

ロケットエンジン構成部品製造におけるインプロセス計測に関する研究

東北大院 ○佐藤隼人, 東北大工 高偉, 清水浩貴, 清野慧

要 旨

本研究は細いチューブを束ねた構造を持つノズルスカートと呼ばれるロケットエンジン構成部品のチューブ間の隙間を迅速に測定する方法を開発するものである。チューブ間に光を照射し、通過する光量の検出によりチューブ間隙間を測定する方法を提案し、その基本特性(感度曲線, 分解能)や安定性(温度, センサ-チューブ相対位置変化による影響)などを測定する実験を行った。それにより本システムの基本特性や安定性は要求を満たす事を確認した。

1. 緒言

本研究の測定対象であるノズルスカートとは図1に示すロケットエンジンの構成部品で、その大きさは高さ、直径共に約2000mm以上という巨大なもので約400本のチューブを束ね隙間をロウ付けし、一部がバンドで補強されている。チューブ隙間はロウ付けを理想的に行う為において全周にわたって0~50μmの範囲で高さ方向に均一であることが理想とされている。チューブ隙間が大きいとロウ付け不良の原因となり大事故を引き起こす恐れがある。しかし、現状では隙間ゲージを用いた人の手による単なるチェックのみでチューブ隙間を定量的に判断することが出来ない。その上、検査漏れの恐れや検査時間の長さなどの問題がある。その為、チューブ隙間を自動的に測定する装置が必要とされており、以上の背景から

- (1) 装置全体を10時間以下で計測できる迅速性。
- (2) 隙間0~100μmを10~15μmの不確かさ、1μmの分解能で測定できる。
- (3) 非接触で測定でき、かつ定量的な隙間データを残せる。

などの条件を満たす測定器が必要とされている。現在研究されている隙間測定の方法として CCD カメラでスリット部を撮影し測定する方法¹⁾がある。しかし、今回の測定対象はチューブに沿う方向の断面形状が曲線によって構成される為、走査機構が複雑化する等の問題がある。そこで本研究では走査機構を用いずに測定可能な方法、光を当て裏面へと通過する光量を受光器で検出することで隙間測定を行う方法を提案する。

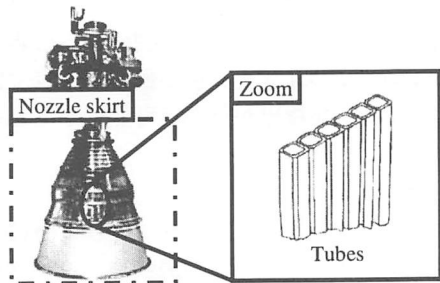


Fig.1 Photograph of the rocket engine²⁾

2. 測定原理

隙間から透過し受光器へと入射する放射束を考える。今、面積 $A[\text{mm}^2]$ の範囲に $P_0[\text{W}]$ の一様な光を照射する。

受光器へ入射する光は図2斜線で示された隙間 d と受光器長さ L によって定められた範囲を通過した光である。斜線領域を通過する放射束は

$$P = \frac{P_0 L d}{A} \quad (1)$$

と表される。ここで P_0/A を一定とすると隙間 d に比例した光量が受光器に入射する。これを検出する事で隙間を測定する。最終的には高さ方向に多数の受光器を配置し縦一列の隙間情報を一度に得る。そして、ノズルスカートを回転させ全ての隙間を順次測定する。

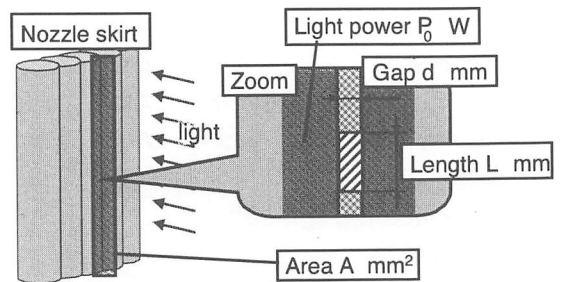


Fig.2 Measurement principle

3. 実験装置

本研究では光源に超高輝度 LED(以下 LED)、受光器として PD を用いた。LED は一個のサイズが小さいために設置自由度が高く、数多く設置することで広い範囲に均一な光を照らすことができる為採用した。PD は応答速度の高速性と光電変換の直線性より採用した。

本研究で用いた実験装置の配置図を図3に示す。ここで光源の LED の最適な Y 方向の列数を探るために、Y 方向へ1列, 2列, 3列と並べた3種類の光源を隙間

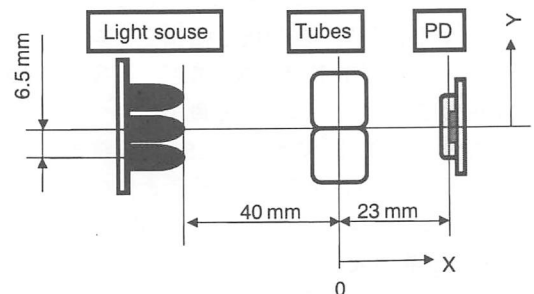


Fig.3 Schematic of the experimental setup

に対して対称に設置した。光源 - チューブ間距離はその微小変化による隙間を透過する光量への影響を軽減するように、図に示す値に PD - チューブ間距離は隙間による回折の影響を考慮し定めた。2本のチューブを最も近づけた状態から一方を自動ステージでY方向へ動かし隙間dを変化できるようにした。自動ステージの正確な送り量はレーザ変位計を用いて測定した。

4. 実験

上記のシステムで実際に1 μm ごとに隙間dを変化させ光量変化を測定する実験を行った。ここで、光源の列数が1列, 2列, 3列の場合それぞれの感度曲線を図4に示す。平均感度はLEDは1列, 2列, 3列の時それぞれ30 $\mu\text{m}/\text{V}$, 23 $\mu\text{m}/\text{V}$, 18 $\mu\text{m}/\text{V}$ となり、3列の時に最も感度が高くなる。さらに隙間に対する出力電圧の線形性も最も良い。4列以上は放射角の関係で効果を期待できないのでこれらから最適な配置は3列であると言え以降、3列の光源にて実験を行う。

次にシステムの分解能を調べた。このシステムの分解能はノイズレベルによって決まる。PD出力のノイズレベルは約5mVで、これを変位に換算すると分解能は約0.09 μm である。目標値より十分高く、要求を満たしていると言える。

さらに、実際に目標とする測定システムの測定時間である10時間での安定性を調べた。LEDの出力は外気温に関係があることが知られており影響を見るため温度も同時に測定した。その結果を図5に示す。温度変化がPD出力に影響を与えているのが分かる。その相関係数は約-0.9であった。約0.5 $^{\circ}\text{C}$ の温度変動によりPD出力が約14mV変化する。これは約0.3 μm の隙間変化に相当するが目標値を大きく下回り問題ないと思われる。また温度と相関が高くある程度の補正も可能と考えられる。

一方、チューブにはその基準形状からy方向に最大 $\pm 5\text{mm}$ 程度の誤差が存在し、さらに目標とする測定システムではノズルスカートを回転させるのでその回転運動誤差も加味すると $\pm 10\text{mm}$ 程度のチューブとセンサの相対位置変化が考えられ、PD出力への影響が予想される。インプロセス計測を行う上で、そのような状況においても安定した出力を得られる必要がある。そこで、約55 μm にチューブ隙間を固定したチューブ束に図3に示す配置からX方向の位置変化を与え、それがPD出力に与える影響を確かめた。その結果を図6に示す。 $\pm 10\text{mm}$ のX方向への変化に対しPD出力が+方向に250mV,-方向に100mV程度変化している。これはそれぞれ約4.5 μm , 約1.8 μm 程度のギャップ変化に相当するが目標値とする不確かさが10~15 μm 以下であり問題ないと思われる。

5. 結言

ノズルスカートのチューブ隙間を計測する手法を提案し、実際にチューブ隙間を測定した。さらに、実験により、本システムの分解能、安定性は要求を満たすことを確認した。以上より、本手法がノズルスカート

のインプロセス計測に適していると明らかにした。

今後の課題としては、実用化に向けて自動的に測定を行うシステムを構築することが上げられる。

参考文献

- 1) 古川勝, 他: 精密工学会秋季大会講演集, (2002), 588
- 2) NASDA <http://www.nasda.go.jp/>

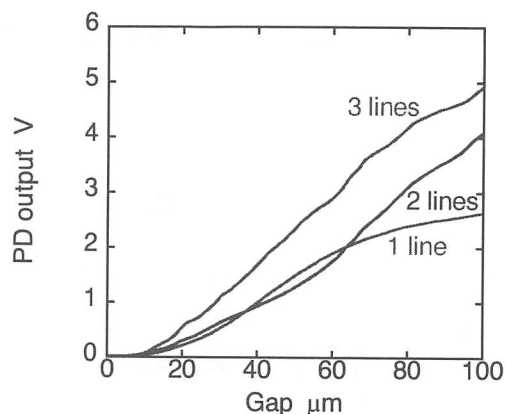


Fig.4 Relationship between the gap and the PD

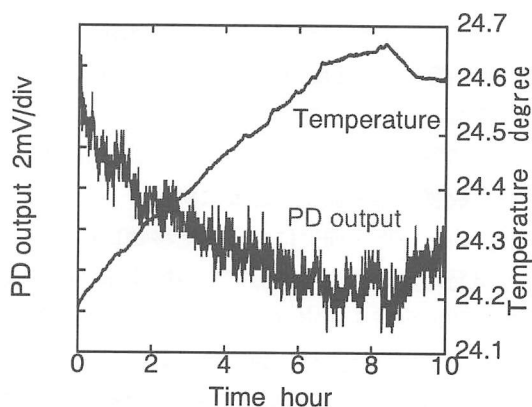


Fig.5 Stability of the PD output

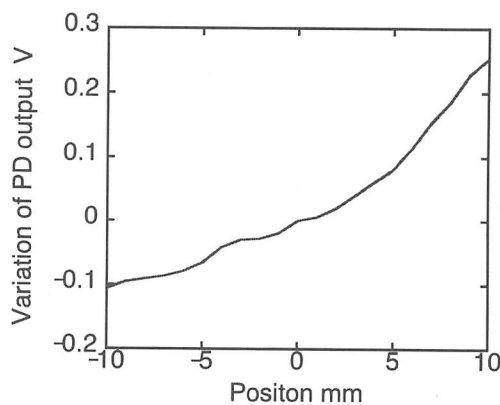


Fig.6 Influence of the X-position of the tubes