

# 金属箔インサートによるA6061合金の拡散接合

安藤 正 昭・宮野 泰 治・進藤 錦 悦  
伊藤 忠\*・菊地 賢\*\*

## Diffusion Bonding of A6061 Aluminum Alloy using metallic foil as insert metal

Masaaki ANDO, Taiji MIYANO, Kinetsu SINDO, Tadashi ITO, Ken KIKUCHI

(平成3年10月31日受理)

Al-Mg-Si series A6061 alloy has been diffusion-bonded at temperature of liquid and solid phase coexist region by applying metallic foil (Cu, Zn and Ag) as insert metal, to investigate the effect of foil diffusion on the bond strength.

Insert metal diffused to a great extent in the base metal and formed solid solution, eutectic and intermetallic compound respectively, that was provided by hardness distribution and EPMA in the vicinity of bond interface. Bond strength were attributed to the hardness of interface, that is, Cu inserted bond offered advantages in other insert metals.

Effect of thickness on bond strength has been examined for various thickness (2~10 $\mu$ m) of Cu foil. Joint were fractured at bond interface and at Al-Cu intermetallic compound formed on fractured surface. The thinner Cu foil provided the stronger bond. The results support presumption that proper quantity of Cu diffusion is probably present the bonding condition.

### 1. 諸 言

拡散接合は、接合面間に生じる原子の拡散を利用して固相状態で接合する方法であり、最近、異種材料間(特に金属とセラミックスなど)の接合で注目されている。材料を溶融しないということで機能材料の接合にも構造材料の接合にも適用される。しかし、接合部の強度に関しては、一般的な溶融溶接と比較してまだ問題が残るようである。そこで拡散接合継手の強度を改善するために、インサート材料と呼ばれ接合面間に異なる材料を挿入して接合する場合もある。本研究で用いたインサート材のZnは、各種金属との濡れ性も良く、超々ジュラルミンと呼ばれる7000番系の高力アルミニウム合金も、Al-Zn系の時効硬化性合金である。また、Agもロウ材として広く用いられている。アルミニウム合金における拡散接合では、固液共存温度域において母材に液相を形成して良好な接合継手が得られている。<sup>1)2)</sup>

A6061合金は時効硬化性のアルミニウム合金であり、同じAl-Mg-Si系のA6063合金に関連して、Cu, Ag, Tiなどのインサート材を用いて継手強度を向上させた報告もある。<sup>3)4)</sup>そこで、Mg, Si量がさらに多いA6061合金について、接合温度を固液共存温度とし、CuおよびAg箔インサート材の継手強度におよぼす影響を調べた。

### 2. 実験方法

本研究に用いた母材は、A6061合金であり、化学組成を表1に示す。インサート金属として、厚さ

A6061 ALLOY

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
.71	.14	.19	.02	.98	.08	.10	.01	Bal.

wt. %

表1 供試材料の化学成分

現在\*ソニー(株)(東京都), \*\*TDK(株)(秋田県仁賀保町)

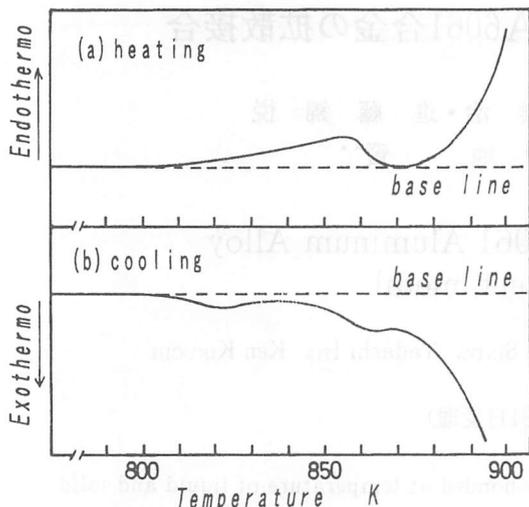


図1 A6061合金のDTA

10 $\mu$ mCu 箔 (純度99.9%), 25 $\mu$ mZn 箔 (純度99.9%) および10 $\mu$ mAg 箔 (純度99.98%) が用いられた。接合試片の形状は直径20mm, 長さ40mmの丸棒で, 端面を旋盤加工後に20%過塩素酸エタノール溶液中で電解研磨し, アセトン中で超音波による脱脂洗浄を行ってから直ちに拡散接合した。拡散接合の装置および手順は前報<sup>6)</sup>に述べたものと同様である。すなわち, 接合部の加熱にはモリブデン箔の抵抗発熱体を用い, 接合圧力は油圧プレスによって加えた。また, 接合雰囲気は $2 \times 10^{-2}$  Pa程度の真空である。接合温度は接合界面から約2mmはなれた試片の側面にパーカッション溶接したCA 熱電対によって測定し, 所定の温度を制御した。

継手の機械的性質は, 室温での引張試験によって評価した。引張試験片は継手から旋盤加工した丸棒試験片で, 平行部直径8mm, 平行部長さ32mmである。引張試験はインストロン型試験機を用い, 引張速度1.0mm/min. で測定した。接合部の組織観察には, バーカー氏液を使って試料を電解研磨した。A6061合金の固相線温度を調べるために, アルミナ粉末を標準として, 示差熱分析を行った。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3・1 A6061合金の固相線温度

本研究で用いたA6061合金の固相線温度を調べるために大気中で加熱, 冷却速度をいずれも10K/min. として, 示差熱分析 (DTA) を行った。図1 (a) は室温から930K まで加熱中の示差熱分析の結果を示したものである。805K 付近から吸熱反応が

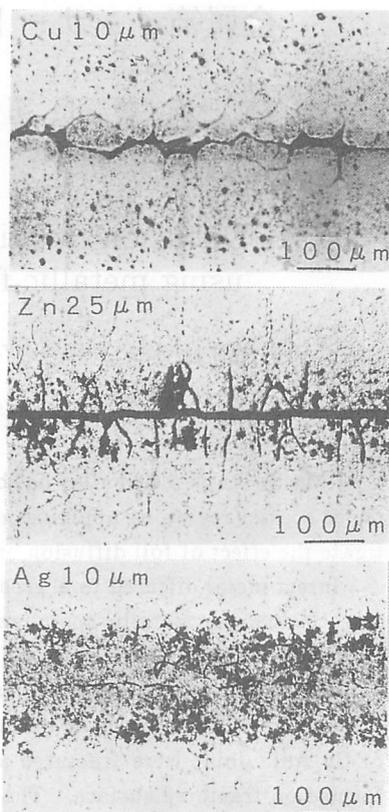


写真1 接合界面の組織

認められる。従って, 本研究に用いられたA6061合金においては, 805K 付近から液相が形成され始めるものと考えられる。しかし, この吸熱反応のピークは小さく, この温度域での液相量の顕著な増加はないものと考えられる。むしろ, 873K 以上の温度で液相量が大きく増加していくものと考えられる。一方, 図1 (b) に示すように, 冷却中には795K 付近まで発熱反応が続く。この結果は冷却中には過冷却のために795K 付近まで液相が存在することを示している。本研究では接合後の冷却過程における凝固割れの発生を抑制するために, 液相が消滅すると思われる795K まで接合圧力を保ち, 凝固収縮に起因する引張応力の発生をできるだけ打消すようにした。なお, 液相量については特別調べていない。

#### 3・2 接合界面の組織

固液共存温度域で接合部に液相を形成して行う拡散接合継手の強度は大きく改善される。<sup>1) 2)</sup> そこで, 3・1のDTA 結果から, 本研究に用いるA6061合金の接合温度は875K とした。また, 接合圧力および接合時間は, それぞれ0.98 MPa, 30分間とした。

金属箔インサートによるA6061合金の拡散接合

拡散接合では、継手の強度を得るために、母材に固溶するインサート材、母材と共晶点をもつインサート材あるいは接合界面に生成する化合物を増したり抑制するためのインサート材などが用いられることがある。そこで、本実験では、固溶度を持ち、さら共晶点をもつことに着目し、Cu, Zn およびAgをインサート材として選んだ。平衡状態図によるとAl-Cu系では、Al側でもCu側でも固溶体を作り、4種以上の化合物ができ、Al側の821Kに $\theta$ 化合物との共晶点がある。

Al-Zn系では、Al, Znともお互いに固溶体を作り、655Kに共晶点がある。Al-Ag系においても、双方で固溶域を有し、常温では2つの化合物を作り、839KでAl側に $\zeta$ 化合物との共晶点を有する。本実験の接合温度875Kは、これらのいずれの共晶点よりも高温となるので、各インサート材とA6061合金の液相化により、相互の拡散が充分に期待される。

Cu, Zn およびAgインサート材による接合界面近傍の組織を写真1に示す。市販のもので25 $\mu$ m以下のZnは入手できないので、Zn箔、Ag箔の10 $\mu$ m厚さと不揃である。CuとAgはさらに薄いものもあるが、Znとの比較のために、とりあえず10 $\mu$ mの厚さを用いた。Cu箔インサートの場合、界面の黒く見える部分はCuである。Cu箔はほとんど界面に残っているが、界面から粒界に沿って、また、母材側の粒内にも黒い点状に見えるのがCuであると推察される。Zn箔インサートでは、Znが界面に残っているのが認められるが、粒界の黒い部分はCuの場合に比較してかなり幅が広く、母材側への拡散も多いことがわかる。一方、Ag箔インサートでは、界面から約100 $\mu$ m程にAgが拡散したと考える黒い帯状部分があり、界面でのAg箔は非常に少ない。これらの組織観察からZn箔とAg箔はCuよりもA6061母材中へ拡散しやすいことがうかがわれる。

3・3 インサート金属の影響

A6061母材中に拡散されたインサート材が、強度にどのように寄与されるかを調べるために、マイクロピッカース試験機によるかたさ試験を行った。試験荷重を10gfとし、荷重時間は30秒である。界面から200 $\mu$ mまでは20 $\mu$ mおきに、以後2mmまで200 $\mu$ mおきに測定した。測定値のバラツキを考慮して場所を変えた5点の測定値を平均してプロットしたのが図2である。界面からの距離を対数目盛りとしてあるが、Cu, Zn およびAgがA6061母材中

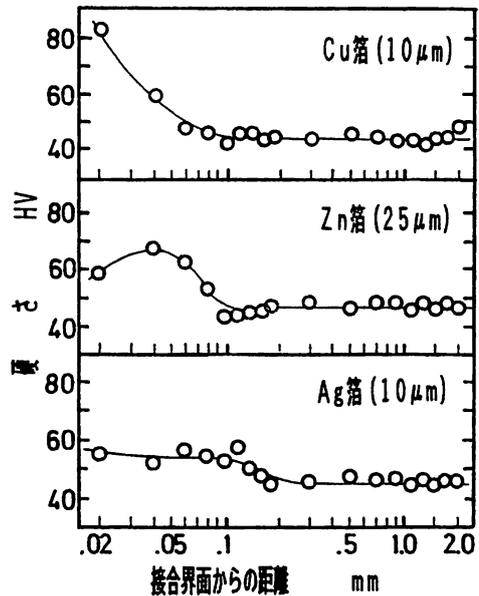


図2 接合界面近傍の硬さ

への拡散を示す硬さ分布であることがわかる。すなわち、界面から母材にかけて見られる硬さ変化は、Cu, Zn およびAgの固溶あるいはそれらとの金属間化合物の生成などによるものと推察される。CuとZnについては界面から約0.1mm程までインサート材の影響があり、Agについては、さらに深い約0.2mm程まで硬さ変化が認められる。硬さ値はCuが最も高く、次いでZn, Agの順となる。Znについては、界面から40 $\mu$ m程のところが硬さ値が高くなり、界面付近はやや低い。写真1で見られたように、Znインサート材の厚さが25 $\mu$ mであり、Znそのものの硬さ値が低いとすれば、界面近くの硬さ値は低くなることが考えられる。一方、Cuの場合、写真1によると、界面近くのCuは少ないように見受けられるにもかかわらず、硬さ値は低下していない。つまり、写真1において、黒い部分が拡散したCuやZnとするならば、むしろCuインサートの硬さや曲線が界面付近で低くなるものと考えられる。しかし、Znの場合のように硬さ値が低くならないのは、A6061母材中にCuが固溶しているからであろう。A6061母材よりも硬さ値が高くなると、インサート材の拡散によって、界面付近の母材の機械的強度が増大するものと推察される。しかし、インサート材によって接合界面が1つ増えること、また、インサート材と母材との反応や、反応により生成される化合物の影響も考えられる。

そこで、これらの継手の引張強度を調べた。引張

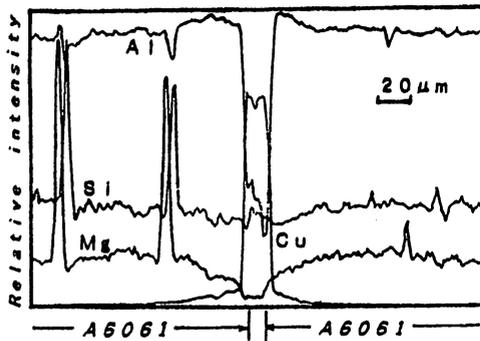


図3 接合界面近傍の EPMA (Cu箔)

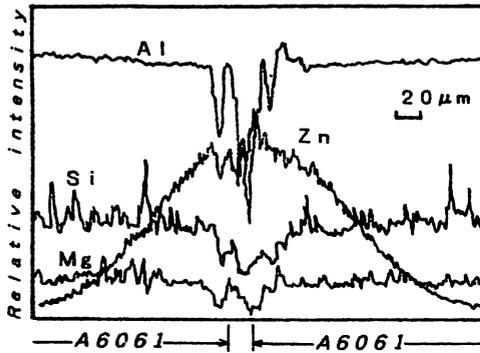


図4 接合界面近傍の EPMA (Zn箔)

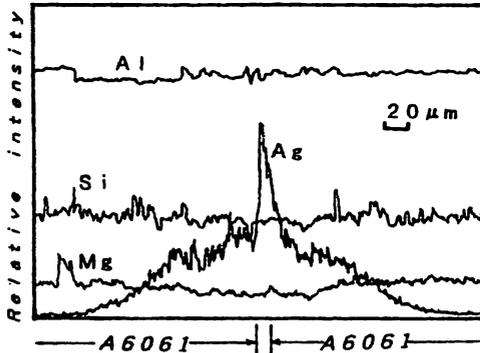


図5 接合界面近傍の EPMA (Ag箔)

試験の結果、Cu箔10μmを使った継手は66.6MPaおよび79.4MPaの引張強さを示した。Zn箔25μmの継手は44.1MPaの引張強さが得られた。これらはいずれも接合界面で破断する。Ag箔10μmの場合は、引張試験片の製作中に継手が破損したために、引張強さのデータは得られていない。アルミナ繊維を含んだA6063合金において、圓城、池内等はAg箔を用いて良好な強度を得ているが、<sup>3)</sup>本実験では強度のデータを得ることができなかった。さらに、インサート材の拡散を詳しく調べるためにEPMA分析を行った。

写真1に示した組織を有する接合界面近傍を界面と

直角にEPMA分析した結果を図3～5に示す。

図3によると、AlはCu中に拡散し、CuもA6061母材中に界面から約60～70μmまで拡散している。また、界面近くのMg濃度が減少していることから、A6061合金中のMgがCu箔中へ拡散していることが考えられる。図4で、ZnはA6061合金中に100μm以上にわたって拡散することがわかる。また、AlもZnに拡散しており、インサート材付近ではAlとZnの濃度が交互に鋸歯状になっている。これはAlとZnの共晶を示すものである。Si、MgともZn箔中では濃度が減少する。図5のAg箔インサートの場合には、AgのA6061合金中への拡散はかなり大きく、界面から約100μm程におよんでいることが認められる。一方、AlのAg箔中への拡散は見られない。平衡状態<sup>6)</sup>によれば、AlはAgを固溶する。しかし、μおよびγ化合物があり、839Kにて化合物とAlの共晶点があるので、図5の界面付近では金属間化合物を生成していることも考えられる。Ag箔インサートでは引張試験片を加工するまでに至らなかったのは、界面に生成される金属間化合物の影響があるものと考えられる。

Znは諸々の金属との濡れ性が良好なこと、Agもまた同じく各種金属の接合に際してロウ材として一般的である。しかし、本実験においては、ZnとAg箔よりはCu箔の方が、A6061合金のインサート材として適していると判断する。すなわち、Cu箔インサートによって界面近傍の硬さ値が上昇し、EPMA分析結果からもCuのA6061母材中への拡散性が優れている。そこで、Cu箔を用いての接合を行い、Cu箔インサート材の厚さの影響について調べてみることにした。Cu箔の厚さは、先の10μmと5μm、4μm、3μmおよび2μmの5種類とした。これらのCu箔を用いて接合した継手の引張試験結果を表2に示す。この結果から判断すると、Cu箔インサートの厚さが薄いと強度が増す傾向がうかがえる。いちばん薄い2μmのCu箔のときに最も高い引張強度を得ている。拡散接合におけるインサート材は、接合後にはそのまま残存しないのが理想的であるから、Cu箔インサート材が薄い程好結果が得られるものと思われる。

厚さ10μmおよび2μmのCu箔インサート材を用いたものとインサート材を用いず直接接合した場合の界面近傍の組織を写真2に示す。Cu箔10μmの場合にはCu層あるいはCuとAlの化合物と推定される層が残存し、さらに、その層とA6061界面でも薄い反応層が観察される。Cu箔2μmで

金属箔インサートによるA6061合金の拡散接合

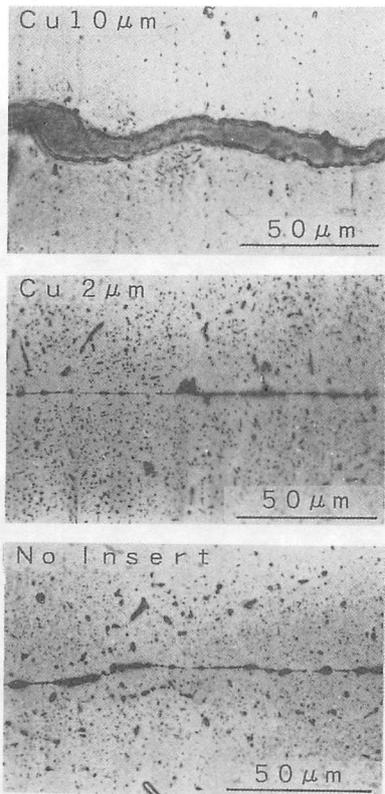


写真2 接合界面の組織

は、インサート材を用いない場合と大きな違いがなく、界面の黒い部分はCu層であるかボイドであるか識別できない。拡散量は、温度と時間の関数で論じられている。同一の接合条件のもとでは、その拡散量が定まることになる。従って、CuがA6061母材中に拡散すれば、インサート材のCu箔を薄くすることにより、界面のCu層は判別できなくなる。界面の組織が母材と同じような組織になり、なおかつ、母材中にCuが拡散して接合部が固溶強化されれば理想的な接合継手が得られる。本実験では、Cu箔の厚さを10~2 μmまで使用したのであるが、組織観察されたのは、10 μmと2 μmの試料だけなので、どれくらいのCu箔厚さで界面のCu層が残存しなくなるのかは明らかにされない。Cuの拡散量と継手強度を関連づけて考えることも必要である。

表3は、A6061合金母材の引張強度を示す。接合同様な熱サイクルを与えた場合には約140MPaの引張強度であるから、2 μm Cu箔を使って得られた継手の最高強度はこの強度の約80%程にしか達していない。そこで、引張試験後の破面をSEM観察し

Cu箔厚さ	引張強さ MPa	伸び %	絞り %
10 μm	66.6	6.3	1.2
	79.4	10.5	2.0
5 μm	73.5	5.6	1.4
	64.7	5.5	1.0
4 μm	46.1	3.1	-
	56.8	3.4	0.3
3 μm	93.1	8.0	2.7
	46.1	3.3	0.3
2 μm	58.8	4.8	1.0
	94.1	8.9	3.8
	116.6	15.8	5.0
	79.4	8.5	2.0

表2 Cu箔をインサートした継手の引張強度

	引張強さ MPa	伸び %	絞り %
As recv.	354.8	33.5	42.3
	351.8	32.2	62.3
Heat cyc.	139.2	41.3	70.9
	146.0	40.0	73.7

表3 A6061合金の引張強度

た。写真3は、Cu箔10 μmと2 μmで最高強度を得た試料とインサートなしで直接接合した試料の破面のSEM写真である。Cu箔2 μmの破面はディンプル状となり、直接接合の破面の様相にきわめて近似している。しかし、Cu箔10 μmの破面はディンプルのサイズは異なるし、浅く、面状での割れも見られる。さらに、白い小さな粒状も観察される。そこで、この粒状の白い部分をX線分析した結果を写真4に示す。矢印の白い粒状部分をエネルギー分散による分析結果、AlとCuのピークだけが現れる。従って、この白い粒状のものはAlとCuの金属間化合物であることがわかる。

すなわち、Cu箔10 μmの場合には、金属間化合物層で継手が破断するものと考えられることができる。

4. 結 言

本研究は、A6061合金の拡散接合継手の強度に対する金属箔インサートの影響を調べたもので、得られた結果は以下のように要約される。

- (1) Cu, Zn および Ag 箔インサート材は、A6061合金中に非常に良く拡散される。

