

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246103

研究課題名（和文） 仮想飛行試験の実現に向けた次世代動的風洞実験の基盤構築

研究課題名（英文） Next-Generation Dynamic Wind-Tunnel Testing for Realizing Virtual Flight-Test Environment

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

研究成果の概要（和文）：本研究は、航空機の非線形領域における動安定性を調べる実験技術として、ハイブリッド・アプローチによる次世代動的風洞試験法を開発することを目的としている。従来のシリアルロボットに加えて、新規に HEXA 型パラレルロボットとその制御系を開発し、それらを用いて縦運動と横運動が連成する2自由度の加振実験を実施した。これと並行して、非定常感圧塗料や蛍光ミニタフトなどの先進的な光学計測手法を開発し、非定常運動するデルタ翼面上の前縁剥離渦の崩壊や空気力への周波数の影響を実験で明らかにした。これら一連の実験により、非線形飛行力学の研究を行うための基盤技術を構築することができた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a next-generation dynamic wind-tunnel testing technique based on hybrid-simulation approach for studying dynamic stability of aircraft in nonlinear flight region. A new parallel-link robotic manipulator called “HEXA” has been designed, built, and used for conducting multi-degree-of-freedom dynamic wind-tunnel testing. In addition, advanced optical measurement techniques such as unsteady Pressure-Sensitive Paint and Fluorescent Mini-tuft have been developed to visualize the flow on the model moving in the flow. As a result of the experiment using these techniques, the effects of oscillation frequency and amplitude on the dynamic stability of a wing have been clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2011年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2012年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学、動的風洞実験、非定常空気力学、飛行力学、流れの可視化

## 1. 研究開始当初の背景

航空機的设计において安定性と運動性の問題は経済性向上と並ぶ重要課題である。これら飛行力学の研究は、線形化された運動方程式に基づく安定性理論として発展し、運動

方程式の係数である動安定微係数から航空機の動安定性を評価する方法が確立している。動安定微係数の算出には、統計データに基づく推定法が広く用いられているが、このような経験則に基づく方法では、高い精度で

の推定を期待することはできない。そのため、宇宙往還実験機など、縦・横方向の動安定性がクリティカルとなる機体では、自由振動法や強制加振法などの動的風洞実験や、実機と質量分布が動的に相似なサブスケール模型を用いた飛行試験や落下試験が実施されている。しかし、これらの実験には多額の経費がかかるため、不十分とは認識しつつも、航空機の動安定性の評価は DATCOM などの経験則に依存しているのが現状である。

このような状況に対し 1990 年頃から最近にかけて、航空機の動安定性評価に対する要求に急激な変化が生じてきた。1つは、航空機が失速や旋回を含む、いわゆる「非線形」の飛行領域を利用するようになったことである。このため、従来の線形理論が適用できず、非線形の運動方程式と非定常空気力学に基づく安定性の考察が必要とされるようになった。この問題は、近年発達が急なロボット航空機 (UAV および  $\mu$  UAV) の開発において顕在化し、UAV の飛行能力の向上に伴って、機体の運動と空気力の時間遅れを正確に把握した高度な設計が求められるようになってきた。

また、近年 Large Eddy Simulation (LES) や Detached Eddy Simulation (DES) など、高精度の非定常数値シミュレーション技術の発達が著しく、動安定微係数の予測も視野に入ってきた。しかし、そのためには検証用実験データ、特に多自由度の大振幅・高周波数における実験データが必要となる。非線形-非定常の飛行力学を確立するには、実験流体力学 (EFD) と計算流体力学 (CFD) の相補的な利用が不可欠であり、そのためには、高精度の実験データを生み出せる動的風洞実験法の開発が急務とされている。

## 2. 研究の目的

本研究は、このような要請に応える新提案として、ハイブリッド・アプローチによる次世代動的風洞試験法を開発することを目的としている。つまり、最新のロボット技術の成果を取り入れ、コンピュータで制御される 6 自由度高速ロボットマニピュレータを開発し、航空機の模型を風洞内で運動させることによって、「流れは風洞で模擬し、運動計算はコンピュータで行う」という新しい概念の動安定試験技術の開発に取り組む。このような「仮想飛行試験」(Virtual Flight Test) を実現するには、風洞実験、ロボット技術、先進計測、CFD の研究者が連携して基盤技術の研究開発に取り組まなければならない。本研究では、その成果として、非線形・非定常を扱う飛行力学、さらには、CFD による「計算飛行力学」(Digital Flight Dynamics) の発展に寄与することを目指す。

## 3. 研究の方法

この研究の鍵を握るロボットマニピュレータには、従来から使用されているシリアルロボットに加えて、東北大学が産学国際共同で開発した「HEXA 型 6 自由度パラレルロボット」を用いる。これらの高速駆動ロボットを Closed Loop で制御することにより、リアルタイムで航空機模型の模擬的な自由飛行状態を作り出す。しかし、模擬自由飛行状態を再現するには、システムインザループ制御によるサーボ遅れ補正などの問題がある。この問題を解決するため位相進みなどの補償法について研究する。

一方、CFD による非定常計算の高精度検証データとして、圧力の 2 次元分布が光学的に計測できる「感圧塗料」(PSP) を用いた非定常圧力場の計測に取り組む。計測画像の信号雑音比を改善するため「位相固定法」(Phase Lock 法) と新規デジタル信号処理技術の研究を行う。これに加え 6 自由度運動する模型の姿勢の時間変化や空力弾性的な変形を光学的に計測する技術の開発を行い、CFD や飛行力学理論を高い精度で検証できる動的データの取得を目指す。

## 4. 研究成果

本研究では、航空機模型の多自由度の運動を作り出すことのできる、2 種類の高速度駆動ロボットマニピュレータシステムを製作した。一方はシリアルリンク式の 3 関節アームロボット (市販品の改造) で、他方は今回新規開発した HEXA 型パラレルロボットである。

シリアルロボットは可動範囲が広いのが特長で、本研究では、アームの先端にモータを追加することでロール速度を向上させた。関節におけるモータとの組み合わせで 7 自由度の運動が実現する。一方、今回新規開発した HEXA 型パラレルロボットはアームロボットの問題とされていた加速度の制限がなく、また高剛性で高速駆動に適している。HEXA 型を縦運動と横運動が連成する 2 自由度の強制加振実験に適用したところ、加振周波数 3Hz という高速度の運動を実現することができる。

風洞実験では、これらのロボットマニピュレータを用い失速付近の高迎角におけるデルタ翼の非定常特性を実験的に調べた。模型には、後退角 80 度のデルタ翼を用い 2 つのモードでの 2 自由度動的試験を行った。ロールとヨーの連成振動では、ヨー運動が渦崩壊の発生を遅らせる効果をもつことと、ローリングモーメントの変化に時間遅れが生じることが明らかになった。一方、ピッチとヒーブからなる縦方向の 2 自由連成振動では、非定常空気力に対するピッチ速度の影響は (実

験でカバーした周波数範囲内では) 無視できることが明らかになった。

これらの力計測実験と並行に、高速応答型感圧塗料 (PSP) を用いて非定常空気力を計測する技術の開発に取り組んだ。模型の運動によって励起光の照射強度や角度が変化するのを補正するため、感圧色素と基準色素と複合化した新規塗料を開発した。そして、これをローリング運動するデルタ翼に適用し、翼面上の非定常圧力分布を  $\Delta C_p = 0.1 \sim 0.2$  という高い精度で計測することに成功した。

また、これとは並行に、蛍光染料で染めたミニタフトの運動を記録した映像から、物体上の流れが乱れた領域を抽出して可視化する手法を考案し、デルタ翼の動的風洞実験に適用した。これらの画像計測手法を用いることで、ローリング運動するデルタ翼面上の前縁剥離渦の崩壊が加振によって遅れること、また、周波数の影響でローリングモーメントの変動パターンが変化し、不安定化が助長されることなどを明らかにした。

一方、計算機と風洞を融合した「ハイブリッドシミュレーション」の実証試験では、動的不安定モードの代表例としてデルタ翼のウイングロック現象を取りあげ、この現象をロボットの拘束運動によって再現することを試みた。その結果、単純にフィードバックループを形成するだけでは、正しい現象は再現できず、トルクセンサの遅れや運動計算の時間をフィードフォワードにより補償する必要があることを確認した。

これら一連の研究により、非線形飛行力学の実験的研究を行うための基盤技術を整備することができた。高迎角において航空機の挙動を正確に表すには、運動方程式の空力項に非定常性の効果を組み込まなくてはならない。本研究で示されたように、ロボットマニピュレータは非定常空気力学と非線形飛行力学を研究するための有用なツールとなり得る。今後はマニピュレータの可動範囲と速度範囲のさらなる拡大を目指すと同時に、弾性変形する模型など、空気力と弾性力がカップリングした場合が扱えるように、解析手法を拡張する計画である。

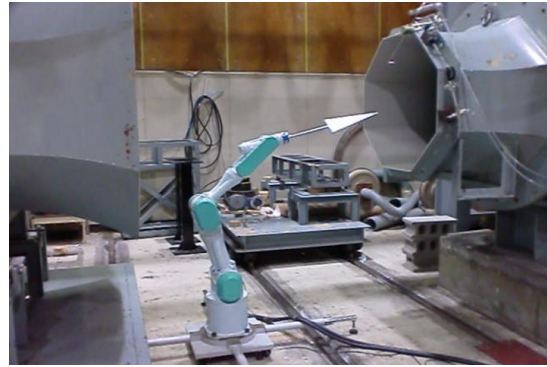


Fig.1 東北大学低乱風洞に設置されたシリアルリンク式ロボットマニピュレータとその先端に取り付けられたデルタ翼模型

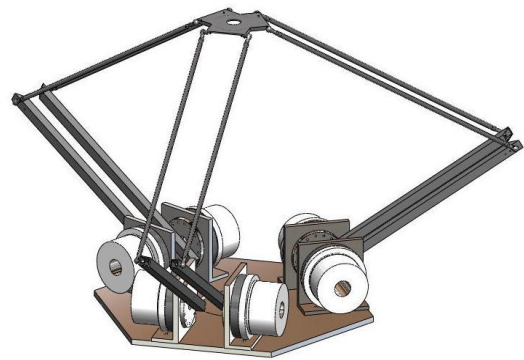


Fig.2 新規開発した HEXA 型パラレルリンク式ロボットマニピュレータの模式図 (ギヤードモータ, 従来型の約 8 倍のトルクが発生)

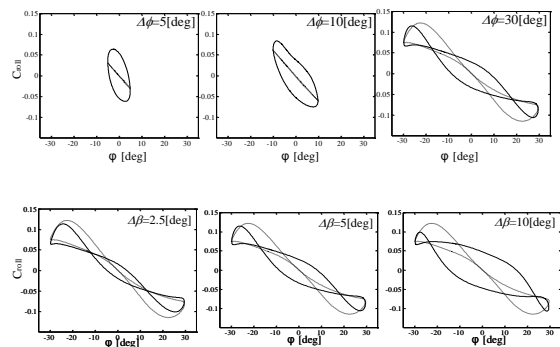


Fig. 3 ロールとヨー運動がカップリングした 2 自由運動するデルタ翼に作用する非定常のローリングモーメント (迎角 35 deg, 無次元周波数 0.01), 上図はロール振幅の影響, 下図はヨー振幅の影響を示す。

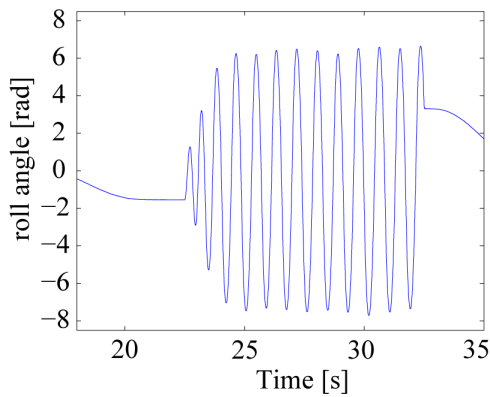


Fig.4 ハイブリッドシミュレーション手法により再現したデルタ翼の WING ROCK 現象 (振動数約 2Hz, ロール振幅約 60 deg)

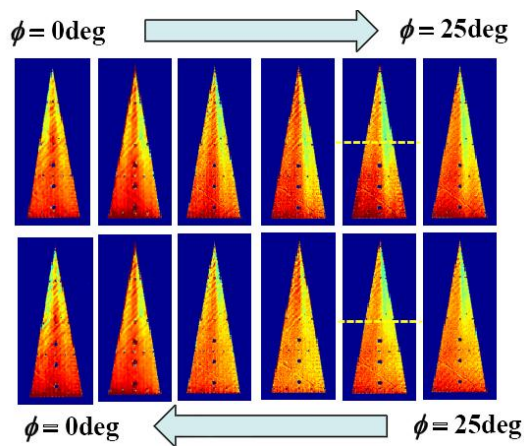


Fig.5 高速応答型感圧塗料と位相固定法を用いて計測されたロール運動するデルタ翼面上の非定常圧力場 (迎角 35 deg, 無次元周波数 0.01, ロール振幅 30deg)

#### 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Bitter, M., Hara, T., Hain, R., Yorita, D., Asai, K., Kähler, C.J., "Characterization of pressure dynamics in an axisymmetric separating/reattaching flow using fast responding pressure-sensitive paint", Experiments in Fluids, 査読有, Vol.53, 2012 年, 1737-1749, DOI :10.1007/s00348-012-1380-7
2. Singh, M., Naughton, J. W., Yamashita,

T., Nagai, H., Asai, K., "Surface Pressure and Flow Field Behind an Oscillating Fence Submerged in a Turbulent Boundary Layer", Experiments in Fluids, 査読有, Vol. 50, 2010年, 701-714

[学会発表] (計 26 件)

1. 中田伸大, 姜欣, 安孫子聡子, 菅井文仁, 伊藤崇文, 高橋一平, 辻田哲平, 内山勝, 沼田大樹, 浅井圭介, "風洞内における仮想飛行の実現に向けたハイブリッドシミュレーションの検証", 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2012年12月18-20日, 福岡, 日本
2. 浅井圭介, 沼田大樹, 姜欣, 安孫子聡子 "多自由度ロボットマニピュレータを用いた動的風洞実験", 第50回 飛行機シンポジウム, 2012年11月05日~2012年11月07日, 新潟, 日本
3. Hara, T., Numata, D., Asai, K., Ito, T., Jiang, X., "Dynamic Wind-Tunnel Testing of a Delta Wing Using a Multi-Degree-of-Freedom Robotic Manipulator", 5th Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics (Integration 2012), 2012年10月3日-10月5日, 東京, 日本
4. Asai, K., Konno, A., Jiang, X., Numata, D., Abe, H., Nakata, N., Hara, T., "Multi-Degree-of-Freedom Dynamic Wind-Tunnel Testing of a Delta Wing", The 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2012年9月23日-9月28日, Brisbane, Australia
5. K. S. N. Abhinav Kumar, Tatsuya Hara, Takahiro Ito, Daiju Numata and Keisuke Asai, "Deflection and Orientation Measurement of Moving Delta Wing Using Photogrammetry", 9th International Conference of Flow Dynamics, 2012年9月19日-9月21日, 仙台, 日本
6. Tatsuya Hara, Daisuke Yorita, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, "Application of Unsteady PSP Measurement in Dynamic Wind-Tunnel Testing", 3rd Japanese-German Joint Seminar Molecular Imaging Technology for

- Interdisciplinary Research, 2012年9月3日-9月5日, 東京, 日本
7. Sakiko Kitashima, Tamao Sugimoto, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, “Characterization of Frequency Response of Pressure-Sensitive Paints”, 3rd Japanese-German Joint Seminar Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research, 2012年9月3日-9月5日, 東京, 日本
  8. Ryota Nakajima, Daiju Numata, Keisuke Asai, “Image Processing for Fluorescence Minuteflow Visualization in Dynamic Wind-Tunnel Testing”, 12th Asian Symposium on Visualization, 2012年05月19日～2012年05月23日, Tainan, Taiwan
  9. 阿部弘之, 中田伸大, 高山大祐, 沼田大樹, 姜 欣, 近野敦, 浅井圭介, “ロボットを利用したデルタ翼の2自由度動的風洞試験”, 日本航空宇宙学会北部支部2012年講演会ならびに第13回再使用型宇宙推進系シンポジウム, 2012年3月15日, 室蘭
  10. 浅井圭介, “新世代の動的風洞実験の展望と課題”, 日本航空宇宙学会平成23年度航空宇宙空力班シンポジウム, 2012年1月28日, 仙台
  11. 依田大輔, 沼田大樹, 永井大樹, 浅井圭介, “信号・画像処理を用いた非定常感圧塗料技術の開発”, 日本航空宇宙学会平成23年度航空宇宙空力班シンポジウム, 2012年1月27日, 仙台
  12. Sugimoto, T., Kitashima, S., Numata, D., Nagai, H., Asai, K., “Characterization of Frequency Response of Pressure-Sensitive Paints”, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 12, January, 2012, ナッシュビル, 米国
  13. 中田伸大, 阿部弘之, 伊藤崇文, 近野敦, 姜欣, 安孫子聡子, 内山勝, 沼田大樹, 浅井圭介, “風洞内における航空機ハイブリッドモーションシミュレーション”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011年12月25日, 京都
  14. K. S. N. Abhinav Kumar, Tatsuya Hara, Daiju Numata and Keisuke Asai, “Reconstruction of Model Movement in Dynamic Wind Tunnel Testing”, 8<sup>th</sup> International Conference on Fluid Dynamics, 10, November, 2011, Sendai
  15. Hiroyuki Abe, Nobuhiro Nakata, Daiju Numata, Xin Jiang, Atsushi Konno and Keisuke Asai, “Dynamic Wind-tunnel Testing of a Rolling Delta-wing using a Robotic Manipulator”, 8<sup>th</sup> International Conference on Fluid Dynamics, 10, November, 2011, Sendai
  16. 原達矢, 沼田大樹, 永井大樹, 浅井圭介, “非定常感圧塗料計測の動的風洞試験への適用”, 第7回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2011年11月2日, 東京
  17. 依田大輔, 山崎真一, 沼田大樹, 永井大樹, 浅井圭介 “感圧塗料を用いた非定常空気力計測”, 第39回可視化情報シンポジウム, 2011年7月19日, 東京
  18. 阿部弘之, 中田伸大, 沼田大樹, 姜 欣, 近野敦, 浅井圭介, “ロボットを利用したデルタ翼ロール運動の動的風洞試験”, 日本航空宇宙学会第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2011, 2011年7月7日, 東京
  19. Keisuke Asai, Daisuke Yorita, “Unsteady PSP Measurement in Low-Speed Flow - Overview of Recent Advancement at Tohoku University”, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Jan 4-6, 2011, Orlando, Florida, U.S.A
  20. Daisuke Yorita, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, “Measuring Unsteady Low-Speed Flow Phenomena by Using a Time Series Analysis of Pressure-Sensitive Paint Images”, The 14th Int'l Symposium on Flow Visualization, June 21-24, 2010, Daegu, Korea
  21. T. Kakuta, A. Koyama, D. Yorita, D. Numata, H. Nagai, K. Asai, S. A. Woodiga and T. Liu “Imaging Measurement of Skin Friction Field

around Bluff Body Using Luminescent Oil Film Technique”, The 14th Int’l Symposium on Flow Visualization, June 21-24, 2010, Daegu, Korea

22. Keisuke Asai, “Aerodynamic Applications of Molecular Imaging and Sensing Pressure and Temperature Sensitive Paint”, International PSP/TSP Workshop 2010, May 23-25, 2010, Beijing, China
23. Daisuke Yorita, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, “Unsteady Pressure Distribution Measurement on a Square Cylinder using Pressure-Sensitive Paint”, International PSP/TSP Workshop 2010, May 23-25, 2010, Beijing, China

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：条件付き画像抽出による非定常感圧塗料計測法

発明者：依田大輔ほか

権利者：東北大学

種類：特願

番号：2010-137911

出願年月日：2010年6月17日

国内外の別：国内

## 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

永井 大樹 (NAGAI HIROKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70360724

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

姜 欣 (JIANG XIN)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30451537

### (3) 連携研究者

近野 敦 (KONNO ATSUSHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90250688

中北 和之 (NAKAKITA KAZUYUKI)

(独)宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・主任研究員

研究者番号：50358595