

硬質塩化ビニール（PVC）製直線ダクトの 摩擦損失

産業医学総合研究所 岩 崎

毅*・小 嶋

純*

1. は じ め に

局所排気装置のダクト系には、従来亜鉛引き鉄板、鋼板など¹⁻³⁾の加工製品や、既製品のスパイラルダクト⁴⁻⁵⁾が多く用いられている。しかし、これらのダクトは、耐食工業材料として十分でないため、最近では、耐食性、経済性、施工性などに優れた、硬質塩化ビニール（PVC）製ダクトが広範囲に利用されつつある。PVC製ダクトの普及に伴い、ダクト系の正しい設計のために、PVC製ダクト部の各種形態（直線ダクト・曲がりダクト）に対する正確な圧力損失が必要となるが、これに関する詳細な報告は見当たらない。

本報では、PVC製直線ダクトの摩擦損失を測定し、その結果を作業現場におけるダクト系の設計資料として有用な直線ダクトの摩擦損失線図にまとめた。

2. 実験装置と方法

局所排気装置のダクト系に使用されるPVC製

* 人間工学特性研究部

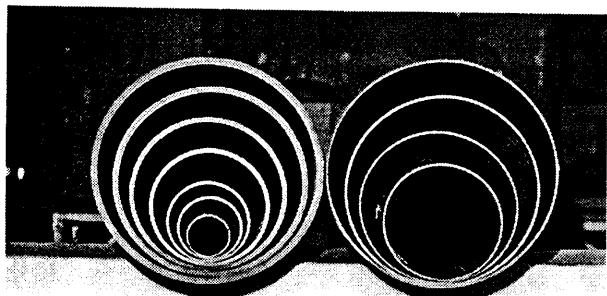


写真1 供試PVC直線ダクトの断面図
(左: VUダクト 右: 薄肉ダクト)

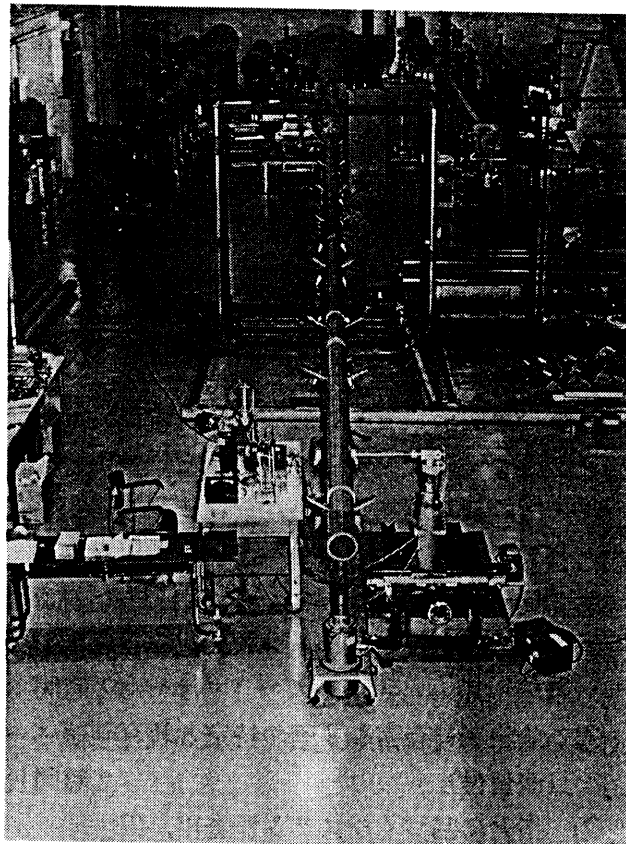


写真2 実験装置の全景

全長16mとして使用した。図1は実験装置の概略図、写真2はその全景を示したものである。

実験装置図の測定用ダクト②に連結されている精密整流格子⑫から下流側2.5dの位置と、フランジ付き円形開口から下流側15dの位置において、同心円等面積 ($n=5$)⁷⁾による10点を測定点とし、精密トラバース装置を用いてNPL (National Physical Laboratory) 型標準ピトー管(直径6mm)をトラバースしながら各測定点の静圧および動圧を、ベッツ微圧計⑬およびデジタル微圧計⑮で測定した。測定により得られた管内平均速度 P_v 、重力加速度 g および空気の比重 γ から $V=\sqrt{(2g/\gamma) \cdot P_v}$ の関係を用いて管内速度 V を計算し、 V と管路断面積 $A=\pi d^2/4$ との積から流量 Q を求めた。このときの管内平均速度は、5~30m/sの範囲で変化させて行った。

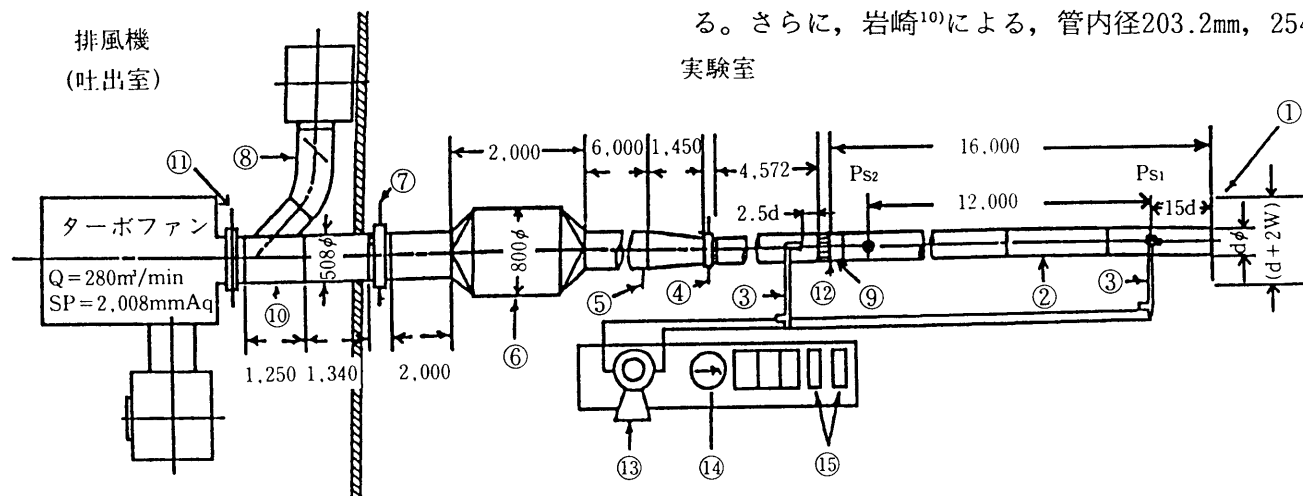
3. 結果と考察

3.1 フランジ付円形開口の下流側における静圧降下現象

PVC製直線ダクトの両端には、テーパ管およびフランジ付き円形開口が連結されており、そのために管内速度の影響を受けない一断面、すな

わち静圧が直線的に降下する助走区間において静圧を測定した。その結果を図2に示す。図2は呼び径150mm (内径154mm) のVUダクトのダクト内を流れる助走区間および下流の発達した流れについて、ダクトに沿う静圧降下分布を速度別に示したものである。図2から、静圧はいずれの速度範囲においても、フランジ付き円形開口面から下流側へ10dで直線的に降下することがわかった。静圧降下は、ダクト内速度が大きくなるにつれて極めて著しくなる。

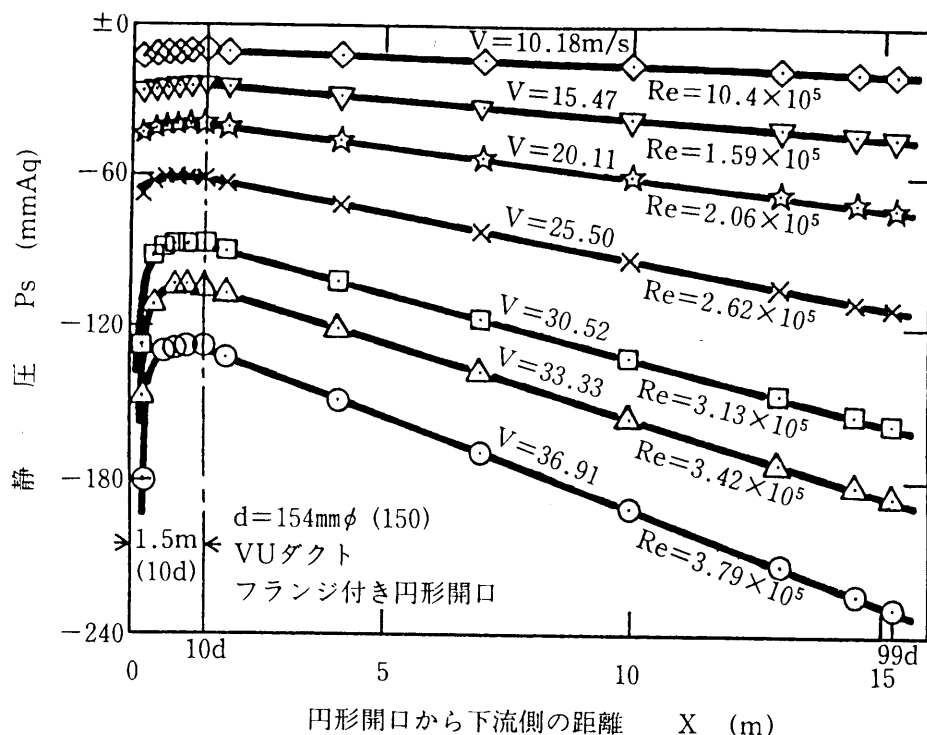
乱れ流における速度分布が完成するまでの流れの距離(助走距離)は、通常、粘性流の助走距離に比べてはるかに短い。Nikuradse⁸⁾は、その距離が(30~50)dであるとしている。この助走距離より下流側では、速度分布が一定になるため管路断面が通る流体エネルギーも一定となり、管摩擦による静圧降下の割合も一定となる。しかし、田中ら⁹⁾が管内径32mm長さ約5.6mの滑らかな真鍮管内に空気を流した実験結果によれば、吸込み口から下流側へ(6.25~175)d付近までは、等間隔ごとに測定した静圧値に多少の相違があるが、これは極めて小さく、吸込み口から管路に沿った静圧降下は、ほぼ直線的に増加するものと見なされる。さらに、岩崎¹⁰⁾による、管内径203.2mm、254



- | | | |
|------------------|-----------------|---------------|
| ①フランジ付き円形開口 | ⑥吸込みサイレンサー | ⑪風量調節スライドダンパー |
| ②測定用ダクト | ⑦精密風量調節スライドダンパー | ⑫精密整流格子 |
| ③NPL標準ピトー管(6mmφ) | ⑧吸込みバタフライダンパー | ⑬ベッツ型微圧計 |
| ④精密風量調節スライドダンパー | ⑨定温度型熱線流速計 | ⑭温湿度計 |
| ⑤温度計(ダクト内の温度測定) | ⑩吸込みバイパス管 | ⑮デジタル微圧計 |

図1 実験装置図

図2 フランジ付き
円形開口から
下流側の静圧
降下現象



mm, 381mm, および508mmの長さ38dの滑らかな鋼管内に空気を流した実験結果では、フランジ付き円形開口より下流側(2~5)dで静圧はほぼ一定となり、(5~8)dで22.5dの下流側の位置の速度分布とほぼ一致し、静圧降下は、吸込み開口面から下流側へ5d以上でほぼ直線的に増加している。したがって、静圧降下がフランジ付き円形開口から下流側へ10d以上で直線的に降下するという本実験結果は、同じ滑らかな管を用いた田中ら⁹⁾、および岩崎¹⁰⁾の結果の範囲内であることがわかる。

以上の結果に基づき、各供試ダクトについて静圧が直線的に降下する範囲内で測定位置を定め、フランジ付き円形開口から下流側15dの位置を測定位置1とし、さらに、測定位置1から下流側12mの位置を測定位置2として測定を行った。

本研究では、ダクト内における空気を等温流と仮定し、ダクト1m当たりの摩擦損失 ΔP を次の式で表した。

$$\begin{aligned}\Delta P &= (P_{s1} - P_{s2}) \cdot 1 / L \\ &= \lambda \cdot (1/d) \cdot (\gamma / 2g) \cdot V^2 \\ &= \lambda \cdot (1/d) \cdot P_v \dots \dots \dots (1)\end{aligned}$$

ここで、

P_{s1} = 測定位置1における平均静圧 (mm Aq)

P_{s2} = 測定位置2における平均静圧 (mm Aq)

L = 測定位置1, 2間の距離 (m)

d = ダクト内径 (m)

γ = ダクト内空気の比重 (kg/m³)

λ = 流体摩擦係数 (—)

V = ダクト内における空気の平均速度 (m/s)

P_v = ダクト内における空気の平均動圧 (mm Aq)

g = 重力加速度 (m/s²)

3.2 ムーディ線図における摩擦係数とレイノルズ数との関係

一般的なダクト(垂鉛引き鉄板ダクト、鋼板ダクト、スパイラルダクトなど)は、ほとんど層流域と完全乱流域(あらい管)の中間領域(遷移領域)において使用される。本研究におけるPVC製直線ダクトの実験でも、流体摩擦係数 λ の値はこの遷移領域内にあり、平滑管のときの λ - Re 数曲線上にあるものとして測定した。ムーディ線図¹¹⁾に記入したPVC製直線ダクトの摩擦係数 λ とレイノルズ数 Re との関係をダクト別に示したものが図3である。図3から λ の値は、いずれのダクト内径に対しても Re 数によって異なり、 Re 数が大きくなるにしたがって、小さくなること

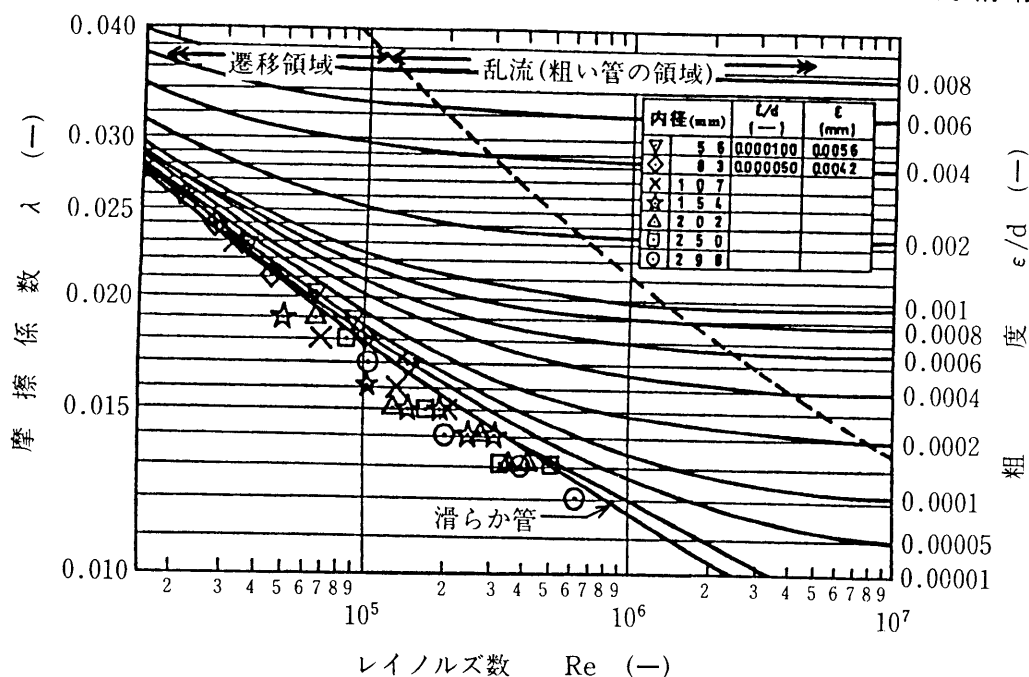


図3 ムーディ線図における摩擦係数とレイノルズ数の関係

が認められた。呼び径50mm（ダクト内径56mm）のダクトでは、平滑管の $\epsilon/d=0.0001$ の λ -Re 数曲線に一致し、呼び径75mm（ダクト内径83mm）のダクトでは、平滑管の $\epsilon/d=0.00005$ の λ -Re 数曲線にほぼ一致していることがわかった。その結果、比較的小さなダクト内径に対する絶対粗度は、呼び径50mmのダクトの絶対粗度 $\epsilon=0.0056\text{mm}$ 、および呼び径75mmのダクトの絶対粗度 $\epsilon=0.0042\text{mm}$ とほぼ一致することが認められた。

比較的小さなダクト内径（56mmおよび83mm）2本に対する絶対粗度は互いにほぼ一致し、その平均絶対粗度（ $\epsilon=0.0049\text{mm}$ ）は、R.Sprenger¹²⁾による塩化ビニール管、及びポリエチレン管の絶対粗度 $\epsilon=0.005\text{mm}$ とほぼ一致する。しかし、比較的大きなダクト内径（107mm～298mm）に対しては、滑らかな管の λ -Re 数曲線よりわずかに小さい値を示した。これは、PVC製直線ダクトの単位長さ当たりの摩擦損失がダクト内径の増大に伴い減少するため、すべてのダクト内径に対して測定位置の距離 $L=12\text{m}$ としたことが原因と思われる。つまり、ダクト内径が大きくなるにつれて、その測定位置の距離も長くする必要があったと推察される。本実験結果から、滑らかな管の ϵ/d の λ -Re 数曲線にほぼ一致したダクト内径（56mmおよび83mm）2本に対して、測定位置の距離 $L=12\text{m}$ は、

ダクト内径の（145～214）倍に相当し、助走距離として十分であったと考えられる。しかし、内径107mm～298mmのダクトに対して、測定位置の距離 $L=12\text{m}$ はダクト内径の（40～112）倍に過ぎず、助走距離として不十分であったと思われる。そこで、56mmおよび83mmのダクト内径2本の実験結果を参考に、すべてのダクト内径に対して、測定位置の距離をダクト内径の（150～200）倍に保てば、PVC製直線ダクトの摩擦損失は、滑らかな管の相対粗度 $\epsilon/d=0.00002\sim0.00001$ の λ -Re 数曲線のいずれかに一致すると推察される。ただし、供試ダクトで最大のダクト（内径298mm）に対して、その測定位置の距離を内径の（150～200）倍に仮定すると、助走距離は、（44.7～59.6）mとなり、実験室内では実現不可能な助走距離となる。

以上の結果からPVC製直線ダクトの流体摩擦係数が求まるまで、PVC製のダクト系を設計する場合に利用すべき摩擦損失線図は、ダクトの単位長さ当たりの摩擦損失を横軸に、風量を縦軸に、又ダクトの内径と風速とを斜行軸にとって作製することができる。

3.3 摩擦損失線図

図4の摩擦損失線図は、前記の実験結果に基づいて作製した。この線図は、ダクト内径56mm、及

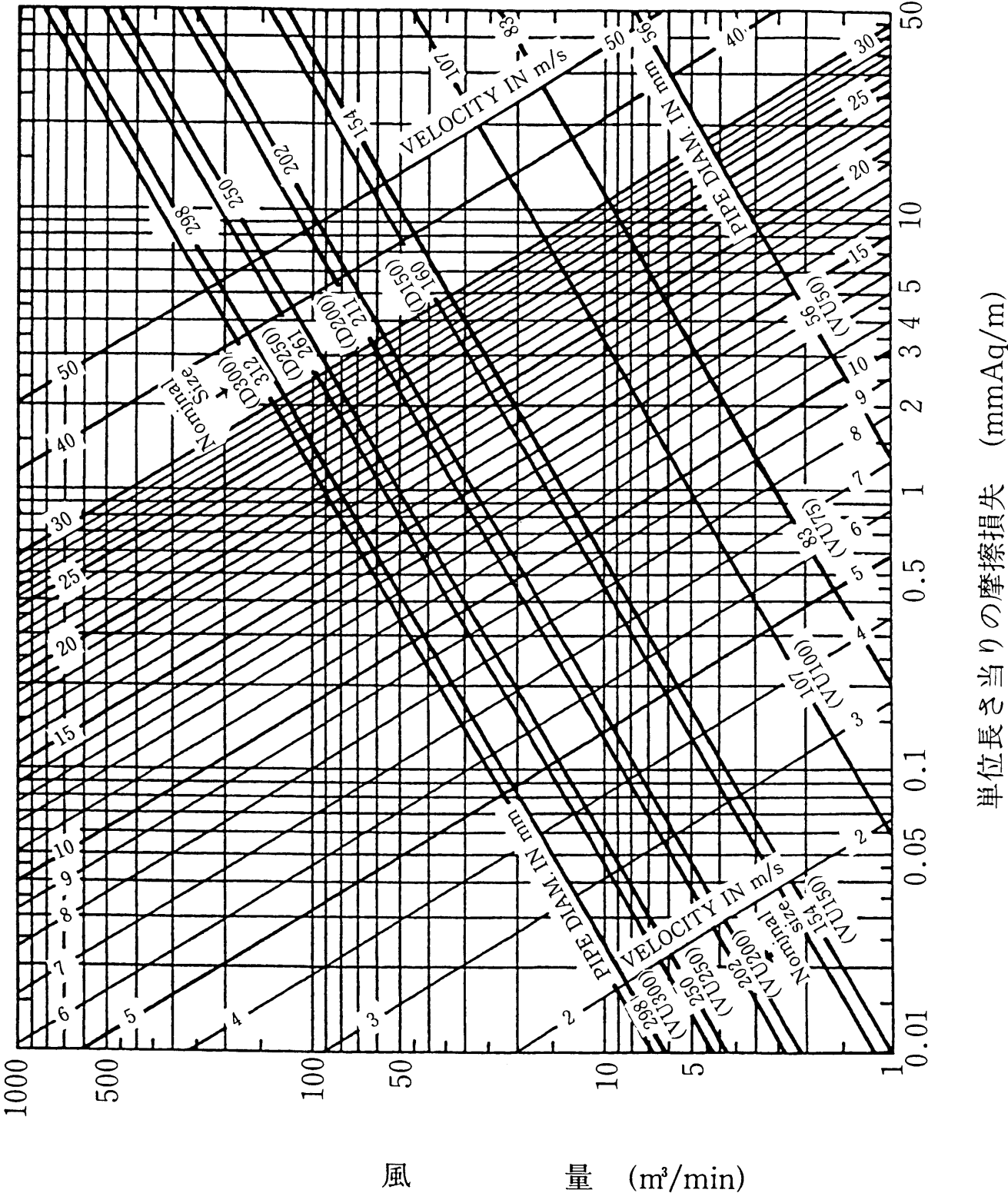


図4 PVCダクトの摩擦損失線図

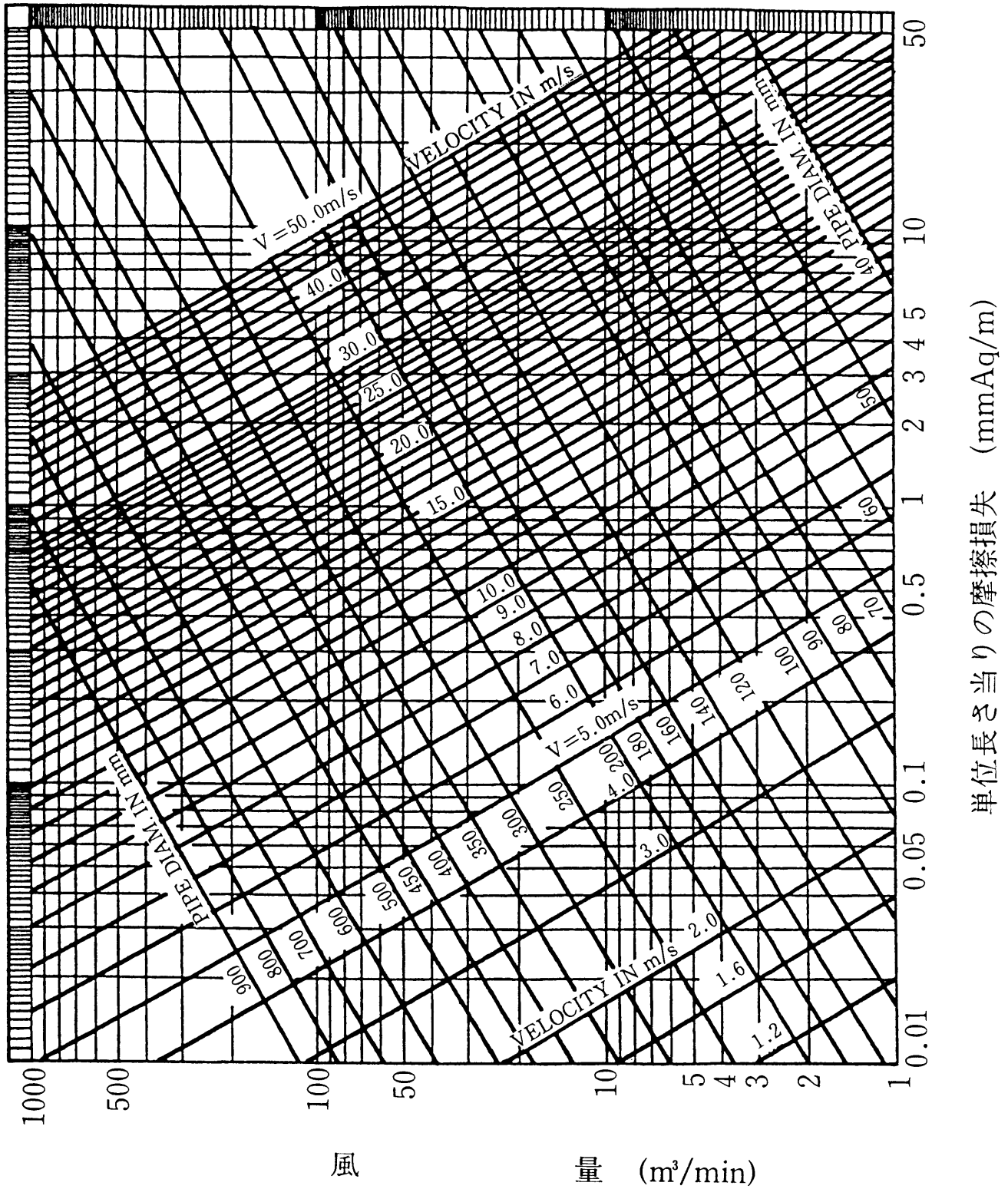


図5 PVCダクトの摩擦損失線図

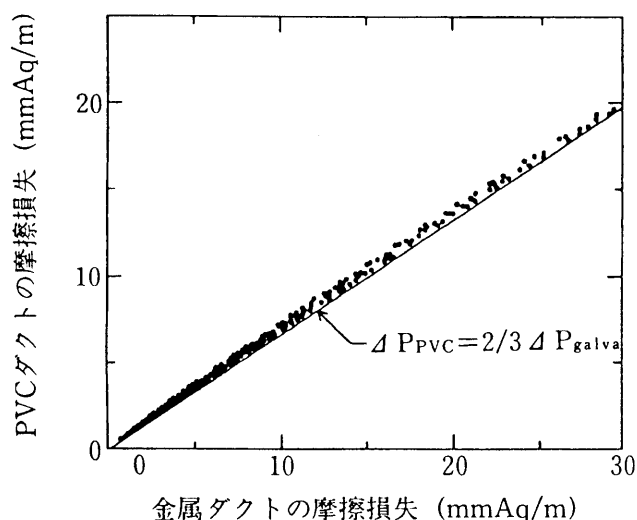


図6 PVCダクトと金属ダクトの
摩擦損失による比較

び83mmに対して妥当である。しかし、内径107mm～298mmのダクトでは、この線図を用いて摩擦損失を求めると実際よりわずかながら小さい値となる。そこで、摩擦損失線図の作製は、井上⁴⁻⁵⁾のスパイラルダクトの摩擦損失線図の作製と同じように、絶対粗度の一番大きな値（本研究の場合、 $\epsilon = 0.0056\text{mm}$ ）を用いて行った。ただし、工業用一般ダクトの場合には、遷移領域で使用されているので、この場合の λ の値はColebrook¹³⁾の遷移領域に対する解析関数式を用いて計算した。その結果をPVC製直線ダクトの摩擦損失線図¹⁴⁾として図5に示す。なお、本線図は、PVC製直線ダクトに常温の空気20℃、湿度60%（比重 $\gamma = 1.2\text{kg/m}^3$ ）を通すときの摩擦損失を与えるものである。

直線ダクトの摩擦損失に関して、本実験結果であるPVC製直線ダクトと亜鉛引き鉄板製ダクトとの比較を示したのが図6である。図6に示されるPVC製直線ダクトの摩擦損失を、亜鉛引き鉄板製ダクトの摩擦損失と比べると、 $\Delta P_{P.V.C.} = 2/3 \Delta P_{GALVA.}$ となり、亜鉛引き鉄板製ダクトのおよそ2/3の値であることが認められた。従って、亜鉛引き鉄板製ダクトの摩擦損失線図から求めた値に、2/3の係数をかければ、本実験に用いたPVC製直線ダクトの単位長さ当たりの摩擦損失が求められることになる。

4. お わ り に

近年、局所排気装置のダクト系には、耐食性、経済性、施工性に優れたPVC製ダクトが普及しつつある。しかし、PVC製直線ダクトの摩擦損失に関する資料は、ほとんど見当たらないのが現状である。本研究では、PVC製直線ダクトの摩擦損失を測定し、亜鉛引き鉄板製ダクトの摩擦損失の約70%弱であることを明らかにした。局所排気装置のダクト系には、摩擦損失の少ないPVC直線ダクトを使用することが経済的に有利であり、今後、PVC製ダクトの更なる普及が望まれる。

文 献

- 1) 井上宇市 (1980) ダクト設計便覧, 丸善, 25.
- 2) ASHRAE (1985) Fundamentals handbook. 33, 12-16.
- 3) ACGIH (1992) Industrial ventilation. 21s ted. 5(37-8)
- 4) 井上宇市 (1962) スパイラルダクトの摩擦損失実験(1), 建築学会, 1, 61-4.
- 5) 井上宇市 (1962) スパイラルダクトの摩擦損失実験(2), 建築学会, 6, 57-60.
- 6) JIS. (1984) Unplasticized polyvinyl chloride (PVC) pipes. JIS. K6741, 1.
- 7) JIS. (1981) Testing methods for turbo fan and blowers. JIS. B8330, 1-9.
- 8) Nikuradse J. (1933) Stromungsgesetze in rauhen Rohren. Forschungsheft 361.
- 9) 田中敬吉 (1933) Jakobの管に依る空気量測定の実験, 東京帝国大学航空研究所 彙報104, 213-26.
- 10) 岩崎 毅 (1989) 円形開口における管内の縮流現象及び圧力損失特性, 作業環境, Vol. 10, No. 4, 64-72.
- 11) Moody LF. (1944) Friction factor for pipe flow. A.S.M.E. Trans. 66, 671.
- 12) Sprenger R. (1974) Taschenbuch fur Heizung Luftung. Klimatechnik, Oldenbourg
- 13) Colebrook CF. (1939) J. Inst. Civil. Engr 11, 133.
- 14) Iwasaki T. Ojima J. (1996) Friction loss in straight pipes of unplasticized polyvinyl chrolide. Ind. Health 34, 245-56.