鈴木均[○](浜松ホトニクス(株))、水島廣(浜松ホトニクス(株))

ICCDcamera based Luminescence Lifetime Imaging

Hitoshi Suzuki and Hiroshi Mizushima

ABSTRACT

We have developed an ICCDcamera based luminescence lifetime imaging system, it enables the imaging of luminescence lifetime of pressure sensitive paint. This system consists of an illuminator for excitation, an ICCDcamera for imaging, a timing controller and a computer for image acquisition and processing. Basic characteristics of this system and its application to the gated intensity ratio method are described. PSPs measured here are PtOEP and FtTFPP. In the measurement by the gated intensity ratio method, both pulsed excitation light and sine-wave excitation light have been applied. With the single-exponential approximation in image processing, the obtained lifetime value is roughly in agreement with the value measured by conventional lifetime method.

Keywords: Luminescence lifetime, Pressure sensitive paint, ICCDcamera

1. はじめに

物体表面の圧力分布を測定する技術として、感圧塗料を用いた光学的圧力分布測定技術が近年航空宇宙分野で利用されている^{1), 2)}。非接触で圧力の2次元分布を測定できるこの技術は、測定対象からの燐光・蛍光の光強度画像同士の比から圧力分布を求めている。この燐光・蛍光の光強度から圧力分布を測定する方法(以下ルミネセンス強度法と称する)に対して、燐光・蛍光の寿命分布から圧力分布を測定する方法(以下ルミネセンス寿命法と称する)の研究・利用³⁾も進みつつある。この方法は、光強度ではなく寿命という時間情報から圧力を求めるので、原理的に照明むらや感圧塗料の厚みむら、表面の汚れなどの影響を受けにくいとされている。あるいは風洞実験における wind on/off 時の模型の位置のずれに測定結果が影響されることもない。

筆者らはルミネセンス寿命法を実現するための実験系を構築し、評価実験を開始した。本報告では、燐光・蛍光の寿命分布を測定するルミネセンス寿命イメージング実験系について、その構成と基本特性、測定例、誤差要

因について述べる。

2. ルミネセンス寿命イメージング実験系の構成と基本特性

2.1 ルミネセンス寿命と圧力の関係

感圧塗料に固定された燐光・蛍光を発する色素化合物のルミネセンス寿命 τ と、塗料表面の圧力分布 P とは以下のスターン・ボルマーの関係式で結ばれている。

$$\frac{\tau_{ref}}{\tau} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (1)$$

ここで τ_{ref} と P_{ref} はそれぞれ既知の寿命と圧力である。また $A(T)$ 、 $B(T)$ はスターン・ボルマー定数と呼ばれている。これらは周囲温度に依存する量であり、実際の測定においては補正されなければならない。

2.2 構成

本実験系の構成を Fig.1 に示す。この実験系は、感圧色素化合物であるポルフィリン類とルテニウム錯体類を励起し、後述のゲート強度比法で寿命計測を行なうことを念頭に設計されている。測定対象表面の感圧塗料を励起するための均一励起照明光学系、撮像デバイスである ICCD カメラ、励起照明の発光タイミングと ICCD カメラのゲートタイミングの同期を取るためのタイミングコントローラ、さらに ICCD カメラからの画像を取込み補正・演算して寿命分布を出力するコンピュータから構成されている。撮像デバイスとして ICCD カメラを採用した理由は、ゲート強度比法を実現するゲート動作が可能だからである。

Fig.1 Experimental Apparatus

2.3 基本特性

光源としては、波長 532nm のパルス発振固体レーザー (PHOTONICS INDUSTRIES 社、型名 DS-10H-532) と、波長 460nm/520nm の変調可能な LED の 2 種類に対応している。このレーザーの出力は、繰り返し発振時 1kHz のとき 1mJ でパルス幅 10ns 以下である。双方ともに 1 m 先において直径 10 cm から 40 cm の領域を照度のばらつき ± 15 % 以内で照明可能な光学系が接続される。LED 光源は、サイン波、方形波、パルス、CW の 4 種類の発光モードを選択でき、繰り返し発光周波数は 100Hz から 1MHz 可変である。各波長での LED の使用個数は 48 個である。

ICCD カメラは内蔵するイメージンテンシファイヤーのゲインを ON/OFF することにより、最大繰り返し周波数 200kHz で最短 20ns のゲート動作が可能である。また CCD 素子を冷却し暗電流雑音を抑制することにより、オンチップ積算が可能で微弱な蛍光像も良好な S/N 比で撮像できる。

3. ゲート強度比法による測定例

3.1 ゲート強度比法とは

ゲート強度比法では色素化合物の励起は、サイン波、方形波、パルス光のいずれかの繰り返し光で行なう。サイン波励起、パルス光励起の場合の測定原理を Fig.2、Fig.3 にそれぞれ示す。なおここでは燐光・蛍光の減衰が単一指数関数で表されると仮定している。パルス光励起では、励起から α までの時間 ICCD カメラのゲートを ON にして取得した画像 I_1 と、 α から蛍光が消滅するところまでゲートを ON にして取得した画像 I_2 の比 R を (3) 式に代入することによりルミネセンス寿命分布が得られる。

$$R = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\alpha}{\ln\left(\frac{1+R}{R}\right)} \quad (3)$$

実際の測定においては単一指数関数で減衰する燐光・蛍光はほとんどなく、 α の値の取り方により寿命は異なる。サイン波励起の場合は、励起光の繰り返し周期をふたつに分け前半部分にゲートをかけ取得した画像を I_1 、後半部分の画像を I_2 とし、それらの比 R を (4) 式に代入することにより寿命分布画像が得られる。ここで H は変調度、 ω は角周波数である。

$$\tau = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2H}{\pi} \frac{1+R}{1-R}} - 1 \quad (4)$$

Fig. 2 Pulse excitation

Fig. 3 Sine-wave excitation

3. 2 測定例

Fig.4. に、大気圧室温下で波長 532nm でパルス励起により感圧色素を PtOEP とする塗料が塗布されたガラス板を測定した例を示す。測定時間は 1 秒であった。全領域にわたる寿命の平均値は $15 \mu\text{s}$ 、標準偏差は $0.2 \mu\text{s}$ であった。また同じ測定対象を中心波長 520nm、繰り返し周波数 20KHz の LED 光源でサイン波励起し、変調度を変えて測定した結果を Fig.5 に示す。ここで Fluctuation とは、寿命平均値を標準偏差で除したもので、寿命画像の S/N 比に相当する。このグラフからはサイン波励起の場合最適な変調度が存在することが推測される。なお別的手段（蛍光寿命測定装置 浜松ホトニクス社 C4334）による同一感圧塗料の寿命計測では、この PtOEP の寿命は $10 \mu\text{s}$ 前後の寿命成分と $30 \text{ 数} \mu\text{s}$ の寿命成分からなっていることがわかっている。したがって Fig.5 において変調度の増加に伴い寿命平均値が減少していること、及びパルス励起の場合の寿命平均値が $15 \mu\text{s}$ であることは、多成分寿命系の演算に単一指数関数モデルを適用しているためであろうと思われる。

Fig. 4 Lifetime map of PtOEP painted plate

Fig.5 Modulation dependence of lifetime and its fluctuation

感圧色素 PtTFPP、ポリマー Poly-IBM-co-TFEM から成る感圧塗料についてもパルス励起による寿命計測を行った。これも大気圧室温の条件下である。Fig.6 に結果を示す。50mm 四方のアルミニウム板（下地白色ペイント）に 3.2 ミクロンの厚みで塗布されている。なお測定時間は 1 秒であった。 α を $10 \mu\text{s}$ に設定したときの全領域の寿命の平均値は $8.3 \mu\text{s}$ 、標準偏差は $0.14 \mu\text{s}$ であった。

Fig. 6 Lifetime map of PtTFPP painted plate

4. 寿命測定誤差に影響を与える要因

寿命測定誤差に影響を与える要因について、確認できている範囲で列挙する。

- ・測定系への入射光量
 - ・ICCD カメラの信号増倍に伴うノイズ
 - ・画像のもつノイズを増大させる画像演算
- またゲート強度比法を適用したことにより、
- ・多成分寿命系への単一指数関数モデルの適用
 - ・パルス励起の場合の α の設定値
 - ・サイン波励起の場合の変調度の設定値

が誤差要因となる。今後実験の進展に伴い新たな誤差要因が確認される可能性がある。たとえば励起光源特に LED の場合、注入電流と周囲温度に依存する発光強度とスペ

クトルの変動が指摘⁴⁾されている。この変動の寿命測定誤差への影響も確認する必要がある。

5. おわりに

ルミネセンス寿命イメージング実験系を構築し、感圧塗料（感圧色素は PtOEP、PtTFPP）について実際に寿命分布測定を試みた。その結果別手段による測定値に近い値が得られた。同時に測定誤差要因も確認した。今後は未確認の誤差要因の抽出とそれらの誤差に対する影響の評価、風洞内の模型測定実験へと進めていく予定である。

最後に感圧塗料板を提供していただいた独立行政法人航空宇宙技術研究所に感謝致します。またこの研究は文部科学省の知的基盤整備推進事業の研究テーマのひとつ MOSAIC 計画（中核機関 独立行政法人 航空宇宙技術研究所）の一環として行われていることを述べておきます。

参考文献

- 1) 浅井圭介：圧力測定の最先端、ながれ、Vol.18, (1999)
pp.215-221
- 2) Tianshu Liu, BT Campbell, SP Burns, and JP Sullivan:
Temperature-and pressure-sensitive luminescent paints
in aerodynamics, Appl Mech Rev Vol50, No4, April 1997
pp.227-246
- 3) JW Holmes: Analysis of Radiometric, Lifetime and
Fluorescent Imaging, The Aeronautical Journal Paper
2306, April 1998, pp.189-194
- 4) Clinehens, G. A. and Dale, G. A. (1998), Ultrastable blue-
LED illumination sources for PSP applications,
Proceeding of the Sixth Annual Pressure Sensitive Paint
Workshop, The Boeing Company, Seattle, Washington,
October 6-8, 22-1 to 11-9.