

溶射ゲージによる静ひずみ測定技術

菅原 敏博 *1

Sugawara Toshihiro

高温環境下のひずみ測定に使用される溶射ゲージは極小の受感素子をセラミック系溶射材により被測定物に溶射施工する特長から、曲率半径の小さいR面やアルミなどの非鉄金属、セラミック材料などにも施工可能である。静ひずみ測定はゼロ点からの絶対値を求めなければならないため、高温環境下での測定では温度変化による特有の大きな見かけひずみの発生とその除去方法が問題となる。本稿では溶射ゲージ実用に際しての留意点などを含む静ひずみ測定技術について紹介する。

キーワード：フリーフィラメントゲージ、4線式、見かけひずみ、クリープ

1. はじめに

溶射ゲージは耐熱性、可撓性、ゲージ寸法が小さいなどの長所を活かし、ガスタービンやジェットエンジンの動翼、静翼の動ひずみ測定に多用されている⁽¹⁾。溶射ゲージは温度による見かけひずみが極端に大きいなどの特性⁽²⁾があり、ゼロ点からの絶対値を求めなければならない静ひずみ測定では見かけひずみが測定精度に大きく影響する。本稿では片持ちはりの曲げ試験を常温下と高温下で行った結果をもとに、溶射ゲージの静ひずみ測定に関する知見を紹介する。

2. 試験方法

2.1 片持ちはり試験片

曲げ試験に供する片持ちはり試験片（以下 TP）の外観を写真1、ゲージ貼付位置を図1に示す。溶射ゲージおよびその近傍の熱電対は専用の溶射装置⁽³⁾により貼付施工した。なお溶射ゲージのリード線は温度影響を低減するため4線法⁽⁴⁾を採用した。

表1に TP の各温度におけるヤング率を示す。ヤング率は JIS Z2280 共振法による動的ヤング率測定により求めた。TP は耐熱性の高い INCONEL600 とし、ひずみ値の比較のため溶射ゲージと箔ゲージを TP の荷重点から同距離の位置に隣合わせに貼付した。



写真1 試験片の外観

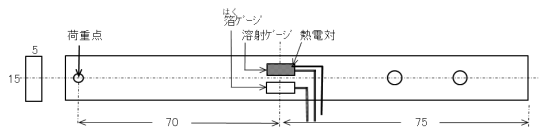


図1 ゲージ貼付位置

表1 INCONEL600のヤング率

試験温度 (°C)	ヤング率 (GPa)
23	221
300	206
500	193
700	177

*1：計測事業部 計測技術部 磯子グループ 部長 JSNDI ひずみゲージ試験レベル3、CIW 上級検査技術者（ひずみ測定部門）

2.2 曲げ試験装置および加熱装置

加熱および曲げ試験装置の構成を図2に示す。写真2に曲げ試験装置を示す。曲げ試験装置はTPを加熱装置に格納した状態でも荷重負荷できるように方式を採用した。荷重は分銅により段階的に負荷および除荷できるようにした。写真3に加熱装置の外観および機器構成を示す。加熱装置は円筒状電気炉とコントローラーで構成される。

2.3 試験手順

TPの曲げ試験は以下の手順で実施した。

- (1) 室温環境下でTPに荷重（曲げモーメント）

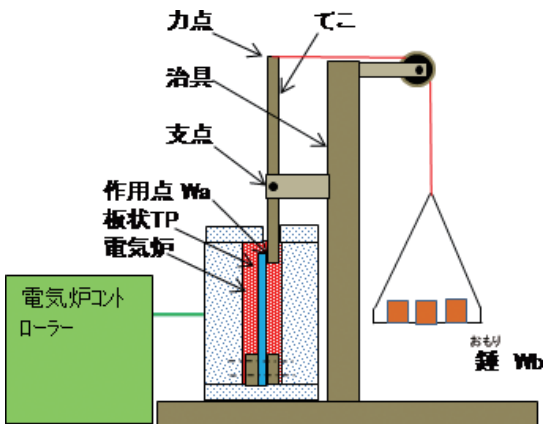


図2 加熱および曲げ試験装置の構成



写真2 曲げ試験装置

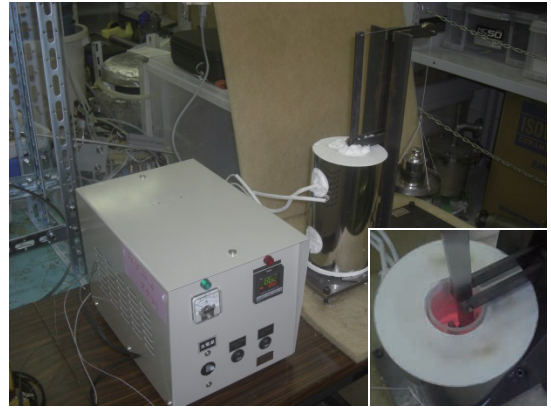


写真3 加熱装置の外観

を加え、溶射ゲージと箔ゲージの測定値が同等となることを確認する。

- (2) TPを電気炉に格納し、700℃まで升温し静定する。このとき見かけひずみも静定することを確認する。

- (3) 700℃でひずみ計測器のゼロ点を取り、TPに段階的に負荷し、測定値と計算値とを比較する。計算値は以下の式で求められる。

$$\varepsilon = \frac{M}{Z \cdot E} \quad (1)$$

ここで、

E：TPのヤング率（GPa）

M：曲げモーメント（N・m）

Z：断面係数（m³）

ε：ひずみ（×10⁻⁶）

- (4) 無負荷の状態ですべて室温まで降温する。

- (5) 室温にもどった後、TPに対して段階的に荷重を負荷し、測定値と計算値とを比較する。

- (6) 再度700℃まで升温し静定したところでゼロ点をとる。

- (7) 温度を任意に変化させ、温度と見かけひずみの関係を確認する。

- (8) 温度を700℃以上に升温し、見かけひずみが静定する温度限界を確認する。

3. 試験結果

3.1 室温環境下の静ひずみ測定

図3に室温環境下で行ったTPの曲げ試験結果を示す。一般的な1軸の箔ゲージのひずみ値と同等の値を示しており、溶射ゲージ施工品質が良好であることを確認した。

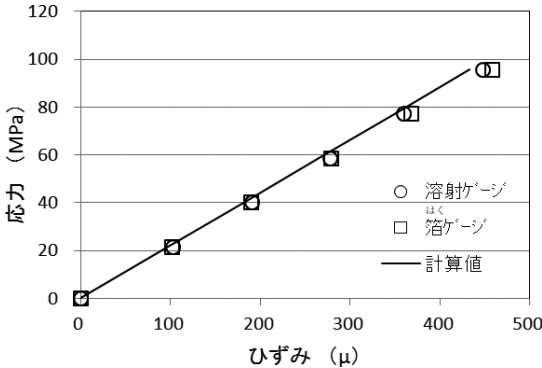


図3 室温環境下の静ひずみ

3.2 高温環境下の見かけひずみ

溶射ゲージの受感素子であるフリーフィラメントゲージは温度による抵抗変化が大きく、高温域では大きな見かけひずみが生じる。

図4に室温から750℃まで昇温し、その後室温まで降温した場合の見かけひずみのプロファイルを示す。1回目は溶射ゲージが温度上昇になじんでいないため、昇温時と降温時の見かけひずみが乖離したカーブとなるが、2回目以降改めてゼロ点をとり昇温、降温を行うと同等のカーブを描くようになる。しかしながら3回とも共通しているのは昇温時の400～500℃付近に不連続部が現れ、降温時はこの不連続部を通らないため、ここを境に昇温時と降温時の差異が大きくなる。この不連続部はメーカーが transition region 「HPI (Hitec Products, Inc.) 社」⁽⁵⁾ とする温度領域にほぼ合致しており、静ひずみ用フリーフィラメントゲージに見られる特性と考えられる。

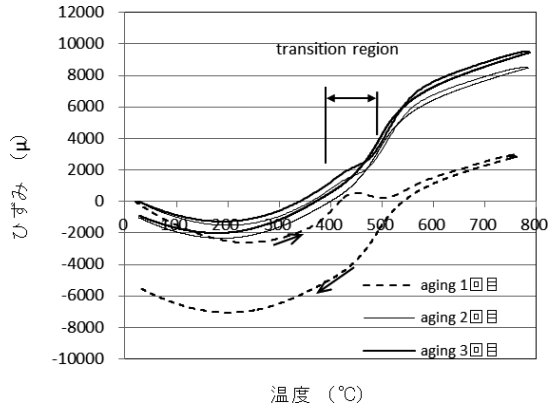


図4 高温環境下の見かけひずみ

図5にTP温度を700℃まで昇温し静定したときの見かけひずみの推移を示す。700℃静定において大きな見かけひずみとなるが、温度静定にともない見かけひずみも静定することを確認した。

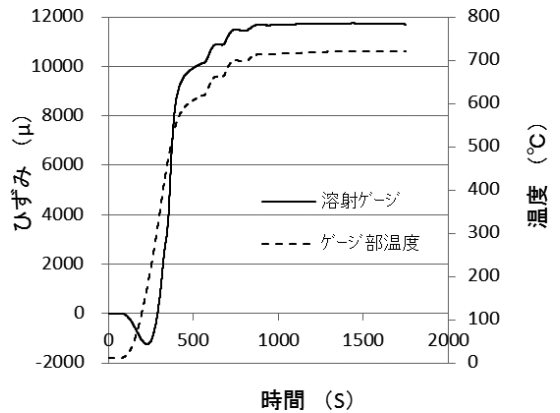


図5 見かけひずみの静定

3.3 高温環境下の静ひずみ測定

図6に高温環境下における曲げ試験結果を示す。高温環境下においては温度一定、見かけひずみ一定の前提のもと、この時点でゼロ点をとり、段階的に荷重負荷、除荷を行ってひずみ値の推移を確認した。荷重負荷過程において各負荷一定にもかかわらず、時間経過とともにひずみ値の増加が見られる。これは高温によりTPがクリープ変形⁽⁶⁾していることを示しており、荷重が増すにつ

れてクリーブ速度が増して行く。また荷重除荷後にひずみが残留しており塑性変形していると考えられる。この結果を応力-ひずみ線図に整理したのが図7である。応力の増加とともにひずみ値の増加量が大きくなっており、弾性域として求めた計算値とは合致しなくなる。なお各荷重点におけるクリーブ変形によるひずみを差し引いた値でプロットした場合は計算値に合致する。

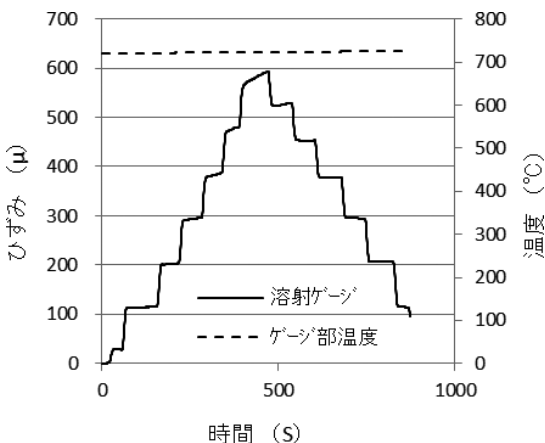


図6 高温環境下の静ひずみ測定

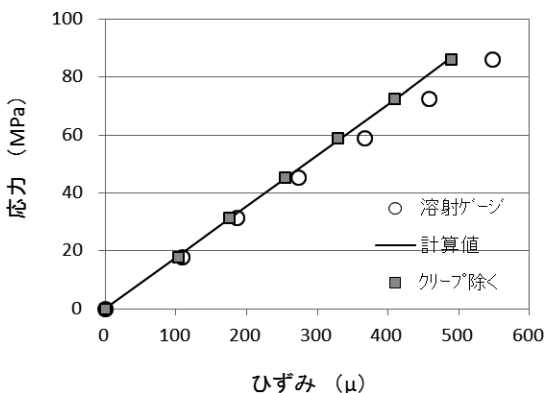


図7 高温環境下の応力-ひずみ線図

3.4 室温環境下再試験の静ひずみ測定

高温環境下で曲げ試験を行ったTPが室温にもどったところで再度曲げ試験を実施し、溶射ゲージの高温耐性を含む健全性評価を行った。図8に

測定結果の応力-ひずみ線図を示す。室温環境下では計算値に合致しており、溶射ゲージが高温によるダメージを受けておらず、正常に受感することを確認した。

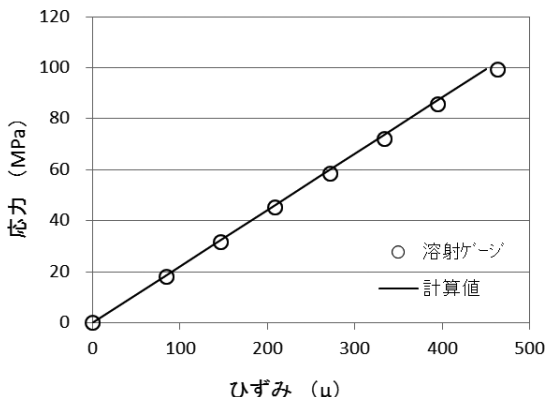


図8 室温環境下再試験時の静ひずみ

3.5 温度変化と見かけひずみ

高温環境下において被測定物の温度が変動する場合は、あらかじめ想定される温度範囲で温度と見かけひずみの関係を把握しておくことが必要となる。図9に700°Cでゼロ点を取り、最大±50°C程度温度変化させた場合の見かけひずみの変動を示す。見かけひずみはおおむね温度変化に敏感に追隨しているが、同一温度で若干の非再現性が見られる。

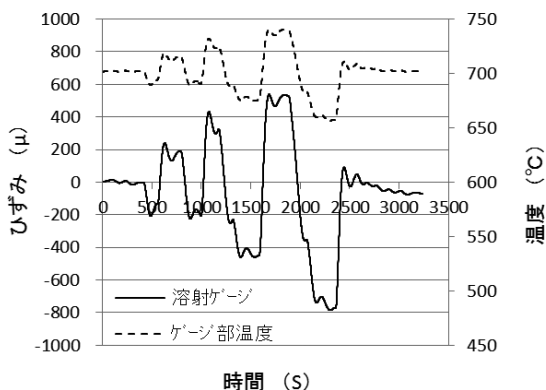


図9 温度変化と見かけひずみ

図9の温度と見かけひずみの主なポイントをプロットし整理したのが図10である。見かけひずみの非再現性がプロットのばらつきとなっている。

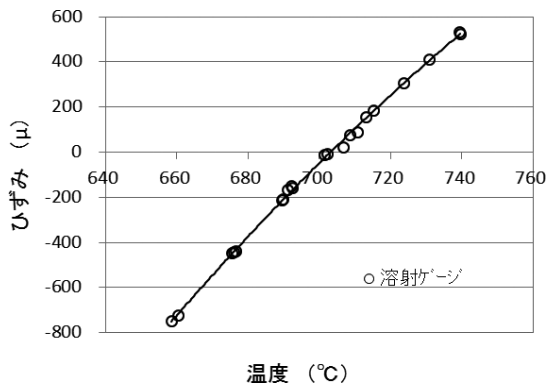


図10 温度と見かけひずみ

図11に726℃一定温度でゼロ点を取り、荷重を18.7N負荷した状態で温度変化させた場合の見かけひずみ変化と、図10のプロットの多項式近似(ただし多項式の切片は、試験開始時の温度726℃と終了時の温度732℃の平均値で変更する)で見かけひずみを除去した場合の状況を示す。上述したように、温度変化した場合の温度に対しての見かけひずみのばらつきが見かけひずみ除去精度に影響する。

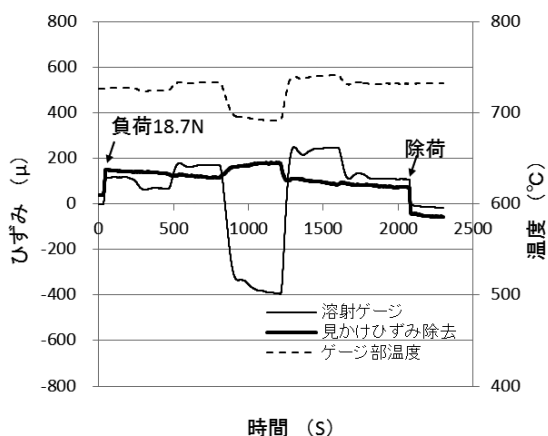


図11 見かけひずみの除去状況

3.6 測定限界温度

高温環境下でひずみ測定を行う場合、温度と見かけひずみはほぼ比例することが前提となる。

図12に示すように、700℃～750℃まではほぼ温度に比例して見かけひずみが推移するが、800℃になると、温度一定にもかかわらず、見かけひずみは低下し始める。受感素子であるフリーフィラメントゲージのメーカー指定最大使用温度が816℃⁽⁷⁾となっていることを考慮すると、溶射ゲージで測定可能な限界温度は750℃前後が妥当と考えられる。

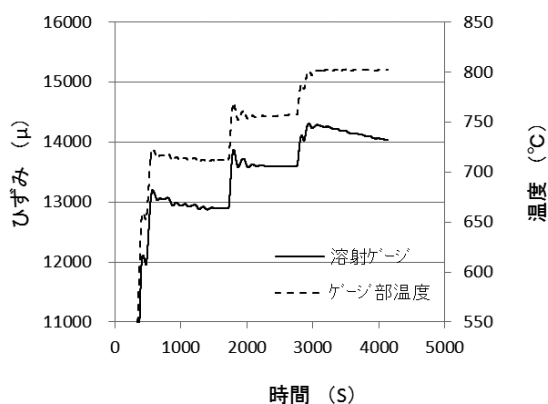


図12 測定限界温度

4. おわりに

静ひずみ測定用溶射ゲージは、受感素子(フリーフィラメントゲージ)に特化した溶射技術により被測定物に固定成形するので、受感素子の温度による抵抗変化や溶射材、被測定物の線膨張などの影響を受けて大きな見かけひずみが発生する。高温環境下で静ひずみを精度よく測定できるか否かは、見かけひずみと外力による機械的ひずみをどれだけ正確に切り分けられるかにかかっている。これには多種多様な条件下、測定対象に溶射ゲージを適用し、経験値を上げて行くことが肝要である。また、施行工程の標準化や施工技術者の継続

的な技能訓練、力量評価などを通じて今後も溶射ゲージ施工品質の安定性担保に注力していきたい。

参考文献

- (1) 青野比良夫：高温ガス中の高速回転動翼の振動応力計測技術とその応用、ターボ機械、第11巻、9号、1983/9、pp.33-37
- (2) W. Dan Williams：Strain Sensing Technology for High Temperature Applications, NASA Technical memorandum 4498, 1993, p.2
- (3) 三上隆男、松田昌悟：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、IIC REVIEW、No.51、2014/04、pp.44-50
- (4) 株式会社東京測器研究所ホームページ：1ゲージ4線式ひずみ測定法 (http://www.tml.jp/product/strain_gauge/catalog_pdf/1gauge4.pdf)
- (5) HPI社ホームページ：<http://www.strainsense.co.uk/downloads/suppliers/Strain%20Gauge/HFH-strain-gauge-bondable-strainsense-datasheet.pdf#search=%27hitec+products+inc.+strain+gauge+engineering+data%27>
- (6) 木村一弘：耐熱鋼のクリープ破断寿命予測、日本金属学会誌、第73巻、第5号、2009/12、p.323
- (7) HPI社ホームページ：<http://hitecprod.com/products/high-temperature-bondable/>



計測事業部 計測技術部
磯子グループ 部長
JSNDI ひずみゲージ試験レベル3、
CIW 上級検査技術者(ひずみ測定部門)
菅原 敏博
TEL. 045-759-2085
FAX. 045-759-2119