

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04186

研究課題名(和文) 二自由度運動浮上を可能にする風洞模型用磁気支持装置の開発

研究課題名(英文) Development of a magnetic suspension system for wind-tunnel models moving in two-degree of freedom

研究代表者

上野 和之 (UENO, Kazuyuki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：20250839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：運動経路や運動姿勢が非定常に変化する自由運動物体の研究には固定式支持棒を使った従来の風洞では対応できません。その場でそのときの空気力を反映した飛行物体の多自由度運動を風洞内で再現する動的風洞試験法の確立を目指します。この研究では2自由度運動の可能な風洞模型用動的磁気支持装置を開発しました。

開発した装置を使い、風洞模型の2自由度磁気支持に成功しました。また、風洞気流空気力の直接的な影響のもとで風洞模型が2自由度運動することを確認しました。その運動を画像認識システムを利用して取得しました。取得した運動データから、空気力モーメント傾斜の値を同定し、その同定手法の妥当性を確認しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

その場でそのときの空気力を反映した飛行物体2自由度運動を風洞内で実現する動的磁気支持装置を開発しました。この磁気支持装置は研究代表者による新規提案システムであり、気流中の物体の多自由度自由運動を実験室で実現できる世界で唯一の実験装置です。

この2自由度動的磁気支持装置を使って、大気圏突入カプセル模型の気流中での運動を調べました。その結果から空力微係数とよばれる空気力学的特性量を取得しました。それにより、開発した装置および動的風洞試験手法の有用性を示すことができました。今後、この技術を世界に広げていきたいと思えます。

研究成果の概要(英文)：Conventional wind tunnels with fixed supports cannot be used for research on free-moving objects whose translational motion and attitude change unsteadily. Establishment of a dynamic wind tunnel test method that reproduces the multi-degree-of-freedom motion of a flying object in a wind tunnel, reflecting the in-situ aerodynamic forces, is proposed. In this study, a dynamic magnetic suspension system for model motion in two degree of freedom has been developed.

Using the developed apparatus, a two-degree-of-freedom suspension of a wind tunnel model was successfully demonstrated. It was also confirmed that the wind tunnel model moves two degrees of freedom under the direct influence of aerodynamic forces in a wind tunnel air flow. The motion was acquired using an image recognition system. From the acquired motion data, we identified the value of the aerodynamic moment slope and confirmed the validity of the identification method.

研究分野：航空宇宙工学、流体力学、電磁力応用工学

キーワード：Dynamic wind-tunnel test Magnetic suspension Aerodynamic force

1. 研究開始当初の背景

等速直線運動する物体まわりの流れと空気力は通常風洞と縮尺模型で再現して計測できる。また、従来型の磁力支持天秤を使えば支持棒の影響を取り除くことで、より正確な計測ができる。それとは対照的に、運動経路や運動姿勢が時々刻々変化する自由運動物体の研究には固定式支持棒を使った従来の風洞では対応できない。ヒンジを使えば回転1自由度で動的風洞試験ができる[1-3]。しかし、並進運動には対応できない。ロボットアームや従来型磁力支持装置模型を使えば風洞模型を強制運動させることが可能である[4, 5]。しかし、その場でそのときの空気力を反映した飛行物体の多自由運動を風洞内で再現する動的風洞試験の技術は確立されていない。多自由度動的風洞試験技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

風洞模型用2自由度磁力支持装置を試作し、その有用性を実証することがこの研究の目的である。

開発した磁力支持装置の概略図を図1に示す。この装置は風洞模型の2自由度の運動を許容するように設計されたものである。気流方向は上向きで、表1に示すようにピッチ回転と揚力方向の並進運動が自由になることを狙った設計である。動的風洞試験においては表1の力に加えて空気力が模型に加わり、それが模型運動に直接的に反映される。この装置では横力方向には不安定な磁気力が作用する。コイル磁場を使ったフィードバック制御によってこれを安定化させる必要がある(図2)。

この磁力支持装置は研究代表者による新規提案システムであり、これが完成したなら、気流中の物体の自由運動を実験室で再現できる世界で唯一の実験装置となる。その有用性を十分に示すことがこの研究の目的である。

表1 風洞模型の動きと模型内部に装着された円盤型永久磁石に作用する力

運動方向	動き	力
y軸まわりピッチ回転	自由(当初計画どおり)	磁石中心が重心に厳密に一致すれば力のモーメントなし
揚力方向(z方向)並進	振動(当初計画どおり)	弱い磁気復元力
抗力方向(x方向)並進	振動(当初計画外)	上向き磁気支持力と重力
x軸まわりロール回転	拘束	固定永久磁石・ヨークの開磁気回路による磁気トルク
z軸まわりヨー回転	拘束	固定永久磁石・ヨークの開磁気回路による磁気トルク
横力方向(y方向)並進	0.1 mm 以下に拘束	2つのコイルによるPID制御

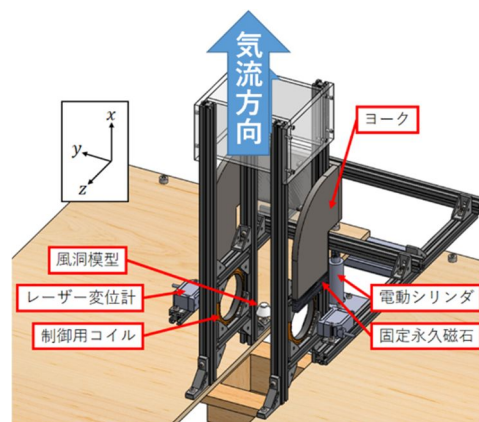


図1 非定常空気力のもとで2自由度運動する風洞模型のための動的磁力支持システム

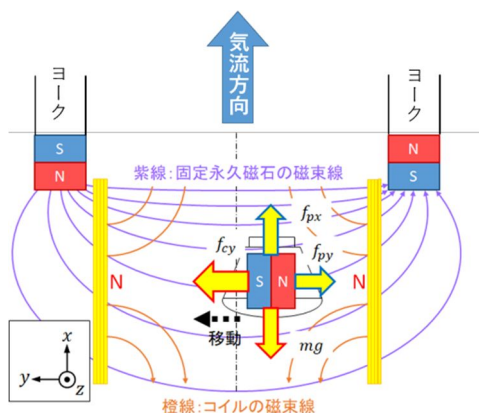


図2 固定永久磁石による模型支持磁場とコイルによる横力方向フィードバック制御磁場

3. 研究の方法

図3に示す風洞模型を設計し製作した。2018年11月に国際宇宙ステーションから帰還して太平洋に着水したJAXAの大気圏再突入カプセルHSRCの1/33.6模型である。この模型を図1の磁力支持装置によって空中に浮上させ、風洞の気流中で飛行させる。研究計画時にはピッチ回転と揚力方向並進運動の2自由度自由運動を狙っていたが、実際には図4のように抗力方向(x 方向)の並進運動も含めた3自由度運動が達成された。

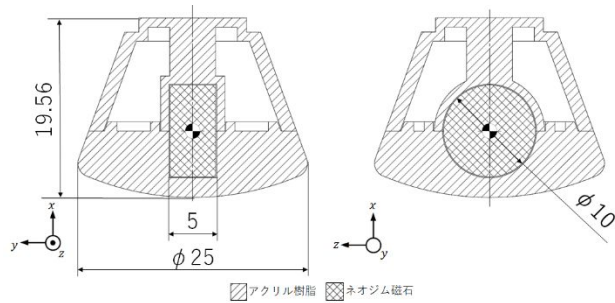


図3 大気圏再突入カプセル模型

表1の7行目に示した横方向(y 方向)並進運動拘束のために、図5に示すようなフィードバック制御システムを設計し、実装した。コイル電流とコイルが作る磁場による制御力との関係を調べたうえで、模型の運動方程式を使って適切なPID制御の係数の値に決定した。

表1の2~4行目に示した模型運動を定量的に計測するために、画像認識システムARToolkitを利用した。模型に貼り付けたマーカー動画をデジタルカメラで撮影し、ARToolkitによる後処理で算出される風洞模型の重心位置($x_g, 0, z_g$)とピッチ角 θ を取得した。

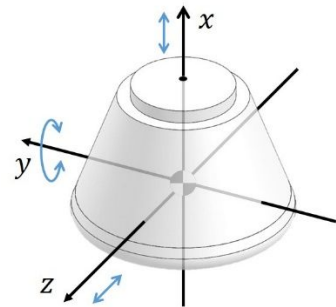


図4 動的風洞試験における風洞模型の運動方向

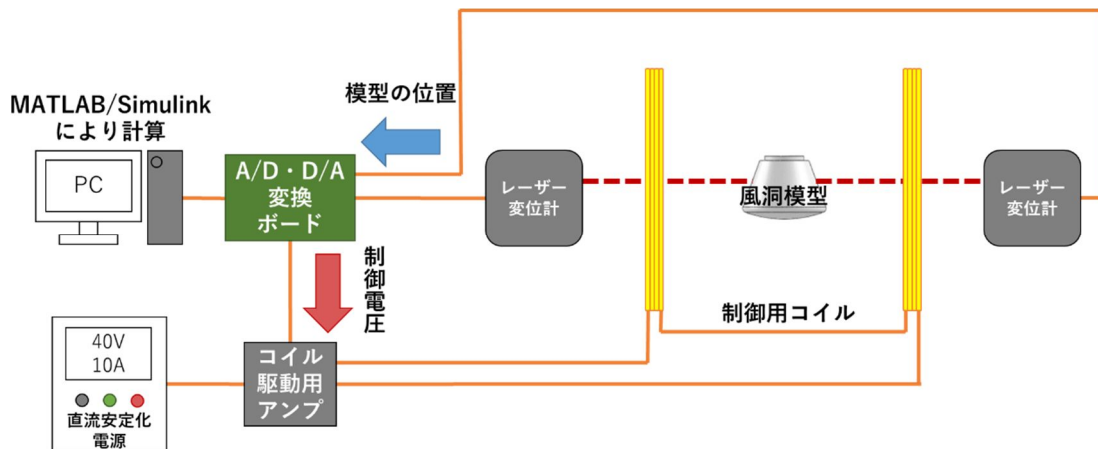


図5 横方向(y 方向)並進運動拘束のためのフィードバック制御システム

4. 研究成果

設計・製作した風洞模型用磁力支持装置を使い、図6のように風洞模型の安定浮上を達成した。計画時の狙いどおりピッチ方向の回転自由度と揚力方向並進運動自由度が得られた。自動制御によって拘束された横力方向(y 方向)の変位は常に0.1mm以下となった。

風洞気流の中で模型を浮上させると模型に非定常空気力が作用して、模型が運動する。図7は、風洞気流が2 m/sのときにARToolkit



図6 安定に磁力支持された大気圏再突入カプセル模型

で取得したピッチ角の時間履歴の一例である。卓越周波数 f_θ で回転振動が続いた。ただし、振動振幅は一定ではない。また、波形もきれいな正弦波とはいえない。

風洞気流が 2 m/s のときに ARToolkit で取得した重心の揚力方向位置の時間履歴の一例を図 8 に示す。卓越周波数 f_z で並進振動が続いた。風洞気流が 2 m/s のときには f_z は f_θ に一致しなかった。

図 9 にピッチ回転の卓越周波数 f_θ と風洞気流流速との関係を示した。先行研究の理論式から、 f_θ が気流流速に比例することが予想されていた。実験結果は、気流流速の増加とともに理論式(図中の青線)に漸近した。その一方で低速域では無視できない差が生じた。

低速域での f_θ の実験値と理論値の差を説明するために、磁石中心と重心(設計上は一致)にわずかな誤差があると仮定して、理論式を拡張した。拡張理論式を図 9 の実験値にフィッティングした結果、重心と磁石中心のずれは 39 μm と同定された。また、モーメント傾斜 $C_{M\alpha}$ は -0.11 と同定された。JAXA が公表している論文[1]中のグラフから読み取れるモーメント傾斜は $C_{M\alpha} = -0.13$ ないし -0.14 である。この値との比較から、本研究のモーメント傾斜同定手法の妥当性が確認できたと考える。本研究と JAXA の風洞試験との間には次のような実験条件の違いがある: 本試験は 2 自由度の動的風洞試験をマッハ数域が $M < 0.1$ の低速域で実施しているのに対して、JAXA では迎え角 α を固定して行った一連の静的な風洞試験を $M = 0.4$ で実施している。このような違いが両者の $C_{M\alpha}$ の 15%程度の値の違いにどのような影響を与えているのかについては今後解明していく必要がある。

以上で説明したように、2 自由度運動の可能な動的磁力支持装置を開発し、風洞模型の磁力支持に成功した。また、風洞気流中で空気力の直接的な影響のもとで 2 自由度運動することを確認した。その運動を画像認識システム ARToolkit を利用して取得した。取得した運動データから、モーメント傾斜 $C_{M\alpha}$ の値を同定し、その同定手法の妥当性を確認した。

<引用文献>

- [1] Fujii, K., Nakano, E., Mitsuo, K., Nagai, S., Tanno, H., Iemura, K., Takama, Y., Nakakita, K., Matsuyama, S., Fujita, K. and Murakami, K., " Estimation of aero- and aerothermo-dynamic characteristics for HTV-R, " J. Space Tech Sci., Vol.27, No.2 (2016), pp.31-43.
- [2] 古賀・互井・日高・中野・永井, 「自由回転試験による揚力カプセルの遷音速動特性の考察」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.64, No.5 (2016), pp.281-287.
- [3] 永井・互井・古賀・日高・中村・渡邊, 「HTV 搭載小型回収カプセルの動安定特性の推定と飛行後比較」, 日本航空宇宙学会誌, Vol.69, No.2 (2021), pp.52-57.

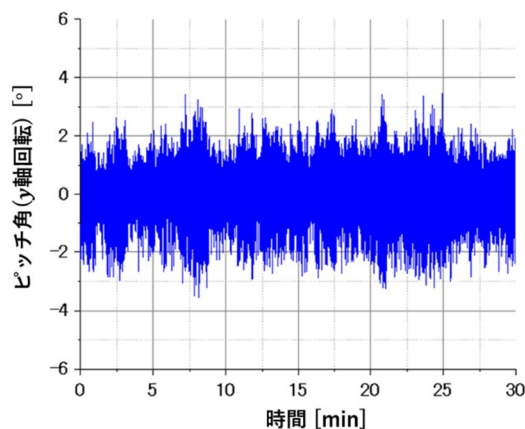


図 7 ピッチ角の時間履歴 (気流流速 2 m/s)

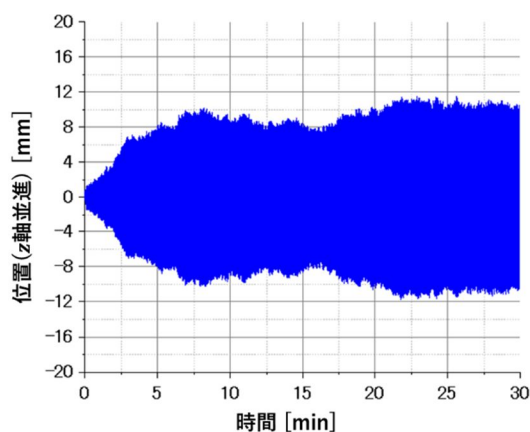


図 8 重心の揚力方向位置の時間履歴 (気流流速 2 m/s)

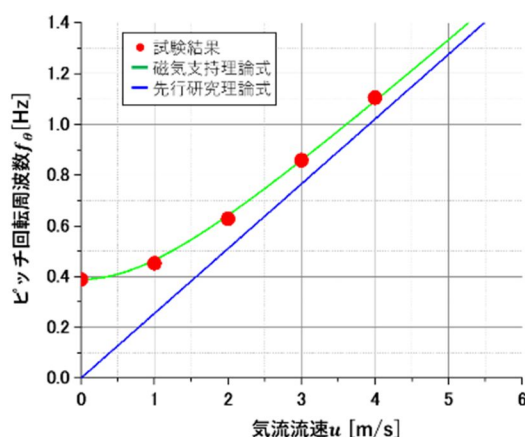


図 9 ピッチ回転周波数と気流速度の関係

- [4] Asai, K., Konno, A., Jiang, X., Numata, D., Abe, H., Nakata, N. and Hara, T., "Multi-degree-of-freedom dynamic wind-tunnel testing of a delta wing using a robotic manipulator," In Proc. 28th Cong. Int. Council Aeronautical Sci. (2012), pp. 23-28.
- [5] Kai, D., Sugiura, H., and Tezuka, A., "Dynamic Wind-Tunnel Testing of a Sixty-Degree Delta-Wing Model Without Support Interference," AIAA Journal, Vol.59, No.3 (2021), pp.1099-1108.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuyuki Ueno, Reo Nagasaka, Takayuki Sato and Mamoru Kikuchi
2. 発表標題 A Magnetic Suspension System for a Wind-Tunnel Model Moving by Unsteady Aerodynamic Force
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤貴行, 佐藤拓志, 菊池護, 上野和之
2. 発表標題 二自由度運動が可能な磁気支持装置を用いた大気圏再突入カプセルの風洞試験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2021年講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永坂 玲央, 佐藤貴行, 菊池護, 上野和之
2. 発表標題 風洞用磁気支持装置による風洞模型の浮上制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 東北支部 第322回研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野和之, 菊池護, 芳賀政汰, 永坂玲央, 藤澤新雪, 佐藤貴行
2. 発表標題 二自由度運動浮上を可能にする風洞模型用磁気支持装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会 第97期 流体工学部門
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永坂玲央, 佐藤貴行, 遠藤幹太, 菊池護, 上野和之
2. 発表標題 二自由度運動を可能にする風洞模型用磁気支持装置
3. 学会等名 日本機械学会東北支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤澤新雪, 菊池護, 上野和之
2. 発表標題 風洞模型用磁気支持装置における 電磁氣的模型位置検出法の開発
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2020年講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野和之, 佐藤貴行, 佐藤拓志, 菊池 護
2. 発表標題 非定常空気を直接反映させる動的磁気支持風洞試験
3. 学会等名 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤拓志, 菊池 護, 上野和之, 竹田裕貴, 並岡勇樹
2. 発表標題 動的磁力支持装置による 三自由度運動模型の 風洞試験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演会ならびに第3回再使用型宇宙輸送系シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

理工学部 システム創成工学科 機械科学コース（上野和之教授研究室）
<https://www.youtube.com/watch?v=0RanCQ7VmRg>
岩手大学 上野・竹田研究室
<http://web.cc.iwate-u.ac.jp/~uenok/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------