

渦輪の打ち込みによるはく離の遠隔制御

学位論文内容の要旨

本研究の目的ははく離の遠隔制御デバイスの開発である。流体機械を非設計点で運転しているときの振動、騒音の発生といった問題は、翼面上の流れのはく離が原因であることが多い。しかし実際の流体機械において、流れの制御装置を組み込むために十分なスペースがあることは希であり、換気扇に用いられているような薄く小さい翼では、そのような装置を翼の内部に組み込むことは困難である。そこで本研究では、はく離制御用攪乱発生装置は翼の外部に設置し、そこから発生する攪乱をはく離せん断層に打ち込むことにより、はく離を遠隔的に制御する方法を提案した。攪乱として周期的に発生させた渦輪を主流中に打ち込む。渦輪は流れ場の中に局所的な速度変動の塊として存在するため、はく離領域以外の流れ場に与える影響を押さえつつ、選択的に制御を行うことが可能となる。

本論文は、主流中の渦輪列の挙動を明らかにするとともに、実際にはく離させた平板翼のはく離せん断層に渦輪を打ち込み、はく離抑制の機構およびその効果の解明を試みたものである。渦輪の打ち込みによるはく離制御を成功させるために必要な知識として、攪乱としての渦輪の性質を明らかにした。すなわち渦輪が放出されてから目的の場所に達するまでの軌跡、渦輪が攪乱としてどのように流れの中に浸透していくかといった基礎的な知識および、渦輪をはく離させた翼に打ち込むことにより、はく離せん断層がどのような変化をするかといった制御の機構、効率的に制御を行うための攪乱周波数や渦輪の強さなどの制御則を把握することが重要である。これらを明らかにするために、流れの可視化実験、流速およびその乱れ強さの測定を行った。これらの実験を通して得られた結果を要約すると以下になる。

第1章では、はく離流れに対する既往の研究を総括し、本研究の背景および目的について述べた。既往の能動的なはく離制御の研究において、攪乱の発生装置のサイズによる設置場所の制限から、実際の流体機械に組み込むことが困難であることを述べ、本研究が提案する遠隔的なはく離制御の位置づけを明確にした。また、他の遠隔制御の方法の持つ問題点をあげ、本研究において渦輪を攪乱として用いる利点を述べた。

第2章では、本研究において使用した実験装置および実験方法について示した。本研究でははく離を制御するための周期的攪乱として渦輪を用いた。渦輪列の特性量が制御の効果に大きな影響を与えると考えられるため、特に渦輪の特性量の決定について述べた。

第3章では、遠隔点への攪乱の注入方法を確立するため、流れに攪乱を与える攪乱発生装置を、周期的に吸い込み吹き出しを繰り返す間欠噴流でモデル化し、それによって形成される渦輪列の特性を実験的に明らかにした。まず本実験装置における渦輪の基礎的な特性を把握するために、主流

を止めた状態において、間欠噴流によって形成される流れ場の速度測定を行った。その結果、吸い込みに伴う流れは、オリフィスからその直径程度の下流において完全に消去し、それより下流では吹き出しによって生ずる渦輪による流れが形成されること、出発渦の持つ循環が一定となる形成時間が存在することが明らかとなった。次に、翼のはく離せん断層へ渦輪列を正確に打ち込むために必要な知識として、様々なパラメータと渦輪列の挙動および軌跡との関係を求めた。その結果、渦輪列の挙動は渦輪を打ち出す周波数やスピーカ入力波形によって変化し、その違いは渦輪の乱流化によって引き起こされることがわかった。また、渦輪列の軌跡には相似則があること、相似則を支配するスケーリングパラメータが存在することが明らかとなった。

第4章では、はく離した翼に打ち込まれた渦輪が翼周りはく離流れにおよぼす影響とその範囲について検討するため、流れ場の速度分布の測定と可視化実験を行った。この結果、渦輪を翼の外部から導入することにより、はく離領域のみを選択的に制御することができること、打ち込まれた渦輪が主流に与える影響は小さいことが明らかとなった。また、スパン方向の翼後流の速度分布において、制御の効果を主流が20%加速されている領域として見ると、それは翼後縁付近においてスパン方向に渦輪の直径の約6倍と広い範囲に影響し、スパン方向に離散的に配置したオリフィスからの攪乱によっても、翼のはく離を二次元的に抑制することが可能であることが示された。また、渦輪によってはく離領域が縮小する機構を検討するため、渦輪列の打ち込みにおける各位相ごとの流れの可視化および流速分布を求めた。これにより、はく離領域が縮小する機構は、渦輪によりはく離せん断層が部分的に切断されてその両側に大きな渦が巻き上がり、この渦が主流の運動量をはく離せん断層中に引き込むためであることが確認された。

第5章では、渦輪列の打ち込みによるはく離の抑制効果に対する定量的検討を行った。オリフィスから渦輪を打ち込み、その時のスパン中央断面における速度分布から、翼の後流の運動量欠損を求めた。運動量欠損は近似的に翼の抗力としてみなすことができるので、これによって制御効果の定量的な評価が可能となる。単一のオリフィスから渦輪を打ち込んではく離制御を行った時には、渦輪を打ち込む周波数が増加するとそれに応じて運動量欠損の値は単調に減少し、特定の周波数で減少は鈍化することがわかった。これに対し、スパン方向に5個のオリフィスを配置してはく離制御を行った場合には、運動量欠損が極小値をとる打ち込み周波数が存在することが明らかとなった。この結果は、スパン方向に一樣でない攪乱を与える方法においても、流れに二次元的な影響を与え、はく離せん断層の不安定性を促進することが可能であることを示している。また研究においてエネルギー効率が最大となる打ち込み周波数が存在することが明らかになった。

第6章では、本論文の結論として、得られた結果を総括した。

以上、本論文では渦輪列の打ち込みによるはく離の遠隔制御という方法を提案し、その機構および効果について検討した。現在は経済不況であり、また環境問題が大きく取り上げられている。このため企業は、コストとCO₂を削減するために、現在稼働している様々な設備の効率改善が急務となっている。逆に言えばエネルギー効率の改善に対する投資は惜しまない状況となっている。本研究によって提案した渦輪による遠隔的なはく離制御は、既存の流体機械においてもケーシングを変更するのみで追加可能であるというメリットがある。すなわち大きな投資を行うことなく、現存設備の効率改善を行うことが可能となる技術であり、これからの時代の要求に適応し、今後発展してゆく技術といえる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	木谷	勝
副査	教授	井上	良紀
副査	教授	藤川	重雄
副査	教授	工藤	一彦
副査	助教授	望月	修

学位論文題名

渦輪の打ち込みによるはく離の遠隔制御

ターボ機械をはじめとする流体機器・装置が非設計点で運転される時の効率低下、振動や騒音の発生は翼からの流れのはく離に起因している。したがって、翼からのはく離の抑制あるいははく離領域の縮小は、流体関連機器・装置の一層の性能向上のためには必須のことであり、これまで多くの研究が蓄積されてきた。これまでのはく離制御の方法は、翼面からの吸込みや吹出し、ボルテックス・ジェネレータなど多くの方法によって行われてきたが、これらは流体機器内の流れが定常であることを前提としており、流れの状態が変化する時の非定常はく離の制御はまだ研究が開始されたばかりの段階である。

本論文は、このような観点から、はく離制御が必要とされる状況の下で作動してはく離領域を縮小する技術について基礎的研究を行っている。ターボ機械に組み込まれる翼の内部には制御のためのセンサーとアクチュエータを組み込む余地が少ないので、本論文では翼の外部からはく離せん断層に渦輪を次々に打ち込んではく離領域を縮小するという極めて独創的な試みを行っている。この方法は渦輪の打ち込みによって、せん断層の渦への巻上りを強化し、はく離領域を縮小するという機構に基づいている。

第1章では、はく離流れの制御とくに能動制御に関する既往の研究を総括し、本研究の背景、目的および構成について述べている。従来のはく離制御装置を実際のターボ機械に組み込むことが困難なことを述べ、渦輪列を使用する遠隔的はく離制御の位置付けを明確にしている。

第2章では、本研究で使用した実験装置、計測装置およびデータ処理方法について述べている。とくに、供試翼の形状、渦輪の発生装置、発生装置を駆動する電圧波形と渦輪の循環の決定方法について詳しく説明している。また、計測範囲が間欠的な逆流をともなう領域を含むために、熱線流速計およびレーザー・ドップラー流速計を併用して、信頼性の高い速度信号を得ることに努力している。

第3章では、はく離領域内の目標とする位置に、渦輪を一定の周期で間欠的に打ち込む方法を確立することを目的として、一様な流れの中における渦輪列の軌跡を明らかにしている。渦輪列の中の個々の渦輪の挙動や乱流化が、渦輪を打ち出す周波数およびスピーカへの入力波形によって変化するにもかかわらず、適当な打ち出し周波数および打ち出し速度の範囲内では、渦輪列の軌跡には

相似性があることを明らかにし、相似性を支配するパラメータを明確にしている。渦輪列の挙動および軌跡が可視化および時間平均速度・乱流強度の分布によって示されていることは、現象の理解およびはく離制御への応用に極めて有意義である。

第4章では、翼の負圧面に形成されるはく離領域に渦輪列を打ち込んだときにはく離領域の縮小について論じている。まず、一つのノズルから打ち込まれた単一の渦輪列が、翼のスパン方向に影響する範囲を明らかにし、スパン方向に渦輪発生のためのオリフィスをその直径の6倍程度の間隔で配置すれば、ほぼ2次元的なはく離制御が可能であることを示したことは実用上重要である。とくに位相平均された流れの可視化および速度場を求め、渦輪が翼の前縁近くに打ち込まれてから後縁から流れ去るまでの間におけるはく離せん断層の渦構造の変化を求めている。これによって、はく離せん断層が渦輪によって切断され、その両側に大きな渦が巻上がり主流の運動量の大きな流体をはく離領域に持ち込むことがはく離領域縮小の機構であることを明らかにしたことは重要な貢献である。

第5章では、渦輪の打ち込みによるはく離領域の縮小効果を定量的に評価している。翼の後縁近くにおける後流の速度分布から求められる運動量欠損が近似的に翼に作用する抗力に等しいことを用いて、渦輪列の打ち込みによる翼の抗力の減少を、打ち込み周波数および渦輪列中の個々の渦輪の循環の関数として明らかにしている。とくに、抗力が翼の弦長と主流速度で正規化した打ち込み周波数の特定の値において極小となることおよびこの周波数が他の周期的攪乱によって翼の揚力が極大（抗力が極小）となる周波数と一致することを明らかにし、その機構がはく離領域の流れの基本的な不安定性にあることを論じている。また、この制御方法のエネルギー効率が上述の周波数において極大値をとることを示し、定常な噴流をはく離領域に作用させることが必ずしも有利でないことを明確にしている。さらにエネルギー効率は渦輪の循環が特定の値をとる時に極大となることを示すとともに、その機構も明らかにしている。これらの成果は、渦輪打ち込みによるはく離制御の実用化に当たって極めて重要な知見である。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、乱流はく離流れの能動制御の研究をさらに発展させ、渦輪列を剥離せん断層に打ち込む遠隔はく離制御の新しい方法を提案して、基本的な実験結果を蓄積し、その有効性を示すとともに、多くの有益な新知見を示しており、流体工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

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。