

2C06 塗装型 AA-PSP を用いた超音速衝撃波の通過に伴う 物体上の非定常圧力場計測

○川島健, 川又有真, 沼田大樹 (東海大学), 大谷清伸 (東北大学流体科学研究所)

Unsteady Pressure Field Measurement on a Test Model During the Passage
of a Supersonic Shock Wave Using Dye-Painted AA-PSP

Key Words : Pressure Distribution, Shock Wave, Flow Measurement

Abstract

In this study, we present a discussion of the results obtained from the visualization and measurement of the interaction phenomena between shock waves and structures using DP-AA-PSP (Dye-Painted Anodized-Aluminum PSP, DP-AA-PSP), as part of the establishment of a blast pressure measurement methodology employing PSP aimed at mitigating the risk of blast injuries. A comparison between the measurements obtained using DP-AA-PSP and those from unsteady pressure sensors demonstrated that PSP enables both quantitative and qualitative evaluation of the interaction phenomena between shock waves or blast waves and objects. Furthermore, the results indicate that because the phenomena significantly vary depending on the angle of incidence of the wavefront during the interaction between the object and the shock or blast wave, surface measurements of the unsteady pressure field using PSP have the potential to serve as an effective means for investigating various blast-related phenomena.

1. 緒論

爆風（衝撃波圧力）の作用による建築構造物や人体への影響評価は、衝撃波による人的被害（爆傷）の低減に密接に関連し、建築・土木工学をはじめとする工学分野だけではなく、衝撃波医療応用分野において重要な研究課題である^{1)~3)}。爆風は Hopkinson-Cranz のスケール則と呼ばれる、爆薬の種類、質量、起爆点からの距離に依存する相似則が成り立つことが知られており^{4),5)}、このスケール則から得られる換算距離 Z より、到達する衝撃波の衝撃波過剰圧 ΔP 、インパルス I 等の値を推算することができる。しかしながら、このスケール則は、起爆点と計測位置までの間において一次元的に成り立つものであることに注意が必要となる。実際の状況においては、爆風の影響評価を行う対象物体以外にも近くに構造物がある場合がほとんどであり、これら周囲物体と爆風が干渉することによる、いわゆる衝撃波干渉によって変化した圧力変動が対象物体に作用することになるため、単純なスケール則のみでは爆風の影響を評価することは困難である。衝撃波干渉現象においては、衝撃波の反射、回折現象によって衝撃波圧力が上昇あるいは低下する。そのため、複数の構造物が近くにある場合には、対象物は非常に複雑な衝撃波干渉現象に晒され、物体への衝撃波作用の影響評価は単純ではない。物体への衝撃波干渉の影響評価においては、従来よ

り非定常圧力センサが用いられてきた。しかしながら、一般にそれらセンサは設置点のみの圧力を測ることしかできず、上述の、非常に複雑な圧力場が想定される研究対象に対しては、その適用には限界があった。そのような中、近年感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP)⁶⁾ を用いた非定常圧力場の評価が注目を集めている。PSP は塗布面すべてが圧力センサとして機能する圧力の面計測手法の一種であり、従来までの非定常圧力センサに変わり様々な研究へ適用されている、また、PSP の中で、非常に高い時間応答特性を有する PSP として、スプレーガンを用いて陽極酸化皮膜に感圧色素を塗装する、色素塗装型陽極酸化皮膜型 PSP (Dye-Painted Anodized-Aluminum PSP, DP-AA-PSP) が近年開発された^{7)~10)}。DP-AA-PSP は、従来までの AA-PSP のディッピングプロセスをスプレーガンを用いた色素塗装プロセスに置き換えたものである。本手法を用いることで、時間応答特性がナノ秒に迫る AA-PSP の作成も可能となっており、現在爆発現象に対する応用を進めている。

本研究では、爆傷のリスクを回避することを目的とした、PSP による爆風圧計測研究手法の確立を目指す一環として、構造物と衝撃波の干渉現象を DP-AA-PSP を用いて可視化計測した結果について報告する。

2. 実験装置

2. 1 自動塗装装置

Fig.1 に東海大学沼田研究室で開発された自動塗装装置の模式図を示す. 本装置は, 装置ブース内においてスプレーガンを任意の条件のもとで動作させることが可能な装置である. 塗装作業中のスプレーガンの移動は事前にプログラムした条件に則り全て自動で行われるため, 均一な塗膜形成や色素吸着量の厳密な制御などが可能である. また, 個々の塗装の技量に起因する再現性の問題や, 塗装距離や塗装条件などの差によって生じるサンプル特性の差異等, 手動塗装を行う上では避けられない各種の塗装上の課題を解消可能である.

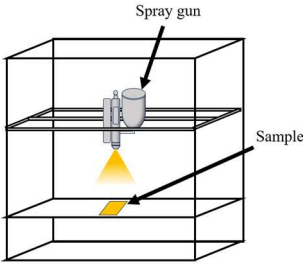


Fig. 1 Schematic diagram of an Automatic painting system at Tokai University

2. 3 無隔膜衝撃波管

Fig.2 に, 本研究で用いた 60 mm × 150 mm 断面無隔膜衝撃波管の概要図を示す. 本装置は低圧室, 高圧室, 補助高圧室, 減圧室, 急速開口弁及び試験部から構成される. 本装置は, 低圧室と高圧室との間にゴム膜を, 補助高圧室と減圧室の間にマイラー膜を設置する構造となっている. 駆動時には, まず, 補助高圧室を加圧し, ゴム膜を低圧室側へ変形させることで低圧室と高圧室を物理的に遮断する. 続いて, 低圧室および高圧室を所定の圧力に調圧し, 減圧室を減圧することによりマイラー膜を破断させ, 補助高圧室を瞬間的に減圧する. これによりゴム膜によって隔てられていた低圧室と高圧室が瞬時に一体化し, 低圧室側に衝撃波が発生する. 無隔膜方式では, 隔膜の破膜の状態が衝撃波の形成過程に影響を与えないため, 試験毎の衝撃波マッハ数の再現性が高い. 本衝撃波管も, ショットごとのマッハ数の再現性は極めて高い.

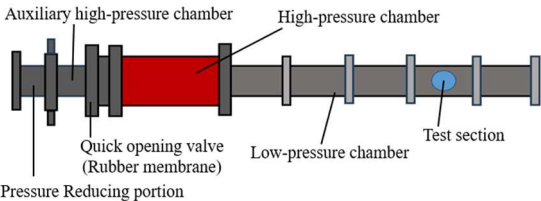


Fig.2 Schematic diagram of the diaphragm-less shock tube at Tokai University

3. 実験手法および実験条件

3. 1 陽極酸化皮膜の作成

本研究では, DP-AA-PSP のベースとしてリン酸型の陽極酸化皮膜を用いた. サンプル試験片は A1050 材を用いており, この板に対して前処理, 陽極酸化, 後処理を順に行いサンプルを作成した. 前処理では, プロパノールを用いて表面を脱脂後, 2 [wt%] の水酸化ナトリウム水溶液を用いて 超音波洗浄を行い, 陽極酸化は 0.3 [mol/L]のリン酸水溶液を用いて陽極酸化を行った. 陽極酸化条件は Table.1 に示している. 後処理は 1 [mol/L]のリン酸水溶液に 90 分浸漬させ, 一定時間ごとに超音波洗浄を行った.

Table 1 Anodizing Condition

Sample material	Aluminum (A1050)
Electrolyte	Phosphoric acid (0.3mol/L)
Current density [mA/cm ²]	3.5
Anodizing time [min]	240
Electrolyte temp. [deg C]	10

3. 2 陽極酸化皮膜に対する色素塗装条件

本研究では, 3. 1 の陽極酸化条件で作成した陽極酸化皮膜に対して, 2. 1 で述べた自動塗装装置を用いて塗装を行った. サンプルからスプレーガンノズル先端までの塗装距離は 3 [cm] であり, 色素溶液の塗装回数は 10 回である. 本研究で用いた感圧色素はピレンスルホン酸 (PSA, CAS No. 26651-23-0, Frinton Laboratories) であり, 色素溶媒としてはアセトンを用いた. 色素溶液の配合比は, 溶媒 10 [ml] に対して色素 1 [mg] である. なお, 今回の塗装条件で得られる DP-AA-PSP の 90% 立ち上がり時間は概ね 0.63 [μs] である. 圧力感度については大気圧で 0.31 [%/kPa] となる. また, 温度感度は 20 [deg C] で -0.12 [%/K] である.

3. 3 可視化試験セットアップ

本研究で用いた衝撃波可視化計測系を Fig.3 に示す.

本研究では, 衝撃波管試験部に PSP 板を張り付けた角柱 (長さ 50 mm, 正方形断面 (30 mm × 30 mm)) を固定した. 角柱前部には圧力センサ (Kislter 603B, KISTLER JAPAN Co.) を設置し, PSP 計測と同時計測を行った.

可視化光学系については, Photron 社の高速度ビデオカメラ FASTCAM Nova S16 を用いて, 角柱を衝撃波管上流方向かつ角柱下方から撮影した. また, 光源としてはキセノンフラッシュ光源 (SA-200F, 日進電子工業株式会社) を用いて おり, インダクターボックス (KB-5L(SA), 日進電子工業株式会社)

に接続することで発光持続時間が長くなるようにした。計測時には、カメラ側にはロングパスフィルタとショートパスフィルタを組み合わせることで、450 nm から 600 nm までの発光のみを検出できるようにした。光源には中心波長 340 nm のバンドパスフィルタを取り付けており、キセノン光の中の UV 成分のみを励起光として用いている。

実験の際には、衝撃波が試験部上流に設置された圧力センサを通過する際に検出される圧力の立ち上がりトリガーとして用いており、このトリガー信号に連動して可視化光学系が適切なタイミングで計測を開始するよう遅延回路を用いてタイミングを調整している。

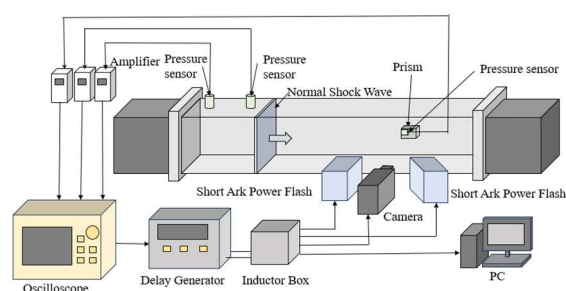


Fig.3 Schematic diagram of the measurement system for shock wave visualization tests

3. 4 可視化試験および解析条件

本研究で行った衝撃波可視化試験の試験部内圧力は 100 kPa であり、衝撃波マッハ数は 1.20 である。高速度カメラの露光時間は 2.0 μ s、フレームレートは 100,000 fps で試験を行った。

4. 実験結果および考察

Fig. 4 に、衝撃波が角柱前面に対して衝突した瞬間における時系列的な圧力場の可視化結果を示す。画像は 20 μ s 間隔で示しており、140 μ s までを示している。また、衝撃波進行方向は図の左から右側である。なお、可視化結果は角柱模型の天板側から覗いた形となっており、画像奥側が床に相当する。

図より、衝撃波の衝突に伴い物体上に発生する非定常圧力場が明瞭に可視化できていることがわかる。衝撃波の衝突に伴い角柱表面には瞬間的に高圧が発生したが、これは入射衝撃波が角柱前面部にて反射した際の反射衝撃波背後の高圧である。角柱正面部において、衝撃波入射方向から眺めて右上部の圧力が周囲と比べてやや低いが、これは垂直衝撃波と角柱の衝突面が完全には平行ではなかったことが原因であると考えられる。また、角柱正面部の四隅は中央部分に比べやや圧力が低いが、これは角部の影響が出たために面中央部に比べ周囲部の方が圧力が低下

したためであると考えられる。衝撃波現象の進展に伴い衝撃波は下流側に伝播していくが、その際に角柱側面に生じる圧力場の圧力値は $Ms=1.2$ の衝撃波背後に想定される圧力場とほぼ一致しており、側面部の圧力場は入射衝撃波背後の圧力場に由来した圧力値を示していることがわかる。なお、角柱において入射衝撃波が通過した角部においては流体剥離に由来する低圧部が形成されていることもわかり、ある一定距離低圧部が存在した後に垂直衝撃波背後の圧力まで圧力上昇する。剥離は角部を持つすべての面において等しく発生している。剥離領域は衝撃波通過に伴いその範囲が拡大しているが、ある一定の長さで成長は止まり、周囲圧力と同化していく。

角柱はすべての角部で圧力が低下しており、角部の影響は角柱上の圧力場に大きな影響を及ぼすことが分かった。また、Fig.4 (b) の角柱正面部の圧力場の不均一性はその後の角柱上の圧力場の対称性にも影響を及ぼしており、衝撃波の物体入射時の角度や、ブラスト波のような球状衝撃波の入射などの際には、衝撃波入射角が物体上の圧力場形成に大きな影響を与えることも確認された。

Fig.5 に、衝撃波衝突直後における非定常圧力センサと PSP から求めた圧力との比較を示す。なお、PSP の圧力計測位置は非定常圧力センサに接する位置とし、非定常圧力センサと同一の面積に相当する領域を平均化して圧力として表示している。縦軸は圧力 [kPa] であり、横軸は時間 [μ s] である。

図より、定性的に見ると両者の結果は概ね一致しており、DP-AA-PSP を用いた衝撃波面の圧力計測が問題なく実施できたことを示している。PSP では衝突直後の急峻な圧力上昇を正確には再現できていないが、これは本研究での可視化条件において、露光時間を 2 μ s に設定したのが原因であり、より短時間露光計測を行えば捉えることが可能であると考えられる。定量的に見ると、両者に 10 kPa 弱の差がみられるが、これは非定常圧力センサによる圧力計測位置と DP-AA-PSP による圧力計測位置に差異があることが原因である。Fig.4 の考察の際にも述べたが、角柱正面に対して垂直衝撃波は完全に正面衝突した形とはなっておらず、また角部の影響もあり、衝撃波衝突時の角柱正面部の面内圧力分布は中央部に近づくほど高圧になるという状況であった。そのため、その影響が 10 kPa の差となり生じたと考えられる。そのため、非定常圧力センサとの比較から、PSP による衝撃波可視化計測結果は、定性的・定量的に妥当な結果が得られたものと考えられる。

5. 結論

本研究では、爆傷のリスクを回避することを目的とした、PSPによる爆風圧計測研究手法の確立を目指す一環として、構造物と衝撃波の干渉現象をDP-AA-PSPを用いて可視化計測した結果について考察を行った。

DP-AA-PSPの計測結果と非定常圧力センサの計測結果との比較から、PSPを用いた衝撃波もしくは爆風と物体との干渉現象について、定量的・定性的にも妥当な評価が行えることが示された。また、物体と衝撃波・ブラスト波の干渉時には波面入射角に応じて現象が大きく変化するため、PSPによる非定常圧力場の面計測が、各種の爆風関連現象の研究に有効な手段となりうる可能性を示すことが出来た。

今後は、大気圧条件下において衝撃波と物体の干渉現象の研究に対してより短時間露光条件下でPSPを適用し、かつ様々な物体・現象に対するPSPの適用性評価も実施予定であり、爆風関連研究に対するPSP計測の有効性の実証を進めていく。

謝辞

本研究はJSPS 科研費（JP24K07299）の助成を受けて実施された。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kazuyoshi Takayama and Tsutomu Saito, SHOCK WAVE/GEOPHYSICAL AND MEDICAL APPLICATIONS, Annu. Rev. Fluid Mech., 36, 347-379 (2004).
- 2) Atsuhiko Nakagawa, Geoffrey T Manley, Alisa D Gean, Kiyonobu Ohtani, Rocco Armonda, Akira Tsukamoto, Hiroaki Yamamoto, Kazuyoshi Takayama, Teiji Tominaga, Mechanisms of primary blast-induced traumatic brain injury: insights from shock-wave research, J. Neurotrauma, 28(6), 1101-1119 (2011).
- 3) A. Nakagawa, K. Ohtani, R. Armonda, H. Tomita, A. Sakuma, S. Mugikura, K. Takayama, S. Kushimoto, T. Tominaga, Primary blast-induced traumatic brain injury: lessons from lithotripsy, Shock Waves, 27, 863-878 (2017).
- 4) B. Hopkinson, British Ordnance Board Minutes, Report 13565 (1915).
- 5) C. Cranz, Lehrbuch der Ballistik, Springer-Verlag, Berlin (1926).
- 6) T. Liu, J. P. Sullivan and K. Asai, Pressure and Temperature Sensitive Paint, Second Edition, Springer (2021)
- 7) 川又有真, 川島健, 沼田大樹, 自動塗装装置を用いて色素吸着した陽極酸化皮膜型感圧塗料の開

発, 2023 年度衝撃波シンポジウム 講演論文集 (2024)

- 8) 川島健, 川又有真, 沼田大樹, 高速非定常衝撃波計測への適用に向けた色素塗装型 AA-PSP の開発, 第 56 回流体力学講演会 講演論文集 (2024)
- 9) 川又有真, 川島健, 高田拓門, 沼田大樹, 塗装型 AA-PSP の特性に及ぼす塗装パラメータの影響, 第 52 回可視化情報シンポジウム 講演論文集 (2024)
- 10) Y. Kawamata, T. Kawashima, D. Numata, Effect of Spray Coating Parameters on the Characteristics of Dye-Painted Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paint, Proc. of the 2025 AIAA Scitech Forum, AIAA 2025-1062 (2025)

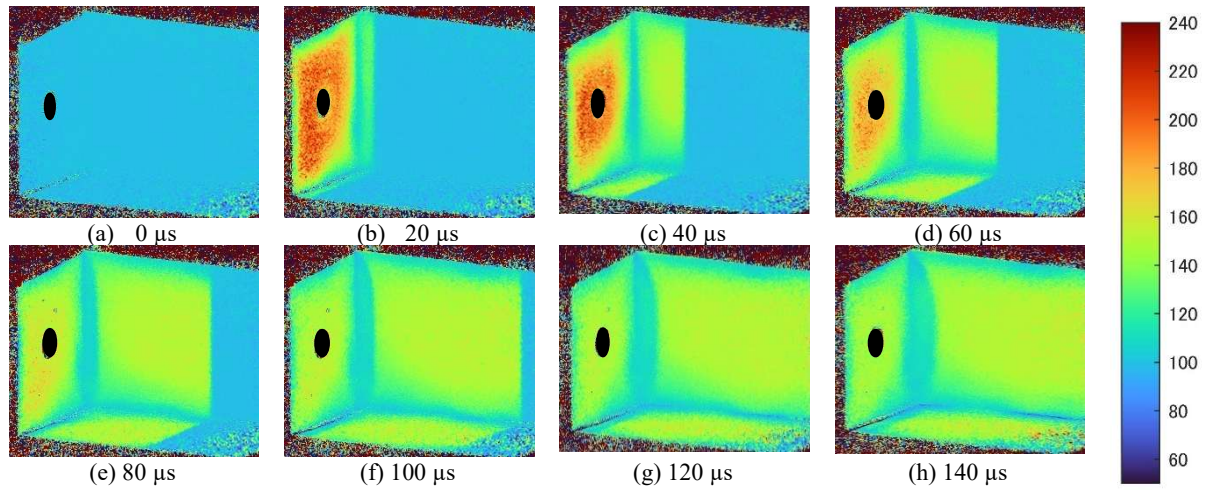


Fig. 4 Visualization of the evolution of the unsteady pressure field over a square prism induced by normal shock wave impingement ($Ms = 1.20$, image interval: 20 [μs])

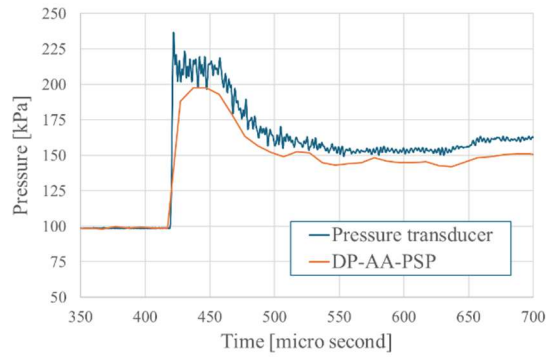


Fig. 5 Comparison of pressure measurements between an unsteady pressure transducer and PSP in the early stage following shock wave impingement