

# 航空機用金属構造部材の改質及び塑性加工技術の適用

## —Mg/Al クラッド板の開発—

早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科

教授 浅川 基男

(平成 19 年度重点研究開発助成 AF-2007005)

キーワード：クラッド材，マグネシウム合金，耐食性

### 1. 研究の目的と背景

近年の航空機部品は、金属と複合材料を合わせたハイブリッド材が使用され始めている。自動車産業で培った材料および塑性加工技術を基軸として、修理部品も含み航空機用構造部材の新加工法や評価技術を確立することは樹脂系複合材料の研究と同等以上に重要である。そこで海外からの輸入に頼り、製造方法や修理方法がブラックボックス化・マニュアル化されている構造部材を再度見直し、さらなる高付加価値な部材を、日本の「材料・ものづくり技術」を活用して高品質・低コストで国産の構造部材を供給して行く必要がある。

そこで筆者らは、自動車産業でも実績を得ているマグネシウム (Mg) 合金の航空部品への適用に着目した。Mg 合金は比重 1.7 であり、実用金属中最も軽量で樹脂系複合材料の比重 1.5 に迫る軽量部材である。一方で、腐食しやすといった欠点がある。そこで、Mg 合金意アルミニウム (Al) など厚さ 10% ほどを被服した Mg/Al クラッド板を航空機用構造部材としての開発を目的とする。

### 2. 実験方法

#### 2-1 中間材

Mg/Al クラッド板を作製するにあたり、Mg と Al を接合させる際に、金属間化合物の層が形成されることが予想される。その金属間化合物の形成を制御するために、Mg と Al の間に中間材として異なる元素を挿入する。本研究では、Mg と Al のそれぞれと金属間化合物層を形成しにくいであろうチタン (Ti) を Mg と Al の間に挿入する。

#### 2-2 供試材

供試材として以下の Mg, Al, Ti を用いる (表 1, 表 2, 表 3)。また、Mg と Al には熱処理を施し、機械的性質を以下に示す (表 4, 表 5)。

表 1 AZ61 の化学成分 (mass %)

Mg	Al	Zn	Mn	Fe
92.5	6.26	1.03	0.234	0.001

表 2 A1100 の化学成分 (mass %)

Al	Cu	Fe	Si	Ti
99.1	0.15	0.61	0.09	0.02

表 3 Ti の化学成分(10<sup>-3</sup>mass %)

Ti	C	Fe	Ni	O	H
99.9×10 <sup>3</sup>	4.51	28.0	2.0	30.0	0.4

表 4 寸法及び熱処理条件

Materials	AZ61	A1100	Ti
Thickness	4.0 mm	0.8 mm	0.04 mm
Annealing condition	400 °C, 1 hour	350 °C, 1 hour	As rolled

表 5 機械的性質

Materials	AZ61	A1100
Tensile stress	201 MPa	90 MPa
Elongation	12.1 %	35.0 %

#### 2-3 熱間圧着

Mg/Al クラッド板は以下の条件で熱間プレスにより作製する (表 6)。供試材は全てアセトン中で超音波洗浄を 10 分間行い脱脂した。

表 6 熱処理条件

Pressure	150 MPa
Temperature	400 °C
Holding time	3 min, 5 min, 7 min

#### 2-4 評価方法

Mg/Al クラッド板の性質を調査するため、次の 4 つを行う。

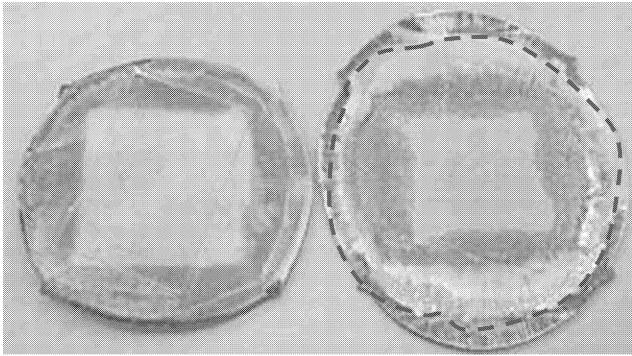
- 界面組織観察
- 3 点曲げ試験による接合強度評価
- 室温での引張り試験による機械的性質の評価
- 室温での V 曲げ試験による成形性評価

### 3. 実験結果及び考察

#### 3-1 Mg/Al クラッド板作製

作製した Mg/Al クラッド板を示す (図 1)。Ti 薄板を挿入したものは表面全体を Al に覆われているが、Ti 薄板のないものは点線内の中央部のみを Al に覆われており、内部の Mg が外に流出している。この要因として、Mg のす

べり系の増加と、金属間化合物の形成の2つが考えられる。



(a)Ti 薄板を挿入した Mg/Al クラッド板 (b)Ti 薄板のない Mg/Al クラッド板

図1 Mg/Al クラッド板

以下にMgのすべり系の臨界せん断応力と温度の関係図を示す(図2)。底面すべりは温度によらず常に一定の力で発生しているが、非底面すべりは熱間圧着温度400度付近で変形抵抗が減少する。

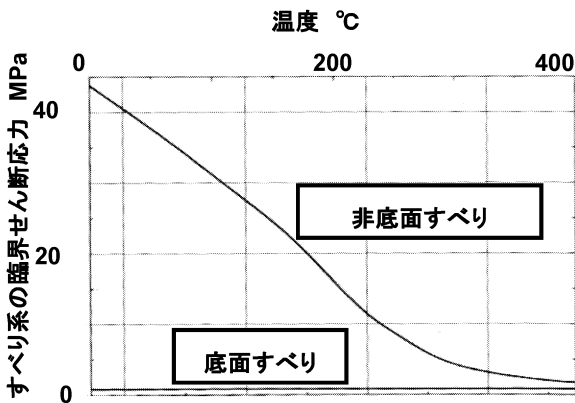


図2 Mgのすべり系の臨界せん断応力と温度の関係図

またMg-Al系の平衡状態図(図3)より、熱間圧着温度400度では金属間化合物 $Mg_{17}Al_{12}$ が形成されることが予想される。

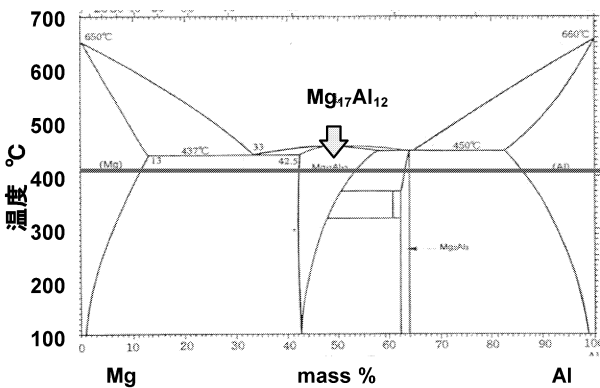
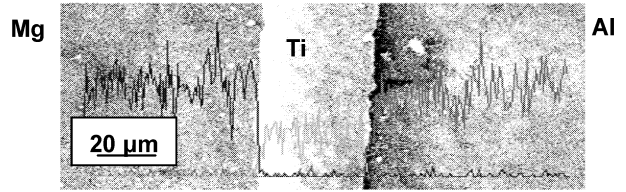


図3 Mg-Al系平衡状態図

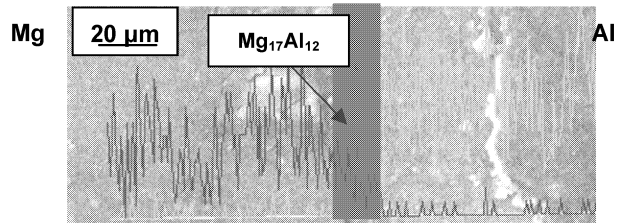
以上から、化合物が析出し続けMg-Al間の抵抗が減り、さらにすべり系の臨界せん断応力が減少したために内部のMgがAlの外に流出したものであると考えられる。

### 3-2 界面組織観察

SEM-EDXを用いて各Mg/Alクラッド板の境界部分の組織観察及び元素分析を行った。結果を以下に示す(図4)。



(a)Ti 薄板を挿入した Mg/Al クラッド板 (圧着時間 5分)



(b)Ti 薄板のない Mg/Al クラッド板 (圧着時間 5分)

図4 界面組織観察結果

Ti 薄板のないものはAl側にMg:Alの比率が一定の割合の領域が観察された。MgとAlの存在比率とMg-Al系の平衡状態図より、 $Mg_{17}Al_{12}$ であると推察される。また、この層の深さは圧着時間ごとに増加している(表7)。

表7  $Mg_{17}Al_{12}$ 化合物形成量と圧着時間の関係

圧着時間	3 min	5 min	7 min
$Mg_{17}Al_{12}$ 層の深さ	9 µm	13 µm	16 µm

一方で、Ti 薄板を挿入したものはTiによってMgとAlが隔離されている。このため、 $Mg_{17}Al_{12}$ の形成はないと考えられる。このTi 薄板を挿入したMg/Alクラッド板の境界部の接合メカニズムを明らかにするため、SEM-EPMAを用いてより細かい範囲の元素分析を行った。分析結果を以下に示す(図5)。

また、Ti-Mg間、Ti-Al間で拡散層が観察された。圧着時間ごとの拡散層深さを以下に示す(表8)。

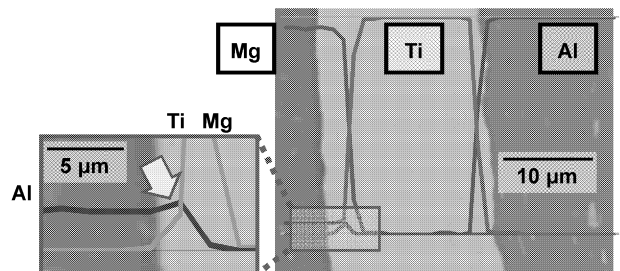


図5 SEM-EPMA 観察結果 (圧着時間 5分)

表 8 圧着時間ごとの各拡散層深さ

圧着時間	3 min	5 min	7 min
拡散層深さ(Mg-Ti)	7.3 μm	6.0 μm	9.3 μm
拡散層深さ(Mg-Ti)	5.3 μm	7.3 μm	8.0 μm

熱間圧着温度 400 度では Mg-Ti 間, Al-Ti 間で金属間化合物を形成しない。よってこの拡散層は原子が固溶しあっている状態だと考えられる。また, 図 5 より, Mg-Ti 境界部に Al の検出量のピークが現れている。この Al は AZ61 中に含まれる 6% の Al である。これはすべての Ti 薄板を挿入した試験片に見られた現象であり, Al が選択的に Ti と反応していることが推察される。しかし, ピークの量は極わずかであるため, クラッド板の機械的性質や成形性に与える影響はほとんどないと考えられる。

### 3・3 接合強度評価

3 点曲げ試験による接合強度評価を行った。試験用ジグ寸法, 試験条件を以下に示す (図 6, 表 9)。

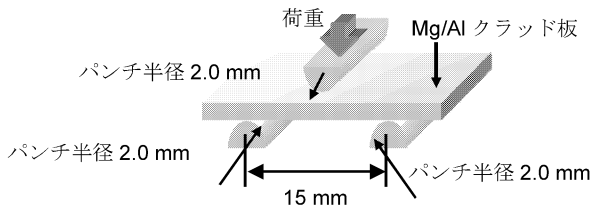


図 6 試験用ジグ寸法

表 9 試験条件 (3 点曲げ試験)

温度	R.T.
試験速度	1 mm/min

接合強度算出式は以下によって与えられる。M はモーメント, E は見かけのヤング率, η は図心からの距離, I は断面 2 次モーメント, τ は応力差から算出した接合強度である。また, 接合強度算出結果を以下に示す (図 7)。

$$\sigma_i = \frac{M E_i \eta}{\sum E_i I_i} \quad (1)$$

$$\tau = |\sigma_i - \sigma_{i-1}| \quad (2)$$

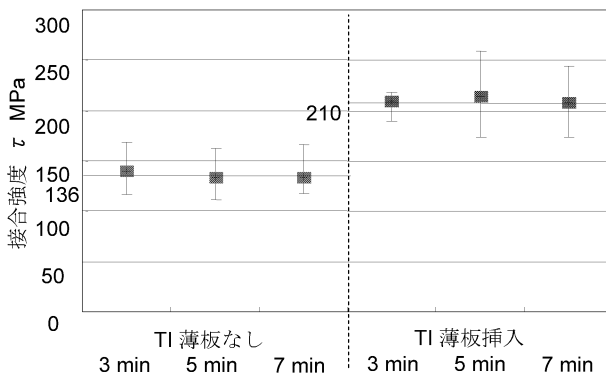


図 7 接合強度算出結果

Ti 薄板を挿入することで接合強度は約 1.5 倍向上した。これより, Mg-Al 間の拡散層よりも Mg-Ti 間, Al-Ti 間の拡散層は高い接合強度を持っていると考えられる。

### 3・4 引張り試験

試験片寸法, 試験条件を以下に示す (図 8, 表 10)。

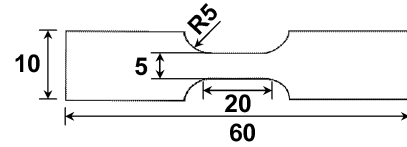


図 8 引張り試験用試験片寸法

表 10 試験条件 (引張り試験)

温度	R.T.
試験速度	1 mm/min

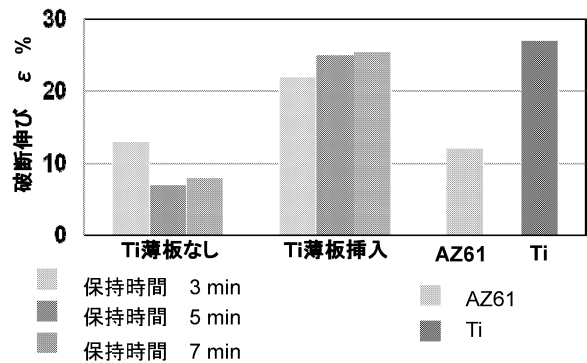


図 9 破断伸び結果

Ti 薄破断伸びの結果を示す (図 9)。Ti 薄板のないもので圧着時間 3 分は AZ61 と同等, 圧着時間 5 分以上ではそれ以下の破断伸びを得た。圧着時間 5 分以上では Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> の形成量増加により早期に破断したと考えられる。

一方, Ti 薄板を用いたものは AZ61 の約 2 倍の破断伸びを示した。この理由として以下のメカニズムが考えられる。まず, 母材は Ti による拘束を受け, くびれ発生状態での軸方向応力の中心部の最大応力を抑制する。さらに表 8 で示した拡散層の接合性が十分あるとすると, 圧着時間の増加に伴い破断伸びが増加すると考えられる。

次に, 引張り強度の結果を以下に示す (図 10)。

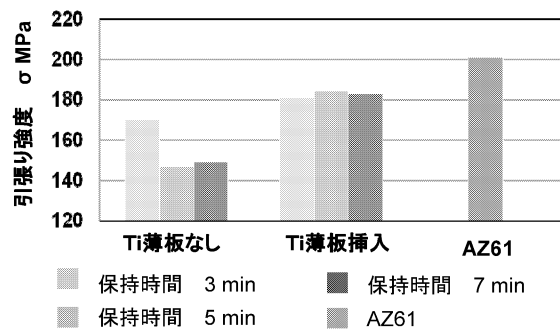


図 10 引張り強度結果

板厚比から算出した内部の AZ61 のみの強度は 144 MPa 程度である。これは Ti 薄板を用いない圧着時間 5 分以上のものと同程度である。しかし、圧着時間 3 分では 170 MPa 程度あることから、圧着時間 3 分の拡散層の状態では強度があるが、5 分以上では  $Mg_{17}Al_{12}$  の増加により Mg と Al の接合力はなくなり、引張り強度が低下したと考えられる。

Ti 薄板を挿入したものは内部の AZ61 以上の引張り強度を示しており、拡散層形成による強度低下は見られない。これも Ti によって拘束されているため軸方向応力が増加しにくかったためだと考えられる。

### 3・5 V 曲げ成形性試験

Mg/Al クラッド板と AZ61 に対して 0.05 mm まで一方向熱間圧延を行った (表 11)。また、試験条件、試験用ジグ寸法を以下に示す (表 12, 図 11)。

表 11 試験片作製条件

試験片	Mg/Al クラッド板 (Ti 板挿入)	Mg/Al クラッド板 (Ti 薄板なし)	AZ61
総圧下率	80 %	75 %	77 %
温度	250 °C		
最終板厚	0.50 mm		

表 12 試験条件 (V 曲げ成形性試験)

温度 °C	試験速度 mm/min	パンチ半径 / 板厚比 Rp / t
R.T.	1.0	1.0, 2.0, 4.0

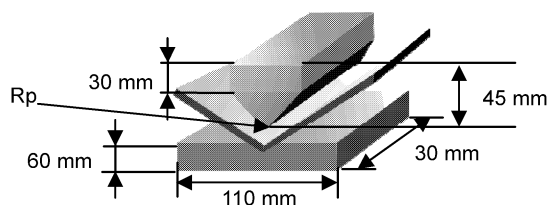


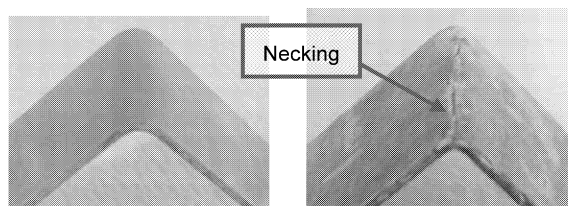
図 11 V 曲げ成形性試験用ジグ寸法

試験結果と成形後の試験片を以下に示す (表 13, 図 12)。

表 13 V 曲げ成形性試験結果

試験片	保持時間	パンチ半径 / 板厚比 Rp / t		
		1.0	2.0	4.0
Mg/Al クラッド板 (Ti 薄板挿入)	3 min	△	△	○
	5 min	△	△	○
	7 min	△	△	○
Mg/Al クラッド板 (Ti 薄板なし)	3 min	△	△	○
	5 min	△	△	○
	7 min	△	△	○
AZ61	3 min	×	×	×
	5 min	×	×	×
	7 min	×	×	×

○ : 成形可能, △ : 表面の Al にくびれ, × : 破断



○ : 成形可能

△ : 表面の Al にくびれ

図 12 V 曲げ成形性試験後の試験片

試験片は圧延方向を長手方向としたもの、圧延方向に対して垂直方向を長手方向としたものの 2 種類を採取したが、いずれも同じ結果であった。

Mg/Al クラッド板の作製条件による差異はあらわれなかったが、少なくとも表面の Al の延性により室温成形性が向上したと考えられる。

## 4. 結論

Mg/Al クラッド板を作製し、界面組織観察、3 点曲げ試験、引張り試験、V 曲げ成形性試験から以下の知見を得た。

- (1) Mg/Al の間に Ti 薄板を挿入すると、熱間圧着時に内部の Mg の流出を防止できる。
- (2) Ti 薄板を挿入すると接合強度が約 1.5 倍向上する。
- (3) Ti 薄板を挿入すると破断伸びが母材 (AZ61) と比較して約 2 倍向上する。
- (4) Mg の表面に Al をクラッドすると母材 (AZ61) よりも良好な曲げ成形性を示す。

今後は実用化を視野に入れ、圧延でクラッド板を作るべく研究を推進する。

## 謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の助成金によって行われたものであり、ここに深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 菊池 俊司, 菅又 信 : アルミニウム合金板をクラッドした AZ31 マグネシウム合金板の性質, 第 60 回 塑性加工連合講演会, 2009, p. 405-406.
- 2) 青沼 昌幸, 津村 卓也, 中田 一博 : 摩擦攪拌接合法による純チタンと AZ31 マグネシウム合金との接合性, 軽金属, 第 57 巻 第 3 号, (2007), p112-118.
- 3) 井上 博史, 水谷 清志, 中村 邦彦, 高杉隆幸 : 圧延接合した AZ31Mg/Ti および AZ61Mg/Ti クラッド板の集合組織と成形性, 平成 20 年度 塑性加工春季講演会, (2008-11), p. 257-258.
- 4) 社団法人 軽金属学会 : アルミニウムの組織と性質, (1991).
- 5) 日本マグネシウム協会編 : マグネシウム技術便覧, (2000).
- 6) 岸 輝雄, 鈴木 洋夫, 原田 健一郎 : チタンテクニカルガイド-基礎から実務まで-, 内田老鶴圃, (1993).