

© 1984 ISIJ

# 鋼と超塑性合金とを積層した制振用複合鋼板の吸振能

.....  
 論文  
 .....

小豆島 明\*・三浦 恒正\*<sup>2</sup>・宮川 松男\*<sup>3</sup>

## Damping Capacity of Composite Sheets Made by Superplastic Rolling/Joining Technique of Steel-Superplastic Alloy

Akira AZUSHIMA, Tsunemasa MIURA and Matsuo MIYAGAWA

### Synopsis:

A study has been conducted to develop the composite sheets made by superplastic rolling/joining technique of steel-superplastic alloys which could be used for the damping material at high temperature. The superplastic alloys used were Zn-22%Al alloy, Al-6%Cu-0.5%Zr alloy and Al-12.9%Mg<sub>2</sub>Si alloy and the composite sheets consisted of the three layers of steel and superplastic alloy (e.g. steel-s.p. alloy-steel, s.p. alloy-steel-s.p. alloy). In case of Zn-22%Al alloy, the volume percentage of the alloy was changed at five steps of 0, 25, 50, 75 and 100%. The specimens were rolled at 4 or 5 passes at 200°C and the final reduction became 80%. The laminar and granular structures could be obtained by heat treatments after rolling. In case of the other alloys, the volume percentage of the alloys was 50%. The specimens were rolled at 300°C and the final reduction became 80%. The results obtained were as follows;

(1) The damping capacity of the steel-Zn-22%Al alloy composite sheet could be obtained several times values of the steel in room temperature. The damping capacity increased with increasing temperature. Above the temperature of 200°C, the damping capacity exceeded 0.1.

(2) In the composite sheets of steel-Al superplastic alloys, good formability could be obtained by heat treatment.

### 1. 緒 言

最近の振動及び騒音公害対策のために制振用鋼板の研究が行われている。従来、制振用材料としては、高吸振能を有する金属材料のほかに、低吸振能の材料であつても合わせ板にすることにより、使用目的にかなうものが製作されている。例えば、2板の鋼板の間に高分子材料または接着剤などをサンドイッチにして、合わせ板にしたものである。しかし、この種の制振用鋼板は、高分子材料または接着剤が使用されているため、100°C以上の高温域では、その界面強度などの面から使用することが困難になるという欠点をもっている。

筆者らは、このような欠点を克服するために高温での使用に耐えうる新規な制振用鋼板について、鋼板と超塑性合金とを積層状に重ね合わせた積層複合板の開発を試みた<sup>1)</sup>。ここでの実験は、超塑性合金として、200~300°Cで超塑性を示す Zn-22%Al 合金、350~475°Cで超塑

性を示す Al-6%Cu-0.5Zr 合金、480~550°Cで超塑性を示す Al-12.9%Mg<sub>2</sub>Si 合金を用いているが、要求される温度範囲に適合した他の超塑性合金を同様に適用できる。

この種の極微細結晶粒超塑性合金は<sup>2)</sup>、その力学物性からわかるように、高い延性、低い変形抵抗を有し、常温においても一般材料と比べ吸振能が高く、特に超塑性発現温度領域では、常温と比べ吸振能が著しく高くなるという性質を有している。更に、超塑性合金は他金属との固相接合能が高く、鋼板と積層することが容易である。一方、鋼は構造強度が高く、材料費が安価であるから、これら両者の特性を併せ持った積層複合板は、高温用制振鋼板としての期待がもてる。

本研究は、この種の積層複合板を圧延/圧接法<sup>3)</sup>によつて作製し、その吸振能及び機械的性質を調べ、高温用制振用鋼板としての特性について検討したものである。

昭和 58 年 12 月 27 日受付 (Received Dec. 27, 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)

\*<sup>2</sup> 東京大学大学院 (現: 昭和アルミ(株)) (Graduate School, The University of Tokyo, Now Showa Aluminum Corporation)

\*<sup>3</sup> 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)

## 2. 実験方法

### 2.1 実験材料

使用した超塑性合金は、板厚 1 mm の Zn-22%Al (略称 SPZ), 板厚 2 mm の Al-6%Cu-0.4%Zr (略称 SUP) 及び板厚 2 mm の Al-12.9%Mg<sub>2</sub>Si (略称 MS) であり、使用した鋼材は、低炭素鋼板 (板厚 0.8 mm の SPCE 及び板厚 2 mm の SPHE) である。それぞれの超塑性合金の性質を Table 1 に、低炭素鋼板の性質を Table 2 に示す。

### 2.2 積層複合板の製造

最初に、鋼と Zn-22%Al (SPZ) との積層複合板の製造方法を示す。積層板の構造としては、鋼と SPZ を 3 層にしたサンドイッチ構造として、SPZ の体積率の異なる鋼-SPZ-鋼積層板及び SPZ-鋼-SPZ 積層板を製造した。その製造方法を Fig. 1 に示す。

積層板の製造には、各板材の積層表面をベンジンで脱脂し、ワイヤブラッシングを行い、表面の酸化物を除去した。そして、板材を 3 板に積層し、両端をステンレス線で縛定した後、大気中で 200°C に加熱し、圧延を行った。また、積層複合板における SPZ 体積率は、どちらの積層組み合わせにおいても、0 (鋼のみ)、25, 50, 75 及び 100% (SPZ のみ) の 5 段階とした。使用した圧延機は、ロール直径 300 mm, ロール周速 20 m/min であり、4~5 パスで圧延し、各パスとも圧延温度は 200°C として、最終的に全圧下率が 80% になるようにした。圧延後の積層複合板の板厚は、鋼-SPZ-鋼板で 0.5 mm 及び 0.8 mm, SPZ-鋼-SPZ 板で 0.8 mm である。

圧延後、SPZ の組織の調節をかねて、350°C・30 min の焼なまし処理をし、SPZ を層状組織にする試験片は、その後炉冷した。一方、粒状組織にする試験片は、焼入れし、2 相分解を完全に終わらせた後、200°C・20 min

Table 1. Properties of superplastic alloys.

Superplastic alloy		Superplastic occurrence temperature (°C)	Total elongation (%)
Name	Composition		
SPZ	Zn-22%Al	200~300	500~1500
SUP	Al-6%Cu-0.5%Zr	350~475	~1000
MS	Al-12.9%Mg <sub>2</sub> Si	480~550°C	100~300

Table 2. Properties of steels.

Steel	Chemical composition					Total elongation (%)
	C	Si	Mn	P	S	
SPCE	0.08	—	0.40	0.02	0.03	>40
SPHE	0.044	0.03	0.210	0.013	0.014	>35

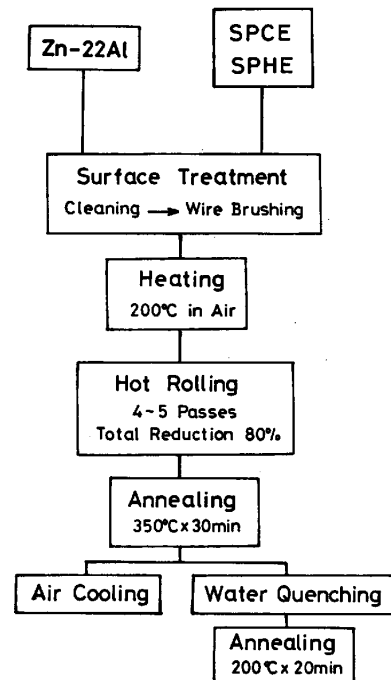


Fig. 1. Flow chart of the preparation for production of the composite sheets made by superplastic rolling/joining technique of steel-superplastic alloys.

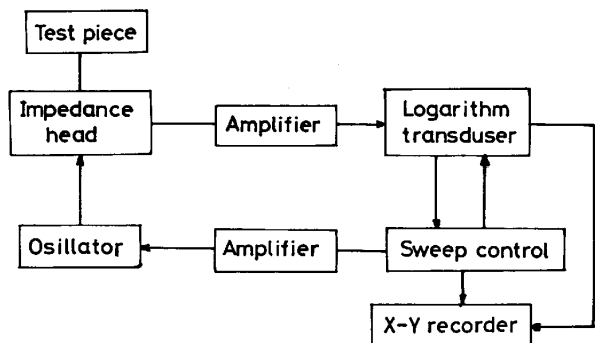


Fig. 2. Block diagram of the apparatus for measuring the damping capacity  $Q^{-1}$  at high temperature ( $\sim 250^{\circ}\text{C}$ ).

徐冷の加熱時効を行った。

次に、鋼と鋼の間に Al-6%Cu-0.4%Zr (SUP) または Al-12.9%Mg<sub>2</sub>Si (MS) を合わせ板にする積層複合板の製造は、Fig. 1 の鋼-SPZ 積層板の場合と同様であるが、各パスでの圧延温度を 300°C とした。圧延後には、各種温度 (450, 470, 500, 520 及び 550°C) で焼なましを行った。板厚は 0.8 mm である。

### 2.3 吸振能の測定

積層複合板の吸振能の測定として、内部摩擦  $Q^{-1}$  を測定した。250°C までの高温の内部摩擦測定には、機械的イナータンス共振付近の変動特性による方法 (半値幅法) を用いた。Fig. 2 にそのブロックダイアグラムを

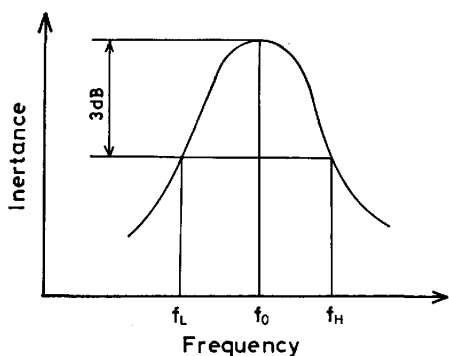


Fig. 3. Frequency characteristics for measuring the damping capacity at high temperature (~250 °C).

示す. 内部摩擦  $Q^{-1}$  値は, Fig. 3 に示すイナータンスがピークを示す共振周波数  $f_0$  と 3 dB 低い両側の周波数  $f_L$  及び  $f_H$  から, 次式のように計算した.

$$Q^{-1} = \frac{f_H - f_L}{f_0} \dots\dots\dots (1)$$

この高温用内部摩擦測定装置は, 高い内部摩擦 (0.05 以上) を測定することを目的としているため,  $Q^{-1}$  が 0.05 以下の値の測定精度はあまり良くない. 試験片寸法は, 幅 10 mm, 長さ 150 mm である.

常温での内部摩擦測定は, 幅 10 mm, 長さ 120 mm の積層複合板の試験片を用いて, 共振法 (周波数はすべて 2 次共振周波数) により行つた. 装置は, 加振器, 振動装置, 増幅器及び対数変換記録計より構成された BRÜEL & KJÆR 社製のものを使用した.

内部摩擦  $Q^{-1}$  は, 自由減衰させたときの振幅  $A = A_0 \exp(-\pi \cdot f \cdot t \cdot Q^{-1})$  より,  $t = 1(s)$  のときの減衰度  $D = 20 \log(A/A_0)$  を用いて, 次式より計算した.

$$Q^{-1} = 3.66 \times 10^{-2} \frac{D}{f}$$

ここで,  $A_0$ : 初期振幅  
 $f$ : 共振周波数

2.4 機械的性質測定

引張試験にはインストロン型万能試験機を用い, 鋼-SPZ 積層板では, クロスヘッド速度を 0.5 mm/min とし, その試験片寸法は, 平行部幅 10 mm, 平行部長さ 35 mm である. その他の積層複合板では, クロスヘッド速度を 5 mm/min とし, 試験片寸法は, 平行部幅 12.5 mm, 平行部長さ 50 mm である.

鋼-SPZ 積層板では, 2 次成形性を調べるため, エリクセン試験を行つた. その試験片は, 板厚 0.8 mm で 50 × 50 mm の寸法を有している.

3. 実験結果

Fig. 4 及び Fig. 5 は, SPZ の組織を粒状組織にし

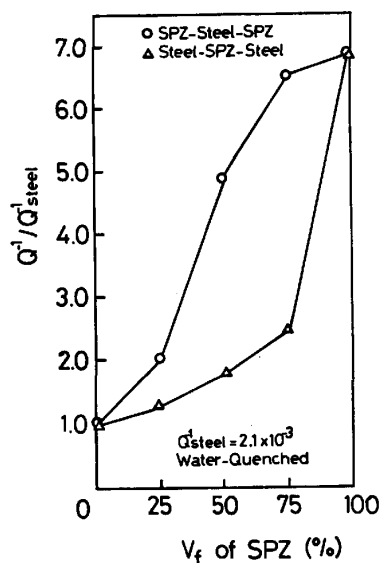


Fig. 4. Effect of the volume fraction of Zn-22%Al alloy (SPZ) in the granular structure on the damping capacity ratio of  $Q^{-1}/Q_{steel}^{-1}$  at room temperature.

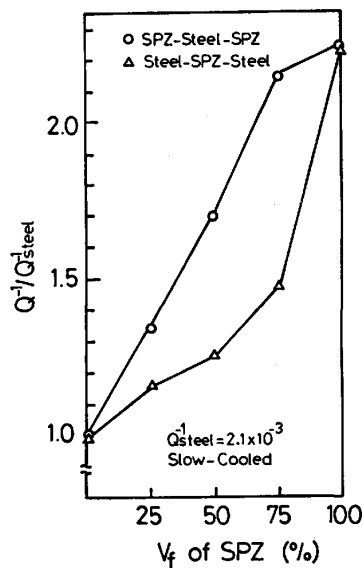


Fig. 5. Effect of the volume fraction of SPZ in the laminar structure on the damping capacity at room temperature.

た場合及び層状組織にした場合の積層複合板と鋼との室温における  $Q^{-1}$  値比を示す. 体積率との関係を見ると, いずれの組織においても, SPZ 体積率が増えるにつれて,  $Q^{-1}$  値は増加している. SPZ の組織の差によって,  $Q^{-1}$  値の大きさは著しく違い, 粒状組織のものは, 層状組織のものよりも大きな値を示した. また, 積層の組み合わせによって,  $Q^{-1}$  値の増加傾向に差が生じており, SPZ-鋼-SPZ 積層板は上に凸な, 鋼-SPZ-鋼積層板は下に凸な増加傾向を示している. このように

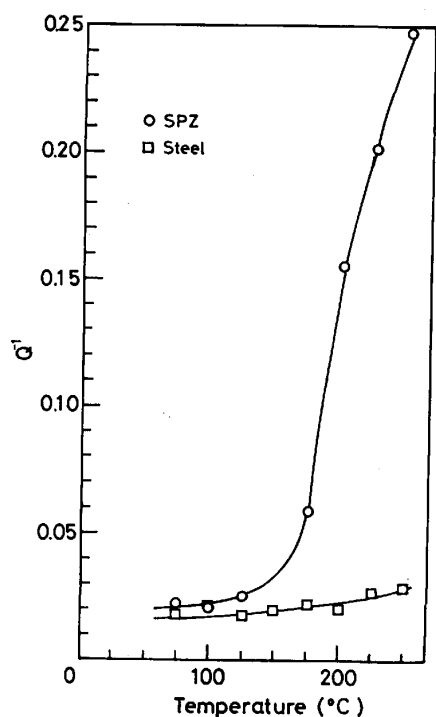


Fig. 6. Relationship between temperature and the damping capacity  $Q^{-1}$  of steel and SPZ in the granular structure.

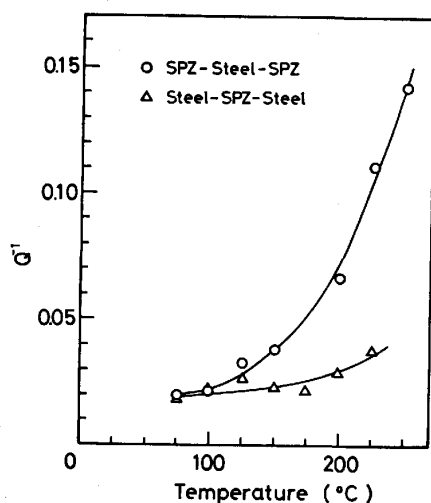


Fig. 7. Relationship between temperature and the damping capacity of SPZ-steel-SPZ and steel-SPZ-steel composite sheets. SPZ volume fraction of SPZ-steel-SPZ composite sheet is 40% and SPZ volume fraction of steel-SPZ-steel composite sheet 50%.

室温において、鋼に高い  $Q^{-1}$  値を示し吸振能の優れた SPZ を合わせ板にすることによつて、吸振能の高い複合構造材料を製造することができる。

次に、Fig. 6 に SPZ 及び鋼単独の  $Q^{-1}$  値の 250°C までの温度変化、Fig. 7 に鋼-SPZ-鋼及び SPZ-鋼-SPZ 積層板の  $Q^{-1}$  値の 250°C までの温度変化を

示す。SPZ-鋼-SPZ 積層板の SPZ 体積率は 40%、鋼-SPZ-鋼積層板の SPZ 体積率は 50% で、それぞれの SPZ の組織は粒状組織をしている。

Fig. 6 から SPZ 単体の  $Q^{-1}$  値は、100°C を越えると急激に増加している。これは、SPZ の特性である超塑性発現が  $Q^{-1}$  値に反映したものであり、SPZ 超塑性発現温度範囲の 200~300°C で  $Q^{-1}$  値が高くなっている。鋼単体の  $Q^{-1}$  値の温度変化はあまりなく、わずかな増加傾向を示している。Fig. 7 の積層複合板の  $Q^{-1}$  値温度変化は、SPZ-鋼-SPZ 積層板では SPZ 単体と同様に、100°C を越えると  $Q^{-1}$  値は急激に増加し、200°C を越えると  $Q^{-1}$  値は 0.1 を上回り、この温度域で非常に優れた吸振能を有する制振用鋼板になっている。鋼-SPZ-鋼積層板では、鋼が表面にクラッドされていることにより、 $Q^{-1}$  値の大きな増加は得られていない。

以上の結果から、粒状組織の SPZ 体積率 50% の SPZ-鋼-SPZ 積層板の  $Q^{-1}$  値は、室温での 0.01 の値から、200°C 以上での 0.15 までの約 15 倍増加していることがわかる。このように、高吸振能の超塑性金属と鋼とを圧延/圧接法により合わせ板にすることによつて、高温での使用に耐える制振用鋼板を作り出すことができることがわかった。

次に、製造した鋼-SPZ 積層板の室温での引張強さ及び伸びを Fig. 8 及び Fig. 9 に示す。引張試験片は、

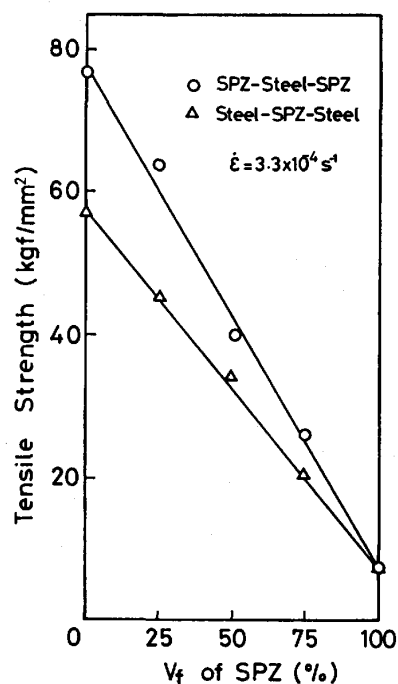


Fig. 8. Relationship between the tensile strength and the volume fraction of SPZ in the granular structure at a strain rate of  $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

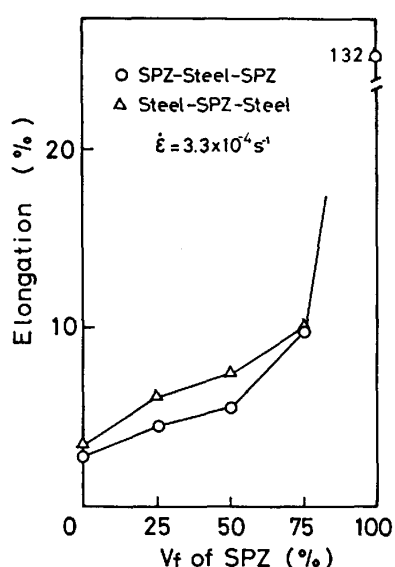


Fig. 9. Relationship between the elongation and the volume fraction of SPZ in the granular structure at a strain rate of  $3.3 \times 10^{-4}/s$ .

平行部幅 10 mm, 平行部長さ 35 mm で, その厚さは, 鋼-SPZ-鋼積層板で 0.5 mm, SPZ-鋼-SPZ 積層板で 0.8 mm とした. また, 用いた鋼材は, 鋼-SPZ-鋼積層板で, SPCE 材, SPZ-鋼-SPZ 積層板で SPHE 材である. 両積層板の SPZ の組織は粒状組織である. Fig. 8 の 2 種類の積層複合板の引張強さの差は, 用いた鋼 (SPCE 材, SPHE 材) の差によるものである. 引張強さは, 両積層複合板とも SPZ 体積率とともに減少し, SPZ 体積率との間には直線関係が成り立ち, 鋼と SPZ との引張強さの単純複合則が成り立つことを示している.

積層複合板の伸びは, Fig. 9 に示すように SPZ 単独以外は鋼の伸びに近い 10% 以下の低い値になっている. しかし, SPZ を鋼に合わせ板にすることにより, どちらの積層複合板においても鋼に比べ SPZ 体積率が増加するとともに伸びは増加している. これは, 鋼に SPZ を圧延/圧接した拘束により, 鋼の層の破断が妨げられているためであろう. このように全体に積層複合板の伸びが低い原因は, 鋼が 80% の圧下率まで大きな変形を受け, その後の熱処理によつては再結晶を起こさなかつたことにある.

この積層複合板の 2 次成形性を調べるため, 伸びが最も大きかつた SPZ 体積率 75% の積層複合板のエリクセン試験を行つた. その試験によつて得られたエリクセン値を Table 3 に示す. 比較のため, SPZ 単独, 積層複合板と同じ履歴を受けた鋼及び焼なまし鋼の値をも示した. 積層複合板の場合, 板厚全体にき裂が入る前に鋼の層だけにき裂が入り, このときのエリクセン値 (Table 2 では, その値を ( ) で表示) は, 同じ履歴を受けた鋼単独のものと同じである.

このように, 焼なまし鋼に比べ, 加工履歴の影響が残っている鋼では成形性は低く, 軽度の 2 次成形しか期待できない. 積層複合板の成形性も, この鋼の成形性に拘束されているので, 高度の 2 次成形が困難な板材になっている. このため, 2 次成形性の高い鋼-超塑性合金積層板としては, 積層複合板に焼なましを行い, 鋼を再結晶させる必要がある. SPZ を合わせ板にする限り, SPZ の融点が鋼の再結晶温度よりも低いため, 熱処理による成形性の改善は期待できない. そこで, SPZ より融点の高い超塑性合金を合わせ板にすることによつて, 高い 2 次成形性を有する高温用制振用鋼板が可能となる.

このため, 圧延/圧接した積層複合板の鋼を再結晶させるため, Al 系超塑性合金 (Al-6%Cu-0.4%Zr (SUP), Al-12.9%Mg<sub>2</sub>Si (MS)) を積層した複合板について検討した. 鋼 MS 超塑性合金積層板の焼なまし温度と引張強さ及び伸びとの関係を Fig. 10 及び Fig. 11 に示す. それぞれの MS 超塑性合金の体積率は 50% とした. 試験片は, アルゴン雰囲気中に各種温度で 2 h 焼なまし後空冷したものを用いた. 比較のために, 同じ履歴を受けた鋼単独の結果をも示した.

鋼-SUP 積層板では, 圧延/圧接によつて接合した界面が 500°C 以上の焼なましを行うと, 引張試験中に界面で分離する現象が現れ, 成形性のよい板材としての機能が失われた. これは, 焼なましにより 鋼-SUP 界面にもろい Fe<sub>3</sub>Al 合金が生成したことによるものと思われる<sup>4)</sup>. 鋼-MS 積層板では, 伸びは焼なまし温度とともに増加し, 引張強さは低下している. 470°C 以上の焼なまし処理を行うことにより, 2 次成形性を有する積層複合板を製造できることがわかつた. この組み合わせの積

Table 3. Erichsen values of steel, SPZ and composite sheets. ( ) means the Erichsen values when the steel layer of composite sheets ruptures.

	steel-SPZ-steel composite sheet	SPZ-steel-SPZ composite sheet	Annealed steel	Same steel of composite sheet	SPZ
Erichsen value	8.1 (6.7)	7.4 (6.7)	12.0	6.7	16.9

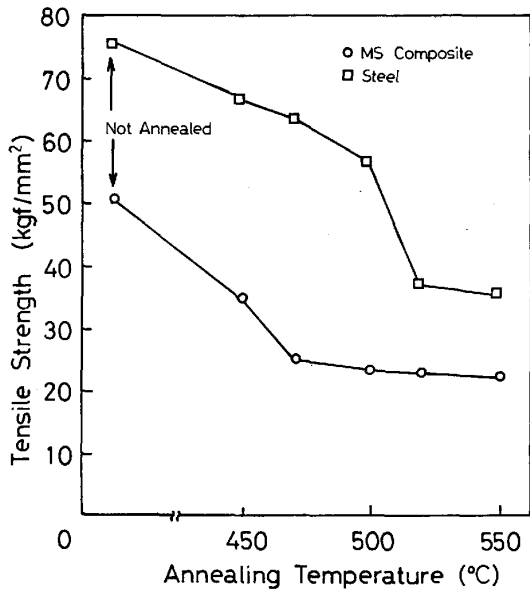


Fig. 10. Effect of the annealing temperature on the tensile strength of steel and Al-12.9% $Mg_2Si$  composite sheet.

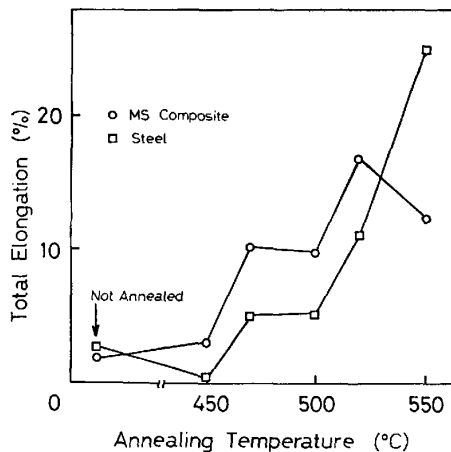


Fig. 11. Effect of the annealing temperature on the total elongation of steel and Al-12.9% $Mg_2Si$  composite sheet.

層複合板は、鋼とMSとの界面が引張変形中に分離することなく、成形性を有した高温用制振材として有効である。

#### 4. 考 察

積層複合板を製造するための板材の表面処理法としては、ワイヤブラッシング、ミーリングによる機械的清浄法及び酸、アルカリによる化学的清浄法が考えられる<sup>5)</sup>。ここでは、工業的な生産性を考え、ワイヤブラッシングによる表面処理法を選んだ。また、その方法はワイヤブラッシングにより表面の酸化膜が除去され、再びそれが形成する前に接合を行うことができること、及び

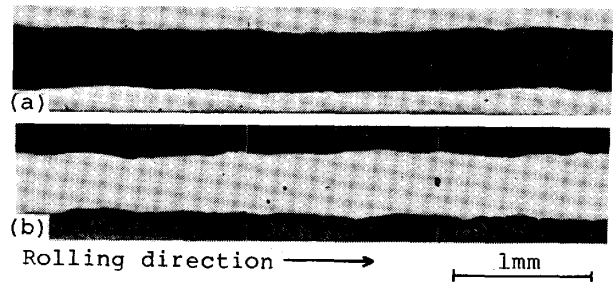


Photo. 1. Optical micrographs of the cross section of steel-SPZ-steel (a) and SPZ-steel-SPZ (b) composite sheets.

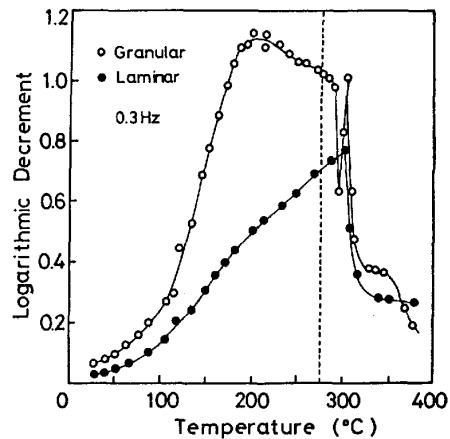


Fig. 12. Relationship between temperature and the logarithmic decrement of SPZ in granular and laminar structures (NUTTAL<sup>8)</sup>).

ワイヤブラッシングにより表面に硬い層が形成され、接合時に両面の硬い層が一つになって破壊し、新しい接合金属面が広く得られるという利点がある<sup>6)</sup>。このワイヤブラッシング法のほかに、エメリー紙による酸化膜除去を試みたが、表面からの金属粉末の除去が困難であるため接合性は良くなかった。また、ワイヤブラッシングの後にベンジンで清浄した場合も接合性は良くなかった。

圧延/圧接法によつて接合された積層複合材の界面は、Photo. 1 に示すように軽い rippling が観察される。これは、SPZ 体積率 50% の鋼-SPZ-鋼及び SPZ-鋼-SPZ 積層材で、腐食により黒く見えるところが SPZ 層である。このように rippling が起こる原因は、圧延温度 200°C において SPZ が超塑性を発現し、変形抵抗が低く、伸びが大きくなり、鋼との間に大きな差が生じ、一方の金属の伸びに他方の金属の伸びが追従しないため発生したものである<sup>7)</sup>。この rippling の発生をできるだけ抑えるため、圧延/圧接の後半のパスの圧下量を小さくした。

SPZ の内部摩擦の温度依存性は、NUTTAL<sup>8)</sup> により調べられており、Fig. 12 に示すように内部摩擦の増加

は、SPZ の超塑性発現温度に対応している。粒状組織の場合は、約 200°C のピークに向かつて急激に増加し、層状組織の場合は、共析点のピークまで比較的ゆるやかに増加している。いずれの場合も共析点を過ぎると急激に低下している。この機構としては、粒状組織の場合には結晶粒界での可逆的すべり、層状組織の場合には coupled relaxation が考えられる<sup>7)</sup>。この SPZ の内部摩擦の温度依存性が、積層複合板の吸振能に大きな影響を与えている。

鋼-SPZ 積層板では、SPZ の融点の関係で圧延後の熱処理によつても鋼に再結晶を起こさせることはできない。このように焼なまし鋼に比べ、加工履歴の影響が残った鋼を合わせ板にした積層複合板では、成形性が乏しく、2次成形には限度がある。この種の積層複合板で2次成形性を上げるためには、圧延/圧接の全圧下量を少なくする方法、例えば、板材の表面の清浄度を非常に高くして真空圧延するか、鋼の表面に機械的に SPZ 層をつけるか SPZ 粉末を機械的に付着させるかさせて SPZ 板と圧延/圧接するなどの方法を採用すると良い。

鋼-MS 積層板では、鋼を再結晶させる焼なましが可能である。焼なまし温度に対する引張強さの変化から 470°C 以上から、引張強さは低下し2次成形性を有することが示された。この際の鋼単独の再結晶挙動については、Fig. 10 及び Fig. 11 に示してある。ここでは、鋼を積層複合板を製造するのと同じ履歴で圧延し、アルゴン雰囲気中に各種温度 (450, 470, 500, 520 及び 550 °C) で 2 h 焼なまし後空冷の熱処理を施し、引張試験より得られた結果を示す。鋼の引張強さは、500°C 以上の焼なましで急激に低下し、550°C で完全に再結晶していることがわかる。積層複合板の場合には、鋼単独の引張強さが低下する焼なまし温度よりも少し低い温度から引張強さは低下し、2次成形性を有している。

鋼-SUP 積層板のように、焼なまし処理によつて、積層界面にもろい層が生成しやすい場合には、鋼板の圧接

面にニッケル、銅またはコバルトなどのめつきを施すか、機械的に凝着層を被装する<sup>9)</sup>とよい。

## 5. 結 言

鋼と超塑性合金とを積層状に重ね合わせた積層複合板を圧延/圧接法によつて製造し、その吸振能及び機械的性質を調べ、次の結論を得た。

1) 鋼と粒状組織の Zn-22%Al 合金 (SPZ) との積層板は、高い吸振能を示し、特に、SPZ の超塑性発現温度範囲では、非常に高い  $Q^{-1}$  値が得られ、高温での使用に耐えうる制振用鋼板となりうる。

2) 鋼-Al-Mg<sub>2</sub>Si 合金 (MS) 積層板は、圧延/圧接した鋼を熱処理により再結晶させることが可能となり、2次成形性を有する高温用制振用鋼板となりうる。

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、日本鋼管(株)技術研究所田辺修吾氏、新日本製鉄(株)第一技術研究所松尾宗次氏、実験に御協力いただいた当時東京大学工学部学生馬目俊一君、近藤宏一君、試料を御提供いただいた三菱アルミニウム(株)に深く感謝の意を表します。

なお、本研究は、文部省科学研究費 (一般研究 C)、軽金属奨学会研究補助金によつたことを付記する。

## 文 献

- 1) 宮川松男, 小豆島明: 特許公報 56-069387
- 2) 超塑性と金属加工技術(超塑性研究会編) (1980) [日刊工業新聞社]
- 3) 小西健司, 参木貞彦: 塑性と加工, 19 (1978), p. 814
- 4) 平野賢一, 菱沼章道: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 591
- 5) 橋本達哉: 日本金属学会会報, 13 (1974), p. 410
- 6) 浅野祐一郎: 東北大学学位論文 (1976)
- 7) 山路賢吉: 金属材料, 9 (1969), p. 98
- 8) K. NUTTAL: J. Inst. Met., 99 (1971), p. 268
- 9) 星野弘之: 特許公報 40-28332