



T. Watanabe

# 各種レーザー加工と軽量化材料への応用

渡部 武弘\*

## 1. はじめに

レーザー加工は、マイクロ加工分野から重厚長大の産業まで幅広く利用されている。特に最近では、レーザー加工機の2分極化により、更に新しい応用分野に浸透しつつある。すなわち、レーザー加工機の高出力化に伴う重厚長大産業への更なる拡大とビームの高品質化によるマイクロ・ナノ領域での活躍である。本講演ではまず、各種レーザー加工を紹介し、次いで、レーザー加工を含めて、軽量化材料の各種加工法を述べる。

## 2. 各種レーザー加工

本章では、レーザー加工の基礎と応用分野全般を示す。

### 2.1 レーザ加工の基礎

表1は、レーザープロセスの基本原則を分類したものである。一つは、レーザー光を対象材料に照射し、レーザー光の持っているエネルギーにより材料を加熱し、加工する熱プロセスで、一般的な加工法である。比較的波長の長いレーザー光が使用される。もう一つは、フォトンエネルギーの大きい短波長レーザー、あるいはピコやフェムト秒のような超短パルスレーザーを用いて、物質を励起・解離することにより材料を除去する光プロセスであり、アブレーション加工といわれている。この加工法では、超高パワー密度のレーザー光をごく短時間、材料に照射するため、熱影響の少ない微細加工が可能である。

表1 レーザプロセスの基本的分類

プロセス	プロセス機構	使用波長
熱プロセス (高温プロセス)	加熱, 溶融, 蒸発	遠赤外線, 近赤外線, 長波長可視光線*
光プロセス (低温プロセス)	励起, 反応, 解離	原子反応 紫外線, 真空紫外線, 短波長可視光線
		分子励起 遠赤外線, 近赤外線

\* 現在利用可能な出力のレーザーは長波長側のみ  
YAGレーザーのTHG, FHGは短波長側となる。

表2は、加工メカニズムにより分類したもので、加熱・溶融・蒸発は熱プロセスに相当する。溶融を伴わない領域では、各種熱処理に使用される。溶融状態では、接合や各種熱処理に使用される。材料を蒸発する領域では、穴あけ・切断分野で広く使用されている。マーキング、マスキング、スクライビング、トリミングは、半導体製造分野では必要不可欠な技

術となっている。光反応では、原子や分子を直接励起し、原子や分子の結合を切り、原子単位で除去するものである。また、光エネルギーにより化学反応を促進し、熱影響の少ない加工も可能である。

表2 レーザ加工のメカニズムによる分類

加工メカニズム	レーザー加工の種類
加熱	○変態焼入れ △衝撃硬化 △焼きなまし △結晶粒微細化 ◎アニーリング △レーザーメッキ
溶融	◎溶接 ○はんだ付け △ろう付け ◎切断 △アモルファス(非晶質)層形成 △合金層形成 ◎クラディング △非熱平衡組織形成 △均質化処理 △成形(ニアネットシェイプ)
蒸発	◎切断 ◎穴あけ ◎マーキング ◎マスキング ◎スクライビング ◎トリミング ○バラシング △衝撃硬化 △PVD △CVD △レーザー核融合
光反応	△同位体分離 △ウラン濃縮 △エッチング △レーザーメッキ △濃縮応力付加 ◎誘起化学反応 ◎アブレーション

◎多用 ○実用化 △開発段階, 実証済み

表3は、応用分野により分類したもので、幅広い分野で応用されている。レーザー加工の主要分野は切断と接合分野であるが、多くの分野で使用されている。熱変形を応用した曲げ加工では、金型を必要としないため、多品種・少量生産に使用されている。特に、小物部品の成形加工には有利である。材料創製や医療領域では、独特の技術として活躍している。宇宙で、太陽光によりレーザー光を共振させ、地球に送り、エネルギーに変換する方法も検討されている。また、岩石の加工分野では、油田開発の掘削への応用や安価な岩石の表面を溶融し、アモルファス化した後、表面を研磨し、御影石の様な高級材料に変換することも検討されている。

表3 レーザプロセスの分野別分

分野	適用例
加工	接合加工, 除去加工, 改質加工, 変形加工, 熱処理
材料創製	材料合成, 化学反応促進・抑制, 結晶成長, 高純度化
エネルギー	レーザー核融合, エネルギー伝送, 同位体分離, ウラン濃縮
医療	手術, 治療, 診断
土木・建築	コンクリート・岩石の破壊除去
印刷・通信	製版, 通信

表面処理の分野でも用途が拡大している。切断や溶接と比較して低パワー密度のレーザー光で可能な表面改質では、ビーム品質は良くないが電気-光変換効率の大きい半導体レーザーは有利である。図1は、各種レーザー表面処理法を示したもので、

\* 千葉大学大学院工学研究科 教授

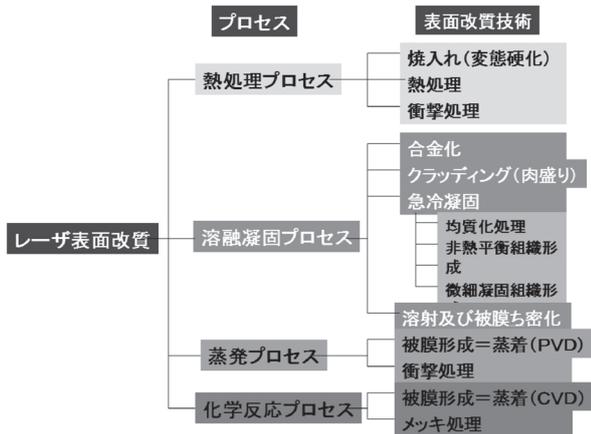


図1 各種レーザー表面改質法

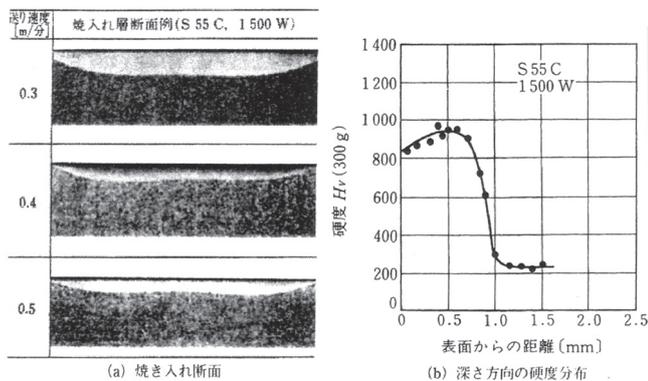


図2 レーザ焼き入れの結果

加熱・熔融・蒸発のプロセスの中で、多くの独特な方法がある。図2は、機械構造用炭素鋼S55Cを1.5kWのCO<sub>2</sub>レーザーを用いて行った表面焼き入れの一例を示したものである<sup>(1)</sup>。レーザー光か材料を移動させ、レーザー光通過後の自己冷却を利用したものである。空気と接する表面では冷却速度が小さいため、内部より硬度は低下している。しかし、自己冷却速度は、10<sup>3</sup>°C/sと非常に大きいため、Ms点以上に加熱された部分は焼きが入り、急峻な焼き入れが可能となっている。トータルの入熱量は小さいため焼き入れ後の変形量も小さく、酸化膜厚さも小さくなっている。

## 2.2 各種レーザー加工

本節では、いくつかのレーザー加工の応用例を示す。

### 2.2.1 マイクロ・ナノ加工

図3は、マイクロ加工に用いた加工システムの全体図を示したものである<sup>(2)</sup>。レーザー光源には紫外光であるYAGレーザーの第4高調波(λ=266nm)や高ビーム品質のファイバーレーザー(λ=1064nm)を用いた。マイクロ加工においては、レーザー光軸と試料回転軸の位置合わせが非常に重要となる。その為、3個のCCDカメラを用いて位置合わせを行っている。

複雑三次元マイクロ加工を実現するために、図4に示すようなシステムを構築した。同図(a)はフライス加工対応のもの、同図(b)は旋削対応のもので、いずれもx-y-z軸とθ-ω軸の5軸から成り立っており、同時制御が可能である。

前述のように、マイクロ加工ではレーザー光軸と加工点の位

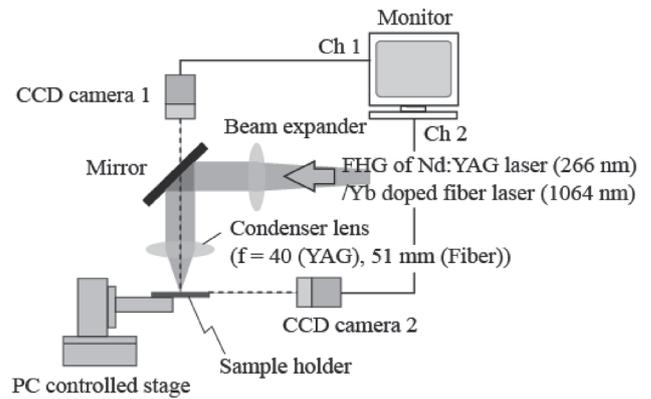


図3 マイクロレーザー加工システムの概略図

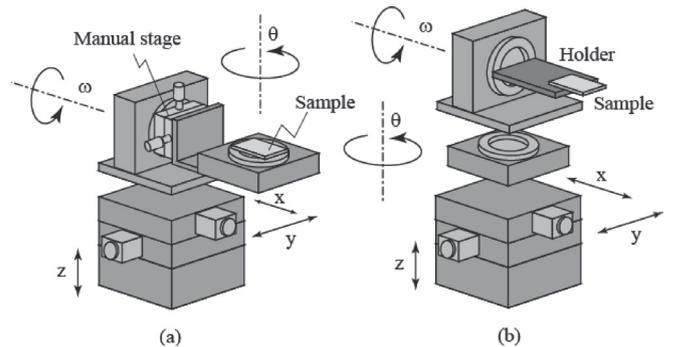


図4 2種類の加工ステージ

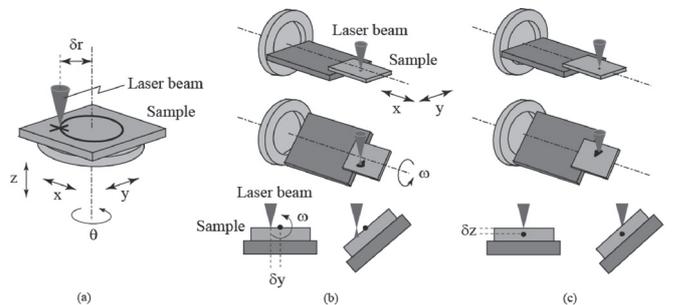


図5 レーザ光中心と加工点の調整法

置合わせが重要である。図5は、位置ずれとその修正法を示したものである。位置合わせは3個のCCDカメラを用い、±1μm以内に納めた。

図6は、以上のシステムを用いて加工したサンプルの一例である<sup>(2)</sup>。高精度のマイクロ加工が可能となっている。8枚羽根の外径は400μm、ネジの外径は70μm、傘歯車の上部径は350μmで、ポリイミドフィルムに加工された。スプリングは、外形500μmのステンレス鋼パイプをスパイラル状にレーザー加工した後、電解加工を行ったもので、外径は約400μmとなった。電解加工時間を適切に選定することにより任意のパネ定数を有するスプリングを作製することができる。医療用ステントは、外形500μmのステンレス鋼パイプを菱形にくり抜いた後、電解加工を行ったものである。同様に、電解加工時間を適切に選定することにより任意の強度を有するステントを作製することが可能である。

右下のものは、1.4×1.4×1.4mm<sup>3</sup>のステンレス鋼製ギヤボックスで、その作製方法を図7に示す<sup>(3)</sup>。同図のような

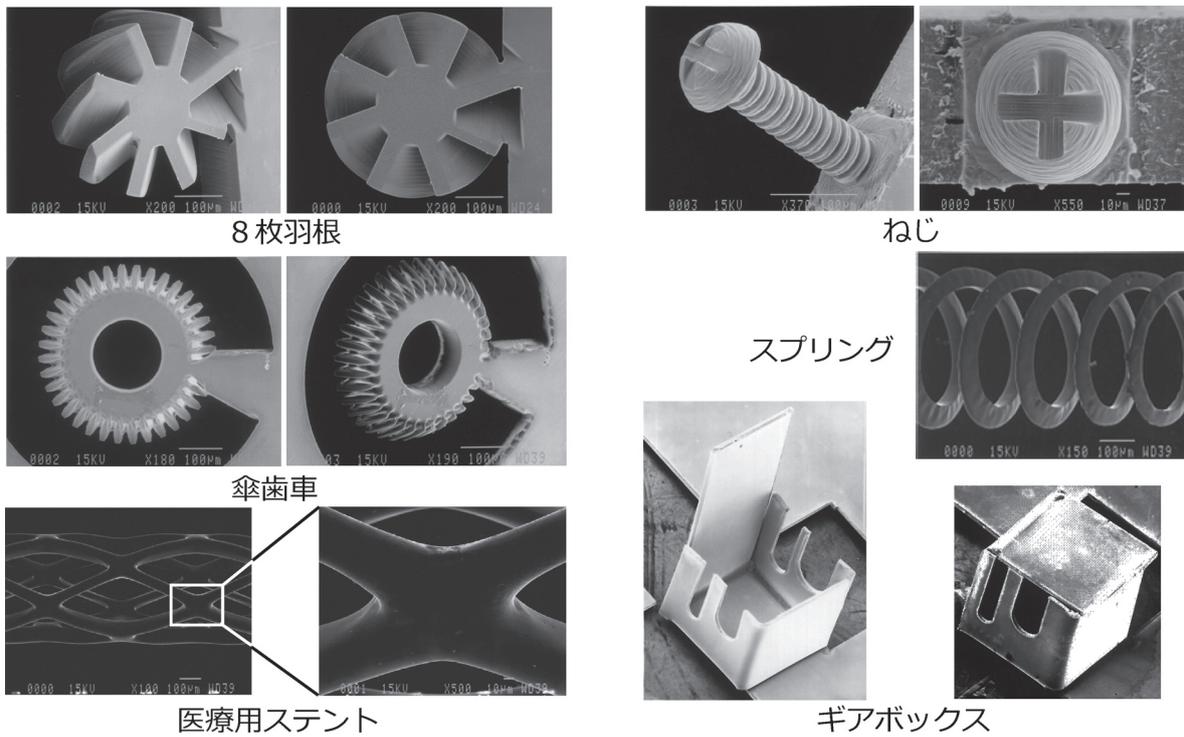


図6 各種マイクロ加工の結果

切断加工を行った後，図8のように折り曲げ，完成したものが図9である．折り曲げの順序が不適切な場合，同図(a)のように隙間が生じてしまう．同図(c)は，上蓋を折り曲げ，完成した状態である．2個の平歯車に軸を通し，減速機構を作製した．この様にレーザ曲げ加工は，金型を必要とせず，

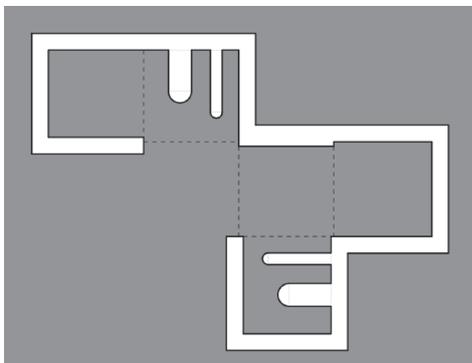


図7 マイクロギヤボックスの加工法

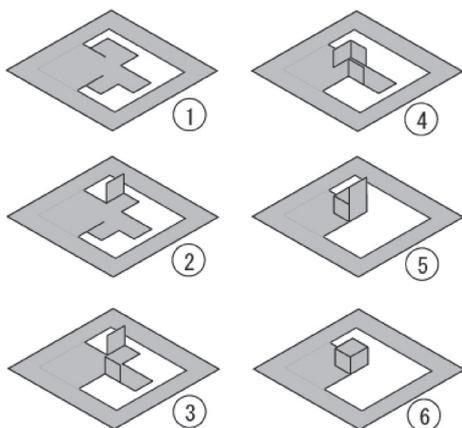


図8 マイクロギヤボックスの曲げ手順

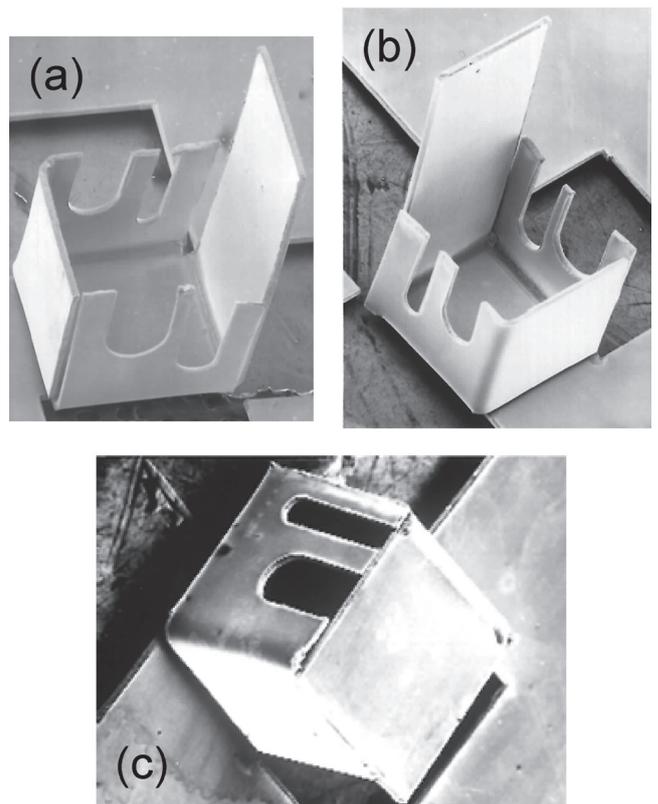


図9 マイクロギヤボックスの完成図

多品種少量生産に利用されている．特に，マイクロ造形物には有利である．

図10は，光造形によるマイクロ加工である<sup>(4)</sup>．光硬化性樹脂に紫外光を当て，積層して造形するものである．左上がマイクロポンプ，左下がマイクロセル，右上がマイクロギア，右下がS字パターンで，右列には毛髪を比較のため入れてある．光造形では，マイクロ加工のみならず家電製品等の試作

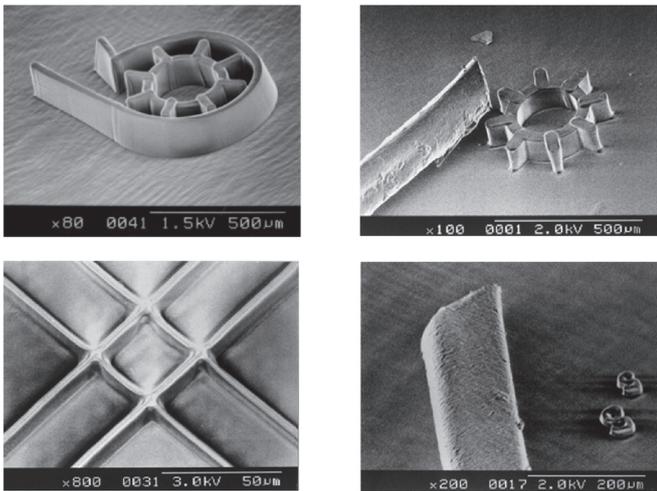


図 10 光造形法によるマイクロ加工の結果

にも用いられている。また、頭蓋骨を作製し、手術のシミュレーションにも用いられている。

### 2.2.2 軟鋼厚板のレーザ切断<sup>(5)</sup>

レーザ切断では、板厚が数 mm 程度の鋼板の高速度で高精度の切断が多く行われている。橋梁や大型構造物の分野でもレーザ切断が要求されている。軟鋼のレーザ切断では酸素をアシストガスとして用い、溶融物の除去と酸化反応熱による溶融の補助等の役割があり、これらの機能はガス流に影響される。そこで、ガス流に影響するノズルの開発を行い、厚板切断を行った。

汎用熱流体解析ソフト PHOENICS を用い、ガス流を解析した。軟鋼厚板の切断には図 11 に示すようなデュアルノズルが用いられる。空気をパージし、切断溝内での酸素濃度を高めるため、アウターノズル出口角度を変化させ、酸素濃度を解析した。その結果を図 12 に示す。出口角度が 97° で最大値を示している。97° より小さい角度では、外側の空気をパージできず、角度が大きすぎると酸素ガスが拡散してしまい、同様に外側の空気をパージできなくなる。図 13 は、各出口角度における切断溝内での酸素濃度分布を示したものである。97° においては、板下部まで高い酸素濃度を示している。出口角度を 97° とし切断実験を行った。

図 14 は、切断速度の切断面性状への影響を調べたもので、切断速度が小さい場合は酸化反応熱の過剰によりセルフパージが起こっている。550mm/min 以上ではクリーンカッ

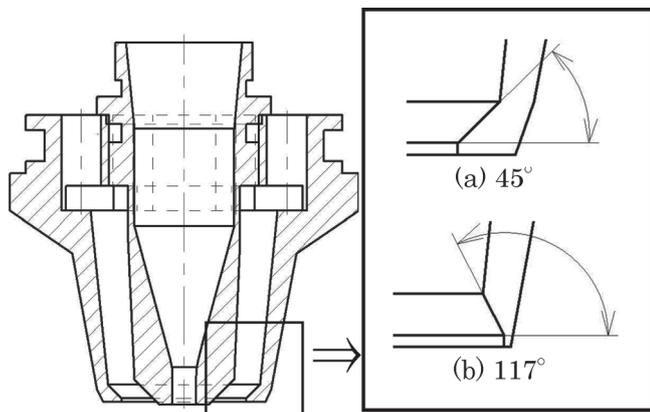


図 11 厚板切断用デュアルノズル

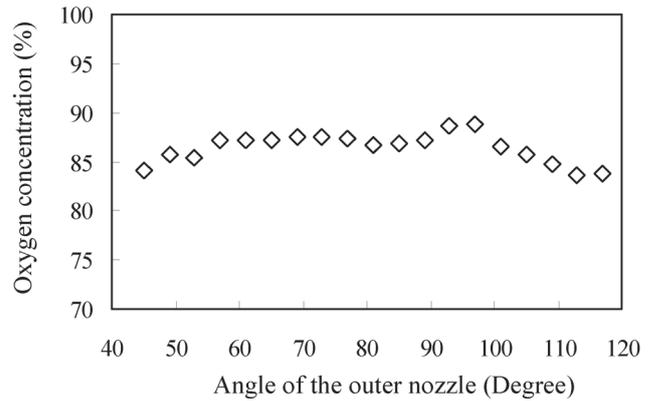


図 12 ノズル出口角度による酸素濃度の変化

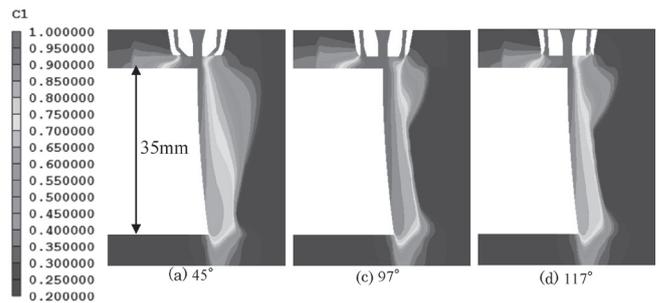


図 13 酸素濃度の解析結果

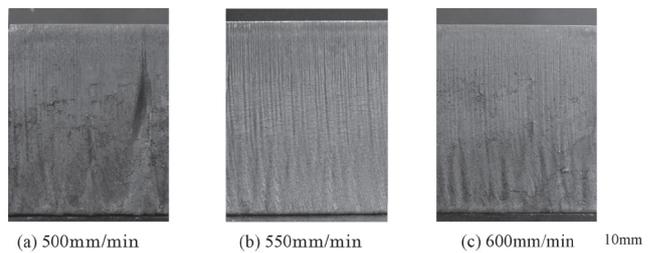


図 14 切断速度による切断面の変化

トの切断面となっている。このように、酸素ガスの流体解析によりノズル形状を設定し、適切な切断条件により、板厚 36mm のクリーンカットが達成できた。ノズル形状を最適化することにより、アウターガス圧、インナーガス圧、レーザエネルギー等において、クリーンカットの領域が拡大された。

### 2.2.3 ファイバーレーザによる加工<sup>(6)</sup>

ファイバーレーザは、光ファイバーに Nd イオン、Er イオン、Pr イオンなどを活性媒体としてドープし、発振するものである。熱レンズ効果が無いため高品位のレーザ光となり、冷却装置も不要で、エネルギー効率も高いため有望なレーザ光源である。ファイバーへのエネルギー注入方式にはファイバー端面から、あるいは、側面からのものである<sup>(7)</sup>。LD モジュールを多くし、ファイバーを長くすることにより高出力の装置となり、1台で 50kW 出力のものも市販されている。

図 15 は、ファイバーレーザによる溶接の一例を示したものである<sup>(6)</sup>。30kW の装置を用いれば、25mm 以上の溶融深さを 2 m /min 以上の速度で達成できており、大型構造物への適用も検討されている。数 mm 程度の溶融深さなら 10 m /min 以上の高速度での溶接が可能である。

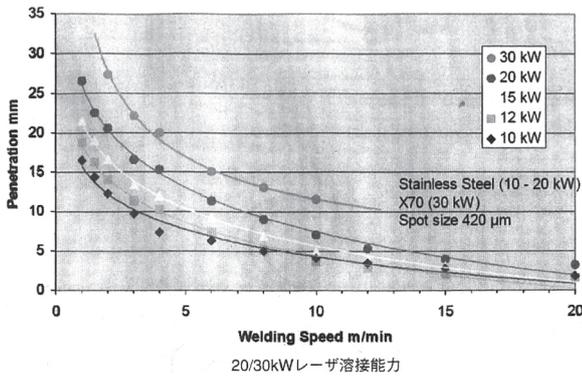


図 15 ファイバーレーザーによる溶接特性

図 16 は、ステンレス鋼の溶接への応用例を示したものである。片側からのレーザー照射で 25mm 以上の溶け込みが得られるため、両側から溶接することにより厚さ 50mm の溶接が達成されている。開先を取り、肉盛りする作業が不要となり、製造工程が大幅に短縮される。高出力レーザー光を用い、高速度で溶接することにより、溶融幅が狭くなり、熱歪みの少ない溶接が達成される。



P=20 kW, v=0.8 m/min



P=30 kW, v=2.0 m/min

50mm ステンレス鋼貫通溶接

図 16 ファイバーレーザーによる貫通溶接の例

高ビーム品位のシングルモードファイバーレーザーを用いると、ビームをスキャンするリモート切断が可能となる。ステンレス鋼薄板において、板厚 100 μm 程度では、200 m/min 以上の超高速度での切断が可能となっている。

#### 2.2.4 複合レーザー加工

ウォータージェットやアークとレーザー光を組み合わせた複合レーザー加工が行われている。特に、アークと組み合わせたハイブリッド溶接は広く応用されている。

ハイブリッド溶接方式には、別置き型、同軸型、タンデム型等があり、これらの改造方式も利用されている<sup>(8)</sup>。ハイブリッドにより入熱量の増加、アークの安定化、レーザー吸収量の増加が達成され、多くの問題点が改善される。図 17 に、溶接結果の比較を示す。TIG やレーザー光のみでは浅い溶融深さしか得られないが、ハイブリッドにすることにより重量効果が得られている。

図 18 は、その効果を示したもので、ここでは発振効率の高い半導体レーザーを用いている<sup>(9)</sup>。溶接速度が 1.0m/min の

溶接法	ティグ	YAG	ティグ + YAG
断面マクロ形状			
溶接条件	ティグ : 100A、YAG : 1kW 溶接速度 : 0.4m/min		

ティグアーク、YAGレーザーおよびハイブリッド溶接の比較

図 17 各溶接結果の比較-1

Heat source	Welding speed	Bead appearance	Cross-sectional view
Arc only	1.0 (m/min)		
	2.0		
LD-Arc Hybrid	1.0		
	2.0		

図 18 各溶接結果の比較-2

場合には、レーザー光の有無による顕著な品質の違いは認められない。溶接速度が 2.0m/min の場合、アーク単独では大きなピット状の欠陥が発生しているが、ハイブリッド法では発生していない。また溶け込み深さでは、両溶接速度においてハイブリッド法の方が大きくなっている。

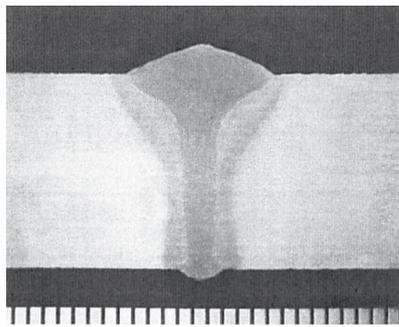
ハイブリッド溶接の特長の一つとしてギャップ尤度がある。図 19 はその結果を示したもので、ギャップが大きくなるにつれ、下板の溶け込み深さが過剰に増加し、それに伴って、のど厚の不足および上板のアンダーカットが大きくなったが、ギャップ 1.5mm でも溶接が可能となっている。

Gap (mm)	0.5	1.0	1.5
Cross-sectional view			

図 19 ハイブリッド溶接におけるギャップの尤度

図 20 は、厚さ 13mm の高張力鋼板 AH36 を突き合わせ溶接したものの断面写真である<sup>(8)</sup>。十分な余盛り、欠陥のない、表裏とも安定したビードとなっている。ハイブリッド溶接法は、造船用大型パネルへの応用も検討されている。

軽量化の一方法としてサンドイッチ構造がある。これにもハイブリッド溶接が適応されている。軽量で剛性が高く、低歪みの特長を活かし、客船の製造に使われている。今後は、



ビー断面マクロ (13mm)  
造船のハイブリッド溶接

図 20 ハイブリッドによる深溶け込み溶接

他に橋梁, 大型構造物, 大型自動車, 車両等へ展開される.

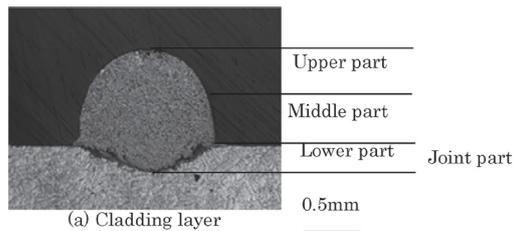
### 3. 軽量化材料の各種加工法

軽量化材料の加工には切断や接合があるが, 接合が最も多い. ここでは接合を中心に紹介するが, クラディングの例も紹介する.

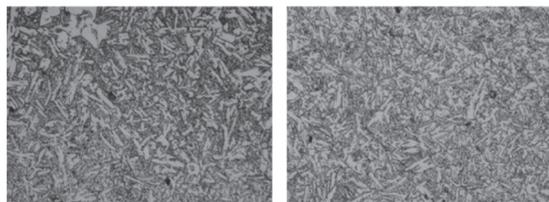
#### 3.1 レーザクラディングによる軽量化<sup>(10)</sup>

アルミニウム鋳物製自動車エンジンのバルブシートには, 耐摩耗性を高めるために鉄製のシートリングが打ち込まれている. これをハイシリコンアルミニウム合金のレーザクラディングに置き換えることにより軽量化が図られると共に, シートリングの製造コストの削減にも寄与できる. 更に, バルブシートの耐摩耗性, 耐熱性, 耐衝撃性, 熱伝導性の向上にも繋がる. そこで, エンジン素材である AC9B 上にファイバーレーザを用いて, クラディングを行った.

図 21 は, 照射レーザパワー 2.0kW, クラディング速度 10.0 m/min で行った Si=50mass% クラッド層の断面写真と組織写真を示したものである. 表面付近では空気に接し, 冷却

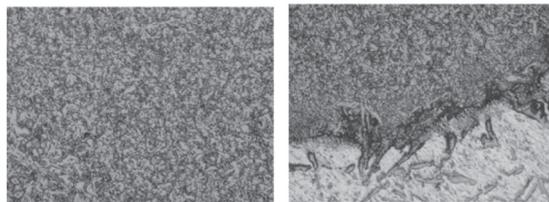


(a) Cladding layer



(b) Upper part

(c) Middle part



(d) Lower part

(e) Joint part

図 21 クラディング部の組織

速度が小さいため結晶粒は大きくなっているが, 中間部付近では微細化している. 接合部では素材と混合し, 密着性は良くなっている.

図 22 は, 各部での結晶粒径とビッカース硬さを示したものである. 中間部付近で最高硬度となった後, 内部で硬度が低下している. これは, クラッド層が素材である低硬度の Al により希釈されたためである.

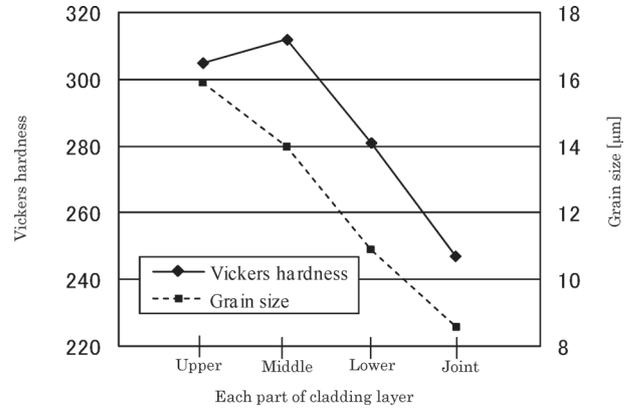


図 22 クラディング部の粒径と硬度

Al-Si 合金では, シリコン量が増加すると非常に脆くなる. そこで, 図 23 に示すような落球試験により, 耐衝撃性を評価した. 用いた試料の組織写真を図 24 に示す. Si=60mass% の場合は, Si 粒が粗大に晶出している.

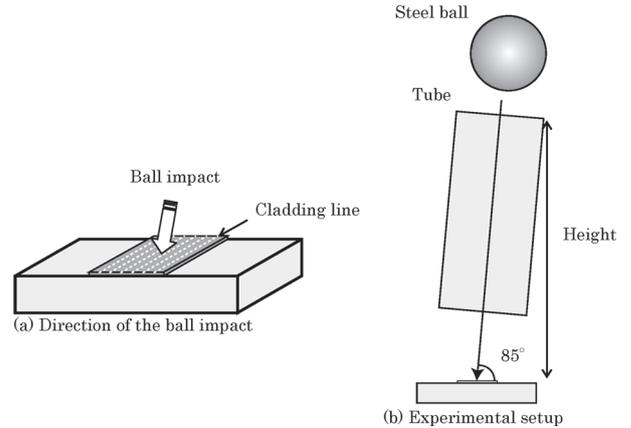
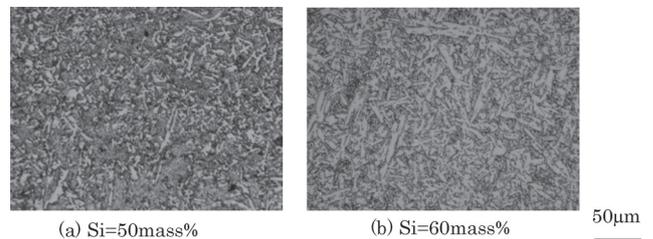


図 23 落球試験の概念図



(a) Si=50mass%

(b) Si=60mass%

図 24 落球試験に用いた試料の組織

図 25 に落球試験の結果を落球高さにより示す. Si=60mass% の場合には, 高さ 90cm でクラックが入っているが, Si=50mass% の場合では, 高さ 150cm でもクラックは入っていない.

耐摩耗性を評価するために, Pin-On ディスク試験を行った.

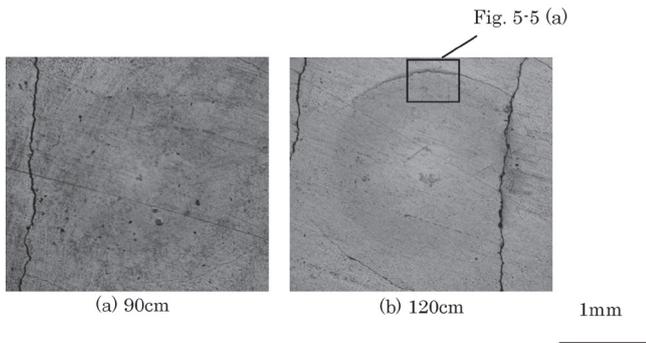


図 25 落球試験の結果 (Si=60mass%)

Si%が増加する毎に粒径と硬度は増加した。Si=40mass%の場合では、低硬度のため摩耗量は多くなっている。Si=60mass%の場合では、硬度は高いが結晶粒が大きくなり、Si粒が脱落する形で摩耗しているため、摩耗量は大きくなっている。適切な粒径で適切な硬度を持ったSi=50mass%の場合が最も摩耗量は少なく、耐摩耗性は高くなっている。

### 3.2 マグネシウムのレーザ溶接

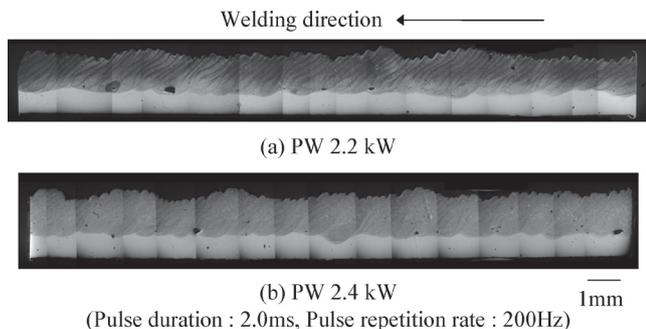
実用的な軽量化材料の代表であるマグネシウムとアルミニウムの物理的性質を、鉄と比較して表4に示す<sup>(11)</sup>。

表4 金属の物理的性質類

マグネシウムおよび二、三の金属の物理的性質

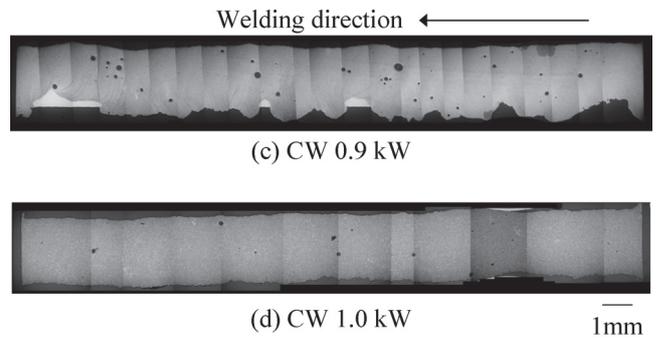
項目	マグネシウム	アルミニウム	鉄
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.74	2.70	7.87
融点 (°C)	651	660	1536
沸点 (°C)	1107	2056	2735
比熱 (J/kg·K) 293K	1022	900	444
熱容量 (J/m <sup>3</sup> ·K) 293K	1778	2430	3494
熱膨張率 (10 <sup>-4</sup> /K) (293~473K)	26.1	23.9	12.2
熱伝導率 (W/m·K) 293K	167	238	73.3
電気抵抗率 (10 <sup>-8</sup> Ω·m) 293K	4.2	2.67	10.1
溶融金属の表面張力 (mN/m)	559	914	1872
縦弾性係数 (GPa) 293K	44.3	75.7	190
凝固収縮率 (%)	4.2	6.6	1.5

まず、板厚1mmの試料を2枚重ねた重ね溶接の結果を示す<sup>(12)</sup>。図26は、パルス波レーザによる溶接結果である。深溶け込みには有利であるが、吸熱・急冷のため、ポロシティや表面の荒れが見られる。図27は、連続波レーザによる溶接結果である。表面は滑らかであるが入熱の制御幅が狭いた



- ポロシティが発生している
- 表面が荒れている

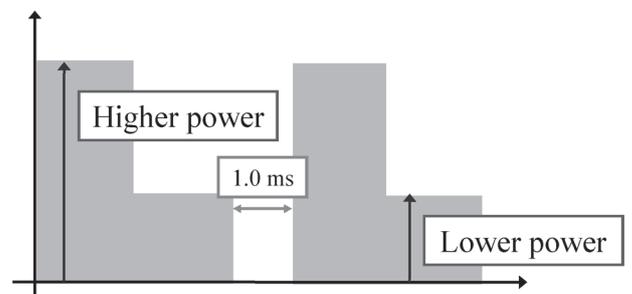
図 26 パルスレーザによる溶融断面の組織



- ポロシティと溶け落ちが発生している
- 表面が滑らかである

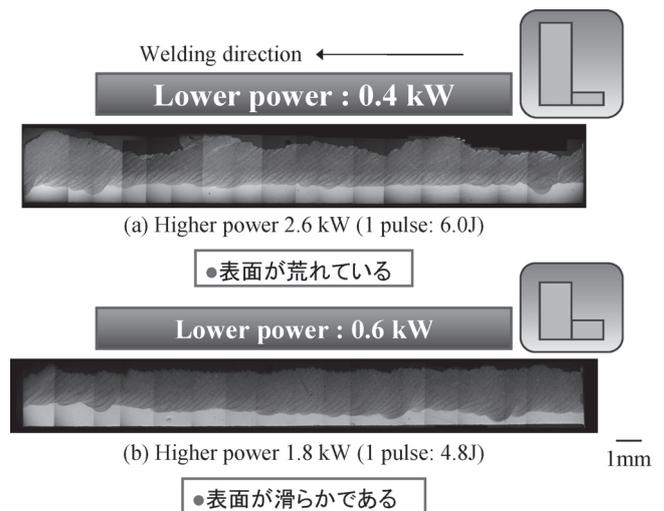
図 27 連続波レーザによる溶融断面の組織

め、解け落ち等の制御が困難である。パルス波レーザと連続波レーザの良いところ取りをしたパルス変調レーザの波形が図28である。これを使用した結果を図29と図30に示す。Higher powerとLower powerの溶接条件を適切に選定することにより、ポロシティやクラックのない健全な溶融層が得られた。



- Higher power : キーホールの形成, 溶融深さ
- Lower power : 急激な冷却の抑制

図 28 パルス変調レーザの波形



- 表面が荒れている

Lower power : 0.6 kW

- 表面が滑らかである

図 29 パルス変調レーザによる溶融断面の組織-1

溶接強度を評価するために引っ張り剪断試験を行い、その結果を図31に示す。徐冷効果を持たせるために波形に傾斜を

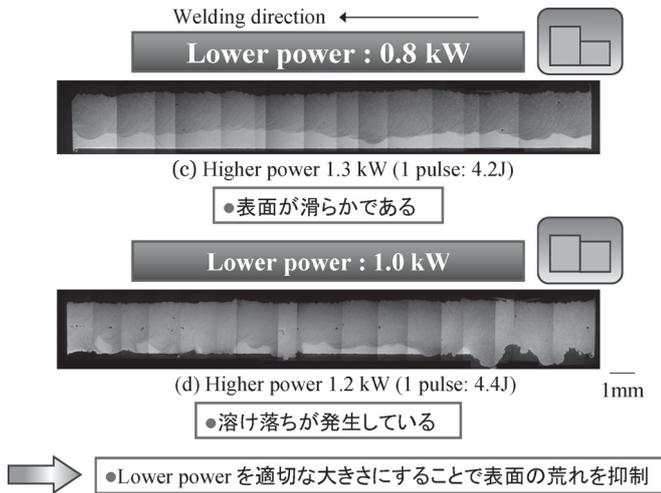


図 30 パルス変調レーザによる溶融断面の組織-2

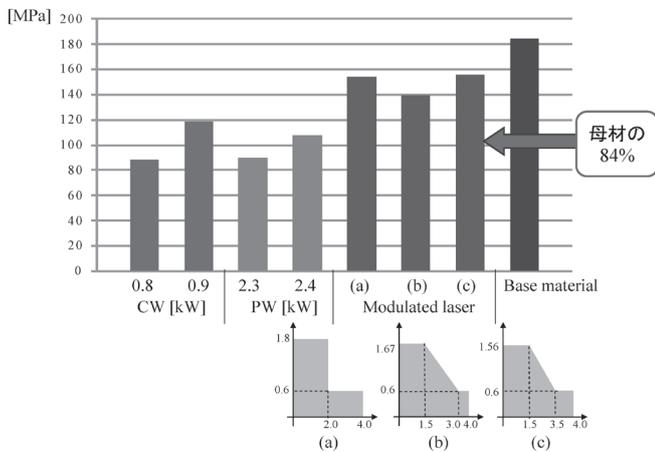


図 31 引っ張り剪断試験の結果

付けた結果も示した。パルス変調レーザを用い、適切な条件を選定することにより、母材強度の 84% の強度が得られた。

次に、板厚 1mm の試料を付き合わせて溶接を行った<sup>(13)</sup>。シヤで切断した端面にはバリが存在し、隙間にバラツキがあるため、端面をフライス仕上げし、隙間を極小化して、実験を行った。連続波やパルス波のみを使用した溶接結果を図 32 と図 33 に示す。何れの場合も健全な溶融層を得ることは困難である。そこで、図 28 に示したパルス変調レーザの波形を用いて行った結果を図 34 に示す。適切な組み合わせに

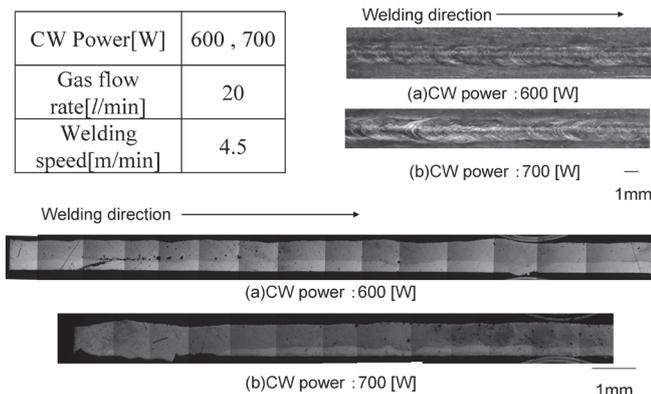


図 32 連続波レーザによる溶融断面の組織

より、ポロシティやクラックのない健全で、ビードの綺麗な溶融層が得られた。

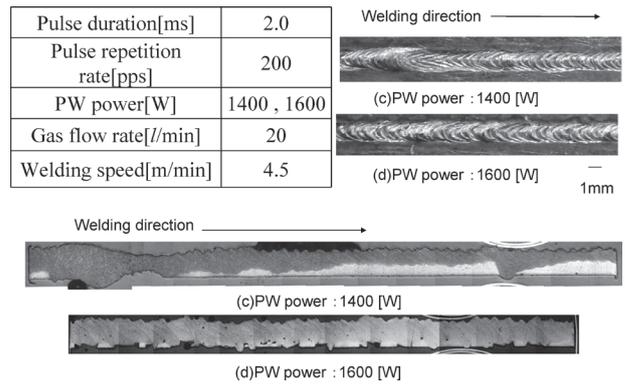


図 33 パルスレーザによる溶融断面の組織

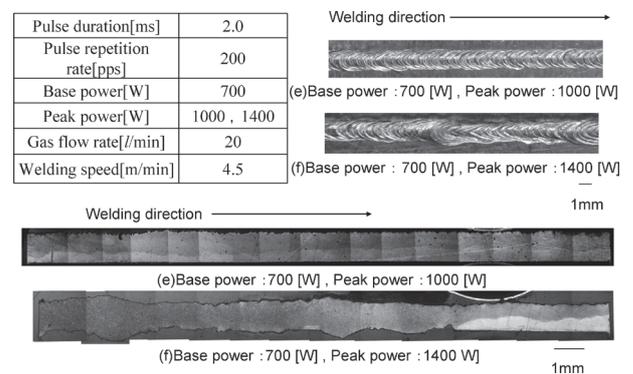


図 34 パルス変調レーザによる溶融断面の組織

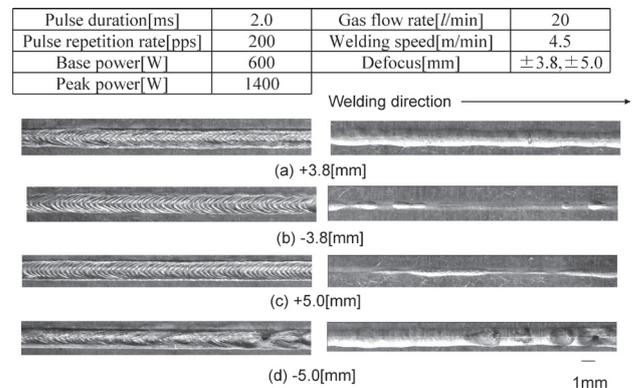


図 35 焦点はずし量のビードへの影響

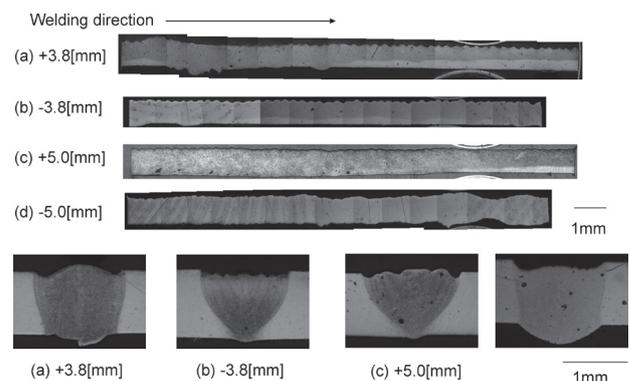


図 36 焦点はずし量の溶融状態への影響

隙間の影響を少なくするために、焦点外しの効果を検証した。表裏面のビードを図 35 に、断面写真を図 36 に示す。適切な焦点外しにより、ビームスポット径が増加し、ポロシティやクラックの少ない健全な溶融層が得られた。

溶接強度を評価するために引っ張り剪断試験を行い、その結果を図 37 に示す。適切な条件を選定することにより、突き合わせギャップの影響を少なくし、母材強度の 83% の強度が得られた。今後の課題として、アンダーカットを少なくする条件を選定する必要がある。

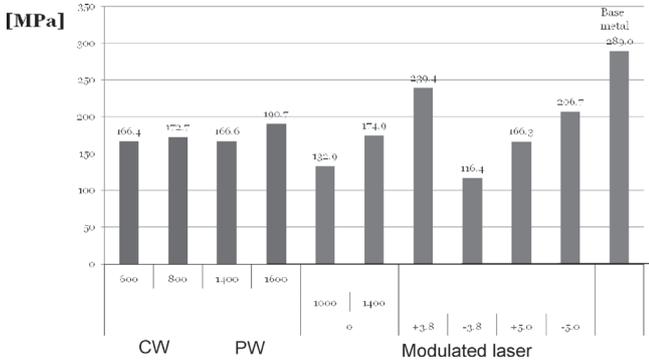


図 37 引っ張り剪断試験の結果

### 3.3 その他の方法によるマグネシウムの溶接

#### 3.3.1 TIG やプラズマによる溶接<sup>(11)</sup>

TIG やプラズマによる溶接も行われているが、薄板では困難で、厚板の溶接に用いられている。板厚 4mm の AZ31 を突き合わせ溶接した結果、何れの方法でも表裏面のビードは綺麗で、欠陥のない溶融層が得られている。プラズマの方が溶融幅は小さくなっており、変形も小さいものと思われる。HAZ 部で結晶粒の粗大化が見られるが、引っ張り強度は母材とほぼ同様で、延性破面となっている。

#### 3.3.2 電子ビームによる溶接<sup>(11)</sup>

電子ビームによる溶接では、薄板の溶接も可能である。板厚 2mm の AZ31 を 2 枚重ね溶接した結果、Al-Mg の化合物が生成しているが、T6 処理をすることにより再固溶することができる。引っ張り剪断試験による評価では、溶接後の強度と伸びは母材に比べ低下しているが、熱処理により母材と同等の強度と伸びを示している。

#### 3.3.3 摩擦攪拌接合 (FSW)<sup>(14)</sup>

摩擦攪拌接合は、円筒形の接合ツールを回転しながら圧入することにより、接合ピンおよび接合ツールの肩部下面と接合面との間で摩擦熱が発生し、接合面が高温に達すると塑性変形抵抗が減少し、塑性流動により接合される。溶融せずに接合することが特長であるが、末端部に欠陥が残留するためダミー板を設置する必要がある。板厚 3.5mm の AZ31 同士を接合した場合、接合中心部では結晶粒が微細化している。マグネシウム合金は再結晶温度が低いいため、接合部近傍には熱的影響部はほとんど認められない。

### 3.4 アルミニウム合金のフリクションスポット接合 (FSJ)<sup>(15)</sup>

FSJ と FSW との違いは、接合ツールを移動しない点である。シンプルなシステムで、消費電力、設備コスト、ランニングコストが低い点が特長である。板厚 1.0mm の A6061

を 2 枚重ね接合した場合、時間と共に攪拌が進んで知る。引っ張り剪断応力は、接合時間 1.2 秒で最大値を示し、母材強度の 66% であるが、抵抗スポット溶接の約 2 倍の高強度となっている。

### 3.5 異種材料のレーザ溶接

軽量化の一方法として、適材適所での材料使用がある。自動車の材料としては主に鉄鋼材料が使用されているが、強度

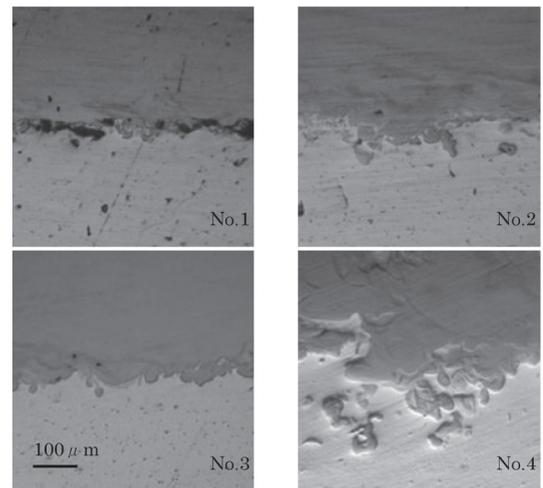
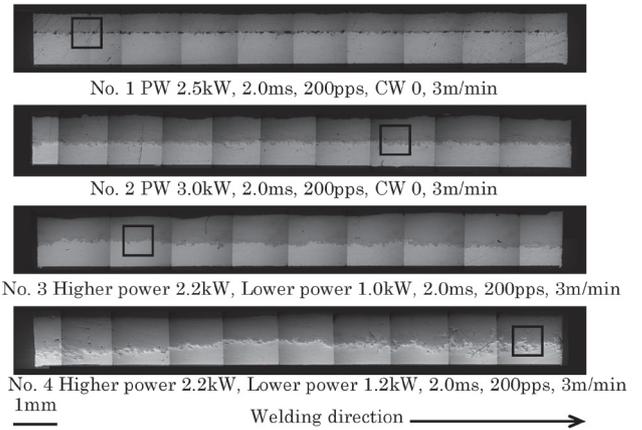


図 38 PWのみとパルス変調レーザによる溶融断面の組織

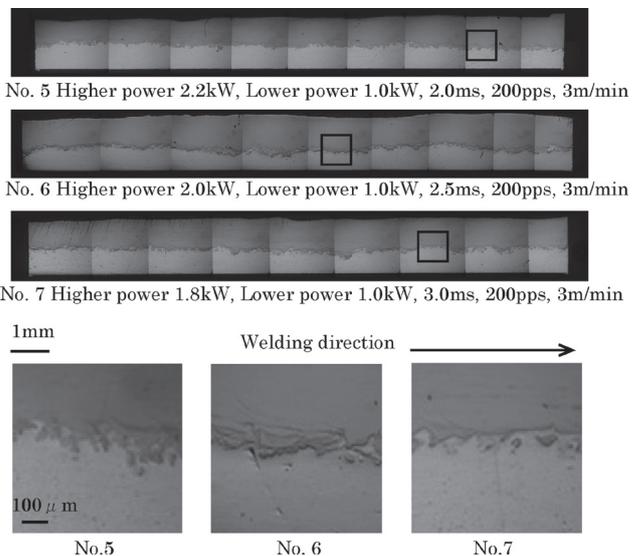


図 39 パルス変調レーザによる溶融断面の組織

を余り必要としない部分には Al 合金も使用されている。その境界部では接合が必要となる。図 38 と図 39 は、板厚 1.0mm の Al 合金 A5182 を下板とし、板厚 0.7mm の JSC270CC を上板として 2 枚重ねて溶接した結果である<sup>(16)</sup>。図 28 に示したパルス変調レーザの波形を用いた。パルス波レーザのみの場合は、ポロシティの欠陥が見られるが、パルス変調レーザの波形では、広い溶接条件で溶接欠陥の少ない健全な溶融層が得られた。また、高速溶接にすることにより金属間化合物も少なくすることが可能である。上板の鉄が Al 合金側に食い込み、アンカー効果も得られている。図 40 に引っ張り剪断応力の結果を示す。PWレーザのみの場合、低強度となっているが、パルス変調レーザ野場合、母材強度の約 80% の強度が得られている。

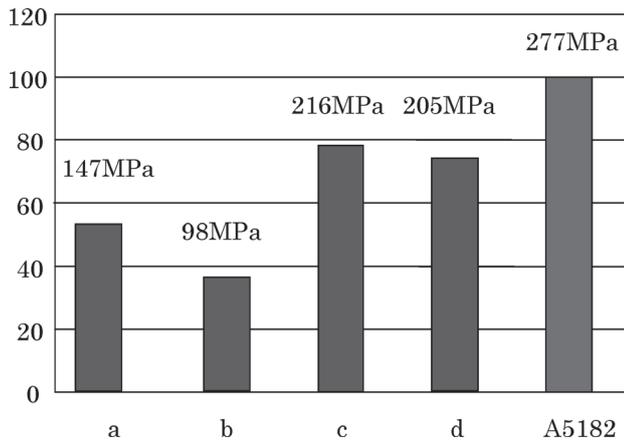
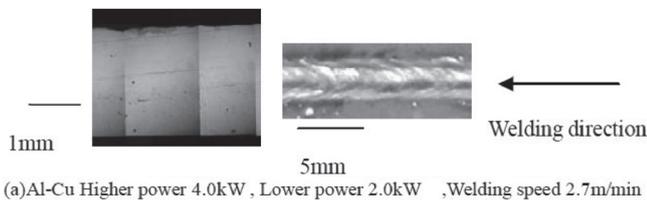
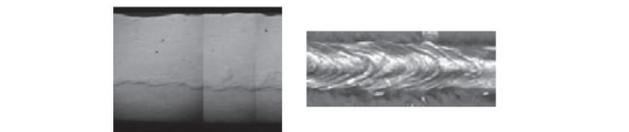


図 40 PWレーザのみとパルス変調レーザによる重ね溶接強度の結果

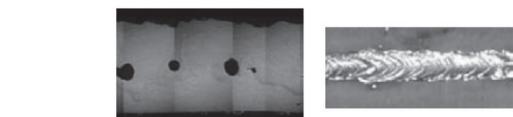
電池電極の軽量化にも異種金属が使用される。銅板のみでは重量が大きくなるが、Al 合金と組み合わせることにより軽量化が図られる。図 41 は、板厚 1.0mm の Al 合金 A5052 と板厚 1.0mm のタフピッチ銅を重ね溶接した結果である<sup>(17)</sup>。Al 合金を上板とした場合は健全な溶融層が得られたが、銅板を上板とした場合は Al 合金の蒸気が取り込まれ、ポロシティが残留した。図 42 は、引っ張り剪断強度を示したもので、最大でも母材強度の約 40% 程度となっている。



(a) Al-Cu Higher power 4.0kW, Lower power 2.0kW, Welding speed 2.7m/min



(b) Al-Cu Higher power 3.5kW, Lower power 2.4kW, Welding speed 2.7m/min



(c) Cu-Al Higher power 4.0kW, Lower power 2.2kW, Welding speed 5.0m/min

図 41 パルス変調レーザによる溶融断面の組織とビード形状

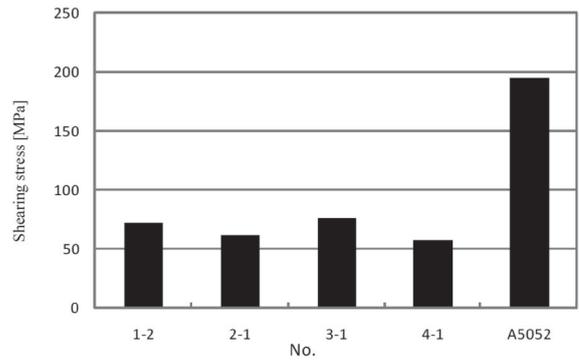


図 42 パルス変調レーザによる溶接強度の結果

アルミニウム合金とマグネシウム合金の異材接合も行われている。板厚 1.0mm の AZ31 を上板とし、板厚 1.0mm の A5052 をした板とした場合、ジャストフォーカス  $def = 0mm$  の場合と  $def = +5mm$  とした場合では、 $def = 0mm$  の場合の方が接合条件は広がっている。接合強度は最大でも A5052 母材の約 40% 程度となっている。

### 3.6 異種材料に対するその他の接合法

#### 3.6.1 摩擦攪拌接合 (FSW)<sup>(19)</sup>

共に板厚 6.0mm の S45C と A6063 の接合が、FSW で行われた。Al-Al の場合、接合ツールの中心は接合界面となるが、Fe-Al の場合は Al 寄りとなる。接合速度による影響が大きく、200mm/min では接合界面での大きなキャビティにより接合できず、500mm/min 以上で接合が可能となっている。接合強度は共に、A6063 の母材強度の約 75% となっている。

#### 3.6.2 フリクシオンスポット接合 (FSJ)<sup>(20)</sup>

FSJ では、FSW に対し、より薄板の接合も可能である。板厚 1.0mm の A6061 を上板とし、板厚 0.7mm の軟鋼板を下板として重ね接合した場合の接合強度は、回転速度が大きくなると接合強度は低下している。この異材溶接での強度は、Al のスポット抵抗溶接よりは高いが、Al の FSJ よりは低く、金属間化合物の影響が出ている。

#### 3.6.3 電磁圧接<sup>(21)</sup>

電磁圧接によっても Al 合金や異種材料の接合が行われている。電磁圧接における接合点の移動を模式的に示したものが図 43 である。同図 (d) に示したように、接合部分は最終接合点である 2 本の線になる。図 44 は、亜鉛メッキ鋼板と Al 板との接合状態を、放電エネルギーにより示したものである。放電エネルギーが 3.0kJ 以下では、メッキ亜鉛が中間

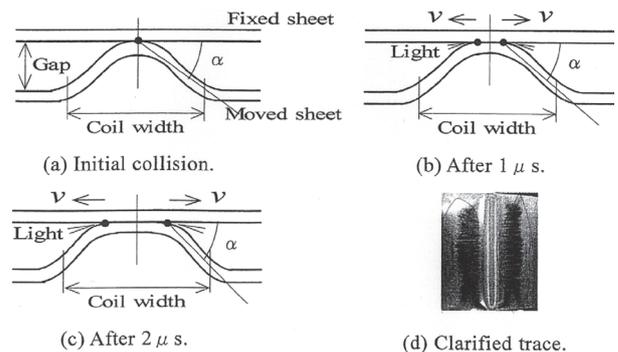


図 43 電磁圧接における衝突点の移動

層として残留しているが、4.0kJでは、亜鉛メッキ部が蒸発により除去され、鋼板とAlとの直接接合となっている。

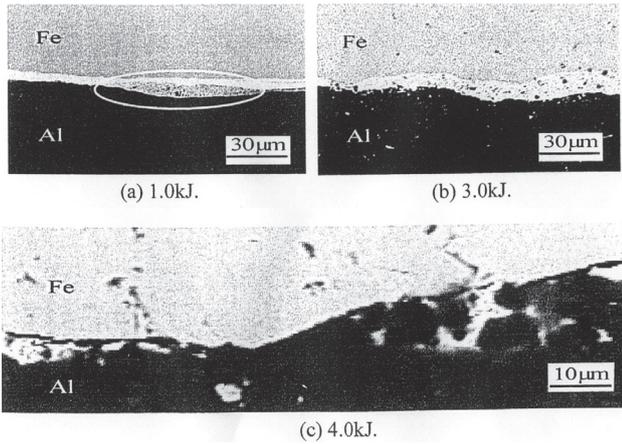


図 44 亜鉛メッキ鋼板とAlの電磁圧接結果

#### 4. おわりに

レーザー加工全般と軽量化材料の加工法について述べた。グリーンイノベーションとの関連で今後も、材料の軽量化や軽量化技術が開発されていく。それに伴い、接合技術を中心として新しい加工技術の開発も必要になっていく。レーザー加工もその一つで、将来展望を図45に示した。新材料は、一般に加工し難いものであるが、レーザー加工は大きな可能性を秘めている。

#### 将来展望

レーザー発振器と周辺機器は年々、成長を続けており、加工応用での可能性は無限にある。

- 1) フェムト秒やピコ秒等の超短パルスレーザーによる超微細・超精密加工
- 2) 高ビーム品質ディスクレーザーによる微細加工から高速加工
- 3) 高ビーム品質ファイバーレーザーによる微細加工
- 4) 高出力ファイバーレーザーによる重厚長大への経済的応用
- 5) 半導体レーザーによる表面改質
- 6) 高効率波長変換素子の開発と短波長固体レーザーによる高品質・微細加工

図 45 レーザ加工の将来展望

#### 参考文献

- (1) 長井治彦：レーザープロセス技術-基礎から実際まで-オプトロニクス社 (2000)、P 190
- (2) Souta MATSUSAKA, Takehiro WATANABE, et al.: FABRICATION OF MICRO-ELEMENTS BY FIVE-AXIS LASER PROCESSING SYSTEM (Paper NO. M1205), Proc. of the 3rd PICALO 2008
- (3) 緒方 豪：ファイバーレーザーによるマイクロボックスの作製、平成 21 年度千葉大学工学部電子機械工学科卒業論文
- (4) 山口勝美・中本剛・他：紫外線感光性樹脂を使ったマイクロストラクチャの製造第 3 報、集束ビーム描画法に

おける硬化特性)、日本機械学会論文集 C 編, 61-581 (1995 年 1 月), pp.304 ~ 310.

- (5) Masayuki NOHARA, Takehiro WATANABE et al.: Development of laser cutting method of mild steel plate using numerical fluid analysis, IIW 2010
- (6) 菊池淳史：高出力ファイバーレーザーの現状とその適用、溶接技術、58-11(2010),P53
- (7) 新井武二：はじめてのレーザープロセス、工業調査会 (2004 年)、P 48
- (8) 荒谷 雄：レーザー・アークハイブリッド溶接の各組み合わせと用途、溶接技術、58-11(2010),P61
- (9) 松坂壮太、渡部武弘、他：レーザー・アークハイブリッド法による亜鉛メッキ鋼板の高速溶接プロセス、レーザー加工学会誌、13-4 (2006)、P 73
- (10) 堀池篤志：Al-Si のレーザークラディングと形成層の特性評価、平成 22 年度千葉大学大学院工学研究科修士論文
- (11) 朝比奈敏勝：マグネシウム合金の溶接、日本マグネシウム協会第 7 会接合技術分科会例会 (2007 年)、P1
- (12) Takero HOSHINO, Takehiro WATANABE, et al.: Development of high-quality laser welding process of magnesium alloy with modulated laser beam, IIW 2010
- (13) 井出昌志：パルス変調レーザーによるマグネシウム合金の高品位突き合わせ溶接、平成 22 年度千葉大学工学部電子機械工学科卒業論文
- (14) 有年雅敏、他：接合技術を用いたマグネシウム合金製大型製品の開発、日本マグネシウム協会第 7 会接合技術分科会例会 (2007 年)、P91
- (15) Mitsuo FUJIMOTO et al., Friction Spot Joining for Automobile Industry, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005, Japan Welding Society, P173
- (16) 郭正陽：パルス変調レーザーによるアルミニウム合金と鋼板の高品位溶接、平成 22 年度千葉大学大学院工学研究科修士論文
- (17) 音光貴仁：パルス変調レーザーによる Al 合金と銅の高品位溶接、平成 22 年度千葉大学工学部電子機械工学科卒業論文
- (18) 宮下幸雄：レーザーによるマグネシウム合金/アルミニウム合金異種金属接合、日本マグネシウム協会第 7 会接合技術分科会例会 (2007 年)、P103
- (19) Toshiaki YASUI, et al.: Development of Welding Process between Aluminum and Steel by Friction Stirring, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005, Japan Welding Society, P227
- (20) Koji TANAKA et al.: Dissimilar joining of aluminum alloy and steel sheet by friction stir spot welding, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly 2005, Japan Welding Society, P181
- (21) 岡川啓悟：電磁圧接板の引張り剪断強さに及ぼすコイル形状の影響、平成 22 年度千葉大学大学院工学研究科博士論文