

# 溶射型ひずみゲージによる 高温環境下の静ひずみ測定技術

三上 隆男<sup>\*1</sup> 松田 昌悟<sup>\*2</sup>  
Mikami Takao Matsuda Masanori

高温環境下のひずみ測定には、一般的に溶接型と溶射型のひずみゲージが適用されているが、前者はサイズが大きいので、比較的大きな構造物のひずみ測定に適用されている。後者は種々のサイズが市販されており、適切なサイズのものを用いれば、小形部品のひずみ測定が可能である。近年、小形高温部品の静ひずみ測定ニーズが高まっており、本稿では溶射型ひずみゲージによる高温環境下の静ひずみ測定技術について紹介する。

キーワード：溶射、フリーフィラメントゲージ、ローカイド、MI ケーブル、静ひずみ

## 1. はじめに

ジェットエンジン、自動車用エンジンのように高温で作動する機械の開発においては、高温部品の疲労およびクリーブ損傷に対する安全性の検証が必要である。そのため、構造解析だけでなく、ひずみゲージによりひずみ（応力）の実測が行われている。

高温環境下においては、一般的な箔ひずみゲージは高温に耐えられないため、溶接型（カプセル型）と溶射型のひずみゲージが適用されている。前者はサイズが大きい（ベース長さ：10～20mm）ので、比較的大きな構造物の測定に適用されている。後者はサイズが小さい（グリッド長さ：3～6mm）ので、小形部品の測定に適している。これらの特殊ひずみゲージはこれまで主として動ひずみ測定に適用されている。

近年、自動車エンジン関連の小形部品の狭隘な

場所の静ひずみ測定の高まっている。

これに対応するためには、小形の溶射型ひずみゲージを適用する必要がある。IIC ではこれまで、約 700 点の溶射実績があるが、そのほとんどが動ひずみ測定用である。高温環境下の静ひずみ測定は動ひずみ測定に比べて解決すべき技術的課題が多々ある。

本稿では、溶射型ひずみゲージの概要とそれを用いた高温環境下の静ひずみ測定技術について紹介する。

## 2. 溶射

溶射は、コーティング材料を加熱により溶融もしくは軟化させ、微粒子状にして加速し、被覆対象物表面に衝突させて、扁平に潰れた粒子を凝固・堆積させることにより皮膜を形成する技術である。溶射にはさまざまな方法があり、使用する材料や熱源の種類などにより分類されている。

\*1：技師長 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士、JSNDI ひずみ測定レベル 3

\*2：計測事業部 計測技術部 部長

IIC は IHI 航空宇宙事業本部の技術指導を受けて溶射設備を 2003 年に横浜市金沢区の福浦事業所分室に導入している。

溶射装置を図 1 に示すが、ローカイド溶射装置(米国:N社製)とサーモスプレー溶射装置(スイス:S社製)の2種類を保有している。



図 1 溶射装置

ローカイド溶射装置は、ローカイド A (アルミナ) の焼結棒を約 3,000℃の酸素/アセチレン炎中で溶融し、この溶滴をエア・ジェット流で加速し、噴射する装置である。完全に溶融されたアルミナ粒子のみが噴射されるので、粒子間結合力の高い膜が得られる。絶縁層および表面コーティング層の形成に用いる。

サーモスプレー溶射装置は、溶射材料粉末 (Ni、Co 系金属) を酸素/アセチレン炎中に送り込み、燃焼炎の流れに乗せて加熱しつつ溶射する装置である。プリコート層形成に用いる。

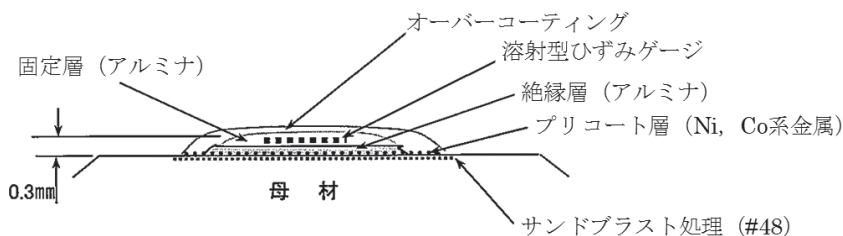


図 3 溶射施工断面図

### 3. 溶射型ひずみゲージの構造と溶射手順

溶射型ひずみゲージは図 2 に示すように、特殊な構造を有している。一般の箔ひずみゲージとは異なり、ベース材がなくゲージ素子とゲージリードのみで構成され、フリーフィラメントゲージと呼ばれている。材質は白金/タンゲステン合金、カンタル A-1 などが用いられる。IIC の社内試験では 1,000℃にも耐えられることを確認している。

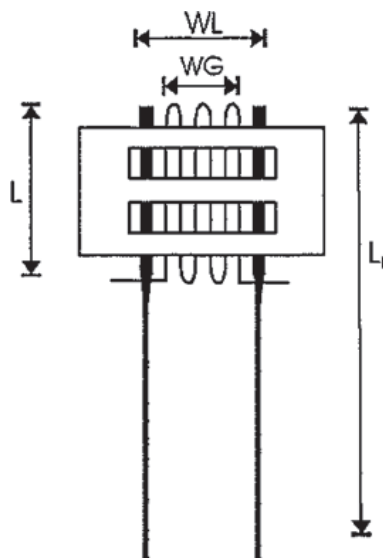


図 2 溶射型ひずみゲージ

溶射型ひずみゲージは、素子のグリッド部分をテフロンテープで仮止めされた形で提供される(図 2 参照)。このゲージを測定対象物に取り付けるには、薄いアルミナ層でサンドウィッチ構造にして絶縁を確保するのが一般的な手法である(図 3 参照)。

以下にゲージ溶射の手順と実際の作業状況を示す。

① サンドブラスト粗面の形成

溶射しない部分をマスキングしてサンドブラスト処理 (#48) により粗面を形成する。

② プリコート層の形成

サーモスプレー装置により Ni、Co 系金属層を形成する (図 4 参照)。

③ 絶縁層の形成

ローカイド溶射装置により電気絶縁性アルミナ層を形成する (図 5 参照)。

④ ゲージ素子とリードの固定溶射

(1) ゲージを測定対象物に位置決め (図 6 参照)

(2) 溶射しない部分をマスキングし、アルミナ溶射 (図 7、8 参照)

(3) テフロンテープを剥がし、既に溶射した部分をマスキングしてアルミナ溶射

(4) 既に溶射した部分をマスキングし、ゲージリードをアルミナ溶射

(5) ゲージリードと延長リードをスポット溶接で接合

(6) 既に溶射した部分をマスキングし、接合部を含むリード部をアルミナ溶射

(7) マスキングテープを取り外して溶射作業完了 (図 9 参照)



図 4 プリコート層の形成

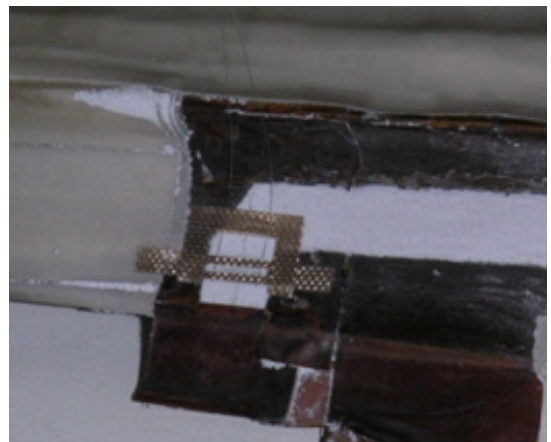


図 6 ゲージの位置決め



図 5 絶縁層の形成

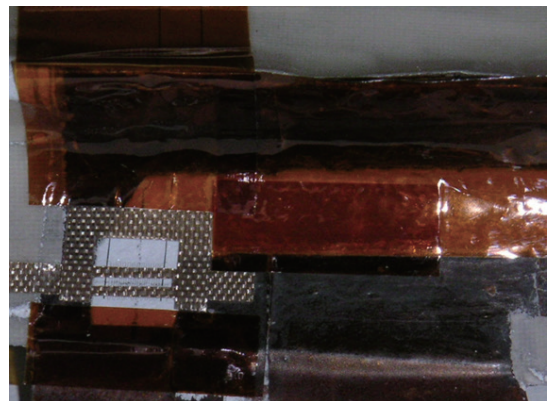


図 7 マスキング

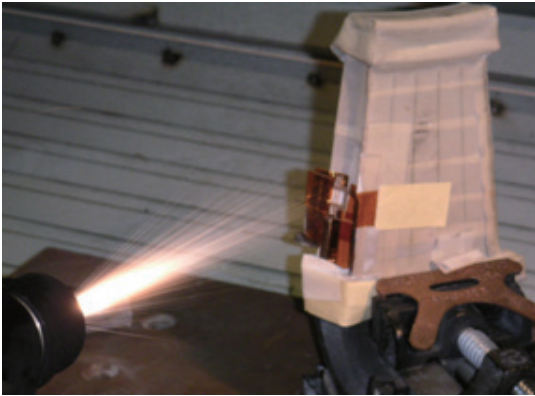


図8 アルミナ溶射

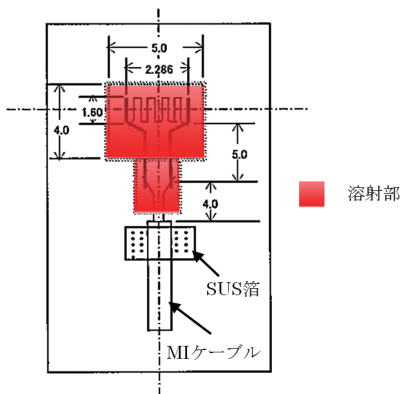


図9 溶射型ゲージ施工例

#### 4. 静ひずみ測定における基本的な問題点

##### 4.1 見かけひずみ

ひずみゲージは外力が作用してなくても温度が変化すると、測定対象物とひずみゲージ抵抗素子の線膨張率の違いとひずみゲージ抵抗素子の抵抗変化の影響で見かけひずみを生じる。見かけひずみ： $\varepsilon_{lg}$ は次式で表される。

$$\varepsilon_{lg} = \left\{ \frac{\alpha}{K_t} + (\beta_s - \beta_g) \right\} \Delta T \quad (1)$$

ただし、

$\alpha$ ：ゲージ抵抗素子の抵抗温度係数 [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$K_t$ ：温度  $T$  におけるゲージ率（ひずみゲージの感度を表す係数で、一般用のひずみゲージで使われている銅・ニッケル系やニッケル・ク

ロム系合金の場合は 2.0 前後の値)

$\beta_s$ ：測定対象物の線膨張係数 [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$\beta_g$ ：ゲージ抵抗素子の線膨張係数 [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T$ ：温度変化 [ $^\circ\text{C}$ ]

室温付近で使用される一般的な銅・ニッケル合金製箔ゲージの場合は、測定対象物の線膨張係数に応じてゲージ抵抗素子の材料を選定することにより抵抗温度係数を制御し、式 (1) の  $\varepsilon_{lg}$  がゼロに近くなるようにすることができる。このタイプのひずみゲージは自己温度補償型ゲージと呼ばれている。

##### 4.2 リード線の影響

前項の見かけひずみ ( $\varepsilon_{lg}$ ) はひずみゲージ単体で生じるものであるが、ひずみゲージはリード線を介して計測機器に接続するため、リード線の温度変化による見かけひずみを考慮する必要がある。リード線の見かけひずみ： $\varepsilon_{ll}$ は結線法により異なる。

##### (1) 1ゲージ法2線式結線の場合 (図10参照)

$$\varepsilon_{ll} = \left\{ \frac{2r_l}{R_g + 2r_l} \cdot \frac{\alpha_l}{K_t} \right\} \Delta T \quad (2)$$

ただし、

$\alpha_l$ ：リード線の抵抗温度係数 [ $1/^\circ\text{C}$ ]

$K_t$ ：ひずみ測定器の設定ゲージ率（通常は 2.0）

$R_g$ ：ひずみゲージの抵抗値 [ $\Omega$ ]

$r_l$ ：リード線 1 本当たりの抵抗値 [ $\Omega$ ]

この方式は簡便なため、一般の応力・ひずみ測定に広く適用されているが、リード線の影響を大きく受けるので、温度変化の大きい場合やリード線が長くなる場合には (2) の 1ゲージ法3線式結線を適用しなければならない。

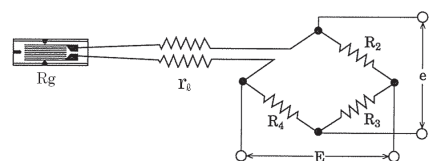


図10 1ゲージ法2線式結線



(2) 1ゲージ法3線式結線の場合 (図11参照)

図11のような3線式結線法を用いればリード線の抵抗 ( $r_l$ ) は1本ずつブリッジの隣り合う辺に入り、リード線の温度による見かけひずみを除去することができる。したがって、 $\epsilon_c$  はゼロとなる。ただし、この方法では、リード線は芯線の断面積や長さが等しく、同じ温度に置かれることが必要で、ふく射の影響を除去するためリード線の被覆の色も同色であることが望ましい。

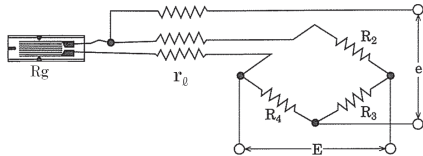


図11 1ゲージ法3線式結線

5. 高温での静ひずみ測定の問題点

5.1 見かけひずみ

溶射型ひずみゲージを用いて高温 (300℃以上) で測定する場合、ゲージの抵抗素子が特殊な材料であるため、前項で述べた抵抗温度係数を調整して自己温度補償する方法を適用できない。そのため、事前に電気炉などを使って式(1)の見かけひずみ量の測定試験 (校正試験) を行う必要がある。図12に静ひずみ測定用のHFH溶射型ひずみゲージ単体 (測定対象物に固定しないで浮かせた状態) の見かけひずみ測定結果を示す。1,000℃以下では昇温時と降温時での指示ひずみ値が一致し

ていない。この現象をゲージのヒステリシスというが、箔ゲージでも見られる現象である。

5.2 リード線の影響

通常、リード線には耐熱性と柔軟性に優れたMI<sup>\*1</sup>ケーブルを使用する。MIケーブルの心線には高温での耐久性、耐振性に優れたNi線を採用している。Ni線の固有抵抗は銅線に比べて約3倍の大きさを有し、抵抗値が高い。例えば、φ0.5mmで長さ1.34mのMIケーブルの抵抗値は約60Ωであり、2線式結線の場合2本×60Ω/本=120Ωにもなり、これはひずみゲージの抵抗値と同レベルである。この高い抵抗値がひずみ測定感度低下の原因となる。

\*1 Mineral Insulated metal sheathed cable :

金属シース内に酸化マグネシウムのような耐熱絶縁材料の粉末が高密度に充填され、導体がある中に埋め込まれた構造を有する無機絶縁ケーブル。

(1) 1ゲージ法3線式結線の場合 (図11参照)

リード線の抵抗値が高い場合、感度が低下する。低下率は次式で計算できる。

$$\epsilon_c = \left(1 + \frac{r_l}{R_g}\right) \epsilon_i \tag{3}$$

ただし、

$\epsilon_c$  : 真のひずみ

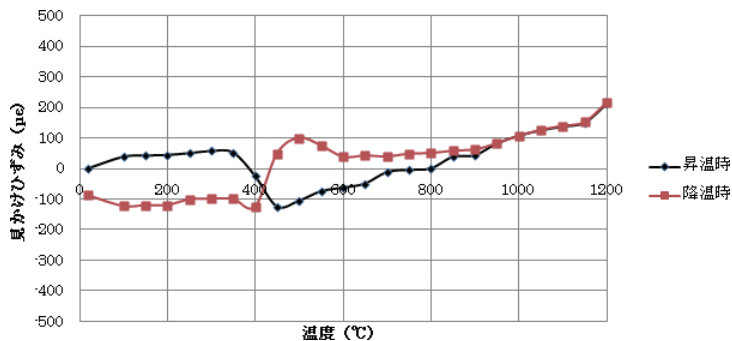


図12 HFH溶射型ひずみゲージの見かけひずみ (HPI社データ)

$\epsilon_i$  : ひずみ計測器の指示ひずみ

例えば、MI ケーブルの抵抗値が  $60\Omega$  で、ひずみゲージの抵抗値が  $120\Omega$  の場合、室温条件で、式 (3) から  $\epsilon_c = 1.5\epsilon_i$  となり、感度は約 67% に低下する。MI ケーブルの抵抗温度係数は溶射型ひずみゲージ (例えば HPI 社の HFH 型) の抵抗素子 (材質: カンタル A-1) のそれに比べて格段に大きいいため、高温ではさらに感度が低下する。また、5.3 節で後述するように、高温ではゲージ率が低下するので、さらに感度が低下する。

このように感度低下の問題があるので、MI ケーブルの長さをできるだけ短くしないと、3 線式結線法でも事実上、測定が困難となる場合が生じる。

## (2) 2 ゲージ 1 アクティブ 1 ダミー法の場合

(図 13 参照)

この方法は測定対象物に取り付けたアクティブゲージ (A) と測定対象物と同じ材料の試験片に取り付けた温度補償用ダミーゲージ (D) をブリッジの隣り合う辺に入れる。そうすると、アクティブゲージは機械的ひずみの他に温度による見かけひずみをセンシングする。一方、ダミーゲージは温度による見かけひずみのみをセンシングする。その結果、温度による見かけひずみはブリッジ回路で除去され、機械的ひずみのみを取り出すことができる。この方式は理想的であるが、A と D のそれぞれのリード線の抵抗値や温度が互いに同じでないと温度補償されない。

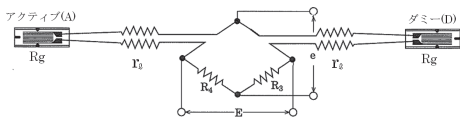


図 13 2 ゲージ 1 アクティブ 1 ダミー法

高温の場合、測定部からひずみ計測器までのリード線の温度を全く同じにすることは現実的に困難である。MI ケーブルは高い抵抗値を有するので、リー

ド線間の小さな温度差が大きな見かけひずみの原因となる。MI ケーブルは温度補償だけでなく、感度低下の問題がある。この点をもう少し詳しく説明する。

金属材料は、外部から引張力を加えると伸び、圧縮力を加えると縮み、その抵抗値はそれぞれ増加または減少する。金属材料にひずみが加えられたとき、 $R_g$  であった抵抗値が  $\Delta R_g$  だけ変化したとすれば、次式が成立する。

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = K_s \cdot \epsilon_c \quad (4)$$

ただし、

$K_s$  : ゲージ率

ひずみゲージは、ひずみによる抵抗変化は極めて小さいので、通常はホイートストンブリッジ回路に組み、抵抗の変化を電圧変化に変換して測定する。図 13 において、出力電圧は、リード線の抵抗を考慮すると、

$$e = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_g}{R_g + 2r_l} \cdot E \quad (5)$$

ただし、

$e$  : 出力電圧 [V]

$E$  : ブリッジ印加電圧 [V]

式 (4) を式 (5) に代入すると、

$$e = \frac{1}{4} \cdot \frac{K_s \cdot E}{(1 + 2r_l/R_g)} \cdot \epsilon_c \quad (6)$$

一方、ひずみ計測器ではリード線の抵抗はゼロとしてホイートストンブリッジ回路の出力電圧の式から下記のようにひずみを計算している。

$$e = \frac{1}{4} \cdot K_i \cdot E \cdot \epsilon_i \quad (7)$$

式 (7) を式 (6) に代入して  $e$  を消去すると、

$$\epsilon_c = \frac{K_i}{K_s} (1 + 2r_l/R_g) \cdot \epsilon_i \quad (8)$$

ここで、式 (8) に値を入れて計算してみる。室温条件で  $K_i = 2.0$ 、 $K_s = 2.3$ 、 $r_l = 60\Omega$ 、 $R_g = 120\Omega$  とすると、 $\epsilon_c = 1.74\epsilon_i$  となり、感度が 58% ( $=1/1.74$ ) に

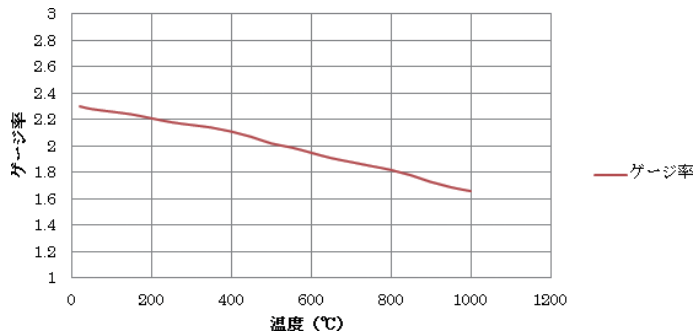


図 14 HFH 溶射型ひずみゲージのゲージ率 (HPI 社データ)

低下することがわかる。

高温の場合は、5.2 節 (1) で述べた内容と同じ理由でさらに感度が低下する。

### 5.3 ゲージ率の低下

ゲージ率は高温になると低下傾向を示す。図 14 に HFH 溶射型ひずみゲージの温度とゲージ率の関係を示す。これによると、室温で 2.3 だったものが 1,000°C では 1.66 に下がる。すなわち 28% 低下する。したがって、高温でのひずみ測定においては、ひずみ測定部の温度を測定してそれによりゲージ率の補正を行うことが必要である。

## 6. おわりに

溶射型ひずみゲージの概要とそれを用いて高温環境下で静ひずみ測定を行う場合の問題点について述べた。高温ではリード線の抵抗変化が種々の問題を引き起こし、これを解決しないと高精度な静ひずみ測定は不可能である。本稿で述べたようにリード線の結線法は種々あるが、どの方式を採用しても問題を解決することができない。

そこで、筆者等は 1 ゲージ 4 線式ひずみ測定法に着目して基礎的な試験を実施中である。この方法はホイートストンブリッジ回路を使用せず、ゲージ抵抗と基準抵抗による直列回路を構成してひずみを測定する。4 本のリード線を用いることで、リード線の影響をなくすものである。1 ゲージ 4 線式ひずみ測定法については別の機会に詳しく報告したい。

### 参考文献

- (1) 三上隆男、松田昌悟：センサ溶射技術、IIC REVIEW No.32、2004/10、pp.40-44
- (2) HPI 社 (HITEC PRODUCTS, INC) の溶射型ひずみゲージカタログ
- (3) 共和電業 カタログ Web 版
- (4) TML 製品総合カタログ Web 版
- (5) 「動ひずみ測定用カプセル型高温ひずみゲージ “KHCD” について」共和技報 NO.413
- (6) 「750°C のカプセル型高温ひずみゲージ KHCS」共和技報 NO.434
- (7) 社団法人日本非破壊検査協会「ひずみ測定Ⅱ」
- (8) 社団法人日本非破壊検査協会「ひずみ測定Ⅲ」



技師長 博士 (工学)、技術士 (機械部門)、環境計量士 (騒音・振動関係)、一般計量士、JSNDI ひずみ測定 レベル 3

三上 隆男

TEL. 03-6404-6583  
FAX. 03-6404-6044



計測事業部  
計測技術部  
部長

松田 昌悟

TEL. 045-791-3518  
FAX. 045-791-3542