

UDC 620.172.22

: 531.79

# 航空技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

TR-6

高温歪ゲージの温度特性

竹 中 幸 彦

1960年12月

航空技術研究所

NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

# 高温歪ゲージの温度特性

竹 中 幸 彦

昭和35年2月25日 宇宙科学技術シンポジウムにて講演  
昭和35年9月10日 第4回材料試験連合講演会にて講演  
Proceedings of the Fourth Japan Congress of Testing  
Materials に掲載予定

## Temperature Characteristics of High Temperature Strain Gage

By Yukihiro TAKENAKA

The necessity of strain measurement in high temperature has been increased not only in the field of aeronautical science but also in many other fields of engineering.

In this paper the theoretical analysis has been carried out on the zero point shift of the high temperature strain gages due to temperature variation which is one of the most important temperature characteristics and the necessary condition of the temperature compensating gage has been shown basing on the results of the analysis. It was also shown that the theory is in good agreement with experimental results and finally problems concerning the high temperature strain gages were indicated with a brief discussion.

### 1. 緒 論

最近航空機の著しい高速化に伴い、空力加熱を受ける高速機体の応力測定の実用性が増大し、高温における歪測定技術の確立が急務となってきた。航空以外においても原子力工業、化学工業等の高温を伴う各種産業分野においてその開発が要望せられ、最近高温歪ゲージについての研究が内外において活発となり、ある程度実用可能な高温歪ゲージが市販される段階に至っている。高温における歪測定には現在のところ接着型の抵抗線歪ゲージが最も取扱い易いので主として用いられているが、実用上は後述のように未解決の問題が多く、信頼度の高い歪測定を行なうためにはさらに多くの研究がなされねばならぬと考えられる。

高温歪ゲージの使用法には一定温度状態での歪測定に用いる場合と、温度変動状態下で用いる場合とがある。前者の場合には比較的問題は少ないが、後者の場合、たとえば速度変化の著しい高速機体のように、機体各部が急激に不均一な温度変動を受けることによって熱応力を生じ、かつ同時に空気力等による外荷重を受ける物体の歪測定には多くの問題が生ずる。これら

の問題を解決するためには高温歪ゲージの諸特性の個々についての基礎的な研究が必要である。

一般に歪ゲージによって計測される歪は、試料金属の応力に対応する歪と、温度変動に基づくゲージ線の抵抗変化によって生じた見掛けの歪とが組合されたものである。したがって応力に対応する真の歪を求めるためにはこの見掛けの歪、つまり「温度変動に基づく零点移動量」が正確に算定せられねばならない。この零点移動の特性は高温歪ゲージの温度特性のうちで最も重要なものの一つであって、この問題については既に池田、三浦氏等<sup>(1)</sup>の基礎研究およびその他二、三の研究<sup>(2)</sup>があるが、それらにはさらに理論的基礎づけが必要であると思われる。

ここではゲージと試料金属との間の接着が完全である場合、つまりこの両者間にはすべりがなく、かつ接着剤の熱による収縮または膨脹がなく、試料金属の歪は100%ゲージに伝達されるとした場合のゲージの零点移動について理論解析を行ない、温度補償用歪ゲージの具備すべき条件について述べる。さらに理論と零点移動についての実験結果との比較をし、最後に高温歪ゲージの問題点を検討する。

## 2. 記 号

$T$ :	温度	(°C)
$e$ :	ゲージ線の歪	
$\varepsilon$ :	試料金属の歪	
$R$ :	ゲージ線の電気抵抗	( $\Omega$ )
$\rho$ :	ゲージ線の比抵抗	( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{mm}$ )
$l$ :	ゲージ線の長さ	(mm)
$\nu$ :	ゲージ線のポアソン比	
$A$ :	ゲージ線の断面積	( $\text{mm}^2$ )
$r$ :	ゲージ線の断面の半径 (断面は円と仮定する)	(mm)
$\alpha_R$ :	ゲージ線の抵抗温度係数	( $1/^\circ\text{C}$ )
$\alpha_g$ :	ゲージ線の線膨脹係数	( $1/^\circ\text{C}$ )
$\alpha_m$ :	試料金属の線膨脹係数	( $1/^\circ\text{C}$ )
$K$ :	温度 $T$ におけるゲージファクター	
$K_0$ :	常温におけるゲージファクター	

## 3. 常温使用の歪ゲージ理論の検討

高温歪ゲージについての解析を行なう前に、まず常温で一定温度のもとで使用するゲージについての理論を検討しよう。

ここではゲージと試料金属との間の接着は完全であって、試料の歪は100%ゲージに伝達さ

れると仮定する。一般にゲージ抵抗  $R$  は

$$R = \rho l / A \quad (1)$$

で表わされるから、歪の微小変化  $\Delta\varepsilon$  によって生じた、 $\rho$ ,  $l$ ,  $A$  の微小変化量  $\Delta\rho$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta A$  に対するゲージ抵抗の変化率は

$$\Delta R / R = \Delta\rho / \rho + \Delta l / l - \Delta A / A \quad (2)$$

である。この場合温度変化はなく  $T = \text{一定}$  であるから、 $\Delta\rho / \rho$ ,  $\Delta l / l$ ,  $\Delta A / A$  はすべて  $\Delta\varepsilon$  の関数である。したがって

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left( \frac{d\rho}{d\varepsilon} \right) \Delta\varepsilon / \rho \quad (3)$$

$$\Delta l / l = \Delta\varepsilon \quad (4)$$

$$\Delta A / A = \Delta(\pi r^2) / \pi r^2 = 2\Delta r / r = -2\nu\Delta\varepsilon \quad (5)$$

である。いま

$$\left( \frac{d\rho}{d\varepsilon} \right) / \rho = \eta \quad (6)$$

とおくと、 $\eta$  は比抵抗の歪による変化率を表わす係数となる。したがって (3) 式より

$$\Delta\rho / \rho = \eta\Delta\varepsilon \quad (7)$$

となる。(4), (5) および (7) 式を (2) 式に代入すると

$$\Delta R / R = (\eta + 1 + 2\nu)\Delta\varepsilon \quad (8)$$

となる。したがってゲージ抵抗の歪による変化率、すなわちゲージファクターは

$$K_0 = \eta + 1 + 2\nu \quad (9)$$

になる。一般に金属のポアソン比  $\nu$  は 0.3 程度の値を有するから、もし  $\eta = 0$  であれば  $K_0$  は 1.6~1.7 程度の値をもつべきである。しかるに、ゲージ線に用いられる各種金属の  $K_0$  の値は第 1 表に示す通りであって、1.6~1.7 程度の値を有する金属は少ない。このことは多く

第 1 表 歪ゲージ用各種金属の常温におけるゲージファクター

材 料	組 成 (数字は成分の%)	ゲージ ファクター	材 料	組 織 (数字は成分の%)	ゲージ ファクター
Manganin	Mn: 13 Cu: 87	0.45~0.5	Nichrome V	Ni: 80 Cr: 20	2.0
Advance	Ni: 43 Cu: 57	2.0~2.1	Karma	Ni: 73, Al+Fe: 7 Cr: 20	2.0
Constantan	Ni: 40 Cu: 60	1.7~2.0	Pt-Ir	Pt: 80 Ir: 20	6.0
Nichrome	Ni: 60, Cr: 16 Fe: 24	2.0~2.5	Minalpha	Cu: 84, Mn: 12 Ni: 4	0.5~2.1
Iso-elastic	Ni: 36, Fe: 52 Cr: 8, Mn+Mo: 4	3.5~3.6			

の金属において  $\eta$  の値が零でないことを示している。さらに最近新しい歪検出器の要素として注目され始めたゲルマニウム単結晶のごときは  $K_0$  の値が 150 程度のきわめて大きな値を有している<sup>(3)</sup>。このような大きな  $K_0$  の値はこの金属の  $\eta$  の値がきわめて大きいことによるのであって、このことは物性論により理論的にも明らかにされている。

#### 4. 温度変動に基く歪ゲージの零点移動

次に温度変動を伴う高温歪ゲージについて考察しよう。この場合にも接着は完全でかつ接着剤の熱による膨脹または収縮がないものと仮定する。

温度変動を伴う場合には前述の  $\rho$ ,  $l$ ,  $A$  およびそれらの変化量はいずれも歪のみならず温度の関数になる。ここで温度  $T$  および歪  $e$  の微小変化量  $\Delta T$  および  $\Delta e$  に対する  $\Delta\rho/\rho$ ,  $\Delta l/l$ ,  $\Delta A/A$  を計算しよう。

$$\Delta\rho/\rho = \{(\partial\rho/\partial T)_e \Delta T + (\partial\rho/\partial e)_T \Delta e\} / \rho \quad (10)$$

である。 $\alpha_R$  の定義から明らかに

$$(\partial\rho/\partial T)_e / \rho = \alpha_R \quad (11)$$

であり、(6) 式と同様に

$$(\partial\rho/\partial e)_T / \rho = \eta \quad (12)$$

とおくと、(10) 式は

$$\Delta\rho/\rho = \alpha_R \Delta T + \eta \Delta e \quad (13)$$

となる。ここでゲージ線の歪変化量を表わす  $\Delta e$  は試料金属の歪変化量  $\Delta\varepsilon$  と、試料およびゲージ線の線膨脹係数の差に基づく歪の和と考えられる。すなわち

$$\Delta e = (\alpha_m - \alpha_g) \Delta T + \Delta\varepsilon \quad (14)$$

と表わすことができる。(14) 式を (13) 式に代入すると、

$$\Delta\rho/\rho = \{\alpha_R + \eta(\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T + \eta \Delta\varepsilon \quad (15)$$

となる。次に長さの変化率は

$$\Delta l/l = \{(\partial l/\partial T)_e \Delta T + (\partial l/\partial e)_T \Delta e\} / l \quad (16)$$

である。ここで明らかに

$$(\partial l/\partial T)_e / l = \alpha_g \quad (17)$$

$$(\partial l/\partial e)_T / l = 1 \quad (18)$$

であるから、(16) 式に (14), (17), (18) 式を代入すると

$$\Delta l/l = \alpha_g \Delta T + \Delta\varepsilon = \alpha_m \Delta T + \Delta\varepsilon \quad (19)$$

となる。次に断面積の変化率は

$$\Delta A/A = \{(\partial A/\partial T)_e \Delta T + (\partial A/\partial e)_T \Delta e\} / A \quad (20)$$

である。ここで

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_e \bigg/ A = \left\{ \frac{\partial(\pi r^2)}{\partial T} \right\}_e \frac{1}{\pi r^2} = 2 \left(\frac{\partial r}{\partial T}\right)_e \cdot \frac{1}{r} = 2\alpha_g \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial e}\right)_T \bigg/ A = 2 \left(\frac{\partial r}{\partial e}\right)_T \cdot \frac{1}{r} = -2\nu \left(\frac{\partial l}{\partial e}\right)_T \cdot \frac{1}{l} = -2\nu \quad (22)$$

である。(14), (21) および (22) 式を (20) 式に代入すると

$$\Delta A/A = 2\{\alpha_g - \nu(\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T - 2\nu \Delta \varepsilon \quad (23)$$

となる。

(15), (19) および (23) 式によって、温度  $T$  および試料の歪  $\varepsilon$  の微小変化量  $\Delta T$  および  $\Delta \varepsilon$  に対するゲージ線の比抵抗、長さ、断面積の変化率が与えられたので、これらの式を (2) 式に代入すると

$$\Delta R/R = [\alpha_R + \eta(\alpha_m - \alpha_g) + \alpha_m - 2\{\alpha_g - \nu(\alpha_m - \alpha_g)\}] \Delta T + (\eta + 1 + 2\nu) \Delta \varepsilon \quad (24)$$

となる。この式より温度  $T$  におけるゲージファクター  $K$  は

$$K = \partial(\Delta R/R) / \partial \varepsilon = \eta + 1 + 2\nu \quad (25)$$

となることがわかる。したがって

$$\eta = K - (1 + 2\nu) \quad (26)$$

となる。この  $\eta$  の値を (24) 式に代入すると

$$\Delta R/R = \{\alpha_R - \alpha_g + K(\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T + K \Delta \varepsilon \quad (27)$$

となる。いま歪計のゲージファクターを最初に常温におけるゲージファクター  $K_0$  に設定して歪測定を行なう場合を考えると、

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \bigg/ K_0 = \left\{ \frac{\alpha_R - \alpha_g}{K_0} + \frac{K}{K_0} (\alpha_m - \alpha_g) \right\} \Delta T + \frac{K}{K_0} \Delta \varepsilon \quad (28)$$

である。ここで  $(\Delta R/R)/K_0$  は歪計によって直接測定されるいわゆる相当歪  $\Delta \varepsilon_{eq}$  である。いま

$$\alpha_T = (\alpha_R - \alpha_g)/K_0 + (\alpha_m - \alpha_g)(K/K_0) \quad (29)$$

とおくと、(28) 式は

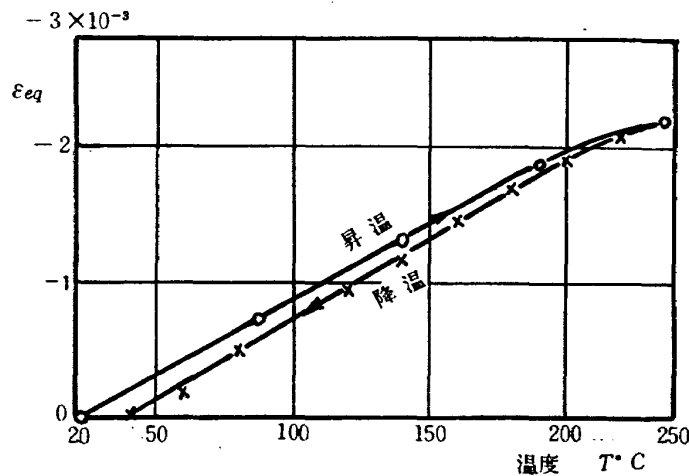
$$\Delta \varepsilon_{eq} = \alpha_T \Delta T + (K/K_0) \Delta \varepsilon \quad (30)$$

となり、測定歪量  $\Delta \varepsilon_{eq}$  は温度変動に基づくゲージの零点移動量を表わす  $\alpha_T \Delta T$  と、試料金属の歪  $\Delta \varepsilon$  による歪  $(K/K_0) \Delta \varepsilon$  との和となる。したがって、(29) 式によって  $\alpha_T$  が求められれば、測定歪から試料の真の歪を計算することができる。

ここで  $\Delta \varepsilon = 0$  の場合、つまり試料金属に何らの応力も作用しない状態で単に加熱した場合を考えると

$$\Delta \varepsilon_{eq} = \alpha_T \Delta T \quad (31)$$

となり、測定歪は零点移動量そのものを表わし、 $\alpha_T$ はそのときの  $T \sim \epsilon_{eq}$  曲線の接線の勾配を表わす。常温より加熱するさいある温度範囲までは  $T \sim \epsilon_{eq}$  の関係は直線的であり、したがって  $\alpha_T$  の値は一定である。第1図に MT ゲージについての実験結果の一例を示す。この直



第1図 MT ゲージの零点移動の一例  
試料金属：軟鋼 外荷重および熱応力は零

線範囲内においては  $\alpha_R$ ,  $\alpha_g$  および  $\alpha_m$  はそれぞれ一定であると考えられるから  $K=K_0=$ 一定となる。したがってこの場合には (29) 式は

$$\alpha_T = (\alpha_R - \alpha_g) / K_0 + (\alpha_m - \alpha_g) \quad (32)$$

となる。ゲージおよび試料金属が与えられれば、(32) 式の右辺の各物理定数がきまるから  $\alpha_T$  を計算することができる。この計算値と実験によって得られた  $\alpha_T$  の値とを比較することにより理論の妥当性を検討することができる。

## 5. 実験結果との比較

目下市販されている高温歪ゲージは米国 B 社の SR-4 ゲージ、国産では K 社の MT および KP ゲージ、T 社 TML ゲージ等であり、現在開発中のものとして K 社の HT ゲージおよびその他数社のものがある。われわれの所でも現在これらのゲージの特性試験を進めているが、ここでは既に他の研究者によって発表された実験結果との比較について述べる。

### (1) MT ゲージ

このゲージの抵抗線はアドバンス線よりなり、その抵抗温度係数は製造工程のわずかな差異によって著しく変動するが、ここで用いたゲージの  $\alpha_R$ ,  $\alpha_g$  および  $K_0$  の値は次の通りである。

$$\alpha_R = -8 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\alpha_g = 13 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$K_0 = 2.0$$

このゲージの  $\alpha_T$  = 一定の温度範囲は室温→約 200°C である。またこのゲージベースはアスベスト紙から成り、シリコン系樹脂によって試料金属に接着する。実験によって得られた  $\alpha_T$  と計算値との比較を第 2 表に示す。

第 2 表 MT ゲージの  $\alpha_T$  の算値計と実験値の比較

試料金属	$\alpha_m$	$\alpha_T$ (計算値)	$\alpha_T$ (実験値)
黄銅	$19.0 \times 10^{-6}$	$-5.5 \times 10^{-6}$	$-5.2 \times 10^{-6}$ (4)
ガラス	$9.0 \times 10^{-6}$	$-14.5 \times 10^{-6}$	$-14.5 \times 10^{-6}$ (4)
オイルストーン	$11.4 \times 10^{-6}$	$-12.1 \times 10^{-6}$	$-11.3 \times 10^{-6}$ (4)
鋼	$12.0 \times 10^{-6}$	$-10.5 \times 10^{-6}$	$-10.4 \times 10^{-6}$ (5)

### (2) FNH-25-12 Foil gage (米国 B 社製)

このゲージの抵抗部はニッケルクロム V の箔からなり、その  $\alpha_R$ ,  $\alpha_g$  および  $K_0$  の値は次の通りである。

$$\alpha_R = 115 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\alpha_g = 13.5 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$K_0 = 2.2$$

このゲージの  $\alpha_T$  = 一定の温度範囲は室温→約 500°C である。接着にはセラミック系の接着剤を用い、ゲージの箔を直接試料金属の表面に転写して後数回の焼付を行なう。その接着操作は面倒でかなりの熟練を要する。 $\alpha_T$  の実験値と計算値の比較を第 3 表に示す。

第 3 表 FNH-25-12 箔ゲージの  $\alpha_T$  の計算値と実験値の比較

試料金属	$\alpha_m$	$\alpha_T$ (計算値)	$\alpha_T$ (実験値)
黄銅	$19.0 \times 10^{-6}$	$51.6 \times 10^{-6}$	$49.4 \times 10^{-6}$ (4)
ジュラルミン (24S)	$22.6 \times 10^{-6}$	$55.1 \times 10^{-6}$	$55.2 \times 10^{-6}$ (4)

### (3) HT ゲージ

このゲージは静的歪測定の場合には 500°C まで、動的歪測定の場合には 800°C までの歪測定を目標として目下開発研究されているゲージである。ゲージ素線はニッケルクロム V を用いている。このゲージの  $\alpha_R$ ,  $\alpha_g$  および  $K_0$  の値を次に示す。

$$\alpha_R = 115 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$\alpha_g = 13.5 \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

$$K_0 = 2.15$$

またこのゲージの  $\alpha_T$  = 一定の温度範囲は室温→約 500°C である。 $\alpha_T$  の実験値と計算値の比較を第 4 表に示す。



第4表 HT ゲージの  $\alpha_T$  の計算値と実験値の比較

試料金属	$\alpha_m$	$\alpha_T$ (計算値)	$\alpha_T$ (実験値)
特殊耐熱鋼	$13.3 \times 10^{-6}$	$47.0 \times 10^{-6}$	$40.8 \times 10^{-6}$ (6)

$\alpha_T$  の実験値は同一ゲージでも加熱サイクルごとに多少変化するし、昇温と降温の場合にも異なるので、2~4表に示した実験値はそれぞれの平均値を取ったものである。これらの実験結果からみると理論値はかなりよく実験値と合うことがわかる。

## 6. 温度補償用歪ゲージ

温度変動に基づく零点移動がなく、試料金属の応力に基づく歪のみを検出できるいわゆる温度補償用歪ゲージができれば実用上きわめて便利である。このようなゲージの具備すべき条件は(30)式より、 $\alpha_T=0$ であることがわかる。したがって(29)式より

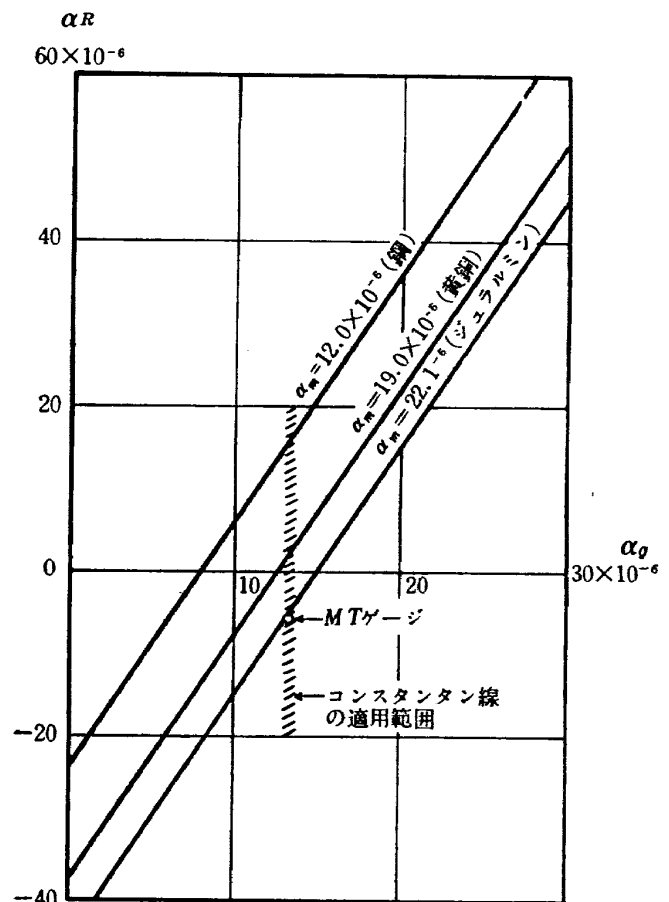
$$\alpha_T = (\alpha_R - \alpha_g) / K_0 + (\alpha_m - \alpha_g)(K / K_0) = 0 \quad (33)$$

である。よって、 $K=K_0$  の場合には

$$\alpha_R - (1 + K_0)\alpha_g = -K_0\alpha_m \quad (34)$$

である。故に試料金属が与えられその  $\alpha_m$  の値がわかれば、(34)式を満足する  $\alpha_R$ 、 $\alpha_g$  および  $K_0$  の値を有する歪ゲージはその試料金属に対して温度補償用歪ゲージとして利用できる。同一素材で  $\alpha_g$  および  $K_0$  の値を大きく変えることは不可能であろうが、 $\alpha_R$  の値はコンスタンタン線などのような銅ニッケル合金では熱処理の仕方によってかなり広範囲に変えることができる<sup>(7)(8)</sup>。したがって  $\alpha_m$  の異なる種々の試料金属に対して温度補償用歪ゲージを作ることが可能である。

一例として  $K_0=2.0$  の場合の温度補償用歪ゲージの  $\alpha_R \sim \alpha_g$  の関係を  $\alpha_m$  をパラメータとして表わしたものが第2図である。コンスタンタン線では  $K_0 \approx 2.0$ 、 $\alpha_g = 13.0 \times 10^{-6}$ 、 $\alpha_R =$



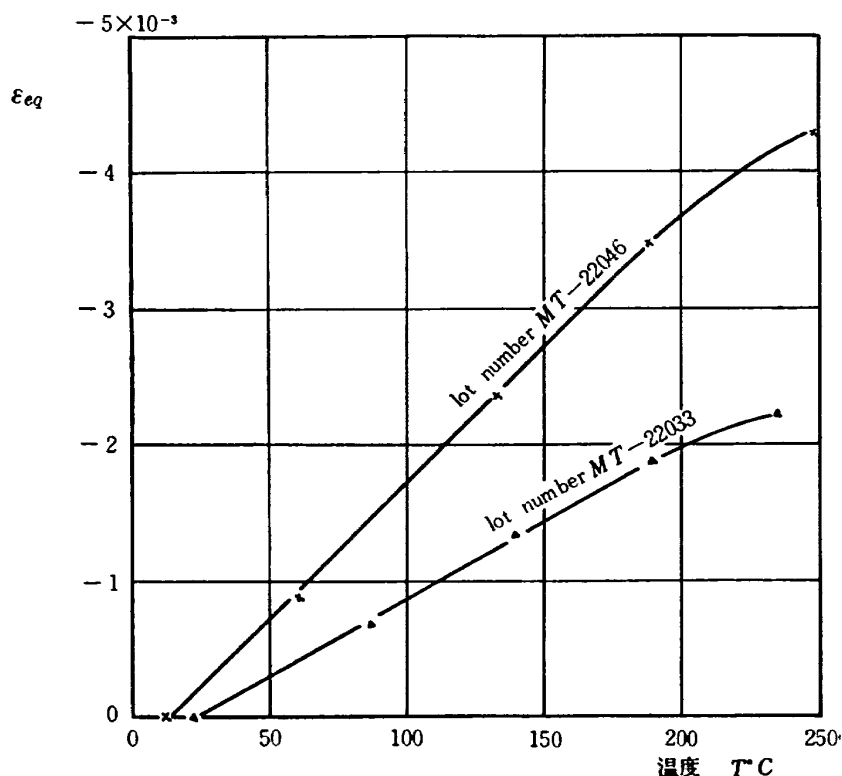
第2図  $K_0=2.0$  の場合の温度補償用歪ゲージの  $\alpha_R \sim \alpha_g$  の関係

$(+20 \sim -20) \times 10^{-6}$  であるから、図からわかるように適当な  $\alpha_R$  の値を有するコンスタンタン線は鋼，黄銅，ジュラルミン等種々の金属に対して温度補償用歪ゲージとして利用できる。また先に示した MT ゲージは  $\alpha_R = -8 \times 10^{-6}$ ， $\alpha_q = 13 \times 10^{-6}$  であるから，ジュラルミンに対する温度補償用ゲージとなる。この図からさらにニクロム V のように  $\alpha_R$  の値が著しく大きいゲージは温度補償用歪ゲージとして不適格であることがわかる。

## 7. 高温歪ゲージの問題点およびその検討

高温歪ゲージ使用上の問題点を列挙すると次の通りである。

(1) 均一性 同一種類のゲージであってもその温度特性は必ずしも同一ではない。特に lot number の異なる場合にはその差が著しい。その一例を第3図に示す。



第3図 lot number の相異なるによる零点移動の差異を示す一実験例

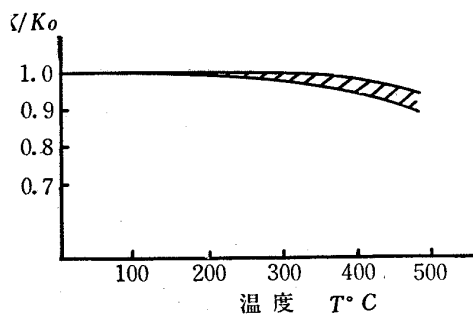
使用ゲージ：MT ゲージ， 試料金属：炭素鋼板  
外荷重および熱応力は零

(2) 再現性 同一ゲージであっても熱サイクルを繰返すたびにその温度特性が変化する。

(3) 零点移動の非直線性とヒステリシス ある温度以上では零点移動は温度に対して直線的でなくなり，その状態で温度を下げればヒステリシスループを描く。このことは昇温の場合と降温の場合とでは同一温度でも零点移動量の異なることを示し，温度変動下での歪測定精度を損なう原因の一つとなっている。このようなループの一例が第1図に示されている。

(4) ゲージファクターの変化 ゲージファクターは温度の関数である。その一例を第4図

に示す。(30)式からわかるように、零点移動の補正をしても  $K$  の値が変化すれば測定歪には  $(K/K_0-1)$  の誤差を生ずる。



第4図 MTゲージの  $K$  の変化<sup>(5)</sup>

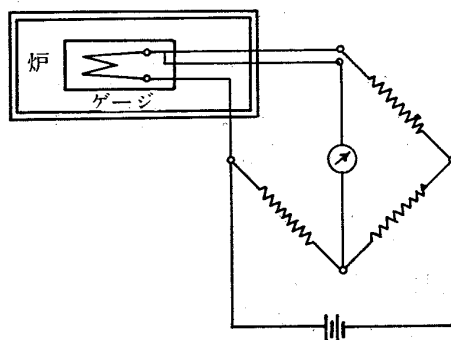
(5) 寿命 寿命は使用する最高温度とその保持時間に関係するが、熱サイクルを数回繰返すのみで温度特性が著るしく変化して使用に耐えなくなる場合がある。

(6) 接着操作 現在市販されている高温歪ゲージは接着後数回一定温度での熱処理を要するものが多い。大きな構造物に接着する場合多点を完全に同一状態で熱処理することは不可能である。

以上あげた他にも種々の問題があるが、ここでは一応上記諸問題のみについて検討しよう。まず高温歪ゲージの構成要素を考えると

- (1) ゲージ抵抗線または箔
- (2) ゲージベース
- (3) 接着剤
- (4) リード線

である。このうち(4)のリード線の温度変化による抵抗変化の影響は第5図に示すような三線配線方式を採用すれば除去されるのでここでは考慮しない。結局(1)~(3)の各要素の特性



第5図 リード線の影響を除去するための三線配線方式

が相互に相関連して高温歪ゲージの複雑な温度特性を決定することになる。

まず最初にゲージ素線(または箔)について考える。素線はいうまでもなく歪ゲージの主要

部分であって、この特性によって歪ゲージの温度特性は大きく左右される。先に述べたように素線の製造過程における熱処理の差異やその成分の僅かな変動によって  $\alpha_R$  の値は大きく変化する。したがって多点の同時測定を行なう場合には成分および製造工程が全く同一な、同一 lot number の歪ゲージを用いるべきである。また再現性およびヒステリシスの点から考えると零点移動の直線域の大きなものが好ましい。その点ニクロム V はコンスタンタンより優れていて  $500^{\circ}\sim 600^{\circ}\text{C}$  位まではほぼ直線性が保たれる。しかしながらニクロム V の  $\alpha_R$  の値はコンスタンタンのそれよりも一桁高く、 $\alpha_T$  の値が著しく大きくなるので見掛けの歪が大となり、温度測定の精度がよくなると歪測定に大きな誤差を生ずることになる。このように高温歪ゲージに最も適した素線材料の開発研究は今後ますます必要である。次に線材と箔の優劣については、製作上の難易は別として、箔の方が接着面積が広くて歪伝達の点で優れていると考えられる。

次にゲージベースと接着剤について考えよう。これらのものはいずれもゲージ素線と試料金属の中間に存在し、両者の相対変位を拘束しているものである。したがってこれらのものが加熱サイクル中に収縮または膨脹してその変形が残留すると再現性が悪くなり、ヒステリシスループおよび見掛けの残留歪を生ずる原因となる。また使用温度限界および寿命はゲージ素線そのものよりもむしろこれらの材料によって決定されることが多いようである。ゲージベースの影響を取除くために米国 B 社の SR-4 ゲージのようにベースのない転写型ゲージにするのも一つの解決法である。接着剤については高温まで安定であることが第一の必要条件であるが、さらに接着操作が簡単であり、しかも熱処理の多少の相異がゲージの特性に影響をおよぼさないものが要求される。特に常温接着後熱処理の必要がなく、かつ高温まで安定なものが見出されれば実用上甚だ便利である。

## 7. 結 論

空力加熱を受ける高速機体の構造強度上の諸問題を研究するために不可欠な高温歪ゲージの温度特性について述べた。特にその中でも主要な特性である「温度変動に基づく零点移動」について理論解析を行い、零点移動量は

$$\alpha_T \Delta T = \{(\alpha_R - \alpha_g) / K_0 + (\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T$$

であることを導き、 $\alpha_T$  の理論値は各種ゲージ、各種試料金属に対する実験値とよく合うことを示した。またこの理論結果に基づいて、温度補償用歪ゲージの具備すべき条件は

$$\alpha_T = (\alpha_R - \alpha_g) / K_0 + (\alpha_m - \alpha_g) = 0$$

であることを導き、各種試料金属に対して適当な  $\alpha_R$  を有するゲージ素線を用いれば、温度補償用歪ゲージが作製可能であることを示した。最後に、高温歪ゲージの使用上の諸問題を挙げ

て簡単な検討を加えた。

この研究に対して実験資料を提供された各位ならびに実験に協力された江川幸一、小川鉦一両技官に感謝の意を表す。

## 文 献

- (1) 池田, 三浦, 小林: 熱応力測定に関する仮説, ロケット研究ノート (東大航研) 第2巻 第34号 (1960)
- (2) たとえば J. Yarnell: Resistance Strain gage, Their Construction and Use (1951)
- (3) 五十嵐: 豊田理研々究報告, 14 (1959)
- (4) 植村, 冬木: 高温における歪測定, 応力測定委員会講演 12月 (1959)
- (5) 渡辺: 高温用抵抗線歪計, 電氣的歪測定技術講習会テキスト 10月 (1959)
- (6) 渡辺, 泉: 試作 HT 高温ゲージの特性, 共和技報 No. 21 9月 (1959)
- (7) W. Wiebe: The Behavior of Fine Nickel-Copper Alloy Wires with Negative Temperature Coefficients of Resistance, National Aeronautical Council of Canada, MS 100, 2月 (1959)
- (8) 吉田: 抵抗線型歪ゲージの温度特性, 日本金属学会誌 第24巻 第3号 (1960)

---

## 航空技術研究所報告6号

昭和35年12月発行

発行所 航空技術研究所  
東京都三鷹市新川700  
電話武蔵野(022)(3)5171(代表)

印刷所 笠井出版印刷社  
東京都港区芝南佐久間町1の53

---