容器内回転円板まわりの流れの可視化

名工大 伊藤基之[○], 山田 豊, 近藤直樹

Visualization of the flow around a disk rotating in a casing

Motoyuki Ito*, Yutaka Yamada*, Naoki Kondo*

The flow in the clearance between a rotating disk and the casing was studied by the use of a flow visualization technique. The experiment was conducted for several clearance ratios s/R from 0.0080 to 0.120. At large clearance ratios, three different types of instability were observed near the casing wall. The two of these instability were similar to the instability in the Ekman layer. At small clearance ratios, only one type of instability was observed. It was found that the boundary layer on the rotating disk was stable for exceedingly large values of the Reynolds number. The effect of throughflow on the stability of the flow was examined.

1. まえがき

広い静止流体中で円板が回転する場合、円板上境界層の流れは局所レイノルズ数が臨界値を越えた所で不安定となり、規則的ならせん状渦が発生することはよく知られている⁽¹⁾⁽²⁾。また、エクマン境界層の流れの不安定性に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾においては、性質の異なる2種類の不安定が観測されている。

容器内で回転する円板まわりの流れは上記の流れに類似したものであるので、流れの不安定性に関しても何らかの類似性が期待される。

以上の観点から、本研究では容器内で回転する円板まわりの流れをアルミ粉法により可視化観察し、流れの不安定性および乱流への遷移について調べた。

2. 主な記号

C_q : 貫流の無次元体積流量 ($=Q/\omega R$), Q : 貫流の体積流量 (半径方向外向きは $Q>0$, 内向きは $Q<0$ とする), R : 回転円板の半径 ($=126.5\text{mm}$), Re : レイノルズ数 ($=R^2\omega/\nu$), Re_l : 局所レイノルズ数 ($=r^2\omega/\nu$), r : 半径位置, ω : 円板の角速度, ν : 流体の動粘性係数, s : 回転円板と容器の軸方向すきま幅。

3. 実験装置および方法

Fig.1に実験装置主要部の概略を示す。回転円板は外径253mmの軟鋼製のものであり、円板面には照明光の反射を防ぐための黒色塗装を施してある。容器は透明なアクリル樹脂製のもので、円筒壁内径は255mm、外形は断面観察の場合に光の屈

* Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya

折の悪影響を少なくするために一辺の長さが340mmの正方形にしてある。容器と回転内板の軸方向すきま幅 δ は厚さの異なる種々のスペーサを用いて変化させることができるが、 δ の値が正確に設定されているかどうかを確認できるように、容器壁には周上等間隔に3箇所の子きま測定孔を設けてある。本研究では5種類のすきま比 $\delta/R=0.120, 0.080, 0.040, 0.016, 0.0080$ について実験を行った。貫流の影響を調べる場合には、容器壁中心に取り付けた1インチ管および外周に設けた2箇所の穴を通して貫流を流すことができる。

流れの可視化法としてはトレーサ法の一つであるアルミ粉法を採用した。すなわち、水または濃度が60%のグリセリン水溶液中に微量のアルミ粉を懸濁させたものを作動流体として用いた。すきまが広い場合には容器外部(Fig.1の左側)からの外観観察に加えて、すきま断面の観察も行った。断面観察には1.5kwのハロゲンランプを光源とするスリット光を用い、主にFig.2(a)(b)に示す2通りの配置で断面写真を撮影した。写真用フィルムはASA 400であり、すべて8倍の増感現像を行った。

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Optical arrangement

4. 実験結果および考察

4.1 すきまが広い場合の不安定

すきま比が大きい場合($\delta/R=0.120, 0.080$)、容器壁側に3種類の不安定が観測された。以下ではこれらの不安定を、臨界レイノルズ数の低い順にそれぞれType I, Type II, Type III と呼ぶことにする。Type I は Fig.3, Fig.4 の内周部にみられるドーナツ状の波であり、半径方向内向きのかなり大きな位相速度をもつ進行波である。この不安定波は本実験範囲内の最小 Re 数(約5000)においてすでに発生しており、臨界レイノルズ数は求められなかった。 Re を少し増すとType Iに加えてType IIが発生するが、これはFig.3でType Iより外側の半径位置にみられるような、表面が周方向と10°前後の角度をなす定在波である。 Re 数がさらに増大するとType IIIがさらに外周から発生するが、これはFig.4の外周部にみられるように、Type IIよりも傾き角が大きく、しかも回転内板と同方向(Fig.4では時計方向)に回転するように見える進行波である。なおFig.4の写真ではType IIの存在が明瞭ではないが、直接観察によればFig.4の条件下ではType I~IIIのすべての不安定が同時に観測される。

Fig.5はType I~IIIが同時に見られる場合の断面写真の一刷であり、前記Fig.2(a)の配置で写真撮影したものである。流れの不安定性を示す波は容器壁の近くだけに存在し、円板側の流れは安定であることがわかる。

以上の各不安定が生ずる臨界レイノルズ数(Re_c)をFig.6に示してあるが、図から s/R が大きいほど低 Re 数で各種の不安定が生じることがわかる。なお同図には後述のすきまが狭い場合($s/R \leq 0.016$)に観測される不安定(Type IV)の(Re_c)も示してある。

エクマン境界層において観測される2種類の不安定は、一つは粘性力とコリオリ力に起因するもの、他の一つは速度プロファイルが変曲点をもつことにより生ずる不安定であるといわれている⁽⁴⁾。これらの不安定をそれぞれType AおよびType Bと呼ぶことにする。Table 1にType I~IIIおよびType A, Bの特性を示してあるが、Type IとType A, Type IIとType Bの間に類似性がみられることから、Type I, IIはそれぞれType A, Bと同様な原因で生ずることが推測される。

Type I~IIIの観測される Re 数範囲よりさらに Re 数を増してゆくと、容器壁側にみられる変動は次第に激しくなり、外観写真ではFig.7に示すように全面が乱流状態となる。しかし、断面観察によれば、この場合の乱れは容器壁側のみに存在し(Fig.8)、回

転円板近くの流れは非常に高い Re 数まで安定である。すなわち、回転円板上の流れは容器壁上の流れに比べてきわめて安定であるといえる。

Fig.3 Type I, II instability
($s/R=0.080$, $Re=2.33 \times 10^4$)

Fig.4 Type I, II, III instability
($s/R=0.080$, $Re=2.99 \times 10^4$)

Fig.5 Sectional view($s/R=0.120$,
 $Re=2.41 \times 10^4$)

Fig.6 Critical Reynolds number

Table 1 Characteristics of instability

Instability	Type I	Type II	Type III	Type IV	Ekman layer ⁽⁴⁾	
					Type A	Type B
Wave length ($\lambda/\sqrt{\nu/\omega}$)	12~17	12~13.5	12~14	8.9~10	25~33	11.8
Wave front orientation(ϵ)	$\approx 0^\circ$	$7^\circ \sim 14^\circ$	$24^\circ \sim 26^\circ$	$0^\circ \sim -5^\circ$	$0^\circ \sim -8^\circ$	14.6°
Direction of propagation	inward (fast)	stationary	outward	stationary	inward (fast)	inward (slow)
s/R	≥ 0.080	≥ 0.040	≥ 0.080	≤ 0.0160	—	—

4.2 すきまが狭い場合の不安定
すきま比が小さい場合($s/R \leq 0.040$)
には、すきまが広い場合に見られ
た Type I, Type III などの位相速度
をもつ不安定は生じない。 $s/R=0.040$
の場合には、 Re 数が増大して前記
Fig. 6 に示す臨界値を越えると、す
きまが広い場合の Type II と同様な
不安定 (Fig. 9) が生ずる。一方、 $s/R=0.0160$, 0.0080 などでは、Fig. 10 に
みられるようなリング状の定在波が観測される。この不安定を Type IV
と呼ぶことにし、その特性を前記 Table 1 に示す。

$s/R \leq 0.040$ の場合、Type II または Type IV の不安定が存在する領域
よりさらに Re 数を増すと、Fig. 11 にみられるようならせん状の局所
乱れが生じる。この乱れ部分は円板の約 $\frac{1}{2}$ の角速度で回転している。
 $s/R=0.040$, 0.0080 ではこの局所乱れの部分が徐々に全面に拡がり、乱
流へ遷移してゆくが、 $s/R=0.0160$ では $Re=1.6 \times 10^5$ 付近でらせん状乱れ
部分が突然消滅し、かわりに Fig. 12 にみられるような乱流斑が外
周部から発生する。 Re 数の増加とともにこの乱流斑は成長し、全
面が乱流状態になってゆく。

4.3 回転円板 上境界層の遷移

Fig. 13 は Fig. 2(b)
に示した配置で
撮影した断面写
真の例である。
すきまの中央部
が暗く写ってい
るのは、その領
域に半径方向流
れがないために
アルミ箔の面が
半径方向に対し
て垂直に配列し、
カメラの方向に
反射光が来ない
ことによるもの

Fig. 7 Turbulence on the wall
($s/R=0.080$, $Re=1.00 \times 10^5$)

Fig. 8 Turbulence
on the wall (s/R
 $=0.120$, $Re=1.10 \times$
 10^5)

Fig. 9 Type II instability
($s/R=0.040$, $Re=5.81 \times 10^4$)

Fig. 10 Type IV instability
($s/R=0.0160$, $Re=7.36 \times 10^4$)

Fig. 11 Spiral turbulence
($s/R=0.0160$, $Re=1.16 \times 10^5$)

Fig. 12 Turbulent spot
($s/R=0.0160$, $Re=1.77 \times 10^5$)

である。すなわち、すきま中央部の暗い部分はポテンシャルコアであり、回転円板と容器壁に沿った明るい部分が境界層であると考えられる。そこでいま、Fig.13の各写真において回転円板上境界層に注目すると、写真の左側から矢印で示す半径位置付近より外側では境界層が半径方向に急激に厚くなっていることがわかる。境界層厚さが半径方向に増大する領域は乱流境界層であると考えられるので、これらの断面写真から局所遷移レイノルズ数 $(Re)_c = (r^2\omega/\nu)_c$ の概略値を求めることができる。

Fig.13 Sectional view of boundary layer($s/R=0.120$)

Fig.14 Critical radius r_c
($s/R=0.0160$, $Re=9.17 \times 10^5$)

Fig.15 Critical Reynolds number

一方、すきまが狭い場合には断面写真の解析は非常に困難であるが、外観写真では円板側境界層が層流である部分と乱流である部分とで明暗の差がみられる(Fig.14)。すきまが狭い場合には照明光は円盘面近くまで透過するため、円板側境界層が層流の部分ではアルミ箔の面が円盘面にはほぼ平行に配列しているの反射光が強く、一方乱流の部分では強い速度変動のためにアルミ箔が乱向性を示さなくなり反射光が弱くなるものと思われる。したがって、この場合にはFig.14のような外観写真から遷移位置 r_c を求め、 $(Re)_c$ の概略値を知ることができる。

以上のようにして各 s/R について $(Re)_c$ を求めた結果をFig.15に示す。実験値はかなりばらついてはいるが、いずれの s/R においても遷移レイノルズ数は $(Re)_c = 2.5 \sim 3.5 \times 10^5$ であり、広い静止流体中の回転円板上境界層の遷移レイノルズ数 $(Re)_c \approx 2.2 \times 10^5$ ⁽²⁾と同程度である。

Fig.16はスリット光を円板面に平行にし、円盘面近傍を照射して正面より写真撮影したものである。写真には周方向に対してやや傾いた白い線が2~3本現れているが、これは回転円板付近に観測される不安定であり、 $10^5 < Re < 3 \times 10^5$ の範囲にみられた。この不安定波は円板よりかなり遅い周速度で回転しており、広い静止流体中の回転

Fig.16 Instability near the disk($s/R=0.120$, $Re=2.58 \times 10^5$)

円板上で観測されらせん渦⁽¹⁾⁽²⁾とは異なるタイプのものである。

4.4 貫流の影響

前述のような各種の不安定が貫流によってどのような影響を受けるかを明らかにするため、半径方向外向き ($C_q > 0$) または内向き ($C_q < 0$) の種々の貫流量を加えて流れを観察した。

Fig. 17 と Fig. 18 にそれぞれすきまが広い場合と狭い場合の結果の代表例を示す。図に示した各領域の境界実はいずれも Re を一定に保ち、貫流量を徐々に増して得られたものである。

Fig. 17 からわかるように、Type II と Type III の臨界 Re 数は半径方向外向き貫流が多いほど大きく、逆に内向き貫流が多いほど小さくなる。これはポテンシャルコアの周速が外向き貫流の増加とともに減少し、内向き貫流の増加とともに増大することに起因しているものと思われる。

一方、すきまが狭い場合にみられる Type IV は、わずかな外向き貫流で消滅する (Fig. 18)。Fig. 18 にあいて破線で囲んだ領域は Fig. 11 に示したようならせん状の局所乱れが観測される領域であり、また一実鎖線より上の領域では Fig. 19 に示すような乱流部と層流部が複雑に入り組んだ流れが観測される。

5. あとがき

容器内回転円板まわりの流れを可視化観察した結果、興味深い種々の不安定が観測された。

文 献

- (1) Gregory, N. ほか2名, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A248 (1955), 155.
- (2) Kobayashi, R. ほか2名, *ACTA Mechanica*, 35 (1980), 71.
- (3) Faller, A. J., *J. Fluid Mech.*, 15-4 (1963), 560.
- (4) Tatro, P. R. and Mollo-Christensen, *J. Fluid Mech.*, 28-3 (1967), 531.

Fig. 17 Ranges of instability

Fig. 18 Ranges of instability

Fig. 19 Turbulent flow with complex boundary ($s/R=0.0160$, $Re=2.15 \times 10^5$, $C_q=702$)