

連携記事・入門講座

鋼を接合するー8

レーザー溶接

Laser Welding

片山聖二

Seiji Katayama

大阪大学 接合科学研究所
接合機構研究部門 教授

1 レーザとレーザー溶接の特色

レーザー (レーザー; LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 「放射 (輻射) の誘導放出による光の増幅」) は、多数の種類が開発されており、一般に、単色性、指向性 (平行性)、集光性、制御性および可干渉性 (時間的・空間的コヒーレンス) に優れ、レンズまたはミラーで集光させると、高パワー密度 (高輝度) の熱源となる。レーザー溶接は、適切なレーザーを選択し、そのパワー密度と照射 (相互作用) 時間を調整することによって、板厚約 $10\mu\text{m}$ の超薄板から 50mm を超える超厚板までの継手が作製できる。図1¹⁾にレーザーのパワー密度分布と溶接部の溶込み形状の模式図を他の溶接用熱源の場合と比較して示す。レーザーのパワー密度は、アークやプラズマよりも高く、電子ビームと同等に高い。その結果、プラズマ、レーザーおよび電子ビーム溶接時にはキーホールと呼ばれる細くて深い穴を形成し、パワー密度の増加に従って溶込みの深い溶接ビードが作製できる。なお、電子ビーム溶接では、高真空を維持し、照射部から発生するX線を防護するためチャンバー内で行う必要があり、また鉄鋼材

料においては溶接前に脱磁処理が必要である。一方、レーザー溶接は、これらの条件を必要とせず、大気圧下でも真空中でも可能であり、真空中では電子ビーム溶接と同様にきわめて深い溶接部を作製できる。

また、アークやプラズマ溶接より速い速度での溶接も可能である。オーステナイト系ステンレス鋼薄板において、TIG、プラズマおよびレーザーで得られた溶接ビードの断面写真の例²⁾を図2に示す。レーザー溶接では、他の熱源に比べて小さい領域に集光でき、溶接金属部 (溶融部) および溶接熱影響部 (HAZ) とその幅が他の溶接法の場合より狭い。さらに、レーザー溶接は、各種溶接・接合法の中で、自動化、省力化、ロボット化、ライン化などが容易であり、各種製品や構造物の高精度・高品質・高柔軟性・高速・低変形の溶接法として認められ、今後、その適用の更なる拡大が見込まれる。

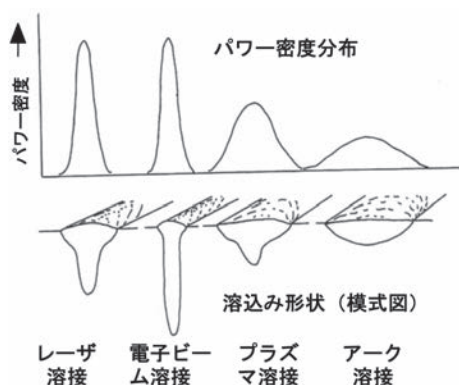


図1 各種溶接熱源におけるパワー密度分布とそれで作られる溶込み特性の比較 (模式図)

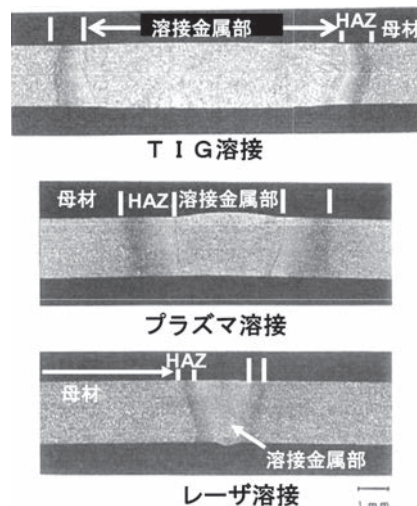


図2 ステンレス鋼薄板のTIG、プラズマおよびレーザー溶接部の断面の比較

2 溶接用レーザーの種類と特徴

溶接用レーザーとしては、CO₂（炭酸ガス）レーザー、パルスまたは連続発振のNd：YAGレーザー、半導体レーザー（以下、Laser Diodeの略称であるLDを用いる）、LD励起固体（YAG、YVO4、YLFなど）レーザー、ディスクレーザー、ファイバーレーザーなどがある。それらの特徴をまとめて表1に示し、典型的なCO₂レーザーおよびランプ励起YAGレーザー溶接システムの模式図を図3に示す。まず、高パワー化が容易で高速・深溶込み溶接が可能である連続発振のCO₂レーザー、およびファイバー伝送が可能で高柔軟性のランプ励起パルスYAGレーザー

表1 溶接・接合用レーザーの種類と特徴（2011年10月1日）

● CO ₂ レーザ（波長：10.6 μm；遠赤外線）
レーザ媒質：CO ₂ -N ₂ -He 混合ガス（ガス）
出力 [連続]：50 kW（最大）
（通常）1 kW ～ 15 kW
利点：高出力化容易（効率：10 %）
● ランプ励起 YAG レーザ（波長：1.06 μm；近赤外線）
レーザ媒質：Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ ガーネット（固体）
出力 [連続]：10 kW（カスケードタイプおよびファイバー結合タイプ最大）
（通常）50 W (pw) ～ 7 kW(cw)（効率：1 ～ 4 %）
利点：ファイバー伝送、波形制御、分岐可能、高柔軟性
○ 半導体レーザー (LD)（波長：0.8 ～ 1.0 μm；近赤外線）
レーザ媒質：InGaAsP 等（固体）
出力 [連続]：15 kW（スタックタイプおよびファイバー伝送タイプ最大）
（通常）50 W ～ 4 kW
利点：コンパクト、最高の効率（30 ～ 60 %）
● LD 励起固体レーザー（波長：約 1 μm；近赤外線）
レーザ媒質：Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ ガーネット等（固体）
出力 [連続]：13.5 kW（ファイバー結合タイプ最大）
[パルス]：6 kW（スラブタイプ最大）
（通常）1 kW ～ 4 kW
利点：ファイバー伝送、高効率（10 ～ 20 %）
○ ディスクレーザー（波長：1.03 μm；近赤外線）
レーザ媒質：Yb ³⁺ :YAG、YVO ₄ 等（固体）
出力 [連続]：16 kW（カスケードタイプ最大）
（通常）500 W ～ 8 kW
利点：ファイバー伝送、高輝度、分岐可能、高効率（15 ～ 25 %）
○ ファイバーレーザー（波長：1.07 μm；近赤外線）
レーザ媒質：Yb ³⁺ :SiO ₂ 等（固体）
出力 [連続]：50 kW（ファイバー結合タイプ最大）
（通常）200 W ～ 10 kW
利点：ファイバー伝送、コンパクト、高輝度、高効率（20 ～ 30 %）

が開発された。

CO₂レーザーは、波長が10.6 μmで、その発振器は、ガス封じ切り形、低速軸流形、高速軸流形、2軸直交／3軸直交形などに分類される。レーザーは、通常連続またはパルス発振が可能で、装置により、ガウス分布モード、低次マルチモード、高次マルチモードまたはドーナツモードのパワー密度分布を呈する。図3（左側）に示すように、連続発振のレーザーは切断や溶接に用いられ、パルスレーザーは穴あけに利用される。また、連続発振レーザーは高パワー化が容易で最大50kWまで市販されたが、50kW級装置の製造は近年すでに中止されている。溶接には、2～15kWの高パワー装置が自動車分野でのブーリやモータコア、ギヤなど部品の溶接、鉄鋼薄板のテーラードブランク溶接、リモート／スキャナ溶接、鉄鋼や造船業界における鉄鋼厚板の溶接などに実用化されている¹⁻⁶⁾。しかし、高パワーCO₂レーザーの場合、ファイバー伝送ができず、シールドガスとしてArガスを用いると、レーザーと相互作用をしてArガスプラズマが形成し、溶込みが浅くなる⁷⁾。また、透過窓や集光レンズにZnSeが用いられるが、高パワーレーザーでは、レーザー照射後透過光学部品内に不均一な温度分布が発生し、焦点位置が集光レンズ側に徐々に移動する“熱レンズ効果”と呼ばれる現象が起こる⁸⁾。これらのため、溶接用熱源としては他のレーザーが利用される傾向にある。

YAGレーザーは、ノーマルパルス、連続発振など、ピークパワーとパルス幅の異なる種々の発振ができ、図3（右側）に示すように、直射光学系またはファイバー伝送光学系が用いられる。波長1.06 μmの基本波YAGレーザーは、ファイバー伝送損失が約2dB/kmと小さいことから、最近では主にファイバー伝送で利用される。そのファイバーにはGI（Graded Index）型とSI（Step Index）型がある。GI型はガウス分布に近いパワー密度分布が得られるが、Geがドーピングされており、損傷のしきい値が低いため、低パワーレーザーの伝送にのみ用いられ、高パワー用にはSI型が用いられる。パルスYAGレーザーは、比較的自由に任意のパルス波形が設定でき、電装品、電

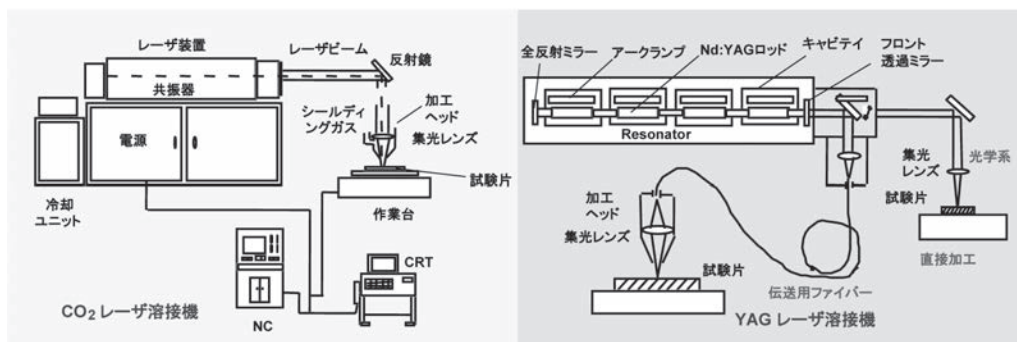


図3 CO₂レーザー溶接機（左）およびYAGレーザー溶接機（右）の模式図

池ケース、電子部品、眼鏡フレーム、装飾品などの微小部の溶接に多用されている⁹⁾。一方、連続発振では、2～4kW高パワーレーザがテーラードブランク突合せ継手または重鉛めつき鋼板重ね継手の溶接に用いられている¹⁰⁾。また、6～10kW級がステンレス鋼などの深溶込み溶接¹¹⁾に適用されている。しかし、ランプ励起の高出力YAGレーザは発振効率が悪いという欠点を有するため、装置開発はすでに中止され、LD励起固体レーザにシフトした。LD励起YAGレーザは、自動車ルーフの3次元溶接やシル部のスティッチ溶接、および一部リモート溶接にも利用されている¹²⁾。しかし、最近、この高パワーレーザ装置の開発も中止され、高発振効率の観点から半導体レーザ¹³⁻²¹⁾、または高発振効率・高ビーム品質の観点からディスクレーザもしくはファイバーレーザが開発され²²⁻²⁷⁾、利用されるようになってきている。

レーザのビーム品質は、従来、 M^2 (エムスクエア: $\pi\alpha\omega_0/\lambda$; ここで、 α : 集光時の半角度; ω_0 : 集光ビームの半径; λ : 波長) またはK (ケー: $1/M^2$) 値で表され、1に近いほどよいと評価されてきた²⁸⁾が、最近では、 $\alpha\omega_0$ (集光ビームの半角と半径の積) で表記されるBPP (Beam Parameter Product) が用いられる。各レーザとも高出力になると、ビーム品質が悪くなる。ビーム品質が優れていると、同じ焦点距離のレンズを使用する場合、より微小なビーム径に集光できて高パワー密度が得られる。また、同一の集光ビーム径を得ようとする場合、焦点距離の長いもしくはサイズの小さくて軽い集光光学系が利用できる¹⁹⁾。

半導体レーザ (LD) は、現在、高出力化と高品質化について活発に検討されており、溶接・接合用に50W～15kWのレーザ装置が市販されている²¹⁾。LD装置は小型・軽量であるので、それをロボットに直接搭載するかまたはファイバー伝送で用いられる。直接照射の場合、レーザビームは焦点位置で細長い楕円形状であるので、金属材料の薄板溶接において表面外観の綺麗な溶接ビードが作製されている^{13,14)}。一方、ファイバー伝送で高パワー密度化されると、深溶込み溶接部の作製が可能となる¹⁶⁾。ただし、高パワーの直接照射型LDの場合、ビーム品質が悪く、特に片方の発散角が大きく、高パワー密度を達成するためには焦点距離が短い集光光学系が必要であるといった欠点がある。現在、ファイバー伝送型LDでは、集光特性の改善が図られ、高パワーYAGレーザと同等のレベルになっている。その結果、LDはステンレス鋼薄板 (流し台など) やプラスチックの溶接用、自動車用重鉛めつき鋼板のブレイジング (ろう付) 用やアルミニウム合金の溶接用として実用化されている¹⁹⁻²¹⁾。

一方、ディスクレーザおよびファイバーレーザは、レーザ発振物質を薄くするか細くして冷却効率を向上させる工夫がされ、また、レーザ発振元素であるNd³⁺を固体中の固溶量

の増加が可能なYb³⁺に置き換え、さらにLD励起法によって高効率・高品質・高輝度が達成されている²²⁻²⁷⁾。現在、ディスクレーザやファイバーレーザは、それぞれ16kWや30kWの高パワーの場合に25%程度の高 (電気・光変換) 効率で、BPPが8mm*mradより小さく高ビーム品質であり、パルス化も可能で、ファイバー伝送ができ、Arガスとの相互作用も小さいなど、種々の優れた点がある。これらの高パワー連続発振のレーザは、リモート/スキャナ溶接および深溶込み溶接用熱源として、また、従来のCO₂レーザ装置やYAGレーザの代替えとして使用されている。なお、高パワー・高輝度のレーザ溶接の場合、長焦点の集光光学系で薄い石英レンズが用いられ、水冷が十分でない場合、また保護ガラスにおいて反射コーティングが劣化したり、汚れたりしている場合など、焦点位置が集光レンズ側に移動する熱レンズ効果が起こる^{29,30)}ため、注意が必要である。

3 レーザ溶接現象と溶接部の溶込み形状

レーザ溶接は、図4に示すように、種々の継手形状に対して利用される。通常、突合せまたは重ね継手がパルス発振レーザによるスポット溶接または連続発振レーザによるビード溶接で作製される。その時、レーザのパワー密度の高低によって、浅い溶込みか深い溶込みの溶接部が得られる。それぞれの溶接現象の模式図を図5¹⁾に示す。レーザ溶接部は、その形状によって、主に、表面で吸収されたレーザによる熱の板内部への伝導と融液の対流により形成する浅溶込みの熱伝導型溶接部 (図5の上段) とキーホールを有する溶融池が形成している深溶込みのキーホール型溶接部 (図5の下段) に分類される。熱伝導型溶接部の溶込み深さは、通常、材料の融点、熱伝導率、湯流れなどによって決定されるが、キーホール型溶融溶接部の溶込み深さは、キーホール深さとその先端からの熱伝導または湯流れで決定され、材料中に蒸気圧の高い元素を多く含むほど深くなる^{31,32)}。レーザ溶接は、一般に

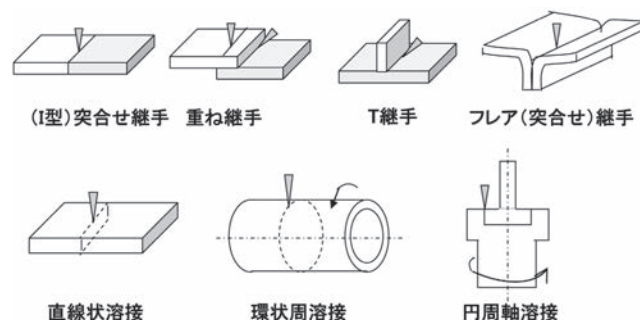


図4 各種溶接継手の模式図

キーホール型の深溶込み溶接で行うことが多い。なお、パルスレーザによる連続したシーム溶接部は、スポット溶接部をラップ率60～80%などでオーバーラップさせて作製される。

レーザが照射されると、材料中の自由電子がレーザの周波数（振動数）に応じて振動し、レーザが吸収される。金属材料に対するレーザの吸収率は、レーザの波長と材料表面の状態によって、通常数%～30%程度と異なり、波長が短い方が高い^{1,33)}。金属材料内部へのレーザの浸透深さは、 $1\mu\text{m}$ 以下と極めて浅く、レーザ加熱は極表層で起っている³⁴⁾。表面温度の上昇は、吸収されたレーザのパワー密度が高いほど、また材料の熱伝導率が低いほど速く起こり、入熱量が多いと溶融が起こる。さらに、レーザのパワー密度が高い場合、レーザ照射部の表面が蒸発温度以上に加熱されて蒸発が起こり、その反跳力で表面がくぼみ、深いキーホールを形成する。金属のレーザ吸収率またはカップリング係数（照射されたエネルギーに対する吸収されたエネルギーの比）は、溶接用レーザ（波長 $\lambda = 0.8 \sim 10.6\mu\text{m}$ ）の場合、角度依存性と温度依存性がある^{35,36)}。レーザカップリング係数の温度依存性の模式図¹⁾を図6に示す。温度が高くなると、結晶中のフォノン（音子）によって電子が散乱され、電気伝導度が減少するので、レーザは一般に金属材料に吸収されやすくなる³⁴⁾。また、レーザの吸収は、表面が酸化されているか、強加工を受けていると高い。温度がさらに上昇して、溶融したり、表面酸化が促進されたり、さらにキーホールが形成したりすると、レーザエネルギーはさらによく吸収される¹⁾。なお、偏光レーザの場合、レーザが試料表面に対して角度を持って照射されると、s波（s偏光）の反射は角度に比例して大きくなるが、p波（p偏光）はブリュースター角近傍で大きく吸収されるようになって反射が減少する。このため通常の溶接用レーザは、偏光の影響が現れやすい直線偏光をさけて、影響の現

れない円偏光やランダム偏光が用いられる。

キーホール内では、内壁面（3m/min以上の高速溶接の場合、進行方向前壁面）や底部でレーザがフレネル吸収（多重反射による吸収）され、金属蒸気が発生し、キーホール口から噴出する。それに伴って、キーホール開口部周囲の融液がスパッタとして吹き飛ばされる。蒸発物質は、高温であることから高輝度の発光体として見られ、その形状からブルーム（羽毛）と呼ばれ、レーザによって生成したことを意識して、レーザ誘起ブルームと呼ばれる。またこのブルーム中には、イオンと電子が検出され、一部電離していることから、レーザ誘起プラズマまたはプラズマ・ブルームと呼ばれるときもある。

高パワーレーザ溶接時のレーザ誘起ブルームの生成状況とその影響についてまとめた模式図を図7¹⁾に示す。図7(a)は、ディスクレーザやファイバーレーザによるリモート溶接を長焦点の集光光学系を用いてガスを吹きつけないで行った場合

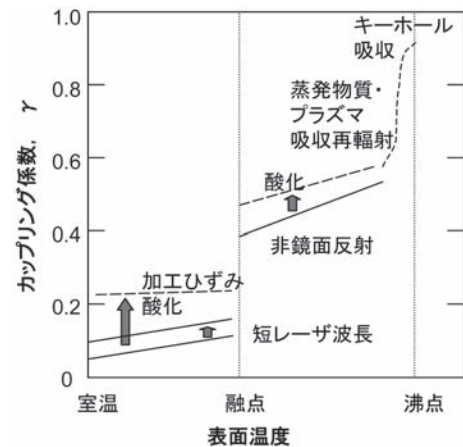


図6 金属のレーザカップリング係数に及ぼす温度と他の因子の影響

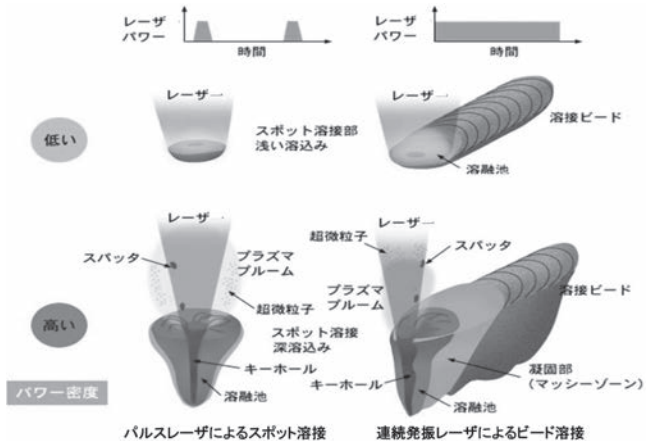


図5 パルスレーザによるスポット溶接現象および連続発振レーザによるビード溶接現象と溶融・溶込み形状に及ぼすレーザパワー密度の影響

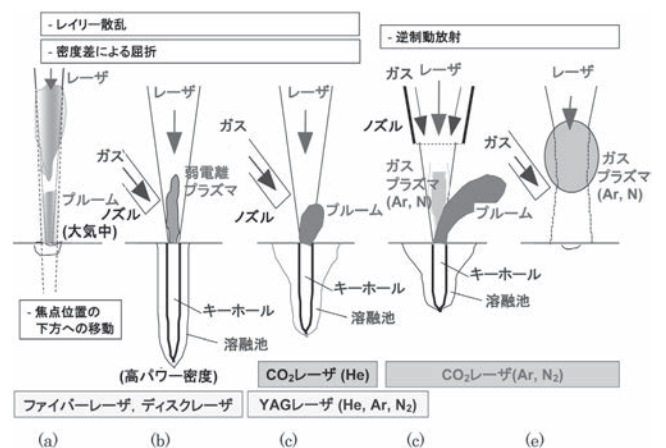


図7 高パワーレーザ溶接時のビード形成とレーザ誘起ブルームまたはプラズマの生成による影響

の状況を示している。ブルームが大きく成長して高温領域が拡大して、それに伴って低屈折率の領域も拡大する。その結果、レーザは低屈折率分布の領域を通過するときに屈折したり、焦点位置が下方へ移動したりして溶込み深さが浅くなることが起こる^{37,38)}。通常、波長約 $1\mu\text{m}$ のレーザでは、ブルームとの相互作用が波長 $10\mu\text{m}$ のレーザに比べて小さいと評価される³⁹⁻⁴⁴⁾が、安定な溶込みを得るためには、レーザのブルーム通過距離を短くする必要がある。図7 (b) は、波長約 $1\mu\text{m}$ の高輝度レーザ溶接の場合を示している。ブルーム温度は約6000Kと高くなっても、溶込み深さは深く、プラズマの影響による溶込み深さの顕著な減少は見られない³⁹⁻⁴¹⁾。図7 (c) は、数kWパワーのYAGレーザやHeシールドガス中での CO_2 レーザ溶接時の状況を示している。この場合、溶込み深さはArガス中での CO_2 レーザ溶接時ほど浅くならない。波長の長い CO_2 レーザでは、5kWおよび10kW以上の高パワーの場合、それぞれ図7 (d) および (e) に示すように、その作用が波長の2乗に比例する逆制動放射により、電離電圧が小さいArガスや N_2 ガスと相互作用をしてガスプラズマを生成し、ガスプラズマの逆制動放射によるレーザの吸収が起こるため、溶込みは浅くなる。そのため、10kW以上の大出力 CO_2 レーザ溶接では、通常、99.9%以上の高純度Heまたは50%以上のHeを含む混合ガスを利用する必要がある。一方、レーザ溶接時には、原子、分子、イオン、超微粒子等によるレイリー散乱 (Rayleigh scattering : 弾性散乱) も起こる。レイリー散乱光の強度は、電磁波の波長 λ に対して $1/\lambda^4$ に比例することから、レイリー散乱は、波長： $1\mu\text{m}$ 帯のレーザやLDなど波長の短いレーザほど大きい^{1,42-44)}。その他、微粒子によるミー散乱 (Mie scattering : 煙草等による散乱) もあるが、その効果は一般に小さい。レーザ溶接では、いずれの場合も、キーホール口から中性金属の発光によるブルーム (一部励起された金属プラズマ) が見られ、蒸発物質はクラスターや超微粒子となって浮遊する。このブルームは低速度溶接の場合、キーホールと連動して、激しく前後左右に動く。一方、高速度溶接では、レーザ誘起ブルームはキーホール口の直上方向から若干後方へ噴出する。このような挙動は、キーホールの形状と安定性に関連し、溶融池内部の湯流れや気泡 (ポロシティ) 生成に影響を及ぼし、溶接ビード形状に影響を及ぼす¹⁾。

焦点位置でのビームスポット径およびパワー密度の異なるファイバーレーザを10kW、4.5m/minでステンレス鋼SUS304に照射して得られた溶接ビードの断面を図8^{41,44)}に示す。ビーム径が小さくなり、パワー密度が高くなるに従って、溶込みは深くなる。なお、通常利用されるビーム径が0.56mmの場合、スパッタが発生してアンダーフィルの溶接ビードが形成し、逆に、ビーム径が0.13mmときわめて小さ

くパワー密度の高い場合、スパッタは減少するが、ハンピングの溶接ビードが形成した^{44,45)}。その間のビーム径で良好な溶接部が形成していた。スパッタは、ブルームの噴出に伴って融液が溶融池より離れた位置に吹き飛ばされることによって形成し、それが激しい場合、アンダーフィルビードとなる^{44,45)}。一方、ハンピングは、溶融池の表面を後方へ吹き上げる融液量が多く、狭い溶融池を通して後方に流れ、最後部の低温側の表面張力が大きくて盛り上がり、中間部の狭い溶融池が早く凝固することにより形成する^{44,45)}。

以上、高パワーレーザによるキーホール型深溶込みの溶接ビードの形状と溶込み深さは、図9に示すように、主にキーホール深さと湯流れによって決定される。図9 (a) および (b) は、不活性ガスシールドが完全で溶融池の酸素量が増加しない場合およびシールドが不完全で大気中の酸素が溶融池表面で吸収され、溶融池の酸素含有量が増加した場合に相当する。表面張力は、溶融池内のS (硫黄) やO (酸素) 含有量が少ないと、融点近傍の低温ほど高いが、溶融池内の酸素量が増加すると、融点近傍の低温の表面張力が低下し、温度に対する勾配が逆転する⁴⁶⁾。したがって、シールドが完全であると、酸素含有量が低いために低温度の表面張力が高く、キー

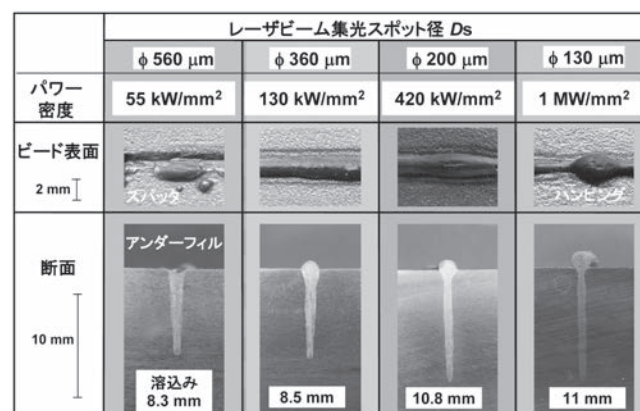


図8 レーザ溶接部の表面外観、断面形状および溶込み深さに及ぼす焦点位置でのビームスポット直径およびパワー密度の影響 (10kW、4.5m/min、Arシールドガス：30L/min)

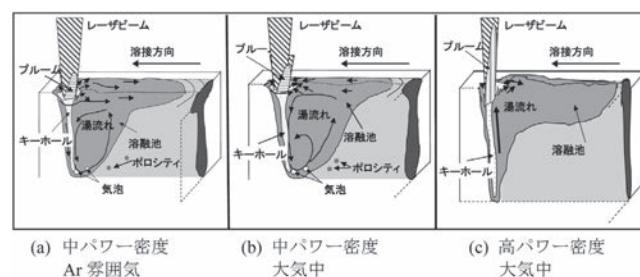


図9 Arシールドガス中におけるレーザ溶接時のキーホール挙動、湯流れ、気泡・ポロシティの発生と防止の差異を示す模式図と溶接ビード形状に及ぼす雰囲気およびパワー密度の影響

ホールから噴出した融液は溶融池幅を広げるように流れ、表面の溶接ビード幅は広くなる⁴⁷⁾。一方、酸素量が増加すると、低温側の表面張力が高温側より低くなり、溶融池の湯流れは温度の高いキーホール口に向かって流れ、溶融池の幅はあまり広がらない⁴⁷⁾。そして、溶融池内部の湯流れはキーホール底部先端から溶融池底部の固液界面上部を後方へ起こる。この場合、キーホール先端から気泡が発生してポロシティが生成するときがあり、溶接ビードの底部は半円状を呈する。一方、パワー密度が高い場合、図9 (c) に示すように、深いキーホールが生成し、レーザ誘起プルームはキーホール口から上後方に噴出してキーホール後端の融液が溶融池表面を後方へ流され、溶接ビードの溶込みは深く、幅の狭い、凸状の余盛が形成する^{41,44,45)}。

4 レーザ溶接欠陥の生成および防止と溶接部の特性

レーザ溶接時には、材料の種類と組成、溶接条件などによって、目違いやギャップによる溶接不良、変形（ひずみ、そり）、スパッタ発生やキーホールの不安定によるアンダーフィルや穴あき、高温割れ、深溶込み溶接部のポロシティなど、種々の溶接欠陥が発生する。それらの種類、発生原因と低減・防止策⁴⁸⁾をまとめて表2に示す。レーザ溶接欠陥は、通常のアーク溶接と同様に、形状欠陥、内部欠陥および性質欠陥に分類される。そのうち、ポロシティや高温割れ（溶接金属部では凝固割れ、HAZでは液化割れ）と呼ばれる内部欠陥が対処すべき重要な欠陥である。

SUS304に対して6kWまたは10kWのファイバーレーザで溶接を行った。その結果、溶接部の溶込み深さに及ぼすレーザパワー、スポット径（パワー密度）および溶接速度の影響を図10^{26,41)}に示す。6kWでの溶込み深さの比較から、スポット径が小さく、パワー密度が高いほど、高速度での溶込みが深い。一方、低速度での溶込みはレーザパワーの高い10kWの方が深い。すなわち、低速度での溶込みはレーザパワーの影響が大きく、高速度での溶込みはレーザパワー密度の影響が大きい。また、溶接欠陥としては、低速度の場合、部分溶込みの溶接部にポロシティが生成しやすい。一方、高速度の場合、ビームが約0.6mm程度の場合、スパッタが発生してアンダーフィルが形成し、ビームが細いとハンピングビードが形成しやすい。

金属材料のレーザ溶接時の現象をマイクロフォーカスX線透視装置^{41,45,49-51)}と高速度ビデオにより観察した結果に基づいて、レーザ溶接時のキーホール挙動や湯流れの様子および気泡の流動やポロシティの生成状況をまとめて図11に示す。キーホールの激しい動きとその先端部から気泡が発生し

ポロシティが生成する。一般に、低速度（1m/min以下）や中速度（1.5～2.5m/min）の場合、気泡はキーホールが崩れることによって、またはキーホール先端部近傍の前壁面から溶融池に向かう強い蒸発によって後壁の溶融部がくぼみ、さらにキーホールの変動に伴って吹き付けられるシールドガス等が巻き込まれて生成する。その気泡は、キーホール先端部

表2 各種レーザ溶接欠陥の発生原因と低減・防止策

分類	溶接欠陥の種類	溶接欠陥の発生原因	溶接欠陥の低減・防止策
形状欠陥	変形（ひずみ）、反り	★ 過剰入熱 ★ 不完全なジグ・拘束条件	○ 高速深溶込み溶接 ○ 強固なジグによる固定
	外観不良（汚れ、表面の凹凸、ピット）	★ スパッタの発生 ★ 不適切な溶接条件 ★ 蒸発物質の付着	○ 低パワー密度溶接 ○ 溶接条件の適正化 ○ 蒸発超微粒子の吹き飛ばし
	溶落ち	★ 薄板の過剰入熱貫通溶接 ★ 過剰入熱広幅ビード ★ 厚板溶接（裏面広幅ビード）	○ 溶接条件の適正化 ○ 裏板、バックシールドガス利用 ○ 裏面溶接ビード幅の適正化
	アンダーカット	★ 高入熱・低速溶接 ★ 高パワー・高速溶接 ★ 溶融池の物理的特性	○ 溶接条件の適正化 ○ 鉄鋼材料ではS（イオウ）含有量の低減等
	アンダーフィル	★ スパッタの発生 ★ 貫通溶接による溶落ち	○ スパッタ低減条件 ○ 溶接条件の適正化
内部欠陥	高温割れ（凝固割れ、液化割れ、クレータ割れ、ビード割れ等）	★ 低融点液膜の広範囲形成 ★ 凝固時の引張ひずみの急速な付加（高速溶接等） ★ 大きな引張ひずみの付加	○ 合金組成の選択 ○ パルス条件の最適化 ○ 急速ひずみ付加の防止
	ポロシティ（気孔、ブローホール、ボア、ウォームホール等）	★ キーホール不安定 ★ 蒸発物質、ガス巻き込み ★ 水素（源）	○ 安定なキーホールの生成 ○ シールドガスの選択 ○ 水素源の除去 ○ 貫通溶接、高調波溶接等
	重ね部の膨らみ	★ 低速・大入熱溶接 ★ 薄い上板の重ね溶接	○ 重ね継手の密着化 ○ 低入熱・高速溶接等
	溶込み不良 融合不良	★ 高反射率・高熱伝導率材 ★ 蒸発物質、プラズマ等	○ 高パワー密度溶接 ○ シールド条件等の最適化
	介在物の巻き込み（スラグ、酸化物等）	★ 表面の酸化、酸素ガス雰囲気 ★ 介在物の多い母材	○ 表面研磨と適切なシールド条件 ○ 介在物等の少ない母材・ワイヤ
	合金元素の蒸発損失	★ 低沸点元素の固溶材料 ★ 低速・低溶融池温度	○ 高速深溶込み溶接 ○ パルス、パルス変調溶接
	マクロ偏析	★ 異材の不完全な混合 ★ ワイヤの不完全な混合	○ ビームオシレーション ○ 再溶融処理
	ミクロ偏析	★ 分配係数の異なる元素含有 ★ 低速溶接	○ 高速低入熱溶接 ○ 溶接後の溶体化熱処理
	機械的性質（強度、伸び、硬さ、衝撃、疲労特性、靱性等） 化学的性質（腐食等）	★ 軟化部の形成（加工硬化、時効硬化やマルテンサイトの消滅） ★ 応力腐食割れ ★ 析出物、偏析による粒界腐食	○ 溶接内部欠陥の低減・防止 ○ 高強度溶接部の作製 ○ 溶接後の最適な熱処理 ○ 高速・低入熱溶接 ○ 残留応力の低減除去熱処理

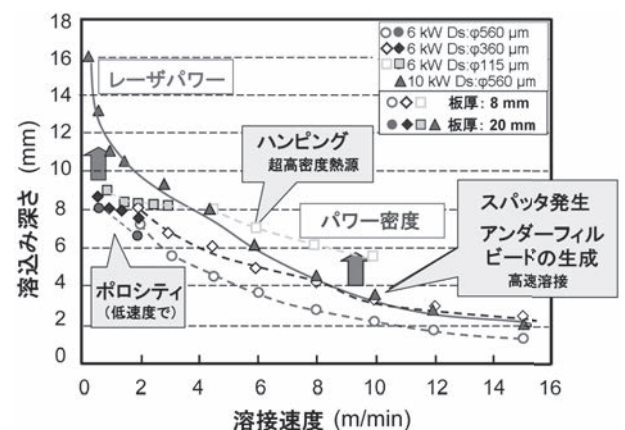


図10 ステンレス鋼SUS304のレーザ溶接部の溶込み深さに及ぼす6kWおよび一部10kWでのビーム径（パワー密度）と溶接速度の影響

から溶融池底部を後方上部への湯流れに乗って移動し、その途中で凝固壁にトラップされてポロシティとなる。溶接速度が速くなると、気泡は底部近傍でトラップされるものが多くなる。さらに高速度になると、図11 (d) に示すように、鉄鋼材料の場合、溶融池内の湯流れが変化し、気泡およびポロシティの発生が抑制される。なお、高輝度レーザー溶接の場合、図11 (b) に示すようにキーホール途中から気泡が発生し、ポロシティとなることがある。気泡内部に取り込まれた蒸発物質は、温度が低下すると、一部、酸化物を生成し、残りは固化して内壁に付着する。その結果、ポロシティ内部は主にシールドガスのみとなり、低圧となる。このため、固体中の拡散が可能な水素は、冷却中および室温放置中に、ポロシティ内に侵入し、シールドガスに対する水素の割合は、分析までの放置日数が増加すると増加する^{49,50)}。

連続発振レーザー溶接時のポロシティは、キーホールが安定に貫通する溶接、適切な繰返し数とデューティの条件でのパルス変調溶接、前進角の溶接、適切なシールドガス（オーステナイト系ステンレス鋼：N₂ガス、鉄鋼材料：CO₂ガス）中の溶接、真空中の溶接などで抑制や防止できる^{1,48-52)}。

レーザー溶接は通常HeまたはArの不活性ガス中で行われるが、ポロシティ量を減少させる目的でN₂ガス中において行われることがある。しかし、N₂ガス雰囲気中において溶接用構造用鋼厚板を15kW以上の大入熱でCO₂レーザーによる貫通溶接を行うと、大きなNガスプラズマが貫通のキーホール底部に発生し、Nが溶融池に多量に固溶され、凝固時に気泡が形成し、ポロシティとなることが報告されている⁵³⁾。また、オーステナイト系ステンレス鋼のCO₂レーザー溶接では、窒素の吸収がYAGレーザーに比べて多くなり、条件によっては溶接金属部に凝固割れが発生する場合がある⁵⁴⁾。

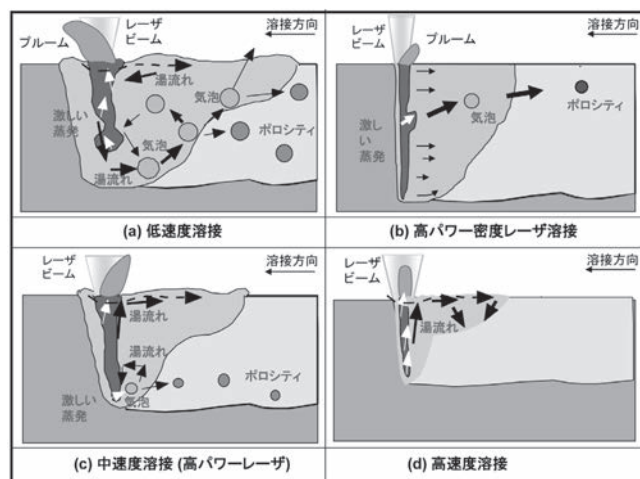


図11 種々の条件におけるレーザー溶接現象（キーホール形状と挙動、ブルーム挙動、気泡・ポロシティの発生挙動、溶融池内湯流れ）を示す模式図

鉄鋼材料の場合、高パワーレーザーによる深溶込み溶接や高速溶接において、溶接金属部の中央部や底部に凝固割れが発生しやすくなる。図12に高張力鋼厚板のディスクレーザーによる部分溶込み溶接部を示すが、溶接金属部の中央部近傍に凝固割れが発生している。割れを防止するためには、溶接ワイヤの開発、溶接部形状の適正化と溶込み深さの制限などが必要である。

微小部の接合では、パルスレーザー溶接が利用される場合が多い。そのスポット溶接部は、図13⁵⁵⁾に示すように、パルス幅や焦点はずし距離（集光レンズの焦点位置と試料表面間の距離）を調整して、溶込みの深いものや浅いものが作製される。なお、矩形のパルスを照射すると、焦点位置近傍の条件や溶込みの深い溶接部でポロシティが形成しやすいことがわかる。レーザースポット溶接時においてパワー密度が短時間に高くなる条件では、溶融池が小さい状況でキーホールが急速

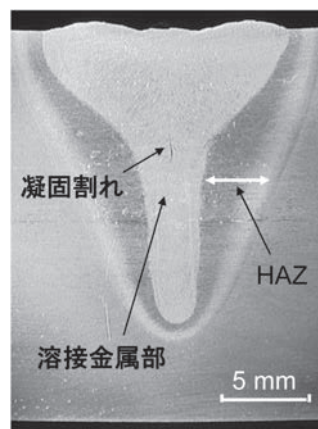


図12 高張力鋼レーザー溶接ビードの断面写真と凝固割れの発生例

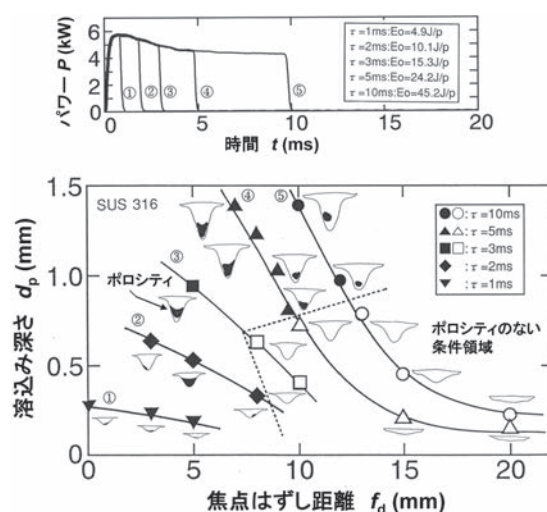


図13 パルスレーザースポット溶接部の溶込みおよびポロシティの生成・防止に及ぼす焦点はずし距離とパルス幅の影響

に形成されると、スパッタが発生し、アンダーフィルの溶接部が形成する。一方、ポロシティは、レーザパワーの急速な低下によりキーホールが急激に崩壊するため、溶融池の底部から中央部に生成する。したがって、アンダーフィルとポロシティを防止・低減させるためには、レーザパワーを徐々に増加させて、比較的大きな溶融池内にキーホールを徐々に深くし、レーザパワーの低下も、キーホールが底部から埋まるように徐々に低下させる方法が有効である^{48,55)}。なお、パルスレーザによる完全オーステナイト系ステンレス鋼やNi基合金のスポット溶接では、急速凝固が起こり、固液共存領域が広くなり、凝固割れが起こりやすい。

鉄鋼材料の場合、アルミニウム合金やNi基合金と異なり、溶接金属部の引張強さや硬さは母材より高く、通常、溶接継手特性は良好である。270～980MPa級の鋼種を用い、溶接部の硬さ分布について測定した例を図14⁵⁶⁾に示す。270および440MPa鋼は、レーザ溶接部の硬さがアークやマッシュシーム溶接のものより高い。これは、溶接金属部の冷却速度が速く、HAZでの温度履歴が急速であり、マルテンサイト相が生成しやすかったためである。また、母材強さが590MPa以上の鋼種では最高の硬さはいずれの溶接法でも大差がなく、ほぼ同等であるが、レーザ溶接の方が狭い。これは、高速溶接が可能で、溶接部が狭いためである。また、980MPa鋼の場合、熱影響部 (HAZ) の両端で硬さの低下が認められる。これは「HAZ軟化」現象であり、780MPa以上の高張力鋼で入熱が大きい時に顕著に見られる。これは、HAZのボンド部 (固液界面) から離れた領域での温度履歴の途上でマルテンサイトが消失して焼戻しペーナイト (少量の軟質フェライト) が生成したためと考えられる。HAZ軟化の程度は、入熱の小さいレーザ溶接の方がアークおよびマッシュシーム溶

接より小さく、レーザ溶接による高速溶接で低減・抑制できる。引張試験や疲労試験では、ここで破断する。特に、固溶強化または析出硬化型の高張力鋼の場合を比較すると、強加工を行った析出硬化型でHAZ軟化が起こりやすい⁵⁶⁾。さらに、1500MPa級高張力鋼では、溶接金属部とHAZの硬さも低下する。この軟化も、高速度のレーザ溶接で低減できる⁵⁷⁾。

自動車用などの薄鋼板のテーラードブランク溶接では、溶接部の品質は球頭張出し試験法またはエリクセン試験法による張出し性で評価される。張出し高さが高く、溶接部で割れないことが望まれる⁵⁶⁾。強度の異なる鋼材や板厚に差がある鋼材では、弱い方に変形が集中するため、みかけの延性が低下することをしておく必要がある。

一方、造船、ガス・石油パイプ、橋梁用などの厚鋼板のレーザ溶接部またはレーザとアーク併用のハイブリッド溶接部では、低温の破壊靱性が良好であることが要求される。この評価法として、標準シャルピー衝撃試験またはCTOD破壊靱性試験が実施されるが、溶接ビード部が硬化し、その幅が狭い場合、溶接金属部にノッチや切欠きがあっても、そこからの破断が母材側に大きくそれる“FPD (Fracture Path Deviation)”現象が起こり、見かけの靱性値が高く出る場合がある⁵⁸⁾。FPDを避けるために、サイドグループ付きシャルピー衝撃試験片が利用される場合がある⁵⁸⁾。

5 鉄鋼材料に対するレーザ溶接・接合の適用例

5.1 レーザによるテーラードブランク溶接

レーザ溶接を利用した車体部品としてのテーラードブランク技術は、1980年代半ばより大型フロアパン用やサンルーフ

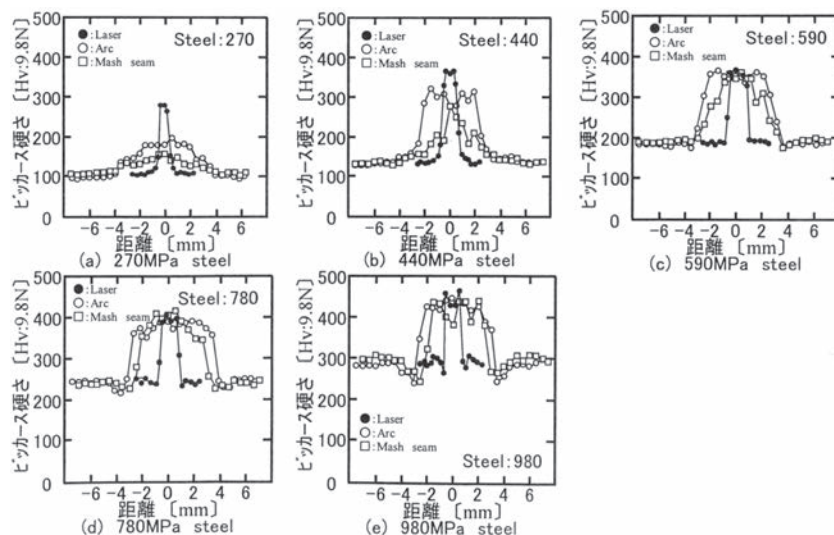


図14 各種鋼種におけるレーザ、アークおよびマッシュシーム溶接部の硬さ分布の比較

などで採用が始まり、現在世界中の自動車ボデーに適用されている^{57,59-64)}。この工法は、プレス成形前に、形状、板厚または強度の異なる素材を溶接して1枚のブランク材を作製するプロセスと、その後、ブランク材を成形するプロセスからなり、軟鋼と高張力鋼の接合や高張力鋼同士の接合などが行われ、最適配置と部品点数の削減により軽量化とコストダウンが計られている。その結果、テラードブランクの自動車への適用箇所は、図15⁵⁷⁾に示すように、多岐に渡り、拡大している。

溶接用レーザとしては、最初、CO₂レーザがCNC機と組み合わせ使用され、続いてYAGレーザ(固体レーザ)がロボットと利用され⁶³⁾、最近では、ディスクレーザ、ファイバーレーザ⁶⁰⁾および半導体レーザ(LD)⁶⁴⁾も適用されている。

ファイバーレーザ溶接では、板厚2.4と3.2mmの亜鉛めっき鋼板の突合せ溶接が加工点出力4kW、溶接速度4m/minの条件で行われている。良否判定には、可視化装置が利用され、ギャップがあいているとアンダーフィルが形成しやすく、画像データの差異からレーザ溶接結果の良否判定が可能であるとされている⁶⁰⁾。

テラードブランクのレーザ溶接技術は、管やタンクなど他の自動車部品や他の産業分野の製品の接合へと展開されている⁶⁵⁾。

5.2 自動車部品のレーザ溶接

自動車部品の接合技術としては、アーク溶接や電子ビーム溶接からレーザ溶接へ置き換えられている⁶⁶⁾。たとえば、オールタネータステータコアの場合、従来のアークや電子ビーム溶接から1kWのCO₂レーザ溶接に変更されている⁶⁶⁾。また、エアコン用電磁クラッチにおいて材質SPCCのロータ

と材質S10Cプーリの溶接は、CO₂レーザ溶接の採用により生産タクト10秒(10ライン)と短く、高生産性が達成されている⁶⁶⁾。オートマチックトランスミッション部品については、日本では電子ビームが主に利用されているが、欧州ではレーザが適用された。最近では、従来ボルト接合されていた鋳鉄と圧延部材のクラッチなどについても、軽量化と低コストの点からレーザ溶接法で作製しようとされている^{67,68)}。なお、高炭素含有の溶接部では、マルテンサイト相やセメンタイト相が生成して高硬度となり、高温割れや低温割れが発生する⁶⁶⁻⁶⁸⁾可能性があるため、その防止策として、予熱処理またはNi入りワイヤが利用される⁶⁶⁻⁶⁸⁾。

レーザ溶接法は、Liイオン電池のステンレス鋼製外枠のレーザ溶接例⁶⁹⁾のように、最近、ロボットと治具が協調して動くシステムが開発され、薄板の溶接に広く用いられつつある。また、燃料インジェクションなどの微小な部品をYAGレーザ溶接し、最終製品まで低変形なレーザ溶接法で作製する技術が開発されている⁷⁰⁾。

5.3 自動車車体や鉄道車両のレーザ溶接

従来、車体の接合は主として抵抗スポット溶接が利用されている。レーザ溶接は、抵抗スポット溶接に比べて、連続溶接、非接触溶接、一方向からのアプローチ、高速溶接、細幅の溶接ビード、低入熱・低変形溶接などのメリットがあり、さらに車体性能も向上することから、適用されている⁷¹⁻⁷⁴⁾。

ドイツ車では、レーザ溶接法が多数の車種に利用されている。たとえば、ある車種では、抵抗スポット溶接1400打点、レーザ接合(溶接+ブレイジング)70mと、スポット溶接の2/3をレーザ接合に置き換え、ねじり剛性と曲げ剛性の向上が計られている^{71,72)}。車体の溶接法としては、重ね溶接が多い⁷⁴⁾。亜鉛めっき鋼板の重ね溶接の場合、板間の隙間がないと、亜鉛蒸気が溶融池内やキーホール内に浸入し、融液を吹き飛ばすか気泡を発生させてアンダーファイルやポロシティを生成させる。このため、隙間を約0.1～0.2mm程度に調節して、良好な溶接部が作製されている。

最近の電車車両は、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS301またはSUS304)製またはアルミニウム合金製である。ステンレス鋼SUS304のレーザ重ね溶接では、レーザパワー3kWで溶接速度5～6m/minの条件で行われており、重ね接合部は十分な強度を発揮するように上板を溶融させるが、下板の裏面(車両表面)に溶融痕ができるだけ出ないように部分溶込みの深さが制御されている⁷⁵⁾。この溶接には、高品質なLD励起YAGレーザ、ディスクレーザまたはファイバーレーザが適用されている。

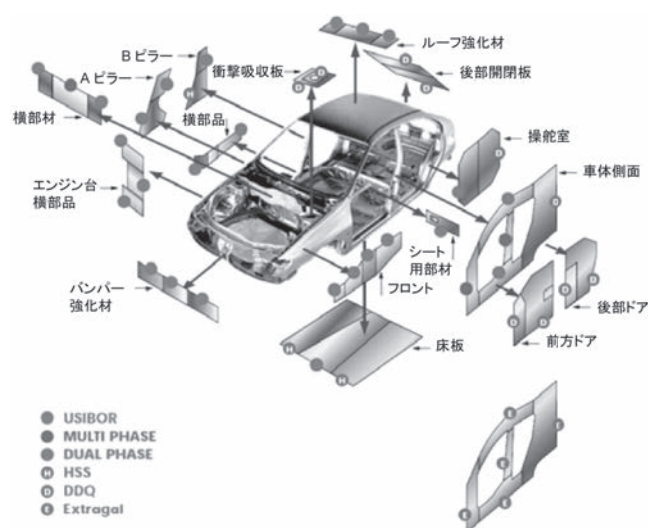


図15 自動車におけるテラードブランクの適応例

5.4 レーザブレイジング

レーザーブレイジングは、MIG ブレイジングに比べて入熱量が少なく、熱変形が小さいため、高い車体精度を確保できるメリットがある。そこで、欧米では、亜鉛めっき鋼板に対してCu-3% Siワイヤを用いてレーザーブレイジングが行われている⁷⁶⁻⁷⁸⁾。特に、レーザーブレイジングによるトランクリッドは、上下に分割したプレス成形部品を一体化するもので、欧米車で採用されている。さらに、車体のルーフに適用し、シールおよびモールを廃止することによるコストメリットと造形自由度拡大のメリットが得られている⁷⁶⁻⁷⁹⁾。ブレイジング用熱源としては、YAG レーザ、半導体レーザなどが用いられる^{77,78)}。

また、レーザーブレイジングは、アルミニウム合金と鉄鋼材料、亜鉛めっき鋼またはアルミめっき鋼との異材接合にも適用され、高強度の継手が得られている^{78,79)}。

5.5 リモート・スキャナ高速溶接

現在、高速・高生産性の接合法として最も注目されるのがリモート溶接・スキャナ溶接と呼ばれる技術である。リモート溶接には、スキャナ（ミラー）を動かすタイプと動かさないタイプがある。特に、ミラーを動かすタイプでは、ガルバノのスキャナに数キロワットの高出力・高品質のレーザービームと長焦点距離レンズを組み合わせ、レーザービームを溶接ポイントから別の溶接ポイントに瞬時に移動させることができ、機械動作（ロボット等）による移動のロスタイムを画期的に削減し、高速・高生産性の溶接が達成される⁸⁰⁻⁸⁷⁾。レーザービームの移動時間が短く、広範囲の加工領域をカバーできるため、1つの姿勢で多数点の溶接部を短時間で処理できる方法である⁸⁴⁾。リモート溶接が利用された自動車車体部品やその他の分野の製品作製の研究開発と利用が増加している。

高ビーム品質のレーザでは、より広範囲な領域をカバーできることになる。最初、高ビーム品質のDCスラブ型CO₂レーザ⁸¹⁾が利用されたが、最近では、ファイバー伝送されたLD励起の固体（YAG）レーザ⁸⁶⁾、ディスクレーザ⁸²⁾またはファイバーレーザ^{87,88)}とロボットが組み合わせて使用されている。抵抗スポット溶接をリモート溶接に変えることによって、作業時間の大幅な短縮が計られている^{86,87)}。なお、ガス吹付けのない状態でリモートレーザ溶接を行うと、図7 (a) に示したように、プルームが大きく成長し、溶融不良が発生する場合があるので注意が必要である^{37,38,88)}。

5.6 高パワーレーザの厚板溶接への適用

最近、ファイバーレーザやディスクレーザの高パワー化に合わせ、高張力鋼やステンレス鋼厚板においてレーザー溶接法やハイブリッド溶接法で深溶込みの溶接部を得るための開

発が鉄鋼や船舶・海洋、重電・重工業の分野で活発に行われている。変形の低減・防止の観点からレーザー溶接法が望まれる場合とギャップ裕度の観点からレーザー・アークハイブリッド溶接法が望まれる場合がある。高張力鋼の場合、集光光学系が異なると、湯流れやキーホール挙動および溶込み深さが変わり、アンダーフィルビードの生成傾向が異なる。また、気泡の発生の有無が変わり、ポロシティの生成傾向が異なることがあるため、高パワーレーザ溶接では、集光光学系の選択が重要である。

12mm厚以上の鉄鋼材料板の貫通溶接の場合、ワイヤを用いないと板表面にアンダーフィルが起こり、また通常の溶接ワイヤの場合も、さらに裏面にハンピングが生じて溶落ちが起こりやすく、裏面にハンピング（溶落ち）を生じない厚板の貫通溶接部を得ることは非常にむずかしい。ファイバーレーザ貫通溶接時の観察結果と裏面ハンピングの生成機構および表面張力に及ぼす温度と酸素の影響の模式図⁸⁹⁾を図16に示すが、裏面から吹き抜けるキーホール口のサイズと安定さおよび溶融池の表面張力に影響されている。たとえば、溶融池内のO（酸素）含有量が少ない場合、溶融池の底部後端の凝固部近傍の表面張力が強くなり、融液を吸収するようになり、ハンピングとなると考えられる。なお、100～150ppmの高O含有量、高パワー密度化による安定なキーホールの形成、低真空中での安定なレーザ溶接の実施などで良好な溶接部が得られている⁸⁹⁻⁹²⁾。

欧州では、客船の製造にCO₂レーザとMAGアークまたはファイバーレーザとMAGアークのハイブリッド溶接法が大型固定治具のもとに使われている⁹³⁾。一方、日本でも、ファイバーレーザとMAGアークのハイブリッド溶接法が独自の溶接機の開発により適用されている⁹⁴⁾。この場合、裏当てを用いて良好な溶接部が得られている。ハイブリッド溶接では、通常、溶着量を得るためにアーク電流の高い条件を使う。しかし、電流が高いと、アーク力が強くなって溶融池表面が凹んで広くなり⁹⁵⁾、表面ビード幅が広がってアンダーフィルやアンダーカットが形成しやすくなるので、溶接ワイヤを用い^{96,97)}、裏あてを用いるか、2パス溶接を行うかなどの対策

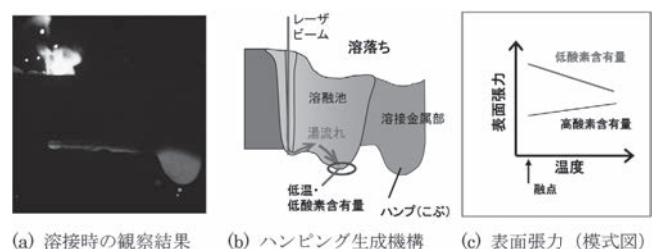


図16 ファイバーレーザ貫通溶接時のハンピングの観察結果とハンピング生成機構の模式図および表面張力の模式図

が必要である。

軟鋼やステンレス鋼の厚板では、ナローギャップに対して多層盛りのレーザ溶接が検討され、板厚50および60mmの溶接が両面または片面から可能であることが示されている^{98,99)}。なお、厚板では、割れが起こりやすいため、溶込み深さが制限され、またステンレス鋼ではδフェライト量が比較的多く残留する溶接ワイヤが用いられている。さらに最近、長焦点距離の集光系を用いて低真空中でレーザ溶接が行われ、深い溶込みを得ることができていることが示されている。たとえば、0.1kPa、26kW、0.3m/min、−40mmの条件で、70mm以上に深いSUS304の溶接部が1パスで作製できること⁹¹⁾から、電子ビームに代わる方法として注目される。

6 まとめ

ルビーレーザの発振が1960年に発表されて以来、わずか半世紀の間に、各種レーザが溶接用に開発され、発展してきている。最近の10年間は、半導体レーザ、ディスクレーザおよびファイバーレーザの高パワー化・高品質化が活発である。鉄鋼材料関連の応用としては、テーラードブランク溶接や自動車ルーフの3次元溶接、亜鉛めっき鋼板2枚重ね溶接、小型製品の溶接、中薄板パイプの溶接、リモートレーザ溶接法などが確立されてきている。また、レーザ溶接欠陥の発生機構と防止策についても明らかになっている。最近は、高張力鋼厚板の深溶込み溶接、ステンレス鋼の水中補修溶接、鉄鋼材料と他の金属や非金属とのレーザ異種接合、高輝度レーザ・MAGアークハイブリッド溶接による厚板パイプや大型構造物の溶接、レーザ溶接時のモニタリング手法の開発などの研究が精力的に行われている。本稿がレーザ溶接を理解し、溶接欠陥の防止に役立ち、レーザ溶接に興味を持つ人が生まれる一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 片山聖二：レーザ溶接，溶接学会，78 (2009) 2, 124-138.
- 2) 山田猛：溶接学会誌，63 (1994) 4, 297-302.
- 3) M.Ito, M.Takada, F.Yanagishima, Y.Kawai, F.Yokozawa, H.Nakahara and H.Sasaki：Proc. of LAMP' 87, Osaka, (1987)，535-540.
- 4) 林智隆，松廣克之，稲葉洋次，櫛田隆弘，大村朋彦，工藤赳夫：第44回レーザ熱加工研究会論文集，44 (1998)，137-144.
- 5) 南田勝宏，城戸基，杉橋敦史，山本博之，浜田直也：レーザ加工学会誌，12 (2005) 3, 154-158.
- 6) M.Litmeyer and H.Lembeck：第70回レーザ加工学会講演論文集，70 (2008)，139-143.
- 7) 塚本進：レーザ加工学会誌，8 (2001) 1, 37-41.
- 8) 江端恵司：レーザ加工学会誌，15 (2008) 4, 240-245.
- 9) 鷲尾邦彦：溶接学会論文集，19 (2001) 1, 176-181.
- 10) 門屋輝慶：レーザ熱加工研究会誌，7 (2000) 1, 10-15.
- 11) S.Tsubota, T.Ishide, M.Nayama, Y.Shimokusu and S.Fukumoto：Proc. ICALEO 2000, LIA, 89-Section C, (2000)，219-229.
- 12) 森清和：第69回レーザ加工学会講演論文集，(2007)，127-131.
- 13) M.S.Zediker：Proc. of the 7th Int. Symp. (7WS)，JWS, Kobe, 1 (2001)，473-478.
- 14) 阿部信行：溶接学会誌，72 (2003) 8, 606-609.
- 15) R.Poprawe, D.Petring and C.Benter：Proc. 7th Int. Aachen Welding Conference (IASTK' 01)，(2001)，117-132.
- 16) 池田剛志，徐国建，坪井昭彦，片山聖二：第70回レーザ加工学会講演論文集，(2008)，37-41.
- 17) 中村秀生，寺田真樹，平田雅巳，酒井朋博：第59回レーザ加工学会論文集，59 (2003)，1-7.
- 18) 才田一幸，西本和俊：溶接技術，51 (2003) 6, 92-98.
- 19) F.Bachmann：第61回レーザ加工学会論文集，61 (2004)，16-29.
- 20) 林祐治，C.Ullmann：第61回レーザ加工学会論文集，61 (2004)，47-55.
- 21) Laserline社ホームページ：
<http://www.laserline-inc.com/index.php>
- 22) H.Hugel：Proc. of SPIE (First Int. Sym. on High Power Laser Macroprocessing)，4831 (2002)，83-89.
- 23) 辻正和：高温学会誌，35 (2009)，171-175.
- 24) C.Emmelman and S.Lunding：Proc. ICALEO 2002, Laser Materials Processing Conf., Section D, (2002)，1-10, CD-ROM.
- 25) C.Thomy, T.Seefeld and F.Vollertsen：Application of high-power fiber lasers for joining of steel and aluminium alloys, Proc. of 3rd Int. WLT-Conf. of Laser in Manufacturing 2005, eds. by E. Beyer, F. Dausinger, A. Ostendorf and A. Otto, Munich, 2005, (2005)，27-3.
- 26) 片山聖二，川人洋介：OPTRONICS No.4, (2007)，187-195.
- 27) 齋藤茂樹：第71回レーザ加工学会講演論文集，71 (2008)，21-30.
- 28) 新井武二，杵名宗春，宮本勇：レーザー加工の基礎 (下巻)，マシニスト出版，(1993)
- 29) D.Reitemeyer, T.Seefeld and F.Vollertsen：ICALEO 2010, LIA, (2011)，13-20, CD.
- 30) X.Zhang, E.Ashida, S.Katayama and M.Mizutani：溶接学会論文集，27 (2009) 2, 64s-68s.
- 31) 片山聖二，C.D.Lundin：軽金属溶接，29 (1991) 8, 349-360.
- 32) 片山聖二，小島敬士，松縄朗：軽金属溶接，36 (1998) 1, 3-21.
- 33) 宮崎俊行，宮沢肇，村川正夫，吉岡俊朗：レーザ加工技術，産業図書 (1991)
- 34) 工藤恵栄：光物性基礎，オーム社，(1996)
- 35) D.R.Roessler：The Industrial Annual Handbook, 1986 Edition, Penn Well Book, (1986)，16-30.
- 36) E.Beyer, K.Behler and G.Herziger：Proc. 5th Int. Conf. Lasers in Manufacturing (LIM-5)，ed. by H. Hugel, Stuttgart, (1988)，233-240.
- 37) S.Katayama, S.Oiwa, H.Ishida, N.Ozawa, M.Mizutani and Y.Kawahito：61st Annual Assembly of Int. Inst. Welding (IIW)，(2008)，IIW Doc. IV-962-08.
- 38) S.Oiwa, Y.Kawahito and S.Katayama：Proc. of 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2009)，LIA, (2009)，359-365.
- 39) 川人洋介，木下圭介，松本直幸，水谷正海，片山聖二：溶接学会論文集，25 (2007) 3, 455-460.

- 40) 川人洋介, 木下圭介, 松本直幸, 水谷正海, 片山聖二: 溶接学会論文集, 25 (2007) 3, 461-467.
- 41) S.Katayama and Y.Kawahito: Proc. SPIE, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 7195 (2009), 71951R-1-71951R-9.
- 42) 宮本勇: 第26回レーザー熱加工研究論文集, 26 (1991), 1-17.
- 43) 松縄朗: 第27回レーザー熱加工研究会論文集, (1992), 59-72.
- 44) Y.Kawahito, M.Mizutani and S.Katayama: Science and Technology of Welding and Joining, 14-4 (2009), 288-294.
- 45) 木下圭介, 水谷正海, 川人洋介, 片山聖二: 溶接学会論文集, 25-1 (2007), 18-23.
- 46) S.Lu, H.Fujii, H.Sugiyama, M.Tanaka and K.Nogi: ISIS International, 43 (2003) 10, 1590-1595.
- 47) 内藤恭章, 水谷正海, 片山聖二: 溶接学会論文集, 24 (2006) 2, 140-161.
- 48) 片山聖二: 平成17年度溶接工学夏季大学教材, (2005), 85-111.
- 49) S.Katayama, N.Seto, J.D.Kim and A.Matsunawa: Proc. ICALEO'97, LIA, 83-Section G (1997), 83-92.
- 50) S.Katayama, N.Seto, J.D.Kim and A.Matsunawa: Proc. of ICALEO'98, L.I.A., Orlando, USA, Section C (1998), 24-33.
- 51) S.Katayama and A.Matsunawa: Proc. CISFFEL 6, Toulon, (1998), 215-222.
- 52) S.Katayama, Y.Kobayashi, N.Seto, M.Mizutani and A.Matsunawa: Proc. ICALEO 2000, LIA, 89-Section C (2000), 182-191.
- 53) S.Tsukamoto, G.Arakane, I.Kawaguchi and H.Honda: Proc. of ICALEO 2004, LIA, (2004) 1007, CD-ROM.
- 54) 片山聖二, 吉田大輔, 松縄朗: 高温学会誌, 30-2 (2004), 93-99.
- 55) S.Katayama, S.Kohsaka, M.Mizutani, K.Nishizawa, and A.Matsunawa: Proc. ICALEO'93, LIA, 77 (1993), 487-497.
- 56) 泰山正則, 内原正人, 福井清之: 第64回レーザー加工学会論文集, (2005), 52-59.
- 57) A Pic, D.D.Munera, R.Vierstraete and F.Pinard: 第67回レーザー加工講演論文集, (2006), 49-62.
- 58) 南二三吉: 平成20年度溶接工学夏季大学教材, (2008), 39-94.
- 59) 高砂俊之: レーザ熱加工研究会誌, 6 (1999) 2, 155-158.
- 60) 大脇桂, 西見昭浩, 畠山健一: LMPシンポジウム2007「輸送機器のレーザー加工」, (社)日本溶接協会LMP(レーザー加工技術)研究委員会, (2007), 13-18.
- 61) 三瓶和久: レーザ加工学会誌, 11 (2004) 2, 67-70.
- 62) 内原正人, 泰山正則, 富士本博紀, 西畑ひとみ, 福井清之: 第66回レーザー加工講演論文集, (2006), 75-81.
- 63) 鳥井信正, 芦田洋三, Boillot J.P., Noruk J.: レーザ加工学会誌, 13 (2006) 4, 240-244.
- 64) 原田裕文: 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 175-177.
- 65) M.Halschka (石原): 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 87-95.
- 66) 漆崎守, 平田雅巳: 第55回レーザー加工学会論文集, (2002), 12-18.
- 67) Fraunhofer IWS Annual Report, <http://www.iws.fhg.de/>
- 68) P.Vondrous, S.Katayama and J.Dunovsky: 第74回レーザー加工学会講演論文集, (2010), 89-98.
- 69) M.Brandner: EALA-European Automotive Laser Applications 2011, (2011), 311-320.
- 70) 白井秀彰, 沢本節夫, 佐藤隆文: 第55回レーザー加工学会論文集, (2002), 19-23.
- 71) 樽井大志: レーザ加工学会誌, 11 (2004) 2, 98-102.
- 72) K.Loeffler: 第64回レーザー加工学会論文集, (2005), 1-16.
- 73) M.Baur and H.Horning: 第64回レーザー加工学会論文集, (2005), 17-31.
- 74) 樽井大志, 森清和, 長谷川隆久: 第64回レーザー加工学会論文集, (2005), 46-51.
- 75) 古賀信次, 村田隆行, 大久保克巳, 平嶋利行, 丸谷武央: LMPシンポジウム2007「輸送機器のレーザー加工」, (社)日本溶接協会LMP(レーザー加工技術)研究委員会, (2007), 57-64.
- 76) P.Hoffmann, R.Dierkenら: 第64回レーザー加工講演論文集, (2005), 33-41.
- 77) 武田晋: レーザ加工学会誌, 9 (2002) 1, 13-17.
- 78) 才田一幸, 西本和俊: 第69回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 137-141.
- 79) 松本剛, 笹部誠二: 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 171-174.
- 80) 三瓶: レーザ加工学会誌, 16 (2009) 1, 8-15.
- 81) 高橋礼司: レーザ加工学会誌, 11 (2004) 2, 82-85.
- 82) 門屋輝慶: レーザ加工学会誌, 11 (2004) 2, 86-90.
- 83) M.-H.Rhee, J.-D.Kim and I.-S.Chang: 第68回レーザー加工講演論文集, (2007), 141-146.
- 84) 空田和彦: 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 147-150.
- 85) V.Naumovski: 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 151-155.
- 86) 樽井大志, 森清和, 吉川暢広, 長谷川隆久: 第68回レーザー加工学会講演論文集, (2007), 157-163.
- 87) N.Yoshikawa, K.Mori and T.Sakamoto: Development of New Remote Welding System for All Closure Assembly at Nissan, EALA-European Automotive Laser Applications 2011, (2011), 321-334.
- 88) 片山聖二, 大岩晋平, 水谷正海, 川人洋介, 石田英伸, 小沢直樹: 第71回レーザー加工学会講演論文集, (2008), 109-118.
- 89) 大西輝政, 川人洋介, 水谷正海, 片山聖二: 溶接学会論文集, 29, (2011) 1, 41-47.
- 90) Y.Abe, M.Mizutani, Y.Kawahito and S.Katayama: Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO 2010, (2010), 648-653.
- 91) S.Katayama, Y.Abe, M.Mizutani, and Y.Kawahito: Physics Procedia, 12, Part 1 (2011), 75-80.
- 92) S.Katayama, Y.Abe, M.Mizutani, and Y.Kawahito: IIW Commission IV, (2011), IIW Doc. IV-1055-11/XII-2046-11/212-1204-11, 1-9.
- 93) M.Litmeyer and H.Lembeck: 第70回レーザー加工学会講演論文集, (2008), 139-143.
- 94) 古賀宏志: LMPシンポジウム2010「レーザーおよびレーザー加工の基礎と応用」, 日本溶接協会レーザー加工技術研究委員会, 大阪, (2010), 81-87.
- 95) S.Katayama: Woodhead Publishing Limited, (2009), 28-46, 299-311.
- 96) 王静波, 西村仁志, 片山聖二: 溶接技術, 57-5 (2009), 90-94.
- 97) 王静波, 西村仁志, 片山聖二, 水谷正海: 溶接学会全国大会講演概要, 東京, 第84集 (2009-4), 206-207.
- 98) 多羅沢湘, 曾我幸弘: 第74回レーザー加工学会講演論文集, レーザ加工学会, 75 (2010), 137-143.
- 99) X.Zhang, E.Ashida, S.Tarasawa, Y.Anma, M.Okada, S.Katayama and M.Mizutani: Journal of Laser Applications, 23-2 (2011), 022007-1-7.

(2011年10月17日受付)