

平行回転する円筒内の熱伝達

Heat Transfer in a Parallel Rotating Cylinder

高橋 章

福島工業高等専門学校機械工学科

Akira Takahashi

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

(2010年9月17日受理)

In the purpose of investigating heat transfer characteristics in a parallel rotating cylinder, experiments had been carried out. The parallel rotating cylinders are applied to the ducts of turbine blade of jet engine, the ducts at disk rotor of brake system etc.

The test cylinder was made of copper tube (O.D. 22.0 mm, I.D. 20.0mm, length of 20.0 mm). The outer side of the cylinder was heated by coiled Nichrome wire. Moreover, the outer side of heating section was insulated by calcined Calcium Sulfate and Bakelite. Also, the edges of cylinder were insulated by Bakelite. So, the heat was transferred only to the inner side of the cylinder. The cylinder was fixed with a rotating disc. To find out the temperature distribution, two types of tests had been carried out. First, five thermocouples were fixed in the radial direction. Next, five thermocouples were fixed in the axial direction. Power supply to the Nichrome wire and electric signal from thermocouples were transmitted by slip rings.

The results were obtained as follows.

In the radial direction, maximum air temperature was obtained at the furthest position from rotating center.

In the axial direction, maximum air temperature was obtained at the middle position in the cylinder.

The temperature differences between the heating surface and the room temperature were decreased by increasing the revolutions per minute. Also, the heat transfer coefficients were increased by increasing the revolutions per minute.

Keywords: forced convection, heat transfer, cylinder, parallel rotating

1. 緒言

平行回転とは、円管などの中心軸が、回転軸と平行に配置されて回転することをいう。ジェットエンジンのタービンブレードの冷却用空気流路の一部やディスクブレーキ用ディスクローターの円孔部などが平行回転の例である。これらは、平行回転しながら、円筒壁内の熱を円筒内側の空間に放出する。回転円筒内の熱伝達については、数値計算結果が多く報告されており⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、実験結果については、坂本・福井⁽⁴⁾の報告、坂本⁽⁵⁾の報告などがあるが、十分であるとは言えない。また、数値計算結果、実験結果ともに、円筒内の2次流れがない場合との比で整理されており、2次流れがない場合の結果がないと整理式が使えない。

本研究では、円筒内空気の半径方向温度分布および軸方向温度分布を測定し、平行回転する円筒内の熱伝達特性を実験的に調査した結果を報告す

る。さらに、円筒内の空気の流れを把握するために行った、タフト法で可視化した結果も報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の系統を Fig. 1 に示す。実験装置は、供試円筒、モータ、インバータ、回転計、熱電対電気信号伝達用スリップリング、ハイブリッド記録計、電力供給用スリップリング、スライダック、電流計、電圧計などで構成されている。

供試円筒の詳細を Fig. 2 に示す。供試円筒は、内径 20 mm、外径 22 mm、長さ 20 mm の銅管を用いた。この銅管を加熱するためのヒータは、銅管外側にニクロム線をコイル状に配置して作製した。このニクロム線は焼石膏で絶縁と固定をした。さらに半径方向と軸方向をベークライトで断熱した。ニクロム線への供給電力は、50 Hz, 100 V の交流電源をスライダックで調節し、電流計と電圧計に

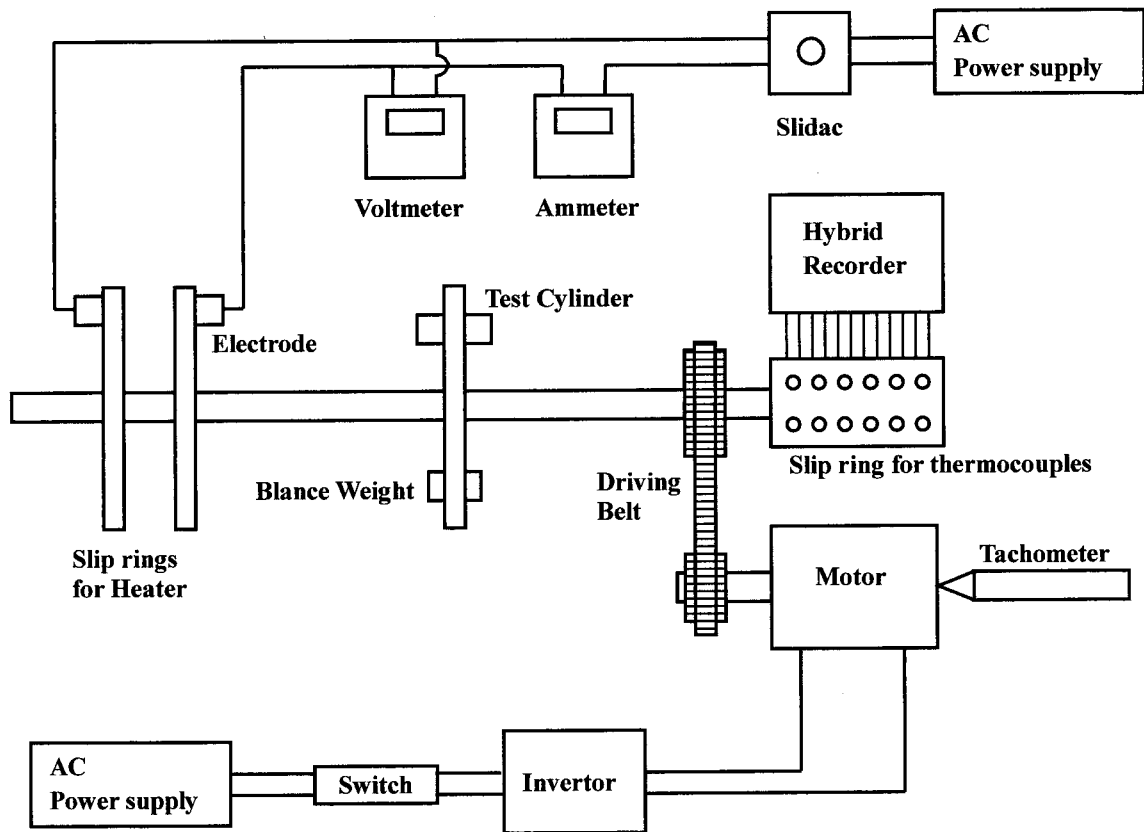


Fig. 1 Experimental apparatus

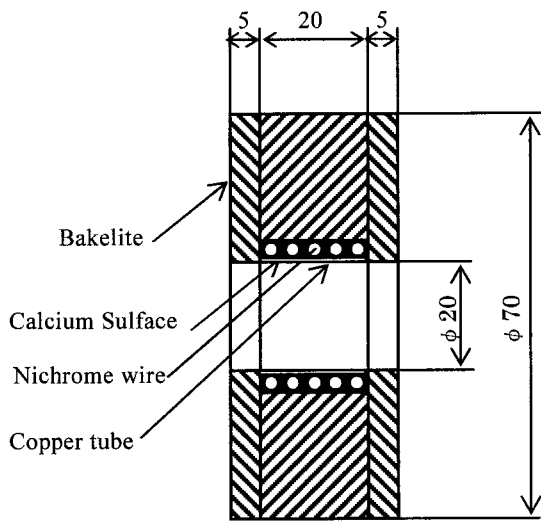


Fig. 2 Detail of test cylinder

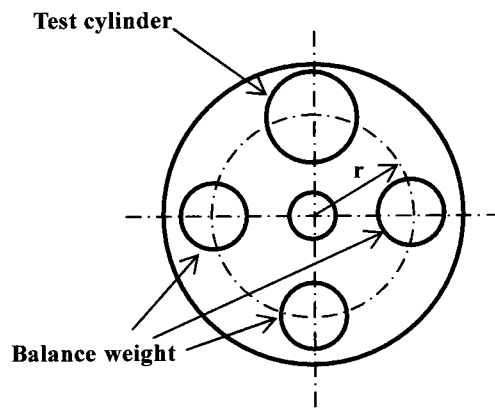


Fig. 3 Location of test cylinder

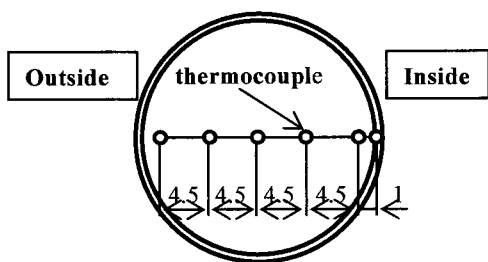


Fig. 4 Location of thermocouples (radial direction)

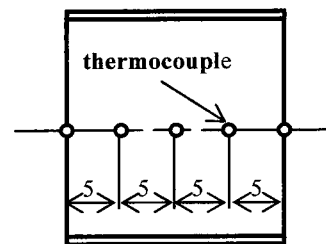


Fig. 5 Location of thermocouples (axial direction)

よって電力量を求めた上で、スリップリングを介してヒータに供給される。

Fig. 3 に示すように、供試円筒を平行回転させるために、厚さ 10 mm、直径 300 mm のアルミ製円板の中心に直径 32 mm の中空の回転軸を取り付け、半径 r が 100 mm の場所に供試円筒の中心軸を設置した。さらに、軸の回転が振れないように、錘を 3 箇所を設置した。

Fig. 4 は、供試円筒内面温度および円筒内空気の半径方向温度分布の測定位置を示している。円筒内面温度は、回転中心に最も近い場所の温度とし、円筒内空気温度は回転中心側の壁面から 1.0, 5.5, 10.0, 14.5, 19.0 mm 離れた位置とした。温度測定は、素線径 0.1 mm の T 型熱電対で行った。熱電対の電気信号は、中空の回転軸内を通してスリップリングに到達し、それをハイブリッド記録計で測定、記録した。Fig. 5 は、軸方向の温度分布の測定位置を示している。実験装置の周りの 2 箇所の室温もハイブリッド記録計で測定、記録した。

モータからの回転は、プーリーおよび歯付ベルトで回転軸に伝達される。回転数は、ハンディタイプのデジタルタコメータで測定した。

実験は、回転軸の回転数をインバータを用いて設定して回転させ、電力供給量を 7 W として加熱し、定常状態になったことを確認して、各部の温度を測定した。回転数は、100, 200, 300, 400, 500rpm とした。最初に半径方向の温度分布を測定し、一連の測定が終わった後に軸方向の温度分布を同様にして測定した。

可視化については、内径 20 mm のアクリルパイプ内にタフトをつけて観察した。撮影はスチルカメラで行い。ストロボスコープで円筒が静止して見えるようにして撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 半径方向温度分布

Fig. 6 は、半径方向の温度分布について、回転数ごとにまとめたものである。その時の 2 箇所の室温もプロットしている。室温と各部温度の差を明確にするために、温度差を回転数ごとに示したのが、Fig. 7 である。各部の温度が、回転数が増えるにしたがって下がり、冷却の効果が上がっていることがわかる。

Fig. 8 は、半径方向の場所による温度の特性を

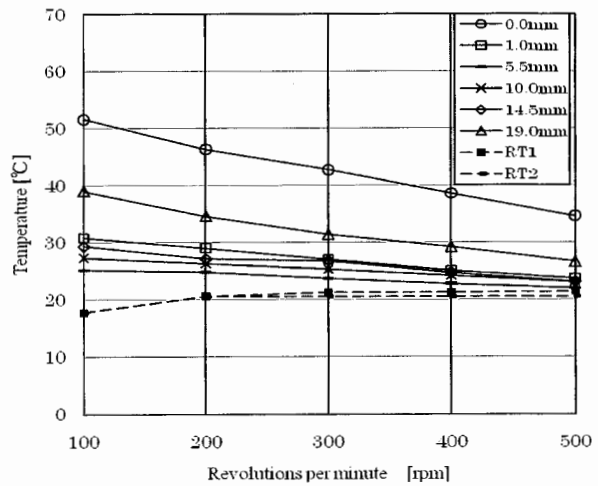


Fig. 6 Temperature Distribution (Radial direction)

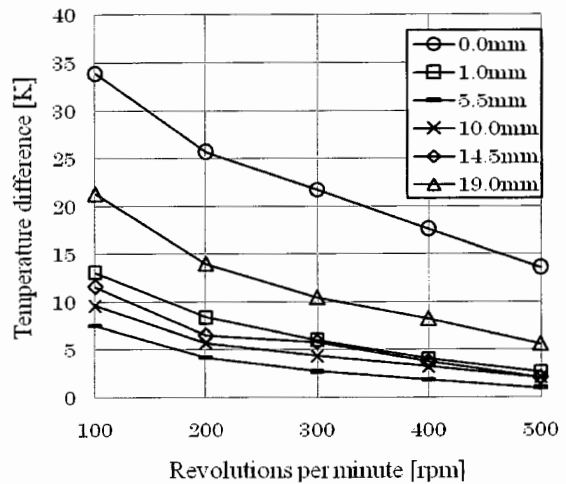


Fig. 7 Temperature difference between the inner air and the atmosphere (Radial direction)

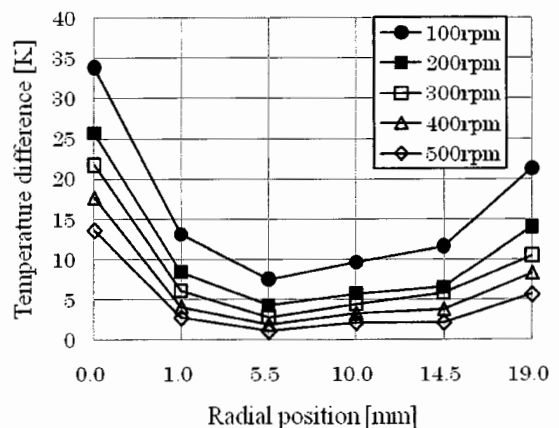


Fig. 8 Temperature difference between the inner air and the atmosphere (Radial direction)

表すものである。半径方向の位置 0 mm は、円筒内面温度であるために、もっとも高い温度となっている。最も低い温度となったのが 5.5 mm の場所であり、それから外側になるにしたがって温度が高くなっていく。中心の 10 mm の場所の温度が最も低い訳ではなく、10 mm の場所を中心として対称でもない。これは、遠心力により、円筒内空気が回転の外側の方に移動して密集するために熱が蓄積されたものと考えられる。さらに外側になるにしたがい、空間が狭くなる影響も加わる。遠心力が働くことについては、タフト法を用いた可視化法で確認した。撮影した写真は、鮮明でないために、割愛させていただく。

3.2 軸方向温度分布

Fig. 9 は、軸方向の温度分布について、回転数ごとにまとめたものである。その時の 2 箇所の室温もプロットしている。室温と各部温度の差を明確にするために、温度差を回転数ごとに示したのが、Fig. 10 である。軸方向の温度分布も半径方向の温度分布と同様に、各部の温度が、回転数が増大するにしたがって下がり、冷却の効果が上昇していることがわかる。

Fig. 11 は、軸方向の場所による温度の特性を表すものである。横軸の 10 mm は軸方向の中心であり、0 mm と 20 mm は左右端である。左右対称の温度分布になると予想されたが、そのようにならなかったのは、左右端での空気の出入りが何らかの影響で少しずれたためであると考えられる。左右端が、中心よりも温度が低いのは、周囲の低い温度の空気が入り込むためである。また、回転数が増大するに伴って温度が低くなるのは、円筒へ入りする空気量が回転数の増大に伴って増えるためである。

軸方向と半径方向温度分布により、円筒内の空気の流れは遠心力に支配され、回転中心の内側から流入し、外側から流出していることが判断された。

3.3 熱伝達率

Fig. 12 に、回転数に対する熱伝達率の変化を示している。

熱伝達率 h は下式を用いて計算した。今回の実験は、円筒内空気の温度分布を求めて、それから

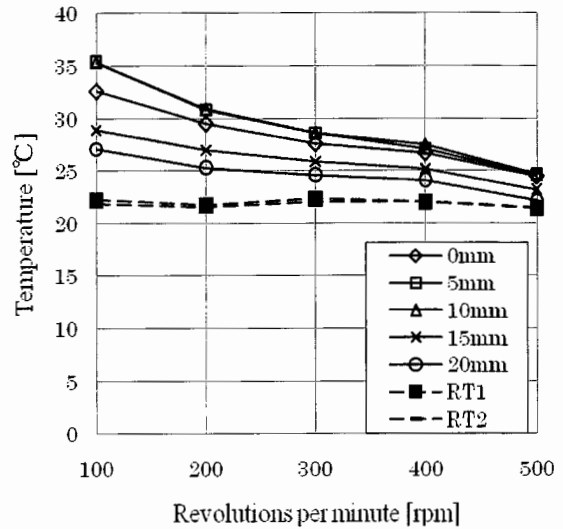


Fig. 9 Temperature Distribution (Axial direction)

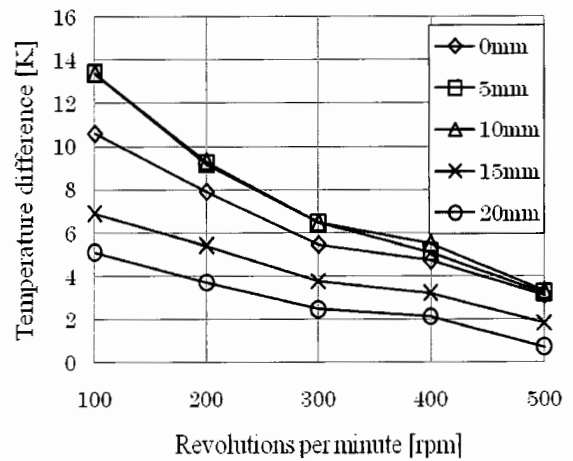


Fig. 10 Temperature difference between the inner air and the atmosphere (Axial direction)

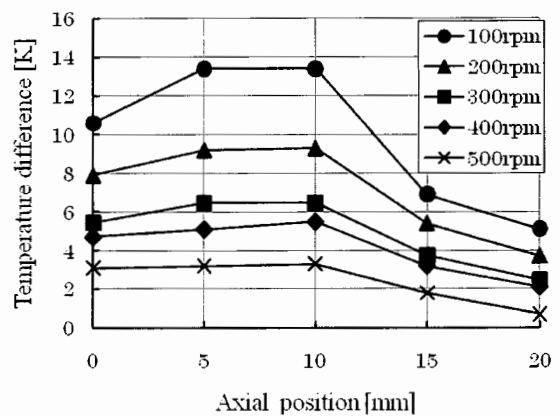


Fig. 11 Temperature difference between the inner air and the atmosphere (Axial direction)

空気の流れを判断して熱伝達特性を把握した。熱伝達率も求める際の伝熱面温度 t_s は、円筒内面に多数熱電対を設けて測定するべきであるが、今回は回転中心に最も近い場所の1箇所のみを用いた。その結果が Fig. 12 である。

回転数の増大に伴い、熱伝達率が上昇していることがわかる。

$$h = \frac{q}{\pi d l (t_s - t_\infty)} \quad (1)$$

ここで、 q ：単位時間あたりの加熱量 [W]

d ：円筒内径[m]

l ：円筒の長さ[m]

t_s ：円筒内面温度[°C]

t_∞ ：室温[°C]

4. 結論

平行回転する円筒内の熱伝達特性を把握するために実験的研究を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 遠心力により円筒内に空気が出入りする。空気の流れは、回転中心に近い場所から流入し、回転中心から遠い場所から流出する。
- (2) 回転数の増大に伴って、円筒内面温度および円筒内空気温度が降下する。
- (3) 回転数の増大に伴って、熱伝達率が増大する。

文 献

- 1) 日本機械学会：伝熱工学資料（改訂第4版）、（1986）pp. 240-241

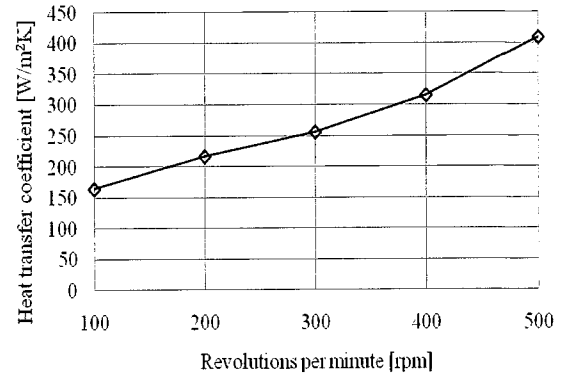


Fig. 12 Heat transfer coefficient

- 2) 石垣 博：浮力が作用する管内層流の流れと熱伝達の基本特性（加熱された平行回転円管と水平円管）、日本機械学会論文集 B 編、59-560、（1993）pp.1094-1100
- 3) 石垣 博：浮力が作用する管内層流の流れと熱伝達の発達特性（平行回転円管と水平円管）、日本機械学会論文集 B 編、60-573、（1994）pp. 1589-1597
- 4) 坂本 守義、福井資夫：平行軸のまわりで回転する円管内流の物質伝達（第1報、浮力による二次流れの影響）、日本機械学会論文集、38-309、pp. 1065-1074（1972）
- 5) 坂本 守義：平行軸のまわりで回転する円管内の物質伝達（第2報、旋回流の影響）、日本機械学会論文集、40-338、pp. 2912-2920（1974）