

(昭和40年11月造船協会秋季講演会において講演)

実験用送風機による実験 (その2)

— 一角オリフィスの特性および丸ダクト分岐部分流特性に関する研究 —

正員 樋口道之助*

正員 瀬川正人*

The Characteristics of Air Flow through a Rectangular Orifice,
and in Circular Duct with a Branch

By Michinosuke Higuchi, *Mmeber*
Masato Segawa, *Member*

Summary

This paper deals with results of tests made on the following matters.

- (1) The flow through the rectangular orifice fitted on a rectangular air duct.
- (2) The divided flow at the tee branch for a circular air duct.

As the results of experiments, the following empirical formulae have been obtained

- (1) Coefficient of resistance at the rectangular orifice.

$$\zeta = (A_d / \alpha A_0 - 1)^2$$

$$\alpha = 0.625 + 0.375(A_0 / A_d)^3$$

- (2) Loss in the divided flow at the tee branch for a circular air duct.

$$\text{Main duct } P = 0.05 H_m + 0.6 S^2 H_m$$

$$\text{Branch duct } P = 0.99 H_m + 0.341 H_b$$

Where

ζ = coefficient of resistance

A_0 = sectional area of orifice

A_d = sectional area of duct

P = pressure loss, mmAq

H_m = velocity head in the main duct, mmAq

H_b = velocity head in the branch duct, mmAq

S = flow quantity ratio

I 緒 言

最近の空気調和装置の進歩に伴い、管路網における風量分配を精確に行なう必要に迫られ、このためかなりの通風試験が行なわれ、その解析結果も発表されている。しかし、これらのいずれもが、すぐそのまま船舶の通風装置の設計資料として、受けいられるわけではない。というのは、船舶の通風装置には、陸上建築物においては考慮する必要のないものまで考えねばならぬからである。すなわち、ダクト空間として利用できる場所がきわめて小さい工事を容易にするために各種金物の形状をきわめて単純なものとする等である。このように船舶の通風装置には、陸上建築物では用いてない金物等があり、これらのデータは皆無の状態である。これらの理由により、われわれは数年来各種の通風実験を行なつてきており、本実験もこれら一連の通風実験一環として行なつたものである。

原稿受付 昭和40年7月10日

* 日本鋼管株式会社

その実験内容は次のごとくである。

1. 角オリフィスの特性調査
2. 丸ダクト分岐部分流特性調査

II 角オリフィスの特性調査

1. 実験目的

船舶の空気調和装置におけるダクト寸法、吹出口寸法の標準化、高速通風方式の採用による送風機圧力の高圧化等により、ダクトまたは吹出口寸法あるいはダクトの形状により、通風系内の風量のバランスを取るのにはきわめて困難を感じる場合が多くなってきた。このようなときに最も簡単な解決法として、ダクト内にダンパーまたはオリフィスを挿入する方法が考えられる。従来、管内オリフィスに関しては多くの実験が行なわれ資料も豊富であり、実験式も導かれている。しかし、これらはすべて丸オリフィスに関するものであり、角型のオリフィスに関するものは見当たらない。本実験はこの角オリフィスに関するデータをそろえ設計の資料とするものである。

2. 実験装置およびその方法

本実験装置の概要は図1に示す通りであり、実験用管路には板厚1.6mmの亜鉛鍍鋼板を用いた。表1には実

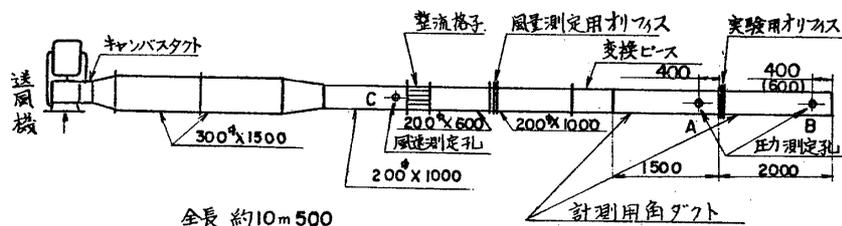


図1 計測装置概略図

表1 計測ダクト及びオリフィス寸法表

| ダクト寸法 180 X 60 | | 240 X 60 | |
|----------------|-------|-----------|-------|
| オリフィス開口寸法 | 面積比 | オリフィス開口寸法 | 面積比 |
| 80 X 30 | 0.252 | 120 X 30 | 0.298 |
| 40 | 0.337 | 40 | 0.398 |
| 50 | 0.421 | 50 | 0.497 |
| 100 X 30 | 0.316 | 140 X 30 | 0.348 |
| 40 | 0.421 | 40 | 0.464 |
| 50 | 0.526 | 50 | 0.580 |
| 120 X 30 | 0.379 | 160 X 30 | 0.398 |
| 40 | 0.505 | 40 | 0.530 |
| 50 | 0.631 | 50 | 0.663 |
| 140 X 30 | 0.442 | 180 X 30 | 0.448 |
| 40 | 0.589 | 40 | 0.597 |
| 50 | 0.736 | 50 | 0.746 |
| 160 X 30 | 0.505 | 200 X 30 | 0.497 |
| 40 | 0.674 | 40 | 0.663 |
| 50 | 0.841 | 50 | 0.829 |
| | | 220 X 30 | 0.547 |
| | | 40 | 0.729 |
| | | 50 | 0.911 |

験に供したダクトおよび角オリフィスの寸法ならびに各々の面積比を記載した。ダクト内を流れる空気量は送風機モーターの刷子の位置により、回転数を変化させて任意に調節可能であり、流量測定のために管路途中に JIS 送風機試験規格によるオリフィスを挿入してある。また管路内の空気流整流のために、オリフィスと送風機の間に整流格子を入れ、計測用ダクトは十分長いものを使用した。本実験に先立ち、ダクトの摩擦抵抗損失を求めめるために AB 間の静圧差を求め、風量との関係を導いた。角オリフィス特性調査に際しては、次のごとく実験を行なった。まず電動機における刷子の位置を -25, -5, 10, 25, 40, 70 の 6 通りとし各状態において AB 間の静圧差をアスカニヤ型円筒微圧計により、風量を風量測定用オリフィス、ならびに C 点においてアネモスターにより

風速を計測した。一般に管路中の断面 (1, 2) の間にはベルヌーイの定理により次の関係が存在することが知られている。

$$\frac{V_1^2}{2g}r + P_1 + z_1r = \frac{V_2^2}{2g}r + P_2 + z_2r + \sum F + \sum \zeta' \frac{V_2^2}{2g}r \quad (1)$$

V = 管路の平均流速 r = 空気の比重量
 P = 管路の静圧 g = 重力の加速度
 z = 高さ F = 2断面間の摩擦抵抗
 ζ' = 抵抗係数 (suffix は断面 1, 2 を示す)

ここで空気の比重量 r はきわめて小さなるゆえ、 $(z_1 - z_2)r \approx 0$ と見なすことができる。また $\sum F$ は断面 1 と 2 との摩擦抵抗であり、 $\sum \zeta' \frac{V_2^2}{2g}r$ は形状変化抵抗物等による衝撃抵抗である。いま、断面 1 と 2 の間にオリフィスのみを入れ、この抵抗係数を ζ' 、摩擦抵抗を f とすると、(1) 式は

$$\zeta' = \left\{ (P_1 - P_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g}r - \frac{V_2^2}{2g}r \right) - f \right\} / \frac{V_2^2}{2g}r \quad (2)$$

(2) 式の右辺の分子の第 1 項は静圧差であり第 2 項は動圧差である。動圧差はダクト内の風量がわかれば計算によつて求めることができる。(2) 式にて分母の $\frac{V_2^2}{2g}r$ の V_2 のかわりに V_1 を用いて表わせば

$$\zeta = \left(P_1 - P_2 + \frac{V_1^2}{2g}r - \frac{V_2^2}{2g}r - f \right) / \frac{V_1^2}{2g}r \quad (3)$$

通風計算においては V_1 がわかっている場合が多いゆえ、 ζ' より ζ を用いる方が便利である。従つてオリフィスの抵抗係数は (3) 式により導くことができる。

なお、本実験に使用した機器の詳細は下記の通りである。

- (1) 電動機 東洋電機製 2HP3 相超分巻整流子電動機
200V 50 \sim 125 \sim 2500 RPM
- (2) 送風機 群馬送風機製作所製 No.1 3/4CH 型シロココファン
- (3) アスカニヤ型円筒微圧計 理化精器製
- (4) ゲッチンゲンマノメーター 理化精器製
- (5) アネモマスター AM-A11 型 日本科学工業 K.K.
- (6) U字管

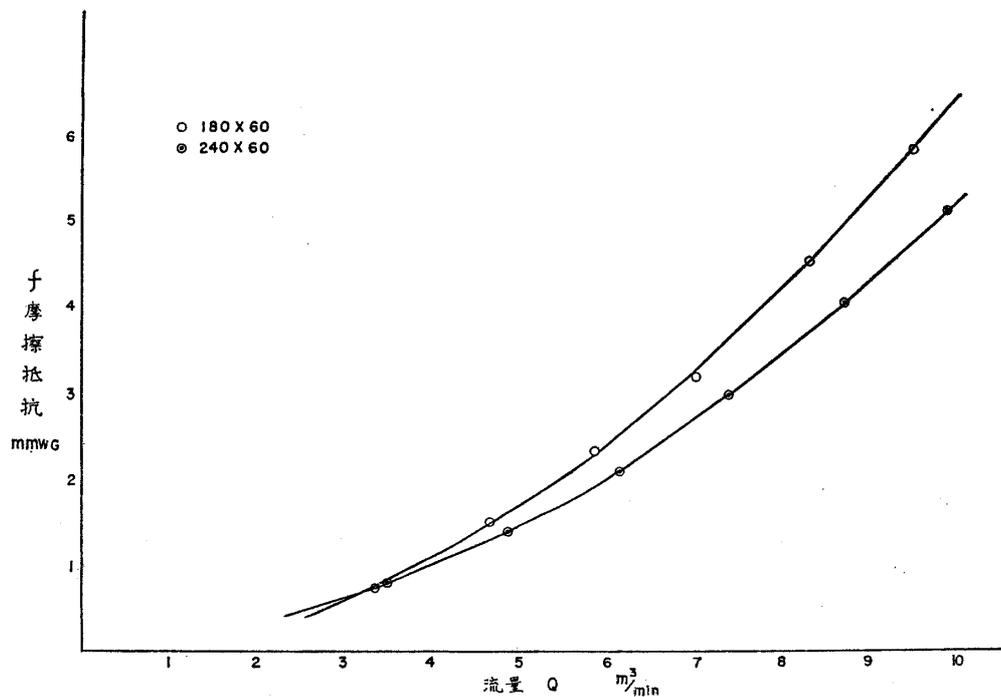


図2 風量と摩擦抵抗の関係

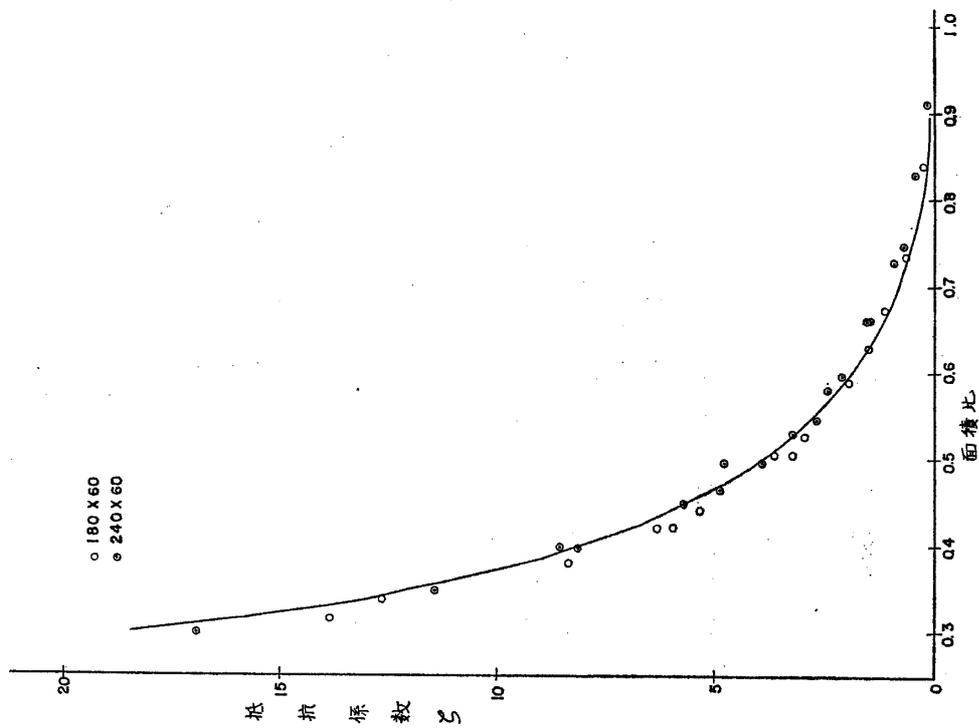


図4 抵抗係数と面積比の関係

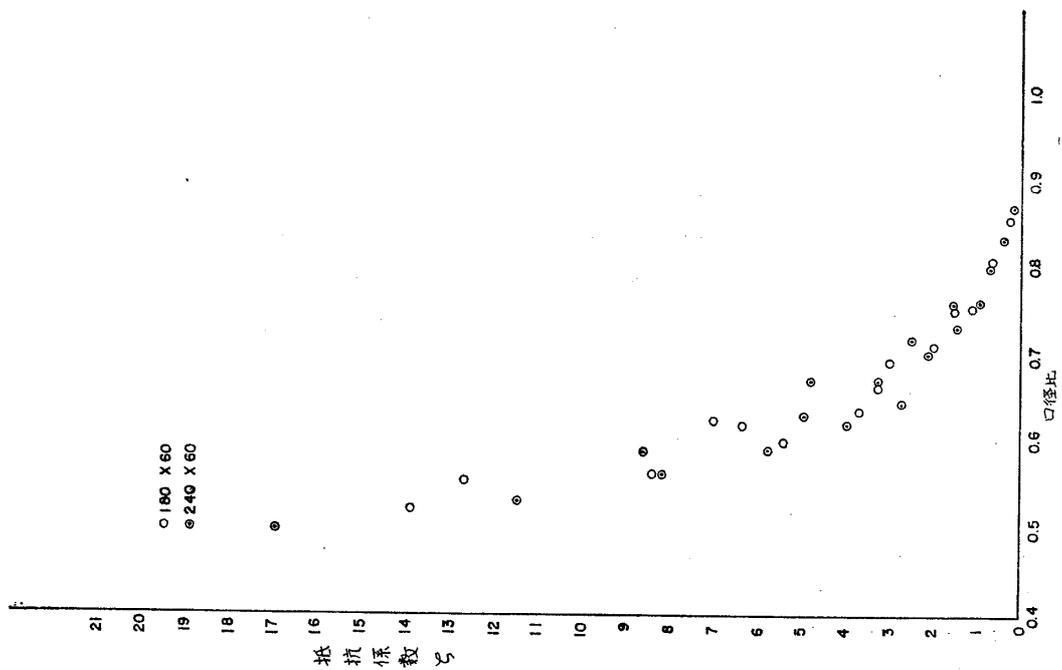


図3 抵抗係数と口径比の関係

(7) 静圧管

3. 実験結果およびその解析

実験の結果に依ればダクトの摩擦抵抗 f と風量 Q の関係は図2のごとくであり、実験式は

$$180 \times 60 \quad f = 0.06 Q^2 + 0.01 Q - 0.2$$

$$240 \times 60 \quad f = 0.05 Q^2 + 0.05 Q + 0.06$$

である。

ダクトとオリフィスの各組合せに対し抵抗係数を計測し、面積比または口径比と抵抗係数の関係を図示したものが図3および4である。ここで面積比は後述の如きもので口径比とはダクトとオリフィスのそれぞれの等価直径の比率である。図3に用いた面積は、ダクトに関しては等価直径による面積、オリフィスに関してはアスペクト比を考慮するためダクトと同様に等価直径を求めこれより面積を求めた。図4においては、ダクトは上記のものを用いたが、オリフィスに対しては開口面積そのものを使用した。両図を比較すると図4の方がバラッキが少い。従つて実験の解析にあつては、図4によることにした。なお、等価直径算出式は、 $d_e = 1.3 \sqrt{(ab)/(a+b)^2}$ を用いた。以上の結果から実験式の導出を考える。Weisbachの実験式を参考にして、

$$\zeta = \left(\frac{A_D}{\alpha A_0} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

$$\alpha = M + N \left(\frac{A_0}{A_D} \right)^3 \quad (5)$$

$$M + N = 1 \quad (6)$$

A_0 = オリフィス開口面積

A_D = 角ダクトに対する等価直径による面積

なる実験式を仮定し、 M および N を求める。すなわち、図4上に実験曲線を想定し、 A_0/A_D および ζ から下記のごとく M 、 N を求める。 $A_0/A_D = 0.4$ のとき $\zeta = 7.4$ 、(4)より $\alpha = 0.672$ 、(5)式および(6)式より、 $M = 0.649$ 、 $N = 0.351$ かくのごとく、 A_0/A_D を数個とり、 M 、 N を計算し、 M 、 N のおおのこの平均を取ると、 $M = 0.625$ 、 $N = 0.375$ となる。従つて抵抗係数算出式は

$$\zeta = (A_D/\alpha A_0 - 1)^2$$

$$\alpha = 0.625 + 0.375 (A_0/A_D)^3$$

となる。なお、図3を用いれば、 $\alpha = 0.8 + 0.2 \left(\frac{A_0}{A_D} \right)^3$ となるが A_0 の値が異なることに注意せねばならない。

III 丸ダクト分岐部分流特性調査

1. 実験目的

高速通風方式は機動通風方法としては最近大いに使用され始めた方式で、各種の研究が多く行なわれているが、実際の設計に役立つ。基礎資料の蓄積が少い。われわれには船舶の高速およびこれに準ずる中速通風方式の効果を十分あげ得るために、丸ダクトのT分岐およびY分岐の分流特性調査の実験を行なつた。

2. 実験装置およびその方法

図5は実験装置の概要を示すものであり、実験用ダクトは特殊耐水ボードの内外面にアルミ泊を張つたフジエアーダクトを用い、T分岐管はスパイラルダクト用のものを用いた。ダクト寸法および測定点の寸法は表2の通りである。ダクト内を流れる空気量は送風機の回転数を変化させる事により任意に調節可能である。また、主ダクト、分岐ダクト内の空気量の割合、すなわち流量比はダンパーAおよびBによつて調節できるようになっている。また管路内の空気流を整流するために整流格子を設けた。実験管路には図5のごとき位置に風速および静圧測定用の孔を設けた。図5に示す通り、 V_1 、 V_2 および V_3 の風速をアネモマスターにて測定し、 $S_1 S_2$ 間および

表2 ダクト寸法および面積比

| 番号 | 本管径 | 支管径 | 面積比 |
|----|-----|-----|-------|
| 1 | 100 | 75 | 1.778 |
| 2 | | 100 | 1 |
| 3 | 125 | 75 | 2.778 |
| 4 | | 100 | 1.563 |
| 5 | 150 | 125 | 1 |
| 6 | | 75 | 4.0 |
| 7 | | 100 | 2.25 |
| 8 | | 125 | 1.44 |
| 9 | | 150 | 1 |

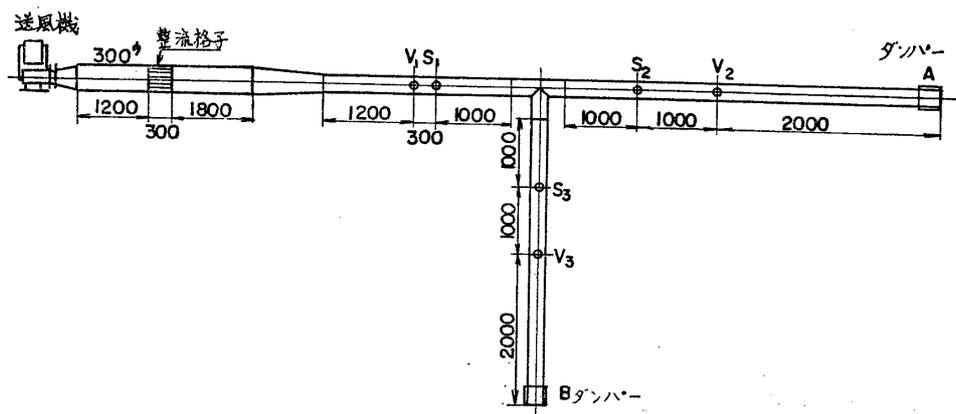


図5 計測装置概略図

S_1S_3 間の静圧差をピトー管, ゴム管をアスカニア型円筒微圧計にて測定する。それに動圧差および摩擦抵抗を加減して分岐部損失圧を求める。一般に管路中の2断面1, 2の間にはベルヌーイの定理により次の関係が成立する。

$$\frac{V_1^2}{2g}r + P_1 + z_1r = \frac{V_2^2}{2g}r + P_2 + z_2r + \sum_1^2 \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}r + \sum_1^2 \zeta \frac{V^2}{2g}r \quad (1)$$

λ = 摩擦抵抗係数

d = 等価直径

l = 断面1, 2間の距離

空気の比重量 r はきわめて小なるゆえ, $(z_1 - z_2)r \approx 0$ と見なし得る。 $\sum_1^2 \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}r$ は断面1, 2間の摩擦抵抗であり, $\sum_1^2 \zeta \frac{V^2}{2g}r$ は衝撃抵抗である。 V として V_1 を用いると

$$\zeta = \left(P_1 - P_2 + \frac{V_1^2}{2g}r - \frac{V_2^2}{2g}r - \sum_1^2 \lambda \frac{l}{d} \frac{V_1^2}{2g}r \right) / \frac{V_1^2}{2g}r \quad (2)$$

したがって, 分岐部損失圧を分流前の本管動圧で除することにより, 分流抵抗係数を求めることができる。なお, 本実験に使用した機器の詳細は前記の角オリフィスの特性調査に用いた機器と同様である。

3. 実験結果およびその解析

実験結果に最小自乗法を適用し下記のごとく実験式を求める。一般に分岐抵抗係数と流速比 (MS) との間には

$$\zeta = a + b(MS) + c(MS)^2 \quad (3)$$

なる関係が成立する。ここで MS は前回の論文で定義したものと同様, M = 本管面積/支管面積, S = 支管風量/本管風量である。 n 個の実験値 ($(MS)_i, Z_i$) ($i=1, 2, \dots, n$) に (3) 式をあてはめる。

$$\text{残差 } V_i = Z_i - (a + b(MS) + c(MS)^2)$$

$$\text{残差平方和 } S = [VV] = \sum_{i=1}^n \{Z_i - (a + b(MS) + c(MS)^2)\}^2$$

最小自乗法の原理により S が最小となるように a, b, c を定める。その結果, 分岐管分岐抵抗係数の実験式は,

$$\zeta_2 = 1.162 - 0.375(MS) + 0.512(MS)^2 \quad (4)$$

同様にして, 本管分岐抵抗係数 ζ と流量比 S との関係をもとめると,

$$\zeta_1 = 0.05 + 0.6S^2 \quad (5)$$

計算によつて求めた実験式 (4) は, 実際に機動通風計算に使用するには複雑すぎるので, $(MS)^2 = H_b/H_m$ の関係から一次の項を省略し, 実験式の簡略化を考える。ただしここで H_b は支管内の動圧, H_m は本管内の動圧を示す。既に建造された4隻の船舶の分岐部の流速比を調査したところ, 流速比 0.2~1.7 はこの範囲にあつた。従つて, a および c の算出にあつては, 流速比が 0.2 と 1.7 の範囲内で, 計算により求めた実験式にもつとも近似するようにした。このようにして求めた a, c の値は $a=0.991, c=0.341$ である。すなわち, 求める式は

$$\zeta_2 = 0.991 + 0.341(MS)^2 \quad (4)'$$

である。図6および7は抵抗係数と流速比または流量比との関係を示したものであるが, これらの結果からダク

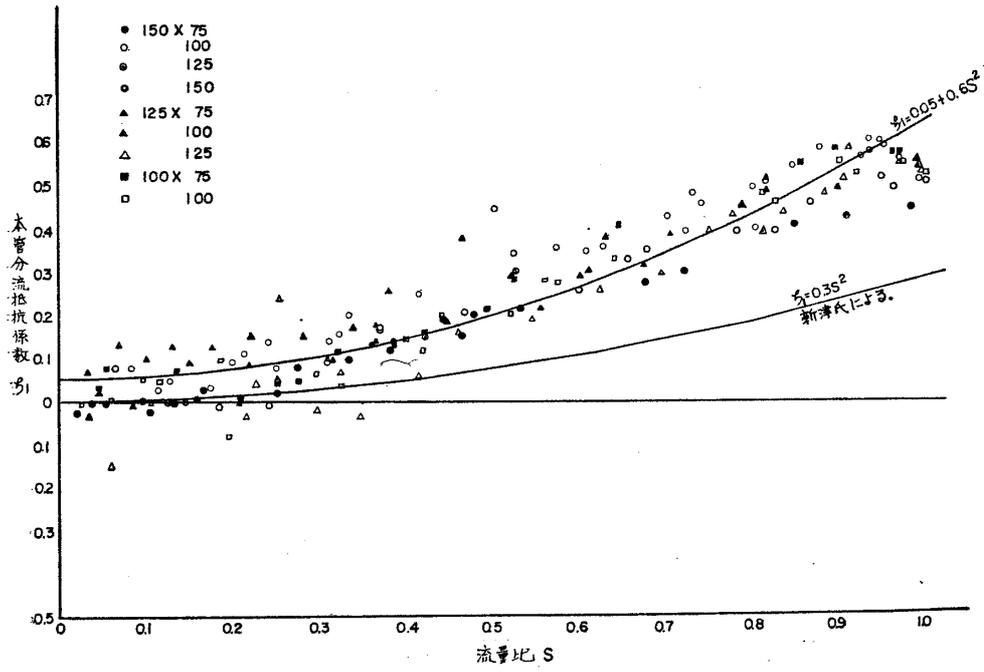


図 6 本管分流抵抗係数と流量比の関係

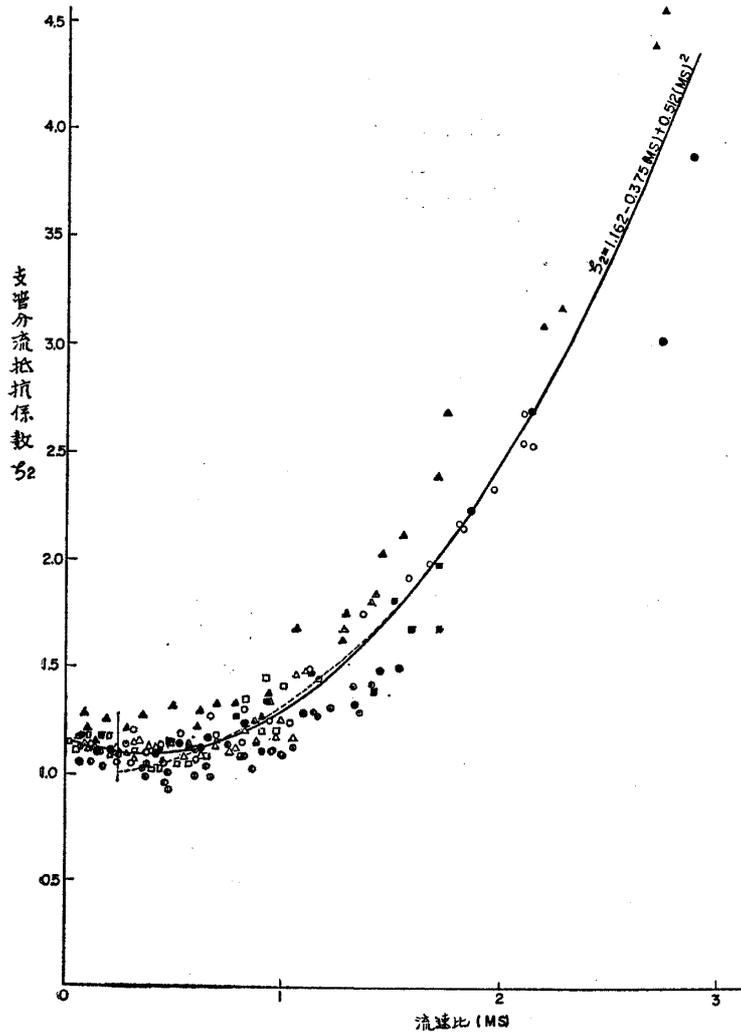


図 7 支管分流抵抗係数と流速比の関係

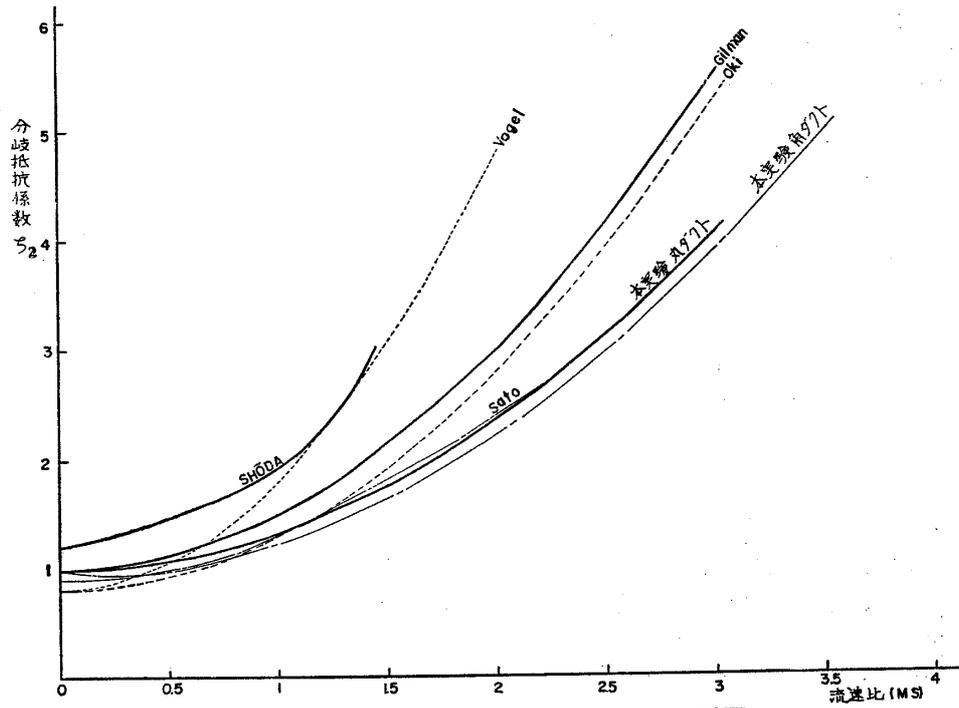


図 8 本実験と他の実験との比較図

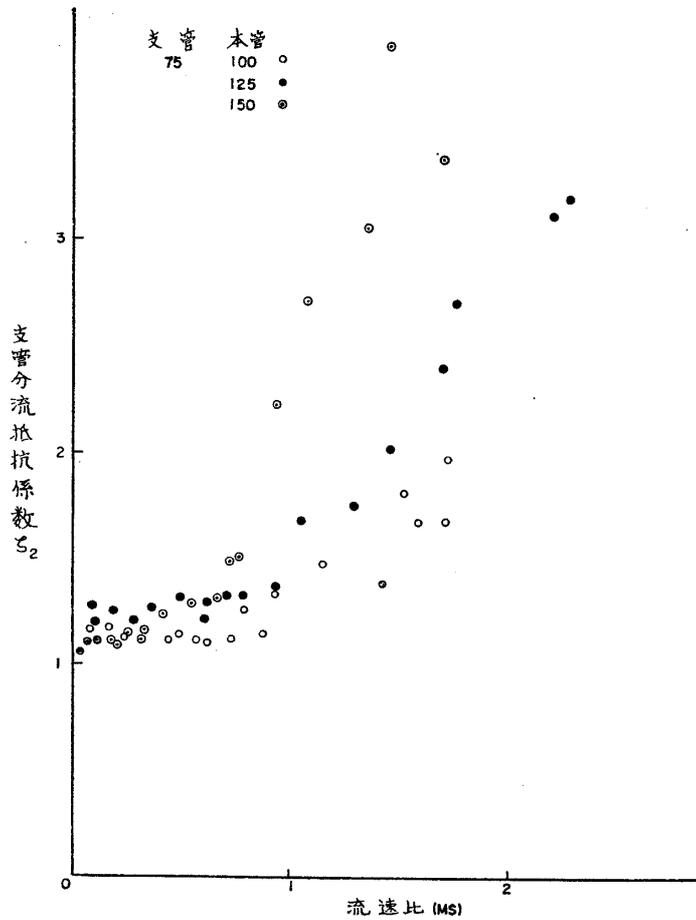


図 9 支管寸法を一定とし本管寸法を変化させた場合の抵抗係数と流速比との関係 (支管寸法 75)

ト寸法の違いによる差を見出すのは、はなはだ困難であるので、上記計算による式とする。すなわち、

$$\text{本管分流抵抗係数 } \zeta_1 = 0.05 + 0.6 S^2$$

$$\text{支管分流抵抗係数 } \zeta_2 = 0.991 + 0.341 (MS)^2$$

したがって、

$$\text{本管分流抵抗 } P_1 = (0.05 + 0.6 S^2) H_m$$

$$\text{支管分流抵抗 } P_2 = (0.991 H_m + 0.341 H_b) \text{ である。}$$

図8は今回の実験結果 ζ_2 と従来行なわれて来た他の実験結果との比較図である。この図に採用した他の実験は下記の通りである。

佐藤雄二：長方形断面の分岐および合流管の損失に関する実験

沖 毅：分岐および合流管の水頭損失に関する考察

勝田高司：船舶の高速通風に関する研究

S. F. Gilmann :

G. Vogel :

今回の実験結果は前回の角ダクトの場合より、少々大きく、九州大学の実験とほとんど同じである。しかし、他の実験とくらべると相当小さい。特に勝田氏の実験は高速通風を対象としているので、これらの違いは相当気になるが実験方法の詳細がわからないのでその原因は不明である。以上の他、実験により気づいた点は、

(1) 主管寸法の影響

図9, 10 は分岐管の寸法を一定とし、主管寸法を変化させた場合の流速比と抵抗係数との関係を示している。分岐管径が75の場合には主管径の変化による影響が見られるが、分岐管径100の場合には判然としない。従って主管寸法を考慮にいれた実験式の導出は不可能であつた。

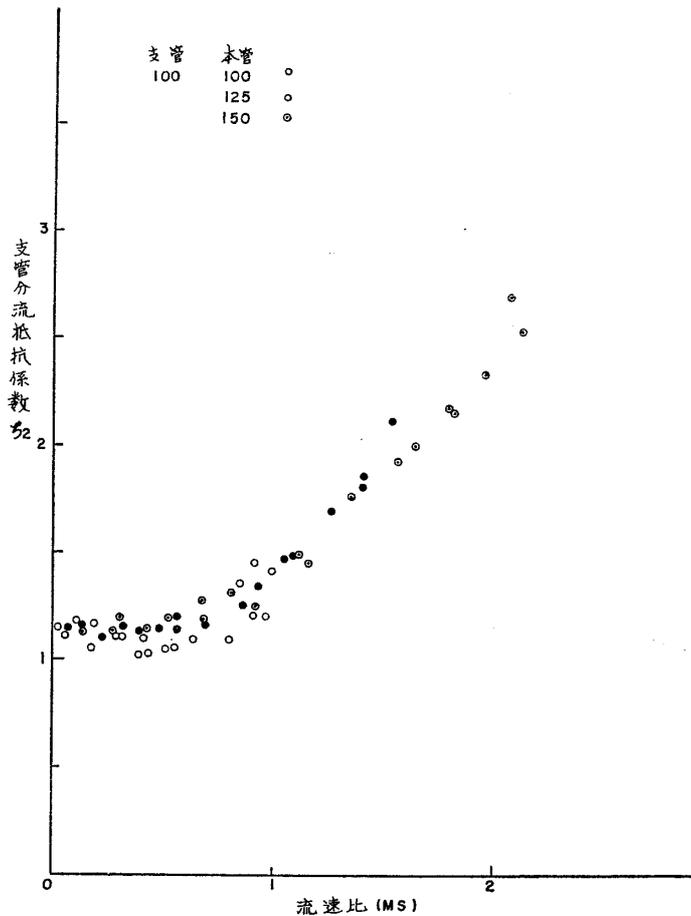


図10 支管寸法を一定とし本管寸法を変化させた場合の抵抗係数と流速比の関係 (支管寸法 100)

(2) 機動通風計算における分岐部の抵抗算出には前記実験式に1割程度の余裕をもたせ

$$P_2 = 1.0 H_m + 0.4 H_b \text{ とした。}$$

(3) 角ダクト (上方分岐) の場合の抵抗式は、

$$P_2 = 0.9 H_m + 1/3 \cdot H_b \text{ としていたが、この式と丸ダクトの式は余り差がない。}$$

(4) $P_2 = 1.0 H_m + 0.4 H_b$ なる式は Gilmann の式と沖の式との中間にある。