

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760761

研究課題名（和文） 超音速波動伝播を捉える革新的超高速応答型感圧塗料技術の基盤確立

研究課題名（英文） Development of Ultrafast Response Pressure-Sensitive Paints for Visualization of Shock Wave Phenomena

研究代表者

沼田 大樹（NUMATA DAIJU）

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20551534

研究成果の概要（和文）：本研究では、リン酸電解液を用いた陽極酸化皮膜型感圧塗料(AA-PSP)の作成条件を最適化することにより、PBAを感圧色素として用いたAA-PSPで時定数0.35 μ s、90パーセント立ち上がり時間0.81 μ sという、従来までに報告されていた感圧塗料(PSP)の時間応答性を大幅に上回る性能を持つ「超高速応答型感圧塗料」の開発に成功した。また、このPSPを用いて衝撃波反射・回折現象を鮮明に捉えることにも成功し、超高速応答型感圧塗料を用いた非定常高速変動圧力場を面計測可能であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop ultrafast-response Pressure-Sensitive Paint (PSP) with the response time less than 1 μ s for visualization of shock-wave phenomena. In order to apply PSP to unsteady shock-wave phenomena, Anodized-Aluminum PSP (AA-PSP) with ultrafast response was fabricated and its response time to a step pressure change was evaluated by using a shock tube. To fabricate AA-PSP with ultrafast response, we selected phosphoric acid electrolyte and changed electrolyte temperature in a systematic manner. The improved AA-PSP achieved a response with the time constant of 0.35 μ s. This is the fastest PSP ever reported. We applied this AA-PSP to interactions of a moving shock wave with a circular cylinder. The results show that the improved AA-PSP can visualize the shock reflections and the shock diffractions with the ever-highest spatial and temporal resolution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学

1. 研究開始当初の背景

火山噴火に代表される爆発現象を伴う自然災害、またはロケットや爆薬貯蔵庫の爆発事故で生じる爆風、いわゆるブラスト波の通過に伴い構造物が受ける経時的な荷重の正確な評価は必須の研究事項である。これは、爆風災害での被害予測や爆発事故に備えた建造物の耐荷重性能の推算時に爆発荷重のデータが大きな割合を占めるためである。災

害被害対策は「安全性」と「経済性」の両面から迫られるため、爆発荷重の推算はより正確である必要がある。しかしながら、ブラスト波は空気中を音速以上の速度で伝搬する圧縮波（衝撃波）及びその背後に形成される負圧領域からなるため、物体表面にはその通過時に高速で変動する非定常圧力場が生じる。この非定常圧力変動を時系列的かつ高精度で評価できる圧力計測手法の開発は、爆風

災害予測に加え非定常現象全般の理解の上で核心となる部分であり、そのニーズは極めて高いといえる。

上述した目的のもと、極めて高速で変動する圧力場の計測には、従来非定常圧力センサによる離散点計測が行われてきた。しかしながら、ブラスト波が物体表面に与える力の正確な把握には離散的なデータのみでは不十分で、物体表面の圧力分布を「点」ではなく「面」で捉える必要がある。これを実現する計測手法の一つとして、機能的分子センサの一種である感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, 以下 PSP) を用いた計測手法がある。PSP は色素一つ一つがセンサの役割を果たしており、計測対象表面の二次元圧力分布を高分解能かつ非接触で計測可能という大きな利点を有する。しかしながら、PSP を高速非定常現象のような高速変動する圧力場に適用する場合は、多くの解決すべき課題が存在する。その一つが、PSP の時間応答性の問題である。現象の変動速度に対して PSP の応答時間が十分に速くなければ、PSP の発光が現象に追従することが難しくなり、衝撃波面等の急激に圧力が変動する領域は計測画像上で不鮮明になる。実際、過去に同様の目的で用いられた PSP の応答時間は高々 $0(10 \mu\text{s})$ であり、超音速で圧力場が変動するような非定常現象においては未だ不十分な水準であると言える。非定常衝撃波現象に誘起される圧力場をより詳細に計測するためには、 $0(1 \mu\text{s})$ もしくはそれ以下の応答時間を有する PSP の開発が要求される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、現時点で最も応答性の優れた陽極酸化皮膜型感圧塗料 (AA-PSP) をさらに改良することで、 $0(1 \mu\text{s})$ 以下の応答時間を有する“超高速応答型感圧塗料”を開発することを目的とする。まず、AA-PSP の応答性を決定する大きな要因である陽極酸化アルミ皮膜の細孔径の拡大を試み、 100 nm を越える細孔径を有する陽極酸化アルミ皮膜の作製を目指す。次に、作製した AA-PSP の時間応答性を評価するために、衝撃波管を用いたステップ応答性試験を行うここでは、細孔深さの異なる AA-PSP を作製し、細孔深さと応答性の関係及び開発した AA-PSP の応答性の限界を調べた。最後に、開発した AA-PSP の非定常衝撃波試験における有効性を実証するため、超高速応答型感圧塗料を円柱周りの衝撃波の反射、回折現象へと適用する。

3. 研究の方法

本研究では、主に(1)陽極酸化皮膜の作成条件の最適化及びその応答性評価、及び(2)衝撃波の反射・回折現象への超高速応答型感

圧塗料の適用による有効性の実証、という2つのパートに分かれる。

(1) 陽極酸化皮膜の作成条件の最適化及びその応答性評価

理論解析や過去の実験的研究により、AA-PSP の応答性は色素の発光寿命とバインダ内の酸素拡散時間に依存することが示されている。色素の発光寿命は蛍光色素を用いることで $0(10 \text{ ns})$ とすることが可能であり、その場合の応答時間の支配要因は一般的に酸素拡散時間となる。バインダ内酸素拡散時間は陽極酸化アルミ皮膜のポーラス構造に依存し、AA-PSP の応答性改善のためには、細孔径がより大きく、細孔深さがより小さいポーラス構造を得る必要がある。そこで本研究では、AA-PSP の時間応答性の改善について、特に細孔径の拡大の観点から取り組む。従来までに報告され達成された細孔径である 100 nm よりも大きい細孔径を有する陽極酸化アルミ皮膜を得ることを目的とし、リン酸電解液を用いた陽極酸化について、細孔径の大きな皮膜を得られる陽極酸化条件の確立を目指した。特に皮膜作製における重要なパラメータの一つである電解液温度が皮膜のポーラス構造に与える影響を調べた。

作成した AA-PSP の応答時間は図 1 に示す衝撃波管を用いて評価した。応答性評価は衝撃波通過時における AA-PSP の発光量変化をイメージインテンシファイアを取り付けた CCD カメラを用いて撮影し、その撮影画像から時間応答曲線を算出して行った。



図 1 衝撃波管

(2) 衝撃波の反射・回折現象への超高速応答型感圧塗料の適用による有効性の実証

前項で作成した AA-PSP サンプルについて、その有効性を検証することを目的とし、衝撃波通過中の円柱周りの高速非定常圧力変動場への適用を行った。また、希硫酸電解液を用いた比較的応答時間の遅い AA-PSP ($0(10 \mu\text{s})$) を作製して同様の試験を行い、応答性の違いが可視化結果に与える影響を調べた。

4. 研究成果

(1) 陽極酸化皮膜の作成条件の最適化

リン酸電解液を用いた陽極酸化アルミ皮膜の作製において、細孔構造が電解液温度に大きく依存することが分かり、電解液温度が重要なパラメータとなることを明らかにした。

細孔径に着目すると、電解液温度 5 deg C で作製した場合の細孔径が約 100 nm であるのに対し、電解液温度の高い場合に細孔径は約 200 nm となった。皮膜上の多孔度も細孔径の増加と共に大きくなることがわかった。しかしながら、電解液 60 deg C の場合には細孔構造が形成されず、リン酸電解液を用いた陽極酸化では電解液温度に最適値が存在することがわかった。また、本研究で実現された細孔径 200 nm は、図 2 に示すように、希硫酸を電解液として用いた場合に陽極酸化皮膜上に形成される細孔径を大幅に上回る径である。

これら一連の陽極酸化条件の最適化により、AA-PSP の応答性を大幅に改善可能な陽極酸化皮膜の作成が可能となった。

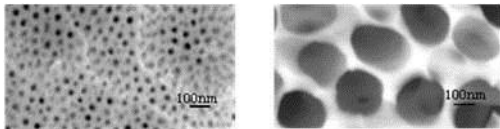


図 2 希硫酸を用いた陽極酸化皮膜(左)とリン酸を用いた陽極酸化皮膜(右)の SEM 画像

(2) 作成した AA-PSP の応答性評価

前項で確立したリン酸電解液を用いた AA-PSP の皮膜作成手法を用いて、AA-PSP の皮膜構造を最適化し、従来までに知られているものよりもはるかに速い時定数を持つ AA-PSP を達成した。

衝撃波がサンプル上を通過した際における AA-PSP サンプル上に生じる非定常圧力分布の一例を図 3 に示す。この時、衝撃波は図の左から右の方向に対して移動しており、画像は事前に較正した結果を用いて圧力値に変換している。図より、今回作成した AA-PSP は、衝撃波通過時の急峻な圧力上昇を鮮明に捉えていることがわかる。また、これらの結果から露光時間の影響を排除したうえで時間応答曲線を作成し、応答の時定数を算出した結果を図 4 に示す。図は、細孔直径を 160 nm に固定した条件で、細孔深さを変更した場合の AA-PSP の時定数を示している。図より、本研究で作成した AA-PSP は、細孔深さの減少に伴い時定数が小さくなっているのがわかる。また、最も小さい時定数として、0.36 μ s を得た。これは、90 パーセント立ち上がり時間に換算して 0.81 μ s であり、従来まで

に知られていた 1.8 μ s を大幅に更新し、かつ非定常衝撃波現象の可視化に十分な水準であった。これにより、音速を超えて伝播する波動現象に起因する非定常圧力場の可視化に十分な時間応答性を持つ「超高速応答型感圧塗料」が実現可能となった。

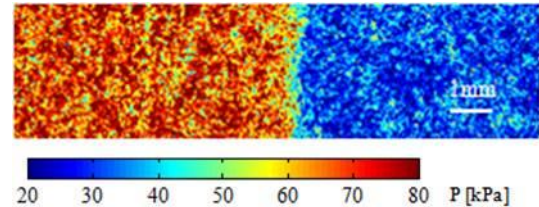


図 3 AA-PSP サンプル上の衝撃波通過時の非定常圧力分布

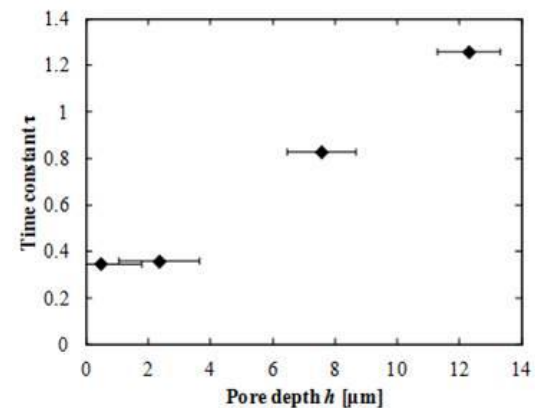


図 4 時定数と細孔深さの関係

(3) 衝撃波の反射・回折現象への超高速応答型感圧塗料の適用による有効性の実証

前項で開発した超高速応答型感圧塗料を用いて衝撃波と円柱の干渉現象の可視化を試み、音速を超えて伝播する波動現象に起因する非定常圧力場の可視化計測に対する超高速応答型感圧塗料の有効性を実証した。

円柱を過ぎる平面衝撃波を PSP で可視化計測した結果を図 5 に示す。図中心の黒色部は円柱であり、平面衝撃波は図の左から右へ進行する。また、画像上部は本研究で開発した超高速応答型感圧塗料による可視化結果であり、下部は従来型の AA-PSP による可視化結果である。なお、実験に用いた AA-PSP の時定数は、超高速応答型感圧塗料が 0.36 μ s であり、従来型の AA-PSP が 10.3 μ s である。図より、従来型の AA-PSP を用いた場合、衝撃波面を正確に捉えきれていないことがわかる。衝撃波の存在する位置はぼやけており、本来であれば急峻な圧力上昇を示す箇所が低圧のままとなっている。また、円柱からの衝撃波反射やマッハ反射に伴う三重点の形成等の、本来見られるはずの特徴が可視化結

果からは読み取れないかもしくは不鮮明となっている。それに対し、超高速応答型感圧塗料を用いた場合、入射衝撃波の波面を鮮明に捉える事が出来ており、衝撃波背後は急峻な圧力上昇を示している。また、円柱からの反射衝撃波面も捉えており、PSP の時間応答性が低いことに起因する画像の不鮮明さが取り除かれたことがわかる。三重点も明瞭に判別可能である。この結果から、本研究で開発した超高速応答型感圧塗料は非定常衝撃波の可視化に十分に適用可能であることがわかる。

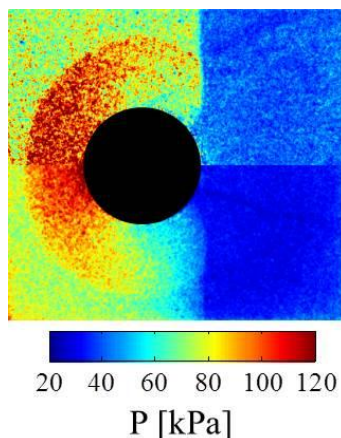


図5 円柱を過ぎる衝撃波(上:超高速応答型感圧塗料、下:従来型 AA-PSP)

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)

[学会発表] (計 8 件)

1. 沼田大樹、浅井圭介、超高速応答型感圧塗料を用いた非定常衝撃波現象の可視化、平成 24 年度 衝撃波シンポジウム、2013 年 3 月 14 日、北九州
2. 沼田大樹、藤井祥太、永井大樹、浅井圭介、非定常衝撃波現象への適用に向けた超高速応答型感圧塗料の開発、平成 24 年度航空宇宙空力班シンポジウム、2013 年 1 月 26 日、亀岡
3. Shota Fujii, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, Development of Ultrafast Response Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paints, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013 年 1 月 8 日, Grapevine, USA
4. 藤井祥太、沼田大樹、永井大樹、浅井圭介、陽極酸化アルミ皮膜型感圧塗料の細孔構造制御と時間応答性評価、第 8 回 学際領域における分子イメージングフォー

ラム、2012 年 11 月 2 日、調布

5. Shota Fujii, Daiju Numata, Hiroki Nagai, Keisuke Asai, Development of Ultrafast Time Response Pressure-Sensitive Paint for Visualization of Shock Wave Phenomena, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 2012 年 9 月 20 日, 仙台
6. Daiju Numata, Kiyonobu Ohtani, APPLICATION OF A POINT - DIFFRACTION INTERFEROMETER TO UNSTEADY SHOCK WAVE PHENOMENA, 15th International Symposium on Flow Visualization (ISFV15), 2012 年 6 月 26 日, Minsk, Belarus
7. 藤井祥太、沼田大樹、永井大樹、浅井圭介、非定常衝撃波現象への適用を目指した超高速応答型感圧塗料の開発、平成 23 年度衝撃波シンポジウム、2012 年 3 月 8 日、千葉
8. 藤井祥太、沼田大樹、永井大樹、浅井圭介、高速非定常流体现象解明のための超高速応答型感圧塗料の開発、第 7 回学際領域における分子イメージングフォーラム、2011 年 11 月 2 日、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼田 大樹 (NUMATA DAIJU)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：20551534

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：