

# 繰り返し複合負荷を用いたアルミニウム合金の拡散接合

徳田正孝\* 吉田弘明\*\* 土井義秀\*\* 稲葉忠司\*\*\* 鈴木実平\*

## 1. ま え が き

航空・宇宙、自動車などの輸送機器分野では、機器構造物の軽量化、リサイクル化といった観点からアルミニウム合金に対する期待はかねてより極めて高いが、鉄鋼材料にとって代わるには程遠い状況にある。この原因の一つにアルミニウム合金の接合性の悪さをあげることができる。そこで本研究では新たな接合法開発にスポットをあてた。

さて、アルミニウム合金をアーク溶接などの融接によって接合する際、熱伝導率、熱膨張係数が高いため生じる熱変形や残留応力、表面に付着している強固な酸化膜によって生じるブローホールやバルク欠陥が大きな問題となる。しかしこれらの現象は、融接を行う場合不可避と考えられ、この改善は容易ではない。一方、一般に高品位に接合可能といわれる拡散接合[1]をアルミニウム合金に適用する場合、強固で熱的に非常に安定(融点 2040℃)、かつ母材に固溶しない酸化皮膜がここでも問題となる。接合力を上げるためには、厳格な表面処理[2,3]と接合環境[4]を用意すれば良いわけだが、実際の接合現場においてこれらの条件を満足することは、非現実的である。さらに、この場合も一般に融点近くまで加熱する必要があり、合金元素が添加されたものや異種金属との接合の場合脆弱な金属間化合物を形成してしまうなどの問題が加わる。

本研究では、上記のような状況を踏まえ、できるだけ低温で高品位にアルミニウム合金を接合する事を目的として、とくに酸化皮膜を効果的に接合過程中に破壊、分散、微細化させるため、接合圧力に加えて繰り返しせん断応力を負荷する、繰り返し複合負荷利用拡散接合法を提案する。また、繰り返しせん断応力の負荷は、高密度転位を発生させるため接合面近傍のエネルギー状態は極めて高くなり、接合温度の低下、接合時間の短縮が期待できる。

ここでは、アルミニウム合金の拡散接合に対する繰り返し複合負荷効果に関する実験結果、またアルミニウム合金と異種材料(ここでは銅合金)との拡散接合の可能性について報告する。

## 2. 実 験 方 法

### 2.1 試験片材料および形状

試験片には、Mg を 4.6% 含んだアルミニウム合金の中空円筒を用いた。その化学成分と試験片形状を表 1 および図 1 に示した。また、接合面の表面処理については以下の 2 種類を採用した。

表面処理 I : 旋盤加工後にエメリー紙 (1000 番) で研磨した後、アルミナ粉でバフ研磨。

表面処理 II : 旋盤加工後にエメリー紙 (1000 番) で研磨した後、電解研磨 (エタノール 20% 過塩素酸水溶液, 15V, 120sec)。

### 2.2 実験装置

実験装置には、環境制御型複合負荷試験機 (島津製作所製オートグラフ AG10TS) を用いた。この装置は軸荷重 (あるいは軸変位) とトルク (あるいはねじれ角) をそれぞれ独立してパーソナルコンピュータにより制御する事ができる。また、アルゴンガスを満たすことのできる電気炉を具備しており、これにより最大 1100℃ まで昇温可能である。その概略を図 2 に示した。

表 1 化学成分 (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.16	0.18	0.05	0.07	4.46	0.07	0.02	balance

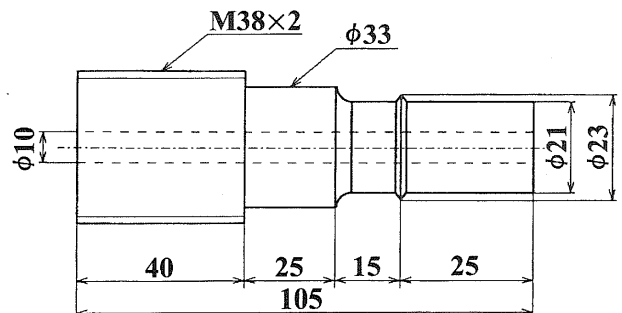


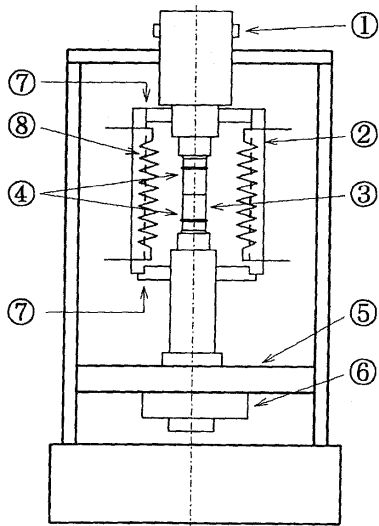
図 1 試験片の形状

### 2.3 実験プロセス

初めに、アルゴンガス雰囲気中において予備軸圧縮応力 ( $P_0$ ) 2.0MPa を加えながら接合温度 ( $T_1$ ) 330°C まで 2 時間をかけ加熱した。その後、その温度、選択されたいくつかの一定軸圧縮応力 ( $P_1$ ) の下で、回転速度 9.0deg/min, 振幅  $\pm 5.0$ deg で繰り返しせん断荷重を与えた。その後、軸圧縮応力 ( $P_2$ ) 19MPa を ( $t_2=$ )120min 間保持した後、炉冷した。また、接合強度の評価は、ひずみ速度  $d\varepsilon/dt=3.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$  の単軸引張試験により行った。

### 3. 実験結果

表面処理 I (バフ研磨) を施した試験片に対し、種々の一定軸圧縮応力  $P_1$  (6.5MPa, 13MPa, 19MPa) の下で繰り返しねじり荷重を与えた場合の実験結果 (引張強度  $T$ ) を図 3 に示す。図からわかるように、 $P_1=6.5$  および 13MPa の場合、繰り返しせん断荷重に関わらず接合力は低いが、 $P_1=19$ MPa の場合、ねじり回数  $N=2$  回以降においておおよそ 90MPa に及ぶ接合強度  $T$  が得られている。この結果より、繰り返しせん断応力負荷の接合強度  $T$  に対する有効性が確認できる。ただし、ねじり回数  $N$  の増加による結合力の強化は期待できないことも確認された。図 4 には、効果的であった  $P_1=19$ MPa 近傍の一定圧縮応力 ( $P_1$ ) 17, 18, 19, 20MPa を選択して接合強度を調べた結果を示している。これらの結果より、軸圧縮応力  $P_1$



①軸力ロードセル, ②電気炉, ③熱電対, ④試験片, ⑤クロスヘッド, ⑥ねじり用モーター及びロードセル, ⑦絶縁用ウール, ⑧ヒーター

図 2 ねじり-軸力組み合わせ負荷装置

の増加による接合力のこれ以上の増加はあまり期待できない。なお、母材の降伏応力  $\sigma_y$  は 110MPa, 引張強度  $T$  は 290MPa である。

図 5 は、表面処理 II により得られた引張強度  $T$  の実験結果を示している。この図から、引張強度  $T$  は、表面処理 I に比べて、表面処理 II の方がかなり改善されていることが確認できる。すなわち、軸圧縮応力  $P_1$  の増加と共に引張強度  $T$  は増加し、 $P_1=20$ MPa 以上では母材の降伏応力 (110MPa) を超えている。しかし、引張強度 (290MPa) にはなお遠く及ばない。ここまでの主たる結果を図 6 にまとめて示した。繰り返しせん断応力を加えなかった場合、その接合力は極端に低いことから、繰り返しせん断応力の効果は明らかである。繰り返しせん断荷重を加えた表面処理 I の場合、いずれ母材の弾性領域応力で破断しており、いわゆる脆性破壊である。一方、表面処理 II の場合、その接合強度は母材の降伏応力を超え、塑性変形を伴い破断している。

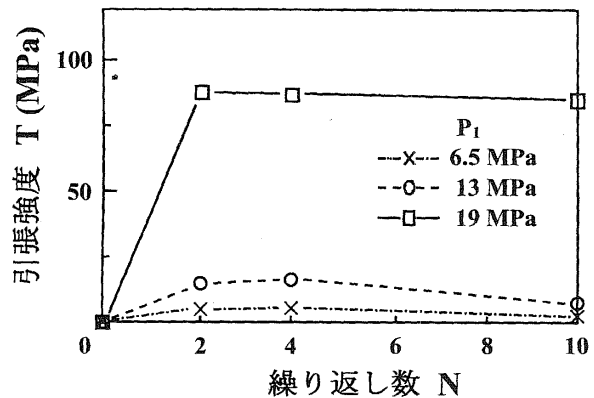


図 3 繰り返しせん断応力の効果 (表面処理 I) (a)

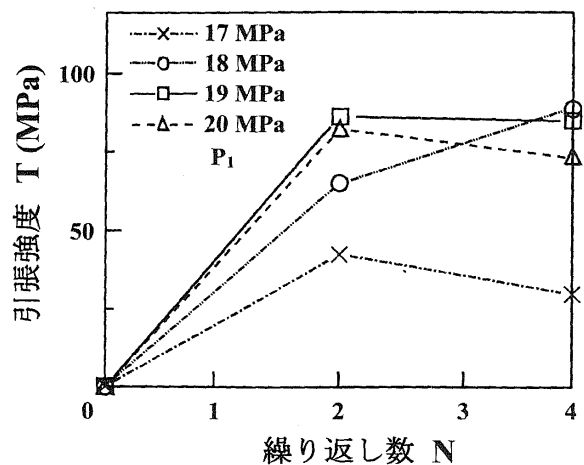


図 4 繰り返しせん断応力の効果 (表面処理 I) (b)

また、破断面の顕微鏡観察から塑性変形の発生を示すディンプルが確認された。この破断面の観察から、円筒試験片外周側と内周側のわずかな領域に未接合部と思われる領域が確認された。このわずかな領域を機械加工により除去した場合の強度をあわせて図6に示した。この場合、引張強度Tはおおよそ230MPaに達しており、母材強さ290MPaにかなり近づいている。さらに、図7に母材自身、および未接合部分を除去した試験片の引張応力-ひずみ関係を示したが230MPa（接合試験片の破壊）までは互いに良く一致している。以上の結果より、アルミニウム合金の拡散接合に関し、せん断応力の効果は極めて大きいと判断できる。

#### 4. 異種材料との拡散接合

##### 4.1 接合強度

ここではアルミニウム合金と異種材料（ここでは黄銅を選択した）との接合性に対する繰り返しせん断応力効果を調べるため、Al-4.8Mg合金（JIS:A5056）とCu-Zn合金（JIS:C1100）の接合実験を行った。一般にアルミニウム合金と銅合金を拡散接合した場合、接合温度が高温となるため、接合面には金属間化合物が生成してしまい、得られる引張り強度は20~30MPa程度と極めて低いといわれている。

図8に、Al合金とCu合金の接合実験の結果を示す。このときの接合条件は、接合温度 $T_1=330^{\circ}\text{C}$ （接合圧力 $P_1=25\text{MPa}$ ）および $T_1=360^{\circ}\text{C}$ （接合圧力 $P_1=23\text{MPa}$ ）、ねじり回数 $N=0$ 及び4、その後の保持接合圧力 $P_2=25\text{MPa}$ 、接合保持時間 $t_2=10\text{min}$ ,  $120\text{min}$ , 及び $240\text{min}$ である。図からわかるように、繰り返しねじり負荷の効果は明らかであるが、このとき得ら

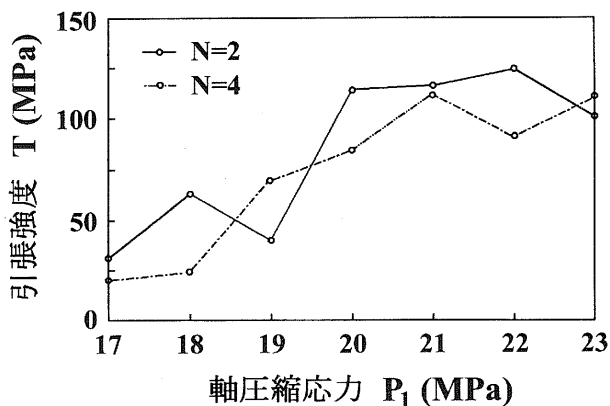


図5 引張強度T-軸圧縮圧力 $P_1$ 関係（表面処理II）

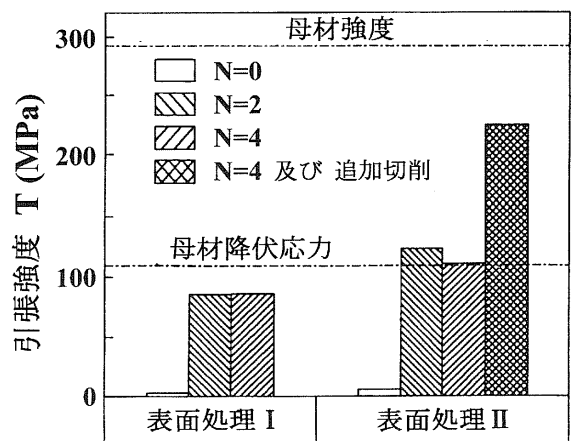


図6 アルミ合金接合実験のまとめ

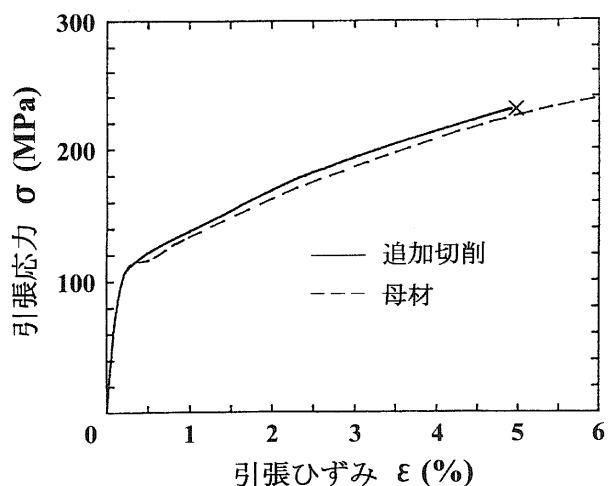


図7 付加加工を施した接合試験片の引張応力-ひずみ関係

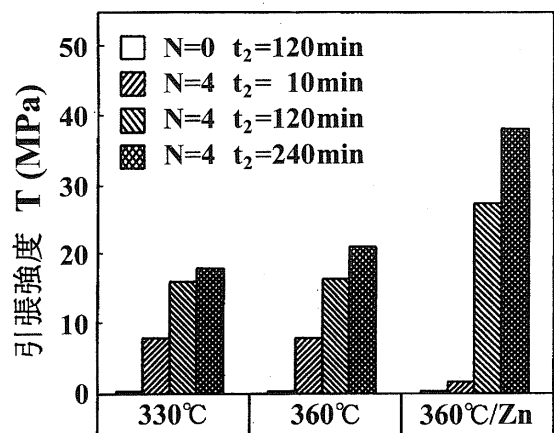


図8 異種材料間の接合実験結果

れた引張り強さは最高21MPaと非常に低い値である。これは330℃あるいは360℃という比較的低温においても接合面に極めて脆弱な金属間化合物が生成されたものと考えられる。そこで、金属間化合物生成の抑制のためAl合金およびCu合金の両者に対し固溶度の高い亜鉛Zn(0.5mmZn箔)をインサート材として用いた。図8の右側に示した棒グラフがその結果を示している。この時の接合条件は、接合温度 $T_1=360^\circ\text{C}$ 、接合圧力 $P_1=23\text{MPa}$ 、その後の接合保持圧力 $P_2=25\text{MPa}$ 、接合保持時間 $t_2=10, 120, 240\text{min}$ である。ここでせん断応力の効果およびインサート材の効果は極めて顕著ではあるが、得られた引張強度 $T$ は40MPa程度に留まっており(アルミニウム合金の降伏応力の1/3程度であり)、更なる改善が望まれる。

#### 4.2 接合面の顕微鏡観察

Al-Mg/Cu-Zn接合について、ねじり負荷およびインサート材(亜鉛シート)の効果調べるために光学顕微鏡、SEM、X線解析、およびEPMA分析を行った。図9にインサート材を用いずに4回ねじりを加えた後、さらに360℃で240min間保持して接合した試料の接合面(Cu-Znのみ粒界腐食が施されている)の光学顕微鏡写真を示す。これらの写真から、接合面の密着性はかなり良好と判断できる。この密着性は繰り返しねじり負荷の効果と考えることができる。しかし、X線解析の結果から、金属間化合物( $\text{Al}_2\text{Cu}_3$ )の存在が確認された。この金属間化合物が脆弱なため、引張り試験を行ったときにこの面から破壊し、引張強度もこの金属間化合物の強さで決定されるものと考えられる。

図10(a)に、厚さ0.5mmのインサート材(Zn箔)を用いて1方向に30degのねじりを加え、360℃で240min保持して接合した試験片の接合面、図10(b)にねじりを加えずに360℃で240min保持して接合した試験片の接合面の光学顕微鏡写真を示す。両方の写真とも黄銅と亜鉛の間に反応層が見られる(これはEPMA分析により、Cu-Zn系の $\gamma+\epsilon$ 層であることが確認された)。いずれも、接合面の密着性は良好である。このことは、インサート材が密着性の改善に役立っていることがわかる。しかし、図8からわかるように、ねじりのある場合と無い場合には強度に大きな差がある。図11(a)および(b)に、Al-Mgと亜鉛層の接合部の高倍率光学顕微鏡写真を示す。2つの写真の比較からわかるように、ねじりを加えた場合には、明確な拡散層②があるが、加えなかった場合には殆ど拡散層が無い。この差が強度に大きな影響

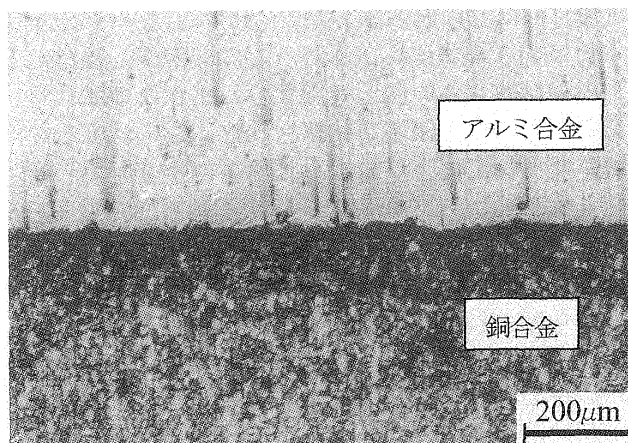


図9 アルミ合金—銅合金間の接合部顕微鏡写真

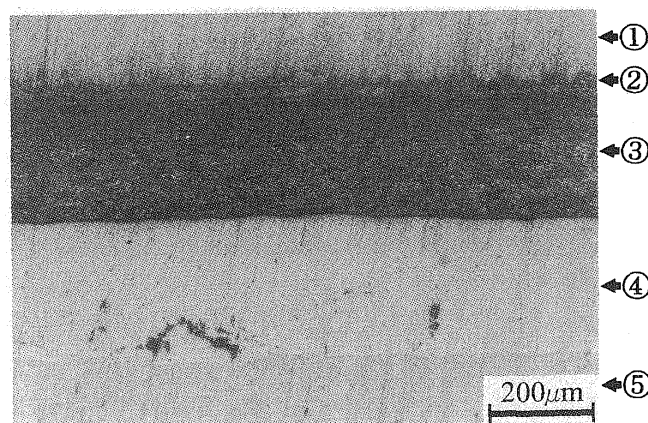


図10(a) インサート材にZnを用いたアルミ合金—銅合金間の接合部顕微鏡写真(繰返しせん断応力あり:①Al-Mg, ②Al-MgとZnとの反応層, ③Zn, ④ZnとCu-Znとの反応層, ⑤Cu-Zn)

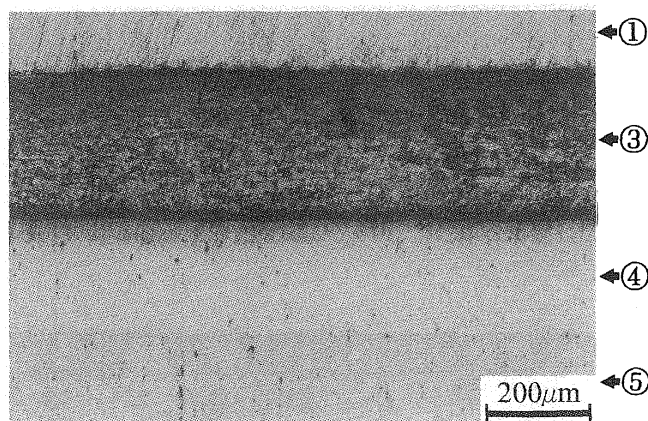


図10(b) インサート材にZnを用いたアルミ合金—銅合金間の接合部顕微鏡写真(繰返しせん断応力なし:①Al-Mg, ③Zn, ④ZnとCu-Znとの反応層, ⑤Cu-Zn)

を与えていると考えられる。接合面における同様の相互拡散相はアルミニウム合金同士の接合でも観察されている。

### 5. おわりに

接合性の良くないアルミニウム合金の接合に対し、複合負荷（圧縮応力とせん断応力の組み合わせ）が極めて有効であることが示された。アルミニウム合金と異なる合金との接合についても、複合負荷は有効であることが示されたが、金属間化合物の生成との関連においてインサート材の適切な金属学的選択、接合時間、接合温度条件の更なる検討が重要と判断された。なお本研究の詳細なデータについては、文献[5-8]を参照されたい。

終わりに、本研究の一部は財団法人天田金属加工機械技術振興財団から研究助成を受けてなされたものであることを記し、深く謝意を表します。

### 参 考 文 献

- [1]大橋, 金属, Vol.56, No.7, p.14 (1986)
- [2]園城, 他2名, 軽金属, Vol.35, No.7, p.58 (1989)
- [3]園城, 他2名, 軽金属, Vol.35, No.7, p.115 (1989)
- [4]高橋, 他5名, 軽金属, Vol.55, No.9, p.109 (1991)
- [5]吉田, 徳田, 日本機械学会東海支部 41 期総会講演論文集, Vol.923, No.1, p.43 (1992)
- [6]吉田, 徳田, 日本機械学会東海支部三重地方講演会, No.923-2, p.142 (1992)
- [7]土井, 徳田, 日本機械学会東海支部岐阜地方講演会講演論文集, No.943-2, p.147 (1994)
- [8]吉田, 三重大学大学院工学研究科, 平成4年度修士論文
- [9]土井, 三重大学大学院工学研究科, 平成8年度修士論文

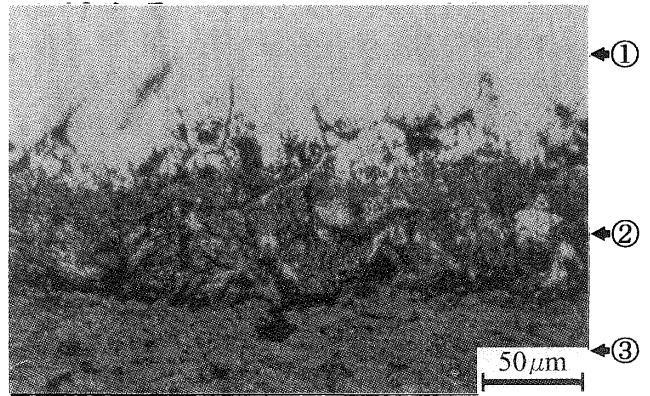


図 11(a) Zn とアルミニウム合金接合部の顕微鏡写真（繰返しせん断応力あり：①Al-Mg, ②Al-Mg と Zn との反応層, ③Zn）

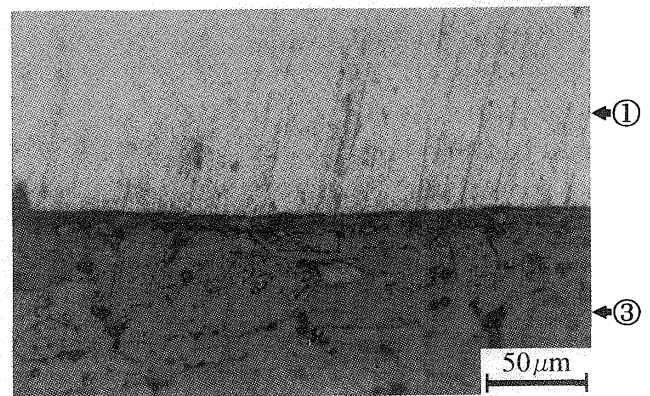


図 11(b) Zn とアルミニウム合金接合部の顕微鏡写真（繰返しせん断応力なし：①Al-Mg, ③Zn）