

ロケットフェアリング模型の非定常 PSP 計測

中北和之、今川健太郎、高間良樹、加藤裕之、中島努
宇宙航空研究開発機構

Unsteady PSP measurement of a Rocket Fairing Model

by

Kazuyuki Nakakita, Kentaro Imagawa, Yoshiaki Takama, Hiroyuki Kato, and Tsutomu Nakajima

ABSTRACT

Unsteady Pressure-Sensitive Paint (PSP) measurement of a rocket fairing model was conducted at the JAXA 2m×2m Transonic Wind Tunnel as a part of the campaign to investigate the steady and unsteady flow field around it and to obtain the CFD validation data. Anodized-aluminum PSP was coated on the model surface, and it was illuminated using a high-power blue laser diode. AA-PSP luminescence was measured by a high-speed camera, whose frame rate was 5kfps. The high-speed camera images were calculated to the C_p data using in-situ PSP calibration. Unsteady PSP data captured unsteady pressure data on the rocket fairing model as time-series C_p images. The unsteady phenomena on the model were significantly varied according to the Mach number and the angle of attack. Frequency analysis was also applied to the time-series C_p data. Unsteady pressure distribution was clearly investigated from the power spectrum results.

1. はじめに

ロケットの先端部分であるロケットフェアリング形状は航空宇宙分野での1つの代表的な機体形状である。突起物や付加物等の微小表面構造物を無視して考えた場合、半球、円錐、円柱、オジャイブ等の基本的形状を組み合わせた軸対称の単純形状でありながら工学的な有用性が高く、かつ非定常衝撃波や剥離、衝撃波-境界層干渉、バフエットなどの複雑な現象も伴う学術的にも意義のある研究対象と言える。従来のロケットフェアリング周り流れ場の研究¹⁾では非定常流れ場については詳細な議論の対象とはなっていない。

遷音速領域でのロケットフェアリング形状に発生する非定常流体现象を理解し、風洞試験結果と近年発達の著しい非定常CFD結果との相互検証を行うことを目的に、JAXAでは単純化したロケットフェアリング模擬形状を対象として風洞実験、CFD計算両面からの遷音速非定常流れ場計測キャンペーンを実施していることは参考文献2及び3に述べられている通りである。この一環として、JAXA研究開発本部で研究開発を進めている光学的な非定常流体計測技術である時系列粒子画像流速計測法(Particle Image Velocimetry) (以下、時系列PIV)と非定常感圧塗料計測(Pressure-Sensitive Paint) (以下、非定常PSP)についてもデータ取得を行った。本キャンペーンでの時系列PIV計測については参考文献4を参照して頂きたい。

非定常PSPは、1990年代から開発が進められ現時点では国内外で既に実用的な圧力計測技術として使われつつある一般的なPSP計測⁵⁻⁷⁾と基本的な構成は同じであるが、陽極酸化アルミPSP(AA-PSP)^{8,9)}等の高速応答型PSPと高速度カメラなどの高速画像取得装置¹⁰⁻¹²⁾を用いる点が異なっている。従来の非定常圧力計測技術である非定常圧力センサと比較し、定量性では更なる性能向上の必要があるが、高速カメラの解像度相当の空間分解能で計測領域全体の非定常流れ場の圧力変動の挙動が時系列で把握できる利点がある。

本稿では、前述のキャンペーンの一環として、参考文献2に述べられている単純化したロケットフェアリング模擬形状のクリーン形状模型(以下、クリーン形状模型)に対して行った非定常PSP計測について、そのシステム構成やデータ処理手法、得られた結果について述べる。

2. 風洞試験及び模型

本研究で用いたクリーン形状模型を図1に示す。本模型及び風洞試験の概要については参考文献2を参照して頂きたい。ここでは非定常PSP計測に関する部分を補足する。

風洞試験ではJAXA 2m×2m 遷音速風洞(TWT1)を用いて試験を行った。計測部としては光学計測用に観測窓が充実している第4カートを用いた。図1がTWT1第4カートに設置されたクリーン形状模型である。図1で黄色に着色された領域が高速応答型PSPの1つである陽極酸化アルミPSP(Anodized Aluminum PSP; AA-PSP)がコーティングされた範囲である。PSP色素はバソフェナンスロリン・ルテニウムである。本試験で用いたAA-PSPの詳細については参考文献13を参照して頂きたい。AA-PSPはkHzオーダーの応答性を有し非定常現象への適用も可能であるが、親水性多孔質被膜であるために空気中の水分の影響を受けやすく、通常はステアリン酸等の疎水性コーティングを併用して用いられてきている。しかし、著者らの最近の研究では疎水性コーティングが低周波数領域での応答性を阻害していることを示唆するデータが得られており^{14,15)}、本研究では水分の影響が生じたとしても、後述するようにPSP発光量と圧力の関係を別に設置された圧力センサの同時刻の計測データを用いて決定するin-situ法を採用することで対処することとし、AA-PSPの時間応答性に影響を与える可能性のある疎水性コーティングは施さなかった。

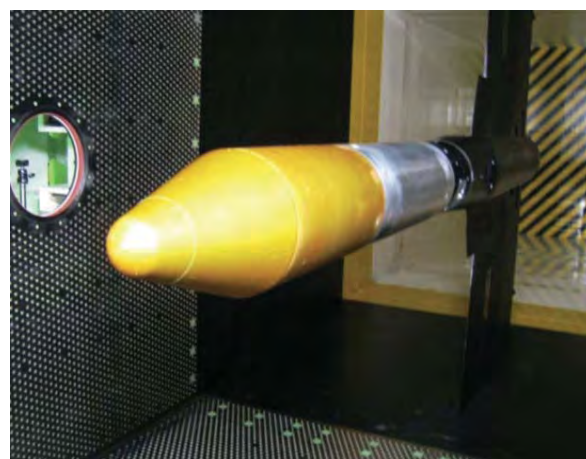


図1 TWT1 第4カートに設置されたクリーン形状模型; 黄色部分が AA-PSP コーティング範囲

図2に本試験での模型ロール角の定義を示す。肩部での剥離が最小になるときを $\phi=0\text{deg}$ と定義する。クリーン形状模型での非定常PSP計測では、最も剥離が大きくなる模型風下側の模型ロール角 $\phi=-180^\circ$ 付近かつ模型肩部周辺の領域を計測した。

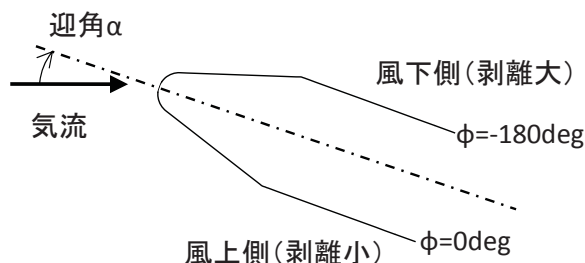


図2 ロール角の定義

3. 非定常PSP計測

3. 1. 非定常PSP計測システム

図3にTWT1第4カート天井部に設置された非定常PSP計測システムを示す。

本研究で用いた高速度カメラは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 $800 \times 600\text{pixel}$ 、最大空間解像度での計測フレームレート6.6kfps (frame per sec)、A/D分解能は最大14bit、16GBのメモリを搭載し、計測可能画像枚数は15,000枚以上である。本試験での高速度カメラ設定は、空間解像度 $400 \times 400\text{pixel}$ 、計測フレームレートを5kfpsとした。露光時間はAA-PSP発光量を最大に取り込むるようほぼフレーム間隔に等しい $198\mu\text{s}$ とした。A/D分解能は12bitに設定した。大量の画像を取得した場合にはPCへのデータ転送時間が長くなるため、本試験では通風時間の制限から最大画像枚数を20,000枚(約6GB)とした。高速度カメラのレンズ(Nikkor 50mm F1.2)には励起光である青色レーザ光をカットし、AA-PSP発光の赤色光を透過するために、580nm以上を透過するOS8フィルタを取り付けられている。

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、高速カメラで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。本研究でのAA-PSPを励起する励起光源としては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に対応する青色光源としては、高出力の7W青色半導体レーザ(住友電工製BLM-5000-H08D)を用いた。発光波長450~455nmの青色半導体レーザをクラスタ化し、最大出力7W、100V商用電源で動作可能な空冷レーザである。図1のTWT1天井の非定常PSPシステム設置位置はTWT1と圧部内に位置するため、高価な7W青色半導体レーザは風洞外の大気圧環境下に設置し、そこからTWT1天井部までは15mのファイバ径800 μm のポリマー製光ファイバを介して伝送した。この15m光ファイバ先端には市販のレーザコリメータを取り付け、模型上での照射範囲の調整と照射光の均一化を図った。

励起レーザ光はTWT1第4カート天井部に設けられた10cm角観測窓を介して下方(計測部中心)に位置されたクリーン形状模型に照射される。青色レーザ光からの反射光の高速度カメラへの入射を防ぐため、励起レーザ光と高速度カメラ計測には独立の10cm角観測窓を用いる。高速度カメラが使用する10cm角観測窓の石英ガラスには、ガラス界面での反射の影響によるゴースト像の写り込みを防止

するために赤色波長領域での反射を低減する反射防止コーティングが施されている。

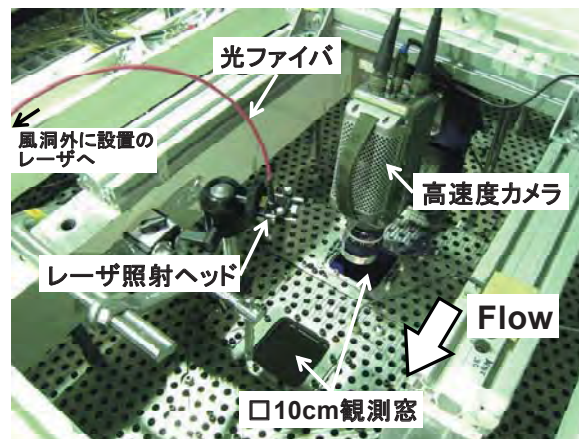


図3 TWT1第4カート天井部に設置された非定常PSP計測システム

3. 2. データ処理手法

PSPの発光量と圧力の関係は既知圧力下の発光量と圧力 I_{ref}, P_{ref} と通風時の光量と圧力 I, P から理論的には以下のStern-Volmerの式；

$$\frac{I_{ref}}{I} = A + B \frac{P}{P_{ref}} \quad \text{----- (1)}$$

を用いて記述される。式(1)、あるいは式(1)を多項式に拡張した実験式を用いてPSP発光量は圧力値に変換される。本研究では、PSPの発光量と圧力の関係としては式(1)を採用した。

PSPの発光量と圧力の関係の較正手法としては、*a-priori*法、*in-situ*法⁵⁾、両者の利点を併用した*a-priori/in-situ hybrid*法⁷⁾などの方法があるが、本研究では、式(1)の変数A, Bを決定するためには、非定常PSP発光量と圧力の関係を模型上に設置されたKulite非定常圧力センサの同時刻の計測データを用いて決定する*in-situ*法を用いた。

非定常PSP計測データ取得の際には同時にKulite非定常圧力センサデータも取得される。本稿のように流れ場が非定常な場合には、計測データの非定常性の影響を受けないよう、非定常PSPデータとKulite非定常圧力センサデータの双方とも十分な時間を平均した平均値を用いる必要がある。本研究では、式(1)を拡張した、

$$\frac{I_{ref}}{\bar{I}} = A + B \cdot \bar{C}_{P, Kulite} \quad \text{----- (2)}$$

\bar{I} : 通風時の非定常PSP発光データの時間平均値

$\bar{C}_{P, Kulite}$: 通風時のCp値でのKulite非定常圧力センサデータの時間平均値

を用いて係数A, Bを較正する。

非定常PSP計測でのデータ処理では、式(2)を時刻 t での値を用いる表現とした、

$$\frac{I_{ref}}{I(t)} = A + B \cdot C_p(t) \quad \text{----- (3)}$$

$I(t)$: 通風時の時刻 t での非定常PSP発光データ

$C_p(t)$: 通風時の時刻 t でのCpデータ

を用いて、時系列の非定常PSP発光データを時系列のCpデータに変換する。

4. 実験結果及び考察

4. 1. 非定常 PSP 計測部位

図4にクリーン形状模型に青色半導体レーザ光を照射した様子を示す。図4では写真撮影用にレーザ光強度を絞っているため、試験時のレーザ光強度の1/10程度の強度での様子である。図5が $M=0.8$ 、 $\alpha=0^\circ$ での非定常PSP計測画像を別に撮影した高速度カメラ画像に重ね合わせた図である。 $\phi=-180^\circ$ 付近かつ模型肩部周辺の領域を計測した結果である。本研究での非定常PSP計測範囲(=青色レーザ照射範囲)はおおよそ $\phi 150\text{mm}$ である。

非定常PSPでの計測範囲は、レーザ照射範囲で高速度カメラによって捉えられる非定常PSP発光のカウント値が計測に十分な値となるか否かによって決定される。計測カウント値が十分に大きな値とならない場合には、S/Nを確保するためには非定常PSP励起光である青色レーザ光をさらに集光しレーザ光密度を大きくすることでPSP発光量を増大させるか、高速度カメラの露光時間を長くすることで計測光量を大きくするかを選択となる。(カメラレンズの絞りが開放でない場合にはこれを大きくする選択肢も取り得る。)レーザ光密度を大きくすることでPSP発光量を増大させる場合には、非定常PSPの劣化

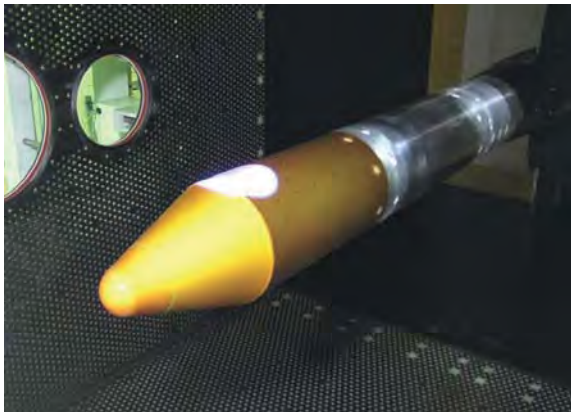


図4 クリーン形状模型への青色半導体レーザ照射

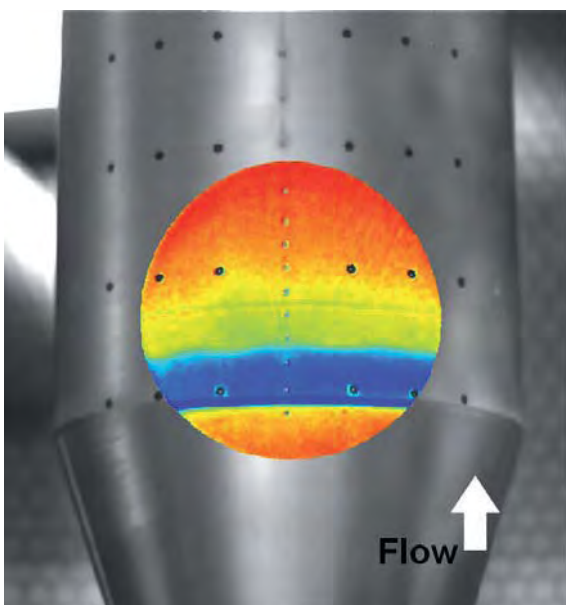


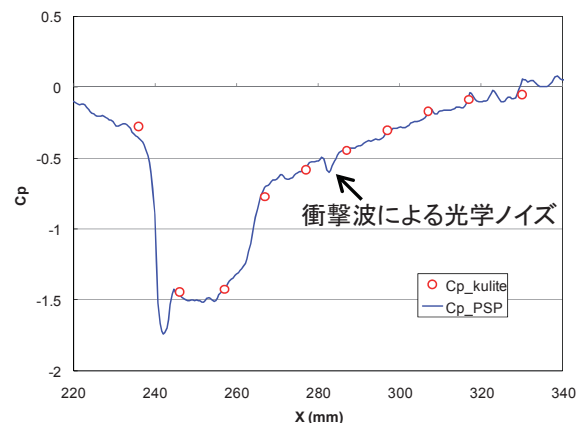
図5 模型と非定常PSP計測範囲の位置関係
模型画像に $M=0.8$ 、 $\alpha=0^\circ$ での瞬時非定常PSP計測画像を重ね合わせ

による発光量現象が許容範囲かどうかには注意しなければならない。本研究では、非定常PSP計測フレームレート5kfpsを優先し、図4のようにクリーン形状模型の肩部周辺に青色レーザ光を集光したセットアップを採用した。レーザ光の密度としては劣化を完全には無視できない程度のある程度強い励起光密度になったが、データ処理に*in-situ*手法を採用しているため、各非定常PSPケースでの較正係数に劣化の影響も含まれた形で圧力データへの変換を行うことができる。青色レーザ光照射にはレーザコリメータを用いて照射範囲内での均一化を図るよう対処しているが、その上での模型上の局所間でのレーザ密度の違いなどは誤差要因となり得る。

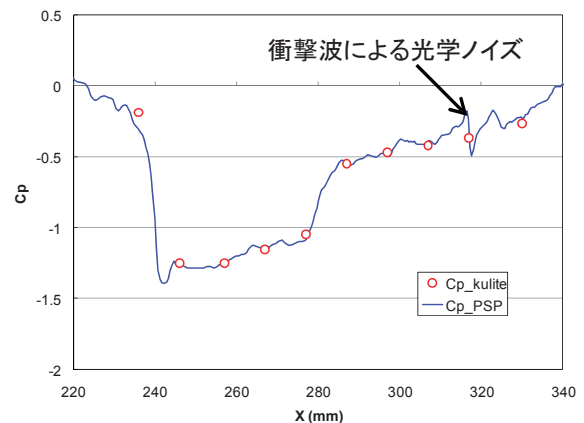
図5で、非定常PSP計測領域の中心軸に小さな黒丸が並んでいるものが直径約2.5mmの10点のKulite非定常圧力センサ、模型周方向に見られる直径4mmの黒丸が画像からの位置同定用マーカである。

4. 2. *in-situ* 較正及び定常圧力分布比較

非定常PSPデータの処理には、式(2)を使って決定されたそれぞれのケースに対応する係数 A, B を入力した式(3)を用いる。図6は $M=0.8$ での $\alpha=0^\circ$ 及び $\alpha=+4^\circ$ での非定常PSPデータとKulite非定常圧力センサデータのそれぞれの時間平均値のデータ比較である。図6、及び式(2)を用いた較正の際ともに、図5に示された画像中の非定常PSP領域に含まれる10点のKulite非定常圧力センサを、それぞれに対応するセンサ近傍の非定常PSP計測データと比較している。



(a)



(b)

図6 非定常PSPデータの時間平均値の定性比較
(a) $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$, (b) $M=0.8$, $\alpha=+4^\circ$

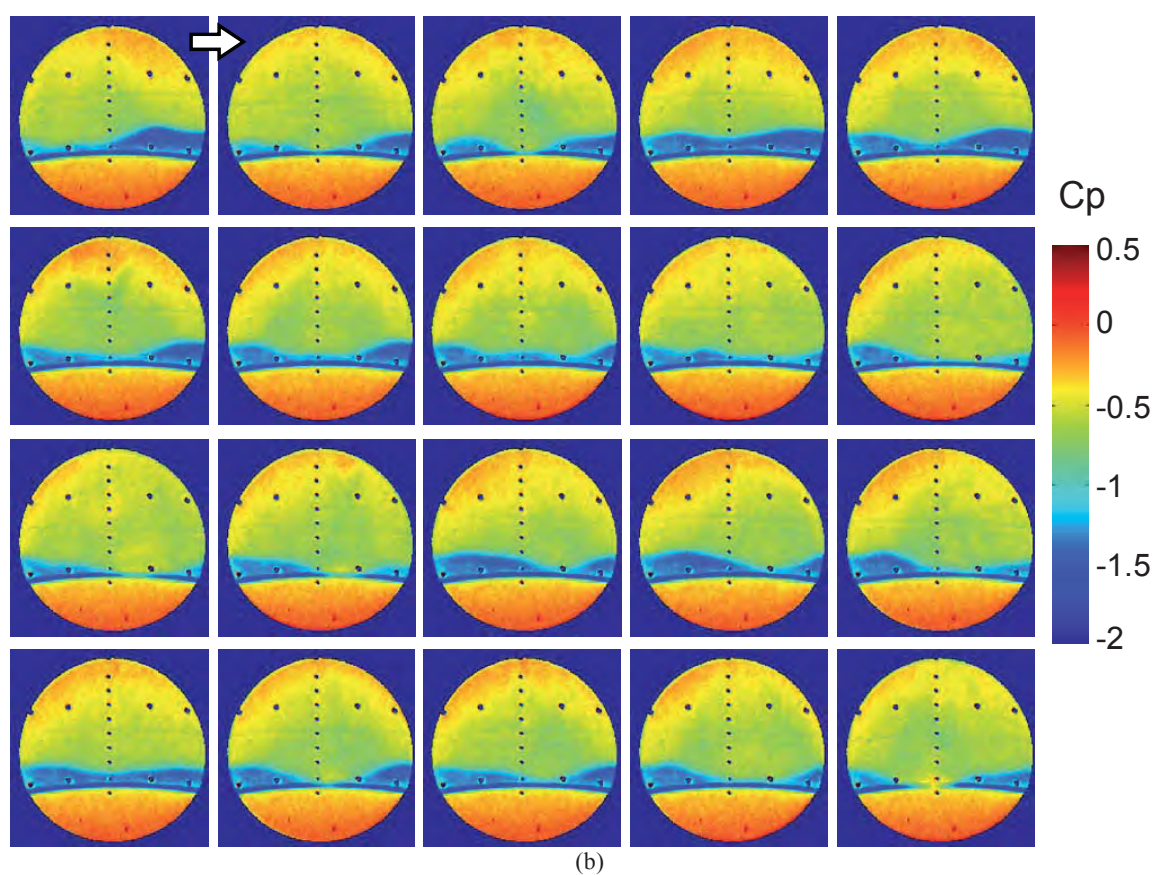
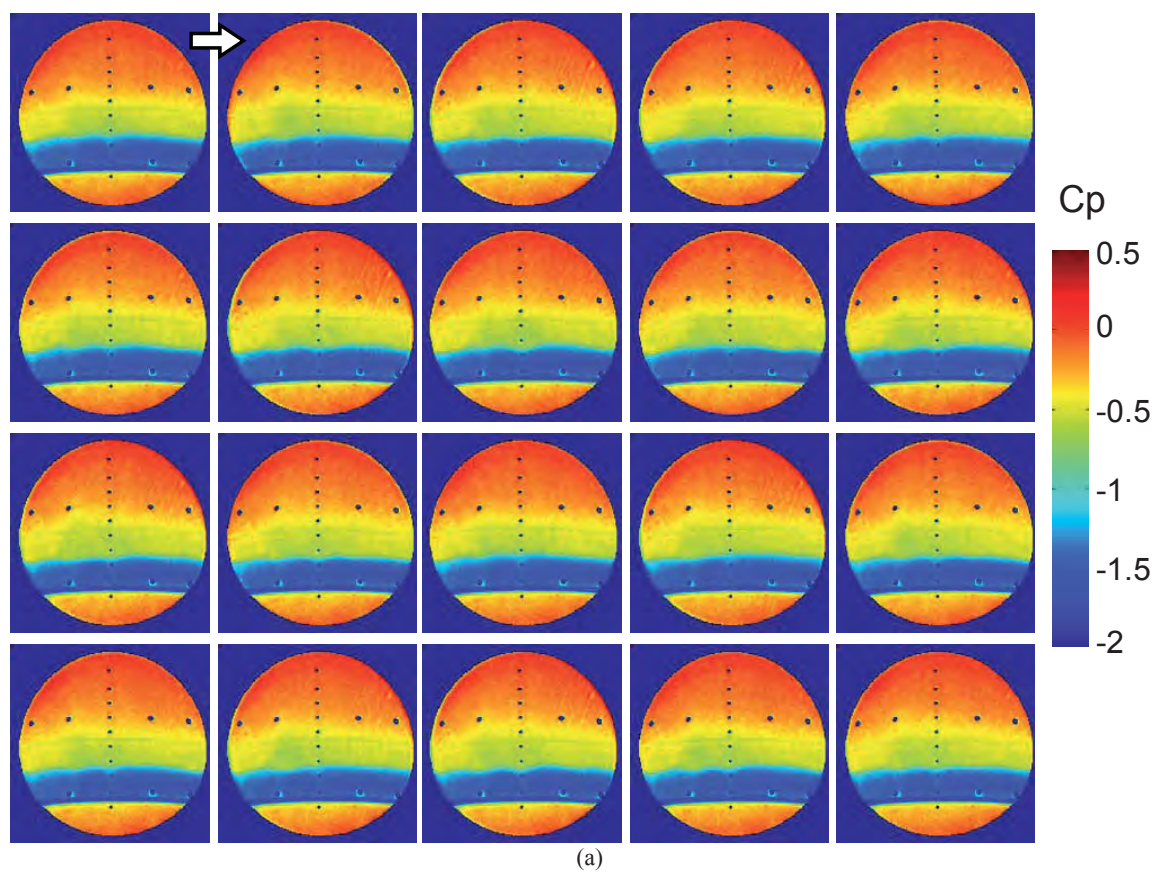


図7 非定常 PSP によるクリーン形状模型肩部付近の非定常圧力変動計測結果
 (a) $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$, (b) $M=0.8$, $\alpha=+4^\circ$
 計測レート: 5kfps, 表示画像は左上から横方向に順に 1ms 間隔での計測結果

図6では、時間平均データとしての観点であるが、*in-situ*法を用いることで定量的に妥当な値を取っていることが確認できる。青線の非定常PSPデータには図6(a)で $x=285\text{mm}$ 付近、(b)で $x=315\text{mm}$ 付近に模型に照射した励起レーザ光が衝撃波を通過することによる光学ノイズが発生している。光学計測であるPSPでは衝撃波による励起光の屈折は避けることができず、このような流れ場ではPSPデータの利用の際には注意が必要となる。

4. 3. 非定常PSPによる圧力変動計測

図7に非定常PSPによるクリーン形状模型肩部付近の非定常圧力変動の計測結果を示す。図6(a)が $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$ 、(b)が $M=0.8$, $\alpha=+4^\circ$ での結果である。模型上の計測位置は図5と同じ $\varphi=-180^\circ$ 付近かつ模型肩部周辺の領域の計測である。高速度カメラの計測レートは 5kfps であるが、図7での表示画像は左上から横方向に順に 1ms 間隔での計測結果を表示している。

図6(a)では、青色と緑色の界面が模型上に形成されるラムダ衝撃波の上流側が境界層と干渉する部分に相当し、この衝撃波の非定常挙動によって変動距離としては小さい量であるが、圧力分布が時間的に変動している現象が捉えられている。図6(b)では、この衝撃波の非定常な挙動がさらに大きくなり、非定常PSPによる圧力分布の計測結果でもはっきりと圧力変動が確認できる。

本稿では、非定常PSP計測結果の代表的なケースとして $M=0.8$ での $\alpha=0^\circ$ と $\alpha=+4^\circ$ について紹介するが、非定常PSP計測はマッハ数方向に $M=0.75, 0.8, 0.85$ 、迎角としては $\alpha=-2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$ についてのデータを取得しており、マッハ数や迎角の組み合わせによって模型表面上の圧力分布や非定常圧力変動の大小、圧力変動領域の位置などが大きく変化している結果が得られている。

4. 4. 周波数解析結果

図8は、図7で示した $M=0.8$ での $\alpha=0^\circ$ 及び $\alpha=+4^\circ$ での非定常PSP計測結果に対し、 C_p のパワー分布を画像化したものである。図7に示された非定常PSP結果はそれぞれ20,000枚の計測画像の一部であり、これらを1,024枚ベースのFFT処理を1/2 overlapしつつ19セットのアンサンブル平均を行った結果である。図8(a)が $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$ 、(b)が $M=0.8$, $\alpha=+4^\circ$ での結果である。それぞれ $300 \pm 20\text{Hz}$ 、 $500 \pm 20\text{Hz}$ 、 $680 \pm 20\text{Hz}$ 、 $1350 \pm 20\text{Hz}$ での平均値を図示した。図8での各ピクセルは完全なパワースペクトルデータを持っており、個々のピクセルでの議論も可能である。

図8(a)の $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$ のケースでは、図7(a)での結果からも言及したが、非定常圧力変動の影響範囲が小さく、パワースペクトル画像でも大きなパワーを持っているのはラムダ衝撃波の上流側が境界層と干渉するごく狭い領域であることが確認できる。この領域の下流側にパワーの大きな線が見られるのは5.2節でも述べた通り、励起レーザ光が衝撃波を通過することによって起こる屈折の影響である。

図8(a)で、画像中心軸上にKulite非定常圧力センサの設置されていることが分かるが、このケースでは、衝撃波の非定常挙動による圧力変動の大きな領域は画像上で上流側より2番目と3番目のKulite非定常圧力センサの設置位置の間に位置し、参考文献2でも記述があるが、離散的なKulite非定常圧力センサではこのような狭い領域での現象は捉える事ができていないことを確認できる。

図8(b)では図7(b)とも対応するように、図8(a)と比較して衝撃波の非定常挙動が大きく、それに連れて圧力変動領域も大きくなるため、大きなパワーを持つ領域も図8(a)に比べて大きくなる。このパワーの大きな領域の形

状であるが、Kulite非定常圧力センサの設置位置である $\varphi=-180^\circ$ 位置が最も非定常現象による流れ方向の圧力変動領域が大きくなり、その左右では圧力変動領域の範囲が小さくなっていることも分かる。

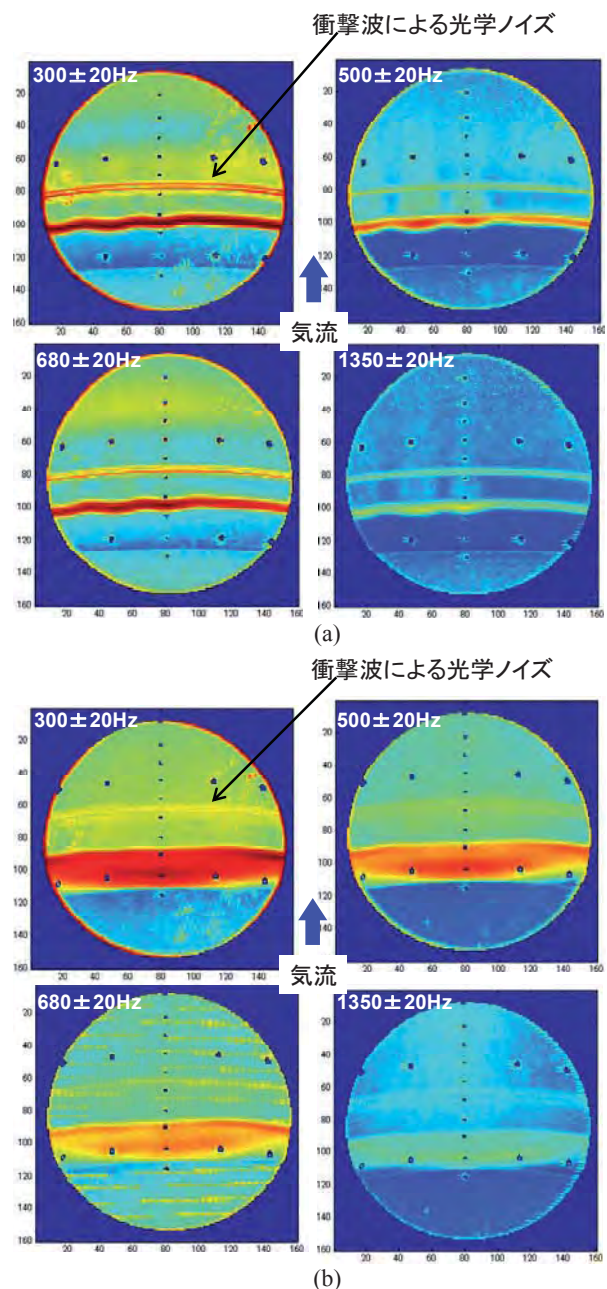


図8 非定常PSPによる時系列 C_p データのパワースペクトル解析結果

(a) $M=0.8$, $\alpha=0^\circ$ 、(b) $M=0.8$, $\alpha=+4^\circ$

5. まとめ

単純化したロケットフェアリング模擬形状を対象として風洞実験、CFD計算両面からの遷音速非定常流れ場計測キャンペーンの一環として、クリーン形状模型を対象とした非定常PSP計測を行い、非定常PSP計測によって得られた時系列 C_p データや、それを用いた周波数解析の結果を紹介した。非定常PSPを用いることによって、定量的な C_p 値として現象を時間分解しての把握が可能となり、さらに周波数解析を施してのデータ処理にも対応可能である。離散的な非定常圧力センサでは把握できないような

狭い領域で発生する非定常現象に対しても漏らすことなく現象を把握できる。

詳細かつ大量の情報量を持つ非定常 PSP は現象理解と、非定常 CFD との相互比較の両面にわたって有用なツールとなることを確認した。

謝辞

本研究での TWT1 風洞試験に際しては、試験計画から準備、風洞運転、撤収にわたって JAXA 風洞センター遷音速風洞セクション諸氏の全面的な協力を頂いた。この場を借りて謝意を表する。

参考文献

- 1) 福島幸夫, 北間章司, 海老原正夫, 鈴木弘一, 伊藤徹, 木村康夫, H-II ロケット衛星フェアリング遷音速時変動圧力計測試験 (その1), 第30回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 252-253, 1986
- 2) 高間良樹, 今川健太郎, 加藤裕之, 中北和之, 西沢啓, 堤誠司, 橋本敦, 渡辺重哉, 松尾裕一, “ロケットフェアリング模型の遷音速風洞試験”, 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, 2B13, 2011.
- 3) 堤誠司, 高木亮治, 高間良樹, 今川健太郎, 加藤裕之, 中北和之, ロケットフェアリング流れにおける定常・非定常CFD解析の現状, 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム2011, 2B12, 2011.
- 4) 加藤裕之, 小池俊輔, 中北和之, 高間良樹, 今川健太郎, 鈴木幸一, 川端敏之, ロケットフェアリング模型の時系列PIV計測, 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム2011, 2B14, 2011.
- 5) J. H. Bell, E. T. Schairer, L. A. Hand and R. D. Mehta, “Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings”, “Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, 2001.
- 6) 中北, 栗田, 満尾, 渡辺, 真保, “国産小型航空機開発への感圧塗料技術の適用”, 平成16年度飛行機シンポジウム講演論文集, 1A1, 2004.
- 7) K. Nakakita, M. Kurita, K. Mitsuo and S. Watanabe, “Practical Pressure-Sensitive Paint Measurement System for Industrial Wind Tunnels at JAXA”, Meas. Sci. Technol. 17, 2005, pp. 359-366.
- 8) K. Asai, H. Kanda, C. T. Cunningham, R. Erausquin, and J. P. Sullivan, “Surface Pressure Measurement in a cryogenic wind tunnel by using luminescent coating,” International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities '97 Record, 1997, pp.105-114.
- 9) H. Sakaue, J. P. Sullivan, K. Asai, Y. Iijima, and T. Kunimasu, “Anodized Aluminum Pressure Sensitive Paint in a Cryogenic Wind Tunnel,” ISA Proceedings of the 45th International Instrum. Sym., 1999, pp. 345-354.
- 10) M. Kameda, T. Tabei, K. Nakakita, H. Sakaue and K. Asai, “Image measurements of unsteady pressure fluctuation by a pressure-sensitive coating on porous anodized aluminium,” Meas. Sci. Technol. Vol.16, No.12, 2005, pp.2517-2524.
- 11) K. Nakakita, J. Osawa, N. Hori, and M. Kameda, “Unsteady Pressure-Sensitive Paint Measurement for Oscillating Shock Wave in Supersonic Nozzle,” AIAA-2008-6580, 2008.
- 12) K. Nakakita and H. Arizono, “Visualization of Unsteady Pressure Behavior of Transonic Flutter Using Pressure-Sensitive Paint Measurement,” AIAA-2009-3847, 2009.
- 13) K. Nakakita, “Unsteady Pressure Measurement on NACA0012 Model Using Global Low-Speed Unsteady PSP Technique”, AIAA-2011-3901, 2011.
- 14) 中北和之, 低速非定常PSPによるNACA0012翼の非定常圧力分布計測, 第42回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム2010, 2C7, 2010.
- 15) K. Nakakita, “Scanning Unsteady PSP Technique for High-Frequency and Small-Pressure Fluctuation in Low-Speed”, AIAA-2010-4920, 2010.