

〔特集〕注目研究 in 年会 2013

飛翔する弾丸の表面圧力・温度分布計測

*電気通信大学 情報理工学研究科	山田 有希†
電気通信大学 情報理工学研究科	宮崎 武
科学警察研究所	石井 将人
宇宙航空研究開発機構	坂上 博隆

Pressure and Temperature Measurement of a Moving Bullet

Yuki YAMADA, University of Electro-Communications
 Takeshi MIYAZAKI, University of Electro-Communications
 Masato ISHII, National Research Institute of Police Science
 Hirotaka SAKAUE, Japan Aerospace Exploration Agency

1 序論

バリスティックレンジ試験は、自由飛翔する飛翔体の運動を理解することに大きな役割を果たす。バリスティックレンジ(図1)は物体を高速で射出する設備であり、衝突現象と高速空気学の基礎研究に使われる。風洞試験を行う際に用いられるスティングを使用せず、試験体を自由飛翔させるため、飛翔体から発生する衝撃波のみを計測できるという利点がある。しかし、時間とともに飛翔体の位置が変化するため、飛翔体表面の圧力・温度を計測することは非常に困難である^{1,2)}。自由飛翔体の表面圧力・温度分布は、飛翔体の運動を決定づける大きな要因となる。そのため、自由飛翔体の表面圧力・温度分布計測法の確立が望まれる。これらを計測することができれば、スポーツ流体といったより低速流体の分野にも適用することができる(図2)。

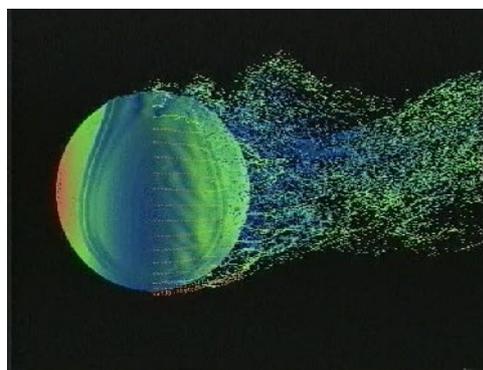


図2 スポーツ流体³⁾

自由飛翔体の表面圧力・温度分布を計測する方法として感圧塗料・感温塗料を用いた計測法に着目した。PSP/TSPは1980年代から航空宇宙分野で風洞試験技術として研究開発された、光化学的に表面圧力・温度分布を計測する技術である。非接触で定量的な計測が可能である。また、圧力孔やトランスデューサ、熱電対といった従来型の点計測とは異なり、高い空間分解能での圧力・温度計測が可能である。PSP/TSP計測は従来型の圧力センサーに必要であった圧力孔や複雑な配線を設ける必要がないため、試験体の製作コストの削減ができるだけでなく、その計測可能な対象モデルは圧力孔の設置が困難な薄い物体や細長い物体、さらにはファンなどの複数の表面を持つ物体にまで及ぶ。PSPは、その構成要素の一つである色素の発光が、酸素分子により消光(酸素消光)する光学的酸素センサーである⁴⁾。大気圧中の

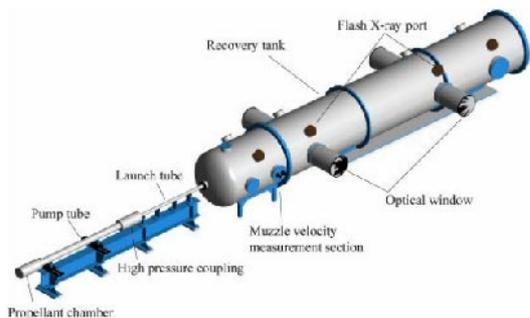


図1 バリスティックレンジ²⁾

*〒152-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1 E4-713

†E-mail: yuki@miyazaki.mce.ucc.ac.jp

酸素分圧は酸素濃度に関係づけられるため、その変化による色素の発光強度変化を捉える事により、圧力を測定することができる。また、TSPは、色素の発光が熱消光することによって温度と関連付けることができる⁴⁾。

PSP/TSP計測システムはPSP/TSPが塗布された試験体と画像計測系及び画像処理系から構成される(図3)。

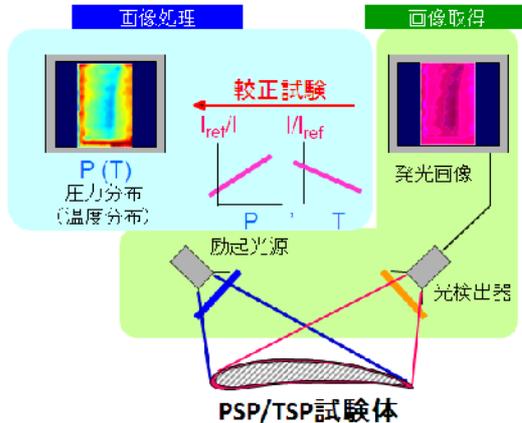


図3 PSP/TSP計測模式図

画像計測には励起光源、光検出器などが必要である。励起光源にはレーザー、キセノンランプ、LEDなどが使用される。発光を捉える検出器には、Charge-Coupled Device (CCD)カメラなどを用いる。また、励起光源による光と色素の発光を分離するために光学フィルターを使用する。計測手順はまず、PSP/TSPが塗布された試験体に励起光源から励起光を照射する。PSP/TSPの発光量変化をCCDカメラなどによって計測することで発光分布画像が得られる。圧力・温度と発光強度の校正試験から、発光画像を表面圧力分布に変換する事で圧力・温度計測が可能となる。

これまで、PSP/TSP計測は遷音速・超音速領域での定常現象における風洞計測技術として広く使用されてきた。しかし、それ以外の領域や非定常現象の計測では未だに学術レベルにとどまっている。ここで、PSP/TSP計測における非定常現象とは経時変化を伴った圧力変動を有する流体现象、経時変化による試験体位置移動・変形を伴った圧力変動を有する流体现象である。定常現象とはそれらが存在しない流体现象を指す。非定常現象に適用できない原因として、PSP/TSP自身の時間応答性、温度依存性、計測システムの限界が挙げられる。時間応答性の課題は、陽極酸化皮膜型PSP/TSP⁹⁾を用いることで解決を試みた。また、温度依存性、システムの限界の課題に関しては、モーションキャプチャーPSP法⁶⁾を用いることで解決を試みた。

本研究では、10 μ sオーダーの反応速度を持つ陽極酸化皮膜型PSP/TSPとモーションキャプチャーPSP法を組み合わせ、飛翔する弾丸形状モデルの表面圧力・温度分布を計測するためのシステムを構築した(3節参照)。この

システムを用いて弾丸モデルの表面圧力・温度分布を計測するために3つの課題があった。1つ目は、PSP/TSPをコーティングした弾丸モデルを画像として捉えることができるかである。弾丸モデルを捉えるために、十分な発光とブレが少ない画像を取得することが必要であった。2つ目は、発光画像から正確に圧力・温度分布情報に変換することが可能かである。PSP/TSPをコーティングした弾丸モデルは試験前と試験後では発光特性が変化してしまう。よって、発光画像を圧力・温度に変換するために試験前校正試験と試験後校正試験を行った。3つ目は、得られた圧力・温度値が正確な値であるかの検証である。ここでは、1つ目と2つ目の課題について報告する。

2 背景

2.1 定常現象に対する発光計測法：強度法

PSPの発光分布を計測する上で発光は圧力や酸素のみではなく、2つの要因によっても変化する。光学の設定による、励起光源・試験体間距離 C_{ill} 、試験体・光検出器間距離 C_{loc} である。PSP/TSP計測はPSP/TSPを塗装した試験体にキセノンランプなどの励起光を当てPSP/TSPを励起させる。励起されたPSP/TSPは流れにより圧力・温度分布が形成され、それにより発光強度が変化する。この発光分布画像を、CCDカメラなどを用いて計測する。この時の圧力・温度分布を伴う発光分布画像をシグナルとする。CCDカメラ内の受像部(CCD素子)は $m \times n$ (m, n は自然数)のピクセルから構成されており、その各ピクセルが光検出器の役割を果たす。その中で任意のピクセル(ij 成分)での発光強度 V_{ij} は以下のように表せる。

$$V_{ij} = g(C_{ill,ij}, C_{loc,ij}) \cdot I \quad (1)$$

g は $C_{ill,ij}$ 、 $C_{loc,ij}$ に依存する関数を表し、これらが影響することにより、PSP/TSP自体の発光強度 V_{ij} は実際の値よりも増加または減少する。関数 g をキャンセルするために流れを起こさない圧力一定の条件を用いる。この時の発光分布画像をリファレンスとする。PSP/TSP自体の発光強度は I_{ref} であるが、 ij 成分での発光強度 $V_{ref,ij}$ は関数 g により、

$$V_{ref,ij} = g(C_{ill,ij}, C_{loc,ij}) \cdot I_{ref} \quad (2)$$

となる。定常計測では $C_{ill,ij}$ 、 $C_{loc,ij}$ は一定である。式(1)、(2)より、

$$\frac{V_{ref,ij}}{V_{ij}} = \frac{I_{ref}}{I} = f(P) \quad (3)$$

と表せ、圧力・温度に対して独立な項をキャンセルすることができる。これは任意の ij 成分で圧力依存性のみの発光比が得られることを示す。

試験体位置が時間経過によって変化する場合、この方法では圧力・温度に対して独立の項をキャンセルすることができない。

$$\frac{V_{refij}}{V_{ij}} = \frac{g(C_{illu,ref}, C_{loc,ref}) \cdot I_{ref}}{g(C_{illu,ref}, C_{loc,ref}) \cdot I} \neq f(P) \quad (4)$$

このようなケースは、PSP/TSPが塗布された試験体が非定常運動している際にみられる。

2.2 非定常現象に対する発光計測法：モーションキャプチャーPSP法

時間により計測対象が変化する場合は C_{illu} , C_{loc} が時間変動する。これらをキャンセルすることが出来なければ非定常現象における試験体表面の圧力を計測することができない。これらを解決するために、以下の方法を述べる。

仮に圧力に依存しない発光を有する塗料があるとする。その発光は以下のように表せる。

$$I_{Rref} = I_R \quad (5)$$

シグナル画像、リファレンス画像が同時取得できれば、 C_{illu} , C_{loc} は同じ値を示す。これらの画像を用いて比をとることにより、 C_{illu} , C_{loc} は同じ値を示す。これらの画像を用いて比をとることにより、 C_{illu} , C_{loc} がキャンセルされ、非定常現象における圧力面計測を行うことが可能となる。ここで、シグナル画像の発光強度を V_S 、リファレンス画像の発光強度を V_R とすると、CCD 素子 ij 成分でのそれぞれの発光強度は、

$$V_{Sij} = g(C_{illu,t_n}, C_{loc,t_n}) \cdot I_S \quad (6)$$

$$V_{Rij} = g(C_{illu,t_n}, C_{loc,t_n}) \cdot I_R \quad (7)$$

となる。ここで、 V_{Sij} , V_{Rij} は時間 t_n における発光強度である。式(6), (7)の比より、

$$\frac{I_R}{I_S} = \frac{I_{Rref}}{I_{Sref}} \cdot f(P) = \alpha \cdot f(P) \quad (8)$$

となる(図4)。以上の結果から、 V_{Rij}/V_{Sij} は(3)式に定数 α ($=I_{Rref}/I_{Sref}$) を掛けた値に等しい。 $\alpha=1$ のとき、(8)式は(3)式と等しくなる。これは、 I_{sig} と I_{ref} が等しくなるように調整することで得られる。

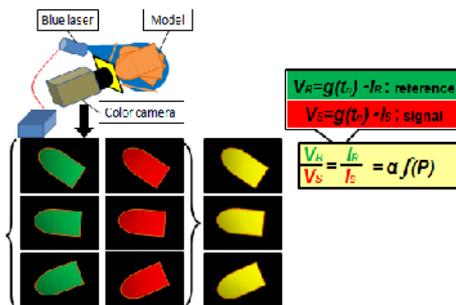


図4 モーションキャプチャーPSP法模式図

3 モーションキャプチャーPSPシステム

モーションキャプチャーPSPシステムは、モーションキャプチャーPSP法と陽極酸化皮膜型PSP/TSPを組み合わせたものである。このシステムは、2色発光AA-PSP/AA-TSP、励起光源、高速カラーカメラで構成される(図5)。

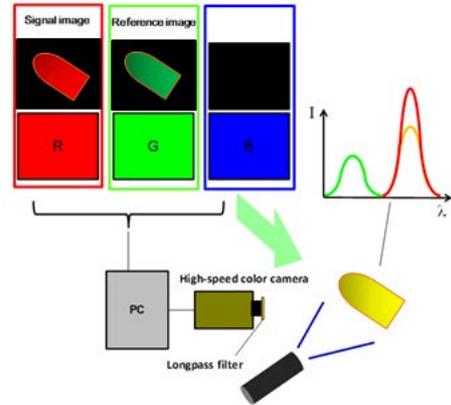


図5 モーションキャプチャーPSPシステム模式図

リファレンスとシグナルを同時に得るために、2色発光AA-PSPは波長成分で異なるピークを持つ。緑の発光はリファレンスであり、圧力変化に伴い発光強度が変化しない。反対に、赤の発光はシグナルであり、圧力に伴い発光強度が変化する(図6)。青は励起光源の色であるため使用しない。温度計測では、圧力感度を持つ色素を温度感度を持つ色素に変更する。

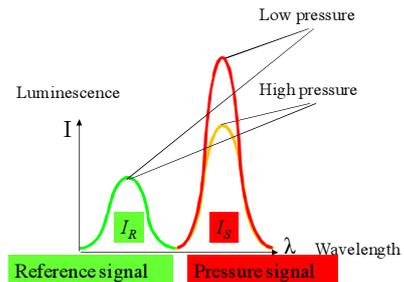


図6 理想的な2色発光PSP

PSP計測では、リファレンス色素としてフルオレセイン、シグナル色素としてルテニウムを使用した。TSP計測では、ルテニウムを感温色素であるローダミンBに変更した。

4 実験

4.1 実験設定

計測対象として、弾丸形状の飛翔体を選択した。弾丸形状の飛翔体を選択した理由として、遷音速領域から超音速領域で飛翔しているために圧力・温度変化が大きく、

複数回計測可能で、準備が容易だからである。

使用した装置は高速カラーカメラ (Nobby Tech. Ltd. Phantom V710), 青色レーザー (住友電工 BLM6000-H08D), IR ビーム&アコースティックトリガー装置 (Nobby Tech. Ltd.), ノート PC, 弾丸形状の飛翔体 (材料:A5052), 速度計測機である。試験を行った部屋の温度は 23.4°C であった。弾丸形状の飛翔体をもちいて 2 色発光 AA-PSP/AA-TSP を作製し, それを射出機で撃ちだした。射出機の銃身内を通過中に傷がつくことを防ぐため, 弾丸モデルをサボと呼ばれる器具で保護した。撃ちだした地点から 1.5m 先の地点にカメラとレーザーを同じ場所にセットし, 横から青レーザーを弾丸モデルに照射した。レーザーを使用して AA-PSP/AA-TSP を励起させ, その瞬間をカメラでとらえた(図 7)。カメラとレーザーは暗幕で囲い, 弾丸モデルのミスショットから保護した。弾丸モデルを捉えるために, 発射音をトリガーとして使用した。カメラのフレームレートは 40kHz に設定し, 露光時間は PSP 計測では 10 μ s, TSP 計測では 5 μ s とした。AA-PSP/AA-TSP を励起させるためのレーザーの波長(4556nm)を除去するためにバンドパスフィルタ(490nm~730nm)をカメラレンズ前面に取り付けた。レンズは焦点距離が 35mm, F 値は 1.4 として使用した。

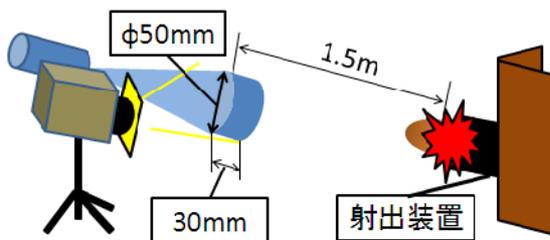


図 7 実験設定模式図

4.2 較正試験

較正試験は 2 色発光 AA-PSP/AA-TSP, 較正チャンバー, 励起光源, 高速カラーカメラを用いて行った(図 8)。励起光源の波長を除去するためにバンドパスフィルタ(490nm~730nm)を高速カラーカメラ前面に取り付けた。励起光源を用いて 2 色発光 AA-PSP/AA-TSP を励起させ, 圧力・温度を変化させてリファレンス画像とシグナル画像をそれぞれ高速カラーカメラを用いて取得した。圧力・温度に依存する画像を処理することで, 較正曲線が得られる。高速カラーカメラから得られた画像は赤, 緑, 青の画像に分けられる。赤の画像がシグナル, 緑の画像がリファレンスである。青の画像は青レーザーの色と重なるために使用しない。赤画像と緑画像の比をとることで, 圧力・温度依存の発光画像を得ることができる(図 9)。

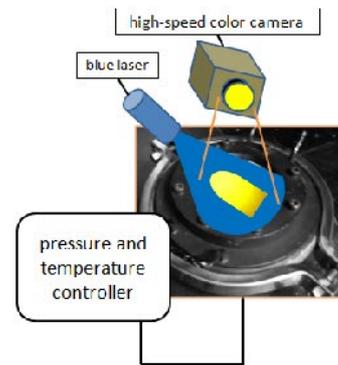


図 8 較正試験

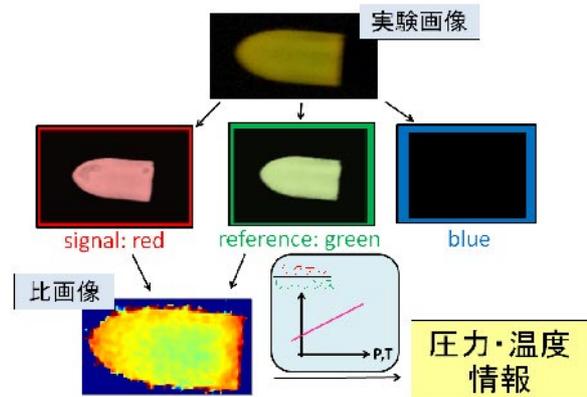


図 9 圧力・温度情報までの変換過程

4.3 実験結果

4.3.1 課題 1: 画像取得

試験から得られた画像から, 弾丸モデルに未燃焼火薬が付着してしまったり, 飛翔中の姿勢が乱れてしまうことが確認できた(図 10)。

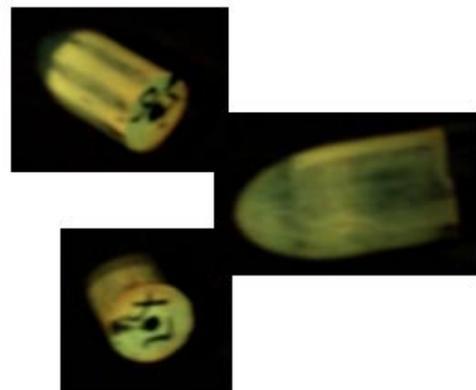


図 10 飛翔姿勢

図 11 に実験から得られた AA-PSP 弾丸の画像, 図 12 に実験から得られた AA-TSP 弾丸の画像を示す。励起範囲が限られていることやカメラのフレームレートにより, 得られた発光画像は 1 回の計測で 4~6 枚であった。この時, AA-PSP 弾丸は 285m/s で飛翔していた。発光の様子から, カメラの露光時間を 10 μ s に設定した。これにより, PSP 計測における画像のブレは, 飛翔方向に対

して 2.8mm であった。また、AA-TSP 弾丸は AA-PSP 弾丸に比べ発光が強かったため、露光時間を 5 μ s に設定した。この時の速度は 378m/s であった。これにより、TSP 計測における画像のブレは、飛翔方向に対して 1.9mm であった。以上の結果から、我々は弾丸モデルの発光画像を取得することができた。しかし、圧力計測においては発光強度が小さく、較正試験結果を用いて圧力に変換することができなかつた。そのため、次節に述べる圧力・温度情報抽出の課題に関しては、温度計測結果を用いて議論する。



図 11 圧力計測における発光画像

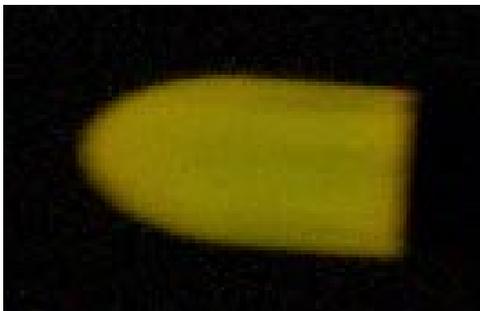


図 12 温度計測における発光画像

4.3.2 課題 2：温度情報抽出

図 13 に示した画像は、試験前（左）と試験後（右）における弾丸モデルの比の画像である。試験後の弾丸モデル表面に傷が付いているのが分かる。比の画像は温度独立の発光がキャンセルされるはずであるため、この傷が付いている部分の発光特性はほかの領域と異なっていることが考えられる。また、この結果は、発光画像を温度と関連付ける際、試験後における弾丸モデルの較正試験結果を使用すべきであることを示している。

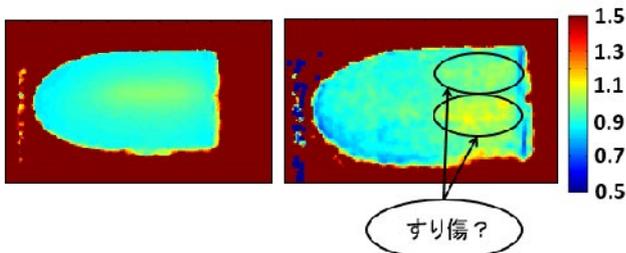


図 13 実験前（左）と実験後（右）における発光強度比

以上から、我々は弾丸モデル表面を 15 分割して較正試験を行い、それぞれの較正曲線を得た。その結果を温度情報を得るため、比の画像に適用した。一つの温度較正試験の結果を示す(図 14)。温度感度は 0.2%/ $^{\circ}$ C であった。図 15 に、分割較正試験によって得られた温度分布画像を示す。

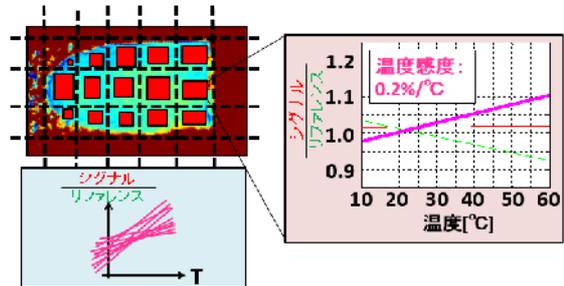


図 14 1ヶ所の較正試験結果

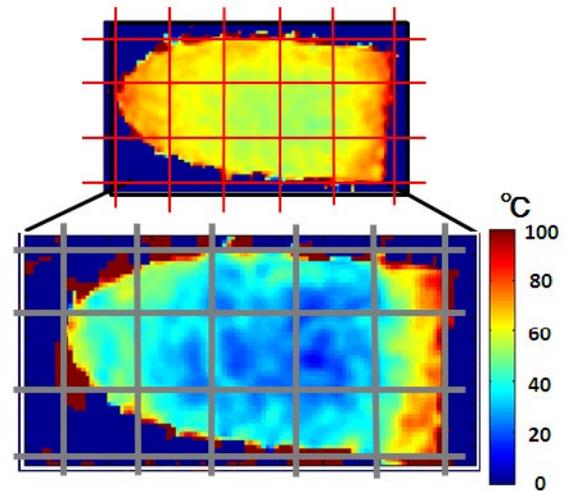


図 15 分割較正試験結果を適用した温度分布画像

比の画像に対し、分割して較正試験を行った結果をそれぞれ適用することで温度分布が得られた。また、弾丸モデルの先端部から後部にかけての表面温度分布をグラフに示した(図 16)。グラフに生じている急な山形は分割較正試験を行ったことにより生じていると考えられる。このとき、弾丸は 378m/s で飛翔していた。この値から、弾丸のよどみ点温度を計算したところ、60 $^{\circ}$ C となった。カメラの露光時間により、弾丸の先端部や後部はブレの影響を受けている。そのため、温度が過剰に計算されていることが考えられる。先端部に近づくにつれて温度が上昇している様子を見て取ることができる。

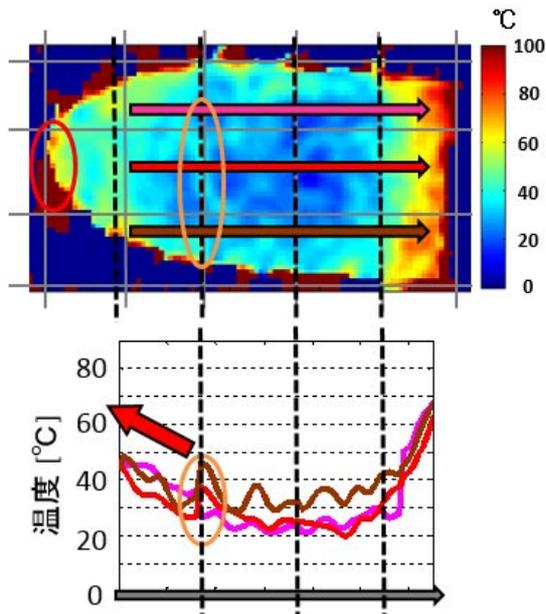


図 16 矢印に沿った表面温度分布

もう一つの TSP 計測試験結果を示す(図 17)。この時、弾丸モデルは 392m/s で飛翔していた。この速度から、淀み点温度の理論値を計算したところ、62°C となった。この試験結果から弾丸の先端部や後部で温度が過剰に計算されていることが分かる。前述の計測結果と同様に、先端部に近づくにつれて温度が上昇していることが分かる。

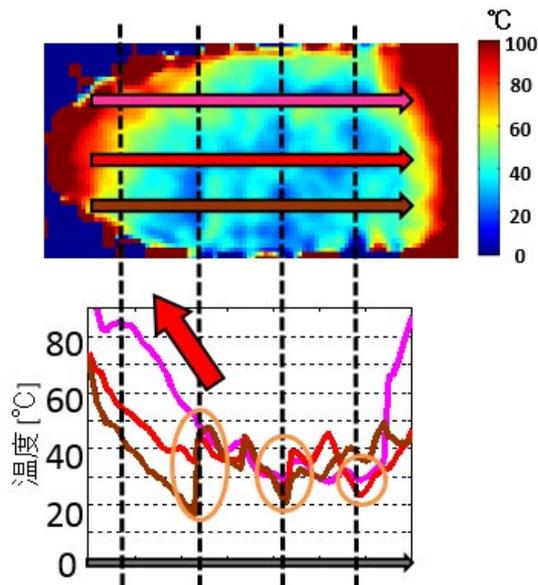


図 17 矢印に沿った表面温度分布

5 結言

本研究は、モーションキャプチャーPSP法と陽極酸化皮膜型PSP/TSPを組み合わせて、バリスティックレンジ試験のための発光計測システムを構築し、自由飛翔体の

表面圧力・温度分布計測を試みた。自由飛翔体として弾丸形状モデルを選択し、模擬バリスティックレンジ試験を行った。本計測システムを用いて自由飛翔体の表面圧力・温度分布を計測するために、3つの課題があった。1つ目は、超音速域で飛翔する弾丸の発光計測ができるかである。弾丸モデルは励起範囲を0.1msで通過していた。我々は、カメラのフレームレートを40kHz、露光時間を5 μ sに設定することで、発光画像を計測することができた。2つ目の課題は、発光画像を圧力・温度分布画像に変換することである。そのためには、試験後の弾丸を用いて、分割校正試験を行うことが必要であった。この方法により、温度分布画像を取得することができた。今後は、3つ目の課題である計測精度の検証を行うために、画像取得システムのさらなる改善に取り組むことが必要であると考えている。

本研究を行うに当たり、多くの方々にお世話になりました。多くの助言をしてくださったJAXAの飯島由美氏、守田克彰氏、実験装置を貸してくださったJAXAの中北和之氏、中島努氏、Nobby Tech.の菌部広氏、ここに感謝するとともに、お礼申し上げます。

引用文献

- 1) 豊田篤, 大久保正幸, 大林茂, 清水克也, 佐宗章弘: バリスティックレンジを用いた超音速複葉翼低ブーム特性の検証実験, 第41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 2009 論文集, (2009) p.71.
- 2) 大林茂, 大谷清伸, 菊池宗将, 小川俊広, 鶴飼孝博: バリスティックレンジ装置について, L15 東北大学流体力学研究所, (2010) p.1.
- 3) <https://nikkeibook.com/science/cvc/CVC6/6-AVS.html>
- 4) Liu, T., Sullivan, J. P.: *Pressure and Temperature Sensitive Paints*, (Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 2004) p.24.
- 5) Sakaue, H.: *Review of Scientific Instrument*, 76 (2005) 084101.
- 6) Sakaue, H., Miyamoto, K., Miyazaki, T.: *Journal of Applied Physics*, 113 (2013) 084901.