

自軸まわりに回転する円柱に作用する力 (定常回転する場合)

水谷 充・村上光清

Force on a Rotating Circular Cylinder in Time-Independent Flow (Constant-Speed Rotation)

Mitsuru MIZUTANI and Mitsukiyo MURAKAMI

The Magnus force on a rotating body traveling through a fluid is partly responsible for the inaccuracy and dispersion of ballistic missiles and rifle shells. A great deal of efforts has been done to predict the detail behaviors of the force under various conditions. Most of them, however, are experimental studies about time-independent ambient flows. The behavior of the force acting on a time-dependent rotating cylinder has not yet studied sufficiently. As a first step to the time-dependent flow problem, this paper describes details of the forces on a constant-speed rotating cylinder in relation to the velocity ratio; peripheral velocity of cylinder/free stream velocity.

1. まえがき

流れの場における物体の抵抗ならびに揚力の問題は、流体力学の基本的問題であり従来多くの研究がなされて来た。また、流れの方向に垂直な回転軸を持つ回転する円柱に関しては、流れの方向に垂直な力が働くことが古くよりマグナス効果⁽¹⁾として知られている。

この種の問題に関しては、近年ロケットなどの回転する飛翔体の空中での運動が注目されるようになり、再び研究の対象として取り上げられるようになった。

回転する円柱に作用する揚力の大きさに関しては、過去多数の実験的報告がある⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、供試円柱の縦横比の影響が大きいため各報告間のデータにばらつきが比較的大きかった。

Swanson⁽⁵⁾は円柱を三分割し、風洞壁から十分離

れた中央の部分についてのみ計測を行うことにより遷移レイノルズ数の付近の範囲において縦横比無限大の場合に近い状態での結果を得られることを示し、通常の揚力方向とは逆向きの揚力が発生するという興味ある結果を報告している。これらの結果は増速側(円柱の回転方向と一様流の方向とが一致する側)の境界層と減速側(円柱の回転方向と一様流の方向が逆である側)の境界層との間で非対称な層流から乱流への遷移が生じていることを示唆している。

一方、回転円柱のまわりの流れについての理論解析はPrandtlの非粘性の場合の解のほか、一様流の速度に比べて周速が非常に大きい場合と、逆に非常に小さい場合についてのみ試みられている⁽⁶⁾⁽⁷⁾にすぎない。また数値計算による解析⁽⁸⁾も試みられている。

しかしこれらの研究はいずれも円柱が定常回転する場合の研究であり、非定常回転する場合の研究は

少ない⁽⁹⁾。実用上、物体は非定常運動する場合または非定常流れの場におかれることが多く、非定常回転する場合の研究は重要な課題である。

本研究ではこの非定常回転の研究を行うための基礎的問題として、まず定常回転する円柱に作用する抗力及び揚力の測定を行い、円柱に作用する力の詳細を明らかにした。

2. 記号

C_D : 抵抗係数

C_L : 揚力係数

d : 円柱の外径 (= 25mm, 100mm, 150mm, 200mm)
(図1)

H : 風洞の吹き出し口高さ寸法 (= 600mm) (図3)

k : 回転比 (= V/U)

L_0 : 円柱の有効長さ (= 300mm) (図1)
(円柱測定部のアスペクト比:

$L_0/d = 3.00$, $d = 100\text{mm}$,

$L_0/d = 2.00$, $d = 150\text{mm}$,

$L_0/d = 1.50$, $d = 200\text{mm}$)

Re : レイノルズ数 (= Ud/ν)

U : 均一流の軸方向速度

V : 円柱外周の回転周速度

ν : 空気の動粘度

Γ : 円柱周りの循環 (図8)

3. 実験装置および実験方法

実験には愛知工業大学縦型回流風洞を用いた。

風洞の詳細は文献(10)に示す。本風洞の測定部は密閉式であり、その寸法は(600mm×600mm×1500mm)である。実験は風速10m/sから40m/sの範囲で行った。この範囲における流れの乱れ度は1%以下である。

Swansonの実験結果⁽⁵⁾によれば、円柱の抵抗係数が急減する臨界レイノルズ数付近において揚力係数が負の値になる現象が観察されている。したがって臨界レイノルズ数を越えた広範囲のレイノルズ数において実験を行うため、円柱には外径 $d=25\text{mm}$, 100mm, 150mm, 200mmの亚克力製の表面の滑らかな円筒および外径 $d=100\text{mm}$ で相対粗さ $1/100$ の表面粗さを持つものの5種類を用いた。

実験装置の概略を図1に示す。円柱はその両端において軸受けにより支持され、ステップモータにより回転させられる。回転数は最大4000rpmの範囲で実験を行った。また支柱の空力的干渉を排除するため図に示すように円柱両端に側板を設置した。

円柱に作用する抗力および揚力は円柱両端の軸受け部において歪ゲージにより測定した。測定部の詳細を図2に示す。歪測定部におよぼす円柱駆動力の影響は十分に小さくなるよう配慮した。

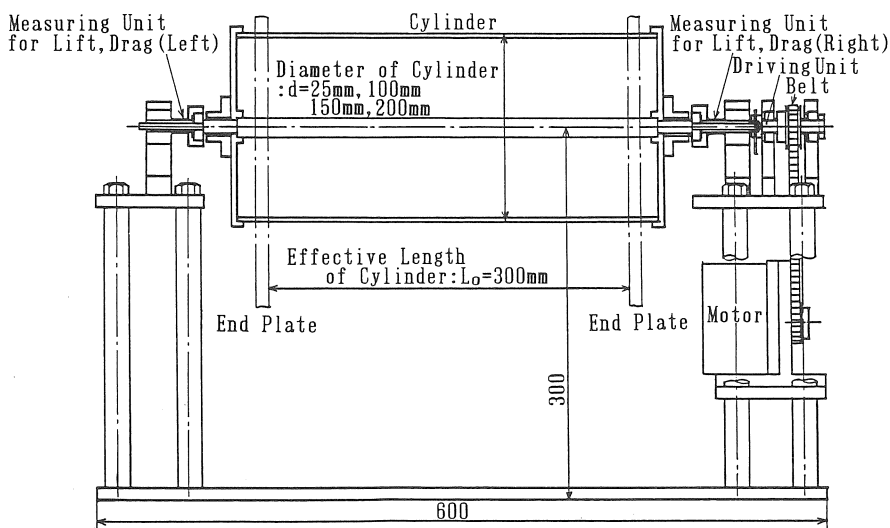


図1. 実験装置測定部

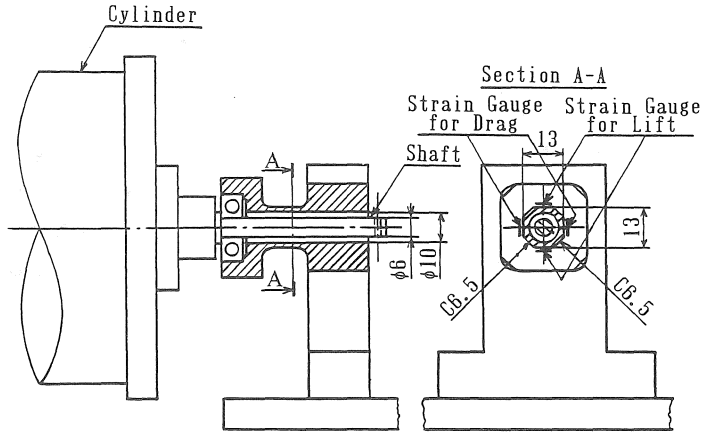


図2. 測定部詳細

4. 実験結果及び考察

4.1 円柱静止時の抵抗係数

図3に円柱静止時の抵抗係数を示す。図中の破線は無限空間における二次元円柱の C_D の値⁽¹¹⁾を示しているが、直径 $d=25\text{mm}$ の円柱を用いた場合の実験結果との一致は良好である。また直径が大きくなるにつれて抵抗係数も増大しているが、これは測

定流路の寸法に対して円柱の直径が大きくなり風洞壁面の干渉が著しくなったためである。この壁面干渉についてはその修正式⁽¹²⁾も提案されているが、ここでは無修正の値を示す。

直径 $d=150\text{mm}, 200\text{mm}$ の円柱はレイノルズ数 $Re=5 \times 10^5$ 付近でその境界層が層流から乱流に移していることがわかる。また $d=100\text{mm}$ の表面粗さを持つ円柱は境界層の遷移がはやまり $Re=1.5 \times 10^5$ 付近で遷移している。

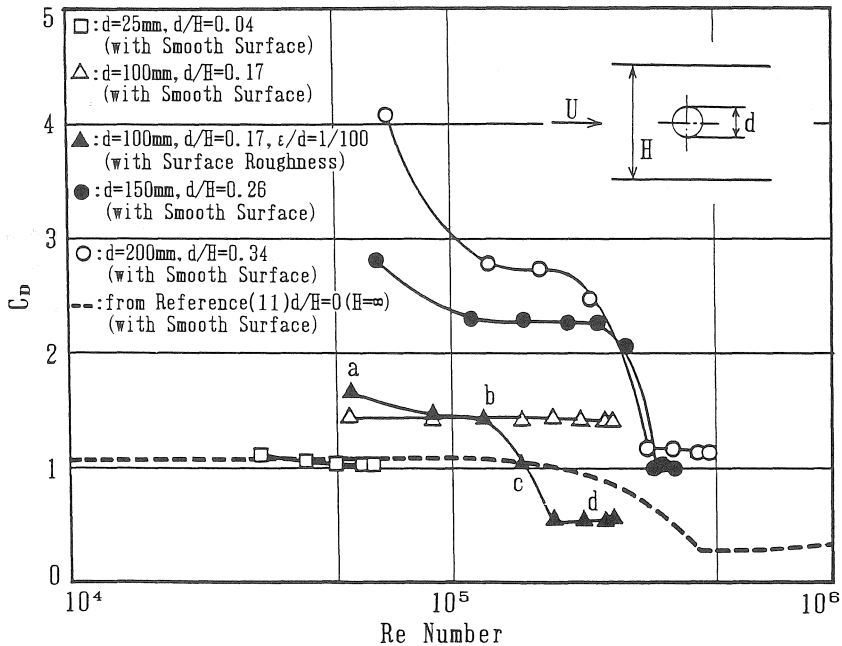


図3. 円柱静止時のRe数と抵抗係数 C_D

4. 2 円柱回転時の回転比と揚力係数

回転比に対する揚力係数の変化については、風洞の壁面干渉を無視し得る $d = 25\text{mm}$ の円柱における結果を示すべきであるが、 $d = 25\text{mm}$ の円柱では十分に臨界レイノルズ数に達しない。すでに述べたように回転に伴う揚力係数は臨界レイノルズ数近傍において複雑な変化をする。したがってここでは、 $d = 100\text{mm}$, 150mm , 200mm の円柱を用いた場合の結果を示す。ただし後述の実験結果によれば、回転にともなう揚力係数の定性的変化は壁面干渉の影響をあまり受けず、したがって壁面干渉の影響はほぼ無視できることがわかる。

図4から図7に回転比に対する揚力係数の実験結果を示す。

(1) $d = 100\text{mm}$ の表面の滑らかな円柱 (図4)

回転比に対する揚力係数の変化の様子はレイノルズ数により異なるが、おおよそ以下の3つのパターンで変化することがわかった。すなわち、回転比の増加にともない次のようになる。

$$(a) \text{Re} < 9 \times 10^4$$

臨界レイノルズ数以下の速度範囲において常に正の値をとり続けるもの。

$$(b) 1 \times 10^5 < \text{Re} < 2 \times 10^5$$

正の値をとった後、負の値をとり、その後レイノルズ数に無関係な共通の一本の曲線を描きながら正の値へ増加するもの。

$$(c) 2 \times 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^5$$

負の値をとった後、(b)と同じ共通な一本の曲線を描きながら正の値へ増加するもの。

(2) $d = 100\text{mm}$ の表面粗さを持つ円柱 (図5)

上述(1)の3つのパターンの他に、臨界レイノルズ数を越えた速度範囲において次のもう1パターン存在する。すなわち

回転比の増加にともない

$$(d) \text{Re} > 2 \times 10^5$$

臨界レイノルズ数以上の速度範囲において正の値をとり続けるもの。

(3) $d = 150\text{mm}$, $d = 200\text{mm}$ の表面の滑らかな円柱 (図6、図7)

上述(1)の(b)および(c)のパターンが見られる。

以上から、回転に伴う揚力の変化には、(a), (b), (c), (d)の4つのパターンが存在することが分かった。この(a)~(d)のパターンは、レイノルズ数により支配され、(a)は臨界レイノルズ数以下の速度範囲において、(b)および(c)は臨界レイノルズ数付近において、(d)は臨界レイノルズ数以上の速度範囲において発生することがわかった。これを図3に示す。

またいずれの円柱の場合も、レイノルズ数に無関係であり回転比のみで定まる一本の曲線が存在することがわかった。

4. 3 回転する円柱の境界層

静止した円柱の境界層はレイノルズ数が小さい速度域においては層流であり、速度の増加に伴い境界層は層流から乱流に移り乱流剥離をおこす。その際剥離点が後方に移動して抵抗係数が急減する事はよく知られている。これに対して回転する円柱の場合は図8に示す3種類の状態が考えられる。

図8(a)は臨界レイノルズ数より十分に低い速度範囲 ($\text{Re} < 9 \times 10^4$) における場合である。境界層は円柱の上下共に層流であり、回転に伴い剥離点が円柱の上下共回転方向に移動し正の揚力を発生している。これは前述のパターン(a)に相当する。

図8(b)は臨界レイノルズ数付近 ($1 \times 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^5$) の速度域において見られ、回転により相対速度が小さくなる円柱の上部では層流剥離、相対速度の大きくなる下部では乱流剥離を起こしている場合である。この場合下面の乱流剥離は層流剥離点よりも後方に移動するため図に示すように円柱まわりの循環は負になり、したがって負の揚力を発生することになる。

図8(c)は臨界レイノルズ数より速い速度範囲 ($\text{Re} > 3 \times 10^5$) における場合である。境界層は円柱の上下共に乱流であり、回転に伴い剥離点が円柱の上下共回転方向に移動し正の揚力を発生している。これは前述のパターン(d)に相当する。

パターン(b)の場合は回転に伴い図8(a)より図8(b)を経て図8(c)に変化していくと考えられる。したがって揚力は正から負へ変化し回転の増加に伴って再び正になる。

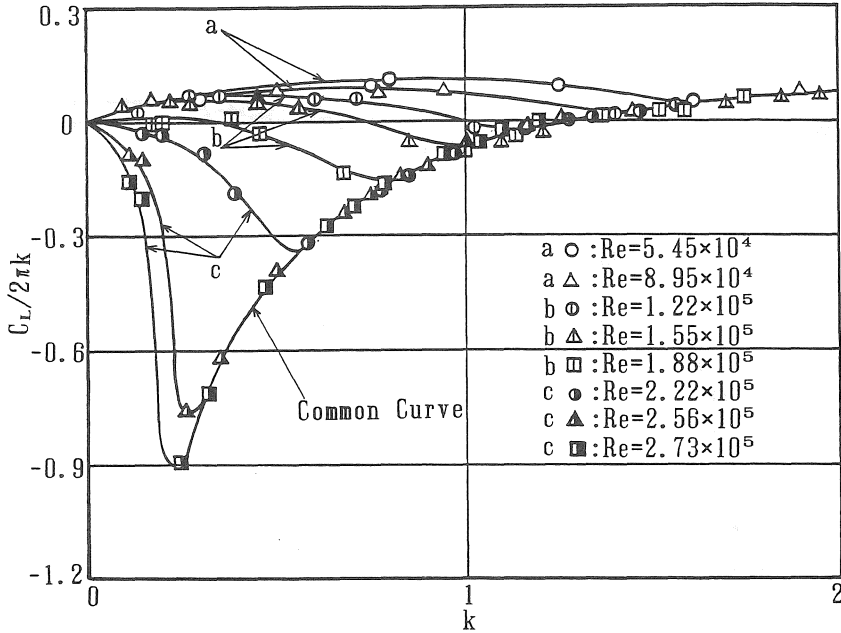


図4. $C_L/2\pi k$ - k 曲線 ($d=100\text{mm}$, with Smooth Surface)

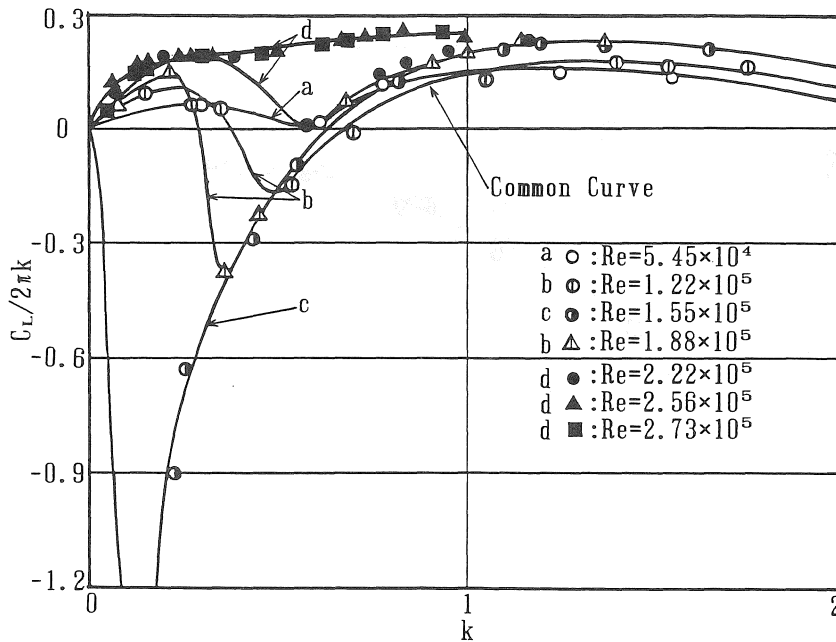


図5. $C_L/2\pi k$ - k 曲線 ($d=100\text{mm}$, with Surface Roughness)

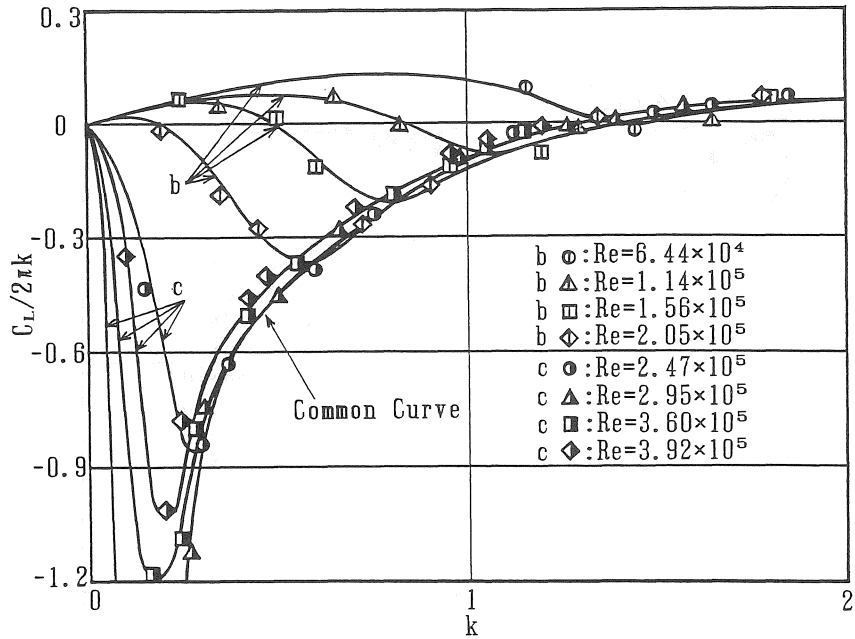


図6. $C_L/2\pi k$ - k 曲線 ($d=150\text{mm}$, with Smooth Surface)

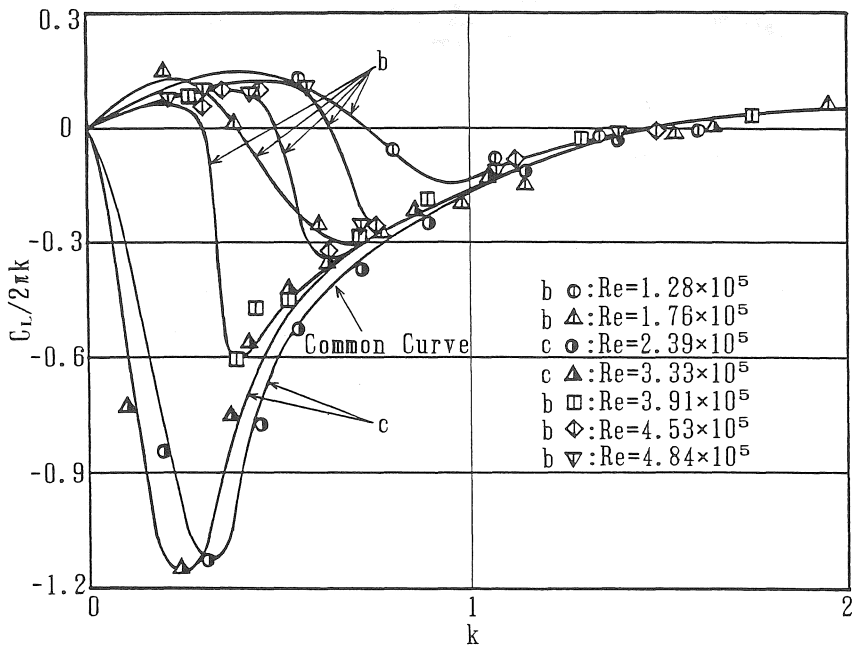


図7. $C_L/2\pi k$ - k 曲線 ($d=200\text{mm}$, with Smooth Surface)

パターン(c)の場合はパターン(b)よりわずかにレイノルズ数が高い場合であり、回転に伴い円柱下部の境界層は直ちに乱流に遷移し図8(b)の状態になる。その後回転の増加にともない図8(c)の状態に変化する。したがって揚力は負から正へと変化する。

このように、回転する円柱の回転比による揚力係数の複雑な変化は、上記のような境界層の剥離状態の違いによるものであることがわかる。

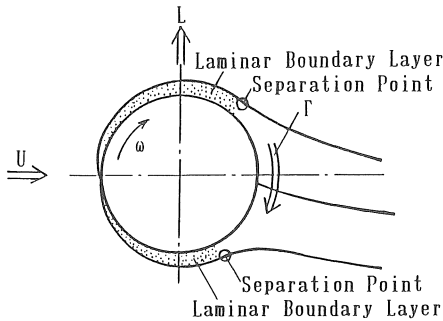


図8(a). 上面, 下面部共に層流はく離

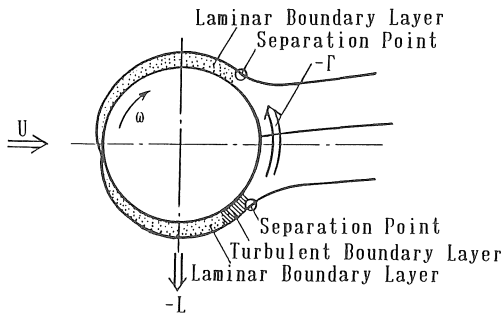


図8(b). 上面部層流はく離, 下面部乱流はく離

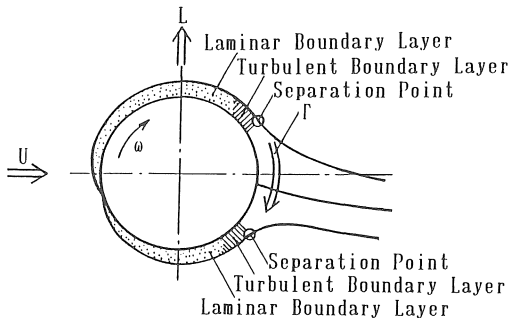


図8(c). 上面, 下面部共に乱流はく離

5. まとめ

均一流中で定常回転をする円柱に作用する揚力の変化を実験的に明らかにした。回転比に対する揚力係数の変化にはレイノルズ数により4通りのパターン(図4~図7)があることがわかった。また、これらのパターンは円柱の境界層剥離の状態(図8)の違いによるものであることを明らかにした。

回転比に対する揚力係数の変化にはレイノルズ数とは無関係に回転比のみで定まる一本の曲線が存在することがわかった。

6. 参考文献

- (1)Magnus.:Poggendorf's Annalen der Physik u. Chemie,88,1,1953
- (2)Thom,A.:Rep.& Men.,Aeron.Res.Council,1018, 1925.
- (3)Thom,A.:Res.& Men.,Aeron.Res.Council,1082, 1926.
- (4)Thom,A.:Res.& Men.,Aeron.Res.Council,1410, 1931.
- (5)Swanson,W.:Trans.ASME,Ser.D,83(3),461,1961.
- (6)Glauert,M.B.:J.Fluid Mech.,1(1),345,1956.
- (7)Moore,D.,W.:J.,Fluid Mech.,2(6),541,1957.
- (8)木村 雄吉他:回転する円柱をすぎる高レイノルズ数の流れ, 日本航空宇宙学会誌,34(387),188,1986.
- (9)Sarpkaya,T.:Trans.ASME,Ser.E,30(1),13,1963.
- (10)水谷 充, 村上光清:愛知工業大学型回流風洞の性能試験, 愛知工業大学研究報告,22(B), 1987.
- (11)Massey,B.S.:Mechanics of Fluids, 4th Ed., 1979.
- (12)谷 一郎他:流体力学実験法, 267, 岩波書店, 1977.

(受理 平成2年3月20日)