

非定常 PSP によるフラッタ時の翼上面圧力変動の可視化

中北和之、有蘭仁、伊藤正剛(宇宙航空研究開発機構)

Unsteady Pressure-Sensitive Paint Visualization of Transonic Flutter on Thin Wing

Kazuyuki Nakakita, Hitoshi Arizono, Masatake Ito (JAXA)

概要

フラッタ発生過程での流体现象の解明とフラッタ予測ツールの検証のため、非定常 PSP 計測を用いた翼面圧力分布と衝撃波位置の可視化を行った。PSP としては高速応答型 PSP の 1 つである陽極酸化 PSP を用い、高出力青色半導体レーザを用いて PSP を励起し、PSP 計測には高速カメラを用いた。高速カメラは 2kfps (frame per sec) または 5kfps で時系列計測を行った。模型は本研究のために独自に設計したアルミ製中実模型である薄翼フラッタ模型であり、前縁の後退角 30° 、スパン 250mm、断面形状は NACA65A004 である。今回紹介する非定常 PSP 計測結果は定性的可視化結果であり、圧力値のデータではないが、フラッタ発生時の非定常な圧力分布の変化と衝撃波の挙動が明瞭に把握できる結果が得られた。

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では前身の航空宇宙技術研究所(NAL)時代の 1994 年から感圧塗料 (PSP) の研究開発を開始し、これまでに多くの PSP 試験を行ってきている^{1~4}。定常現象に対する実用 PSP 技術では実機開発にも用いられるレベルに達している。

2007 年度からは実用 PSP 技術で得られた技術蓄積を活かし、PSP の用途を非定常圧力現象の計測にも拡張すべく非定常 PSP 技術の開発も行っている。この非定常 PSP では 4 つの分野を主な適用対象として選定し、技術開発を行っている；

- ① 遷音速フラッタ・バフエット
- ② 低速での空力騒音に関連する非定常場
- ③ ヘリコプタ・ブレード
- ④ 内部流

これらの対象は研究面、実用面ともに PSP のメリットである面での圧力分布計測が求められている測定対象であり、かつ JAXA 内部にそれぞれを研究対象とする専門家集団が存在し非定常 PSP 計測がこれらの専門家集団と連携を取ることで JAXA

A として大きな前進が期待できる対象でもある。本稿で取り上げる遷音速フラッタ・バフエットの他に、空力騒音場に関連する非定常場⁵と内部流⁶では非定常 PSP の研究は進んでおり、ヘリコプタ・ブレードについても 2 回の feasibility study 試験を終え、さらなる改良を図っている段階である。

フラッタは空力と構造の連成した非線形現象であり、航空機設計に際しては構造強度を決定するにあたって考慮すべき重要な現象である。無駄な構造強度を省くため、高精度なフラッタ限界予測手法が期待されているが、現時点では最終的には実験によってフラッタ限界を確認する手法が一般的である。

フラッタ試験で用いられる模型は破損を前提に製作されており、フラッタ現象に伴う非定常圧力変動の計測のための非定常圧力センサも装着されているが、その点数は高々数点程度であり、個々の模型でのフラッタ現象の原因解明やフラッタ予測コードの検証のための非定常圧力データとしては限られた圧力情報しか得られないのが現状である。非定常 PSP であれば、安価な製作費用で模型全体の非定常圧力情報を取得可能であり、非定常な衝撃波

位置の把握や、フラッタ開始に至る原因となる空力現象の理解にも寄与が可能であろう。また、高精度なフラッタ予測ツールの構築に際しての検証データとしても数点の非定常圧力センサと比較して遥かに大きな情報量を提供できる。さらにはフラッタ制御デバイス等の開発にも時系列な非定常圧力データを活用可能である。

本研究では、非定常 PSP 技術のフラッタ現象への適用性確認を目的とする。用いる高速応答型 PSP はこれまでも実績の豊富な陽極酸化アルミ PSP (Anodized Aluminum PSP; AA-PSP) とした。試験模型としては 2 章に後述する薄翼フラッタ模型を新規に設計・製作した。この薄翼フラッタ模型は JAXA が所有するフラッタ予測コードを活用し、PSP が得意とする大気圧以下の圧力範囲でフラッタを発生するように設計を行った。本稿では一連の非定常 PSP 技術のフラッタ現象への適用性確認研究の中での First Step として、フラッタによる非定常圧力変化を PSP で可視化する試験を行う。

2. 供試模型

本研究では非定常 PSP 技術のフラッタ現象への適用性確認を目的とし、用いる高速応答型 PSP としてこれまでに最も実績の豊富な AA-PSP を採用したことから供試模型にいくつかの制限が加わる。AA-PSP では模型材質がアルミ系材料でなければならない、この中でも A5052 が最も適する。通常、フラッタ模型は模型剛性の点から FRP などの非金属材料が使われるが、アルミ材料を用いるためにフラッタを発生させるためには薄翼でなければならない、翼型としては最大翼厚 4% の NACA65A004 を採用した。また、模型製作費を低減するため、模型の構造は中実模型となっている。本研究で用いた薄翼フラッタ模型の概略は以下のとおりである；

- ・翼根コード長：110mm
- ・翼端コード長：55mm
- ・翼スパン長：250mm
- ・翼前縁の後退角：30°

(25%コードでの後退角は 27.58°)

模型上には 60%スパン位置に非定常圧力センサ (Kulite XCQ-062-25D) を 3 点装着した。図 1 に薄翼フラッタ模型の概要を示す。

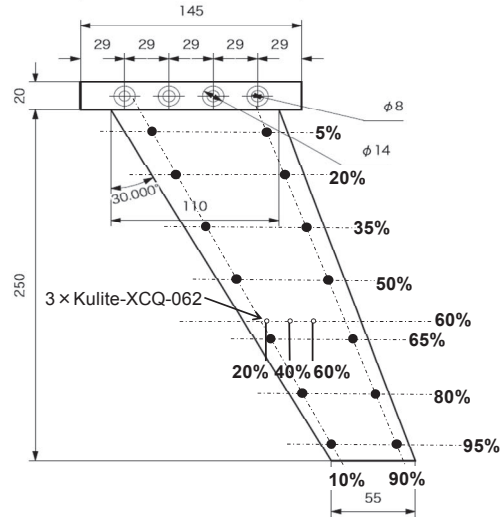


図 1 薄翼フラッタ模型形状と非定常圧力センサ設置位置

3. 非定常 PSP

3.1 高速応答型 PSP

PSP は特定の有機分子からの発光が酸素消光によって減少することを用いた分子センサである。PSP からの発光量は酸素分子の少ない低圧環境下では大きくなり、高圧下では小さくなる。通常、風洞試験で一般的に用いられる PSP はバインダであるポリマと感圧色素を溶媒に溶かし、スプレーで模型表面に塗装されるものである。しかしこれらのポリマをバインダとした PSP はポリマ中の酸素拡散に律速され、時間応答性は秒のオーダーである。非定常現象計測にはこのような一般的なポリマタイプ PSP の時間応答性では不足であるため高速応答型 PSP を用いる。本研究ではその 1 つである AA-PSP を用いた。これはアルミ系材料に陽極酸化による酸化アルミ層を形成し、その上に感圧色素を吸着させるものであり、10kHz 以上の時間応答性を持つ。これまでも非定常 PSP 計測^{5,6}や、極超音速衝撃風洞における短時間計測⁷などで広く用いられている。本研究での感圧色素はバソフェナンスロリン・ル

テニウム($[\text{Ru}(\text{ph}_2\text{-phen})_3]\text{Cl}_2$)である。

図 2 に AA-PSP の概要を示す。(a)は陽極酸化アルミの構造、(b)が陽極酸化アルミ表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 撮影画像である。(c)は衝撃波管を用いて評価した AA-PSP 時間応答性評価試験の結果の一例であり、陽極酸化アルミ層の厚さによっても応答性は異なるが、この例での時間応答性は約 $40\mu\text{s}$ である。

3.2 非定常 PSP 計測システム

前述の高速応答型感圧コーティング、高速カメラ以外の主要な計測システム要素として励起光源が

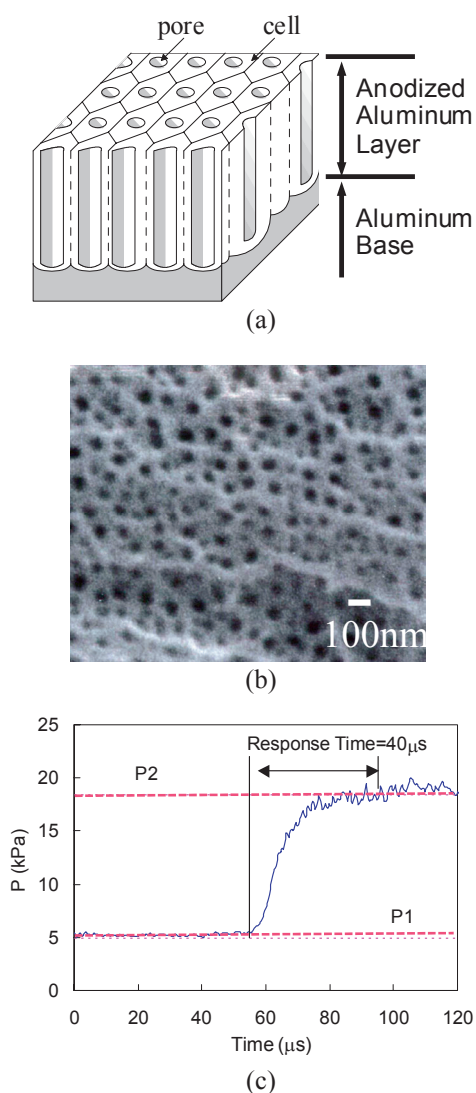


図 2 AA-PSP の概要

(a) 陽極酸化アルミ層の構造、(b) 陽極酸化アルミ表面の SEM 画像、(c) 衝撃波管を用いた AA-PSP 時間応答性試験結果の一例

ある。本研究では既存の 300W 高安定キセノン光源を 3 台用いた。非定常 PSP 計測ではカメラ露光時間が 1ms 以下となるため、キセノン光源では十分な PSP 発光量を得ることが難しく、計測可能な変動圧力の限界を決める要因となっている。PSP からの発光を増大させると計測可能な変動圧力の限界や計測周波数を拡張することができるため、今後は PSP 自体の発光量増大と、Ar レーザや半導体レーザ、LED などによる励起光量の増強を図る必要がある。

3.2.1 高速カメラ

非定常 PSP 計測では、対象となる非定常現象の周波数をカバーできる明るい高速度カメラが必要となる。非定常 PSP 用高速度カメラに必要な条件としては、

- ・明るさ
- ・撮影可能フレームレート
- ・A/D 分解能
- ・空間解像度
- ・画像取得枚数

の 5 項目が重要となる。

高速カメラの明るさは、PSP からの弱い発光を非常に短い露光時間で計測するため、十分な感度が必要となる。計測可能周波数としては、対象となる現象の最低 4 倍以上のフレームレートが必要であり、可能であれば 10~20 倍の周波数が望ましい。また、A/D 分解能については、PSP 発光量を定量的に分解するために最低でも 10bit が必要であり、12bit 以上が望ましい。高速カメラを含む世の中のデジタルカメラの大部分は 8bit (カラーカメラであれば 8bit × 3 色の 24bit) であり、1 count あたりの階調が 0.4% 程度と定量的 PSP 計測に用いるには不足である。空間解像度についても詳細な画像計測には 512×512 ピクセル程度の空間解像度は必要と考えられる。画像取得枚数としては、非定常現象を連続で計測するためには 100 枚以上は必要であり、FFT や相関解析も念頭に置くとすると 1000 枚以上の取得可能枚

数は欲しいところである。

本研究で用いた高速カメラは Vision Research 社製 Phantom V7.3 (モノクロ機) であり、ISO 感度 4800、最大空間解像度 800×600 pixel、最大空間解像度での計測フレームレート 6.6kfps、A/D 分解能は最大 14 bit、計測可能画像枚数は 15,000 枚以上である。

3.2.2 非定常 PSP 用励起光源

非定常 PSP 計測では計測周波数が高いため必然的に露光時間が短くなり、十分な計測カウント値を得ることが難しくなる。このため、PSP からの発光を可能な限り大きくする必要があり、高輝度 PSP 励起光源が必要となる。

本研究では、PSP 色素であるバソフェナンスロリン・ルテニウムの吸収線である青色光源として高出力の青色半導体レーザー (住友電工製 BLM-5000-H08D) を用いた。発光波長 $450 \sim 455$ nm の 14 個の半導体レーザーをクラスタ化し、最大出力は 5W、100V 商用電源で動作可能な空冷レーザーである。これまでの非定常 PSP 計測では 6W 水冷アルゴンレーザーを使用していたが、これは 3 相 200V 電源、max. 50A の水冷光源であり、総重量も 100kg であったが、これに比べ、総重量 20kg 程度と非常に可搬性の高い光源である。難点は高出力青色半導体レーザー素子の価格が高く、光源全体としてもアルゴンレーザーより高価であることである。

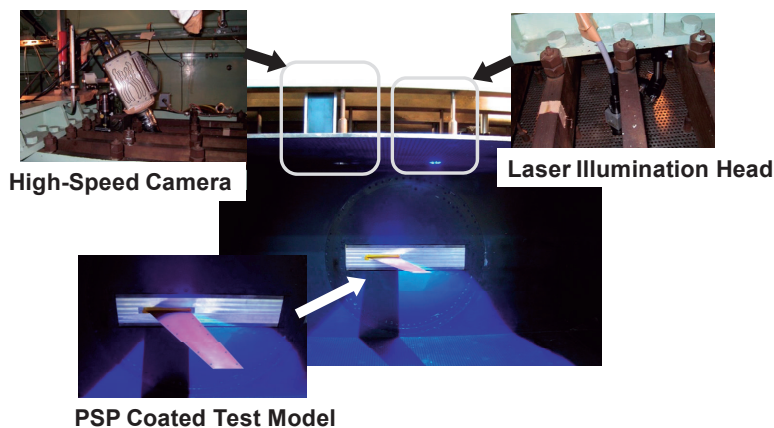


図3 FWT への薄翼フラッタ模型と非定常計測システム設置の様子 (高速カメラは上方計測の設置位置)

3.3 風洞への計測システムセットアップ

試験は JAXA $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ フラッタ風洞 (FWT) で行った。薄翼フラッタ模型は図3に示すように FWT 側壁に装着され、天井壁面下流側の小穴から青色半導体レーザー光を照射する。

高速カメラは上方計測と側方計測の2種類の設置位置を用いた。図3は上方計測の様子であり、天井壁面上流側の小穴から模型を計測する。図3では明瞭ではないが、この設置方法では、FWT 天井部に支持梁があり、梁の間隔が高速カメラ本体の幅より小さいため観測用小穴まで近寄ることができず、高速カメラ本体と C マウントレンズの間に 250mm のリレーレンズを取り付けて計測を行った。側方計測では模型設置面と反対側の側面にある大型シュリーレン窓を介して計測を行う。側方計測では光学アクセスが容易なため、リレーレンズは用いない。

4. 試験結果

4.1 側方計測

薄翼フラッタ模型でのフラッタ試験での気流条件は $P_0=150\text{kPa}$ で一定とし、マッハ数を 0.90 から 0.95 まで $0.002/\text{s}$ でスイープした。模型の設置迎角は 0° である。この際、マッハ数およそ 0.93 でフラッタが発生する。フラッタ現象としては発散的なフラッタではなく、当初は振幅が増大するが、一定の振幅に達すると周期的な振動を繰り返す LCO (Limit Cycle Oscillation) であった。

図4に非定常 PSP 計測で得られた LCO 時の翼面上圧力分布の可視化結果を示す。本稿での PSP 結果は可視化であり、定量的な圧力値までの処理は行っていない。高速カメラの計測フレームレートは 5kfps であり、露光時間は $198\mu\text{s}$ と極力多くの光量を確保するためにフレーム間のほとんどの時間を露光時間に費やした。このため、5kfps より小さいフレームレートでは、

翼の移動速度が大きいため1フレーム内での模型画像がブレてしまい、明瞭な画像を得ることができなかった。また、翼面上でPSPによって可視化されている領域は翼端部の60%程度であり、レーザ照射密度を高くする必要性と、照射ヘッドの光学アクセスの2点の制限から、薄翼フラッタ模型の全体を照射することはできず翼面全面をPSP計測することはできなかった。

図4はLCO 1周期の非定常PSP可視化結果である。これよりLCO 1周期に対応する翼面上の圧力分布と衝撃波位置と、翼の弾性変形の時間変化を理解することができる。LCO周波数は110Hz程度であり、現象には高調波成分も存在するが、用いたA-A-PSPの時間応答性は十分に速いものと考えこ

とができる。

図4から、翼が下方に弾性変形した際には、後退翼であることによる捩じり下げによって翼にプラス方向の迎角が付き、翼面上に衝撃波が現れる。衝撃波は前縁側と中央部の2つの衝撃波が見られる。時間が進み、翼変形が中立点付近に向かうにつれ、捩じり下げによる翼の迎角は小さくなるため衝撃波は翼前縁に向かって移動し、かつ弱くなる。翼前縁の衝撃波は中央部の衝撃波よりも早期に見えなくなる。さらに弾性変形が進み、中立点より上方に翼が変形すると翼の迎え角はマイナスとなり、翼面上には衝撃波は存在しなくなる。さらに弾性変形の位相が進み、中立点から下方に弾性変形すると、翼の迎角がプラスとなり、衝撃波が現れる。

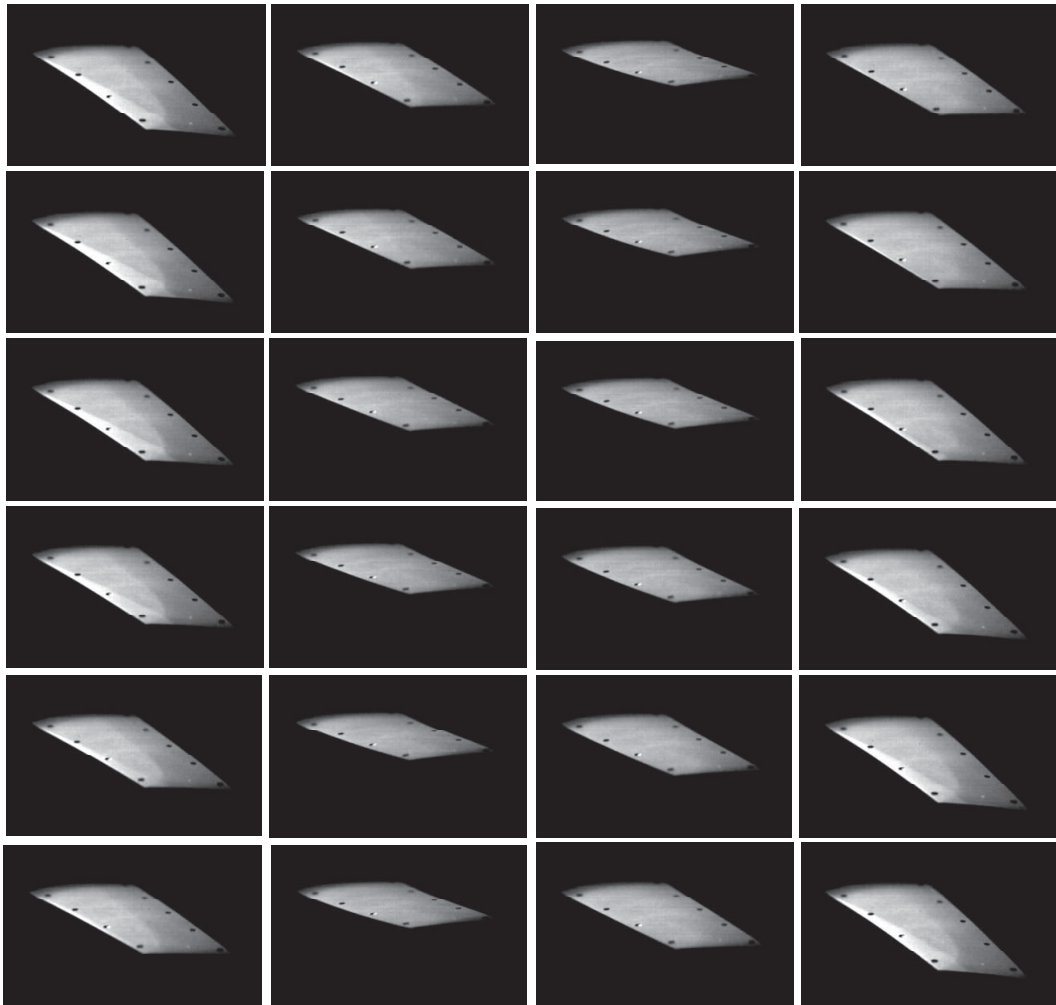


図4 側方計測によるフラッタ1周期の圧力分布の可視化
気流条件は $P_0=150\text{kPa}$, $M=0.93$, $\alpha=0^\circ$. 高速カメラの計測フレームレート 5 kfps.
図中の各画像間の時間間隔は 0.4ms であり、図左上より下方に時間順に配置してある。

弾性変形と空力現象の間の位相遅れの情報も興味深い点であり、図4の1枚目と24枚目、2枚目と23枚目といった比較をすると、下方（プラス迎角）→上方（マイナス迎角）への変形の位相での衝撃波の様子と、上方（マイナス迎角）→下方（プラス迎角）への変形の位相での衝撃波の様子を比較すると、はなはだ定量的ではないが、衝撃波は消えにくく、現れにくい、という特徴を持つことが分かる。ただ、翼面上の歪ゲージ出力は必ずしもきれいな正弦波出力を示してはならず、弾性変形は逆位相で完全には対称ではないため、現象の位相遅れについては、今後十分に詳細な比較を行った上で議論する必要がある。

4.2 上方計測

図5は上方計測による薄翼フラッタ模型上のLCO 1周期の非定常PSP可視化結果である。これよ

りLCO 1周期に対応する翼面上の圧力分布と衝撃波位置と、翼の弾性変形の時間変化を理解することができる。高速カメラ位置は異なるが、レーザ照射は側方計測と共通であるため、側方計測と同様に翼面上でPSPによって可視化されている領域は翼端部の60%程度である。気流条件は側方計測の場合と同様であり、 $P_0=150\text{kPa}$ 一定、マッハ数は0.90~0.95まで0.002/sでスイープし、模型の設置迎角は 0° である。上方計測では模型の弾性変形の方角に対して上から計測するために変形による画像ブレが小さく、高速カメラの計測フレームレートは側方計測とは異なり、2kfps、露光時間を $498\mu\text{s}$ とし、多くの光量を確保し、S/Nの良い計測となるようにした。

図5でもLCO 1周期に対応する翼面上の圧力分布と衝撃波位置が可視化できており、図4より圧力分布と衝撃波位置の模型上位置の関係は直感的に把握できる。しかし、翼の弾性変形との関係は逆に

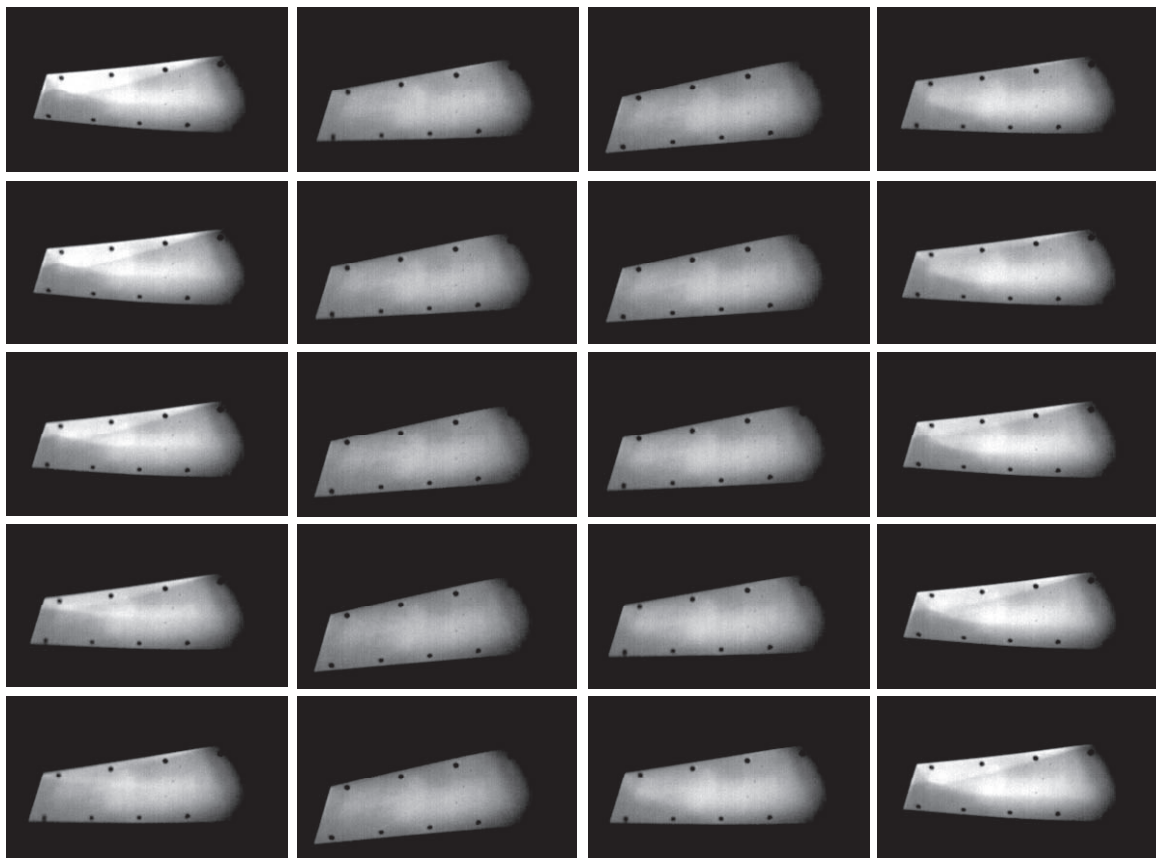


図5 上方計測によるフラッタ1周期の圧力分布の可視化
 気流条件は $P_0=150\text{kPa}$, $M=0.93$, $\alpha=0^\circ$ deg. 高速カメラの計測フレームレート 2 kfps.
 図中の各画像間の時間間隔は 0.5ms であり、図左上より下方に時間順に配置してある。

分かりにくくなっている。しかし、この観点は将来的な定量的 PSP 処理においては有利な点となるものと考えている。PSP 処理の起点となる無風時の参照 PSP 画像と通風時の試験 PSP 画像の比を取り発光量を規格化する部分で弾性変形による影響を小さくできるためであり、上方計測は高速カメラの光学アクセスの点では大きなハンデを抱える設置方法であるが、定量的な非定常 PSP 計測では有効な計測方法となる。

5. まとめ

非定常 PSP 計測によって薄翼フラッタ模型のフラッタ (LCO) 時の翼面上の圧力変化及び衝撃波位置を時系列で可視化し、模型の弾性変形と関連する衝撃波の挙動を明瞭に把握することができた。一連の結果より、非定常 PSP 技術のフラッタ計測への適用性が確認でき、また、本技術がフラッタ現象の計測に有用なツールとなりうることも確認できた。

本研究は非定常 PSP 技術のフラッタ計測への適用の第一歩であり、まだ多々問題は存在する。今後は定量的圧力値の算出が当面の課題であり、変形する模型への PSP データ処理ソフトを構築し対応する必要がある。また、現在は AA-PSP を使うことを前提としたために模型材質がアルミに限定されているが、アルミ以外の模型への対応も大きな課題である。フラッタ模型では FRP、プラスチック、バルサなどが模型材料の主流であるため、このような模型であっても対応可能な塗装型高速応答 PSP の開発中も進めている。

最終目標としては、非定常 PSP 技術をフラッタ計測に適用し、定量的かつ高い時間及び空間解像度を持った非定常圧力分布計測データを提供することで、高精度なフラッタ予測ツール構築に対して寄与することであり、このような非定常 PSP データを生産できるよう技術を発展させて行く所存である。

謝辞

本研究にあたっては、JAXA 機体構造グループの玉山雅人氏、斎藤健一氏、吉本周正氏、菊池孝男氏には試験遂行と風洞オペレーション全般にわたって最大限のサポートを頂いた。この場を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1 Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K., and Watanabe, S., "Practical Pressure-Sensitive Paint Measurement System for Industrial Wind Tunnels at JAXA", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 359-366.
- 2 Kurita, M., Nakakita, K., Mitsuo, K., Kawato, H., Yamamoto, Y., Watanabe, S., and Fujii, K., "Aerodynamic Characteristics of a Lifting-Body-Type Reentry Vehicle at Transonic Speeds," AIAA-2006-665, 2006.
- 3 満尾和徳、栗田充、中北和之、渡辺重哉、伊藤正剛、山内智史、山谷英樹, "JAXA における実用 PSP 計測システムの研究開発," 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008.
- 4 渡辺重哉、満尾和徳、中北和之、栗田充、加藤裕之、口石茂、藤井啓介、山本一臣、畑中圭太, "国産旅客機開発に向けた光学的空力計測技術の開発," 日本航空宇宙学会第 40 期年会講演会講演集, 2009.
- 5 Nakakita, K., "Unsteady Pressure Distribution Measurement around 2D-Cylinders Using Pressure-Sensitive Paint," AIAA-2007-3819, 2007.
- 6 Nakakita, K., Osawa, J., Hori, N., and Kameda, M., "Unsteady Pressure-Sensitive Paint Measurement for Oscillating Shock Wave in Supersonic Nozzle," AIAA-2008-6580, 2008.
- 7 Nakakita, K. and Asai, K., "Pressure-Sensitive Paint Application to a Wing-Body Model in a Hypersonic Shock Tunnel," AIAA-2002-2911, 2002.