4 1 4 表面に螺旋溝を有する回転円板の抵抗減少効果 (乱流遷移に螺旋溝が及ぼす影響)

Drag Reduction of a Rotating Disk with Spiral Grooves (Effect of Spiral Grooves on Transition to Turbulent)

○正 小方 聡 (都立大院) Budiarto (インドネシア大)
正 渡辺 敬三 (都立大院)

Satoshi OGATA, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo
Budiarto, University of Indonesia, Depok 16424 Indonesia
Keizo WATANABE, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo

Key Words: Boundary Layer, Drag Reduction, Enclosed Rotating Disk, Velocity profiles, Velocity Distribution

1. 緒言

回転円板摩擦抵抗はターボ機械の羽根車の機械的損失動力に直接関連し、羽根車の性能向上とも関わりをもつ故、その評価は工学的及び工業的にも重要である。通常、その損失動力は容器内回転円板摩擦抵抗の解析及び実験結果から算定することが出来る。それ故、回転円板の摩擦抵抗やその低減化に関する研究は従来から多く行われている。

回転円板近傍の流れに関して、Gregory ら⁽¹⁾は円板上に形成される螺旋渦の本数およびその角度を実験的・解析的に明らかにしている。また、油膜法により、加藤ら⁽²⁾は螺旋渦の流れ角を、Bilgen⁽³⁾はその周期や本数の測定を行っている。これら可視化結果に着目し、著者らは従来の研究⁽⁴⁾でその表面に流れに沿うような螺旋状の溝を付した回転円板を用い容器内回転円板摩擦抵抗に対する新しい抵抗減少効果を明らかにした。螺旋溝は乱流への遷移を遅らせ、それによる抵抗減少効果は最大約 11%を示した。さらに、アルミニウム粉法による流れの可視化を行い⁽⁵⁾、螺旋溝は遷移域の流れの半径方向への広がりを抑制し、その結果、遷移域が円板外周まで長く続くことを明らかにした。しかしながら、上述した研究では速度分布やその変動成分の測定は行われておらず、流れの不安定性や乱流への遷移に螺旋溝が及ぼす影響は明らかにされていない。さらに、螺旋溝を付した回転円板上流れの遷移過程の詳細も不明のままである。

よって、本研究は表面に螺旋溝を付した回転円板の乱流への遷移の遅れのメカニズムを速度分布および速度変動を測定することで詳細に明らかにすることを目的とする。

2. 主な記号

a : 円板半径, F^* : 無次元周波数(=周波数/円板回転周波数), P : パワースペクトル, Re : 局所レイノルズ数(= $\omega r^2/\nu$), s : 軸方向隙間, t^* : 無次元時間(=測定経過時間/円板回転周期), u : 周方向速度, u^* : 無次元速度成分(= $(u^2+v^2)^{1/2}/r\omega$), v : 半径方向速度, δ : 境界層厚さ, ν : 空気動粘度, ω : 円板角速度, r, θ, z : 円筒座標系

3. 実験装置及び実験方法

図 1 に容器内回転円板実験装置を示す。供試円板は直径 $2a = 400 \text{ mm}$ のアルミニウム製で、測定面には螺旋溝が付してある。円板の回転数はモータを制御することで行い、3000 rpm まで回転可能である。円板半径 a と容器と円板の隙間 s との比は $s/a = 0.22$ で、従来の研究^{(4),(5)}と同一である。速度変動の測定は熱線流速計のデータをオシロスコープで読み取り FFT 解析することで行う。供試流体は空気である。

螺旋溝の作製は円板表面をエッチングすることで行った。図 2 に螺旋溝の例と断面図を示す。螺旋溝の形状は従来の研究^{(4),(5)}と同一であり、その本数は 150 本、深さは $h = 0.1 \text{ mm}$ である。この条件で溝幅は円板外周位置で $w = 7.3 \text{ mm}$ となる。

4. 実験結果および考察

図 3 に回転円板上速度分布を $Re = 1.9 \times 10^5$ に対して示す。円板回転数は 1500 rpm である。図中、実線は乱流、破線は

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Fine spiral grooves on the disk

Fig. 3 Velocity profiles at $Re = 1.9 \times 10^5$

層流の従来の滑面円板の実験式を示している⁽⁶⁾。図 3 より明らかなように、螺旋溝を有する回転円板の半径方向の速度 v は滑面に比べ全体的に小さくなるが判る。これらの傾向は他の局所レイノルズ数でも同様であった。半径方向の速度が小さくなることは円板上の循環流(二次流れ)が小さくなったことを意味し、従来の可視化の結果⁽⁵⁾と一致する。一方、回転円板摩擦モーメントは角運動量保存則から算出することが出来る。周方向速度 u は滑面と比べて乱流の速度分布に近づくが半径方向速度が減少したことにより、それらの運動量の積が滑面より小さくなることで、螺旋溝による抵抗減少効果が生じたと考えられる。

図 4 に円板回転数 1500rpm, $z/\delta = 0.2$ における主流速度変動の測定結果を示す。図 4(a)の滑面円板の場合、 $Re=1.9 \times 10^5$ において規則的な変動が生じ始め、 $Re=2.1 \times 10^5$ で変動振幅が増大する。これは回転円板上境界層の遷移領域において発生する不安定性によるものであると考えられる⁽⁷⁾。さらに回転数が増加し $Re=3.5 \times 10^5$ になると変動は乱雑化し乱流へと遷移する。一方、図 4(b)の螺旋溝を付加した円板では $Re=2.1 \times 10^5$ においてのみ変動振幅が減少しており、その前後の、 $Re=1.9 \times 10^5$ および、 $Re=3.5 \times 10^5$ では滑面との間に明確な違いは見られない。図 4 より、螺旋溝を有する円板の遷移領域の変動は滑面と同様発生するが、その発達は抑制されることが判る。この螺旋溝による速度変動の発達の抑制が二次流れを小さくしたものと考えられる。

図 5 に速度変動のパワースペクトルを示す。図 5(a)の滑面円板の場合、 $Re=1.9 \times 10^5$ で現れた高周波成分は $Re=2.1 \times 10^5$ でそのパワーが増大し、 $Re=3.5 \times 10^5$ で変動の乱雑化が進み乱流へと遷移していく⁽⁷⁾。一方、図 5(b)の螺旋溝を付加した円板の場合は、 $Re=1.9 \times 10^5$ で低周波成分にパワーの増大が生じる。局所レイノルズ数が増加し $Re=2.1 \times 10^5$ になっても螺旋溝を付加した円板の高周波成分は滑面と異なり増大の傾向を示さず、周波数成分もほとんど乱雑化しないことが判る。しかしながら、 $Re=3.5 \times 10^5$ では変動の乱雑化が進み滑面と同様乱流へと遷移する。

5. 結論

表面に螺旋溝を付した容器内回転円板の乱流への遷移の遅れのメカニズムを明らかにするため、回転円板上の速度

(a) Smooth disk

(b) Spiral grooves disk

Fig. 4 Velocity fluctuation at $z/\delta = 0.2$

(a) Smooth disk

(b) Spiral grooves disk

Fig. 5 Power spectrum at $z/\delta = 0.2$

分布およびその変動成分の測定を行った。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 螺旋溝を有する回転円板の半径方向速度は、遷移域の局所レイノルズ数において滑面と比較し減少する。
- (2) 螺旋溝は遷移領域の変動の発達を抑制する効果を有するが、その発生段階にはほとんど影響を及ぼさない。また、遷移領域の高周波成分のパワーはほとんど変化しない。

本研究は平成 16 年度科学研究費補助金・基盤研究 B(2)15360099 の援助を受けたことを記し、謝意を表する。

文献

- (1) Gregory, N., et al., Phil. Trans. Royal Soc. London, A248(1955), 155-199.
- (2) 加藤宏・他 2 名, 機論, B, 44-379 (1978), 970-978.
- (3) Bilgen, E., J. Basic Engineering, 93-2, (1971), 85-87.
- (4) 渡辺敏三・他 3 名, 機構論, No.040-1, (2004), 311-312.
- (5) Watanabe, K. et al., Proc. 13th European Drag Reduction Meeting, (2004), p.71.
- (6) 黒川淳一・佐久間真人, 機論, B, 53-492, (1987), 2468-2476.
- (7) 伊藤基之・他 3 名, 機論, B, 54-502 (1987), 1236-1243.