

# 三層積層アルミ板における振動減衰特性

遠藤 紘・打川 淳\*

## Vibration Damping Properties of Three Layered Beam from Aluminum/Viscoelastic Material/Aluminum

Hiroshi ENDO and Jun UCHIKAWA\*

(2001年11月30日受理)

The characteristics of vibration damping aluminum sheet, which has three layered structure of aluminum/viscoelastic material/aluminum were examined. They were affected theoretically by material conditions, such as properties of viscoelastic material and configuration of each layer, and also by mechanical vibration conditions. Aluminum is light weight material and light rigidity. but the results give a guide for the best suitability for a loss factor.

### 1. 緒言

近年、自動車、鉄道車両、産業機械から家電、情報通信機器などにいたるまで、多くの機械で高速化、軽量化が重要な課題となってきた。それらに伴って機械の振動、騒音の増加が問題となっている。さらに、振動、騒音を抑制することは、環境問題としてだけでなく機器の性能向上や信頼性を高めるために避けて通れない問題である。振動や騒音を低減するための技術や材料として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、これらの方法の多くは機器の重量の著しい増加や機器本来の機能を損ねるなど実用的に解決すべき多くの問題がある。そこで振動、騒音を抑制する方法の一つとして、構造部材に振動減衰性能（制振性能）を付与させる制振技術や制振材料の研究が盛んになされるようになった。それらの中で2枚の鋼板の間に粘弾性物質を挟んだ三層積層鋼板は、曲げ振動に対して大きな振動減衰性能（損失係数）が得られることから、制振鋼板として実用的に用いられている。しかし、三層積層鋼板の損失係数は、材料の構成条件、各層の材料特性値、温度、周波数、さらに振動モードや波長によって大きく変化するとされている。

また、制振材料の研究においては、振動減衰性能が高いことは当然ながら、強度、剛性などの機械構造材料としての基本的に必要な特性を兼ね備え、し

かも重量の増加を極力おさえた材料を開発することが求められている。

アルミニウムは密度が小さく軽量化の観点からは適する材料であるが、ヤング率も鋼材に比べ小さく、曲げ剛性が低いため振動しやすいと考えられている。そこで、本研究ではアルミ板を用いた三層積層アルミ板の振動減衰特性について研究し、三層積層鋼板の場合とその効果を比較検討し、三層積層アルミ板に対する最適な制振処理条件やその有効性および最適な使用条件を明らかにすることを目的とした。

三層積層板の振動減衰特性は、上述のごとく多くの因子の影響を受けることは表裏の剛性材が鋼板の場合には明らかになってきているが、アルミニウムについてはほとんど研究されていない。また、三層積層板の理論的解析研究も多くなされているが、支配因子が多様であるので容易にその振動減衰特性を類推できないのが現状である。そこで本研究では材料の構成条件、温度、周波数、振動モード、波長など種々の観点から実験的に三層積層アルミ板の振動減衰特性を明らかにすることを目的とした。

### 2. 振動減衰のメカニズムと損失係数

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に Fig. 1 に示すような変形を繰り返すことになる。その時に上下の板は曲げ変形をし、その際粘弾性材料は基板と拘束板に上下

\* 秋田高専専攻科学生

の面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り、その伸びの差が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（ずり変形）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、振動減衰材料としての性能を発揮することになる。一般的に振動減衰特性は損失係数  $\eta$  で表され、1自由度モデルにおいて、 $\eta$  は  $\eta = \Delta E / 2\pi E$  で定義される。（ $\Delta E$  は1サイクル中に消費されるエネルギー、 $E$  は1サイクルの振動エネルギー）

損失係数  $\eta$  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、この実数部から損失係数を求めた。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、周波数が低い順に1次モード、2次モード、3次モードとした。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、2.1式より損失係数を算出した。損失係数とは振動エネルギーが熱エネルギーに変換されたかを表す尺度であり、これが大きいほど振動減衰をしていることになる。

$$\eta = \frac{\Delta E}{2\pi E} = \frac{f_a^2 - f_b^2}{f_a^2 + f_b^2} \dots (2.1式)$$

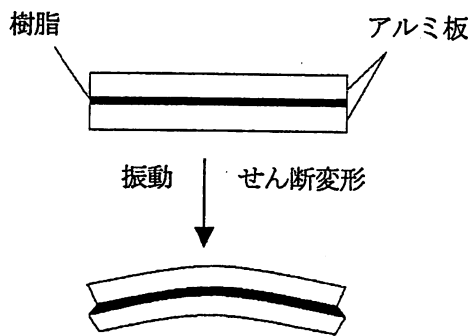


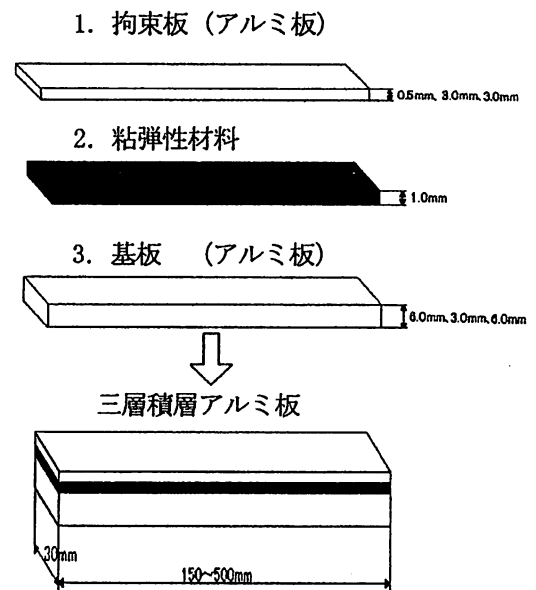
Fig. 1 拘束型制振材料の構造と制振機構

### 3. 研究方法

本実験に用いた試験片は、Fig. 2 に示す構成のはり状の3層積層板を用い、比較材として基板拘束板とも鋼板の3層積層板も用意した。損失係数の周波数依存性およびモード次数依存性、波長の影響を明らかにするため、試験片長さを150 mm から50 mm

間隔で500 mm まで変化させた。中間層の粘弾性材料は常温近傍で損失係数が最大となるブチルゴム系の粘弾性材料を用いた。

制振特性の測定に用いた実験装置の構成を Fig. 3 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によって伝達関数  $A/F$  の周波数応答を求め、さらにそのリアルパートから損失係数  $\eta$  を求めた。また損失係数の温度依存性を調べるために試験片を恒温層に入れ、温度を  $-20^{\circ}\text{C}$  から  $80^{\circ}\text{C}$  まで変化させて損失係数  $\eta$  を測定した。



#### 試験片仕様

|          |                     |                     |
|----------|---------------------|---------------------|
| 幅        | 30mm                |                     |
| 長さ       | 150~500mm (50mm 間隔) |                     |
| 1. 拘束板   | 材質: Al              | 厚さ: 0.5, 3.0, 3.0mm |
|          | 材質: SS400           | 厚さ: 0.4mm           |
| 2. 粘弾性材料 | 材質: ブチルゴム系粘弾性物質     |                     |
|          | 厚さ: 1.0mm           |                     |
| 3. 基板    | 材質: Al              | 厚さ: 6.0, 3.0, 6.0mm |
|          | 材質: SS400           | 厚さ: 5.7mm           |

Fig. 2 試験片の構造

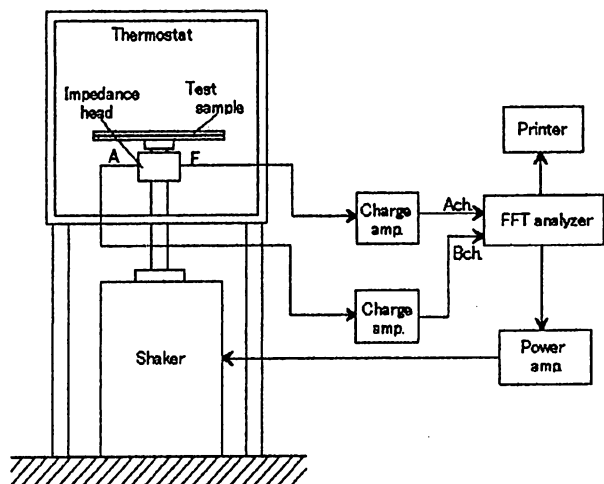


Fig. 3 実験装置

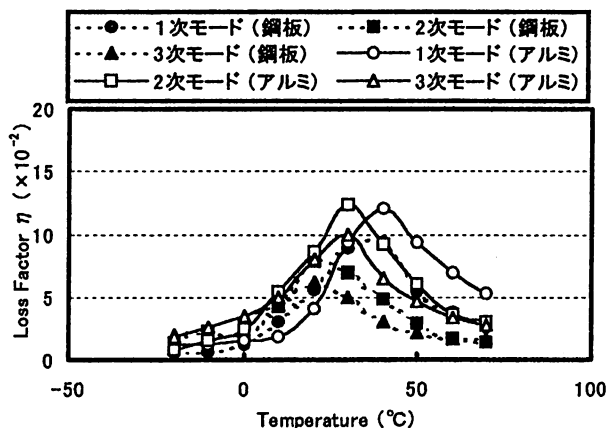


Fig. 4 損失係数と温度の関係 (200 mm)

#### 4. 研究結果

##### 4. 1 損失係数の温度依存性

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、温度依存性を明確にすることは最も基本的事項であり本節では測定した損失係数の温度依存性について検討する。

Fig. 4. 5は基板厚さ6mmのアルミ板に拘束板0.5mmのアルミ板を貼り付けた三層積層アルミ板と、基板厚さ5.7mmの鋼板に拘束板0.4mmの鋼板を貼り付けた三層積層鋼板で試験片長さ200mmと500mmについて測定した損失係数と温度の関係を示したものである。同様にFig. 6. 7は基板厚さ3mmのアルミ板に拘束板3mmのアルミ板を貼り付けた三層積層アルミ板の試験片長さ200mmと500mmについて測定した損失係数と温度の関係を示したものである。

これらの図においては、モード次数ごとの損失係数の温度依存性を示し、周波数の影響はここでは無視している。

Fig. 4の試験片200mmのアルミ板は1次モードでは40°Cでピーク温度となるのに対し、2, 3次モードでは30°Cでピーク温度となっている。鋼板の場合は1次モードでは35°C、2, 3次モードでは20°Cでピーク温度となっており、アルミ板、鋼板とも高次モードほどピーク温度が低くなっている。さらにアルミ板と鋼板とでは5~10°C程ピーク温度にずれが生じている。これは板材材料のヤング率、弾性

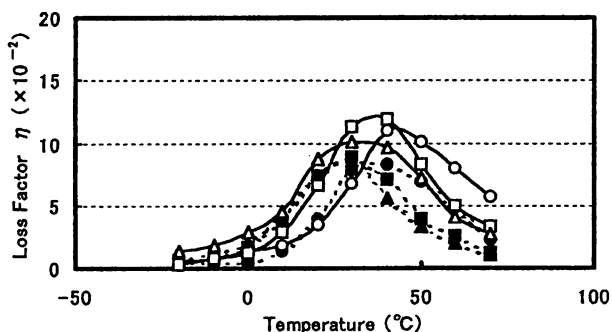


Fig. 5 損失係数と温度の関係 (500 mm)

や粘弾性材料の特性による違いよるものと考えられる。また、アルミ板、鋼板ともにモードによる依存性が見ることができる。

Fig. 5の試験片500mmのアルミ板は1次モードでは45°Cでピーク温度となるのに対し、2, 3次モードでは35°Cでピーク温度となっている。鋼板の場合は1次モードでは40°C、2, 3次モードでは30°Cでピーク温度となっており、アルミ板、鋼板とも高次モードほどピーク温度が低くなっている。また、試験片200mmと同様にアルミ板と鋼板とでは5°C程ピーク温度にずれが生じている。しかし鋼板の場合、試験片の長さで異なった挙動を示し1次モードではピーク値がほとんど変化しないが、2, 3次モードは試験片が長くなるにつれてピーク値が高くなりモード依存性が見られなくなっているのに対し、アルミ板では試験片が短くても長くても各モードによってそれほど大きな変化はなくモード依存性が見られない。

Fig. 6. 7のアルミ板3-3mmの場合は2, 3次モードでは30°Cで損失係数がピーク温度となり、1次モードでは40°Cがピーク温度となっている。鋼板

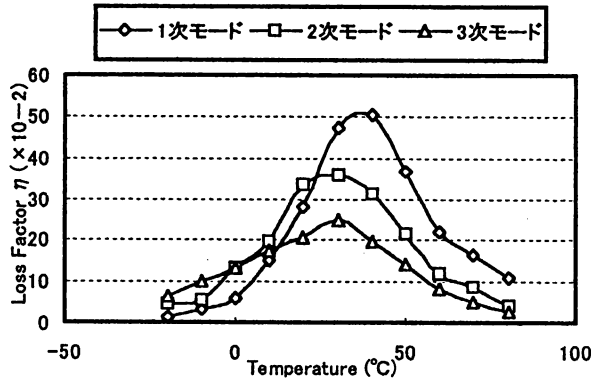


Fig. 6 損失係数と温度の関係 (200 mm)

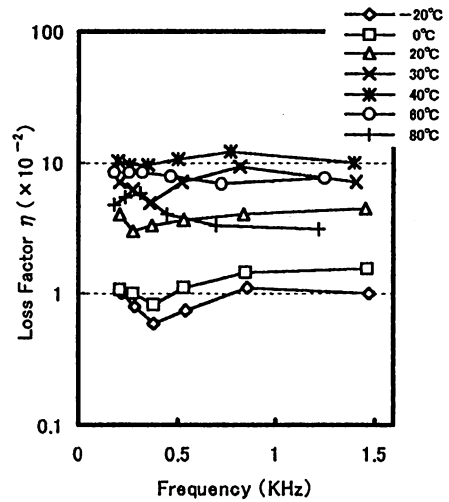


Fig. 8 損失係数と周波数の関係 (1次モード)

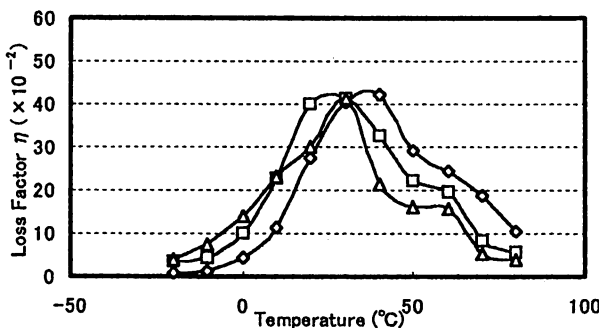


Fig. 7 損失係数と温度の関係 (500 mm)

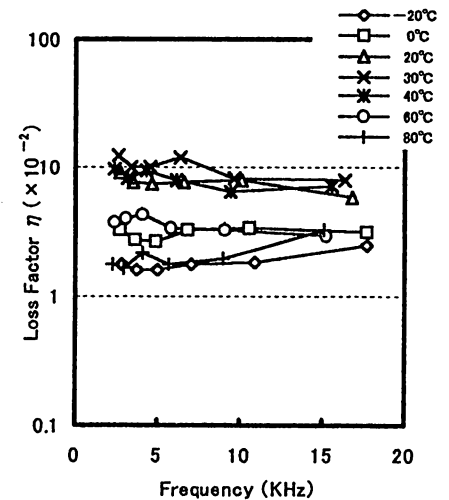


Fig. 9 損失係数と周波数の関係 (2次モード)

の場合と比較するとアルミ板 3 - 3 mm の方が損失係数の値が高いと言うこと以外は同様な挙動を示し、試験片が長くなるとモード依存性が見られなくなるのがはっきりわかる。また、アルミ板 3 - 6 mm の場合も同様な挙動を示した。

これらよりピーク温度はいずれの長さの試験片でも次数モードで異なり、高次モードほどピーク温度が低くなっている。

#### 4. 2 損失係数の周波数依存性

一般的に三層積層板の振動減衰のメカニズムは、主に粘性減衰によるものと考えられており、その損失係数は温度依存性と同様に周波数に依存するのは当然であると考えられている。そこで本節では損失係数に及ぼす周波数依存性について、試験片長さと同共振周波数を変えて検討した結果を明らかにする。

Fig. 8. 9. 10は三層積層アルミ板の試験片の長さと同温度を変えて測定したモードごとの損失係数と同周波数の関係を示したものである。アルミ板の各次数モードおよび各温度においてどの温度においても損失係数に対する周波数の影響は小さい。粘弾性特性を利用した制振材料は一般に周波数と同温度の影響を

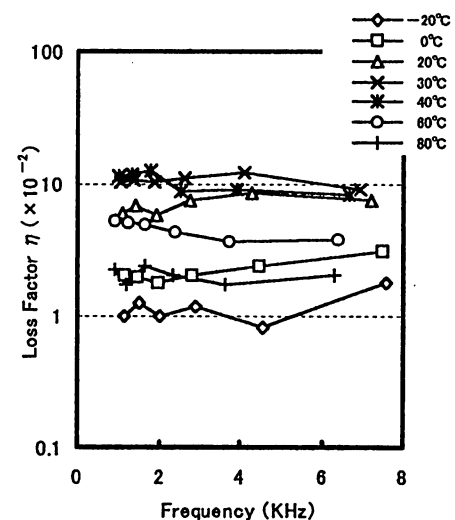


Fig. 10 損失係数と周波数の関係 (3次モード)

受けるとされているが、本実験のように長さを変えて周波数依存性を求めると異なった結果が得られる。実用的見地から拘束タイプの制振材料は温度依存性が極めて大きい、周波数依存性は小さいと見られる。

### 4. 3 損失係数のモード依存性

共振と反共振の振動モードにおいてそれぞれのモードの共振周波数は試験片の長さによって変化する。そこで本節では、試験片長さ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振動条件で損失係数を測定し、共振の1次モードから3次モードの影響を検討した結果について述べる。

Fig.11. 12. 13. 14. 15はモード次数の影響を明らかにするために温度ごとにモード次数をパラメータとして損失係数と周波数の関係を示した図である。減衰効果が現れない $-20^{\circ}\text{C}$ から $0^{\circ}\text{C}$ の低温部では、

損失係数に対する次数モードの影響は見られない。

それに対し $20^{\circ}\text{C}$ になると次数モードの影響が現れ、1次モードと2, 3次モードとは同一周波数上に対して異なる損失係数を持ち、2, 3次モードの方が大きい値となっている。ここまでの温度では周波数のスケールを大きくとっていることによって各モードは右上がりの傾向が見られる。

損失係数がピークとなる $40^{\circ}\text{C}$ 付近では1次モードの損失係数が大きくなり、1, 2, 3次モードが一つの曲線状になり、再びモード依存性が認められなくなる。ピーク付近では周波数の影響はなく各モードは同一線上に並んでいる。ピーク値を超えた $60^{\circ}\text{C}$ では1次モードと2, 3次モードの損失係数は周波数に対して異なった値を示し、 $20^{\circ}\text{C}$ 付近とは逆に1次モードの損失係数のレベルが2, 3次モードより大きくなり再びモード依存性が見られる。

高温部では周波数の影響によって各モードは右下

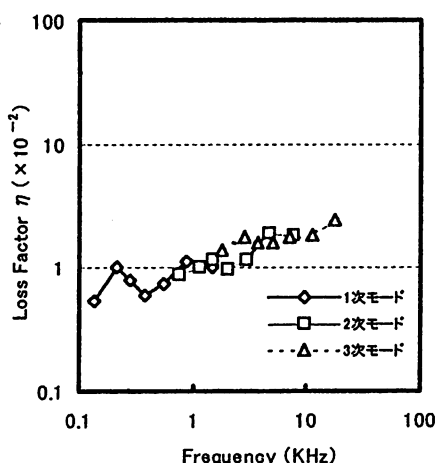


Fig. 11 損失係数とモードの関係 ( $-20^{\circ}\text{C}$ )

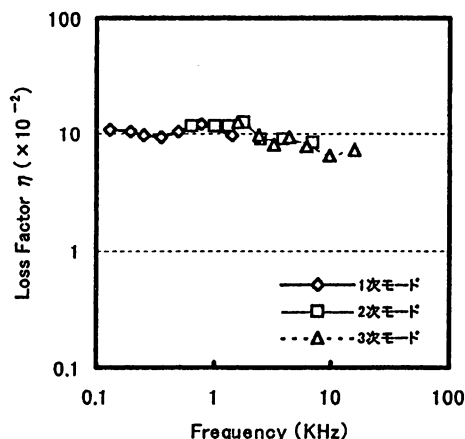


Fig. 13 損失係数とモードの関係 ( $40^{\circ}\text{C}$ )

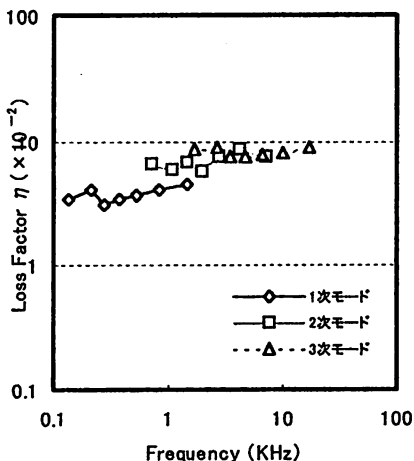


Fig. 12 損失係数とモードの関係 ( $20^{\circ}\text{C}$ )

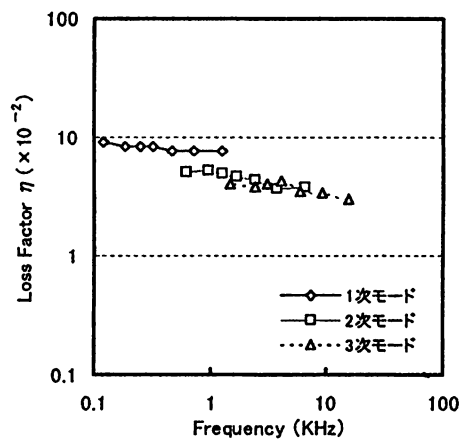


Fig. 14 損失係数とモードの関係 ( $60^{\circ}\text{C}$ )

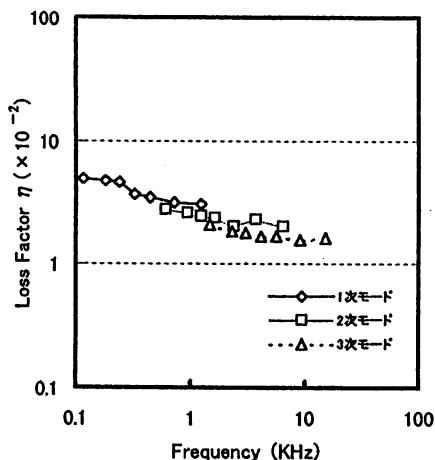


Fig. 15 損失係数とモードの関係 (80°C)

がりの傾向が見られる。80°Cでは60°Cと同様の傾向を示すが1次モードと2, 3次モードとの損失係数の差が小さくなっていく。さらに温度が上がると低温部と同様に損失係数のモード依存性は見られなくなる。アルミ板のモード依存性の挙動としては鋼板と同様の傾向となっていた。

このように損失係数のモード依存性は、鋼板もアルミ板も同様で、損失係数がピークとなる温度の前後の領域で起こり、1次と高次モードでは同一周波数に対して2つの異なる損失係数を示すことになる。

#### 4. 4 試験片長さ (波長) の影響

鋼板の場合、温度変化によって損失係数の最大値が試験片長さによって異なり、材料に励起される振動の波長の影響を考慮する必要があった。そこで本節では、アルミ板の場合に生じ得る振動の波長の影響について検討した結果を明らかにする。

Fig.16はアルミ板6—0.5 mmと鋼板5.7—0.4 mmの試験片の長さとのピーク値の関係を示している。アルミ板の場合は、鋼板に比べ損失係数のピーク値が多少大きく、試験片が短くても長くても各モードによって損失係数のピーク値はそれほど大きな変化はなく、波長による各モードのピーク値への影響は見られないが、モードの依存性は常に見られる。

鋼板の場合、1次モードは長さが変わっても損失係数のピーク値はあまり変わらないが2, 3次モードは長さに比例して損失係数のピーク値も大きくなる。最終的にはどのモードもある値に収束する傾向となる。試験片が短いとモード依存性が見られるが、長くなるにつれてモード依存性が見られなくなっている。よって損失係数のピーク値は1次モードでは

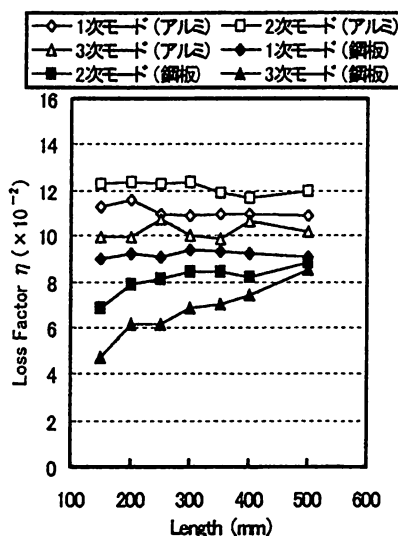


Fig. 16 試験片長さとのピーク値の関係 (アルミ3—3 mm、鋼板5.7—0.4 mm)

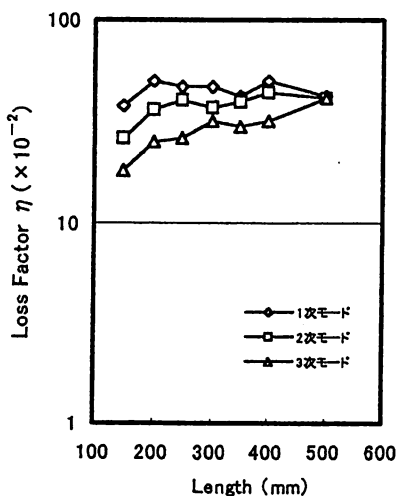


Fig. 17 試験片長さとのピーク値の関係 (アルミ3—3 mm)

長さにあまり依存しないが、2, 3次モードは長さに大きく依存する。

また、Fig.17はアルミ板3—3 mmの試験片の長さとのピーク値の関係を示している。この図から鋼板の場合と同様の挙動を示し、モード依存性が見られなくなるのははっきりわかる。6—3 mmの場合も同様の傾向となった。これらより、アルミ板6—0.5 mmは他の組み合わせの試験片とは異なる性質を持っていることが明らかになった。

#### 4. 5 材料の構成条件の損失係数への影響

一般的に粘弾性材料を用いた拘束タイプのダンピ

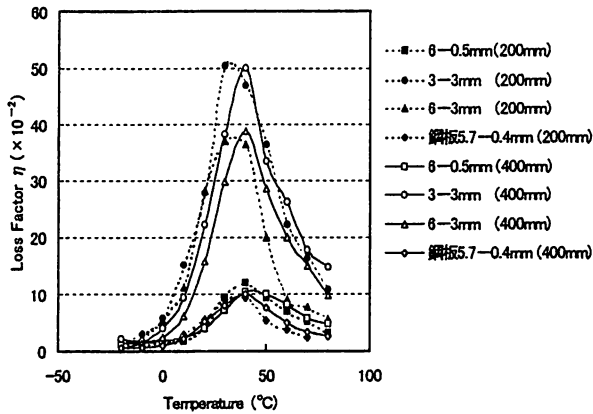


Fig. 18 損失係数と温度の関係 (1次モード)

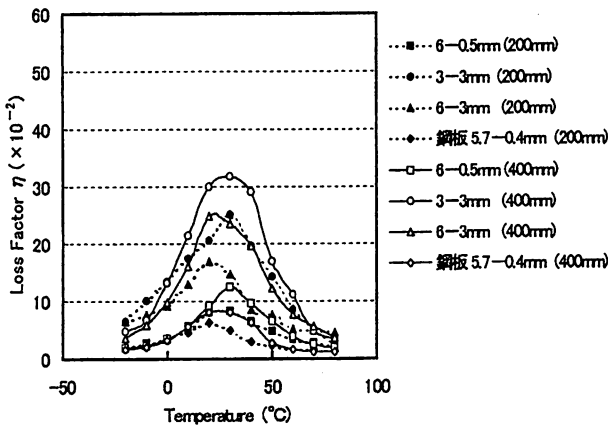


Fig. 19 損失係数と温度の関係 (3次モード)

ング構造の振動減衰は、上下の板の曲げ変形が粘弾性材料層にせん断変形を生じさせることに基づくと考えられている。本節では基板と拘束板の構成条件を変化させ、曲げ剛性が大きく異なる時の影響を検討した結果について述べる。

Fig.18. 19は材料の構成条件を変えた、1次モードと3次モードの損失係数と温度の関係を示している。どのモードでもアルミ板3-3mmの損失係数が一番大きく、次にアルミ板6-3mm、次にアルミ板6-0.5mm、鋼板5.7-0.4mmの順となっている。三層積層板では、基板と拘束板が等厚の場合に最も振動減衰性能の効果が大きいことを示している。これは基板と拘束板の曲げ変形が粘弾性材料層にせん断変形を生じさせているためであり、基板と拘束板との曲げ剛性が大きく異なる場合は、基板と拘束板の厚さの比を小さくするほど損失係数が大きくなる傾向が見られる。

## 5. 考 察

本実験の結果から、アルミ板に粘弾性材料を介して拘束として基板の1/10程度の拘束板を取り付けた三層積層アルミ板も、鋼板の三層積層鋼板と同様に大きな損失係数が得られる事が明らかになった。また、その損失係数は温度、周波数、モードの影響を受けるが、温度については極めて敏感であるのに対して周波数依存性は同一モードでは意外に小さい。三層積層アルミ板の損失係数がピークとなる温度は鋼板に比べ10°C程度高温側に以降することが認められた。また、損失係数はモード次数の影響を大きく受け、同一周波数、同一温度でもモードによって異なった損失係数となる場合があり、特に1次モードと高次モードでは異なった挙動を示す。さらに、三層積層アルミ板は材料の構成条件において基板と拘束板の厚さの比が小さいほど振動減衰性能の効果が大きくなり、基板と拘束板の組み合わせによっては、鋼板に比べ材料に生じる波長の影響は小さいことなどが明らかになった。これらの原因は三層積層板の振動減衰性能(損失係数)はその曲げ剛性と密接な関係があり、表裏の剛性材の曲げ剛性と粘弾性材料のせん断変形に影響を及ぼすために生じるものと考えられる。したがって、アルミは密度が小さく軽量化の観点からは適する材料であり、ヤング率が低く曲げ剛性が低いため振動しやすいと考えられているが、粘弾性材料を介して拘束とした三層積層アルミ板にすることによって大きな損失係数を得られ、機械構造部材の重量の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思われる。

## 6. 結 言

アルミ製の機械構造部材に対して、最も効果的に制振性能を付与するために、粘弾性材料を中間層とする三層積層アルミ板の振動減衰特性について、材料構成条件、周波数、温度、振動モードなど種々の観点から実験的に研究した。その結果、以下のような結論が得られた。

1. アルミはヤング率が鋼材に比べ小さく、曲げ剛性が低いため振動しやすいと考えられているが、三層積層アルミ板にすることによって三層積層鋼板同様、大きな損失係数が得られ、制振処理として有効であると考えられる。
2. 三層積層アルミ板も損失係数の温度依存性が極めて

て大きい。周波数による変化は比較的小さい。本実験に用いた粘弾性材料の場合は、損失係数は40°C前後でピークとなり、同一粘弾性材料を用いた鋼板に比べ約10°C程度高温で制振性能を最も発揮することができることが判明した。

3. 損失係数はモード次数の影響をうけ同一周波数、同一温度でもモードによって異なった損失係数となる場合がある。1次モードと他の高次モードでは特に異なった挙動を示す。
4. 三層積層鋼板の場合、損失係数のピーク値は1次モードでは長さに依存しないが、2、3次モードは長さに大きく依存する。同様の基板と拘束板の組み合わせの三層積層アルミ板では1、2、3次とも長さに依存せず、しかも2次モードの損失係数がどの長さ（波長）でも最も大きい。しかし、拘束板が厚くなると鋼板と同様に2、3次モードでは材料の長さに依存するようになる。
5. 材料の構成条件の影響は鋼板と同様に基板と拘束

板の厚さの比が小さいほど振動減衰性能の効果が大きくなる傾向にある。

6. 拘束タイプのダンピング構造における損失係数の最適な制振処理条件や最適な使用条件を得るためには、粘弾性材料の選定と振動モード波長を考慮する必要がある。

## 7. 参考文献

- ・田中良平編集，制振材料，制振鋼板，日本規格協会（1992）
- ・森沢正旭著，入門機械振動工学（1998）
- ・田口隆士，平成11年度専攻科特別研究論文集，国立秋田工業高等専門学校専攻科（2000）
- ・遠藤，田口，東北支部米沢地方講演会講演論文集，日本機械学会東北支部（1999）
- ・遠藤，打川，佐々木，東北支部盛岡地方講演会講演論文集，日本機械学会東北支部（2001）