

論文題目 二次元シンセティックジェットの方法制御に関する研究

氏名 小林 亮太

目次

第 1 章 緒論	4
第 2 章 突起型非対称スロットにより形成されるシンセティックジェットの流れ特性	7
2.1 はじめに	8
2.2 主な記号	9
2.3 実験装置及び方法	10
2.4 数値解析方法	18
2.5 結果及び考察	20
2.6 まとめ	47
第 3 章 階段型非対称スロットにより形成されるシンセティックジェットの流れ特性	48
3.1 はじめに	49
3.2 主な記号	50
3.3 実験装置及び方法	51
3.4 数値解析方法	52
3.5 結果及び考察	54
3.6 まとめ	77
第 4 章 コア面を伴うシンセティックジェットによる噴流方向制御	78
4.1 はじめに	79
4.2 主な記号	80
4.3 実験装置及び方法	81
4.4 結果及び考察	86
4.5 まとめ	102
第 5 章 結論	103
参考文献	103
謝辞	108

噴流はスリットやノズルなどの小孔から空間に対して、流体が噴出する現象であり、産業界に留まらず、日常生活においても目にする機会が多い身近な現象でもある。噴流に関する研究は航空機における失速抑制やクルマの抵抗軽減、流体機械内部での不安定流れの抑制、空調・エアカーテンの高効率化などを目的として盛んに行われ、得られた知見は流体制御に積極的に応用されている。また加工分野においては研磨剤を含んだウォータージェットにより超硬質材のチタン合金やセラミック材を切断することが可能となり、さらに医学の分野では血管を残したまま臓器の切開・切離が期待されるウォータージェット手術法が提案されるなど、噴流技術は様々な場面で利用されつつある。最近ではウイルス飛沫感染防止を目的とする換気・空調の最適化に向けた流れ場制御に噴流を利用する研究が始まっており、噴流技術は益々注目を集めている。このような状況において、噴流の進行方向を簡単かつ自由に調整することができれば、より一層広い分野で噴流技術が役立つことは間違いない。

本論文では幾何形状の変化を伴わずに噴流の方向制御を目指し、その実現のためにシンセティックジェットを適用する。具体的にはシンセティックジェットの無次元周波数による流れ場の制御と噴流偏向メカニズムについて実験及び数値解析の両面から調査がなされた。

シンセティックジェットとは、スロットやノズルにて流れの吸引と噴出を交互に繰り返すことで、正味の流量がゼロであるにも拘わらず、スロットやノズルの下流に形成される連続噴流と類似の流れである。シンセティックジェットの形成は渦の挙動と密接に関わっており、噴出過程においてスロット角部付近に作られる渦対が互いに速度を誘起し合うことで、並進運動を始めることがこの現象の本質である。したがって発生条件は、吸引過程に渦対の互いの誘起速度が吸引速度を上回ることであり、渦対が下流に進行する過程でエントレインメントにより実質流量を伴う噴流構造は形成される。シンセティックジェットの駆動源はスピーカーやダイヤフラム、ピエゾ素子などの振動体であり、構造が単純であることから、小型・軽量化に適し、アクチュエータの種類が豊富であることも大きな特徴の一つである。シンセティックジェットの流動特性に関して、これまでに噴流の形成条件、連続噴流との同異、レイノルズ数と無次元ストロークの影響、入力波形の影響、スロット内部幾何形状の影響、スロット幅ないしオリフィス径の影響などが研究されてきた。シンセティックジェットの応用研究としては、失速・剥離制御や熱交換用アクチュエータ、攪拌・混合促進などの報告がある。しかしながら、シンセティックジェットの基本流動特性については未だに不明な点が多く、特に振動特性と噴流進行方向との関係に着目した研究例は極めて少ない。

広い意味での噴流方向制御について目を向けると、従来、推進体のスラスト・ベクタリングやターボ機械からの吐き出し方向制御には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きた。また現在、ほとんどの航空機のヨーイング制御には垂直尾翼のラダーが用いられ、流体力はラダー角度で調整される。すなわち、スラスト・ベクタリングやヨーイング制御など流れの方向を変化させるためには、幾何形状を変化させ調整するのが一般的である。ところが、推進体の噴射ノズルを可変にするには大掛かりな可動機構が必要となり、ラダー、ルーバーなどの可動部は不具合の大きな原因となる。ところで実用段階の研究例として、航空機の垂直尾翼は水平飛行時に大きな抗力を生み出すことから翼面積を小さくすることを目的とした **Sweeping Jet** による垂直尾翼のラダー効率改善方法が提案されている。しかしながら、可動部であるラダーを無くすには至っていない。一方近年、幾何形状変化を伴わないフルイディック・スラスト・

ベクタリングが提案され、そこでは複数噴流の干渉やコアンダ面を有する二次流れを利用して、噴流偏向を実現している。ただし、従来のフルイディック・スラスト・ベクタリングで任意の噴流偏向角を実現することは容易ではなく、さらに幾何形状変化を伴わない単独噴流の方向制御に関する報告はほとんど見当たらないというのが現状である。

第2章では、単独シンセティックジェットに対して、非対称形状スロットを利用した噴流の方向制御を試みた。Smithらは、一次連続噴流に対して二次噴流としてシンセティックジェットを干渉させた場合の流れ場について研究しており、シンセティックジェットを使用して一次連続噴流の方向を制御できることを明らかにしている。また、Luoらも、一次連続噴流の方向制御に二次流れとしてシンセティックジェットを適用しており、シンセティックジェット生成のための新型アクチュエータを開発している。加えてSmithらは、隣接する2つのスロットから様々な位相差を持たせたシンセティックジェットを生成することで、それらの干渉によって噴流方向の制御を試みており、振動条件を調整することで噴流方向制御が可能であることを明らかにした。このように、これまで研究されてきたシンセティックジェットによる噴流方向制御技術は、連続噴流と組み合わせて使用される場合が多く、連続噴流を用いない場合でも複数のシンセティックジェットの干渉を利用している。本章では、他の噴流と干渉させることなくかつ可動部を伴わずに噴流制御を行うため、突起形状非対称スロットが提案された。ここでは流れ場に局所的非対称性を与えることで、同一スロット形状下においても単独二次元シンセティックジェットの進行方向は無次元周波数 f^* に依存することが明らかとなった。この状況で流れ場は無次元突起長さ C と無次元周波数 f^* の両方の影響を受け、本論文の条件範囲内では一部条件を除き、噴流偏向度は C および f^* の増加とともに増加すること、偏向メカニズムとして非対称スロットにより渦の生成位置にずれが生じ、その相対的ずれの量に基づく誘起速度の対称性崩壊が偏向の原因として考えられることなどが示された。また、噴流が一定以上の曲率を持った場合、スロット近傍に再循環領域が形成され、壁面上にはよどみ点が形成され、その位置は無次元周波数 f^* に依存して移動することが明らかとなった。すなわち、無次元突起長さ C が一定の条件下においても噴流の進行方向は無次元周波数 f^* を調整することで、制御可能であることがわかった。ところで、ある条件下では、スロット下流で千鳥配置の渦列が形成され、この場合、噴流構造は維持するものの、上記とは異なる流動特性を有することが議論された。なお、比較のため連続噴流に及ぼす突起型非対称スロットの影響も確認され、連続噴流により形成される流れ場は無次元突起長さ C にほとんど依存しないことが示された。

第3章では階段形状の非対称スロットにより生成されたシンセティックジェットの流動特性について議論された。前章の突起形状非対称性スロットでは噴流方向制御が可能になるものの、制御可能な噴流方向はおよそ偏向角 $0^\circ\sim 90^\circ$ の範囲に限られる。また、機器表面への突起物の付加は、例えば一様中への噴射を試みる場合に場が複雑になることから応用面で制限を受ける可能性がある。本章では突起物に代わりスロットに凹部を設けた階段形状非対称スロットを提案し、調査を行った。なお、この形状は将来的にスロット両側を階段形状にすることによって、噴流方向の制御範囲を拡大できる可能性も有している。本論文では、シンセティックジェットの挙動と階段型非対称スロットのステップ高さおよび無次元周波数 f^* （無次元ストローク L_0 ）との関係が明らかにされた。突起型非対称スロットと同様、階段型非対称スロットにおいても、無次元周波数 f^* を調整することで、噴流の偏向角を制御できることが実証された。基本的な噴

流方向制御の原理は前章の突起型非対称スロットと類似であり、噴出過程における渦対の生成位置が非対称となることに起因する。ただし、階段型非対称スロットの場合には、噴流の曲率がステップ高さ H_2 にも依存することがわかり、これはステップ高さが突起型非対称スロットには無い新しいパラメータであることを意味している。さらに噴流の曲率はキャビティ近傍の再循環領域の大きさに影響されることが示され、このことから同一の無次元ストローク長さに対して噴流の偏向角が極大値を示す H_2 の存在が示唆される。

第4章では、一次連続噴流の方向制御のため、二次流れにコアンダ面を伴うシンセティックジェットを利用する方法が提案された。シンセティックジェットには高流量化、高運動量化が困難という課題がある。そこで本章では従来のフルイディック・スラスト・ベクタリングの二次流れとしてシンセティックジェットを適用し、これにより従来の幾何条件、運動量比の他に無次元振動数 f^* という新しい制御パラメータを付加することに成功した。主な結果として、一般的なコアンダジェットにおいては、噴流方向は運動量比 ξ に依存することが知られているが、二次流れとしてシンセティックジェットを用いた場合、運動量比 ξ だけでなく、無次元周波数 f^* にも依存すること、今回の運動量比に関する条件範囲においては、運動量比と無次元周波数の組み合わせることで、従来の方法と比較して制御可能領域を拡大できることなどが明らかとなった。

突起形状非対称スロット、階段形状非対称スロット、コアンダジェットの3つの状況において噴流進行方向はシンセティックジェットの無次元周波数 f^* により制御可能であることが明らかとなった。