

溶射型ひずみゲージの現場適用 ～溶接型溶射ひずみゲージの検討～

中野 公貴^{*1} 尾崎 淳一^{*2}
Nakano Hiroki Ozaki Junichi

航空機エンジンや火力発電所など高温に曝^{さら}される設備、機器ではクリープ損傷や疲労損傷などの懸念があり、ひずみ測定の需要は高い。高温環境下でのひずみ測定では、溶接型ひずみゲージや溶射型ひずみゲージなど、特殊なひずみゲージが用いられる場合が多い⁽¹⁾⁽²⁾。前者は現場での施工が容易であるが、後者は設備の整ったラボで施工する必要がある、現場での施工は難しい。本稿では、高温ひずみ測定の有望な手法の一つとして、溶射型ひずみゲージの現場適用に向けた検討結果を紹介する。

キーワード：高温ひずみ、溶射、フリーフィラメントゲージ、ベースプレート

1. はじめに

航空機エンジンや火力発電所のボイラなど、350℃を超える高温環境において、ひずみを計測する場合、溶接型ひずみゲージや溶射型ひずみゲージなどが利用される。

溶接型ひずみゲージ(図1)はゲージベースやセンシング部、ゲージリード部に金属が使用されており、完全密閉された構造となっている。このゲージベースは測定対象の金属面に対して、可搬式の抵抗スポット溶接機を用いて取付ける。したがって、電源が取れる現場であれば、どこでも容易に施工することができる。

一方、より可^と携性が求められる用途には溶射型ひずみゲージが用いられる。溶射型ひずみゲージ(図2)は、フリーフィラメントゲージをセラミック溶射でコーティングしたセンシング部と金属で



図1 溶接型ひずみゲージ



図2 溶射型ひずみゲージ

*1：計測事業部 計測技術部 福浦グループ 課長

*2：株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術センター 材料・構造グループ

覆われたゲージリードを使用した構造である。溶射型ひずみゲージの施工には局所排気設備や、溶射用ガス供給設備が整った溶射ブース内で測定対象の金属面に直接溶射施工する必要があり、通常、現場での施工は困難である⁽¹⁾。しかし小さく軽量かつ耐熱性、可撓性に優れているため、高温環境における高速回転体のひずみ測定に適しており、現場適用が強く望まれている。

本稿では、溶射型ひずみゲージの現場適用のため、抵抗スポット溶接機で取付けが可能となる金属製ベースプレートをゲージベースとした現場施工タイプの「溶接型溶射ひずみゲージ」を試作し、施工方法の検討を実施した事例を紹介する。

2. 溶接型溶射ひずみゲージの試作

一般的な溶射型ひずみゲージの断面構造を図3に示す。溶射型ひずみゲージは通常の箔^{はく}ひずみゲージとは異なりゲージベースが無く、計測対象の金属母材に対して直接溶射施工する。以下に溶射施工手順を記す。

- ①プラスト処理：測定対象金属表面に対し、接着性および変形追従性を良くするための粗面処理

- ②Ni・Co系金属のボンド層溶射：溶射ひずみゲージの接着層施工
- ③酸化アルミニウム（セラミック）絶縁層溶射：フリーフィラメントゲージのベース施工
- ④フリーフィラメントゲージ：ひずみ受感部（グリッド）取付け
- ⑤酸化アルミニウム（セラミック）オーバーコート溶射：フリーフィラメントゲージの固定とオーバーコート施工

図4に今回試作した溶接型溶射ひずみゲージの断面構造、図5に施工平面図を示す。ベースプレートのプラスト処理方法などに違いはあるが、基本的にはラボ施工の溶射型ひずみゲージの手順と変わらず、直接の溶射施工対象が計測対象の母材ではなく金属製ベースプレートになる。使用したベースプレートの材質は耐熱性の高いインコネル600、板厚は $t=0.1\text{mm}$ および 0.2mm の2種類とし、ベースプレートの外周には計測対象へ取付けるための抵抗スポット溶接用のスペースを確保した。ゲージリードにはリード線の電気抵抗および温度変化を除去する $\phi 1.0\text{mm}$ の4芯MIケーブルを使用し、温度補正用のK型熱電対も併せて溶射施工した。図6にフリーフィラメントゲージの取

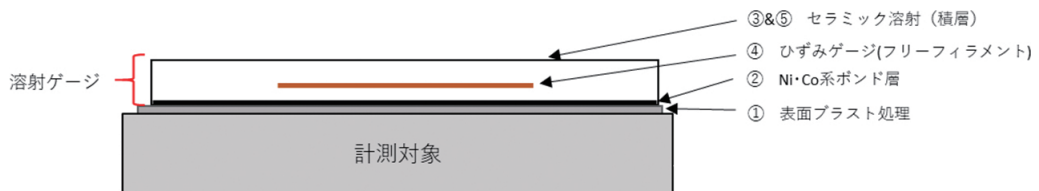


図3 一般的な溶射型ひずみゲージの断面構造

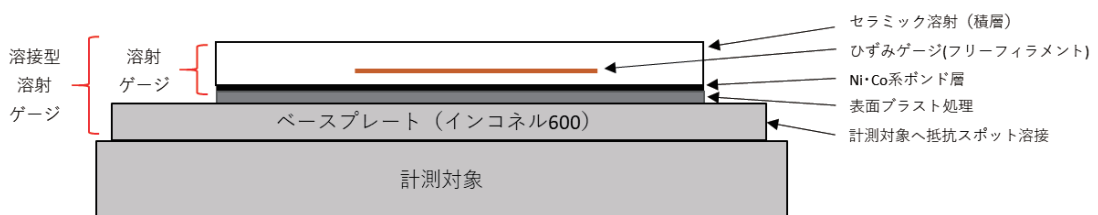


図4 溶接型溶射ひずみゲージの断面構造

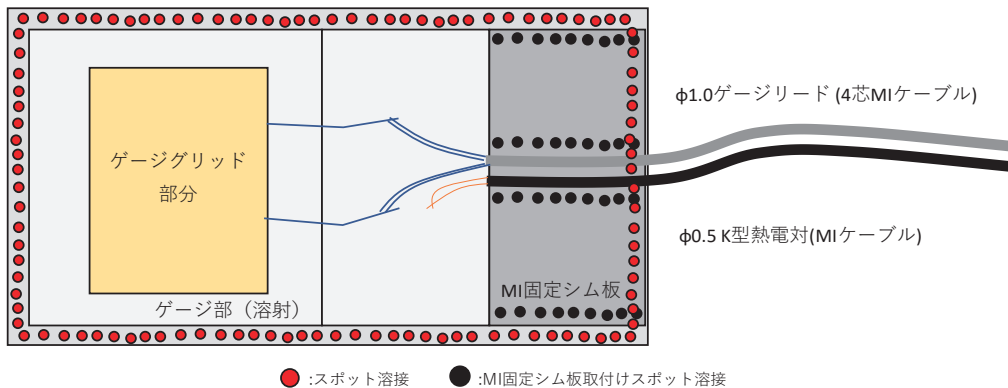


図5 溶接型溶射ひずみゲージの施工平面図

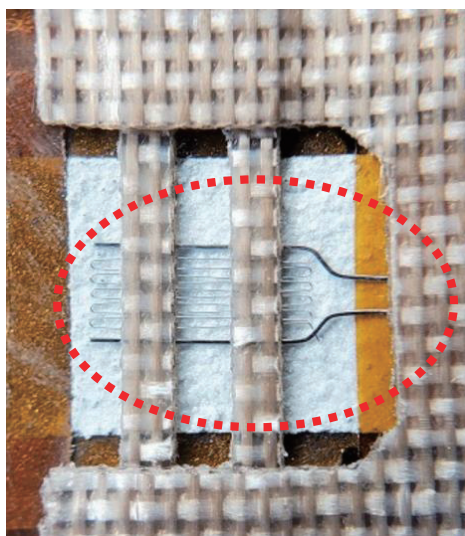


図6 フリーフィラメントゲージ

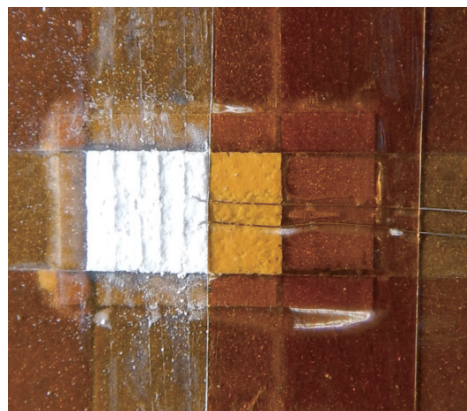


図7 セラミック溶射後

付け、図7にセラミック溶射後、図8に溶接型溶射ひずみゲージの完成品を示す。

3. 静的・繰返し载荷試験

溶接型溶射ひずみゲージについて、静的载荷および繰返し载荷試験を行い、ひずみ伝達特性、高温時の出力特性を確認した。

3.1 試験体・試験方法

図9に示す試験片(材質:インコネル600)の中央付近に、ベースプレート(幅8mm×長さ14mm、板

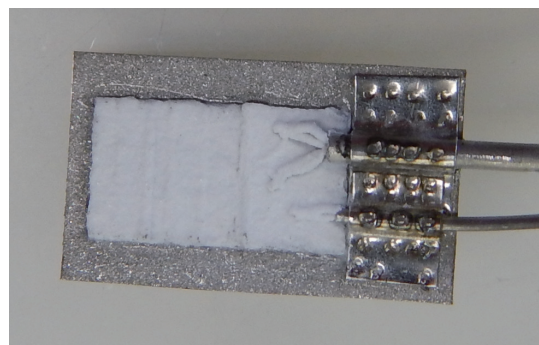


図8 溶接型溶射ひずみゲージ(完成品)

厚0.1mmおよび0.2mm)を有する溶接型溶射ひずみゲージを配置した(図10)。

この試験体を用いて、室温、300℃、650℃における静的载荷および繰返し载荷試験を実施した。表1に試験条件を示す。

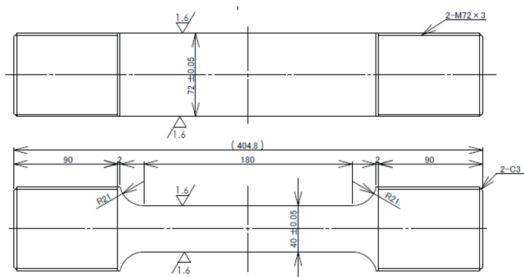


図9 試験体形状 (上:ひずみゲージ貼付面、下:側面)

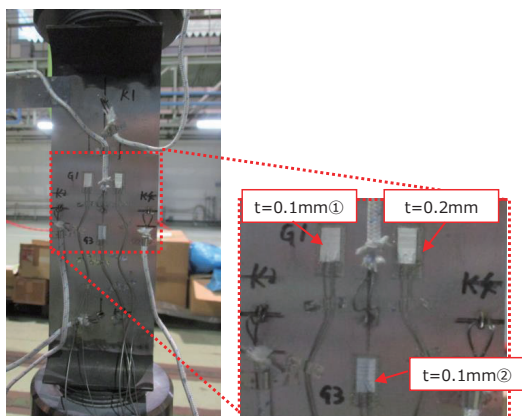


図10 試験体への取付け状態

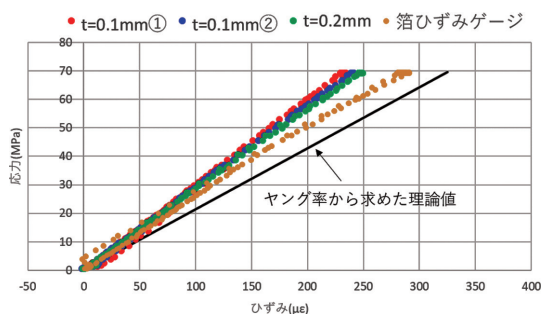
表1 試験条件

	静的载荷	繰返し载荷
試験温度	室温, 300°C, 650°C	室温, 300°C, 650°C
制御形態	荷重制御	荷重制御
負荷速度, 波形	手動	0.002Hz, サイン波
繰返し数	1回(室温)または2回	110回

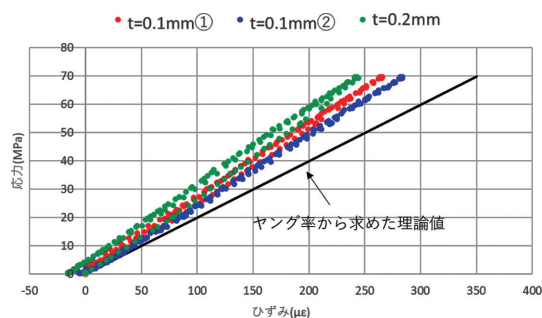
3.2 試験結果

図11に静的载荷試験結果を示す。図の縦軸は試験荷重から算出される応力、横軸は計測されたひずみの値であり、試験材のヤング率を用いて求めた理論値を併記した。また、室温における試験では比較のため、一般的なひずみゲージ(箔ゲージ)による計測結果も示した。

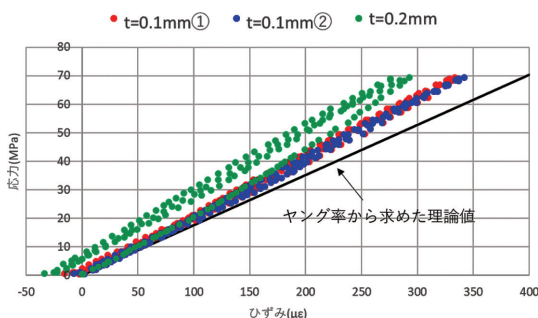
室温での試験において、箔ゲージによるひずみ値は理論値と比べて約10%低い値であったが、除荷時における傾きは理論値とおおむね一致していた。一方、溶接型溶射ひずみゲージのひずみ値は理論値より約25%低い値であった。このような差



(a) 室温



(b) 300°C



(c) 650°C

図11 静的载荷試験結果

が生じる理由として、ベースプレートを介してゲージ部に計測対象のひずみが伝達する複雑な構造であるため、ひずみが伝達過程で一部損失している可能性が挙げられる。

高温時(300℃および650℃)においては、 $t=0.2\text{mm}$ のベースプレートの応力ひずみ曲線にヒステリシスが確認された。 $t=0.1\text{mm}$ のベースプレートの場合

は、ヒステリシスは見られないが、常温時と同様300℃では約19%、650℃では約14%、理論値に対して低いひずみ値を示しており、高温でもベースプレートの影響でひずみの損失が生じていると考えられる。

図12に繰返し载荷試験結果を示す。各温度での1cycle目と100cycle目の結果を比較すると、い

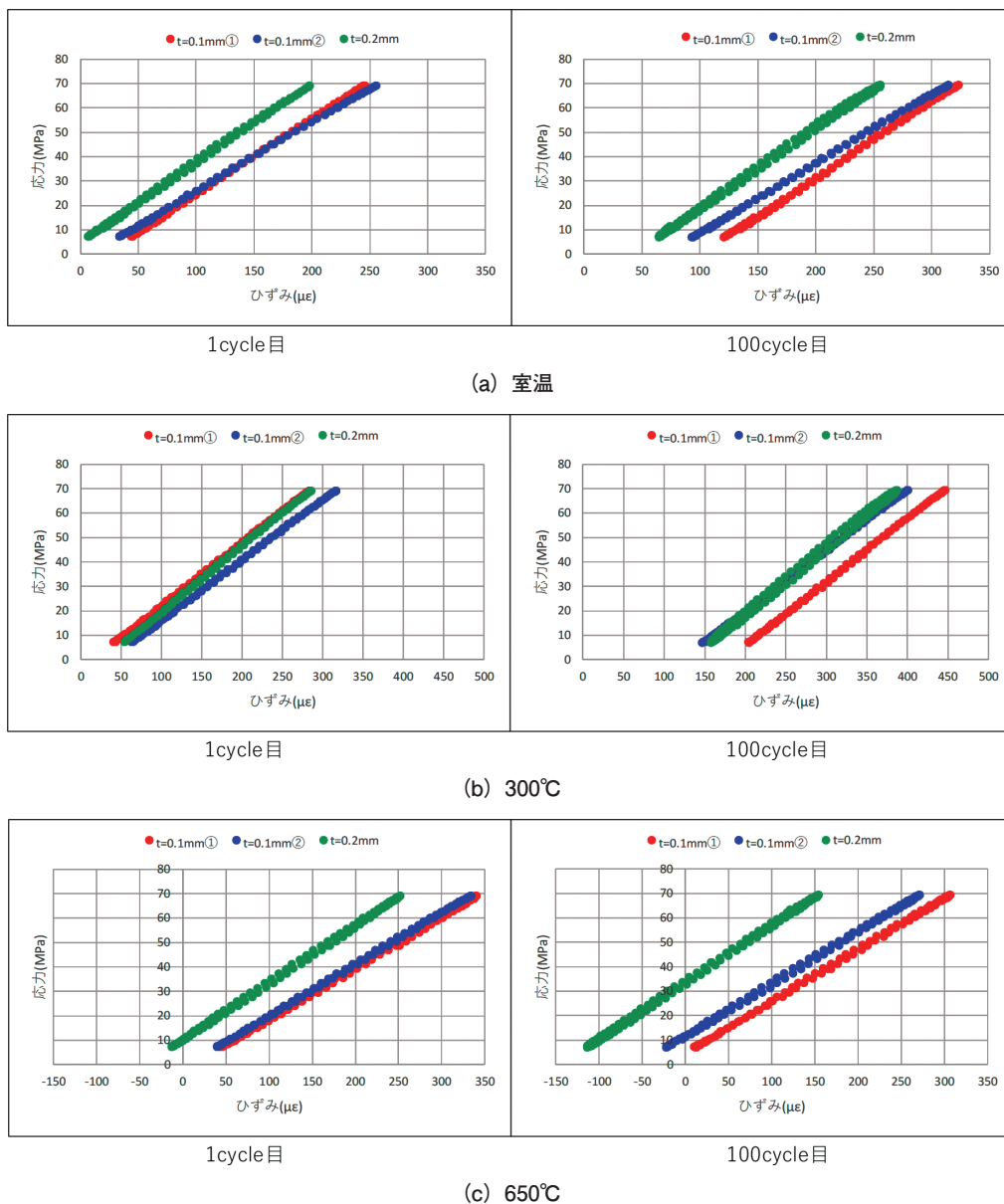


図12 繰返し载荷試験結果

ずれの温度条件に対してもドリフトが発生している。しかし 100cycle に到達しても得られたひずみ範囲については安定しており、それぞれのひずみ範囲(グラフの傾き)は繰返し回数に伴う大きな変化は見られなかった。

4. 溶接型溶射ひずみゲージの適用性について

溶接型溶射ひずみゲージを現場における高温ひずみ測定に適用するためには、構造や評価において改善の余地がある。具体的には、MI ケーブル固定部のシム板が2重構造かつスポット溶接により剛性が高くなっていると考えられ、またベースプレート外周のスポット溶接とゲージグリッドの間にMIケーブル固定部があるため、ひずみの伝達が一部損失していると考えられる。以上のことから、今後ひずみゲージの構造変更を試みる予定である。一方、ひずみが理論値より低い値となること、高温時のドリフトについては、それらの影響を定量的に評価し、結果を補正する方法を検討する。

一方、繰返し载荷試験においては応力変化に対して得られるひずみ範囲(傾き)がおおむね安定していることから、動ひずみ測定に関しては現場適用に対して有望である。

5. おわりに

今回試作した溶接型溶射ひずみゲージに対し、構造や評価方法についての課題を得ることができた。今後も高温環境下における新たな手法として研究を行い、計測技術を向上させるとともに現場適用を目指す。

参考文献

- (1) 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
- (2) 菅原敏博：溶射ゲージによる静ひずみ測定技術、IIC REVIEW、No.58、2017/10、pp.12-17



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
課長

中野 公貴

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541



株式会社 IHI 技術開発本部
基盤技術センター
材料・構造グループ

尾崎 淳一

TEL. 045-759-2864
FAX. 045-759-2627