

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「マグネシウム合金とアルミニウム合金の
ハイブリッド構造体の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 中部経済産業局
委託先 財団法人あいち産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制（研究組織・管理体制）	1
1-3	成果概要	3
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	4

第2章 前書き

第3章 マグネシウム鋳造合金円筒にアルミニウム合金の

内面コーティングハイブリッド構造体作製に関する研究

3-1	概要	6
3-2	内面コーティングの実験結果	8
3-3	Y軸の追加	8
3-4	ハイブリッド構造体接合機によるマグネ鋳造合金に対する 内面コーティング実験結果	1 1
3-5	ハイブリッド構造体接合機による実験結果（チャート）	1 3
3-6	ハイブリッド構造体接合機による内面コーティングまとめ	1 4

第4章 内面コーティングによるハイブリッド構造体の強度と組織評価

4-1	概要	1 5
4-2	実験方法	1 5
4-3	コーティング層の組織および合金層	1 6
4-4	実製品を想定したハイブリッド構造体の製作および強度評価	1 7
4-5	ハイブリッド構造体コーティング処理材の強度評価	1 8
4-6	結論	2 0

第5章 スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化に関する研究

5-1	研究目的及び目標	2 1
5-2	スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化の実験	2 1

5-3	スポット摩擦攪拌接合の実験結果	22
5-4	まとめ	23
第6章 マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接に関する研究		
6-1	概要	24
6-2	供試材および実験方法	24
6-3	実験結果	24
6-4	マグネシウム合金展伸材+マグネシウム合金展伸材の摩擦圧接	24
6-5	実験結果	24
第7章 全実験結果の総括		
		25

第 1 章 研究開発の概要

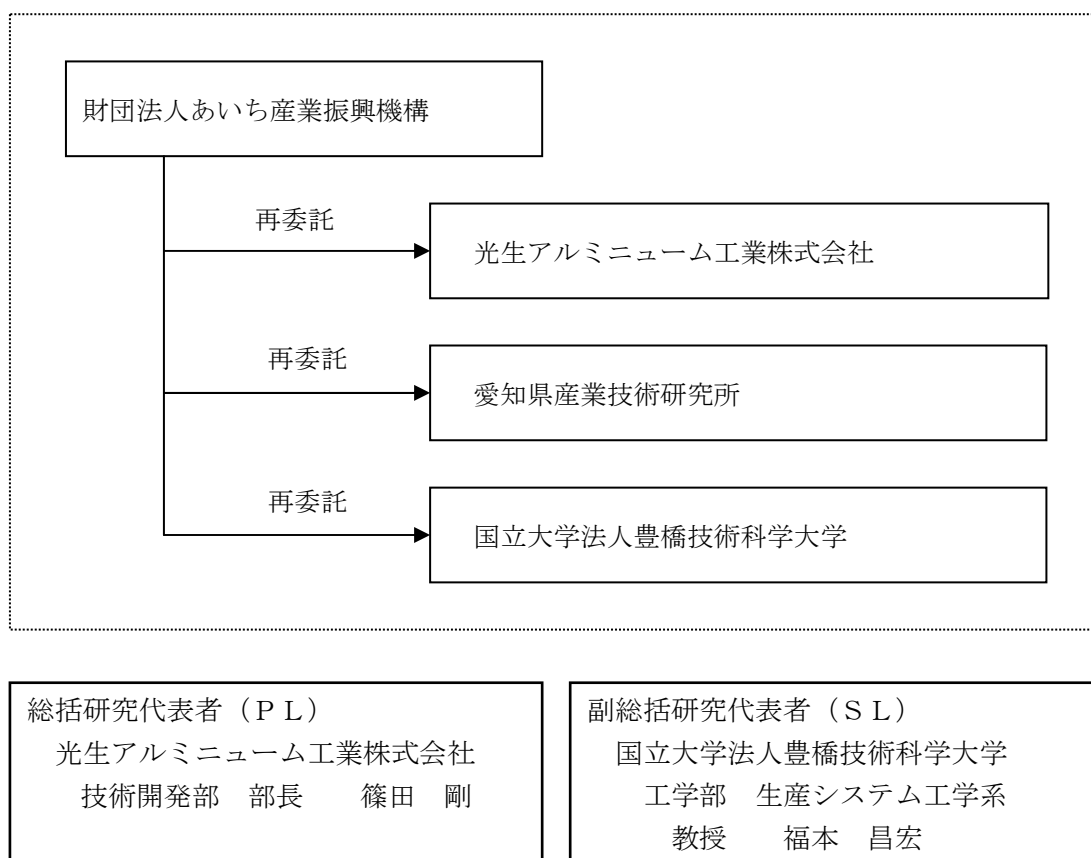
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標

地球温暖化防止の観点から、温暖化ガスの排出量の低減が強く求められている中、自動車産業において車体への軽量材料の採用が必要となるが、マグネシウム合金は軽量であるものの溶接・接合性に乏しく単体構成部材としてユーザーのニーズに応えきれていない。本研究は、自動車部品へのマグネシウム合金の用途拡大にむけて、新規接合法によるマグネシウム合金とアルミニウム合金の固相接合によるハイブリッド構造体を開発する。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制）

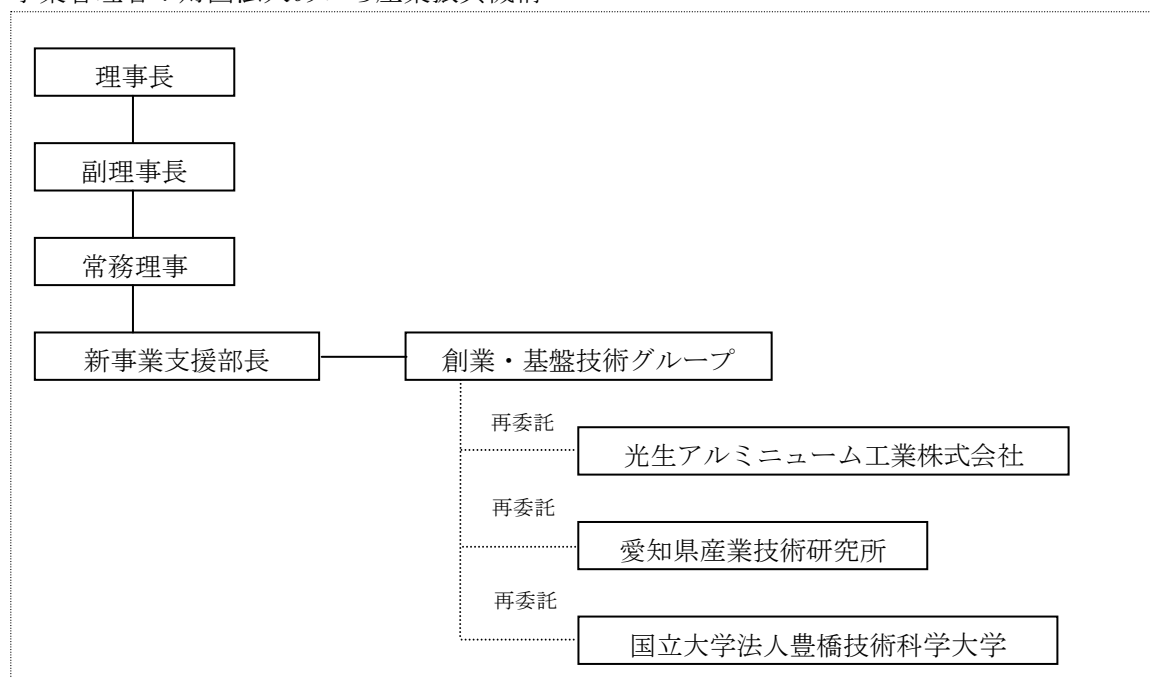
※組織・役職名等については、平成 21 年 4 月 1 日時点のもの

（研究組織）

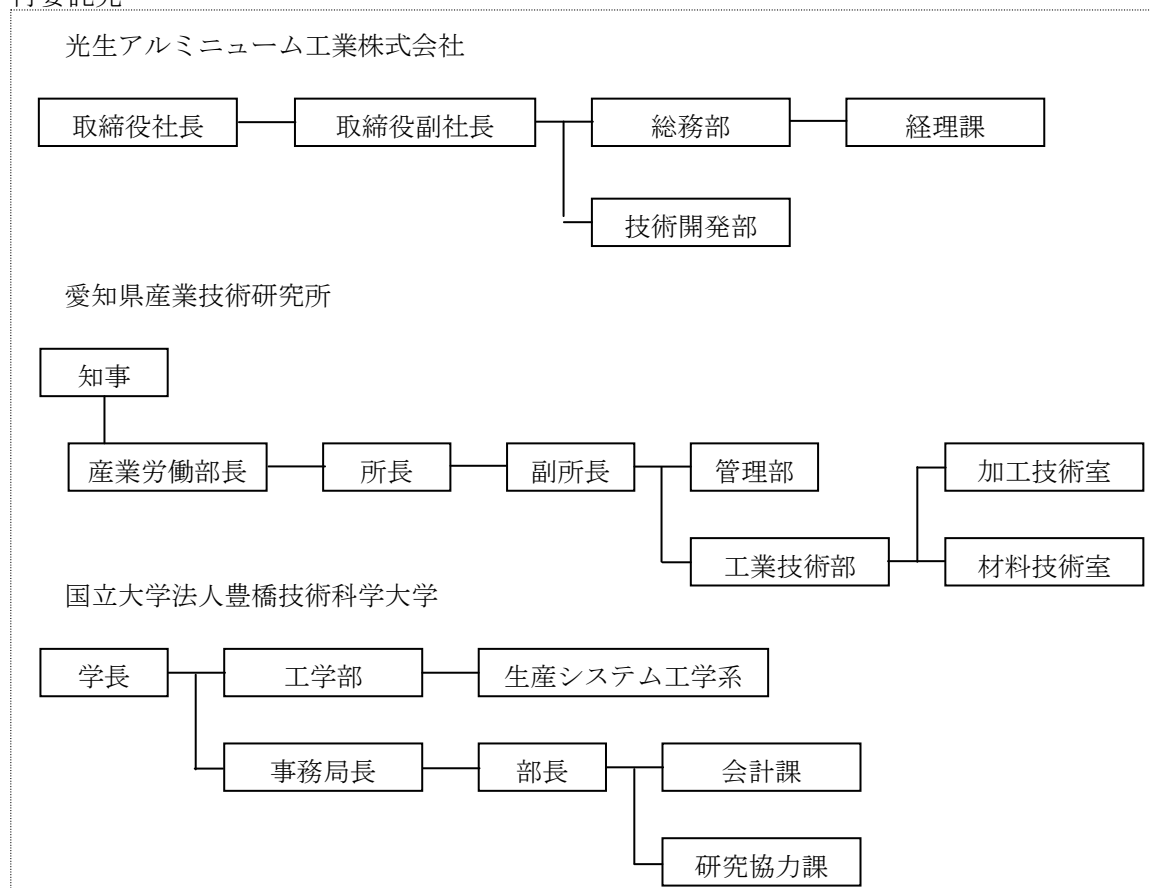


(管理体制)

事業管理者：財団法人あいち産業振興機構



再委託先



1-3 成果概要

マグネシウム合金の剛性不足という弱点を克服するために、アルミニウムとの全く新規の接合技術により、マグネシウム合金とのハイブリッド化を行い、構成部材の高剛性化、高強度化を図り、新機能創生と工業材料としての優れた特性を創出する。優れた材料固有の特性を生かすために、マグネシウム合金の難接合性を克服する新規の接合法の開発と、マグネシウム合金の高剛性化という二つの技術開発を行う。

①マグネシウム鋳造合金円筒にアルミニウム合金の内面コーティングハイブリッド構造体作製に関する研究

コーティング技術をマグネシウムに適用し最適パラメータの探索を行った。さらに、エンジン部品の生産品に適用する実証実験を行った。この結果、従来のボルト結合の数倍の強度特性を示し、本提案のプロセスの正しさを実証できた。

②内面コーティングによるハイブリッド構造体の強度と組織評価

熱量の大きい回転数の高いものでは接合界面に脆弱な金属間化合物の生成が認められた。しかし、実体強度特性に対しては影響は小さく、悪影響は認められなかった。

③スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化に関する研究

マグネシウム展伸材又は鋳造体とアルミニウム展伸材又は鋳造体の重ね継手の形成を行い、接合パラメータの最適化を行うとともに、ツール形状を2種類選り強度特性、組織を調査した。引張りせん断試験の結果として、Al/Mgの場合は、全ての条件で、押し込み量の増加とともにせん断強度が低下する傾向が見られ、押し込み量の一番少ない0.3 mmで最大であった。

④マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接に関する研究

マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接を行い、熱量配分から摩擦圧接パラメータの最適化を図るため、AC4C-T6材の摩擦圧接を行った結果、継手効率は89.0%で母材破断しており、アルミ系材料としてはほぼ満足できる水準の接合条件が得られた。アルミニウム鋳物材同士の摩擦圧接、マグネシウム展伸材同士の摩擦圧接を通じて、比較的良好な接合条件を得ることができた。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人あいち産業振興機構

新事業支援部 創業・基盤技術グループ

住 所：〒450-0002

愛知県名古屋市中村区名駅四丁目4番38号

愛知県産業労働センター（ウインクあいち）内

電 話：052-715-3075（ダイヤルイン）

FAX：052-563-1438

第2章 前書き

マグネシウム合金とアルミニウム合金のハイブリッド構造体の開発のプロジェクトは、大別して3つの柱よりなっている。すなわち、

- 1：マグネシウム鋳造合金円筒にアルミニウム合金の内面コーティングハイブリッド構造体作製に関する研究
 - 2：スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化に関する研究
 - 3：マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接に関する研究
- である。

このうち、1項のハイブリッド構造体の開発は、もっとも多くの努力を傾注したものであり、この報告書の中心的内容でもある。他の項目についても膨大な実験結果を得ているが、結論程度の記載とした。

ハイブリッド構造体の開発では、地球温暖化防止の観点から、自動車の軽量化が進む場合、マグネシウム合金の採用が検討あるいは適用が進んでいる。この場合の問題点としては、マグネシウムは軽量（比重が小さい）であるのは大きな長所であるが、強度は高くなく、マグネシウム部材の取り付けをボルトで行う場合、ボルトの当たり面のマグネシウムが局部変形（座屈）を起こす。この結果、座面の軸力低下、言い換えるとボルトのゆるみが生じる。この軸力低下はマグネシウム合金を扱う技術者の共通認識でもあり、解決が望まれている。

解決の方法は2つ考えられる。

- 1：マグネシウム合金全体の強度改善、すなわち全体強化
- 2：マグネシウム合金の組成などは従前のままとし、ボルトの当たり面のみを強化する部分強化法

である。前者の全体強化では軸力対策は行うことができて、鋳造性、加工性に新たな問題を生じると、価格上昇をもたらす。一方後者の部分強化は確立したマグネシウム合金組成をそのままにしておき、ボルトの座面のみを強化するもので、この部分強化法が開発されれば大きなコストアップなしに、軸力が確保できる。この場合、合金組成などの変化がないので、鋳造性および加工性に影響を与えない。

本プロジェクトでは、この部分強化を行うべく内面コーティングを開発した。

第3章 マグネシウム鋳造合金円筒にアルミニウム合金の内面コーティングハイブリッド構造体作製に関する研究

光生アルミニウム工業株式会社
豊橋技術科学大学

3-1 概 要

内面コーティング専用機の開発を行い、目的を達成した。すなわち、内面コーティング技術をマグネシウムに適用した場合の問題点の洗い出しと、各因子のデータロギングと解析から最適パラメータの探索を行った。

【実施計画】光生アルミニウム工業は、内面コーティングハイブリッド構造体接合機を開発し、計画に沿って、系統的な実験を実施した。

マグネシウム鋳造合金のダイカストによるエンジンカバーの大型製品を獲得し、カバーを用いてアルミニウム合金による内面コーティングハイブリッド構造体の製作を行った。これによって、最終的な成果としたが、最適条件を求める実験は、一般的に押し出し材で市場に供給されているマグネシウム材を用いた。押し出し材は製品が安定して供給されることもあり、実験上のばらつきは小さくできた。

図 3-1 は、平成 19 年度に試作を完了したハイブリッド構造体接合機基本仕様と完成状況を示す。

- 仕様 1：推 力 3 トン 最低荷重 100kg サーボ制御のこと
Z 軸変位 サーボ制御のこと
- 2：チャック コレットチャック
- 3：摩擦圧接可能のこと
- 4：スポット摩擦攪拌接合可能のこと
- 5：プロセスモニター：回転数、摩擦圧力、Z 変位、主軸トルク、
時間を出力のこと
プロセス終了後の確認のグラフ表示化のこと

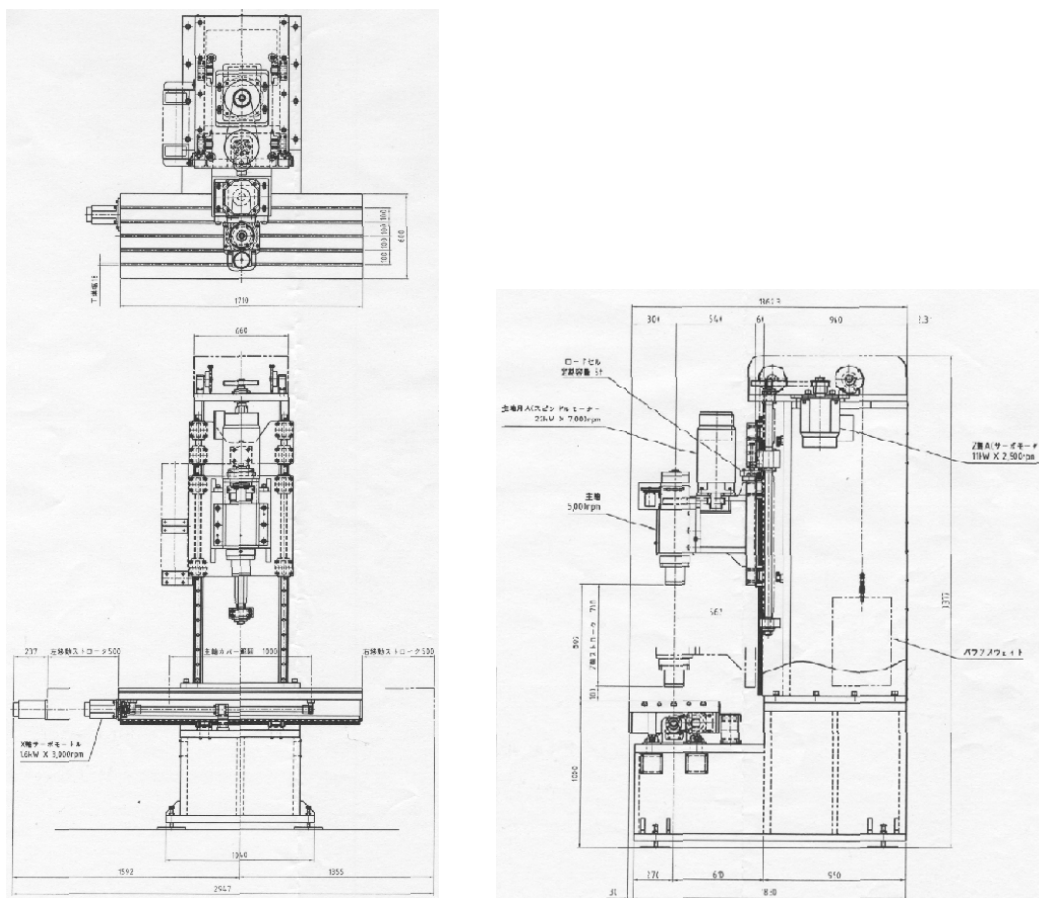


図 3-1 ハイブリッド構造体接合機基本仕様と完成状況

3-2 内面コーティングの実験結果

光生アルミニウム工業にて、ハイブリッド接合構造体製作の予備実験として、AZ31 マグネシウム合金円筒の内面に、A1050 および A7075 アルミニウム合金を改質材とした、コーティング層の成形実験を実施した。図 3-2 に、本実験で使用した試験片および回転工具形状の例を示す。試験材寸法は状況に応じて数種のものの組み合わせで行っている。



寸法：
外径 ϕ 25mm
内径 ϕ 16mm
高さ 25mm

(a) AZ31 マグネシウム円筒



寸法：
直径 ϕ 15mm
高さ 30mm

(b) A1050 および A7075 アルミ改質材



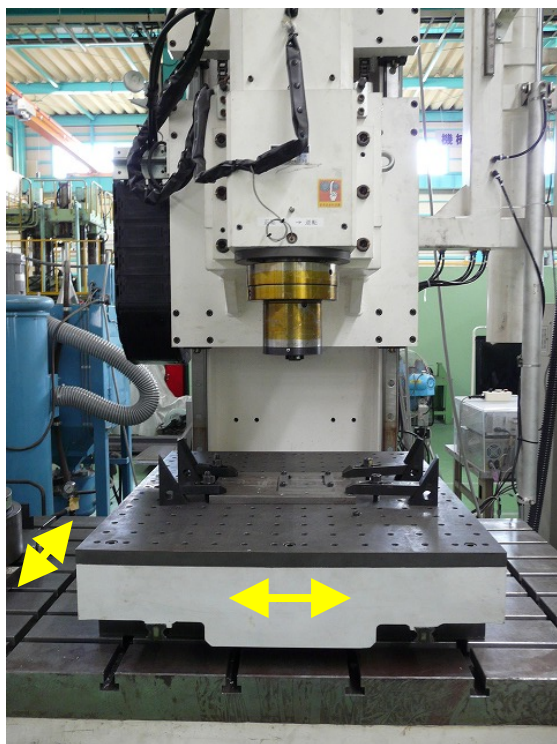
寸法：
先端部直径 ϕ 11mm
先端部長さ 35mm
先端テーパ角 15°
材質: S45C

(c) 非消耗性回転工具

図 3-2 試験片および回転工具形状

3-3 Y 軸の追加

開発を進行していく上で、実体材での処理を行うこととしたので、設備したおりに装備している X 軸に加えて、さらに、図 3-3 のように Y 軸を追加し開発の便を図った。Y 軸テーブルは簡単に脱着でき、容易に設備した初期状態に戻すことはできる。



Y テーブルの追加によって
下記写真のような多点コーティン
グが連続で施工可能
(400x1000mm)

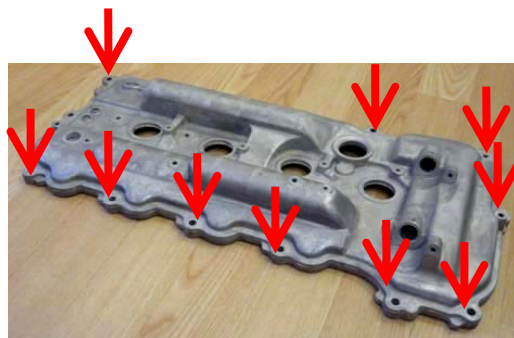


図 3-3 Y 軸テーブルの付与と想定される部品写真（右図）

また、図 3-4 に本実験で適用した内面コーティングプロセスの原理図を示す。これは、回転する工具に荷重を付与しながら改質材に接触させ、発生した摩擦熱により、改質材が可塑化し、塑性流動しながらシリンダ内面に圧着させるものである。その結果、膜厚 1～3mm 程度の安定したコーティング層を得ることが出来るというもので、光生アルミニウム工業の独自開発技術である。

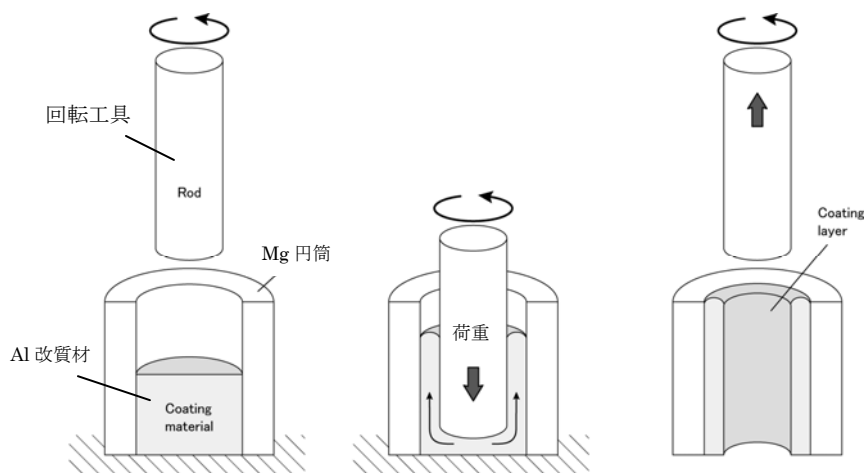


図 3-4 内面コーティングプロセスの原理図

内面コーティングプロセスの、主な接合条件のパラメータは、工具回転数・摩擦荷重・改質処理速度（工具の降下速度）である。予備実験で使用した容量 10 トンの摩擦圧接機では、今回の試験片に対して能力が過大で、1 トン以下の低荷重域の制御が困難であった為、接合最適条件を選定するには至らなかったが、Mg 円筒内面に Al コーティング層の接合が可能であることが確認でき、ハイブリッド構造体接合機の実験に移行できた。

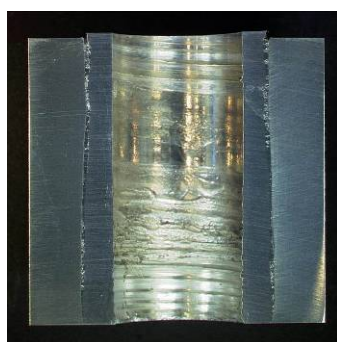
以下、表 3-1 に接合条件範囲を、図 3-5 に内面コーティングプロセスで処理後の Mg 円筒断面写真の一例を示す。図 3-5-(a)は、改質材に A1050 を用いたものであるが、Al 改質材の大部分が回転工具に凝着し、Mg 円筒内にコーティング層を接合することが出来なかった。また、Mg 円筒内表面は、熔融した跡が見られ、摩擦による入熱が、過剰であったと推察される。図 3-5-(b)および(c)は、改質材に A7075 を用いたもので、摩擦荷重、改質処理速度は同一条件だが、回転数が(b)より、(c)が高速回転になっている。回転数が高いほど摩擦入熱は多く、それに伴い(b)の断面において接合界面に厚い金属間化合物層の生成が確認された。一方、(c)断面では、目視で確認できる程の金属間化合物層は見られなかった。

表 3-1 内面コーティング接合条件

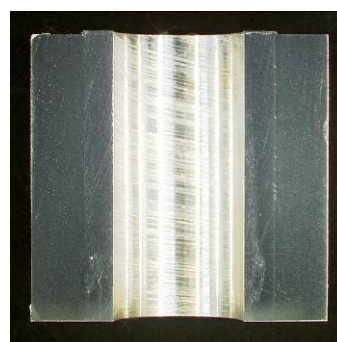
回転数 rpm	1000－3000
摩擦荷重 kN	15－25
改質処理速度 mm/min	100－350
Mg 円筒	AZ31
Al 改質材	A1050、A7075



(a)改質材:A1050



(b)改質材:A7075



(c)

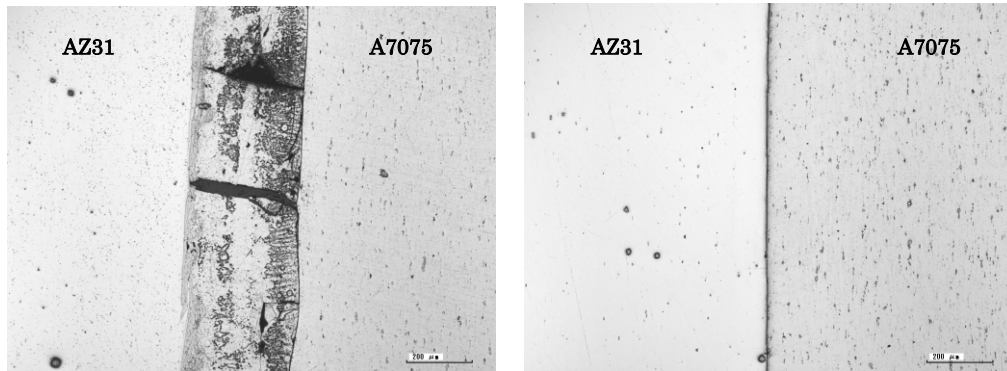
改質材 : A7075

図 3-5 内面コーティング処理後の Mg 円筒断面

図 3-6 に、前述の図 3-5-(b)、(c)それぞれの接合界面のマイクロ組織写真を示す。

図 3-6-(a)は、接合界面に 300～500 μm 程の金属間化合物層が生成しており、一部に割れや、局部溶解の跡も観察された。

図 3-6-(b)は、界面に目立った化合物層は無かった。



(a) 加工熱量の大きい場合

(b) 加工熱量の小さい場合

図 3-6 ミクロ断面組織

以上のデータに基づいて、ハイブリッド構造体接合機に移行し、接合条件の最適化を進めた。今回の実験では Mg 合金、Al 合金共に展伸材を使用した。

ハイブリッド構造体接合機によるマグネ鋳造合金に対する内面コーティング実験を行った結果を以下に示す。

3-4 ハイブリッド構造体接合機によるマグネ鋳造合金に対する内面コーティング実験結果

図 3-7 に、主軸回転数を変化させた場合(加工速度一定)のマグネシウム合金シリンダのコーティング断面を示す。従来の摩擦圧接機による予備実験と比較しても遜色の無い出来上がりで、問題なく接合出来る事を確認した。但し、モーター特性の違いからか、同一の条件で施工しても、摩擦発熱の状態が良好であるように感じた。図 3-7 の例では、回転数の増加と共に摩擦発熱量が増加し、界面の金属間化合物層が厚くなってゆく事を確認した。同様に、改質処理速度を変化させた場合も、速度が遅くなるほど化合物層が生成した。

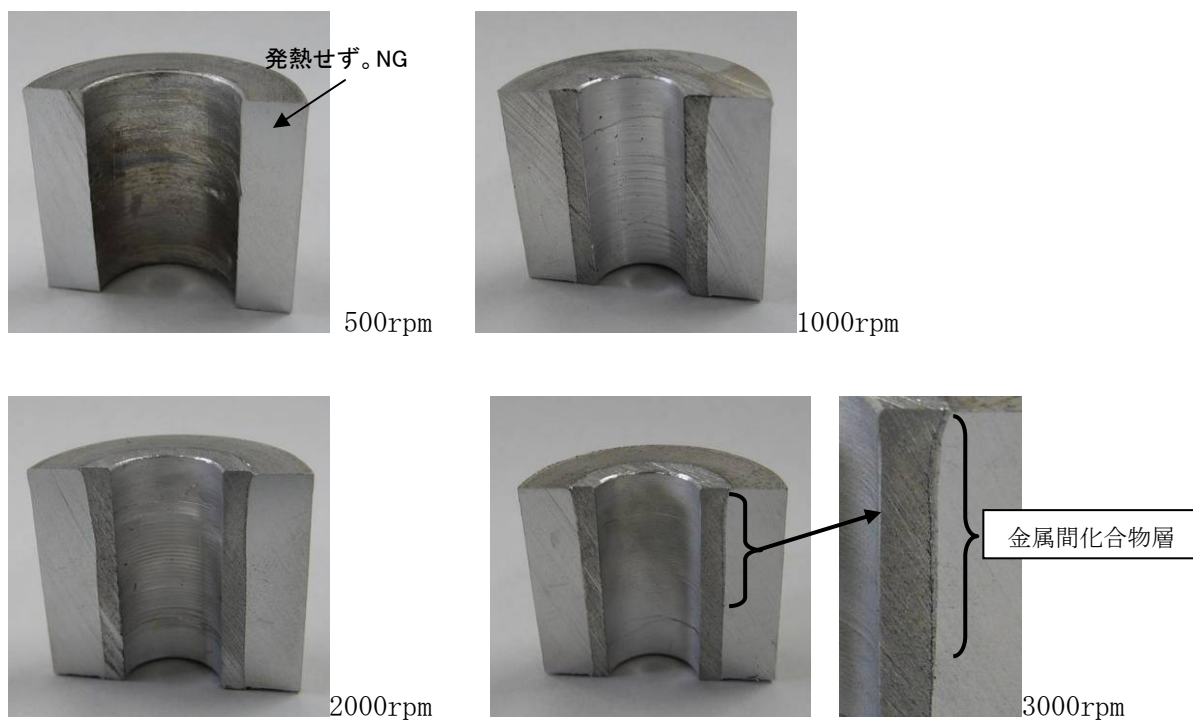


図 3-7 内面コーティング処理後の Mg 円筒断面

図 3-8 は、接合界面に生成した金属間化合物層のミクロ組織である。高倍率で観察したところ、マグネシウム合金側組織に球状の空孔欠陥の発生が確認された。接合時にマグネシウム合金の一部が局部溶解し、合金中に含まれる水素ガスが噴出したものと考えられる。また、アルミニウムとマグネシウムの腐食電位の差によるマグネシウムの溶失（腐食）による可能性もある。これは、バフ研磨中に水溶性の研磨材を使用するため生じる現象で、防止するために非水溶性、すなわちアルコールベースの研磨剤を使用すればこの現象を押さえられる可能性がある。

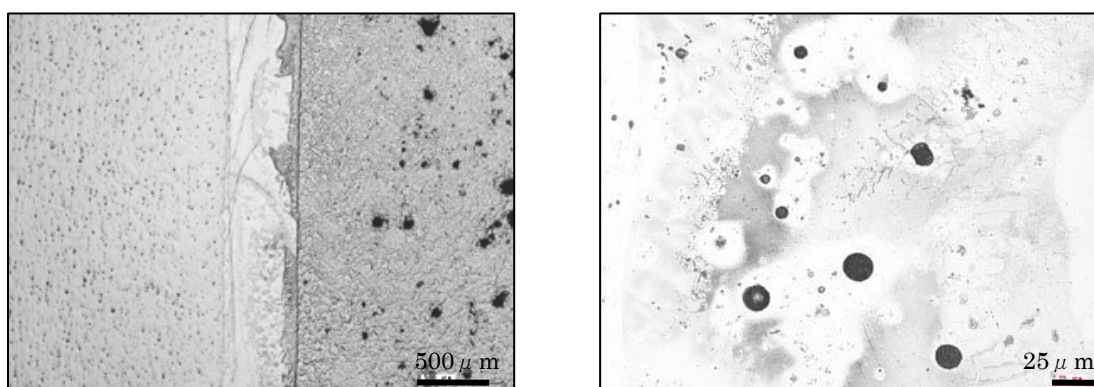


図 3-8 界面の金属間化合物層

3-5 ハイブリッド構造体接合機による実験結果（チャート）

図 3-9 に、主軸回転数 3000rpm の実験チャートを示す。この実験では、改質処理速度を一定に保つプログラムであった為、主軸荷重（Z 荷重）が大きく変動して、改質材の軟化状態に追従している事が分る。主軸回転の高い条件ほど、回転による摩擦発熱が大きくなる為、反比例して主軸荷重は小さくなると思われたが、実際は回転数を 1000、2000rpm と変化させた場合も、ほぼ同様なチャート図となっており、明確な違いが見られなかった。しかしながら、前述の通り断面観察では、回転数の変化に伴い化合物層の生成に変化が見られるため、今後詳細に分析し、変動要因を特定する必要がある。接合温度の測定も不可欠と感じた。

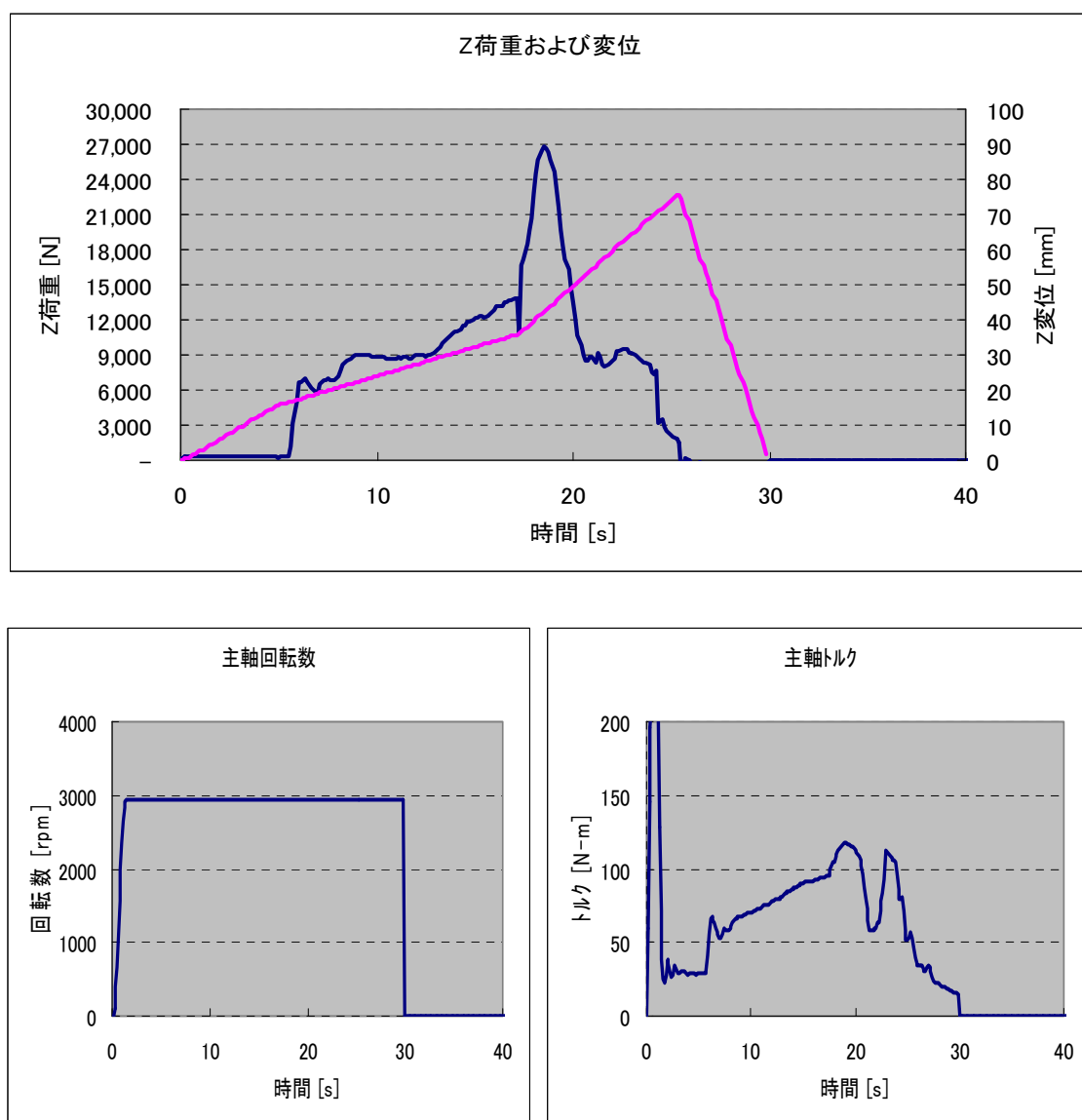


図 3-9 実験チャートの例（3000rpm の場合）

3-6 ハイブリッド構造体接合機による内面コーティングまとめ

ハイブリッド構造体接合機を使用した内面コーティング実験の結果、内面コーティング接合においては、従来の摩擦圧接の改造機と同様、問題無く接合体を得られることを確認した。本プロジェクトでは2つのコーティング法の差圧型と非差圧型の制御法を開発した。本報告では前者を内面コーティングとして示したが、後者は非開示として本報告より削除した。ただし、結果のみを示すと、強いていうと長い穴、すなわち穴の直径に対して深いアスペクト比の大きいものをコーティングする場合は差圧型が安定しており、短尺の穴、アスペクト比の小さい場合では制御の簡単な非差圧型の方がメリットがある。また、高回転、低速送りの条件が合金層を広範囲で生成し、作業時のZ軸方向の荷重が安定していた。

第4章 内面コーティングによるハイブリッド構造体の強度と組織評価

光生アルミニウム工業株式会社

愛知県産業技術研究所

豊橋技術科学大学

4-1 概 要

第3章で作製したハイブリッド構造体のコーティング層との接合部界面の強度と組織の関係を解明する。

評価試験は、アスペクト比の小さい短尺ものの処理を想定した試験材を評価した。

4-2 実験方法

内面コーティングプロセスの、主な接合条件のパラメータは、工具回転数・摩擦荷重・改質処理速度（工具の降下速度）である。導入された容量3トンのハイブリッド構造体接合機を用いて行った。

試験体の断面マクロでは、接合不良が低速回転、高改質処理速度では接合不良を生じやすい。また、高速回転、低改質処理速度の領域では接合は良好であるが、接合界面に合金層も生成されている。この結果、回転数が高い、送り速度が遅いと熱量過多で合金層が厚く、広範囲に生成されると思われる。

この合金層を詳細に観察すると図4-1のようにほぼ2層に分かれた組織が認められる。合金層には一部割れも認められたが、ほぼ健全な界面となっている。合金層の厚さも下部の方がやや厚いが膜厚はほぼ均一で界面もスムーズである。①の上部で、アルミ側でやや接合不良（下方の楕円の丸い領域）も認められる。これは上方での側面圧力が不足しているものと思われる。しかし、膜厚はほぼ均等である。送り速さ 25mm/min が Z 軸荷重 2000N で安定している。他の場合では送り速度が速いので Z 軸の変動が大きい。これは、材料側の軟化が不均一におきている結果と思われる。

回転数:5000rpm 、送り:25mm/min

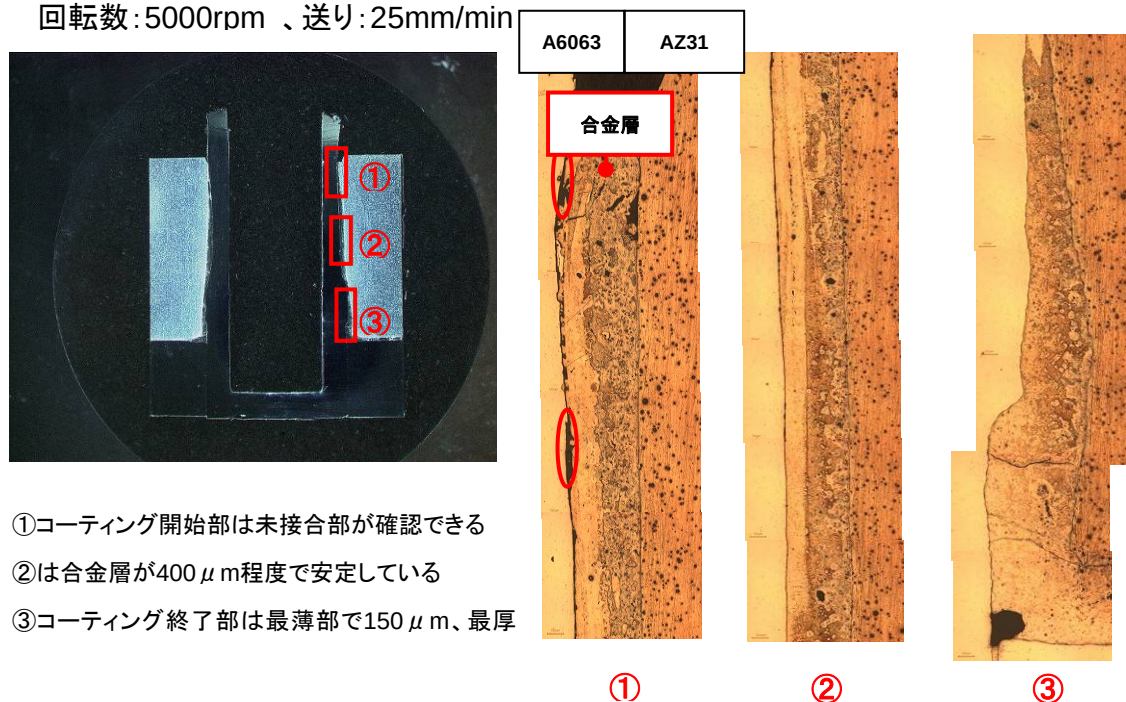


図 4-1 内面コーティングハイブリッド構造体のマイクロ断面写真

4-3 コーティング層の組織および合金層

図 4-1 に示した断面のように内面コーティングハイブリッド構造体の層は複数の層に分かれているように思われる。この部分を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、またこの部分の元素分析を行った。この結果を図 4-2 に示した。

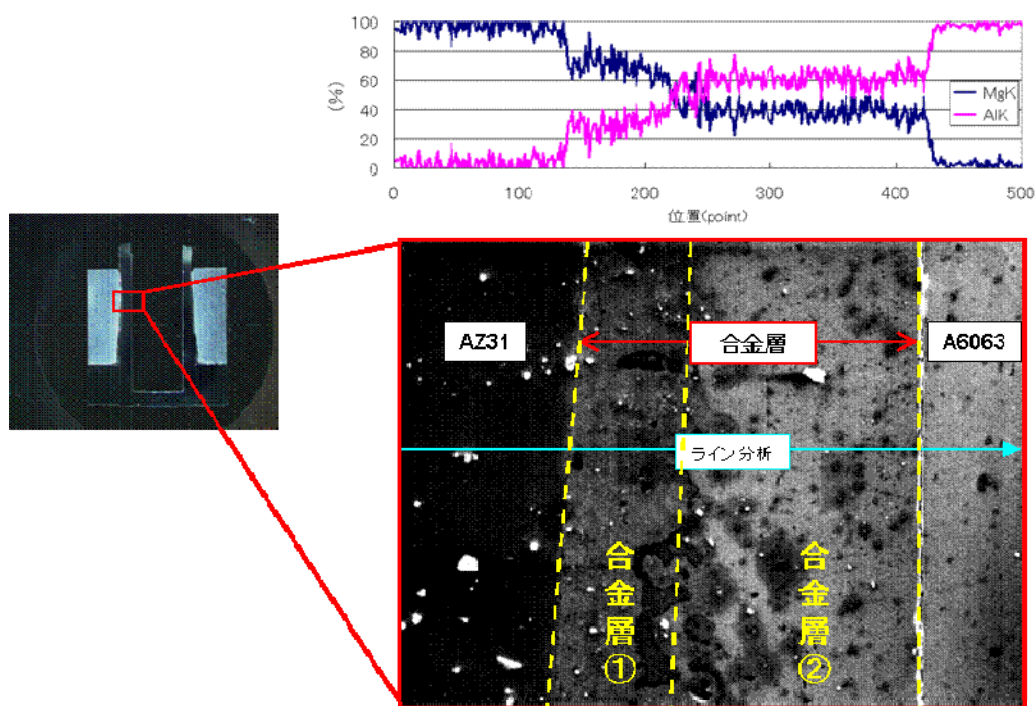


図 4-2 合金層の元素分布（走査型電子顕微鏡線分析図）

図 4-2 の左側はマグネシウム合金側で右側がアルミ側である。図中に黄色の線で示すように界面では 2 層の組織が認められる。青線上でライン分析した結果を上図に示す。この結果によるとピンクのアルミはマグネシウム側より徐々に増加し、中央付近より一定に 60%前後の値を示し、ついでアルミニウム母材濃度となる。徐々に濃度の変化している領域を、合金層①、一定の合金層濃度となっている部分を合金層②と定義すると合金層②と母材界面の境界は狭く 10 ミクロン以下である。一方、マグネシウム側は裾の広い合金濃度変化となっている。

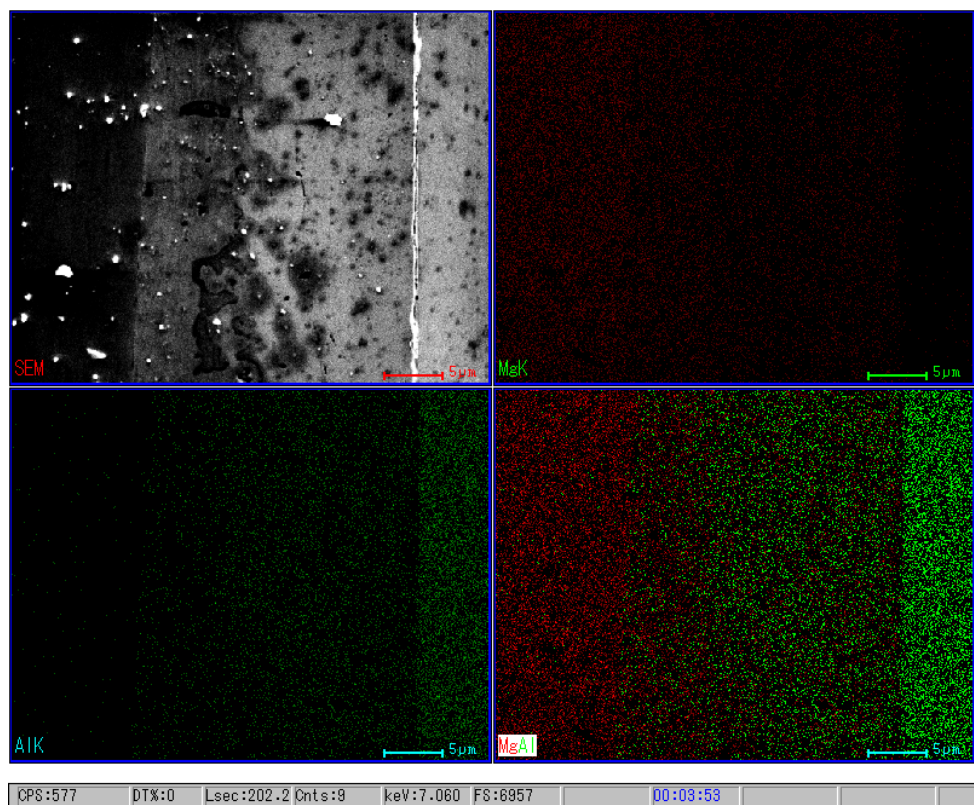


図 4-3 合金層の元素分布（走査型電子顕微鏡面分析図）

図 4-3 は、同じく走査型電子顕微鏡によるハイブリッド接合体の界面付近の元素の分布状況を面分析した結果である。赤のアルミニウム分布と緑のマグネシウム分布を見たもので、右下の図で合金層①の領域で徐々に元素分布が変化していく様子が確認でき、線分析結果と一致している。

4-4 実製品を想定したハイブリッド構造体の製作および強度評価

本プロジェクト推進中に実製品を想定した試験を行えるかとのアドバイザーおよび経済産業省よりのコメントもあり、申請当時には無いプログラムを入れた。

実生産品のマグネシウムダイカスト材を準備し、XY テーブルを装備したハイブリッド構造体接合機に図 4-4 の様にセットした。セットは、定盤に拘束ボルトを用いて、拘束した。ボルトにはあらかじめ孔加工した A6063 アルミニウム合金を挿入した。

加工機には NC プログラムにより動作させた。



図 4-4 マグネシウムダイカスト部品の処理

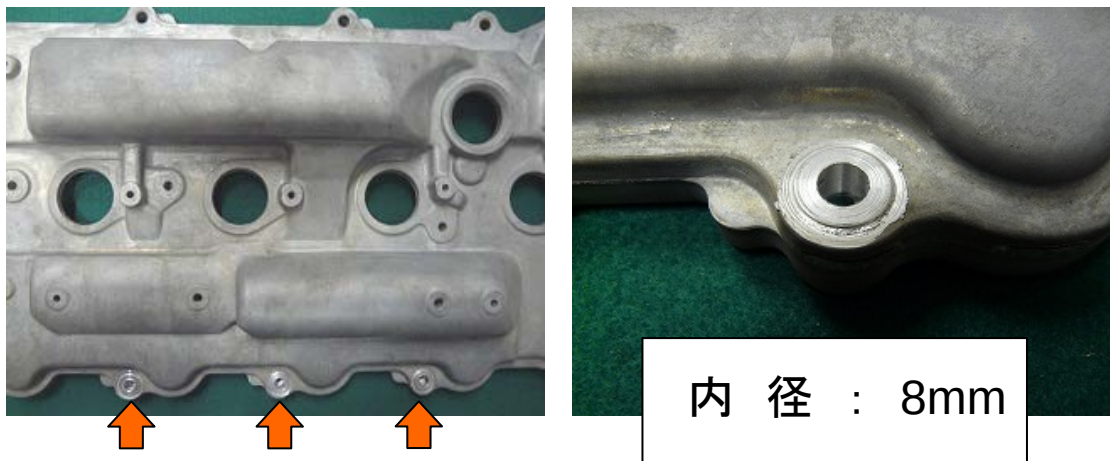


図 4-5 マグネシウムダイカスト部品の処理結果 (矢印部)

図 4-5 は、処理終了の写真である。矢印の連続打点処理を行ったもので、外観上満足すべき結果を得た。

4-5 ハイブリッド構造体コーティング処理材の強度評価

得られたハイブリッド構造体によるコーティング処理材の強度を押込み剪断試験によって評価した。比較材として他の結合法、すなわちネジ締結、焼きばめと比較した。

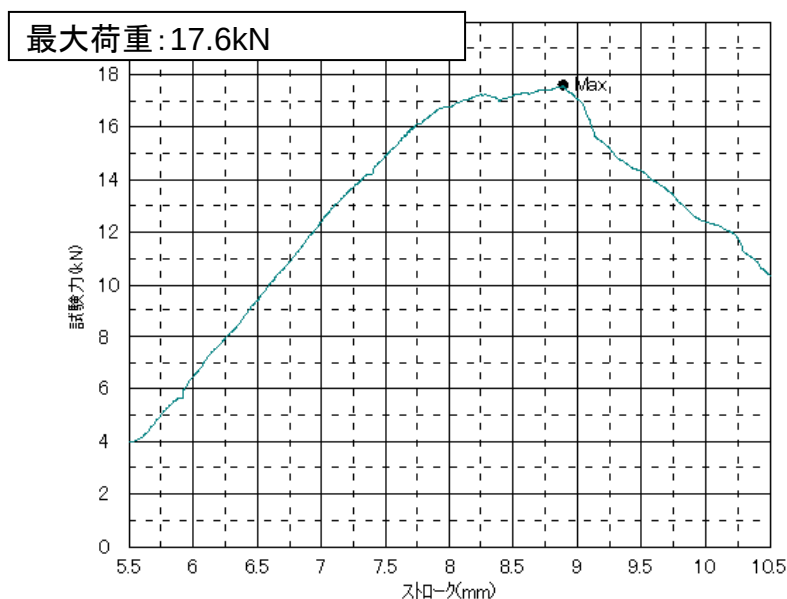


図 4-6 マグネシウムダイキャスト部品の押込み剪断試験結果

図 4-6 は剪断試験結果である。最も高い剪断強度を示した 5mm/min の加工速度で行ったハイブリッド構造体の例である。試験機ラムの変位を横軸に縦軸に加重を取ったものであるが、変位と比例した加重が負荷された後に変位のみ増加後、剪断破断に至る。最高点の加重を持って最大剪断加重とした。この場合、最高剪断加重は 17.6kN である。

表 4-1 剪断試験結果の総括

試験片		最大荷重
内面コーティング	5mm/min	17.60kN
	10mm/min	14.02kN
	20mm/min	16.79kN
比較用・M8 ネジ		7.31kN
比較用・焼きばめ		0.24kN

表 4-1 は、剪断試験のまとめである。これによると上の 3 つ、すなわち内面コーティングによるハイブリッド構造体の剪断強度はネジ結合、焼きばめ結合の 2 倍から数倍の剪断強度を有していることが分かる。

4－6 結 論

ハイブリッド構造体によるコーティング処理としての結論としてはハイブリッド構造体接合機において、新規製作した XY テーブルを使用し内面コーティングの連続多点処理が可能であることを確認した

小径・短距離のコーティングならばバックアップ装置なしの内面コーティングでも、接合体を得られることを確認できた。

合金層は成分が異なる 2 層になっている。押込み剪断試験により、内面コーティングがネジ・焼きばめよりも高強度となることが確認できた。また、合金層の押込み剪断強度におよぼす影響は現在の所明らかでない。

第5章 スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化に関する研究

光生アルミニウム工業株式会社

国立大学法人豊橋技術科学大学

5-1 研究目的及び目標

マグネシウム合金の剛性不足という弱点を克服するために、スポット摩擦攪拌接合によるマグネシウム合金とアルミニウム合金をハイブリッド化した構成部材の実現を目標としている。ここでは、スポット摩擦攪拌接合によるアルミニウムとマグネシウムの重ね継手の接合パラメータの最適化を図った。

5-2 スポット摩擦攪拌接合パラメータの最適化の実験

図 5-1 に実験に使用した荷重制御型の接合装置の外観を、また表 5-1 にその諸元を示す。さらに、図 5-2 に接合用ツールの形状と表 5-2 にその諸元を示す。



図 5-1 荷重制御型スポット摩擦攪拌接合装置.

表 5-1 荷重制御型スポット摩擦攪拌接合装置諸元

Machine Name	Kawasaki Heavy Industries Stationary FSJ Machine
Electric Motor Main Shaft (V)	AC200/220
Welding Pressure (N)	1470~5880
Main Shaft Rotation Speed (rpm)	0~4500
:Width	675
Size (mm):Length	975
:Height	1993
Weight (kg)	550

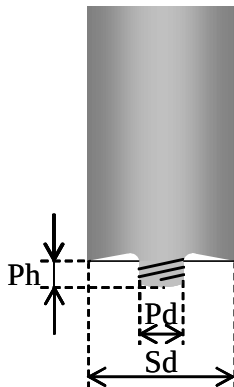


図 5-2 ツール形状.

表 5-2 ツール形状諸元

	TG7A	TG9A	TG10A
Material	SKD		
Shoulder diameter (Sd)	10mm		
Probe diameter (Pd)	3.0 mm		
Probe hight (Ph)	1.0 mm	0.7 mm	0.3mm

供試材には板厚 $t=1\text{mm}$ のアルミニウム合金 A1070 とマグネシウム合金 AZ31 を使用した。

5-3 スポット摩擦攪拌接合の実験結果

図 5-3 に上板が A1070, 下板が AZ31 で作製した接合体の外観を、また、図 5-4 に上板が AZ31, 下板が A1070 で作製した接合体の外観をそれぞれ示す。上板が AZ31 の接合体ではツールへの凝着もなく良好な接合体が得られた。しかし、上板が A1070 の接合体では、低荷重の条件であってもツールの振れや A1070 のツールへの凝着が確認された。この傾向は位置制御型の場合と同様であった。



図 5-3 接合体表面 (AZ31/A1070 1000rpm-5000N-7s-TG7A)

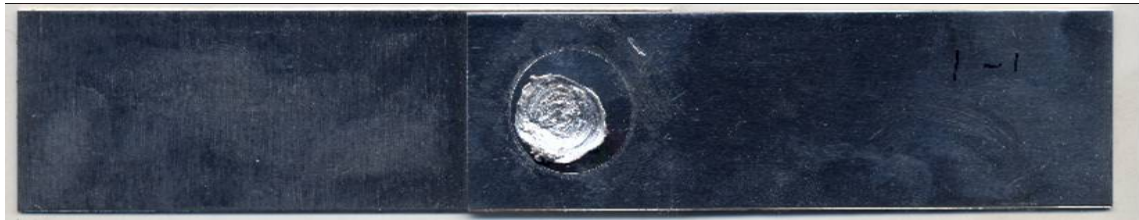


図 5-4 接合体表面 (A1070/AZ31 1000rpm-1500N-3s-TG7A)

表 5-3 に引張試験の結果をまとめて示す。また、比較のために位置制御型装置での結果（ツール回転数 1000rpm）を示す。引張せん断強度と十字引張強度は共に位置制御型の接合装置において最も高い強度が得られている。両接合での接合時間を比較すると、荷重制御型装置の方が長時間を要することが分かる。一般に荷重制御型装置では、ピン部が押し込まれショルダーが上板に完全に接触するまでに過度に時間がかかる。このため、接合部への入熱量やツールの押し込み量が適正に制御できないものと考えられる。今回の実験では、接合開始から終了までを一定荷重として制御したが、荷重を段階的に変化させるなどの改善が今後の取り組みとして必要と考えられる。

表 5-3 引張試験結果

接合装置	ツール形状	接合時間	押し込み量	引張せん断強度	十字引張強度
荷重制御	TG7A	7s	—	1.75 kN	115 N
	TG7A	8s	—	1.969 kN	250 N
	TG9A	7s	—	1.859 kN	325 N
位置制御	TG7A	1s	1.2mm	2.035 kN	445 N
	TG9A	1s	1.1mm	1.973 kN	274 N

5-4 まとめ

荷重制御型接合装置を用いて AZ31-A1070 間のスポット摩擦攪拌接合を行い、位置制御型接合装置との比較を行った。その結果、短時間の接合条件で、プラグ破断する強度の高い強度を得た。荷重制御型接合装置でも位置制御型装置と同様に上板を A1070 とした場合には、回転ツールの振れやツールへの凝着により良好な接合体の作製は困難であった。また、位置制御型装置では接合時間が数秒であったのに対し、荷重制御型装置では接合時間が長く、また接合強度も低いものとなった。

接合部断面の SEM 観察および EDX 分析の結果、ツールのショルダー下部では、ピン高さによらず塑性流動による Al と Mg の巨視的混合が確認された。しかし、ピン下部においては、ピン高さの低いツールにおいてのみ上板と下板の間での混合、拡散が確認された。また、ピン高さの低いツールほど接合中心部の温度が高くなる傾向が認められた。これは、接合時間とともに接合部の温度が上昇した結果、接合部が軟化し塑性流動を起こすとともに相互拡散が促進されたためと考えられる。一方、Al の Mg への明確な拡散傾向は確認されなかった。

接合中の部材内温度測定結果より、押し込み深さの増加に伴い接合中の温度が上昇し、最高到達温度が中心部で約 580K になることが分かった。この温度は、Al と Mg の融点・共晶温度よりも低いため、接合界面では金属間化合物の生成・成長が抑制されるものと考えられる。ただし本接合体では、薄い金属間化合物層の形成と塑性流動に伴う Al と Mg 間の相互拡散、ならびに混合による機械的にロックされた構造の界面形成により Al と Mg が強固に接合された可能性が示唆される。

第6章 マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接に関する研究

光生アルミニウム工業
愛知県産業技術研究所

6-1 概要

マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材料の摩擦圧接を行い、熱量配分から摩擦圧接パラメータの最適化を図る。

6-2 供試材および実験方法

供試材は Al-6%Si の AC4C と称される一般的な鋳造合金および転伸材の丸棒同士およびパイプ同士の異種材料、同種形状の摩擦圧接を実施した。

T6 処理を施した AC4C 鋳物材を、直径 $\phi 25\text{mm}$ 、長さ 150mm に加工し、摩擦圧接の試験片として使用した。圧接制御は、摩擦加圧 P1 を摩擦長制御、アプセット加圧 P2 を摩擦時間制御、主軸回転停止のタイミングを P2 加圧開始後に設定した。

6-3 実験結果

AC4C-T6 材の摩擦圧接を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 継手効率は 89.0% で母材破断しており、アルミ系材料としてはほぼ満足できる水準の接合条件が得られた。
- (2) バリの形状は接合条件による形状変化の境界が存在し、カールしているほど継手効率は高い値を示した。

6-4 マグネシウム合金展伸材+マグネシウム合金展伸材の摩擦圧接

＜供試材および実験方法＞

供試材には、Mg-Al3Zn1Mn の AZ31 マグネシウム合金展伸材を使用した。試験片寸法を、直径 $\phi 20\text{mm}$ 、長さ 100mm として、摩擦圧接試験に供した。圧接制御は、摩擦加圧 P1 を摩擦長制御、アプセット加圧 P2 を摩擦時間制御と、ここまでは前述のアルミ鋳物の摩擦圧接と同様であるが、主軸回転が完全停止後に P2 加圧が付与されるよう設定した。

6-5 実験結果

AZ31 マグネシウム合金の同種材の摩擦圧接を行った結果、以下の結論を得た。

引張試験の結果、摩擦圧接継手は最も良いもので、引張強度 279MPa と JIS 規格の 240MPa 以上を十分満足しており、良好な継手を製作することが出来た。

第7章 全実験結果の総括

開発した内面コーティングハイブリッド構造体接合機は、東海テクノ株式会社の全面的な協力もあり、十分な機能を有していることを確認した。途中、光生アルミの豊田製作所の建て替えに伴い、平成20年の年度途中で福井工場への移転、さらには平成21年の豊田製作所への再移転等開発業務に支障を来す問題を生じた。光生アルミニウム工業各位の真摯な業務遂行により、成果を出すことができた。また、豊橋技術科学大学、愛知県産業研究所各位の熱心な協力により十分な成果を得たことは大きな喜びである。

プロジェクトとしても、実施工の適用についても掘り下げるべき課題も見いだしたので、今後学術的にも実用面においても、さらに近い将来この開発を発展させたいと考えている。

ハイブリッド構造体によるコーティング処理としての結論としては

- 1：ハイブリッド構造体接合機において、新規製作したXYテーブルを使用し内面コーティングの連続多点処理が可能であることを確認した
- 2：小径・短距離のコーティングならばバックアップ装置なしの非差圧型コーティングでも、接合体を得られることを確認できた。
- 3：高回転、低速送りの条件が合金層を広範囲で生成し、Z軸方向の荷重が安定していた。
- 4：合金層は成分が異なる2層になっている。
- 5：押し込み剪断試験により、内面コーティングがネジ・焼きばめよりも高強度となることが確認できた。

スポット摩擦攪拌接合による結果を総括すると

- 1：アルミニウム合金板とマグネシウム合金板の重ね継手の摩擦攪拌スポット接合では、プラグ破断の条件が得られ、十分な強度のあることを確認した。
- 2：接合部断面のSEM観察およびEDX分析の結果、ツールのショルダー下部では、ピン高さによらず塑性流動によるAlとMgの巨視的混合が確認された。
- 3：ピン下部においては、ピン高さの低いツールにおいてのみ上板と下板の間での混合、拡散が確認された。また、ピン高さの低いツールほど接合中心部の温度が高くなる傾向が認められた。
- 4：接合中の部材内温度測定結果より、押し込み深さの増加に伴い接合中の温度が上昇し、最高到達温度が中心部で約580Kになることが分かった。

マグネシウム合金とアルミニウム合金異種材の摩擦圧接における結果を総括すると、

- 1：アルミニウム合金同種材AC4C-T6材の摩擦圧接を行った結果、継手効率は89.0%で母材破断しており、アルミ系材料としてはほぼ満足できる水準の接合条件が得られた。

2：アルミニウム合金とのマグネシウム合金異種材の摩擦圧接継手の強度は、同種材よりやや低い強度特性を示す結果が得られた。いずれの継手でも、摩擦寄り代が大きくなると共に継手強度は高くなる傾向がある。