

軸流中の回転円筒上の乱流境界層  
に関する実験的研究

平成9年3月

甲65

矢野治久

氏名(本籍)	矢野 治久 (岐阜県)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲第 65 号
学位授与年月日	平成 9 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	軸流中の回転円筒上の乱流境界層に関する実験的研究
学位論文審査委員	(主査) 教授 山下 新太郎 (副査) 教授 田中 敏雄 教授 永田 拓

## 論文内容の要旨

本論文は、一般の三次元流の中でも比較的単純な軸対称物体まわりの流れ場として、軸流中で回転する円筒上のねじれた速度分布の乱流境界層に注目し、その平均ならびに変動速度場の特性を実験的に明らかにすることが目的であり、全部で5章からなっている。

第I章では、まず回転体上の乱流境界層の問題の位置づけと一般的性質について概説している。そして、軸流中の回転体まわりの流れに関する研究、特に本研究と関連の深い回転物体上の乱流境界層の実験的研究、ならびに三次元対数速度分布に関する研究の歴史と現状を概観し、現在における問題点と本論文の目的を述べている。

第II章では、一様な軸流中で回転する細長回転円筒上の乱流境界層の基本量、即ち平均速度とレイノルズ応力全成分を測定する意義を示し、また実験装置および実験方法について述べ、得られた結果について考察している。

実験に用いた風洞は吸い込み型で、セツリングチャンパー内にはハニカムと4枚のスクリーンを備えている。円筒は半径40 mm、全長約1200 mmのアルミ合金製で、その表面は滑らかに仕上げている。円筒の前縁はナイフエッジとし、吸い込みを行うことによって円筒前縁に一樣流が流入するようにしてある。また、境界層の乱流遷移を促進するため、高さと幅が1 mmのリングが前縁から100 mm下流に設けてある。

実験はレイノルズ数 $Re$ を $3 \times 10^4$ と一定に保ち、円筒の回転速度は静止時も含めて3種類変化させている。境界層の測定には熱線流速計を用いるが、第II章では境界層の基本量を測定するため、空間分解能の優れた一本の熱線プローブ(受感部の長さが約1 mmの通常のI型と傾斜型の2種類)の回転法を用いている。熱線からの信号はサンプリング周波数が10 KHzのA/D変換を行ってマイクロコンピュータにより処理している。

測定は主として乱流発達域の3断面( $x=650, 750, 850$  mm)で行い、平均およびレイノルズ応力6成分の変化の特徴、ならびに平均速度分布に対する対数速度分布の適応性について調べている。まず円筒静止時の速度分布はRaoの提唱した対数速度分布が妥当であることを確認している。次に円筒回転時については、Nakamuraらの導出した対数速度分布がよく適合することを検証し、さらに各種の三次元流に対して提唱された対数速度分布の妥当性を検討している。また、軸流速度と円筒周速度の合成速度を代表速度として、 $U_{R0}$ で無次元化した

$u'$ ,  $w'$  は速度比によらずほぼ相似になるが  $v'$  は円筒回転時の方が静止時より大きくなること、等方的渦粘性の関係が成立しないこと、および混合距離は円筒回転時に内層において壁からの距離に対するこう配が増加すること等を明らかにしている。

第III章では、一様な軸流中で回転する細長回転円筒上の、乱流境界層の乱流構造を明らかにするため、平均流エネルギーと乱れエネルギーの収支、ならびに乱れエネルギースペクトルを調べている。

エネルギー方程式の各項の計算には、第II章で得られた発達域の3断面の平均、およびレイノルズ応力値を用い、 $x = 750$  mmの断面のエネルギー収支を求めている。また  $x$ ,  $y$  方向成分のパワースペクトルの測定は、 $x = 850$  mmの断面について行っているが、その際には瞬時速度の2方向同時測定可能な微小V型熱線プローブを用いている。スペクトルの計算は、V型熱線の出力をデジタル的に  $x$ ,  $y$  成分に変換し、それをFFT法による2048点のデータ解析とアンサンブル平均により求めている。

平均流エネルギーの対流項と拡散項は境界層の外層部でほぼ釣り合い、代表速度による無次元値の絶対値は速度比の増加とともに減少すること、乱れエネルギーの生成項と散逸項は境界層全域にわたって支配的でほぼ釣り合っており、平衡境界層となっていること、さらに、乱れエネルギーの対流項は全域にわたって値が小さいが外層部でやや大きくなり、拡散項とほぼ釣り合うことを明らかにしている。円筒回転時において、壁近くの  $u$ ,  $v$  変動速度のスペクトルの低波数域にピークが存在することを示し、比較的規則性のある渦構造が存在することを推論している。また、高波数域のエネルギー密度が相対的に大きくなることから、乱れの微細化が生じていることを明らかにしている。

第IV章では、一様な軸流中で回転する細長回転円筒上の乱流境界層の乱流構造をさらに明らかにするため、平均流エネルギーと乱れエネルギー方程式を各成分に分けた輸送方程式の収支について調べ、さらに  $u$ ,  $v$  変動速度のクロススペクトルを検討している。

境界層の内層部において、平均流エネルギーの  $x$  成分は生成、粘性散逸、粘性輸送項が Loss で、拡散項が Gain であり、 $y$  成分は生成、粘性散逸、拡散項が Loss で、粘性輸送項が Gain となること、境界層の外層部において  $x$  成分は対流と拡散項が支配的でほぼバランスし、 $y$  成分は生成と拡散項がほぼバランスすること、円筒回転時の乱れエネルギー収支においては、エネルギー再配分項と交換項が存在し、それは無視できない寄与をしていること、円筒回転時に境界層内層部で  $u$ ,  $v$  変動のクロススペクトルの低波数域に相関があり、比較的規則性のある渦構造が存在すること等を明らかにしている。

第V章では、以上の内容を総括し、結論として述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、三次元乱流境界層の流動現象を解明する上で重要となる軸対称物体まわりの流れ場として、軸流中の細長回転円筒上の乱流境界層の特性を実験的に研究したものである。

第I章では、回転体上の乱流境界層の問題の位置づけと一般的性質について概説している。さらに、研究の基本となっている回転物体上の乱流境界層の実験的研究と、三次元対数速度分布に関して、国内外における既存の研究について整理し、研究の位置づけを明確にしている。

第II章では、一様な軸流中で回転する細長回転円筒上の乱流境界層の基本量、即ち平均速度

とレイノルズ応力全成分を測定し、その変化の特徴や平均速度分布に対する対数速度分布の適応性について検討した。その結果、円筒静止時の速度分布は Rao の提唱した対数速度分布が妥当すること、円筒回転時については、Nakamura らの導出した対数速度分布が最もよく適合することを確証した。また、軸流速度と円筒周速度の合成速度  $U_{R0}$  を代表速度として、その速度で無次元化した  $u'$ ,  $w'$  は速度比によらずほぼ相似になるが  $v'$  は円筒回転時の方が静止時より大きくなること、レイノルズせん断応力成分  $-\overline{uw}/U_{R0}^2$  は速度比とともにやや減少し、 $-\overline{vw}/U_{R0}^2$  は円筒回転時に壁近傍で非常に大きな値を示すこと、等方的渦粘性の関係が成立しないこと、および円筒回転時には  $x$ ,  $y$  方向の混合距離がともに増大し、内層での壁からの距離に対するこう配が増加すること等を明らかにしている。

第III章では、第II章の基礎的検討をふまえ、この乱流境界層の乱流構造を明らかにするため、平均流エネルギーと、乱れエネルギーの収支、および  $u$ ,  $v$  変動速度の一次元パワースペクトル分布の特徴について実験的に検討した。その結果、平均流エネルギーの対流項と拡散項は、境界層の外層部でほぼ釣り合い、速度比の増加とともに絶対値が減少すること、乱れエネルギーの生成項と散逸項は、境界層全域にわたって支配的でほぼ釣り合っており、平衡境界層となっていること、乱れエネルギーの対流項と拡散項は、境界層の外層部でほぼ釣り合い、速度比にそれほど依存しないことなどを明らかにしている。さらに、 $u$ ,  $v$  変動速度のパワースペクトル分布から、円筒回転時において大規模渦構造の存在と、乱れの微細化を明らかにしている。

第IV章では、この乱流境界層の乱流構造をさらに明らかにするため、平均流エネルギーと乱れエネルギー方程式を各成分に分けた輸送方程式について調べ、さらに  $u$ ,  $v$  変動速度のクロススペクトルを検討した。

その結果、境界層の内層部において、平均流エネルギーの  $x$  成分は生成、粘性散逸、粘性輸送項が Loss で、拡散項が Gain であり、 $y$  成分は生成、粘性散逸、拡散項が Loss で、粘性輸送項が Gain となること、境界層の外層部において  $x$  成分は対流と拡散項が支配的でほぼバランスし、 $y$  成分は生成と拡散項がほぼバランスすること、円筒回転時の乱れエネルギー収支においては、エネルギー再配分項と交換項が存在し、それは無視できない寄与をしていること、円筒回転時に境界層内層部で  $u$ ,  $v$  変動のクロススペクトルの低波数域に相関があり、比較的規則性のある渦構造が存在すること等を明らかにしている。

以上、本論文は一様流中の回転体上の乱流境界層の平均・乱流構造に関する基礎的研究として、円筒回転時における三次元対数法則に対する検証、混合距離の増加、平均流エネルギー・乱れエネルギーの流れと収支、規則的な渦構造の存在などについて明らかにし、多くの知見を得ている。これは、学術的にも工業的にも貢献するもので、学位論文に値するものと判断される。