

報告番号 ※ 第3035号

主論文の要旨

題名 二重管内および回転管内の旋回流れ

氏名 今尾 茂 樹

主論文の要旨

報告番号

※ 甲 第
乙

号 氏 名

今尾茂樹

クエット流れの実験的モデルとしてよく知られている同心回転二重管内流れは、軸受の流体摩擦などに関連して重要である。さらに流れの安定性、そして層流から乱流への遷移過程の詳細を究明する上でも、この二重管という系の持つ対称性、比較的小さな閉じた系であること、および管の回転数に比例したレイノルズ数を高い精度で制御できることなどの観点から、従来非常に数多くの研究が実験と理論の両面から行われてきた。中でも内管が回転する場合に生ずるテイラーうずは多くの研究者たちの注目を集め、現在でもなおその研究は続けられている。一方、外管が回転する場合はすきま内の流れは安定化の影響を受け、上述のテイラーうずの発生は見られず、別の形の遷移を生ずる。しかしながら、こうした両管のうち一方のみが回転する場合の流動はかなり明らかになっているのに対し、両管がともに回転する状況では、内管および外管の回転それぞれのもつ不安定化と安定化の作用が、角速度比、半径比、回転レイノルズ数などの諸因子によって複雑に影響するため、従来の研究により両管が回転する場合の流体摩擦抵抗そしてすきま内の流動まで十分解明されているとは言い難い。

他方、流体機械の流入部、タービンや発電機などの回転部を有する冷却系、回転式熱交換器、さらに最近のロケットエンジンにおいて見られる旋回流れは、上述の二重管の内管を有しない場合と見ることができ、こうした流れの解明は回転機器を設計する上で重要である。この問題は従来研究されてきた静止管内へ旋回成分をもった流れが流入する場合と異なり、常に管から旋回成分が与えられる遠心力場内での流動であり、管内の圧力分布や乱れの分布は静止管とは相当異なったものになることが考えられる。このように、直管がその中心軸まわりに回転する場合、その中の旋回流れは工業的にも重要な問題であるにもかかわらず、未だ十分な研究がなされていないのが現状である。

近年、回転機械の高速化、大形化に対応すべく実験条件となる各種レイノルズ数も広範囲について行う必要性を生じてきた。しかしながら、従来の二重管内お

主論文の要旨

報告番号	※ 甲 乙	第 号	氏 名	今 尾 茂 樹
------	----------	-----	-----	---------

よび回転管内の流れに関する研究はいずれも限られた条件のもとで行われている。そこで本研究では、内管および外管が共に回転する状況での同心二重管内の流れについて、摩擦モーメントの測定、可視化観察、速度分布・速度変動の測定を、広範囲の回転レイノルズ数および角速度比において詳細に行い、両管の種々の回転によってすきま内の流動がどのような影響を受けるかを実験的に明らかにした。さらに、十分長い円管を管軸まわりに回転させ、管入口から十分下流での圧力損失、速度分布などを広範囲のレイノルズ数について測定し、管の回転が及ぼす流れの安定化、不安定化について実験的に明らかにした。以下、本論文の内容を章をおって要約する。

第 I 章では、本研究の意義と目的を明らかにするとともに、本研究の背景となる過去の研究を概観した。

第 II 章では、二重管の両管いずれか一方のみが回転する場合も含めて、同心二重管の内管に作用する摩擦モーメントを正確に測定し、角速度比および半径比とトルクとの関係を明らかにした。その結果を要約すれば次のようである。

(1) 角速度比がいかなる場合も、層流における摩擦モーメント係数 C_M の値は理論値と一致する。

(2) 内管が外管より早く同方向に回転する場合の C_M 値は、すきまが小さいと角速度比によらず内管のみ回転する場合よりやや大きな値となるが、すきまが大きくなると角速度比が 1 に近いほど小さな値となる。

(3) 外管が内管より早く同方向に回転する場合には、外管のみ回転する場合よりさらに C_M 値は減少する。このとき、 C_M 値が層流の理論値からはずれる臨界回転レイノルズ数は角速度比が 1 に近いほど大きくなる。

(4) 両管が逆方向に回転する場合には、角速度比が負の大きな値になるにしたがい、 C_M 値が内管のみ回転時の値から外管のみ回転時の値へと減少してゆく。

主論文の要旨

報告番号

※甲第
乙

号

氏名

今尾茂樹

この変化はすきまが大きな場合ほどより顕著となる。

(5) C_H 値が層流の理論値からはずれる臨界回転レイノルズ数を、従来までの安定理論と比較した結果、逆方向に回転する場合は理論値とほぼ一致するが、同方向に回転する場合の実験から得た臨界値には遅れが存在する。

第Ⅲ章、第Ⅳ章では、二重管内の流れの詳細を、断面観察を含めた可視化観察と速度分布、変動速度の解析から明らかにした。まず、第Ⅲ章の両管が同方向に回転する場合について得た結果を要約すると次のようである。

(1) 外管が内管より早く回転するときの層流域はかなり広いが、層流であっても目視観察ではとらえることのできない程度の乱れが存在する。そして、層流と乱流とが二重ねじのように存在するスパイラルターブレンス状態に遷移した後でも、層流部分にこの乱れがある。

(2) スパイラルターブレンスが発生するレイノルズ数と消滅するレイノルズ数との間には顕著な差がある。しかも、この境界と全域が完全な乱流に遷移するレイノルズ数は使用流体によって変化する。

(3) 内管が外管より早く回転する時に発生するテイラーうずは、円周上でうずの本数が変化する転位現象を生じやすい。

(4) すきま内の速度分布は、テイラーうずが発生する不安定境界を境として全く異なり、相対速度が同じであっても内管が外管より早く回転する不安定側では、壁近くの速度こう配がかなり急となり、乱れ強さも大きくなる。

(5) テイラーうずの発生に伴うすきま内の流動変化は半径方向外側から始まる。

続いて、第Ⅳ章の両管が逆方向に回転する場合において得た結果を要約すると以下のようである。

(1) 外管回転数を低く一定に保ち、内管回転数を上昇させた場合には、内管のみ回転の場合と同様な遷移過程をたどるが、外管回転数がある程度大きなところ

主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	今尾茂樹
<p>では、テイラーうずに加えてスパイラルターブレンスも同時または相前後して発生し、両者が共存した流れとなる。</p> <p>(2) 外管回転数がかかなり大きな場合には、流れはスパイラルターブレンスが支配的となり、テイラーうずの発生は確認できないまま完全な乱流状態へと遷移するが、乱流域でも内管回転数が十分大きくなると、乱流テイラーうず流れとなる。</p> <p>(3) 臨界値において発生するテイラーうずとスパイラルターブレンスの順序が逆転するのは、角速度比が-2付近である。</p> <p>(4) 速度変動の記録からも、テイラーうずとスパイラルターブレンスの両者によるすきま内の二重構造が明かになった。</p> <p>(5) スパイラルターブレンスは、外管のみ回転時には外管速度の0.46倍、同方向回転時には両管の相対速度の0.48倍、そして逆方向回転時には相対速度の0.50 ± 0.02倍の速さで回転する。</p> <p>(6) 乱流域内でも、角速度比により速度分布形状はかなり異なっている。</p> <p>第V章では、回転管内の旋回流れについて、流れの発達過程と十分発達した流れにおける圧力損失および速度分布を測定し、回転管内に形成される流れを明らかにした。結果を要約すると以下のごとくである。</p> <p>(1) 層流域で管を回転すると、回転しない場合より流動損失が増大する。この増大した管摩擦係数に対する実験式を得た。</p> <p>(2) 層流域における回転管内の速度分布は、周速度はほぼ強制うず形分布であるが、軸速度は層流の放物分布より中央で小さく壁近くで大きな分布形状となる。</p> <p>(3) 乱流域で管を回転すると、層流域とは逆に流動損失が減少する。このときの周速度分布は、強制うず形より小さく凹形にわん曲している。特に旋回比が大きな場合には、軸速度分布が層流の分布とほぼ一致し、λも層流の理論値と一致する逆遷移（層流化）現象が起こる。ただし、この流れが発達するためには、回</p>				

主論文の要旨

報告番号

※ 第
乙

号

氏名

今尾茂樹

転しない場合に比べてかなり長い距離を必要となる。

(4) 乱流の場合、管内の旋回流に対して、時間平均速度に角運動量の法則を適用すると大きな誤差を生じる。

第VI章では、回転管内で十分発達した旋回流れについて、層流域、遷移域、乱流域の各領域で、可視化観察、速度変動、乱れ強さおよびそのスペクトルを求め、回転によって生ずる流れの微細構造を明らかにした。結果を要約すると次のようである。

(1) 層流域で回転を加えると、その回転数が低くても層流状態は崩れ、乱れが加わる。ただし、ここで発生する乱れは比較的低周波成分のものに限られる。

(2) 遷移域付近では、管の回転によって乱れ強さは増加するものの、その乱れ成分に大きな変化はなく流動損失にまでは影響しない。

(3) 乱流域では、管の回転により乱れが減衰する。その詳細は、管の回転数が低いところで高周波の乱れ成分から減衰し、高い回転数において低周波成分の乱れまで収まってゆく。この乱れの減衰は、軸レイノルズ数が大きいほどより顕著になる。