

周辺を拘束した三層積層板の振動減衰特性

遠藤 紘・淡路 政夫*

Vibration Damping Properties of Three Layered Plate at Fixed Condition around its Plate

Hiroshi ENDO and Masao AWAJI*

(2003年12月12日受理)

In this paper, vibration damping properties of constrained type which has three layered plate from steel sheet/visco -elastic material/steel sheet were studied on fixed and free conditions around the plate of test sample. The loss factor of constrained type generally has been considered to be affected theoretically and experimentally by visco -elastic properties of mid-layer and configuration of each layer. Furthermore vibration damping properties are considered to be affected also vibration mode and shape of test sample. It could obtain higher loss factor and lower compliance in comparison to fixed condition than free condition.

Therefore, it was clarified to controll by around the plate that vibrating damping effect is exserent large effect.

1. 緒言

近年、自動車、鉄道車両、産業機械から家電、情報通信機器など多くの機械において、高速化、軽量化の動向が強まっている。その結果、機械の振動、騒音が増加し、その機能の低下や制御精度が不安定になることなどから、振動の抑制をはかることは、重要な技術的課題となってきている。振動や騒音を低減する方法は既に多くの方法が提案され実用的にも用いられているが、軽量化・高速化と振動・騒音の低減は相反する場合が多く、重量の増加や本来の機能を損ねるなど実用的に解決すべき問題が多い。そこで、著しい重量の増加や本来の機能の低下をさせることなく振動を低減し騒音も抑制する方法として構造部材自身に振動減衰性能（制振性能）を付与させる技術もいろいろ開発されてきた。それらの中で拘束型制振材料の一種である「粘弾性材料をコア材料とし、表裏に等厚の薄鋼板を用い、表裏の鋼板の厚さに対してコア層の粘弾性材料層の厚さを極めて薄くした三層積層板」は制振鋼板として大きな振動減衰性能を有する材料である。このような制振鋼板を構造部材として用いることにより、重量の増加

を抑え、その機能を損ねることなく振動を低減することができると考えられる。しかし、三層積層板の振動減衰特性は、温度、周波数に依存するコア材料の粘弾性特性により変化しやすいことや、各層の材料の構成厚さによる影響を大きく受けることはすでに明らかになっている。これまでの三層積層板の振動減衰性能（損失係数）の測定は、はり状試験片を用いてその曲げ振動における損失係数を温度を変えて測定し、温度依存性や温度変化による共振周波数の変化とモード変化による共振周波数の変化から周波数の影響を求めてきた。さらに、はり状試験片の長さを変えて損失係数を測定することによりモードの影響を受けることが明らかになっている。はり状試験片によるこれらの結果から三層積層板を実際に機械構造部材に適用する場合に得られる振動低減効果や最適な利用方法は何ら明らかにされていない。

そこで、本研究では三層積層板の平板について、実用的使用条件である周辺拘束による振動特性への温度依存性、周波数依存性、モード依存性、拘束条件の影響などについて実験的に調べ、ハードディスクドライブケースなどの小型軽量の電子機器の構成部材に使用するための三層積層板の最適設計と最適な利用方法を明らかにすることを目的として行った。

* 秋田高専専攻科学生

2. 研究目的と振動減衰のメカニズム

2.1 三層積層板の振動減衰性能

粘弾性材料を剛性材（金属板など）ではさんだ三層積層板は曲げ振動の際、図1に示すような変形を繰り返す。その時に上下の板は曲げ変形をし、その際粘弾性材料は上下の板で拘束されているので上部の板の下面と下部の板の上面との間では伸びに差が生じることになる。その伸びの差によって粘弾性材料にせん断変形が生ずる。このように曲げ振動に伴う粘弾性材料のせん断変形により、振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、その結果として三層積層板に振動減衰が生じる。一般的に振動減衰特性は損失係数 η で表され、1自由度モデルにおいて損失係数 η は、1サイクルの振動エネルギーを E とし、1サイクル中に消費されるエネルギーを ΔE とすると次式で定義される。

$$\eta = \frac{\Delta E}{2\pi E}$$

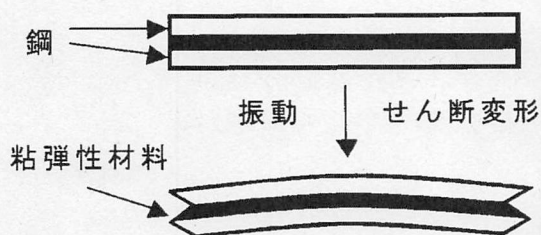


図1 三層積層板の構造と制振機構

2.2 本研究の目的

本研究の目的は、ハードディスクドライブケースに三層積層板を適用し、その振動をより低減することである。そのため三層積層板のハードディスクドライブケースと同等のサイズの三層積層板を用いて、実用的使用条件である周辺拘束による振動特性への影響について実験的に調べ、その振動低減に最適な条件を明らかにすることを目的とした。

三層積層板について、これまでは「はり状試験片」を用いてその損失係数をできるだけ大きくすることを最大の課題としてきたが、本研究では、ハードディスクドライブケースの振動低減をはかることが課題であり、損失係数を高くする条件を見出すとともに、振動の変位（振幅）を小さくすることが必要であると考えた。そのために、伝達関数のコンプライアンスの周波数応答曲線すなわち加振力 (F) に対する変位 (X) の X/F の周波数応答曲線の共振ピークレ

ベル（振動レベル）を調べ、損失係数と振動レベルの関連を明らかにし、最適な三層積層板の設計と使用条件を見出すことを目的とした。

3 研究方法

3.1 実験に用いたサンプル

実験に用いた試験片は、ステンレス鋼板を表裏の材料とし、ともに厚さ0.5mm、中間層の粘弾性材料は厚さ0.04mmのものを使用した。制振鋼板の損失係数の測定法としては、JIS (GO602) の「制振鋼板の振動減衰特性試験方法」に提示されているが、そこでは試験片の幅は10~25mm、長さは250mmの「はり状」を推奨している。しかし、本研究はハードディスクケースなどの小型電子機器への適用を目標とするものであるため、図2のように長さ150mm、幅100mmの平板の試験片を用いた。また試験片の拘束・支持条件の影響を明らかにするため試験片の周辺をアルミ製L型アングル材で図3のように拘束したものと周辺自由支持の場合と比較検討した。

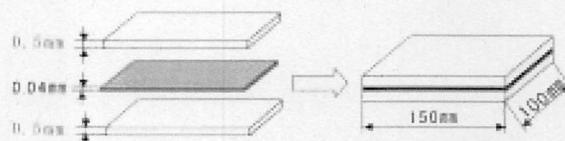


図2 試験片（三層積層板）

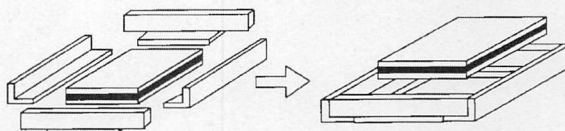


図3 試験片周辺拘束図

表1 試験片仕様

<ul style="list-style-type: none"> 試験片寸法形状 <ul style="list-style-type: none"> 幅：100mm 長さ：150mm 粘弾性材料 <ul style="list-style-type: none"> 材質：ブチルゴム系粘弾性物質 厚さ：0.04mm 上面及び下面の板 <ul style="list-style-type: none"> 材質：ステンレス鋼板 厚さ：0.5mm 周辺拘束材 <ul style="list-style-type: none"> 材質：アルミ製L型アングル材 厚さ：1mm

3.2 実験装置について

制振特性の測定に用いた実験装置の構成を図4に示す。損失係数の測定は、試験片の中央部をインピーダンスヘッドに固定し、インピーダンスヘッドを介して加振器で加振する中央支持-中央加振法を用いた。このときの加振力 F と加速度 A から FFT アナライザによって伝達関数 A/F の周波数応答を求め、さらにその実数部（リアルパート）から損失係数 η を求めた。さらに FFT アナライザによって伝達関数 A/F を積分しコンプライアンスを求めた。また損失係数の温度依存性との関係を明らかにする必要があるので試験片を恒温層に入れ、温度を -10°C から 50°C まで変化させて損失係数 η を測定した。

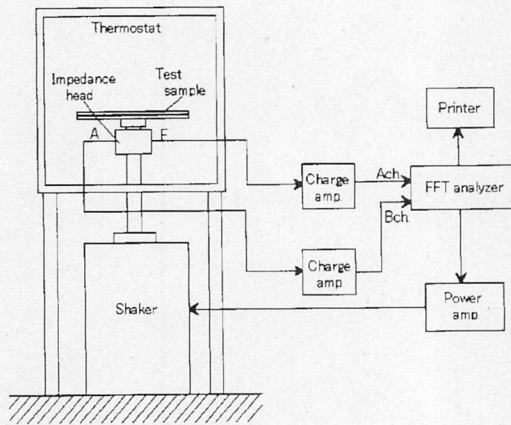


図4 実験装置

3.3 測定方法

損失係数 η の算出方法としては、定常加振法によって得られた加振力 F とその応答加速度 A から FFT アナライザによって伝達関数 A/F の周波数応答とその実数部（リアルパート）を求め、この実数部から求めた。FFT アナライザによって得られた伝達関数の周波数応答では複数の共振点が現れ、両端自由支持における共振曲線の周波数が FEMLAB の結果に近い値を低い順に 1 次モード、2 次モード、3 次モードとした。（この場合反共振モードは無視した）また、これらの伝達関数の実数部は、共振周波数近傍に二つの極値が現れ、この極値をそれぞれ f_a 、 f_b とし、(3.1) 式より損失係数を算出した。

$$\eta = \frac{\Delta E}{2\pi E} = \frac{f_a^2 - f_b^2}{f_a^2 + f_b^2} \quad \dots (3.1)$$

3.4 振動モードについて

これまで三層積層板のはり状試験片の研究でその損失係数は振動モードの影響を受けることが明らかにされてきた。そこで本研究では平板状の試験片ではモードの影響がどのように及ぼすのか明らかにするため周辺拘束、非拘束の場合の振動モードを FEMLAB を用いて計算で求めた。また、本実験では中央支持-中央加振法を用いたので中央部が共振しているモードを周波数の低い順から 1 次、2 次、3 次モードとした。図5は周辺非拘束の各モード形状、図6は周辺拘束の各モード形状である。

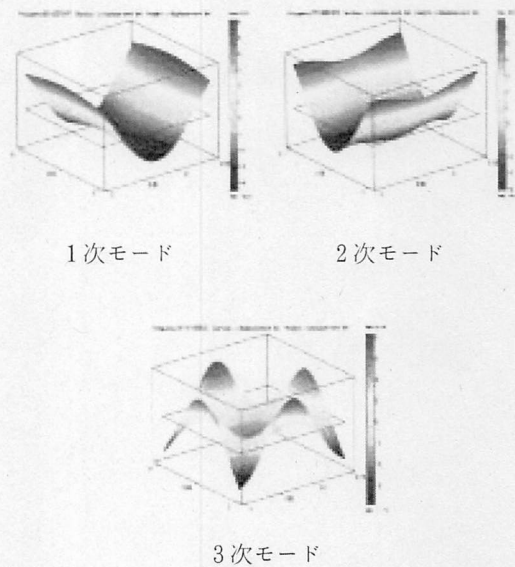


図5 非拘束におけるモード形状

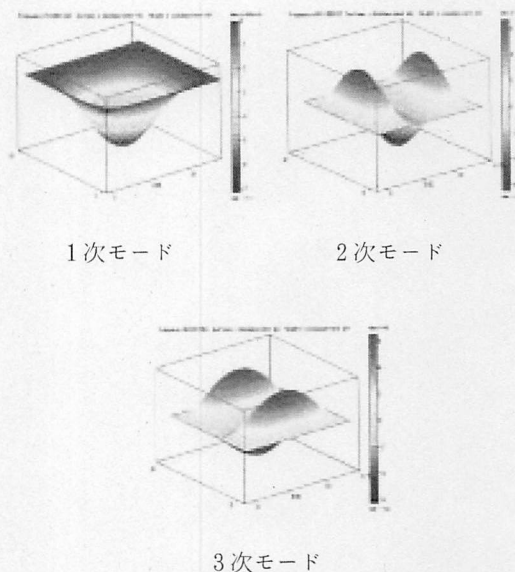


図6 周辺拘束におけるモード形状

4 研究結果

4.1 モード次数と周辺拘束による影響

粘弾性材料を用いている三層積層板の損失係数は温度で大きく変化することはよく知られているが、その他モード次数や拘束条件によっても変化することが予想される。そこで本節では、周辺の拘束条件を変えることにより同一の共振モードで周波数の異なる条件で損失係数を測定し、モード次数、周辺拘束の影響について検討する。図7, 8はそれぞれ周辺非拘束、拘束のもとで、モード次数の影響を明らかにするためにモード次数別に損失係数と温度の関係を示した図である。これらの図から明らかなように拘束条件にかかわらず、1次モードが最も低く2次、3次モードが高い損失係数を示している。また2次、3次モードはほぼ同一のレベルを示していることがわかる。さらに、両者とも20℃から50℃で損失係数が大きくなり、30℃近傍でピークとなることがわかる。図9, 10, 11は拘束条件を変え、モード次数別に損失係数と温度との関係を示したものであ

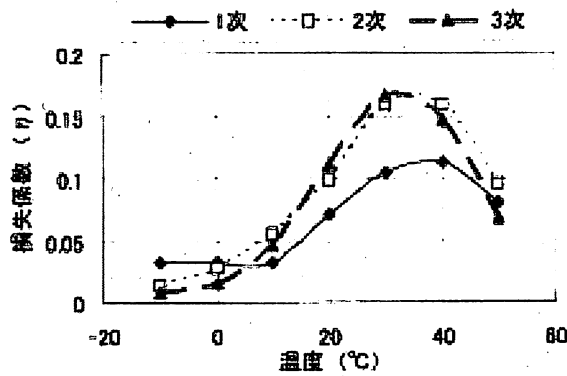


図7 損失係数と温度の関係 (非拘束)

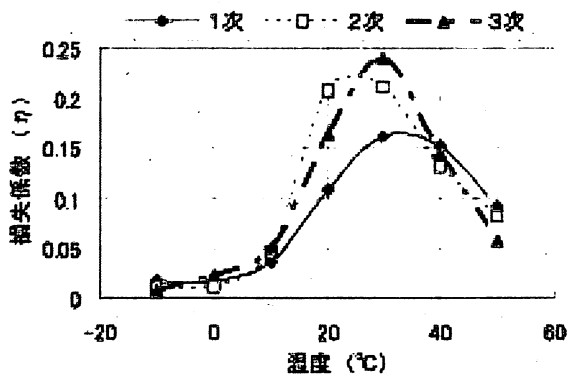


図8 損失係数と温度の関係 (拘束)

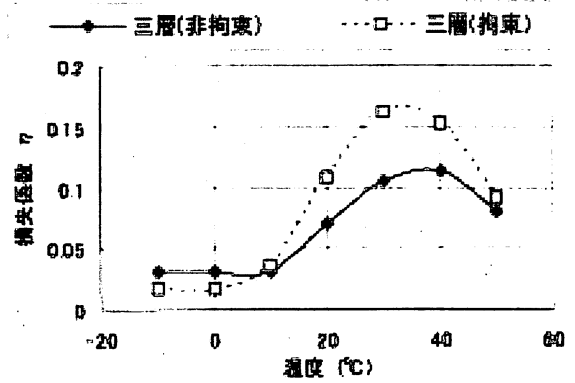


図9 損失係数と温度の関係 (1次)

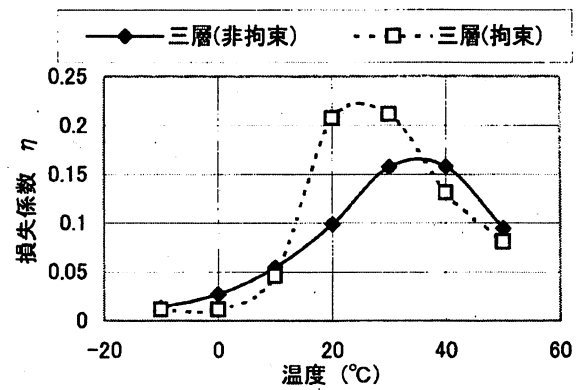


図10 損失係数と温度の関係 (2次)

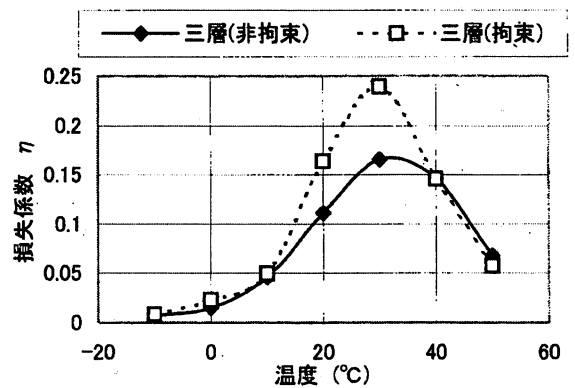


図11 損失係数と温度の関係 (3次)

る。これらの図より、周辺を拘束した方が損失係数のピーク近傍においていずれのモードでも損失係数が高くなっていることがわかる。

4.2 損失係数と相対曲げ剛性の温度変化

粘弾性材料を用いている三層積層板は損失係数だけでなく曲げ剛性も温度で大きく変化することは知

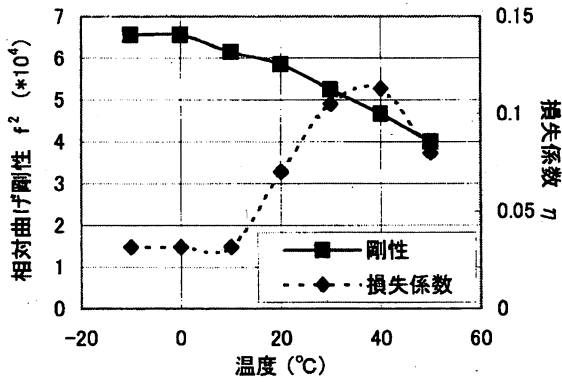


図12 剛性と損失係数の温度変化 (非拘束, 1次)

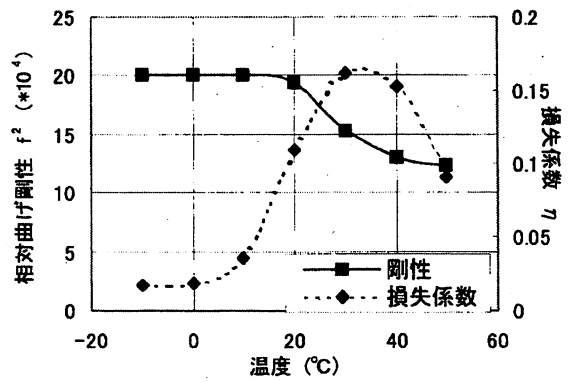


図15 剛性と損失係数の温度変化 (拘束, 1次)

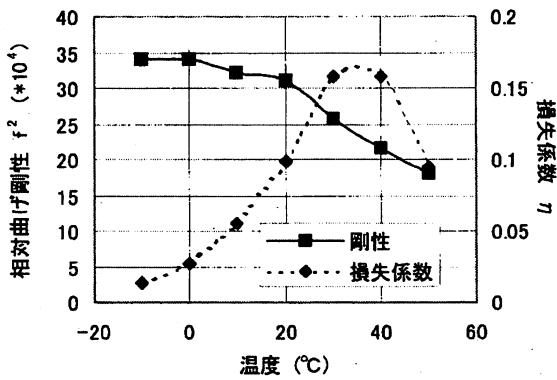


図13 剛性と損失係数の温度変化 (非拘束, 2次)

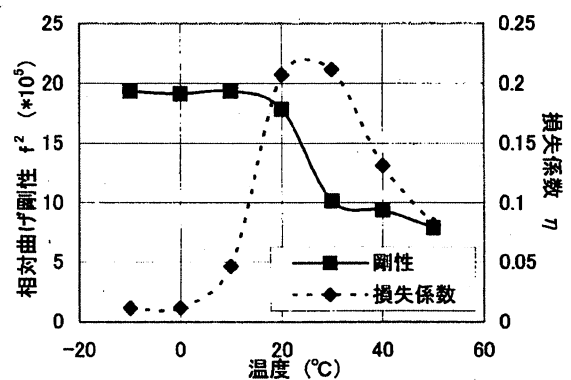


図16 剛性と損失係数の温度変化 (拘束, 2次)

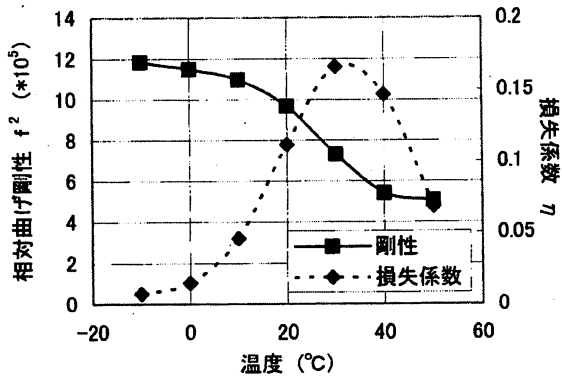


図14 剛性と損失係数の温度変化 (非拘束, 3次)

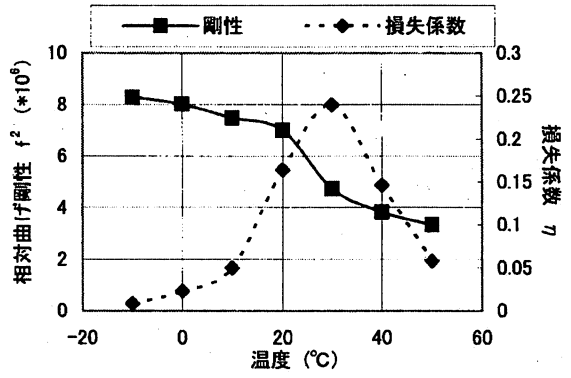


図17 剛性と損失係数の温度変化 (拘束, 3次)

られている。振動特性を明らかにするためには曲げ剛性の影響を明確にすることが必要であり、相対曲げ剛性の温度依存性を測定した結果について検討し、さらに損失係数との関係を比較検討する。ここで、ヤング率をE、断面二次モーメントをI、固有振動数を f_n とすると曲げ剛性はEIで表すことができ、曲げ剛性は $EI \propto f_n^2$ で表すことが出来る。そこで f_n^2 を相対曲げ剛性とし検討することにする。

図12, 13, 14は周辺非拘束、図15, 16, 17は周辺拘束における相対曲げ剛性と損失係数の温度変化を測定した結果でそれぞれ1次, 2次, 3次モードを示す。これらの図より、周辺拘束、非拘束のどのモードにおいても同様の傾向を示していることがわかる。また損失係数が30°C近傍でピークとなっているのに対して、曲げ剛性は低温時で最も高い値となり温度が上昇するとともに低下し、特に損失係数のピーク

周辺を拘束した三層積層板の振動減衰特性

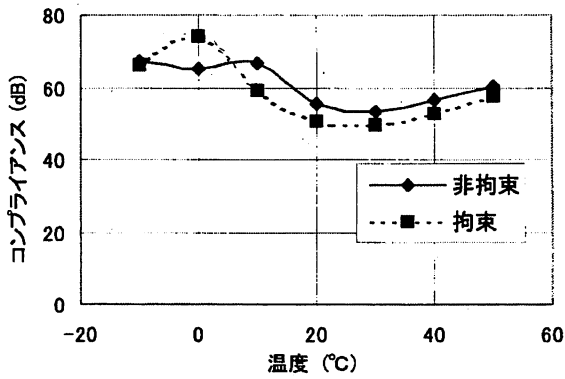


図18 コンプライアンスと温度の関係 (1次)

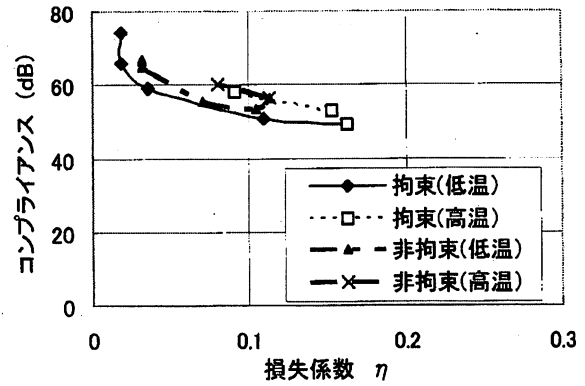


図21 損失係数とコンプライアンスの関係 (1次)

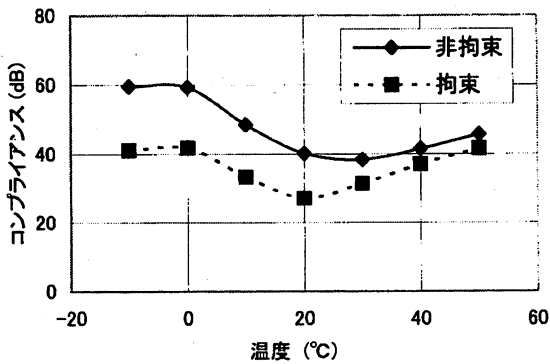


図19 コンプライアンスと温度の関係 (2次)

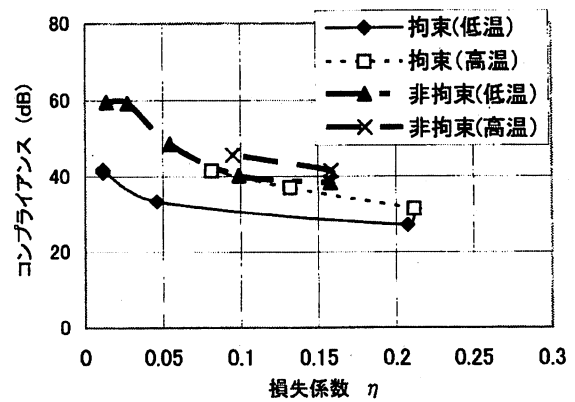


図22 損失係数とコンプライアンスの関係 (2次)

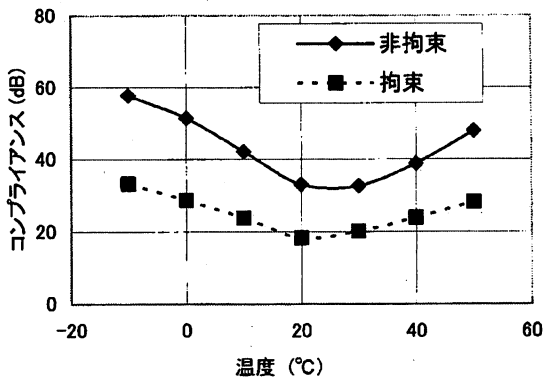


図20 コンプライアンスと温度の関係 (3次)

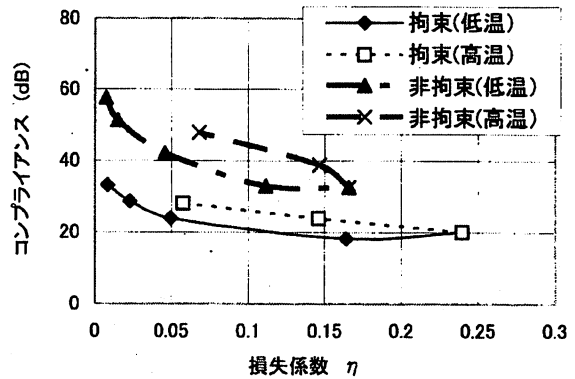


図23 損失係数とコンプライアンスの関係 (3次)

近傍で相対曲げ剛性が急激に低下していることがわかる。

4.3 コンプライアンスと拘束条件の影響

三層積層板の振動低減を考えるうえで損失係数を高めるだけでなく三層積層板の変位(振幅)つまりコンプライアンスを低減させることも必要だと考えた。そこで、本節ではコンプライアンスがどのよう

な変化をするか明確にすることを目的に、コンプライアンスの周辺拘束の影響について、モード別に温度を変えて測定した結果をもとに検討する。

図18, 19, 20は周辺非拘束及び拘束におけるコンプライアンスと温度の関係測定した結果でそれぞれ1次, 2次, 3次モードを示す。図18, 19, 20より20~40°C付近で拘束, 非拘束に関わらずコンプライアンスの値が低下し, 20°C近傍で最小値を示してい

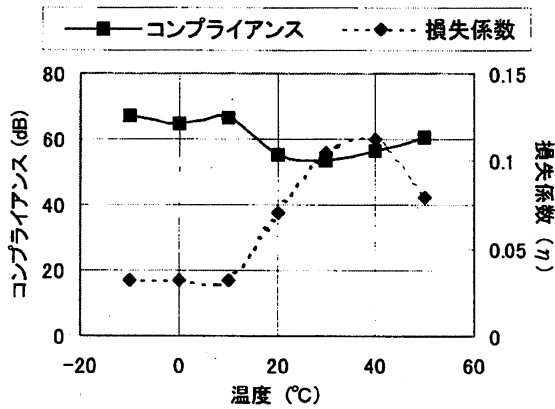


図24 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(非拘束, 1次)

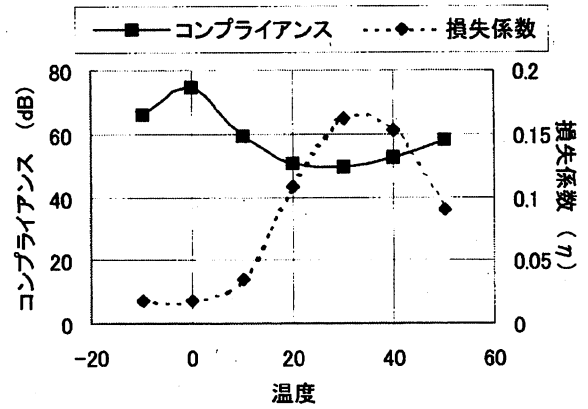


図27 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(拘束, 1次)

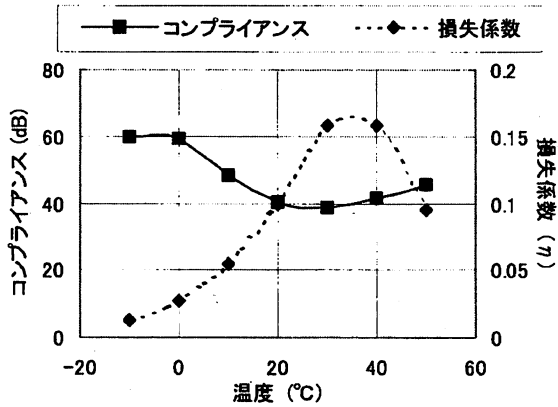


図25 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(非拘束, 2次)

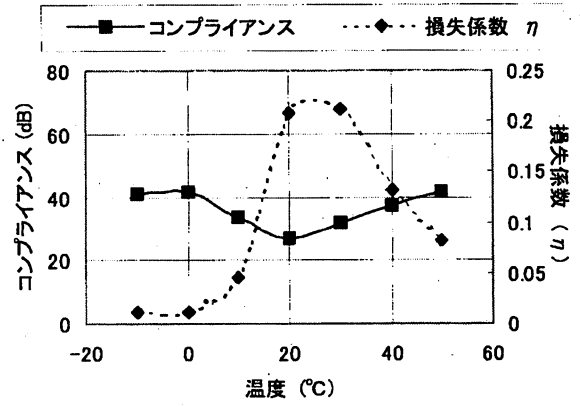


図28 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(拘束, 2次)

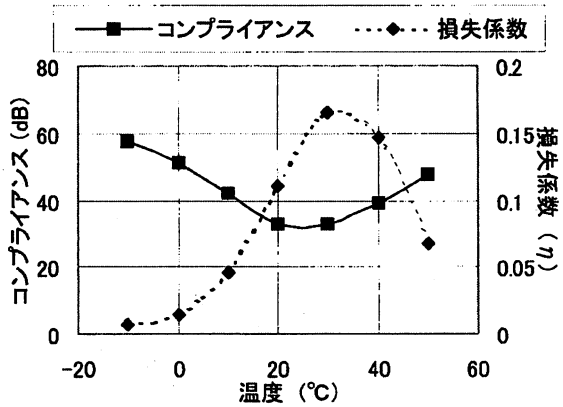


図26 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(非拘束, 3次)

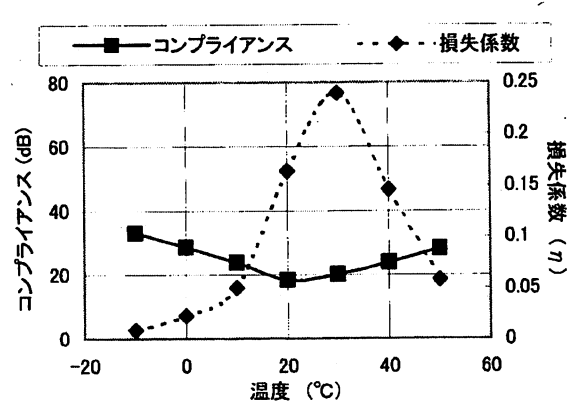


図29 コンプライアンスと損失係数の温度変化
(拘束, 3次)

る。また、拘束したほうがどのモード次数でも各温度でコンプライアンスの値が小さくなるのがわかる。また、次数が上がるにつれコンプライアンスの値が低下しているのがわかる。これは拘束による曲げ剛性の変化によるものと推定される。三層積層

板の損失係数の値は20 $^{\circ}\text{C}$ ではピークにならないのに対して、コンプライアンスの値は最小になっている。これは三層積層板は低温の方が剛性が高いためではないかと考えられる。

4.4 損失係数とコンプライアンスの関係

粘弾性材料を用いた三層積層板は損失係数、コンプライアンス共に温度によって大きく変化する。そこで、損失係数とコンプライアンスの間にどのような関係があるかを明確にすることが振動低減を考えるうえで最も重要な事項と考え、検討する。

図21, 22, 23は周辺非拘束, 拘束の場合のコンプライアンスと損失係数の関係でそれぞれ1次, 2次, 3次モードを示す。また、損失係数の性質をわかりやすくするため損失係数のピーク温度を境に低温側, 高温側と分けて示す。

これらの図より、拘束条件、モード次数に関わらず、損失係数の増加とともにコンプライアンスは低下し損失係数のピーク値でコンプライアンスは最小となる。損失係数のピーク温度からさらに温度を上昇させると損失係数は低下していきコンプライアンスは上昇していくのがわかる。この曲線を見てみると、同一の損失係数に対して二つのコンプライアンスを持ち、低温側つまり剛性の高い方がコンプライアンスが低くなっていることがわかる。

1次モードはさほど拘束条件による影響は無いように見えるが2次, 3次と次数が上がるにつれ拘束と非拘束の差が大きくなっていることがわかる。

図24, 25, 26は周辺非拘束におけるコンプライアンス, 損失係数の温度変化を測定した結果でそれぞれ1次, 2次, 3次モードを示す。図27, 28, 29は周辺拘束におけるコンプライアンスと損失係数の温度変化を測定した結果でそれぞれ1次, 2次, 3次モードを示す。拘束条件に関係なく1次, 2次, 3次と次数があがるにつれコンプライアンスの値が小さくなるのがわかる。損失係数とコンプライアンスの曲線の形状が逆転されているように見える。2次, 3次モードではコンプライアンスのピークが20°C付近にきている。損失係数のピークは30°C付近なのでここで10°Cのずれが生じていることがわかる。これは研究結果4.2, 4.4で述べたように損失係数と剛性の関係によるものだと考えられる。

5. 考察

これまで制振鋼板の特性はほとんど損失係数によって議論されてきた。しかし本研究では、損失係数だけでなくコンプライアンスとともに温度、振動モード、周辺拘束による影響を調査し、小型製品への適用の最適化をはかることにした。本実験の結果から、三層積層板の周辺拘束したのも従来の非拘束の三層積層板同様大きな損失係数が得られることが明らか

かになった。はじめ周辺を拘束することは三層積層板のせん断変形を妨げ損失係数の低下につながってしまうと考えたが、むしろ周辺拘束の方が非拘束より高い損失係数を得ることが出来た。これは周辺をビスで固定する程度では三層積層板のせん断変形を妨げる程ではないと考えられる。また拘束と非拘束とではモード形状が全く異なり、拘束したモードは三次元的に変化し、より多くのせん断変形を起こしたのではないかと考えられる。コンプライアンスや相対曲げ剛性なども三層積層板の場合拘束条件に関係なく同様な傾向を示し、さらに拘束した方が非拘束の場合より損失係数は高く、コンプライアンスは低い値となることが明らかになった。三層積層板の損失係数のピーク温度は30°C近傍なのに対しコンプライアンスの最小値は20°C近傍となっている。ここで損失係数のピークよりコンプライアンスの最小値が10°C程低温側に以降しているのは、損失係数は30°C近傍でピークになるのに対し相対曲げ剛性は低温側の方が高く、この両者のバランスよりコンプライアンスの最小値が20°C近傍に現れているのだと推定される。

また同一の損失係数でピーク温度を境に低温側と高温側の二つのコンプライアンスが存在することが明らかになり、低温側の方が小さいコンプライアンスをとることがわかった。これは先ほど述べたように低温側の方が相対曲げ剛性が高いためだと推定される。

周辺を拘束することは機械構造部材の重量の著しい増加を抑えて効果的に制振処理が可能でそれによって振動を効率よく抑制することができると考えられる。

6. 結論

粘弾性材料を中間層とする三層積層板を小型軽量の電子機器の構成部材に使用するため、振動減衰特性について、周辺拘束の影響を温度、周波数、振動モードなどの観点から実験的に研究した。その結果、次のような結論が得られた。

1. 損失係数は、板においても周辺の拘束条件によらず1次モードでは高次モードに比べ小さい。また、コンプライアンスは損失係数とは逆の傾向を示す。
2. 周辺を拘束した場合、せん断変形（ずり変形）を妨げ、高い損失係数が得られないのではないかと考えていたが、むしろ周辺を拘束した方が剛性および損失係数が高く、コンプライアンス

は低くなり、振動低減効果が大きくなることが判明した。

3. 同じ損失係数でもピーク温度を境に二つのコンプライアンスを持ち、低温側つまり高剛性側の方がコンプライアンスが低い。
4. 振動の低減を考える場合損失係数だけでなく曲げ剛性とのバランスを考える必要があるといえる。

参考文献

1. 日本規格協会発行 JIS G 0602 (1993)
2. 出羽宏視 日本接着学会誌 vol.29 No.1 (1993)
3. 遠藤 紘 鉄と鋼 Vol.81 (1995), No.6 p679
4. 石川, 加川 モーダル解析入門 オーム社 (1989) p32
5. 田口, 遠藤 東北支部米沢地方講演会講演論文集, 日本機械学会 (1999)
6. 打川, 遠藤 東北支部岩手地方講演会講演論文集, 日本機械学会 (2001)
7. 佐々木, 遠藤 東北支部岩手地方講演会講演論文集, 日本機械学会 (2001)
8. 成田, 遠藤 東北支部八戸地方講演会講演論文集, 日本機械学会 (2002)
9. 淡路, 遠藤 東北支部第39期秋季講演会講演論文集, 日本機械学会 (2003)