

No.2

「航技研における磁力支持天秤装置の研究」

澤田 秀夫, 河野 敏, 国益 徹也(航空宇宙技術研究所)

MSBS Research at NAL

Hideo Sawada, Takashi Kohno, Tetsuya Kunimasu (NAL)

概要:

航技研では、1986年に10cm角測定部の低速風洞用磁力支持天秤装置の研究を開始して以来、1987年に我が国初の磁力支持に成功し、1993年には世界最大の測定部を持つ60cm磁力支持天秤装置による模型支持に成功した。また、模型位置姿勢測定装置の開発、模型運動の6自由度総てを磁力制御する試みや、ホト素子を用い磁場強さを測定し、模型に加わる慣性力を利用した動的な天秤校正試験等を行った。現在は、模型内部に組み込んだ模型姿勢制御法の研究、模型用磁石の代わりに超電導コイルを用いる試験を進めている。

1. はじめに

1.1. 磁力支持天秤装置とは

磁力支持天秤装置は磁気力で風洞模型を気流中に支持する装置のことで、模型支持に伴う支持装置と気流との干渉を避けるために考案された装置である。測定部に作り出される磁場は気体の解離が現れる迄は気流とは殆ど干渉することがなく、いわゆる支持干渉のない風洞試験を実現することのできる方法であると考えられている。模型に磁気力を作用させる磁場の形成は測定部周りに図1の様に配置したコイルに電流を流すことにより行われる。このため、コイルに流す電流を測定すれば、模型に作用している磁気力を直接評価することができ、磁力支持装置は天秤の機能も併せ持っていることになる。

磁力支持天秤装置の特徴には支持干渉が無いこと以外にも、風洞試験における模擬能力の向上、動的試験の容易さ、新しい試験対象物の風洞試験等が挙げられる。このように、磁力支持天秤装置は他の試験装置にはない特徴を持ちながら、未だ普及していない大きな理由は、依然として実用化の段階にまで達していないことにあると考えられる。具体的な実用化の目標とは、磁力支持の信頼性の向上、磁力支持天秤装置の使用経験の蓄積、磁力支持天秤装置を利用する研究者数の増加、開発レベルで使用に耐える大きさの磁力支持天秤装置の供給とえるであろう。

1.2. 磁力支持天秤装置の原理

磁力支持天秤装置は基本的な5つの部分に分けられる。それらは、磁力支持する模型とそれに磁気力を作用させる外部磁場を形成するコイル系、コイルを駆動する電源系、模型の位置姿勢を計測する計測系、模型の位置姿勢を制御する制御系である。

まず、磁力支持用の模型とは、その外形は風洞試験する模型であるが、内部には外部磁場と干渉して磁気力を受けるような磁化された物質か、それに代わる超電導コイルのような電流を流し続けているコイルが必要である。通常は円柱形の永久磁石を用いるが、特別に磁化用のコイルを外部のコイル系に加えて、外部磁場により磁化された軟鉄を利用する場合もある。いずれにしても、強力な磁石かそれに代わるものを模型内部に組み込ませなくてはならない。

コイル系では、容易に高速で制御できる空間磁場を効率的に形成できるものでなくてはならず、様々な磁場形成用のコイル系が考案されている。それぞれ長所短所があるが、航技研では図2のコイル系を採用した。基本的には、流れに直角な断面内で磁場の方向と大きさを容易に制御でき、空間に形成される磁場の強さをできる限り強くし、同時に制御し易いものとした。

電源系は、コイルに電流を流し、高速に変化させるパルス電源のことである。航技研では総てリアクティブ電源を用いているが、パルス制御電源を用いた方がより効率的であろう。

計測系は、模型の位置姿勢を高速、且つ高精度に計測するもので、航技研では独自に開発した CCD リニアセン

を 3 本組み合わせたコイルを用いている。詳細は[文献1]を参照されたい。

図3に示すような単純な模型の支持ですら、基本的にはコイル電流を制御しなければ不安定になってしまう。図中の模型の位置を常時高速で測定し、仮に落下していきそうになれば、コイルに流す電流の量を増加させ、模型を元の位置にまで戻す操作が必要になる。また、模型が上昇した場合も、コイルに流す電流を減少させ、模型を落下させる必要がある。このように、模型の位置を常時高速に計測し、位置が所定の位置から変化したら、直ちにそれを直す操作命令を出す制御系が磁力支持天秤装置には必須となる。航技研ではこの制御系として、市販のパーソナルコンピュータを利用している。

1.3. 磁力支持天秤装置の歴史

磁力支持の考え方は既に 1940 年代に始まり、米国 NACA の Ames 研究所で最初の試作が行われたが、失敗に終わり、1957 年にフランスの ONERA で世界初の磁力支持装置が製作されたといわれている。²⁾その後、世界各国で十数基の磁力支持天秤装置が製作され、1950 年代から 1960 年代にかけて研究が行われた。しかしながら、1970 年代になると、磁力支持天秤装置の研究は下火になり、1980 年代には有名な米国 MIT の磁力支持天秤装置は NASA の Langley 研究所に移管された。磁力支持天秤装置の研究が衰退した理由は磁力支持天秤装置の実用化の見込みが立たなかったためといわれている。試作された磁力支持天秤装置は総て小型で、通常の風洞で使用することは困難であった。磁力支持天秤装置を大型化しようとするとならば莫大な電気エネルギーを消費し、装置もきわめて大がかりなものとなることが懸念され、実用化が断念されたものと考えられる。

一方、NASA の Langley 研究所では 1980 年以降、MIT の磁力支持天秤装置を移管された他に、AEDC の磁力支持天秤装置も借り、新たな磁力支持天秤装置の研究開発に乗り出した。³⁾文献によれば、磁力支持天秤装置の研究の意義は次のような情勢の変化によって現れてきたとしている。すなわち、低温風洞のような小型で大きなレイノルズ数を出せる風洞が実用化され、比較的小型の磁力支持天秤装置でも実用的な試験に利用できるようになったこと、また、超電導技術の進歩により大型の磁力支持天秤

装置でも実現が可能な状況になってきたことにあるとしている。さらにまた、磁力支持天秤装置は、支持干渉を無くすばかりでなく、風洞運転効率の向上、磁力支持天秤装置一台で多種多様な試験の実現が可能、今まで不可能と考えられていた種類の風洞試験の実現といった効果が挙げられている。このように、磁力支持天秤装置の研究は風洞試験に関連する広い分野で意義のあることといえる。

最近では、旧ソ連連邦における磁力支持天秤装置の研究の内容が知られるようになり、米国よりも大型の磁力支持天秤装置が実現していたことが知られている。⁴⁾また、中国でも磁力支持天秤装置の研究が始まり 15cm 程度の磁力支持天秤装置が作られている。また、台湾でも 10cm 程度のものが作られている。⁵⁾我が国でも、航技研以外で、三菱重工で一時磁力支持天秤装置の研究を行ったが現在は中止されている。福岡工業大学で磁力支持天秤装置の研究が開始されたということも聞いており、磁力支持天秤装置に関する研究は我が国でも徐々に盛んに成りつつあるように思える。

1.4. 航技研での磁力支持天秤装置研究の経緯

航技研では、磁力支持天秤装置の技術課題に対して、先ず、10cm 磁力支持天秤装置の製作とそれを用いた磁力支持試験の蓄積を図った。⁶⁾また同時に、実用的な大きさの磁力支持天秤装置の実現に向けた研究も重ねてきた。その結果、現在は世界最大の大きさの測定部を持つ 60cm 磁力支持天秤装置が実現し、⁷⁾さらに、より大きな空気力に対しても使用できる超電導コイルを用いたコイルの研究、模型内部に姿勢制御能力を持たせた支持模型の研究も進めている。⁸⁾

1986年、航技研では磁力支持天秤装置の研究を開始し、翌年 10 月には小型の 10cm 磁力支持天秤装置を用いた 3 軸制御による模型の磁力支持に成功した。1989 年には、簡単な吹き出し部を持つ風洞に取り付け、54m/s までの気流中で模型を磁力支持する事ができるようになった。その後、1992 年には、横揺れ制御を含む 6 軸総ての制御ができる磁力支持天秤装置に改良された。⁹⁾10cm 磁力支持天秤装置に関する研究成果については、既に様々な機会に論文や口頭の発表をしている。詳細は参考文献を参照していただきたい。10cm 磁力支持天秤装置の研究と平行して、1991 年にはより大きな測定部を持つ磁力支持天

秤装置として、10cm 磁力支持天秤装置のデータを基に 60cm 磁力支持天秤装置を設計した。

2. 記号

(x, y, z)	… 座標系、図1参照 (mm)
(F_x, F_y, F_z)	… x, y, z 方向の力成分 (N)
(M_x, M_y, M_z)	… x, y, z 方向のモーメント成分 (N·m)
(H_x, H_y, H_z)	… x, y, z 方向の磁場強さ成分 (G)
(ϕ, θ, ψ)	… x, y, z 方向周回回転角 (deg.)
I_i or J_i	… コイル i に流れる電流 (A)
I_{ia}	… コイル(1,3,5,7)に流れる電流の 平均値 (A)
H_{ia}	… コイル(1,3,5,7)の磁極での H_z の 平均値 (G)

3. 10cm 磁力支持天秤装置

3.1. 装置の概要

10cm 磁力支持天秤装置の寸法は図4に示す。8個の電磁石と2つの空芯コイルは図1に示したように配置されている。コイルの巻き数及び仕様は表1に示す。測定部中心付近で、前後に置かれたそれぞれの磁気回路では、 yz 面内に、各コイル電流の制御により大きさと向きを容易に制御可能な磁場が形成される。また、これらの磁気回路の前後には空芯コイルが置かれ、 H_x を x 方向に変化させるように組み合わせている。表1に示したコイル(1,2,3,4)と(5,6,7,8)の電流を変化させることで二つの磁気回路内で磁場の強さと向き(H_y, H_z)を制御できる。また、二つの磁極の間の磁場は連続的に変化するので、 $\partial H_y / \partial x$ 、 $\partial H_z / \partial x$ をコイル(1,2,3,4)と(5,6,7,8)の電流で変化させることもできる。また、空芯コイルの電流で $\partial H_x / \partial x$ を制御することができる。これにより、 x 方向に磁化された円柱磁石の運動では、5軸制御が可能となる。

3.2. 制御法

8個の電磁石と2個の空芯コイルはそれぞれ独立した10台のバーニアに連結していて、磁力支持の状況に応じて、様々な組み合わせで駆動される。横揺れ制御を除

く5軸制御では、表2に示した組み合わせでコイル電流を制御する。35度を越すような高迎角支持では、更に組み合わせコイルを独立に制御させる。また、横揺れ制御では、コイルの組み合わせを制御系の中で仮想上複数設定し、コイル電流を評価して制御する方法を用いている。こうすることで、様々なコイルの組み合わせ毎に、別のコイルを設置する必要が無く、柔軟な制御が可能となる。但し、駆動電源はコイルの数だけ必要となる。

3.3. 静的力較正試験

縦3分力の力較正試験は、磁化されない重りを模型に吊り下げることで実施可能である。模型を所定の位置姿勢に支持しておき、その間に、模型に重りを吊り下げると、各コイル電流が変化する。基本的には、表3に示したようなコイルの組み合わせが取られているので、そのコイル電流を測定し、作用した力との対応をとれば、力較正ができたことになる。図5はそのときの試験の写真、図6はその結果の一例である。

3.4. 横揺れ制御を含む6軸制御

模型内部に取り付ける母線方向に磁化された円柱磁石で、図1に示すようなコイル配置では、円柱軸周りのモーメントを発生させることは困難である。このため、円柱磁石の軸に直角な方向に磁化された補助磁石を取り付け、横揺れモーメントを発生させる方法を採用した。横揺れモーメントを発生させる際に、他の力とできる限り干渉しないような補助磁石の組み合わせが図7である。この方法による6軸制御の様子が図8である。また、干渉の様子が図9に示している。

3.5. 動的力較正試験

磁力支持天秤装置の利点として、模型を支持する物体がないので、模型を運動させるときに、支持装置自体が流れを乱すことが無く、正確な模擬が可能となる点が挙げられる。また同時に、模型を強制振動させたり、加速度運動をさせると、模型の運動は模型位置姿勢測定装置により測定されているので、模型を制御しているコイルに流れる電流と一意的な関係があることが期待される。この考えに基づき、模型を正弦的に定常運動させ、模型に加わる慣性力とコイル電流の関係を求め、力較

正試験に代えることが提案されている。これを動的力較正試験と呼ぶが、風洞試験の直前に力較正試験ができて、試験が容易であることから、実用化されれば、風洞試験結果の信頼性を向上させるものと期待されている。

この実用性について、10cm 磁力支持天秤装置で評価した。^{19,10}その結果、模型を定常振動させることは磁力支持では確かに容易であるが、コイル電流は、図10に示すように、模型の正弦的運動と比べて、正弦曲線から若干ずれる。これは、コイル電流が作り出す磁場は一旦鉄心の磁気回路を流れて空間に達するが、その間に様々な影響を受けるため、コイル電流と模型の運動とは完全な対応を示さないものと結論づけられた。一方、空間磁場が模型内の磁石に直接作用して模型が運動をするのであるから、より直接的な磁場を測定する方がよいと判断し、8 個の電磁石の磁極にホト素子を張り付け、模型後流部にもホト素子を設置し、その出力を計測した。その結果、図 10 に示すように、模型の運動とホト素子の出力は極めて良好な対応を示していることが判明した。

これらの出力と、模型の慣性力とを対応させたものが図 11 と 12 である。極めて線形的な関係を示していることが判るが、較正できている大きさは小さく、未だ実用の段階にはほど遠いものと考えられる。但し、極めて小さい空気力を測定するにはむしろ好都合な場合もあり、試験の内容によっては実用の目的に利用できるものと考えている。

3.6. 高迎角設定試験

磁力支持天秤装置の特徴として、模型迎角を大幅に変更できることが挙げられている。通常の模型支持では高迎角に近づくと、支持装置の影響が極端に大きくなり、風洞試験の意味が無くなるほど気流の流れの状態が変わってしまうことがある。このため、迎角が大きくなると、支持法そのものを変えて試験することになり、風洞運転効率を著しく損なうことになる。磁力支持天秤装置では、支持法そのものは変えることなく、高迎角まで設定できるので風洞試験の効率が下がるとはないと期待される。しかしながら、高迎角になると、各コイルに流す電流の中とりわけ大きな必要電流になるものが現れて、最終的に電流供給限界に達し、10cm 磁力

支持天秤装置では支持が困難になる。

このため、円柱磁石の縦方向の運動について、必要なコイル電流はどの様になるかを評価した例が図 13 である。10cm 磁力支持天秤装置では、各コイル電流の最大値は 15A で、この近くの電流ではもはやコイル電流を制御することはできない。このため、(1,3)、(5,7)という縦方向の運動を制御する揚力コイルと(0,9)の抗力コイルの組み合わせで、各組み合わせコイルの電流も一定の比率で変える方法で、必要電流の量を押さえる試みを行った。この結果、数値計算による予測では大幅に抗力コイルに流すべき電流値を押さえることができたが、実際の試験結果では、明瞭な改善はみられなかった。最終的には、最高迎角は51度で抗力コイル電流が15A近くに達してしまう。これは、(1,3)、(5,7)という縦方向の運動を制御する揚力コイルでは、電流の比率を変えても、磁気回路を構成する磁極間に発生する磁場の強さは影響しないためと考えている。このため、現在、磁気回路を形成しないような非磁性体の構造要素に交換することを検討中である。また、迎角 90 度近くでは、磁気回路の構造上、模型の横方向の制御ができなくなる。このため、模型の姿勢を、鉛直線を含まない横方向に傾いた姿勢で模型を 90 度回転する方法を検討中である。この場合は、90 度の迎角でも制御は理論上可能となる。

4. 60cm 磁力支持天秤装置

4.1. 装置の概要

60cm 磁力支持天秤装置は、基本的には図 14 に示すように、10cm 磁力支持天秤装置と同じ構成となっている。5 軸制御ではあるが、模型をバランスさせて航空機形状の模型を磁力支持したものが図 15 である。磁力支持天秤装置の寸法効果は、寸法を L 倍にすると、磁気回路内に形成される磁場強さの大きさは $1/L$ となる。このため、流れ方向の磁気勾配は $1/L^2$ となる。寸法が L 倍した模型内の円柱磁石の磁気モーメントは L^3 倍となるので、単純に L 倍した磁力支持装置では、模型に作用する磁気力は L 倍となる。模型を磁力支持するのに必要な力は、低速風洞のような場合、重力のみを考えると、 L^3 倍であるから、磁力支持天秤装置は大型化する程、コイルの磁場形成能力を L^3 倍に強くする必要がある。

空気力に対しては、模型が L 倍になると、動圧が同じならば空気力は L^2 倍となるので、コイルの磁場形成能力は L 倍にすればよい。一方、空気力のモーメントは動圧が一定ならば L^3 倍となるが、磁気力によるモーメントは L^2 倍となるので、これもコイルの磁場形成能力を L 倍にすればよいことになる。

また、磁極断面の大きさも L^2 で増大するので、同じ磁場強さを保つと磁束は L^2 倍になる。コイル巻き数の増加で同じ磁場強さを保つとすると、コイルの両端に加わる逆起電力は L^2 倍となり、高速での磁場制御が極めて困難となる。このため、電流の増加により、同じ磁場強さを保つのが望ましいが、コイル巻き線の断面積を電流値に比例して大きくする必要が生じ、結果的にコイル系の構造は著しく大きくなる。

こうした大型化に伴う不具合を避けるには、模型内の磁石の磁気モーメントをできる限り大きくすることが良い。超電導コイルはこうした要求に合致するが、極低温に保つ断熱ケースを考慮すると、小型の磁力支持装置には適用できない。

4.1.1. コイル系と駆動用電源

各コイルの仕様を表 4 に示す。駆動電源も表に示す様に、パワーアンプは 5 台で、上下左右各一对の合計 4 組のコイルを -75A から 75A 迄の範囲で駆動できる。但し、電力限界により制御速度に関する制限がある。また、前後の空芯コイルも対で一台の同型のパワーアンプにより駆動される。揚力用のパイプコイルが 4 つあり、円柱磁石に浮揚力を作用させる磁場を形成するように組み合わせられ、定電流電源により 100A までの範囲で駆動される。

この磁気回路に発生した磁場の計測例を図 16 に示す。実際に磁力支持する場合に近づけるため、 70A のパイプ電流を流し、磁場強さ成分を計測した。揚力用コイルと抗力用コイルによる磁場形成能力は設計時より劣るが、模型を磁力支持するには十分な能力を示している。

4.1.2. 模型及び磁石

模型用の永久磁石としては Fe-Cr-Co 磁石で、現在、最高残留磁束を得ることのできるものである。他にも、様々な磁石が、 60cm 磁力支持天秤装置の模型用永久磁石として評価されたが、図 17 に示す種類

の永久磁石が利用できる。

Fe-Cr-Co 磁石の最適形状を評価した結果を図 18 に示す。Fe-Cr-Co 磁石はその形状によって磁石を貫通している磁束の量が大幅に変わるので、その形状は希土類磁石に比べると特に重要である。一方、希土類磁石も利用可能であるが、磁化するのに極めて強い磁場が必要で、薄い磁石しか入手することができない。その上、それらを連結すると、連結作業には危険が伴い、構造強度上も脆いという欠点がある。常温の永久磁石では、図 17 から判るように、Fe-Cr-Co 磁石または AlNiCo 磁石を用いるのがよい。

4.1.3. 模型位置姿勢測定装置

模型位置姿勢測定装置として一台のカメラで高速に 6 軸総てを計測できる装置を開発している。しかし、カメラのレンズに垂直方向の運動、姿勢変化は像の大きさの変化により認識するため、測定対象物体が離れるほど精度は悪くなる。 60cm 磁力支持天秤装置で、この欠点を除くために、このカメラを上方と、横と同時に計測し、位置姿勢評価で像の大きさを用いない方法に変えた。2 台のカメラは同時に測定する必要があり、同じ様な測定速度に調整し、カメラ側からの割り込み信号で模型の位置姿勢データを取り込んだ。同期は取っていないが、測定時間の差は最大 4ms 未満である。位置姿勢の校正試験結果の一部を図 19 に示す。

4.1.4. 模型把持装置

磁力支持天秤装置が大型になると、支持する模型も大きく、質量も大きくなる。このため、模型を磁力支持装置内で支える台は大きなものとなり、完全な磁力支持の後に、台を引き出す作業は危険な作業となる。また、途中で磁力支持に失敗すると、模型は予期せぬ運動を行い、台を叩いたり、落下したり、時には磁極に吸い付けられる。精密な模型の磁力支持では、こうした失敗は模型の大損害となるので、現在の所、形状が複雑で高価な模型の磁力支持は行っていない。模型を磁力支持する際の失敗を避けるために必要な装置が、磁場に影響せず、強力に模型を把持できる模型把持装置である。図 20 は航空機形状の模型を把持している時の写真である。

外部磁場への影響を避けるため、材料には AlNiCo 合金と SUS304 を利用した。模型に加わる磁気力の

変化により、模型把持装置の把持部分の位置及び姿勢が変化しない様に、駆動は油圧を用いた。また、模型に加わる磁気力を監視できるように、把持部の下部に非磁性体の天秤を装着した。この天秤により、把持の最中に模型に加わっている磁気力がどの程度のものであるかを監視できるので、把持を外す時を判断し易くなったこと、把持を外した後、模型が不均衡な状態にあるのかどうかの判断も容易になった。

模型が完全に磁力支持されたことを確認すると、把持装置の退避ボタンを押すことで、把持装置は自動的に模型と衝突を避けながら、測定部外部に退避する。試験終了後は、把持準備ボタンを押すことで、把持装置は自動的に模型の把持部分に把持用部分を合わせ停止する。その後、把持命令ボタン操作により、強制的に模型を把持する。その後、磁力支持天秤装置の電源を切り、安全に磁力支持天秤装置を停止できる。

4.2. 制御法

60cm 磁力支持天秤装置では、14 個のコイルを表 4 の様な組み合わせにより、5 台のパワーアンプと 2 台の定電流電源を制御することで運転している。模型の位置と姿勢は先にも述べたように、模型の垂直方向の位置と姿勢(z と θ)の制御とパルス用コイルへの電流値設定用に一台のパワーコンピュータを使用している。模型の横方向の位置と姿勢(y , ϕ)、及び流れ方向の位置(x)はもう一台の計算機により制御を行っている。制御則は 10cm 磁力支持天秤装置の場合と同じく、二重位相進みと、比例積分制御により模型の位置姿勢を設定値に保持している。パワーアンプから発生している大きなノイズが模型位置姿勢測定信号に進入するため、カット周波数が 10Hz で 2 次のデジタルフィルタを介して位置姿勢を測定している。測定周波数は約 250Hz である。模型の位置姿勢は運転中に任意に変えることができ、モニター画面により模型の姿勢の変化を常時監視することもできる。

4.3. 静的力較正試験

模型に加わる磁気力を正確に評価するには、模型把持装置に取り付けてある天秤出力は精度上十分でない。このため、図 21 の様に模型に実際に重りを吊り下げて、

そのコイル出力と重りの関係を特定することが最も精度の高い力較正試験となる。通常、リフトを模型から引き出して、プーリーを介し、吊り下げて行う。プーリーには軸受がついていて、回転摩擦を少なくしている。通常の軸受は、玉の部分が強磁性体であり、影響が懸念されたので、この試験ではベリク製の玉と、非磁性体のケースを採用した軸受を使用した。これを用いて効力較正試験をした結果が図 22 である。コイル電流を計測したもので、コイル電流は模型を一定位置姿勢で保持している最中でも変化しており、誤差が生じている。10cm 磁力支持天秤装置での動的力較正試験結果の経験から、今後は、模型に軸受素子を内蔵して、素子の出力と抗力の関係を評価することを試みたい。

4.4. 模型内蔵型横揺れ制御

模型を磁力支持する以上は当然軸対称物体ばかりではないので、60cm 磁力支持天秤装置でも、6 軸制御の方法を確立する必要がある。もちろん、軸対称物体でも、模型から放出される湯などが完全に軸対称になるとは限らないので、非定常の横揺れモードを受けることになる。モードの大きさとしては小さいものであることが予測されるが、横揺れ制御能力が無いと、横揺れ振動が増幅し、他の方向の振動を誘発する危険性もある。

横揺れ制御を 10cm 磁力支持天秤装置の方法と同じ様に行うとする場合の必要エネルギーを大まかに評価する。模型と磁力支持天秤装置が共に L 倍になると、前後の磁気回路を通過する磁束はコイル電流と巻き数が同じで、寸法が L 倍となる場合には L 倍となる。これにより得られる横揺れモードは L^2 倍となるが、空気力により発生する横揺れモードも L^2 倍となり、 L 倍大きなコイル電流か L 倍のコイル巻き数にしなくてはならない。よって、空気力により発生する横揺れモードを制御するために必要な磁気エネルギーは L^2 倍となる。このように、磁力支持天秤装置が大きくなればなるほど、大きなエネルギーを制御する必要があり、電源装置が膨大になる危険性がある。また、10cm 磁力支持天秤装置の横揺れ制御法をそのまま適用すると、各コイルを独立に制御する必要があり、少なくともパワーアンプを 4 台追加する必要があることになる。そこで、できる限り小さなエネルギー制御で横揺れ制御を可能とする方法の一つの候補として、模型内

模型の横揺れ制御法を検討することにした。

4.4.1. 目的

ここで採用した模型内蔵型の横揺れ制御法は、模型の内部に模型軸と一致させて、ワイヤを取り付け、モータによりこれを回転させ、角運動量保存則に従って、模型外部からの横揺れモーメントに抗するものである。このため、モータ回転による回転磁場、回転子の外部磁場との干渉は有るが、それ以外は全く外部磁場との間での干渉を排除できる利点がある。また、モータの影響は速度が速く、その影響は少ないと予測した。

将来的には、60cm 磁力支持天秤装置の浮揚力を増大できるので、ワイヤの慣性モーメントを増すことも可能である。また、制御モーメントが小さいため、高速制御が可能となり、将来は遅い制御は外部磁場で、早く細かい制御は内蔵型制御装置による姿勢制御も考えられる。

4.4.2. 試験装置

自立的制御が可能となるように、模型内部には角速度計測用光ファインレーザを搭載し、この出力が零となる様な比例積分制御を採用した。図 23 は試験装置のブロック図である。磁力支持する模型に搭載するので軽量に製作した。最大外径は 75mm で全質量は駆動用電池を含め 650g に押さえた。モータの最大トルクは約 10.8mN・m あるが、現在は制御回路の制約により約 6.3mN・m に押さえている。¹⁰

試験では、制御能力を知ること、各部品が模型内の強力な永久磁石の影響を受け、予想外の挙動をする可能性を評価した。模型の横揺れ角は外部の計算機に取り込み、制御量を計算し、制御命令を出す方法を採った。現在は、制御回路自体を模型に取り付け、更に、模型の横揺れ角補正をレーザ送信し、ワイヤでモータ電流値を送り返す様に改修中である。図 24 に示すレーザ送信機は赤外線を用い、高速通信を可能にしている。将来的には、模型の底面圧等の模型に取り付けた様々な計測データを高速に送信するように改修する。

4.4.3. 試験結果

この横揺れ制御装置を実際に磁力支持する永久磁石を組込んだワイヤ形状模型に取り付け、図 25 の様に吊り下げ、制御性能を評価した。測定した結果の一例を図 26 に示す。吊り下げているワイヤにも捻れ剛性があるので、制御しなくても捻り振動は減衰するが、制御を

かけると早く振動が減衰する。試験では、回路の未改良で、モータに供給できる電流の最大値が 100mA であり、初期の減衰部は制御能力を超えた命令を受けている。改良された回路では、500mA まで流せるので、性能は向上しているものと判断される。

今後は、その性能を磁力支持中に評価することとしている。本装置は、模型の回転を停止させることを目的としているが、逆に模型に一定回転を与えることも可能となる。

4.5. 超電導コイル模型

60cm 磁力支持天秤装置では、模型を大きくでき、超電導コイルを用いた模型の磁力支持用コイルの特性について研究が可能となった。模型に加わる大きな空気力に抗する磁気力を発生させるには、強い周辺磁場と、模型内に強力な磁気モーメントを発生させることのできるコイルが必要になる。通常は、このコイルは永久磁石や、磁化され易い軟鉄が用いられるが、模型が大型になり、内部に空間的余裕が出てくると、超電導コイルを用いたコイルは効率的な磁気モーメント発生コイルと考えられる。既に、超電導コイルの試作は、ケンブリッジ大学で 1980 年代に実施され、磁力支持に成功している。¹⁸また、大型風洞用の磁力支持用超電導コイルの研究が NASA で行われ、試作されている。¹⁹しかしながら、この大型の超電導コイルを磁力支持して、その能力を評価できる大型磁力支持天秤装置は無い。航空宇宙技術研究所では、60cm 磁力支持天秤装置の大きな測定部を利用し、超電導コイルの実用化研究を始めた。

4.5.1. コイル仕様

目標とする超電導コイルの能力として、1.25m 高 1/10 数超音速風洞の測定部に適用できるものとした。実際には、この高 1/10 数風洞は未だ存在しておらず、直ちにこの目標を実現できるような超電導コイルの設計はせず、その実現のために必要な技術を段階的に取得することにした。このために、先ず、60cm 磁力支持天秤装置で試験できる寸法の超電導コイルの設計に止め、発生させる磁気モーメントも市販の超電導コイルで可能な範囲とした。

超電導コイル部分の長さは既存の永久磁石の長さと同じ 300mm にした。一方、コイル直径は、目標とする高 1/10 数超音速風洞の超電導コイルの寸法にした。これは、断熱の

効果をより実証的に評価するためである。このようにして、英国 CRYOGENICS 社が設計した超電導コイル模型は図 27 の様になった。模型全長は 600mm、外径は 87mm である。

基本性能は表 5 に示す。超電導維持時間は 1 時間とした。実際に、液体ヘリウムを注入し、模型把持装置に設置し、電流を流し、その後永久電流モードにし、また電極を外して、磁力支持を開始するまでの時間と風洞試験する 20 分、再度模型を把持し直して、磁力支持装置の制御電流を切り、電源を超電導コイルに再びつなげ、電流を吸い出す操作に要する時間を推定して決定した。熱練度により、実際に要する時間は変化するであろうが、1 時間の維持時間があれば、超電導コイルの磁力支持試験を行う余裕があると考えている。

模型の外径は最大 87mm として、超電導コイルに必要な機器は総てこの中に収まるように製作している。これは、将来、風洞模型がこの超電導コイルを内蔵する時に、容易に装填できることを目標として決定された。気化したヘリウムガスは、常時ガスを放出する。このため、ガスが放出されていないときに、空気力を測定する必要がある。将来は、或時間間隔でガスを放出するようにし、ガス放出の影響を避ける機構を模型内に取り付ける必要がある。

超電導コイル材料としては NbTi 線を用い、4.2K の液体ヘリウム内にコイルを浸すことで、超電導状態を維持する。断熱は多層真空断熱を用いた。最大磁気モーメントは解析的には $5.7\text{mWb}\cdot\text{m}$ となっている。重量は総て装備して、約 8kg である。

60cm 磁力支持天秤装置の測定された磁場を用いて、超電導コイルに作用する磁気力は図 28 に示すように、模型を支持する十分な磁気力を発生できる。

4.5.2. 試験結果

超電導コイルは精密なものであるから、慎重に段階的に試験を進めている。現在は、超電導コイルを非磁性体の台に載せ、超電導状態で永久電流モードの持続時間を測定し、実際に磁力支持できる時間の実証的評価を試みている。実験では、超電導コイルを液体ヘリウムで 4.2K 付近まで冷却し、その温度付近で温度上昇速度を測定し、何分間超電導状態を維持できるか評価し、約 1 時間は液体ヘリウムが超電導コイルのクワッド内に溜まっていることが

確認された。

その後、図 29 に示すように、20A の電流を流して、永久電流モードにして電源との結線を外し、超電導コイルが孤立した状態で永久電流モードを約 35 分間保った。最後は、液体ヘリウムの量が少なくなり、コイルの温度が上昇し、クワッド現象を起こして永久電流モードは破壊したのが判る。その際、磁場として蓄えられていたエネルギーは一部コイル内で発熱し、コイル温度を急激に高くしていることが判る。超電導コイルを保護するために、クワッド内に設置している保護ダクトにより大部分のエネルギーは熱に変換されている。実際に磁力支持試験を行う際に、各操作がどの程度の時間を要し、実際の磁力支持はどのくらい続けることができるかを予測するためのものである。十分な試験は完了していないが、磁力支持準備操作、模型把持操作の時間を短縮すれば、現状の永久電流モード持続時間でも 10 分程度は可能と考える。

超電導状態に保てる温度の時間は 1 時間近くあるので、超電導コイルへの電流供給時間の短縮、模型把持装置の移動速度の増加、60cm 磁力支持天秤装置の起動時間短縮により、更に長い時間の超電導コイルの磁力支持が可能となるものと期待される。

4.5.3. 今後の計画

今後は、超電導コイルを模型把持装置に把持させ、コイル電流を変化させながら、監視用天秤の出力から、超電導コイルの有効性について詳細に検討していく。最終目標は超電導コイルの磁力支持であるが、模型把持装置を用いて慎重に且つ安全に遂行していく予定でいる。

超電導コイルの磁力支持では支持している最中にクワッド現象を起こすと、支持できなくなるので、超電導コイルの温度が十分に低い状態で試験を行うようにする必要がある。このために、再現性の高い液体ヘリウムの完全充填と、コイル温度の制御によるモニタリングが必要であろう。

5. まとめ

以上、航技研で行ってきた磁力支持天秤装置の研究開発について、その概要をまとめた。詳細は既に文献にして発表しているの、それらを参考にして頂きたい。

60cm 磁力支持天秤装置が完成した段階で、ほぼ実

用に供せる大きさになったわけで、いよいよ風洞に取り付けて、実用性について評価することになっている。風洞試験での磁力支持天秤装置の利用例は未だ我が国にはないので、速やかに、経験を積み、実用化に向けての問題点の整理を行いたいと考えている。永久磁石の性能は磁力支持天秤装置の能力に直接影響するものであり、風洞試験に応じた磁石形状と種類の選択が重要となる。

超電導コイルは、遷音速以上の風速の風洞に磁力支持天秤装置を取り付けるとなると必須のものであるから、今後もその実用化に向けて研究を続ける。また、超電導バネ材のような新しい材料による磁力支持の可能性についても研究したいと考えている。

謝辞

高迎角支持の研究は法政大学工学部学生である松田亮、松野貴浩、中西啓司、三浦明生君らが航技研の研修生として、実験、データ整理、評価等を行ってくれた。ここに感謝の意を表すものです。

参考文献

- 1) H.Sawada, H.Kanda, and H.Suenaga : "the 10cm x 10cm Magnetic Suspension and Balance System at the National Aerospace Laboratory", AIAA 91-0397, 1991
- 2) Chrisinger, J.E., Tilton, E.L., etc : "Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Application", Journal of Royal Aeronautical Society, Vol.67, Nov. 1963
- 3) Kilgore, R.A. : "Advance Experimental Techniques for Transonic Testing", Lecture 7, "Magnetic Suspension and Balance systems", Lecture Series presented at the National Defense Academy, Oct. 1987
- 4) A.Kuzin, G.Shapovalov, and N.Prohorov : "Force Measurements in Magnetic Suspension and Balance System", NASA CP336, 1996, pp.493-503
- 5) C.E.Lin, Y.-R. Sheu, and H.-L. Jou : "Magnetic Levitation System Design and Implementation for wind Tunnel Application", NASA CP336, 1996, pp.483-492
- 6) 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
- 7) H.Sawada and H.Suenaga : "Status of MSBS Study at NAL", NASA CP3247, 1994, pp.275-289
- 8) H.Sawada, T.Kohno and T.Kunimasu : "SUPERCONDUCTIVE SOLENOID FOR THE NAL 60CM MSBS", NASA/CP-1998-207654, 1998
- 9) 澤田 秀夫, 末永尚史, 鈴木孝行, 池田宣一 : 「航技研 10cm×10cm 磁力支持天秤装置横揺れ制御について」, NAL TR-1164, 1992
- 10) H.Sawada, H.Suenaga and T.Kohno : "Status of MSBS Study at NAL in 1995", NASA CP336, 1996, pp.505-519
- 11) H.Sawada and H.Suenaga : "Magnetic Suspension and Balance Systems at NAL", Pacific International Conference on Aerospace Science and Technology, Conference Proceedings Vol.2, 1993, pp.1014-1021
- 12) T.Kohno, H.Sawada and T.Kunimasu : "ROLL MOTION RESTRAINT SYSTEM FOR NAL 0.6m MSBS", NASA/CP-1998-207654, 1998
- 13) C.Britcher : "Progress Toward Magnetic Suspension and Balance Systems for Large Wind Tunnels", Journal of Aircraft, Vol.22, No.4, April, 1995 pp.264-269
- 14) C.P.Britcher : "Large Superconducting Model Core Developed by Madison Magnetics", MSBS News Letter edited by R.Kilgore, No. 7, June, 1990, pp. 3

表 1 10cm 磁力支持天秤装置コイル仕様

コイル番号	名称	巻き数	コイル寸法(mm)	用途	抵抗(Ω)
0, 9	抗力コイル	270	120x120	抗力均衡	0.94
1, 3, 5, 7	揚力コイル	204	50x50	揚力・重力均衡 縦揺れモーメント均衡	0.54
2, 4, 6, 8	横力コイル	102	40x40	横力均衡 偏揺れモーメント均衡 横揺れモーメント均衡	0.22

表 2 10cm 磁力支持天秤装置コイル組み合わせ

作用力種類	コイル組合	備考
抗力(Fx)	0+9	
揚力・重力(Fz)	(1+3)+(5+7)	
横力(Fy)	(2+4)+(6+8)	
縦揺れモーメント(My)	(1+3)-(5+7)	
偏揺れモーメント(Mz)	(2+4)-(6+8)	
横揺れモーメント(Mx)	(2-4)+(6-8)	6軸制御のみ

表 3 60cm 磁力支持天秤装置コイル仕様

コイル番号	名称	巻き数	コイル寸法(mm)	用途
0, 9	抗力コイル	50	620x620	抗力均衡
1_1, 3_1, 5_1, 7_1	揚力コイル	97	200x200	揚力均衡 縦揺れモーメント均衡
1_2, 3_2, 5_2, 7_2	重力コイル	97		重力均衡
2, 4, 6, 8	横力コイル	100	200x200	横力均衡 偏揺れモーメント均衡 横揺れモーメント均衡

表 4 60cm 磁力支持天秤装置コイル組み合わせ

作用力種類	コイル組合	電源種類
抗力(Fx)	0+9	バッテリー(#5)
重力(Fz)	(1_2+3_2)+(5_2+7_2)	定電流電源(100A)
揚力(Fz)	(1_1+3_1)+(5_1+7_1)	バッテリー(#1+#2)
横力(Fy)	(2+4)+(6+8)	バッテリー(#3+#4)
縦揺れモーメント(My)	(1_1+3_1)-(5_1+7_1)	バッテリー(#1+#2)
偏揺れモーメント(Mz)	(2+4)-(6+8)	バッテリー(#3+#4)

表 5 超電導コイル仕様
Magnet

Field achieved in test at 4.2K	Specified: 6.5 T	Actual: >6.5 T
Coil inductance:	Specified: N/A	Actual: ~7 H
Current density at 6.5T:	Specified: >25 kA/cm ²	Actual: 45.1 kA/cm ²
Calculated magnetic moment at 6.5T:	Specified: >0.0047 Wb.m	Actual: 0.0057 Wb.m
Magnet bore:	Specified: 35 mm	Actual: 43 mm
Overall diameter:	Specified: 75 mm	Actual: 72 mm
Overall length:	Specified: N/A	Actual: 348 mm
Winding length:	Specified: 300 mm	Actual: 300 mm
Distance from base to field center:	Specified: N/A	Actual: 156.5 mm

Cryostat

Cryostat length:	Specified: 600 mm	Actual: 600 mm
Cryostat outside diameter:	Specified: 87 mm	Actual: 87 mm

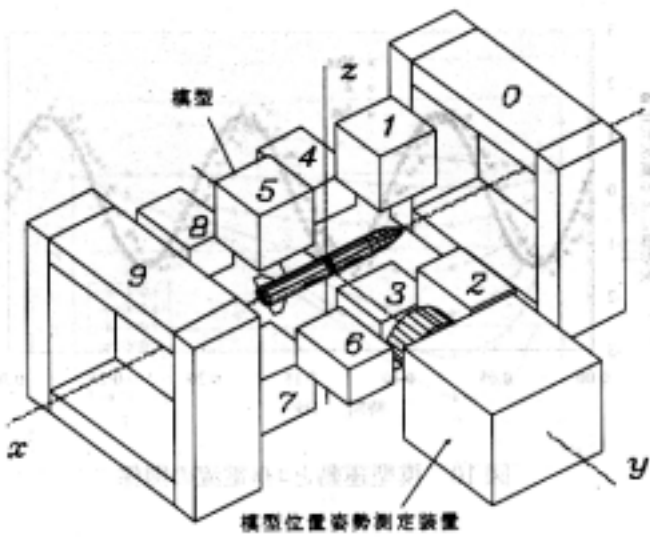


図1 磁力支持天秤装置コイル配置図

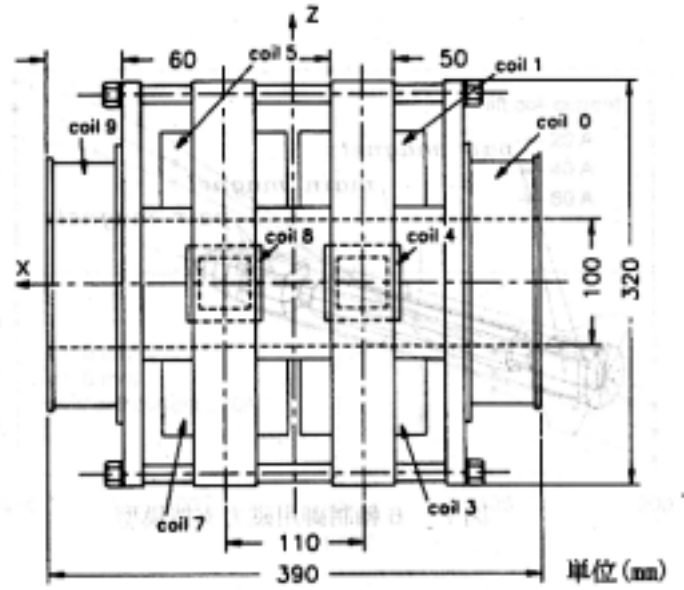


図4 航技研10cm磁力支持天秤装置側面図

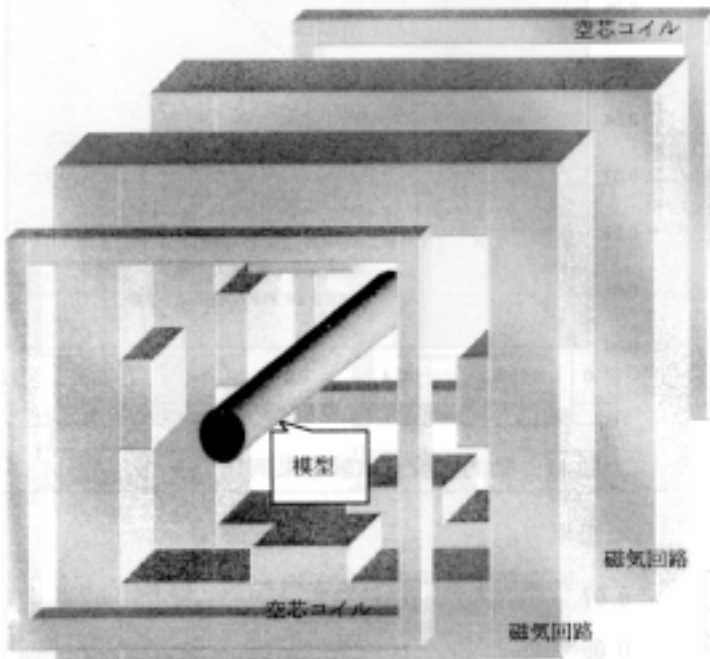


図2 航技研磁力支持天秤装置磁気回路概念図

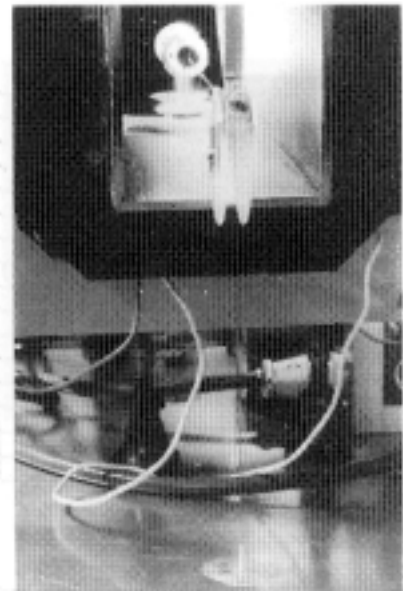


図5 10cm磁力支持天秤装置力較正試験

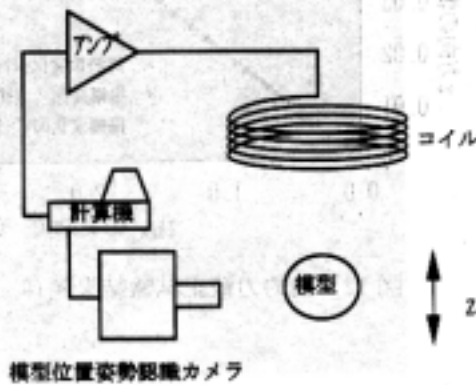


図3 磁力支持天秤装置概念図

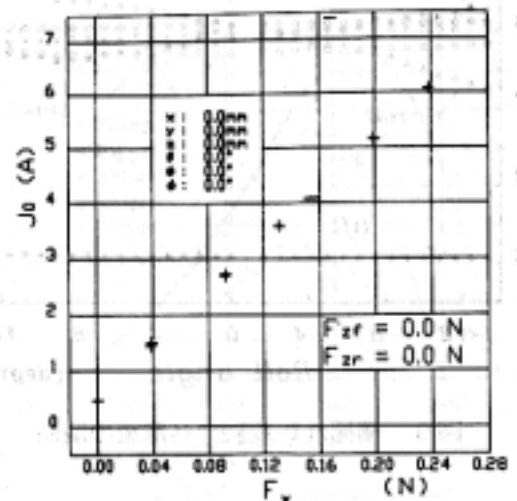


図6 10cm磁力支持天秤装置力較正試験結果

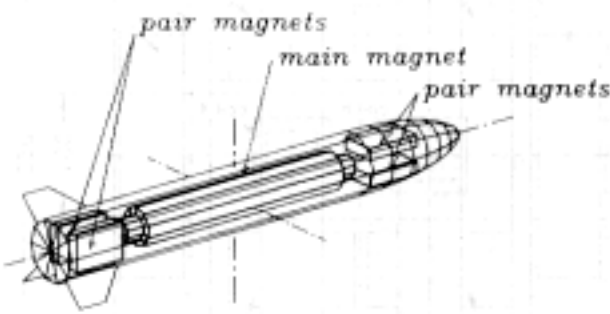


図7 6軸制御用磁力支持模型

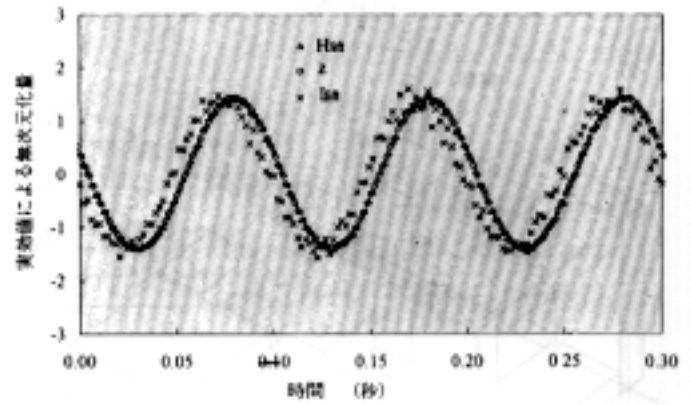


図10 模型運動とコイル電流の関係

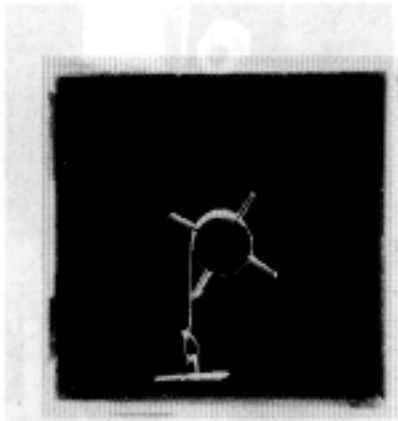


図8 横揺れ制御中の模型

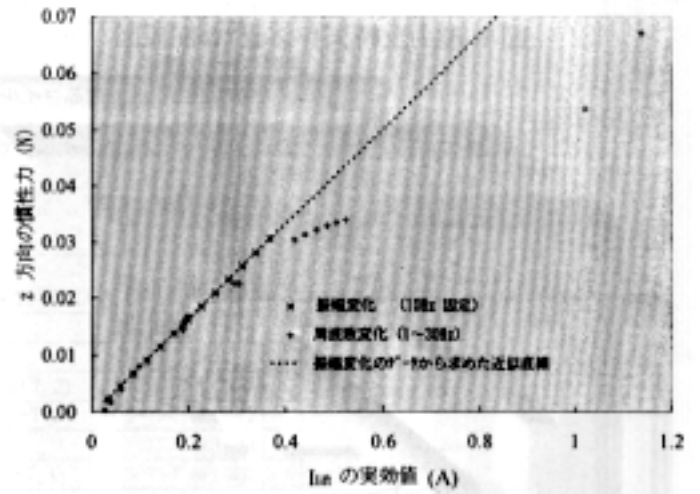


図11 動的力較正試験結果例 (F_z vs. I_{Isin})

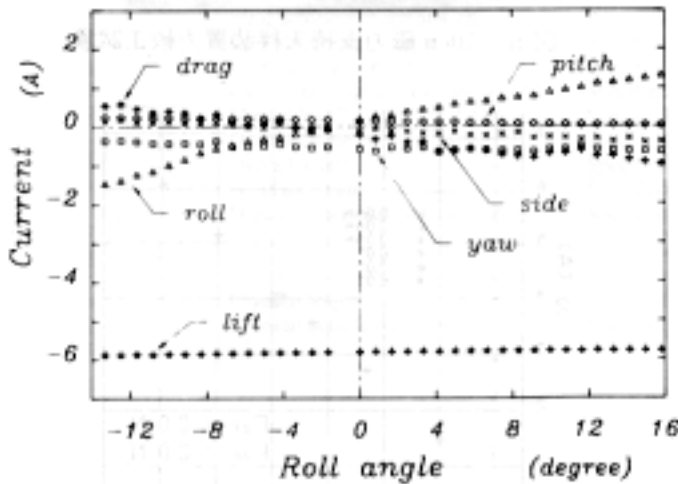


図9 横揺れモーメントとコイル電流の関係

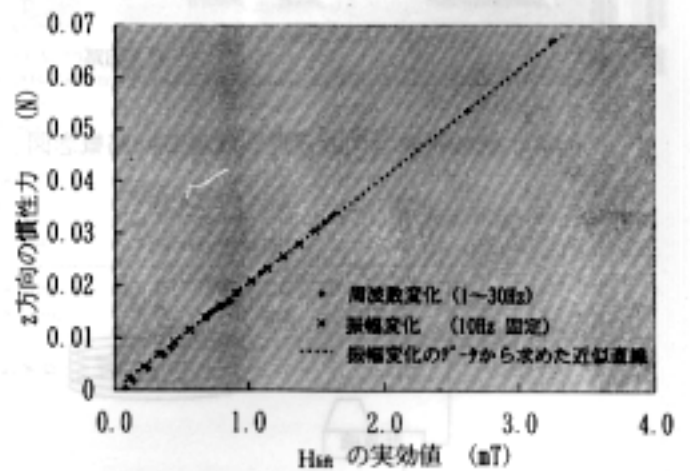


図12 動的力較正試験結果例 (F_z vs. H_{Isin})

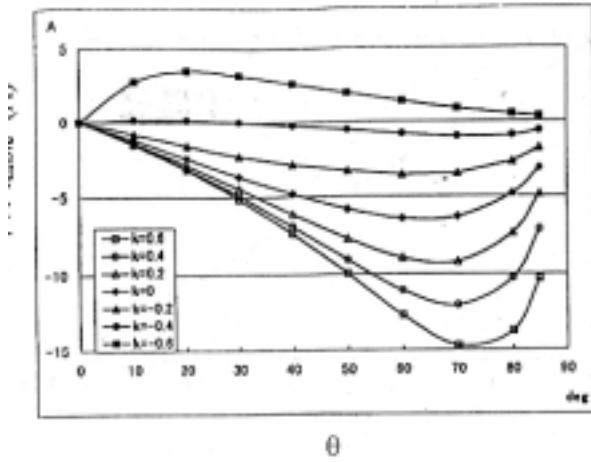


図13 高迎角支持中の抗力用コイル電流推定値

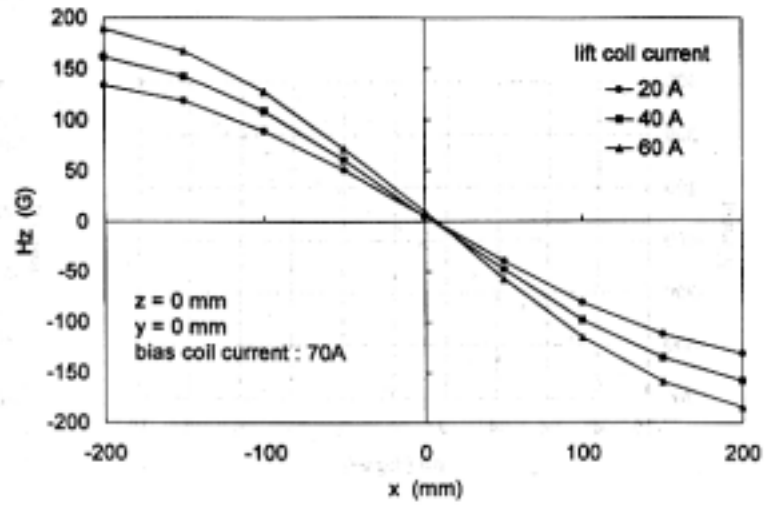


図16 Hzのx方向分布の計測例

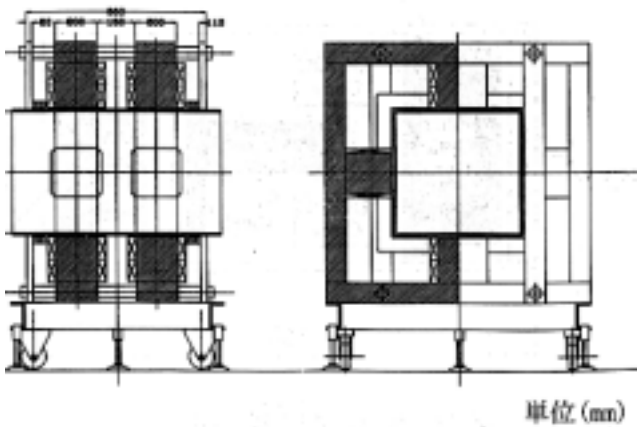


図14 60cm 磁力支持天秤装置側面図

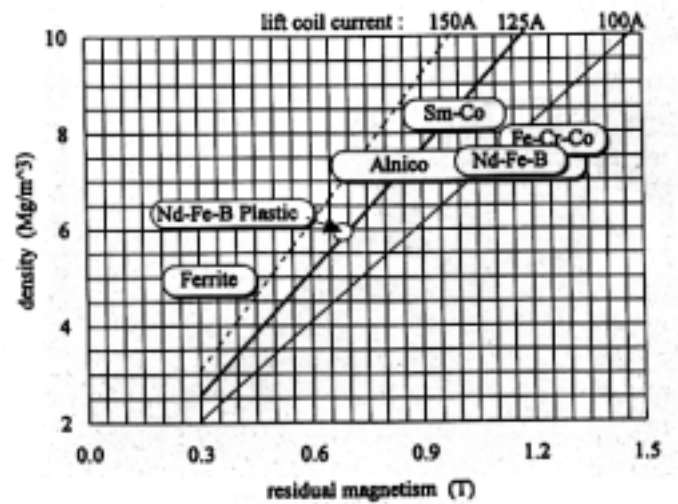


図17 60cm 磁力支持天秤装置用磁石の性能

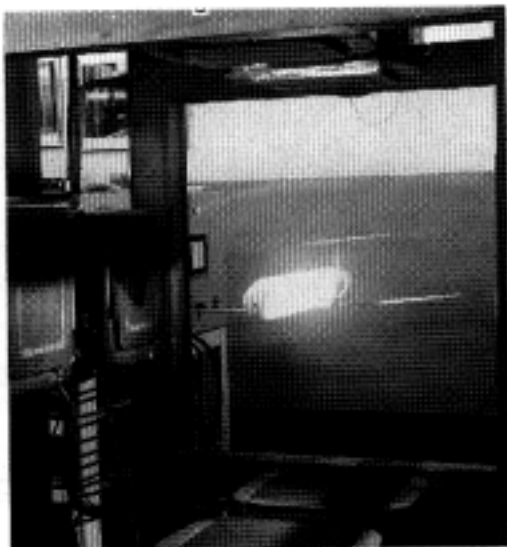


図15 60cm 磁力支持天秤装置による磁力支持例

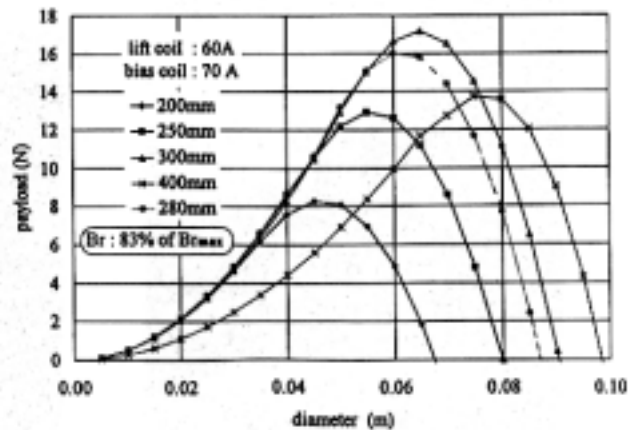


図18 Fe-Cr-Co 磁石の最適形状
(60cm 磁力支持天秤装置で)

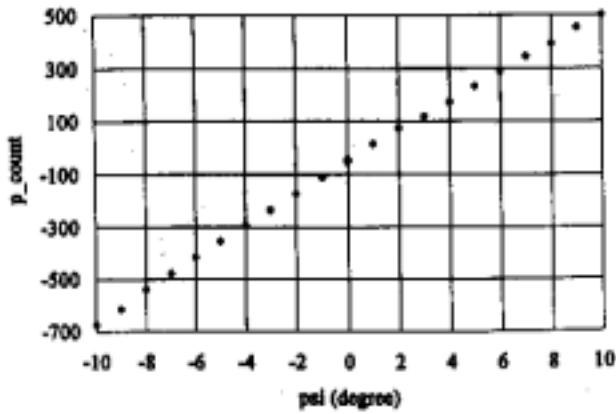


図 19 模型位置姿勢認識装置校正試験結果

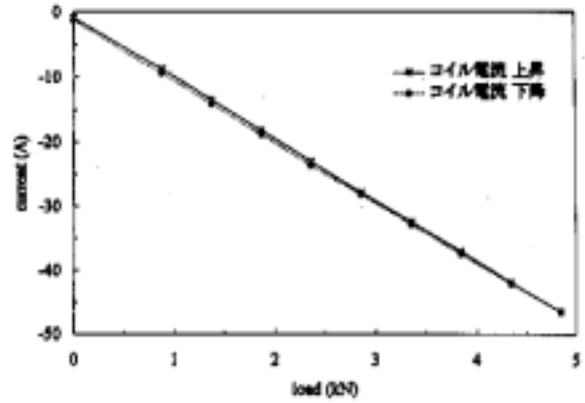


図 22 抗力校正試験結果例

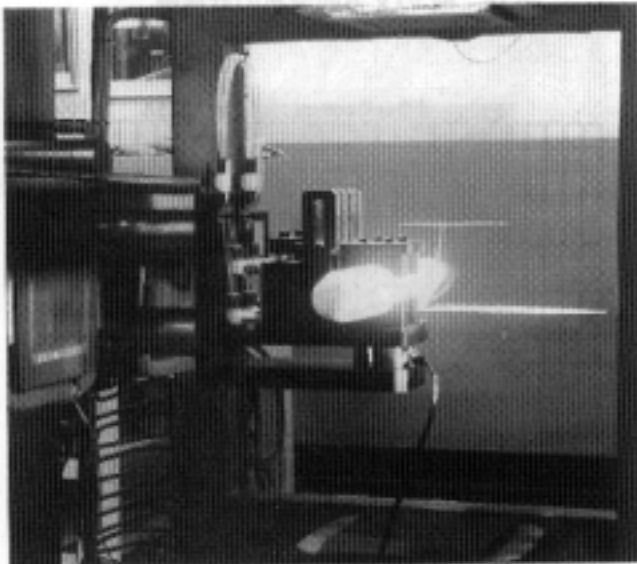


図 20 模型把持装置

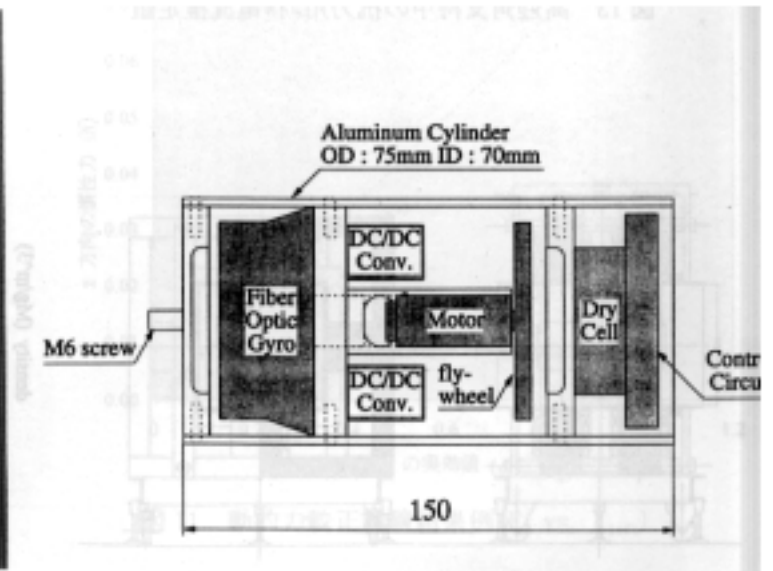


図 23 横揺れ制御概念図

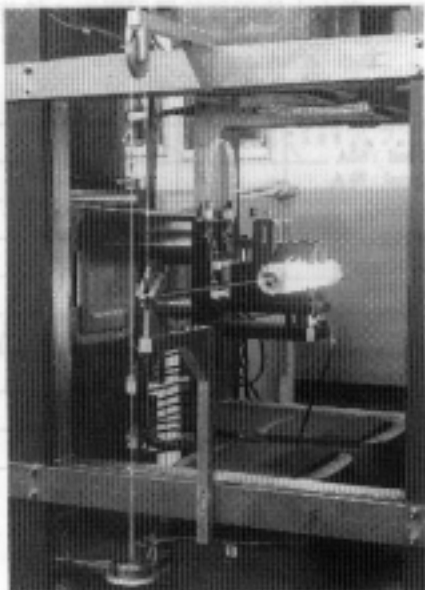


図 21 60cm 磁力支持天秤装置抗力校正試験

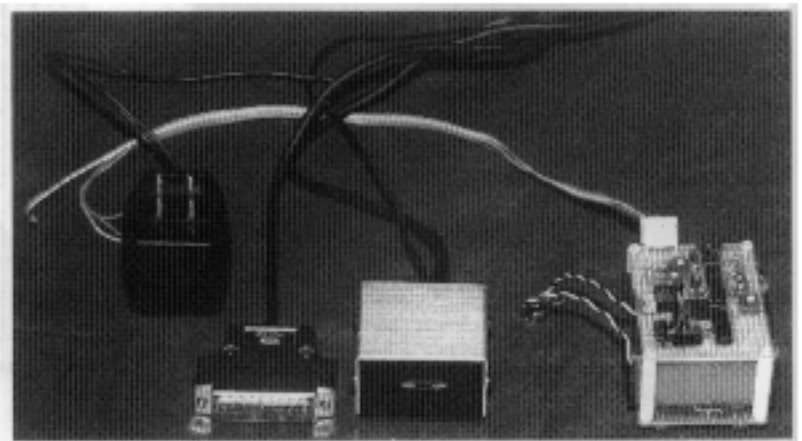


図 24 60cm 磁力支持天秤装置用センサーシステム



図25 横揺れ制御性能評価試験

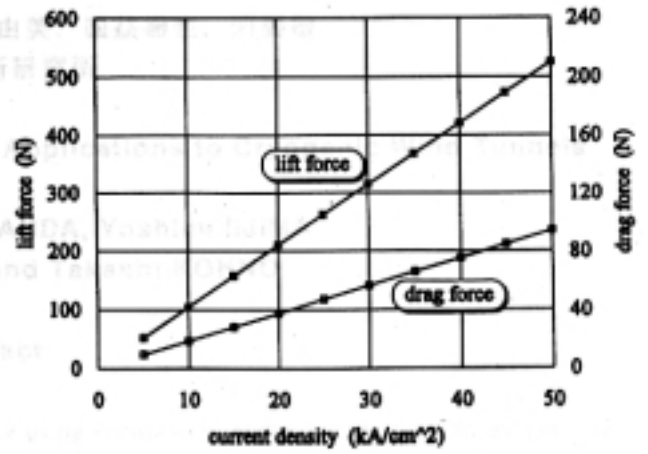


図28 超電導コイルへ作用する磁気力推定値

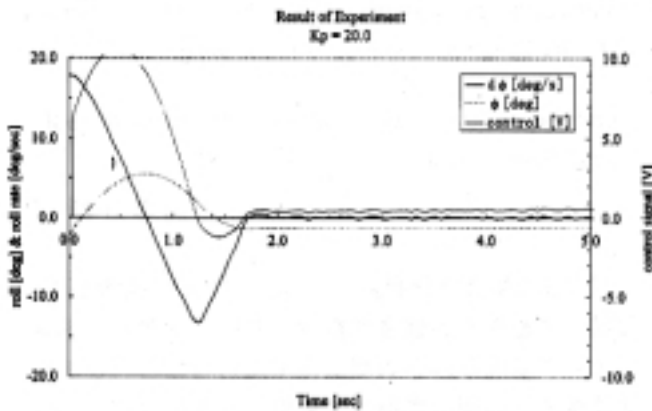


図26 横揺れ制御試験結果

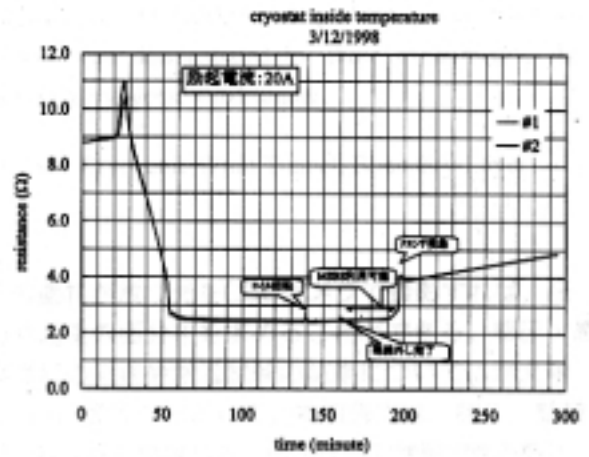


図29 超電導コイル永久電流モード試験例

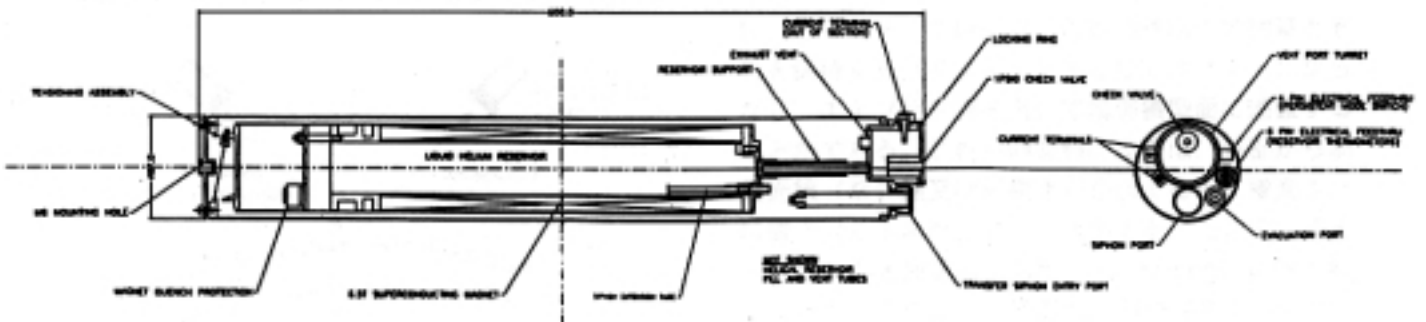


図27 60cm 磁力支持天秤装置用超電導コイル

