A108 上壁のある円形衝突噴流により浮上する円盤上の流れ

五十嵐 保[○], 筒井敬之, 中村元 (防衛大)

Fluid Flow on a Disk Levitated by a Circular Impinging Jet with Confining Wall

Tamotsu IGARASHI, Takayuki Tsutsui and Hajime NAKAMURA

The National Defense Academy, Dept. of Mechanical Engineering, Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka, 239-0811 Japan

Experimental studies on the fluid flow around a small disk levitated by a circular impinging jet with confining wall were carried out. The diameters of the upper and lower disks were 100 mm and 20 ~ 75 mm, respectively. The mass of the lower disk ranged from 0.77 to 52 g. The behavior of levitation of the disk and the pressure distributions on the disk were measured in the range of the space between the two disks from 0.5 to 6 mm. The flow rate was ranged from 10 to 50 l/min. The surface oil-flow patterns on the both disks were visualized. The levitating and falling critical flow rates were obtained by the dimensionless quantities. And the dimensionless lift acting on the lower disk was also obtained. The lift is almost equal to the weight of the disk. The levitation of the lower disk was caused by the large pressure drop outward along the impinging region of the jet. The pressure drop was induced by the vena contracta due to the separation bubble attached on the upper disk.

Key Words: Impinging Jet, Internal Flow, Pressure Distribution, Lift, Surface Oil-flow Pattern, Velocity Distribution

1. まえがき

2つの円盤を平行に設置し、上側の円盤の中心部のノズルから噴流を吹出すと、下方の円盤が浮き上がる現象⁽¹⁾は古くから知られている。最近、谷田⁽²⁾がこれを可視化情報に連載した「手作り実験あれこれ—教育の現場から」の中で紹介している。この現象は吸引した円盤状物体を非接触搬送に応用でき、工業的応用⁽³⁾の面から注目されている。この現象は放射流れを仮定したベルヌーイの定理に基づく圧力差によると定性的に説明されている。しかし、研究報告例は見当たらない。

五十嵐・大倉は第1報⁽⁴⁾で円盤が浮上および落下する場合の臨界流量を調べ、無次元量で表示し、ベルヌーイの定理による説明に疑問を呈した。第2報⁽⁵⁾では下方円盤表面の油膜模様と表面圧力分布を測定した。円盤に働く局所揚力分布から円盤に働く揚力は、噴流のはく離と反転によって生じるはく離泡と縮流による圧力低下に起因することを明らかにした。

しかし、上壁と下方円盤間の流れの詳細は未だ不明な点がある。本報では放射流れ領域がないと考えられる小円盤の圧力分布を測定し、局所揚力分布、油膜模様との組み合わせにより下方円盤上の流れを明らかにする。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置と噴流により浮上した円盤を示す。平行2円盤の上方側円盤は直径 $d_1 = 100$ mm, 厚さ10 mmの亚克力製である。実験に用いた下方の円盤直径は $d = 75 \sim 20$ mmと変化させた。円盤の厚さは $0.5 \sim 5.0$ mmで、質量 $m = 0.77 \sim 52$ g, 材質は亚克力, 発泡スチ

ロール, 金属等である。上方円盤は固定で、その中心に設けた内径 $d_n = 2.0$ mmのノズルから空気が噴出する。流量を上げていくと、ある流量に達すると下方円盤は突然浮上し、上方円盤とのすきま1 mm以下で空中に静止する。初期状態のすきまを $s = 0.5 \sim 6.0$ mmの間で変化させ、円盤の浮上臨界流量 q_c (l/min)を測定した。次に流量を低下させ円盤の落下臨界流量 q_{cf} (l/min)も測定した。圧力分布測定用の上・下円盤⁽⁶⁾は厚さ10 mmで内径0.6 mmの圧力孔が半径方向に1, 2 mm間隔、円周方向に10°間隔にらせん状に設けてある。この圧力孔をデジタルマノメータに接続して円盤表面圧力を測定した。得られた圧力分布を積分して円盤に働く揚力を求めた。また、油膜法により2円盤の表面流れの可視化を行い、圧力分布と組み合わせフローパターンを考察した。

Fig. 1 Experimental apparatus and fluid dynamic levitation

3. 実験結果および考察

3.1 次元解析

円盤に働く揚力 L が円盤に作用する重力 mg より大きければ円盤は浮上する. このときの流量 q , 円盤の直径 d , 円盤の質量 m , ノズル・円盤間のすきま s との間の関係を調べる. その他, 関係する物理量は重力 g , 流体の動粘性係数および密度 ρ , ν である. 方向性次元解析⁽⁴⁾により現象を支配する4つの無次元量が得られる.

$$Q = q/d\nu, M = m/\rho d^3, S = s^3 g/\nu^2, D = d^3 g/\nu^2 \quad (1)$$

たとえば, 無次元臨界流量は次の関係式で与えられる.

$$Q_c = f(D, M, S) = C D^1 M^n S^n \quad (2)$$

3.2 円盤浮上の限界流量

まず, 直径 $d = 75$ mmの円盤が浮上する瞬間の臨界流量を求めた. 臨界流量に対するすき間および円盤の質量の依存性を図2(a), (b)に示す. これらの間には次の関係がある.

$$q_c \propto s^{0.21}, q_c \propto m^{0.35} \quad (3)$$

無次元整理を行った結果を図3に示す. 式(2)の指数は $m = 0.35$, $n = 0.07$ で与えられる. この結果を用いて臨界流量に及ぼす円盤直径の影響を調べる. 円盤直径 $d = 20 \sim 70$ mmの場合の結果を図4に示す. $d = 40 \sim 70$ mmの場合, 実験値は $d = 75$ mmの結果とよく一致している. しかし, $d = 20 \sim 30$ mmでは臨界流量は前者よりも約10

Fig. 2 Correlation of critical flow rate 'q' vs space 's' and mass of disk 'm'

Fig. 3 Dimensionless critical flow rate: $d = 75$ mm

Fig. 4 Effect of the diameter 'd' on the dimensionless critical flow rate: $d = 70 \sim 20$ mm

%低い. 結局, 臨界流量は次式で与えられる.

$$Q_c = 100 M^{0.35} S^{0.07} \quad (d = 40 \sim 75 \text{ mm}) \quad (4)$$

$$Q_c = 90 M^{0.35} S^{0.07} \quad (d = 20 \sim 30 \text{ mm}) \quad (5)$$

上式とすべての実験値との誤差は ± 4 %以内である.

3.3 円盤落下の臨界流量

浮上した円盤のすきまは観察によれば1 mm以下である. 流量を q_c から徐々に減少させて, 円盤が落下する臨界流量 q_{cf} を求めた. 次の関係が得られた.

$$Q_{cf} = 33 M^{0.28} D^{0.09} \quad (d = 20 \sim 75 \text{ mm}) \quad (6)$$

上式と実験値の誤差は ± 4 %以内である.

3.4 円盤表面の圧力分布

下方円盤の圧力分布の一例を図5に示す. 基準圧力は大気圧 p_a である. ノズル直下の衝突面中心近傍の圧力はノズル出口の動圧よりやや低い. その外側に著しい負圧領域が存在している. この劇的な変化はすきま $s \leq 1$ mm

の場合、 $r = 1 \sim 2$ mmの間で、 $s \geq 2$ mmの場合は $r > 3$ mmで起こる。すきまが広がると、正圧領域および負圧領域は外周方向に移動し、その領域が広がっている。また、最大負圧の値はすき間に反比例して低下し、その位置は外側に移動している。なお、すきま $s \geq 2$ mmでは外周まで負圧であるが、 $s = 0.5, 1.0$ mmでは半径方向の $r = 10, 15$ mmで正圧に転じている。

3.5 円盤に働く揚力

円盤に作用する半径方向の単位長さ当たりの局所揚力 $\Delta L(r)$ を圧力分布から求める。得られた結果を図6に示す。円盤中心近傍の衝突領域には大きな衝突力が作用し、その外側に大きな揚力が作用している。すき目が狭いほど局所揚力の最大値は大きく、その位置は最大圧力差を与える位置とほぼ一致している。揚力の作用する領域はすきまが増加すると外周側に広がっている。次に円盤に作用する揚力 L を局所揚力を積分して求めた。得られた結果を図7に示す。図中の実線は円盤浮上の臨界流量式(5)から導かれる円盤の重力 mg である。この重力と揚力が釣り合っている。

Fig. 5 Pressure distribution along radial direction on the lower disk with space 's'

Fig. 6 Local lift distribution acting the lower disk

3.6 2円盤の表面流れ

図8は両円盤表面の油膜模様である。下側円盤の中心部に円形の衝突噴流のよどみ領域が見られる。この衝突領域と壁面噴流領域の大きさはすき間に比例して直線的に増大している。また、両円盤に形成される白黒の模様は上・下面で白黒が逆転しほぼ対照的である。両円盤表面ではく離(白)と再付着(黒)が起きている。 $s = 0.5, 1.0, 2.0$ mmでは、両円盤とも2つのリング模様が見られる。噴流は下側円盤に衝突し、反転して上面に衝突してから再び反転し、下面に再付着している。さらに反転して上面に再付着してからはく離している。上面の油膜模様は、ノズル出口から上壁に付着したはく離泡の形成を示している。図9に以上の結果より2円盤間の流れのスケッチを示す。油膜の剥がれる部分を黒で表す。

Fig. 7 Lift acting the lower disk

Fig. 8 Surface oil-flow patterns

Fig. 9 Schematic flow pattern between two disks

3.7 小円盤の場合

比較的大きな円盤 $d = 75$ mm でも円盤浮上に寄与する揚力の作用する領域は直径20 ~ 30 mmの範囲である。そこで、放射流れが存在しないと考えられる $d = 20$ mmの円盤について調べる。その圧力分布と油膜写真を図10, 局所揚力分布と揚力を図11に示す。噴流の衝突領域を除いた半径 $r = 2 \sim 4$ mmの圧力は大気圧に比べて負圧となり最大負圧をとった後, 上昇するが端部まで負圧である。すきま s が増加すると最大負圧は減少し, その位置は外周に寄っている。噴流の衝突領域を除く全域で揚力が発生している。すきま $s/d \leq 0.10$ では実験流量範囲でつねに揚力が発生する。注目すべきは $s = 2.4$ mmの場合で, 圧力分布は単調減少し, 円盤には揚力 ($F > 0$) は発生しない。油膜模様から揚力が発生する場合は, 衝突噴流が下側円盤上でなく離し, 環状のはく離線が形成されている。このときははく離流れは上側円盤に再付着する。

4. まとめ

従来, 噴流による円盤の浮上現象はベルヌーイの定理によって説明されてきた。すなわち, 円盤間は放射流れで, 速度を減少しながら流れて, すきま出口で大気圧の状態流出する。したがって, すきまの中は出口よりも速度が大きく, その分だけ圧力は大气圧よりも低くなっている。しかし, 実験結果からは円盤浮上の臨界流量式は放射流れ説に否定的結果が示された。圧力分布において, すきま $s = 0.5, 1.0$ mmでは円盤間の圧力は大气圧よりも高かった。また, $s = 2.0 \sim 7.0$ mmでも圧力分布および局所揚力分布から放射流れ領域の揚力は無視できる程度であった。結局, 噴流の反転により生じた衝突領域

Fig. 10 Pressure distribution and surface oil-flow pattern: $d = 20$ mm Fig. 11 Lift acting the lower small disk: $d = 20$ mm

外側の負圧に起因した揚力がノズルからの噴流の衝撃力を上回り円盤が浮上する。このことは放射流れのない $d = 20$ mmの小円盤の実験からも検証された。これは1円から500円の硬貨の浮上とも合致する。

参考文献

- (1) ペクレマン著, 金光不二夫訳, 物理のはなし, 東京図書, (1987), pp. 120-121.
- (2) 谷田好通, 手作り実験あれこれ—教育の現場から(3), 可視化情報, Vol. 17, No. 65 (1997), pp. 18-23.
- (3) たとえば, 特開平10-181879, 搬送装置, (株)コガネイ, (1998-7-7).
- (4) 五十嵐保, 大倉達也, 上壁のある円形衝突噴流により浮上する円盤に働く揚力 (第1報, 臨界流量), 日本機械学会論文集, Vol. 66, No. 642, B (2000), pp. 368-373.
- (5) 五十嵐保, 大倉達也, 上壁のある円形衝突噴流により浮上する円盤に働く揚力 (第2報, 圧力分布と揚力), 日本機械学会論文集, Vol. 66, No. 648, B (2000), 掲載.