

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249121

研究課題名(和文) EFD/CFD/RT融合による非線形飛行力学の跳躍的發展

研究課題名(英文) Evolution of Nonlinear Aerodynamic Modelling based on Combined EFD/CFD/RT Approach

研究代表者

浅井 圭介 (Asai, Keisuke)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40358669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非線形領域における航空機の動安定性を評価するための新しい飛行シミュレーション技術を構築に向けて、EFD(風洞実験)とCFD(計算流体力学)とRT(ロボット技術)の専門家が協力して、これらの分野を融合した新概念の実験技術の開発に取り組んだ。具体的にはロボットマニピュレータや磁力支持装置(MSBS)による6自由度マニピュレーション技術を開発し非線形空気力の数理的モデルの同定を可能にする動的風洞技術を開発し、これによりデルタ翼の高迎角試験、回転楕円体や有翼模型の自由支持を実現した。また運動する模型上の非定常流れ場を計測する新しい可視化法を開発し動的実験におけるそれらの有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a new type of flight simulation technique for wind-tunnel testing, the specialists of EFD, CFD, and RT have collaborated in merging the associated technologies of these fields. The six degree-of-freedom manipulator such as a HEXA-type parallel-link robot and a Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) have been developed and applied to wind-tunnel testing to identify the nonlinear aerodynamic modelling of the model. One of the targets of this study was the behavior of a maneuvering delta wing at high angles of attack. The other was free-flight tests of a prolate spheroid and a winged body using the MSBS. New visualization techniques such as two-color unsteady pressure-sensitive paint and luminescent mini tuft have been introduced and their effectiveness in dynamic wind-tunnel testing has been verified. The developed technique can provide a useful method for dynamic testing of automobiles and reentry space capsules.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：飛行力学 非定常空気力学 磁力支持天秤装置 ロボットマニピュレータ データ同化 光学計測

## 1. 研究開始当初の背景

航空機の設計開発においてフライトシミュレータは不可欠のツールであるが、それを使用されている空力データの信頼性は必ずしも高いものではない。20世紀初頭に Bryan らが築き上げた線形化運動方程式に基づく飛行力学は、安定微係数に基づく安定性解析など航空分野で多くの成果を挙げてきたが、ポストストールなど非線形領域における飛行や UAV の高機動運動への適用に対しては限界が明らかになっている。次世代の航空機の設計には、経済性ととともに安全性のさらなる向上が求められており、非定常空気力モデルの同定は解決が急がれる重要な工学問題だと言える。航空機の安全性向上や無人機の事故率低減の問題に対して、非線形領域における運動模擬が可能な動的風洞実験と非定常空気力モデルを同定する系統的な解析手法の開発が重要だという認識が高まっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、このような問題に対する工学的アプローチとして、航空機の運動を支配する「非定常空気力モデル」を同定する新しい概念の風洞内飛行シミュレーション技術を開発することを目指している。このため、実験流体(EFD)、計算流体(CFD)、ロボット技術(RT)の専門家が連携し、「ハイブリッドシミュレーション」による動安定性の評価、「磁力支持装置」による自由飛行状態の実現、動的風洞試験への「計測融合シミュレーション」の適用と言う3つの研究課題に取り組む。このような研究は、航空機の動安定性の研究や UAV 開発だけでなく、自動車の走行安定性やスポーツ工学の研究にも適用可能であり、飛行力学の枠を超える学術の進歩と産業界への応用展開に広く貢献することが期待される。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの軸に従って研究計画を推進する。

(1) 第1の軸では、パラレルリンクマニピュレータを用いた「ハイブリッドシミュレーション」とそれを利用した動安定性評価法の確立を目指す。風洞内の模型にはたらく空気力をフィードバックし、このロボットを Closed Loop で制御することによりリアルタイムで航空機の模擬的な自由飛行状態を作り出すことを考える。

(2) 第2の軸では、磁力で模型を空中に浮揚させることのできる「磁力支持装置」(MSBS)の開発に取り組む。動安定実験

の大きな問題点が模型の支持装置と流れ場との干渉である。MSBSはこの問題を根本から解決する“理想的なマニピュレータ”と言えるが、技術的な困難が多く風洞実験への適用は進んでいなかった。本研究では、動的試験における支持干渉の影響とともに、この技術の将来性を評価するため、MSBSを用いた非定常実験に挑戦する。

(3) 第3の軸では、実験データと CFD データの同化によってより現実に近い模擬を行う「計測融合シミュレーション技術」を開発する。あわせて、非定常流れを可視化計測する非定常感圧塗料などの先進的な光学計測技術と画像処理手法の開発に取り組む。非定常空気力のモデルはこれまで、経験的な関数やポテンシャル理論を併用した数値モデルで表現されていた。ここでは、動的風洞実験に適用できるより統一的な方法論を確立することを目指している。

## 4. 研究成果

### 4-1. ロボットマニピュレータの開発

動的風洞実験には周波数と振幅が広い範囲で可変できる多自由度のロボットマニピュレータが不可欠である。HEXA ロボットは東北大内山研究室で開発された6自由度パラレルマニピュレータである。高速、高精度、高剛性、高負荷という特長を持つ。低負荷の運動では約 20 Hz という高速動作を実現している。本研究では、HEXA 型ロボットを動的風洞実験用に改良した「HEXA-X2 (図1)の開発に取り組んだ。高トルクのギア付きサーボモータを採用することで負荷性能を高めている。モータゲインのチューニングとフィードフォワード制御の実装が進めた結果、振幅 10 deg で周波数 4 Hz までの回転運動が実現できている。



図1 東北大の6自由度ロボット  
(HEXA-X2)

#### 4 - 2 ハイブリッドシミュレーション

ハイブリッドシミュレーションとは、航空機模型まわりの流れは風洞実験で、航空機の運動は計算機で模擬することで、仮想的な自由飛行状態をシミュレートする技術である。ロボットの先端に取りつけた模型に作用する空気力を PC にフィードバックし加速度を計算し、ロボットを閉ループ制御することで、航空機の模擬的な自由飛行状態を風洞内にリアルタイムで作り出せる。

ここでは、ロール回転するモータにデルタ翼を取りつけて、Wing Rock 現象のハイブリッドシミュレーションによる再現を試みた。図 2 に風速 10 m/s, の場合のロール角の測定結果を示す。Wing Rock に類似したリミットサイクル振動が模擬できていることがわかる。ただし、図 3 の位相図から明らかなように、ハイブリッドシミュレーションでは運動の立ち上がりが悪く、見かけの慣性モーメントが増大した状態になっており、各要素の改善が必要になった。

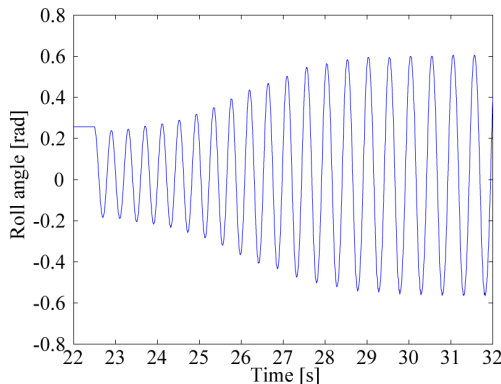


図 2 ハイブリッドシミュレーションによる Wing Rock 現象の模擬

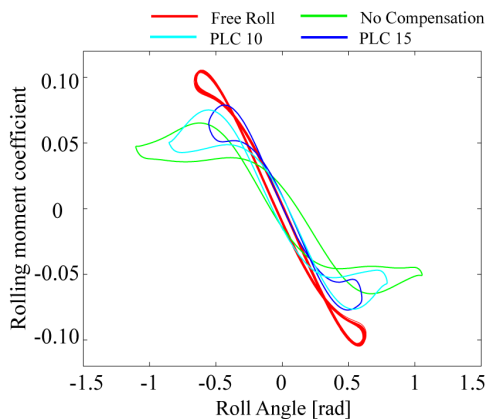


図 3 ハイブリッドシミュレーションの場合の位相図の比較 (赤:フリーロール, 緑:補償なし, 水色:10°の位相進み補償, 青:15°の位相進み補償)

#### 4 - 3 非線形空力現象の同定

デルタ翼が高迎角で飛行する際に翼面上に形成される前縁剥離渦は、渦揚力を発生し機体の運動に大きな影響を及ぼす。そのような現象の代表的な例にロール軸まわりにデルタ翼が自励振動を起こす“Wing Rock”がある。本研究では、半頂角 10 度のデルタ翼について大振幅におけるロール強制加振試験を行い、模型の運動がローリングモーメントに及ぼす影響を調べた。

その結果、デルタ翼に作用する空気力が振幅と無次元振動数に強く依存して変化することがわかった (図 4 参照)。

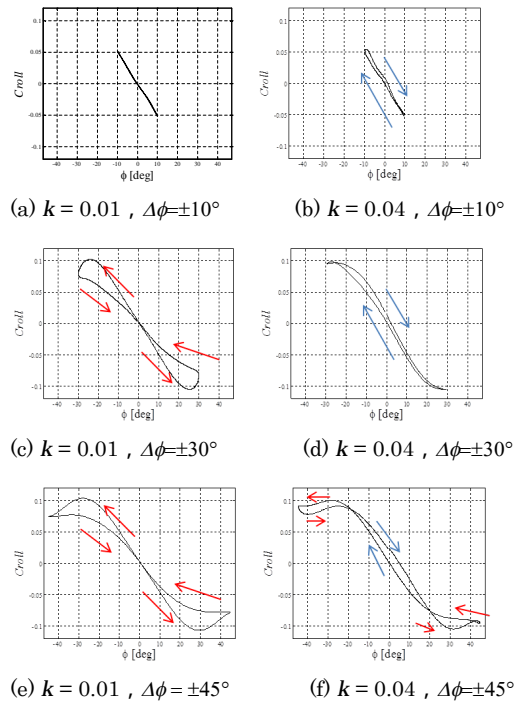


図 4 デルタ翼に働くローリングモーメントに対する無次元周波数と振幅の影響

デルタ翼に働くローリングモーメントの非定常変化には、デルタ翼本来のダンピング能力以外に、前縁剥離渦と翼面の位置関係、渦崩壊による揚力損失という 2 つの要因が関係している。翼面上の流れはそれらの時間遅れに支配されている。“Wing Rock”運動を正しく記述するには、これらの効果を含めたモデリングが不可欠であることがわかった。

#### 4 - 4 磁力支持天秤装置による動的試験法の開発

模型が風洞気流中で運動する動的風洞実験において支持干渉は最も評価が難しい誤差要因の一つである。本研究では、測定部の大きさが 0.3m の正方形の磁力支持天秤

(MSBS)の開発に取り組んだ .コイル系 , センサー系 , 制御系はすべて JAXA 0.6-m MSBSと同じ思想で設計されている( 図5) . 図6 に回転楕円体模型が磁力支持された時の写真を示す . 現在は模型の6 自由度支持 , さらに最大で 15 度の迎角で模型を空中固定することに成功している .

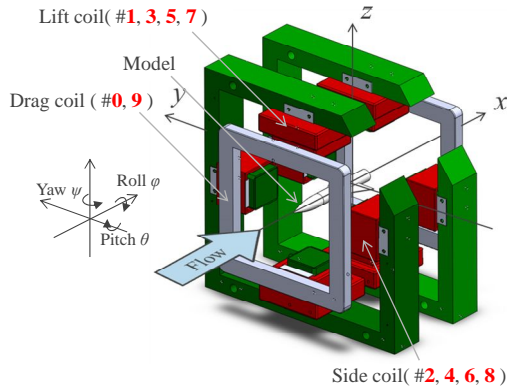


図5 0.3-m 磁力支持天秤装置の概要

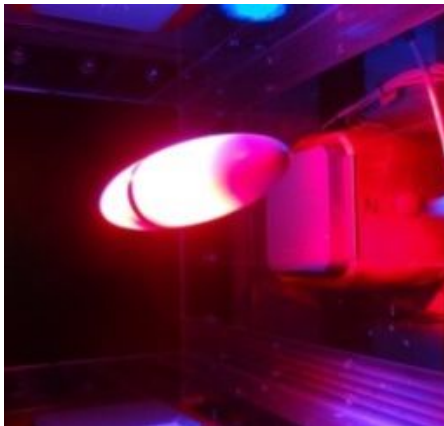


図6 回転楕円体が自由支持される様子

ここで強制加振試験へのMSBSの適用を考える . 図7 に制御電流の振幅の変化に対する加振周波数の影響を示す . それぞれ , (a) 横力制御電流 ,(b) 揚力制御電流 ,(c) ピッチ制御電流 , (d) ヨー制御電流を表している . 計測値は約 4Hz 程度までは計算値と一致するものの , それより早い周波数ではずれが増し , 振幅が大きくなるほど計算値との差が大きくなる . これは渦電流の効果を示している .

測定部中心部における磁場の電流出力命令に対する周波数特性をガウスメータを用いて測定したデータに基づいて磁気力の補正を行った結果を図8 に示す . 各々の図には補正前と補正後のデータが示されている . 補正後のデータは慣性力の計算値に近づくことがわかる . (a)と(b)には , 補正後にも誤

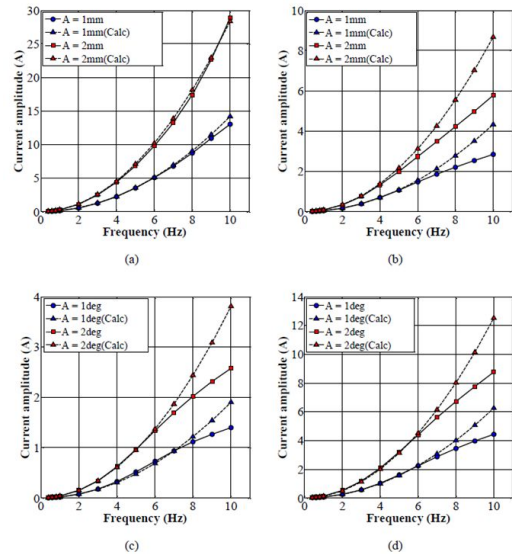


図7 制御電流の振幅の変化に対する加振周波数の影響 ( 0.3-m MSBS, 円柱模型の場合 )

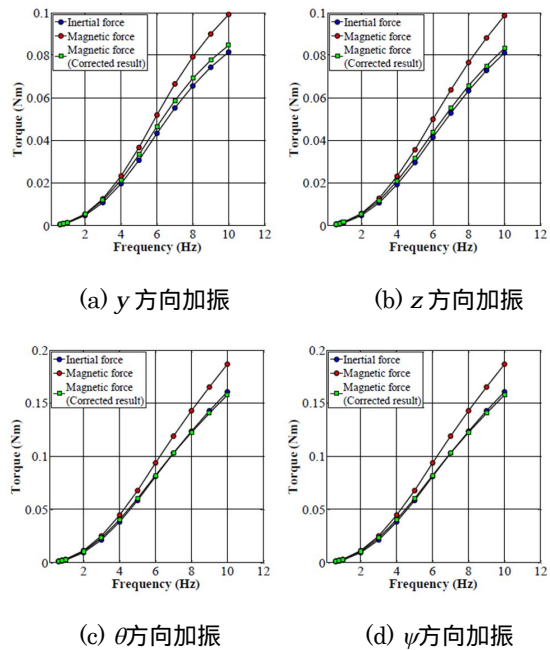


図8 磁気力の補正を行った結 ( 0.3-m MSBS, 円柱模型 , ピッチング運動 )

差が残る . その要因としては , 補正式に含まれる起因する誤差や微小空気力の影響 , また , ネオジム磁石表面に生じる渦電流の影響などが考えられる .

#### 4 - 5 計測融合シミュレーション

統計的データ同化手法のひとつであるアンサンブルカルマンフィルタを用い , 動的風洞試験で得られたデルタ翼の非定常圧力計測結果を非定常計算に同化させ , 実験で

は計測できなかった模型の動きの推定を試みた．今のところ空気力のヒステリシスを正しく捉えられないなどの問題がある．同様に，矩形翼まわりの剥離流を計算するCFDプログラムを開発し，蛍光オイル法による表面流線の計測画像とCFD計算と同化を試みた．この方法で境界層の遷移点がある程度は推測できることが示唆された．

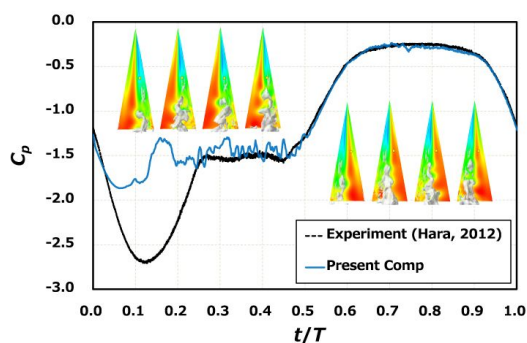


図 11 ロール運動するデルタ翼面上の圧力と実験値との比較

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 20 件)

1. 浅井圭介, 大嶋龍, 安保巧, 大林茂, 澤田秀夫, MSBS による非定常空気力計測の現状と課題, 第 53 回飛行機シンポジウム(招待講演), 2015 年 11 月 11 日-11 月 13 日, 松山市総合コミュニティセンター, 愛媛
2. Senzaki, K., Sato, K., Asai, S., Obayashi, H., Sawada, "Magnetic Field Control of the IFS 1-m MSBS for Forced-oscillation Experiments," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 仙台国際センター, 仙台
3. K. Sato, T. Senzaki, K. Asai, S. Obayashi, H. Sawada, Position Sensing System for the IFS 1-m MSBS," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 仙台国際センター, 仙台
4. T. Ambo, T. Otsuki, S. Taniguchi, D. Numata, K. Asai, "Support Interference Effects on Aerodynamic Forces of a Magnetically Suspended 6:1 Prolate Spheroid Model, The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 国際センター, 仙台
5. S. Taniguchi, T. Ambo, D. Numata, K. Asai, "Evaluation of Interference Effects of Oil-Flow Visualization on the Model Position and Attitude Sensor System of the 0.3-mMSBS," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 国際センター, 仙台
6. M. Pastuhoff, Y. Sugioka, K. Asai, "A Low Frequency Calibration Device for Pressure Sensitive Paint," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 国際センター, 仙台
7. S. Hattori, H. Nagai, D. Numata, K. Asai, "Development of the Makita-type Active Turbulence Grid for 0.3-m Wind Tunnel," The Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), 2015 年 10 月 27 日-10 月 29 日, 国際センター, 仙台
8. T. Lee, T. Ambo, Y. Sugioka, D. Numata, K. Asai, "Establishing Optical Aerodynamics Measurement System for the 0.3-m Magnetic Suspension and Balance System," 5<sup>th</sup> Japanese-German Joint Seminar on Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research, 2015 年 9 月 23 日-9 月 25 日, 産業技術総合研究所, 茨城
9. 野口大樹, 安保巧, 谷口周平, 大槻高也, 沼田大樹, 浅井圭介, "動的風洞試験に向けた磁力支持天秤装置の開発," 日本航空宇宙学会第 46 期年会講演会, 2015 年 4 月 16 日~4 月 17 日, 東京大学山上会館, 東京
10. Takumi Ambo, "Study of flow-field around a magnetically-suspended model moving in a wind tunnel," Next Generation Transport Aircraft Workshop 2015, 2015 年 3 月 20 日-3 月 20 日, Embassy Suites Seattle-Tacoma International Airport, Seattle, USA
11. 方辰, 三坂孝志, 菊地亮太, 大林茂, 浅井圭介, 安保巧, 沼田大樹, 加藤博司, "データ同化を用いた 3 次元翼の非線形空力解析," 日本機械学会第 27 回計算

- 力学講演会, 2014年11月22日-11月24日, 岩手大学, 盛岡
12. Keisuke Asai, Daiju Numata, Jiang Xin, Shigeru Obayashi, Koji Shimoyama, "Significance of dynamic wind-tunnel testing in nonlinear flight regime," Tohoku University-DLR Workshop(招待講演, 2014年10月13日-10月14日, 東北大学, 仙台)
  13. Takumi Ambo, Takahiro Senzaki, Daiju Numata and Keisuke Asai, "Investigation of dynamic characteristics of pitching flat-plate by Dynamic Wind-Tunnel Testing," The 11th International Conference on Flow Dynamics, 2014年10月8日-10月10日, 仙台国際センター, 仙台
  14. Daiju Noguchi, Shuhei Taniguchi, Takumi Ambo, Daiju Numata and Keisuke Asai, "The Development of the 0.3-m Magnetic Suspension and Balance System," The 11th International Conference on Flow Dynamics, 2014年10月8日-10月10日, 仙台国際センター, 仙台
  15. Shuhei Taniguchi, Takumi Ambo, Daiju Noguchi, Daiju Numata, Keisuke Asai, "Calibration of the Model Position and Attitude Sensor System in the 0.3-m Magnetic Suspension and Balance System," The 11th International Conference on Flow Dynamics, 2014年10月8日-10月10日, 仙台国際センター, 仙台
  16. S. Obayashi, K. Asai, D. Numata, X. Jiang, K. Shimoyama, "Researches at Tohoku University towards Nonlinear Flight Dynamics," Loss of Control in Flight Symposium Tokyo, 2014年9月29日-9月29日, 機械振興会館, 東京
  17. Chen Fang, "Data Assimilation Method for CFD/EFD Integration," Next Generation Transport Aircraft Workshop 2014, 2014年3月28日, Seattle, USA
  18. Sakiko Kitashima, Yousuke Sugioka, Daiju Numata, Keisuke Asai, "Characterization of Pressure-Sensitive Paint containing Ceramic Particles," Tenth International Conference on Flow Dynamics, 2013年11月25-27日, 仙台国際センター, 仙台
  19. Kohei Kakizaki, Daiju Numata, Keisuke Asai, "Status Report on the Development of the 0.3-m Magnetic Suspension and Balance System," Tenth International Conference on Flow Dynamics, 2013年11月25-27日, 仙台国際センター, 仙台
  20. Ryota Nakajima, Daiju Numata and Keisuke Asai, "Image Processing for Fluorescence Minituft Flow Visualization in Dynamic Wind-Tunnel Testing," The 12th Asian Symposium on Visualization, 2013年5月19-23日, Tainan, Taiwan
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
浅井 圭介 (ASAI KEISUKE)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40358669
  - (2) 研究分担者  
姜 欣 (JIANG XIN)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 304515374  
上野 誠也 (UENO SEIYA)  
横浜国立大学・環境情報研究科・教授  
研究者番号: 60203460  
大林 茂 (OBAYASHI SHIGERU)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号: 80183028  
下山 幸治 (SHIMOYAMMA KOJI)  
東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号: 80447185  
沼田 大樹 (NUMATA DAIJU)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 20551534
  - (3) 連携研究者  
柳原 正明 (YANAGIHARA MASAACKI)  
宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・センター長  
研究者番号: 30358642  
渡辺 重也 (WATANABE SHIGEYA)  
宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・センター長  
研究者番号: 30358593