

# ハイブリッドロケットの空力特性に関する研究

中山昇(信州大学), 関啓亮(信州大学), 常前洋(信州大学), 宮川知大(信州大学大学院),  
榊和彦(信州大学), 鈴木直洋(宇宙航空研究開発機構), 野中聡(宇宙航空研究開発機構),  
丸祐介(宇宙航空研究開発機構), 赤嶺政仁(宇宙航空研究開発機構),  
山内智史(宇宙航空研究開発機構), 嶋田徹(宇宙航空研究開発機構)

## Study on aerodynamic characteristics of hybrid rocket

Nakayama Noboru (Shinshu university), Seki Keisuke (Shinshu university), Jyomae Hiroshi (Shinshu university),  
Myakawa Tomohiro (Graduate School of Shinshu university),  
Sakaki Kazuhiko (Graduate School of Shinshu university), Suzuki Naohiro (Japan Aerospace eXploration Agency),  
Nonaka Satoshi (Japan Aerospace eXploration Agency), Maru Yusuke (Japan Aerospace eXploration Agency),  
Akamine Masahito (Japan Aerospace eXploration Agency),  
Yamauchi Satoshi (Japan Aerospace eXploration Agency), Shimada Toru (Japan Aerospace eXploration Agency)

### ABSTRACT

The trajectory of the rocket in flight is simulated to launch the hybrid rocket safely. The coefficient of Cd used in the simulation is constant at 0.75 regardless of the speed. In the future, it is necessary to clarify the exact coefficient of Cd in order to develop a hybrid rocket that exceeds the speed of sound. In this study, three types of rockets with different lengths were manufactured to clarify the shape and coefficient of Cd of the hybrid rocket to be launched, and the aerodynamic characteristics were clarified.

**Keywords:** coefficient of Cd, hybrid rocket

### 1. はじめに

ハイブリッドロケットを安全に打ち上げるために、飛行中のロケットの軌道についてシミュレーションを行っている。シミュレーションに用いるCd値は、モデルロケットの教科書などに記載されている速度に依存していない0.75が多用されている。しかし、教科書などに記載されているCd=0.75を用いてシミュレーションを行うと実測と大きく異なる。今後、音速を超えるハイブリッドロケットを開発し、安全に飛行実験を実施するためには正確なCd値を明らかにする必要がある。

本研究では、打ち上げを予定しているハイブリッドロケットの形状とCd値を明らかにすることを目的として三種類の長さの異なるロケットを作製し空力特性を明らかにした。

### 2. 試験方法

ハイブリッドロケットを対象としたモデル実験を行った。ロケットのボディーの直径やノーズコーンと尾翼（フィン）の大きさは固定し、ボディーの長さを3種類変化させたモデルを作製した。実際に作製し打ち上げを考える場合のロケットの形状を図1に示す。ここで直径をDとするとモデルの長さを10D, 15D, 30Dと変化させたロケットを検討した。使用する内挿天秤にはNo. 2を用いるが、その天秤の外形がφ22であることから、挿入部のクリアランスを考慮してモデル会計をφ25とした。なお、肉厚はおおよそ2mm程度が必要であることから、風洞モデルは外形φ30mmになるように検討した。その結果、風洞実験に用いるロケットのモデルは1:6.5の尺度となった。

試験風洞は遷音速風洞および超音速風洞を用いてマッハ0.3~1.1, 2.0, 3.0の条件で実験を実施した。マッハ0.3~1.1はスイープ、マッハ2.0および3.0はマッハ数を固定した。さらにピッチ角 $\theta$ を $\theta=0, 3, 6^\circ$ , ロール角 $\phi$ を $\phi=0, 45^\circ$ と変化させて実験を行った。

計測には内挿天秤 No.2 を用いて、得られたデータから CD 値を求めた。

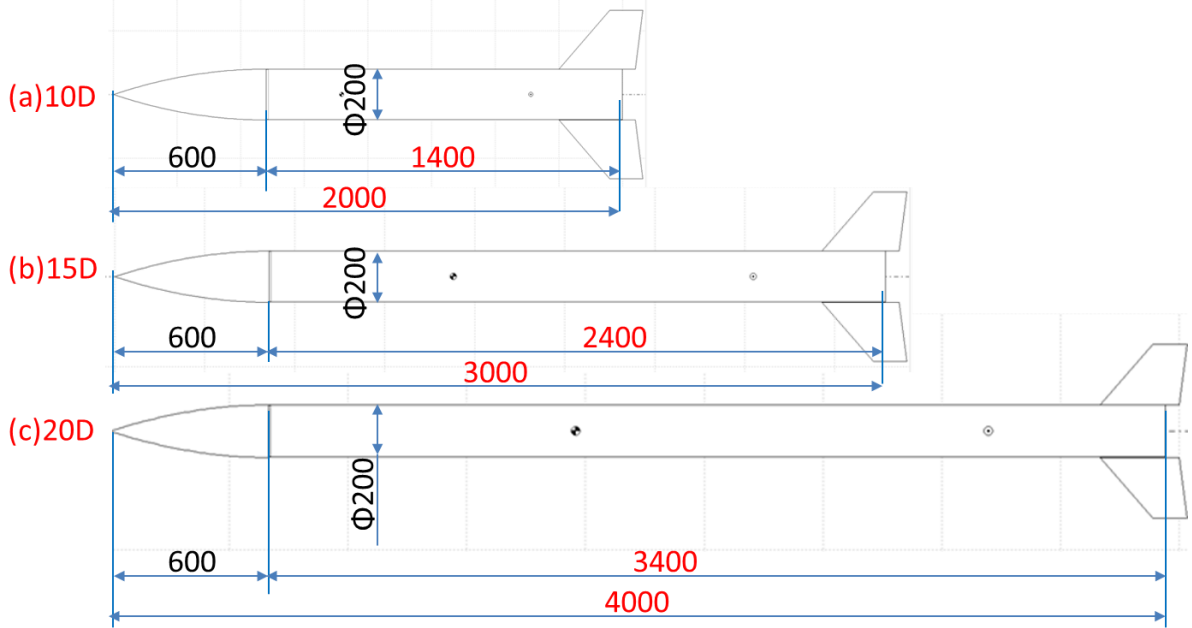


図1 ロケットの形状 (実物大)

### 3. 実験結果

モデルの長さを10D, 15D, 30Dと変化させたロケットに対してマッハ数を0.3~3.0まで変化させて風洞実験を実施した. 代表的な例として風洞実験の様子 (10Dモデル, ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ )) を図2に示す.

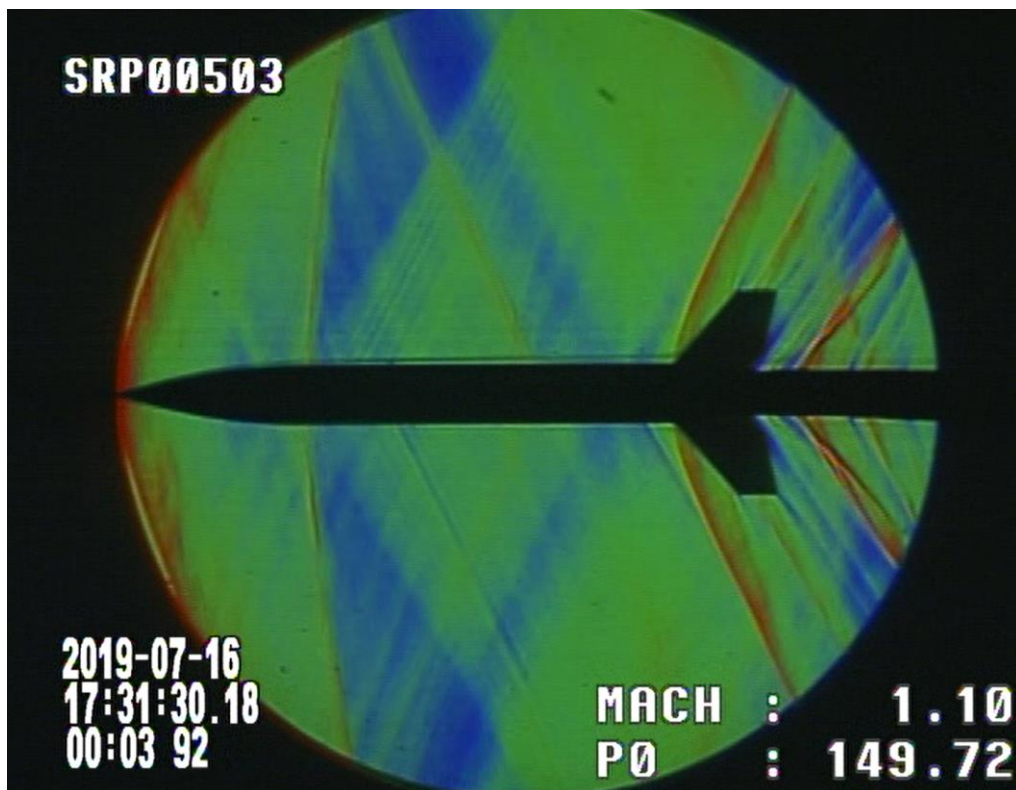


図2 風洞実験の様子 (10Dモデル, ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ))

$\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$  におけるマッハ数とCd値の関係を図3に示す。図3から、マッハ1付近で空気抵抗Cd値が急激に増加することがわかった。

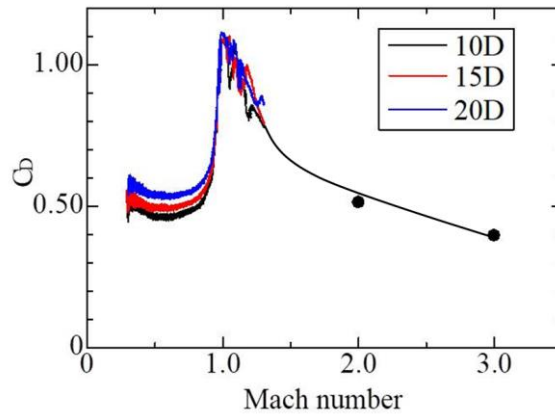
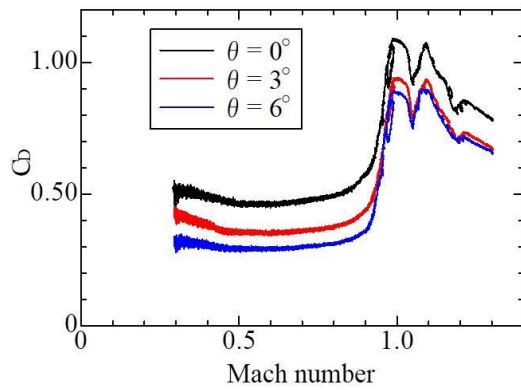
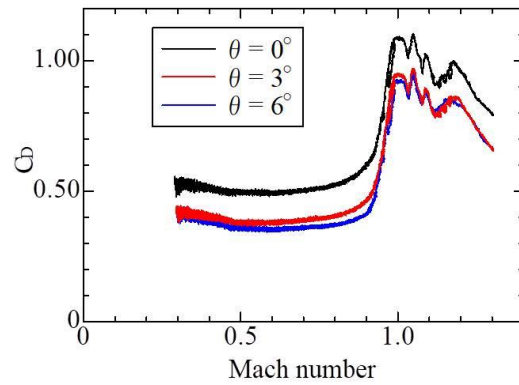


図3 マッハ数とCdの関係 ( $\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$ )

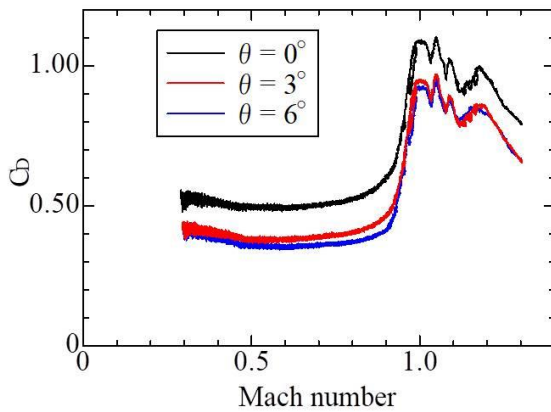
10D, 15D, 20Dのそれぞれの機体を用いた場合のピッチ角 $\theta$ を $0, 3, 6^\circ$ と変化させた結果をそれぞれ図4(a)~(c)に示す。全てのモデルにおいてピッチ角 $\theta$ が大きくなるほどCd値が低下することがわかった。



(a) 10D



(b) 15D



(c) 20D

図4 ピッチ角 $\theta$ を変化させたときのCd ( $\phi = 0^\circ$ )

ピッチ角を $3^\circ$  と一定としてロール角度 $\phi$ を変化させた場合の結果を図5に示す。多少 $\phi=0^\circ$ の方が増加するが、あまり変化が無いことがわかった。

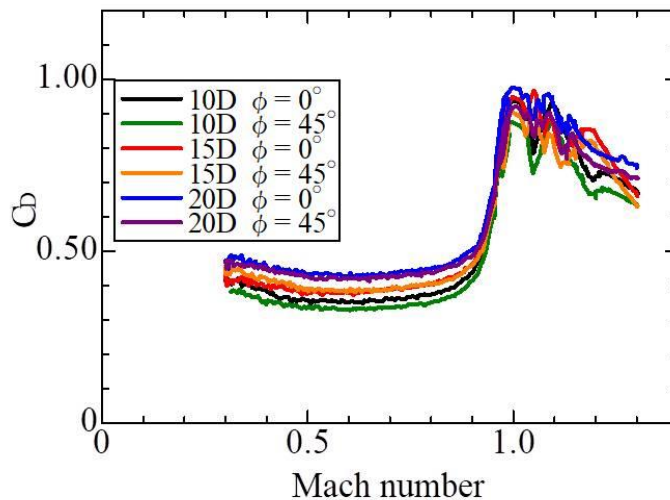


図5 ロール角 $\phi$ を変化させたときのCD ( $\theta = 3^\circ$ )

これまでハイブリッドロケットを打ち上げてきたが、最大でもマッハ0.8程度であった。図3の結果から求めたマッハ0.3~0.8の範囲のCd値の平均値を図6に示す。例えば、これまで20Dのハイブリッドロケットの打ち上げ実験を行ってきたので、そのCd値の平均値を求めると0.5566であった。

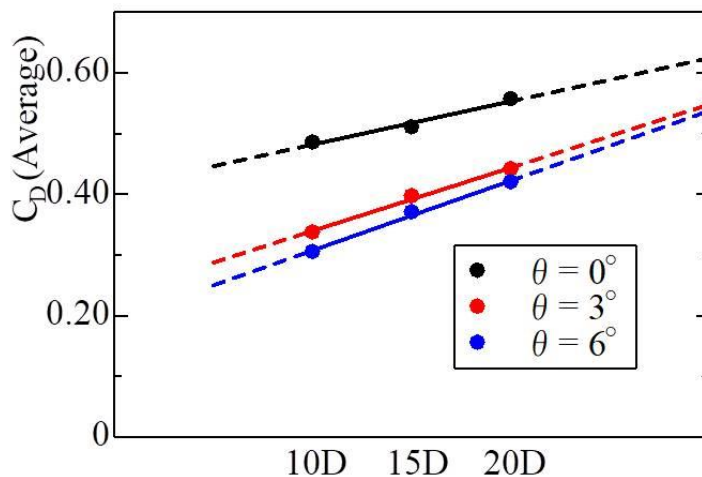


図6 マッハ数0.3~0.8までの平均CD ( $\phi = 0^\circ$ )

本研究で得られたCd値 (0.5566) を用いてハイブリッドロケットの打ち上げ実験のシミュレーションを行った結果を図7に示す。図中の青い線が実際の高度であり、緑色の線が教科書などに記載されているCd=0.75を用いてシミュレーションを行った結果である。両者には400m程度の差がある。本研究で求めたCd値 (0.5566) を用いてシミュレーションを行った結果がオレンジ色の線であるが、実測値とほぼ同じであることがわかった。従って、ハイブリッドロケットの飛行シミュレーションの精度を高めることができたため、今後打ち上げるハイブリッドロケットの打ち上げ実験は、これまで以上に安全に実施できると考える。

### 高度（実測値とシミュレーション[CD値]の比較）

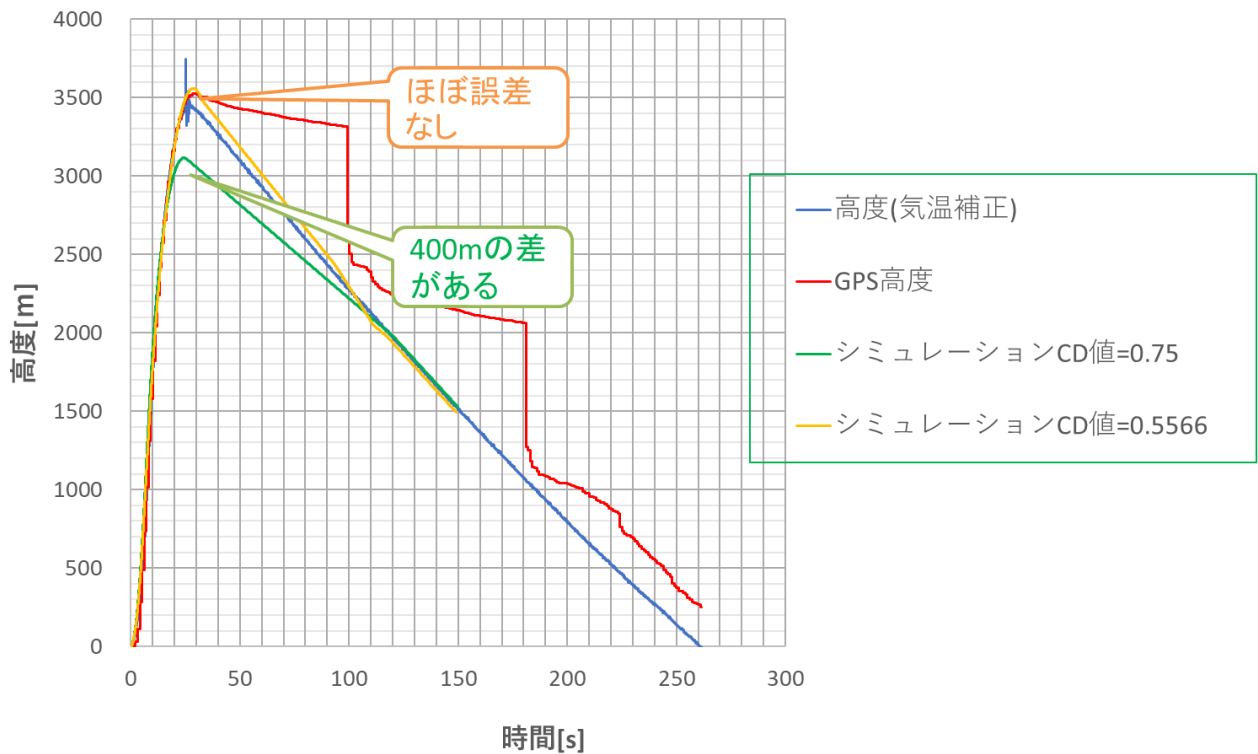


図7 実際に打ち上げた際のロケットの高度とシミュレーション結果の比較

#### 4. まとめ

本研究では、打ち上げを予定しているハイブリッドロケットの形状とCd値を明らかにすることを目的として三種類の長さの異なるロケットを作製し空力特性を明らかにした。

その結果、正確なCd値を求めることができた。

正確なCd値を用いてハイブリッドロケットの飛行シミュレーションを行った結果、実測値はほぼ同じであることがわかり、シミュレーションの向上に寄与できたことを証明できたと考えられる。

今後は、ノーズコーンの形状とCd値の関係などを明らかにして、さらなるロケット飛行シミュレーションの精度向上を目指していきたいと考える。

#### 謝辞

本プロジェクトは「地域活性化・地域住民生活等緊急支援交付金（地方創生先行型）先駆的事業分（タイプI）」の助成を受けたものです。