

UDC 536.45

# 航空宇宙技術研究所資料

TM-62

高温歪ゲージの温度特性試験

江川 幸一

1965年10月

航空宇宙技術研究所

既 刊 資 料

TM- 1	高マッハ数風洞について (I)	1961年11月	平橋 一, 木本 一, 清水 福寿
TM- 2	航空技術研究所計数型電子計算機設備 プログラムライブラリー (I)	1962年 2月	樋口 好美, 三能 鳥海, 長細 川本, 橋登, 井上 政一
TM- 4	18cm×20cm超音速風洞について	1962年 5月	木本 一, 登雄, 清水 福寿
TM- 5	遷音速流の線型理論	1962年 8月	戸川 隼人, 高橋 垣芳, 佐藤 幸雄
TM- 6	18cm×18cm遷音速風洞整備試験	1962年 8月	井上 政一
TM- 7	慣性力形疲労試験機	1962年 8月	山根 皓一郎
TM- 8	アルミ合金の前歴が疲れ寿命に およぼす実験的研究	1962年 9月	池田 為治, 坂元 思無邪
TM- 9	方向性次元解析と相似解に関する覚書	1963年 2月	申藤 好郎, 小出 勉
TM-10	DATATRON 205 用 ALGOL 58 使用法について	1963年 2月	高橋 利之
TM-11	光弾性による高速車盤の縞模様	1963年 2月	永井 文雄, 小川 鉦一
TM-12	コーティングの断熱効果に関する実験	1963年 3月	中井 幸彦, 小原 英
TM-13	遷音速における 45° 後退角翼の予備的 フラッタ実験	1963年 3月	中井 一, 小原 英
TM-14	変断面片持梁固有振動数の一計算方法 について	1963年 3月	中井 一, 小原 英
TM-16	フラッタ試験設備測定部変換ノズルの 予備試験	1963年 4月	高木 俊朗, 橋本 正勝
TM-17	VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す る一考察	1963年 5月	鳥崎 忠雄, 藤井 昭一
TM-18	ヘリコプター振動のパワースペクトル 解析	1963年 6月	小野 幸一
TM-19	吹出式超音速風洞による実験データの 処理方式について (I)	1963年 6月	新井 忠, 原 亘利
TM-20	1 m×1 m吹出式超音速風洞における AGARD 標準模型 B の三分力試験	1963年 7月	高木 廣治, 谷 喬忠
TM-21	国産中型輸送機 Y S-11 主翼疲労試験 (第 I 報)	1963年 9月	竹内 和之, 飯田 宗四郎
TM-24	円輪と薄肉円筒の回転強度の関係	1963年11月	北谷 勇, 中井 治夫
TM-25	DATATRON 205 用 ALGOL 58 の Procedures ライブラリー	1964年 1月	高橋 利之
TM-26	吹出式風洞の圧力制御 (フラッタ試験 設備の場合)	1964年 1月	橋 爪 宏, 中井 一
TM-28	一段式観測ロケットの超音速風洞試験	1964年 1月	谷 喬, 原 亘利
TM-29	遷音速フラッタ試験設備の改造および 整備試験	1964年 2月	中井 一, 橋 爪 宏
TM-30	二段式ロケット飛しょう体の揚力およ び圧力中心推定法	1964年 3月	小橋 安次郎, 高宮 沢政文
TM-31	亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞に おける試験	1964年 3月	河崎 俊夫, 竹内 理
TM-32	遷音速風洞の防音	1964年 4月	牛田 健二, 高橋 宏義
TM-33	非定常境界層の遷移の研究に使用され た定温度型熱線風速計について	1964年 4月	榎 並敬之, 山本 稀義
TM-34	極超音速風洞ノズルの境界層補正につ いて	1964年 5月	長洲 秀夫
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風 洞ノズルの設計計算法	1964年 5月	毛利 浩
TM-38	AGARD-A 標準模型の超音速三分力 試験	1964年 6月	高木 廣治, 石原 久蔵, 斎藤 秀夫
TM-39	相似極超音速流におかれた半球面上の 境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の 結合影響	1964年 7月	石井 孝雄
TM-40	国産中型輸送機 Y S-11 胴体疲労試験 (I)	1964年 9月	竹内 和之, 川島 矩郎
TM-41	抵抗線歪ゲージのゲージ率測定	1964年10月	田畑 浄治, 大坪 孔治
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	滝沢 昌次, 田寺 木一
TM-44	高負荷燃焼器 (アナログ模型) の実験 結果	1964年12月	大塚 貞吉, 鈴木 邦男
TM-46	翼洞結合金具の疲労特性	1964年12月	松本 宏, 石井 浅五郎
TM-47	ローター後流中のヘリコプター胴体の 抵抗について	1965年 1月	広竹 内和, 山 中 国
TM-48	極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実 験	1965年 2月	幸尾 治朗, 岡 枝 遠
			平林 一, 橋本 登崇
			林 二 識, 吉 永

# 高温歪ゲージの温度特性試験\*

江 川 幸 一\*\*

## 1. ま え が き

超音速で飛行する航空機やロケットの空力加熱による高温状態での機体の構造強度および剛性の諸問題が現在大きくクローズアップされているし、また、航空以外の分野でも最近の工業技術の進歩に伴って高温のもとで用いられる強度部材がますます多くなっているために、このような温度条件のもとでの歪測定の必要性が増大してきた。このような事情から高温歪ゲージの開発が内外において活発に行なわれており、現在各種の高温歪ゲージが市販される段階に至っている。しかしながら、これらの歪ゲージによる測定には常温の場合と異なり測定操作上および測定精度上検討を要する問題が数多く含まれている。ここでは、国産の2種の高温歪ゲージについて、一連の試験を行ない、その温度特性を明らかにし、これらを用いていかにすれば信頼度の高い歪測定を行なうことができるかを検討した。

これらの歪ゲージを用いて高温での歪を測定する際に問題となる点を列挙すると次のとおりである。

- (a) 歪ゲージの温度変化に伴う見かけの歪量の発生、すなわち零点移動
- (b) 高温におけるゲージ率の変化
- (c) 昇温、降温を1サイクルとする温度サイクルの繰返しによる(a)と(b)の特性の変動、すなわち歪ゲージの再現性の問題
- (d) 歪ゲージごとの(a)と(b)の特性のばらつき、すなわち歪ゲージの均一性の問題
- (e) 一定高温中に保持された場合の時間経過に伴う歪出力の変動、すなわちクリープ特性
- (f) 歪ゲージの絶縁の低下
- (g) 歪ゲージの取り扱いの難易

ここでは上記の(a)～(d)および(g)の各項について試験を行ない、それらの特性を調べた。絶縁の低下については国産の高温歪ゲージはすべてベース付きなので外国製のベースなしのものほど問題にならないと考えられたので省略した。クリープ特性については別の機会に報告する。

---

\* 昭和40年8月21日受付

\*\* 機体第一部

## 2. 歪ゲージおよび実験装置

### 2.1 試験に用いた歪ゲージ

試験に用いた高温歪ゲージは常温で用いられるものと同様な構造で、金属細線を歪検出素子としてこれを高温に耐えるベースにはり付け、さらにベースと同材料のものでその上をおおっている。試験に用いた2種の歪ゲージの仕様を表1に示す。

### 2.2 試験片材料

表2に示すような線膨脹係数の異なる5種類の材料を選び、これらに歪ゲージを接着して試験を行なった。これらの試片の形状、寸法と歪ゲージの接着位置とを図1に示す。

### 2.3 歪ゲージの接着法

接着前の試験片の表面処理は両ゲージとも常温で用いられる歪ゲージに対する処理方法と同じであるが、その接着法は常温用のものの場合とは著しく異なり、いずれの歪ゲージも加熱処理が必要である。

#### (1) Aゲージ

接着剤を接着面と歪ゲージにそれぞれ塗り、空気中で2～3分放置したのちにシリコンラバーを介して0.5kg/cm<sup>2</sup>の圧力を加え、80°C 1時間、120°C 2時間、180°C 2時間の加熱処理後、加圧を解放して徐冷する。

#### (2) Bゲージ

接着剤を接着面と歪ゲージに厚さ0.5mm以下となるように塗り、空気中で10分間放置したのちにシリコンラバーを介して0.5kg/cm<sup>2</sup>の圧力を加え、100°C 1時間、200°C 1時間の加熱処理後、加圧を解放して徐冷する。

### 2.4 リード線の接続

高温ふんいき中では銅線は酸化する恐れがあるために用いられず、高温に耐え、その上歪ゲージのくち出し線との溶接が容易に行なえるニッケル線やアドバンス、ニクロムなどのようなニッケル合金線が用いられる。ここではAゲージにはアドバンス、Bゲージにはニッケル線を用いた。接続はコンデンサーにたくわえたチャージを放電し短時間に大電流を流す点溶接の方式によって行なった。常温の部分では平行ビニール線を使用し、高温部分のリード線との接続はハンダ付けで行なった。

### 2.5 実験装置

実験装置の概略を図2に示す。歪ゲージを接着した試片をテストスタンドに取り付け、これを炉内に入れ加熱して試験を行なった。加熱には簡単な電熱式乾燥炉を使用した。炉は炉内の一辺が50cmの立方体で、温度を60～400°Cまで任意に設定できる構造のものである。テストスタンドはアングルで組み立てられ、横梁はステンレス製でこの上に2枚の試片を同時に取り付けうるようにな

っている。また、これら2枚の試片に同時にたわみを与えた場合でも十分な剛性を持つように設計されている。試片の一端は3枚の押し板を介してボルトで横梁に固定され、他端はアジャストスクリューとたわみ設定金具によって一定量のたわみを与えられる。このようなたわみ一定型の負荷形式は、試片の温度分布が一様であれば温度変化によるヤング率の変化が測定点の歪値に影響しないので、荷重一定型の負荷形式より好つごうである。試片は同時に2枚取り付けて試験を行なった。歪ゲージは試片の表裏に1～2枚ずつ図1に示す位置に接着し4～8枚を同時に試験した。

## 2.6 歪測定

高温ふんいき中で用いた耐熱リード線は銅線に比べてその抵抗が大きく、温度変化に伴うリード線の抵抗変化は無視できない大きさとなる。この影響を除去するため図3に示す3線式結線法を用いた。歪測定は静歪測定器または自動多点歪測定器を用い2ゲージ法により行なった。実験中の室内温度の変動による影響を避けるためダミーゲージをステンレスの小片に接着し乾燥剤とともにびん詰にして冷蔵庫内の水槽に納めて使用した。

## 2.7 温度測定

CA熱電対と12打点の電子管自動平衡式温度記録計を使用して温度測定を行なった。熱電対は1対中の2線を約1mm離して試片表面に溶着した。温度測定箇所は1試片に4箇所とし、これらの測定値から試片の温度分布が一様なことを確かめ、さらに歪ゲージの温度も求めた。温度測定位置を図4に示す。

# 3. 測定方法

試験は同じ材料の試験片2枚、歪ゲージA・Bの各2～4枚を1グループとし、昇温、降温の温度サイクルを11回繰り返して測定を行なった。第1～10回の温度サイクルでは常温のほか大略100°、180°、260°、320°、380°C、(380°CはBゲージのみ)の一定温度において昇温、降温時ともに静歪測定器を用い測定を行なった。第11回の温度サイクルでは約1.5°C/minの割合で炉内温度を変化させながら自動多点歪測定器を用いて零点移動の測定のみを行なった。

## 3.1 零点移動の測定

炉内のテストスタンドに取り付けられた試片の無負荷時の歪出力を上記の各一定温度において測定し、第11回の温度サイクル時には10°Cとびに測定を行なって零点移動をより正確に求めた。ただし、石英ガラス試片はテストスタンドに取り付けず、テストスタンド上の試片と同一高さに保持してほかの試片と同一の温度となるようにした。

## 3.2 ゲージ率の変化の測定

ステンレス試片についてのみ試験を行なった。まず常温で一定たわみを数回与えて歪値を求め、次に炉内温度を上げて上記の各一定温度にし、常温で与えたのと同じ一定たわみを試片に与え歪値

を測定した。炉温を変化させた状態ではすでに零点移動を生じているため、このときの測定値から零点移動分をさし引き、たわみ負荷による歪値を求めこれを常温における測定値で除してゲージ率の変化を求めた。すなわち一定高温中における歪  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) / K_T \quad (1)$$

ここで

$R$  : 測定温度  $T$  における歪ゲージの無歪時の抵抗値 ( $\Omega$ )

$\Delta R$  : 測定温度  $T$  における歪ゲージが歪を受けることにより生じた抵抗変化 ( $\Omega$ )

$K_T$  : 測定温度  $T$  におけるゲージ率

で常温における歪値と同じ大きさになるべきであるが、歪測定器には常温における歪ゲージのゲージ率  $K_0$  が設定されているので実際に測定される歪は、

$$\varepsilon' = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) / K_0 \quad (2)$$

したがって

$$\varepsilon' = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) / K_0 = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \cdot \frac{1}{K_T} \cdot \frac{K_T}{K_0} = \varepsilon \cdot \frac{K_T}{K_0} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{K_T}{K_0} \quad (4)$$

となる。

### 3.3 再現性の測定

零点移動の再現性は同一の歪ゲージを10回以上の温度サイクルを経過させて各温度サイクルにおけるデータを求めこれらと比較することにより判定した。ゲージ率の再現性は ①温度サイクルの繰返しによる常温でのゲージ率の変動と、②温度サイクルの繰返しによる一定高温中でのゲージ率の変動、とを各温度サイクルにおけるデータを比較することにより求めた。

### 3.4 均一性の測定

零点移動とゲージ率の変化を同種同一ロットの歪ゲージを同時に4枚試験し、その特性のばらつきを調べた。

## 4. 結果と検討

### 4.1 零点移動

A・B2種の歪ゲージをそれぞれ線膨脹係数の異なる4種の材料に接着した場合の測定結果を図5～14に示す。図5、6はいずれも第11回の温度サイクルにおける測定値で、図7～14は第1、3

9回の温度サイクルにおける測定値である。

これらの実験データから次の事が明らかとなった。

#### (1) 零点移動の形状とその大きさ

図5, 6から, 零点移動はその形状とこう配の変化により, Aゲージでは大略常温 $\sim 60^{\circ}\text{C}$ ,  $60\sim 200^{\circ}\text{C}$ ,  $200\sim 360^{\circ}\text{C}$ の三つに分かれ, Bゲージでは常温 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ,  $100\sim 360^{\circ}\text{C}$ の二つに分けられる。Aゲージが $200\sim 360^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で大きな弧を描くことを除けば, ほかはA・Bゲージともそれぞれの温度範囲内の温度と零点移動の関係はほぼ直線をなすとみなすことができる。一例として石英ガラスに歪ゲージを接着した場合には, これらの直線のこう配はAゲージが約 $-20\times 10^{-6}$  ( $70\sim 200^{\circ}\text{C}$ ), Bゲージが約 $-13\times 10^{-6}$  ( $70\sim 200^{\circ}\text{C}$ )となっている。零点移動の大きさは歪ゲージを接着した材料と温度によりまちまちであるが, 数千マイクロの大きさになるものも生じている。石英ガラスに接着した場合の $200^{\circ}\text{C}$ における零点移動はAゲージ  $-3400\times 10^{-6}$ , Bゲージ  $-2300\times 10^{-6}$ となっている。

#### (2) 歪ゲージの種類が異なれば零点移動も異なる

図5, 6から, 同一材料の試片に接着されたA・Bゲージの零点移動はその大きさ, 形状などすべて異なっていることがわかる。これは歪ゲージの構成要素の抵抗素線, ベース, 接着剤などが異なるとその温度特性が変わり零点移動が変わることを示している。

#### (3) 歪ゲージが接着される材料が異なれば零点移動も異なる

図5, 6から試片の線膨脹係数が零点移動に大きな影響を与えていることがわかる。すなわち線膨脹係数が非常に小さい石英ガラスに歪ゲージを接着した場合の零点移動はA・B両ゲージともにマイナス側に大きな値で生じているが, 試片の線膨脹係数が石英ガラス $\rightarrow$ ステンレス $\rightarrow$ 黄銅 $\rightarrow$ アルミ合金と大きくなるに従って零点移動もプラス側に移動してくる。しかも零点移動はAゲージでは曲線, Bゲージでは2段折線となっているが, いずれの試片の場合にもその形状はほぼ同一で, ただ温度に対するこう配のみが変化していることがわかる。

#### (4) 一般に昇温時と降温時の零点移動は一致せず, ヒステリシスループを描く

図7~14に示すようにAゲージはいずれの温度サイクル時にもヒステリシスループを描いて常温で大きな残留歪を残している。ヒステリシスループは第1回の温度サイクル時には非常に大きい温度サイクルを経過するに従って徐々に小さくなっていく。残留歪も同様な傾向となっている。Bゲージは比較的小さなヒステリシスループを描き, 第3回の温度サイクル時にはヒステリシスループは非常に小さくなり常温における残留歪も小さく, 第11回の温度サイクル時には零点移動は図6に示すような直線(2段折線)となってヒステリシスはほとんど認められない。図7~14では前回の温度サイクル時の残留歪をさし引いて, 次回の零点移動を表示してあるから, 昇温時の零点移動の起点は歪値零からであり, 第1, 3, 9回の温度サイクル時のそれぞれのヒステリシスループと残

留歪の大きさが表わされている。

#### 零点移動についての検討

(a) 零点移動の大小，正負および温度に対する変化の傾向は歪ゲージの抵抗素線の温度に関する物理的な性質，すなわち抵抗温度係数や線膨脹係数および試片の線膨脹係数の大小に依存することが明らかとなった。また，ベースや接着剤の影響も受けるものと思われる。これらの点についてさらに詳しく考察してみると，

(i) 歪ゲージの抵抗素線の温度変化に伴う抵抗変化および高温にさらされるために生ずる抵抗変化

(ii) 試験片と歪ゲージの線膨脹係数のちがいがい

(iii) 温度変化に伴うベースと接着剤の形状変化

(iv) リード線の温度変化に伴う抵抗変化

(v) 接着剤のキュアーの進行に伴う形状変化

(b) 図5，6にみるように試片の材質によってはかなり大きな零点移動を生じているが，このような場合には，外荷重や熱応力に基づく真の歪 $\epsilon$ が正しく求められない事態を生ずる恐れがある。高温における歪測定で直接測定される歪量 $\epsilon_{app}$ は真の歪 $\epsilon$ と零点移動 $F(T)$ の和となっている。すなわち

$$\epsilon_{app} = \epsilon + F(T) \quad (5)$$

$$\epsilon = \epsilon_{app} - F(T) \quad (6)$$

したがって真の歪に比べて零点移動量が非常に大きい場合には零点移動の測定誤差が真の歪に対して無見できない大きさとなるからである。一例を上げれば，ステンレスにAゲージを接着して200～300°Cにおいて実験を行なった場合，図5に示すように零点移動が $-900 \sim -1000 \times 10^{-6}$ あるから求める歪値が $\pm 100 \times 10^{-6}$ 程度とすると直接測定される歪量 $\epsilon_{app}$ の10%程度のため測定精度が非常に悪くなる。

(c) 温度の変化に対して零点移動が直線的に変化するとみなすことができる温度範囲の一例として70～200°Cの範囲をとり実験結果について零点移動のこう配と試験片の線膨脹係数との関係を求めてみると表3，4のようになる。これらの表から明らかのように零点移動のこう配から試験片の線膨脹係数をさし引いた値は歪ゲージごとにはほぼ一定となる。したがってこれらはA，Bそれぞれの歪ゲージに固有の値であると考えられる。以上の関係は

$$\alpha_0 = \alpha_T - \alpha_m \quad (7)$$

ここで

$\alpha_0$  : 歪ゲージに固有の値

$\alpha_T$  : 温度変化に対する零点移動のこう配



$\alpha_m$  : 試片材料の線膨脹係数

このことは温度変動に基づく零点移動の理論解析によりすでに立証されている<sup>1), 2), 5)</sup>。すなわち、零点移動量は

$$F(T) = \alpha_T \cdot \Delta T = \{(\alpha_R - \alpha_g)/K_0 + (\alpha_m - \alpha_g)\} \Delta T \quad (8)$$

$$\alpha_T = \{(\alpha_R - \alpha_g(1 + K_0))/K_0 + \alpha_m\} \quad (9)$$

ここで

$\alpha_R$  : ゲージ線の抵抗温度係数

$\alpha_g$  : ゲージ線の線膨脹係数

$K_0$  : 常温におけるゲージ率

したがって(9)式の右辺の第1項はゲージ線の性質により定められ、同一ロットのゲージ線については一定となる。(9)式において

$$\{\alpha_R - \alpha_g(1 + K_0)\}/K_0 = \alpha_0 \quad (10)$$

とおけば

$$\alpha_0 = \alpha_T - \alpha_m$$

となり、(7)式が得られる。よって

$$\alpha_T = \alpha_0 + \alpha_m \quad (11)$$

となり、歪ゲージに固有の値  $\alpha_0$  を実験によって求めておけば線膨脹係数の異なるほかの試片にその歪ゲージを接着した場合の零点移動を容易に求められることができる。すなわちある材料  $a$  に接着した場合の零点移動のこう配  $\alpha_{Ta}$  から  $\alpha_0$  を求めておけば、線膨脹係数の異なるほかの材料  $b$  の零点移動のこう配  $\alpha_{Tb}$  は

$$\begin{aligned} \alpha_{Tb} &= \alpha_0 + \alpha_{mb} \\ &= (\alpha_{Ta} - \alpha_{ma}) + \alpha_{mb} \\ &= \alpha_{Ta} + (\alpha_{mb} - \alpha_{ma}) \end{aligned} \quad (12)$$

零点移動  $F(T)_b$  は

$$\begin{aligned} F(T)_b &= \alpha_{Tb} \cdot \Delta T \\ &= [\alpha_{Ta} + (\alpha_{mb} - \alpha_{ma})] \Delta T \end{aligned} \quad (13)$$

$\Delta T$  : 温度差,  $\alpha_{ma}$ ,  $\alpha_{mb}$  はそれぞれ  $a$  および  $b$  材料の線膨脹係数として求めることができる。

さらに実験結果「4.1(1)」で述べたように零点移動は常温からのある温度範囲内では数段の折線で近似できるから、折線の各段に対応する温度範囲内で(12), (13)式の計算を繰返し常温から200ないし380°Cまでの温度範囲内の零点を求めることができる。すなわち、温度範囲(1)では

$$F(T)_{b1} = [\alpha_{Ta1} + (\alpha_{mb1} - \alpha_{ma1})] \Delta T_1 \quad (14)$$

ここで

$$\Delta T_1 : \text{温度差} \quad \Delta T_1 = T - T_0$$

$T$  : 温度範囲 (1) 内の温度

$T_0$  : 零点移動測定起点の温度

温度範囲 (2) の温度  $T_2$  における零点移動は

$$F(T)_{b2} = [\alpha_{Ta2} + (\alpha_{mb2} - \alpha_{ma2})] \Delta T_2 + F(T_1)_{b1} \quad (15)$$

$$\Delta T_2 = T - T_1$$

$T$  : 温度範囲 (2) 内の温度

$T_1$  : 温度範囲 (1) 内の最高温度

同様に温度範囲 (3), (4) ……について求め、零点移動測定起点と  $T_1, T_2, \dots$  における零点移動を直線で結んでゆけばよい。いま、材料の線膨脹係数が温度範囲 (1) および (2) でそれぞれ一定とすれば

$$(\alpha_{mb1} - \alpha_{ma1}) = (\alpha_{mb2} - \alpha_{ma2}) = (\alpha_{mb} - \alpha_{ma})$$

(15) 式は

$$F(T)_{b2} = [\alpha_{Ta2} + (\alpha_{mb} - \alpha_{ma})] \Delta T_2 + F(T_1)_{b1} \quad (16)$$

となる。

零点移動が曲線となる場合にはこれを多段の折線で近似して上記の方法を適用すれば良いが、図式的に求めるのが便利である。一例を上げると、図15にはAゲージを石英ガラスに接着した場合の昇温時の零点移動を折線近似したものと、アルミ合金、黄銅、ステンレスのそれぞれの線膨脹係数から石英ガラスの線膨脹係数をさし引いた値をそのこう配とする直線とが示してある。ここでは簡単にするためそれぞれの材料の線膨脹係数は常温から380°C付近まで一定と仮定してある。すなわち、零点移動と線膨脹係数の差をこう配とする直線は、温度範囲 (1) を例にとると、それぞれ、

$$F(T)_{a1} = \alpha_{Ta1} \cdot \Delta T_1$$

$$(\alpha_{mAl} - \alpha_{mglass}) \Delta T_1 \quad (\text{アルミ合金の場合})$$

となる。したがって (14) 式から明らかなように両者の和を求めればアルミ合金、黄銅、ステンレスに歪ゲージを接着した場合の零点移動が求められる。このようにして求めた零点移動と実験データとの比較を図16, 17に示す。点は実験データ、折線は上記の方法で求めた零点移動を表わす。この例からも明らかなように実験を行なった温度範囲内では零点移動をかなり良く求めることができる。

(d) 零点移動は歪ゲージの構成要素の温度変化に伴う各種の変化および試片と歪ゲージとの線膨脹係数の差によって生ずる。しかし (11) 式から歪ゲージに固有の値  $\alpha_0$  が試片の線膨脹係数と大きさが等しく符号が反対であれば零点移動のこう配は零となり零点移動は生じない。実際には実験を行なう全温度範囲にわたって零点移動を完全に零とすることは困難であるが、このような考え

方から試片に対して適当な  $\alpha_0$  の値を持つ歪ゲージを用いることにより零点移動をかなり小さくすることが可能である。本実験に用いたAゲージについては図5に示すようにこれを黄銅に接着した場合がその一例となっている。

(e) 零点移動がヒステリシスループを描き、これが温度サイクルの経過に伴って変化していることは(a)に上げた零点移動を生ずるさまざまな原因が温度変化のみでなく温度サイクルの経過に伴って変化していることを示している。これらについては「4.3」再現性の項でさらに検討する。

## 4.2 ゲージ率の変化

A・B 2種の歪ゲージをいずれもステンレスの試片に接着し、10回の試験を行なった。測定結果を図18, 19に示す。矢印付きの細線は第1回温度サイクルの測定値を結んだものである。図の縦軸は各試験温度におけるゲージ率と常温におけるゲージ率の比を表わしている。これらの実験データから次の事が明らかとなった。

(1) ゲージ率の温度に対する変化は第1回の温度サイクル時には不規則である。

Aゲージは昇温時の100~200°Cの温度範囲内でゲージ率が大幅に低下して0.86~0.95ぐらになり200°C以上の高温中では0.96~0.98とかなり1.0に近づく傾向があるが、No.17の歪ゲージのように0.9付近にとどまったままのものもある。降温時はだいたい最高温度におけるゲージ率の値のままでもどり常温でも完全に1.0にはもどらず0.98ぐらとなる、Bゲージも昇温時の200°C付近でゲージ率が大幅に低下して0.82~0.88ぐらとなり300~400°Cの温度範囲でゲージ率比が若干大きくなるものと200°C付近における値のままのものがあるが、いずれも0.85~0.88ぐらにとどまり、降温時には温度の低下に伴って急速に回復し常温で0.98ぐらとなる。

(2) 第2回以降の温度サイクルでは両歪ゲージとも温度変化に伴ってゲージ率は変化するが、それぞれの変化はほぼ定常的となり、再現性は比較的良好である。Aゲージのゲージ率の低下は100°C以下では2%弱で、100°C以上ではかなりのばらつきがあるが大略5%以内に収まり平均的には2%程度の低下で温度に無関係にほぼ一定とみなすことができる。Bゲージは300°Cまでは100°Cあたり約3.3%の割合で温度に対し直線的に低下し、300°Cでゲージ率が約90%になっている。その後380°Cまでにさらに約1.5%低下する。

(3) 歪ゲージに与える歪が引張りでも圧縮でもゲージ率の低下については特別な違いは認められない。

### ゲージ率の変化についての検討

(a) ゲージ率を低下させる原因として考えられるのは

(i) 接着剤のキュアが不十分なため試片と歪ゲージとの間ですべりを生じ試片の歪が正しく伝達されない

第1回温度サイクルの昇温時にゲージ率が大幅に低下し、第2回以降の温度サイクルにおける測定結果と全く異なった傾向を示すことからこの原因が推定される。A・Bゲージの接着時の加熱処理の最高温度は180°Cと200°Cだが、第1回温度サイクルの昇温時の120°Cと210°C付近ですでにゲージ率が大幅に低下していることから、接着時の加熱処理のみでは接着剤の硬化が十分でなく加熱の進行する過程で接着剤のキュアが進行し試験最高温度でキュアがほぼ完了してすべりが止まり、降温時にはいずれの歪ゲージもゲージ率が大幅に回復し、第2回以降の温度サイクルではゲージ率の低下がほぼ定常的になるものと考えられる。

(ii) 歪ゲージの抵抗素線の歪感度が高温中で低下する

第2回の温度サイクル以後におけるゲージ率の低下は温度に対しほぼ定常的となりAゲージは約2% Bゲージは300°Cで約10%の低下を生じている。歪ゲージの高温での出力を低下させる原因として、前述のような接着剤の影響によるもののほかに、抵抗素線の歪感度の高温中での低下が考えられる。Bゲージのゲージ率の低下はばらつきも比較的少なく温度サイクルの繰返しに対してほぼ定常的でしかも300°Cで約10%にもなっているし、一方AゲージでもNo.17のデータはばらつきはやや多いが傾向はほぼ定常的で、平均して5%程度の低下が認められる。これらのことから第2回以降の温度サイクルにおけるゲージ率の低下は主として抵抗素線の歪感度の低下に基づくものと推定される。

(b) 不規則で再現性のないゲージ率の変化を避けるために接着時の加熱処理後に試験最高温度より若干高い温度で接着剤を十分キュアすることが望ましい。特に100~120°C付近でのゲージ率の低下が第1回温度サイクル時に顕著なことから現行の接着方法がA・Bゲージのいずれの場合も十分でないものと考えられる。

(c) ゲージ率の低下は測定値にそのまま効いてくるのでこれを補正する必要がある。現在これを自動的に補正する特殊な方法はないので、試験前になんらかの方法でゲージ率の低下を測定しておかなければならない。

### 4.3 再 現 性

#### 4.3.1 温度サイクルの繰返しによる零点移動の変動

図7~14はいずれも第1, 3, 9回の温度サイクル時の測定値を曲線で結んだもので歪ゲージと試験に用いた材料ごとにまとめてある。ここでは第4~8回の温度サイクル時の測定値はほとんど第3回と第9回の測定値の間に収まることが実験から確かめられている。図20, 21はステンレスに接着した歪ゲージの185, 265, 355°C付近の三つの温度範囲における零点移動の温度サイクルの繰返しによる変動を示したものである。以上の実験データから次の事が明らかになった。

(1) 零点移動は第1回の温度サイクル時に不規則な変化をする。

この不規則な現象は、Aゲージについては

- (i) 昇温時200°Cを越えても零点移動の温度に対する減少率が低下しない
  - (ii) 降温時マイナス側に非常に大きなヒステリシスループを描く
  - (iii) 常温にもどったときに大きな残留歪を残す。残留歪の大きさは材料ごとにまちまちである
- (2) Aゲージの零点移動は温度サイクルを繰り返すごとにプラス方向に移動する。この傾向は250°C以上の高温において著しい。Bゲージの零点移動は温度サイクルを繰り返してもあまり大幅に変化せず全体に直線に近づいてくる。
- (3) A・Bゲージともヒステリシスループの幅は温度サイクルを繰り返すに従って小さくなり、同時に常温における残留歪も小さくなる。Aゲージは第9回の温度サイクル時にもヒステリシスループを描くがBゲージはほとんどヒステリシスループを描かなくなる。
- (4) 第2回以降の温度サイクルにおける試験では温度サイクルの繰返しは2～3回の間をとって考えれば零点移動はある幅の中で再現性を示すと考えて良い。しかしA・Bゲージとも350°C付近の試験については再現性に乏しく、Aゲージで第5回の、Bゲージで第3回以降の温度サイクルについてのみ再現性が認められる。第3回から第10回までの温度サイクルにおける零点移動の変動幅はAゲージは大きく、Bゲージは比較的小さい。

#### 零点移動の再現性についての検討

(a) 歪ゲージは「2.3」で述べたように接着時に加熱処理を行なうがその最高温度はAゲージが180°C、Bゲージ200°Cであり、歪ゲージの製作工程中でもこれ以上の温度を受けていないと推察される。このため第1回の温度サイクルにおいて歪ゲージの抵抗素線・リード線・接着剤がより高い温度に初めてさらされるため素線のやきなまし、ベースや接着剤の形状変化などが一時に進行し、その結果200°C以上の高温中で零点移動が不規則な変化をし、降温時に大きなヒステリシスループを描き常温で大きな残留歪を残すものと考えられる。歪ゲージの抵抗素線は熱処理を受けることによって比較的大きな抵抗変化を生ずる傾向があることが知られている。その一例<sup>4)</sup>を図22, 23に示す。これは388°Cの一定高温中に約250Ωの抵抗線材（コンスタントン線, Ni45・Cu55）を90分間保持したところ約2Ωの抵抗変化を生じ、その変化も試験の初めほど大きいという結果を表わしている。本実験に用いた歪ゲージの抵抗素線はいずれも銅・ニッケル合金でコンスタントン線と類似の温度特性を持っていると考えられる。また、接着剤も高温中で溶剤の蒸発や化学変化の進行がありそれに伴って伸縮し歪ゲージの出力を変化させることは容易に想像できる。これらのことは350°C付近の高温の場合を除いて第2回以降の温度サイクルにおける零点移動が不規則な変化を示さずにほぼ定常的となることから明らかである。

以上から実際の高温度構造物試験では歪ゲージの接着終了後に少なくとも1回、試験最高温度より若干高い温度で十分な予加熱を行なう必要があると思われる。このため試験構造物自体がそこなわ

れる場合には組立前の部材ごとに歪ゲージの接着と予加熱とを行なわねばならない。

(b) 350°C付近の高温中ではAゲージでは第5回の、Bゲージでは第3回の温度サイクル以降でなければ零点移動は安定しない。高温中で特に不安定となるのは接着剤のキュアが不十分であったためとも考えられるが、Aゲージの場合は第1回から第5回の温度サイクルの間にかんがりの変動を生じていることから、主として歪ゲージの抵抗素線の抵抗変化によるものと考えられる。これらからAゲージの抵抗素線の安定な上限温度は200~250°C程度と考えられる。Bゲージは第3回と第10回の零点移動を比較してもそれほど大きな変動は認められず350°Cまでは安定して使用できるものと考えられる。

#### 4.3.2 温度サイクルの繰返しによるゲージ率の変動

図24, 25は常温で一定たわみを負荷したときの歪値を試験した全歪ゲージについて温度サイクルを1回繰返すごとに測定しプロットしたものである。試片はいずれもステンレス鋼で10回の温度サイクル経過後にゲージAではゲージ率の変化はほとんど認められなかったが、ゲージBではゲージ率の低下が多少認められた。歪ゲージごとに測定値が異なるのははり付け位置が同一でないことと試片の中心線に対してそれぞれ若干の偏角を持っているためである。図26, 27は試験した歪ゲージの中からAゲージのNo.16とBゲージのNo.1について常温および一定高温中における一定たわみ負荷時の歪値を各温度サイクルごとに求めたものである。ここではあげていないが試験した他の歪ゲージもNo.16およびNo.1と総体的にほとんど同じ傾向を示している。以上の実験データから次の事が明らかになった。

##### (1) 温度サイクルの繰返しによる常温におけるゲージ率の変動

###### Aゲージ

第1回の温度サイクル経過後に特に大きな歪出力の低下はない。また、温度サイクルを10回繰返したが、No.17の歪ゲージが $10 \times 10^{-6}$ の出力減となっている以外には大きな歪出力の変動はない。

###### Bゲージ

第1回の温度サイクル経過後に全部の歪ゲージが約 $10 \times 10^{-6}$ の出力減となっているほかに第4回の温度サイクルまでに約 $10 \sim 30 \times 10^{-6}$ の出力が減少し、その後出力減少の割合は小さくなるがやはり出力の減少が続く。始めから温度サイクル10回経過後までの出力減は $25 \sim 35 \times 10^{-6}$ で、これは温度サイクルを受けていない場合の歪出力の5~8%にあたる。

##### (2) 温度サイクルの繰返しによる高温におけるゲージ率の変動

###### Aゲージ

温度サイクル1回経過後の歪出力が急増しているほかに全般的な傾向として温度サイクルを繰返すごとに歪出力が少しずつ増加し各一定高温中の歪出力が常温における歪値に近づいている。こ

れは図18に示した温度に対するゲージ率の変化が温度サイクルを初めて受けたあとで急速に回復し、さらに温度サイクルを繰り返すごとに全体的に1.0に近づいてゆくことを示している。また、第1回の温度サイクルの繰返しによる高温でのゲージ率の変化がきわめて小さく再現性があることを示している。

#### Bゲージ

第1回温度サイクル経過後に歪出力が急増しているが、373~386°Cの温度範囲ではほぼ同じ値を取っている。全般的な傾向として温度サイクルを繰り返すごとに歪出力が減少し、第4回の温度サイクル以降ほぼ一定となる。変化の傾向は、第1回の温度サイクル経過時を除いて常温における歪出力の変動とほぼ同じで各一定高温中におけるデータは常温におけるデータとほぼ平行になり、したがって出力差もだいたい一定となる。これは温度サイクルを初めて受けたあとで歪出力が急速に回復するが、なお温度サイクルを3~4回繰り返すまで不安定なことを示している。また、第1回温度サイクル経過時を除いて、常温における歪出力のデータと各一定高温におけるデータとがほぼ平行になることは、図19に示した温度に対するゲージ率の変化がほぼ一定の割合で減少し、しかも温度サイクルの繰返しに対して再現性があることを示している。

#### ゲージ率の再現性についての検討

(a) 第1回温度サイクル経過時にA・Bゲージとも高温中で歪出力に大きな変動を生ずるので、再現性を保つために試験前に試験最高温度より若干高い温度で予加熱を行なうことが必要である。

(b) Aゲージは第2回以降の温度サイクルにおいてはある幅の中で再現性を示す。Bゲージは第4回の温度サイクルを経過するまでは歪出力が減少するので第4回以降の温度サイクルについてのみ再現性を認めることができる。しかし温度変化に対するゲージ率の変化は第1回の温度サイクルを除けば、各温度サイクルにおいてほぼ同一の割合でゲージ率の低下を生ずる傾向があるため常温におけるたわみ負荷による歪出力を試験開始前に毎回求めておけば再現性について特に困難な事態は生じない。

(c) 100~110°Cの温度範囲における歪出力がA・Bゲージとも初めて温度サイクルを受けたときに急減し、第2回目には急速に回復しているが、この温度範囲はいずれの歪ゲージも接着時の加熱処理で一度、かなり長時間にわたって経過している。したがって現在行なわれている接着方法では十分でない点があるものと考えられる。

#### 4.4 均 一 性

すでに「4.1(2)」で述べたように歪ゲージの零点移動とゲージ率の変化は歪ゲージの製作工程上のわずかな違いによって大きく変わる可能性があるため、これらについての均一性は一般には同一ロットの歪ゲージについてでなければ期待できない。ここではいずれの場合も同一ロットの歪ゲ

ージ4枚づつを試験した結果について述べる。

#### 4.4.1 零点移動の均一性

図28, 29はA・Bゲージ4枚づつをニッケル鋼に接着した場合の第5回の温度サイクルにおける零点移動を表わしている。これらの実験データから次の事が明らかになった。

- (1) 同種類, 同一ロットの歪ゲージでも零点移動のばらつきは存在し, Aゲージでは  $150 \times 10^{-6}$  ぐらい, Bゲージでは  $500 \times 10^{-6}$  ぐらいとなっている。
- (2) ばらつきの大きさは高温となるに従って増大する傾向にある。しかし降温時には温度が低くなってもばらつきが小さくなる傾向はみられない。
- (3) 零点移動の絶対値の大小とばらつきの大きさは特に関係しない。

零点移動の均一性についての検討

(a) 歪ゲージごとのばらつきは歪ゲージの製作工程や接着操作のわずかな違いによって生ずるものらしく, 一般にはこれを避けることは不可能と考えられる。

(b) 多数の歪ゲージを同時に用いる場合, 同一ロットの歪ゲージを数枚抜きとって零点移動を求め全体の歪測定値の補正を行なうのは歪ゲージのばらつきが直接誤差となるため好ましい方法ではない。今回の実験を例にとれば  $200^{\circ}\text{C}$  以上の高温中ではAゲージでこのばらつきは  $\pm 70 \times 10^{-6}$ , Bゲージで  $\pm 250 \times 10^{-6}$  の大きさとなるため測定値が正しく求められない恐れがある。手数でも実験に使用する歪ゲージ一枚ごとに零点移動を求めて補正を行なうことが望ましい。

#### 4.4.2 ゲージ率の均一性

図30, 31はA・Bゲージ4枚づつをステンレスに接着した場合の第5回の温度サイクルにおける温度に対するゲージ率の変化である。これらの実験データから次の事が明らかとなった。

- (1) ゲージ率のばらつきはAゲージは  $100^{\circ}\text{C}$  付近で2%ぐらい,  $180^{\circ}\text{C}$  以上で約5%ぐらいであり昇温時・降温時ともにこの傾向は変わらず, また降温時の常温における値もほぼ1.0にもどる。Bゲージは昇温時・降温時ともに2~4%ほどのばらつきで降温時の常温における値もほぼ1.0になる。
- (2) 温度上昇に伴ってばらつきが増大する傾向はAゲージにはあるが, Bゲージにはみられない。
- (3) ゲージ率の低下とそのばらつきとの間には特別な関係はない。

ゲージ率の均一性についての検討

(a) 多数の歪ゲージを同時に用いる高温構造物試験を行なう場合, あらかじめ同一ロットの歪ゲージから抜き取りを行なってゲージ率の低下を求めて全体の補正を行なう場合, いずれの歪ゲージでも2~3%程度の誤差が含まれることが予想される。

#### 4.5 歪ゲージの取り扱いの難易



実験を行なう過程で以下の事が明らかとなった。

(1) 歪ゲージの接着の難易

(a) 接着剤の塗布

Bゲージに用いたシリコンセメントは流動性がなく一様に試験片に塗布することおよび指定された厚さ0.5mm以下にすることがむずかしく、はなはだしい場合には歪ゲージの接着剤の凹凸にならって曲げられてしまったこともあった。接着剤が必要以上に厚い場合には試片からの歪の伝達が完全に行なわれない事態を生ずる恐れがある。

(b) 歪ゲージのはり付け

A・Bゲージともベース付きのため簡単に行なうことができる。Bゲージのようにベースが不透明の場合には抵抗素線の位置を歪ゲージ上に表示することが必要である。

(c) 接着時の加熱処理

「2.3」で述べたように接着を完全にするために加熱を行なわなければならない。この加熱によって破損または永久変形を生ずるような構造物では組立前に部材ごとに歪ゲージの接着を行なう必要がある。さらに加熱は2～3の温度段階を経過させる必要があり、各段の温度もかなり正確に定めねばならないため、炉内で処理できる小型構造物以外は加熱処理がたいへん面倒である。

(2) リード線接続の難易

(a) 点溶接

点溶接は溶接個所を流れる電流を定める三つの要素、すなわちコンデンサーにたくわえられるチャージの量、溶接個所の抵抗値、圧着の強さに支配され、さらに溶接される金属の材質が同一系統に属することや溶接される線の太さが極端に違わないことが必要であり、やや熟練を要する作業である。

(b) リード線の太さ

高温での歪測定回路では高温となる部分に抵抗値の高いニッケル線などがリード線として使用されるためアクティブ・ダミー両ゲージの抵抗がこれらのリード線の抵抗値だけ増加し歪出力が低下し、このための補正が必要となる。リード線の抵抗を小さくすればこの補正は不要となるが、このためリード線を極端に太くするとリード線の接続がむずかしくなるばかりでなく、歪ゲージのくち出し線に比べて太く剛性の高い線が接続されるため点溶接後のリード線の処理時に歪ゲージのくち出し線に大きな力がかかりやすく溶接部分が離れてしまったり歪ゲージを破損してしまう場合が多い。接着時の加熱処理を済ませた歪ゲージを破損した場合には再度加熱処理を行なわねばならず試験構造物や近隣の歪ゲージに及ぼす影響を考えると事態はきわめて面倒である。

## 5. 結 論

国産2種の高温歪ゲージについて最高380°Cまでの高温ふんいき中で温度特性試験を行なった結果、次のごとき結論を得た。

試験した高温歪ゲージはすべての点で常温用の歪ゲージと同様に簡便に使用できしかも同程度の測定精度を持つものではなかった。しかし、内外の文献を調べても現在市販されているいずれの高温歪ゲージも常温用のものと同程度の精度と使いやすさを持つものはない。

現在、これらの高温歪ゲージを用いて高温となる構造の歪測定を行なう場合には次の条件が満たれる必要がある。

(a) 歪ゲージの接着時の加熱処理とその後に試験最高温度より若干高い温度で予加熱を1時間ほど行なうこと。

(b) 零点移動が外荷重や熱歪に基づく真の歪値に比べて極端に大きくない歪ゲージを選ぶこと。また、零点移動の補正が行なえること。

(c) ゲージ率の低下に基づく歪出力の低下の補正が行なえること。

(d) 高温で試験を繰り返し行なう場合には、上記の(a)～(c)のほかにも零点移動とゲージ率の変化の試験の繰返しによる変動を補正しうること。

これらの条件が満たされれば高温中での歪測定は可能である。しかしこの場合でも測定可能な最高温度は300～400°Cであり、その測定誤差もかなり大きいものと考えねばならない。

この研究に対して御指導下さった竹中室長ならびに実験に協力された遠藤修司、野口義男の両君に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 竹中幸彦：高温歪ゲージの温度特性，航技研報告TR-6（昭和35）
- 2) 竹中幸彦：高温および低温における歪測定，日本機械学会誌 第68巻，第554号，（昭和40/3）p. 96
- 3) 江川幸一：高温歪ゲージに関する一実験，日本非破壊検査協会資料4150（昭和36）第5回宇宙科学技術シンポジウム前刷（昭和37）
- 4) W. Wiebe; The Behavior of Fine Nickel Copper Alloy Wires with Negative Temperature. Coefficient of Resistance, National Council of Canada, MS-100 (1959)
- 5) 竹中幸彦：高温歪ゲージの諸問題，機械の研究14巻（昭和37）pp. 628-634
- 6) 江川幸一：高温歪ゲージのクリープ試験，日本非破壊検査協会資料4187（昭和39）
- 7) R. Bertodo; Development of High Temperature Strain Gages, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineerings, Vol 173, No. 23 (1959)
- 8) R. L. Bloss; Evaluation of Resistance Strain Gages at Elevated Temperature, Material Research and Standard (1961) p. 9-15

表1 試験に用いた高温歪ゲージ

歪ゲージ名	A	B
寸 度 (mm)	26×8 単軸	24×7 単軸
標点距離 (mm)	10	10
抵 抗 値	120	120
ゲージ率 (Ω)	2.02	2.38
抵抗線材料	アドバンス線 (0.025mmφ)	カルマ線 (0.025mmφ)
ゲージ型式	格子型	格子型
ベース材料	アスベストシートをシリコン樹脂で処理	ガラスセインのシートに耐熱性プラスチック含浸
接 着 剤	シリコン樹脂	シリコンセメント
*使用上限温度 (°C)	静300 動400	450
使用数量	20枚	20枚

\*使用上限温度はメーカーの指定した値

表2 試験片材料

材 料 名	線膨脹係数 (1/°C)	接着した歪ゲージ
ステンレス鋼 SUS27	$16 \times 10^{-6}$	A, B
黄 銅 BSP3	19 "	"
アルミ合金 24S	23 "	"
ニッケル鋼		"
石英ガラス	$0.5 \times 10^{-6}$	"

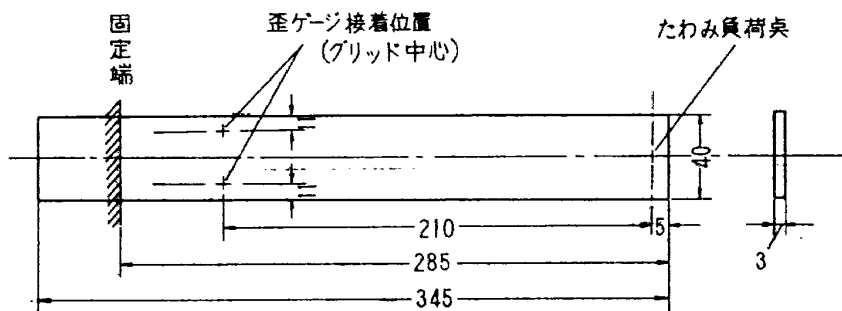


図1 試片と歪ゲージ接着位置  
(石英ガラス試験片のみは100×100×5t, 半透明)

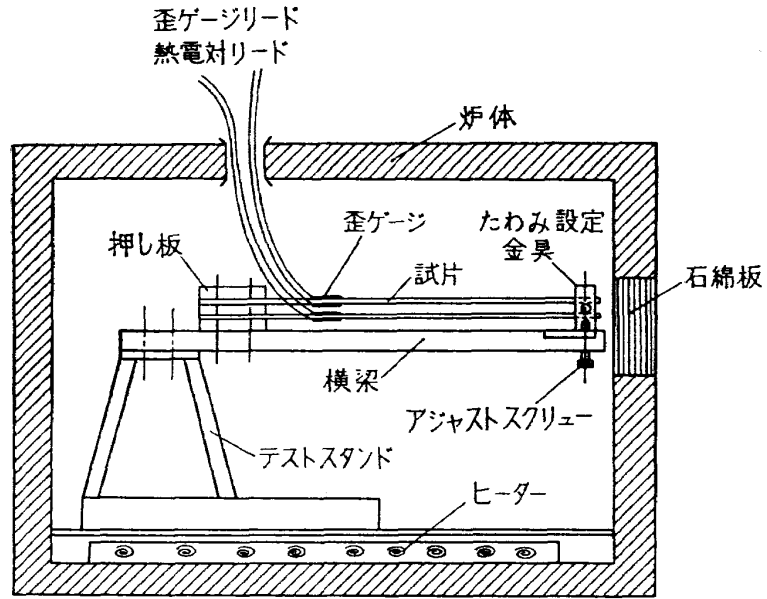


図2 実験装置

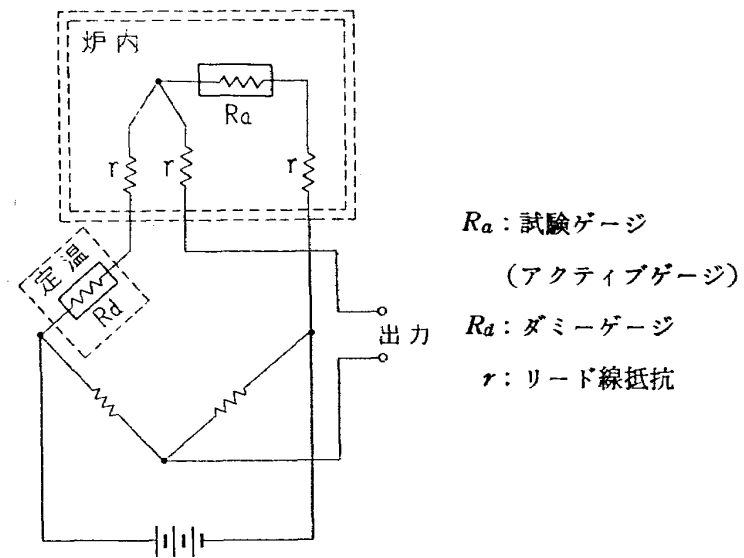


図3 測定回路

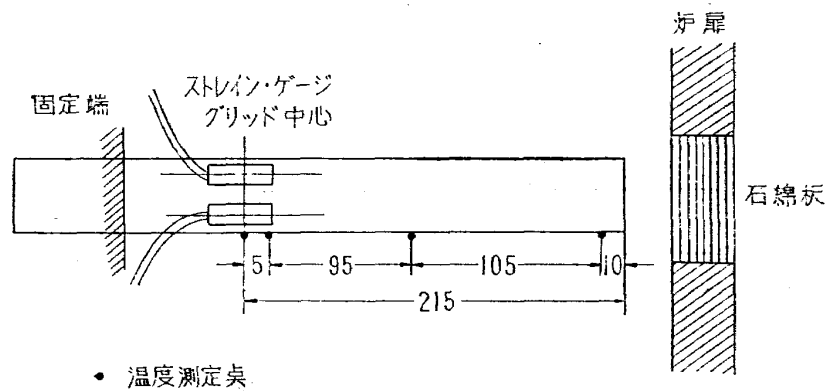


図4 温度測定位置

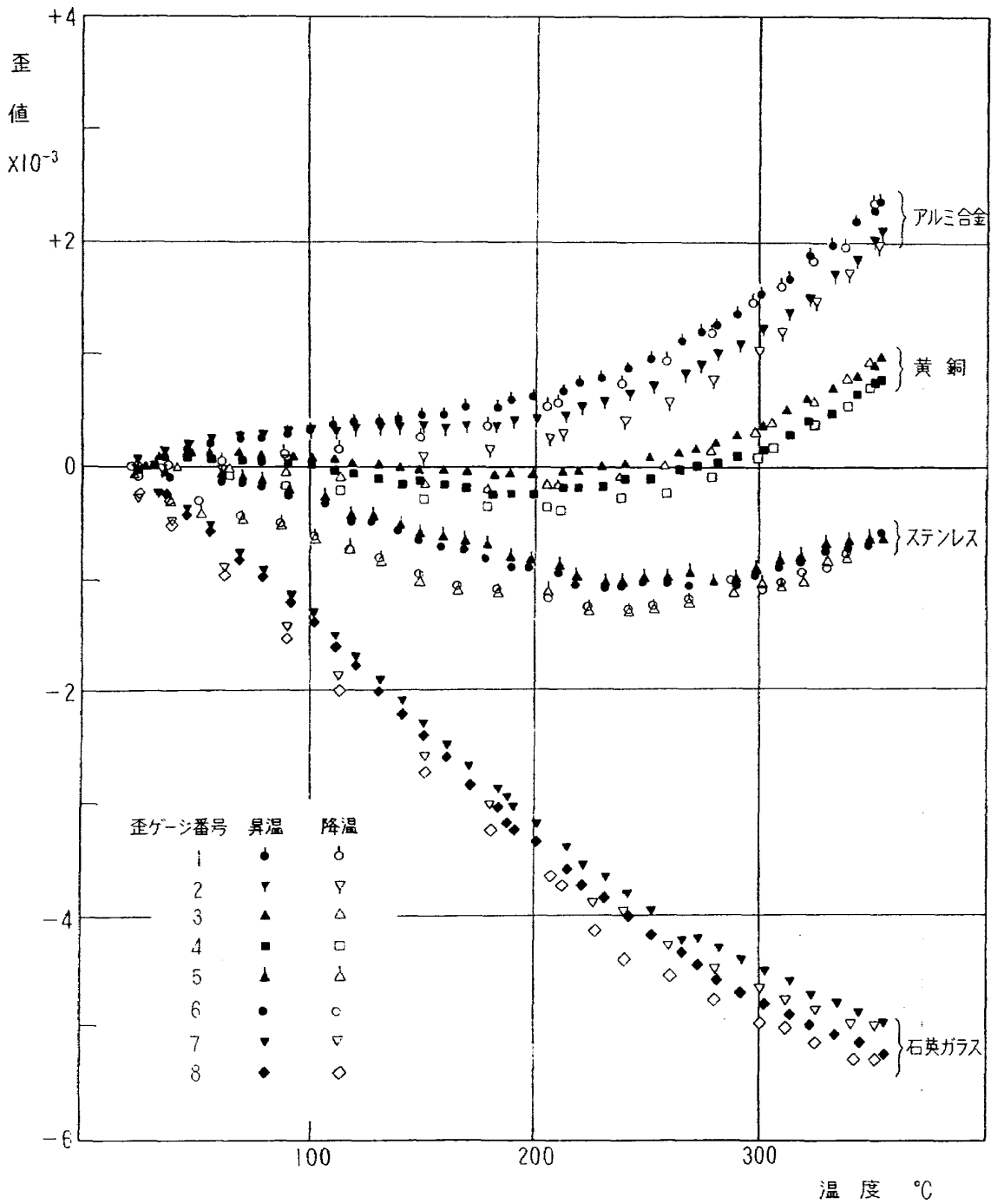


図5 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, 温度サイクル第11回)

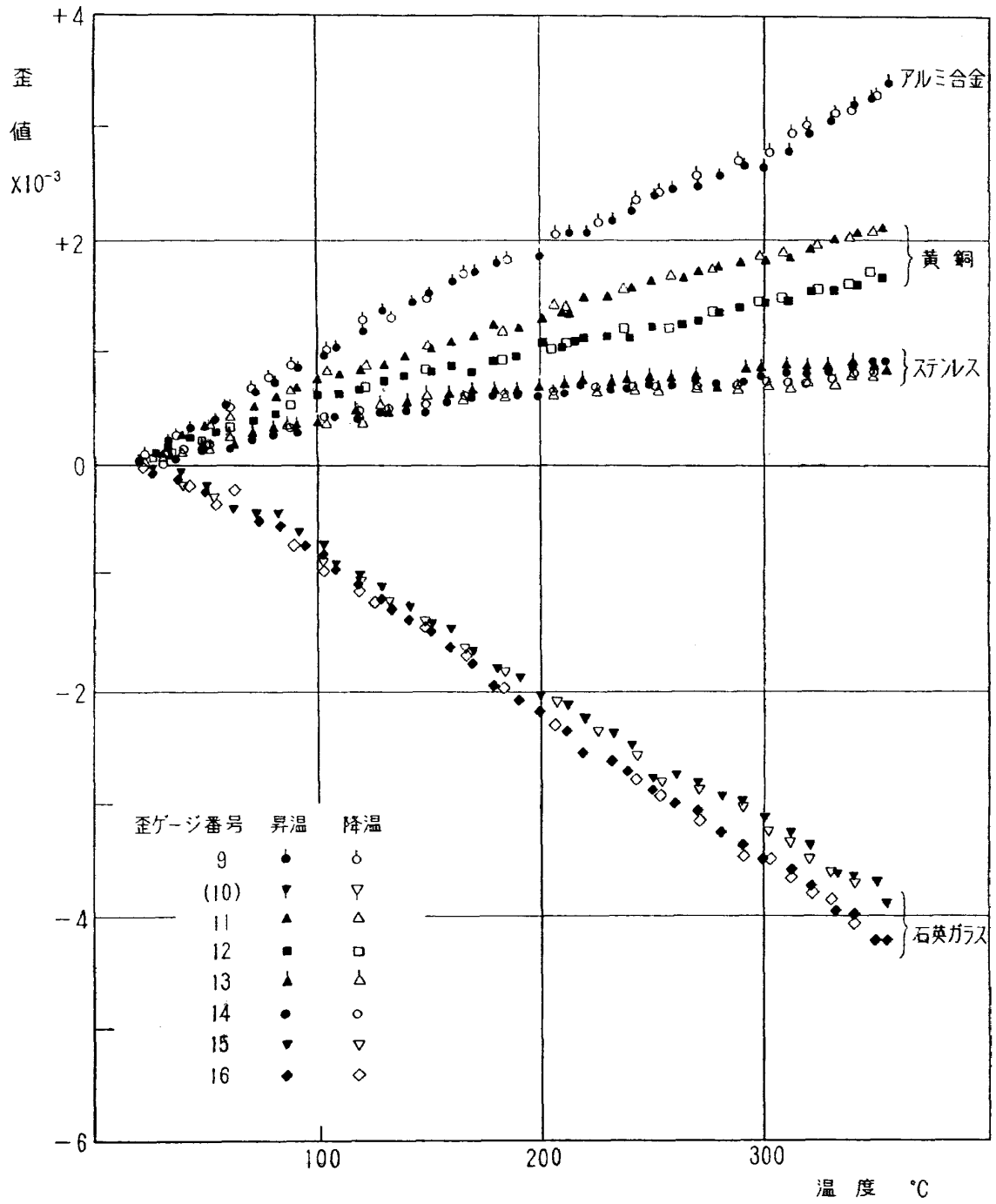


図6 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, 温度サイクル第11回)

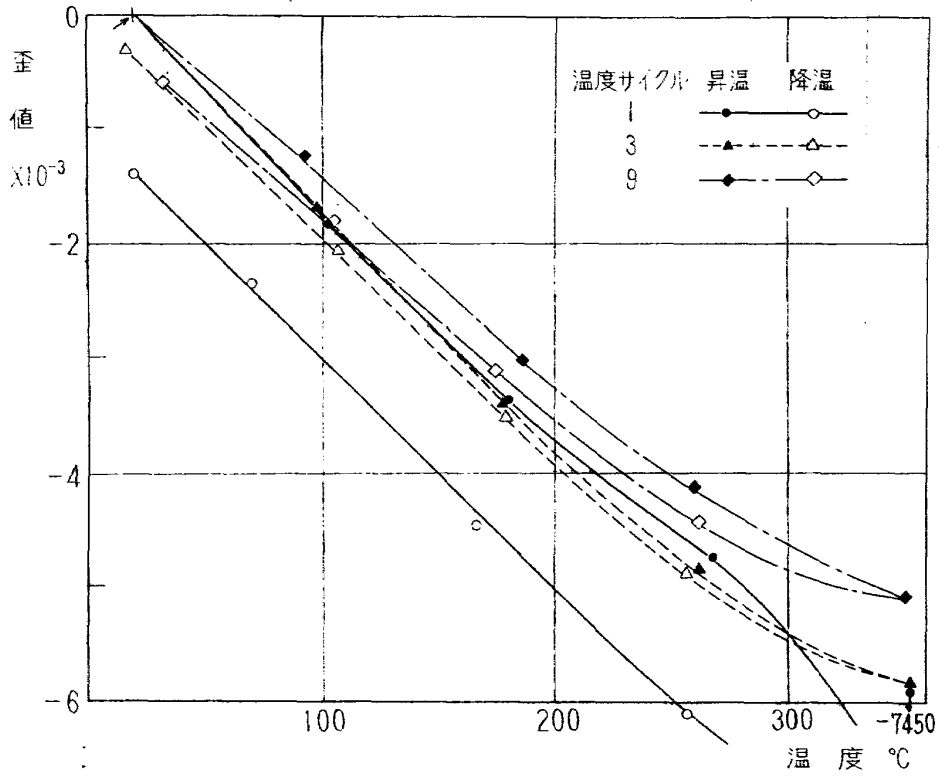


図7 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, 石英ガラスに接着)

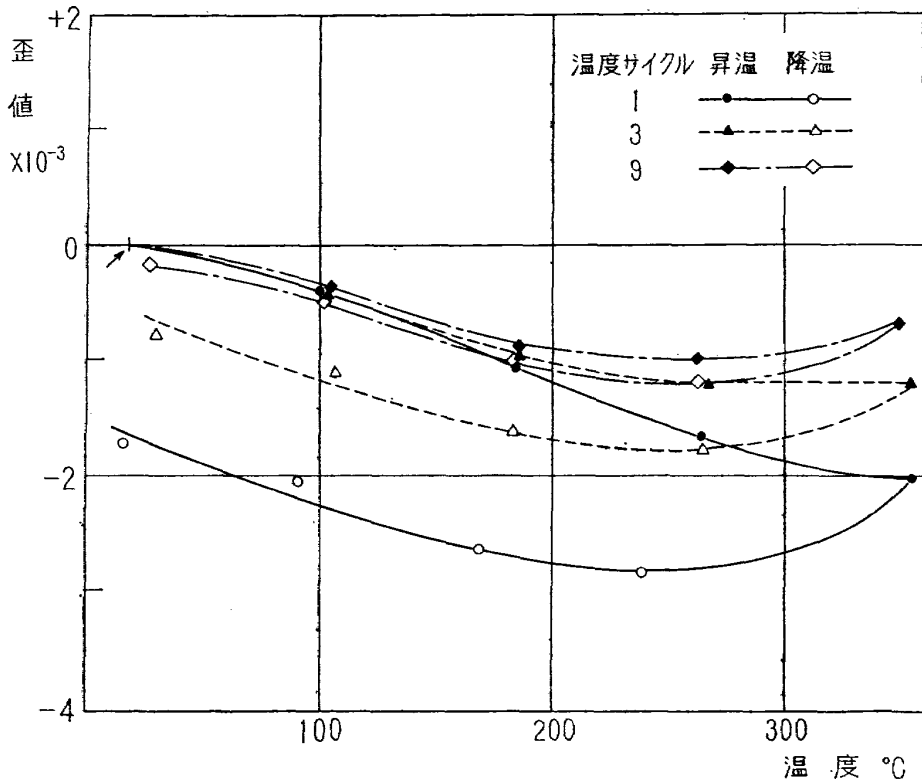


図8 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, ステンレスに接着)

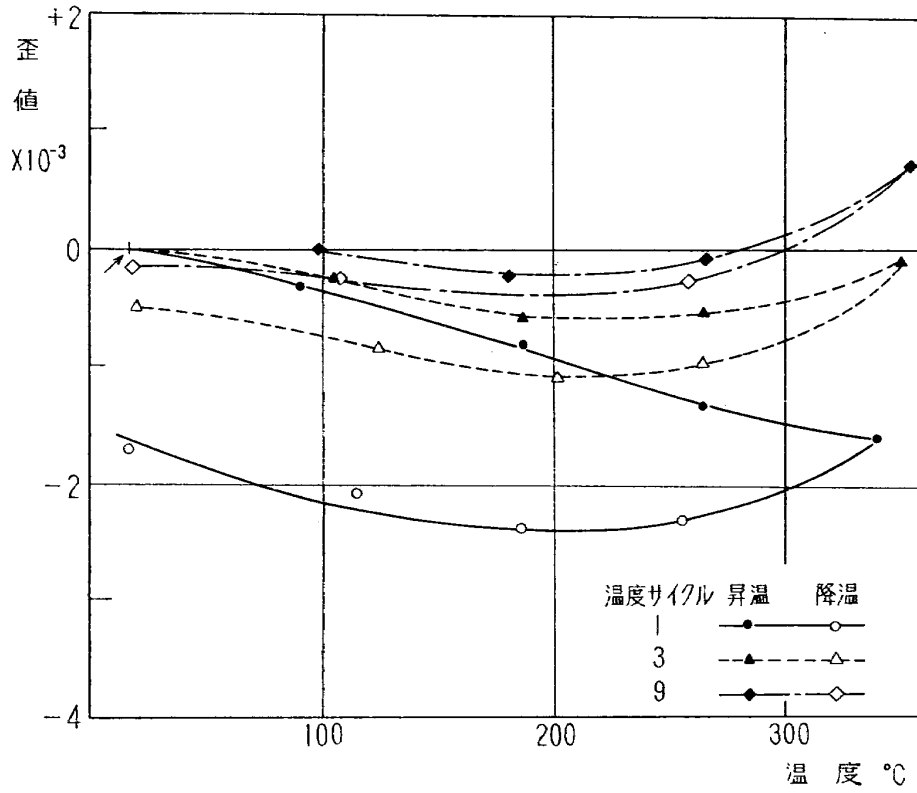


図9 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, 黄銅に接着)

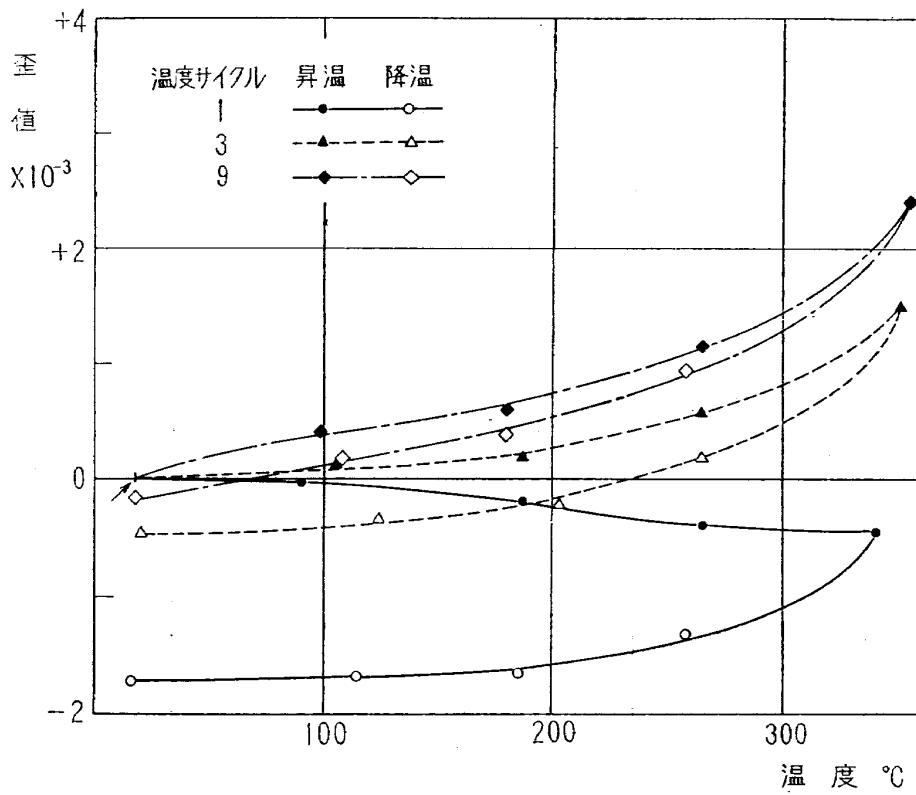


図10 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, アルミ合金に接着)



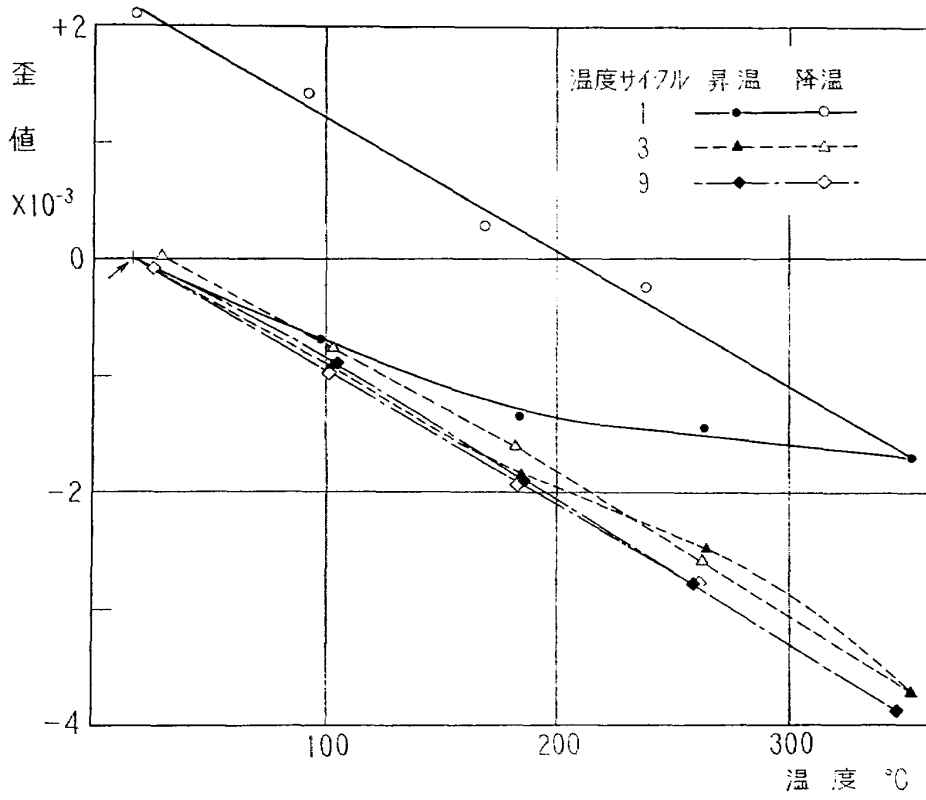


図11 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, 石英ガラスに接着)

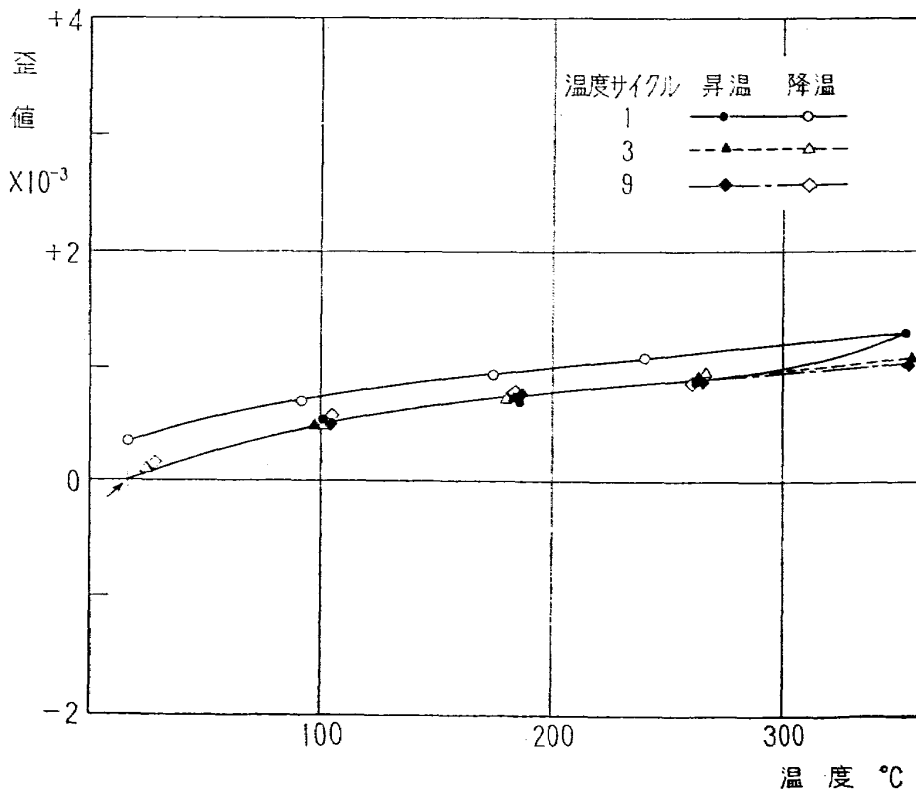


図12 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, ステンレスに接着)

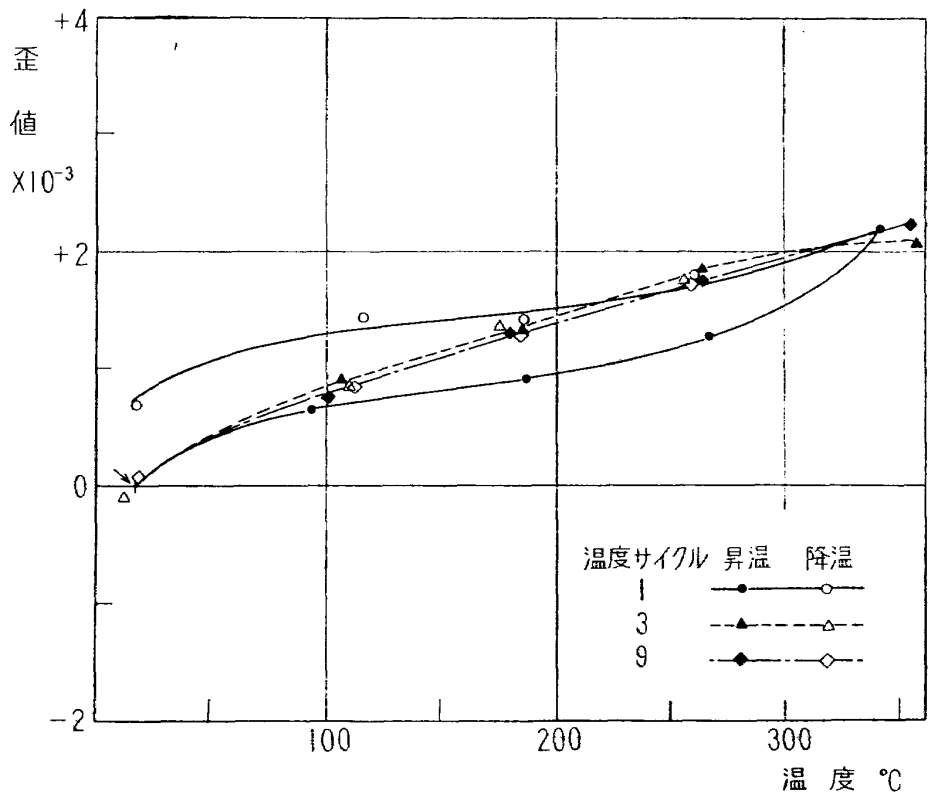


図13 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, 黄銅に接着)

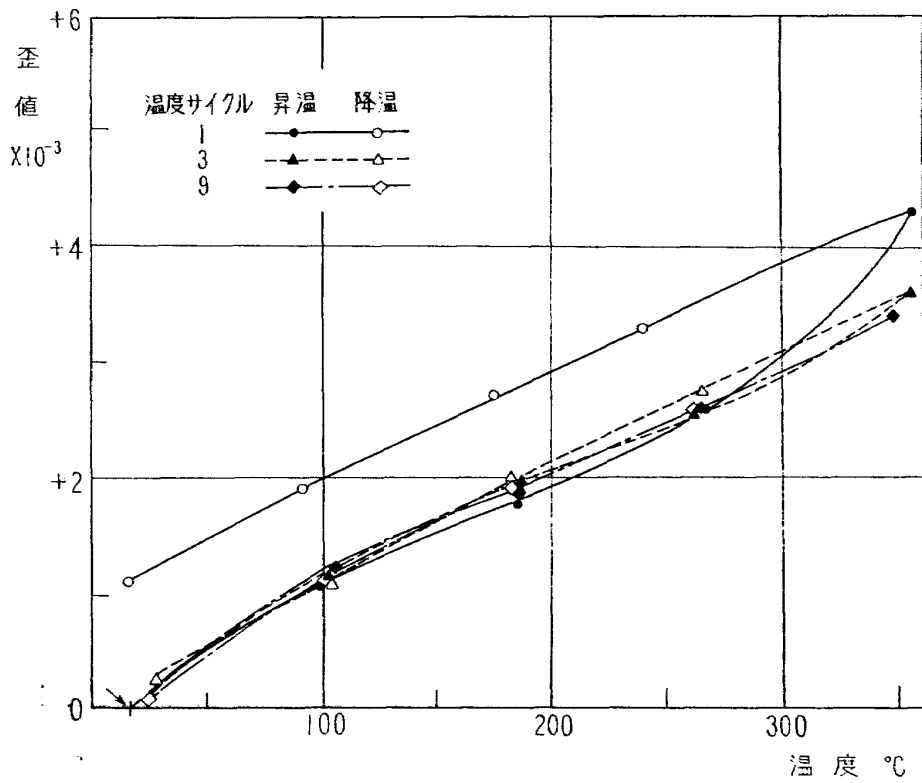


図14 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, アルミ合金に接着)

表3 零点移動のこう配と試験片の線膨脹係数との関係  
(歪ゲージA, 温度範囲70~200°C)

(1)	(2)	(3)	(4)
試験材料	零点移動のこう配 (1/°C)	線膨脹係数 (1/°C)	(2)-(3)
石英ガラス	-21.2×10 <sup>-6</sup> -19.6 "	0.5×10 <sup>-6</sup>	-21.7×10 <sup>-6</sup> -20.1 "
ステンレス鋼	- 6.0 " - 6.0 "	16 "	-21.0 " -21.0 "
黄銅	- 2.0 " - 2.6 "	19 "	-21.0 " -21.6 "
アルミ合金	+ 1.2 " + 2.8 "	23 "	-21.8 " -20.2 "
			(2)-(3)の平均値≒-21.1×10 <sup>-6</sup>

表4 零点移動のこう配と試験片の線膨脹係数との関係  
(ゲージB, 温度範囲70~200°C)

(1)	(2)	(3)	(4)
試験材料	零点移動のこう配 (1/°C)	線膨脹係数 (1/°C)	(2)-(3)
石英ガラス	-14.0×10 <sup>-6</sup> -12.4 "	0.5×10 <sup>-6</sup>	-14.5×10 <sup>-6</sup> -12.9 "
ステンレス鋼	+ 2.8 " + 2.8 "	16 "	-13.2 " -13.2 "
黄銅	+ 4.4 " + 6.0 "	19 "	-14.6 " -13.0 "
アルミ合金	+ 9.2 "	23 "	-13.8 "
			(2)-(3)の平均値≒-13.6×10 <sup>-6</sup>

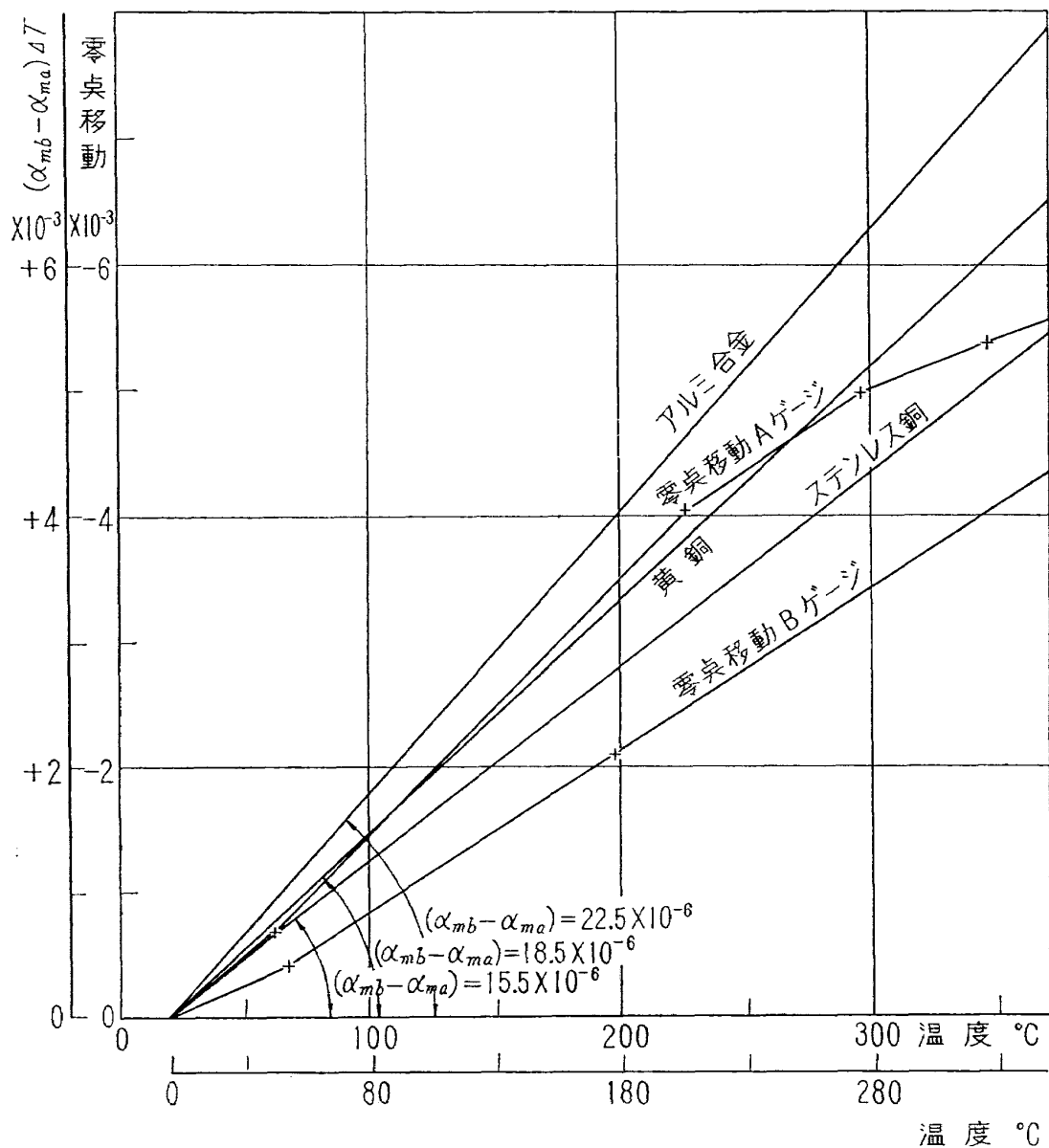


図15 石英ガラスに接着した歪ゲージの零点移動からステンレス，黄銅，アルミ合金に接着した場合の零点移動を求める方法  
 (零点移動は折線近似)

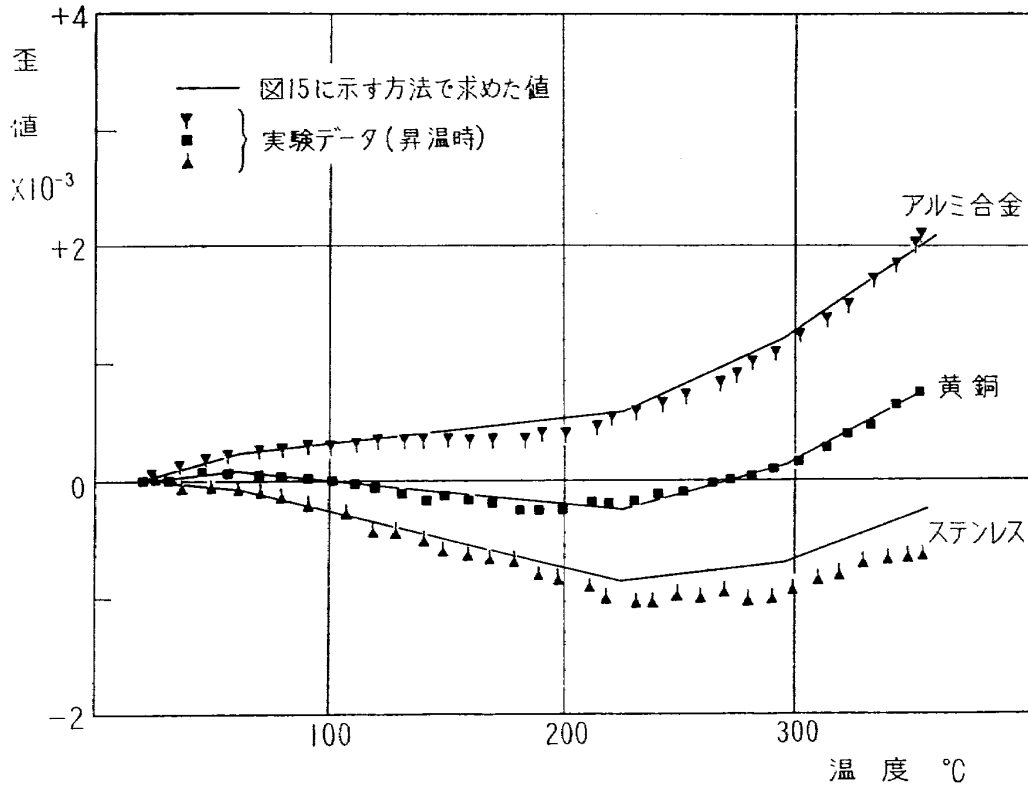


図16 図15に示す方法で求めた零点移動と実験データとの比較  
(歪ゲージA)

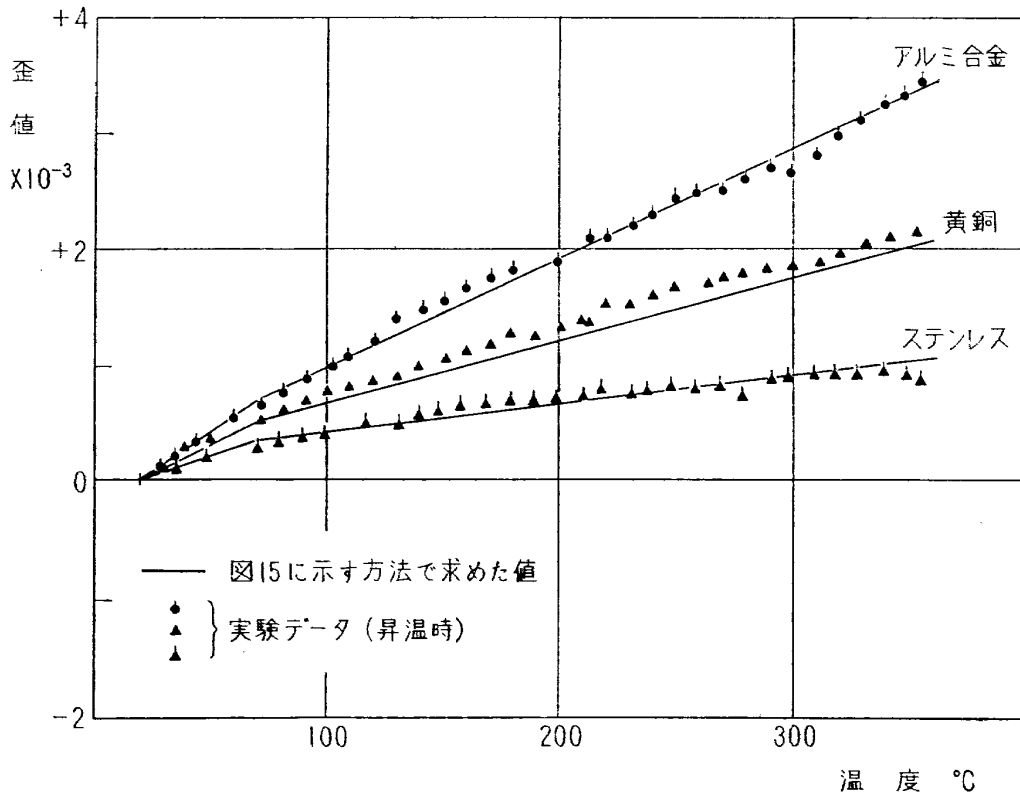


図17 図15に示す方法で求めた零点移動と実験データとの比較  
(歪ゲージB)

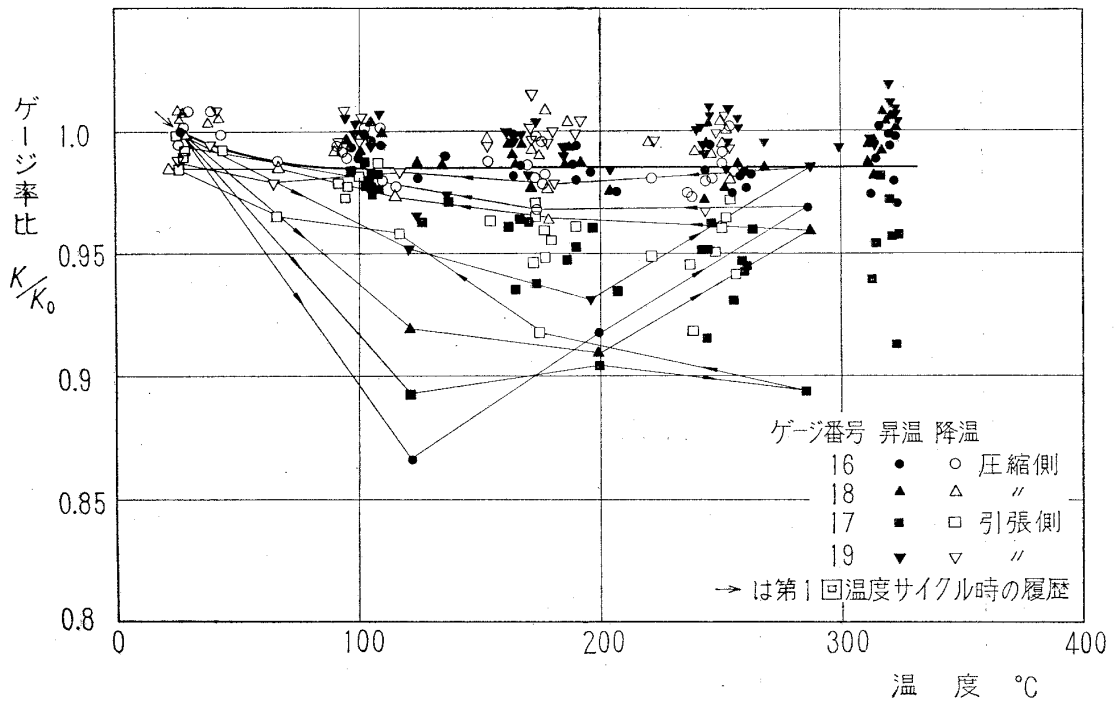


図18 歪ゲージの温度変化によるゲージ率の変化  
 (歪ゲージA, ステンレスに接着)

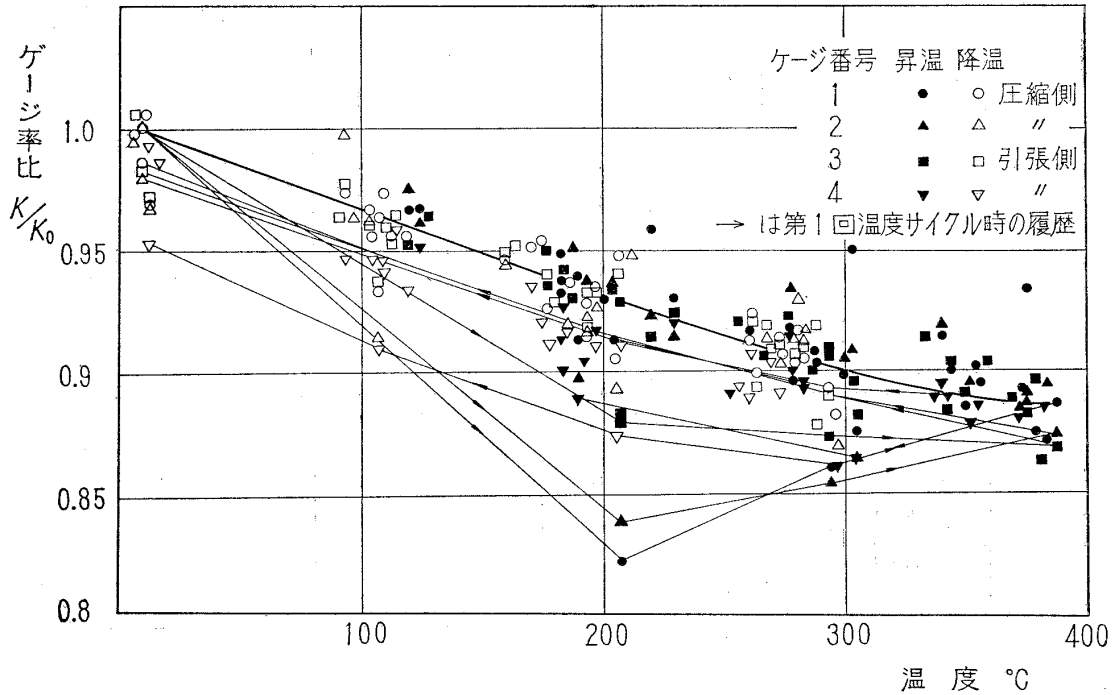


図19 歪ゲージの温度変化によるゲージ率の変化  
 (歪ゲージB, ステンレスに接着)

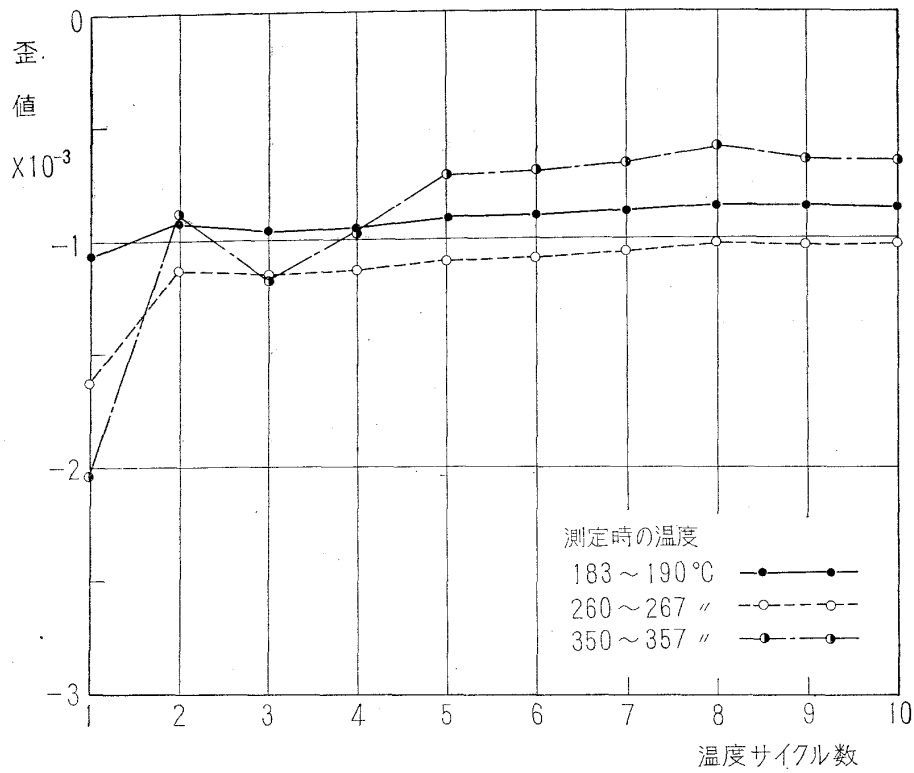


図20 温度サイクルの繰返しによる零点移動の変動  
(歪ゲージA, ステンレスに接着)

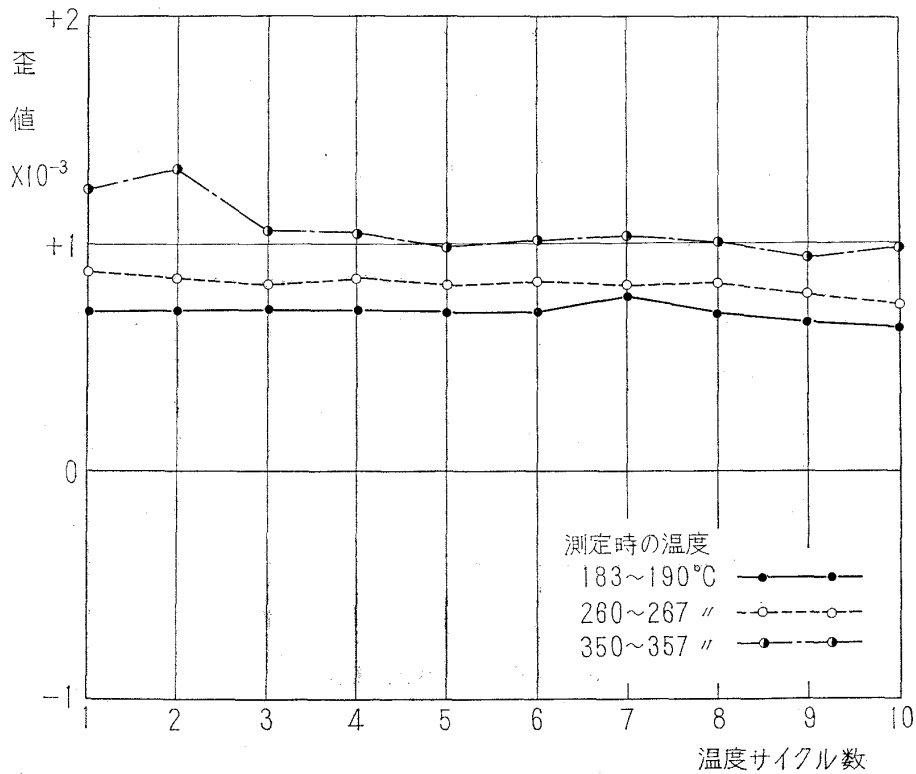


図21 温度サイクルの繰返しによる零点移動の変動  
(歪ゲージB, ステンレスに接着)

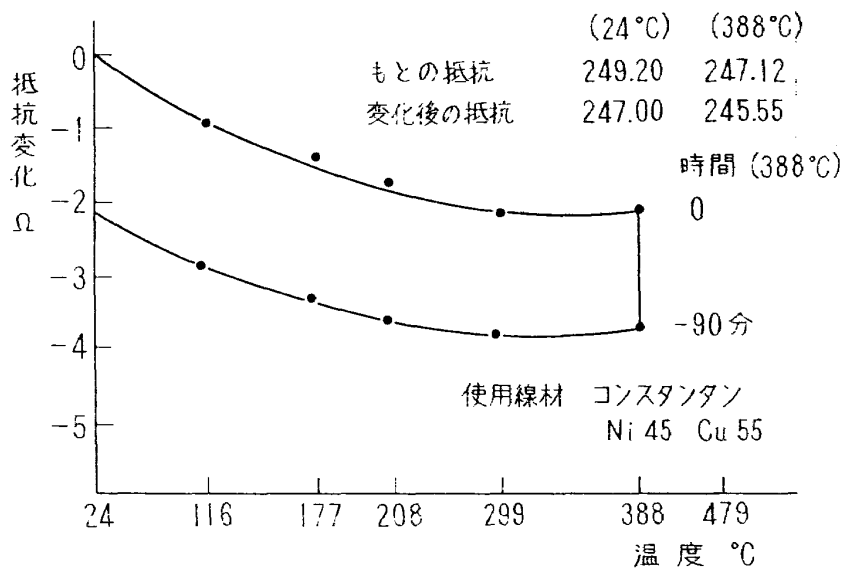


図22 抵抗変化 (温度の関係)

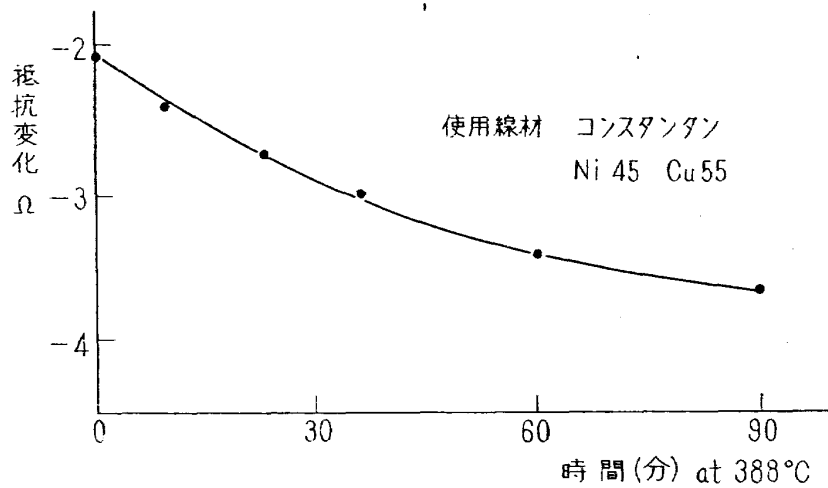


図23 抵抗変化 (時間の関係)



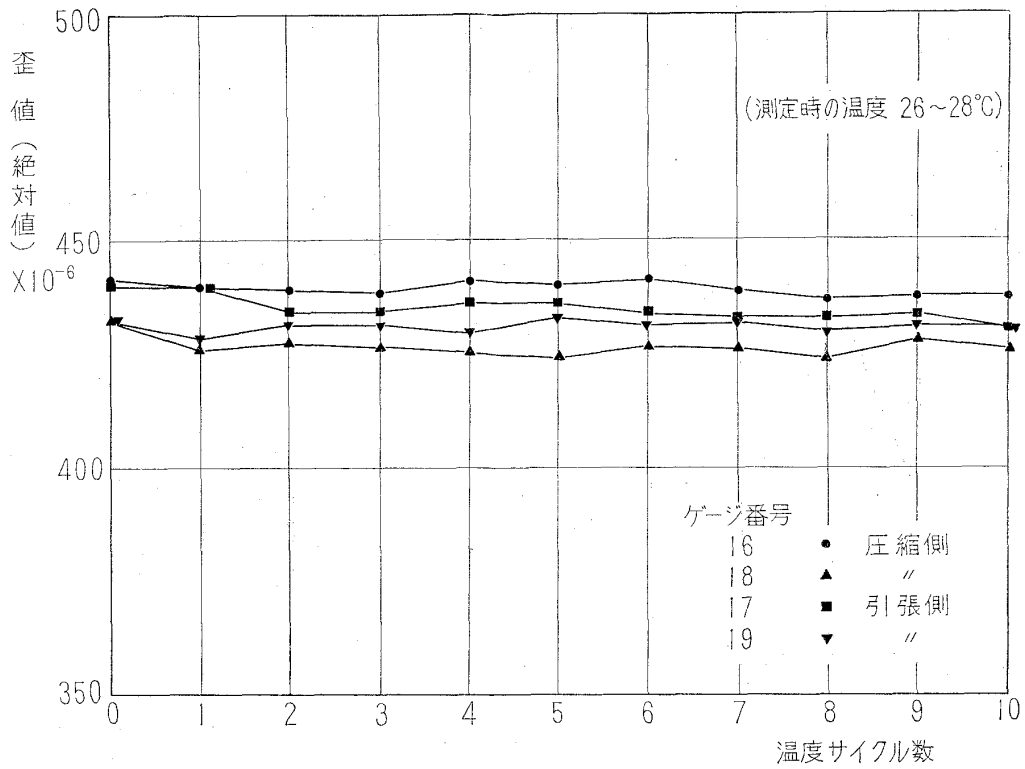


図24 温度サイクルの繰返しによる歪出力の変化  
(歪ゲージA, ステンレスに接着)

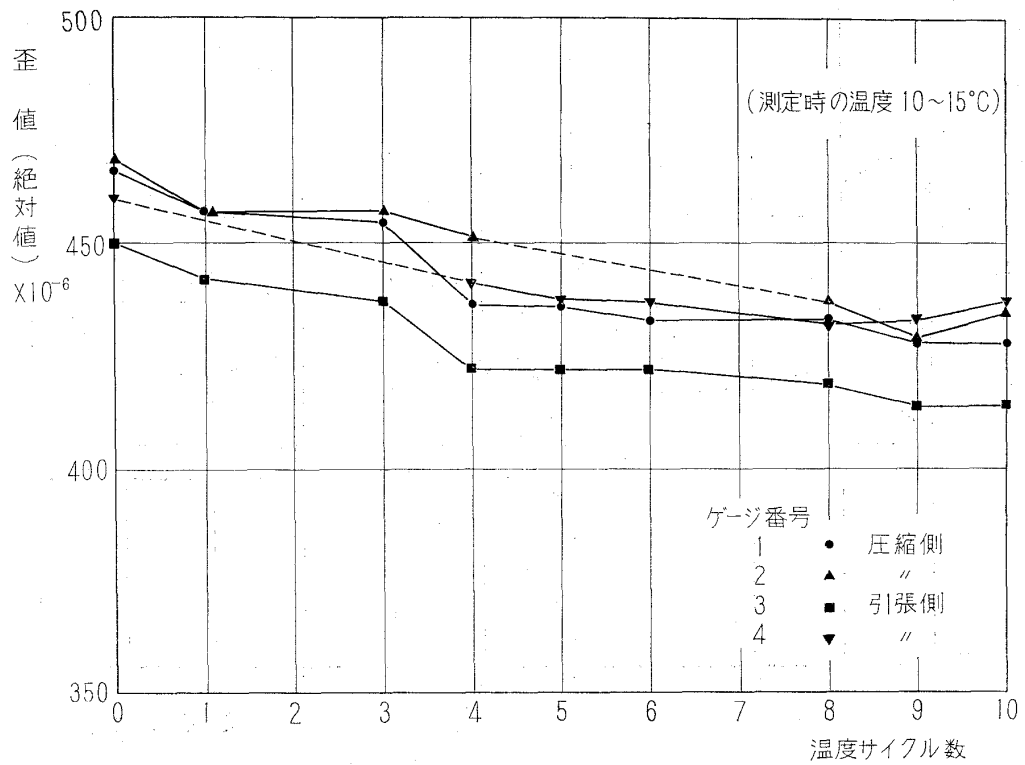


図25 温度サイクルの繰返しによる歪出力の変化  
(歪ゲージB, ステンレスに接着)

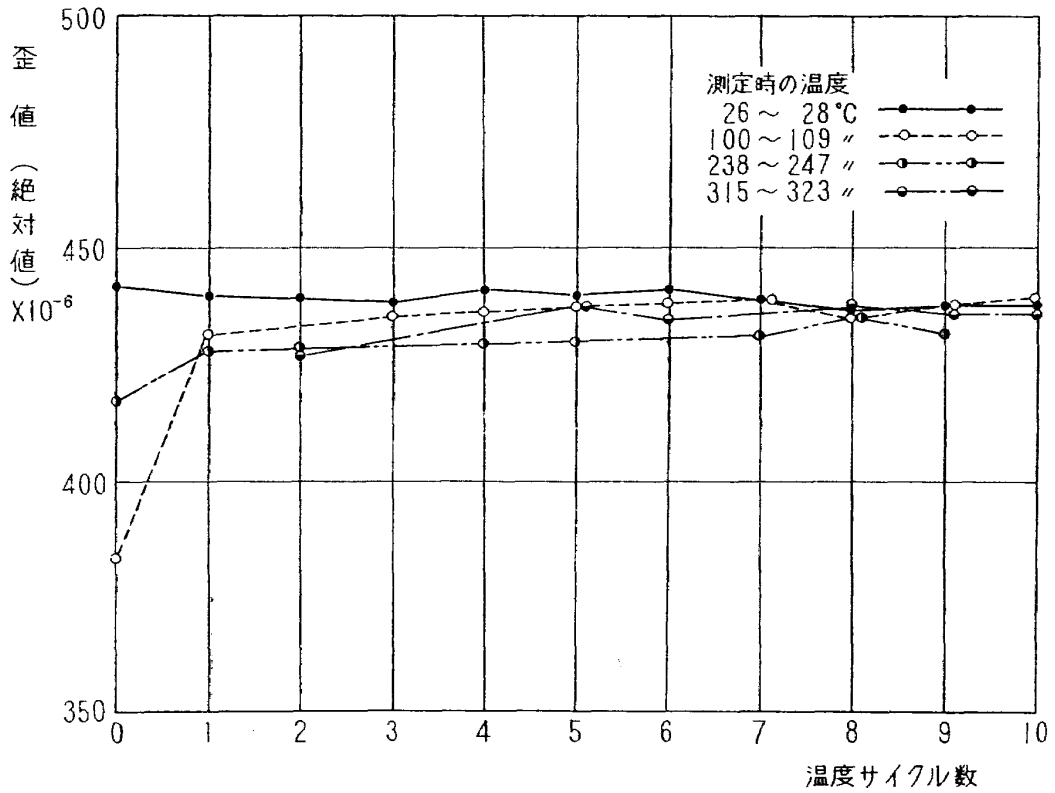


図26 温度サイクルの繰返しによる歪出力の変化  
(歪ゲージA ステンレスに接着)

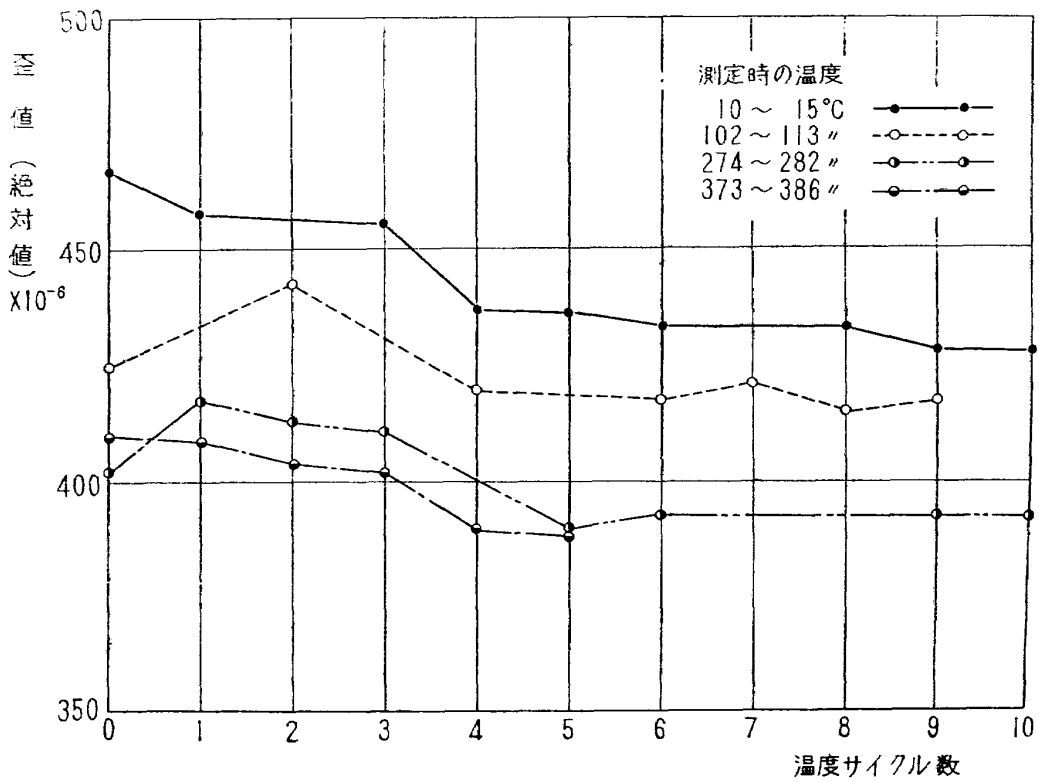


図27 温度サイクルの繰返しによる歪出力の変化  
(歪ゲージB ステンレスに接着)

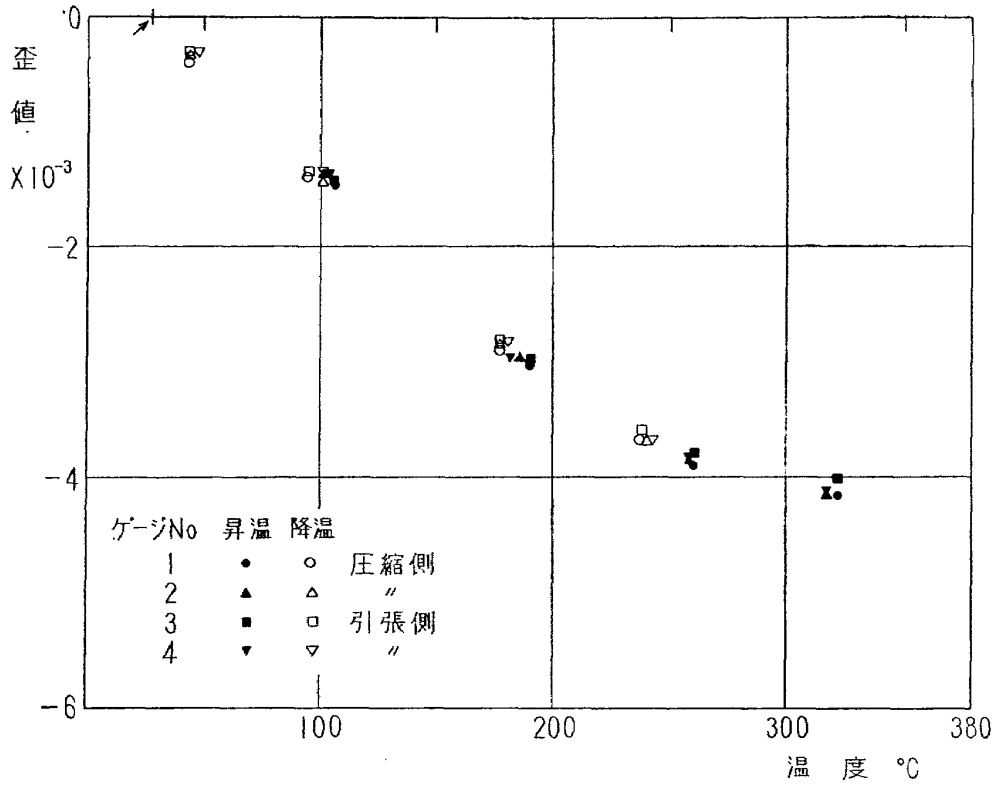


図28 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージA, ニッケルに接着, 温度サイクル第5回)

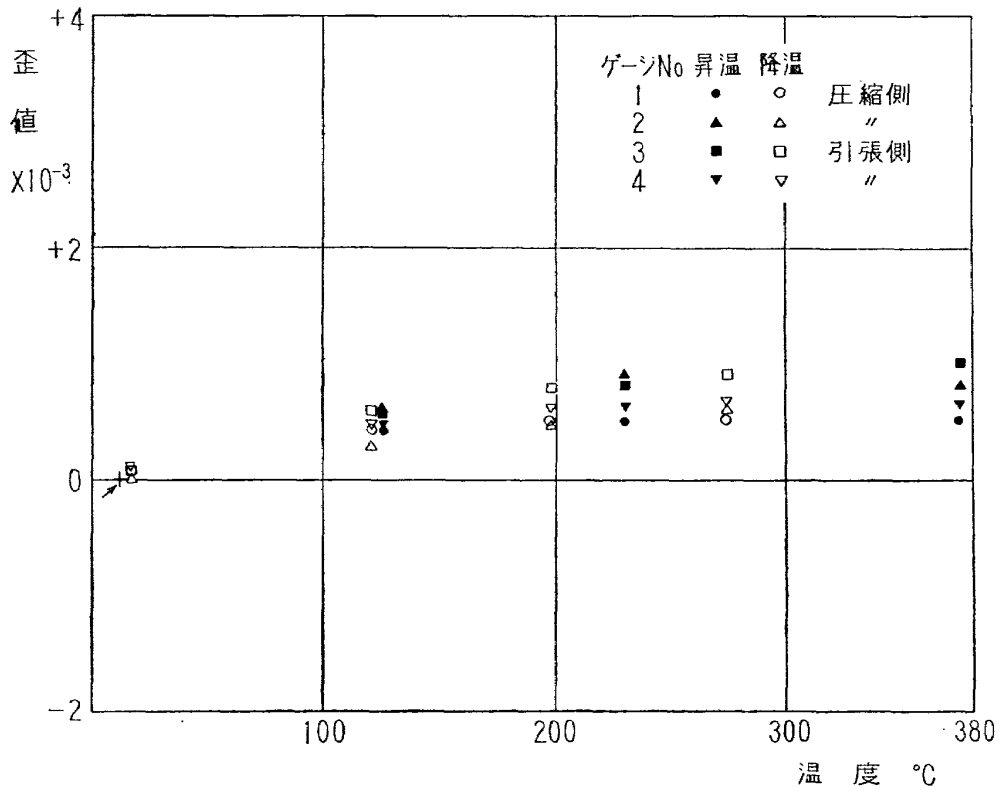


図29 歪ゲージの温度変化による零点移動  
(歪ゲージB, ニッケルに接着, 温度サイクル第5回)

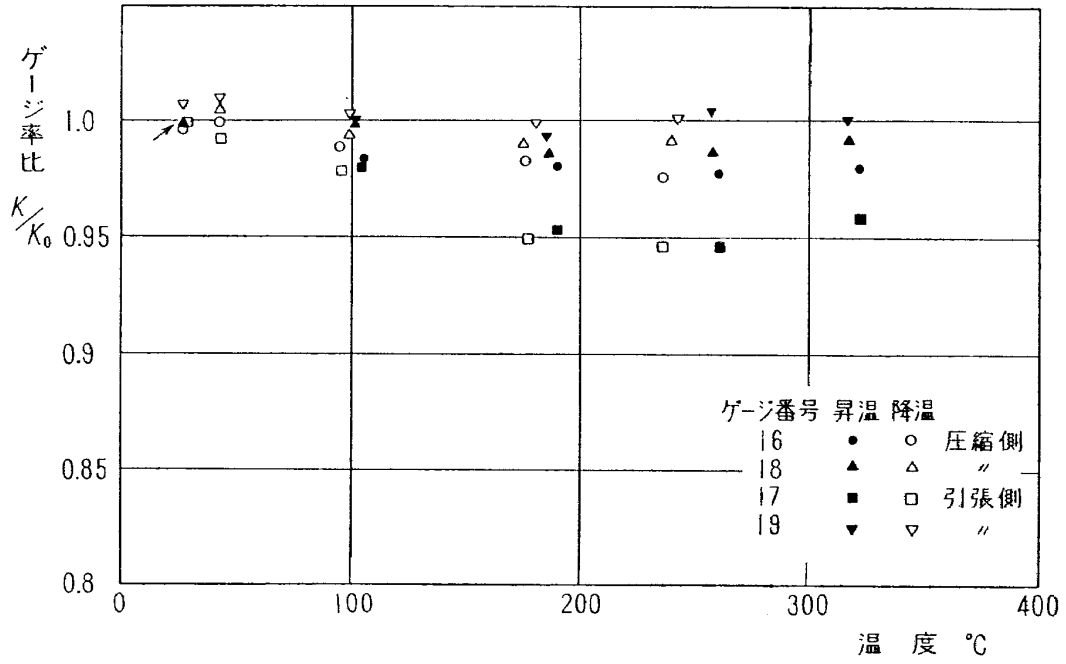


図30 歪ゲージの温度変化によるゲージ率の変化  
(歪ゲージA, ステンレスに接着, 温度サイクル第5回)

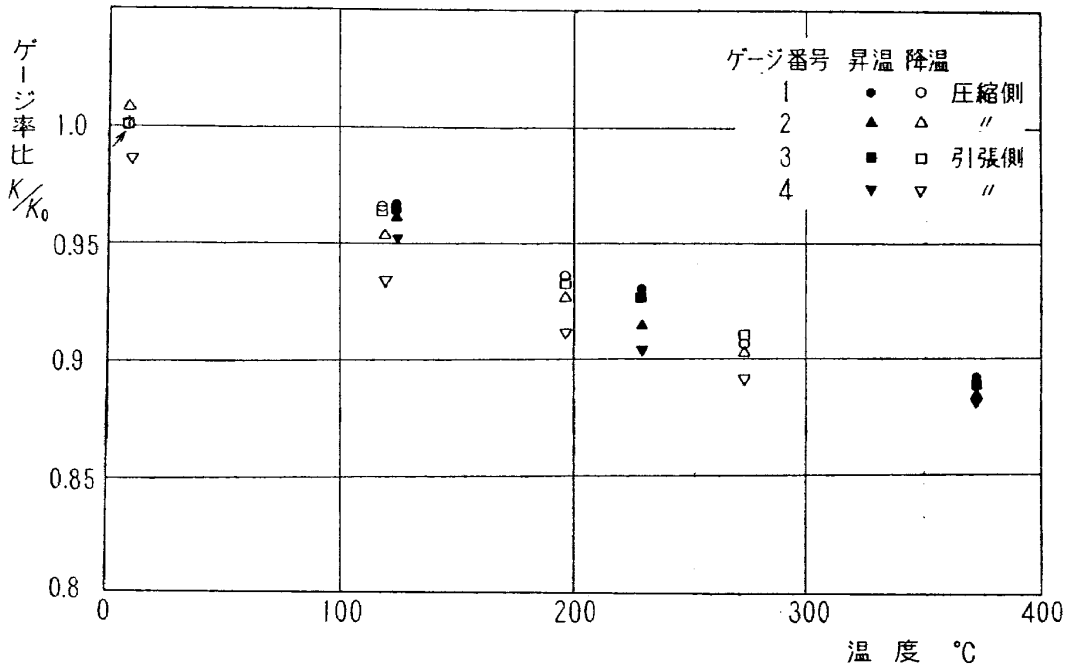


図31 歪ゲージの温度変化によるゲージ率の変化  
(歪ゲージB, ステンレスに接着, 温度サイクル第5回)

NAL TM-62

航空宇宙技術研究所

高温歪ゲージの温度特性試験

I. 江川幸一

II. NAL TM-62

III. 536.45

1965年10月

34ページ

国産2種の高温歪ゲージについてその温度特性を試験し、これらを用いていかによれば信頼度の高い歪測定が高温中で行なえるかを検討した。これらは常温用の歪ゲージと同等な精度と使いやすさを持つものではないが、1)歪ゲージの接着時の加熱処理とその後予加熱が行なえる。2)零点移動が外荷重や熱歪に基づく真の歪値に比べて極端に大きくない歪ゲージを選ぶ。また、零点移動の補正が行なえる。3)ゲージ率の低下の補正が行なえる。などの条件が満たされれば高温中での歪測定は可能である。しかしこの場合でも測定可能な最高温度は300~400°Cで、その測定誤差もかなり大きい。

NAL TM-62

航空宇宙技術研究所

高温歪ゲージの温度特性試験

I. 江川幸一

II. NAL TM-62

III. 536.45

1965年10月

34ページ

国産2種の高温歪ゲージについてその温度特性を試験し、これらを用いていかによれば信頼度の高い歪測定が高温中で行なえるかを検討した。これらは常温用の歪ゲージと同等な精度と使いやすさを持つものではないが、1)歪ゲージの接着時の加熱処理とその後予加熱が行なえる。2)零点移動が外荷重や熱歪に基づく真の歪値に比べて極端に大きくない歪ゲージを選ぶ。また、零点移動の補正が行なえる。3)ゲージ率の低下の補正が行なえる。などの条件が満たされれば高温中での歪測定は可能である。しかしこの場合でも測定可能な最高温度は300~400°Cで、その測定誤差もかなり大きい。

NAL TM-62

航空宇宙技術研究所

高温歪ゲージの温度特性試験

I. 江川幸一

II. NAL TM-62

III. 536.45

1965年10月

34ページ

国産2種の高温歪ゲージについてその温度特性を試験し、これらを用いていかによれば信頼度の高い歪測定が高温中で行なえるかを検討した。これらは常温用の歪ゲージと同等な精度と使いやすさを持つものではないが、1)歪ゲージの接着時の加熱処理とその後予加熱が行なえる。2)零点移動が外荷重や熱歪に基づく真の歪値に比べて極端に大きくない歪ゲージを選ぶ。また、零点移動の補正が行なえる。3)ゲージ率の低下の補正が行なえる。などの条件が満たされれば高温中での歪測定は可能である。しかしこの場合でも測定可能な最高温度は300~400°Cで、その測定誤差もかなり大きい。

NAL TM-62

航空宇宙技術研究所

高温歪ゲージの温度特性試験

I. 江川幸一

II. NAL TM-62

III. 536.45

1965年10月

34ページ

国産2種の高温歪ゲージについてその温度特性を試験し、これらを用いていかによれば信頼度の高い歪測定が高温中で行なえるかを検討した。これらは常温用の歪ゲージと同等な精度と使いやすさを持つものではないが、1)歪ゲージの接着時の加熱処理とその後予加熱が行なえる。2)零点移動が外荷重や熱歪に基づく真の歪値に比べて極端に大きくない歪ゲージを選ぶ。また、零点移動の補正が行なえる。3)ゲージ率の低下の補正が行なえる。などの条件が満たされれば高温中での歪測定は可能である。しかしこの場合でも測定可能な最高温度は300~400°Cで、その測定誤差もかなり大きい。

TM-49	Queen-Air 機の失速特性について	1965年 2月	幸尾 治朗, 岡 遠一 照井 祐之, 鎌田 幸男 中井 暎一, 塙 武
TM-50	LS-A 型ロケットの曲げ剛性および振動試験について	1965年 5月	泉 日出夫, 高 島 一 谷 原 亘, 近 藤 洋 原 垣 芳雄, 利 洋史
TM-51	超音速風洞空力データ表示記録装置	1965年 5月	武藤 洋治郎, 池田 為治 坂元 思無邪, 光山 敏雄 河崎 俊夫, 谷 喬
TM-53	ベクトルのノルムと行列のノルム —数値解法の収束条件その他への応用—	1965年 5月	石田 誠, 河野 哲雄
TM-54	熱衝撃試験用風洞整備試験	1965年 5月	曾 我国 男
TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年 5月	齋藤 秀夫, 木村 友昭 近藤 博, 増田 惣平
TM-56	2024-T4アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年 7月	原 亘利, 高島 一明 関 根 英夫, 中 正夫 戸川 保子, 矢田 健司 塚末 健雄, 沢村 征一 佐野 雄吉, 能 村 一実 別府 四信, 宏
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年 7月	
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風洞試験	1965年 8月	
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取り入口の実験 (I)	1965年 9月	
TM-60	吹出式超音速風洞における実験データの処理方式について (II)	1965年 9月	
TM-61	クインエア機の風洞試験	1965年 9月	

注：欠番は配布先を限定したもの

---

## 航空宇宙技術研究所資料 62号

昭和 40 年 10 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野 (0422) (4) 9171 (代表)

印刷所 奥村印刷株式会社  
東京都千代田区西神田 1~10

---