

回転円盤に作用する流体トルクの軽減*

羽二生 博之,*¹ 呉 平*²
宮越 勝美*¹, 安居 義典*³

Reduction of Fluid Torque Acting on a Rotating Disk

Hiroyuki HANIU*⁴, Ping WU,
Katsumi MIYAKOSHI and Yoshinori YASUI*⁴ Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090 8507 Japan

The flow induced energy loss of a rotating disk in enclosed fluids bring out significant challenges in the engineering domain of high speed grinding, turbo machinery, circular saws, hard disk, and so on. Since the fluid is supplied continuously to the neighborhood of the disk surface, much of disk's rotational energy is considered to change into kinetic energy of fluid motion. In this study, a control circular cylinder was placed near the disk with its axis of symmetry coincide with that of disk to reduce the supply of flow to the disk. As a result, the fluid torque acting on the disk was found to be reduced significantly when the distance between the disk and the cylinder was intimately small. Furthermore, to measure the fluid torque directly, a new measurement method using load cell was developed in this study.

Key Words: Flow Control, Velocity Distribution, Fluid Dynamics, Fluid Torque, Rotating Disk, Loss of Kinetic Energy, Load Cell, Control Cylinder

1. 緒 論

近年、製品の機能や性能の向上に伴って素材の難削化が急速に進み、切削加工から研削加工への置換が検討されている。従来の研削による加工は、切削に比較して加工能率が劣っていたが砥石の周速を高速化することで、(1)仕上面粗さの向上、(2)加工能率の大幅な向上、(3)研削抵抗の減少、などの利点が生まれ、超高速研削盤の研究開発が精力的に行われている⁽¹⁾。しかし、超高速の研削加工では回転円盤砥石と空気の摩擦に起因する大きな動力損失が発生する。これは円盤の回転運動エネルギーが流体へ接線方向の運動量として伝わることによる動力損失が大きいためであり、流体が供給されるかぎり動力損失がある。このため超高速グラインダでは、出力の大きいモータを用いたり、真空中で作業を行っているのが現状である。このような流体による動力損失が減少すると、モータの出力を有効に利用することができるので、より出力の小さな小形のモータを使用したり、砥石の回転をさらに高速

化することも可能となる。

これまで流体力学の立場からは、ハードディスク等への応用を想定して円盤の流体関連振動に関する研究は多数行われている⁽²⁾⁻⁽⁶⁾が、回転円盤周囲の流体運動と流体トルクについての研究は少ない。そこで本研究では、流体による動力損失を抑制する制御方法を考案し、回転円盤に作用する流体トルクの軽減を試みた。具体的な制御方法は、円盤近傍に円筒を円盤に対して同心円状に置いて、円盤のみを回転させたとき、円盤付近に供給される流量を減少させて、回転円盤に作用する流体トルクを軽減させるというものである。また本研究では回転用のモータから円盤までの回転機構全体を板状のスポークで支持し、この支持板にストレーンゲージを張ってロードセルを構成して流体トルクを直接計測した。

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 実験には、幅1000 mm、長さ1545 mm、高さ450 mmの水槽を使用した。図1に示すように、流れの可視化観測やLDVによる流速測定のために、水槽側壁の3面にはガラス板がはめ込まれている。実験時の水位は380 mm一定とし、水温は $17 \pm 2^\circ\text{C}$ に保った。

* 原稿受付 2005年10月27日。

*¹ 正員、北見工業大学工学部(☎090-8507 北見市公園町165)。*² 正員、北見工業大学SVBL。*³ 日本電子(株)(☎196-8558 東京都昭島市武蔵野3-1-2)。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

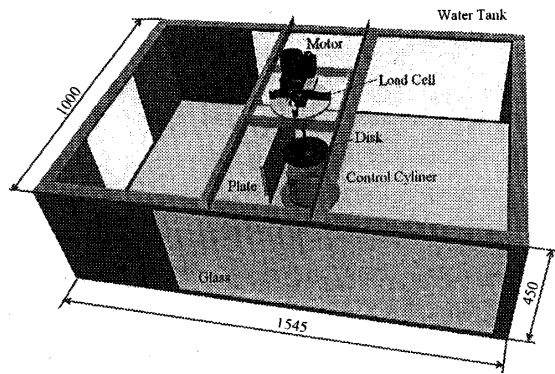


Fig. 1 Schematic view of experimental arrangement

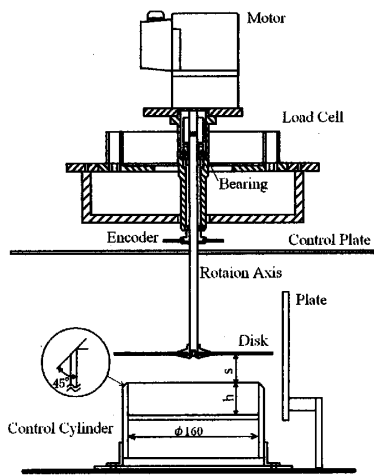


Fig. 2 Experimental setup of rotating disk

実験装置は、図2に示すように円盤回転装置部、トルク測定装置部、制御用円筒取付部、工作物に見立てた平板で構成されている。また自由表面の影響を受けないように、水面に合わせてアクリル板を設置した。回転円盤は直径 $D=180$ mm、厚さ $t=1.5$ mm の真ちゅう製であり、直径 10 mm のステンレス製回転軸の先端に真ちゅう製の円形アダプタによって固定した。円盤の駆動には、インバータによって回転数の制御が可能な AC モータ(オリエンタルモーター製 VW 425-403 T 25 W)を使用した。また、モータには減速比 3:1 のギヤヘッドが組み込まれている。

トルク測定部は、図3(a)に示すように、円盤の回転軸用のボールベアリングを組み込んだアルミニウム製軸受ハウジング、ならびにその外周に取付けられた4枚のロードセルで構成されている。ロードセルは、厚さ 1.5 mm、幅 35 mm、長さ 60 mm の可とう部を有するアルミニウム板からなっており、モータマウントを兼ねて軸受全体を支持する構造となっているため、ベアリングやギヤヘッド等の摩擦トルクは相殺され、円盤に作用する流体トルクのみを検出できる特徴

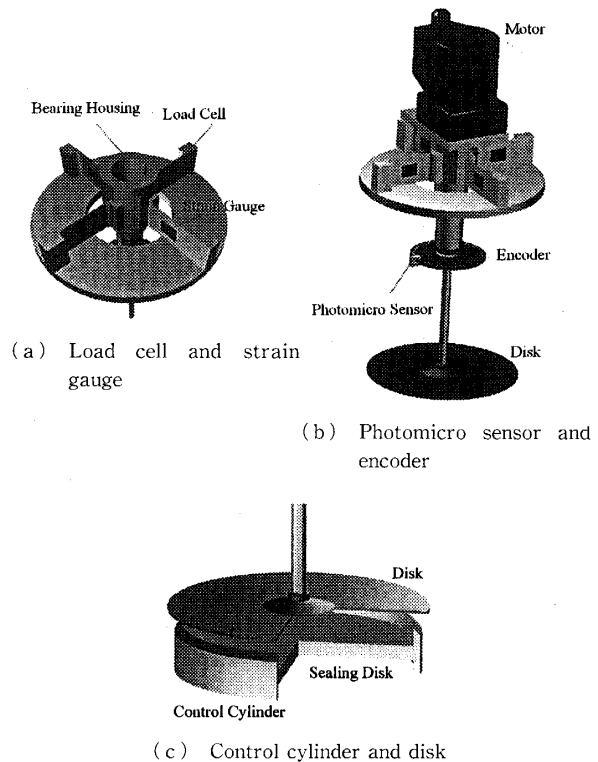


Fig. 3 Experimental arrangement of measuring unit

がある。ロードセルに加わったトルクは、4枚の半導体ひずみゲージによって検出され、この信号は動歪計によって電圧値として出力される。トルク測定に先立ち、モータマウント部に既知のモーメントを与えて出力値を測定する校正実験を行った。図4にトルクと出力電圧の校正線図を示す。本装置のトルクと出力電圧の間には、良好な比例関係があり、最小二乗法から近似式 $T=1.1E$ を得た。ここで $T[\text{kgf} \cdot \text{cm}]$ はトルクであり、 $E[\text{V}]$ は動歪計の出力電圧である。

円盤の回転数 N [rpm] は、図3(b)に示すように、スリット入りの円盤状のエンコーダに取付けたフォトマイクロセンサによって検出し、ユニバーサルカウンタ(アドバンテスト製 TR 5822)によってパルス周波数をモニタリングして一定に保った。

円盤は水槽中央の水深約 140 mm の位置に設置した。制御用の円筒には、図3(c)に示すように、内径 $d_1=160$ mm、外径 $d_2=170$ mm のアクリルパイプを使用した。また、円筒内の深さは円筒に入れた円盤状のふたの位置を上下させることで任意に変えることが可能な仕組みとなっている。なお、制御用円筒の上端は、端面と回転円盤の干渉を防ぐために外周を 45° の角度で面取り加工をしてある。本研究では、図2に示すように、制御用の円筒上端と回転円盤の下面との間

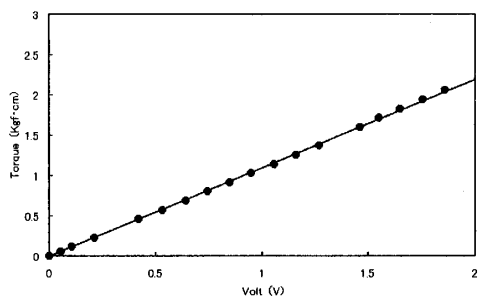


Fig. 4 Strain gauge voltage vs torque load

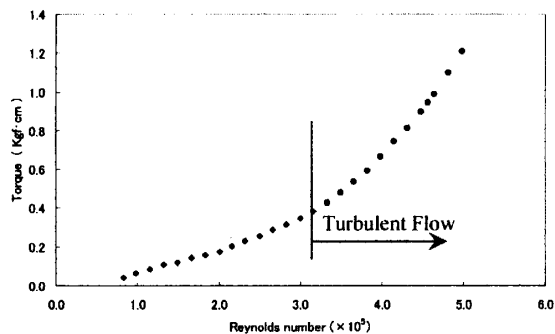


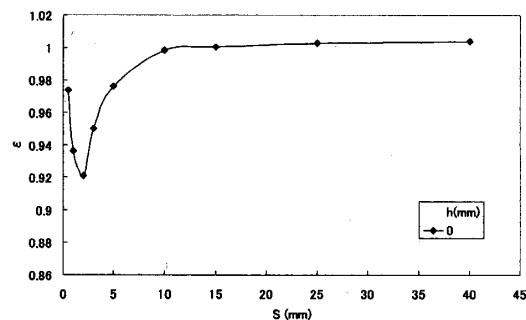
Fig. 5 Reynolds number vs torque load

げきを s , 円筒深さを h と定義し, それぞれ任意に変化させることが可能である. これらのパラメータは, あらかじめ用意した数種類のゲージを用いて正確に設定した. また, グライダ作業では, 回転する砥石で工作物の研削を行うため, 工作物に見立てた 400 mm × 200 mm, 厚さ 3 mm の平板を回転円盤外周から 1 mm 離して垂直に設置した場合についても円盤の駆動トルクを測定した.

流速の測定には LDV を使用した. また, 周波数シフタを使用することにより, 逆流の測定を可能にしている.

2.2 実験条件 本実験における無制御時のトルクとレイノルズ数の関係を図 5 に示す. ここでは $Re = R^2\omega/\nu$ と定義している. R は回転円盤の半径, ω は回転角速度, ν は水の動粘度である. レイノルズ数が $Re = 3.2 \times 10^5$ 付近からトルクの増加傾向が大きくなっているのがわかる. また, この Re 数は小濱ら⁽⁷⁾の結果と一致していることから, $Re > 3.2 \times 10^5$ は乱流域であると考えられる. 本実験では, 十分発達した乱流域においてトルク制御を行うために, 実験のレイノルズ数は遷移レイノルズ数の約 1.4 倍の $Re = 4.6 \times 10^5$ とした. このときの円盤の回転数は $N = 550$ rpm である.

制御条件は, 制御円筒内径を $d_1 = 160$ mm, 外径を $d_2 = 170$ mm に固定し, 円盤下面と円筒上端の間げき

Fig. 6 Control effect of depth $h=0$

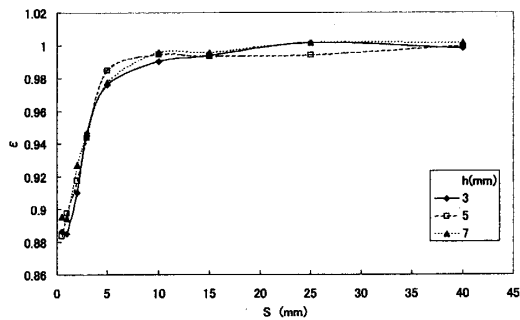
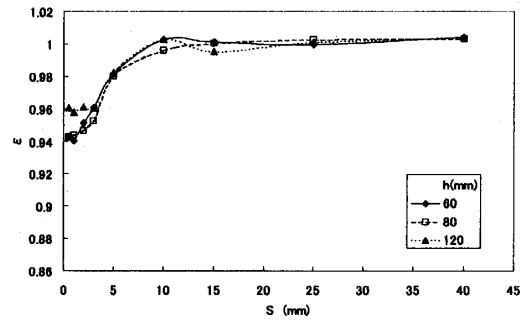
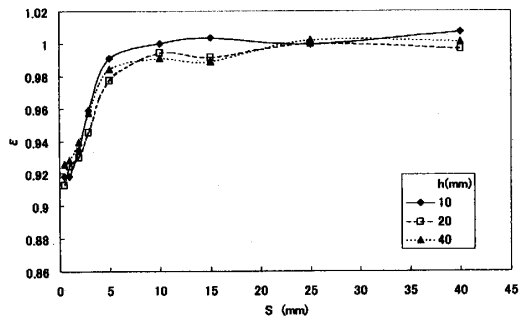
s は, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 25, 40 mm と変化させ, 円筒の深さ h は 0, 3, 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80, 120 mm と変化させた. 工作物に見立てた垂直平板設置時の円筒の深さは後述するように $h = 7$ mm とした. 制御時のトルクを無制御時のトルクで無次元化した値を制御係数 ϵ とし, トルクの変化を比較した.

LDV を用いた速度測定では, 回転円盤の下側表面から下方に $z = 1.5$ mm 離れた位置にレーザ光を通した. このときの制御円筒の深さは $h = 7$ mm, 円盤と円筒の間げきは $s = 3$ mm とした. また, 円盤接線方向の流速を U , 円盤半径方向の流速を V と定義し, 測定点は円盤外縁より半径方向に中心に向かって 5 mm 間隔で変化させた. 本実験では LDV の光軸を半径方向に一致させることで流速の U 成分を, 半径方向に直交させることで流速の V 成分を測定した.

3. 結果および考察

3.1 制御円筒による円盤駆動トルクの軽減効果 制御係数 ϵ の間げき s に対する変化は制御円筒深さ h によって異なっており, データの判読を容易にするために, トルク軽減効果を円筒深さ $h = 0$ mm, $h = 3 \sim 7$ mm, $h = 10 \sim 40$ mm, $h = 60 \sim 120$ mm の 4 領域に分けて, それぞれの結果を図 6~9 に示して考察した.

図 6 は円筒深さ $h = 0$ のときの制御効果を示している. 測定結果は, 縦軸に制御係数 ϵ を, 横軸に間げき s をとっている. 図 6 から間げき $s = 10$ mm 以上ではトルクの軽減効果はないものと判断することができる. しかし, s の減少に伴い, 制御係数は小さくなり, $s = 2$ mm において極小値を示し, さらに s が小さくなると, ϵ は増加することがわかる. このようなトルク軽減効果は, 回転する円盤に制御円筒上端面が近づいたことにより, 回転円盤近傍に流れ込む流体の流量が減少し, 円盤から流体に伝わる運動量が抑制されたためと考えられる. また, s が 2 mm より小さくなるとトルクが増加するのは, この条件における制御円筒

Fig. 7 Control effect of depth $h=3, 5, 7$ mmFig. 9 Control effect of depth $h=60, 80, 120$ mmFig. 8 Control effect of depth $h=10, 20, 40$ mm

深さが $h=0$ mm であるため、 s の減少によって回転円盤の下面と制御円筒の上端面とが近づき、二面間の流れがクエット流れのような速度こう配をもち、二面間に粘性力によるせん断応力が発生したためと考えられる。

図7は円筒深さが $h=3, 5, 7$ mm における制御効果を示している。これらの三つの条件では $s=1$ mm 付近において最も制御効果が現れており、約11%のトルクが軽減されているのがわかる。これは、間げき s が十分に小さいことで円筒内外の流体の流出入量が減少して回転円盤から流体に伝わる運動量を抑えることができたことと、 h の増加により円筒内にくぼみができて回転円盤表面と円筒内底面との間の粘性によるせん断応力が減少したためと考えられる。一方 $s=1$ mm から $s=10$ mm にかけて、トルクは急激な増加の傾向を示している。これは回転円盤と円筒の間げき s が大きくなることにより、円筒内外の流体の出入量が増加したためと考えられる。すなわち、円筒内で回転円盤から接線方向の運動量が伝わった流体の一部が遠心力によって円筒外へ流出し、接線方向の運動量をもたない同じ体積の流体が円筒内へ吸い込まれる。この円筒内外の流体の出入量の増加により、円盤から流体に伝わる運動量が増加し、トルクが増加したと思われる。また、接線方向の運動量をもたない流体が円筒内へ吸い込まれる流量は、回転円盤と円筒上端の間げき

s とともに増加すると考えられる。一方間げき s が 0.5 mm となっても、駆動トルクが増加する傾向は見られない。

図8は $h=10, 20, 40$ mm のときの結果を示している。図8に示すように、 $h=3\sim 7$ mm の場合と同様に間げき $s < 10$ mm の範囲で制御効果が現れており $s=1$ mm 付近において約8%前後のトルクが軽減されることがわかる。このトルク軽減量は、 $h=3\sim 7$ mm の場合より2%ほど小さい。このトルク軽減量が低下する理由は、円筒上端と円盤との間げき s が小さくなるにつれ円盤に向かって流れ込む流体の流量は抑制されるが、制御円筒の深さ h が大きくなったことにより二次流れが発生して円筒内での流動量が増加したため回転円盤から円筒内の流体に伝わる運動量が増加し、円筒内部での混合に伴う粘性摩擦によって運動エネルギーが消散するためと考えられる。

図9は $h=60, 80, 120$ mm のときの結果を示している。これらの条件における最大制御効果は $s=1$ mm 付近に見られ、約4~6%程度のトルクが軽減されているのがわかる。しかし、 $s=10$ mm 以下に見られる制御効果は、 $h=40$ mm 以下の場合より明らかに小さくなっており、 $h=120$ mm では、間げきが $s=3$ mm 以下になってもトルク軽減率は約4%となっている。このような制御効果の低下傾向は $h=10\sim 40$ mm の場合と同様に円筒の深さ h が大きくなったことにより円筒内での流動量が増加し、粘性による運動エネルギーの消散が増えたためと考えられる。

3.2 平板を設置した場合の制御効果 グラインダ作業では、回転する砥石で工作物の研削を行う。このため、工作物に見立てた 400 mm \times 200 mm、厚さ 3 mm の平板を回転円盤外周から 1 mm 離して設置した場合の円盤駆動トルクの測定を行った。実験は円筒を用いた制御時と無制御時について行い、このときの制御円筒深さは平板がない状態で良好なトルク軽減効果が得られた $h=7$ mm とした。

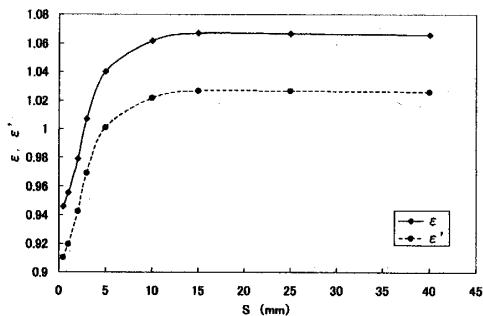


Fig. 10 Control effect in case of plate

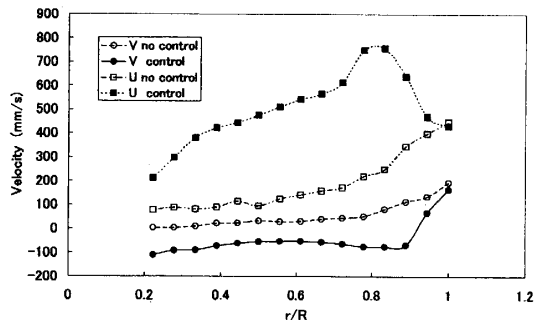


Fig. 11 LDV measurement of mean velocity in radial direction

図10は制御係数 ε 、ならびに ε' の間げき s に対する変化を示したものである。なお、 ε' は平板設置状態における無制御時(円筒がない状態)の円盤駆動トルクで制御時(円筒がある状態)の駆動トルクを割った値である。無制御時の円盤トルクは、平板の設置により約4%大きくなることからわかる。この回転トルクの増加は、円盤周囲の流体の旋回運動が平板の設置により妨げられ、平板付近における円盤表面近傍での速度こう配が大きくなって、壁面せん断応力が増大したためと考えられる。したがって平板設置時の円筒による制御効果を検討するには ε ではなく ε' の結果に基づいて考察する必要がある。図10の ε' から、平板がある場合においても間げきが $s=10$ mm以下で制御効果が見られ、 $s=1$ mm付近において10%程度のトルクが軽減されることがわかる。なお、 ε' は s が十分に大きくなると1.0に近づくはずであるが、本実験での $s=40$ mmまでの実験条件では円筒と平板が干渉し、 ε' は1.0よりも高い値を示している。

3・3 回転円盤表面付近の流速 約11%のトルク軽減効果が得られる制御円筒の深さ $h=7$ mm、回転円盤と円筒上端の間げき $s=3$ mmの条件において円盤下面から下へ1.5 mmの位置における流速の円盤半径方向成分および接線方向成分の分布を測定した。 $s=3$ mmとしたのは、これ以上間げきを小さくするとレーザービームの設置が困難になることと、フォーカ

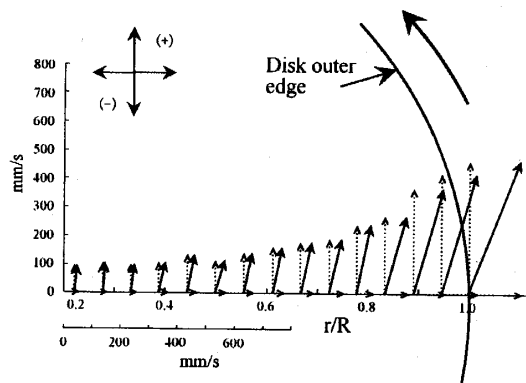


Fig. 12 Velocity vectors along radial direction (no control)

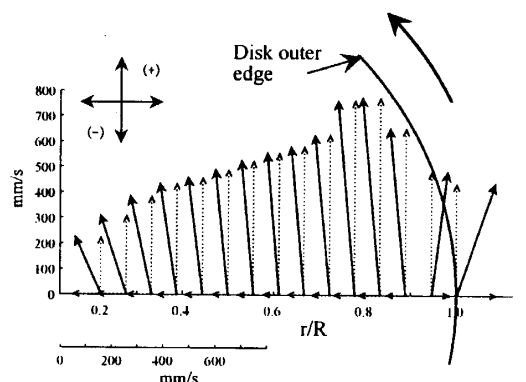


Fig. 13 Velocity vectors along radial direction (control)

スボリューム(測定点)からの散乱光がレーザ受光器によって十分に得られなくなったためである。制御時と無制御時の接線方向の時間平均流速 U 、半径方向の時間平均流速 V の測定結果を図11に示す。また、図11のデータに基づいて U と V の速度ベクトルと両者の合成速度ベクトルを図12と図13に示す。図においては、横軸は中心から測定位置までの距離 r を回転円盤の半径 $R=90$ mmで無次元化して示している。なお、図11の□と■は接線方向の流速 U であり、○と●は半径方向の流速 V である。また、白抜き記号は無制御時で、黒塗り記号は制御時である。

無制御時の U は $r/R < 0.5$ での変化は小さく、さらに r/R が増加するにつれて徐々に大きくなり、 $r/R > 0.83$ において急に増大することがわかる。また、無制御時の流速 V においても、 r/R の増加に伴って U と同様な変化傾向を示している。円盤上に発達する境界層の厚さ δ の解析解⁽⁸⁾⁽⁹⁾[層流： $\delta=3.22(\nu/\omega)^{1/2}$ 、乱流： $\delta=0.522r(\nu/\omega r^2)^{1/5}$]を用いて推定すると、層流が形成されていると考えられる $r/R=0.45$ において $\delta=0.44$ mm、完全乱流の $r/R=1.0$ において $\delta=2.6$ mmとなる。したがって U と V は、 r/R

$=0.5$ 付近では境界層外の速度を、また $r/R=1.0$ 付近では、境界層内の速度を示しているものと考えられる。なお、測定点の円盤からの距離 $z=1.5$ mm を回転中心からの距離 r で無次元化すると、回転円盤の外縁においては $z/r=0.0167$ となる。円盤外縁付近でのこの位置における流速は約 $U=450$ mm/s, $V=200$ mm/s であり、速度比は $V/U=0.444$ となる。小濱ら⁽⁷⁾ は空気中で回転する直径 400 mm の円盤表面の境界層を詳細に測定しており、そこでの円盤外縁に近い $r=195$ mm, $Re=7.76 \times 10^5$ の完全乱流領域の速度分布から $z/r=0.0167$ における速度比を求めると $V/U=0.395$ となる。本実験結果は、小濱らによる値とほぼ一致していることがわかる。

制御時の接線方向の流速 U は、無制御時に比べて約 2~5 倍の大きさになっている。これは制御円筒を円盤に十分近づけることにより円筒内外の流体の出入量が減少し、回転円盤から運動量を得た流体が円筒外にほとんど流出することなく運動量が蓄積し、流速が大きくなったためと考えられる。また、その最大値を示す位置が制御円筒の内径 ($r/R=0.89$) よりやや内側となるのは、制御円筒内壁の境界層の影響によるものと考えられる。制御円筒の外側では回転円盤の外縁において流速は無制御時と近い値になっている。一方、制御時の半径方向の流速 V は無制御時とは逆の負の値を示し、外側から回転円盤の中心に向かう流れが起こっている。これは制御円筒の設置によってほぼ閉鎖された空間内に二次流れが発生し、回転円盤から 1.5 mm 離れた測定点において逆流を検出しているものと思われる。あるいは、測定点がすでに境界層の外にあり、そのため円筒内に流れ込む流体の流速を検出したものとも考えられる。回転円盤から運動量を得た流体がわずかでも円筒外へ流出するためには、流体の連続性から円筒内への流体の流入が存在しなければならない。小濱らの結果は、回転円盤における境界層厚さは小さいことを示しており、本実験においても円盤上の境界層厚さは非常に薄いものと考えられる。そのため、境界層外においては、流出する流体の流速を検出できず、円筒内に流れ込む流体または循環流を検出したものと考えられる。しかし、可視化が行えないため、現象の詳細は不明である。

制御時と無制御時の流速変動の rms 値を図 14 に示す。なお、値は円盤外縁の速度で無次元化してある。無制御時における rms 値よりも、制御時における rms 値のほうが接線方向 U' および半径方向 V' とともに大きく、乱れ度が大きいことを示している。無制御時においては、円盤中心部よりも外周において乱れ度が大

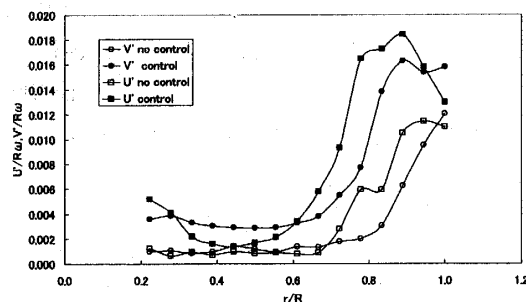


Fig. 14 Velocity rms in radial direction

きくなっており、 $r/R=0.7$ 付近から乱れ度が増加し始め、 $r/R=0.8$ 付近から外側で乱れ度が急激に大きくなっている。時間平均流速と見比べると、時間平均流速が大きくなるのに従い、乱れ度も大きくなっているのがわかる。これは遷移領域から完全乱流域に入ったため、乱れが急激に大きくなったと考えられる。一方、 $r/R=0.7$ 以下においては、時間平均流速と同様に大きな変化もなく安定しており、遷移領域およびその内側での乱れ度は小さくほぼ一定値である。

制御時において半径方向の流速変動 V' は、 $r/R=0.6$ 付近までは乱れ度に変化は少なくほぼ一定である。しかし、 $r/R=0.6$ 以上では、制御円筒の外周付近にかけて急激に乱れ度が大きくなっているのがわかる。これは、無制御時には乱れた流体がすぐに外へ排出されるのに対して、制御時には円筒内で乱れが蓄積して循環することと、円筒内では時間平均流速が増加すること、さらには出入りする流体が干渉することにより乱れが大きくなったためと考えられる。円盤中心付近で乱れ度が大きくなっているのは、円盤と円筒のすきまを通り円筒内に流れ込んだ流体が流出する流体との干渉で乱れをもった後に二次流れに乗って回転円盤の軸方向から円盤に流れ込むことによるものと考えられる。

4. 結 論

回転円盤に作用する流体トルクを、円筒によって制御した結果、以下のような結論を得た。

(1) 円筒を回転円盤付近に設置することにより、回転軸方向から円盤へ向かって流れ込む流量が抑えられ流体への運動量の伝達が抑制されたため、トルクは小さくなることがわかった。

(2) 円筒の深さを適度に小さく設定し円盤に十分近づけることにより、円筒内の二次流れが抑制されるとともに円筒内の流体の出入量が減少して、流体に伝わる運動量が減少するため、トルクが軽減されることがわかった。

(3) トルクの軽減される制御条件における円筒内の時間平均流速と乱れ度は無制御時よりも大幅に増大することがわかった。また制御時における半径方向の流れも無制御時と大きく異なることがわかった。

文 献

- (1) Inada, Y. et al., Development of Wheel Spindle for Ultra-High Speed Grinding Machine-Studies on Ultra-High Speed Grinding (1st Report)-, *Seimitsu Kogakakaishi (Journal of the Japan Society of Precision Engineering)*, Vol. 62, No. 4 (1996), pp. 19-23.
- (2) Humphrey, J. A. C. et al., Unobstructed and Obstructed Rotating Disk Flows: A Summary Review Relevant to Information Storage Systems, *Advances in Information Storage Systems*, Vol. 1 (1991), pp. 79-110.
- (3) Renshaw, A. A. et al., Aerodynamically excited vibration of a rotating disk, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 177, No. 5 (1994), pp. 577-590.
- (4) Huang, F. Y. and Mote, C. D., Jr., Mathematical Analysis of Stability of a Spinning Disk Under Rotating, Arbitrarily Large Damping Forces, *Transaction of ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 118 (1996), 657-662.
- (5) Moroi, T. et al., Viscoelastic Flow due to a Rotating Disk Enclosed in a Cylinder Casing (High Viscous Silicone Oil), *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B)*, Vol. 66, No. 647 (2000), pp. 1691-1697.
- (6) Kang, N. and Raman, A., Aeroelastic Flutter Mechanisms of a Flexible Disk Rotating in an Enclosed Compressible Fluid, *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71 (2004), pp. 120-130.
- (7) Kohama, A. et al., Traveling Disturbance on a Spinning Disk Boundary Layer., *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B (Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series B)*, Vol. 60, No. 574 (1994), pp. 1978-1984.
- (8) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, (1968), pp. 606-607, McGraw-Hill.
- (9) Ikui, T. and Inoue, M., *Viscous fluid Dynamics* (in Japanese) (1985), pp. 164, Rikogakusha Publishing.