

主 論 文 の 要 旨

論文題目 大気圏突入機体の空力減速装置に生じる
空力干渉に関する研究
(Experimental Study on Aerodynamic
Interaction around High-Speed
Aerodynamic Decelerator)

氏 名 田口 正人

論 文 内 容 の 要 旨

宇宙往還機が宇宙空間から惑星大気圏に突入する際、機体は極超音速飛行を経験する。このとき機体壁面に生じる空力加熱の問題は、高速空気学分野において依然として最重要課題の一つである。壁面空力加熱率は壁面近傍の流れ場に依りて局所的に変化し、壁面表面に分布する。従来的には、発生する空力加熱率を予測し適切な熱防御を施すことで、空力加熱から機体を保護する対策がとられてきた。一方で、将来的な大気圏突入システムを想定して、発生する空力加熱自体を低減させて過酷な加熱環境を回避するという方策が検討されている。これにより、システム全体として空力加熱による負荷が軽減されるため、より低コストで安全な宇宙空間からの輸送手段の実現が期待される。

空力加熱の低減技術には、主に『流体制御』による方法と『飛行経路の選択』による方法がある。前者は、壁面近傍の流体现象を制御し、空力加熱の発生を抑えるものである。一方で後者は、機体の弾道係数を低減し、発生する空力加熱の低い経路を選択して飛行する方法である。この方法では、気流条件自体を制御できるため『流体制御』による方法と比べて大幅な空力加熱低減効果が期待できる。低弾道係数を達成するためには空気圧等で柔軟構造体を機体から展開する空力減速装置 (Inflatable Aerodynamic Decelerator, IAD) の使用が提案されているが、空気力学の観点からこれには技術的な課題が残されている。特に問題となっている現象として、流体構造連成現象 (Fluid-Structure Interaction, FSI) と呼ばれる非定常流体现象がある。この現象は IAD の構造の柔軟性に起因しており、IAD の柔軟構造がその周囲の気流と相互に干渉することで非定常かつ複雑な流れ場が誘起され

る。FSI を伴う流体现象では、流体と構造の双方の変化を同時に考慮する必要があるため、特に風洞実験における流体計測手法に制約がある。これが流れ場の予測を難しくしており、IAD における技術的課題の一つとなっている。

これに加えて、機体が設計された飛行経路を飛行するには姿勢制御装置による経路の微調整が必要である。大気圏突入機体の姿勢制御装置としては従来からサイドジェットが用いられる。サイドジェットとは、壁面から噴射されたジェットによる推力によって機体姿勢を制御する方法であるが、高速気流中にジェットが噴射されるため空力干渉が発生し、これによってジェット近傍の壁面空力加熱が増大することが報告されている。将来的に大気圏突入システムがより低空力加熱化されたとき、サイドジェットによる空力加熱が相対的に大きくなり問題となる可能性がある。したがって、システム全体の低空力加熱化に合わせて、サイドジェットによる空力加熱の低減も考慮されるべきである。

本研究の目的は、将来の大気圏突入システムに対して空力加熱低減を実現するための手法を提案することである。主たる空力加熱低減技術として IAD を想定し、柔軟構造と（極）超音速気流の非定常な空力干渉（FSI）の予測に対して、実験手法の提案という切り口から貢献する。具体的には、1）衝撃波（流体）と柔軟構造体の運動（構造）が連成した振動現象の評価手法、2）変形する柔軟構造体表面の空力加熱の可視化手法、の提案と風洞実験による実証を行う。さらに、姿勢制御用のサイドジェットの低空力加熱化を目標に、2つのサイドジェット同士の干渉を利用した空力加熱率の低減手法を提案し、同様に風洞実験による検証を行う。

まず、流体構造連成現象（FSI）による振動現象を評価するための手法の提案と風洞実験による実証を行った。ここで提案するものは、同期計測されたデータの周波数解析により流体振動と構造の振動を関連付けるという手法である。これにより流体側の情報と構造側の情報がリンクした実験データを取得することが可能となり、FSI を特徴づける振動現象を周波数の観点から分離し、相互相関を明らかにすることができる。本手法を適用する系として、超音速パラシュート周りの FSI を取り上げた。超音速パラシュートは火星大気圏突入時の空力減速装置として使用されるが、マッハ数 $M = 1.5$ 以上において衝撃波の大変形と柔軟なパラシュート傘の相互作用に起因する抗力（空気力）振動の発生が問題となっている。本研究では、『衝撃波振動』と『傘部の運動』及び『抗力（空気力）振動』に着目して周波数解析を行い、抗力振動に対して支配的な影響を与える流体・構造の振動現象を実験データから特定することを試みた。結果として、傘部の運動および衝撃波振動と抗力の振動の周波数が一致し、これらの振動現象に相互相関があることが実験により確認された。また、抗力振動は低周波数モードと高周波数モードに分離でき、周波数モードごとに抗力振動に影響を与えている FSI の性質が異なっていることを明らかにした。すなわち、低周波数モードは主にピッチ方向及びヨー方向の傘部運動の作用が支配的であり、衝撃波の振動はあまり見られないが、高周波数モードでは、傘部前方の衝撃波が振動することでより高周波の傘部運動成分を誘起し、これが抗力振動の主たる要因になっていると考えられる。

以上の結果から、周波数解析に基づく評価手法が柔軟構造模型の風洞試験に対して有効であることが示された。本手法により、超音速パラシュートの抗力振動が衝撃波振動と傘部の運動によって直接誘起されていることが実験によって確認され、周波数帯によって抗力振動の原因となるFSIが異なるということが新たに判明した。これらの知見は、従来の計測手法では得られないものであり、本研究で提案した周波数解析に基づいた手法が風洞試験におけるFSIを評価するために有効であることが確認された。

次に、変形する柔軟構造体表面に適用可能な空力加熱の可視化手法の開発と風洞試験での検証を行った。風洞実験では、模型表面の状態量（圧力及び温度）は、機体にかかる空気力や空力加熱など機体の空力性能を評価する上で重要な情報であるが、柔軟構造へのセンサ（圧力変換器や熱電対）の設置はFSIの現象自体を阻害する要因となる可能性がある。よって、柔軟表面の状態量を計測するには非接触な手法が求められている。そこで、本研究では、空力加熱を非接触に評価するため、2色法の感温塗料（Temperature Sensitive Paint, TSP）法による柔軟表面の空力加熱計測を試みた。TSP法は分子イメージング技術の一種であり、局所的な流れ場を反映した壁面加熱パターンが取得可能である。本研究では、壁面空力加熱分布と柔軟模型の変形を同時に取得することを目的とした。まず、2つの色素（Ruphen と Fluorescein）を用いた感温塗料を作製し、2色の光を分離して同時に計測する2光路型光学系を製作した。次に、柔軟エアロシェル模型を用いた風洞試験に適用し、計測可能性を検証した。その結果、2色TSP法によって空力加熱パターンを可視化しつつ、空気力による柔軟模型の変形を捉えることに成功した。また、その模型形状はシュリーレン可視化法により観測された模型形状と一致した。これにより、柔軟構造の変形と流体による表面状態量を関連付けて考察するために分子イメージング手法が有効であることを示した。

最後に、サイドジェット空力干渉により誘起される空力加熱の抑制を目的として、2つのサイドジェットの干渉を利用した空力加熱の抑制手法を実験的に検証した。先行研究により、複数のサイドジェットが干渉すると空力加熱が低減されるという可能性が示唆されていたが、具体的にどのような条件で空力加熱の低減が達成できるのか明らかになっていなかった。そこで本研究では、サイドジェットの数を2つに限定してサイドジェットの噴射孔（インジェクタ）の配置と設置間隔が空力加熱率分布に及ぼす影響を衝撃風洞実験により調査した。その結果、Tandem configuration（主流方向に2つの並んだ配置）では、1つのサイドジェットによる空力加熱と比較してほとんど変化はなかった。一方でParallel configuration（主流方向に対して垂直方向に2つ並んだ配置）では、設置間隔によって加熱を受ける範囲は大きく変化し広がったが、最大空力加熱率が最高で60%程度抑制された。姿勢制御用サイドジェットとしての応用という観点からは、上述の結果は空力加熱率の増加なくしてサイドジェットによる推力を増加させることができる可能性を示している。すなわち、Tandem configurationを用いれば1つのサイドジェットによる空力加熱率分布を維持したまま推力を増やすことができる。一方で、Parallel configurationを用いれば、空

力加熱を受ける範囲は広がるが、最大空力加熱率を低減させることができる。最大空力加熱率の抑制と加熱範囲の抑制のどちらを優先するかは、インジェクタ配置によって任意に制御可能であることを示すことができた。これは、低空力加熱を念頭に置いたサイドジェット的设计に有用な結果であるといえる。

以上より、本論文では高速気流中の柔軟構造体に生じる流体構造連成現象（FSI）に対して、流体现象（衝撃波や表面状態量の変化）と構造の現象（運動と変形）を一体的に評価する手法を提案し、風洞試験でその有効性を確認した。また、空力加熱の増大が課題のサイドジェット空力干渉について、ジェット配置の制御によりこれを抑制できることがわかった。これらの知見は今後、空力加熱低減のための装置を開発する際に有用であると考えられる。