

論文内容の要旨

論文題目

Jet Flow Control using Coanda Effect on a Circular Cylinder

氏名 張 強

# Contents

Abstract.....	2
List of Figures.....	5
Introduction .....	8
1.1 Background.....	9
1.1.1 Fluid Thrust Vector Method.....	9
1.1.2 Circular Control Wing .....	11
1.2 Research Objectives and Composition .....	12
Influence of Amplitude of Excited Secondary Flow on the Direction of Jets.....	16
2.1 Introduction .....	17
2.2 Nomenclature.....	18
2.3 Experimental setup and method .....	20
2.3.1 Experimental equipment.....	20
2.3.2 Velocity measurement method.....	23
2.3.3 Experimental evaluation .....	26
2.4 Results and Discussion .....	31
2.4.1 Influence of $\zeta$ , $\xi$ and $f^*$ on jet flow characteristics .....	33
2.4.2 Unsteady flow characteristics analysis .....	48
2.5 Summary.....	57
Jet Flow Characteristics for Various Slot Widths and Frequency using Coanda Secondary Flows .....	58
3.1 Introduction .....	59
3.2 Nomenclature.....	60
3.3 Experiment setup and method .....	62
3.4 Results and Discussion .....	66
3.4.1 Influence of various $R/h_1$ on jet flow characteristic.....	66
3.4.2 Effect of various $f$ on jet flow unsteady characteristic .....	80
3.5 Summary.....	91

Jet Direction Control Using Circular Cylinder with Tangential Blowing .....	92
4.1 Introduction .....	93
4.2 Nomenclature.....	94
4.3 Experimental setup and method .....	96
4.3.1 Experimental equipment.....	96
4.3.2 Velocity measurement method.....	100
4.3.3 Experimental evaluation .....	102
4.4 Results and Discussion .....	106
4.4.1 Influence of momentum coefficient .....	106
4.4.2 Influence of injection angle .....	115
4.4.3 Jet widths and eccentricity of cylinder .....	123
4.5 Summary.....	132
Comparison between two jet direction control methods .....	133
Conclusion.....	138
Acknowledgement.....	142
Reference .....	143

噴流とは速度を持った流体がスロットやノズルのような小孔から噴出される流れである。主な性質として、粘性により周囲の流体を巻き込むジェットエンタインメントや噴流が壁近傍に存在する場合に壁側に引き寄せられるコアンダ効果などが挙げられる。噴流研究の進展と流体機械の進歩とは密接に関わっており、空調、エアカーテン、フルートからクルマや鉄道車両、船舶、航空機の抵抗低減、流体機械内部の非定常流の抑制、ロケット推進まで、我々は日常生活の様々な場面で噴流研究の恩恵を受けている。さらに、連続噴流の代わりにシンセティックジェットを利用して失速や剥離流れを制御する研究も始まっている。

しかしながら、これまで、噴流の方向制御に関する知見は十分とは言い難い。現在、ほとんどの流体機械では、機械的方法により方向制御がなされており、例えば噴射ノズルを可変にして噴射角を調整する方法や吹出口にルーバーやフィンを付加してその角度により噴射角を調整する方法などが取られている。すなわち、可動部・可変部を設け角度を変化させることで噴流の進行方向を調整している。そのため、流れの偏向角度の調整範囲は限定的で、しかも可動部での不具合の発生確率も高くなっている。特に劣悪な環境で用いられるような大型流体機械では可動部の不具合は大事故につながることから、偏向角度調整のためだけに安易に可変部を動かすことを避けるケースが少なくない。

さて、本研究では噴流の方向制御に着目し、可動部すなわち幾何形状変化を用いない方法で、物理パラメーターと噴流偏向特性との関係について研究が展開される。ここでは、大きく分けて2つの噴流方向制御方法が検討されている。1つ目（後述の第2章、第3章）は、コアンダ曲面を伴う二次流れにより運動量が大きい一次連続噴流の方向制御を試みるものであり、噴流が生成される出口スロットでの進行方向決定に適している。これは航空機の流体力調整やエアコンの吹き出し角度調整などへの応用が期待できる。2つ目（後述の第4章）は、循環制御翼（Circulation Control Wing : CCW）の一種である接線方向吹き出し円柱による噴流の方向制御であり、既存の噴流の進行方向を円柱表面で生成されるジェットシートの運動量で調整を試みるものである。例えば閉鎖空間で発生したミストや煙の換気や工場などでのダクトレス換気や部分空調などへの応用が期待される。

本論文は、6つの章から構成されており、第1章には緒論が記された。噴流技術の向上には高度な噴流方向制御に対する知見が必要であること、特に幾何形状変化をさせることなく方向制御を試みることの意義を述べ、フルイディック・スラスト・ベクタリングや循環制御翼に関する最近の研究動向などを紹介した。さらに関連分野における未解明な問題と本研究の位置付けなどが記述された。

第2章、第3章では、一次連続噴流の進行方向をコアンダ曲面を伴う二次流れで調整する方法について議論された。この方法はフルイディック・スラスト・ベクタリングと呼ばれ、元々航空工学分野で航空機エンジンからの燃焼ガス噴射角を調整し、推力の方向を制御するために提案された。従来の機械的スラスト・ベクタリングに比べて、フルイディック・スラスト・ベクタリングでは偏向角度範囲の拡大、可動部を無くしたことによる信頼性の向上だけでなく、翼の小型化・軽量化とそれに伴う抗力低減が期待できる。すなわちこの技術の実用化により航空機の姿勢制御・運動性能と燃費の向上が見込まれている。現在までに、フルイディック・スラスト・ベクタリングに関する研究では注目すべき成果が得られているが、コアンダ曲面近傍の二次流れは定常噴出あるいは定常吸引がほとんどであった。可動部なしで噴流偏向角度を調整するためのパラメーターは一次噴流と二次流れとの運動量比のみであることが多く、その

ため、ヒステリシスが現れる噴流現象においては、滑らかに噴流偏向角度を変化させることが極めて難しいという問題があった。最近になり二次流れとしてシンセティックジェットを適用したジェットベクタリング方法が提案され、これにより噴流方向制御のための無次元パラメータは噴流の運動量比 $\zeta$ と無次元振動数 $f^*$ の2つになったため、運動量比 $\zeta$ と無次元振動数 $f^*$ を組み合わせることで、ある程度滑らかな噴流偏向角度調整に成功した。しかしながら、適用条件や詳細な発生メカニズム、さらに非定常特性を含む噴流の質については不明な点が多く残されている。

第2章では、一次連続噴流の方向制御を目的に二次流れとしてコアンダ曲面を伴う脈動流れを利用する新しい方法が提案された。シンセティックジェットは正味の流量がゼロなのに対して、励起流れでは正味の流量が発生し、二次流れ速度は定常成分と非定常成分に分解される。すなわち、運動量比 $\zeta$ と無次元振動数 $f^*$ の他に二次流れである脈動流れに定常速度成分と速度変動振幅との比 $\zeta$ という概念が生まれる。本章では主として噴流の偏向特性に及ぼす $\zeta$ と $f^*$ の影響について実験的に解明が試みられるとともに、非定常特性など噴流の質について検討された。さらに、生成された噴流の時間平均速度分布、非定常特性についても調べられた。第2章の主な結果として、噴流の偏向角は運動量比 $\zeta$ 、無次元周波数 $f^*$ だけでなく二次流れの速度定常成分と速度変動振幅との比 $\zeta$ にも依存すること、 $\zeta$ を導入することで $\zeta$ や $f^*$ の調整では得られなかった大きな偏向角を実現すること、 $\zeta$ 、 $f^*$ 、 $\zeta$ の3つのパラメータを組み合わせることで、噴流進行方向だけでなく噴流半値幅や非定常特性も制御できること、二次流れに振動流を用いることで、逆カルマン渦列状の大規模渦が周期的に放出される場合があること、二次流れが振動流の場合の速度変動乱れ強さは定常流の乱れ強さよりも大きく、無次元周波数が減少すると乱れ強さの値はわずかに増加することなどが明らかにされた。

第3章では、二次流れが定常流れとシンセティックジェットの場合に限定して、噴流の流動特性に及ぼす一次連続噴流のスロット幅およびシンセティックジェットの周波数の影響について議論した。コアンダ曲面の半径と一次噴流スロット幅との比 $R/h_1$ と無次元周波数 $f^*$ が本章でのメインパラメータである。本研究ではコアンダ曲面の半径 $R$ を一定とし、 $h_1$ を変化させた結果について示された。第3章の主な結果として、噴流の偏向特性は一次噴流とシンセティックジェットの運動量比 $\zeta$ 、シンセティックジェットの無次元周波数 $f^*$ だけでなく、コアンダ曲面の半径と一次噴流スロット幅との比 $R/h_1$ にも大きく依存すること、コアンダ曲面半径と一次噴流スロット幅との比 $R/h_1=0.75$ 、 $R/h_1=0.075$ の場合について、等しい無次元周波数 $f^*$ の条件下の流れ場を比較すると、噴流偏向角度は異なるものの、両者の噴流幅や非定常特性は概ね類似し、噴流半値幅や非定常特性は主に無次元周波数 $f^*$ で決定されること、二次流れがシンセティックジェットの噴流半値幅は定常流れ（連続噴出、連続吸引）の場合を上回り、さらにシンセティックジェットの半値幅は無次元周波数に依存すること、このとき半値幅は無次元周波数が減少するにしたがって増加する傾向にあり、これは逆カルマン渦列の渦間隔が大きくなることに起因すると考えられることなどが明らかになった。

第4章では循環制御翼（CCW）のひとつである接線方向吹き出し円柱による噴流方向制御方法が提案された。二次元噴流の方向を制御するため一次噴流の下流に接線方向吹き出し円柱を設置し、円柱周りの流動特性が実験的に評価された。流れの可視化が行われ、円柱表面の時間平均圧力分布計測、円柱周りの速度計測がなされた。第4章での主な結果として、一次噴流の流れ方向は運動量係数 $C_\mu$ に依存し、噴流偏向角度 $\Delta\theta_c$ は本研究で検討した条件範囲で0から

約  $90^\circ$  まで制御可能であること、スロット角度  $\theta_j=90^\circ$  では運動量係数に対する揚力係数、剥離点位置、噴流偏向角の曲線概形はほぼ一致しており、噴流偏向角度を滑らかに制御するためには剥離点位置を正確に制御する必要があること、噴流偏向特性は  $C_\mu$  だけでなくスロット角度  $\theta_j$  にも依存し、滑らかに角度制御するためには  $C_\mu=0$  での剥離点近傍、すなわち  $\theta=90^\circ$  付近に吹き出し口を設定するのが適切だと思われること、一次噴流の幅が異なる場合においても偏向特性は、 $C_\mu$  を一次噴流ノズル幅  $W$  の関数とすることで、統一的に取り扱うことができること、噴流偏向特性に及ぼす円柱設置偏心率  $\varepsilon$  の影響は大きいもの、 $\theta_j=90^\circ$ 、 $C_\mu=0.364$  で  $\varepsilon=-1.3$ ,  $0$ ,  $1.3$  を比較すると、反スロット側に円柱を偏心させた  $\varepsilon=-1.3$  の場合にわずかに大きなより大きな噴流偏向角度  $\Delta\theta_c$  が得られること、一次噴流の下流に置かれた接線方向吹き出し円柱では、ジェットシートの運動量を調整することで円柱後流に形成されるカルマン渦を抑制可能であることなどがわかった。

第 5 章で上記 2 つの方法の比較検討がなされ、コアンダ曲面を伴う二次流れにより一次連続噴流の方向制御方法では小さな運動量係数で大きな噴流偏向角が実現できるものの不連続的に角度変化が起こるなど運動量係数のみによる制御可能領域が小さいこと、接線方向吹き出し円柱による噴流方向制御方法では噴流偏向は運動量係数とともに滑らかに増加することから扱いやすいものの、噴流偏向角を大きくするためには大きな運動量係数が必要であることなどが示された。

第 6 章には結論であり、上記のまとめが記述された。