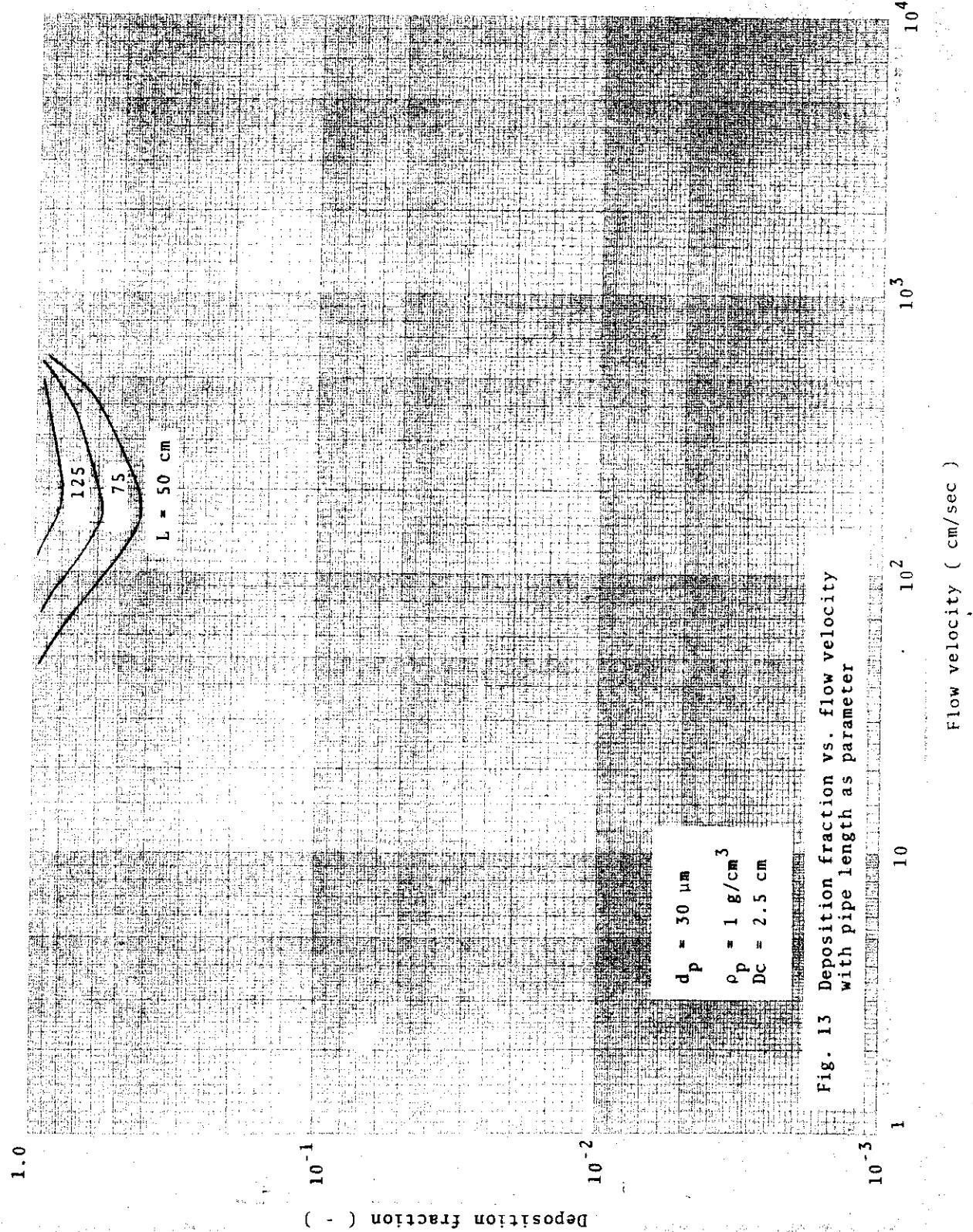


Fig. 12 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe length as parameter



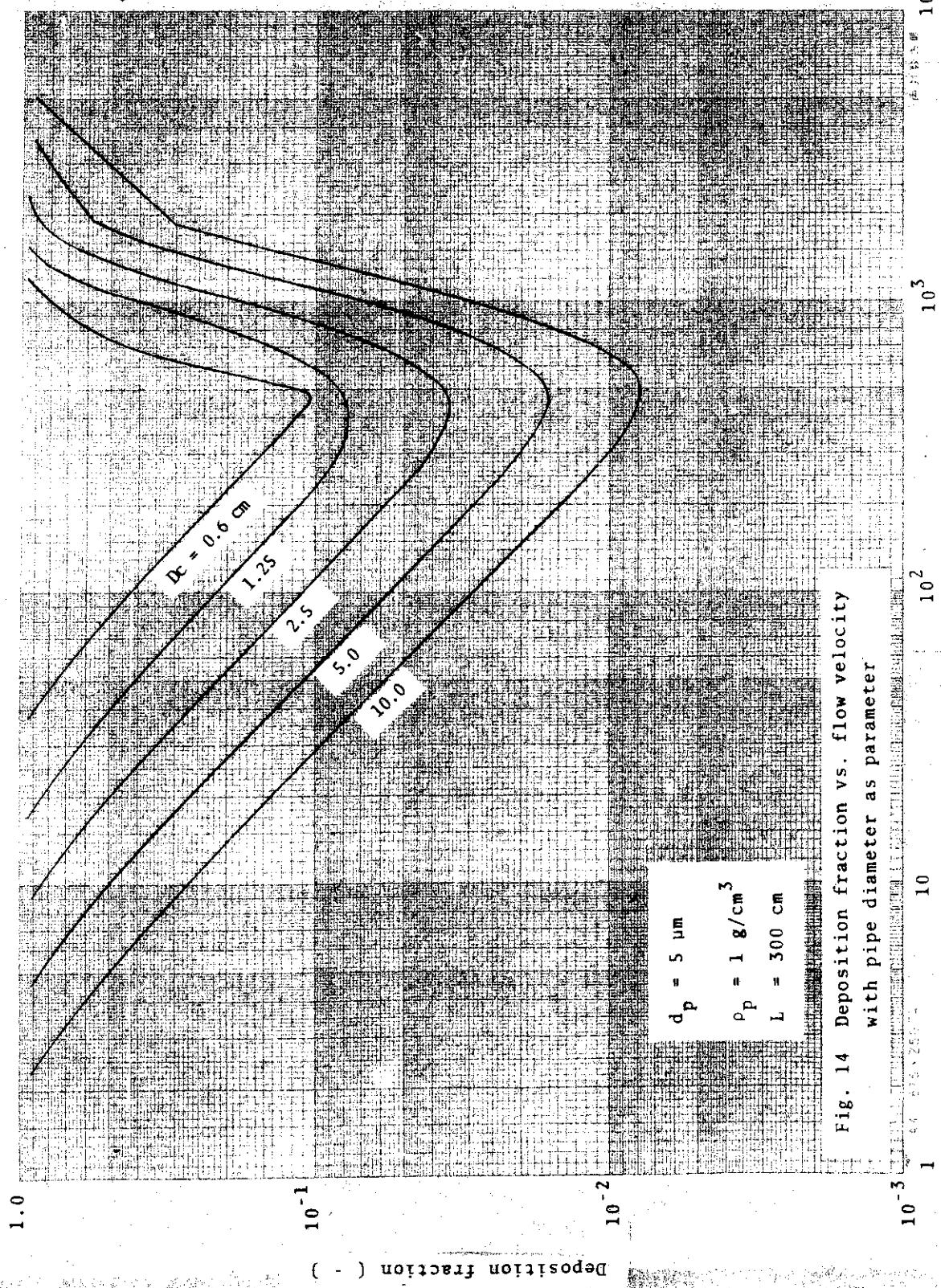
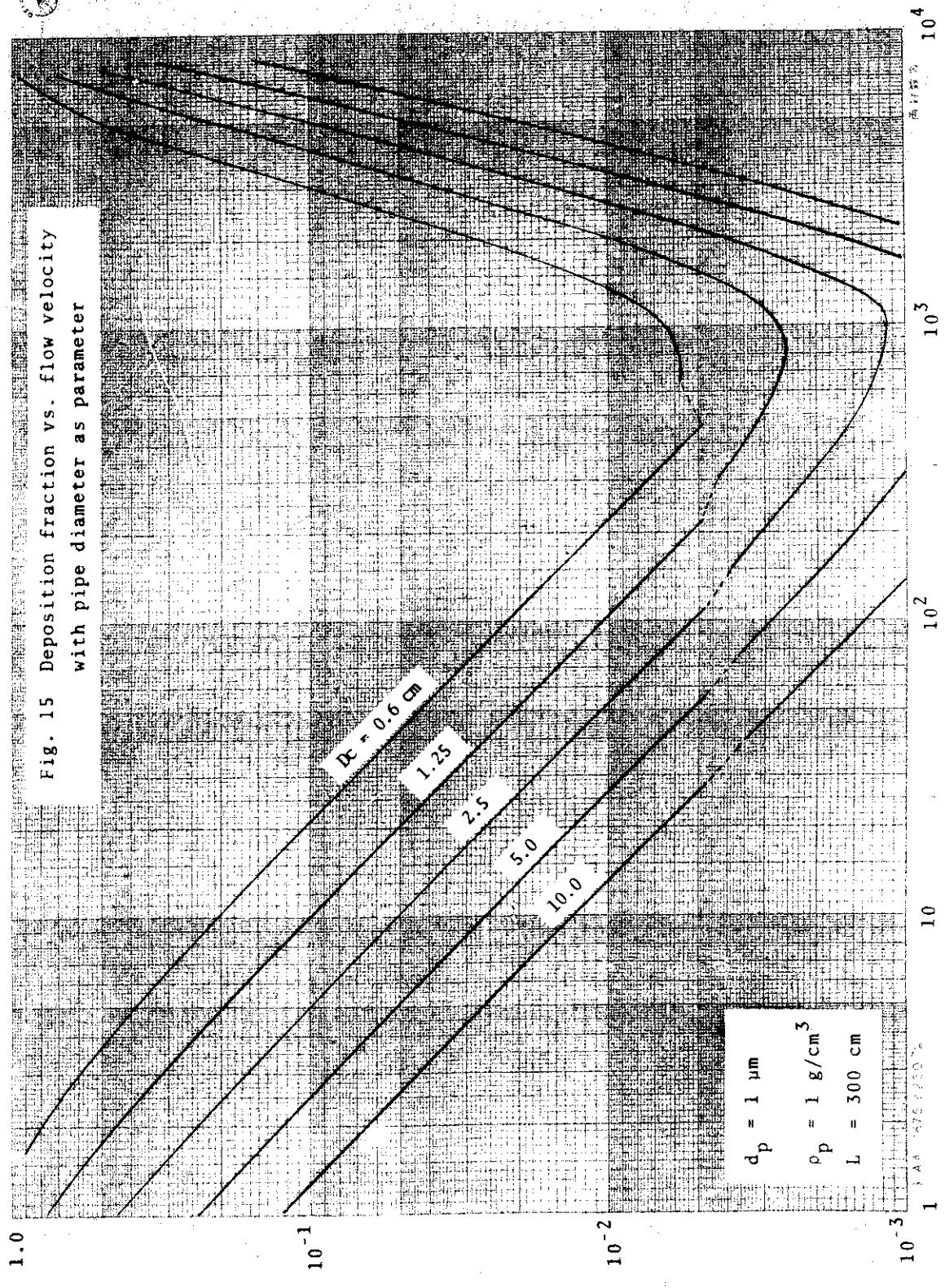


Fig. 14 Deposition fraction vs. flow velocity
with pipe diameter as parameter



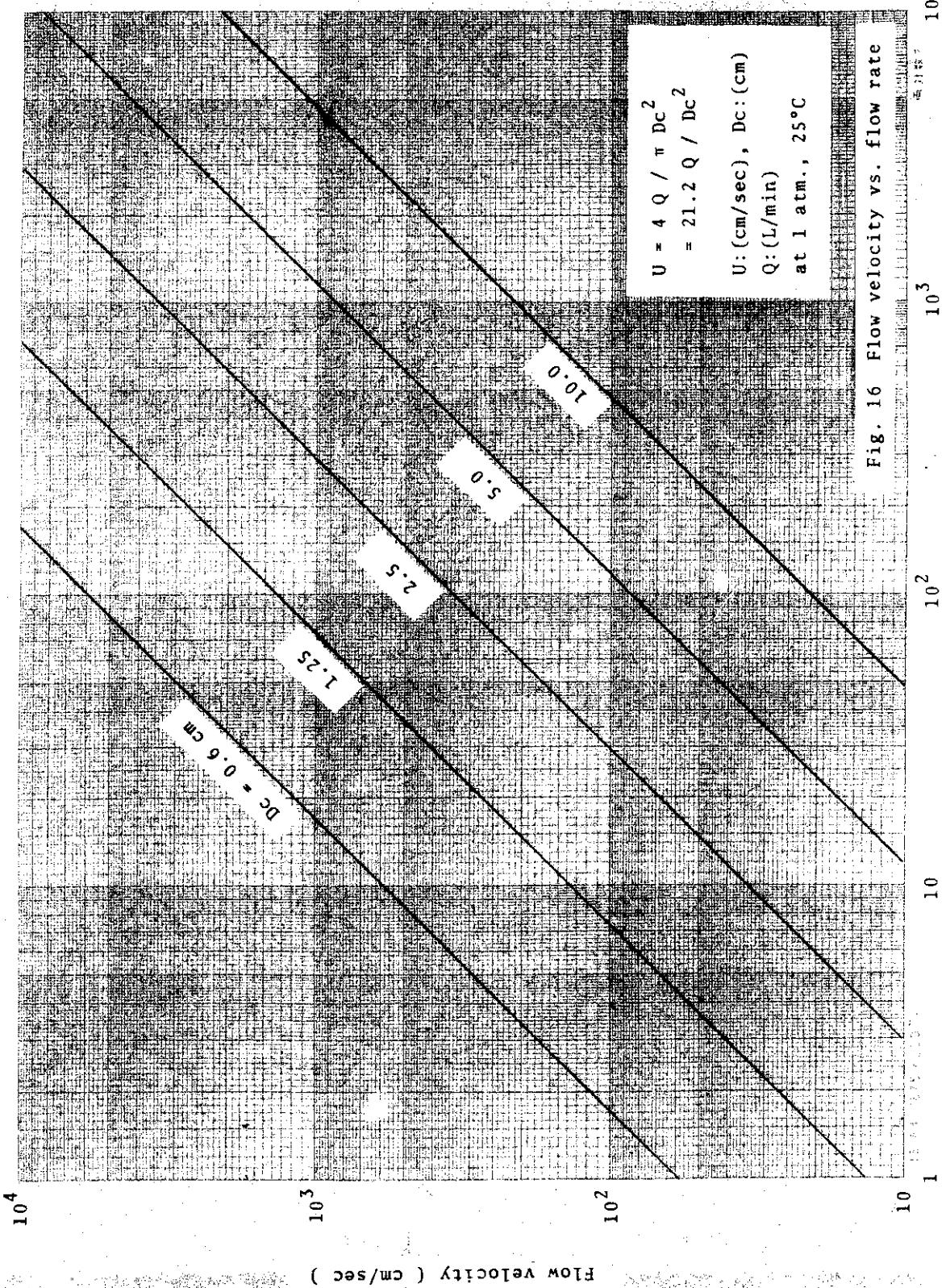


Fig. 16 Flow velocity vs. flow rate

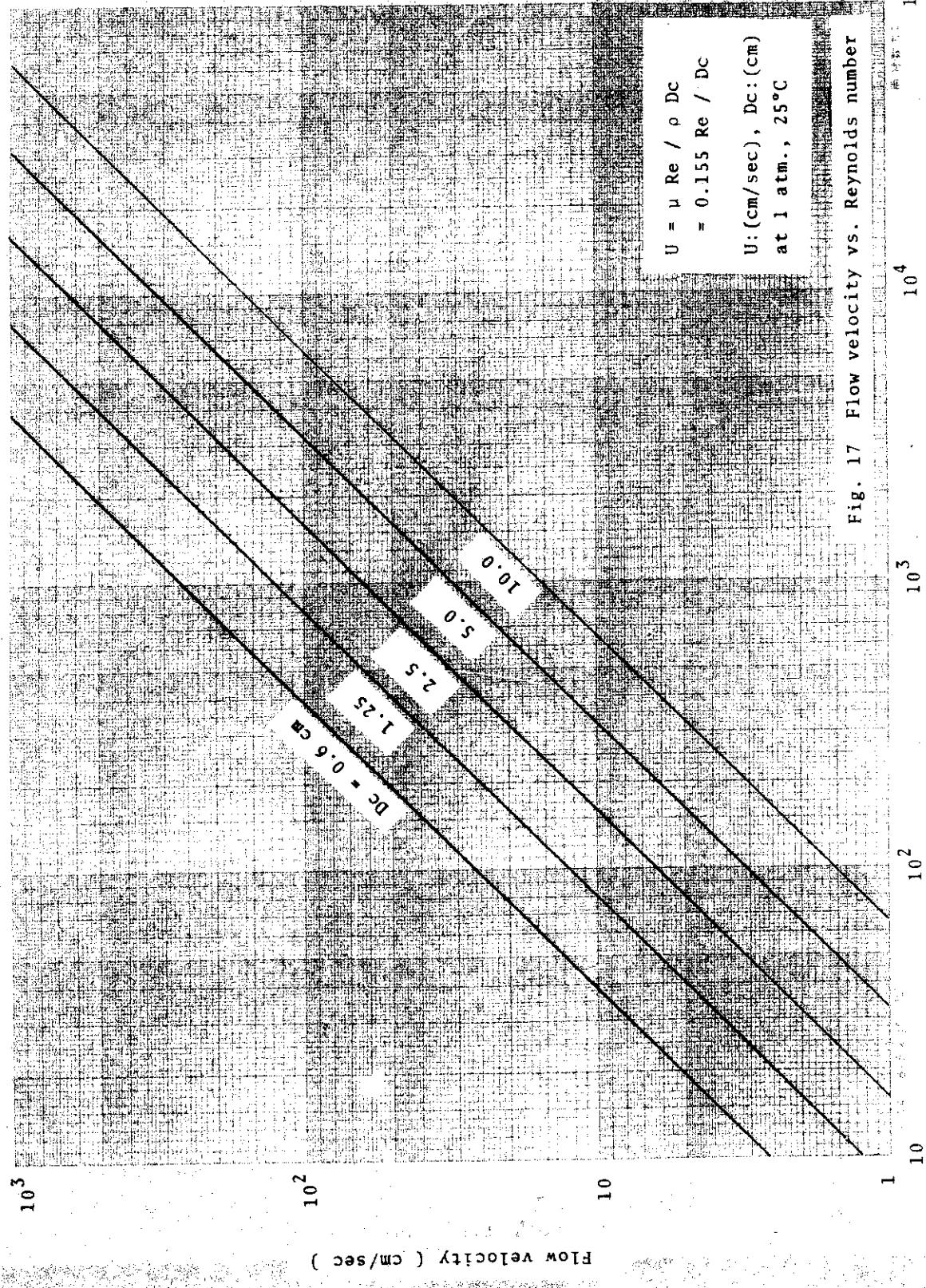


Fig. 17 Flow velocity vs. Reynolds number

Reynolds number (-)

