

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820054

研究課題名(和文) 超低レイノルズ数領域の羽ばたき運動の解明に向けた高速応答型感圧塗料技術の確立

研究課題名(英文) Development of fast-response pressure-sensitive paint techniques for elucidation of flapping motion at low Reynolds numbers

研究代表者

安養寺 正之 (Anyoji, Masayuki)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：70611680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一般的な低速風洞とは異なり、周囲の密度を下げて低レイノルズ数環境で気流を発生する低密度風洞を用いることで、羽ばたき運動など翼面上に作用する非定常な圧力分布を計測する高応答型感圧塗料技術の開発を試みた。種々の較正試験の結果、最も動的特性に優れる手法が色素にRuDPを用いた陽極酸化皮膜法であることを見出した。またこれを適用した風洞試験により円柱のカルマン渦など非定常圧力分布計測に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop fast-response pressure-sensitive paint(PSP) under low Reynolds number conditions using a low-density wind tunnel for elucidation of a flapping motion as typified by flying insects. As results of calibration tests using some sensor molecules and binders, Anodized-Aluminum PSP(AA-PSP) with RuDPP as a sensor molecule shows the highest dynamic performance and is applied to low-density wind tunnel tests using a circular cylinder. As a result, unsteady pressure fluctuations by shedding Karman vortices are successfully captured.

研究分野：流体力学、航空工学

キーワード：感圧塗料 羽ばたき翼 低密度風洞 陽極酸化皮膜 非定常

1. 研究開始当初の背景

昆虫やコウモリなどの鳥類の飛行におけるレイノルズ数( $Re$  数)は  $10^3 \sim 10^5$  であり, 超低  $Re$  数領域となる。また, これら生物の飛行解析から, 同程度の  $Re$  数で飛行する小型航空機や火星探査航空機などの設計開発に応用しようとする自然模倣(バイオメティック)の研究に近年注目が集まっている。生物の飛行は, 非定常で複雑な非定常な羽ばたき運動と前縁剥離渦(図1)に代表される大規模な渦流れとして特徴づけられる。羽ばたき飛行の非定常空力特性に関しては数値計算に頼るところが大きく, 過去の実験研究でも翼周りの渦の可視化結果などは見られるものの, 信頼性のある空力データはほとんど見られない。これは空気が  $0.1 \text{ N}$  以下の微小力計測であることや羽ばたきなどの非定常運動で生じる慣性力の補正が技術的に極めて困難であることに起因する。

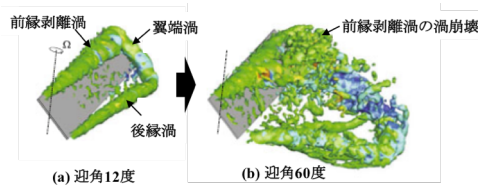


図1:羽ばたき翼周りの流れ場

このような課題に対し, “感圧塗料センサー”は有力な候補となる。感圧塗料は蛍光色素の発光強度が酸素分圧によって変化することを利用し, 圧力場を面情報として光学的に非接触で計測する手法である。翼面上の大規模な渦特性は特徴的な圧力分として現れ, 上下面の圧力分布を計測し, 積分すれば揚力や推力などの空力も定量的に算出することができる。このため, 飛行運動に伴う翼面上の非定常圧力分布特性を高精度に定量的に把握することは飛行力学メカニズムの解明に直結すると言える。近年では陽極酸化被膜を応用した高速応答型の感圧塗料センサーも開発されている。ただし, 感圧センサーの感度に相当する風洞の気流動圧がネックとなる。一般的に低速風洞を用いた低  $Re$  数試験では気流速度は  $1 \sim 3 \text{ m/s}$  となり, その気流動圧はわずか数  $\text{Pa}$  と極めて低い。そのためセンサー感度自体が得られず, アンサンブル平均でも対応しきれない程の劣悪な  $S/N$  比から, 低速風洞による低  $Re$  数試験には適用できない。

このような問題に対して本研究では, 気流動圧を約  $70 \sim 100 \text{ Pa}$  と比較的高い動圧を確保しつつ, 実験環境の密度を下げることで低  $Re$  数環境を実現する新たな相似実験である“低密度風洞試験”を実施する。これまでの研究により, 既存の感圧塗料技術を低密度風洞試験で適用できるよう改良を進めてきた結果, 低  $Re$  数二次元翼周りの圧力分布計測には成功しており, 剥離渦の形成・崩壊に伴う非線形空力性能との関連などを明らかにしてきた。しかし, 現状の塗料センサーではポリマー使用による酸素透過性の問題から応答性に課題

があるため, 定常計測に限られている。そこで本研究では, 陽極酸化被膜法を用いた高速応答型の非定常感圧塗料技術を低密度環境仕様に開発し, 風洞試験による低  $Re$  数非定常現象による実証試験を行う。

2. 研究の目的

本研究では, 昆虫などの羽ばたき運動に代表される低  $Re$  数領域の非定常運動解析を目指し, 翼上面の圧力場を非接触で光学的に計測する高速感圧塗料センサーを開発することを目的とする。一般的な低速風洞で感圧塗料を使用した際に直面する感度不足を克服するため, 本研究では減圧環境で通風試験ができる低密度風洞を使用する。較正試験によって減圧環境における種々の感圧塗料の特性を検証することで, 減圧環境で静的・動的特性に優れた感圧塗料の開発を目指す。その上で, 低密度風洞を用いて非定常現象に適用することで, 本計測技術の実証を行う。

3. 研究の方法

本研究では, 非定常感圧塗料として一般的に用いられている多孔質バインダとして, Polymer-Ceramic PSP(PC-PSP), 陽極酸化皮膜(AA-PSP), Thin-Layer Chromatography PSP(TLC-PSP)の3種類で検証した。また色素には PtTFPP(Pt(II) meso-Tetra(Pentafluorophenyl) Porphine)及び RuDPP(Tris(Bathophenanthroline) Ruthenium Dichloride)の2種類を用いて, それぞれ較正試験によって減圧環境における静的・動的特性の検証を行った。

静的試験では, 圧力及び温度の制御が可能な較正用チャンバーを使用し, 減圧環境下における圧力感度に対する温度の影響や光劣化特性を調べた。また動的試験の際は, 図2に示す音響共鳴管を用いた。これは閉管の音響共鳴を利用したもので, 共振周波数における圧力変動が増大することを利用している。音波の発生にはスピーカーを使用した。圧力の較正器として Kulite センサーを使用し, ゲインおよび位相遅れを評価した。

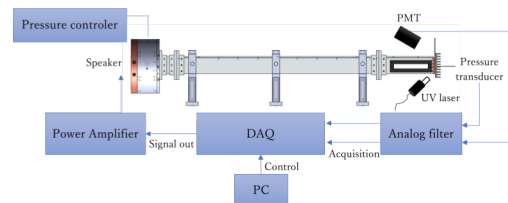


図2:音響共鳴管を用いた応答性試験のセットアップ

風洞試験では, 図3に示す火星大気風洞を使用した。本風洞は真空チャンバー内部に吸い込み式風洞が設置されている。約  $1 \text{ kPa}$  まで減圧した環境での試験が可能であり, エジェクター駆動方式により,  $Re$  数が  $10^3 \sim 10^4$  オーダーでありながら,  $M=0.2 \sim 0.7$  程度の高速

気流を発生することができる。本試験では  $Re = 6.5 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$  の範囲で  $M$  数が約 0.2~0.4 で試験を行った。風洞模型としては図 4 に示すアルミ製の円柱模型を用いた。円柱より発生するカルマン渦放出に伴う非定常性を感圧塗料により計測した。感圧塗料計測の際、光源は高出力 UV-LED(IL-106X)を、光検出器として高速度カメラ(FASTCAM SA-X2)を用いた。



図 3:火星大気風洞



図 4:円柱模型

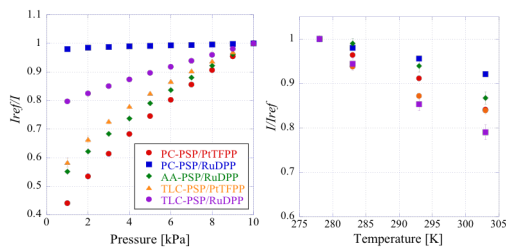
#### 4. 研究成果

##### (1) 較正試験

静的な特性として、図 5 に低圧環境下(1~10kPa)における圧力感度特性及び温度感度特性を示す。圧力感度としては AA-PSP に RuDPP を塗布したものが最も高い感度を示した。逆に PC-PSP に RuDPP を塗布した場合が最も感度が低下する結果となった。ただし、温度感度は PC-PSP に RuDPP を塗布したものが最も小さく、その他は同程度の結果となった。

一方、動的特性として図 6 に PtTFPP を色素とした PC-PSP の結果を示す。ゲイン・位相の両特性は低圧化に伴って悪化する。このような低圧化の影響はバインダと色素の組み合わせによって異なるが、いずれも一次遅れ系に近い結果となる。このことから、低圧化によって発光寿命が動的特性の支配的要因であることが分かった。さらに発光寿命計測を行ったが、色素によって周囲圧力への依存性の有無が決まり、バインダによってその影響の程度が決まることも分かった。

これらの較正試験の結果、幅広い周波数計測に適用が期待でき、なおかつ圧力感度特性の良好な RuDPP を色素とする AA-PSP が最適

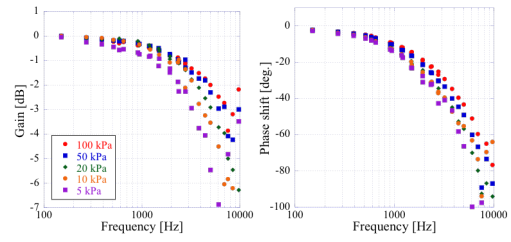


(a) 圧力感度

(b)温度感度

図 5:低圧における圧力感度および温度感度特性

と結論付けた。



(a) ゲイン

(b) 位相

図 6:PC-PSP/PtTFPP のゲインおよび位相特性

##### (2) 低密度風洞試験

円柱模型に対して RuDPP を色素とした AA-PSP を適用して火星大気風洞試験を実施した。連続画像としては各画像におけるノイズが大きく、非定常圧力現象は捕らえられない。そこで圧力変動における支配的な周波数を検出するため、高速フーリエ変換に基づいたデータ処理手法を適用することでノイズを低減化し、時系列データとしての圧力分布画像の取得に成功した(図 7)。前縁から 20~40%の位置に発光強度の分布が大きく変化する境界が剥離点に相当すると考えられる。さらに図 8 に示すように、これらの時系列圧力分布の定量値を FFT 解析した結果と熱線流速計による計測結果とのスペクトル比較においても同様のピーク周波数の特徴を捉えることができたため、本計測結果の妥当性が得られた。

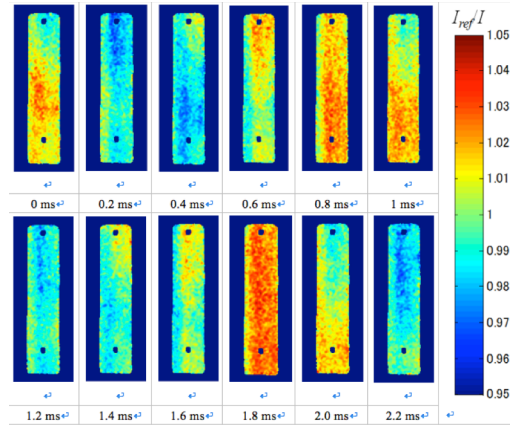


図 7:時系列発光強度分布

(5 kPa,  $M=0.42$ ,  $Re=8.8 \times 10^3$ , 流れ方向は左から右)

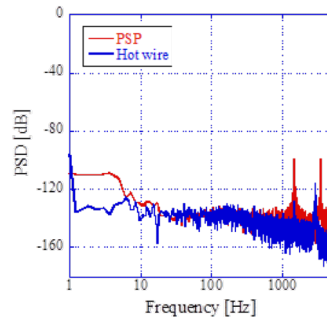


図 8:周波数スペクトル計測結果

(5 kPa,  $M=0.42$ ,  $Re=8.8 \times 10^3$ )

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 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

1. 佐々木大介, 押山大佑, 安養寺正之, 沼田大樹, 浅井圭介, 非定常感圧塗料の火星大気風洞への適用, 可視化情報シンポジウム 2015, 工学院大学新宿キャンパス(東京都新宿区), 2015.
2. D. Sasaki, D. Numata, K. Asai, M. Anyoji, Characteristics of Unsteady Pressure Sensitive Paint under Low Pressure Condition, Eleventh International Conference on Flow Dynamics, Sendai International Center (Miyagi, Sendai), 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://mac507.ence.kyushu-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安養寺正之 (MASAYUKI ANYOJI)

九州大学大学院総合理工学研究院・助教

研究者番号: 70611680

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

浅井圭介 (KEISUKE ASAI)

東北大学 工学部・教授

研究者番号: 40358669