

報告番号

※
乙 第 3119 号

主論文の要旨

題名 管内旋回流における渦流崩壊現象の研究

氏名 早瀬敏幸

主論文の要旨

報告番号	※ 第 乙	号	氏名	早 瀬 敏 幸
<p>旋回流に関連する特異な流動現象の一つに渦流崩壊現象 (vortex breakdown phenomena) がある。これは軸速度を有する旋回流が、旋回軸に沿うある位置で流動の様相を急変する現象で、流体力学的に興味深く、また工業上も航空機の失速などと関連して重要な問題である。従来理論および実験の両面から多くの研究がなされて来たが、崩壊形態の多様性あるいは非定常、非軸対称な崩壊をも含む現象の複雑さなどのため、現象の統一的な説明までには至っていないのが現状である。本研究は、渦流崩壊現象と旋回流中の内部波（慣性波）との関連に着目し、現象生起の機構の解明、現象の詳細な把握などを目的として行った一連の研究をまとめたものである。なお本研究では渦流崩壊現象を線形近似の立場で議論することの妥当性と、その限界に関する知見を得るために、崩壊現象の検討に先立って、回転する円筒容器内の慣性振動を対象として予備的な検討を行った。次にその結果に立脚して、本研究の主題である渦流崩壊現象を対象に、多様な崩壊形態に対して統一的な説明を与え、軸対称形崩壊の機構、同崩壊における管路形状の効果などについて理論的、実験的に検討した。最後に、渦流崩壊現象とは外見上全く相異なるが、やはり慣性波と関連する現象と考えられるサイクロン状流路内の渦心の振れ回り現象を対象に、上記線形近似モデルと同様な立場に立つ理論モデルを構成し、実験との対比により線形近似モデルによる解析手法の有効性の確認を試みるとともに、振れ回り現象に関する知見を求めた。</p> <p>以下に各章の内容を要約する。</p> <p>第1章では、本研究の意義および渦流崩壊現象に関する過去の研究の概要について述べた。</p>				

主論文の要旨

報告番号

※第
2

号

氏名

早瀬敏幸

第2章では、円管内旋回流中に生起する微小攪乱の支配方程式を記し、さらに、非粘性、線形近似のもとで剛体回転、一様軸速度の基本的な主流場に生起する慣性波（波動形攪乱）の表式を導いて、後の議論の準備とした。すなわち、軸方向および周方向に伝播する旋回流中の2次元波動として渦流崩壊現象の理論モデルを構成し、さらにこれらの波動に基づく定在波として慣性振動の理論モデルが、また波動の軸方向波数を純虚数とおくことにより渦心の振れ回り現象の理論モデルが得られることを述べた。なおこれらのモデルの実験による検討は次章以下で行った。

第3章では、前章で導いた渦流崩壊現象の理論モデルの妥当性および実際現象に対するモデルの近似の程度を知るために、従来内部波との関連が指摘されている、回転する円筒容器内の流体の慣性振動を対象を選んで検討した。なお実験的側面からの慣性振動自体の検討も従来なお数少く、特に高次モードの振動に関しては、対応する流れ場の実態について詳しい検討はなされていないことを考慮し、本章では、上述した理論モデルの妥当性に対する知見を得ることに加えて、慣性振動自体の実験的検討も行った。その結果、周方向の高次モードまで含めて、慣性振動の特徴的な流動形態は非粘性、線形近似理論モデルにより定性的に良く説明できること、また慣性振動の固有振動数は上記理論モデルにより、良い精度で予測可能であることなどを明らかにした。

なお上記により、理論モデルの実際の流れ場への適用の妥当性を回転容器内の慣性振動について確認した上で、第4章から第6章において、本論文の主題である渦流崩壊現象に関する検討を行った。

主論文の要旨

報告番号	※ 第 2	号	氏名	早 瀬 敏 幸
------	----------	---	----	---------

第4章では、第2章で述べた慣性波の理論モデルを用いて、多様な崩壊形態に対して定性的説明を与えることを目的とした。モデルからの帰結ならびに従来の実験結果によれば、実際に観測される崩壊の形態は、基本的な3種すなわち、軸対称形 ($s = 0$ 形)、らせん形 ($s = 1$ 形)、および2重らせん形 ($s = 2$ 形) に分類される。この分類は、崩壊を旋回流中に生起する慣性波としてとらえるモデルの見地からすれば、その周方向モードの低次の値 ($s = 0, 1, 2$) に対応するものである。また定常、非定常の差異は、攪乱の位相速度の有無に対応する。さらに、実際に観測されるその他の多様な崩壊形態は、上記した基本的なモードの攪乱の複数が共存する状態として理解される。これらの論点を確認するため、円管内旋回流の染料による可視化実験を行った。観測された種々の崩壊形態を、理論モデルにより得られる流脈線の計算結果と比較した結果、従来報告例のない実験例をも含めて、全ての崩壊形態に対して統一的説明を与え得ることを示した。なお理論モデルは剛体回転、一様軸速度の主流を前提にしているが、実測された速度分布を用いた解析でも定性的に類似の流動パターンが得られることも明らかにした。

第5章では、多様な崩壊形態の中で、対象を基本的な軸対称形崩壊（定常な渦塊を伴う崩壊）に限り、崩壊の機構の実験的解明を目的とした。すなわち、第4章では渦流崩壊現象の特徴的な流動形態が、旋回流中に生起した慣性波に伴う流動として定性的に説明可能なことを指摘したが、実際に慣性波が生起することの実証は行っていない。そこで、本章ではレーザ流速計を用いて円管内旋回流の定量的測定を行った。従来の円管を用いた実験では、案内羽根などによって予め旋回を与えられた流体を円管内に導くものが殆どで

主論文の要旨

報告番号	※第 乙	号	氏名	早瀬敏幸
<p>あったが、本実験では、円管壁面摩擦による旋回強さの流れ方向変化を避けるため、回転円管を用いて実験を行った。その結果、軸速度に相対的な旋回の強さがある臨界値を超えると、軸対称かつ定常な波動（慣性波）が円管内旋回流中に生起することを実証するとともに、その性格についての知見を得た。観測された軸対称な慣性波は、全て上流端境界条件により誘起され、下流方向に減衰する定常な波動であり、本実験の範囲では旋回流の不安定性による波動の増幅、成長の現象は認められなかった。さらに、流体の粘性の効果を近似的に考慮した形に理論モデルを拡張し、測定結果との定量的な比較を行って、軸対称形渦流崩壊と軸対称のモードをもつ慣性波との関連を実験的に明らかにした。すなわち、円管内旋回流中に生起する軸対称形渦流崩壊は、定常な軸対称形攪乱の発生に伴い軸心部に逆流部を生じた流動状態に他ならないとの結論を得た。なお、静止円管を用いて行った同様な実験により、軸対称形崩壊の機構に関しては、管の回転、非回転によって本質的な差異は生じないことを確認した。</p> <p>第6章では、前章に引き続き軸対称形崩壊を対象として、管路断面積の軸方向変化が崩壊の発生に与える影響について検討した。回転する拡がり管、および狭まり管内の旋回流の詳細な測定を行って、管のテーパと生起する慣性波との関連について知見を求めた。すなわち、管路にわずかなテーパが存在することによって崩壊の発生は大きな影響を受けるが、その際、波動形攪乱自身の特性（波長、減衰率など）に目立った変化はなく、攪乱の振幅も崩壊の発生し易い拡がり管の場合に増加することはない。しかし、拡がり管の場合には攪乱成分を除いた平均的な軸速度成分が管軸近傍で減速するため、</p>				

主論文の要旨

報告番号	※ 第 2 号	氏名	早 瀬 敏 幸
------	---------	----	---------

攪乱の振幅自身の増加はないにもかかわらず、相対的に逆流部が生じやすくなるとの実験事実が得られた。すなわち従来指摘されているように、管路の拡がりによって波動形攪乱が安定性を失い、その結果崩壊が発生するという旋回流の不安定性に基づく崩壊の機構は、少なくとも軸対称形の慣性波についての本実験の範囲内では認められなかった。また、第5章で述べた粘性の効果を実験的に考慮した理論モデルにより、上記の実験事実に対して定性的説明を与えた。

以上、第4章から第6章において、円管内旋回流に生起する渦流崩壊現象の多様な崩壊形態が慣性波の理論モデルにより定性的に説明できることを示し、さらに基本的な軸対称形崩壊について、理論の妥当性を実験的に検証するとともに、管のテーパが崩壊の発生におよぼす影響についても検討を加え、慣性波に立脚する立場から崩壊現象に関する合理的な説明を試みた。

第7章では、第2章で述べた慣性波の生起を基本とする非粘性・線形近似理論モデルが、第3章で述べた慣性振動および本論文の主題である渦流崩壊現象のみならず、円管内旋回流に生起する他の振動現象の説明にも同様に妥当するか否かについて検討した。すなわち、サイクロン分離器の作動時にしばしば発生して作動の障害となるが、その機構については殆ど未知の状況にある渦心の振れ回り現象を対象を選び、第2章で述べたように慣性波の特殊な場合として現象の理論モデルを構成し、実験結果との対比によりその妥当性を検証するとともに、振れ回り現象に関する知見を得た。

第8章は、各章の結果を総括したものである。