

論文の内容の要旨

論文題目 キャビティ流特性を応用した可変形状軸対称インテークに関する研究

氏名 丸 祐介

将来型宇宙輸送システムのひとつであるスペースプレーンに搭載される空気吸込式エンジンのエアインテークは、従来の航空機用のインテークよりも広い範囲を、常に加速状態で作動することが求められるため、混合圧縮型軸対称形状のインテークが採用される。広い作動範囲のために、流路を可変とすることが必要であるが、軸対称形状の場合の可変機構はスパイクと呼ばれる中心体を前後移動させる方式が一般的である。しかしながら、この種のインテークは、全圧回復率と流量捕獲率という二変数のインテーク性能指標に対し、スパイクの前後移動という一変数の可変機構しか持たないために、航空機用途ではそれほど重要視されなかった、(1)非設計点飛行速度における性能低下が顕著となること、(2)コアエンジン/インテークの空気流量の不一致に起因する余剰流により効率が低下すること、の2点の問題が生じる。このふたつの問題はともに、従来の軸対称インテークが一変数の制御機能しか持たないことに起因する。

本研究では、第2章において、この問題点の解決を図る新規形状のインテークを考案し、その空力特性を評価した。第3章では、エンジンシステム全体における、スケルトンインテークの有効性を評価した。第4章では、得られた研究成果をまとめ、結論を述べた。

第2章ではまず、考案した新規インテーク形状を提案し、その概念を述べた。考案したインテーク形状を「スケルトンインテーク」と呼ぶ。スケルトンインテークの概念図を図1に示す。スパイク全体を移動させてスロート面積を調節して全圧回復率を制御する機能とは独立してスパイク長さを変化させ、溢流の量を調節して流量捕獲率を制御することを考え、スパイクを幾つかのブロックに分割し、それらの相対位置を変えてスパイク長さを変化させる機能を付加した。そのスパイクは、先端の円錐とその後流に軸方向に並べられた複数の円板から構成され、壁面に複数の軸対称キャビティが形成される。従来はスパイク固体壁面によっていた圧縮面を、キャビティ上に形成される安定な剪断層で代替する。空隙の軸方向長さを変化させることで、スパイク全長を変化させることができ、先端衝撃波による溢流の流量を制御できる。これにより、従来の全体が固体壁面で構成されるスパイクでは不可能であった全圧回復率と流量捕獲率の独立制御の達成を図ることがスケルトンインテークの特徴である。

次に、スケルトンインテークの特性を空気力学の観点から評価した。空力特性の評価は大きくふたつの内容に分けられる；ひとつは、スケルトンインテークのスパイクを、複数のキャビティを有する円錐に単純化し、その空力特性をインテークへの応用の観点から評価した部分であり、もうひとつは、スケルトンインテークの性能を評価した部分である。

円錐キャビティ流れの特性の評価では、具体的には、キャビティの後流境界層への影響、キャビティに起因する圧力振動の基礎特性、キャビティによる空気力特性への影響を評価した。以下に各項目における評価の目的と内容、結果を簡潔に述べる。

インテークに流れにおいて、発達した境界層は、流れの有効流路断面積を低下させ、また衝撃波と干渉して剥離し流路の閉塞を招くために問題となる。そこで、円錐面上のキャビティの後流境界層に与える影響を実験的および解析的に調査した。その結果、円錐面上のキャビティは、その後流の境界層をキャビティのない場合に比して肥厚化させ、その程度は、キャビティ

長さの総和に依存することを示した。また、キャビティ長さの総和を同一とした場合、キャビティの個数を増やすことで肥厚化を抑制できることを示した。これは、キャビティ上の剪断層の発達にキャビティ長さに対し、非線形的に増大するためである。

キャビティはその周りの流れに圧力振動を誘起することがよく知られている。そこで、円錐キャビティ流れにおける圧力振動を計測し、その基本特性を調査するとともに、キャビティを隔てる円板の構造振動計測を併せて行い、キャビティに起因する圧力振動の円板構造振動への影響を調べた。その結果、圧力振動は、キャビティが長い場合で、かつ主流が遷音速域のとき顕著となること、キャビティ長さの総和を同一とした場合、キャビティの個数を多くすることで、振動レベルを抑制できること、円錐面上のキャビティ流れにおいても、矩形キャビティ流れにおける圧力振動周波数の予測式である Rossiter の式でもってその圧力振動の周波数を予測できることを示した。構造振動計測結果から、円板の固有振動数とキャビティによる圧力振動の周波数が一致した場合、構造振動のレベルが極端に大きくなる現象が見られ、構造設計の観点から、圧力振動の周波数を予測しておくことの重要性を指摘した。

スケルトンインテークは推進機関の要素であるため、スパイク面上のキャビティによる抗力増分の評価は不可欠である。そこで、円錐面上のキャビティがその空気力特性に及ぼす影響を実験的に調査した。その結果、キャビティにより抗力は増大し、その程度はキャビティ長さの総和に依存していることが示された。半頂角 8° の円錐面の約 55% を 13 個のキャビティに置き換えた形態のゼロ揚力抵抗係数は、半頂角が $10^\circ \sim 12^\circ$ の円錐のそれと同等であった。また、キャビティ長さを同一とした場合、キャビティの個数を増やすことで抗力増分を抑制できることが示された。

以上の円錐面上のキャビティ流れの基礎特性の調査から、スケルトンインテークのスパイク面の配置するキャビティに関して、以下の指針を得た。スケルトンインテークでは、スパイク全長変化のためにキャビティを用いる。その必要変化距離が決まれば、配置すべきキャビティの長さの総和も決まることになる。そのとき、その長さを構成するキャビティの個数は多い方がよい。このことは、後流の境界層の肥厚化、圧力振動レベル、抗力増分を抑制する。

スケルトンインテークの性能特性の評価では、まず、もとの基準とする従来型軸対称インテークのスパイク壁面に複数のキャビティを配置し、スパイク全長は変化させないスケルトンインテークの形態を設計点と定義し、その性能特性を評価した。その結果、キャビティを上流側に配置した場合、基準インテークの性能と同等であった。キャビティを適切に配置すれば、スケルトンインテークはインテークとして成立し、基準インテークと同等の設計点性能を達成できることが実証された。

次に、設計点のスケルトンインテークのスパイク全長を変化させた状態を非設計点と定義し、その性能特性を評価した。スパイク全長を短縮した形態(短縮型スケルトンインテーク)では、スピレージ流を削減して、全圧回復率を維持しつつ、流量捕獲率を向上させることを期待したが、風洞実験の結果、全圧回復率、流量捕獲率ともに悪化した。これは、流れが閉塞しない最大の流量捕獲率は、流路収縮比によって決定されるため、幾何的に収縮比を変化させない限り、全圧回復率を維持しつつ流量捕獲率を改善することはできないためである。

スパイク全長を伸長した形態(伸長型スケルトンインテーク)の性能を取得した結果、従来型軸対称インテークよりも全圧回復率を高く維持しつつ、流量捕獲率を制御できることが示された。これは、インテークとコアエンジンの空気流量のマッチングが重要な課題である超音速空気吸込式エンジンでは、捕獲流量制御性の観点から、非常に有効な特徴である。

第 3 章では、従来型軸対称インテークに対する優位性が期待できる形態として、伸長型のスケルトンインテークを提案し、その空気吸込式エンジンシステムにおける有効性を評価した。スケルトンインテークを搭載した場合および従来型軸対称インテークを搭載した場合のエンジン性能を推算し、それらを比較した。具体的には、圧縮機を通過する空気流量が制限された場

合を想定し、それぞれのインテークを搭載したエンジンの推力スロットル制御性を比較した。解析の結果、スケルトンインテークでは、全圧回復率とは独立して流量捕獲率を制御できるため、余剰流をバイパスさせることなく、従来型インテークの場合より効率的にエンジン推力を制御できることが示された。

また、実用上の諸問題について検討を行った。具体的には、迎角特性およびレイノルズ数特性の調査、構造面からの検討を行った。軸対称型インテークが迎角性能の低下が、矩形型と比較して顕著であることが短所のひとつであるが、スケルトンインテークでも迎角性能の低下は顕著であり、従来型のものと比較してもさらに悪化する傾向にあった。また、インテークでは、レイノルズ数の上昇に伴い、境界層が薄くなることに起因して一般に性能は向上する。CFD 解析の結果、この傾向はスケルトンインテークでも同様であることが示された。

第4章では結論を述べた。従来型インテークに対する、スケルトンインテークの優位性を示したことを本研究の最大の成果とした。また、スケルトンインテークがその基をおく、「キャビティ上に形成される剪断層で固体壁面を代替し、その剪断層を任意に変化させて、空力的な形状を制御する」という基本概念は、インテークだけでなく高速飛翔体全般に有効なものであり、本研究で得られたキャビティ付き円錐周り流れに関する基礎的な知見は、この観点からも有用なものであると結論した。

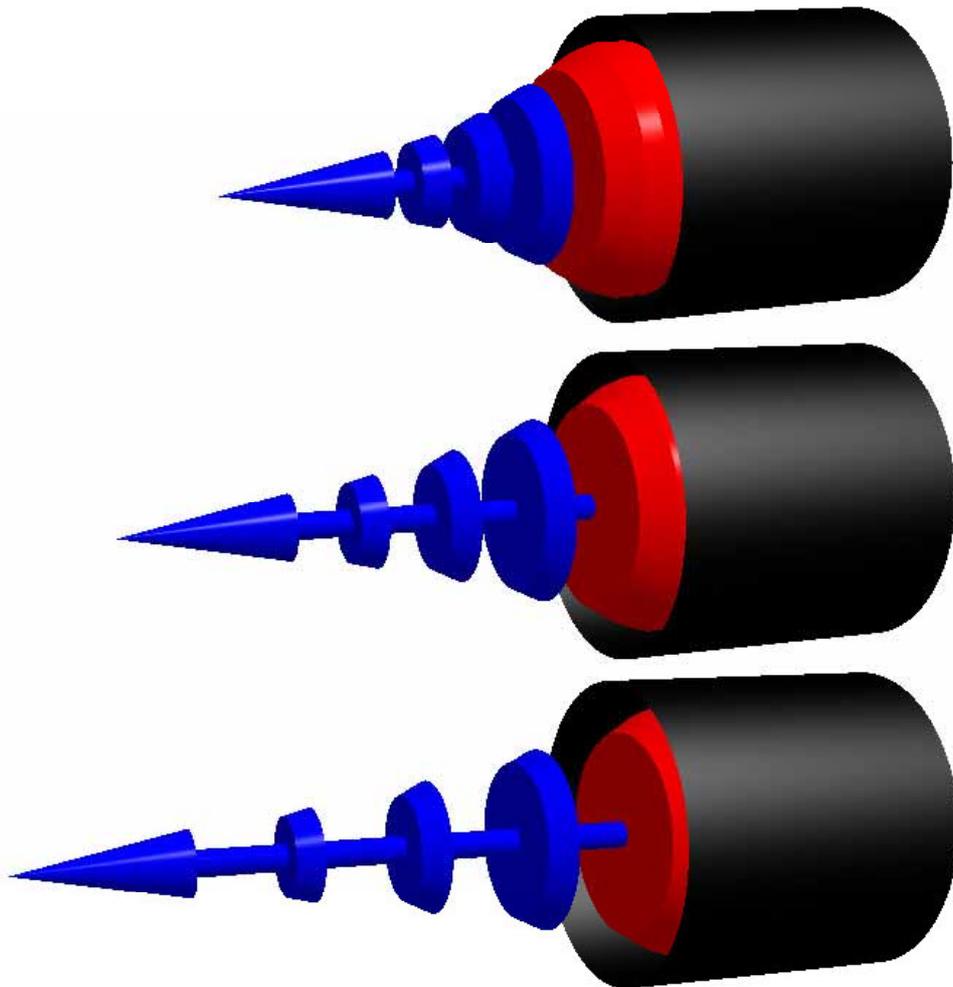


図 1