

# L7 超音速吸い込み風洞用磁力支持天秤の開発

○大林茂、澤田秀夫、小野里卓也、高木良規（東北大流体研）

Development of Magnetic Suspension and Balance System for Supersonic Suction Wind Tunnel  
Shigeru Obayashi, Hideo Sawada, Takuya Onozato and Yoshiki Takagi (IFS, Tohoku Univ.)

Key Words : Magnetic Suspension and Balance System, Supersonic Wind Tunnel

## 1. はじめに

本研究は、低ブーム超音速飛行体の研究開発で必要となる低ソニックブーム設計技術を機体近傍場で検証するための実験システム構築を目的としている。その初期段階として支持干渉のない風洞試験が可能な磁力支持天秤装置及びφ85mm超音速風洞を開発した。

超音速磁力支持天秤装置の設計指針となるのが超音速風洞特有の起動停止荷重対策である。これまで超音速風洞への磁力支持天秤装置の適応例は複数例報告されている<sup>[1]</sup>。過去の適応例は、本装置と比べ測定部が大きく起動停止時には機械支持を行うことで起動停止荷重への対策を行っていた<sup>[2]</sup>。しかしこの手法は、模型形状の制約や測定部が小型の場合機械支持機構を配置するスペースが限られるといった問題があり、本装置への導入は困難と考えられる。したがって本装置は風洞の起動から停止まで機械的支持無しに磁力支持を行う。

本稿では本装置の特徴である起動停止時の衝撃荷重を支えるためコイル配置、高出力アンプ、高速度・高分解能センサーについての検証結果、並びに測定部の気流検定結果を報告する。

## 2. 実験装置

φ85mm-磁力支持天秤装置(φ85-MSBS)を図1に示す。磁力支持天秤装置は、アンプ・コイル系、制御系、センサー系、及び浮揚模型で構成される。コイル系は図2のように#0, #9の空心コイル及び#1~#8の鉄心コイルが模型に関して点对称に配置されている。空心コイルは抗力方向の磁気力を発生させ、#1,3,5,7は揚力、ピッチングモーメント、また#2,4,6,8は横力、ヨーイングモーメントを発生させる。模型を支持する磁気力を発生させるコイル電流は、センサー系で計測される模型の位置・姿勢変位によって算出される。センサー系は図3のようにラインセンサーカメラ、光源、レンズ、フィルター、ハーフミラーで構成され、スクリーン上の光強度を一様にするため水平方向を赤、垂直方向を青色の光を用いて計測を行う。5

台のカメラの内4台は、模型のエッジに対して垂直に配置し、 $y, z, \theta, \phi$ を計測する。残りの一台は模型の中心にある黒いマーカーを読み取り、 $x$ 方向の変位を計測する。模型の位置・姿勢変位はカメラの素子番号から算出されるカウント値によって評価される。MSBSの制御系は図4のようになり、PI制御+2重位相進みで構成されている。

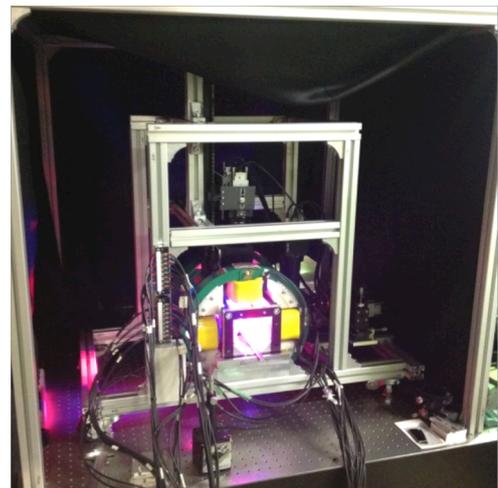


図1 φ85mm-MSBS

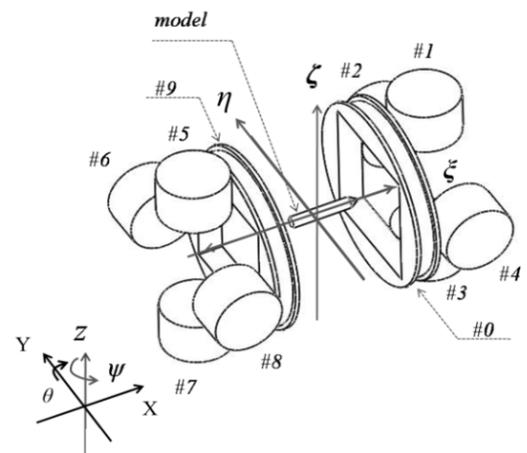


図2 φ85mm-MSBS コイル配置

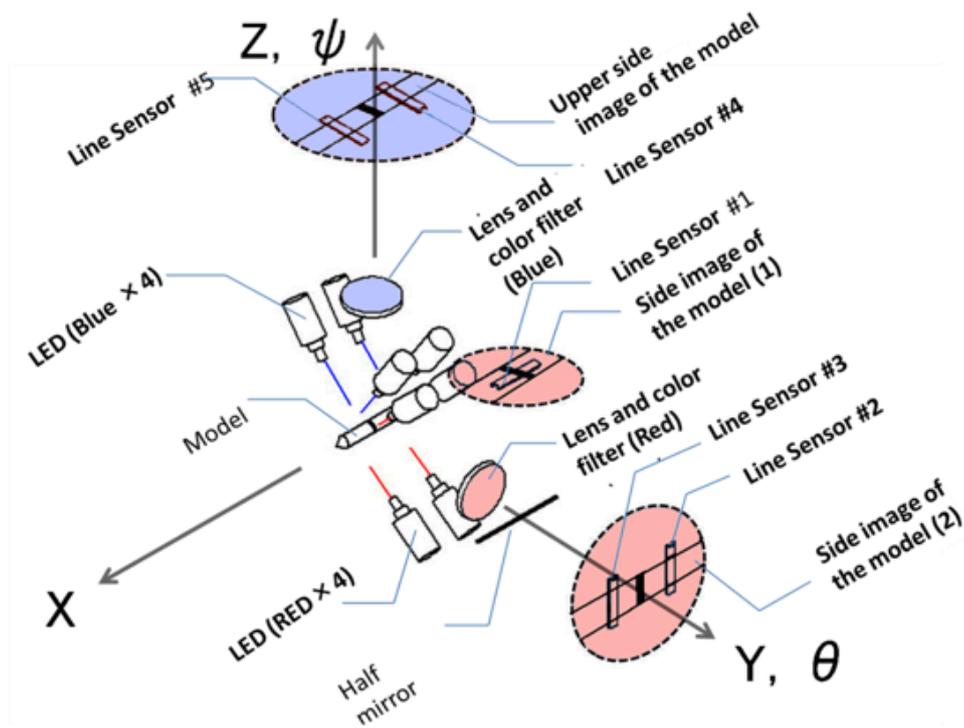


図3 センサー系全体図

$$x_0 = \frac{u_{max}^{#1} + u_{min}^{#1}}{2} - r\psi$$

$$y_0 = -\frac{w_{max}^{#4} + w_{min}^{#4} + w_{max}^{#5} + w_{min}^{#5}}{4}$$

$$z_0 = -\frac{w_{max}^{#2} + w_{min}^{#2} + w_{max}^{#3} + w_{min}^{#3}}{4}$$

$$\theta = -\frac{w_{max}^{#2} + w_{min}^{#2} - w_{max}^{#3} - w_{min}^{#3}}{4u_0}$$

$$\psi = -\frac{w_{max}^{#4} + w_{min}^{#4} - w_{max}^{#5} - w_{min}^{#5}}{4u_0}$$

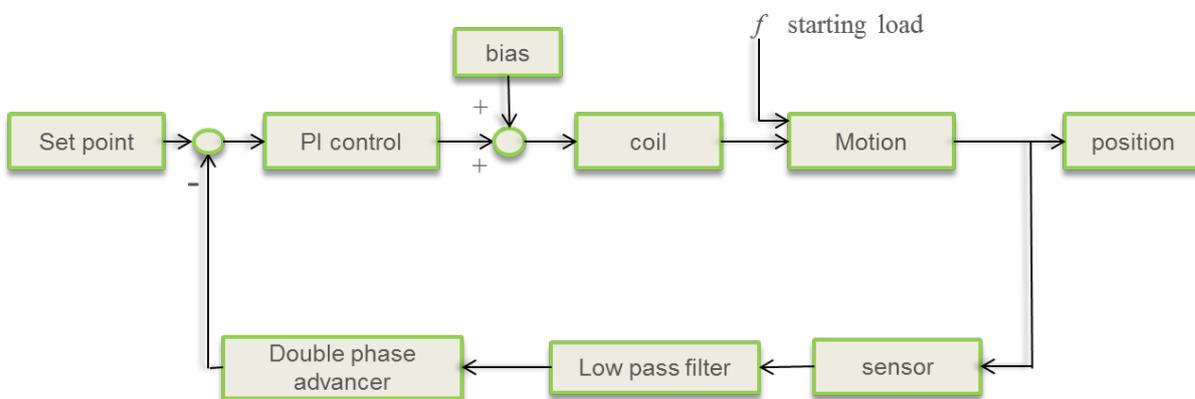


図4 MSBS制御系

### 3. 検証

#### 3-1 アンプ・コイル系

まずアンプについて述べる。アンプの要求性能は模型の運動周波数によって決定される。模型をヒー

ピング運動させる場合

$$m\ddot{x} = H_{xx}M_0$$

$$x = A\sin\omega t$$

より

$$H_{xx} = -\frac{m}{M_0}A\omega^2\sin\omega t$$

であるから

$$\frac{\partial H_{xx}}{\partial t} = -\frac{m}{M_0}A\omega^3\sin\omega t$$

逆起電力は

$$V = -\mu_0SN\frac{\partial H_{xx}}{\partial t}$$

となるから

$$V = -\mu_0SNA\omega^3\frac{m}{M_0}\sin\omega t$$

と概算される。上式から模型に内蔵された磁石がコイルの成す磁界中を角周波数 $\omega$ で運動する際発生する逆起電力を見積もることができる。X方向の運動を考えると振幅4mm,周波数40Hzで運動した場合加わる逆起電力は約92Vとなる。コイルのインピーダンスを約0.86 $\Omega$ とすると105Aの電流が必要になる。本装置で採用している抗力アンプは印加電圧150V、連続出力電流60A、最大瞬間電流120Aであり、瞬間的になら40Hzの運動まで行うことができると考えられる。しかし熱の問題からこの場合9600Wの発熱が予想されるため、風洞の起動停止のような極めて短い時間に限って対応可能である。

次にコイル配置について述べる。抗力方向に発生する磁気力は空芯コイル一辺の長さ2a,コイル間隔2 $\xi$ ,磁石長さ2aとして下式のように評価できる。下式は図5のように極大値を取ることから、図6の本装置では $\xi/a=0.6$ となり従来型の1.8と比して抗力方向の磁気力を効率良く発生させることができる。

$$F_{mag,x} \propto \left\{ \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\xi}{a} - \frac{\xi}{a}\right)^2\right)\sqrt{2 + \left(\frac{\xi}{a} - \frac{\xi}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\xi}{a} + \frac{\xi}{a}\right)^2\right)\sqrt{2 + \left(\frac{\xi}{a} + \frac{\xi}{a}\right)^2}} \right\}$$

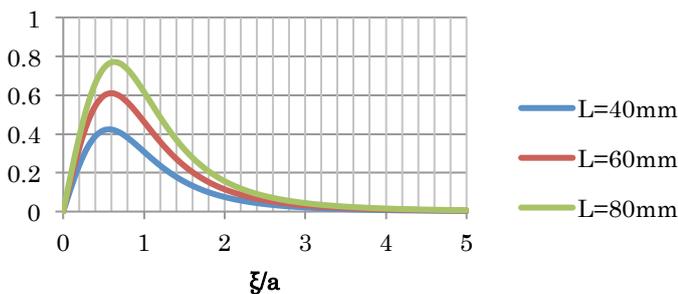


図5 コイル間隔と磁気力

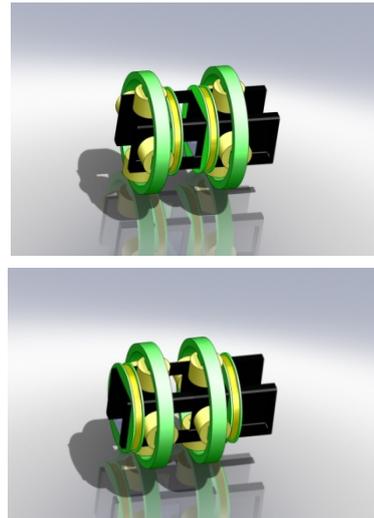


図6：コイル配置 超音速型(上)、従来型(下)

### 3-2 センサー系

センサー系で使用するラインセンサーカメラは素子数7450,素子サイズ $4.7 \times 4.7 \mu\text{m}$ ,計測周波数1.25kHz~5kHzである。較正試験の結果は図7から11のようになり、各軸の変位と素子番号から計算されたカウント値は線形関係になっている。分解能は表のようになり、同型のセンサー系を採用しているJAXAのMSBSと比べて分解能、計測周波数共に2倍以上の高性能化に成功している<sup>[3,4]</sup>。センサーのむだ時間が小さくなったことで図12のようにシステム全体の根軌跡は安定側へシフトしている。これにより安定条件を満たすコントローラゲインはより大きくなり制御の速応性が向上したと考えられる。

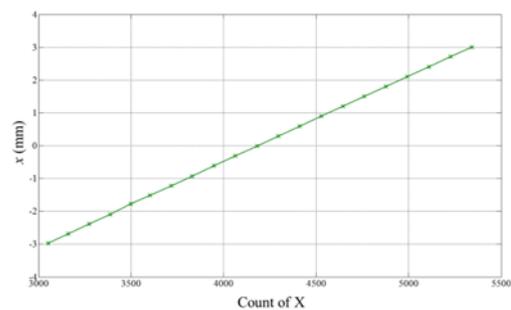


図7 較正結果(x方向)

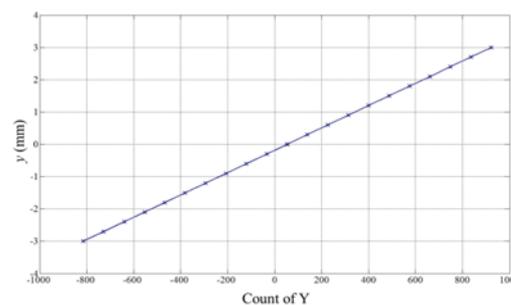


図8 較正結果(y方向)

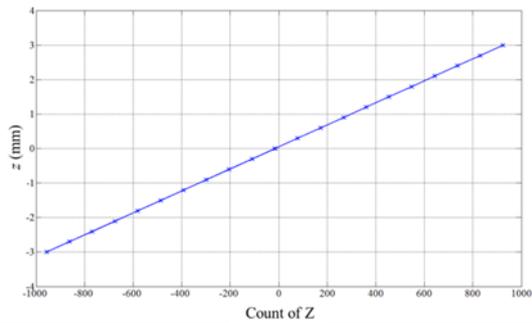


図9 較正結果(z方向)

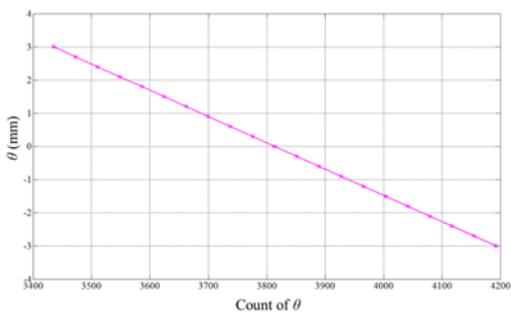


図10 較正結果( $\theta$ )

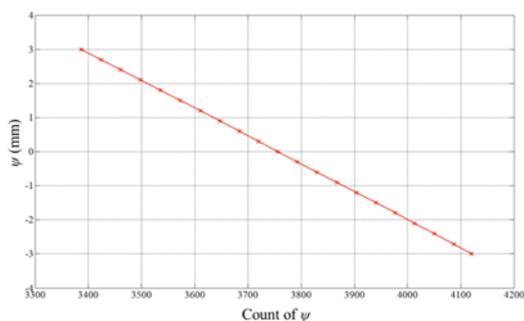


図11 較正結果( $\phi$ )

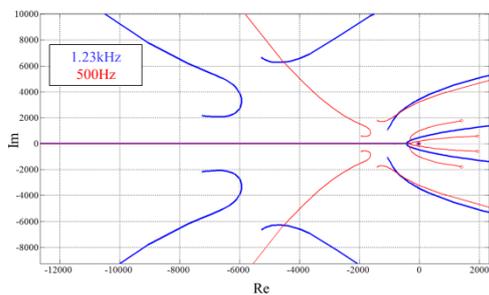


図12 MSBS根軌跡の比較

### 3-3 風洞始動時のシミュレーション

浮揚に成功した制御定数を元に、風洞起動時の模型の変位をシミュレーションした。始動過程は実験によって得られた壁面静圧をもとに推算し、模型の抗力係数は定常値を用いた。図13は始動過程の模型の変位を表している。この時x方向に最大10mmの変

位が予想される。コイルに流す制御電流を算出するために必要な模型の位置・姿勢変位はセンサーの視野内約5mmに限られるため、この状態での支持は不可能である。そこで、衝撃荷重が加わる0.1secの間30Aの抗力電流を流した結果を図14に示す。この場合最大変位は約4.6mmとなり、模型の変位をセンサーの視野内に収めることができる。今後浮揚模型に加わる抗力履歴を試験によって求め、予め加える電流値を決定することで機械的支持無しに磁力支持を行うことができると考えられる。

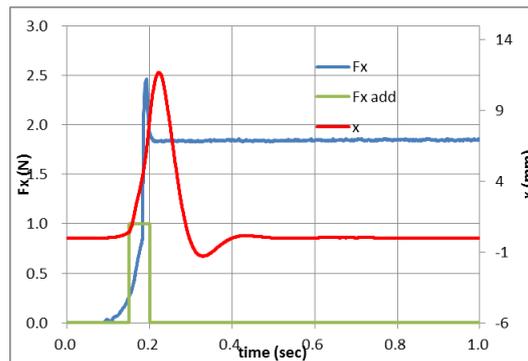


図13 模型変位 バイアス電流なし

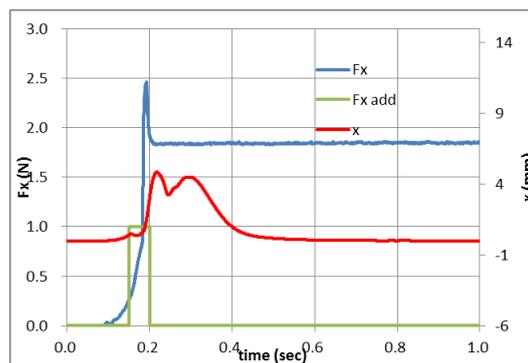


図14 模型変位 バイアス電流30A

## 4. 測定部の気流検定結果

新たにノズルを設計し、測定部の気流検定を行った。ノズルは特性曲線法で設計し、Fluent<sup>[5]</sup>で粘性解析を行い、境界層厚みを評価し、設計にフィードバックした。図15に設計結果のCFD解析結果を示す。設計マッハ数は1.7である。ノズル出口直径 $\Phi 85.0$  mm、ノズル全長299.2 mm、スロート直径 $\Phi 71.6$  mmである。測定部でほぼ目標とするマッハ数1.7の様な流れができています。図16に気流検定結果を示す。流れ方向にほぼ測定部中央となる断面においてマッハ数1.75が実現できている。ただ、流れ方向にマッハ数が変化しており、ノズルと測定部との結合部において、軸がずれており段差が生じてしまっている可能性がある。

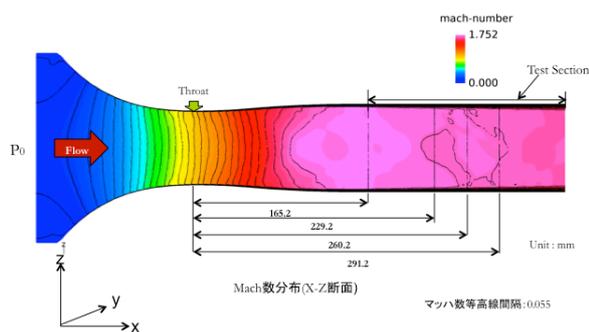


図15 ノズルCFD解析結果

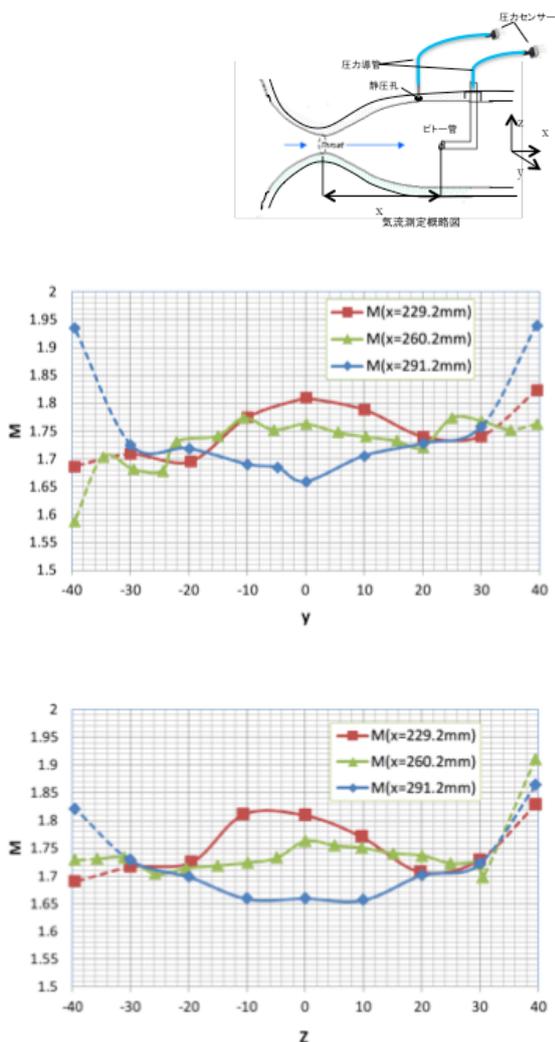


図16 測定部の気流検定結果

## 5. まとめ

超音速風洞特有の起動停止荷重に対して機械的支持を必要としない磁力支持天秤装置及びφ85mm超音速風洞を開発した。装置開発のポイントは、制御の速応性であり、新たに開発したMSBS制御系によ

り機械的支持無しに磁力支持を行うことができる可能性が示された。また、ノズル部も新たに製作し、超音速で始動することを確認した。今後浮揚模型に加わる抗力履歴を試験によって求める。

## 6. 参考文献

- [1] Richmond P. Boyden: “A REVIEW OF MAGNETIC SUSPENSION AND BALANCE SYSTEMS”, *Aerodynamic Testing Conference, 15<sup>th</sup>*, San Diego, CA, May 18-20, 1988.
- [2] Moreau, Roland: “Use of Magnetic Suspension System in O.N.E.R.A. Wind Tunnel”, Summary of ARL Symposium on Magnetic Wind Tunnel Model Suspension and Balance Systems, pp.199-245, Aril, 1966.
- [3] H. Sawada, H. Kanda and H. Suenaga: “The 10cm × 10cm Magnetic Suspension and Balance System at the National Aerospace Laboratory”, *29<sup>th</sup> Aerospace Science Meeting*, Reno, Nevada, January 7-10, 1991.
- [4] 澤田 秀夫, 国益 徹也: “低速風洞用60cm磁力支持天秤装置の開発”, 日本航空宇宙学会論文集, 第50巻, 第580号, 2002.
- [5] <http://ansys.jp/products/fluid/fluent/> アクセス Jan.11, 2013.