

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656514

研究課題名(和文) 磁力支持による超音速風洞実験法の研究

研究課題名(英文) Experimental techniques in a supersonic wind tunnel with Magnetic Suspension Balance System

研究代表者

大林 茂(OBAYASHI, Shigeru)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80183028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁力支持装置を用いた超音速風洞において磁力で模型を浮揚したまま風洞始動を可能とする実験技術を構築する。特に鍵となる2つの技術である、模型の高速姿勢位置測定用センサーの開発および集合胴圧の高速制御技術の開発を行った。高速・高精度なポジションセンサーによって速応性の向上および模型の位置・姿勢角の標準偏差が低減でき、高い精度で風洞測定部中心に支持することが可能となった。また、集合胴圧を高速に制御したことで、模型に作用する荷重が低減でき、模型を磁力で支持したまま超音速風洞の起動・通風・停止に成功した。

研究成果の概要(英文)：Experimental techniques in a supersonic wind tunnel with Magnetic Suspension Balance System (MSBS) are developed in this research to suspend a model against starting load without mechanical support. The principal results were obtained as the following; a suspended model was accurately positioned at the center of a test section by the newly-developed fast response control system of MSBS, and the starting load was decreased by adjusting a total pressure within a setting chamber, making it possible to magnetically suspend a model in a supersonic wind tunnel testing.

研究分野：数値流体力学

キーワード：ソニックブーム 磁力支持 超音速流 風洞

### 1. 研究開始当初の背景

近年、民間の超音速輸送機 (SST) の分野では、小型超音速旅客機や超音速ビジネスジェット (SSBJ) の開発計画が世界的に注目されている[1,2]. 国際民間航空機関 (ICAO) では、これらの動きに対応して 2016 年に民間超音速飛行に関するソニックブーム基準策定を計画している. 我が国でも、第 3 期科学技術基本計画の分野別推進戦略においてソニックブームの低減が掲げられ、これに対応して文部科学省では「次世代超音速機技術の研究開発」が重点的に進めるべき研究開発として取り上げられ、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において 2011 年に気球投下による低ブーム技術実証試験が行われた[3]. 2010 年 3 月からは日本航空宇宙学会において申請者を主査とするソニックブーム研究会が発足し、JAXA・学会を中心に組織を横断してオール日本で超音速機の研究開発に取り組む体制が整いつつある.

低ブーム超音速飛行の研究が日米欧において注目を浴びている中、申請者らは、独自の低ブーム技術として超音速複葉翼理論を提案し、現在バリスティックレンジ実験の高度化に取り組んでいる. バリスティックレンジ実験では、模型の支持干渉がないため計測の精度は高いが、模型が使い捨てになり、模型のサイズが小さいため、費用面から工作精度に制限を設けざるを得ない. 一方、風洞装置を利用した飛行試験の代替実験技術である磁力支持装置 (MSBS) では、磁力で模型を浮揚させることが可能であり、支持干渉のない理想的な計測ができ、磁気力の計測により空気力も同時に評価できる. しかし、超音速風洞では始動荷重に耐える必要があり、かつて ONERA [4] で超音速風洞に適用されたときには、可動式支持が用いられ、揚力を持たない軸対称模型に限られていた. 有翼模型を扱う場合、風洞の起動・停止荷重が定常状態の数倍の大きさで加わり、しかもその作用点が高速に移動するため、磁力支持が困難になる.

### 参考文献

- [1] エアリオン社 : <http://www.aerioncorp.com/home>
- [2] SAI 社 : <http://www.saiqsst.com/>
- [3] JAXAD-SEND データベース : [http://d-send.jaxa.jp/d\\_send.html](http://d-send.jaxa.jp/d_send.html)
- [4] Moreau, R., Summary of ARL Symposium on Magnetic Wind Tunnel Model Suspension and Balance Systems, pp. 199-245 (1966).

### 2. 研究の目的

MSBSは、磁力で模型を浮揚させることが可能であり、支持干渉のない理想的な計測が期待されているが、有翼模型などを用いた超音速風洞実験においては、始動荷重に耐えるために可動式支持機構が必要となり、模型形状

に制約が生じる. 本研究では、世界各国で進められている低ブーム理論の検証を行うとともに、空気力特性とのトレードオフを見極めるため、超音速風洞において磁力で模型を浮揚したまま風洞始動を可能とする実験技術を構築する.

### 3. 研究の方法

本研究では、東北大学流体科学研究所に既設の吸込み式超音速風洞と JAXA より移管された 10cm MSBS を改良して、MSBS 超音速実験法を研究し、鍵となる 2 つの技術である、模型の高速姿勢位置測定用センサーの開発および集合胴圧の高速制御技術の開発を行う.

MSBS (図 1) とは、模型内の磁石と周辺の磁場を干渉させることで模型を浮揚させ、支持干渉のない状況での風洞試験を可能にする装置である. それ以外の長所としては、制御状態から模型に加わる空気力を評価できる天秤としての機能を持つこと、作用する空気力が小さくても容易に空気力測定が可能であることが特徴として挙げられる.

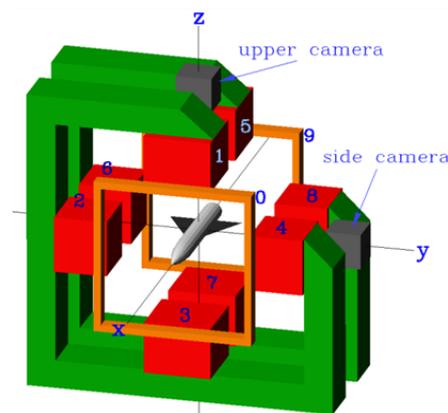


図 1 MSBS 設置概念図 (赤・橙色がコイル)

(1) 高速姿勢位置測定用センサーの開発 : MSBS において模型の位置・姿勢を計測するためには、非接触、高応答、高精度といった条件が課せられ、それらすべてを満足するセンサーには可視光線を利用したものが適切である. 東北大学の MSBS では、CCD 素子を 1 列に並べたラインセンサーを複数同期使用し模型の位置・姿勢を計測する手法を用いている. このようなラインセンサーを利用したセンサーは、模型からの反射、模型による遮光を利用したものがあがるが、遮光を利用した場合センサー出力の模型の形状依存性から較正試験が困難である. そこで本研究では JAXA の 60 cm-MSBS で使用されているセンサーを基に、市販の高応答・高分解能 CCD ラインセンサーカメラを利用したポジションセンサーを新たに開発する. このセンサーは JAXA のセンサーとは異なり、ハーフミラーを使用することで像を増やし CCD ラインセンサーを

任意の位置に設置可能なセンサーであり、従来では位置・姿勢計測が困難であった模型形状に対しても適用可能である。

(2)集合胴圧の高速制御技術の開発：東北大学流体科学研究所に既設の吸込み式超音速風洞に集合胴（図 2）を設置し、風洞上下流部のバタフライ弁の開閉タイミングの調整することで、模型に作用する起動・停止荷重が低減できる集合胴圧の高速制御技術を開発する。バタフライ弁の開閉は微調整ができ、高精度な制御が可能である。また、集合胴設置によって生じる気流の乱れを抑えるため、拡張ディフューザ、多孔板、ハニカムおよびメッシュ 2 枚を取付けて、計測部に一様な気流を供給する。

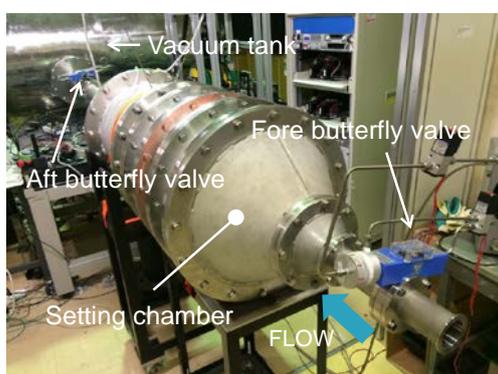


図 2 集合胴の全体写真

#### 4. 研究成果

高速姿勢位置測定用センサーの開発：機械支持機構なしで始動荷重を磁力支持可能な制御系を実現するために高速・高精度なポジションセンサーを開発した。較正試験を行った結果、計測分解能および計測周波数ともに既存の MSBS の 2 倍以上の高性能化を確認した。計測周波数が高速化したことでステップ応答の立ち上がり時間が 30% 改善し、制御系の速応性を向上させることに成功した。また、計測分解能が向上したことで、模型の位置・姿勢角の標準偏差を低減でき、高い精度で風洞測定部中心に支持することが可能となった。さらに、センサーの計測周波数が向上したことで外乱抑制性能も向上した。既存の MSBS と比較した場合、起動停止荷重の周波数特性において大振幅が予想される 20 Hz 以下の外乱に対して模型変位を 50% に抑えることが可能となった。

定常空気力計測においてもセンサー性能向上の影響が表れると考えられる。制御周波数を 1kHz 以上にしたことで外乱による模型変位が半分抑えられ、同程度の定常空気力精度を得るために必要な平均化回数が少なることで必要な計測時間が短縮され、試験時間の短い間欠式風洞にとって重要な性能改善が期待できる。

集合胴圧の高速制御技術の開発：模型に作用する始動停止荷重を低減し、有翼模型などの複雑形状の模型においても磁力保持を可能にするため、集合胴圧の高速制御技術を開発し、超音速風洞試験を実施した（図 3）。集合胴圧の変化と測定部の風速を評価した結果、バタフライ弁の開閉タイミングの制御によって、低圧での起動・停止に成功し、風洞が正常に始動でき、集合胴圧を制御していない場合と比較すると、模型に作用する荷重が 80% に低減できた。また、超音速流れを維持したまま長い時間風洞が始動でき、風洞内の総圧が上昇できたため、レイノルズ数低下の回避に成功した。

集合胴設置によって生じる気流の乱れを抑えるため、集合胴内に多孔板、ハニカムおよびメッシュを設置し、測定部断面及び気流方向のマッハ数一様性について評価した結果、測定部断面においてマッハ数の非一様性は最大で 0.6% 以内となり、測定部断面及び気流方向のマッハ数は測定部中心において対称性が得られた。

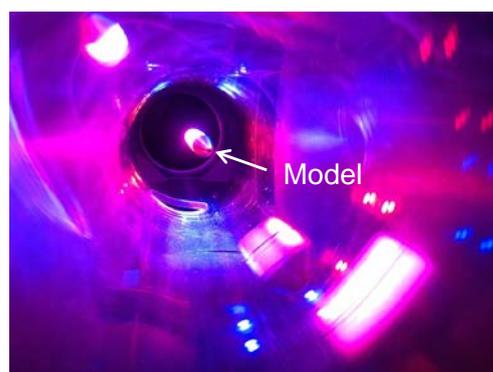


図 3 MSBS による磁力保持模型

本研究では、IT 技術を利用した模型の高速位置姿勢測定用センサーと、風洞起動・停止荷重を大幅に減少させる集合胴圧の高速制御技術を開発し、超音速風洞において磁力で模型を浮揚させる実験技術を構築した。今後、本研究で開発した超音速磁力支持技術を利用して、有翼形状などの複雑模型を用いて低ブーム理論の検証を行うとともに、空気力特性とのトレードオフを見極めていきたい。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

1. 大林茂，澤田秀夫，小西康郁，磁力支持天秤を生かしたフライト計測融合低乱熱伝達風洞設備，日本航空宇宙学会誌，Vol.62, No.6, pp.22-29, (2014.6.5). 査読有

〔学会発表〕（計 8 件）

1. 大嶋龍, 澤田秀夫, 大林茂, 磁力支持天秤装置を用いた動的風洞試験法の可能性～動安定微係数計測精度, 一般社団法人日本航空宇宙学会第 46 期定時社員総会および年会講演会, 東京大学山上会館, (2015.4.16).
2. 横山学, 大嶋龍, 高木良規, 澤田秀夫, 大林茂, 磁力支持天秤装置のための集合胴圧制御による超音速風洞の起動停止荷重低減法について, 第 46 回流体力学講演会/第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 青森県弘前市, (2014.7.3).
3. 大嶋龍, 澤田秀夫, 大林茂, 磁力支持天秤装置による多自由度非定常運動の検証実験, 日本航空宇宙学会北部支部 2014 年講演会, 仙台, 日本, (2014.3.10).
4. Yoshiki Takagi, Hideo Sawada and Shigeru Obayashi, Development of a Magnetic Suspension and Balance System for Supersonic Wind Tunnels, 52nd AIAA Aerospace Sciences Meeting (Scitech 2014), National Harbor, USA, (2014.1.16). AIAA-2014-1312
5. 大林茂, 超音速吸い込み風洞用磁力支持天秤の開発, 平成 24 年度航空宇宙空力班シンポジウム, 京都 (2013.1.25)
6. Yoshiki Takagi, Hideo Sawada, Shigeru Obayashi, Axis Calibration Test Results for 85mm Magnetic  $\phi$  Suspension and Balance System, 2012 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2012), Jeju, Korea (2012.11.13).

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
大林茂 (OBAYASHI, Shigeru)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号 : 80183028

[図書] (計 0 件)