高温で音響加振される構造物のひずみゲージによる一測定法*

江 川 幸 一**

A Strain Measurement of Acoustically Excited Aircraft Structures
at Elevated Temperatures

by Koichi EGAWA

A high temperature strain gage which can be adhered in reverse is developed for attaining accurate strain measurement of acoustically excited structures at elevated temperatures. The reversible gage is a self-temperature compensated, polyimide base, foil one usable upto 250°C. The given environment is so hostile that main effort is devoted to limite the error of the measurement under 50×10^{-6} upto 250°C. Then, the creep and drift of the reversible gages are tested for applying them to aircraft flap model tests. The fatigue of reversible gages are checked after the test by measureing their resistances, gage-factors and dynamic responcees. Consequently, it is clarified that the reversible strain gage is a good tool to obtain accurate high temperature strain data, and it is thought to keep its performances under the hostile environment without considerable deterioration.

Key Words: Strength of Materials, Stress Analysis, High-Temperature Strain Measurement, Strain Gage, Acoustic Excitation, USB Flap, STOL Transport

1. 緒 言

昭和 60 年代の航空輸送の発展に対処するべく計画された低騒音短距離離着陸機は、必要とされる高揚力をエンジン排気ガスを主翼上面に流すことにより得る。この方式では主翼とフラップは加熱と騒音による加振とを同時に受ける。特に、エンジン排気流の制御が十分に行いがたいフラップについて発生ひずみをできるだけ正確に求めることが設計上必要とされる。そこでフラップの構造模型を製作し、高温音響疲労試験を実施することとした。この実験でのひずみ計測は、

(1) 加熱のみを受ける場合の熱座屈発生の有無と熱ひずみの大きさ、

(2) 加熱と音響加振を受ける場合のオイルキャニング発生の有無と発生ひずみの大きさ
を求めることを要求された。ここでは、ひずみゲージを用いて発生ひずみをできるだけ正確に測定するために考案した方法と、その方法の本試験への適用について述べる。

2. 供試体と試験条件

短距離離着陸実験機のフラップは、図 1 の示すように前フラップと主フラップの 2 段式となっている。いずれも縦通材、助材、表面板をリベットで止めた半張殻構造である。エンジン排気により加熱される上面と加熱されない下面とはすべての材質が変えてある。図 1 の(A)~(E)の構造を模擬した 5 種の供試体を製作し、

図 1 短距離離着陸実験機のフラップ

* 昭和 58 年 11 月 28 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日

** 正員、科学技術庁航空宇宙技術研究所 (〒182 東京都調布市深大寺町 1880)。

この中 A, C, D を加熱音響疲労試験に供した。試験部分は図 2 に示す供試体の中央のけたで囲まれた部分で、その板厚は図 1 に示す (供試体 C はこれらとほぼ同寸法の曲面板で、その曲率半径は 535 mm である)。

試験は 5 項目について行ったが、ひずみ測定で特に工夫を要するのは加熱試験と高温音響疲労試験である。試験温度は前者で 200°C、後者で 150°C である。試験時間は前者で 5~10 分、後者では最初に 0.5 時間、以降 2 時間、まれに 6 時間、連続して試験し、累積して 150 時間に及ぶ。音響疲労試験で供試体に付与すべき音響スペクトラムは、実機エンジン上部より計測したデータから図 3 の目標値のように定められたが、試験装置の制約から図中の細線に示すノイズスペクトラムを与えることとなった。

3. ひずみ測定に対する要求事項

- (1) 試験前の供試体の変形などを予防するため、加熱をせずにゲージを供試体に取り付ける。
- (2) 加熱試験では座屈の発生が予想されるので、最初の試験時にできるだけ精度良くひずみを測定す

図 2 フラップ構造模型 A, B, D, E

図 3 付与音響スペクトラムと目標値

る。

(3) 高温音響疲労試験では 150°C で、オーバーオール 160 dB の音圧を受け、150 時間の測定を行う。

3.1 ひずみゲージの取付け 加熱せずにゲージを取付けるには、溶接形ゲージをスポット溶接でとめる方法があるが、Ti 合金の疲労寿命を大幅に低下させることがあるので⁽¹⁾、常温硬化形接着剤を使用する。

3.2 高温ひずみ測定の精度 ひずみゲージによる高温ひずみ測定の研究は 1957 年頃より行われ、その後も多くの研究と開発とがなされてきた^{(2)~(6)}。これらの成果から、高温ひずみの測定精度に最も影響するのは、温度による見かけのひずみの大きさとそのばらつきであることが明らかにされている。温度 T におけるひずみの測定値 $\epsilon_M(T)$ と測定点の応力に基因するひずみ $\epsilon(T)$ との関係は、見かけのひずみを $F(T)$ 、ゲージ率変化を (K_T/K_0) とすると、

$$\epsilon(T) = \{\epsilon_M(T) - F(T)\} (K_0/K_T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

のように示される。見かけのひずみとゲージ率変化は、同一ロット中から抜き取られた適当枚数のゲージについて求めるのが一般的である。この方法では、求められたデータと各ゲージとの見かけのひずみの差は、そのまま求めるひずみ $\epsilon(T)$ の誤差となる。

温度による見かけのひずみのゲージごとのばらつきは、温度が高いほどまた $F(T)$ が大きいほど大きくなることが知られている。小林⁽⁷⁾は抵抗温度係数の小さなアドバンスやカルマを受感材として用いたゲージでも、見かけのひずみのばらつきは 1°C あたりおよそ 1×10^{-6} との値をとるとし、これは抵抗材料そのものの本質的なばらつきによると述べている。ゲージ率の変化については、使用するゲージと接着剤の組合せによりほぼ定常的な値をとり、1~3% の出力変化となることとゲージごとのばらつきの少ないことがわかっている⁽⁸⁾。以上のほかに、測定が長時間に及ぶ場合には、ゲージのクリープとドリフトの補正を考慮しなければならない。これらについては使用するゲージと接着剤の組合せごとにデータを求めて、測定値を補正するのが一般である。このため、これらの一般的な特性については不明なことが多い。

一方、航空機構造の常用時に発生する応力は Ti 合金と Al 合金でそれぞれおよそ 200 MPa と 70 MPa と考えられるから、ひずみの測定誤差として 10% まで許されるとすると、 150×10^{-6} と 100×10^{-6} となる。一般の鉄鋼構造については 100 MPa と 50×10^{-6} と考えられる。したがって、ここでは見かけのひずみの補正誤差として 50×10^{-6} 以下を目標にとれば、ここで

のひずみの測定精度に対する要求を満たす、と考えた。

3.3 ひずみゲージの高温疲労特性 最近の国産のひずみゲージの疲労特性については、滝沢ら⁽⁸⁾および小泉ら⁽⁹⁾の報告がある。ひずみゲージは繰返しひずみを与えられて、零点移動を生じ、またゲージ率に変化し、出力波形が乱れるものが生じる。常温硬化形接着剤を用いてゲージを接着し、150°Cにおいて 500×10^{-6} の両振りひずみを 2×10^5 回与えた試験では、指示ひずみはほとんど変化せずに安定していたが、零点移動量がしだいに増加して、 2×10^5 回では 35×10^{-6} に達したことが報告されている⁽⁹⁾。疲労特性は、一般にゲージと接着剤の組合せおよび試験温度により非常に異なり、また同一条件でもゲージごとにばらつきのあることが示されている。

したがって本試験での要求をそのまま満たしうるゲージと接着剤の組合せを見いだすことは、時間的制約からかなり困難と思われたので、まず要求事項(1)と(2)とを満たす方法を開発し、本試験実施後にこの方法で用いたゲージと接着剤の組合せについて、ゲージ抵抗、ゲージ率および出力波形を調べて、ゲージが本試験中に正しく機能しているかをチェックすることとした。

4. ひずみ測定条件(1),(2)への対応法

4.1 接着剤の選定 常温で硬化して200~250°Cまで使用できるとして市販されている接着剤を調査し、表1に示す国産のポリエステル系接着剤を選定した。使用最高温度は測定条件により、かなりの幅があることがわかったので、いずれも250°Cまで使用することとした。

4.2 ひずみゲージの試作

4.2.1 設計条件 高温でのひずみ測定の精度を向上させるためには、

- (1) ゲージの温度による見かけのひずみを小さくし、

くし、

- (2) さらに、ゲージごとの見かけのひずみのばらつきに起因する誤差を減らす、ことが必要である。

(1)については、対応すべき温度上限が250°Cなので、自己温度補償形ゲージを使用することとした。

(2)については、試験に用いる全数のゲージについて見かけのひずみを求め、これらをそのまま本試験に使用すれば、誤差はほとんどなくなると考えて、再使用できるゲージを試作することとした。ゲージの再使用に際しては、その一般的接着法における接着面の清浄度に対する要求を考慮し、一度使用して汚れた面は再度使用しないこととした。以上の考え方から、新しく開発するひずみゲージは、

- (1) 接着形で、使用温度上限280~300°Cの自己温度補償形。

(2) 見かけのひずみを求めるために、250°Cを上限温度とする温度域で2~3回の加熱を経験した後に、これを平坦にはく離でき、さらに反対の面を使って供試体に接着できる。

(3) 反転して接着したゲージの見かけのひずみとゲージ率変化は、反転前に求めたものとほぼ同一。

(4) 反転して接着したゲージは、機械的ひずみに対して、最小限 1000×10^{-6} まで誤差なく追従できる。の要求を満たすものでなければならない。

4.2.2 ゲージの構造 設計条件(1),(2)を満たすゲージの構造として、ゲージのベース面およびカバー面を平坦とするため、(i)受感部は箔とし、(ii)受感部を中心としてベース側とカバー側の構造および材料を同一とし、(iii)ゲージリード線は薄いリボン状のものとし、スポット溶接でゲージタブに取付ける、こととした。このようにしても、リード線の厚みだけゲージタブ上に盛り上がりが生じ、この上にさらにスポット溶接による突起ができる。スポット溶接の加圧力をできるだけ小さくしたが、ゲージが反転接着された時、盛り上がり部分がゲージ受感部の接着に影響する恐れがある。そこで、ゲージタブを通常のゲージより十分長くした。タブの延伸長さは、大井の解析結果⁽¹⁰⁾を参考にし、ゲージ受感部の外側に1~1.5 mmほど完全な接着がなされるよう、実験的に決定した。

4.2.3 ゲージのはく離 ポリエステル、エポキシ、ポリイミド、ペークライトベースのゲージ(大きさ約 10×5 mm)を、表1に示した接着剤を用いてSUS 304試験片に接着し、250°Cまでの加熱を2~3回経験させた後、メスによる剥離を試みた。ゲージがほとんど平坦なまま、歩留りよくはく離できたのは、ポリイミドベースのゲージで、接着剤はA, Bとも、工具はこの

表1 選定した常温硬化形接着剤

ADHESIVE	CURING REQUIREMENTS	OPERATIONAL TEMP. MAX.
POLYESTER (A)	Clumping Pressure 0.03-0.05 MPa Clumping Duration 4 Hours Curing Temp. Room Temp.	170 °C
POLYESTER (B)	Clumping Pressure 0.03-0.1 MPa Clumping Duration 1-2 Hours Curing Temp. Room Temp.	300 °C

刃ナイフの組合せであった。この組合せについて、さらにSS 41, インコネルX, 24S, Ti6Al4Vに接着してはく離を試み、ほとんど同様にはく離できた。

以上の考察と実験の結果、設計条件(1), (2)を満たすゲージとして、約300°Cまでの使用に耐える受感はくを、同一のポリイミドフィルムでサンドイッチした構造の、図4に示すゲージを開発した。これは250°Cまで使用できる接着形の反転式自己温度補償はくゲージで、ベース寸法16×6mm, ゲージ厚さ50~70 μm , リード線厚さ20~40 μm のものである。

4.3 試作ゲージの温度特性

4.3.1 温度特性の試験方法 まず反転接着時の見かけのひずみの再現性を調べるため、試作ゲージ100枚をテストした。試験片はSS 41, 接着剤は表1のA, 混合比1%, 加圧は0.2 MPaで, 12~14時間行った。接着剤の硬化は48時間行った。ゲージははじめ反転して接着し、見かけのひずみを3回求めた後にはく離し、次にベース面を接着して、見かけのひずみを2回求めた。測定は室温から250°Cの範囲で5回昇温時のみ行った。第1回の加熱時には、測定終了後に260°Cで0.5時間加熱し、ゲージの温度特性の安定をはかった。はく離したゲージのうち、(i)見かけのひずみが大きくない、(ii)第1回と第2回加熱時の見かけのひずみに大差がない、あるいは第2, 第3回で大差がない、(iii)第2, 第3回加熱終了後の室温での零

図4 試作した反転ゲージ

図5 見かけのひずみの一例

点移動が小さい、ゲージについてのみの再現性の試験を行った。ゲージ率の変化は、SUS 304の片持ばり試験片に試作ゲージを6枚接着し、試験片の先端に一定変位を与えてその発生ひずみを測定し、求めた。接着条件などはすべて見かけのひずみの測定時に同じ。

4.3.2 見かけのひずみの再現性 試作ゲージの見かけのひずみの一例を図5に示す。ここでのひずみの測定条件である第1回の構造物試験での精度の良い測定を実現するためには、第4回と第2あるいは第3回加熱時の見かけのひずみが良く一致していなければならない。第2回と第4回加熱時の見かけのひずみの差を図6に示す。225°Cまでは 50×10^{-6} 以内、250°Cでは 55×10^{-6} 以内に収まり、再現性は良好である。

4.3.3 ゲージ率変化の再現性 1~5回の加熱時のゲージ率変化を図7に示す。各加熱時のデータはほとんど一致し、ばらつきは160°Cで0.5%, 250°Cで1.5%と小さい。再現性は良好である。

4.3.4 機械的ひずみに対する追従性 試作ゲージ10枚を特殊鋼の試験片に接着し、250°Cまでの加熱を2回与えた後に、はく離・反転接着した。再接着したゲージの間に新品のゲージを接着した。試験片は曲

図6 見かけのひずみの差

図7 ゲージ率変化

げジにより、室温で 500×10^{-6} とびに 2500×10^{-6} までの機械的ひずみを与えられ、そのひずみゲージの出力が測定された。結果を表 2 に示す。表では試験ゲージの出力の平均値が示してあるが、ばらつきはごく小さかった。反転接着したゲージの出力も、与えられた機械的ひずみにほとんど同じであった。

以上の実験結果から、試作した反転式の高温度ゲージは、ひずみ測定の要求事項(1)、(2)を満たすことが明らかにされた。

5. フラップ構造模型の試験

5.1 ひずみ測定の準備 開発した反転ページによる測定法が、要求事項(1)、(2)を満たすことが明らかになったので、チタン合金用自己温度補償形反転ゲージを入手し、接着剤 A を用いて、前述の方法により、加熱試験および高温音響疲労試験で必要とされる温度特性を求めた。

5.1.1 見かけのひずみとゲージ率変化 見かけのひずみは図 5 に示した結果とほとんど同じ傾向で、常温から 200°C までは $+50 \sim -100 \times 10^{-6}$ と小さく、特性の良好なことを表していた。ゲージ率変化は使用ゲージと接着剤の組合せが同じならば、ほとんど同じ特性を示すことから、図 7 の結果をそのまま用いることとした。

5.1.2 クリープとドリフト インコネル X の試験片にゲージを各々 3 枚接着し、これを 200°C と 250°C に加熱して、 1000×10^{-6} の機械的ひずみを与

表 2 はく離・再接着した反転ゲージのひずみ出力

GIVEN MECHANICAL STRAIN ($\times 10^{-6}$)	509	1017	1503	2000	2506
MEAN OF INDICATED STRAIN OF REVERSED GAGES ($\times 10^{-6}$)	510	1018	1504	1997	2498
MEAN OF INDICATED STRAIN OF NEW GAGES ($\times 10^{-6}$)	511	1019	1504	1997	2500

図 8 反転ゲージのクリープ

え、クリープを測定した。結果を図 8 に示す。 200°C では 1.5 時間経過後は 20×10^{-6} 以下でほぼ一定となるが、 250°C では 3 時間まで増大しつづけて 70×10^{-6} の値を示し、なお安定する傾向は示していない。

次に 2 章で述べた試験状況に合わせた断続クリープと断続ドリフトの特性を求めた。ゲージは熱履歴を与えた後に反転・再接着して、 250°C で試験を行った。結果を図 9 に示す。加熱サイクルを経験するごとにクリープ量は減少し、第 4 回加熱以降は $\pm 10 \times 10^{-6}$ 以下でほぼ安定した。したがって 200°C での断続クリープはいっそう小さく、安定したものとなることが推定される。

断続ドリフトの結果を図 10 に示す。ドリフト量は 2~6 回の加熱に、時間と共に直線的に増加し、2 時

図 9 反転ゲージの 250°C での断続クリープ

図 10 反転ゲージの 250°C での断続ドリフト

表 3 ゲージ率, 5 分間クリープとゼロシフト

GAGE		GAGE FACTOR	5 MIN. CREEP	
			CREEP	ZERO SHIFT
for Ti alloy	3T	2.05	0×10^{-6}	1×10^{-6}
	5T	2.06	0	0
	20R	2.05	0	1
	26T	2.05	-1	-1
	27T	2.04	0	-5
	G.F. on package $2.05 \pm 1\%$

図 11 動ひずみ応答

間では約 15×10^{-6} となる。

以上の結果から、加熱試験では試験時間が短いことから、また、高温音響疲労試験では試験温度が 150°C であることから、いずれの試験でもクリープとドリフトを補正する必要はなく、見かけのひずみとゲージ率変化の補正のみ行えばよいものと判断した。

5.2 試験結果 加熱試験ではめいりょうな座屈は観測されなかった。発生ひずみは 600×10^{-6} 以下であった。チタン合金平板を用いて行った高温音響疲労予備試験では R.M.S. 300×10^{-6} の応答ひずみを得たが、使用した 10 枚の反転ゲージは約 1 時間で、すべて断線またははく離した。本実験ではひずみ測定は順調に行われた。供試体にき裂発生は認められなかった。使用した 36 枚のゲージの生存率は 50% であった⁽¹¹⁾。

5.3 試験に使用した反転ゲージの特性試験 約 150 時間に及ぶ高温音響疲労試験中にゲージが正常に機能していたかどうかを調べるために、特性試験を行った。試験は (A) ゲージが供試体に取付けられた状態で、①目視検査、②導通チェック、③絶縁チェック、④静バランスチェック、⑤加熱テストを行い、次に (B) 供試体からゲージをはく離して、⑥抵抗値測定、⑦ゲージ率測定、⑧ 5 分間クリープ、⑨動ひずみ応答チェックを行った。試験 (A) はゲージ全数について、(B) ははく離に成功したゲージについて実施した。

ゲージ抵抗は 4 けたを測定した。ゲージの疲労による

抵抗変化は、これが 100×10^{-6} の零点移動となる場合でも、ゲージ抵抗 350Ω でゲージ率 2.00 として、 0.07Ω にすぎない。4 けたの抵抗値測定では 150×10^{-6} 以上の零点移動を生じる場合しか検出できない。測定結果では大きな抵抗変化を生じたゲージはなかった。

ゲージ率測定は 5 枚のゲージについて行った。結果は表 3 に示すようにいずれも規格内にあり、大きな変化を生じていない。5 分間クリープとゼロシフトはいずれも良好な結果を示している。

動ひずみ応答はゲージを片持ばり試験片に接着し、これらのそばに新品のゲージを接着して、まず振幅 $\pm 500 \times 10^{-6}$ の正弦波ひずみを約 30 Hz の速さで 5 分間与えて出力を測定し、次に振幅を $\pm 850 \times 10^{-6}$ として 3 分間与えて出力を測定した。結果の一例を図 11 に示す。本例ではそのピーク出力は、使用した後のゲージでは 849×10^{-6} 、新品ゲージでは 842×10^{-6} で、ひずみ出力の差は 1% 弱とごく小さく、出力の時間おくれは認められない。チェックしたゲージ全数について同じ結果を得た。また出力波形の乱れたものは生じなかった。

6. 結 論

高温で音響加振されるフラップ模型のひずみ測定をひずみゲージにより行うため、測定精度の向上を主目的として、反転して使用できるゲージを開発した。一般に最大の誤差要因とされる見かけのひずみの補正については、 250°C までの温度域でほぼ 50×10^{-6} 以下（この内、80% は 30×10^{-6} 以下）の差に収めることができた。反転ゲージの音響加振による疲労に関しては、温度 150°C 、音圧 160 dB オーバオールで 150 時間の試験に用いても、著しい特性劣化のないことがわかった。試験環境がこのような苛酷な場合には、ゲージの接着、ゲージリード線の取扱い、およびコーティングに慎重を要することもわかった。

文 献

- (1) Imig, L. A., NASA TND, 5973 (1970), 6.
- (2) ASTM Spec. Tech. Publ., 230 (1959).
- (3) 竹中・江川, 機誌, 68-562 (昭 40), 1573.
- (4) Gibbs, J. P., Exp. Mech., 19-7 (1967), 19
- (5) 小泉・ほか 2 名, 機論, 36-286 (昭 45), 878.
- (6) 江川, 非破壊検査, 21-12 (昭 47), 740.
- (7) 小林, 応力と歪, 1-4 (昭 47), 1.
- (8) 滝沢・ほか 2 名, 非破壊検査資料, 4460 (昭 51), 35.
- (9) 小泉・ほか 2 名, 非破壊検査, 21-1 (昭 47), 15; 渋谷・ほか 2 名, 非破壊検査, 22-10 (昭 48), 644.
- (10) 大井・ほか 3 名, 機論 A, 43-376 (昭 52), 4409.
- (11) 佐野・ほか 3 名, 23 回構造強度講演集, (昭 56), 126.

討 論

〔質問〕 高 橋 賞〔関東学院大学工学部〕

(1) 772 ページ左欄 6 行めの「5 項目」は何か。

(2) 772 ページ左欄 12 行めから 15 行の音響スペクトラムの具体的付与方法はどのようなものか。これと関連して第 5 章, フラップ構造模型の試験のところで行った音響疲労試験の詳細はどのようなものか。

(3) 試作反転ゲージのゲージ長さはいくらか。またこれを作るのは簡単にどこでもできるものか。かなり難しいように思えるが。

(4) 774 ページ 4・3 節では種々の材質の試験片を用いているが、特に意味があるのか。またこれと関連して、第 5 章, フラップ構造模型の試験のところでやっているチタン合金用自己温度補償形反転ゲージを最初から用いるのがよいと感じるがどうか。

(5) 本表題のひずみ測定の実例はどんなものか。

(6) 結論にある「ゲージの接着, …」の具体事項は何か。

〔回答〕 (1) 試験を行った 5 項目は次のとおりである。(i) 振動特性試験, (ii) 固有振動数の加熱による変化の測定, (iii) 加熱試験, (iv) 動応答試験, (v) 高温音響疲労試験。

(2) 音響スペクトラムは当研究所の進行波管により与えた。試験は、進行波管内部に赤外線加熱ランプ 9 台を取付け、その前面に取付けた供試体を音波の進行中に加熱し、供試体の温度、ひずみ、変位、加速度および音波の音圧を測定して行った(付図 1 参照)。

(3) ゲージ長さは 7.5 mm である。ご指摘のようにゲージの製作にはかなりの設備と技術とを必要とす

付図 1 試験装置

るため、簡単には行えないと思う。本ゲージの製作は(株)共和電業が担当した。

(4) 試作に成功すれば、高温ひずみ測定用として広く使用されるものと考え、構造用金属材料数種に適用した。また、このゲージは発表者独自の発想に基づく全く新しいものなので、試作が成功するか否かは当初は不明であった。そこで最も製作経験の多い鉄鋼用でまず試作した。現在では、ご指摘のようにチタン合金用反転ゲージを最初から用いることが可能である。

(5) 航空機の主翼、フラップ、胴体などでエンジン排気にさらされる部分およびエンジン排気用ダクトなどが直接測定対象である。しかし、本文より明らかなようにこのゲージの適用域は音響加振部分に限定されず、高温で繰返し荷重を受ける構造物のひずみ測定に用いることができるので、適用範囲は広いものと考え

る。

(6) ゲージ接着の基本事項である接着面の清浄化、ゲージの加圧などをきちんと、慎重に行うことを意味する。