磁力支持天秤による切り立った底部を有する機体の Base 圧補正に関する研究^{*1}

An Experimental Study on Base Pressure Correction for Bluff-Base Bodies Using Magnetic Suspension and Balance System

只 熊 憲 治^{*2}・麻 生 茂^{*3}・谷 泰 寛^{*3}・溝 口 也 寸 志^{*4}・岡 田 卓 三^{*4}

Kenji TADAKUMA, Shigeru ASO, Yasuhiro TANI, Yasushi MIZOGUCHI and Takumi OKADA

Key Words: Base Pressure Correction, MSBS, Sting Interference, Bluff-Base Body

Abstract: An experimental study on validity and improvement of base pressure correction for a bluff-base body with hemisphere nose using MSBS (Magnetic Suspension and Balance System) has been conducted. Force and pressure distribution data on the model base were examined for several parameters; angles of attack $0-7.5^\circ$, Reynolds number $Re_D = 7.6 \times 10^4$, with or without a sting and diameters of the sting. These results showed that the base pressure correction using the pressure data near the sting could have validity at the case of 0° of angle of attack only. Besides we could propose a new accurate method to calculate base-pressure axis forces.

記 号

- C_{pb} : base 圧力係数
 $C_{Xb_{nst}}$: スティング支持なしでの base 圧力による軸力係数
 $C_{Xb_{st}}$: スティング支持時, 面積 S_{bc} にかかる base 圧力による軸力係数
 D_m : 模型底面直径
 D_s : スティング直径
 F_A : 軸力
 F_{AF} : forebody 軸力
 p_b : base 圧
 p_c : cavity 圧
 $p_t(\alpha)$: 迎角 α における模型頭部全圧孔計測による全圧
 p_∞ : 主流静圧
 Re_D : レイノルズ数 (代表長 D_m)
 S_b : 模型底面積
 S_{bc} : $S_b - S_{st}$ (第 5 図参照)
 S_{st} : スティング挿入孔面積 (第 5 図参照)
 S_{cs} : cavity 面積 (第 5 図参照)
 α : 迎角

1. 序 論

近年, 完全再使用型宇宙往還機 (FRLV: Fully Reusable Launch Vehicle) の開発が進められており, その機体は切り立った底部を有するものや, re-entry から着陸する間を滑空して降下するものが多い。そのような宇宙往還機の開発においては, 特に, 機体の空気力を正確に求める必要が

ある。

そこで, 我々は, このような FRLV に代表される滑空飛行を行う切り立った底部を有する機体を対象とし, 空気力の精度向上のために, 風洞試験で行われる base 圧補正法に着目し, その妥当性及び全機軸力推定方法について検討を行った。

base 圧補正とは, 模型を後方からスティング支持する風洞試験において空気力を取得する際, 模型底面にかかる力が零である全機軸力, つまり, forebody 軸力を求めるために行われる¹⁻⁴⁾。具体的には, base 圧補正は, 模型底面のスティング付近の base 圧を取得し, それが模型底面全体にかかるかと仮定し, その力を内挿型スティング天秤などで得られた空気力から差し引くことによって行われる補正法である^{1, 3)}。第 1 図に base 圧補正について示す。また, forebody 軸力算出について第 (1) 式に示す¹⁻³⁾。ここで, F_{AF} は forebody 軸力, F_A は天秤などによって計測された軸力, p_b は base 圧, p_∞ は一様流静圧, S_b は模型底面積である。場合によっては, スティングを内挿するために空けた孔の中 (cavity) の cavity 圧を計測し, それも含めて補正することもある^{5, 6)}。

$$F_{AF} = F_A + (p_b - p_\infty)S_b \quad (1)$$

最終的に求めたい軸力は forebody 軸力ではなく全機軸力であり, 一般に, 尾部を含む模型で幾つかの支持法を組み合わせて, 空気力を測定し, 全機軸力を推定する。一方, 今回の対象である切り立った底部を有する機体の場合は, forebody 軸力に, 別途推算した base 抵抗を加算して全機軸力を推定する方法も使用されている^{1, 2)}。

これらの base 圧補正及び切り立った底部を有する機体に関する全機軸力推定について, 次の検討課題が存在すると考えられる。

^{*1} © 2005 日本航空宇宙学会

平成 17 年 6 月 8 日原稿受理

^{*2} 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

^{*3} 九州大学大学院工学府航空宇宙工学部門

^{*4} 三菱重工業 (株) 神戸造船所

- 1) base 圧補正について, forebody 軸力を算出するために用いられる base 圧が模型底面全体にかかるという仮定の妥当性の検討. つまり, 上述の base 圧補正が模型底面にかかる力を零にする補正であるかについての検討.
- 2) 滑空飛行する切り立った底部を有する機体の全機軸力推定のための base 抵抗推算方法についての検討.

第 1 の検討課題については, スティング装着時の base 圧分布を調べればよい. 例として, Kavanau⁷⁾ は, その分布が迎角 0° で非一様であることを示している. その他に, 様々なスティング形状, 模型後部形状及び fin の有無に対する空気力及び base 圧への影響を報告した例など¹⁰⁻¹⁶⁾ は, 多数存在する. しかしながら, スティング装着時の base 圧分布の一様性について詳細に調べた例はほとんどない.

第 2 の検討課題である切り立った底部を有する機体の全機軸力推定のための base 抵抗推算方法については,

- 1) 過去の計測結果による実験式や解析値を用いて推算する方法^{7-9, 12)}
- 2) 別途, 風洞試験¹⁷⁻¹⁹⁾ や数値計算^{20, 21)} により算出する方法

があると考えられる. しかしながら, 過去の計測結果による方法の場合, 基になるデータに支持干渉を含んでいるものや迎角 0° のみの検討であるものも多く, 宇宙往還機のような機体に適用するのは難しい. また, 別途, 風洞試験や数値計算を行うにはコスト及び時間を要する.

また, 支持干渉がない状態で実験を行う方法として, 磁力支持天秤を用いる方法や飛行試験がある. Britcher ら¹⁰⁾ や Stoney²²⁾ はそれぞれ磁力支持天秤, 飛行試験を利用し, スティング有無による base 圧や base 抗力などを調べた結果を報告している. しかしながら, それらの報告もそれぞれの速度域に対し, 単一の迎角でデータを取得したものである. そのため, 全機軸力推定のための base 抵抗推算方法を考えるためには, 支持干渉がない状態において, より体系的なデータ取得が望まれる.

そこで, 著者らは, これら 2 つの検討課題に対して, 1) スティング支持状態での模型底面における base 圧分布について調査し, base 圧補正が模型底面にかかる力を零にする補正であるかについて検討すること, 及び, 2) 支持干渉がない状態を作り出し, より体系的なデータ取得を行うことによって全機軸力推定のための base 抵抗推算方法を確立すること, を目的とし, 研究を行った. これらにより, base 圧補正の妥当性の確認及び支持干渉のない base 圧データを基にした, 全機軸力推定のための base 抵抗推算を行うことができるため, 風洞試験における空気力の精度向上が見込まれる.

第 1 図 base 圧補正

本研究では, 支持干渉がない状態を実現するために磁力支持天秤を用い, 切り立った底部を有する機体を対象とし, スティングの有無, スティング径変化及び迎角変化に対する base 圧分布について調べる. 本論文では低速域における結果について報告する.

2. 実験装置と方法

2.1 風洞と天秤 使用した風洞は, 九州大学所有の $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ の測定部を持つ吹き出し式低速風洞である. また, 支持干渉がない状態で実験を行うために, 三菱重工業 (株) 神戸造船所より借用した $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ の測定部を持つ磁力支持天秤 (MSBS: Magnetic Suspension and Balance System, 以降 MSBS と呼ぶ) を用いた. コイル配置やコイル電流制御方法は JAXA 所有の 5 軸制御磁力支持天秤と同様である²³⁾. これらの吹き出し式風洞と MSBS を連結させ, 実験を行った. 鈍頭模型浮上の様子を第 2 図に示す.

連結した風洞の乱れ強さは 0.7% 以内であり, 測定部断面の動圧は平均動圧に対して $-1.4 \sim 1.0\%$ の範囲内で一様性を有している.

2.2 模型と base 圧測定方法 実験に使用した模型を第 3 図に示す. 頭部が半球で胴体部が円柱の鈍頭模型である. 模型中心付近の黒線は, MSBS 付属のカメラによる模型位置検出に用いる. 模型材料は, 磁場に影響を与えないように, 主にアルミニウムとアクリルを使用している. 第 3 図 (b) に模型の構成品について示す. 模型を浮上させるために直径 20 mm , 長さ 120 mm のアルニコ磁石を模型内部に収納及び固定した. また, base 圧を計測できるように, 無線圧力計測システムを収納し, 模型底部に直径 0.5 mm の静圧孔を設けてある.

無線圧力計測システムとは, 赤外線通信モジュール, 電源, H8 マイコン及び微差圧センサで構成され, 測定された差圧データを赤外線により風洞外部へ送信するシステムである. MSBS により浮上した模型周りの圧力を無線で計測する方法は他にも Britcher ら¹⁰⁾ や澤田ら²⁴⁾ の例がある. 磁場が無線圧力計測システムに与える影響を調査するために, 模型浮上による磁場が存在する状態と存在しない状態において, 基準となる微差圧計 (測定レンジ $0 \sim 500\text{ Pa}$) を

第 2 図 鈍頭模型浮上の様子

用いて較正を行った．その結果，較正結果の不確かさは磁場の有無にかかわらず $\pm 1.5 \text{ Pa}$ (基準となる微差圧計のフルスケールに対して $\pm 0.3\%$) 以内であり，模型浮上による磁場の影響はないと判断できる．なお，不確かさ解析は，2.4 節に示す方法と同様であり，その区間は 95%信頼区間を表す．

測定する差圧は，迎角 α のときの模型頭部全圧孔計測による全圧 $p_t(\alpha)$ と base 圧 p_b との差圧であり，求めたい base 圧の圧力係数とは異なる．求めたい base 圧の圧力係数 C_{p_b} は第 (2) 式より算出される．ここで， $f(\alpha)$ は迎角による模型頭部全圧孔により計測される全圧への影響を補正する項であり，迎角 0° のときの模型頭部全圧孔計測による全圧 $p_t(0)$ を用いて表すと第 (3) 式となる．これは base 圧を計測する実験の前に明らかにしておく必要がある．具体的には，迎角 $0 \sim 7.5^\circ$ における模型頭部全圧孔による全圧を測定し，その値を $f(\alpha)$ の算出に用いた．その結果を第 4 図に示す．なお，エラーバーは，2.4 節に示す不確かさ解析と同様な方法で求め，95%信頼区間を表す．

$$C_{p_b} = \frac{p_b - p_\infty}{q_\infty} = 1 - \frac{p_t(\alpha) - p_b}{q_\infty} + f(\alpha) \quad (2)$$

$$f(\alpha) = \frac{p_t(\alpha) - p_t(0)}{q_\infty} \quad (3)$$

測定した動圧などのデータに対して，測定部壁面の境界層によって生じる静圧勾配を考慮し，さらに，固体壁測定部に対する閉塞効果補正 (solid blockage 及び wake blockage)

(a) 模型

(b) 模型構成

第 3 図 実験模型

第 4 図 迎角による模型頭部全圧孔により計測される全圧への影響

を行った²⁵⁻²⁸⁾．

2.3 実験条件 まず，本論文における base 面積，スティング挿入孔面積及び cavity 面積の定義について第 5 図に示す． S_{bc} は模型底面積 S_b からスティング挿入孔面積 S_{st} を引いた面積である．また， S_{cs} は cavity 面積であり，スティング挿入孔面積 S_{st} からスティング断面面積を除いた面積である．スティング支持時における S_{bc} ，または，スティング支持のない状態における模型底面積 S_b にかかる圧力を base 圧， S_{cs} にかかる圧力を cavity 圧と呼ぶこととする．

実験は，base 圧分布測定を，スティングの有無，スティング径変化及び迎角変化の場合において行った．実験ケースを第 6 図に示す．第 6 図 (a) はスティング支持がない場合であり，base 形状は flat である．底部に base 圧孔を設け，底部を 45° ずつロール方向へ回転させることによって base 圧データを取得した．その他のケースも同様である．第 6 図 (b) 及び (c) はスティング支持の場合であり，スティングを通すための深さ 15 mm のスティング挿入孔を設け

第 5 図 base 面積，スティング挿入孔面積及び cavity 面積の定義

(a) スティング支持がない場合

(b) スティング径 25 mm

(c) スティング径 10 mm

(d) スティング径 25 mm 圧力配管あり

(e) スティング径 10 mm 圧力配管あり

第 6 図 実験ケース (: base 圧孔, : cavity 圧孔)

ている．第 6 図 (d) 及び (e) は，第 1 図に示したものと同様に，base 圧補正に用いる base 圧を取得する場合である．スティング周りの模型底面近くに base 圧孔と同じ径の圧力管（外径 1 mm，内径 0.5 mm のステンレス管）を模型底面に向かって上下及び右の 3 点配置し，その位置での base 圧を取得した．スティング径及びスティング挿入孔径はそれぞれ第 6 図 (b) 及び (c) と同様である．この圧力配管による base 圧も他の base 圧と同様に模型全圧孔による全圧との差圧として計測し，その圧力係数は第 (2) 式及び第 (3) 式により算出した．なお，第 6 図中の圧力計測孔は，その位置を分かりやすくするために実物の比より大きく描いている．また，cavity 圧もそれぞれのケースにおいて取得している．

スティングについて第 7 図に示す．スティングはアルミ管を用い，支柱と模型底面までの距離はいずれの場合も 460 mm に固定した．支柱は，幅 9 mm，長さ 40 mm，高

第 7 図 スティング概略図

さ 559 mm である．なお，スティングの模型側の端は，アクリル板でふたをしている．

風速は 27 m/s とした．測定した迎角範囲は，MSBS による模型検知範囲の制限を考慮して 0° から 7.5° までとした．今回の模型において，それ以上の迎角になると模型の磁気浮上が困難となる．模型直径 $D_m (= 0.042 \text{ m})$ を代表長としたレイノルズ数 Re_D は， 7.6×10^4 である．

2.4 不確かさについて 取得したデータを適切に評価するために不確かさ解析を行った．不確かさ解析は，Kline ら^{29, 30)}の方法を基に行い，95%の信頼を有する不確かさ区間をグラフ上にエラーバーとして示している．

3. 実験結果と考察

3.1 base 圧分布に関する結果と考察 第 8 図に模型底面 base 圧孔より計測された base 圧の分布を示す．今回の計測では横滑り角 0° であり，流れ場は $X-Z$ 平面に対称と考えられるので，右半面において計測した base 圧を左半面に同様に与え，底面全体の圧力分布として示している．第 8 図 (a) より，迎角 0° におけるスティング支持なしの base 圧分布は同心円状の分布を示し，ほぼ一様な分布であることが分かる．第 8 図 (b) より，迎角を有すると，底面上部の base 圧は低く，下部は高くなり，その分布が一様でなくなっていることが分かる．また，その値は迎角 0° の base 圧と比べ，低くなる．スティング支持した場合，第 8 図 (c) 及び (d) より，支持しない場合と比べて，base 圧が全体的に高くなっていることが分かる．また，径 25 mm 及び径

第 8 図 base 圧分布

10 mm のどちらにおいても、底面上部は低い値を、下部は高い値を示し、支持がない場合の base 圧分布と同様な傾向を示している。

3.2 base 圧補正の妥当性に関する結果と考察 次に base 圧補正の妥当性について議論する。本論文では、base 圧や cavity 圧によって底面にかかる軸力成分を無次元化したものについて「base 圧による軸力係数」などと呼ぶことにする。第 9 図にスティング支持時の base 圧による軸力係数を示す。スティング支持時の base 圧による軸力係数 C_{Xbst} とは、第 (4) 式によって与えられ、スティング支持時において、base 圧により面積 S_{bc} にかかる力を動圧と模型底面積 S_b で無次元化したものである。面積の名称については第 5 図と同様である。それらの軸力係数の向きは第 9 図中に示すように機軸下流方向を正とする。

$$C_{Xbst} = - \int_{S_{bc}} (p_b - p_\infty) dS / q_\infty S_b \quad (4)$$

グラフ中の「スティング径 25 mm」及び「スティング径 10 mm」は、模型底面に設けられた静圧孔から取得した base 圧分布を用いて、第 (4) 式より与えられる。また、「スティング径 25 mm 圧力配管」及び「スティング径 10 mm 圧力配管」は、同様に第 (4) 式によって与えられ、模型底面スティング付近の base 圧が面積 S_{bc} 全体にかかると仮定して算出した base 圧による軸力係数である。

第 9 図より、スティング支持の場合において、「スティング径 10 mm 圧力配管」と「スティング径 10 mm」について、その差はほとんどない。「スティング径 25 mm 圧力配管」と「スティング径 25 mm」については、迎角が大きくなると、その差がわずかではあるが大きくなっている。

第 10 図及び第 11 図にそれぞれのケースにおける base 圧の分布を示す。それぞれ第 10 図は迎角 0° 、第 11 図は迎角 7.5° の base 圧分布である。迎角 0° の場合、流れ場が軸対称であると考え、 z 軸方向のみの base 圧を計測した。第 10 図より、スティング支持した場合の模型底面 base 圧は、平坦な分布を示しており、base 圧分布はほぼ一様であると考えられる。また、圧力配管による base 圧と模型底面 base 圧孔によって計測された base 圧の値もほぼ等しいことが分かる。

第 11 図 (a) より、迎角 0° の場合と同様に、「スティング

第 9 図 base 圧による軸力係数 C_{Xbst} の比較

支持なし base flat」の base 圧は、その他のケースと比較して、低くなっていることが分かる。迎角 0° の場合、その分布はそれぞれのケースで一様であったが、迎角 7.5° の場合、一様ではなくなっていることが分かる。また、スティング支持時において、配管により計測されたスティング付近の base 圧は、模型底面 base 圧孔で計測した値と異なっている。

第 11 図 (b) より、模型底面で計測された base 圧の y 軸方向分布はほぼ一様になっていることが分かる。しかしながら、「スティング径 25 mm 圧力配管」における base 圧係数は、模型底面 base 圧孔で計測した「スティング径 25 mm」の値と異なっている。

これらより、迎角を有した場合、base 圧分布は一様ではなくなり、また、スティング付近の base 圧とその半径方向外側における base 圧の値は異なる場合もあり、スティング

第 10 図 base 圧分布 ($\alpha = 0^\circ$)

(a) z 軸方向

(b) y 軸方向

第 11 図 base 圧分布 ($\alpha = 7.5^\circ$)

付近の base 圧と同様な base 圧が模型底面全体にもかかると仮定する base 補正は妥当ではないと考えられる。

このように迎角によって base 圧の分布が様でなくなる原因は、base 面が傾斜することによって、base 背後の再循環領域が上下非対称に形成されるためであると考えられる。また、スティングの径によって、半径方向外側の base 圧とスティング付近の base 圧の値が滑らかにつながったり、異なったりする原因は、スティングの径の違いによって、その再循環領域の形成や強さが異なるためであると推測される。しかしながら、その原因を解明するには、空間的な流れ場を把握する必要がある。

3.3 全機軸力を求める base 圧補正について 本研究で用いた鈍頭模型に対して、低速域における全機軸力推定のための base 圧による軸力係数推算方法を提案する。この方法により、base 圧補正を行うために取得した base 圧を用いて、スティング支持のない状態での base 圧による軸力係数を求めることができる。第 12 図にスティング径と base 圧による軸力係数の関係を示す。 D_s はスティング直径、 D_m は模型底面直径である。横軸に模型底面直径に対するスティング径の比 D_s/D_m 、縦軸にそれぞれの迎角における「スティング支持においてスティング挿入孔面積 S_c を除いた底面積 S_{bc} にかかる、base 圧による軸力係数 $C_{Xb_{st}}$ 」を「スティング支持のない状態での base 圧力による軸力係数 $C_{Xb_{nst}}$ 」で除した値 $C_{Xb_{st}}/C_{Xb_{nst}}$ を示す。

これより、実験で使用したスティング径が与えられれば、スティング支持なしの場合の軸力係数を推定することができる。以下に、base 圧による軸力係数算出及び全機軸力推定について、手順を示す。

- 1) 風洞試験において、空気力測定と同時に、base 圧による軸力係数 $C_{Xb_{st}}$ を、模型底面に設けた静圧孔より取得した base 圧より求める。
- 2) 内挿型天秤などにより測定した軸力係数から $C_{Xb_{st}}$ を差し引き、forebody 軸力係数を求める。このとき、第 12 図を用いて $C_{Xb_{nst}}$ を算出しておく。
- 3) その forebody 軸力係数に $C_{Xb_{nst}}$ を加え、全機軸力係数を求める。

このとき、cavity 圧を含めて補正する場合は、併せて cavity 圧 p_c も取得しておく必要がある。その cavity 圧 p_c を用いて、第 (5) 式に示すように、スティング支持における

cavity 面積 S_{cs} にかかる、cavity 圧による軸力係数 $C_{Xb_{cs}}$ を求める。上述の手順 2) において、内挿型天秤などにより測定した軸力係数から $C_{Xb_{st}}$ だけでなく、 $C_{Xb_{cs}}$ も差し引くことにより、forebody 軸力係数を求める。

$$C_{Xb_{cs}} = - \int_{S_{cs}} (p_c - p_\infty) dS / q_\infty S_b \quad (5)$$

この補正を、より精度のよい補正にするためには、様々なスティング径と模型底面直径の組み合わせにおいて、試験を行うことが重要である。また、補正の一般性を拡張するためには、翼の有無などの模型形状やレイノルズ数を変化させて、さらにパラメトリックにデータを取得することが望まれる。

4. 結 論

切り立った底部を有する機体の base 圧分布について、スティングの有無、スティング径変化及び迎角変化に関して調べ、base 圧補正法の妥当性を検証するとともに、全機軸力推定のための base 抵抗推算方法について検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) スティング装着時、迎角 0° における base 圧分布は様である。しかしながら、迎角を有した場合、base 圧分布は様ではなくなり、また、スティング付近の base 圧とその半径方向外側における base 圧の値は異なる場合もある。したがって、スティング付近の base 圧と同様な base 圧が模型底面全体にもかかると仮定する base 補正は、迎角 0° においては妥当であるが、迎角を有した場合は妥当ではない。
- 2) 本研究で用いた鈍頭模型に対して、低速域において、全機軸力推定のための base 圧による軸力係数推算方法を提案した。この方法により、base 圧補正を行うために取得した base 圧を用いて、スティング支持のない状態での base 圧による軸力係数を求めることができる。また、この方法は、迎角を考慮したスティング支持がない状態での base 圧による軸力係数により全機軸力係数を算出することができるため、全機軸力推定精度が向上すると考えられる。

無線圧力計測システム構築に尽力して下さった九州大学技術職員の松原 学さん、貴重な助言をして下さった九州大学大学院修士課程の西村光正君、そして磁力支持天秤を貸与して下さいました三菱重工業 (株) 神戸造船所に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) HYFLEX 空力特性研究チーム: 極超音速飛行実験機 (HYFLEX) の空力特性, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1334, 1997.
- 2) NAL/NASDA HOPE 研究共同チーム HYFLEX サブグループ: 極超音速飛行実験機 (HYFLEX) の設計結果, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1466, 2003.
- 3) 野田順一, 石田清道, 関根英夫, 原 亘利, 榊原盛三, 河本 巖: 2 台の AGARD-B 標準模型による並列二段式往還機の超音速空力特性試験, 航空宇宙技術研究所資料 TM-692, 1996, p. 36.
- 4) 青木竹夫, 鈴木弘一, 中村正剛, 若松逸雄, 中野英一郎: 07/HOPE 遷音速対応風洞実験, 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-38, 1997,

第 12 図 スティング径と base 圧による軸力係数の関係

- pp. 139–154 .
- 5) 郭 東潤, 宮田勝弘, 野口正芳, 砂田保人, 李家賢一: 超音速航空機 (SST) 形態の高揚力装置に関する実験的研究, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1450, 2002 .
 - 6) 宮田勝弘, 李家賢一, 郭 東潤, 野口正芳: 超音速航空機 (SST) 形態の高揚力装置に関する実験的研究 第 2 報 丸い前縁形状の効果, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1456, 2003 .
 - 7) Kavanau, L. L.: Base Pressure Studies in Rarefied Supersonic Flows, *J. Aeronaut. Sci.*, **23** (1956), pp. 193–207.
 - 8) Jorgensen, L. H.: Prediction of Static Aerodynamic Characteristics for Space-Shuttle-Like and Other Bodies at Angle of Attack from 0° to 180° , NASA TN D-6996, 1973.
 - 9) Hoerner, S. F.: Fluid-Dynamic Drag, Private Publication, 1958, pp. 3-18–3-22.
 - 10) Britcher, C. P., Alcorn, C. W. and Kilgore, W. A.: Subsonic Sting Interference on the Drag of a Family of Slanted-Base Ogive-Cylinders, AIAA Paper 89-2206-CP, 1989.
 - 11) Tunnel, P. J.: An Investigation of Sting-Support Interference on Base Pressure and Forebody Chord Force at Mach Numbers from 0.60 to 1.30, NACA RM A54K16a, 1955.
 - 12) Cahn, M. S.: An Investigation of Sting-Support Effects on Drag and a Comparison with Jet Effect at Transonic Speeds, NACA Report 1353, 1958.
 - 13) Love, E. S.: A Summary of Information on Support Interference at Transonic and Supersonic Speeds, NACA RM L53K12, 1954.
 - 14) Lee, G., Summers, J. L.: Effects of Sting-Support Interference on the Drag of an Ogive-Cylinder Body with and without a Boattail at 0.6 to 1.4 Mach Number, NACA RM A57I09, 1957.
 - 15) Hart, R. G.: Effects of Stabilizing Fins and a Rear-Support Sting on the Base Pressures of a Body of Revolution in Free Flight at Mach Numbers from 0.7 to 1.3, NACA RM L52E06, 1952.
 - 16) Ericsson, L. E.: Review of Support Interference in Dynamic Tests, AIAA J., **21** (1983), pp. 1652–1666.
 - 17) Koh, J. C. Y.: A New Wind-Tunnel Technique for Providing Simulation of Flight Base Flow, *J. Spacecraft Rockets*, **8** (1971), pp. 1095–1096.
 - 18) Herrin, J. L. and Dutton, J. C.: Supersonic Base Flow Experiments in the Near Wake of a Cylindrical Afterbody, AIAA J., **32** (1994), pp. 77–83.
 - 19) Merz, R. A., Page, R. H. and Przirenbel, C. E. G.: Subsonic Axisymmetric Near-Wake Studies, AIAA J., **16**, 7 (1978), pp. 656–662.
 - 20) 河合宗司, 藤井孝蔵: LES/RANS hybrid 手法による亜音速から超音速にかけての Base 流れ現象の解明に向けて, 第 36 回流体力学講演会, 2004, pp. 59–62 .
 - 21) Kawai, S. and Fujii, K.: Computational Study of a Supersonic Base Flow Using LES/RANS Hybrid Methodology, AIAA Paper 2004-0068, 2004.
 - 22) Stoney, W. E., Jr.: Pressure Distributions at Mach Numbers from 0.6 to 1.9 Measured in Free Flight on a Parabolic Body of Revolution with Sharply Convergent Afterbody, NACA RM L51L03, 1952.
 - 23) 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一, 溝口也寸志, 岡田卓三: JAXA 60 cm 磁力支持天秤装置の 5 軸天秤較正試験結果, 日本航空宇宙学会論文集, **52** (2004), pp. 309–315 .
 - 24) 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一: 磁力支持天秤を用いた球の空気力測定, 第 36 回流体力学講演会, 2004, pp. 343–346 .
 - 25) Barlow, J. B., Rae, W. H. and Pope, A.: Low-Speed Wind Tunnel Testing, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999, pp. 322–325.
 - 26) 谷 一郎, 小橋安次郎, 佐藤 浩: 流体力学実験法, 岩波書店, 東京, 1977, pp. 266–281 .
 - 27) Alcorn, C. W. and Britcher, C. P.: An Experimental Investigation of the Aerodynamic Characteristics of Slanted Base Ogive Cylinders Using Magnetic Suspension Technology, NASA CR-181708, 1988.
 - 28) 佐藤淳造: 大型風洞壁面効果補正要領, 航空宇宙技術研究所資料 TM-237, 1972 .
 - 29) Kline, S. J. and McClintock, F. A.: Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, *Mech. Eng.*, **75**, 1 (1974), pp. 3–8.
 - 30) 佐藤 朗: 計測概論, 計量管理協会編, コロナ社, 東京, 1978, pp. 30–103 .