

論 文

鋼-超塑性合金積層複合制振用鋼板の設計

小豆島 明*・宮川 松 男**

Design of a Composite Damping Sheet Made by Superplastic Rolling/Joining Technique of Steel-Superplastic Alloy

Akira AZUSHIMA and Matsuo MIYAGAWA

In a previous paper, the composite sheets made by superplastic rolling/joining technique of steel-superplastic alloy were developed and it was found that they could be used for the damping material at high temperature. On the basis of these results, a study has been conducted to investigate the damping mechanism of the composite sheet and the design of the composite damping sheet of steel-superplastic alloy. The effect of the joining interface of the composite sheet on damping capacity could not be recognized. It became possible that the damping capacity of the composite sheet was calculated from each damping capacity characteristic. The damping capacity calculated from a simple model was generally in agreement with the measured one. From the calculated results, when the layer number of the composite sheets was five, the best damping capacity was obtained.

1. 緒 言

前報¹⁾において、鋼と超塑性合金とを積層状に重ね合わせて、圧延/圧接により製造した積層複合板は、積層した超塑性合金が超塑性を発現する温度域において高い吸振能を有し、必要とする温度域における高温用制振材になりうることを示した。この積層複合板の高温での吸振能の増加の原因については、合わせ板にした超塑性合金自体の高温における吸振能の向上、及び積層板の界面におけるエネルギー吸収が考えられる。しかし、現在のところ異種金属の積層板の吸振挙動については明らかでなく、また、鋼と超塑性合金の積層枚数を増加させた際の界面による吸振能の変化についても明らかでない。更に、積層複合板を実際に使用する際に、吸振能を定量的に取り扱うことができることが望まれており、積層複合板の制振板としての設計を行う必要に迫られている。

本研究は、まず最初に鋼-超塑性合金積層板の界面におけるエネルギー吸収についての定量的な実験を行い、この種の積層複合板の摩擦減衰の挙動を明らかにする。そして、積層複合板の吸振能設計に必要な計算方法について述べ、鋼-超塑性合金積層複合制振用鋼板の具体的な設計例について示す。

2. 多層積層板の吸振能

2.1 実験方法

積層板に使用した鋼板は、板厚 1.6 mm の熱間圧延低炭素鋼板 (SPHE 材) である。鋼板を 40×30 mm の短冊に切断し、表面を 40% 塩酸 (40°C) で酸洗いを行う。次にベンジンで脱脂し、ワイヤブラッシングを行い、表面の酸化膜を除去した。その鋼板を 2 枚から 7 枚積層し、両端をステンレス細線で縛定し、大気中で 650°C に加熱後、圧延を行った。圧延は、4~5 パスで行い、最終的に板厚が 1 mm になるようにした。圧延には、ロール直径 300 mmφ、ロール周速 20 m/min の 2 段圧延機を使用した。

圧延/圧接法によつて作製した積層板から、10×150 mm の吸振能測定用の試験片を切り出し、吸振能としての Q^{-1} 値の測定を行った。つづいて、その試験片をアルゴン雰囲気中で 850°C×1 h の焼なましを行い、 Q^{-1} 値を測定した。更に、アルゴン雰囲気中で 950°C×1 h の再焼なまし後の Q^{-1} 値をも測定した。これらの測定には、前報の室温用測定装置を用いた。

比較のため、圧延した鋼板の Q^{-1} 値に及ぼす圧下率の影響を調べる実験を行った。使用した鋼板は、板厚

昭和 59 年 1 月 12 日受付 (Received Jan. 12, 1984)

* 東京大学工学部 (現: 横浜国立大学工学部) 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Now Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

** 東京大学工学部 (現: 長岡技術科学大学) 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Now The Technological University of Nagaoka)

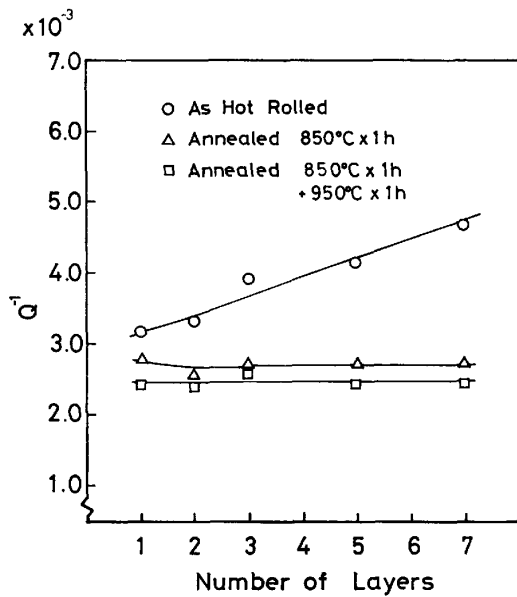


Fig. 1. Effects of the number of layers of steel sheets made by rolling/joining technique at a rolling temperature of 650°C and the annealing treatments (850°C×1 h and 850°C×1 h+950°C×1 h) on the damping capacity Q^{-1} .

3.15 mm の熱間圧延低炭素鋼板 (SPHE 材) で、これを冷間圧延により所定の各種板厚にし、850°C×1 h の焼なましを行った。この鋼板を板厚 1 mm まで冷間圧延を行い、26.9, 41.2, 50.6, 60.2 及び 68.4% の 5 種類の圧下率の試料を作製した。それぞれの試料から、10×150 mm の吸振能測定用試験片を切り出し、 Q^{-1} 値の測定を行った。また、アルゴン雰囲気中で 450°C×1 h の焼なましを行った試験片についても測定を行った。

2.2 実験結果及び考察

Fig. 1 に積層鋼板の Q^{-1} 値の測定結果を示す。圧延/圧接したままの状態では、積層数が増加すると Q^{-1} 値は高くなっている。しかし、850°C で 1 h 焼なましを行うと、 Q^{-1} 値は全体的に低下し、積層数による依存性がほとんどなくなる。950°C で 1 h 再焼なましを行うと、更に、 Q^{-1} 値は低くなり、積層数とは無関係にほぼ一定の値になっている。このように、両熱処理を行った各種積層板の Q^{-1} 値は、積層板の積層数に関係なく、ほぼ一定の値となっており、 Q^{-1} 値は積層間の界面の数には関係ないという結果が得られた。

2 回の熱処理を行った積層板では、1 回の熱処理を行った積層板に比べ、低い値になっている。これは、2 回の熱処理を行うことにより、内部に存在する転位などの欠陥が少なくなつたためと考えられる。

つぎに、圧延/圧接したままの積層板の吸振能が積層数とともに増加している原因は、冷間圧延による圧下率

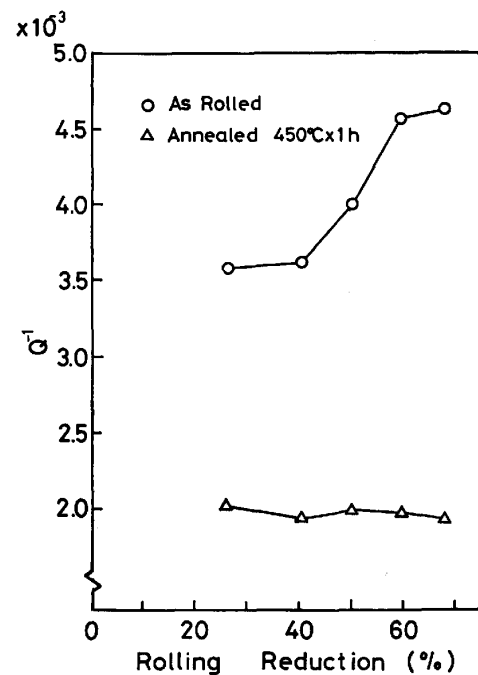


Fig. 2. Effect of the rolling reduction and the annealing treatment (450°C×1 h) on the damping capacity.

が積層数とともに増加している影響が Q^{-1} 値に反映したものである。これは、加工により材料内部に導入された転位量が圧下率とともに増加し、 Q^{-1} 値を高くしたものと考えられる。これを確かめるため、冷間圧延した鋼板の Q^{-1} 値に及ぼす圧下率の影響を調べた実験結果を Fig. 2 に示す。鋼板の圧下率が大きくなると、 Q^{-1} 値もそれに伴って高くなっていることがわかる。この鋼板を 450°C で 1 h 焼なましすると、その Q^{-1} 値は圧延したままの状態に比べて、全体的に低くなり、圧下率に関係なくほぼ一定になっている。

これらの結果から、積層複合板の吸振能を高める一つの原因として考えられていた界面でのエネルギー吸収が、圧延/圧接によつて固相接合が行われている界面では、あまり効果のないことがわかつた。これは、圧延/圧接した積層複合板の吸振能が、積層複合板にした材料要素それぞれの吸振能によつて表すことのできることを示している。

3. 鋼-超塑性合金の吸振能

吸振能は、外部から与えられたエネルギーが振動中に失われる効率であるから、積層複合板の吸振能は、界面のエネルギー吸収がほとんどないとすると、与えられた外部エネルギー (ひずみエネルギー) に対する積層複合板の鋼と超塑性合金とのエネルギー分担率で表すことができるようになる。

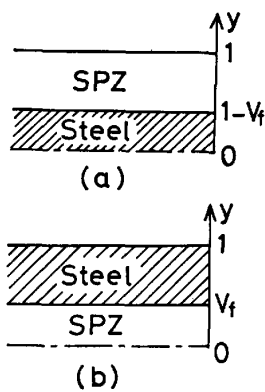


Fig. 3. Schematic representation of the cross section of the composite sheets of SPZ-steel-SPZ (a) and steel-SPZ-steel (b) for calculating the damping capacity. V_f is the volume fraction of SPZ.

Fig. 3 に示す 2 種類の SPZ-鋼-SPZ 及び鋼-SPZ-鋼積層板のひずみエネルギーを求め、超塑性合金として Zn-22%Al 合金 (略称 SPZ) を用いた。ここでは、積層複合板の振動中のひずみエネルギー分担を、第 1 近似として、積層複合板を静的に中立面の曲率半径が r になるまで曲げるときに、それぞれの材料要素に生じる曲げエネルギーを考えることにする。計算を簡単にするため、積層複合板の板厚を 2、界面の面積を S 、SPZ の体積率を V_f 、鋼及び SPZ の曲げエネルギーを U_{Steel} 及び U_{SPZ} 、積層複合板の曲げひずみエネルギーを U_{Total} とする。また、鋼及び SPZ のヤング率を E_{Steel} 、 E_{SPZ} として、それぞれのヤング率は温度の関数とする。

Fig. 3 (a) の場合の SPZ-鋼-SPZ 積層板の SPZ 層の受けもつひずみエネルギー U_{SPZ} は、

$$U_{SPZ} = \int_{(1-V_f)}^1 \frac{E_{SPZ}}{2} \frac{y^2}{r^2} S dy = \frac{E_{SPZ}}{6r^2} \{1 - (1-V_f)^3\} S \dots\dots\dots (1)$$

となり、鋼の受けもつひずみエネルギー U_{Steel} も

$$U_{Steel} = \int_0^{1-V_f} \frac{E_{Steel}}{2} \frac{y^2}{r^2} S dy = \frac{E_{Steel}}{6r^2} (1-V_f)^3 S \dots\dots\dots (2)$$

で表すことができ、積層複合板のひずみエネルギー U_{Total} は、

$$U_{Total} = U_{SPZ} + U_{Steel} = \frac{E_{SPZ}}{6r^2} \{1 - (1-V_f)^3\} S + \frac{E_{Steel}}{6r^2} (1-V_f)^3 S \dots\dots\dots (3)$$

となる。

同様に、Fig. 3 (b) の鋼-SPZ-鋼積層板のひずみエネルギーも、次式から求めることができる。

$$U_{Total} = \frac{E_{SPZ}}{6r^2} V_f^3 S + \frac{E_{Steel}}{6r^2} (1-V_f)^3 S \dots (4)$$

積層複合板の Q_{Total}^{-1} 値は、鋼及び SPZ の Q_{Steel}^{-1} 、及び Q_{SPZ}^{-1} 値のひずみエネルギー分担率から

$$Q_{Total}^{-1} = \frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} Q_{SPZ}^{-1} + \frac{U_{Steel}}{U_{Total}} Q_{Steel}^{-1} = \frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} Q_{SPZ}^{-1} + \left(1 - \frac{U_{SPZ}}{U_{Total}}\right) Q_{Steel}^{-1} \dots (5)$$

となる。

ここで、SPZ-鋼-SPZ 積層板では

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = \frac{1 - (1-V_f)^3}{1 - (1-V_f)^3 + \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}} (1-V_f)^3} \dots\dots\dots (6)$$

鋼-SPZ-鋼積層板では

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = \frac{V_f^3}{V_f^3 + \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}} (1-V_f)^3}$$

で表すことができる。この関係式から、 Q^{-1} の値を V_f よりも、 U_{SPZ}/U_{Total} によつて評価することを考える。

そこで、前報¹⁾で示した室温における鋼-SPZ 積層板の体積率 V_f に対する Q^{-1} 値の変化を縦軸に、横軸に SPZ のエネルギー分担率 U_{SPZ}/U_{Steel} で書き換えると、Fig. 4 及び Fig. 5 のようになる。ここで、SPZ の室温でのヤング率 E_{SPZ} は、本橋²⁾及び師岡³⁾の示す実験結果を用いた。SPZ の組織が層状組織の場合に

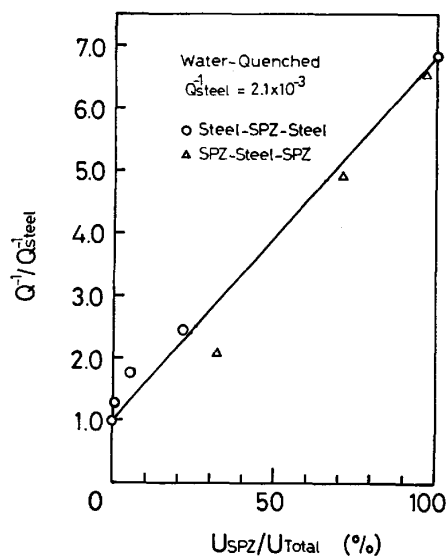


Fig. 4. Relationship between Q^{-1}/Q_{Steel}^{-1} and U_{SPZ}/U_{Total} of the composite sheets of steel-SPZ-steel and SPZ-steel-SPZ in the granular structure of SPZ quenched in water.

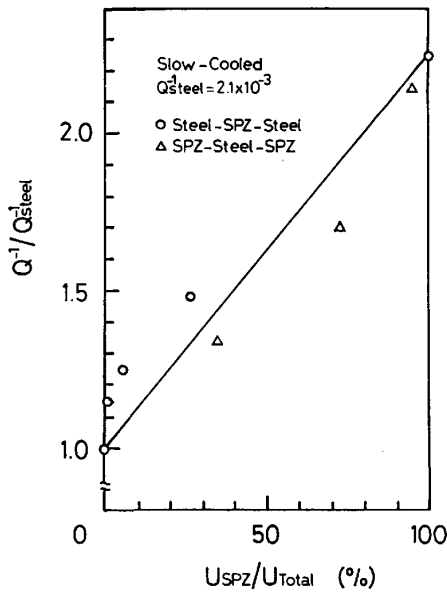


Fig. 5. Relationship between Q^{-1}/Q_{steel}^{-1} and U_{SPZ}/U_{Total} of the composite sheets of steel-SPZ-steel and SPZ-steel-SPZ in the laminar structure of SPZ cooled in furnace.

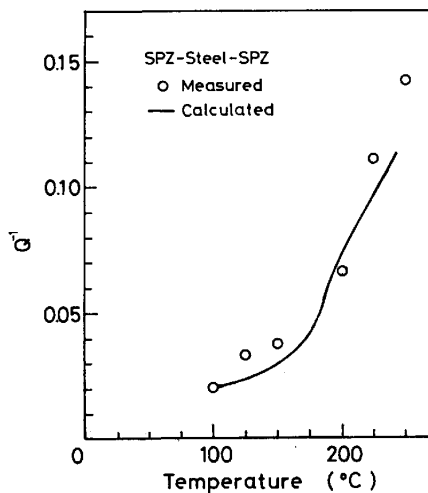


Fig. 6. Comparison with the calculated values and the measured values in SPZ-steel-SPZ composite sheet in the granular structure of SPZ with temperature.

は、 $E_{Steel}/E_{SPZ}=2.6$ 、粒状組織の場合には、 $E_{Steel}/E_{SPZ}=2.7$ である。 Q^{-1} 値比と U_{SPZ}/U_{Total} の関係は、ほぼ直線関係になり、圧延/圧接法により作製した積層複合板の界面でのエネルギー吸収を考える必要のないことを示している。

次に、鋼-SPZ 積層板の Q^{-1} 値の温度変化を、鋼、SPZ 単独の Q^{-1} 値の温度変化の測定値及び鋼、SPZ それぞれの温度変化を考慮に入れたヤング率 E_{Steel} 、 E_{SPZ} を式(5)に代入して求めた。この計算結果を測定値とともに Fig. 6 に示す。その際の SPZ のヤング率

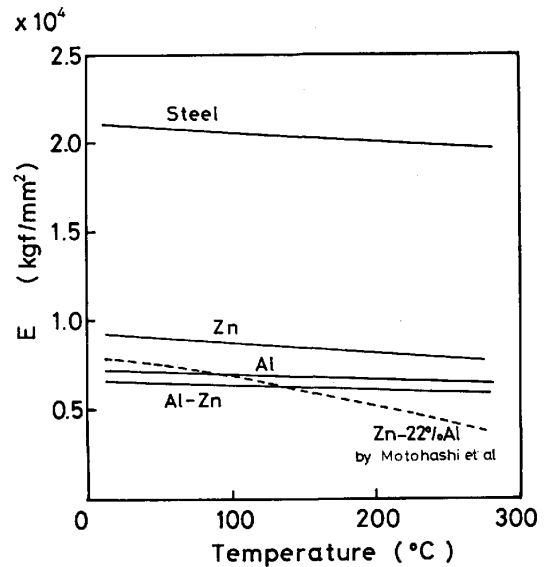


Fig. 7. Young modulus of steel, Zn, Al, Al-Zn and Zn-22%Al with temperature.

E_{SPZ} の温度依存性²⁾、及び鋼、Al、Zn、Al-Zn のそれぞれのヤング率の温度変化⁴⁾を Fig. 7 に示す。Fig. 6 の測定値と計算値とは、同じ傾向を示し、計算値の Q^{-1} 値が測定値よりも少し低い程度であった。計算値が測定値を下回った原因としては、モデルが第1近似として動的な現象を静的に取り扱っているため低く評価しているものと考えられる。

このモデルによつて、比較的よい精度で積層複合板の吸振能を求めることができる。また、SPZ 以外の超塑性合金を用いるときも、その超塑性合金の Q^{-1} 値と E の温度変化が明らかであれば、同様に使用できる。

4. 鋼-超塑性合金多層積層板の設計

積層複合板の Q^{-1} 値の計算方法は、3層以上の鋼-超塑性合金積層板の場合にも、同様に用いることができる。3層以上の積層複合板においても、3層の場合と同様に、

(1) 積層界面の存在が、積層複合板の Q^{-1} 値に影響を及ぼさないものとし、 Q^{-1} 値は、超塑性合金のエネルギー分担率によつて表すことができる。

(2) 積層複合板の引張強さにおいて、単純複合則が成り立つ。

の関係が成り立つものとする。

多層積層複合板の設計計算例として、両外層には鋼板がくるものとし、超塑性合金の体積率と積層数とを変化させた場合について、述べておこう。まず、Fig. 3(b) の拡張として、多層にした場合を考え、鋼及び超塑性合

金 (SPZ) の板厚は、それぞれ同じとする。 Q^{-1} 値は、同じく式(5)から求めることができ、各層での SPZ のエネルギー分担率は

3層の場合

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = \frac{V_f^3}{V_f^3 + \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}}(1 - V_f^3)} \dots\dots\dots (7)$$

5層の場合

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = \frac{V_f(V_f^2 + V_f + 1)}{3 \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}} - \left(1 - \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}}\right)V_f(V_f^2 + V_f + 1)} \dots\dots\dots (8)$$

7層の場合

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = \frac{V_f(9V_f^2 + 18V_f + 27)}{54 \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}} - \left(1 - \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}}\right)V_f(9V_f^2 + 18V_f + 27)} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

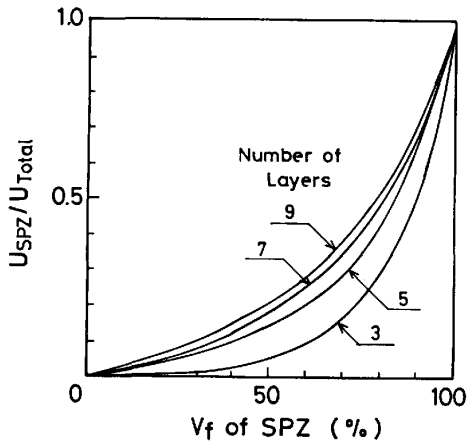


Fig. 8. Effect of the volume fraction of SPZ with the number of layers of composite sheets made by rolling/joining technique of steel and SPZ on U_{SPZ}/U_{total} .

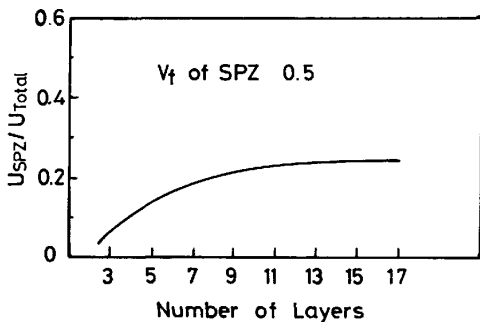


Fig. 9. Relationship between U_{SPZ}/U_{total} and the number of layers at the volume fraction of SPZ of 0.5 in Fig. 8.

Fig. 8 に SPZ のエネルギー分担率 U_{SPZ}/U_{Total} と SPZ 体積率との関係を示す。 Fig. 8 の SPZ 体積率 $V_f=0.5$ の場合の、 U_{SPZ}/U_{Total} と積層数との関係を Fig. 9 に示す。両図から、 Q^{-1} 値は 3層から 5層にかけて大きく増加し、 9層以上ではほとんど Q^{-1} 値の増加が期待できないことがわかる。積層複合板の加工上の問題から考えると、 5層の積層複合板 (鋼-SPZ-鋼-SPZ-鋼) が同一体積であつても、かなり大きな吸振能を得ることができる。

次に、 5層の積層複合板の 3層の鋼板の板厚の変化を許し、 SPZ 層を表面に近づけることにより、さらに大きな吸振能が期待できる。 Fig. 10 に示すように、積層複合板の板厚を 2、外層の鋼の板厚を t とすると、 SPZ のひずみエネルギー分担率 U_{SPZ}/U_{Steel} は、

$$\frac{U_{SPZ}}{U_{Total}} = V_f \{ 3t^2 - 3(2 - V_f)t + V_f^2 - 3V_f + 3 \} / \left[\frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}} - \left(1 - \frac{E_{Steel}}{E_{SPZ}}\right)V_f \{ 3t^2 - 3(2 - V_f)t + V_f^2 - 3V_f + 3 \} \right] \dots\dots\dots (10)$$

となる。

Fig. 11 に種々の外層の鋼の板厚 t に対する SPZ の

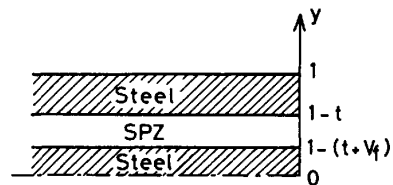


Fig. 10. Schematic representation of the cross section of the composite sheet of five layers (steel-SPZ-steel-SPZ-steel). t is the thickness of steel and V_f is the volume fraction of SPZ.

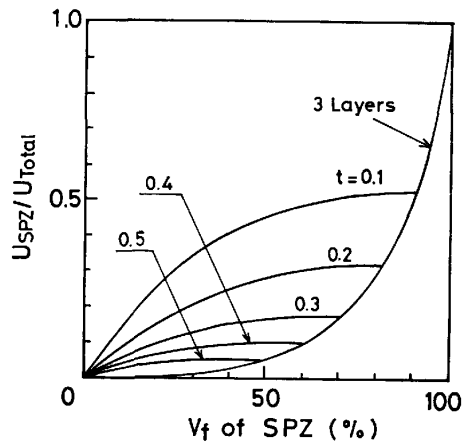


Fig. 11. Relationship between U_{SPZ}/U_{total} and the volume fraction of SPZ in the composite sheet of five layers when the thickness t of the outer layer of steel was changed from 0.1 to 0.5.

エネルギー分担率と SPZ 体積率との関係を示す。この図から、SPZ 体積率 50% では、鋼の板厚を $t=0.1$ にすることにより、Fig. 8 の場合の Q^{-1} 値の約 3 倍の値が得られる。3 層の積層複合板と比較すると、3 層で SPZ 体積率 50% の積層複合板と同一の Q^{-1} 値を 5 層の積層複合板で得ようとする、 $t=0.5$ の場合には SPZ の体積率は 20~30% でよく、 $t=0.3$ にすると、SPZ 体積率は 10% 以下になる。このように、積層数を 5 層にすることにより、SPZ の体積率を少なくすることができ、より安価な積層複合材を製作することができる。また、鋼の体積率が増えることにより、引張強さが向上した構造用制振材として使用することもできる。5 層以上にしても吸振能の大きな増加は期待できないが、SHERBY⁵⁾が示したように、破壊時の crack の進行が停留または著しく遅れるという利点が生じる。

ここでは、鋼-SPZ 積層板の室温の場合について計算したが、他の超塑性合金の場合も、高温の場合も、同様に計算することができ、鋼-超塑性合金積層複合制振用鋼板の設計を行うことができる。

5. 結 言

積層複合板の界面におけるエネルギー吸収について

は、鋼の積層板を作製し、吸振能を測定した結果、界面におけるエネルギー吸収をほとんど考える必要はなく、積層複合板の吸振能は、合わせ板にする材料の吸振能特性によつて求めうることがわかった。

この結果から、積層複合板の吸振能を計算するモデルを考え、鋼-超塑性合金積層複合制振用鋼板としては、5 層の積層数が吸振能を高くし、製造上からも適当であることを示した。

おわりに、本研究を遂行するにあたり御援助いただいた機械技術研究所 鳥阪泰憲氏、本研究に御協力いただいた当時東京大学工学部大学院生 三浦恒正君、学部生 大山英人君に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 小豆島明, 三浦恒正, 宮川松男: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 2269
- 2) 本橋嘉信, 菊地弘明, 柴田孝夫: 日本機械学会超塑性研究会資料, No. 23-1 (1983-9), p. 1
- 3) 師岡利政: 日本金属学会誌, 22 (1958), p. 436
- 4) 金属材料の弾性係数に関する資料調査分科会報告書 (日本機械学会編) (1968), p. 10, p. 29, p. 34 [日本機械学会]
- 5) O. D. SHERBY: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 232