

## 〔特集〕流れの非接触計測

# 福岡工業大学における低電力 40 cm 級 磁力支持天秤装置を用いた風洞実験

## Wind Tunnel Experiments Using a Low-Electric Power 40cm-Class Magnetic Suspension and Balance System in Fukuoka Institute of Technology

\*福岡工業大学工学部知能機械工学科 河村 良行†  
Yoshiyuki KAWAMURA

### 1. 概要

一般的に、3次元模型の風洞実験を行う場合には支柱やワイヤ等により模型を支持する必要がある、そのため流れにはこれらの支持部の影響が現れる。この問題を解決するために考案されたのが磁力支持天秤装置<sup>1)</sup>であり、この装置では磁気力により模型を支持するので支持部の影響はなくなる。さらに、コイルに流れる電流の変化から空気力の測定が可能となる。また、磁力支持天秤装置は磁場を制御することで模型に対して様々な運動を与えることや、磁力支持制御系の周波数特性が優れていれば、従来の天秤が苦手としてきた非定常空気力の測定も可能になる。このように磁力支持天秤装置はこれまでの方法では困難であった様々なタイプの風洞実験を実現することができる。

磁力支持天秤装置の研究は1940年代から行われているが、消費電力が大きく重量の大きなものがほとんどであり、消費電力が低く軽量で大学の研究室程度の規模の実験室で使用できるものはなかった。わが国においては、独立行政法人航空宇宙技術研究所において、1980年代から先駆的な研究がなされ、現在では試験断面積が60 cm ×

60 cmの世界最大規模のものが稼動している。

我々は磁力支持天秤装置の上下に大型永久磁石を予め設置し、模型の自重と釣り合う磁気力を定常的に発生させることにより、模型の浮上支持に必要な電力を限りなく少なくすることに成功した。またこれまでの研究<sup>2)</sup>では磁束密度を上げるために各コイルで鉄製のヨークを使用していたが、これをあえて用いないことで装置の軽量化を計った。また、このことはコイルのインダクタンスの低下をもたらし、装置の応答速度を上げることに寄与していると考えられる。

本報告では測定部の断面が高さ36 cm、幅40 cmで球体模型の支持に適した低電力磁力支持天秤装置の開発、及びこれを用いた風洞実験について述べる。装置の詳細については現在投稿中の風工学会の会誌に詳細が近く報告されるのでそれを参考にされたい。

### 2. 磁力支持天秤装置の概要

本研究で開発した磁力支持天秤装置の構成を図1に、正面図と側面図を図2に示す。装置は主に、パソコン(PC)、電流制御回路、空芯コイル(外径180 mm、内径140 mm、厚さ20 mm、巻き数255回、インダクタンス6.89 mH)、大型永久磁石(外径150 mm、内径50 mm、厚さ25 mm、残留磁束密度1.066 T、サマリウム系希土類磁石)、位置・姿勢検出器から構成されている。模型の内部

\* 〒811-0295 福岡市東区和白東3-30-1

† E-mail: y-kawa@fit.ac.jp

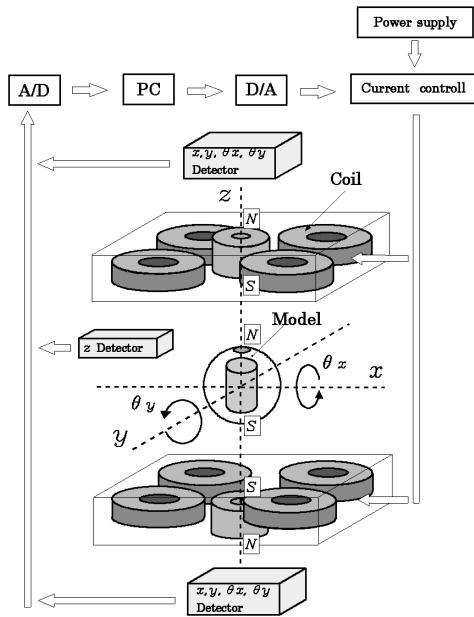


図1 磁力支持天秤装置の構成

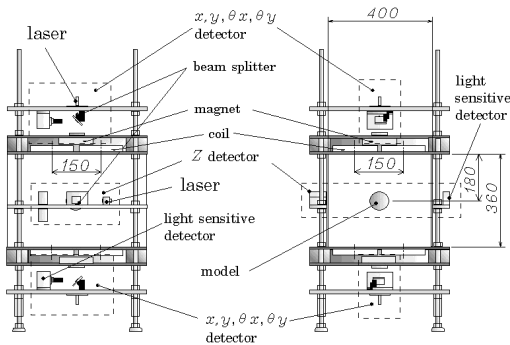


図2 磁力支持天秤装置の正面図と側面図

には磁気力を発生させるための小型の永久磁石が入っている．装置の大型永久磁石と小形永久磁石の磁極の関係は図1に示す通りであり，模型は測定部中心で支持される．小型永久磁石には直径 35 mm，長さ 40 mm，残留磁束密度 1.35 T のネオジム系希土類磁石を使用している．模型の運動に対して取られる軸は図1に示すように鉛直方向を  $z$  軸，水平方向を  $x$  軸（スパン方向）， $y$  軸（主流方向），それらの軸回りの回転角をそれぞれ  $\theta_x$ ， $\theta_y$  とする．現在  $z$  軸回りの回転を除いた 5 軸の制御及び力の測定が可能である．

模型を磁力支持するための磁界を形成する空芯コイルは装置上下に各 4 個ずつ設置されている．この装置の特長として，模型の自重と等しい磁気力を上下一対の大型永久磁石により得ることができるので，模型の支持（重力に対する）に消費する電力はほぼ 0 であり，装置全体の消費電力を大幅に抑えられることが挙げられる．

また，一般的に磁力支持天秤装置では高い磁束密度を得るために，ヨークを用いて磁気回路を構成するが，本装置においてはヨークを使用していない．ヨークを用いればコイルに流す電流に対して大きな磁束密度を得ることができるので消費電力を抑え，模型に作用させる磁気力を増すことができるが，一方でヨークを用いない磁力支持天秤装置の利点として次のことが挙げられる．ヨーク内の残留磁化に起因するヒステリシスの発生の影響を受けないので，高精度な測定が可能である．これは特に動的試験のような時間的に変動する力の測定においても有利である．また，コイルのインダクタンスが下がるのでコイル電流の立ち上がり時間が速くなり 制御速度の高速化がより容易となる．加えて，装置の軽量，小型化が可能になる，などの点である．

一般的な磁力支持天秤装置では航空機の模型を使用した風洞実験を視野に入れているので，横長の模型の支持に適した設計がなされている<sup>1-6)</sup>．従って，模型内部の永久磁石も横長に，つまり水平軸方向に磁石の磁極が取られる様に設置される．これとは対照的に本磁力支持天秤装置では球体模型に代表されるブラフボディタイプの模型に適した設計がなされており，その点が大きな特長となっている．

模型の  $z$  軸方向の変位は，模型の上端に水平にレーザー光を照射し，その対面にある光検出器の出力値より求めた．つまり，レーザー光の全光量の半分が光検出器に照射される場合を原点とし，模型が中心より上側に移動した場合，光検出器が受ける光量は減少し，逆に模型が中心より下側に移動した場合は光量が増加することを利用している．簡単な計測システムではあるが約  $3 \mu\text{m}$  と比

較高い測定精度が得られた．有効な変位検出範囲は  $\pm 1$  mm 程度である．

$x, y$  軸方向の変位および  $x, y$  軸周りの回転角  $\theta_x, \theta_y$  を検出するために、模型の上側の中心及び下側の中心に直径 3 mm の円形反射シールが貼られている．半導体レーザーの光が光拡散板により広がり、その後レンズで集光されて模型上の反射シールに照射される．その反射光を同じレンズと半透鏡を用いて 4 分割光検出器の受光面上に結像させる．なお、上下の反射シール位置から模型の重心位置と回転角  $\theta_x, \theta_y$  を算出し、姿勢制御に用いた．この検出器では反射シールからの反射光は円形なので変位と検出電圧との関係は線形にはならない．従って、 $z$  軸の検出器同様に 3 次曲線として感度を求めた． $x, y$  軸方向における有効な検出範囲は  $\pm 1$  mm 程度である．

磁力支持天秤装置では模型に対して作用させることができる磁気力の限界は、模型内部の永久磁石に依存する．従って磁石の種類、寸法は模型の用途や実験条件に基づいて決定する必要がある．模型に内蔵させる永久磁石は少しでも大きな磁気力が得られるように、高い残留磁束密度を有するものが望ましい．本研究ではネオジム系希土類磁石（信越化学工業株：N シリーズ）を使用している．磁石の仕様は模型重量を考慮した上で磁気力計算等を行い決定される．磁場解析にはピオ・サパールの法則に基づいて独自に開発したプログラムを使用した．

また、小形永久磁石に作用する力の算出においては、これを同じ形状のソレノイドに置き換え、ソレノイドの銅線に作用する力を積分することにより求めた．ソレノイドへの近似では、まず適当な巻き線密度を決め、ソレノイドの長さを無限長にしたときのソレノイド中心部における磁束密度が、永久磁石の飽和磁束密度と一致するように電流値を決めた．この様な方法で求められた磁気力と実測値との間の誤差は約 10 % 程度であった．

本磁力支持天秤装置では上記のネオジム系希土類磁石で直径 35 mm、長さ 40 mm の円柱形状のものを模型に内蔵させた場合、模型の総質量を

383 g にすれば装置の大型永久磁石との間に働く磁気力と釣り合った．この場合、永久磁石の質量が 288.6 g であるから模型の外装部は 94.4 g になるように設計した．

本磁力支持天秤装置は模型に対して  $z$  軸回りの回転を除いた 5 軸の制御及び力の測定が可能である．制御には PC（NEC 株：PC-9821Xa7）を使用しており、制御プログラムは Turbo C++ により作成した．PC には 12 bit、16 ch の A/D 変換ボード 1 枚、12 bit、4 ch の D/A 変換ボード 2 枚が組込まれている．A/D 変換ボードには位置姿勢検出器の検出信号用に 8 ch、コイル電流を測定するためのシャント抵抗部の電圧測定用に 8 ch を割り当てている．D/A 変換ボードはコイル電流を制御するための PC からの出力電圧（8 ch）を発生するために使用される．

模型の 5 軸制御は軸ごとに PID 制御を用いることで行われる．磁力支持天秤装置には上側に 4 個、下側に 4 個、合計 8 個のコイルが設置されており、制御する軸によりこれらのコイルに流す電流の符号が異なる．これは模型内部の永久磁石の特定軸方向に対して磁気力が作用するように磁場を形成するためである．

### 3. 力較正試験

磁力支持天秤装置を使用する風洞実験において模型に作用する空気力を測定するには、予め実験前に軸ごとに模型に作用する力とコイル電流との関係式を求めておく必要がある．この作業は一般的な天秤装置の力較正試験と同じである．その方法は滑車、ワイヤ等を用いて直接模型に重りを吊り下げ、模型の特定の軸に既知の力を作用させ、その時のコイル電流を測定し荷重とコイル電流値の間の比例定数を求めるものである．

磁力支持天秤装置の力較正試験では模型に直接ワイヤ等を取り付ける必要があるため、模型形状によって較正試験の精度が大きく左右される．また、磁力支持天秤装置では実際に磁気力が作用するのは模型内部の永久磁石なので、力較正する模型内部の永久磁石に同一のものを使えば模型の外

部形状が異なっても問題はない。

そこで力較正試験が容易に行える円盤形状の模型を使用して力較正試験を行った。模型内部の永久磁石には前述した通り、直径 35 mm、長さ 40 mm、残留磁束密度 1.35 T のネオジウム系希土類磁石を使用した。

力較正試験結果の一例として、 $z$  軸方向の結果を図 3 に示す。また、回転軸回りの力(トルク)較正試験の結果の一例として、 $\theta_x$  軸周りのトルク較正試験結果を図 4 に示す。コイル電流の測定は 1 点に対して、模型に重りを吊るした状態で連続的に 1,024 回測定し、その平均値を電流値としている。これらの力較正試験結果から磁場を形成す

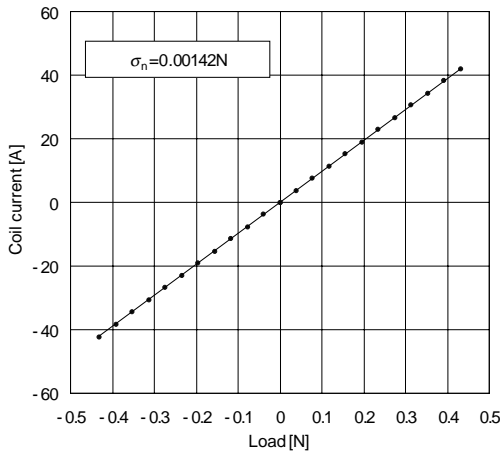


図 3  $z$  軸の力較正試験

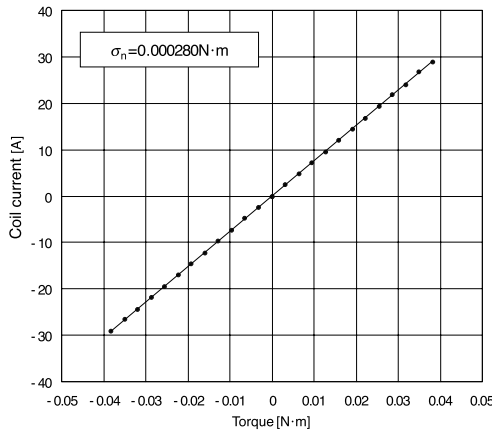


図 4  $\theta_x$  軸の力(トルク)較正試験

るコイルに流れる電流と模型に作用する磁気力とがほぼ比例関係であることが分かる。図中の  $\sigma_n$  は直線からのズレを標準偏差で表したものであり、高い直線性を示していることが分かる。

本磁力支持天秤装置が持つ天秤の測定精度を表 1 に示す。測定精度は天秤の支持限界(測定限界)に対する標準偏差の割合で評価した。表中の支持範囲とは各軸単独に磁気力を作用させた場合の支持限界を表したものである。従って  $z$  軸と  $x$  軸に同時に磁気力を作用させる場合はその割合によって支持限界は変動することになる。

模型の位置姿勢制御は軸ごとに行われており、実際の制御では制御対象となっている軸のみに磁気力が作用することはなく、例えば  $x$  軸方向に磁気力を作用させると  $\theta_y$  軸にトルクが生じてしまうなど軸間の干渉が発生する場合がある。この軸間の力の干渉は天秤の測定誤差として現れる。従って、力較正試験ではコイル電流と磁気力との関係式を求めるだけでなく、軸間の干渉の度合いを調べておく必要がある。

力較正試験より明らかとなった軸間干渉の度合いをまとめたものが表 2 である。軸間干渉の度合いは較正対象軸の近似直線の傾きと、比較の対象となる軸の近似直線の傾きとの比により評価している。最も干渉が大きかったのは  $\theta_x$  軸(100%)に対する  $y$  軸に 5.7%の干渉があった。また、 $\theta_y$  軸(100%)に対する  $x$  軸の干渉も 3.5%と大きいことが分かる。それ以外の軸に関しては 3%以

表 1 磁力支持天秤装置の測定精度

|                    | $z$      | $x$      | $y$      | $\theta_x$ | $\theta_y$ |
|--------------------|----------|----------|----------|------------|------------|
| Support Range      | -0.6N    | -0.8N    | -0.8N    | -0.06N·m   | -0.06N·m   |
| Standard Deviation | 0.00142N | 0.00076N | 0.00156N | 0.00028N·m | 0.00024N·m |
| Accuracy           | 0.24%    | 0.10%    | 0.20%    | 0.47%      | 0.40%      |

表 2 力較正試験における軸間干渉

|            | $z$  | $x$  | $y$  | $\theta_x$ | $\theta_y$ |
|------------|------|------|------|------------|------------|
| $z$        | 100% | 2.4% | 0.2% | 0.9%       | 1.1%       |
| $x$        | 1.1% | 100% | 1.4% | 1.8%       | 2.7%       |
| $y$        | 1.3% | 2.5% | 100% | 2.1%       | 2.6%       |
| $\theta_x$ | 1.9% | 2.5% | 5.7% | 100%       | 1.3%       |
| $\theta_y$ | 1.7% | 3.5% | 0.8% | 1.0%       | 100%       |

下である。

## 5. 球体模型の風洞実験

### 5.1 滑面球の抗力係数

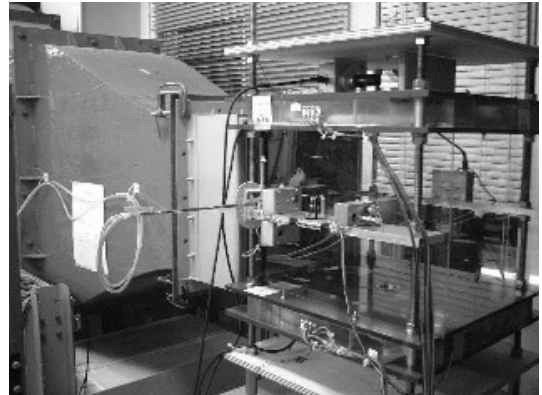
本磁力支持天秤装置の性能を確認するためには、球体や楕円体といった基本形状の模型を用いた風洞実験を行い、既存の信頼性の高いデータと比較してみる必要がある。この研究では野球ボールでの風洞実験も視野に入れているため、球形状の模型の磁力支持は他の形状の磁力支持に比べ容易にできる構造になっている。

磁力支持天秤装置による風洞実験用の模型として直径 70 mm の滑面球を製作した。模型内部の小型永久磁石は力較正試験で用いたものと同じ直径 35 mm、長さ 40 mm のネオジム系希土類磁石である。模型の外装部は機械加工が可能でかつ軽量のケミカルウッド（商品名：サンモジュール 7 K、比重：0.65、三和化成工業(株)製）を NC 旋盤で加工し、質量は永久磁石を含めて 383 g であった。

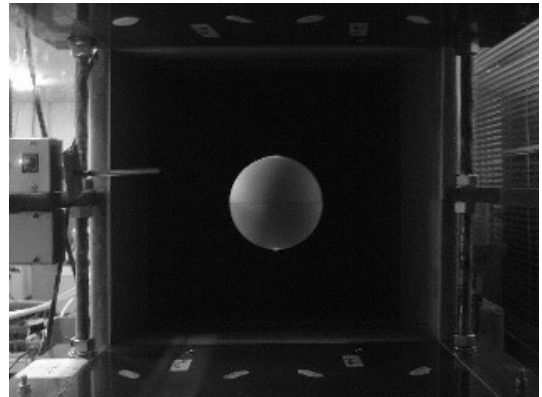
風洞実験で使用した風洞<sup>7)</sup>は開放型押込み式で絞り比が 18、風速分布の一様性が  $\pm 1\%$ 、乱れ強さが 0.1% 以下のものである。出口寸法は 36 cm  $\times$  40 cm で測定部に接続されている。

図 5 (a) に風洞測定部の様子を示す。図 5 (b) は球体模型が測定部中央に浮かんでいる様子を示す。実験は先ず球体模型を磁力支持し、無風状態時の基準となるコイル電流を測定した後、風速 5 m/s  $\sim$  20 m/s の間を 1 m/s ずつ増加させながら、各軸方向のコイル電流を測定した。5 軸制御の磁力支持天秤装置なので  $z$  軸回りの回転の制御はできない。従って、実験中はできる限り自発的な回転が誘起されていない状態で測定を行った。

実験結果を図 6 に示す。コイル電流の測定値（ただし、同符号の電流となる 4 個のコイル電流の合計値）は 1 点に対して 1,024 回連続に測定した値の平均を取っている。制御周期が 6.3 ms なので 1 点の測定時間は 6.45 s である。抗力の作用する方向である  $y$  軸制御のコイル電流は流速の増加とともにほぼ 2 次関数的に増加しており、抗力が



(a) 風洞と磁力支持天秤装置



(b) 磁力支持されている球体模型

図 5 球体模型の風洞実験

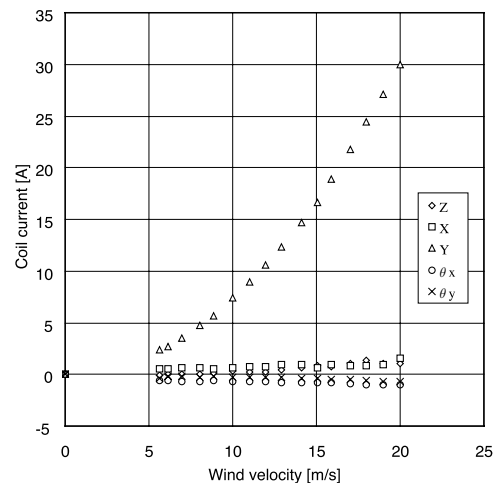


図 6 風速に対するコイル電流の変化

流速の 2 乗に比例して増加してゆく様子がわかる。y 軸以外の軸に対してもわずかの力成分が測定されている。

この結果から滑面球の抗力係数とレイノルズ数の関係を求めたものが図 7 である。比較のために様々な機械的支持法により球体の風洞実験を行った機械工学便覧の実験データ<sup>8)</sup>を同図にプロットしている。測定したレイノルズ数の範囲において抗力係数がよく一致していることが分かる。

## 5.2 擬似支持棒による影響

磁力支持天秤装置の特長を生かした風洞実験として、磁力支持された球体模型の下流側に直径 6 mm のアルミ製中実丸棒を図 8 の様に設置することで擬似的な支持状態を作り、その支持干渉の影響を調べる実験を行った。球と支持棒の先端部の間は 1 mm 程度の距離をとっている。

この実験結果を図 9 に示す。一般に球の下流側に支持棒等の物体が存在すると、球後方の剥離領域は棒の体積分だけ実効的に減るので、抗力係数は小さくなると考えられる。今回の実験結果からも、抗力係数は 3% 程度低下しており、その傾向を伺うことができた。

## 6. まとめ

低電力で比較的大面積の開口部を持つ磁力支持天秤装置の開発を行ない、直径 70 mm の滑面球模型を風洞測定部中央に磁力支持させることに成功し、流速 20 m/s まで安定に保持することができた。z 軸回りの回転を除く 5 軸の位置姿勢制御及び力の測定が可能になった。しかしながら数%程の軸間干渉は残った。

この装置を用いて直径 70 mm の滑面球模型の風洞実験を行い、 $Re = 10^5$  付近の球の抗力係数を求めた結果、信頼性の高い既存の測定データとよく一致することを確認した。さらに、擬似的な支持棒の空力特性に及ぼす影響について調べ、支持棒の有り無しで抗力係数に有意な差が観測できた。

最大風速時 (20 m/s) におけるこの装置の消費

電力は約 1.5 kW であった。

これらのことより、磁力支持天秤装置が 3 次元の模型の風洞実験装置を用いた空力特性の測定に有効であることが明らかとなった。

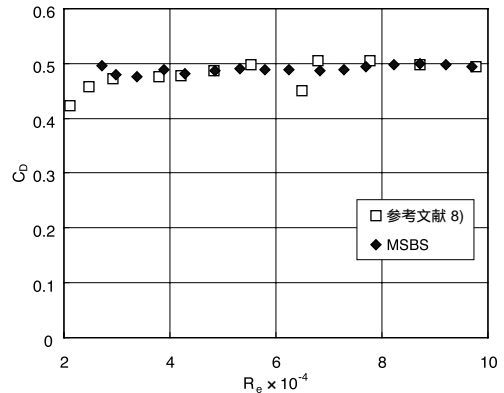


図 7 抗力係数とレイノルズ数の関係

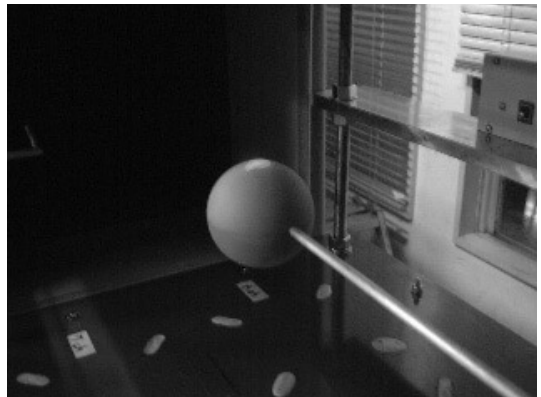


図 8 擬似支持状態における球体模型の風洞実験

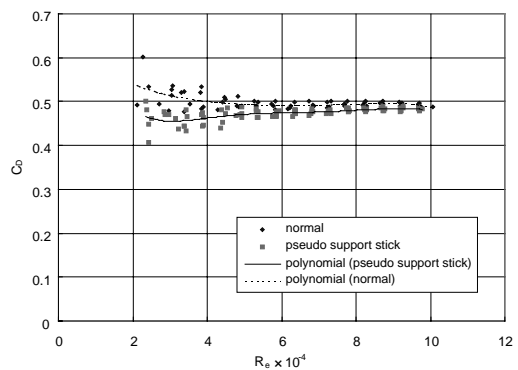


図 9 擬似支持が抗力係数に及ぼす影響

## 参 考 文 献

- 1) Chrisinger, J.E., Tilton III, E. L., Parkin, W. J., Cofin J. B. and Covert, E. E.: Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Application, J. Royal Aeronaut. Soc., **67**(1963), pp.717-724.
- 2) 澤田秀夫, 河野 敬, 国益 徹也: 「航技研における磁力支持天秤装置の研究」, NALSP-42, 1999, pp.9-23.
- 3) 澤田秀夫, 河野 敬, 国益 徹也: 「60 cm 磁力支持天秤装置の低速風洞への適用」, 第31期日本航空宇宙学会年会講演会前刷り集, 2000.3, pp.222-225.
- 4) 澤田秀夫, 国益徹也, 原田賢哉: 「磁力支持天秤装置を用いた回転楕円体模型の抗力測定結果」, 第32回流体力学講演会前刷り集, 2000.10, pp.171-174.
- 5) 原田賢哉, 澤田秀夫, 高橋 伴: 「飛行船風洞実験における支柱干渉の影響」, 第32期日本航空宇宙学会年会講演会前刷り集, 2001, pp.211-214.
- 6) 永井文秀: 「磁力浮上天秤の研究」, 第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 1998.6.23-25, pp.453-458.
- 7) 溝田武人, 功能郁生, 市村日出夫: 「小型・低速風洞装置の製作と流速制御」, 共和技報 1988年 No.369第369号, 1988.11, pp.2707-2711.
- 8) 「機械工学便覧 A5流体工学 新版」, 日本機械学会編, p.98, 図205.