

溶射ゲージによる静ひずみ測定技術（その2）

菅原 敏博 ^{*1}

Sugawara Toshihiro

溶射ゲージによる高温環境下の測定試験について、前号⁽¹⁾では INCONEL600 試験片に施工した場合の測定試験結果をもとに、溶射ゲージの高温特性や測定手法、測定精度等について報告した。本稿においては、SUS304 試験片に溶射ゲージを施工して測定試験を実施したので、その試験結果と評価および課題等について報告する。

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

溶射ゲージは受感部であるフリーフィラメントゲージ（HPI社製 型式 HFH-12-063-ZHW）⁽²⁾を、セラミック系溶射材により被測定物に溶射絶縁固定するひずみゲージである。溶射ゲージは動ひずみ測定に用いられることがほとんどであるが、その長を活かし静ひずみ測定への適用可否について検討を始めている。本稿では、前号で紹介した INCONEL600 試験片の前に行った SUS304 試験片による試験結果をもとに、試験結果の評価、試験手法の課題、試験装置の改良案および今後の計画について報告する。

2. 試験方法

2.1 片持ちはり試験片

写真1に SUS304 片持ちはり試験片（以下 TP）への溶射ゲージおよび、はくひずみゲージ貼付状況を示す。図1に各ゲージの貼付位置を示す。はくひずみゲージは室温環境下での比較試験のため、溶射ゲージに隣り合わせに貼付した。また、

溶射ゲージのリード線は温度影響を低減するため4線式を用いた。

表1に SUS304 の各温度におけるヤング率を示す。ヤング率は JIS Z2280 共振法により求めた。



写真1 SUS304TP 外観

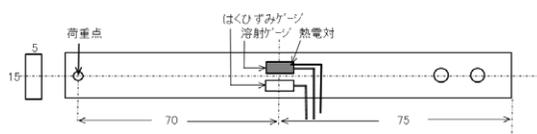


図1 ゲージ貼付位置

表1 SUS304 のヤング率

試験温度 (°C)	ヤング率 (GPa)
23	209
300	186
500	169
700	152

*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

写真2および図2に曲げ試験装置と加熱装置を取り付けた場合の外観と概念図を示す。TPは一端が固定され、もう一端にてこ方式で荷重が負荷される。また加熱する場合はTP部分に円筒状加熱炉を設置する。



写真2 曲げ試験装置（加熱炉設置）

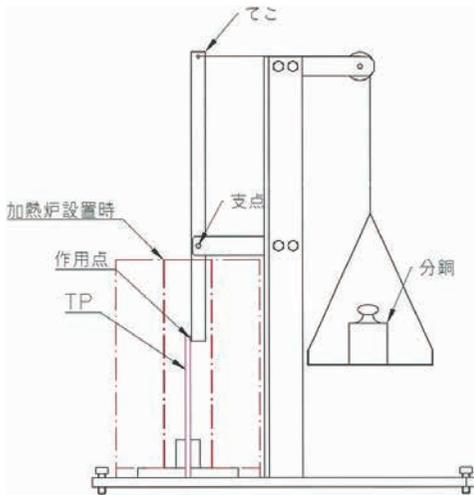


図2 曲げ試験装置、加熱炉設置概念図

2.3 試験手順

TPの測定試験は以下の手順で実施した。

- (1) 室温環境下での曲げ試験。
- (2) 700℃まで昇温、室温まで降温し、見かけひずみ推移確認。
- (3) 700℃まで昇温静定しゼロ点を取り、曲げ試

験。のち無負荷で室温まで降温。

- (4) 室温環境下で再度曲げ試験。

(5) 700℃まで昇温静定し、ゼロ点を取り任意に温度変化させる。温度と見かけひずみのプロットから近似式をもとめる。

(6) 700℃でゼロ点を取り、荷重を負荷した状態で任意に温度変化をあたえる。(5)の試験より求めた近似式により見かけひずみを除去する。

なお、(3)の試験でははくひずみゲージとの比較ができないため、はりの曲げ理論に基づく式(1)により求めた計算値と比較する。

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

ここで、

E : SUS304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)

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。室温環境下で段階的に荷重を加え、溶射ゲージとはくひずみゲージのひずみ値を比較し、ほぼ同一値となることを確認した。

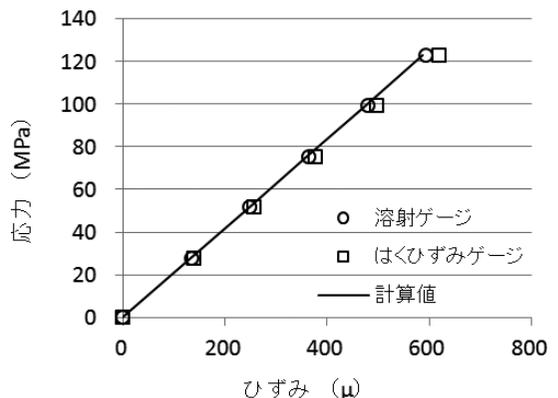


図3 室温環境下の静ひずみ

3.2 高温環境下の見かけひずみ

一般にひずみゲージは温度変化にともない、見かけひずみが発生する。溶射ゲージも同様に温度変化の影響を受けやすく、あらかじめ温度と見かけひずみの関係を把握しておくことが必要になる。図4に見かけひずみ試験結果を示す。室温から700℃まで昇温後、室温まで降温したときの見かけひずみの推移を示している。1回目は溶射ゲージが温度に馴染んでいないため、昇温時と降温時の値に大きな差異が生じるが、2回目以降はほぼ同等のカーブを示すようになる。3回目の700℃付近と300℃付近にスパイク状の急下降が見られるが、これは荷重を負荷、除荷して復元性を確認したことによる。また昇温時の400℃から500℃付近に不連続部が現れるのは前号のINCONEL600TPで行った試験でも見られた静ひずみ用フリーフィラメントゲージの特性と考えられる。

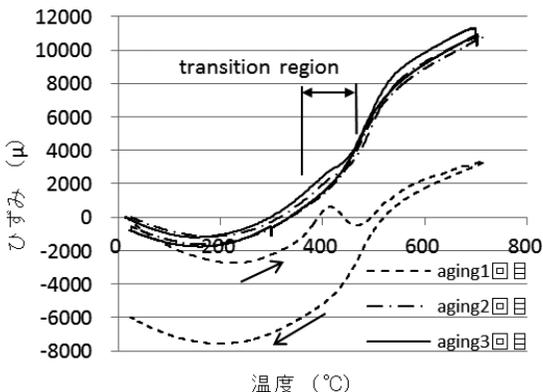


図4 高温環境下の見かけひずみ

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。TP温度が一定に保持されることで、見かけひずみも一定に保持されることを確認した。

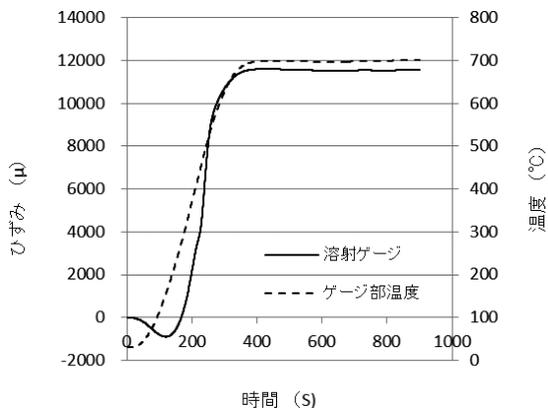


図5 見かけひずみの静定

3.3 高温環境下の静ひずみ測定

TPが700℃で静定したところでゼロ点を取り、段階的に荷重を負荷および除荷して曲げ試験を行い、測定精度の確認を行った。なお、試験温度700℃は、静ひずみ用フリーフィラメントゲージのメーカー指定最高使用温度が816℃となっているため、安全を考慮して任意に決めた温度である。

図6に曲げ試験時の測定結果を示す。荷重増により、階段状にひずみが増していき、また、各荷重増時に時間経過とともにひずみが大きくなるクリープの様子も捉えることができた。

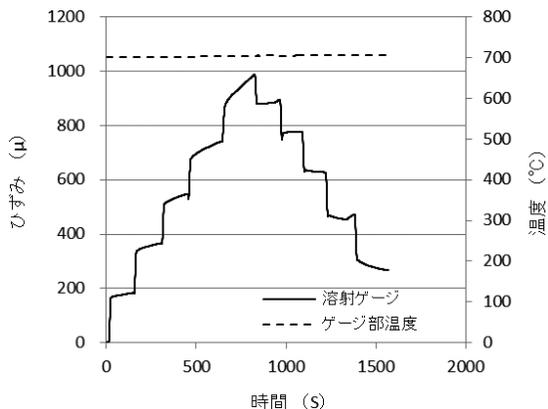


図6 高温環境下の静ひずみ測定

図6を応力-ひずみ線図に整理したのが図7である。参考値として、クリープによるひずみ分を除いた場合は計算値に近い値になる。

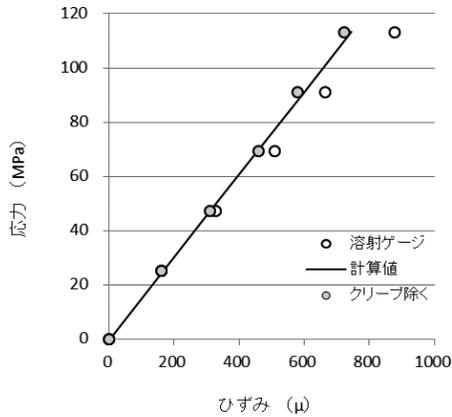


図7 高温環境下の応力-ひずみ線図

図8に300℃の温度環境下で曲げ試験を行ったときの応力-ひずみ線図を示す。300℃ではクリープは起こらないので、若干の差異はあるが計算値に近い値となった。

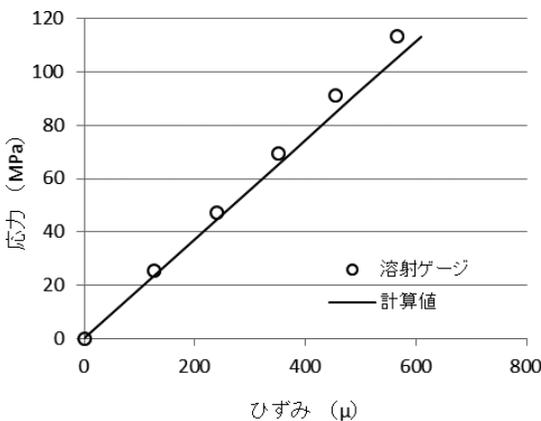


図8 300℃における応力-ひずみ線図

3.4 室温環境下再試験の静ひずみ測定

図9に高温環境試験後に室温までTP温度が下がったところで、再度曲げ試験を実施した結果を示す。

測定値はほぼ計算値に合致しており、溶射ゲージの高温耐性と再現性の確認ができた。

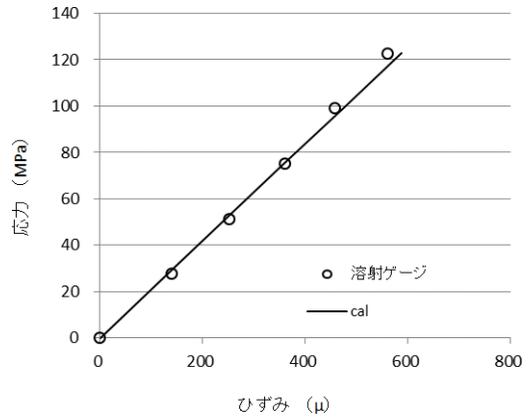


図9 室温環境下再試験時の静ひずみ

3.5 温度変化と見かけひずみ

高温環境下でひずみ測定を行う場合、想定される温度領域での温度変化と見かけひずみの関係をあらかじめ求めておくが必要になる。試験では、約700℃に温度を静定し、ひずみも静定したことを確認後にゼロ点を取り、温度を最大±80℃程度変化させたときの温度とひずみの関係を確認した。図10に試験結果を示す。おおむね温度変化に従ってひずみも変化しているが、温度を試験開始時近くまでもどしたときのひずみに若干の非再現性が見られた。

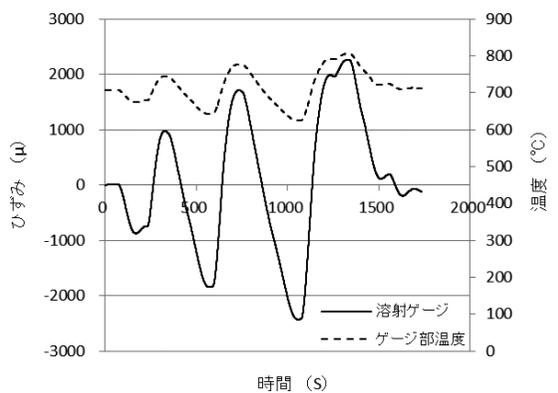


図10 温度変化と見かけひずみ

図10の主なポイントを温度とひずみで整理したのが図11である。見かけひずみの若干の非再現性がプロットのばらつきの原因となっている。

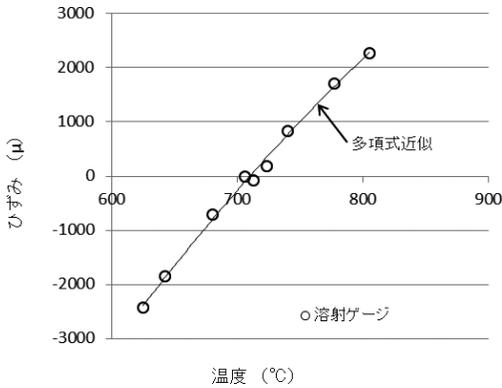


図 11 温度と見かけひずみ

図 12 に約 710°C で静定、ゼロ点を取り、荷重 32.8N を負荷した状態で任意に温度変化させたときのひずみ変化を示す。また、図 11 のプロットから求めた多項式近似により、温度変化で生じた見かけひずみをどの程度除去できるかを確認した。この試験の場合では、温度変化する前の静定しているときの元のひずみ値と多項式近似より求めた 710°C の見かけひずみ値を差し引くと $\pm 60\mu$ 程度の誤差であることが確認できた。

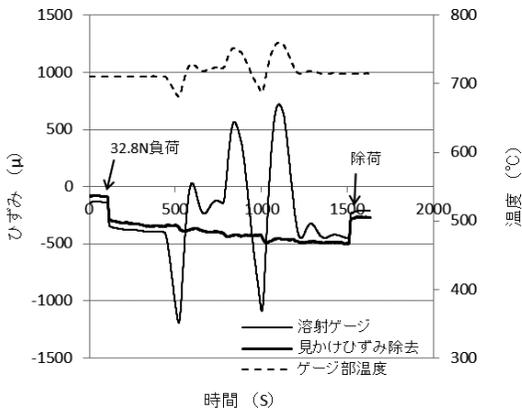


図 12 見かけひずみの除去状況

4. おわりに

簡易な試験装置を用いて、高温環境下の曲げ試験を実施した結果では、溶射ゲージによる静ひずみ測定は一定の精度で可能である。ただし、実際の測定に適用する場合は、被測定物が高温まで昇温し、温度変化しながら応力が生じているというような状況でひずみ測定を行うことになるので、事前に被測定物に対して電気炉等で想定される温度までの昇温、温度変化を再現し、温度変化に対する見かけひずみの変化量を求めておくことが必要となる。

なお、本件で使用した試験装置については、クリープ変形がないと考えられる 300°C での試験で、計算値に若干合わなかったことがあり、原因としては、加熱炉をたて置きにしたことによる上下の温度差の影響が考えられる。改善案として、① TP 固定部のかさ上げ、② 加熱炉をよこ置きにできるよう曲げ試験装置の設計変更などが考えられる。①については前号で紹介した INCONEL600TP に適用した。②については今年度(2017年度)設計し、導入することにした。また、溶射ゲージ施工技能者の育成を課題において、施工技能トレーニング、TP への本施工、測定試験による技能レベルの評価、社内技能認定システムの構築に向けて現在取り組んでいるところである。

参考文献

- (1) 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
- (2) 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