

# 「スコーレ・テクニカル・ブリーフ」第22号

2013年10月

分野:計測技術

テーマ:ひずみゲージを過信していないか？

すぐれモノ紹介:手回し計算機(タイガー計算機)

ひずみゲージは、基本的に接着作業が必要だが、取扱いが比較的容易なため、部品のひずみや応力測定に広く使用されている。

ひずみゲージは、ゲージを取付けた(通常は接着)被測定対象のひずみ(正確には「変位」)を抵抗変化で測定する。その「抵抗変化」は非常に小さいので、一般的にはホイートストーンブリッジ回路を使用して、電流変化として検出する。

今回は、この「抵抗変化」と「接着」に関する留意点(問題)を取り上げる。

## 【1】基本的な計算式:どの程度の抵抗変化を測定しているのか？

基本的な計算式は以下。

$$\Delta R/R = K \cdot \varepsilon \quad \dots\dots \text{式(1)}$$

$\Delta R$ :ゲージの変形による抵抗変化( $\Omega$ )

$R$ :ひずみゲージの初期抵抗( $\Omega$ )

$K$ :ゲージ率(ゲージファクター)

$\varepsilon$ :ゲージのひずみ(被測定物のひずみ)

一般的なひずみゲージ(ゲージ抵抗 $R=120(\Omega)$ 、ゲージ率 $K=2$ )を使用した場合、測定ひずみが $500(\mu)$ とした場合の抵抗変化 $\Delta R$ は、

$$\Delta R = 120 \times (2 \times 500 \times 10^{-6}) = 0.12(\Omega) \text{となる。}$$

ひずみ $\varepsilon = 500(\mu)$ は、スチールの場合ヤング率 $=200,000(\text{MPa})$ 程度であるので、応力は $\sigma = E \cdot \varepsilon = 200,000 \times 500 \times 10^{-6} = 100(\text{MPa})$ となる。

**応力=100(MPa)を0.12( $\Omega$ )の抵抗変化で測定していることになる。**

## 【2】リード線付きひずみゲージ使用時の留意点

ひずみゲージを単独で使用することはまず無い。ゲージ端子を使用してリード線を取付けるか、リード線付きのひずみゲージを使用するのが普通である。

リード線が細い場合あるいは長い場合、温度変動があると大きな計測誤差をもたらす。

下記は、手許にあるひずみゲージ(共和電業。数年前に購入)のパッケージ裏面記載の

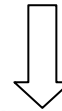
「共和リード線付きゲージの取扱い法」の抜粋である。

4. リード線の温度が変化した場合にはリード線による零点変動が生じます。下に示す式を用いて計算して下さい。  
 (3線式結線法の場合はリード線の温度が変化しても零点変動は生じません。)

$$E_L = \frac{\gamma \cdot \alpha \cdot \Delta T}{K_s \cdot R} \quad \longleftarrow \quad \text{式(2)}$$

- $E_L$ : 零点変動量  
 $\gamma$ : リード線の往復抵抗値  
 $\alpha$ : リード線の抵抗温度係数  
 (銅線=3.8×10<sup>-3</sup>/℃)  
 $R$ : リード線を含んだひずみゲージの抵抗値  
 (表側に記載)  
 $\Delta T$ : 温度変化分  
 $K_s$ : ゲージ率 =  $\frac{R}{(R-\gamma)} \times K$   
 $K$ : リード線の抵抗分 $\gamma$ を含んだゲージ率  
 (表側に記載)

コメント  
 ・抵抗値は24(°C)の値  
 ・「1m当りの往復抵抗値」とは、  
 リード線が2本あるので、  
 トータル2m



リード線の種類 Type of lead wire	リード線の長さ Length of lead wire	1m当りの往復抵抗値 Total resistance value per 1m
ネオマル被覆銅線 φ0.14mm NEOMARL wire (PEW)	0.01~1m	2.46Ω/m
平行ビニール線 0.08mm <sup>2</sup> Parallel vinyl wire	0.3~5.0m	0.44Ω/m
*1平行ビニール線 0.11mm <sup>2</sup> Parallel vinyl wire	6~30m	0.32Ω/m

※1: リード線の長さが6 m 以上は0.11mm<sup>2</sup>を使用しております。

The parallel vinyl wire (0.11mm<sup>2</sup>) is used as the lead wire which length is more than 6m.

ひずみゲージを24℃でキャリブレーションし、124℃の炉に入れて部品の熱ひずみ(熱応力)を測定するものとする。

ゲージ抵抗=120(Ω)、ゲージ率=2とし、リード線は1m(往復で2m)、断面積が0.08 mm<sup>2</sup>の平行ビニール線とする。

ゲージ部は124℃、計測器部は24℃、リード線の温度変化が直線と仮定すると、リード線の平均温度は、(124+24)/2=74℃となり、キャリブレーション時の温度に比べて74-24=50℃上昇することになる。

この温度変化(50℃)をひずみに換算すると以下になる(零点変動により、見かけのひずみとして計測される)。

計算式は、以下で近似しても大勢に影響はない(ただし、リード線の抵抗が大きい場合は、式(2)で計算した方がよい)。

リード線の温度変化に起因するひずみ  $E_L$  は、

$$E_L = (0.44 \times 3.8 \times 10^{-3} \times 50) / (2 \times 120) = 0.000348 \rightarrow 348(\mu)$$

ひずみ  $\varepsilon = 348(\mu)$  は、スチールの場合ヤング率=200,000(MPa)程度であるので、

応力は  $\sigma = E \cdot \varepsilon = 200,000 \times 348 \times 10^{-6} = 69.6$  (MPa) となる。  
 もちろん、リード線が細ければ、温度変化に起因するひずみはより大きくなる。

「自己温度補償のひずみゲージ(なお、ゲージと被測定物の線膨張係数が全く同じ、ということとは無い)を使用しているので問題は無い」と思っていると、とんでもない落とし穴が待っていることになる。

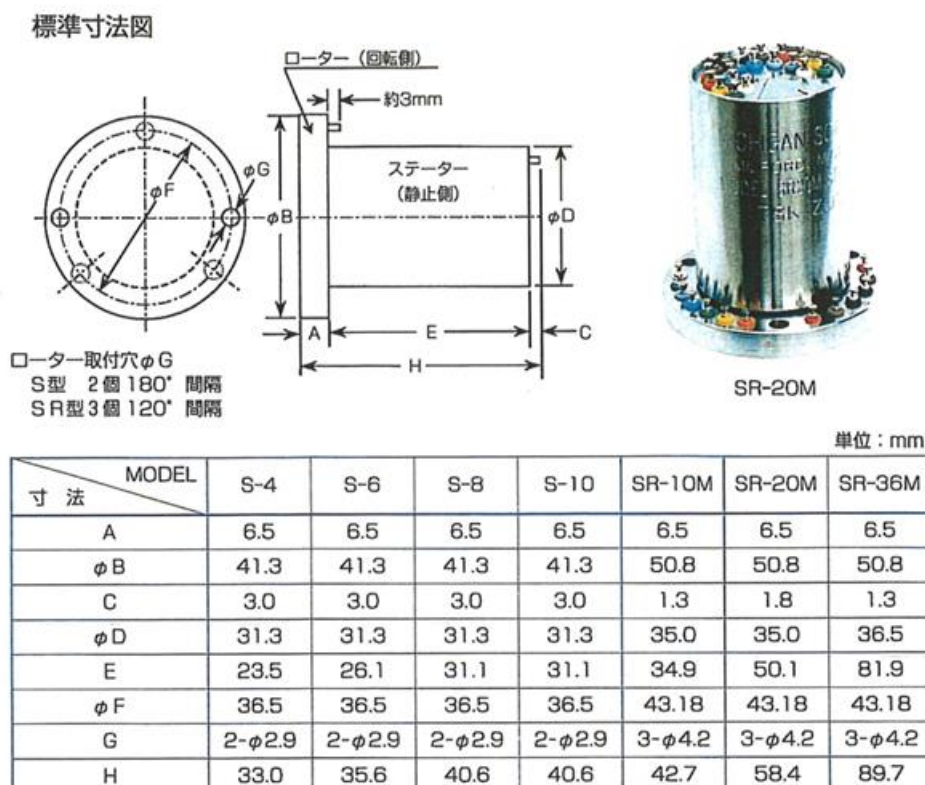
ゲージ抵抗の大きなひずみゲージを使用するか、3線式結線法を採用する等の工夫が必要である。

### 【3】スリップリング使用時の留意点

回転体のひずみを測定する場合、テレメータ(無線信号を使用)を使用する場合があるが、テレメータは結構ノイズがのりやすい。

そこで、スリップリング(接触型)を使用することも多いが、スリップリングで問題になるのは、「接触抵抗」である。

以下は(株)東測のスリップリングである。S-6型(6,000rpm まで使用可能)は、随分昔に使用したことがある(計測上の問題は無かった)。



カタログによると、「接触抵抗」は0.1  $\Omega$  以下、となっている。

一般的なひずみゲージ(ゲージ抵抗  $R = 120$  ( $\Omega$ )、ゲージ率  $K = 2$ )を使用した場合、0.1 ( $\Omega$ )をひずみに換算すると、式(1)より、

$(0.1/120)/2=0.000417 \rightarrow 417(\mu)$

すなわち、接触抵抗により、大きな「みかけのひずみ」が発生することになるので、注意が必要である。

ただし、「接触抵抗によるみかけのひずみがある」ことを理解していれば、スリップリングは使いやすい。

#### 【4】ゲージ接着に関する留意点

さて、ひずみゲージは被測定物に接着して使用するのが一般的であるが、ひずみゲージが**正しく接着されたかどうかをどのように判定、検査するのか？**

実は、「**ゲージ貼り付けの可否を検査する方法がない。……結局は習熟が必要になる**」<sup>1)</sup>というのが実情である。未知のひずみを測定するのだから、測定結果が正しい、と判定する基準は無いのである。

ではどうするのか？ 一つの方法が計測とシミュレーション(解析)を併用することである。シミュレーションも、所詮「ある条件(荷重条件、拘束条件)での近似計算」だが、シミュレーション結果を参考にすることで、計測結果の信頼性が高くなる。また、計測をすることでシミュレーション結果の信頼性も高くなる。

#### \* 引用、参考文献

1. 日比野文雄 著:曲げ変形の物理学、裳華房(2010年11月20日、第1版 第1刷)、P220~221

#### 【5】測定誤差について

計測には測定誤差がつきものである。

**測定誤差が大きいことが問題では無い。測定誤差の大きさを知らないことあるいは測定誤差を(あえて)無視することが問題なのである。**

#### 【すぐれモノ紹介】

今回紹介するすぐれモノは「手回し計算機(器)(タイガー計算機(器))」です。

宮崎駿監督のアニメ映画「風立ちぬ」が注目を浴びています。零戦(零式艦上戦闘機)の設計計算に駆使されたのが、今回紹介する「手回し計算機(タイガー計算機)」です。

1923年に大本寅治郎(大阪)により発明され、「虎印計算器」として販売されたが、なかなか売れず、「タイガー計算器」に改名された<sup>2)</sup>。日本名では売れずカタカナにしたら売れた、というのはいかにも日本的であるが……。



写真1は外観、写真2は内部構造、写真3は使用法解説書の一部です。この計算機は数年前にインターネットのオークションで手に入れたもので、完動品です。製造後50年近くになると思うが、内部は錆びも無く、きれいです。



写真1(外観)

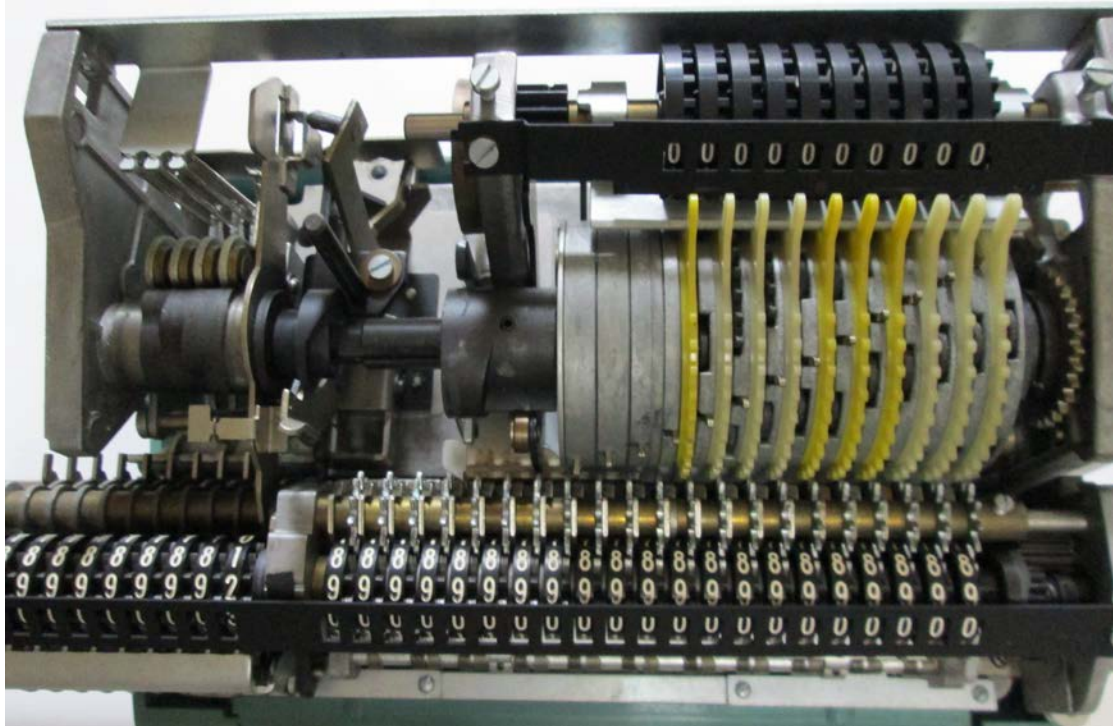


写真2(内部構造:見事な歯車、カム等のメカニズム)

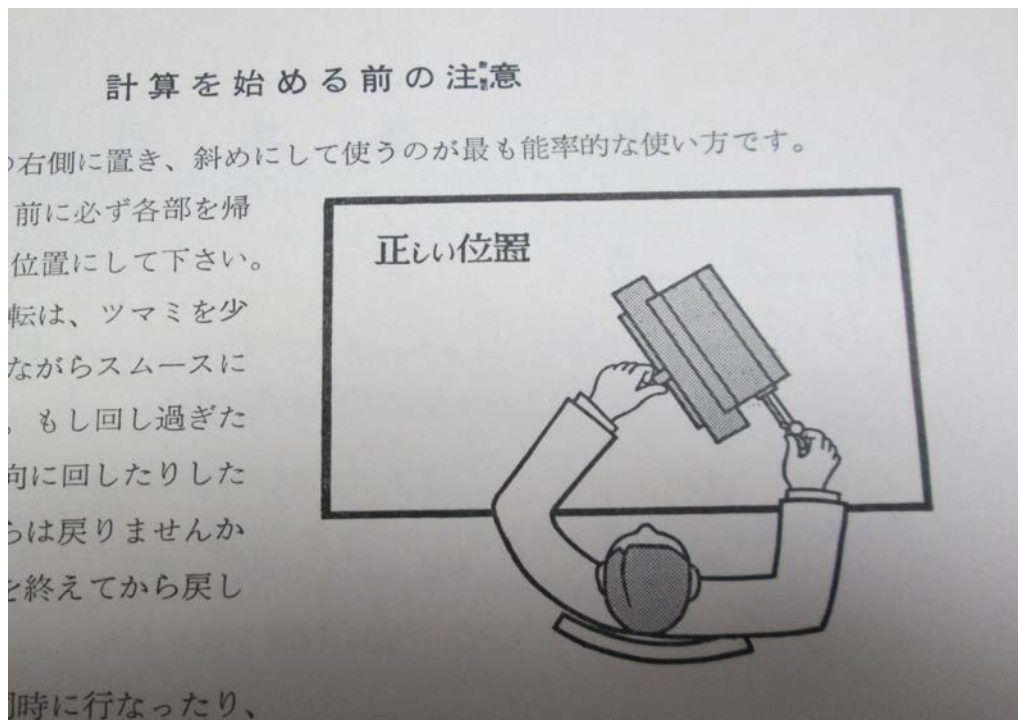


写真3(使用法解説書の一部)

計算は、加減乗除の他、特殊計算として開平(いわゆるルート)も出来る(使用法解説書)。

乗算は加算の繰り返しです。100×500の場合、100を500回足すことです。これは、タイガー計算器ではハンドルを500回廻すことに相当しますが、それでは大変なので、「桁送りレバー」を使用して5回廻せばよい様になっています。

ハンドル部に電動モーターを付けたモノも開発されたようです(私は見たことがありませんが・・・)。

零戦(零式艦上戦闘機)の設計には、100人単位の計算工がタイガー計算機(写真1は比較的新しいモデル。零戦の設計には初期のモデルを使用)を駆使して数値計算を行った、と何かの資料に書いてあったと記憶しています(資料が不明なので、記憶違いであればお詫びします)。

手回し計算機(タイガー計算機)は優れた機械遺産です。

機械式計算機に関する書籍(美しい写真付き)としては、参考文献3, 4があります。

\* 引用、参考文献

2. タイガー手廻計算器資料館(<http://www.tiger-inc.co.jp/temawashi/temawashi.html>)
3. 渡邊祐三 著:美 機械式計算機の世界、ブレン出版(2008年10月31日、初版 第2刷)
4. 渡邊祐三 著:続 美 機械式計算機の世界、ブレン出版(2008年3月21日、初版 第1刷)

\*\*\*\*\*問題解決のお手伝いをします\*\*\*\*\*

(有)スコレ・ティエ・エー・リサーチ

電話:052-723-9227、FAX:052-723-9228

E-mail:info@schole-rd.co.jp ホームページ` <http://www.schole-rd.co.jp>