

学位論文題名

乱流剥離流れの能動制御

学位論文内容の要旨

近年の流体力学の進歩により、より複雑な流れが研究されるようになってきた。本研究が対象としている乱流剥離流れも、そのような複雑流れの一種である。翼などのまわりの流れは本来物体に沿って流れることによりその性能を発揮する。しかし、ひとたび迎え角が臨界をこえると流れは翼から剥がれ、性能は大きく低下する。この現象が流れの剥離である。翼などに代表される流線形物体であっても、流れの方向が変化することによって剥離が起こるのであるから、流れの中に物体を置く以上剥離は避けられない問題である。このような剥離流れは流れ自体の複雑さに加え物体壁面の影響を受けるためさらに複雑なものとなる。そのひとつの現象として一度剥離した流れが再び壁面に沿って流れる剥離再付着流れがある。この流れの特徴として、剥離した流れが再付着するまでの間に剥離泡と呼ばれる循環領域を形成することがあげられる。ポンプの羽根車や管路内の曲がり部や拡大部においてこの剥離泡が形成されると、全圧損失、振動、騒音、流路抵抗の増大および圧力変動などを引き起こす。そのため剥離泡を制御し、消失することができればその工学的メリットは大きい。

流体を取り扱う機器・装置内の剥離泡は複雑であるため、簡単なモデルを使用して研究を行う方がよい。モデルとしては、後ろ向きステップ流れ、厚板平板、鈍頭円柱、尾板付き垂直平板などがある。厚板平板や鈍頭円柱は流れを支配するパラメータがレイノルズ数だけであることから最も基本的な剥離泡であるといえる。また、鈍頭円柱では風洞壁面の影響を受けないので、本研究では鈍頭円柱前縁に生じる剥離再付着流れを採用した。

剥離流れの制御方法としては、受動制御と能動制御がある。受動制御としては、翼におけるボルテックスジェネレータやフラップなどがある。これらの制御の特徴は流れ自体のエネルギーを利用するため外部からのエネルギーの導入がないことである。能動制御としては、音波や振動、吸い込み吹き出しなどを導入する方法がある。受動制御に比べ能動制御の方がより効果的である。

本研究は、剥離再付着流れの一つである鈍頭円柱前縁剥離泡に対し、周期的攪乱を与えることによって、能動制御を試みたものである。本論文は全6章で構成されている。以下にその概要を示す。

第1章では、乱流はく離流れに関する既往の研究を総括し、本研究の背景および目的に

について述べている。

第2章では、本研究に使用した実験装置および実験方法について示した。特に、本研究では剥離泡の制御方法として周期的攪乱を用いているので、攪乱の制御が重要である。そのため攪乱の制御システムおよび鈍頭円柱まわりの流れから決定した攪乱の規定方法（鈍頭円柱側壁に沿って円柱前方の流速分布を測定し、せん断層の外側で流速が最大値の90%になる位置で攪乱の規定を行った）について詳細に述べている。

第3章では、鈍頭円柱前縁剥離泡に対し周期的攪乱を与えた場合の制御の効果について示した。周期的攪乱の周波数および強さを変化させたときの制御の効果について再付着長さ（剥離泡の長さ）を比較することによって示した。その結果、攪乱周波数に対し再付着長さは、極小値および極大値をもつような変化を示すことを明らかにした。主流速度の20%の強さの攪乱を与えた場合、再付着長さがほぼ0になる攪乱が存在することを明らかにした。再付着長さが極大となるときの攪乱周波数は、剥離点直後のケルビンヘルムホルツの不安定周波数の約1/2であり、ケルビンヘルムホルツの不安定周波数の2倍以上の周波数の攪乱を与えても再付着長さに変化はなかった。本研究で使用したレイノルズ数の範囲（ $Re = 0.69 \sim 2.76 \times 10^5$ ）では、極小となる再付着長さはレイノルズ数が増加するにしたがい短くなった。また、再付着長さが極小となる攪乱周波数とそのときの再付着長さとの関係について示した。

第4章では、攪乱による剥離せん断層内の構造の変化について示した。流れの可視化によって、せん断層内の渦構造の変化を定性的にとらえた。流速および圧力分布の測定からせん断層の全体的な変化をとらえた。せん断層外縁の速度変動スペクトルおよびせん断層中心の変動圧力スペクトルからせん断層内の渦構造を定量的にとらえ、渦の合体過程を明らかにした。攪乱によって形成された渦は、二回ないし一回合体した後再付着する。再付着長さがほぼ0になる場合は合体が起こっていない。また、剥離泡からの大規模渦塊の放出にともなう圧力変動に起因する剥離泡内の自励発振のメカニズムにもとづいて、再付着長さを極小とする攪乱の周波数について説明した。

第5章では、より効果的な制御を試みるためにバイモーダル攪乱を行った結果について示した。バイモーダル攪乱とは、二つの周波数成分をもつ正弦波攪乱である。本研究では、二つの正弦波の強さは同一のものを採用した。周波数は第3章で述べた再付着長さを極小とする周波数を基本周波数とし、その倍調波および分数波を加えた。その結果、基本周波数とその2倍の周波数を加えた場合、再付着長さの変化に二つの周波数の間の位相差に対する依存性が存在することが明らかとなった。基本周波数と1/2または4倍以上の周波数を加えた場合ではこのような位相差に対する依存性は存在しなかった。また、ミスチューニングなどの効果についても示した。この場合は、ただ単に攪乱強さを増加させた効果しか現れなかった。

第6章では、本研究で得られた主の結果を要約してある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 木 谷 勝
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 飯 田 誠 一
副 査 教 授 井 上 良 紀

学 位 論 文 題 名

乱流剥離流れの能動制御

乱流剥離流れは、翼や翼列の失速、流体機械・装置の性能低下や振動、流体騒音などの原因になる。しかし、流体を取り扱う機器・装置においては、流れの剥離を完全には防止できないことが多い。したがって、いったん発生した剥離流れを適当な方法によって制御し、その内部の乱流渦構造を変化させて剥離流れの領域（剥離領域）を縮小することは重要な研究課題であり、国内外において活発な研究が進められている。剥離流れの制御には、静的な装置を用いる受動制御と動的な装置を用いる能動制御が用いられている。

本論文は、剥離流れの基本的なものの一つとして、鈍頭円柱の前縁剥離流れをとりあげ、これに正弦波攪乱を与えたときの応答を、攪乱の振幅および周波数の広い範囲について実験的に明らかにしたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、剥離流れの乱流構造と制御に関する既往の研究を概観し、本論文の意義と構成について述べている。

第2章では、実験装置および実験方法について述べている。攪乱は、前縁に沿って設けられた狭いスロットを通して、円柱内部に組み込んだスピーカによって与えている。この攪乱が前縁近傍の剥離せん断層に正弦波速度変動を導入することを確認し、攪乱の振幅および周波数をこれまで研究されていなかった広い範囲にわたって変化させ得ることを示している。従来の研究では攪乱を規定する位置が明確でないことが多いが、著者はこの位置を剥離点における境界層外縁と関連させて明確に定義している。

第3章では、単一周波数の正弦波攪乱に対する前縁剥離領域の応答に対する実験結果を提示している。攪乱の効果を剥離領域の長さ（再付着長さ）の変化によって代表させることを説明し、ついで再付着長さと攪乱振幅および攪乱周波数との関係を求め、(1)攪乱振幅が主流速度の10%以下のとき、再付着長さは特定の攪乱周波数（最適周波数）において極小値をとる；(2)この極小値は攪乱振幅の対数関数で表される；(3)攪乱振幅が主流速度の14-20%のとき、攪乱周波数のある範囲にわたって剥離領域は消滅する；(4)この攪乱周波数の範囲は攪乱振幅の増加とともに拡大する傾向がある、などの重要な新知見を示している。とくに、

最適周波数およびこれに対応する再付着長さの極小値を説明する理論モデルを提案したことは特筆すべき貢献である。

第4章では、単一周波数の正弦波攪乱による剥離領域内の乱流渦構造の変化を、流れの可視化および速度変動と圧力変動の測定によって明らかにしている。この結果にもとづいて、攪乱による渦の形成・合体過程および剥離領域からの渦放出周波数の変化を考察し、上述の理論モデルの前提となった仮定の妥当性を確認している。また、強い攪乱による剥離領域の消滅とこのときの渦構造を、流れの可視化によってはじめて明らかにしている。

第5章では、周波数の異なる二つの正弦波を重畳した攪乱に対する剥離領域の応答を明らかにしている。すなわち、基本的な二つの周波数の組み合わせについて各成分の振幅を同一とし、再付着長さ位相差の関係を提示している。この結果、一方の周波数を単一周波数攪乱における最適周波数に設定し、他方の周波数をその2倍にしたとき、再付着長さの位相差に対する依存性が最も大きく、(1)再付着長さは位相差0において極小値を、位相差 π において極大値をとること、(2)主流速度の10%程度以上の攪乱振幅では、再付着長さは位相差に依存しないこと、などの重要な新知見を得ている。また、その他の周波数の組合せについては、再付着長さに対する位相差の効果は無視しうる程度であることを示している。

第6章は結論であり、本論文で得られた結果を総括している。

これを要するに、本論文は、前縁剥離流れの正弦波攪乱に対する応答を、広範囲の攪乱振幅および攪乱周波数について明らかにし、もって乱流剥離流れの能動制御に関する重要な新知見を与えたものであり、流体力学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。