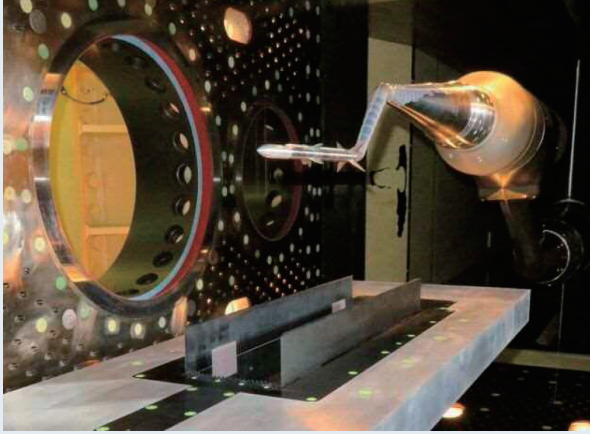


空力技術による航空機からの搭載物分離特性評価

Evaluation of Store Separation Characteristics from Aircraft Using Aerodynamic Technology



園田 精一①	Seiichi Sonoda
越智 章生②※	Akio Ochi
鈴木 互③	Wataru Suzuki
木村 敏之④	Toshiyuki Kimura
橋岡 崇裕⑤	Takahiro Hashioka
白銀 英之⑥	Hideyuki Shirogane
小山 雅隆⑦	Masataka Koyama
久保田 哲也⑧※	Tetsuya Kubota

最新の航空機においてはステルス性能や速度性能向上を実現するため、搭載物の内装化が進んでいる。

そこで、内装ベイ周りの流れや飛行中の航空機から搭載物を分離する状況を把握するために、亜音速から超音速域まで流れ場解析するとともに風洞試験でシミュレーションする分離特性評価システムを国内で初めて開発して、防衛装備庁の千歳試験場三音速風洞に導入した。

The latest military aircraft is equipped with stores in the internal weapon bays to improve stealth and speed performance.

In this context, we developed a store separation characteristics evaluation system to analyze the flow-fields of the subsonic to supersonic ranges and simulate them at the wind tunnel test to identify the flow around the internal weapons bay and how the store is separated from the aircraft in flight for the first time in Japan. This system has been integrated into the Tri-sonic Wind Tunnel in the Chitose Test Center of the Acquisition, Technology & Logistics Agency.

まえがき

軍用機などにおいては、飛行中にミサイルや爆弾などの搭載物を分離・投下することがある。胴体下や主翼下に搭載物を取り付けると搭載物によるレーダー波の反射や空気抵抗によりステルス性能や速度性能が悪化するため、最新の航空機では性能向上のために搭載物を機体内部の内装ベイに格納するケースが多い。

1 背景

扉を開いた状態においては内装ベイは機体表面からくぼんでおり、複雑な空気の流れであるキャビティ流れが内装ベイ周りに発生する。キャビティ流れは流れの速度や圧力の変化が大きく、ここを通過する搭載物には時々刻々と変化する空気が作用する。また、飛行速度が亜音速の場合と超音速の場合とでは、キャビティ流れの状態が異なることも多く搭載物にかかる空気が変化するため、内装ベイから分離した搭載物の挙動を推定することが重要となる。

2 航空機からの搭載物分離

航空機から搭載物を分離する際に、搭載物が空気力により浮き上がって航空機に接触する可能性がある。このような事象を未然に防ぎ飛行の安全を確保するためには、実飛行の前に分離特性を検証しておくことが不可欠である。これには、CTS (Captive Trajectory System) 試験などの風洞試験に加えて数値流体力学CFD解析も用いられる。

図1に示す哨戒機「P-1」には、搭載物を機体内に格納する内装ベイが採用されている。内装ベイを使用する際の飛行速度は、「P-1」では比較的低速であるが、戦闘機では遷音速から超音速にわたる。そして、図2に示すように、内装ベイ内の流速の遅い空気と外側の流速の速い空気との間に速度差を持った“せん断層”と呼ばれる層が形成される。さらに、遷音速から超音速においては衝撃波と膨張波を伴う複雑な流れ場となるが、搭載物を含むキャビティ流れの解析事例は国内にはこれまでなかった。

また、風洞における分離試験についても、低速では十分な能力の施設を利用できるものの、遷音速および超音速における試験は海外の施設を利用している状況であった。



図1 内装ベイの例（「P-1」爆弾倉）
Fig. 1 Example of internal weapons bay (P-1)

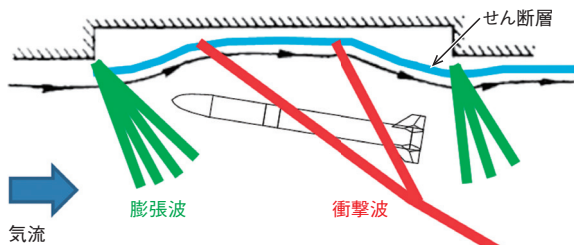


図2 内装ベイ周りの空気の流れの例
Fig. 2 Example of air flow around internal weapons bay

3 分離特性評価に関連する技術課題

遷音速から超音速における搭載物の分離特性評価を行うためには、図3に示すような空力現象の把握と分離状況の風洞試験が必要である。

(1) 空力現象の把握

内装ベイから搭載物を安全に分離するために、内装ベイ周りの空力現象を把握することが重要となる¹⁾。

遷音速から超音速においては、図2に示したように、機体表面に沿う超音速流が内装ベイによって曲げられると膨張波や衝撃波が発生する。また、内装ベイ内外の流れの境界においてせん断層が形成され、このせん断層の周辺においては時間的な流れの変化の大きい非定常な流れになる。内装ベイから分離していく搭載物がこの非定常な流れの中に入ると、空気力の変動によって搭載物の挙動に変化が生じて機体と接触する危険性がある。したがって、遷音速から超音速において搭載物を安全に分離するためには、搭載物に影響を及ぼす内装ベイ周辺の空力現象を把握する必要があるが、これまでは取り組まれていなかった。

(2) 分離状況の風洞試験

国内には、低速域から高亜音速域まで利用できるCTS装

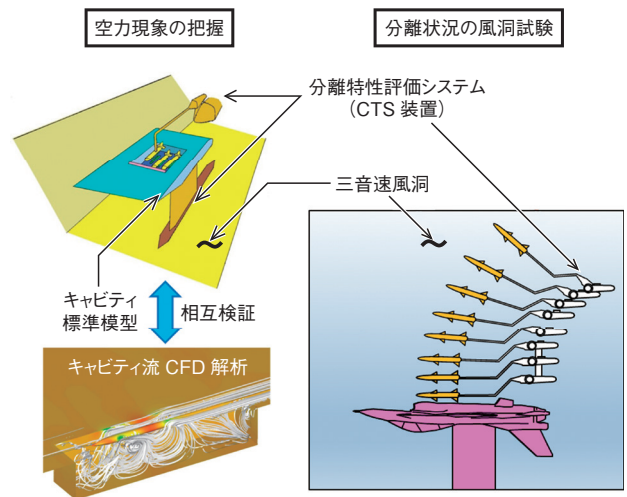


図3 分離特性評価の構想
Fig. 3 Concept of store separation characteristics evaluation

置があるが、内装搭載物の分離をシミュレーションした経験は少ない。

また、遷音速から超音速における分離特性推定に関して、試験品質確保の観点から、飛行条件相当の気流条件（広いマッハ数範囲と高レイノルズ数）を実現できる防衛装備庁千歳試験場の三音速風洞²⁾の活用が適切である。この低速域から超音速域まで対応可能な三音速風洞用に、内装搭載物分離のシミュレーションに利用できるCTS装置の開発が必要であった。

4 分離特性評価に関連する技術開発

(1) 空力現象の把握

(i) キャビティ流れ解析ツールの開発

風洞試験でキャビティ流れの基礎データを取得するための内装ベイを模擬した模型とCFD解析ツールを作成して、風洞試験データとの相互検証を行った。

キャビティ流れの研究のために標準的に使用する模型を設計・製作した。この模型は搭載物を内装する航空機の内装ベイ周辺の胴体表面を模擬した平面に均一な流れを実現するように設計しており、ここに内装ベイを模擬したさまざまな深さや長さのキャビティを設置して圧力計測などを行った³⁾。

CFD解析ツールの構築において、「P-1」などの実機開発で培った複雑形状への格子作成技術を、内装ベイや搭載物の複雑形状の解析に活用した。このCFD解析ツールは、市販CFD解析ソフトウェアのFLUENT上で作動する格子データと計算条件設定ファイルからなり、数回にわたる風洞試験により精度向上を図ってきたものである⁴⁾。

(ii) 解析ツールの検証

キャビティ流れは、キャビティの寸法やマッハ数によって敏感に変化するもので、空力的に予測や再現が難しい現

⑦ 技術開発本部 ものづくり推進センター ものづくり自動化推進部
⑧ 技術開発本部 システム技術開発センター 機電システム開発部

象である。その流れ場は、OpenタイプとClosedタイプ、その中間のTransitionalタイプの3つに分けられ、キャビティ底面の圧力分布が異なることが知られている。

Transitionalタイプについて、流れ場の概要およびCFD解析と風洞試験におけるキャビティ底面の平均圧力分布を図4に示す。

キャビティ前方から流れてくる気流がキャビティ先端の角を回り込む際に膨張波が発生し、気流の向きが変わってキャビティの中に入り込む。キャビティ内で気流は圧縮され、発生した衝撃波によって気流の向きが変わってキャビティの外に出る。その際、キャビティ後端の角に膨張波が発生し、気流は再び偏向して後方へ流れていく。キャビティ底面の平均圧力分布を見ると、キャビティ先端付近においては膨張波の影響で流れが加速されキャビティ底面圧力 C_p が負になり、その後下流に向けて衝撃波の影響で流れが圧縮されて C_p が増加している。

3つの流れ場タイプについてCFD解析と風洞試験結果の圧力分布を比較し、CFD解析によりキャビティ流れ場を予測できることを確認した。

(iii) 前縁デバイスの効果の評価

図5に示すような前縁デバイスをキャビティの先端部に設置することで、キャビティ流れを制御する効果を検証した。前縁デバイス無しの場合のキャビティ流れでは、図6(a)に示すようにせん断層がキャビティの中に入り込んでTransitionalタイプの流れ場となっている。一方、前縁デバイス有りの場合は、同図(b)に示すように前縁デバイス位置からせん断層が上方へ跳ね上げられている。このときの

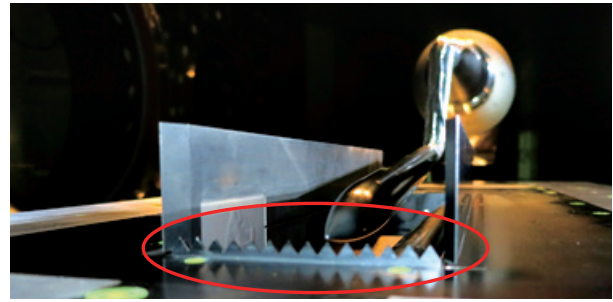


図5 前縁デバイスの形状
Fig.5 Shape of leading edge device

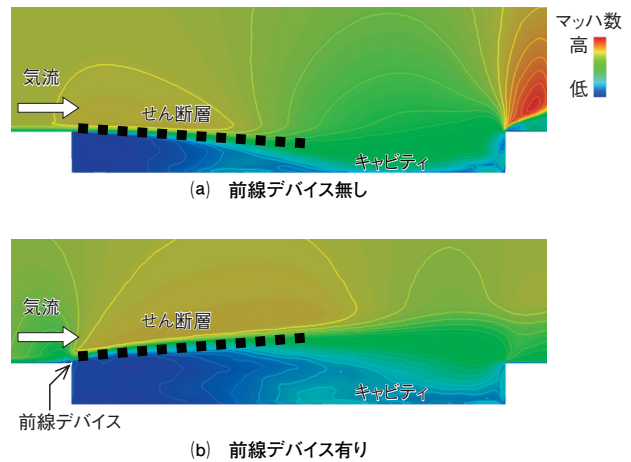


図6 前縁デバイスの有無によるキャビティ流れの違い
(マッハ数分布, 気流マッハ数0.85)
Fig.6 Effect of leading edge device on cavity flow
(Mach contour, free stream Mach 0.85)

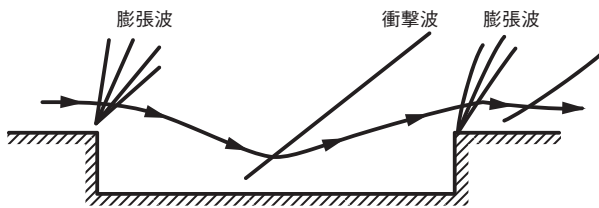
流れ場はOpenタイプとなり、前者とは流れ場タイプが異なることが明確に分かる。このせん断層位置の違いは、CFD解析とともに風洞試験の総圧分布計測でも捉えており、両者のデータは対応していた。

このようにCFD解析と風洞試験データとの相互検証を行うことで、搭載物がある場合の内装ベイ周辺の流れ場解析が適切に実施できることを確認した。

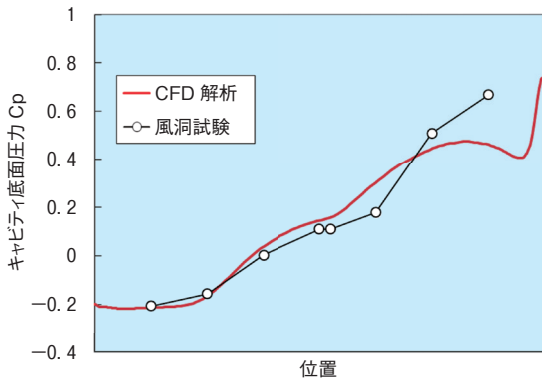
(2) 分離状況の風洞試験

当社は2003年に国内初の「高速風洞用CTS装置」を、社内のロボット技術を活用して開発し、岐阜工場の遷音速風洞に導入した⁵⁾。この装置を「P-1」開発時の高速域の分離特性評価にも使用するとともに、そこで培った装置設計ノウハウと分離特性評価技術を図7に示す「三音速風洞用CTS装置」の開発に活用した。

「三音速風洞用CTS装置」は、3軸ロボットアーム状の装置で搭載物である模型を支持しており、模型の姿勢角を変更する。本装置は、3軸の内1軸を傾斜させた傾斜回転関節機構としてスリムな形状を実現しており、風洞内の空力的な影響を低減している。また本装置の導入にあたっては、研究試作と性能確認試験を実施した⁶⁾。



(a) 流れ場の概要



(b) キャビティ底面圧力 C_p の分布

図4 キャビティ流れの例 (Transitionalタイプ, マッハ2.0)
Fig.4 Example of cavity flow (transitional type, Mach 2.0)

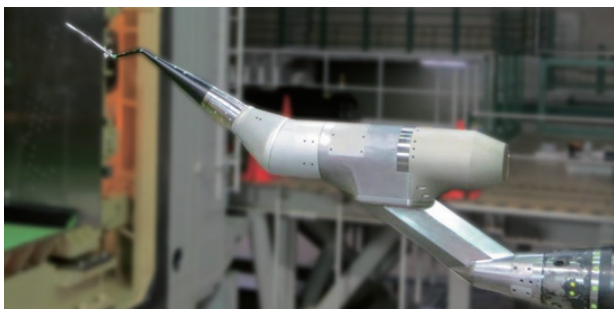


図7 「三音速風洞用CTS装置」
Fig.7 CTS for Tri-sonic Wind Tunnel

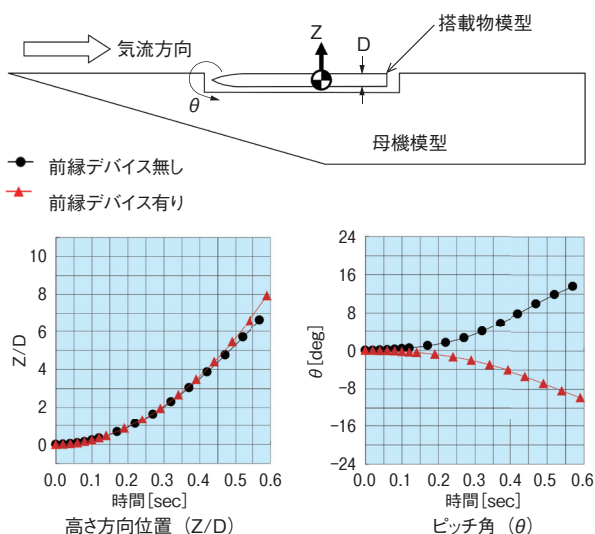


図8 前縁デバイスの有無による内装搭載物分離の軌跡の違い
Fig.8 Store separation trajectories with or without leading edge device

本装置を用いて、将来戦闘機に想定される速度範囲（マッハ数0.3～2.5）で試験が実施できることを確認した。また、内装ベイからの搭載物の分離状況をシミュレーションする技術を確認するために、内装搭載物分離試験を実施した。本試験では、キャビティ標準模型を用いて、遷音速から超音速まで内装搭載物のキャビティ内の搭載位置からの分離シミュレーションが可能であることを確認した。

前縁デバイスの有無による内装搭載物の分離シミュレーションの結果を図8に示す。前縁デバイスによるせん断層位置の違いの影響は、高さ方向位置（ Z/D ）では表われないが、ピッチ角（ θ ）では符号が逆転するほどの効果が見られた。

あとがき

内装ベイ周りの流れを評価可能なCFD解析ツールを構築してキャビティ流れに対する空力現象を把握することができた。この成果は今後の戦闘機などの研究開発に適用可能である。また、「三音速風洞用CTS装置」を開発し、国内で初めて超音速域までの内装搭載物の分離シミュレーション

を実施できることを確認した。本装置は将来の航空機開発における搭載物の分離シミュレーションに利用されていく予定である。

本開発は、防衛装備庁「ウェポン内装化空力技術の研究試作」として実施したもので、ご協力いただいた航空装備研究所に感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 宇田川, 菊本, 園田, 越智, 橋岡, 白銀, 川村: “航空機の搭載物分離特性に関する複合的研究 研究全般概要”, 第54回飛行機シンポジウム講演集 (2016)
- 2) 杉田: “三音速風洞の概要”, 第45回飛行機シンポジウム講演集 (2007)
- 3) 菊本, 宇田川, 高尾, 園田, 鈴木, 北川, 木村, 上田: “航空機の搭載物分離特性に関する複合的研究 内装搭載物のキャビティ流風洞試験”, 第54回飛行機シンポジウム講演集 (2016)
- 4) 越智, 永田, 宇田川, 菊本, 大澤: “航空機の搭載物分離特性に関する複合的研究 キャビティ流CFD解析と風洞試験の比較”, 第54回飛行機シンポジウム (2016)
- 5) 濱田, 葉山, 越智, 辻内, 鈴木: “航空機開発を支える空力・騒音の基盤技術”, 川崎重工技報, No.171, pp.28-33 (2011)
- 6) 橋岡, 白銀, 小山, 久保田, 竹中, 宇田川, 菊本, 金子: “航空機の搭載物分離特性に関する複合的研究 三音速風洞用CTS (Captive Trajectory System) の開発”, 第54回飛行機シンポジウム (2016)



園田 精一



越智 章生



鈴木 互



木村 敏之



橋岡 崇裕



白銀 英之



小山 雅隆



久保田 哲也