# チタンクラッドマグネシウム合金板の成形加工と突き合わせ接合

大阪府立大学 大学院工学研究科 物質・化学系専攻 マテリアル工学分野 教授 井上 博史 (平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013033)

キーワード: 焼鈍条件, 絞り成形性, レーザ溶接

#### 1. 研究の背景と目的

マグネシウムは実用金属材料の中で最も軽量であり, 比強度が高く,振動吸収性,切削性,耐くぼみ性,リサイ クル性に優れているなどの数多くの利点がある.その反面, 中性・酸性域での低い耐食性や最密六方晶の底面集合組織 に起因する乏しい常温加工性などの改善すべき欠点も多 い.一方,チタンも軽量かつ高比強度であり,耐食性,意 匠性に優れるとともに,常温加工性も良好である.しかし ながら,両者の比重を比較すると,材料の軽量化にはマグ ネシウムの方が有利である.

そこで、マグネシウムの欠点である耐食性を改善するた めに、実用マグネシウム合金の表面に耐食性の優れたチタ ンを被覆し、実質的にチタンと同等の耐食性を得るととも に、チタンの良好な強度・常温加工性・意匠性とマグネシ ウム合金の優れた軽量性・強度を活かした新規の軽金属材 料を開発することを目的として、マグネシウム合金とチタ ンを温間圧延接合した「チタンクラッドマグネシウム合金

(TCM) 板」を創製した<sup>1),2)</sup>. AZ31Mg/Ti<sup>3)</sup>から AZ61Mg/Ti,
AZ80Mg/Ti へと高強度化を図るとともに、当初の 0.9 mm
厚から 0.5 mm 厚への薄肉化も達成してきた. 開発してきた
た TCM 板は主として Mg 合金と Ti の厚さ比が 3:1 の 2 層
クラッド板(密度 2.46 g/cm<sup>3</sup>)であり, Mg 合金単板よりも
強度と成形性(絞り成形性,曲げ成形性,張り出し成形性)
が遥かに優れていた. 比強度,成形性,意匠性,耐食性に
優れた多機能な TCM 板を実用化するために、TCM 板の
大型化にも取り組み,図1に示すように、厚さ 0.5 mm×幅
230 mm×長さ 200 m の AZ61Mg/1 種 Ti 薄板コイル材の作



図 1 AZ61Mg/1 種 Ti クラッド薄板長尺コイル材 (内側:1種 Ti, 外側:AZ61Mg 合金)

製に成功している <sup>1)</sup>.

上述のように、多機能な TCM 板ではあるが、実用化す るには最終製品を想定した研究開発が不可欠である.用途 として携帯用電子機器や輸送機器,福祉機器などの部材が 考えられる. Ti 層を凸側とした室温での曲げ加工性は、最 大引張ひずみが Ti 表面に働き、[0001]//ND の底面集合組 織を有する凹側の Mg 合金層では{1012}<1011>双晶形成 が起こりやすいため、非常に良好である. TCM 板の意匠 性を活かした携帯用電子機器筐体などの部材への実用化 には絞り成形性の評価も必要である. Ti と Mg 合金の界面 強度が絞り成形性に影響を及ぼし、界面強度が低いと角筒 絞り試験では側壁部ではく離が起こる. また、TCM 板で は接合強度を上げるために温間圧延接合後に焼鈍を行っ ているが、焼鈍温度が高いとカップ肩部で Ti に亀裂が入 る場合がある. そのため、TCM 板の作製条件、特に温間 圧延接合後の焼鈍条件を最適化する必要がある.

また、車両や福祉機器の様々な産業、例えば二輪車、車 椅子、パワーアシストスーツ等の構造部材としてパネルや フレームに TCM 板を用いることも想定している.この場 合、TCM 板の突き合わせ溶接が可能であれば、Ti 被覆を 外側とした大型パネルやパイプの作製が可能となる. TCM 板の溶接における大きな問題点は、構成金属の Mg と Ti の融点が大きく異なること(それぞれ 923 K と 1941 K) および Mg の沸点(1393 K)が Ti の融点よりも低いこ とである.これらの問題を解決するには、レーザ照射によ る Ti 表面の局部加熱で Ti 層を部分的に溶融し、Mg 合金 よりも熱伝導率がかなり低い Ti の熱伝導により融点が約 1000 K 低い内部の Mg 合金層を溶融させる方法が有望で ある.

以上のことから、本研究では、TCM 板の実用化を目指 して、①クラッド板のはく離や Ti 層での亀裂発生なしに 絞り成形を行うために、絞り成形性に及ぼす温間圧延接合 後の焼鈍条件の影響を検討すること、および②クラッドの 形態を残したままレーザ溶接で継手効率の良好な突き合 わせ接合を行う方法を確立することを目的とする.

## 2. 実験方法

2・1 TCM 板の絞り成形性に及ぼす焼鈍条件の影響AZ80 Mg 合金板および 2 種 Ti 板の片面を金属ブラシが

けし,623 K で圧延接合した.接合強度を高めるために, アルゴンガスを流しながら焼鈍を施し,2層のAZ80 Mg/2 種 Ti クラッド板を作製した.焼鈍は573~673 K で 600~ 1800 s 行った.一方,2層 AZ61 Mg/1 種 Ti クラッド板は, 図 1 に示した薄板コイル材を切り出して使用した.このコ イル材には圧延接合後の焼鈍(573 K-7200 s)がすでに施 されている.さらに,このコイル材にアルゴンガスを流し て 673 K-1800 s の追加焼鈍を施した.

絞り成形性を評価するために,円筒絞り試験(ポンチ径 15 mm,ポンチ肩半径 2 mm)を行い,成形可能な温度と 速度を測定した.絞り試験は,絞り比 1.67,成形速度 0.167 ~3.33 mm/s,試験温度 348~473 K で行い,潤滑剤に二硫 化モリブデンペーストを用いた.また,AZ61 Mg/1種 Tiク ラッド板では角筒絞り試験(ポンチ寸法:28 mm×18 mm, ポンチ肩半径:4 mm)を,成形速度 0.1~3.3 mm/s,成形温 度 373~523 K で行った.AZ80 Mg/2種 Ti クラッド板では 円筒絞り成形時にカップ肩部で Ti の割れが発生する場合 があり,この原因を調査するために,絞り成形後の各試料 の切断面を光学顕微鏡で観察し,Ti 層の厚さを測定した.

# 2・2 TCM 板のレーザ突き合わせ接合

レーザ突き合わせ溶接用試料として、図1に示した2層 AZ61Mg/1種Tiクラッド薄板コイル材(板厚0.5mm, AZ61MgとTiの厚さ比3:1)を用いた.切断砥石で湿式切 断した断面を突き合わせ、アルゴンガスを201/min流して 圧延方向と平行にTi側からレーザ照射を行った.AZ61Mg 合金層の温度上昇を抑えるために、放熱用銅板による冷却 または冷却水循環装置による強制水冷を行った銅製放熱 治具を用いてAZ61Mg合金側の表面(裏面)を冷却した. レーザのスポットサイズと出力,試料移動速度を変化させ て接合状態を調査した.溶接材の機械的性質を評価するた めに接合面に垂直な方向に引張試験を行った(図2).また, 溶接部の光学顕微鏡観察を行い,Ti層とAZ61Mg合金層 の溶融状態を観察するとともに、EBSD測定により微細組 織と集合組織を調査した.さらに,溶接部と母材部の硬度 を測定し,組織と機械的性質の関係を検討した.



図2 突き合わせ溶接材の寸法と引張試験片採取方向

3. 研究成果



図3 673 K-1800 s の追加焼鈍を(a)施さなかった試料と (b)施した試料における角筒絞り試験後の外観

#### 3・1 TCM 板の絞り成形性に及ぼす焼鈍条件の影響

AZ61 Mg/1 種 Ti クラッド板の角筒絞り試験後の外観を 図 3 に示す. 絞り成形は通常,成形可能な温度が低く成形 可能な速度が大きいほど絞り成形性が良好である. 追加焼 鈍を施さなかった試料は,温度 523 K,速度 0.1 mm/s の高 温・低速条件であっても側壁部でクラッド接合部の Ti と Mg がはく離した (図 3(a)).一方,673 K-1800 s の追加焼 鈍を施した試料は,398 K,3.33 mm/s の低温・高速条件で あってもはく離せず,良好な成形性を示した (図 3(b)). また,180°はく離試験によって得られた Ti 層と AZ61Mg 層の界面接合強度は,追加焼鈍を施さなかった場合 0.1 N/mm,施した場合 4.1 N/mm であった.以上のことから, はく離することなく角筒絞り成形するには,高温・長時間 の焼鈍によりはく離強度を上昇させる必要があると考え られる.

AZ61 Mg/1 種 Ti クラッド板よりも強度の高い AZ80 Mg/2 種 Ti クラッド板<sup>4)</sup>を用いて,円筒絞り成形性に及ぼ す焼鈍条件の影響を調査した.円筒絞り成形可能な温度と 速度の関係を図 4,試験後の外観を図 5 に示す.図 4 に示



図4 AZ80Mg/2 種 Ti クラッド板の円筒絞り試験におけ る成形可能速度と温度の関係



図 5 AZ80Mg/2 種 Ti クラッド板を(a) 673 K-1800 s 焼鈍 した試料と(b) 573 K-600 s+673 K-1800 s の 2 段焼鈍 した試料における円筒絞り試験後の外観



図 6 573 K で時間を変化させて焼鈍した AZ80Mg/2 種

Ti クラッド板の円筒絞り試験後の Ti 層厚さ



図 7 AZ80Mg/2 種 Ti クラッド板の円筒絞り試験後の Ti 層厚さに及ぼす第1焼鈍(573 K-600s)の効果

すように, 圧延接合後に 673 K-1800 s のみ焼鈍した試料 は, いずれの絞り条件においてもカップ肩部で Ti の割れ が生じた(図 5(a)).しかし,573 K-600 s の比較的低温・ 短時間で焼鈍した後に 673 K-1800 s の高温・長時間の追加 焼鈍を施した試料は,肩部での Ti 割れが生じることなく 絞り成形性が良好であった(図 5(b)).そのため,はく離 や割れを抑制して絞り成形性を向上させるには,このよう な2段階の焼鈍が必要であると考えられる.

AZ80 Mg/2 種 Ti クラッド板の円筒絞り性が良好な試料 および肩割れした試料の各焼鈍条件における Ti 層の厚さ を図 6 および図 7 に示す.上述の結果から接合強度を高め るには焼鈍を高温または長時間行うのが望ましい.しかし, 573 K 焼鈍において 1800 s では Ti 肩部で割れが生じたの に対して,1200 s では割れが生じなかった(図 6). Ti-Mg 二元系状態図<sup>5)</sup>によると Ti と Mg の金属間化合物相が存 在しないことから,カップ肩部で Ti と Mg 合金が局所的 にはく離し,カップの外側表面の加工硬化した Ti に最大 引張応力がかかったためと考えられる.一方,焼鈍温度が 673 K の場合, Ti 層はより脆性的に破断した(図 7). 肩部 のはく離による破断のほかに, Ti の酸化による割れが生 じ,そこから破断したと推察される.上述のようなはく離 の原因に,焼鈍時に界面に存在する酸素や窒素などの気体



分子が熱膨張し気泡を生じることで、部分的に接合されていない箇所ができたと考えられる.573 K-600 s 焼鈍後, 673 K-1800 s 焼鈍する 2 段階焼鈍では、気泡による部分的なはく離が起こることなく第 2 焼鈍の段階で接合強度を 高められると考えられる.

AZ61 Mg/1 種 Ti クラッド板の円筒絞り試験結果を図 8 に示す.追加焼鈍を施すことで,より低い温度で成形する ことが可能であり, AZ80 Mg/2 種 Ti クラッド板と同様に 絞り成形性が向上した.したがって,健全な TCM 板の作 製には低温・短時間と比較的高温・長時間からなる 2 段階 焼鈍が有効であると言える <sup>6</sup>.

#### 3・2 TCM 板のレーザ突き合わせ接合

0.5 mm 厚の 2 層 AZ61Mg/1 種 Ti クラッド薄板の突き合 わせ溶接部の光学顕微鏡写真を図 9 に示す. Ti 層と AZ61Mg 合金層の混合は起こらず, Ti は Ti 同士で, AZ61Mg 合金は AZ61Mg 合金同士で接合し, 溶融部でも 2



(a) 自然放熱, スポットサイズ 
 ↓ 1.5 mm, 出力 400 W,

 試料移動速度 10 mm/s



図9 AZ61Mg/1種Tiクラッド板の溶接部断面写真



(a) 母材部



100 µm
 (b) 溶接部
 図 10 図 9(b)の試料における母材部と溶接部の EBSD
 バンドコントラスト像
 写真上部:Ti 層,写真下部:AZ61Mg 合金層

層クラッド状態は保持されている"). 銅製放熱治具を自然 冷却した場合に Ti 層近傍の AZ61Mg 合金にボイドが発生 するとともに放熱治具側の AZ61Mg 合金に大きな凹みが 2箇所発生したが、銅製放熱治具を水冷した場合、ボイド は発生せず AZ61Mg 合金の凹みもかなり小さくなった. このようなボイドや凹みの発生は、レーザ照射により Ti 表面が融点(1941 K)以上に加熱され, Tiの熱伝導を通し て AZ61Mg 合金層が Mg の沸点 (1393 K) 以上の温度まで 加熱され気化したことよると考えられる.実際に、レーザ 溶接中に Mg の気化と思われる発煙が認められる場合が あった. ボイドや凹みの発生と関連して,水冷放熱治具を 使用した方がより高い継手強度を示した. 引張試験におい て高い強度が得られた溶接条件では、0.2%耐力で評価し た継手効率は75%~83%,引張強さで評価した通常の継手 効率は 64%~69% であった. 後述のように, 母材部では加 工硬化した Ti 層と再結晶組織の AZ61Mg 合金層が 1:3 の 割合で存在し、溶接部では Ti 層が粗大粒組織で AZ61Mg 合金層が伸長粒からなる凝固組織であること、および AZ61Mg 合金層に凹みが存在することを考慮すると, 突き 合わせ溶接の継手効率は比較的良好であると言える.破断 は全て溶接部で起こったため、溶接材の伸びは母材の伸び

(~14%)と比べてかなり低い値(~1.0%)を示したが, 引張試験片の平行部長さ(10 mm)と比較して溶融幅が小 さいため(~2 mm),溶接部の伸びは 5%程度と見積られ る.この値は主に母材部と溶接部の微細組織の違いによる ものと推察される.

高い継手効率が得られた試料を用いて母材部と溶接部 の EBSD 解析を行った結果を図 10 に示す<sup>8)</sup>. 母材部では Ti 層は多くの変形双晶を含む等軸に近い変形組織である が, AZ61Mg 合金層は等軸粒からなる再結晶組織である. クラッド界面近傍の Ti 層では解析不能点が多く,界面近 傍の Ti はひずみが多く加工硬化した状態であると考えら れる.溶接部では Ti 層は表面近傍の針状組織を除き,50 µm を超える粗大粒組織となっている. この粗大粒組織は 凝固組織または粗大化した高温 β 相から α 相に相変態し た組織と考えられる. AZ61Mg 合金層では板厚方向に伸長 した凝固組織が認められ,このことは銅製水冷治具で冷却 された部分から Ti 側に向かって凝固が進行したことを示 唆する. また EDS 分析の結果,溶接部の Ti 層と AZ61Mg 合金層の界面にわずかながら TiAl に近い金属間化合物相 の形成が認められた. 溶融時に AZ61Mg 合金に含まれる



 (b) 溶接部
 図 11 レーザ溶接による Ti 層の集合組織変化(左から 順に(0001)、{0110}、{1210}極点図)



(b) 溶接部

図 12 レーザ溶接による AZ61Mg 合金層の集合組織変 化(左から順に(0001), {01ī0}, {ī2ī0}極点図) Al と TCM 板の構成金属 Ti が接合界面で反応した可能性 が示唆される.溶接によりビッカース硬さは Ti 層で 170 から 144 に, AZ61Mg 合金層で 103 から 94 に低下した. これは引張試験で破断が全て溶接部で起こったことと対 応する.軟化の原因として Ti 層における加工ひずみの消 失およびレーザ照射による加熱と溶融・凝固による結晶粒 の粗大化が考えられる.

図 11 の極点図<sup>8)</sup>から, Ti 層では[0001]が圧延面法線方 向 ND から横方向 TD の方に約 35°傾いた方位を主成分と する α 相圧延集合組織から様々な方位をもつ変態集合組 織に変化することがわかった.これは、レーザによる急速 加熱により Ti 層表面が液相になり、その後の冷却でβ相 の形成と $\beta \rightarrow \alpha$ 変態が起こるために、最終的に多数の $\alpha$ 相 バリアントが出現したことを示唆する. Ti 層内部では融 点に到達しなかった可能性があるが、その場合でも α→ β→α 変態が起こるため、多数のα相バリアントが出現す ることになる.一方,図12の極点図<sup>8)</sup>から,AZ61Mg合 金層では[0001]//NDの底面集合組織から(ī2ī0)[0001]に近 い方位が主成分の{ī2ī0}集合組織となり、凝固時の粒成 長方向に起因する集合組織形成が示唆される.溶接部の強 度が母材部よりも低いことは、微細組織だけでなく、板厚 の 75%を占める AZ61Mg 合金層の溶接部における {ī2ī0} 集合組織も関係すると考えられる.

以上のように、適切な溶接条件で TCM 板をレーザ突き 合わせ溶接することにより,2層クラッド状態を保持した まま継手効率が比較的高い突き合わせ溶接材が得られる ようになった.本溶接技術の特徴は構成金属の融点が大き く異なる TCM 板でクラッド状態のまま突き合わせ溶接が 可能となったことである. 融点が近いマグネシウムとアル ミニウムのクラッド板は軽量性の点で有望であるが,溶接 により合金化が起こるだけでなく金属間化合物も形成す る可能性が高く,突き合わせ溶接材でクラッド本来の特性 を活かすことは難しい. これに対して, TCM 突き合わせ 溶接材はクラッド材の優れた特性を十分に活用できる利 点がある.この特徴を利用して,外側が Ti 層で内側が Mg 合金層の2層 TCM 溶接管が作製可能かどうかを検討した. 実際に 25 mm 角の AZ61Mg/1 種 Ti クラッド薄肉溶接角管 を試作した(図13)<sup>7)</sup>. 試作品は, AZ61Mg 合金単体と比 較して曲げ加工性に優れた AZ61Mg/1 種 Ti クラッド板を ファイバーレーザ加工機で切断し,室温でコの字型に曲げ 加工した後に、2 箇所でレーザ突き合わせ溶接した TCM 薄肉角管である. 平板のレーザ突き合わせ溶接材と同様に, 目視の範囲では溶接部は2箇所とも健全な状態である.

水冷式銅円管放熱治具を作製し, AZ61Mg/1 種 Ti 薄板 コイル材で Ti 層が外側の薄肉溶接円管の試作を行った. 円管の場合,レーザ溶接の前に TCM 板を円筒状に丸め加 工する必要がある. TCM 板に焼鈍を施さずに円筒状丸め 加工を行うとスプリングバックが大きく,円筒形状を保つ



図 13 試作した 25 mm 角の AZ61Mg/1 種 Ti クラッド 薄肉角管(外側: Ti 層,内側: AZ61Mg 合金層)



図 14 AZ61Mg/1 種 Ti クラッド薄肉溶接円管の溶接部 断面写真

ことができなかった.加工前に 673 K-300 s 焼鈍を行うこ とで AZ61Mg 合金のビッカース硬さが 93 から 61 まで減 少しスプリングバックが小さくなった.この状態で円筒状 丸め加工を行うことによりビッカース硬さは 65 になった が,丸め加工による硬化は小さいため,丸め加工前のみ焼 鈍を行うことにした. AZ61Mg 合金側表面を冷却すること により、レーザ突き合わせ溶接で TCM 薄肉溶接円管を作 製することができた. レーザ出力 400 W では AZ61Mg 合 金側の凹みが見られたが、出力を 370 W に下げることで 凹みが小さくなり接合状態が改善された(図14).密度が 2.46 g/cm<sup>3</sup>の2層 TCM 溶接管は車椅子や二輪車などの軽 量化に非常に有用である、溶接部がパイプ曲げ加工に対し て十分な強度があるかどうかを評価するために、今後、パ イプ曲げ試験を行う必要がある.また実用化の観点から, TCM 板厚に応じたレーザ溶接条件の最適化や TCM 薄肉 溶接管の長尺化も今後の重要な課題である.

#### 4. 結 論

TCM 板の応用を目的として, 絞り成形加工とレーザ突 き合わせ溶接について検討を行った.主要な結果を以下に 要約する.

(1) はく離や表面亀裂のない良好な絞り成形性を有する TCM 板を作製するには,温間圧延接合後に低温・短 時間の焼鈍に加えて比較的高温・長時間の焼鈍を施す ことが有効である.

- (2) レーザ溶接条件の最適化により, TCM 板の 2 層状態 を保持したまま継手効率が比較的高い TCM 板の突き 合わせ溶接が可能である.
- (3) TCM 薄板にレーザ突き合わせ溶接を行うことによっ て TCM 薄肉溶接管の作製が可能となり,軽量フレー ム材としての応用が期待できる.

# 謝 辞

本研究は主として公益財団法人天田財団の「平成25年 度一般研究開発助成」により実施された.さらにレーザ突 き合わせ溶接に関する研究の一部が「平成25年度研究成 果展開事業 A-STEP FS ステージ探索タイプ」により実施 されたことを付記する.最後に,高出力半導体レーザ加工 機を用いたレーザ溶接実験に立ち会っていただいた地方 独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所加工成形科の 萩野秀樹氏と山口拓人氏に感謝の意を表する.

## 参考文献

- 1) 井上博史: チタン, 60-1 (2012), 54-57.
- 2) 井上博史: 軽金属, 65-5 (2015), 156-163.
- Inoue, H., Ishio, M. & Takasugi, T.: Mater. Sci. Forum, 495-497 (2005), 645-650.
- 井上博史・磯野晋也:軽金属学会第120回春期大会講 演概要, (2011), 375-376.
- Massalski, T. B., Murray, J. L., Bennett, L. H. & Baker, H.: Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1986), 155.
- Inoue, T., Isono, S. & Inoue, H.: Proc. 9th Pacific Rim Int. Conf. on Advanced Materials and Processing (PRICM9), Ed. by Furuhara, T., Nishida, M. & Miura, S., The Japan Institute of Metals and Materials, (2016), 897-900.
- 7) 井上博史:溶接技術, 63-5 (2015), 65-68.
- お) 井上博史・奥野雅士:軽金属学会第128回春期大会講 演概要,(2015),283-284.