

特集 磁気浮上技術

風洞用磁力支持天秤装置

A Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnels

澤田 秀夫^{*1}

Hideo SAWADA

Principle, features and history of the Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) for wind tunnel are described. Some features of the JAXA 60cm MSBS are also introduced. It has the largest dimensions of the world. It is equipped with the 60cm low speed wind tunnel. It has been worked in order to provide aerodynamic researchers with valuable data sets using MSBS features like support interference free condition. Besides, present research plans at JAXA relating to the MSBS are introduced; they are MSBS research for a high subsonic wind tunnel and application to a seismometer and to a small ultra-high pressurized wind tunnel.

Keywords: magnetic suspension, balance, wind tunnel testing technology, wind tunnel.

1 緒言

磁力支持天秤装置(Magnetic Suspension and Balance System, 以降 MSBS と呼ぶ) は磁気力で模型を気流中に支持する装置で、模型支持に伴う支持装置と気流の干渉を避けるために考案された。Fig. 1 の飛行船模型の様に模型は測定部中に何ら支持用の支柱も無く静止している。実際は完全な静止状態では無く極僅か運動しているが、位置姿勢を元に戻すように、測定部の周りに配置された多数のコイルに流す電流が高速に調整されている。コイルに流す電流から模型に作用している磁気力を評価でき、MSBS は力を測定する天秤機能も併せ持つ。MSBS の特徴は支持干渉が無いこと以外に、風洞試験における運動模擬能力が高い、新しい対象物の風洞試験の可能性等が挙げられる。この様に本装置は他の試験装置には無い優れた特徴を持ちながらも未だ普及していない。しかしながら、我が国では近年徐々にではあるがMSBSの研究が広がり始めている。本稿では風洞用 MSBS の簡単な原理及び歴史と JAXA で開発した MSBS 技術について紹介する。

2 風洞用MSBSの特徴

磁気力で物体を浮揚させる技術は様々な分野で利用されている。航空機の開発や飛翔体周りの流れの研究で使われる風洞でも、磁気力を使った模型浮揚技術が求められ、古くから研究されている。風洞とは測定部と呼ばれる所に一様な気流を形成し、その中に模型

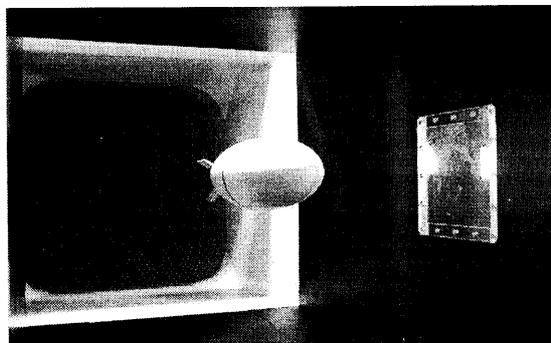


Fig. 1 An airship model suspended in the 60cm MSBS.

を設置して模型が静止した大気中を一定の速度で飛行している状態を相対的に模擬する装置である。模型を動かすのと異なり、観測者から見ると模型周りの流れが一定位置に留まっているので、流れの状態や模型に加わる空気力を測定し易いという利点がある。しかし、自動車や建物のように地上に有るものと異なり、空中を飛行する場合は、模型を何か機械的な物で支えなければ落下、或いは空気力で飛ばされてしまう。実際に飛行している航空機には風洞試験で用いる支持装置は付いていないから、支持装置の存在は風洞模擬能力を著しく劣化させる要因であり、是非とも取り除きたい対象である。

Fig. 2 は典型的支持装置に取付けた模型の例である [1]。支持装置の存在自体が模型の形状を実際と異なったものにしてしている他に、その存在が模型周りの流れに影響し、実際の飛行とは異なった流れを作り出してしまう場合も多々ある。こうした影響を風洞試験分野の技術者の間では支持装置干渉と呼んでいる。支持干渉は定量的に推定する方法が幾つか提案されているが、どれも完全にその影響を評価できているとは言い難く、

連絡先: 澤田 秀夫, 〒182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1, 宇宙航空研究開発機構, 総合技術研究本部, 空気力学研究グループ,

e-mail: sawada.hideo@jaxa.jp

^{*1}JAXA 総合技術研究本部

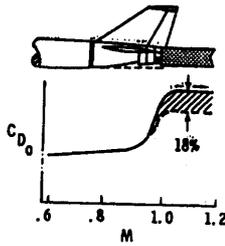


Fig. 2 Effect of support system (quoted from Ref.[1]).

支持干渉そのものが無い支持方法が強く望まれている。このため、磁気力で模型を浮揚できる磁力支持装置は風洞試験にとって夢の支持装置である。

風洞用 MSBS には他の磁気力を用いた浮揚装置と異なる特徴が幾つかある。その第一は磁気力を発生させるコイルと模型の距離が非常に大きいことである。風洞試験では測定部の中を高速気流が流れるので、その中にコイルが入っているのは支持装置干渉が新たに生じるので意味がなくなる。このためコイルは必ず測定部外に設置するので模型とコイルの距離は必然的に大きくなる。同時に模型の位置姿勢を測定するセンサーも離れた所から高速高精度に測定することが求められる。JAXA 60cmMSBS[2]ではコイルと模型の距離は320mmあり、世界最大である。第二に風洞用 MSBS では磁気力で浮揚させる模型の姿勢を自由に変更できるようにしている。風洞試験では模型の姿勢変化に伴う空気力変化を測定する。このため、模型の位置や姿勢角を変更できる様にコイルを多数配置し、それぞれが別の機能を持つように制御される。Table 1に Fig. 3

Table 1 Specifications and roles of the JAXA 60cm MSBS. (I_i ... current through coil # i)

Coil #	Winding number	Size (mm)	Control coil current	Purpose
0,9	50	620 square	$(I_0+I_9)/2$	Drag
1,3,5,7	97 +97	200 square	$(I_1+I_3+I_5+I_7)/4$ $(I_1+I_3-I_5-I_7)/4$	Lift Pitching moment
2,4,6,8	100	200 square	$(I_2+I_4+I_6+I_8)/4$ $(I_2+I_4-I_6-I_8)/4$ $(I_2-I_4+I_6-I_8)/4$	Side force Yawing moment Rolling moment
Coil drive units	130V,120A in continuous mode ... 3 nits 130V,60A in continuous mode ... 4 nits			
Control	5 D.O.F. for models with a main magnet 6 D.O.F. for special models with pair magnets plus a main one			

で示す JAXA 60cmMSBS の 10 個のコイルとそれらの役割を示す。第三に、模型に作用する空気力を測定する機能が強く求められることである。風洞試験では空気力を測定する機能を天秤機能と呼び、通常精度 1% 程度が求められる。このように、風洞用 MSBS では天秤機能も通常兼ね備えているので、磁力支持天秤装置と呼ぶ。

3 風洞用MSBSの原理

模型に磁気モーメント M の永久磁石を組み込んだ場合に、模型に作用する磁気力は以下の基本式で表すことができる。なお、座標系としては Fig.3 に示す座標系を用いた。

$$F_{magnet} = (M \cdot \nabla)H$$

$$N_{magnet} = M \times H$$

$$\frac{d(mv)}{dt} = F_{magnet} + F_{aero} + F_{gravity},$$

$$\frac{d(I \cdot \omega)}{dt} = N_{magnet} + N_{aero} + N_{gravity},$$

ここで F, N は力とモーメントを表し、添え字の magnet は磁気力を、aero は空気力を、gravity は重力を示す。 m は模型の質量を、 v は模型重心位置の速度ベクトルを示す。また、 I は模型の慣性モーメントを表すテンソルを、 ω は角速度ベクトルを示す。模型内に組み込んだ永久磁石の磁化方向により制御する磁石周りの磁場強さ H は大幅に異なり、個々の風洞用 MSBS コイル系の特徴が現れる。例えば、Fig.3 の MSBS ではコイルは前後、上下、左右対称に配置され、模型内の永久磁石は模型軸に平行である。低速風洞用 MSBS では空

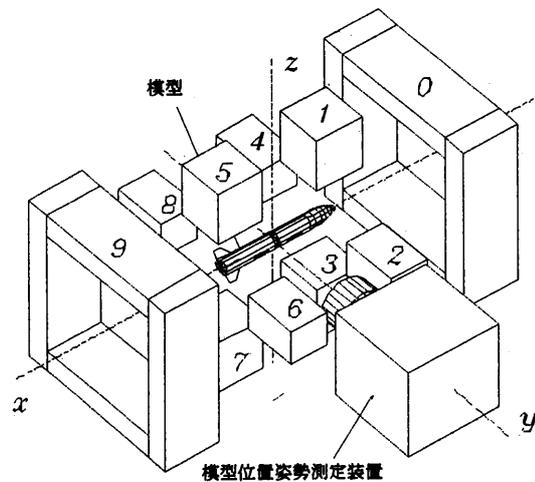


Fig. 3 Coil Arrangement of the JAXA 60cm MSBS.

気力自体は小さいので、設計では主に重力に逆らって模型を浮揚させるようにコイルを設計する。模型を水平に浮揚する場合は H_x が大きくなるように大型のコイルを上下に設置している。このようなコイル配置以外にも、コイルとパワーアンプの数を少なくする工夫をした MSBS も見られる[3]。

風洞用 MSBS ではコイルと浮揚させる模型の間の距離が大きいため、必要な磁場強さ成分を大きくする様々な工夫がされている。その一例が Fig.4 に示す JAXA MSBS の磁気回路を利用するもので、ヨークを使いできるだけ測定部に強い磁場を形成させ、同時に外部への磁場の漏れを抑え、試験時の人間への磁場の影響を低く抑えるようにしたものである。

この磁気回路を模型の前後に設置して模型内の磁石に図中の yz 軸に平行な力と yz 軸回りのモーメントを磁気力により作用させることができる。次に、Fig.3 の前後の空芯コイルにより、 H_x を制御することで x 方向の磁気力を制御できる。この結果、模型内に挿入した x 軸方向に磁化された永久磁石に対して、Fig.3 のコイル系は x 軸回りのモーメントを除く 5 つの制御された力を作用させることができる。先の基本式から永

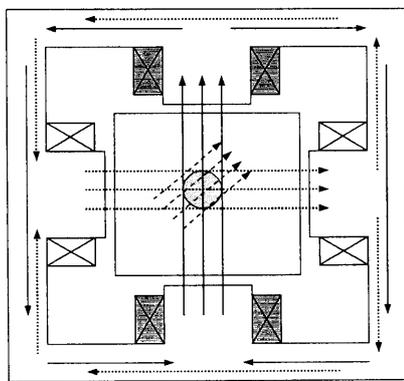


Fig. 4 Magnetic circuit of the JAXA 60cm MSBS.

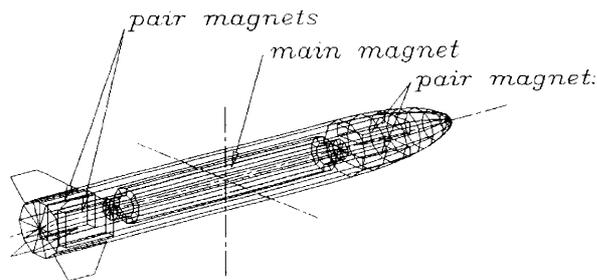


Fig. 5 A roll control model of the JAXA 60cm MSBS.

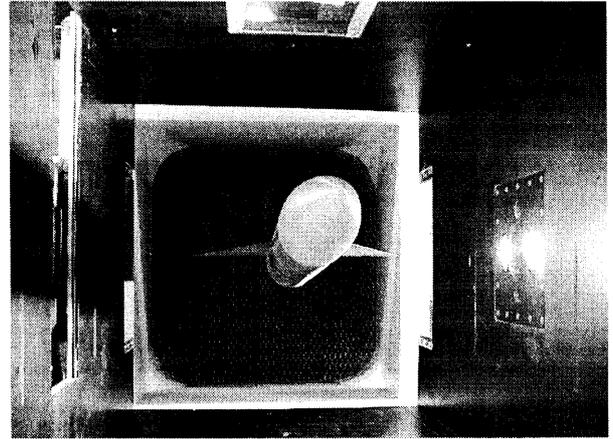


Fig. 6 A model magnetically suspended in 6 DOF control.

久磁石が x 方向の磁気モーメント成分しか持たなければ、 x 軸回りのモーメントは発生させることができない。このため、JAXA MSBS では x 軸方向に磁化された永久磁石の他に模型内に x 軸に垂直方向に磁化した小型磁石を Fig.5 の様に取付けている。この磁石に xz 面に関して対称で且つ xz 面に垂直方向の磁場を作用させると x 軸回りのモーメントを発生させることができる。Table1 の横揺れ制御の組合せで制御電流を流すと模型軸回りに回転モーメントを作用させることができる。Fig.6 は翼を持った非軸対称模型を軸回りの回転モーメントを制御して、6 軸制御で磁力支持している時の写真である[4]。

4 風洞用MSBSの歴史

磁力支持の考えは 1940 年代に始まり、1950 年代後半に ONERA で世界初の MSBS が製作された[5]。その後 1960 年代に研究が盛んに行われたが、1970 年代になると下火になった。その理由は装置の実用化の目処がたたなかったためと言われている。Table2 に示す様に製作された装置は総て小型で通常風洞試験で使用できる物とは言い難い。装置を大型化すると莫大な電気エネルギーを消費し、極めて大掛かりな物となることが懸念され、実用化が断念されたと考えられる。その後、低温風洞と呼ばれる小型でも大きなレイノルズ数を出せる風洞が実用化され、比較的小型の装置で実用的試験に利用できる様になったこと、超電導技術の進歩により大型の装置でも実現が可能な状況になったこと等により、1980 年代に NASA Langley 研究センターで MSBS の研究が開始されたが[6]、10 年ほどで再び下火となった。MSBS に関する文献は参考文献[7]にまとめられている。JAXA/ISTA では 1986 年に 10cmMSBS の

Table 2 MSBS's up to 1992, quoted from Ref.[10].

Magnetic Suspension and Balance Systems

Organization	Degrees of freedom*	Size, cm	Mass number	Use	Approximate dates of operation
ONERA	5	8.5 x 8.5	1 to 3	Drag, base pressure	1967-68
ONERA	5	6.0	7	Drag, base pressure	1968-62
Mass. Inst. of Tech. (MIT)	5	10.2 x 10.2	4.8	Static & dynamic	1962-71
ONERA	5	30.0	7	Base pressure & heat transfer	1962-71
University of Southampton	5/6	15.2 x 20.3	0 to 0.9	Static & dynamic	1962-present
NASA Langley	1	12.1	---	Research & development	1964-66
Princeton University	3	15.2	16	Wake studies	1964-70
University of Virginia	5	10.2	7.6	Cone & sphere drag	1964-77
AEDC/NASA Langley 15-inch MSBS	5	27.3 x 31.9	8/6 to 0.5	Wake studies / R & D	1965-70 / 1979-present
RAE	5	17.8 x 17.8	8.6	Biting effect & Magnus	1966-77
University of Michigan	1	6.1	Subsonic	Low Pin sphere drag	1963-71
MIT/NASA Langley 8-inch MSBS	5/6	15.2 octag.	0 to 0.5	Aero. testing / R & D	1968-82 / 1984-present
Oxford University	3	14	5 and 8	Low density sphere & cone drag	1871-75
University of Virginia	3	15.2	3 / Subsonic	Dynamic stability R & D	1973-82
Oxford University	3	12 x 12	Supersonic	Low density sphere & cone drag	1975-present
MAI / TsAGI (U.S.S.R.)	5	40 x 80	Subsonic	Aerodynamic research	1963-present
NAL (Japan)	5/6	10 x 10	Transonic	Research & development	1967-present
MAI (U.S.S.R.)	5	30 x 40	Subsonic	Research & development	1969-present
NAL (Japan)	5	60 x 80	Subsonic	Research & development	Under Construction

* degrees of active control

研究を開始し、翌年 10 月には縦方向の 3 軸制御による磁力支持に成功した。1989 年には吹き出式風洞に取付け、54m/s の気流中で模型を支持した。その後 1992 年に横揺れ制御を含む 6 軸制御装置に改良した[8]。10cmMSBS の研究と平行し、1991 年により大きな測定部を持つ 60cmMSBS を設計・製作した[9]。その後 1999 年に 60cmMSBS を低速風洞に取付け、磁力支持した模型の風洞試験を可能にした。2000 年度からは気流検定を実施し、力校正試験を経て 60cmMSBS を用いた実用的風洞試験が実施できるようになった[2]。

5 JAXA 60cm MSBSの特徴

JAXA 60cm MSBSには他のMSBSには無い特徴が幾つかある。その中でも測定部寸法が世界最大であること、実際に気流検定された風洞に常時装備されていて取得データは風洞試験結果として信頼できること、鈍頭物体周りの流れと抵抗の研究で成果を挙げていることについて紹介する。

5.1 世界最大の測定部寸法

MSBS の歴史で述べた様に、既存の MSBS の測定部寸法はどれも小さく、60cm の測定部は世界最大である。この大きさにできたのは磁場発生用の効率的磁気回路の採用、PWM 方式高効率パワーアンプの採用、高感度 CCD センサーの利用によるところが大きい。測定部寸法が大きいと模型を大きくでき、模型製作が容易

なこと、模型内部に機器を組み込める等の利点がある。一方、大型化には欠点もある。その第一は大きな模型にすれば磁石も大型になることである。大型永久磁石は玩具の小型磁石からは想像もつかない危険な代物である。磁石と何か鉄製の構造物の間に挟まれれば大怪我どころか生命の危険性もあり、十分慎重な取り扱いが必要となる。60cmMSBS で取り扱っている最大の磁石は直径 100mm、高さ 100mm のネオジ磁石である。この磁石が一旦測定部床に落ちると手で取り除くのは非常に困難で、且つ危険である。60cm 以上の測定部を持つ MSBS を設計することは可能であるが、模型内に入れる永久磁石の安全な取り扱いを考えると、これ以上大きな MSBS の製作には躊躇しているのが実情である。

模型内部に機器を組み込むことで色々な種類の試験が可能になる。例えば、球模型の内部に圧力変換器を組み込み、データを伝送することで通常の風洞試験で測定できなかった模型背圧を測定できるようになる。Fig.7 は球の模型内部に電池と圧力変換器、無線伝送システムを組み込んだ時の写真で、支柱干渉の無い状態で球の背圧を測定した例は世界初である。

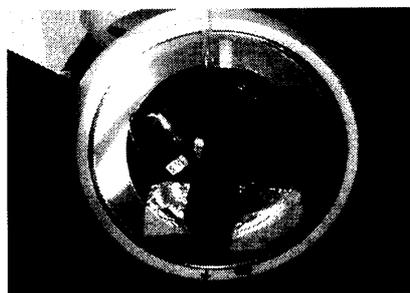


Fig. 7 Telemeter system in a 150mm dia. sphere mode.

5.2 60cm 低速風洞への装備

風洞用 MSBS は風洞に装備して初めてその価値が出る。また、風洞に装備することで MSBS 単体では意識しなかった様々な問題が生じてくる。その第一は測定部の材質である。風洞は通常鋼鉄製で、測定部の壁は強磁性体ということになる。MSBS 用の測定部ではこうした材料は避けなくてはならない。また、模型の位置姿勢を観測する窓を設ける必要があるが、測定部周りは MSBS のコイルとヨークで大部分が覆われてしまう。この結果、設計段階で測定部後方から模型の出し入れができるような配慮が必要となる。更に、大型模型では、最初に模型を台の上に置いて浮揚させ、その後、台を手で取り払うのは危険であり、模型を浮揚

させた後に測定部から退避できる模型把持装置が必須である。また、磁力支持中の模型の挙動を目視するためには窓が測定部上流に必要であろう。こうした条件を満たした例が Fig.8 の測定部に装着した JAXA 60cmMSBS の写真である。測定部周りには模型把持装置、その制御盤、パワーアンプ、MSBS 制御機器、計測器とかなりの広さの場所が必要となる。

風洞用 MSBS の天秤精度を維持するには天秤校正試験を容易にできるようにする必要がある。抗力校正試験は模型の後端を糸で引くようにすれば良いが、5 軸又は 6 軸の校正試験となると容易ではない。予め基準の錘を吊るして所定の力を模型に作用させる方法を考えておく必要がある。JAXA 60cmMSBS では模型把持装置の下面に磁場の影響が十分小さいことを確認した天秤を取り付け、模型を把持した状態で外部磁場を強制的に変化させ天秤校正を行っている。錘を吊るす方法に比べると精度は落ちるが、模型の姿勢を決めれば 1%程度の誤差内で力を測定できる[11]。

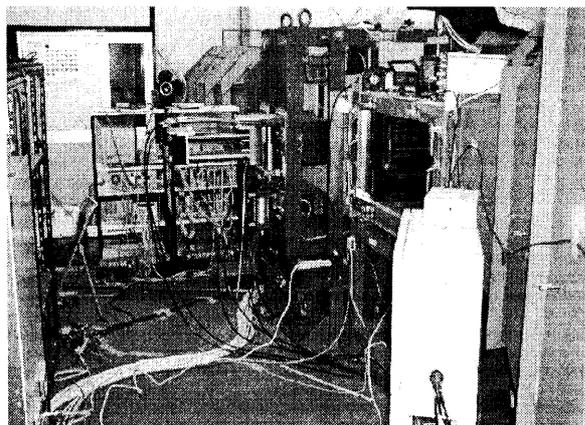


Fig. 8 The 60cm MSBS at 60cm low speed wind tunnel.

5.3 流体力学研究への支援

MSBS を用いて様々な流体力学関連の試験が実施されてきたが、実際の風洞試験技術や流体力学の研究で明確な貢献をした例は僅かである。この理由は、多分、風洞試験を MSBS 開発技術者が中心になって実施したことで、試験自体が有意義ではなかった場合が多いこと、風洞試験技術者が期待したほど優れた物でなかったことが考えられる。開発用の風洞試験では定量的測定は必須であり、精度は 1%では不十分な場合が多い。また、模型形状は複雑で模型の姿勢安定度は重要な要素であり、気流中の僅かな運動でも測定結果の信頼性に重大な疑念をもたらす。

JAXA 60cmMSBS では、現状の MSBS 技術で最大の効果を発揮できる試験を選択し、様々な分野の研究者、技術者と共同研究を実施している。その例として気流に平行に置いた有限長の円柱抵抗係数と後流の研究が挙げられる。この研究は科学研究補助金による研究課題で流体力学研究者と協力して有意義な試験になるよう慎重に実験を重ねている[12]。模型は単純であるが流体力学的には興味深い対象である。流れは円柱前面で剥離し、直径の約 1.6 倍の所で再付着し、その後乱流境界層となり円柱後縁に達し後流を形成している。剥離境界層の再付着、後流の再循環領域の形成等は未だに数値計算で信頼性の高い結果を出せない部分である。また、通常の模型支持では大きな支持干渉が危惧され、円柱の抵抗係数の測定は殆どできていなかった。更に、試験結果は 2 通りの傾向を示しており、どちらが正しいか明確ではなかった。磁力支持による抵抗計測では支持干渉が無いので抵抗測定値は既存の 2 通りの抵抗変化の傾向の内、どちらが正しいか結論付けることができた。正しいデータの提供は数値計算による流れ場計算技術の向上にも大いに貢献すると考えられる。

6 MSBSの新たな展開

6.1 高速風洞への適用

Table2 に示した様に風洞用 MSBS では高亜音速域で高レイノルズ数流風洞に適合する MSBS は無い。現在稼働している MSBS では高亜音速域で利用できる MSBS は無く、風洞用 MSBS の普及にはこの速度域の MSBS に関する技術研究の必要性が認められた。JAXA/ISTA では 10cmMSBS を遷音速低温風洞へ取り付けられるように改修し、マッハ数 0.5 以上の高亜音速流中で利用できる MSBS の研究を進めている。高亜音速 MSBS と低速の MSBS との違いは動圧と気流速度の大きな差異である。風洞総圧が 1 気圧で常温の時、風速 40m/s の場合とマッハ数が 0.7 の場合で比較すると、動圧は約 26 倍、風速は約 6 倍となる。この結果、同じ寸法の模型では同じ空力係数でも空気力は 26 倍になり、変動空気の周波数域は 6 倍高くなると予想される。このため、最初の課題として、風洞総圧 2bar で風速 100m/s 以上の気流中で模型を磁力支持することを目指した。Fig.9 に遷音速低温風洞測定部中で磁力支持されている軸対称模型の写真を示す。動圧 13.4kPa、風速 130m/s までの流れの中での磁力支持試験の結果

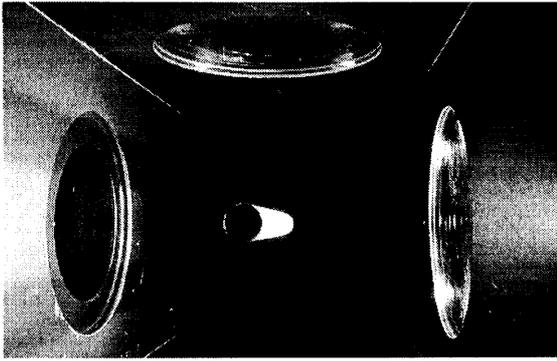


Fig. 9 A model magnetically suspended in the transonic cryogenic wind tunnel.

によると、気流の高速化により顕著に現れる現象は変動空気力による模型の運動であった。

6.2 地震計，振動計としての応用

MSBS はバネで大きな質量を支持している地震計に似ている。バネの代わりに MSBS では磁気を用いている。バネ定数は制御系の比例ゲインに対応し、その調整は容易で、地震計としても優れた特徴を持つ。以下のような記号を導入すると、

- $\mathbf{r}_{\text{model}}$... 慣性系に於ける浮揚模型の位置。
- \mathbf{r}_{MSBS} ... 慣性系に於ける磁力支持装置の位置。
- $\mathbf{r}_{\text{sensor}}$... センサーで計測した浮揚模型の位置。
- m ... 浮揚模型の質量。
- $\mathbf{F}_{\text{magnet}}$... 模型に作用させている磁気力。
- $\mathbf{F}_{\text{gravity}}$... 模型に作用している重力。

模型位置の関係は

$$\mathbf{r}_{\text{model}} - \mathbf{r}_{\text{MSBS}} = \mathbf{r}_{\text{sensor}}$$

運動方程式は

$$m\ddot{\mathbf{r}}_{\text{model}} = \mathbf{F}_{\text{magnet}} + \mathbf{F}_{\text{gravity}}$$

となる。重力変化を無視し、上式の長時間平均を取れば、平均的には模型は同じ位置に留まっているので、

$$\overline{\mathbf{F}_{\text{magnet}}} + \mathbf{F}_{\text{gravity}} = 0$$

である。ここで、 $\mathbf{F}_{\text{magnet}}$ 上部の横棒は平均操作結果を表す。よって、

$$\ddot{\mathbf{r}}_{\text{MSBS}} = -\ddot{\mathbf{r}}_{\text{sensor}} + \frac{1}{m}(\mathbf{F}_{\text{magnet}} - \overline{\mathbf{F}_{\text{magnet}}})$$

となり、地震の変位は上式を2回積分することで得られる。この時、 $\mathbf{r}_{\text{sensor}}$ 、 $\mathbf{F}_{\text{magnet}}$ 、等は計測、又は評価できる量であるから、結局、MSBS が地表に固定されていれば、慣性系に対する地表の時間変位が地震波とな

るので、 \mathbf{r}_{MSBS} が地震波を示しているので、地震波を測定できることになる。特に、磁気力変動量に対し m が非常に大きい時は最後の式で右辺第2項が無視でき、地震波はセンサーで計測した模型位置変化の反対符号に相当する。一方、磁気力変動量に対して m が非常に小さく、右辺第1項が第2項に対して無視できる場合も有り得る。この時は丁度、第2項は地震波の加速度を表し、MSBS は加速度計として機能する。通常地震計の機能を得るには、この両極の場合に近い条件を設定する。更に MSBS ではセンサー出力と磁気力の両方を同時に計測でき、上記条件の中間の場合も地震波を推定できる。

Fig.10 に磁力支持試験の最中に偶然測定した地震波の測定例を示す。x方向が東西、y方向が南北、z方向が上下方向を示している。模型はロケット形状で40g程度の質量であり、地震測定用に調整した物ではないので、振幅が地震波そのものを表すものではないが、地震波を明瞭に捉えた事は確かである。細線では地震波が無い時を示し、太線は地震があった時の模型位置変動を示した。

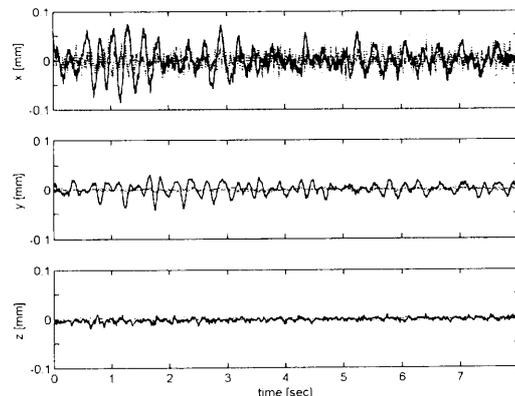


Fig. 10 Observed earthquake by the JAXA 10cm MSBS.

6.3 小型超高压風洞用 MSBS

MSBS 技術は風洞試験の世界を一変させる可能性も有る。航空機開発用風洞は巨大な設備で、測定部の寸法は最低でも2m以上あり、遷音速風洞ではその動力は50MW以上のものもある。航空機周りの流れを再現できる巨大風洞は建設費、維持費が莫大で、世界的にも数が限られている。また、その使用に際して掛かる費用も膨大である。このため、航空機開発に携われる空力設計技術者は極少数の企業の技術者に限られる。巨大風洞になった理由の一つは模型を支える支持装置の強度限界による。高いレイノルズ数の流れを得

るために風洞圧力を高くすると、圧力に反比例して風洞の大きさを小さくできるが、支持装置が破損するので遷音速風洞の場合 5 気圧より高くできない。MSBS を用いるとこの制限が無くなり、圧力を模型が破損しない圧力まで高くできる。この結果、同じ流れを得るのに、風洞の圧力を 10 倍にすると測定部寸法は 1/10 にでき、風洞体積は約 1/1000 に、駆動電動機の容量は 1/10 にできる。当然、風洞建設費、維持費も安くなり、様々な分野の技術者が利用できる機会も増えることが期待できる。

風洞圧力の制限は動圧が高い遷音速風洞の場合であるが、非接触測定技術の発展に伴い動圧が低い低速風洞でも MSBS の導入は大きな効果が期待できるようになった。一般に風洞試験では小さい模型に加わる力を測定するのは非常に困難である。例えば、昆虫の飛翔力の測定を考えると容易に想像できる。その原因は模型自体が小さく、これを支える機械的な姿勢変更機構付きの超小型支持装置が考えにくいこと、模型に加わる力が小さくて支柱干渉量を考慮すると力測定精度に不安があることが挙げられる。しかし、MSBS は力測定機能と模型姿勢変更機構、模型支持機構を併せ持っており、先の問題点は完全に払拭される。更に、風洞圧力を 100 気圧程度に上げれば、数 cm 角の測定部で、合理的な動圧で 2m 角程度の風洞と同じ流れを作り出せる。小型化することで、自動車や鉄道などで問題となっている大型の高速ムービングベルトは幅数 cm、速さ数 m/s の小型低速のものとなり、製作は容易になり、且つ廉価になることが期待できる。更に、風洞自体の製作費、維持費、動力も大幅に小さくなり、机上に載る自動車用風洞も夢ではない。

7 結言

風洞用 MSBS に関してその原理と特徴について説明し、併せて MSBS の歴史について述べた。また、JAXA 60cm MSBS の特徴として、世界最大の測定部寸法を持つこと、常時 60cm 低速風洞に装備されていること、流体力学の研究者と共同して MSBS の特徴を活かした試験データの提供に心がけていることを紹介した。更に MSBS の新しい展開として、高亜音速用 MSBS の研究、地震計、振動計としての MSBS 利用、小型超高压風洞への MSBS 適用について紹介した。

参考文献

- [1] W.R.Martindale, R.W.Butler and R.F.Starr, Study on Needs for a Magnetic Suspension system Operating with a Transonic Wind Tunnel, *NASA CR-3900*, 1985.

- [2] 澤田秀夫, 国益徹也, 低速風洞用 60cm 磁力支持装置の開発. 日本航空宇宙学会論文集, Vol.50, No.580, p.188-195, 2002.
- [3] E.E.Covert and M.Finston, Magnetic Balance and Suspension systems for Use with Wind Tunnels, *Progress in Aerospace Science*, Vol.14, Pergamon Press, pp.27-107, 1973.
- [4] H. Sawada, S. Suda, T. Tetsuya, NAL 60cm Magnetic Suspension and Balance System, *ICAS 2004-3.1.2*, 2004.
- [5] Chrisinger, J.E, Tilton, E.L., et. al., Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Application, *Journal of Royal Aeronautical Society*, 67, pp.717-724, 1963.
- [6] D.A.Dress, Drag Measurements on a Laminar Flow Body of Revolution, *AIAA-88-2010*, 1988.
- [7] Tuttle, M.H., Moore, D.L. and Kilgore, R.A, Magnetic Suspension and Balance Systems, *NASA TM-4318*, 1991.
- [8] 澤田秀夫, 神田 宏, 末永尚史, 0.1m×0.1m 磁力支持天秤装置の試作, NAL TM-623, 1990.
- [9] H.Sawada, H.Kanda, and H.Suenaga, The 10cm×10cm Magnetic Suspension and Balance System at the National Aerospace Laboratory, *AIAA 91-0397*, 1991.
- [10] R.A.Kilgore: MSBS Newsletter, No.9, 1992.
- [11] 澤田秀夫, 国益徹也, 西村正治, 溝口也寸志, 岡田卓三, JAXA 60cm 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, Vol.52, No.606, pp209-315, 2004.
- [12] 澤田秀夫, 樋口 博, 国益徹也, 須田信一, 気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数, 日本風工学会論文集, Vol.29, No.4, pp.55-62, 2004.