

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21360412

研究課題名(和文) スマートストラクチャ素子を活用した翼型失速回避制御システムの構築

研究課題名(英文) Development of Airfoil Stall Suppression System Utilizing Smart Structure Sensor Actuators

研究代表者

李家 賢一 (Rinoie, Kenichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20175037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円、(間接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：翼型上に生ずる層流剥離泡の崩壊は、翼型失速を引き起こす原因である。本研究では、層流剥離泡崩壊の抑制と翼型失速の抑制を目的とした。そのために、剥離泡崩壊の原因と考えられる剥離泡から放出される渦構造の生成を制御する剥離泡崩壊制御板とそれを動作させるスマートストラクチャ機構を組み合わせた翼型失速回避制御システムを開発し、剥離流れ場の制御を行うことで、自律的に失速抑制を行う機構を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：Bursting phenomenon of a laminar separation bubble formed over an airfoil is known to be a cause of airfoil stalls. The aim of this research is to suppress bubble burst and to avoid airfoil stalls. A burst control plate is a device that enhances vortical structures formed inside the laminar separation bubble and can suppress bubble burst. This plate was combined with a smart structure sensor actuator system to work as an autonomous airfoil stall suppression system. It was demonstrated that this autonomous system works effectively for stall angle delay.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 流体工学 剥離流 流体制御

1. 研究開始当初の背景

翼型周りの流れにおいて、流れが層流剥離した後、剥離剪断層内で乱流遷移が起こり、再び物体表面に付着する現象が見られる。この層流剥離点と再付着点の間の剥離領域は、層流剥離泡と呼ばれている。翼型上に層流剥離泡が存在しているとき、迎角を増やしていくと突如再付着しなくなり層流剥離泡が崩壊する現象が起きる。この崩壊現象が起こると翼の揚力は急激に減少し、前縁失速を生じる。このように翼型上に生じる層流剥離泡は、翼型失速特性に大きな影響を及ぼすことが知られており、航空工学上重要な問題であるため、多くの研究がなされてきた。特に、この層流剥離泡の崩壊を制御して翼の失速を遅らせ、ひいては失速を回避することができるのであれば、航空機の重大事故を防止することにつながり、航空安全の向上につながる。

研究代表者らが過去に行ってきた研究結果より、層流剥離泡の崩壊時には、突発的な渦構造の放出があることが明らかにされてきた。そこでこの渦構造の生成を制御することができれば、層流剥離泡崩壊を抑えることができると考えた。そのために翼型上に生じている層流剥離泡内で、上記の突発的に放出される渦構造をより強め、かつ継続的に放出させて剥離泡の崩壊を抑制する目的でスパン方向に均一な薄板(剥離泡崩壊制御板)を設置し、その後端高さを最適高さに設定することによって、層流剥離泡の崩壊を抑制し、翼型失速をより高い迎角まで生じさせないことに研究代表者らは成功した。しかしながら、この研究で使用した「剥離泡崩壊制御板」は、簡易な形態であり、未だ最大の効果を挙げる最適な形状には至っていないと考えられた。そこで本研究では、これまでの成果をさらに推進し、より効果の高い失速制御を可能とする機構を開発し、本装置による失速制御手法を確立することを目標とした。

2. 研究の目的

層流剥離泡崩壊の抑制と翼型失速の回避を目的とした「剥離泡崩壊制御板」について検討してきた成果をさらに推進し、より効果の高い失速制御を可能とする機構と失速制御手法を確立することを目的とする。そのために、剥離泡崩壊の原因と考えられる剥離泡から放出される渦構造の生成を抑制するための「翼型失速回避制御システム」を構築し、剥離流れ場の制御と翼型失速の抑制を自律的に実現する研究を行う。

3. 研究の方法

効率がより高く効果的な翼型失速回避制御システムを構築するために、以下の方法で研究を行った。

(1) 表面圧力計測装置、空気力計測装置と流れの可視化装置を翼型計測用風洞に設置し、実験準備を行う。また剥離泡崩壊制御板を含んだ広い領域で流速計測を行うため、PIV 装

置の設置ならびに調整を行う。

(2) 剥離泡崩壊制御板、失速予兆検知機構ならびに失速予兆検知機構からの失速予兆検知信号に同期して駆動する制御板駆動装置(これを本研究ではスマートストラクチャ機構と呼んだ)を組み合わせた一体型回路を翼型模型に構築して、自律型の翼型失速回避制御システムを作り上げる。

(3) 翼型失速回避制御システムからの出力信号および PIV 流速計装置による剥離制御板まわりの流れ場の計測結果を用いて、最適な翼型失速回避制御システムの駆動方法を探索する。

(4) 完成した翼型失速回避制御システムを用いた計測を行い、その効果を検証する。

(5) 風洞に設置した各種模型形態にあわせた数値計算を行う。また本実験に関係するスパン方向に形態が変化した剥離制御デバイスの効果を調べる実験、低レイノルズ数における翼の空力特性を取得する実験ならびに取得された時間変動を含むデータの解析手法の検討と適用を行う。

4. 研究成果

(1) 剥離泡崩壊制御板の最適な形態と駆動方法を探り、得られた最適な形態と駆動方法を用いた翼型失速回避制御システムの効果を実証することができた。研究当初は、薄膜スマートストラクチャ素子の使用も念頭におき、また翼スパン方向に制御板の形態を変化させることや制御板を複数組み合わせることを実験的に検討したが、最終的には矩形断面を有する剥離泡崩壊制御板を翼型上の適切な位置と高さに設置することで、最大の失速抑制効果が得られることが明らかになった。本研究で得られたこの主な成果については次項で述べる。この他に、翼型周り解析実施のための直交格子アルゴリズムを構築し、二次元翼型周りの定常流れ場解析を実施した。また剥離泡崩壊制御板と関連して、前縁セレーションと呼ばれる剥離制御板による剥離制御の効果を平板翼について調べる実験を行い、また固有直交分解と呼ばれる手法により単純形態の物体に生じる剥離流れの構造を把握する流速計測も行った。更に低レイノルズ数における翼の空力特性を知る実験も行いとりまとめた。

(2) 実験は吸い込み型 2 次元低速風洞(測定部高さ 600mm、幅 200mm)を用い、一様流速 10m/s にて行った。使用した翼型模型は NACA0012 翼型模型であり、翼弦長基準のレイノルズ数は $Re=1.3 \times 10^5$ である。翼型模型の前縁付近に矩形断面剥離泡崩壊制御板が埋め込まれており、翼型中に設けられた制御板駆動装置によって上昇する図 1 のような構

造になっている。前縁付近翼上面側の静圧孔の一つを失速予兆検知に活用し、風洞外に設置された失速予兆検知判定装置と制御板駆動装置を組み合わせることで翼型失速回避制御システムが構築されている。翼型表面圧力測定、三分力測定、煙による流れの可視化実験、ならびに PIV による制御板周り流れの流速分布計測実験が行われた。

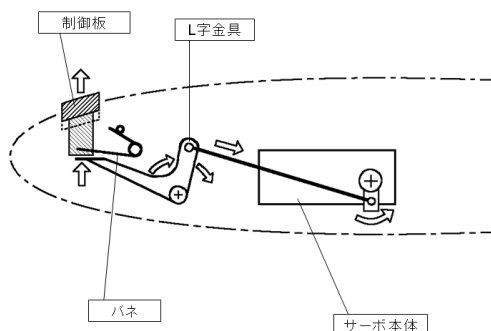


図1 翼模型に設置した剥離泡崩壊制御板

図2に剥離泡崩壊制御板の効果を確認するために流れを可視化した写真を示す(写真左側から主流が流れている)。いずれも同じ迎角での結果である。この迎角は翼型単独では失速してしまっている迎角にあたる。上図が本システムを動作させずに剥離泡崩壊制御板を翼に収納した状態で、翼型は失速した状態にあるものである。下図は本システムを動作させ、剥離泡崩壊制御板が失速抑制に適切な高さに上げられている状態での写真である。上図の場合、流れが前縁付近で剥離しているのに対し、下図の本システムを駆動した場合は、剥離泡崩壊制御板の効果により流れが翼面上に付着しており非失速状態であることが見て取れる。

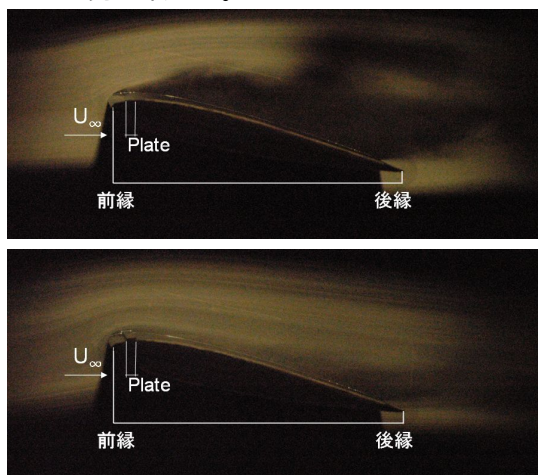


図2 流れの可視化(迎角 13.0deg)

本翼型失速回避制御システムが正常に機能するか動作確認実験を行った。これはある迎角に固定し、剥離泡崩壊制御板を下げた状態からシステムを起動し、自律的に失速抑制ができるかどうかを確認したものである。その結果、本システムを駆動すると、制御板が

段々と上がっていき失速状態から回復したと判断した段階で制御板を自動的に停止する動作が実現され、本システムが正常に動作していることが確かめられた。図3に本翼型失速回避制御システムを用いた場合の効果を揚力係数 - 迎角曲線として、システムを用いずに制御板を収納したままでの測定結果との比較として示した。本システムの自律型制御機構により本研究で用いた翼型模型においては迎角が 14.45deg まで失速抑制でき、揚力係数は 1.08 程度まで改善できていることが分かった。

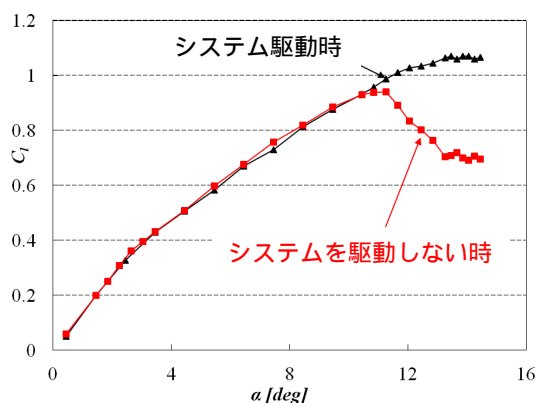


図3 揚力係数 - 迎角曲線
(翼型失速回避制御システムの効果)

(3) 以上を通して、本研究の目的であった層流剥離泡の崩壊を制御することによって自律的に失速抑制を行う機構を確立することができ、また剥離流れに関する知見を深めることができた。

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトであるが、一連の本研究に関する成果として得られた剥離泡崩壊制御板の失速抑制につながる効果については、当研究グループが提案している剥離泡崩壊制御板を動的に動作させることで一定の剥離抑制の効果を得ようという研究が、当研究グループの成果を出発点として、国外で報告されている。また国内では、最新の空気力学研究について特集した日本航空宇宙学会誌の連載記事「先進的空力技術-流れの制御と実験・計測」において14種選ばれた技術の一つとして本剥離泡崩壊制御板がとりあげられている(雑誌論文)。

(5) 今後の展望であるが、本翼型失速回避制御システムは、翼型の迎角を固定した状態での自律的な失速抑制を可能にしたが、実際の航空機の飛行では、機体の姿勢はパイロットの操舵や突風の影響で、翼の迎角が非定常的に変化する。そこで、翼の迎角が増大したり、減少したり、あるいは非定常的に変化する場合においても失速抑制制御が的確に行われるように、システムを改良することが必要である。また現在は実験室レベルの小型風洞での失速抑制の実証にとどまっているが、実際

に本装置を実機に適用することをにらみ、より速度域(レイノルズ数)が高い場合において本システムの有用性を確認する必要があり、これらの点について現在改良と検討を続けている段階である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

李家賢一、層流剥離泡制御による翼型失速抑制の可能性について、日本航空宇宙学会誌、査読無、Vol.61, No.708, pp.8-13, 2013.

Chi Wai Wong and Kenichi Rinoie, Bubble Burst Control Using Smart Structure Sensor Actuators for Stall Suppression, J. Aircraft, 査読有、Vol.47, No.4, pp.1439-1442, 2010.

Chi Wai Wong and Kenichi Rinoie, Bubble Burst Control for Stall Suppression on a NACA 631-012 Airfoil, J. Aircraft, 査読有、Vol.46, No.4, pp.1465-1468, 2009.

〔学会発表〕(計25件)

Takuma Komuro, Yasuto Sunada and Kenichi Rinoie, Stall Suppression Effect of Bubble Burst Control Plate Accompanied by Aerodynamic Noise, 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Sunport Takamatsu, Takamatsu, Japan, Nov. 21, 2013.

Masayuki Sakai, Yasuto Sunada, Taro Imamura and Kenichi Rinoie, Experimental and Numerical Studies on Flow behind a Circular Cylinder Based on POD and DMD, 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Sunport Takamatsu, Takamatsu, Japan, Nov. 21, 2013.

田中宏樹、砂田保人、李家賢一、前縁セレーション付きキャンパー翼における剥離制御効果に関する実験、第45回流体力学講演会、2D15、東京都江戸川区タワーホール堀切、2013年7月5日。

小室卓磨、砂田保人、李家賢一、翼型失速抑制時に剥離泡崩壊制御板が発生する空力音について、第45回流体力学講演会、1D10、東京都江戸川区タワーホール堀切、2013年7月4日。

中村悠志、砂田保人、李家賢一、矩形断面をもつ剥離泡崩壊制御板及びその組み合わせによる翼型失速抑制に関する実験、第44回流体力学講演会、1B11、富山市富山国際会議場、2012年7月5日。

小室卓磨、砂田保人、中村悠志、李家賢一、自律制御機構つき矩形断面型剥離泡崩壊制御板による翼型失速抑制について、第44回流体力学講演会、1B10、富山市富山国際会議場、2012年7月5日。

Kenichi Rinoie, Takuma Komuro, Yushi Nakamura and Yasuto Sunada, Airfoil Stall Suppression Using Rectangular Bubble Burst Control Plate and Sensor Actuators, 6th AIAA Flow Control Conference, AIAA2012-2683, New Orleans, Louisiana, Jun. 25, 2012

李家賢一、中村悠志、Chi Wai Wong、砂田保人、剥離泡崩壊制御板を用いた翼型失速抑制について、平成23年度航空宇宙空力班シンポジウム、L6、宮城県仙台市東北大学、2012年1月27日。

Yushi Nakamura, Kenichi Rinoie and Yasuto Sunada, Airfoil Stall Suppression by Use of Rectangular Cross Section Burst Control Plates, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville, Tennessee, AIAA-2012-0318, Jan. 9, 2012.

Chi Wai Wong, 李家賢一、砂田保人、自律型アクチュエーターを活用した翼型失速抑制システムの検討、第43回流体力学講演会、2E13、東京都新宿区早稲田大学、2011年7月8日。

中村悠志、砂田保人、李家賢一、棒状平板の組み合わせによる翼型失速抑制に関する実験、第43回流体力学講演会、2E12、東京都新宿区早稲田大学、2011年7月8日。

田中宏樹、中村悠志、砂田保人、李家賢一、HOFSSASS ESPADA翼の低速空力特性に関する実験 第二報 三分力計測、第43回流体力学講演会、2D9、東京都新宿区早稲田大学、2011年7月8日。

Chi Wai Wong and Kenichi Rinoie, Airfoil Stall Suppression by Use of Smart Structure Sensor Actuators for NACA 631-012, 2011 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Melbourne, Australia, Mar. 1, 2011.

李家賢一、層流剥離泡の準周期的挙動と失速抑制の可能性について、第48回飛行機シンポジウム、1D10、静岡市静岡グランシップ、2010年11月30日。

田中祐介、砂田保人、李家賢一：部分的膜構造を模擬した翼型における失速抑制の実験、第42回流体力学講演会、2D2、鳥取県米子市米子コンベンションセンター、2010

年 6 月 24 日.

Chi Wai Wong and Kenichi Rinoie,
Bubble Burst Control Using Smart
Structure Sensor Actuators for Stall
Suppression, 39th AIAA Fluid Dynamics
Conference, AIAA 2009-4277, San Antonio,
Texas, Jun. 25, 2009.

栗田 聡、Chi Wai Wong, 李家賢一、砂田
保人、異なる翼型における層流剥離泡の崩壊
抑制板がもたらす効果の違いについて、第 41
回流体力学講演会、東京都調布市 JAXA 調布
航空宇宙センター、2009 年 6 月 18 日.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

李家 賢一 (RINOIE, Kenichi)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：2 0 1 7 5 0 3 7

(2)研究分担者

砂田 保人 (SUNADA Yasuto)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：5 0 2 1 6 4 8 8

今村 太郎 (IMAMURA Taro)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：3 0 3 7 1 1 1 5
(平成 23 年度より)