

航空宇宙技術研究所報告
TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-549

高温環境下におけるハニカムサンドイッチ梁の
減衰特性に関する研究*

峯岸正勝・名取通弘・砂川 恵

1978年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

高温環境下におけるハニカムサンドイッチ梁の 減衰特性に関する研究*

峯岸正勝** 名取通弘*** 砂川 恵***

Experimental Analysis on Damping Characteristics of Aluminum Honeycomb Sandwich Beams Under High Temperature Environment

By Masakatsu MINEGISHI, Michihiro NATORI and Megumi SUNAKAWA

Abstract

An experimental study of damping characteristics of aluminum honeycomb sandwich beams is presented. Experiments were carried out under high temperature environments up to 240°C. Test specimens were supported at their middle points and were excited in symmetric modes. Displacement of beams in damped free vibration was picked up and the logarithmic decrements and loss factors were calculated. From the experiments of many test specimens, the loss factors of sandwich beams have been obtained with high accuracy and the change of damping characteristics due to temperature rise has been clarified.

記号

FM47	: ビニール・フェノリック系接着剤
MB328	: 変性エポキシ系接着剤
2L, B, H	: 試験片の全長, 幅, 全高
H_1, H_2, H_3	: 試験片の表板の厚さ, 接着層の厚さ, コアの高さ
f	: 試験片の曲げ一次固有振動数
l	: 長さ
I, N	: データ処理のパラメタ
T	: 温度
t	: 時間
W_0	: 全振幅

W_{0+n}	: n 周期後の全振幅
δ	: 対数減衰率
η	: 損失係数
τ	: 接着剤の剪断強度

1 まえがき

構造の軽量化が強く要求される航空機及び飛翔体の構造要素として、サンドイッチ構造が広く応用されている。これらの構造の動的荷重に対する応答にはその減衰特性が大きく影響する。例えば、強制振動の振動振幅は減衰力の存在に大きく左右される。この振動振幅の低減は疲労破壊防止の為に、又騒音軽減の為に重要である。この構造の減衰特性に関する研究の多くは金属物理学や材料力学的な観点によるもの¹⁾であり、構造力学の解析にそのまま使用することが出来る資料は意外に少ないのが現状である。

* 昭和 53 年 10 月 2 日受付
** 機体第一部
*** 東京大学宇宙航空研究所

又、サンドイッチ材や複合材料の減衰特性についても理論及び実験の両面から数多くの研究がなされている^{2)~6)}*が、高温環境下での減衰特性については、僅かに粘弾性材を芯材としたサンドイッチ材の実験的研究⁴⁾があるのみである。本研究においては、航空機及び飛翔体の構造要素として現在最も実用的なアルミニウムハニカムサンドイッチ材について、空力加熱等で問題となる100℃以上の温度領域における減衰特性の変化の解明に重点をおいて、代表的な二種類の接着剤によるサンドイッチ材の減衰特性を実験により明らかにしようとするものである。

2 実験の概要

2.1 試験片

試験片としては、アルミニウムハニカムサンドイッチ梁を使用した。表面板及びコアはアルミニウム合金5052であり、接着剤はビニールフェノリック系接着剤FM47及び変性エポキシ系接着剤Met1-Bond328(以下MB328と略記する。)の二種類を用いた。ハニカムサンドイッチの接着には、通常金属同士の接着に用いられる接着剤、即ちエポキシ系樹脂、ゴム又はビニール変性フェノリック系樹脂が用いられる。これらのうちでアルミニウムハニカムサンドイッチに最も広く用いられていると思われるのはビニール変性フェノリック系樹脂であり、FM47はこれに属する市販品の一つである。次にエポキシ樹脂は、異なる二種類の接着剤を用い、剝離強度と剪断強度との均衡を図る為に変性化することが多い。このため変性エポキシ樹脂の種類は非常に多く、一般的な特性の記述は困難である。MB328もこれら変性化されたエポキシ樹脂に属する市販品の一つである。本実験に用いたFM47及びMB328はいずれも熱硬化性で、加熱により硬化しそれぞれ異なった特性を持つ。FM47はハニカムサンドイッチ用接着剤としてかなり古くから使用されているもので、常温での剪断強度は接着剤の中では高い部類に属する。接着の強度は温度による影響が大きい、その指標の一つとなる剪断強度 - 温度線図⁷⁾を図1に示す。図から分かるように、常温から80℃付近までは剪断強度3.0kg/mm²以上を有し、それ以上の温度では急速に強度が低下する。次にMB328は耐熱性に重きをおいた接着剤で常温での剪断強度(2.7kg/mm²)は接着剤の中では中位に属するが、使用温度範囲はFM47に比べて遙かに広い。200℃においても1.5kg/mm²以上の剪断強度を有し、200℃付近までの温度では長期使用にも耐えると言われている。

* ここに引用しなかった文献については、筆者等の前報告⁵⁾において概観してある。

試験片としては、L方向(リボン方向)及びW方向(トランスバース方向)にそれぞれ600mm及び1800mmの板から長さ580mm、幅36.5mmの梁をアルミ用特殊鋼丸鋸を用いて切り出した。試験片の長さ方向はリボン方向にあってある。試験片の幅は75mm程度のもので標準的規準のようであるが、梁としてよりも板としての特性が現れることを避ける為に、ここでは約半分程度の値とした。試験片のコア高さは、公称 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{4}$ 及び $\frac{1}{2}$ インチの3種類であるが、FM47とMB328の試験片では全厚さで約1.5mm程度の差がある。これら実験に使用した試験片の名称及び寸法を表1に示す。

2.2 実験装置

試験片の取付けに関しては、図2に示すようにその長手方向中央部を支持架に支持する。実験に使用した支持架では35mm以下の厚さの試験片を支持出来る。この支持架を加振器への加熱を減少させる為の結合棒(以下中間結合棒と言う。)を介して加振器に取付け、加振制御装置で加振周波数及び振幅を調節し加振する。これら試験片取付けの状態を図3に示す。図3から分かるように、試験片は左右対称なモードで加振される。この支持及び加振方法は、特にサンドイッチ材の場合に、片持梁に非常に近い支持条件を与えるのに有効である。

加熱室は、厚さ10mmのアスベスト板で周囲を囲み、更にその内側に反射板として厚さ0.4mmのステンレス板を取付けて出来ている。加熱には赤外線ランプ(Philips社製1kw/220V)24本を用い、それらを試験片の長手方向両側面に垂直に各10本ずつ、左右先端部には水平に各2本を上下に配置した。赤外線ランプの取付け方法について

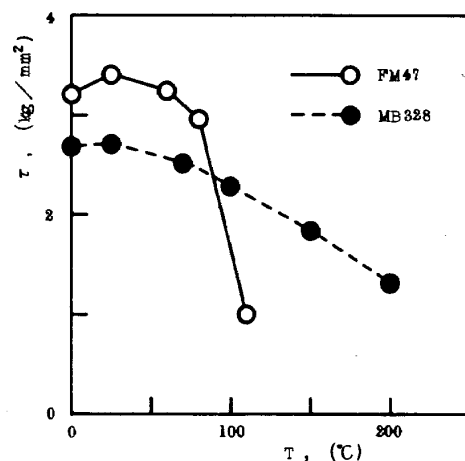


図1 接着剤の剪断強度と温度との関係(実験値)⁷⁾

表1 試験片諸元

試験片番号	全長	全幅	全高	表板の厚さ	接着層の厚さ	コア高さ
	2L (mm)	B (mm)	H (mm)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	H ₃ (mm)
MB328 3/8-1	580	36.3	12.6	0.8	0.1	10.8
MB328 3/8-2	580	36.3	12.6	0.8	0.1	10.8
MB328 3/8-3	580	36.5	12.6	0.8	0.1	10.8
**MB328 3/8-4	580	36.5	12.6	0.8	0.1	10.8
**MB328 3/8-5	580	36.5	12.6	0.8	0.1	10.8
MB328 5/8-1	580	36.5	19.3	0.8	0.1	17.5
MB328 5/8-2	580	36.7	19.3	0.8	0.1	17.5
MB328 5/8-3	580	36.6	19.3	0.8	0.1	17.5
**MB328 5/8-4	580	36.5	19.3	0.8	0.1	17.5
**MB328 5/8-5	580	36.5	19.3	0.8	0.1	17.5
**MB328 7/8-1	580	36.6	25.5	0.8	0.05	23.8
**MB328 7/8-2	580	36.4	25.5	0.8	0.05	23.8
MB328 7/8-3	580	36.5	25.5	0.8	0.05	23.8
MB328 7/8-4	580	36.5	25.5	0.8	0.05	23.8
MB328 7/8-5	580	36.5	25.5	0.8	0.05	23.8
* FM47 3/8-1	580	35.5	11.3	0.8	0.1	9.5
FM47 3/8-2	580	36.6	11.3	0.8	0.1	9.5
FM47 3/8-3	580	36.5	11.3	0.8	0.1	9.5
FM47 3/8-4	580	36.5	11.3	0.8	0.1	9.5
FM47 3/8-5	580	36.5	11.3	0.8	0.1	9.5
* FM47 5/8-1	580	36.6	17.7	0.8	0.1	15.9
FM47 5/8-2	580	36.5	17.7	0.8	0.1	15.9
FM47 5/8-3	580	36.5	17.7	0.8	0.1	15.9
FM47 5/8-4	580	36.5	17.7	0.8	0.1	15.9
FM47 5/8-5	580	36.5	17.7	0.8	0.1	15.9
* FM47 7/8-1	580	36.0	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-2	580	36.2	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-3	580	36.5	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-4	580	36.5	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-5	580	36.5	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-6	580	36.5	24.0	0.8	0.1	22.2
FM47 7/8-7	580	36.5	24.0	0.8	0.1	22.2

* 温度分布測定のための試験片

** 固定した支持架による実験も行ったもの。

$$H_2 = (H - 2H_1 - H_3) / 2$$

は、ランプ口金が銅板のレール上をスライドして任意の位置で固定出来る方式を採用した。試験片が任意の温度で一樣な温度分布となるように、ランプ配置を容易に調整し易くする為である。ランプの取付け状態と加熱装置を図4に示す。図5に加熱用赤外線ランプの配置及び配線図を示す。支持架の熱容量が試験片に比べて非常に大きいので、試験片中央部にランプ8本を垂直に並べた。又振動状態では試

験片両端の温度が中央部の温度より早く低下するので、加振開始前に両先端部に近い所を中央部の温度より多少高めに保つことが必要である。その為に、試験片の両先端部付近にランプを垂直に6本及び水平に2本ずつ配置した。水平に配置したランプ位置の調整と加熱室床面に取付けた反射板とにより、試験片温度分布の左右対称性及び上下対称性を保つことが出来た。赤外線ランプの点滅は、実験を連

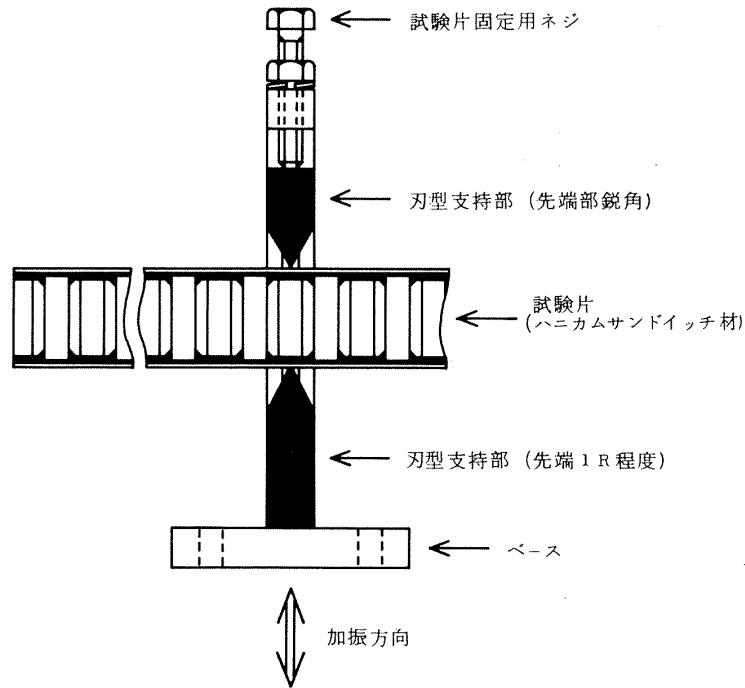


図 2 支持架 (刃型支持部詳細)

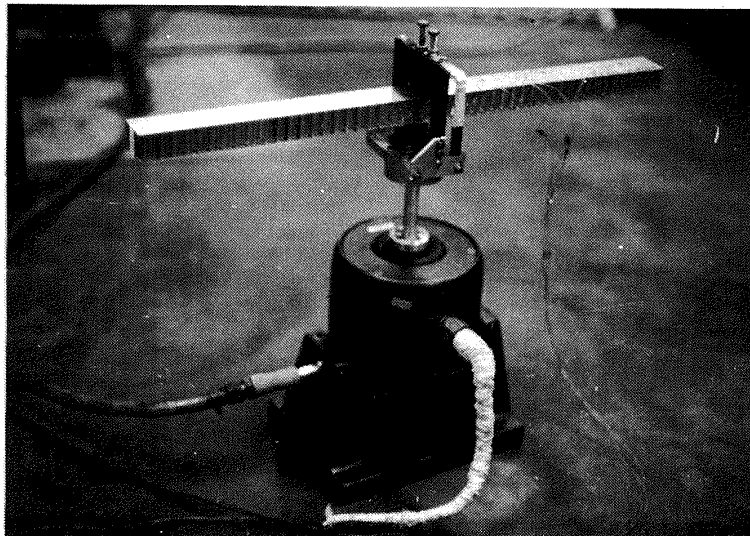


図 3 試験片の取付け状態

続して行うのに便利なように、又試験片先端部及び中央部を別々に加熱出来るように、2系統の加熱用電力回路及び開閉器によって行った。

加振器の防熱対策は、高温環境での実験を行う場合に大きな問題があり、十分な対策を施す必要がある。まず中間結合棒の動きに支障のないだけの大きさの穴を、図6に示すように、加熱室底板にあけて加振器を遮熱した。更に中

間結合棒と加振器との取付けには、厚さ2mmのシリコンシートを挟んで熱伝導を少なくしてある。又加振器本体には、水道用ゴムホースを巻付け、これに冷水を通して外側より冷却すると共に、小型コンプレッサーにより冷風を加振器内部に送り、加振器本体の温度上昇を防いだ。コンプレッサー作動時と休止時での実験データの比較から、このコンプレッサーの作動によるサンドイッチ材の減衰特性への影

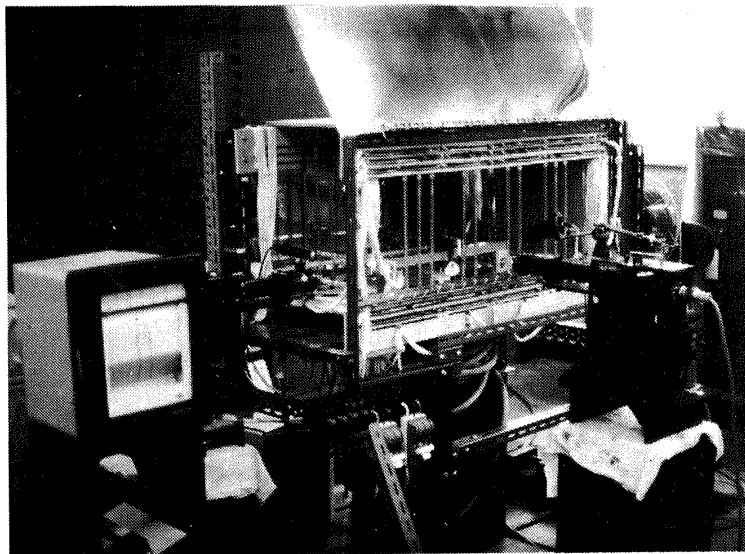


図 4 加熱用赤外線ランプの取付け状態と加熱装置の全景

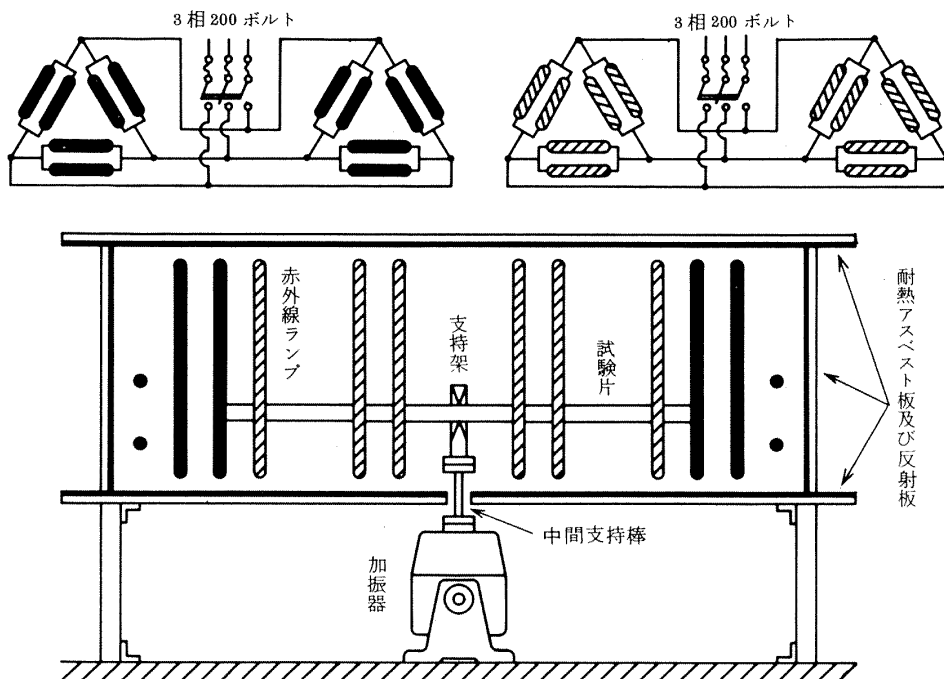
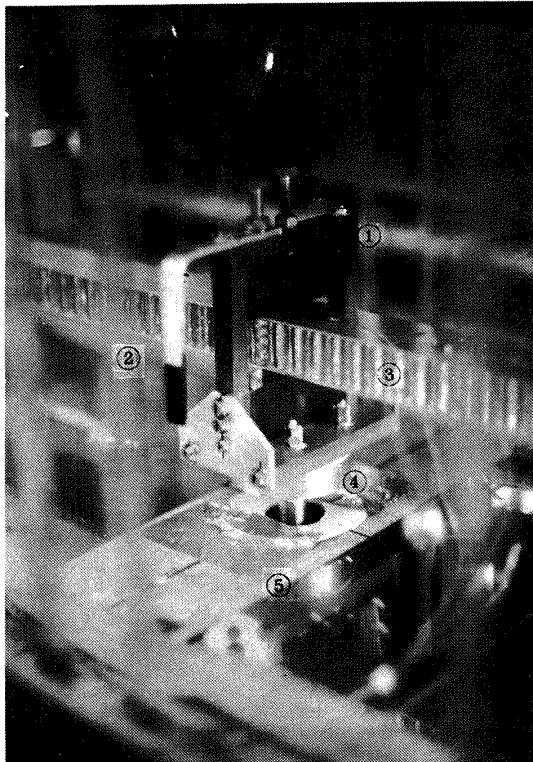


図 5 加熱用赤外線ランプの配置及び配線図



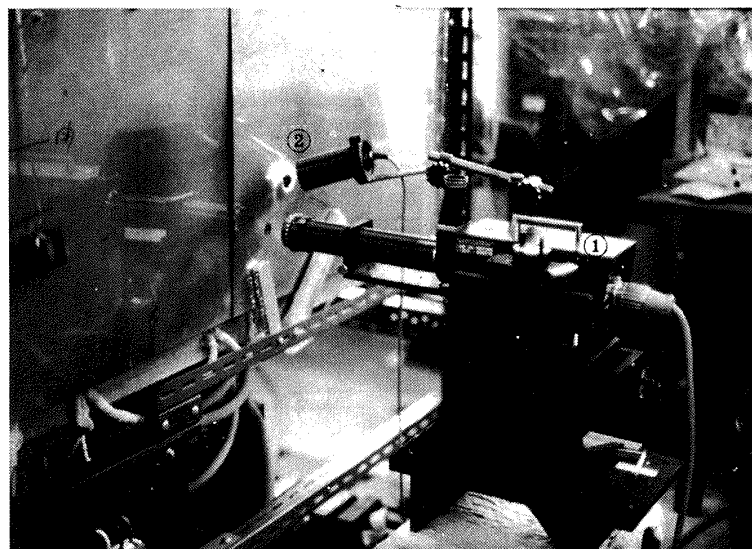
① 支持架 ② ターゲット ③ 試験片 ④ 中間結合棒
⑤ アスベスト底板及びステンレス反射板

図 6 試験片支持部及び加熱室底板の加工

響はないと言える。

変位の検出には、電子光学式非接触変位計⁸⁾を用いた。これは測定位置のターゲットに一方から光を当て、その動きをカメラ部で捉えて変位を検出する方式であり、変位の測定範囲によりカメラ部のレンズを交換して使用する。本実験の場合にはターゲットからレンズまでの間隔が220mm程度しかなく、加熱中の赤外線ランプの光を直接カメラレンズに当てると加熱の為にレンズに損傷を与えたり、必要以上の光量がカメラに入り、カメラ及びアンプ側の故障の原因ともなる。そこで、アスベスト板及びステンレス反射板に直径20mm程度の穴を2箇所あけ、一方の穴よりターゲットに光を当て、主としてその反射光のみを用いて、もう一方の穴からターゲットの変位をカメラで捉えるようにした。そしてこの2つの穴には可動用のアスベスト蓋を取付け、これを簡単に開閉出来るようにした。電子光学式非接触変位計カメラ部の設置状態を図7に示す。なお、ターゲットも従来の白-黒色アクリルラッカーでは高温環境での実験に使用出来ないので、シリコンゴム(信越化学・シーラント KE-45)を使用した。更に、各種の接続コード類にはアスベストテープを巻き防熱及び絶縁の処置を行った。

試験片温度は、熱電対(クロメル/アルメル0.1mmの素線をグラスクロスで被覆したもの。)を試験片の上下面に溶接し、この熱起電力を多点式温度記録計に記録し、求め



① 電子光学式非接触変位計用カメラ
② 同上光源部

図 7 電子光学式非接触変位計用カメラ部の設置状態

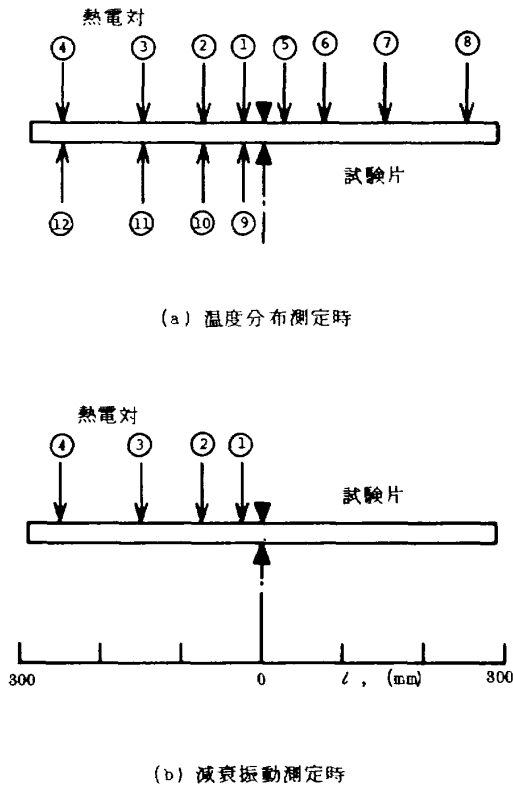


図 8 温度検出用熱電対の取付け位置及び番号

る。図 8(a)に示す試験片の上下面の 12 点について、各点の温度履歴測定の一例を図 9 に示す。これは 150℃ 付近において一様な温度分布が得られるように、試験片を約 200℃ に加熱した後、ランプ電源を切断して自然冷却の状態 で得られた測定結果である。支持架の熱容量が大きい為、試験片中央部の温度は先端部に比べて加熱時には低く自然冷却後十分時間がたつてからは高くなっている。全測定点の温度差が最小となる時点 を C 点、全測定点の温度差の最大値がその時点における平均温度の 5% になる時点を C 点の前後で A 点及び B 点とする。試験片の温度分布は A 点から B 点に至るまでの間、最大 5% の範囲内で一様である。この温度分布をそれぞれの設定温度について示したのが図 10 である。試験片の表面及び裏面の温度を○印及び●印で、両面の温度が一致している場合には●印で表してある。A 点より B 点までの経過時間は 65~275 秒であり、この時間は図からも明らかなように高温になるほど短い。しかし測定に要する時間は数秒程度であるので、測定の開始時点を C 点付近に定めれば、測定の間試験片の温度はほぼ一定である。また試験片の温度分布は、それぞれの設定温度について C 点ではほぼ上下左右対称となっているので、損失係数測定の実験においては、図 8(b)に示す試験片上面片側の 4 点の温度のみを計測した。実験における試験片の公称温度としては、この 4 点の温度の平均値を用いる。

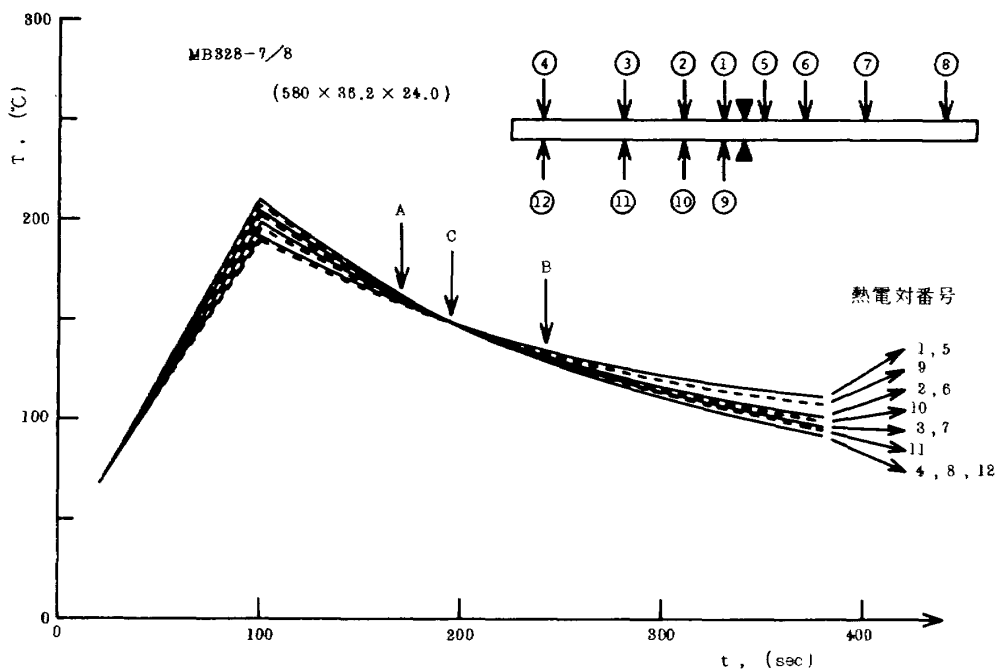


図 9 温度履歴曲線の一例、設定温度 150℃ の場合

2.3 実験方法

減衰特性の測定法としては種々のものが考えられる⁹⁾

が、ここでは実験方法の簡明さと微小振幅での測定に重点をおいて、減衰自由振動の波形から対数減衰率を求める方法を用いた。この方法では試験片の加振は容易である代わりに、減衰振動波形の測定に際して、加振器自身の減衰の影響を考慮しなければならない。しかしこの実験の系を図11(b)に示すような単純なモデルに置換えた計算によれば、加振器自身の減衰率及び支持架部分の質量が大きい場合には、 $(x_1 - x_2)$ により計算される減衰率は、図11(a)に示すような試験片のみの減衰率に殆んど等しくなることが知られている¹⁰⁾。本研究ではこのことについて実験的に確認しており、詳細については後に述べることにする。

実験は、まず試験片を加熱装置により設定温度より高い適切な温度に加熱しておき、その後自然冷却状態において曲げ一次の固有振動数で共振させる。試験片の先端部及び中央支持部分にターゲットA及びBを設け、これらの点の振動変位を電子光学式非接触変位計で検出する。検出した二つの変位信号A及びBを加算減算増幅器に通して信号

(A-B)を得る。この変位信号(A-B)及び試験片先端の変位信号Aの波形をシンクロスコープで観測しつつ、振動振幅が最大となるように加振振動数を調節して、試験片の曲げ一次固有振動数に一致させる。このようにして共振状態を見出した後、加振制御装置により加振器の駆動電流を調節して適切な振幅を与える。この状態を保ちながら試験片の自然冷却時における温度履歴を観測して、温度分布が最も一様となるのを待って加振制御装置の出力を瞬時に切断し、以後の減衰自由振動の波形をデータレコーダに記録する。実験方法の概要を図12に、実験のブロック図を図13に示す。又実験に使用した装置及び計測器の様子を図14にその仕様を表2に示す。

得られたサンドイッチ材の減衰特性に加振器の減衰特性が影響していないことを確認する為、本研究では常温状態で支持架を固定した実験も実施した。すなわち、図15に示すように、支持架を固定して、試験片両先端部の変位を電子光学式非接触変位計で検出しつつ左右対称に糸で引上げた後に糸を切断し、以後の減衰自由振動の波形を記録して損失係数を求める。この方法においても糸及び滑車部

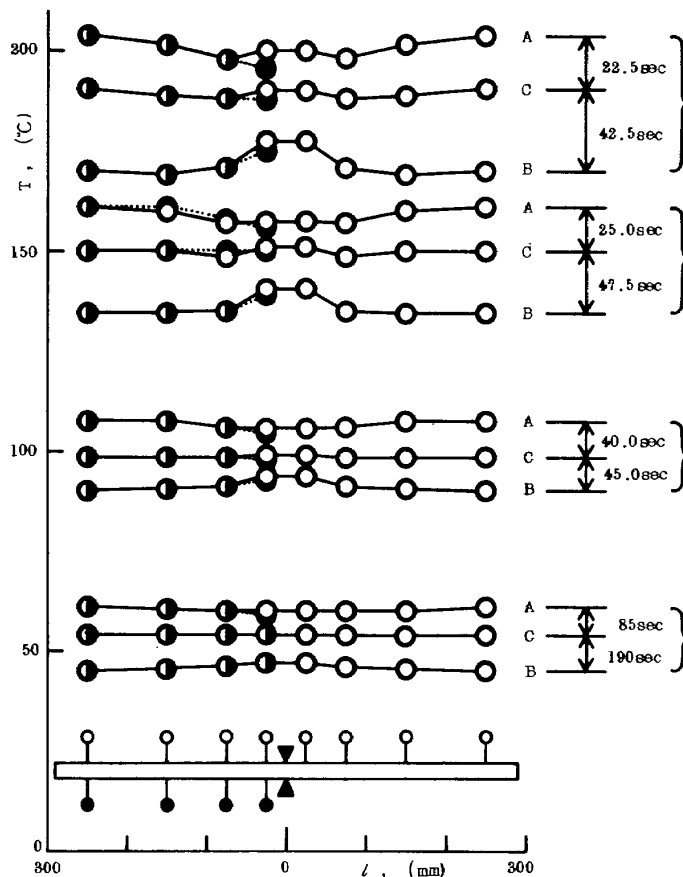


図 10 温度分布、各設定温度における最大バラツキ 5% の時の温度分布とその経過時間

分でのエネルギー損失があるわけであるが、後述する結果から判断して、その影響は非常に小さいようである。この方法では、サンドイッチ材の剛性が高いので糸の引上げにより十分な静的変位を得ることが困難であり、又糸を切断

した際に減衰波形に高周波成分が重畳し易い。そこで何回かの実験を繰返し行って、信頼できるデータを得るようにした。

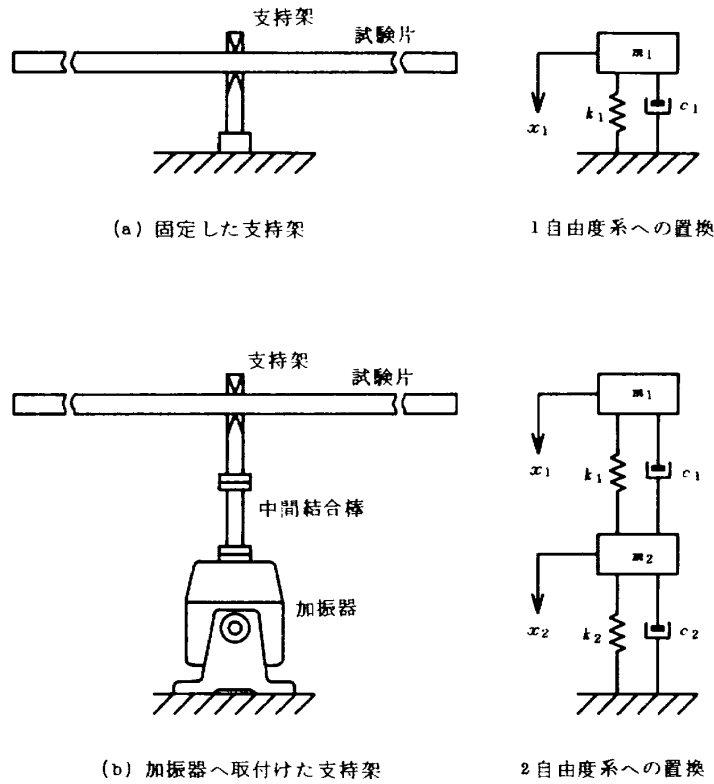


図 11 試験片の支持方法の解析モデル

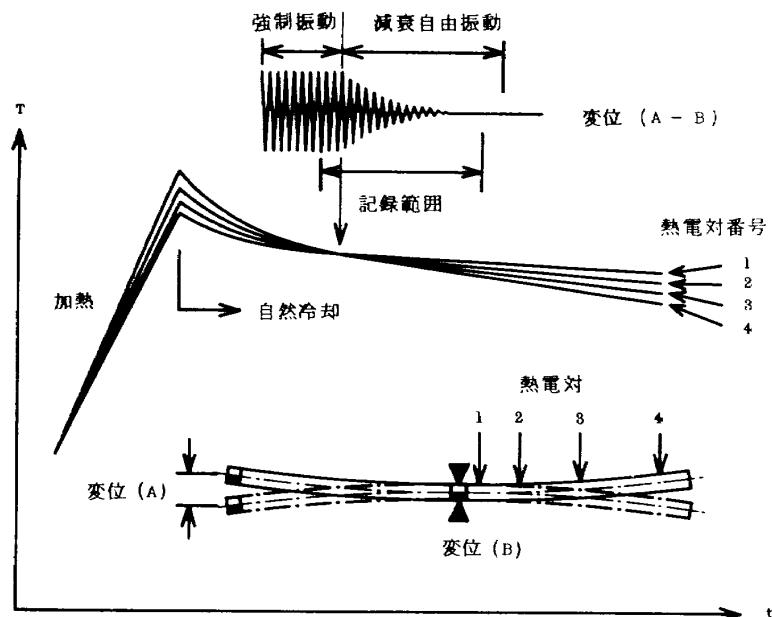


図 12 高温環境下での実験方法の概要図

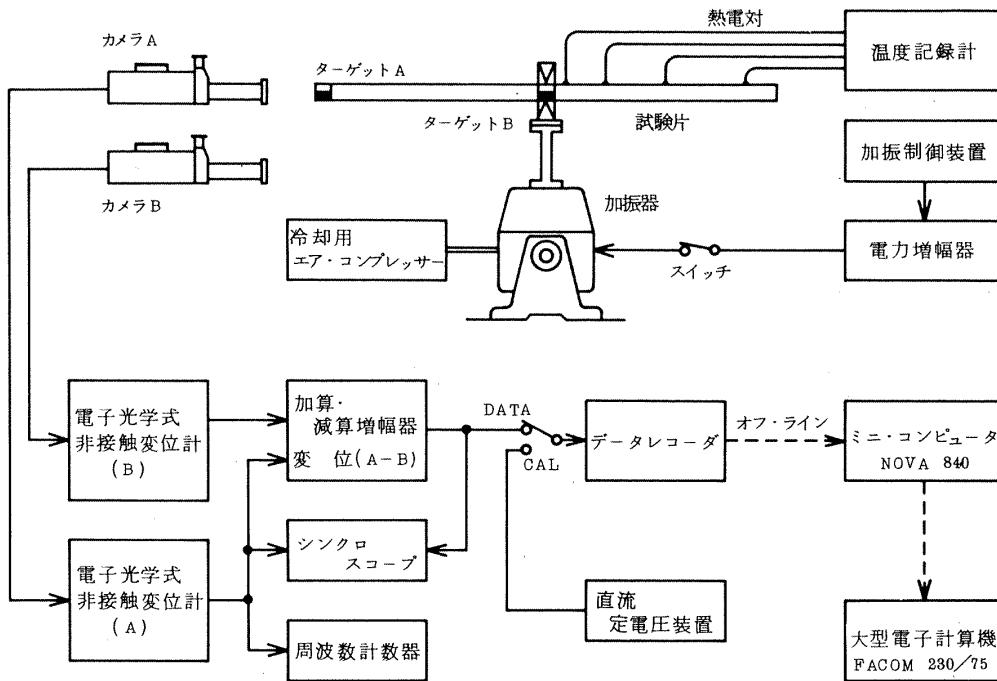
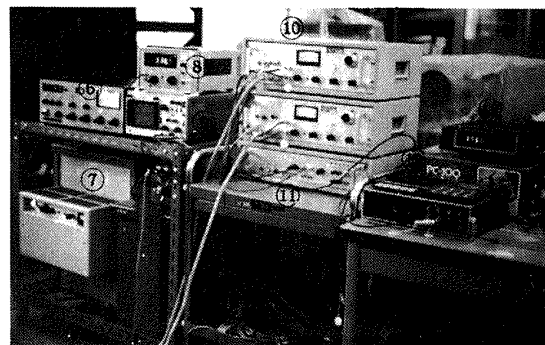
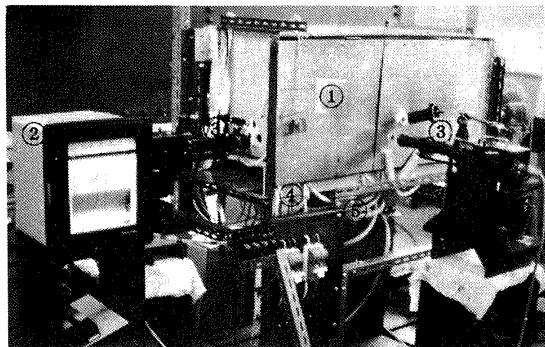


図 13 実験装置及び計測装置のブロック図



- ① 加熱室 ② 温度記録計 ③ 変位検出用カメラ
- ④ 加熱用電源スイッチ ⑤ 加振器及び冷却水用ホース
- ⑥ 加振制御装置 ⑦ 加振器用電力増幅器 ⑧ 周波数計数器
- ⑨ シンクロスコープ ⑩ 電子光学式非接触変位計
- ⑪ 加算・減算増幅器 ⑫ 電圧電流計 ⑬ データレコーダ

図 14 実験装置と計測機器

表2 実験装置及び計測機器の仕様

項目	メーカー	モデル	性能
加振器	GOODMANS	V50mk 1	最大出力：2.5 lbs load(100Hz) ストローク：0.7 inch
	LING	406	最大出力：2.8 lbs/amp. ストローク：0.7 inch
加振制御装置	BRUEL & KJÆR	1019	周波数範囲：5~10000 Hz 周波数精度：1%±0.25 Hz 出力電圧精度：±0.5 dB(5~5000 Hz) ±1.0 dB(5~10 kHz)
		1047	周波数範囲：5~10000 Hz 周波数精度：0.1 Hz or 1.0 Hz ダイナミックレンジ：80 dB
電力増幅器	PHILIPS	EL6476/05 & EL6476/75	最大出力：250 VA (5~5000 Hz) ノイズ：-80 dB (フルケース)
電子光学式非接触変位計	ZIMMER	100A	周波数応答性：0~50 kHz (フラット) 分解能：フルスケールの1/10000 LENS：100-05 (5mm フルスケール)
加算・減算増幅器	ZIMMER	160D	周波数応答性： 出力電流 200 mA(P-P) } 0~20 kHz < ±0.5% 出力電圧 10 V(P-P) } 0~40 kHz < ±3% 直線性：< ±0.1%
データレコーダ	SONY	FRC-1402	カセット式 4 ch. 歪率 < 1%
シンクロスコープ	岩崎通信機	SS-5050	周波数帯域幅：DC~5 MHz - 3dB 感度：10 mV~25 V/cm
周波数計数器	横河電機	2891	測定範囲：20 Hz~2 MHz (6 Range 切換) 分解能：0.001 Hz / 1 digit
直流定電圧装置	高砂製作所	GPO50-2	定格出力：DC, 0~25V2A / 50V1A
温度記録計	横河電機	ERB-12-30M	CA熱電対用 12打点式記録計 測定範囲：0~300 / 600 °C 感度：< 0.15%

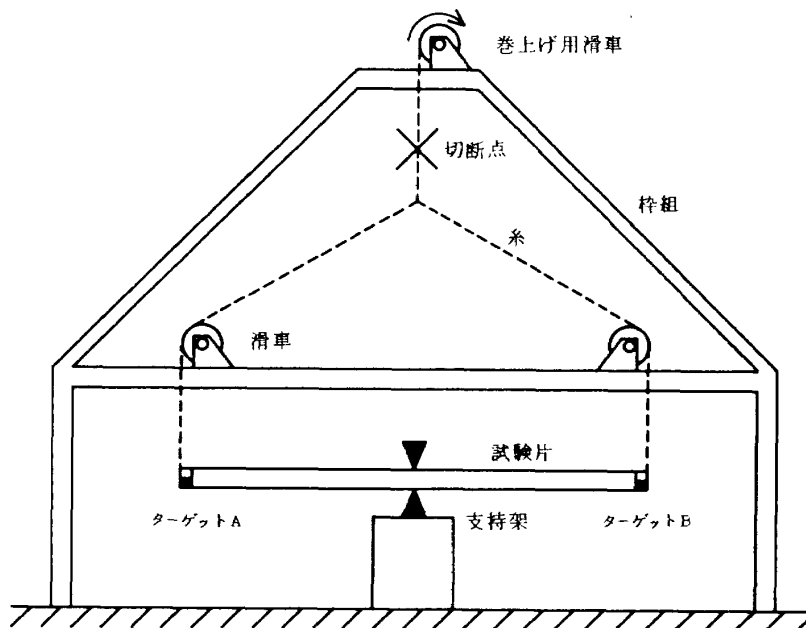


図 15 固定した支持架による損失係数測定の実験装置概要図

2.4 実験データの処理と解析

実験データの処理の為に、幾つかの温度環境下における減衰自由振動波形のアナログデータをオフラインでミニコンピュータを使用して A/D 変換した後で、大型電子計算機により減衰率を計算する。減衰振動波形の或る時点での全振幅を W_0 とし、それから n 周期後の全振幅を W_{0+n} とすると、対数減衰率を求める為の振幅比のグラフは図 16 のようになる。このグラフ上に占める一点を以後一つのデータと呼ぶことにする。これらのデータを N 個とり、それらを最もよく表す直線の勾配 a を最小二乗法により決定し、それから対数減衰率 δ を

$$\delta = \frac{1}{n} \ln a \quad (1)$$

により求める。損失係数 η は、材料を Voigt 型の粘弾性モデルに置換えて、次式から得られる。

$$\eta \approx \delta / \pi \quad (2)$$

このようにして得られた損失係数は有限振幅の実験結果であるので、大気による減衰の影響とサンドイッチ材そのものの減衰の振幅依存性の影響をも含んでいる。そこで、これらの影響を調べる為に、図 16 のデータを幾つかのブロックに分けて、それぞれのブロックの損失係数を前述の方法で求める。そして、そのブロックの最初の振幅値を振幅の代表値として、損失係数と振幅値の関係を求めることとする。損失係数の値が大きい場合には、減衰振動の波形は早く収束してデータの個数を多くとることが出来なくなる。そこで、振幅の大きい方から順に N 個のデータを用いて始めのブロックを作った後、データを I 個 ($1 \leq I \leq N$) ずらして次のブロックを作り、順次この操作を繰返して行く。損失係数が小さい場合には、 $n = 5, N = 30, I =$

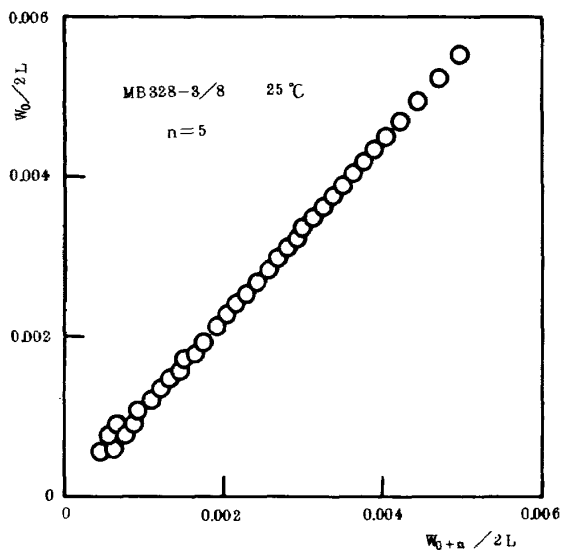


図 16 対数減衰率を求めるための振幅比のグラフ

2 とした。損失係数が大きい場合には、 $n = 1, 2$ 及び $3, N = 10$ 及び $20, I = 1$ 及び 2 として、損失係数と振幅との関係を十分に表せるように考慮した。微小振動のデータは多くの測定誤差を含む為に、ブロックのデータ数 N が或る値以上多くないと意味のある損失係数を与えないことが知られている⁵⁾が、以下ではその点をも考慮して実験結果を整理した。損失係数と振幅値との関係を求めた後で、これから振幅値零の場合の損失係数を外挿により求めた。この値には、大気による減衰の影響は含まれておらず、又、非線型因子によるサンドイッチ材そのものの減衰の振幅依存性も第一次近似としては小さいと思われるので、以後この値をサンドイッチ材の損失係数と呼ぶこととする。

3 実験結果

3.1 加振器の減衰特性の影響

試験片支持架を固定台に直接固定した実験により得られた損失係数と振幅との関係の一例を図 17 に示す。図 17 には、加振器を含む系で測定した損失係数の値も示してある。筆者等の測定結果によれば、本実験で使用した加振器及び支持部分での減衰特性を損失係数に換算して表すと、

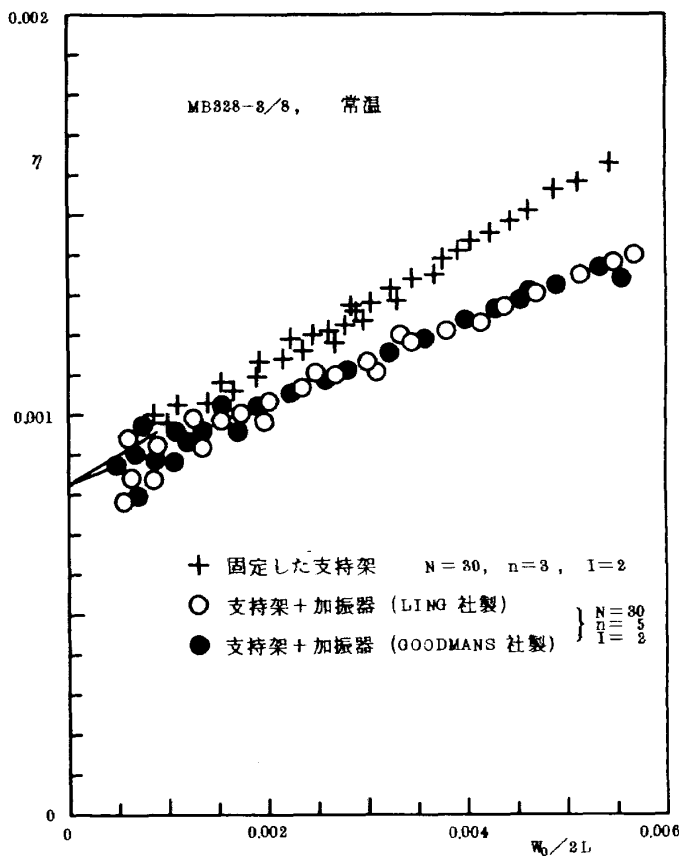


図 17 損失係数と振幅との関係、加振器の影響

Goodmans 社製加振器では、0.16, Ling 社製加振器では0.096である。又それぞれの共振振動数は1.5Hz及び17.0Hzである。このように加振器自身は非常に早く減衰し、又支持架を含めた支持部分の質量は試験片に比べてかなり大きいので、図17に示すように、振幅値が零の場合に外挿して得られる損失係数は、支持架を固定して得られる試験片の損失係数と一致している。加振器を含む系での実験では、或る程度時間が経過した後の試験片先端の変位と支持架部分の変位との差のデータを解析すれば、このように加振器自身の持つ減衰特性を無視出来ることが確認された。また図17において、 $W_0/2L$ が0.001以下の値に対しては損失係数の値にバラツキが大きくなっている。これは測定の際の種々の誤差原因によるもの⁵⁾であり、この付近のデータについては信頼性が薄い。

3.2 高温環境下での実験結果

3.2.1 MB328接着剤を用いたサンドイッチ材

損失係数と振幅との関係を、温度をパラメタとして図18に示す。これはコア高さ $\frac{3}{8}$ インチの試験片による結果の一例であり、損失係数の各点は、図に示すように、大気中で小さな振幅ではほぼ直線で近似され、その傾きは非常に

小さい。図17と同様に、 $W_0/2L$ が0.001以下では損失係数の値のバラツキが大きくなっている。この直線と η 軸との交点をそれぞれの温度でのサンドイッチ材の損失係数として、表1に示すようなそれぞれの試験片について、幾つかの温度環境下での実験を同様の方法で処理した結果を、図19～図22に示す。図19は、コア高さ $\frac{3}{8}$ インチのサンドイッチ材について、数本の試験片による実験データを整理したものである。図から分かるように、損失係数は15℃付近から80℃位までは温度による影響はなく、100℃付近から僅かずつ増大する。この傾向は温度が高くなるほど急激である。各試験片間の損失係数値のバラツキは非常に少なく、その温度による変化の様子はほぼ一本の曲線で代表することが出来る。損失係数の値は、常温で0.001, 150℃で0.004, 更に200℃では0.014～0.017である。図20に、コア高さの異なる試験片について、損失係数と温度との関係を示す。図は、試験片のコア高さを $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{3}{8}$ 、及び $\frac{1}{2}$ インチと変えた場合に、損失係数への影響が殆んどないことを示している。これは、コアがアルミニウムハニカムのように高い剪断剛性を持つ場合には、減衰率はコアの物性値に敏感でない¹¹⁾ 為である。

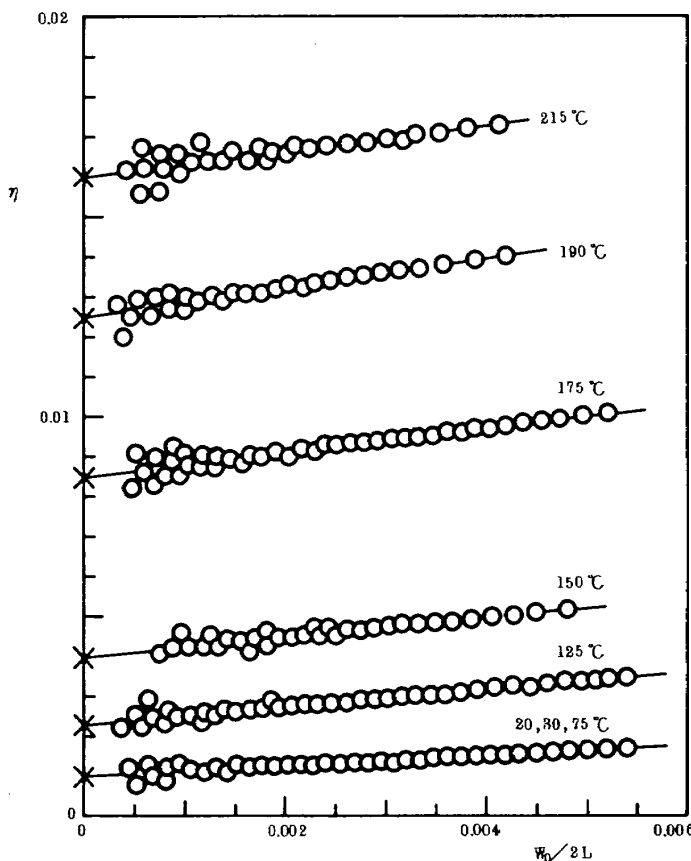


図 18 損失係数と振幅との関係, MB328-7/8の場合

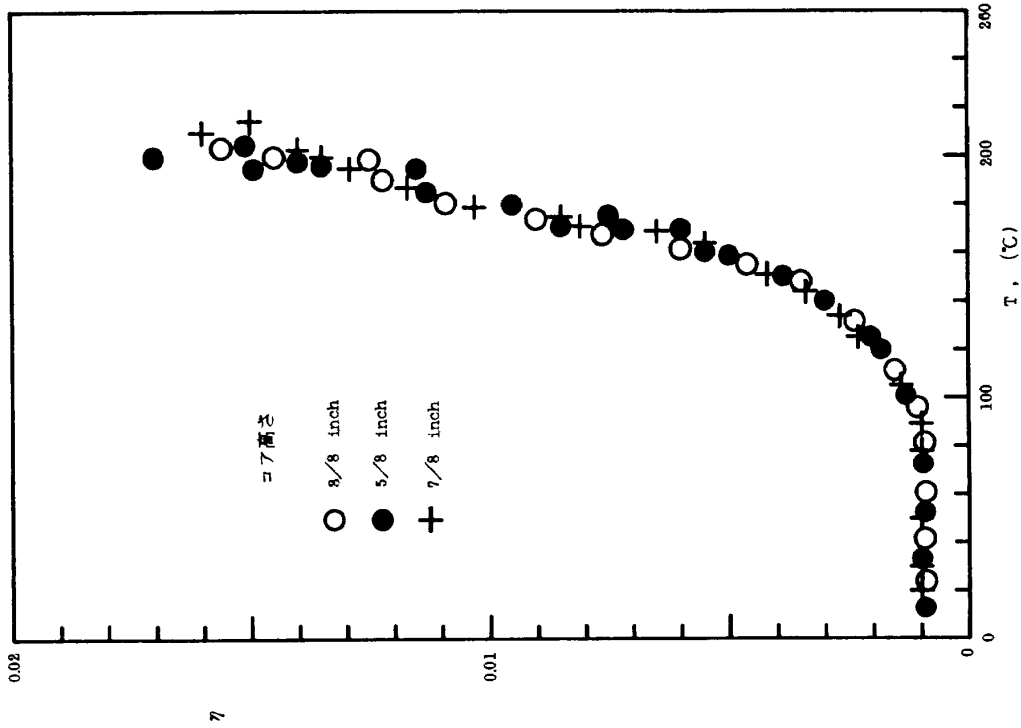


図 20 損失係数と温度との関係, MB328 の場合

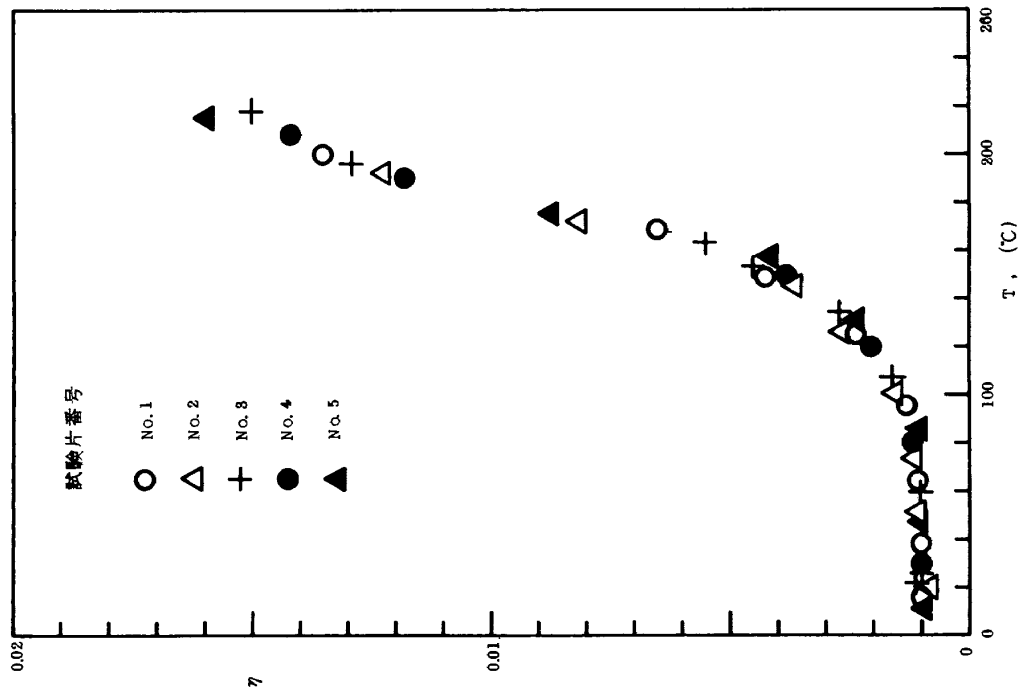


図 19 損失係数と温度との関係, MB328-7/8 の場合

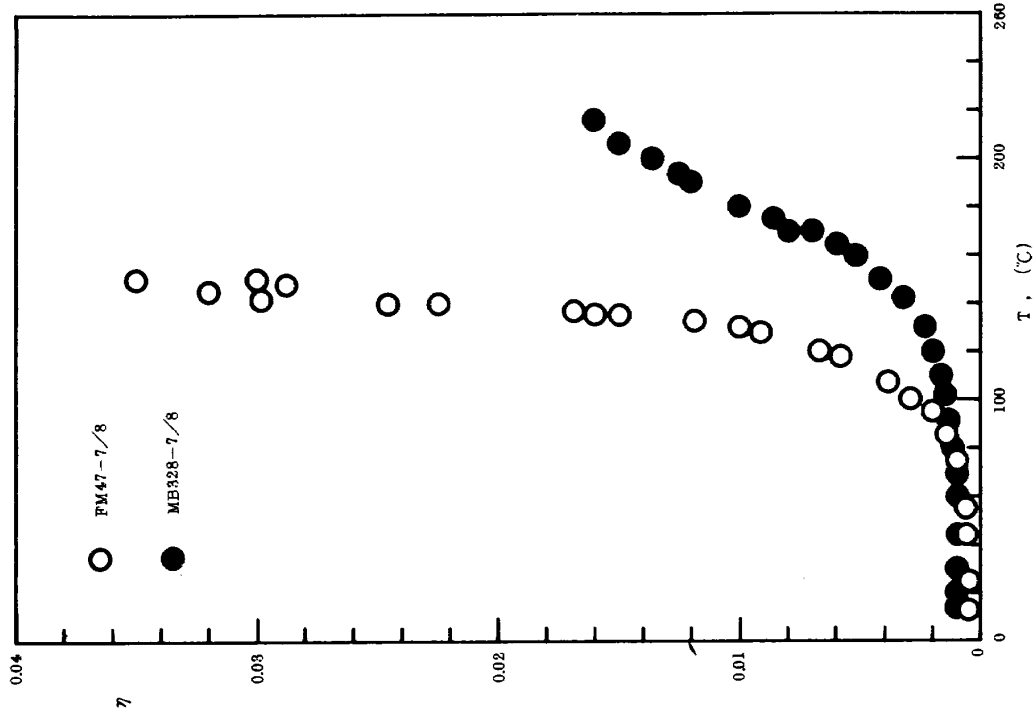


図 2.2 損失係数と温度との関係, 接着剤の影響

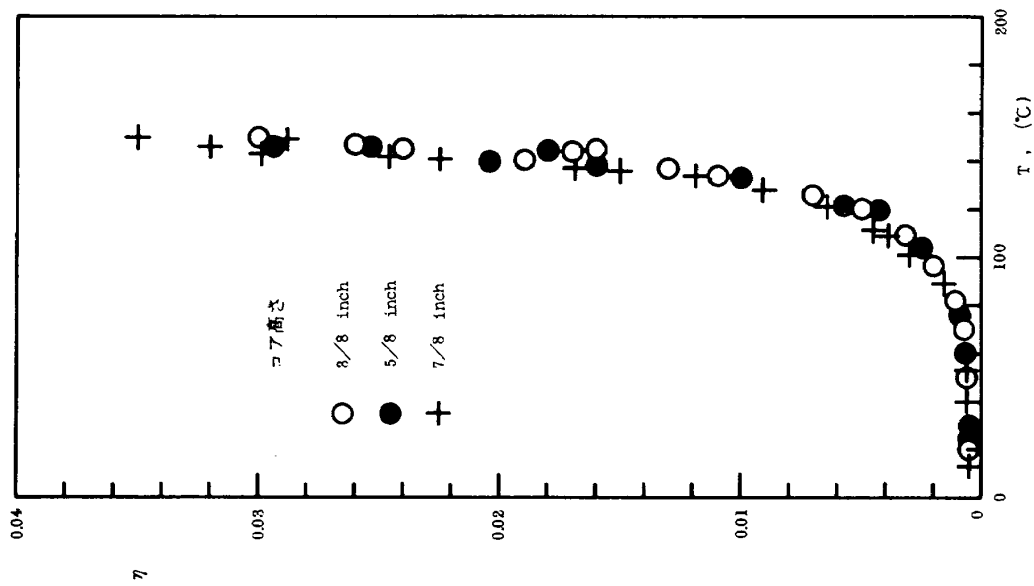


図 2.1 損失係数と温度との関係, FM47 の場合

3.2.2 FM47 接着剤を用いたサンドイッチ材

図 2 1 に、損失係数と温度との関係を示す。図から分るように、損失係数は室温状態の 15℃ から 60℃ 付近までは 0.0005 程度であり、それ以後増大傾向を示し、80℃ で 0.001、100℃ では 0.002 となり、それ以上の温度領域では非常に急激な増大傾向を示す。150℃ における損失係数の値は 0.03 以上である。又この損失係数の値は、MB328 の場合と同様にコア高さの違いに影響されないことが分る。

下における損失係数の関係は、室温状態では MB328 の 0.001 に対し FM47 では 0.0005 と小さい。しかし、FM47 は 60℃ 付近より損失係数の増大傾向が現われ、70℃ では室温状態から損失係数が変化していない MB328 と同じ 0.001 となり、これ以上の高温領域においては逆に大きくなる。更に、その増大傾向も MB328 に比べて非常に急激である。このことは、図 1 に示す接着剤自身の剪断強度と温度との関係に、また次の図 2 3 に示す曲げ一次固有振動数の低下とも対応している。

3.2.3 二種類の接着剤を用いたサンドイッチ材の損失係数の比較

図 2 2 に、MB328 及び FM47 を用いた試験片についての損失係数と温度との関係を示す。この図は、コア高さ 3/8 インチのサンドイッチ材を例として、両者の比較を示したものである。図からも明かなように、それぞれの温度環境

3.2.4 曲げ一次固有振動数

図 2 3 に曲げ一次固有振動数と温度との関係を、コア高さをパラメタにして示す。○印、△印及び□印は、それぞれコア高さ 7/8、5/8、及び 3/8 インチの試験片による曲げ一次固有振動数の実験値を示している。又、それぞれの印で白抜きで示すものが MB328 を用いたサンドイッチ材、塗り

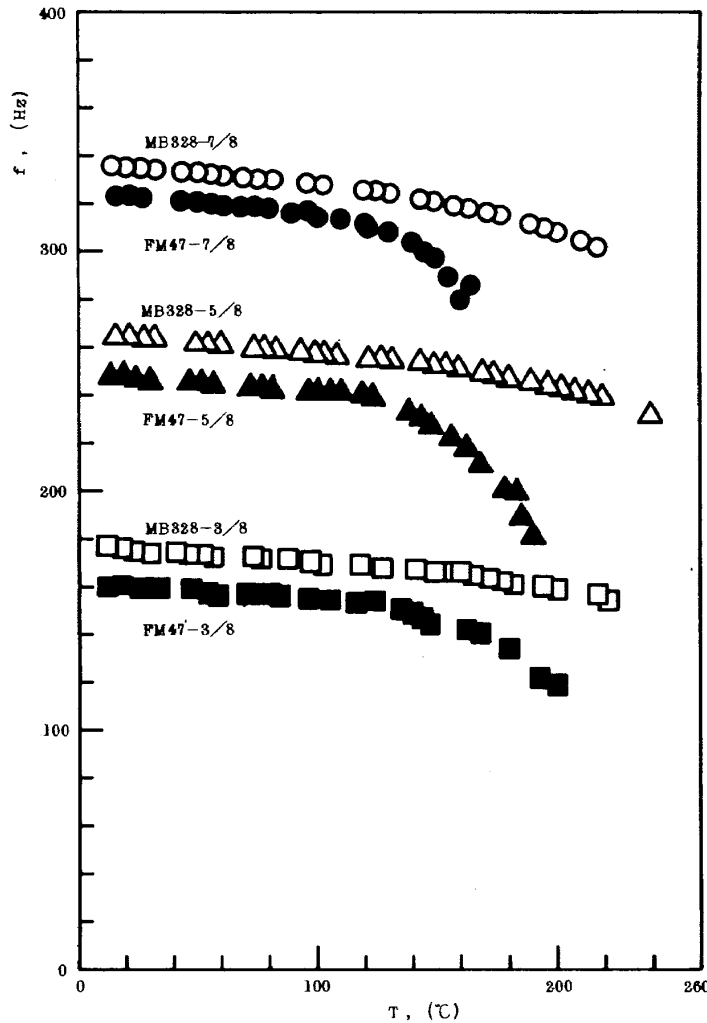


図 23 曲げ一次固有振動数と温度との関係

つぶしてあるものがFM47を用いたものである。MB328を用いた試験片については、温度上昇により100℃位まで振動数は直線的に低下し、これ以上の温度領域では低下速度が僅かずつ増加し、150℃以上での低下速度は更に増大する。FM47を用いた試験片については、80℃まで振動数は直線的に低下し、これ以上の温度領域では低下速度は増加しながら120℃以上で急激に増大する。又、これら振動数はFM47によるものの方がMB328によるものと比べて幾分低いが、それは表1に示すように、同じ呼び寸法のコア高さでもFM47を用いた試験片のコア高さが低い為である。

本研究では室温状態から順次高温状態の実験を行っているが、最高温度の実験の後に最初の室温状態まで冷却すると、一、二の例外(FM47によるサンドイッチ材を250℃程度の温度まで上昇させた場合)を除いて、試験片の固有振動数及び損失係数の両者とも元通り回復していたので、温度履歴による接着剤の変質についての問題はなかったと思われる。

4 結 論

本報告は、常温及び高温環境下で行われた精密な減衰振動実験による、アルミニウムハニカムサンドイッチ材の減衰特性に関する実験的研究について述べたものである。試験片中央部を支持架によって加振器に支持し、左右対称の曲げ一次固有振動モードでの加振状態からの減衰自由振動波形を記録することによって損失係数を求めた。温度環境としては大気中において15～240℃の範囲で、振動数としては120～335Hzの範囲の実験を行った。本研究によって以下のことが明らかになった。

- (1) 常温状態におけるアルミニウムハニカムサンドイッチ材の損失係数の値は、接着剤としてMB328を用いたものが0.001、FM47を用いたものが0.0005である。
- (2) 高温環境下での損失係数の値は、接着層にFM47を用いたサンドイッチ材では100℃以上で急激に増大し、150℃では0.03以上ともなる。MB328によるサンドイッチ材では、その増大傾向は緩かで、180℃においても0.01、200℃でも0.014～0.017である。
- (3) この実験の温度範囲におけるアルミニウムハニカムサンドイッチ材の損失係数は、接着層の減衰特性による影響が非常に大きく、表板及びコアの金属部分の減衰特性には殆んど影響されない。
- (4) 損失係数の値は、アルミニウムハニカムサンドイッチ材のコア高さに殆んど影響されない。
- (5) 支持架を加振器に支持しての実験では、試験片先端と支持部との変位の差を計測してそれから損失係数を求め

れば、加振器の減衰特性の影響を殆んど無視することが出来る。

本研究によれば、アルミニウムハニカムサンドイッチ材の高温環境下での減衰特性は、接着剤物性値の温度変化により大きな影響を受ける。このことは、コア材料が他の粘弾性材であるようなサンドイッチ材の場合、更に一般の複合材料の減衰特性評価の際にも大きな問題になると考えられる。これらについては、更に理論及び実験の両面からの研究が必要であろう。

本研究は著者の一人、峯岸の国内留学における研究の一つとして行われたものである。その際、種々御高配賜り、また本稿作成に当って御助言戴いた、高木前部長**、竹内部長*、田寺室長*、小野室長*、山根室長*に謝意を表すものである。データ処理に関して助言を戴いた外崎得雄氏*、本実験に協力された東京大学宇宙航空研究所の市田助手に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) B. J. Lazan : Damping of Materials and Members in Structural Mechanics, Pergamon (1968).
- 2) R. A. DiTaranto & W. Blasingame : Composite Damping of Vibrating Sandwich Beams, J. Engng. Ind., Trans. ASME, Series B, 89 (1967), 633.
- 3) T. F. Derby & J. E. Ruzicka : Loss Factor and Resonance Frequency of Viscoelastic Shear-Damped Structural Composites, NASA CR-1269 (1969).
- 4) T. Nicholas & R. A. Heller : Determination of the Complex Shear Modulus of Filled Elastomer from a Vibrating Sandwich Beams, Exptl. Mech., 6 (1967), 110.
- 5) 外崎得雄, 名取通弘, 砂川恵: アルミニウム合金材およびサンドイッチ材の減衰特性に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告, TR-438 (1976).
- 6) R. F. Gibson & R. Plunkett : Dynamic Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Composites : Measurement and Analysis, J, Comp. Mats., 10 (1976), 325.
- 7) 日本接着協会編: 接着ハンドブック, 日刊工業新聞社 (1971), 547.

* 機体第一部

** 航空機用ジェットエンジン研究組合

8) 名取通弘, 外崎得雄, 市田和夫, 砂川恵: 観測ロケット発射時におけるランチャ及びロケットの運動計測, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第11巻4号(B)(1976), 46.

9) 例えば, R.F.Gibson & R.Plunkett: A Forced-Vibration Technique for Measurement of Material Damping, Exptl.Mech., 17(1977), 297.

10) 梅田哲弘, 名取通弘, 砂川恵: サンドイッチ構造の動特性(第4報)高温環境下におけるサンドイッチ梁の減衰特性, 第18回構造強度に関する講演会講演集(昭51), 212.

11) C.W.Bert, D.J.Wilkins, Jr & W.C.Crisman: Damping of Sandwich Beams with Shear-Flexible Cores, J.Engng.Ind., Trans.ASME, Series B, 89(1967), 662.

航空宇宙技術研究所報告 549 号

昭和 53 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
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2-27-12

Printed in Japan