

# 円管内の気流に関する研究

川畑早苗・米倉豊彦

(受理 昭和47年5月31日)

## STUDIES ON THE AIR CURRENT THROUGH THE CIRCULAR PIPES

(About the effect of the shape and the high speed of columns.)

Sanae KAWABATA and Toyohiko YONEKURA

For the purpose of investigating the air flow when a train runs into a tunnel, the authors of this paper simplified the problem as stated in the former report and investigated the air velocity in the inlet and outlet of the pipe by moving short columns into the horizontal pipes.

Hara has studied about the air pressure when the train runs into the tunnel in case of changing the top shapes of the train, but nothing seems to be investigated about the air velocity.

Then, in the present paper, we report about the air velocity in case of changing the shape of the top and back of the columns.

On the other hand, we state about the air velocity in case of the high speed of the column corresponding to that of the train.

### 緒 言

筆者らは、列車がトンネル内に進入した際の気流について知る目的で、既に前報<sup>1)</sup>に示したように、問題を単純化して、水平管内に短い円棒を押し込んだ場合の管出入口および管内における風速について調べた。さて、列車前部の形を変えた場合のトンネル進入時における風圧については原の発表<sup>2)</sup>があるが、風速については調べられていないようである。そこで、本報では棒の前後部の形状を変えた場合の風速について述べる。一方、列車の速度に合わせる為に、棒速を大きくした場合について述べることにした。

### 1. 棒の形状による影響

#### 1.1 実 験

実験装置の概略を図1に示す。すなわち、内径40mm、長さ1mの水平管内で7種類の棒(図2参照)をいずれも0.34m/sの速度で走らせることにした。一方、管出入口および管内特定断面に、それぞれ管壁から3mmの位置に直径0.025mm、長さ3mmの白金線を取り付け、その風速を熱線風速計によりオシログラフ写真に撮影して求めた。

#### 1.2 実験結果

棒の形状を変えて実験した結果の一部(B断面)を図3に示す。もちろん、B断面以外の断面(管出入口およびA、C断面)においても、風速に対する棒の形状の順位は同じである。図中の $u_1$ 、 $u_2$ および $u_3$ はそれぞれ棒の前方、まわりおよび後方の風速で、正の値は正流(棒の進行方向)を、負の値は逆流を示す。図から分かるように、風速は前後部の凹んだ棒の場合が最大

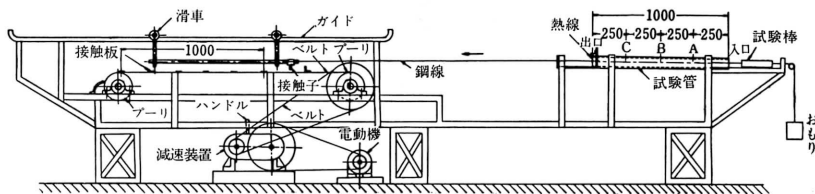


図 1 実験装置略図 (棒の形状を変えた場合)

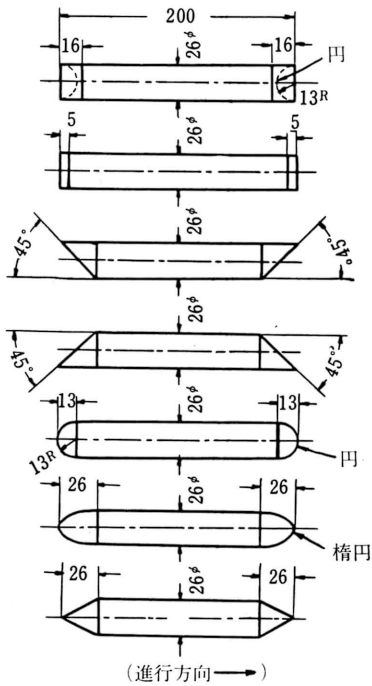


図2 棒の形状

で円錐状の場合が最小であり、球面状よりも楕円状の棒の場合が風速は小さくなる。また、棒と管が同心の場合の風速についても実験してみたが、その結果は図3と同じ傾向でただ全体的に小さくなるのでここでは省略することにした。

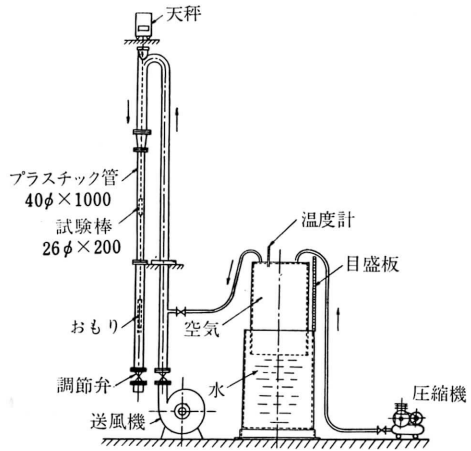


図4 棒の抵抗測定装置

1.3 考察

以上の実験結果を確かめる目的で、風速と棒の抵抗との関係についても調べてみた。すなわち、図4に示すように管内に吊した棒に気流を当て、その抵抗を精密天秤によつて測定した。

そして、次式<sup>3),4)</sup>によつて抵抗係数 ( $C_D$ ) ならびにレイノルズ数 ( $Re$ ) を計算した。すなわち、 $C_D = 2D/F\rho v^2$ ,  $Re = vd/\nu$  ただし、 $D$ : 抗力、 $F$ : 棒の流れに垂直な平面への投影面積、 $d$ : 棒の直径、 $v$ : 空気の流れの速度、 $\rho$ : 空気の密度、 $\nu$ : 空気の動粘性係数である。そして、図5に各種形状の棒の抵抗係数の比較を示す。

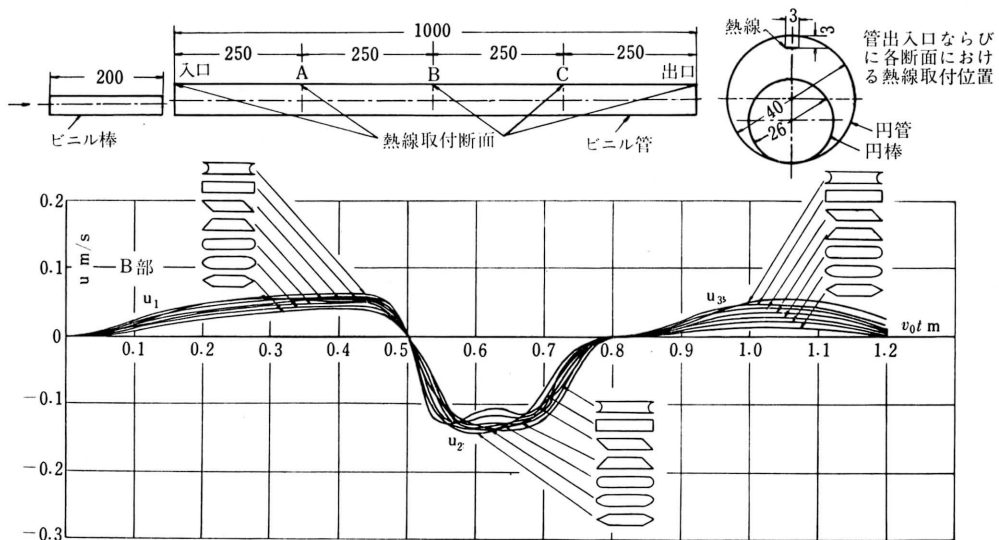


図3 実験結果 (棒の形状を変えた場合)

図からも分るように、抵抗係数の値は一樣流の場合に比べて幾分か大きくなっており、図3と図5を比較す

れば、棒の風速による順序と抵抗による順序とが一致している事実により、上記の風速に対する実験結果は正しいことが分る。

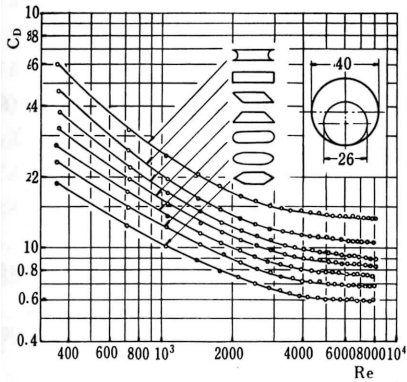


図5 棒の抵抗係数

## 2. 高速の場合

### 2.1 実験

図6は実験装置の概略を示す。すなわち、圧縮空気の力により、直径26mm、長さ200mmの円棒を発射させて内径40mm、長さ1mの水平管内を走らせて実験した。そして、管出入口および管内特定断面において、それぞれ管壁から1mmの位置に直径0.025mm、長さ3mmの白金線を取り付け、その風速を熱線風速計によりオシログラフ写真に撮影して求めた。

### 2.2 実験結果

棒を高速で走らせて、管内特定断面における風速を

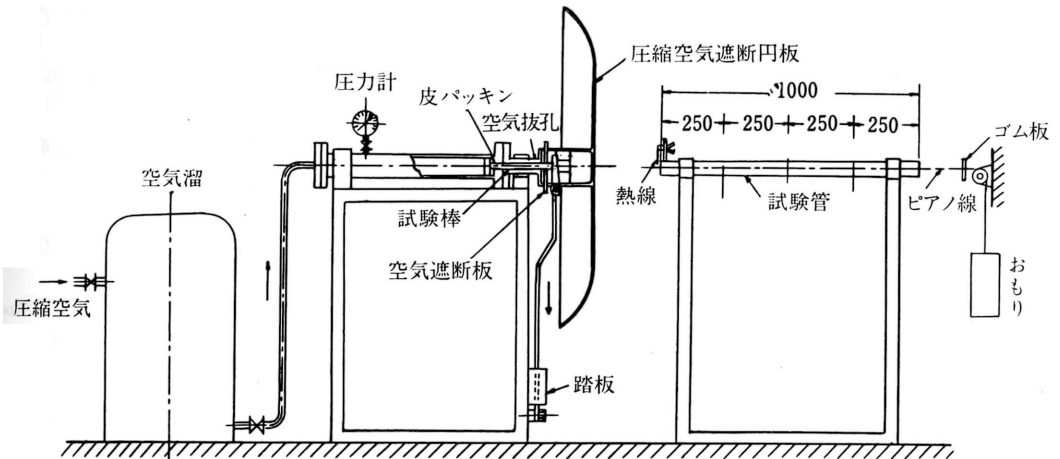


図6 実験装置略図(高速の場合)

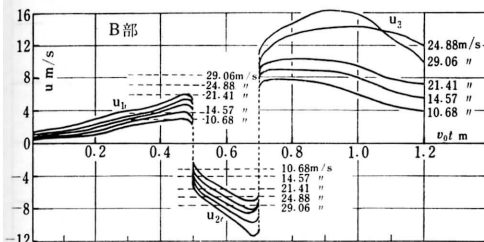


図7 実験結果(高速の場合)

測定したが、その結果の一部(B断面)を図7に示す。ただし、 $u_1$ 、 $u_2$  および  $u_3$  はそれぞれ棒の前方、まわりおよび後方における風速で正の値は正流、負の値は逆流を示す。

図から分るように、棒が高速になる程風速も大きくなり、一方棒の進行につれて増加してゆく。このことはB断面以外の箇所(管出入口およびA、C断面)についてもいえる。また、図中の破線は各棒速に対する理論値を示す。

### 2.3 理論

列車がトンネル内に進入した際、列車の速度が左程大きくなくとも空気の圧縮性が問題になるものと考えられるが<sup>5)</sup>、筆者らは空気の圧縮性を考慮にいれた理論式を誘導してみた。

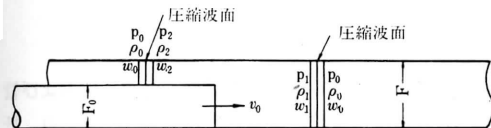


図8

いま、図8に示すように、円管および円棒の断面積をそれぞれ  $F, F_0$  とし、棒の速度を  $v_0$  とする。

また、棒の前方およびまわりでは圧縮波を生ずるものとし、それぞれの圧縮波面の前後における空気の圧力密度および相対速度を図のようにとる。そして、添字0は大気を示すものとし、棒の前方およびまわりにおける空気の絶対速度をそれぞれ、 $u_2$  とすれば

$$u_1 = v_0 - w_1 \quad u_2 = w_2 - v_0 \quad \text{となる。}$$

また、圧縮波を非常に弱い衝撃波と見做してRankine-Hugoniot の関係式<sup>6),7)</sup>を適用すれば

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{1 + \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \cdot \frac{p_0}{p_1}}{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} + \frac{p_0}{p_1}} = \frac{p_1 + 6p_0}{6p_1 + p_0} \quad \dots\dots(1)$$

棒のまわりでは同様に

$$\frac{\rho_0}{\rho_2} = \frac{p_2 + 6p_0}{6p_2 + p_0} \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $\gamma$ : 空気の断熱指数 ( $\approx 1.4$ ),  $p_0$ : 大気圧 ( $\approx 10, 332 \text{ kg/m}^2$ ),  $\rho_0$ : 大気密度 ( $\approx 1/8 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ) 一方連続の式は

$$\rho_1 w_1 F = \rho_2 w_2 (F - F_0) \quad \dots\dots(3)$$

となりエネルギーの式は

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} w_1^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} w_2^2 \quad \dots\dots(4)$$

となる。また、圧縮波前後に連続の式を適用すれば  $(v_0 - w_1)\rho_1 = C_1(\rho_1 - \rho_0)$ ,  $(w_2 - v_0)\rho_2 = C_2(\rho_2 - \rho_0)$  となる。ここで、 $C_1, C_2$  は圧縮波の伝播速度であるが、空気中の音速を  $C$  とすれば次のようになる<sup>8)</sup>。

$$C_1 = \frac{\gamma+1}{4} u_1 + \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{4}\right)^2 u_1^2 + C^2},$$

$$C_2 = \frac{\gamma+1}{4} u_2 + \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{4}\right)^2 u_2^2 + C^2}$$

しかし、本実験では  $u_1, u_2$  の値が小さいので  $C_1 = C_2 = C$  と仮定すれば

$$(v_0 - w_1)\rho_1 = C(\rho_1 - \rho_0) \quad \dots\dots(5),$$

$$(w_2 - v_0)\rho_2 = C(\rho_2 - \rho_0) \quad \dots\dots(6)$$

以上(1)~(6)式を連立方程式として解けば次のようになる。

(5)式より

$$\rho_1 = \frac{C\rho_0}{C - v_0 + w_1} \quad \dots\dots(5)'$$

(1),(5)'式より

$$p_1 = \frac{5C + v_0 - w_1}{5C - 6v_0 + 6w_1} p_0$$

(6)式より

$$\rho_2 = \frac{C\rho_0}{C + v_0 - w_2} \quad \dots\dots(6)'$$

(2),(6)'式より

$$p_2 = \frac{5C - v_0 + w_2}{5C + 6v_0 - 6w_2} p_0$$

$p_1, p_2, \rho_1$  および  $\rho_2$  の値を(4)式に代入すれば

$$\left\{ \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{5C + v_0 - w_1}{5C - 6v_0 + 6w_1} \rho_0 \times \frac{C - v_0 + w_1}{C\rho_0} \right\} + \frac{1}{2} w_1^2 \\ = \left\{ \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{5C - v_0 + w_2}{5C + 6v_0 - 6w_2} p_0 \times \frac{C + v_0 - w_2}{C\rho_0} \right\} + \frac{1}{2} w_2^2 \quad \dots\dots(7)$$

また、 $\frac{F}{F - F_0} = \alpha$  とおけば3式より  $\rho_1 = \frac{\rho_2 w_2}{\alpha w_1}$

これと(5)式より  $\frac{C\rho_0}{C - v_0 + w_1} = \frac{\rho_2 w_2}{\alpha w_1}$  となり(6)'式より

$$w_1 = \frac{(C - v_0)w_2}{\alpha(C + v_0 - w_2) - w_2} \quad \dots\dots(8)$$

となるので(7)式と(8)式よりグラフ解によつて  $w_1, w_2$ , したがつて  $u_1, u_2$  が求められるので、これらの値と棒速との関係を図9に示した。

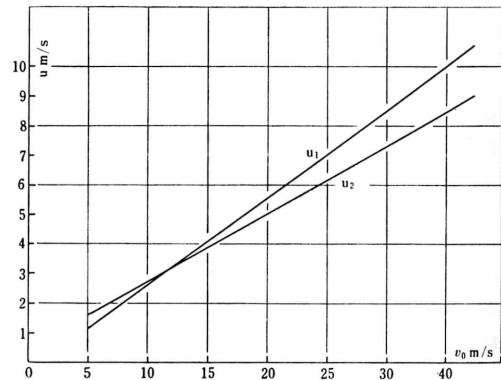


図9 棒速に対する風速の理論値

## 結 論

(1) 円管内で棒を走らせる場合、管出入口および管内における風速は棒前後部の形状によつて変わり、抵抗の小さい棒ほど風速も小さくなる。そして、棒の抵

抗は一樣流の場合に比べて幾らか大きくなる。したがって、実際の列車の場合にも前後部の形状によつて、トンネル出入口およびその内部における風速も変わり、また平地を走る場合よりもトンネル内での抵抗のほうが大きいたることが分る。

(2) 棒が高速になるほど、管出入口および管内における風速も大きくなる。そして、棒の後方からの風速がだんだんと大きくなつてゆくが、棒が高速になるにつれてその増し方もひどくなるようである。このことから、実際の列車の場合にもトンネル内では、前方の風速よりも吹き返しのほうが大きくなるものとおもわれる。

(3) 棒が高速になると、空気の乱れがかなりあるので、管内における風速の実験結果は理論値と一致するところまではゆかないが、だいたいにおいて近い値になる。ただし、実験結果としては時間的ずれを考慮に入れて曲線の立ち上りの部分の風速をとることにした。終りに、本研究に対し種々の御助言を賜つた大

阪大学植松教授ならびに近江教授に対し厚く御礼申し上げます。

なお本研究の一部は昭和39年後文部省科学研究費によつて行なつたものであることを付記し、感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 川畑：機械学会論文集，29-207（昭38-11），1742.
- 2) 原：鉄道技術研究資料，19-8（昭37-8），19.
- 3) 植松：水力学，（昭37），146，産業図書.
- 4) 藤本：流体の力学と流体機械，（昭38），137，養賢堂.
- 5) W. Tollmien：VDI-Z，71-6（1927），199.
- 6) 河村：高速空気力学，（昭33），55，日刊工業.
- 7) A. M. Kuethe & J. D. Schetzer：Foundations of Aerodynamics，（1957），165.
- 8) Courant-Friedrichs：Supersonic Flow and Shock Waves，（1961），148.