

超高速カメラ用大型回轉圓盤の

空氣摩擦抵抗について

植 村 恒 義

歌 川 正 博

On the Air Resistance of High Speed Rotating
Disc for Ultra-highspeed CameraBy Tsuneyoshi Uemura
and Masahiro Utagawa

ABSTRACT: In ultra-highspeed cameras using film drums of large diameters rotating at high speeds, the necessary powers became extraordinarily large as they rotate at high speeds.

The authors measured the rotational resistances of the Suhara's Ultra-highspeed Camera of Type II (the diameter of the film drum being 143 cm, the weight about 400 kg) rotating at from 1,000 to 3,000 r.p.m., with various pressures in camera chamber between 100 and 760 mm Hg. Most of the necessary power was found to be consumed for air resistance, and the mechanical loss was very small. The measured air resistances followed approximately to the formula given by Th. v. Kármán, and it was very efficient for high speed rotation to maintain vacuum in camera chamber.

(1951年2月24日受理)

1. 緒 言

超高速カメラにおいてフィルム移動用に大型高速回轉圓盤を使用する場合、回轉数の増加と共にカメラ運転に要する動力は急激に増大する。

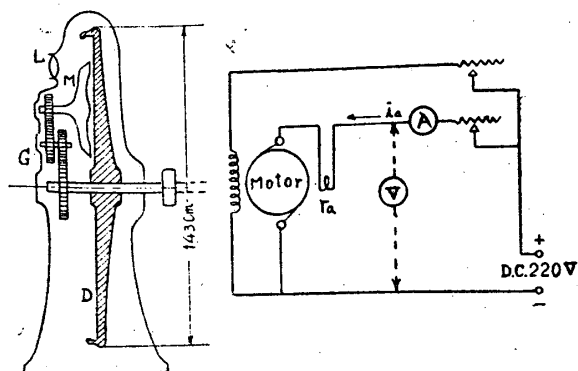
柘原豊太郎博士の製作された超高速カメラ⁽¹⁾では I 型(ジュラルミン製圓盤, 直径 70 cm, 最高 3,000 r.p.m. 毎秒 20,000 駒の時, 円周速度 100 m/sec) で 10 馬力, II 型(特殊鋼製圓盤, 直径 143 cm, 最高 3,000 r.p.m., 毎秒 45,000 駒の時, 円周速度 225 m/sec) で 40 馬力, III 型(特殊鋼製圓盤, 直径 143 cm, 最高 4,000 r.p.m., 毎秒 60,000 駒の時, 円周速度 300 m/sec) で 80 乃至 100 馬力を必要としている。

筆者等は柘原式 II 型を使用し、回轉数及び氣圧を

変化させて所要の動力を測定し、このような特殊な形状の圓盤が特殊な形の容器内で高速回轉する場合、空氣摩擦抵抗の爲にどれだけの動力が費され、又機械部分の抵抗によるものが幾許かを調べて見たので、その結果を以下簡単に報告する。

2. 實驗裝置及び方法

α) 裝置 第1図は裝置の概略図で左図は柘原式 II 型の断面を示したもので、D はフィルム用特殊鋼製回轉ドラムでこの内側にフィルムを巻きつけるようになっており、重量は約 400 kg である。M は 180 面体不銹鋼製回轉反射鏡で、増速齒車 G によりドラムの 5 倍の速度で廻り、レンズ L によつてフィルム上に出來た像がドラムの円周速度と同じ速度で移動して、フィルム上の像の相對速度が、零になるようになってい



第一図 実験装置の概略図

る。撮影の際は回転鏡とドラムは同時に廻すのであるが、回転円盤の空気抵抗を考慮する場合複雑になるので、歯車を外してフィルム用ドラムのみを回転させて実験を行った。実際に回転鏡を同時に廻しても、約3割馬力が増えるだけである。

b) 所要動力の測定 動力の測定には第1図右のような配線の直流30IP複巻モーターを用い、電機子電圧と電機子電流とを測定して入力求め、次の式から出力を計算した。

$$P_0 = E_a i_a = V i_a - R - r_a i_a^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

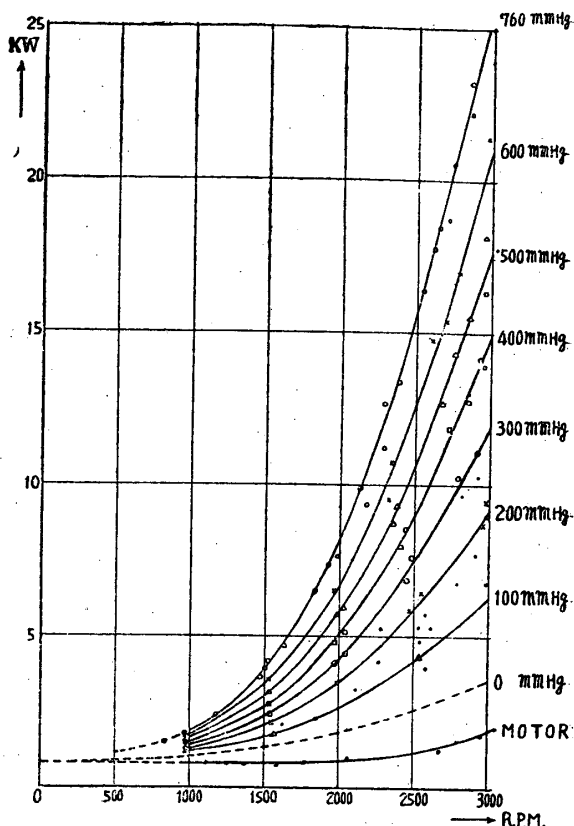
ここで V : 電機子電圧, P_0 : 出力, E_a : 逆起電力, i_a : 電機子電流, r_a : 電機子内部抵抗 = 0.134 Ω , R : ヒンアリシス, 渦流, 機械部分の摩擦等の損失 (回転数のみの函数で電流 i_a の大小にはほとんど無関係な値である) とする。

c) 回転数及び容器内圧の変化 回転数は1,000乃至3,000 r.p.m. の範囲で変化させ磁石発電式回転計で測定した。ドラムの直径は143 cmであるから、ドラムの円周速度は3,000 r.p.m. の時225 m/secになる。

気圧は油回転式真空ポンプを用いて760乃至100 mm Hgまで変化させ、水銀の開放U字管で計った。カメラの容器は内部を真空にするような構造になっていないため、軸が容器を貫く部分のバツキングが難しく、100 mm Hg以下に減圧することは出来なかつた。

3. 実験結果 (I)

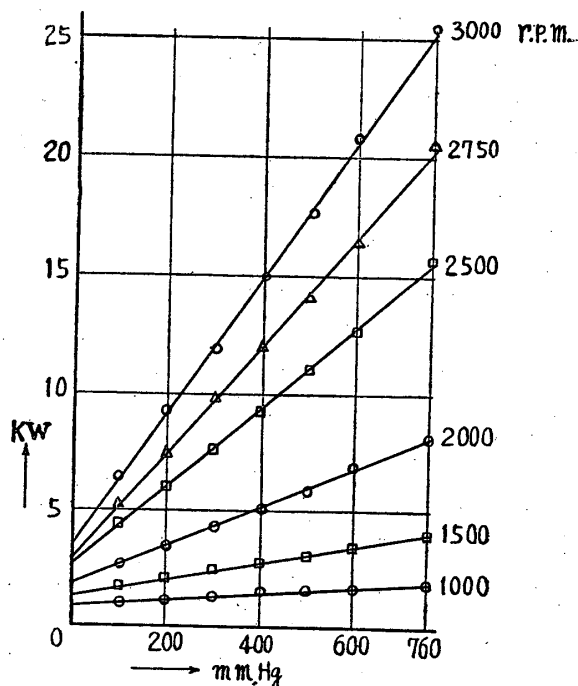
a) 所要動力の測定値 測定した動力を図示すると第2図のようになる。横軸に回転数、縦軸に所要動力を示すが、この動力値は(1)式の $P_0 + R$ の値をとつた。最下位の Motor 曲線はモーターのみを空転させた時の $P_0 + R$ の値を示す。従つて真空時の 0 mm Hg 曲線と Motor 曲線の差はカメラの機械的損失に要する



第2図 所要動力の測定結果

動力となる。

実験では先述のように真空の場合の動力を測定出来なかつたので外挿法により求めた。即ち第3図のよう

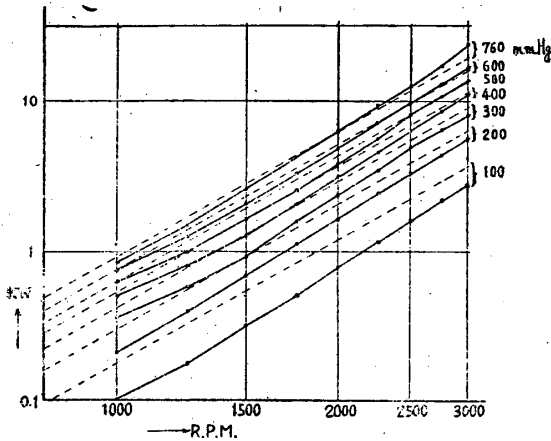


第3図 内圧と所要動力との関係

に横軸に氣圧、縦軸に動力をとると、ほぼ直線になつて各回転数に対する眞空の場合の動力を求めることが出来るから、これより第2図の O_{mm} Hg 曲線を得た。

第2図から判るようにカメラの運転に必要な動力は眞空にすれば大氣圧の場合に較べて、1,000 r.p.m. で 1/2, 2,000 r.p.m. で 1/4, 3,000 r.p.m. では約 1/7 となつており、空氣抵抗が動力の大半を食っているから、容器内の減圧が非常に有利であることが判る。

b) 空氣抵抗 次に空氣抵抗のために費された動力を考えると、第2図において眞空の場合の動力を減じたものになるから、この差をとり回転数及び動力の兩者を対数で図示すると第4図の実線のようになる。



第4図 空氣抵抗に費された動力と回転数との関係

さて空氣抵抗については Th. v. Kármán⁽²⁾ (3) 等が境界層理論より一樣な厚みの円盤が無限に広い流体中で回転する場合について計算している。即ち、

$$M = C_M \rho \omega^2 a^5 \dots \dots \dots (2)$$

こゝで

M : 円盤の両面の空氣抵抗によるトルク (m·kg)

ρ : 空氣密度 ($kg \cdot S^2/m^4$)

a : 円盤の半径 (m)

ν : 空氣動粘性係数 (m^2/S)

ω : 円盤の角速度 (1/S)

C_M : 抵抗係数

$$C_M = 1.935 (\omega a^2 / \nu)^{-\frac{1}{2}}$$

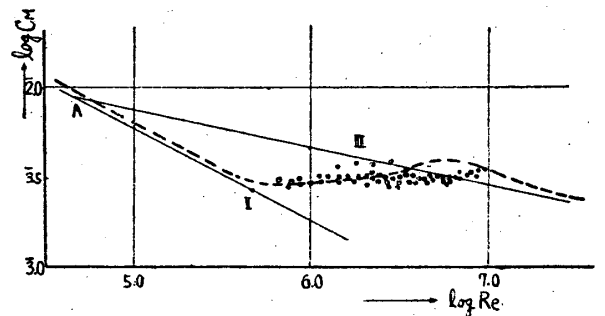
(但し流体の運動が層流の場合 $\omega a^2 / \nu < 5 \times 10^4$)

$$C_M = 0.0728 (\omega a^2 / \nu)^{-\frac{1}{5}}$$

(但し流体の運動が乱流の場合 $\omega a^2 / \nu > 5 \times 10^4$)

尙容器の影響のある場合については木谷氏,⁽⁴⁾ Schultz-Grunow⁽⁵⁾ 等の研究があるが、筆者達の実験した特殊な型状の円盤の場合、Kármánの理論式とどの程度の差異があるかを調べるために、Kármánの式による計算値を第4図に破線で示した。(但しこの計算では ρ は氣圧に比例するものとし、温度は 25°C をとつた。実験中の容器内の温度は 10°~40°C の範囲で変化したが、計算上では温度変化はあまり影響がないのでその平均 25°C を用いた。もつとも容器内の温度は、高速回転が長時間にわたると次第に上昇し、70°C 以上にも達することもあつたが、以上の測定は 10°~40°C の範囲内で行つた。) この図でみると実験値は Kármán の値より傾斜が幾分急であるが、大氣圧附近ではほとんど一致し、200 mm Hg 附近でも著しい差異は見られない。

今横軸にレイノルズ数 Re をとり、縦軸に抵抗係数 C_M をとつて図示すると第5図のようになる。これ



第5図 レイノルズ数 Re と抵抗係数 C_M との関係

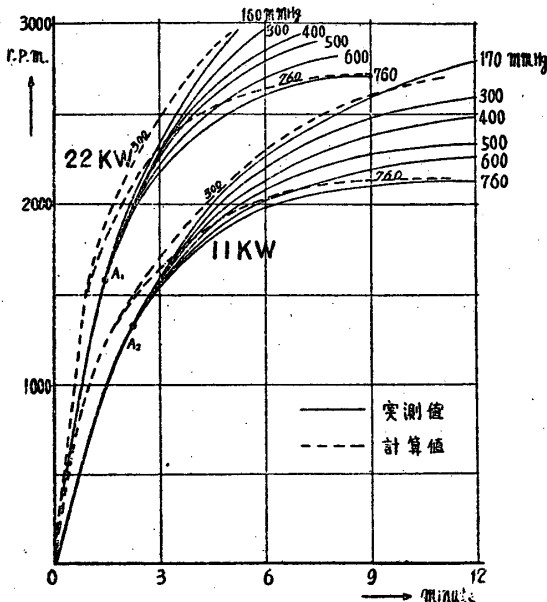
から判ることは、筆者達の実験の範囲 (即ち $Re = 10^6 \sim 10^7$) では、 C_M は Re に無関係にほぼ一定値 ($\log C_M = 3.49$, $C_M = 0.00309$) であることである。

この意味を考えて見るに、実験値は第5図に示すように Kármán の理論式による層流の場合の値 (実線 I) と乱流の場合の値 (実線 II) の間にはさまれており、これは層流から乱流に移り変わる部分に相当するものと思われる。通例層流から乱流に移り変わる場合、層流の線と乱流の線との交点 (図の A 点) で直ちに移らずに、しばらく層流の線 (I) に沿つて C_M は減少して行き、ある点まで来ると C_M は急に増加して乱流の線 (II) に戻り、今度はそれに沿つて再び減少して行く傾向がある。この実験の場合は円盤の特殊な形状及び容器の影響等により層流から乱流に移る際急に C_M が増加して乱流に移らずに、しばらく C_M は一定値を保ちながら次第に層流から乱流に移り変つて行くものと考えられる。尙 Re がもつとずつと高い範囲において面

の粗さの影響等により C_M が一定値になる場合が存在する筈であるが、実験値は R_e の値から考えてその場合ではないと思われる。故にもつと高い R_e の範囲まで実験を行えば、 C_M は第5図の破線のようにやがて実線 II につて減少し始めることが予想されるが、円盤の強度並にモーターの出力の限界からこれ以上高い R_e を出すことが出来なかつた。

4. 実験結果 (II)

回転数上昇時間 次は一定の入力をモーターに與えた場合の回転数上昇最間を実測してみた。その結果を第9図に実線で示す。入力は 22 kw と 11 kw の二通りの場合で氣圧を変化させた。



第6図 回転数上昇最間

回転数上昇時間を示す実験式は、第6図から求めることも出来るが、先に測定した空氣抵抗の式を用いて理論的に計算すると次のようになる。即ち円盤の運動方程式を考えると

$$I \frac{d\omega}{dt} + M + B = P/\omega \quad \dots\dots\dots(3)$$

- I : 円盤の慣性モーメント ($m \cdot kg \cdot S^2$)
- M : 空氣抵抗によるモーメント ($m \cdot kg$)
- B : ベアリングその他の機械的抵抗モーメント ($m \cdot kg$)
- P : モーターの出力 ($kg \cdot m/S$)
- ω : 角速度

となり、 I は円盤の形から求められ、 M は実測した C_M を用いて、 $M = C_M \rho \omega^2 a^5 = 0.00309 \rho \omega^2 a^2$ となる。

B は第2図の場合の真空の曲線から

$$B = b/\omega + d\omega^2$$

とおくことが出来る。こゝで簡単のために

$$M = C\omega^2, (P - b)/(C + d) = e^3$$

とおくと(3)式は

$$I/(c+d) \cdot \frac{d\omega}{dt} = (e^3 - \omega^3)/\omega$$

積分して

$$\int_0^T dt = I/(c+d) \int_0^T \frac{\omega}{e^3 - \omega^3} d\omega$$

$$\therefore T = I/6e(c+d) \left[\ln \frac{e^3 - \omega^3}{(e - \omega)^3} + \frac{\pi}{\sqrt{3}} - \frac{6}{\sqrt{3}} \tan^{-1} \frac{2\omega + e}{\sqrt{3}e} \right]$$

この式で T を計算してみると第6図の鎖線のようになる。鎖線は 760 mm Hg 及び 300 mm Hg の場合のみ記入した。これらの鎖線に実測値よりかなり左えずれているが、実測の場合には初めの1~2分の間モーターの起動用抵抗の存在により所定の入力が與えられていないため、実測値の A_1, A_2 点附近を原点にとれば、実測値は計算値に殆んど一致する。従つて回転数上昇時間は実測しなくても抵抗係数 C_M は測定しておけば上述の方法で計算出来るわけで、このことは高速度カメラの設計上実際に役立つ。

5. むすび

以上のことから

- (1) 回転円盤の場合、半径が大となり高速度になると空氣抵抗が急激に増し、所要馬力の大半を占めるようになるから、高速度カメラの場合出来れば眞空中で廻すように設計すること。
- (2) 円盤はこのような特殊な形状をしていても、空氣抵抗は大体 Kármán の計算式に従うものとして設計して大過ないこと。

等が結論出来る。

尙將來出来得れば、容器内の減圧ばかりでなく、加圧した場合の空氣抵抗をも測定して R_e の高い範囲を驗べ、又容器内に水素其の他の氣体を充填した場合の摩擦抵抗等も測定したいと考える。

終りに御指導並に御援助を賜つた曾田範宗教授、河村正彌教授、及種々有益な御教示を載いた谷一郎教授に厚く御礼申上げると共に、終始実験に協力して下さつた伊藤寛治氏に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) T. Suhara: Report of Aeronautical Res. Inst. 5 (1930), 178.
- (2) Th. v. Kármán: Z. A. M. M. 1 (1921), 233.
- (3) W. G. Cochran: Proc. Cambridge Phil. Soc. 30 (1934), 408.
- (4) 木谷要一: 應用物理 1 (1932), 8.
- (5) F. Schultz-Grunow: Z. A. M. M. 15(1935), 191.

この他参考文献として次のものがある。

- 久武眞直: 日本機械学会論文集 8 (昭 17) II—33.
- 藤本・岩垣: 日本機械学会論文集 13(昭 22), 180.
- " 14(昭 23), I—44.
- 藤本武助: 機械の研究 2 (1950), 193.