

UDC 621.317.39
531.75:531.768

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-146

半導体歪ゲージを用いる小型高感度
加速度計の研究

田畑 浄治・大坪 孔治・滝沢 実

1967 年 11 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- | | | | |
|---------|--|-----------|---|
| TR-125T | Experimental and Calculated Results of Supersonic Flutter Characteristics of a Low Aspect-Ratio Flat-Plate Surfaces | Jan. 1967 | Eiichi NAKAI, Toshiro TAKAGI, Koji ISOGAI, Toshiyuki MORITA |
| TR-126 | 高負荷燃焼器の箱形模型による実験 (II)
Some Experiments on High Intensity Combustor with Partial Models (II) | 1967年2月 | 大塚貞吉, 福田 広
相波哲朗 |
| TR-127 | 周波数変換による微小回転角の計測
Measurement of Small Rotating Angle by the Frequency Modulation Technique | 1967年3月 | 大月正男, 鈴木孝雄
円居繁治 |
| TR-128 | 輻射加熱による固体の熱的物性値の測定法
Infra-red Radiation Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity of Solid Materials | 1967年3月 | 小川 敏一 |
| TR-129 | 金属箔による円管流の熱絶縁
Thermal Insulation of Metal Foil for the Case of Circular Pipe Flow | 1967年3月 | 井上建二 |
| TR-130T | An Experimental Study of the Melting Phenomena in Axisymmetric Stagnation Region of Thermally Highly-Conducting Materials | Mar. 1967 | Yasuhiko AIHARA |
| TR-131 | 風があるときのロケットの運動の近似解析およびランチャ角修正法
An Approximate Analytical Solution for Dispersion of Unguided Rockets Due to Wind with Its Application to the Calculation of Wind Compensation for Launching | 1967年4月 | 毛利 浩 |
| TR-132 | 軸方向に補強されたパネルの最大軸圧縮力 (近似解)
Ultimate Axial Forces of Longitudinally Stiffened Plate Panels | 1967年4月 | 築地恒夫 |
| TR-133 | 解離した極超音速流中での Teflon への熱伝達の測定
Measurements of Heat-Transfer to Teflon in Dissociated Hypersonic Flow | 1967年4月 | 野村茂昭 |
| TR-134 | 高速単段軸流圧縮機の研究
—二重円弧翼の性能—
The Aerodynamic Performance of a Single-Stage Axial-Flow Compressor with Double-Circular-Arc Blades | 1967年5月 | 藤井昭一, 西脇英夫
吉田 晃, 五味光男
武田克巳, 菅原 昇 |
| TR-135 | 同軸型電磁衝撃波管の作動機構
Driving Mechanism of an Electric Shock Tube with a Coaxial Gun | 1967年5月 | 松崎利一 |
| TR-136 | Nearly-Free-Molecule-Flow におけるオリフィス型圧力管
Experimental Study of an Orifice-Type Pressure Probe in Nearly-Free-Molecule Flow | 1967年5月 | 恩地 瑛, 山本稀義 |
| TR-137 | 梁, 板結合構造物の振動 (I)
On the Natural Vibration of Plate-Beam Combination Structures (I) | 1967年6月 | 越出慎一, 林 洋一
塙武 敏 |
| TR-138 | 変厚片持板の静撓みについて
Deflection Analysis of Variable Thickness Cantilever Plate | 1967年7月 | 塙 武敏, 越出慎一 |

半導体歪ゲージを用いる小型高感度 加速度計の研究*

田畑 浄治**・大坪 孔治**・滝沢 実**

Study on the Miniature Type High Sensitivity Accelerometer Using Semiconductor Strain Gages

By Johji TABATA, Kohji OTSUBO and Minoru TAKIZAWA

The characteristics of semiconductor strain gages were experimentally investigated for the purpose of application to accelerometers. It is clarified from these results that the change of resistance due to strain is expressed as $\Delta R/R = A_1\varepsilon + A_2\varepsilon^2 + A_3\varepsilon^3 + A_4\varepsilon^4$ for the P-type silicon gages, and $\Delta R/R = A_1\varepsilon + A_2\varepsilon^2 + A_3\varepsilon^3$ for the N-type silicon and the N-type germanium gages (for strains $\varepsilon \leq 3,000 \mu$), respectively, and that the coefficients of higher order terms in these formulae have different values under tension from those under compression. Also it is found that the gage factor depends on the kind of gage cement.

Based on these experimental data, two kinds of accelerometers with semiconductor strain gage were developed. One of these has a very high sensitivity so as to detect side slip, ranging from 0.5 to 0.001 g, of a V/STOL aircraft. The other model, which is to be mounted on a small size rocket and which has range between 50 g and 0.01 g, is very small in size; 7×10×17 (in mm). Its output voltage is 230 mV/50 g, and this is considered to be a very large value compared with 4 mV/50 g, approximately, of a conventional wire strain gage type accelerometer.

は し が き

今日、ようやく半導体歪ゲージも数種の国産品が市販されるようになって実用化の段階にはいった。これらの半導体歪ゲージは、従来の抵抗線歪ゲージにくらべて、ゲージ感度は 30~90 倍もあり、また非常に小型であるなどのすぐれた特徴を持つが、他方温度特性および直線性があまりよくないことと取り扱いが非常にむずかしいなどという点に問題がある。したがって、トランスデューサなどの応用的部門に用いた方が、よりいっそうその特性を発揮するものと思われる。特に機器の小型化軽量化が強く要求される航空宇宙関係において、広い応用面が考えられるが、まずそれに先立ち、各種の半導体歪ゲージの基本的な特性をつかんでおくことが必要である。

このような考えに基づき市販の国産半導体歪ゲージ

のうちベースなしの半導体歪ゲージについて、応用的見地から、直線性、温度特性、電流特性、疲労特性の四点に関して実験的に求めた。このうち直線性に関しては、外国におけるようなくわしい測定例がほとんどないのでできるだけ詳細に求めてみた。しかる後、飛行計測用センサのうちでも、もっとも半導体歪ゲージの特徴が発揮されるものと思われる加速度計について、つぎのような二つの目的のものを試作した。一つは、V/STOL 機の横滑り検出に用いられるような測定範囲 0.5~0.001 g のもので、直線性と検出感度を重視したものであり、他の一つは小型ロケットの飛しょう性能測定用として、測定範囲 50~0.1 g の小型で、かつ高出力の加速度計である。これは従来の抵抗線歪計式加速度計と比較すると、出力が 60 倍近いので高利得の増幅器が不要となることから一段と測定系全体の小型化に有効である。これらの結果についてここに報告する。

* 昭和42年6月13日受付

** 計測部

I 半導体歪ゲージの特性

$$\Delta R/R = -149 \epsilon + 52,600 \epsilon^2$$

1. 直線性

(1) 従来の関係式

半導体 (Si, Ge 等) の歪による抵抗変化は、理論的には many valley theory によって取り扱われている^{1)~6)}。これは結晶内における各軸方向のエネルギーの等ポテンシャル面を定め、応力が働いたときのこれ等のエネルギー面の変化からキャリアの移動度および個数の変化を計算して比抵抗の変化率を求める方法であるが、N型以外への適用はモデルが複雑になって、あまりうまくいってない。したがって歪があまり大きくない範囲ではつぎのような級数に展開した近似式が用いられている⁷⁾。

$$\begin{aligned} \Delta R/R &= f(T, \epsilon, R_0, \rho, F) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{C_n}{T^n} \right) \epsilon^n = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \epsilon^n \quad (1.1) \end{aligned}$$

T : 絶対温度, ϵ : 歪, ρ : 比抵抗

R_0 : $\epsilon=0$ の時の抵抗, F : 形状

C_n, A_n : 係数, $\Delta R/R$: 抵抗変化率

係数 A_n は影響する因子が多いので各種の条件付きで求められており、各報告によって多少異なった値となっている。代表的な一例として、W.P. Mason²⁾ および J. Dorsey^等⁷⁾ によって求められた実験式を示す。

Si-N 型 <100>

$$\Delta R/R = -110 \epsilon + 10,000 \epsilon^2 \text{ (low resistivity)}$$

$$\Delta R/R = -125 \epsilon + 26,000 \epsilon^2 \text{ (high ")}$$

Si-P 型 <111>

$$\begin{aligned} \Delta R/R &= 119.5 \epsilon + 4,000 \epsilon^2 \\ &\quad + 35,000 \epsilon^3 \text{ (low resistivity)} \end{aligned}$$

$$\Delta R/R = 175 + 72,625 \epsilon^2 \text{ (high ")}$$

(温度: 25°C)

ここで <100> や <111> は歪ゲージの結晶軸方向を表わす。

Ge の直線性については、直接測定された例は非常に少なく、わずかに Ge-N 型 <111> に対してつぎのような一例がある²⁾。

国産の市販ゲージに対しては、これ等の非直線性に関する関係式を求めた報告をまだ見かけないので、これについて重点的に求めた。表 1 は使用したゲージの仕様一覧表である。

(2) 測定

ゲージへの負荷歪はゲージ率検定機⁸⁾ で与えた。この検定機は被試験ゲージを貼り付けた矩形断面の検定ビームに荷重を加え、その撓み量から接着面の歪みを精密に求めるもので、0.1~3,000 μ strain の歪を連続的に与える事ができる。抵抗変化の測定には、ホイートストンブリッジ回路を用い、測定中の温度変化による影響を除くために測定ゲージの隣辺にダミーゲージを用いた。ゲージの抵抗値は 100~400 Ω の範囲ゆえその変化量の測定には、対辺にゲージとほぼ等しい値の可変抵抗器 (分解能 0.01 Ω) を組み込み、ブリッジを平衡させたときのこの抵抗器の読みから求めることができる。図 1 に、各種ゲージの 1 箱分 (4 枚) について測定した歪~抵抗変化の関係を示す。なおゲージの比抵抗値は、0.01~0.03 Ω -cm である。

(3) 測定結果の検討

(i) これ等の測定曲線の各グループからもっとも平均値に近い 1 本を代表として選び、 $\Sigma \Delta$ 法⁹⁾ によって (1.1) 式に対応する実験式を求めた。この関係は歪が 3,000 μ strain 以内では次式 (1.2), (1.3) で示され、これ以上の高次の項は無視し得る程小さいことが明らかとなった。係数 A_n は表 2, 表 3 に示す値となる。

$$\text{Si-P 型 } \Delta R/R = A_1 \epsilon + A_2 \epsilon^2 + A_3 \epsilon^3 + A_4 \epsilon^4 \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si-N型} \\ \text{Ge-N型} \end{array} \right\} \Delta R/R = A_1 \epsilon + A_2 \epsilon^2 + A_3 \epsilon^3 \quad (1.3)$$

Si-P 型に対して、 $\Delta R/R = A_1 \epsilon + A_2 \epsilon^2$ の近似式を用いている文献¹⁰⁾もあるが、小さい比抵抗のゲージに関して、われわれが求めたところでは、表 2 からわかるように、歪が大きくなるにしたがって高次の項の影響が無視できなくなり、なかでも四次の項の影響はかなり大ききいているという結果になった。

表 1 試験ゲージ仕様一覧表

材質	導電型	結晶軸	表示率 ゲージ率	表示抵抗値	最大許容 歪値	最大許容 電流値	形状 (mm)			ベース	包装数 (1箱につき)
							長さ	幅	厚さ		
Si	P	<111>	+ 135	350 ± 1%	表示なし	表示なし	3	1	0.02~0.03	なし	4枚
Si	P	<110>	+ 85	120 ± 1%	〃	〃	3	1	0.02~0.03	〃	〃
Si	N	<100>	- 125	120 ± 1%	〃	〃	5	1	0.02~0.03	〃	〃
Ge	N	<111>	-177 ± 5%	120 ± 4%	±2000 × 10 ⁻⁶	30mA	7	1	0.03~0.04	〃	〃

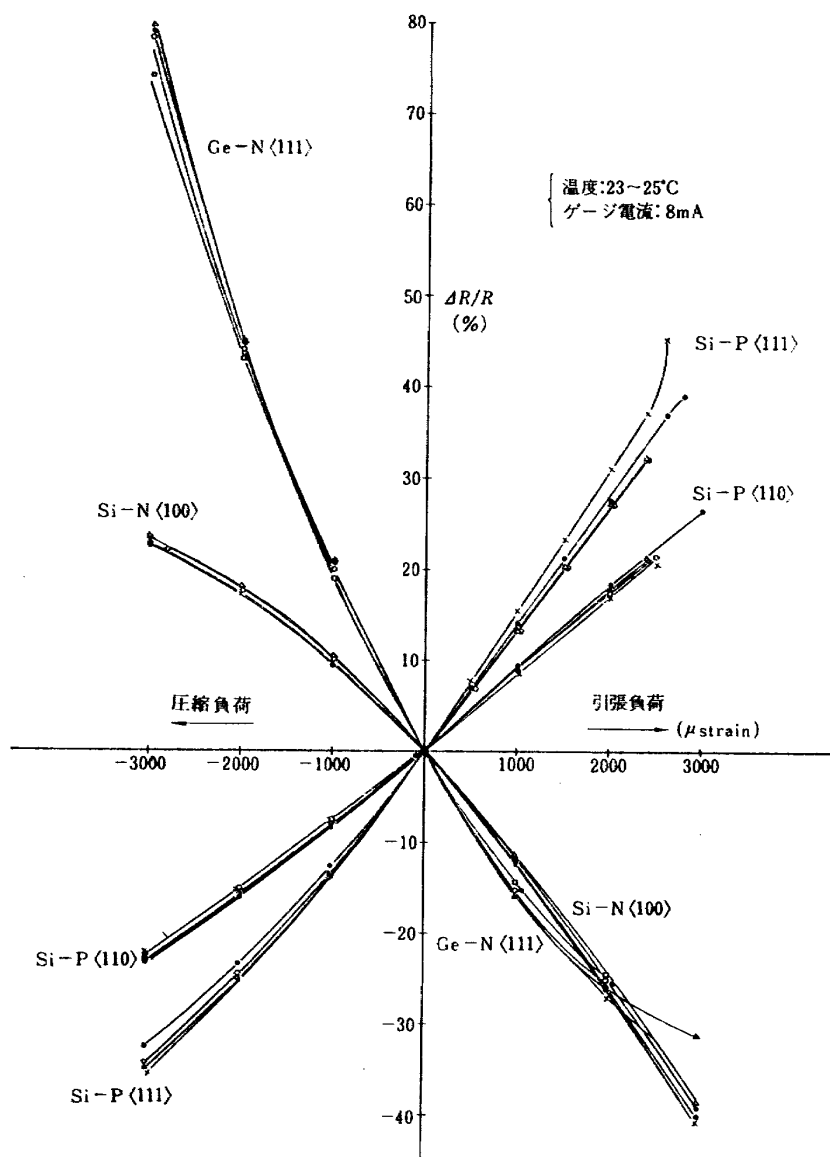


図 1 半導体歪ゲージの直線性

表 2 P型ゲージの直線性

種類	応力	表示ゲージ率 K	測定値				$A_1 - K$ K (%)	$(A_2\epsilon + A_3\epsilon^2) / A_1$ (%)		$A_4\epsilon^3 / A_1$ (%)		検定数
			A_1	A_2	A_3	A_4		1,000 μ	2,000 μ	1,000 μ	2,000 μ	
Si-P <110>	引張	+85	92.1	7.5×10^3	-5.3×10^5	5.7×10^8	+ 8.4	0.26	0.73	0.60	4.80	7
	圧縮		85.8	5.4×10^3	4.1×10^5	6.4×10^8	+ 0.9	0.15	0.66	0.74	5.96	
Si-P <111>	引張	+135	152.1	9.0×10^3	-6.5×10^5	7.70×10^8	+12.6	0.19	0.59	0.51	4.08	7
	圧縮		134.4	1.01×10^3	7.9×10^5	9.68×10^8	- 0.4	0.16	0.33	0.72	5.76	

温度: 23~25°C, ゲージ電流: 8 mA

表 3 N型ゲージの直線性

種類	応力	表示ゲージ率 K	測定値			$\frac{A_1 - K}{K}$ (%)	$(A_2 \epsilon + A_3 \epsilon^2) / A_1$ (%)		検定数
			A_1	A_2	A_3		500 μ	1000 μ	
Si-N <100>	引張 圧縮	-125	-146.0	20,200	-1.48×10^6	+16.8	6.64	12.8	7
			-144.5	16,400	2.05×10^6	+15.6	5.25	10.0	
Ge-N <111>	引張 圧縮	-177	-194.7	45,000	-5.01×10^6	+10.0	10.2	20.5	8
			-182.2	55,300	9.55×10^6	+2.9	14.9	25.1	

温度：23~25°C， ゲージ電流：8mA

(ii) 引張りと圧縮を比較してみると、その直線性に対して明らかに非対称性がみられる。すなわち第一次の項についてみると、Si-N型では、その差が表示値に対して1%程度であるが、他は7~13%もの違いがあり、符号も第二次項までは等しいが、第三次項になると異なってくる。これは接着の際の precompression が大きな原因と思われるが、 ϵ の正負によって、出力の絶対値が違ってくるのでトランスデューサとして使用する場合注意しなければならない。

(iii) 直線性に関してはN型よりもP型のほうがよい。1000 μ strainを例にとると、ゲージ率に対する非直線性はP型では1%以下であるが、N型では10~25%となっている。一般にN型の非直線項は二次までしかとられてないが、歪が大きくなると第三次の項も無視できなくなり、表4に示すようにSi-N型でも1,000 μ strainで非直線性が1~1.5%、2,000 μ strainでは4~6%もの影響をおよぼす。

表 4 $A_3 \epsilon^2 / A_1$

種類	歪		1000 μ	2000 μ
	応力			
Si-N	引張	張縮	1.0 %	4 %
	圧縮		1.5	6
Ge-N	引張	張縮	2.5	10
	圧縮		4.9	20

(iv) 測定したゲージ率は、いずれも表示値より高い。特にこの傾向は引張りにおいて著しく、ほぼ、10%またはそれ以上となっている。エポキシ系の加熱型接着剤を用いる場合、加熱による硬化過程中ゲージに圧縮力が働いて抵抗値が変り、P型では減少し、N型では増大するが、抵抗線歪ゲージと比較してその変化量は非常に大きく、大体10%近い値となる。普通製造者でゲージ率を検定する場合は、常温型接着剤を用いており、加熱を行っていないようなので、貼付後に測定する抵抗値の相違が、あるいは上述のようなゲージ率の相違の一つの原因ではなからうかとも思われるが、この事に関しては、いずれ機会があれば検討してみたいと思う。

(4) ゲージ率および抵抗値のバラッキ

半導体結晶からゲージ率および抵抗値のよくそろった歪ゲージを作るのは、技術的にみてかなり難しい問題である。現在市販されているベース無しゲージについて、このばらつきを調べた一例を表5に示す。表中の最大ばらつきというのは、1箱4枚の測定平均ゲージ率に対するばらつきの最大値をいい、ブリッジ回路に組んだときの不平衡量の目安となる。なお検定には500 μ strainの圧縮歪を用いた。この表から、N社の製品は抵抗値はそろっているが、ゲージ率のばらつきが大きく、K社の製品はこの傾向が逆になっている。

表 5 ゲージ率と抵抗値のばらつき

メーカー	ゲージ種類	検定数	K_0	K_m	$\frac{K_m - K_0}{K_0}$	ゲージ率最大バラッキ	表示ゲージ抵抗値	実測平均抵抗値	抵抗値のバラッキ
			表示ゲージ率	実測平均ゲージ率					
N社	Si-P<111>	7	+135	+148	+9.6%	4.1%	120 Ω	109.60 Ω	0.63%
	Si-P<110>	7	+85	+94	+10.5	4.8	120	108.75	0.11
	Si-N<100>	7	-125	-139	+11.2	3.6	120	131.21	0.32
K社	Ge-N<111>	8	-177	-195	+10.2	2.2	110	124.30	2.65

検定歪：500 μ (圧縮) 室温：23~25°C ゲージ電流：8 mA

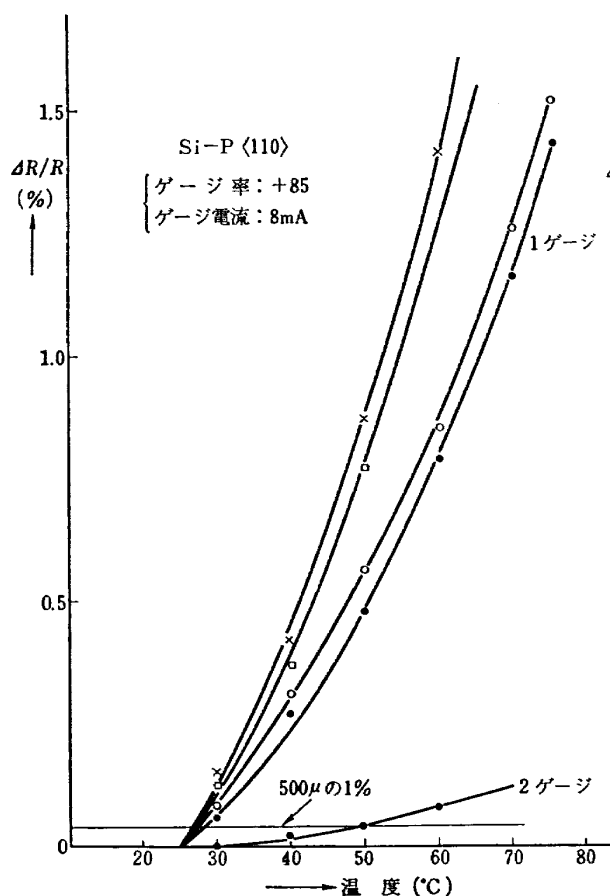


図 2、半導体歪ゲージの温度特性 (1)

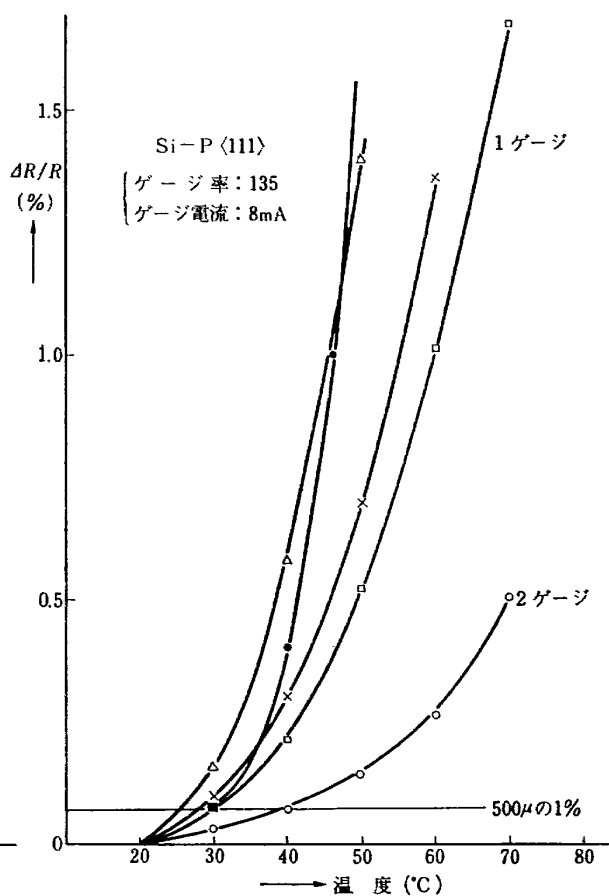


図 3 半導体歪ゲージの温度特性 (2)

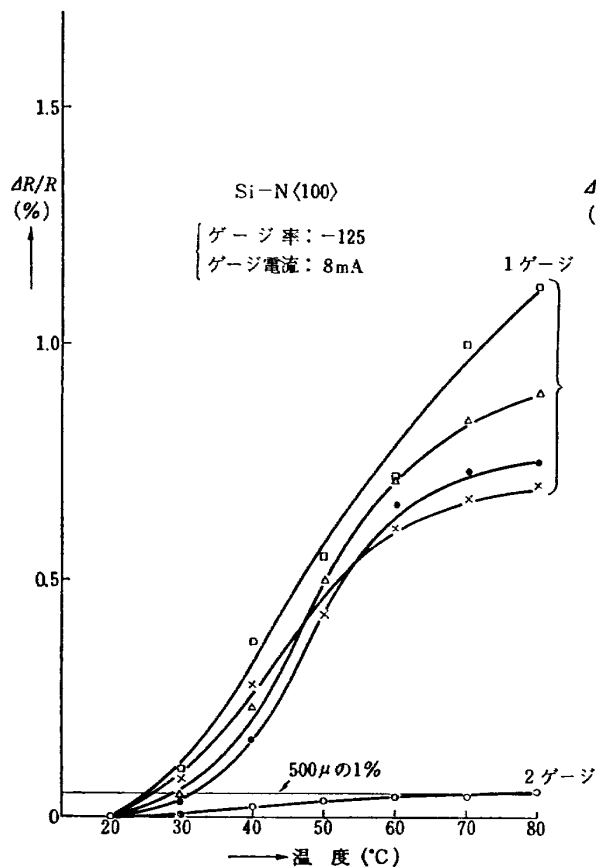


図 4 半導体歪ゲージの温度特性 (3)

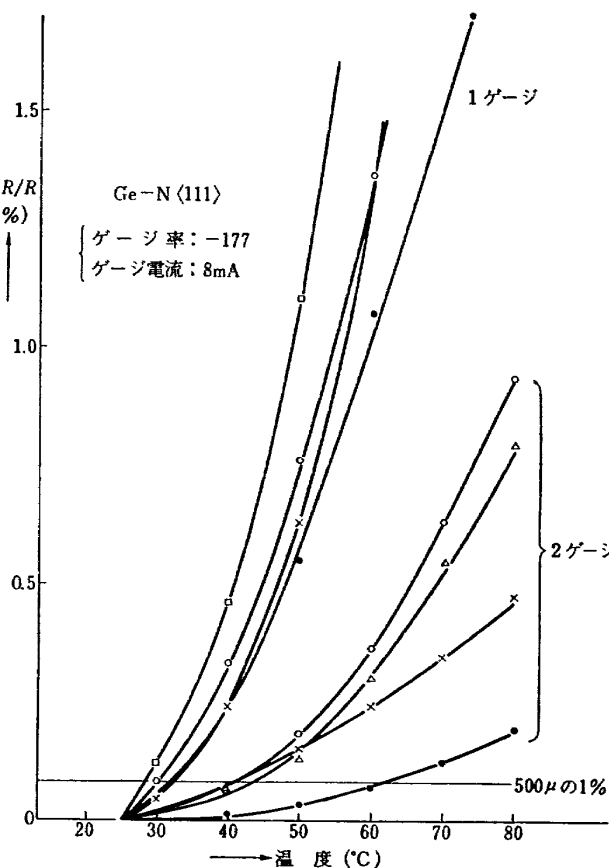


図 5 半導体歪ゲージの温度特性 (4)

2. 抵抗—温度特性

半導体歪ゲージは、従来の抵抗線歪ゲージと比べると温度係数が大きいという欠点がある^{5),10),11)}。各種のゲージについて測定した一例を図 2, 3, 4, 5 に示す。縦軸は抵抗変化率、横軸は温度を示し、温度による零点のドリフトが $500 \mu \text{ strain}$ に対して 1% に相当する値を参考のため記入した。

測定結果の検討

1 ゲージ法, 2 ゲージ法を通じて最も温度特性の良かったのは Si-N 型で, 2 ゲージ温度補償法を用いれば, 70°C 近くまで温度によるドリフトを, フルスケール $500 \mu \text{ strain}$ に対して 1% 以下におさえられる可能性がある。その他のゲージでも, 特性の等しいものを選んで 2 ゲージ法にすれば温度特性は非常に改善され, 大体 $50\sim 60^\circ\text{C}$ 位までは十分使用できそうである。トランスデューサで 2 ゲージ法として使用する場合は, 温度補償用ゲージからも出力が得られるため, 非常に有利である。しかし 1 ゲージ法で使用する場合は, $500 \mu \text{ strain}$ の出力に対する温度ドリフトを 1% 以下に保つためには, 温度変動を 5°C 以下におさえなければならない。

3. 抵抗—電流特性

半導体ゲージは印加電流によって抵抗変化をおこすが, この変化は電流の加えはじめはかなり急であって, 比較的短時間で飽和する。これは, ゲージが電流によって加熱されて温度が上昇し, 熱的に新しい平衡状態に達するまでの過渡現象と思われる。平衡状態に達したときの抵抗変化量について測定した結果を図 6, 7, 8, 9 に示す。

この図から, ゲージ電流が大きい場合には小さな電流の変動でもかなり大きな抵抗変化を生じることがわかる。これは歪による抵抗変化量に付加されて直線性を悪くするので, 許容されるゲージ電流の限界が使用目的に応じて定められなければならない。われわれの場合, ゲージ電流の変動を $\pm 10\%$ 程度に考え, それによる出力変化が, $500 \mu \text{ strain}$ の歪による出力の $\pm 1\%$ に等しくなるときの電流値を各種ゲージについてこれらの図から求めて, 最大許容電流値として表 6 に示した。その際, 各曲線群中それぞれもっとも急勾配の曲線をとって行なった。

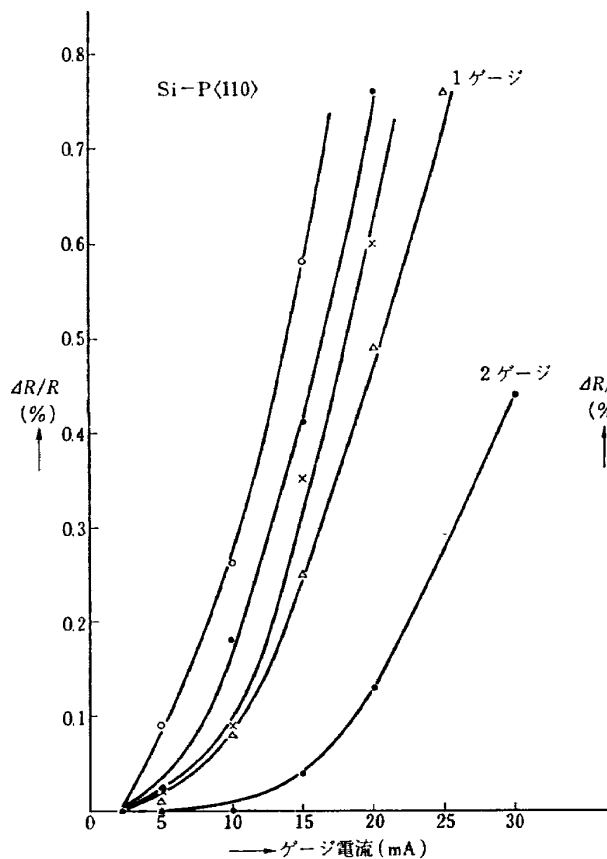


図 6 半導体歪ゲージの電流特性 (1)

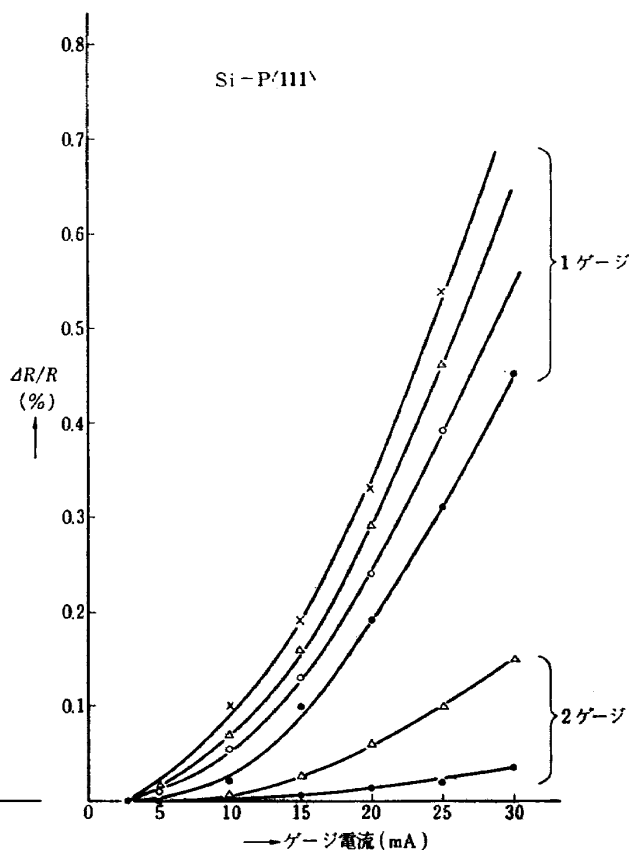


図 7 半導体歪ゲージの電流特性 (2)

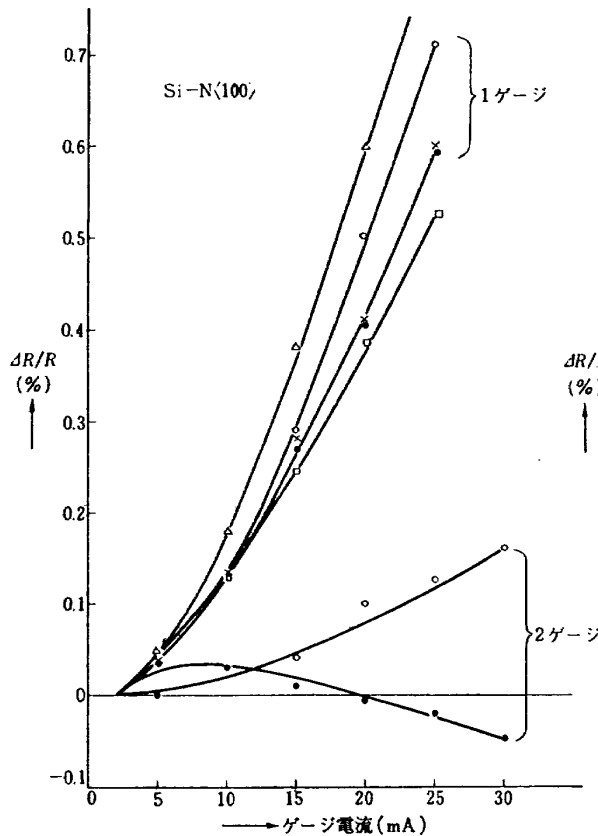


図 8 半導体歪ゲージの電流特性 (3)

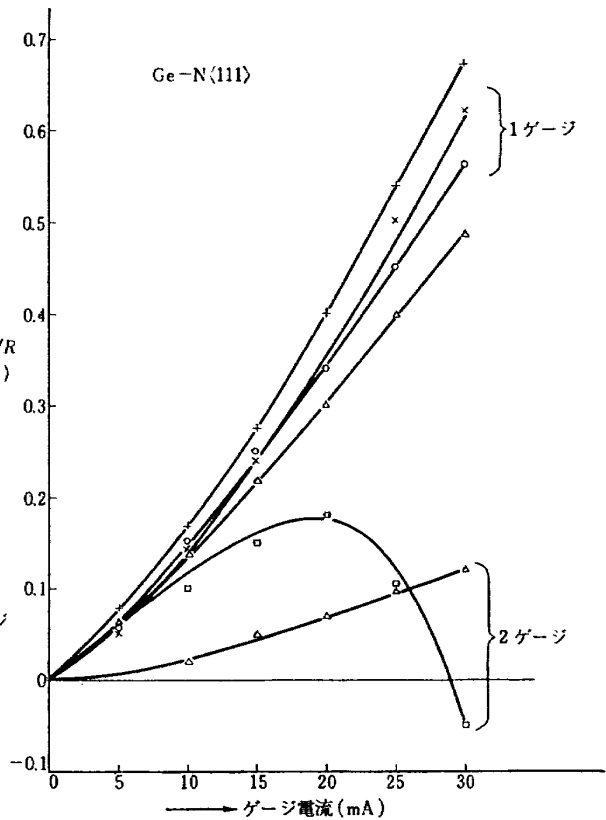


図 9 半導体歪ゲージの電流特性 (4)

表 6 最大許容ゲージ電流値

種類	表示ゲージ率	最大許容電流	
		1ゲージ法	2ゲージ法
Si-P<111>	+135	20 (mA)	30 (mA)
Si-P<110>	+ 85	10	20
Si-N<100>	-125	15	30
Ge-N<111>	-177	30	30

4. 疲労特性

半導体歪ゲージをトランスデューサとして使用する場合、寿命が問題となる。その一応の目安として航空機の耐用年数以上を採ることとした。YS-11の主翼疲労試験は保証寿命である 30,000 flight hours (f. h.) に対して、安全係数を 6.3 にとり、約 189,000 f. h. おこなっている¹²⁾。100 f. h. 中にかかる平均荷重回数は約 476 回と見積られているので、全 f. h. 中にかかる荷重回数は大体 9×10^5 回となる。センサとしてはこれよりも 10 倍程度の安全率を見積って、 1×10^7 回以上の荷重をかけて疲労の程度を調べた。

(1) 試験法

試験はりん青銅のカンチレバ上にゲージを貼り、その自由端にカムを当ててモータでカムを回転させ繰返し曲げ荷重を与える。一定の繰返し歪をあたえるためには、カンチレバの曲げ振幅をつねに一定にしなければならないが、このためにはカンチレバの固有振動数を利用すればよい。固有振動数はストロボによって簡単に測定出来るので、これによりモータの回転数を調整した。ゲージは振幅から計算して、それぞれ 500, 300 μ strain にあたる位置に各 4 枚づつはった。固有振動数は 16 c/s であり、1 日に 7 時間振動をあたえて、 4×10^5 cycle (1 日) ごとにゲージの出力変化を測定した。その結果を図 10 に示す。

(2) 結果の検討

荷重回数は 1.5×10^7 回であるが、ほとんど出力低下は認められず、ゲージ本体には問題ないことがわかったが、ゲージからのリード線はしばしば断線をおこし、その接続および固定法にはかなり工夫がいろいろあった。

5. ま と め

以上得られた特性から半導体歪ゲージをトランスデューサとして応用する場合考慮すべき事項は、つぎの

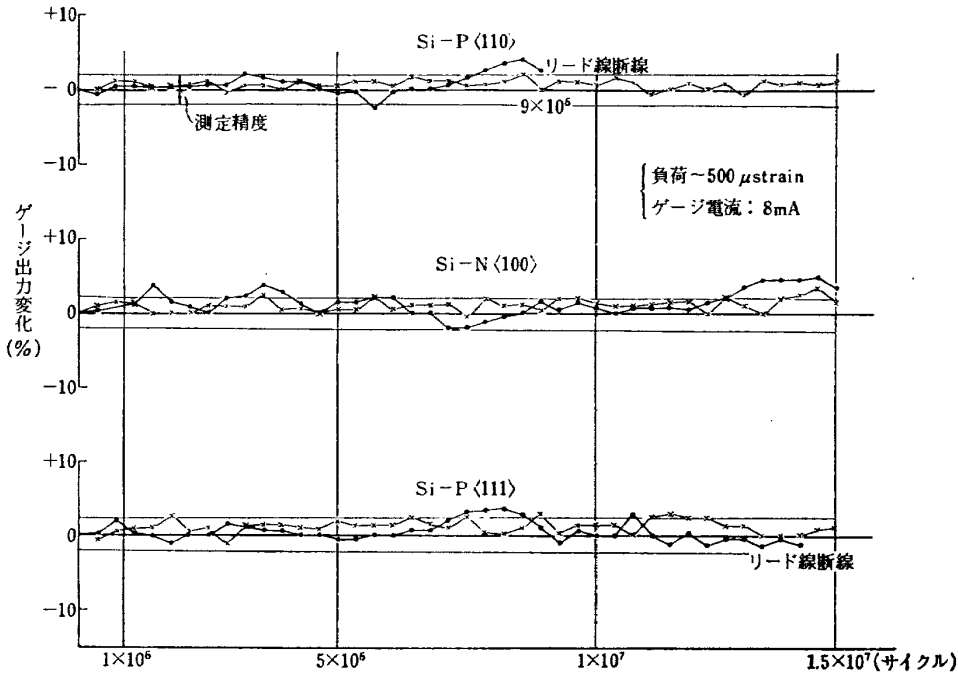


図 10 半導体歪ゲージの疲労特性

ようになる。

(a) 素子

出力が大きくて、しかも比較的直線性の良いものは、Si-P <111> である。また歪の範囲をあまり大きくとらないものなら、ゲージ感度から考えて、Ge-N <111> が適当である。

(b) 最大負荷

直線性を範囲の 1% 以下におさえるためには、N 型なら 100 μ strain 以下、P 型なら 1000 μ strain 以下でなければならない。

(c) 最大許容電流

一般にトランスデューサをもちいる場合、定電流源を利用することが多い。半導体歪ゲージの場合、1000 μ strain で抵抗値の変化が 10% 近くなることを考えれば、許容電流は 20 mA 以下におさえねばならない。

II 加速度計の試作

1. 目 標

- (a) 航空機の横滑りが検出可能な 0.001 g 程度の高感度を有するもの (低加速度計)。
- (b) 小型ロケット用として、最大測定値 50g 程度で小型高出力のもの (高加速度計)。

以上二つの形式について、直線性としては従来からある加速度計と同等以上を目標とし、前記の特性実測結果を基礎として、半導体歪ゲージを用いた加速度計を試作した結果、かなり満足すべきものが得られた。

2. 方 式

試作した加速度計の型式は、自由端に重錘を取り付けたカンチレバタイプで、図 11 にその概略を示す。この方法は構造的にもっとも単純な方式ゆえ、製作が容易であるということのほか、加速度によって生じたビームの歪がゲージを通して直接出力となって現われるため、拡大機構などによる中間的な誤差がはいてこないという長所がある。しかし他方欠点として、温度の影響を受けやすく、この影響は小型化すればす

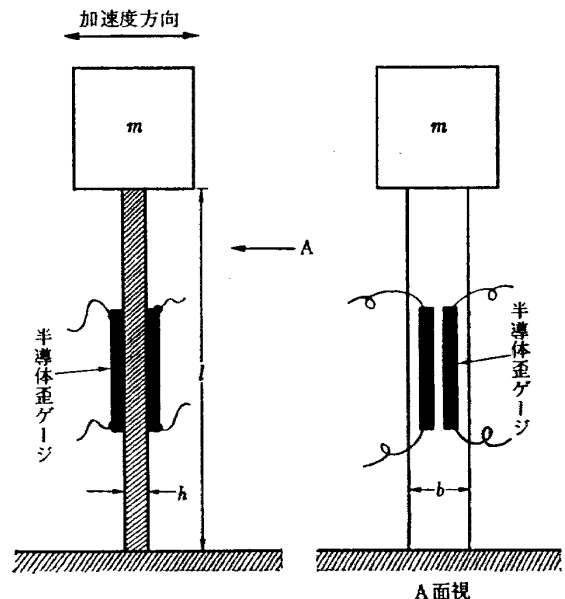


図 11 加速度計の概略

るほど大きくなるので、素子の選択が重要な問題となる。このようなカンチレバの振動方程式は、ゲージ部分の質量を無視すれば、

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2.1)$$

ここで、 m : 重錘質量, k : バネ定数, x : 重錘の変位

断面二次モーメントを I , ヤング率を E とし, カンチレバの長さ, 幅および厚さを l, b, h とすれば, $I = bh^3/12$, $k = 3EI/l^3$ ゆえ固有振動数 f_0 は,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{h}{4\pi l} \sqrt{\frac{Ebh}{m}} \quad (2.2)$$

歪との関係は, 曲げ応力および曲げモーメントを σ , M , 断面係数を Z とすれば,

$$\sigma = M/Z = E\epsilon$$

$$\therefore M = E\epsilon Z = E\epsilon bh^2/6 \quad (2.3)$$

いま $F = nmgl$ の力が加わった時, 根元における歪を ϵ_{\max} とすると, (2.3) 式に $M_{\max} = nmgl$ を用いて

$$m = E\epsilon_{\max} bh^2/6ngl \quad (2.4)$$

(2.4) を (2.2) に代入すると

$$f_0 \doteq \frac{6.1}{l} \sqrt{\frac{nh}{\epsilon_{\max}}} \quad (2.5)$$

設計にあたっては測定範囲および感度の目標値を満たし, かつこの固有振動数 f_0 を以下にのべる適当な値とするよう諸要素を定めていった。

(a) 素子の選択および構成法

素子の選択は使用目的によって異なる。低加速度計は, 過負荷に対する対策上 ϵ_{\max} をあまり大きくとれないので, 直線性は悪いがゲージ率が高くて, かつ比較的溫度特性も良い Ge-N <111> を選んだ。高加速度計は, 過負荷をフルスケールの3倍程度考慮すればよいから, ϵ_{\max} を 600~700 μ strain 程度とれるので, 多少溫度特性は悪くても素子が小さくてかつ直線性の良い Si-P <111> を選んだ。構成は 4 gage bridge 法とした。これは 2 gage 法にくらべて, 製作および溫度補償の点が難しくなるが, 出力が2倍になるという利点がある。

(b) 測定範囲および最大負荷

測定範囲は低加速度計に対して, その目的から考えて, 0.5~0.001 g とした。高加速度計も同じ見地から, 50~0.1 g とした。最大負荷は直線性および過負荷に対する考慮から, 低加速度計では 300~400 μ strain, 高加速度計は, 500~600 μ strain 程度におさえた。

(c) 溫度特性

溫度係数は, フルスケールに対し 0.01~0.5 %/°C

程度を目標にした。素子の組合せは, 接着後溶融可能な接着剤 (シアノアクリレート系) を用いてビームと同一材質の母材にはって溫度特性を調べ, その中から特性のなるべく等しいもの同志を2組選び出し, 再びはがして使用した。

(d) 固有振動数およびダンピング

加速度計の固有振動数は, 使用ビームの特性によって左右されるが, 高加速度計は, テレメータの応答周波数から, 500~300 c/s, 低加速度計は, 5 c/s 以下の加速度を高精度で検出するため 25~30 c/s 程度を目標にした。ダンピングオイルとしては, 溫度, 経年変化などの点ですぐれているシリコンオイルを採用した。

(e) ビーム材

ビーム材は, バネ用りん青銅板のうち, JIS規格 H 3732-PBS-SH 材を使用した。厚さは, 0.15 mm, ヤング率は 11,000 kg/mm² である。ビームの形状は使用素子の大きさおよび横感度の影響等を考慮して, できるだけ小さくした。

3. 特性試験方法

(1) 直線性

低加速度計は, 角度1分まで測定できる傾斜台に取り付けて垂直面内で傾斜させ, 重力加速度の分力を与えて, 直線性を調べた。0.001 g は傾斜角になおして3分程度の値となる。高加速度計は, 遠心型加速度試験機で調べた。これは回転腕の半径 838 mm, 最大回転数 600 rpm で最大加速度 250 g の能力がある。

(2) 固有振動数およびダンピング調整

これ等の特性試験は, いずれも動電型振動試験機を用いつぎのようにしておこなった。

(i) 固有振動数

発生加速度を一定に保ち, 周波数を掃引していったときの出力変化からただちに測定できる。

(ii) ダンピングオイルの調整

このカンチレバをダンピングオイルに浸して $y = a \times \sin \omega t$ なる外部振動変位を加えたときの振動方程式は

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.6)$$

ただし c はダンピングオイルによる制動係数。

問題は振動ゆえ, この解の中の非減衰項のみについて考えると,

$$x_0 = \frac{ma\omega^2 \sin \omega(t - \tau)}{\sqrt{(k/m - \omega^2)^2 + (c^2/m^2)\omega^2}} \quad (2.7)$$

ただし $x_0 = x - y$, $\tan \omega\tau = c\omega / (k - m\omega^2)$

(2.7) 式はカンチレバの変位で, すなわち入力加速度

に比例するもので、外部振動加速度 \ddot{y} に対するこの比を f_ω とすると、カンチレバの周波数特性は、次式のようにになる。

$$\frac{f_\omega}{f_{\omega=0}} = \frac{k}{m\sqrt{(k/m - \omega^2)^2 + (c^2/m^2)\omega^2}} \quad (2.8)$$

したがって $\omega=0$ の時に対する偏差を最小にする条件から

$$\frac{2k}{m} - \frac{c^2}{m^2} = 0$$

$$\therefore c = \sqrt{2mk} = \frac{c_0}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

ただし $c_0 = 2\sqrt{mk}$: 臨界制動係数

これよりオイルの動粘性係数が算出できるが、実際には形状効果などがあるかなり異なった値となるため、実験によって $c/c_0 = 0.70$ になるようオイルの粘性を調整した。このオイル調整には、振動試験機をもちいて周波数応答法を利用した。

(3) 温度特性

温度特性は、ダンピングオイルの調整がすんだのち、恒温槽を利用して測定した。

4. 結果および設計値との比較

以上のような方法で試作した加速度計の仕様を表 7 に、その特性曲線を図 12, 13, 14, 15, 16 に示す。

このように、直線性および感度に関しては、ほぼ予期していた値が得られたが、温度特性および固有振動数に関しては、やや予想を下まわった。以下問題となる点について検討してみる。

(1) 最大負荷

一般にカンチレバタイプのものでは、ビーム上の各点で生じる歪の大きさが異なるが、弾性限界内では linear な関係をもち、最大歪は固定端に生じ、自由端で零になる。したがってはられたゲージに対しては、中心部分に生じる歪が平均歪として検出されることになるので、これを各加速度計の設計値と出力からの推定値について比較してみる。設計値は表 7 の値を (2.4) 式に入れて求める。

(i) 低加速度計

$$n = 0.5, m = 9.8(\text{g}), l = 1.0(\text{cm}),$$

$$h = 0.015(\text{cm}), b = 0.35(\text{cm})$$

$$E = 1.10 \times 10^9(\text{g/cm}^2), g = 980(\text{cm/sec}^2)$$

より設計上予定した歪量 ϵ_A は

$$\epsilon_A = \frac{1}{2} \left(\frac{6nlmg}{Ebh^3} \right) \approx 169 \mu \text{ strain}$$

出力より推定する歪量 ϵ_B は、4 gage 方式の入力電圧 $e_i = 3 \text{ V}$, 出力電圧 $e_o = 100 \text{ mV}$, かつゲージ率は特性試験の結果を用いて、 $K = 177 + 10\%$ とすれば、 ΔR が小さいゆえ

表 7 試作加速度計の仕様

項 目	高感度低加速度計	小型高加速度計
使用領域	0.001 g ~ 0.5 g	0.01 g ~ 50 g
ゲージ要素	Ge-N<111>, 7×1×0.03(mm), ベースなし	Si-P<111>, 3×1×0.03(mm), ベースなし
板 材	$E = 11000 \text{ kg/mm}^2$ りん青銅板, 13×2.7×0.15(mm)	$E = 11000 \text{ kg/mm}^2$ りん青銅板, 7×3×0.15(mm)
重 錘	材質: 鉛 質量: 9.8 g	材質: 鉛 質量: 0.28 g
接 着 剤	EP-17 (エポキシ系)	EP-17 (エポキシ系)
ゲージ要素構成	4ゲージブリッジ結線法	4ゲージブリッジ結線法
最大負荷(歪量)	340×10^{-6} , (平均 170×10^{-6})	612×10^{-6} , (平均 306×10^{-6})
出力, 感 度	100 mV/0.5 g/3 V, 0.2 mV/0.001 g	230 mV/50 g/5 V, 46 μ V/0.01 g
直線性, ヒステリシス	共に $\leq 0.5\%$ (±の出力差も含む)	共に $\leq 1\%$ (±の出力差も含む)
温度係数, 使用温度範囲	0.06% F·S/°C, $\leq 50^\circ\text{C}$	0.087% F·S/°C, $\leq 50^\circ\text{C}$
固有振動数	15 c/s	220 c/s
外形寸法, 重量, 材質	33×18.5×17(mm), 28 g 硬質ジュラルミン	17×10×7(mm), 4 g 硬質ジュラルミン

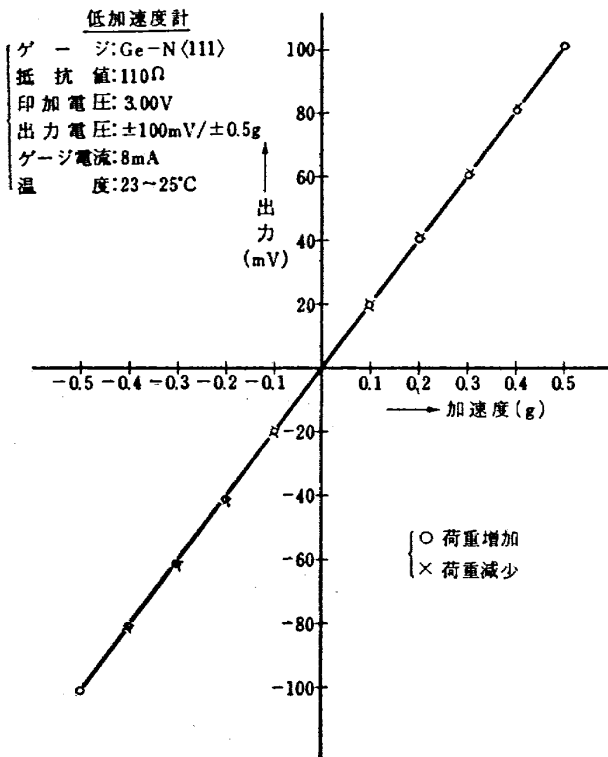


図 12 加速度計入出力特性 (1)

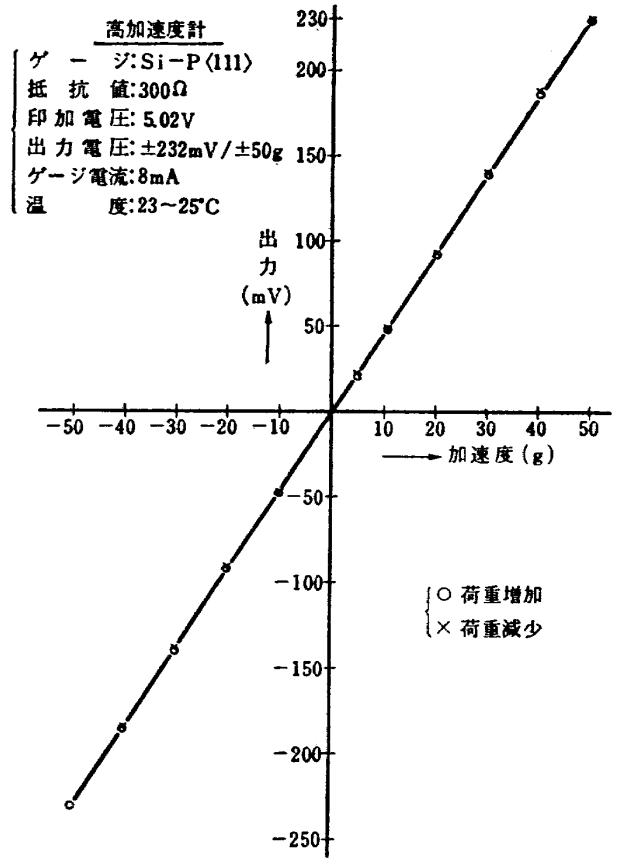


図 13 加速度計入出力特性 (2)

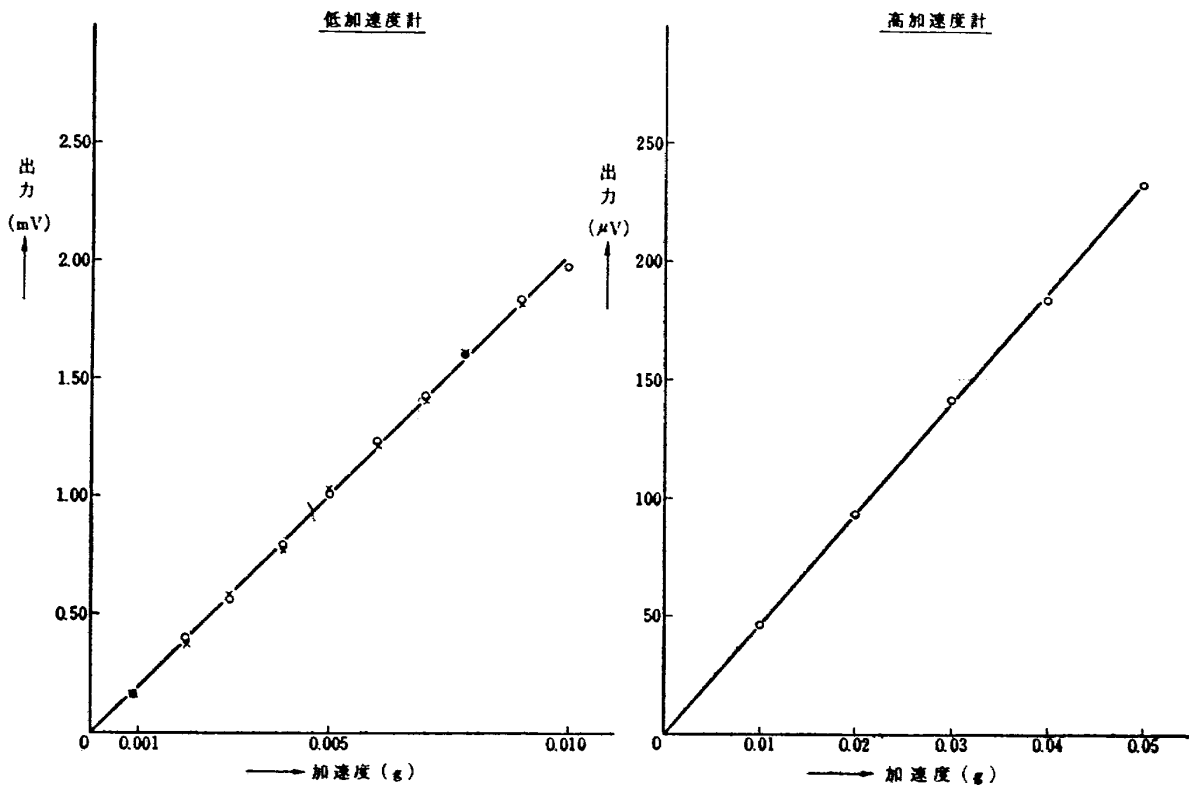


図 14 加速度計検出感度

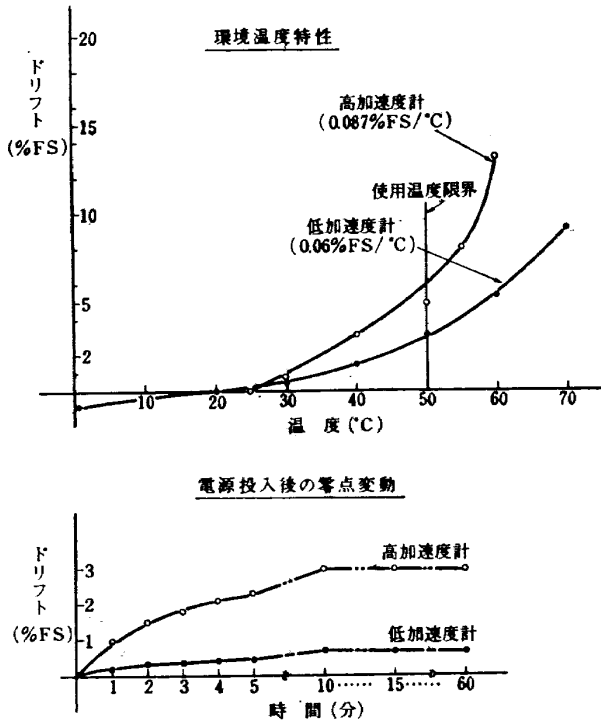


図 15 加速度計温度特性 (FS はフルスケール)

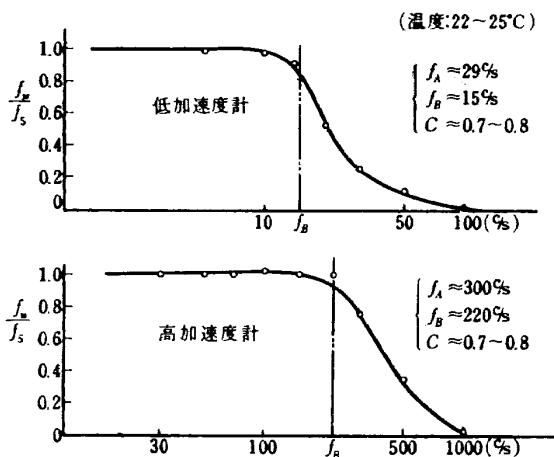


図 16 加速度計周波数特性

$$\epsilon_B = \frac{1}{4K} \cdot \frac{e_0}{e_i} \times 4 \approx 171 \mu \text{ strain}$$

(a) 高加速度計

$$n=50, m=0.28(g), l=0.7(\text{cm}),$$

$$h=0.015(\text{cm}) \quad b=0.3(\text{cm})$$

より設計値は

$$\epsilon_A \approx 320 \mu \text{ strain}$$

これに対して、 ϵ_B は、4 gage 方式の $e_i=5 \text{ V}$, $e_0=230 \text{ mV}$, $K=135+10\%$ より

$$\epsilon_B \approx 306 \mu \text{ strain}$$

で、両加速度計とも設計値と実際の値はかなり良い一致を示した。

(2) 固有振動数

固有振動数について(2.5)式より設計した値 f_A と、実測値 f_B を比較する。

(i) 低加速度計

$$f_A = \frac{6.1}{l} \cdot \sqrt{\frac{nh}{\epsilon}} \approx 29 \text{ c/s}$$

$$f_B = 15 \text{ c/s} \quad (f_A \text{ の約 } 50\% \text{ 減})$$

(a) 高加速度計

$$f_A = \frac{6.1}{l} \cdot \sqrt{\frac{nh}{\epsilon}} \approx 300 \text{ c/s}$$

$$f_B \approx 220 \text{ c/s} \quad (f_A \text{ の約 } 25\% \text{ 減})$$

このように固有振動数が大幅に減少したのは、固定端の弾性変形、ゲージのはり付け位置のずれ、ビーム長さの測定誤差などが影響しているのではないかとと思われるが、まだはっきりしたことはわからないので、今後さらに検討してみたいと思う。

5. 機構的誤差の検討

(1) ビームのたわみによって生じる誤差

いま、図 17 に示すように、力 F が働いてビームが平均して $\Delta\theta$ だけ傾いたとする。その後さらに力 F' が働いた場合、この F' がビームに曲げモーメントを加える成分は $F' \cos \Delta\theta$ になる。したがってセンサに生じる検出誤差 Δe は、

$$\Delta e = \frac{F' - F' \cos \Delta\theta}{F'} = 1 - \cos \Delta\theta \quad (2.14)$$

ビームの長さ、幅および厚さをそれぞれ l, b, h , 最大たわみを δ , 歪を ϵ , 応力を σ , ヤング率を E とすれば

$$\sigma = \frac{6 l F}{b h^3} = \frac{3 h \delta E}{2 l^3} \quad (2.15)$$

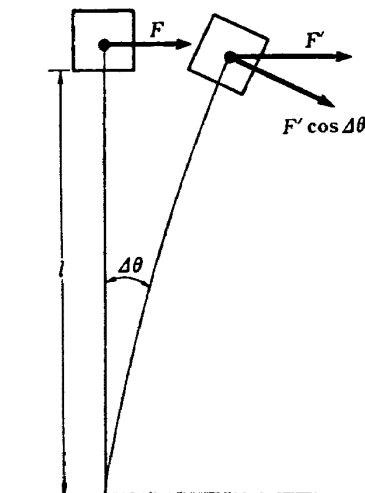


図 17 たわみによる誤差

$$\therefore \delta = \frac{2l^2\sigma}{3hE} = \frac{2l^2\varepsilon}{3h} \quad (2.16)$$

$\Delta\theta$ は図 17 から、(2.16) 式をもちいてつぎのようにあらわされる。

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\delta}{l}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2l\varepsilon}{3h}\right) \quad (2.17)$$

各加速度計のフルスケールに対して、これを計算してみると、

$$\Delta\theta_{0.5g} = \tan^{-1}(2 \times 1.3 \times 340 \times 10^{-6} / 3 \times 0.015) \approx 1^\circ 08'$$

$$\Delta\theta_{50g} = \tan^{-1}(2 \times 0.7 \times 612 \times 10^{-6} / 3 \times 0.015) \approx 1^\circ 17'$$

$$\therefore \Delta e_{0.5g} = 1 - \cos 1^\circ 08' = 0.0002 \quad (0.02\%)$$

$$\Delta e_{50g} = 1 - \cos 1^\circ 17' = 0.00025 \quad (0.025\%)$$

したがって、この誤差はほとんど無視出来る。

(2) 横方向加速度による誤差

歪ゲージがビームの中心線上に貼られていないときには、感度方向に対して直角な方向の加速度に関しても出力が生じ、誤差の原因となる。今、図 18 のごとく感度方向を y 、それに直角方向を x とし、中心線からそれぞれ x_1, x_2 の位置にはられたゲージのゲージ率を K_1, K_2 とする。ビームが x および y 方向にそれぞれ同じ力 F を受けた時、各ゲージに生じる歪を $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}, \varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y2}$ とする。 $\varepsilon_{y1} = \varepsilon_{y2}$ ゆえこれを ε_y とおき、 y 方向に関する出力を $\Delta R_y/R_y$ とすると、歪が小さい範囲では、2ゲージ法の場合

$$\Delta R_y/R_y = \frac{\Delta R_{y1}}{R_y} + \frac{\Delta R_{y2}}{R_y} = \varepsilon_y(K_1 + K_2)$$

これ等二つのゲージ率の差を $\Delta k K_1$ として

$$K_2 = K_1(1 \pm \Delta k)$$

とおくと

$$\begin{aligned} \Delta R_y/R_y &= \varepsilon_y \{K_1 + K_1(1 \pm \Delta k)\} \\ &= \varepsilon_y K_1 (2 \pm \Delta k) \end{aligned} \quad (2.18)$$

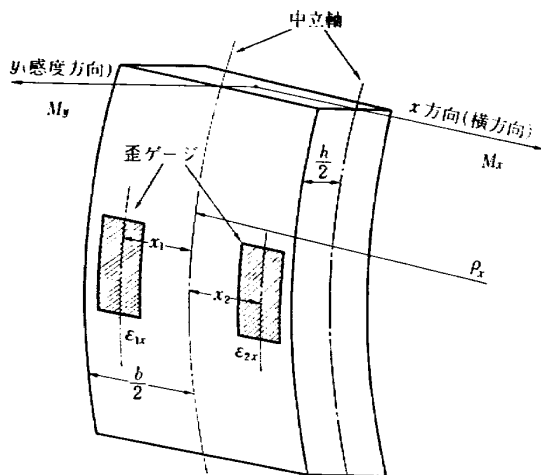


図 18 加速度計におけるゲージ位置

同様に x 方向に関する出力を $\Delta R_x/R_x$ とすると

$$\begin{aligned} \Delta R_x/R_x &= K_1\varepsilon_{x1} + K_2\varepsilon_{x2} \\ &= K_1\{\varepsilon_{x1} + (1 \pm \Delta k)\varepsilon_{x2}\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

ビームに働く、 x, y 面内の曲げモーメントを M_x, M_y 、かつ曲率半径を ρ_x, ρ_y 、 y, x 軸に対する断面二次モーメントを I_x, I_y とする。各面の中心線から x および y の距離の歪は

$$\varepsilon_x = x/\rho_x \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_y = y/\rho_y \quad (2.21)$$

で与えられる。さらに簡単のため、曲げによる幅方向の変形を小さいとして無視すれば、つぎの関係が成り立つ。

$$\frac{1}{\rho_y} = \frac{M_y}{EI_y} = \frac{M_y}{E(bh^3/12)} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{M_x}{EI_x} = \frac{M_x}{E(hb^3/12)} \quad (2.23)$$

これらを用いて、(2.18), (2.19) 式を書直すとつぎの式を得る。ただし、 $M_x = M_y = M$ 、 $y = \frac{h}{2}$ 、かつ $x = x_1$ および x_2 と与える。

$$\frac{\Delta R_y}{R_y} = K_1(2 \pm \Delta k) \frac{M}{2E(h^2b/12)} \quad (2.24)$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = K_1\{x_1 + (1 \pm \Delta k)x_2\} \frac{M}{E(hb^3/12)} \quad (2.25)$$

正規の出力に対する横方向の加速度による影響を $\Delta\gamma'$ とすれば

$$\Delta\gamma' = \frac{\Delta R_x/R_x}{\Delta R_y/R_y} = \frac{2\{x_1 + (1 \pm \Delta k)x_2\}h}{(2 \pm \Delta k)b^2} \quad (2.26)$$

Δk の存在のほかに、 $|x_1|$ と $|x_2|$ が異なると誤差が現れる。極端な場合として、ゲージをもっとも中心線から離して貼った場合を考えると、ビームの幅 b が 3 mm、ゲージ幅は 1 mm であるから、 x_1 、または $-x_2$ は 1 mm となる。 $x_1 = 1.0$ mm ならば上式で Δk の前の符号が負のとき、また、 $-x_2 = 1.0$ mm ならば符号が正のとき、誤差が大きくなる。 x_1 (または $-x_2$) が 1.0 mm、 $-x_2$ (または x_1) がこれに対して 20% 小さく (すなわち 0.2 mm 中心線寄りに) 貼られていたとすると、 Δk はゲージの特性の測定結果から最大 10% 程度と考え、 $h = 0.15$ mm ゆえ (2.26) 式より

$$\Delta\gamma' \approx \pm 0.47\%$$

(ただし、符号は $x_1 = 1$ mm のとき正、 $-x_2 = 1$ mm のとき負)

となるが、ゲージがビームの両面に各 2 枚ずつ貼られているのを考慮すれば、結局最大の誤差は

$$\Delta\gamma = 2\Delta\gamma' \approx 0.94\%$$

程度ということになる。したがって、機構的な誤差としては、本節 (1) と合せてもじゅうぶん 1% 以下と

みなせる。

6. む す び

現在国産されている半導体歪ゲージについて、その特性を調べ、これ等の資料にもとづいて加速度計を試作した結果、つぎのようなことが得られた。

- (1) 半導体歪ゲージの特性のうち、最大の弱点は温度依存性と直線性だと言われているが、この実験においても、温度補償問題でなやまされた。特に半導体歪ゲージが従来の抵抗線歪ゲージとくらべて、いちじるしく異なる点は、抵抗温度係数のほかに、(1.1) 式にも示されるようにゲージ率が温度によって変化する(感度温度係数)という点である。このため温度補償は抵抗温度係数と感度温度係数の両者を考慮しておかないと、無負荷の時のみで補償したものは、動作中の温度変化によって、ドリフトを生じることになる。
- (2) 試作した加速度計のうち、50g 用のものは、現在のような接着型の歪ゲージをピック・アップとしてもちいる場合、形状的にみて小型化の限界であろうと思われる。0.5g 用のものも、この程度の出力および直線性を持ったものとしては、ほとんど限界に近く、たとえ素子のより小さなものを使用したとしても、せいぜい高さが数 mm 小さくなるにすぎない。両加速度計とも、現在国産品として市販されている一番小型のものと比較してみると、容積比でほぼ 1/5 以下になっている。よりいっそうの小型化は、蒸着法などの半導体処理技術の進歩をまたねばならないであろう。
- (3) 最小検出感度を考えると、低加速度用は、その出力からみて十分 0.0001 g の感度を持っている

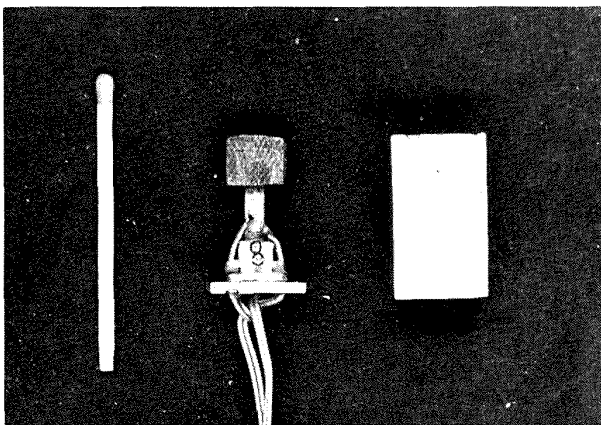


図 19 低 加 速 度 計

(右端がケースで、中央が内部構造)を示し、感度方向は紙面に垂直)

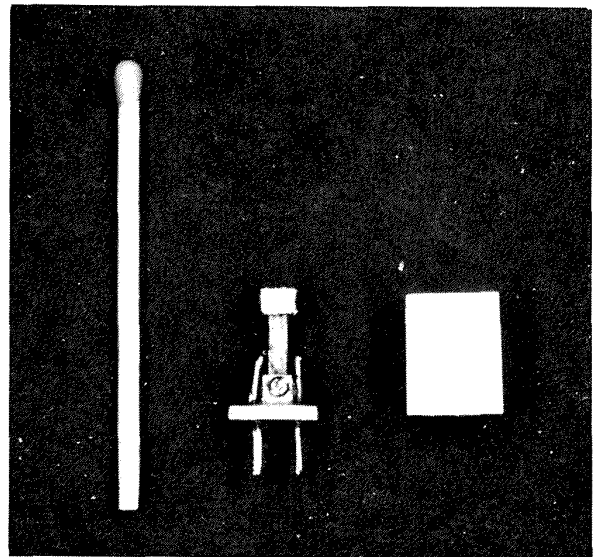


図 20 高 加 速 度 計

(配置は図 19 と同様)

と思われるが、適当な試験装置がないので、測定はおこなわなかった。

- (4) 直線性は使用範囲で非常に良好であるが、横方向加速度が大きい場合は、精度に多少の影響が考えられる。
- (5) 図 19 および図 20 に、試作した加速度の外観を示す。このうち、高加速度計は、NAL-7 型ロケットに搭載して飛しょう性能測定のため実用に供される予定である。

文 献

- 1) C.S. Smith; Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, Phys. Rev. 94-1, '54, p. 42.
- 2) M. Dean III, R.D. Douglas; Semiconductor and Conventional Strain Gages, p. 109~120, Academic Press, New York, '62.
- 3) 五十嵐伊勢美; 半導体歪計, NDI 資料 4146.
- 4) 五十嵐伊勢美; Ge の Piezo 抵抗効果及びその歪計への応用, 応用物理, Vol. 29, 160, p. 73.
- 5) 塩田 健; 半導体ゲージ, 共和技報, No. 51~53, '62.
- 6) F. T. Geyling, J. J. Forst; Semiconductor Strain Transducers, The Bell Sys. Tech. Jour., 39~3, '60, p. 705.
- 7) J. Dorsey; Semiconductor Strain Gage Handbook, Strain Readings, 6-5, '63~5.
- 8) 田畑浄治, 大坪孔治, 滝沢 実; 抵抗線歪ゲージのゲージ率検定, 航技研資料, TM-41, Oct., '64.
- 9) 沼倉三郎; 測定値計算法, 明治書院, '43, p. 184.

- 10) 松田哲郎；半導体歪ゲージの特性，TAIKO, No. 5, Feb., '64, p. 364.
- 11) R.E. Talmo；Semiconductor Strain Gages Offer High Sensitivity, Electronics, Feb, 24, '61, p. 43.
- 12) 竹内和之，飯田宗四郎，北谷虔勇，中井治夫；国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験，航技研資料，TM-21, Sep., '63.

- | | | |
|--------|--|--|
| TR-139 | 多発動機付ヘリコプタの片発停止時における
最適着陸操作—前進速度0の場合—
Optimal Vertical Descent Procedure with
Partial Power of Multi-Engined Helicopters
—The Case of Rejected Take-Off— | 1967年8月 古茂田 真幸 |
| TR-140 | 流線法によるダクト流れ
Streamline-Curvature Approach to Duct
Flow Problems | 1967年9月 藤井昭一, 宇野威信 |
| TR-141 | マトリクス内力法による半張殻構造の応力解
析について
Semi-Monocoque Structures Solved Nu-
merically by the Matrix Force Method | 1967年10月 川島 矩郎 |
| TR-142 | 動的模擬模型による姿勢のオンオフ制御実験
Experimental Studies on Some On-Off
Attitude Control Systems Using a Dy-
namic Model | 1967年10月 樋口一雄, 堀川勇壮
村上力, 小川敏雄
真柳光美 |
| TR-143 | 高負荷燃焼器の一次燃焼領域の研究
Experimental Studies on the Primary Zone
of High Intensity Combustors | 1967年10月 鈴木邦男 |
| TR-144 | 円管流の非定常熱伝達
第2報 薄い壁の場合
Transient Heat Transfer through a Thin
Circular Pipe Due to Unsteady Flow in
the Pipe | 1967年11月 林 二識, 井上建二 |
| TR-145 | ロケット用耐熱材料の研究
Study on the Heat Insulation Materials
for Rocket | 1967年11月 古田敏康 |

航空宇宙技術研究所報告146号

昭和42年11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
電話武蔵野三鷹(0422) 44-9171 (代表)

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2-27-12
