

レーザー異材溶接の現状と新展開

名古屋大学 工学研究科

沓名 宗春

1. はじめに

従来より、表1に示すような異種金属・異種材料の溶接が工業的に要求され、研究開発されてきた。かなりものが固相接合（圧延、爆接、摩擦接合など）やろう付で溶接され、実用化されてきた。異材継手を用いることにより、多機能な部材を作成したり、主要材料にない性能を付与したり、主要部材の各箇所ごとに性能を変化させたり、部材コストを低減させることなどが可能となる。しかし、通常、金属の結晶構造が異なることや材料特性が異なることから、ここで紹介するレーザーによる異材継手の溶接は、アーク溶接による異材溶接の場合と同じように、冶金学的に図1に示すようにその溶接性には多くの問題がある[1]。ただし、レーザー溶接の入熱量が少ない、発生する収縮応力や溶接ひずみ・変形が低減できるので、これらの問題を低減できることがある。すでに、電機産業、自動車産業、精密機械産業中心に、各種産業で応用が進んできている。ここではまず、各種異材継手のレーザー溶接とその問題点を紹介し、さらに最近注目される輸送機器の軽量化問題で注目されている鋼とアルミニウムのレーザー溶接に関する研究開発を中心に述べる。とくに、著者らが進めているアルミニウム合金と鋼材のレーザーロール溶接や、実用化されているレーザーろう付のような新展開も含めて紹介する。



図1 各種金属間の溶接適合性[1]

表1 対象となる異種金属継手とその用途

異種材料継手の材料系 基本材	相手材	適用分	適用製品
軟鋼	高炭素鋼	自動車、機械産業	工具、歯車
軟鋼	ステンレス鋼	各種工業、 エネルギー、 造船	精密機器、化学プラント 圧力容器、反応容器 プロペラ
低合金鋼	銅合金モネル	橋梁、建築	溶接構造物
低合金鋼	低合金高張力鋼	航空機	動力軸（後部軸、前方軸など）
低合金鋼	高合金鋼Cr鋼	エンジン	タービノズルダイヤフラム
低合金鋼	13Cr鋼	エネルギー	発電プラント機器
低合金鋼	ステンレス鋼	輸送機器 プラント	自動車部品（燃料噴射弁等） 各種化学プラント機器、
低合金鋼	銅合金	プラント	熱交換器、機械部品
低合金鋼	黄銅、リン青銅	輸送機器	自動車ボンネット
低合金鋼	アルミニウム合金	プラント	海水プラント、複水器
低合金鋼	チタン合金	エネルギー	原子力プラント
低合金鋼	ニッケル合金	航空機 プラント	エンジン部品 化学プラント機器
耐熱鋼	鋳鉄	自動車	自動車部品
ステンレス鋼	鋳鉄	輸送機器	エキゾーストマニホールド
ステンレス鋼	アルミ合金	エネルギー	種低温機器、トランジション継手
ステンレス鋼	銅合金	エネルギー	発電プラント
ステンレス鋼	タンガスステン/モリブデン	エネルギー	核融合炉、
ステンレス鋼	超合金	エネルギー	発電プラント
アルミ合金	異種アルミ合金	輸送機器	構造体、パネル
アルミ合金	銅合金（黄銅、リン青銅）	輸送機器	エンジン部品（エンジンバルブ）
アルミニウム合金	チタン合金	航空宇宙産業	宇宙機器、航空機部品
アルミニウム	複合材料（SiC/Al）	航空宇宙産業	宇宙機器、
銅合金	ニッケル合金	電機産業	回路、配線
チタン合金	Nb		
チタン合金	Ta		
チタン合金	MMC複合材料、 Ti3Al		
ニオブ	Ti alloy4	エネルギー	燃料棒格納機器
ニオブ			
その他			
金属 - 樹脂			
金属 - セラミックス			

2. 各種異材継手のレーザー溶接およびその利点と問題点

2.1 各種異材継手のレーザー溶接およびその利点

(1) 炭素鋼と異種金属のレーザー溶接

軟鋼や低合金鋼と高炭素鋼、ステンレス鋼、鋳鉄、アルミ合金、銅合金、チタン合金、およびマグネシウム合金のレーザー溶接がある。炭素鋼やCr-Mo耐熱鋼とステンレス鋼の異材継手は広く利用されており、レーザー溶接される場合もある。レーザー溶接の場合、入熱が少なく、高速で溶接すると、冷却速度が高くなり、溶接金属の残留デルタフェライト量がアーク溶接に比べ、減少し、図2に示すように高温割れ感受性が幾分高くなる[2]。よって、図3に示すようにアーク溶接用のシェフラー組織図から得られるデルタフェライト量がずれるので[3]、注意を要する。直接、炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼や2相ステンレス鋼をレーザー溶接する時は注意を要する。とくに、高温で使用する部材の場合には「炭素移行」現象があるので、このような時はフィラーにニッケルの高いフィラーを用いて溶接する必要がある。

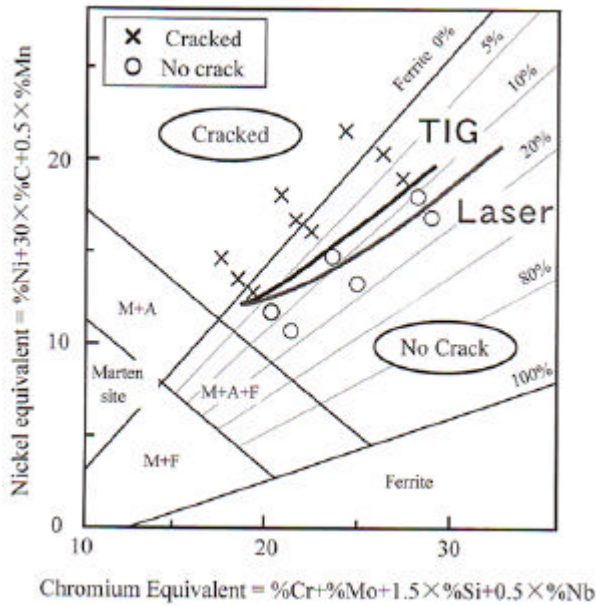


図2 レーザ溶接とアーク溶接におけるステンレス鋼の高温割れ感受性の比較[2]

最近、著者らは自動車ミッションギヤのレーザー溶接について、低炭素鋼と肌焼き鋼に浸炭処理（0.7 wt% C）した部材の溶接割れについて研究した結果、レーザー溶接条件により幾分ことなるが、溶接金属の炭素含有量が約0.45%以上になり、冷却によりその硬さが700HV以上になると、図4に示すように溶接金属内およびHAZにマルテンサイト変態誘起低温割れが発生することを確認した[4]。この割れを防止するには溶接部の硬さを650HV以下にする必要があり、(1)冷却速度を遅くするために予熱（例えば、高周波加熱などの）を行うか、(2)炭素含有量を下げのために炭素含有量の低いフィラーワイヤを用いてレーザー・アークハイブリッド溶接をすることが有効である。

炭素鋼とアルミニウム合金のレーザー溶接の研究も多くあるが[5]-[8]、未だぜい性な金属間化合物の生成の問題点があり、接合困難な異材継手とされている。なお、ティッセン製鉄所の特許出願（特許出願公表番号:2001-5011349）では図5に示すような重ね継手の接合面をレーザーで直接加熱するレーザー溶接法が提案され、鋼-アルミニウム、鋼-銅、鋼-チタン、鋼-特殊鋼の溶接が提案されている[9]が、未だ、自動車パネルへの適用事例は報告されていないようだ。著者らはこの問題を解決する方法としてレーザーロール溶接について研究開発したので、3.2節で解説する。

炭素鋼と銅のアーク溶接については鋼の粒界に銅が拡散して浸入し割れを生じることがあるが、レーザー溶接は熱サイクルが短時間であり、この影響を低減できる。著者らは炭

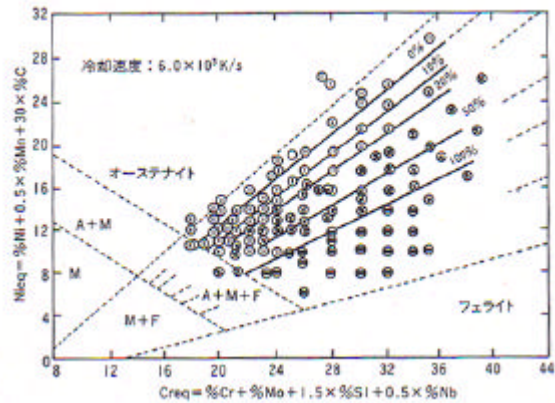


図3 ステンレス鋼レーザー溶接時の溶接金属組織の変化[3]

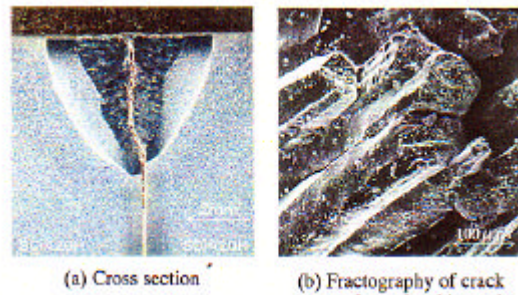


図4 軟鋼と高炭素鋼のレーザー溶接部に発生した変態誘起低温割れ[4]

素(SPCC)鋼と純銅(C1020)の異材継手について、レーザ溶接を適用し、母材破断するほど十分な強度の溶接継手を作成している[10]。

炭素鋼と純チタンのレーザ溶接については片山らが、上述の特許で提案された方法でレーザ溶接しており、金属間化合物を $2\mu\text{m}$ 以下の溶融部を確認している。継手強度も母材破断する継手を得ている[11]。

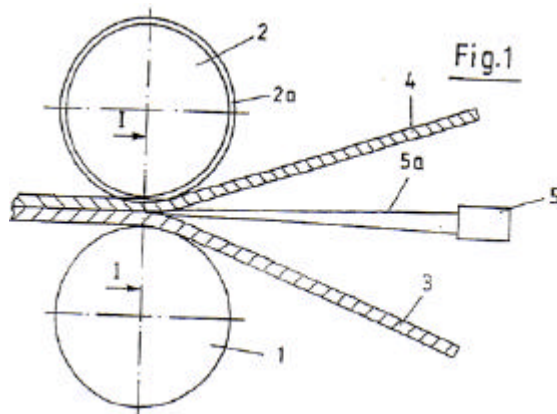


図5 特許出願「重ね継手のレーザ溶接」[9]

(2) ステンレス鋼と銅、アルミニウムおよびチタンとのレーザ溶接
 通電性と耐食性を確保する異材継手としてステンレス鋼と銅合金の継手が利用されており、この継手は溶接割れが生じるので、大久保らはビーム照射位置を銅母材側に 0.3m ズラすことにより割れを防止し、 220MPa の継手強度を得ている[12]。同様の実験をM.C.Guptaらも行っている[13]。

また、ステンレス鋼とアルミニウム合金のレーザろう付の例としては半導体部品の溶接として、304ステンレス鋼とA5052アルミ合金の溶接例がある[14]。

なお、渡辺らはSUS304と銅およびSUS304とアルミ合金の重ねスポット溶接をYAGレーザにより実験し、溶接条件の影響を調べている[15]。SUSと銅の溶接では母材以上の継手強度を得ている。

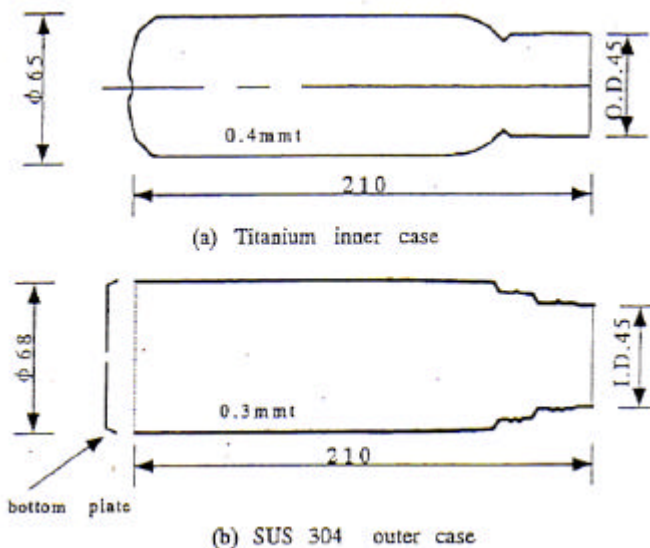


図6 SUS-Ti異材継手で作る魔法瓶の形状[16]

ステンレス鋼とチタン合金のレーザ溶接としては、図6に示すような魔法瓶の容器を接合するために行った

YAGレーザ重ね溶接の実験結果を武藤らが報告している[16]。チタン板側から重ね溶接し、溶接部へのチタンの含有量を制御することにより良好な継手を得られた。

(3) アルミニウム合金と異種金属のレーザ溶接

アルミニウム合金と異種アルミニウム合金[17][18]、マグネシウム合金[19]、および複合材料[20]のレーザ溶接について報告されている。アルミニウム合金と異種のアルミニウム合金(AI-27%Si~50%Si系)のレーザ溶接の研究では図7に示すように熱影響部に割れが発生する点や溶接金属に生じるポロシティが調査された。これらを防止するためにYAGレーザのパルス形状、パルス条件との

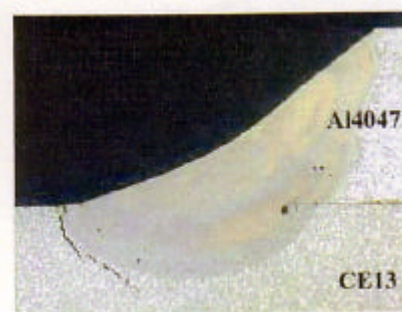


図7 Al-Si系合金のレーザ溶接部HAZに生じた割れ[18]

関係が報告された[18]。 アルミニウム合金A5052とマグネシウム合金AZ31の重ね継手のレーザ溶接の研究報告もある[19]。この場合も脆い金属間化合物が生成する。

なお、軽量の航空機部材や自動車部材として、アルミニウムとポリマーハイブリッド材が研究開発されているが、これらのパルスYAGレーザ溶接の研究もなされている[20][21]。

(4) 銅合金とFe-Ni合金のレーザ溶接

電子機器部品の配線に銅細線束が使用されるが、従来、鉛-スズはんだで接合されてきたが、近年、公害の点から鉛フリーが要求されるため、レーザで異種金属を直接接合する場合も出てきた。そこで、センサーなどの端子線に用いられているFe-Ni線とのレーザ溶接が研究され、銅細線をFe-Ni線側に偏心させることによりうまく接合できることを確認している[22]。

(5) チタン合金とニオブおよびタンタルとのレーザ溶接

原子力発電プラントなどでは高融点金属のTa, Nb とチタン合金の異材接合が要求される。これらの部材は製品寸法の精度が厳しく制限されるため、電子ビーム溶接やレーザ溶接が用いられる[23]。また、チタン合金Ti-6Al-4V合金とタンタルのパルスYAGレーザ溶接において、タンタル側に2mmズラすと割れなく溶接できることが報告されている[24]。

(6) ニオブと異種金属のレーザ溶接

ニオブとジルカロイ4とのYAGレーザ溶接でも溶接部がニオブ側で破断が起こるが強度的には十分な継手が得られた[23]。

(7) 金属と樹脂のレーザ溶接

最近、半導体レーザを用いて樹脂のレーザ溶着が工業的に適用されているが、このような樹脂とチタン板などの金属との異材継手のレーザ溶接が実用化している。図8はポリミドとステンレス鋼をレーザ溶接した一例である[25]。今後ますます金属と樹脂のレーザ溶接が拡大して行くと思われる。

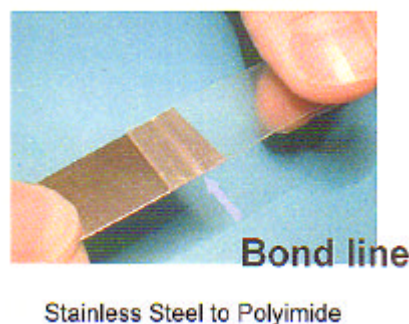


図8 ステンレス鋼とポリミドのレーザ溶接[25]

3. 異材継手のレーザ溶接の新展開

3.1 新レーザ溶接法

(1) レーザ溶着

樹脂と金属の異材接合を行うのにレーザを透過する樹脂側からレーザを照射して金属との接合界面で金属を加熱し、樹脂の融点(約250 - 300)以上になったとき、樹脂が金属表面に濡れ、接合面を拡大し、冷却が始まると樹脂が固着することから接合が完了する。または金属側から加熱し、接触している樹脂を加熱し、圧接する方法もある。すでに、チタンやステンレスと樹脂のレーザ溶着が報告されている[25]。

(2) レーザロール溶接

この方法は1997年ごろ、ドイツのブレーメンビーム応用研究所(BIAS)のSepold氏らにより考案され、アルミニウムと鋼の溶接に図9のような方法として研究開発された

[26]-[28]。著者らも1999年ころより、アルミニウムとSPCC鋼の異材継手を溶接する方法として、研究を重ね、ついに2001年、Sepold氏らと少し異なる結論に達した。図10は著者らが開発したレーザロール溶接法(特許第3535152号)の概要を示す[29]-[30]。この方法でアルミニウム合金と低炭素鋼[31][32]、銅と低炭素鋼[10]、oyobichitanと低炭素鋼[33]などの異材溶接が報告されている。これについてはさらに3.2節で具体的に紹介する。

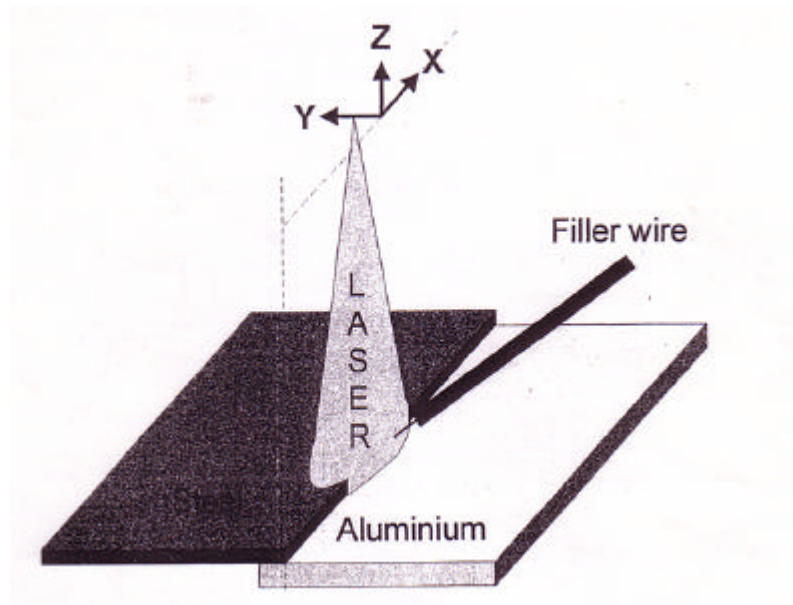
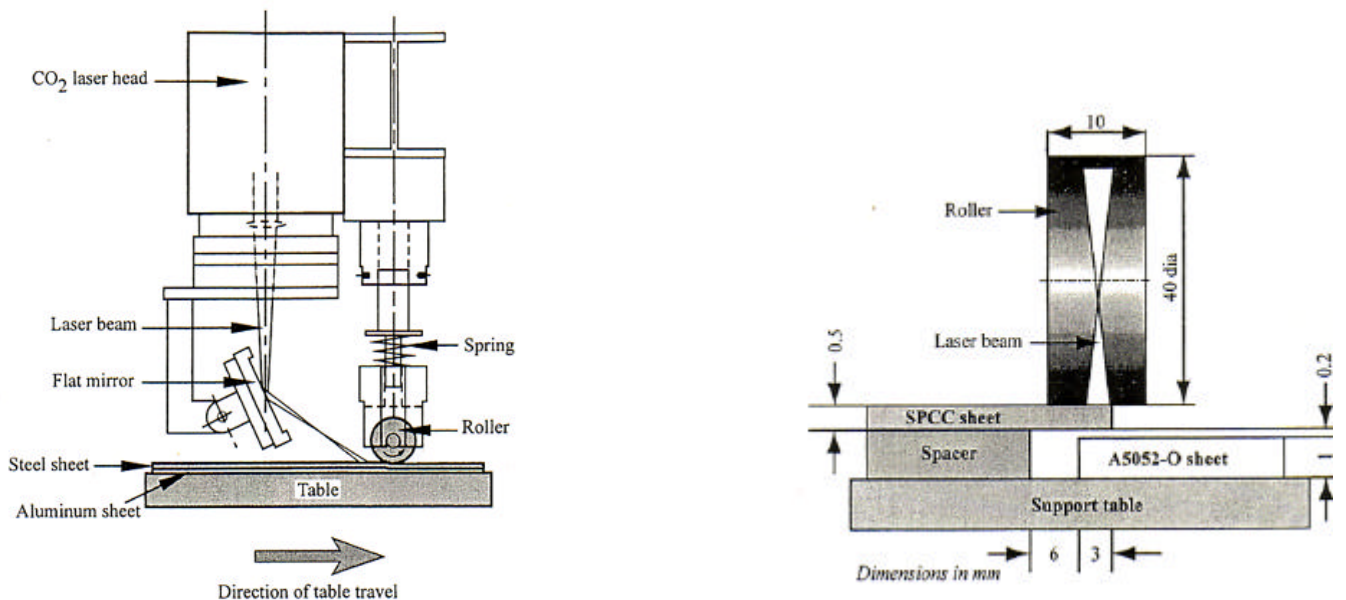


図9 BIASの開発したアルミニウムと鋼のレーザ溶接法の概念図[27]



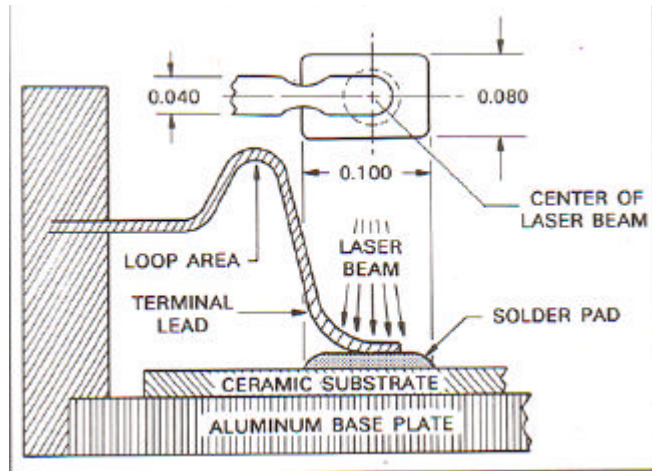
(a) 側面図

(b) 前面図

図10 名古屋大学で開発したレーザロール溶接の概念図[29][30]

(3) レーザろう付

約17年前、“レーザはんだ付(Laser Soldering)”という技術が開発され、電卓や家電機器などの溶接に適用された[34]。その後、この技術は図11に示すようなLSIのリード端子とアルミナ基盤の溶接[35]や扇風機の端子台のはんだ付[36]などに利用されてきた。1995年ごろから鉛フリーが公害防止の点から叫ばれてきた。そこで、Sn-Agはんだなどがレーザはんだ付に開発されてきた[37]。最近異種金属の溶接にレーザ



ろう付(Laser Brazing: 450以上の接合)が自動車部品などに接合に検討されている。図12はA6016アルミ合金とAISI1020鋼のレーザろう付継手を示す[38]。ろう材はAl-Zn系合金で溶接されている。

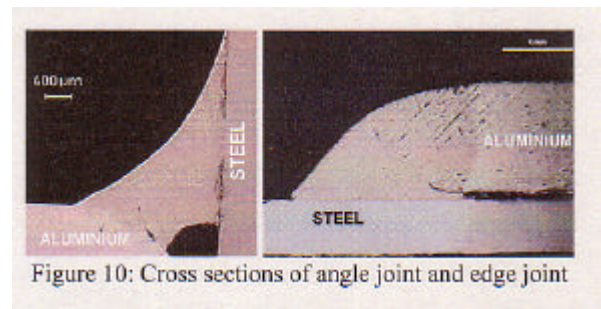


Figure 10: Cross sections of angle joint and edge joint

レーザろう付の大きな特徴は

- 1) ろう付が高速である。
- 2) ろう付用フラックスが不要

図12 鋼とアルミニウム合金のレーザろう付[38]

(4) レーザ照射・加熱

木材・複合材とポリマーの溶接として、図13に示すようにレーザを用いた接合法がある[39]。

家具や自動車部品に適用されている。木材のもみの木、樫の木、ベニア板、栗の木などの上にポリマーを置き、このポリマーをレーザで溶融し、木材に接合していく方法である。

以上、新しい異材継手のレーザ溶接法について紹介したが、まだまだ、いろいろな接合法が開発されて得ると思う。

Industrial Sectors	Furniture and Woodworking Industry	Automotive Industry																						
Processes																								
Typical Parts	Edge Bandings	Door Facings																						
Examples, Products																								
Materials	<table border="0"> <tr> <td>Wood materials</td> <td>Polymers</td> </tr> <tr> <td>- Fir wood</td> <td>- PE</td> </tr> <tr> <td>- Oakwood</td> <td>- PMMA</td> </tr> <tr> <td>- Chip board</td> <td>- PP</td> </tr> <tr> <td>- Nut tree</td> <td></td> </tr> </table>	Wood materials	Polymers	- Fir wood	- PE	- Oakwood	- PMMA	- Chip board	- PP	- Nut tree		<table border="0"> <tr> <td>Wood fiber composites</td> <td>Polymers</td> </tr> <tr> <td>- Lignoprop</td> <td>- PE</td> </tr> <tr> <td>- Lignoflex</td> <td>- PC</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- PP</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- PA</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- ABS</td> </tr> </table>	Wood fiber composites	Polymers	- Lignoprop	- PE	- Lignoflex	- PC		- PP		- PA		- ABS
Wood materials	Polymers																							
- Fir wood	- PE																							
- Oakwood	- PMMA																							
- Chip board	- PP																							
- Nut tree																								
Wood fiber composites	Polymers																							
- Lignoprop	- PE																							
- Lignoflex	- PC																							
	- PP																							
	- PA																							
	- ABS																							

図13 木材とポリマーのレーザ溶接の例[39]

3.2 アルミニウムと鋼のレーザロール溶接

図10に示したように炭素鋼板の表面を約1200にレーザ加熱した後、その下面を

ローラーでアルミニウムに圧接して、接合する方法を著者らはレーザロール溶接(Laser Roll Welding)と呼んでいる。接合界面には2ないし10 μ m厚さの金属間化合物層が生成するが、A6061板(t=1.0mm)とSPCC鋼板(t=0.5mm)の接合継手の強度は充分で図14に示すように十分で、鋼の母材で破断した。エリクセン試験でも図15に示すようにアルミ母材で亀裂が発生している。この技術で自動車のボンネットやルーフを鋼とアルミニウムのハイブリッド構造で軽量化できないか開発中である。

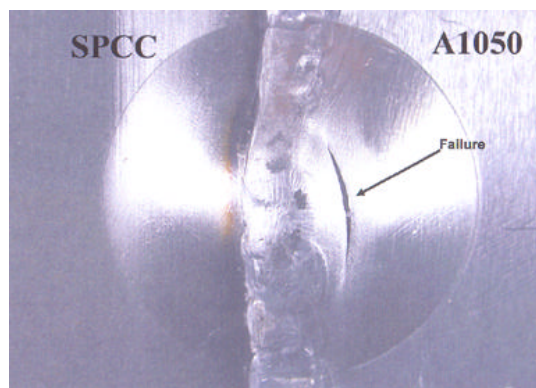


図14 LR溶接継手の引張試験結果

図15 LR溶接継手のエリクセン試験結果

ここではアルミと鉄の金属間化合物(Fe_3Al 、 $FeAl$ 、 $FeAl_2$ 、 Fe_2Al_5 、 $FeAl_2$ 等)の機械的性質に注目し、より延性のある鉄リッチの化合物である Fe_3Al 、 $FeAl$ を生成するレーザ溶接条件を求め、その後、急冷することにより、より健全な継手を目ざしている。すなわち、これら金属間化合物の生成を制御していることにより健全な異種金属継手の製作をできる。

本新技術は、鋼-アルミの組み合わせに代表されるような接合する金属のそれぞれの融点が異なり、かつ、低温でお互いに十分な固溶度がなく、難接合異種金属継手を圧接する異種金属ハイブリッド構造部材の製造に有用である。

本接合技術は、高融点側の金属をレーザで急熱し、ローラーで低融点側の金属に急速に密着させ、急加熱・急冷させるレーザロール圧接方法で、接合部界面において、脆性金属間化合物の生成を抑制させ、延性金属間化合物を生成し、かつ、金属間化合物層厚を薄く制御出来ることを特徴とするものである。

現在、科学技術振興機構の開発研究として実用化の研究を行っている。この方法を用いて、Steel-Al以外に、Steel-Cu, Steel-TiおよびTi-Alなどの溶接を試みており、母材破断の継手がスパッタなしに重ね接合したり、重ね突合せ継手を製作している。今後 各種異種金属パネルの溶接に有用な方法として開発を進めている。

本技術は、難接合異種金属継手の機械的特性を改善し、従来困難とされてきた異種金属ハイブリッド構造部材を、軽量高剛性化要求の強い自動車、航空機、鉄道車両、船舶等の輸送機器用に広く利用が期待される。

3.3 異材継手のレーザ溶接の今後の展望

(1) 自動車産業

自動車産業でも各種の異材継ぎ手がレーザ溶接されている。地球温暖化防止のため、車体

の軽量化が課題となっており、アルミニウム合金やマグネシウム合金や樹脂の適用が図16のように検討されている。とくに、SPCC鋼とアルミニウム合金の異材継手のレーザろう付などは研究されている。

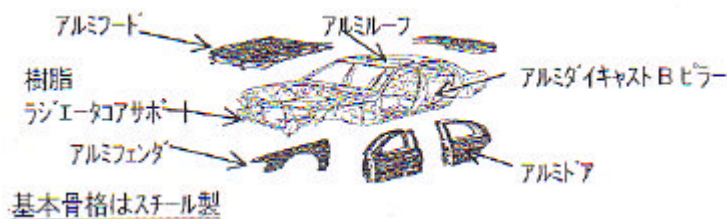


図16 自動車車体へのアルミ合金の適用箇所[40]

図17はエンジンプラグのインコネル600製中心電極と貴金属チップ(イリジウム+ロジウム)のレーザ溶接の例を示す[41]。寿命の長いプラグの貴金属チップが接合されている、

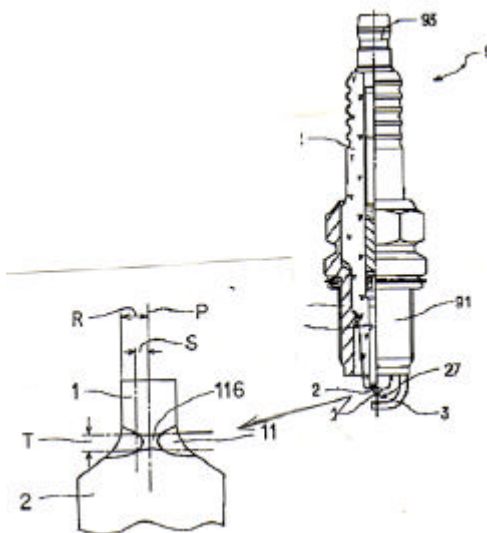


図17 プラグの貴金属チップのレーザ溶接[41]

(2) 航空機産業

最近エアバス社はA380旅客機をスキンパネルとスティフナーをレーザ溶接しているが、さらに、図18に示す座席トラックをアルミニウム合金同材からアルミニウム合金とチタンの溶接継手に改善しようと開発を進めている[42]。すでに、レーザろう付を用いて、図19のように座席トラックを製造する研究が報告された[42]。

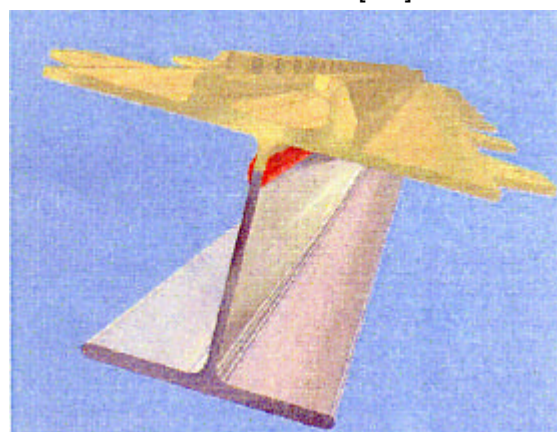
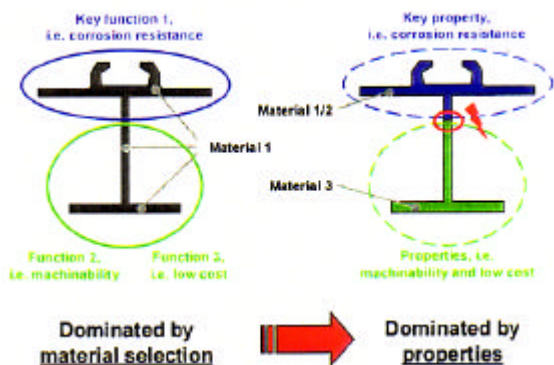


図18 旅客機の座席トラックの構造[42] 図19 チタンとアルミ合金のレーザ溶接[42]

この場合、脆い金属間化合物層が厚くならないように加熱温度の制御を行うと同時に、ろう付材料の選択に注意している。よって、図20に示すようにろう材が両母材を包む形のレーザろう付となっている。

(3) 電機産業

最後に、各種レーザ点溶接により、部品が組立てられる電機部品への応用についても触れる。この分野では様々な金属が接合されている。主な異種金属の継手としては鋼-アル

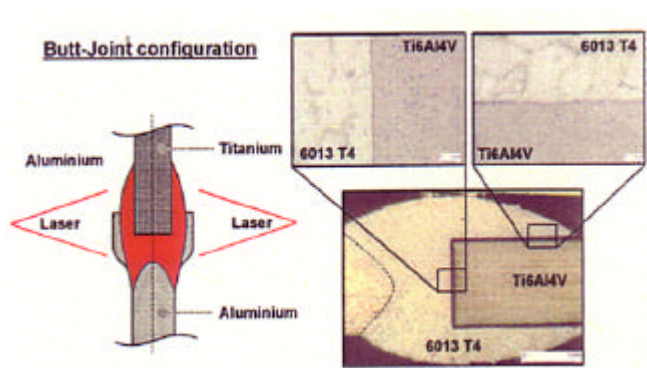


図 2 0 レーザろう付部の組織[42]

ミニウム、鋼－銅、銅－アルミニウム、銅－ニッケル、チタン－鋼などであるが、この他、いろいろな金属が接合されている。図 2 1 はモリブデン線とアルミニウムのレーザ点溶接を示す。

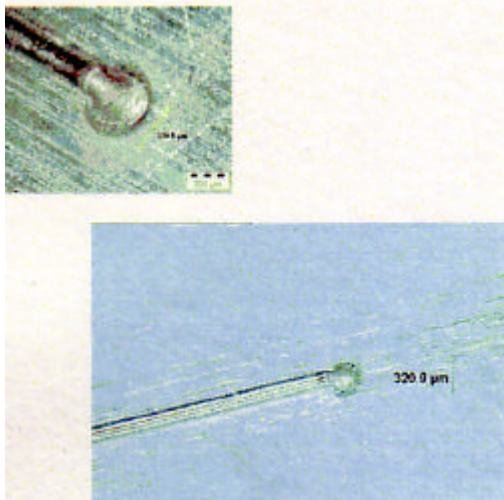


図 2 1 モリブデンへのアルミ線の
レーザ点溶接[43]

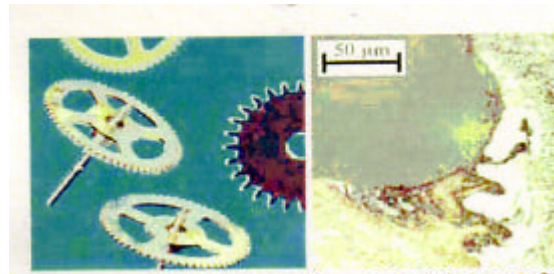


図 2 2 SHADOW溶接された時計の歯車と
シャフト（ワンパルスで周溶接）[43]

（４）精密機器産業

精密機器の時計部品のマイクロ接合として、SHADOW (Step-less Highly Accurate and Discrete One Pulse Welding) 法によりパルスレーザ溶接された歯車とそのシャフトを図 2 2 に示す。ワンパルス（約 1 0 – 5 0 m S）のうちに、ビームを高速回転し、全周溶接するもので、非常に偏心が少ないのが特徴である。

4 . まとめ

以上、異材継手のレーザ溶接に紹介したが、まだまだ、その発展性は高く、今後、製品の多機能化、精密化、高精度化が進むほど、この技術が注目され、検討されて行くと思われる。

引用文献

- 1) 浅見：レーザ工学、電機大出版局(1976), p.203
- 2) 沓名、A.マハリ,早川：溶接学会全国大会講演概要、第 6 6 集 (2000-4) , 132-133
- 3) 中尾、西本ら：溶接学会論文集、 9 – 1 (1991) , p104
- 4) 沓名、町本ら：レーザ加工学会誌、 1 1 - 2 (2004-9) , 76-81

- 5) S. Katayama: *Welding International* 18 - 8 (2004-8), 618-625
- 6) E. Schbert et al: *proc. of ICALEO'98, Orlando, US, 1998, Section G-111-120*
- 7) F. Wagner et al: *proc. of ICALEO'2001, Section C- #1301 (CD-ROM)*
- 8) 片山ら：溶接学会全国大会講演概要、第69集(2000-9), 248-249
- 9) 特許出願：特表2001-501134(平成13年1月30日公表)
- 10) 沓名、西村：溶接学会全国大会講演概要、第73集(2003-10), 292-293
- 11) 片山、西本ら：溶接学会全国大会講演概要、第71集(2002-10), 358-359
- 12) 今、大久保：溶接学会全国大会講演概要、第73集(2003-10), 112-113
- 13) H. Shen, M.C. Gupta: *Jour. of Laser Applications*, 16-1 (2004-Feb), 2-8
- 14) 才田、西本：溶接技術、51 - 6 (2003), 92 - 98
- 15) 渡部、吉田：ジョイテック、(1990 - 1月号)、p 60 - 66
- 16) 平賀、武藤ら：溶接学会論文集、19 - 4 (2001), 717-726
- 17) 富田、中田ら：溶接学会全国大会講演概要、第73集(2003-10), 114-115
- 18) G.J. Shannon: *Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Sec. laser welding & Brazing*, p 5-10
- 19) 宮下、武藤ら：溶接学会全国大会講演概要、第74集(2004-4), 70-71
- 20) J. Lawrence: *Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Section; Diode laser processing*, p 47-51
- 21) H. Gower, R. Pietersら：Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Sec. laser weld. & Brazing, 187
- 22) 佐々木、天間ら：溶接学会全国大会講演概要、第74集(2004-4), 72-73
- 23) B.F. Aubert: *Proc. of CISFFEL, Cannes, France 1988 Sept.* p95-104
- 24) C. Dombard et al.: *Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Sec. laser weld. & Brazing*, 36-42
- 25) Fraunhofer Institut für Lasertechnik、Catarog "Micro-joining of Dissimilar materials" 2004
- 26) E. Schubert, G. Sepold: *SPIE Volume 3097(1997)* ,
- 27) E. Schbert, I. Zerner, G. Sepold: *Proc. of ICALEO'1998, Orlando, FL, Section G*, 111-120
- 28) E. Schbert, I. Zerner, G. Sepold: *IIW Doc. IV-734-99 (1999)*
- 29) 沓名、M. ラトウド：溶接学会論文集、第21集(2003-1), -
- 30) M. Kutsuna and M.J. Rathod: *Welding Journal*, 83-1(2004), s - s
- 31) 沓名、M. ラトウド：溶接学会全国大会講演概要、第74集(2004-4), 140-141
- 32) 沓名、山上ら：溶接学会全国大会講演概要、第75集(2004-9), 182-183
- 33) 沓名、市岡：溶接学会全国大会講演概要、第75集(2004-9), 192-193
- 34) 土屋：New Weltec、(1988-10号), 17-22
- 35) D.U. Chang: *Welding Journal*, 66-11(1987), 323s-331s
- 36) 石崎、出田：溶接学会全国大会講演概要、第55集(1994-10), 104-105
- 37) W. Yang, R.W. Messler et al: *Welding Journal*, 74-7(1995), 224s-229s
- 38) A. Mathieu, S. Mattei, et al.: *Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Sec. laser weld. & Brazing*, 36-42
- 39) H. Haferkamp, A. von Busse, et al.: *Proc. of ICALEO'2002, , Section A, Paper # 605*
- 40) 自動車技術会構造カレント技専門委WG：軽金属溶接、41-7(2003), 297-307
- 41) 特許第2921524号
- 42) R. Kocik, et al: *Proc. of ICALEO'2004, San Francisco, Sec. laser weld. & Braz.* 79-83
- 43) D. Lavoie, R. Holtz: *Proc. of ICALEO'2003, Jacksonville, FL, Section A*, 245-254