

氏 名	谷 口 英 夫		
授 与 学 位	博 士 (工学)		
学位授与年月日	平成9年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻		
学位論文題目	回転球における境界層の乱流遷移とはく離に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 太田 照和		
論文審査委員	東北大学教授 太田 照和	東北大学教授 中橋 和博	
	東北大学教授 小濱 泰昭	東北大学助教授 福西 祐	

論文内容要旨

第1章 緒 論

回転する軸対称物体における境界層の挙動を把握し、それを予知する方途を確立することは、回転系の境界層問題として基礎研究の面から強い関心が寄せられているばかりでなく、応用面からもターボ機械の内部流動や飛行体の制御などに関連しており重要である。また、回転軸対称物体における境界層は、速度ベクトルの方向が物体表面からの距離によって変化する典型的な3次元境界層を構成するため、3次元境界層の一般的な性質を調べる上でも重要な位置を占めている。

回転軸対称物体上の境界層の乱流遷移については、これまでに円板、円すい体、球などといった単純形状に対して系統的研究が行われてきている。特に静止流体中の回転円板上の流れについては、層流境界層において相似解が存在することや比較的簡単な実験装置で流れ場を実現できるということもあり、理論・実験の両面で数多く研究が行われてきている。これに対し、円すい体や球などの境界層は場所によって速度分布の形状が変わる非相似解となる。球は円板と比較して曲率というパラメータが増え、壁面があらゆる場所で湾曲している点で解析を困難にしている。静止流体中の回転球に沿う境界層の乱流遷移については、2, 3の実験的研究があるものの理論的研究はいまだ行われていない。さらに、実験で観測された臨界レイノルズ数は研究者間や実験に使用した球直径によって差が見られている。本論文の第2章および第3章では、静止流体中の回転球に沿う境界層の乱流遷移を理論的に解明することを目的とし、境界層の線形安定性解析を行っている。

第4章では、回転球における境界層のはく離に関する研究を風洞実験により行っている。流れの中に球のような鈍頭物体があるとき、その物体表面に形成される境界層ははく離し、物体後方に渦が放出される。この渦放出は非正常であり、物体の振動や騒音の原因となるため、その構造の解明や制御は重要な課題である。一様流中で回転しない球の場合については渦放出の研究が数多く行われているが、球が回転している場合についてはあまり行われていない。第4章では、球の回転軸が主流方向と一致している場合について、球からの渦放出に及ぼす球の回転の影響を実験的に調べている。さらに、球の回転周方向2箇所において速度変動の同時測定を行なうことによって渦放出の3次元的な構造を解明するこ

とも試みている。

第2章 静止流体中の回転球に沿う境界層の安定性解析 (Orr-Sommerfeld 方程式を用いた場合)

静止流体中の回転球に沿う境界層の遷移現象を理論的に解明することを目的として、境界層の線形安定性解析を行った。まず、擾乱として実験で観測されているらせん渦を想定し、その流れ場に対する擾乱方程式を新たに導出した。その擾乱方程式において他の項よりもオーダーの低い流線曲率に関する項を省略すると Orr-Sommerfeld 方程式が得られる。本章においてはこの流線曲率に関する項を省略して得られた Orr-Sommerfeld 方程式を用いて安定性解析を行い、臨界レイノルズ数およびらせん渦の特性を理論的に求めた。図1は本解析から得られた臨界レイノルズ数と過去の実験結果との比較を示している。計算から得られた臨界レイノルズ数は過去の実験結果と比較的近い値を示し、らせん渦の角度 ε が大きいほど実験結果に近くなることを明らかにした。

第3章 静止流体中の回転球に沿う境界層の安定性解析 (流線曲率項を含んだ擾乱方程式を用いた場合)

第3章では、第2章においては省略した流線曲率に関する項を含めた擾乱方程式を用いて静止流体中の回転球に沿う境界層の安定性解析を行った。回転円板境界層や Ekman 層に関しては、この流線曲率に関する項を含めて行った安定性解析において、臨界レイノルズ数が著しく低いもう1つの不安定が発見されており、また、実験においてもこの不安定が観測されている。この不安定は、研究者によって呼び名こそ変わるが (Parallel不安定:Lilly, Type II不安定:Fallerら, 流線曲率不安定:Itoh), 流線の湾曲に起因する遠心力型不安定であると言われている。本論文においてはこの不安定を Itohに倣い「流線曲率不安定」と呼んでいる。第3章においては、流線曲率項も含んだ擾乱方程式による安定性解析を行うことによって臨界レイノルズ数およびらせん渦の特性等に及ぼす流線曲率の影響を調べるとともに、回転円板境界層や Ekman 層で発見されているような流線曲率不安定が回転球境界層においても存在するか否かも調べた。

まず、過去の実験結果と比較するために、実験で観測されている臨界点におけるらせん渦の角度 14° に対して臨界レイノルズ数を求めた。その結果、流線曲率項を含んだ擾乱方程式から得られた臨界レイノルズ数は流線曲率項を省略した第2章の計算結果よりも大きな値になり、実験値に近づく傾向を示すことが分かった。

次に、らせん渦の角度を種々変化させ球面の各位置において安定性解析を行った結果、回転球においても流線曲率不安定が存在することが明らかになった。さらに、図2に示すように回転球においては、極付近において横流れ不安定が支配的であり、逆に赤道付近では流線曲率不安定が優位になることを明らかにした。

第4章 一様流中にある球からの渦放出に及ぼす球の回転の影響

3次元物体周りの流れの基礎研究として球に関する研究は古くから行われてきており、抵抗、はく離、渦放出など様々な研究がなされてきた。その中で渦放出に限定しても数多くの報告がある。例えば、一様流中にある球からの渦放出には、レイノルズ数 $Re_D (= U_\infty D / \nu)$ が約 $10^3 < Re_D < 10^4$ の領域において、ストローハル数 $St (= fD / U_\infty)$ に2つのモード (high mode および low mode) が存在することが明らかにされている。high mode は、はく離せん断層中の周期的な変動に起因し、low mode は球背面に蓄積される流体の塊が周期的に下流に放出 (大規模渦放出) されることによって現れるモードとされている。しかし、 Re_D が 10^4 を越えると、はく離せん断層が乱流化するため high mode に対応する St は観測されなくなり、low mode の St のみが現れる。さらに、 Re_D が約 3×10^5 以上になると大規模渦放出その

ものにも周期性がなくなり, low mode の St が観測されなくなるということが報告されている。一方, 一様流中の回転球については, 小林らがはく離に関する実験を行っており, 回転速度比 ($S = 2R\Omega/3U_\infty$) と層流はく離, 乱流はく離の関係を明らかにしている。これまで一様流中の回転球については理論および実験的研究が数多く行われてきているものの, ほとんどが境界層についての研究であり, はく離に伴った渦放出についての研究はなされていない。

第4章では, 一様流中にある球からの渦放出に及ぼす球の回転の影響および渦放出の3次元挙動を風洞実験により調べた。本実験においては, 渦放出に起因した速度変動を熱線流速計を用いて測定した。実験の結果, 回転球においても, 回転のない場合と同様に high mode と low mode の渦放出が存在し, high mode が回転のない場合に比べ, より高いレイノルズ数の領域で観察された。図3は, high mode および low mode に相当する速度変動波形の回転周方向の相互相関係数を示している。high mode に相当する速度変動は球の回転周方向に位相が揃っており, 一方 low mode に相当する速度変動は球の回転周方向に位相差が大きくなることが分かった。図4は, low mode が観測される位置において速度変動波形の回転周方向の相互相関係数を示している。 $\xi = 100^\circ$ の位置において, 回転のない場合には見られなかった新たな変動モードが発見された。そのモードの周波数は low mode の約2倍で, 球の回転方向とは逆方向への移動が見られた。

第5章 結 論

第2章から第4章までの研究の結果をまとめている。

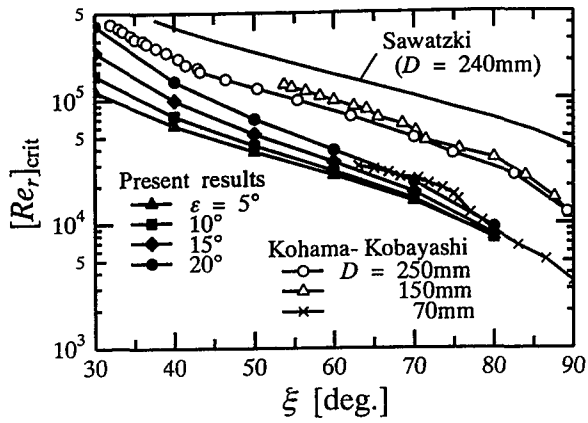
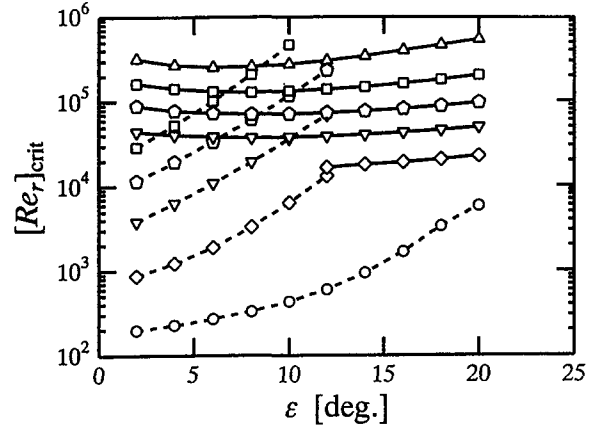
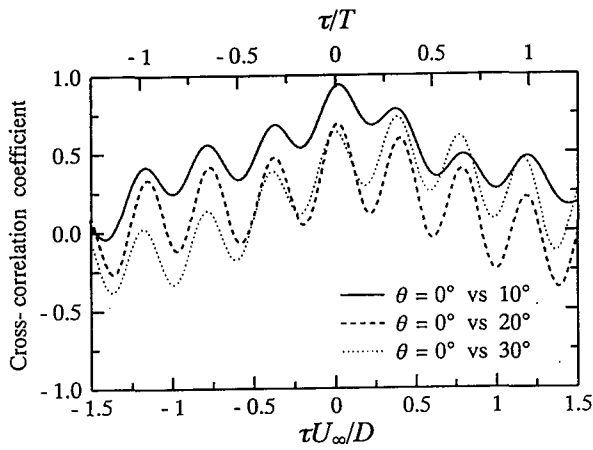


図1 本解析から得られた臨界レイノルズ数 $[Re_r]_{crit}$ と過去の実験結果との比較

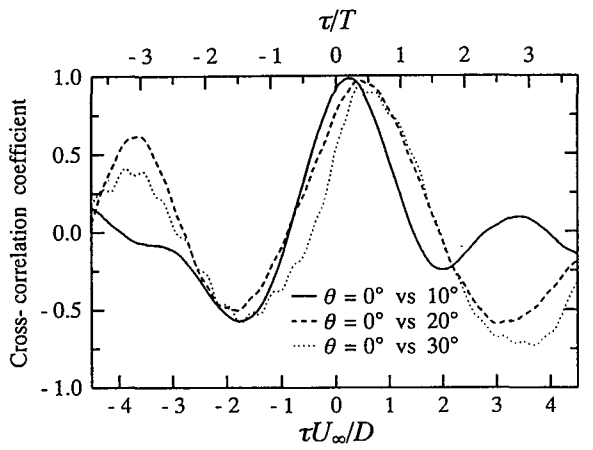


△: 30° □: 40° ○: 50° ▽: 60° ◇: 70° ○: 80°
 — cross-flow instability
 - - - streamline-curvature instability

図2 各 ξ 位置におけるらせん渦の角度 ε による臨界レイノルズ数の変化

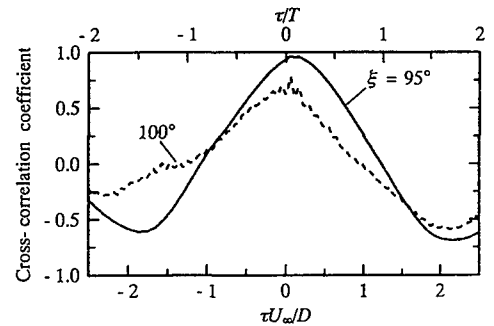


(a) $\xi = 80^\circ$

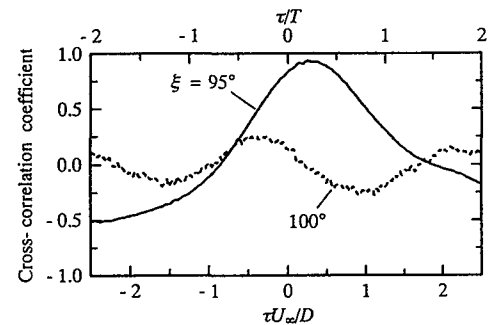


(b) $\xi = 90^\circ$

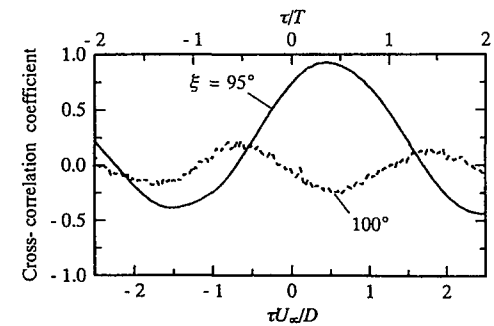
図3 相互相関係数 ($U_\infty = 6 \text{ m/s}$, $N = 1500 \text{ rpm}$, $Re_D = 0.79 \times 10^5$, $S = 1.75$)



(a) $\theta = 0^\circ$ vs $\theta = 10^\circ$



(b) $\theta = 0^\circ$ vs $\theta = 20^\circ$



(c) $\theta = 0^\circ$ vs $\theta = 30^\circ$

図4 相互相関係数 ($U_\infty = 10 \text{ m/s}$, $N = 2400 \text{ rpm}$, $Re_D = 1.31 \times 10^5$, $S = 1.68$)

審査結果の要旨

回転する軸対称物体における境界層の挙動を把握し、それを予知する方途を確立することは、回転系の境界層問題として基礎研究の面から強い関心が寄せられているばかりでなく、応用面からもターボ機械の内部流動や飛翔体の制御などに関連して重要である。

本論文は、回転球における境界層の乱流遷移とはく離に関する研究を理論解析および風洞実験により行った研究成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、静止流体中の回転球に沿う境界層の乱流遷移を理論的に解明することを目的として、境界層の線形安定性解析を行っている。まず擾乱としてらせん渦を想定し、その流れ場に対する擾乱方程式を新たに導出している。その擾乱方程式の流線曲率に関する項を省略して導出した Orr-Sommerfeld 方程式を用い、安定性解析を行っている。その結果得られた臨界レイノルズ数は過去の実験結果に比較的近い値を示し、解析の基礎とした考え方が正しいことが示されている。これは工学的に有用な知見である。

第3章では、静止流体中の回転球に沿う境界層に対し、第2章においては省略した流線曲率に関する項を含めた方程式を用いて安定性解析を行っている。その結果、回転球においても、回転円板で発見されているような流線曲率不安定が存在することを理論的に明らかにしている。さらに、回転球においては極付近において横流れ不安定が強く影響し、逆に赤道付近では流線曲率不安定が優位になることも明らかにしている。これは、工学的に有用な知見である。

第4章では、風洞実験により一様流中の回転球における境界層のはく離に伴う渦放出に関する研究成果を述べている。その結果、回転球においても、回転のない場合と同様に high mode と low mode の渦放出が存在し、high mode が回転のない場合に比べより高いレイノルズ数領域に現れることを見いだしている。さらに、球が回転している場合には、回転のない場合には見られなかった low mode の約2倍の周波数をもつ新たな変動モードが存在することを発見している。これは回転物体回りの流れの解明に貢献する貴重な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、回転球における境界層の乱流遷移およびそのはく離現象に伴った渦放出を理論解析および風洞実験により明らかにしたもので、機械工学の発展に寄与するところが少ない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。