

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760492  
 研究課題名 (和文) 溶接基礎現象解明に基づく超高パワー密度ファイバレーザ溶接プロセスの知能化  
 研究課題名 (英文) Smart Processes Produced by Clarification of Fundamental Phenomena in Ultra-High-Power-Density Fiber Laser Welding  
 研究代表者  
 川人 洋介 (KAWAHITO YOUSUKE)  
 大阪大学・接合科学研究所・准教授  
 研究者番号：70379105

研究成果の概要 (和文)：電子ビームの MW/mm<sup>2</sup> に匹敵する超高パワー密度ファイバレーザ溶接時における基礎現象の解明および溶接プロセスの知能化を実施した。基礎現象の解明では、キーホール の X 線透視観察結果と関連付けて、ステンレス鋼では最大 89 % と高いレーザ吸収が実現されることを明らかにした。一方、知能化では、連続発振ファイバレーザ溶接に適用し、蓄熱を考慮することで、従来の適応制御法では難しかった、加減速時の所定の溶接部形成に成功した。

研究成果の概要 (英文)：The objectives of this research are clarification of fundamental phenomena and development of smart process in ultra-high-power-density fiber laser welding. As for the fundamental clarification, the laser absorption of SUS304 stainless steel achieved 80 % and the absorption mechanism was revealed on the basis of X-ray high-speed pictures of the keyhole. With respect to smart process, laser adaptive control applied for continuous-wave fiber laser welding. Consideration of thermal storage effects led to success of stable sound welds at acceleration or deceleration in welding speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工処理

キーワード：接合・溶接

#### 1. 研究開始当初の背景

レーザ溶接は、日本の基幹産業におけるものづくりの基盤技術である。その研究は、大出力化・高パワー密度化とともに進歩発展してきた。我々は、近年開発された超高パワー密

度ファイバレーザ溶接を実施し、世界に先駆けて、溶接部表面が凹形状となる溶接欠陥アンダーフィルを抑制する特長的な熔融池形状や、レーザ誘起プラズマの溶込みへの影響などを明らかにし、レーザ溶接の基礎研究分

野で、重要な役割を果たしてきた。また、ファイバレーザ溶接の研究は、海外で著名なレーザ溶接の研究機関である米国のエジソン溶接研究所 (EWI) や、独国のフラウンホーファー研究所などにおいても開始され、世界的に注目され、研究すべき分野である。

## 2. 研究の目的

電子ビームの MW/mm<sup>2</sup> に匹敵する高出力・高輝度レーザを用いて、高品質な深溶込みを安定的に得られる画期的なレーザ溶接法を創出するため、超高パワー密度レーザ溶接時における基礎現象の解明および溶接プロセスの知能化を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 基礎現象解明：超高パワー密度ファイバレーザ溶接におけるステンレス鋼のレーザ吸収を、カロリメトリー法を用い、広範囲な溶接条件で計測した。さらに、高速度ビデオカメラおよびX線透視リアルタイム観察装置を使用して溶融池表面のキーホール口径および溶融池内部のキーホール形状を観察し、これらと入射ファイバレーザ光との関係およびレーザ吸収に及ぼすキーホール特性（口径と形状）の影響を検討した。

(2) 溶接プロセスの知能化：連続溶接では、レーザ照射位置が常に移動するので、溶接欠陥に対して予防的なレーザ制御が必要である。そこで、シングルモード・ファイバレーザを純チタン薄板の重ね溶接における、溶接速度の加速・減速時のプロセス変化を適用例とし、連続レーザ溶接時のレーザ適応制御に、どのような物理的な要因を加味しなければならないかを検討した。具体的には、図1に示す実験装置を用いて、ファイバレーザ光を、モニタリング機能つき加工ヘッドによって、スポット径 50 μm まで集光し、重ねた厚み 100 μm の純チタン薄板に照射した。その際、熱放射光および反射光をレーザ入射光と同軸方向で計測し、得られたモニタリング強度に基づき、所定の溶接結果が得られるようにレーザ出力を 4 ms 毎にリアルタイム制御を行った。

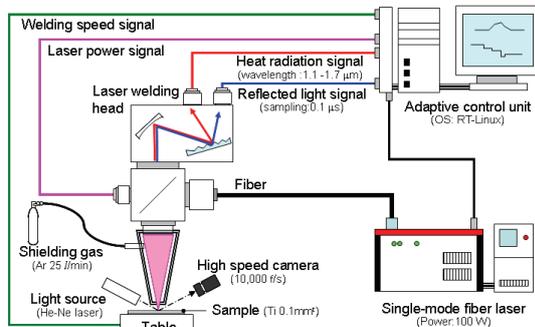


図 1: レーザ適応制御の実験構成

## 4. 研究成果

### (1) 基礎現象解明 1: 超高パワー密度ファイバレーザ溶接時のレーザ吸収特性

SUS304 鋼板を吸収測定用ジグに固定し、ファイバレーザビームの焦点位置（ピークパワー：330 kW/mm<sup>2</sup>）を試料表面に設定し、溶接速度 50 mm/s で、レーザ出力を 2 kW から 10 kW に増加させ、ビード・オン・プレート溶接を実施した。温度計測結果の一例として、レーザ出力 10 kW、溶接速度 50 mm/s において得られた温度上昇データを図 2 に示す。レーザ照射時間は 2 秒程度であり、50 秒後に最大 1.4 度程度温度上昇し、300 秒程度で室温にまで下がっている。なお、実験時の温度計測時間は、600 秒である。

カロリメトリー法におけるレーザ吸収率の算出は、レーザ照射開始時から 300 秒間の温度上昇の積分値（図 2 では斜線部の領域）に、温度計測時の水温における定圧比熱をかけた値を、レーザの入射エネルギー 20 kJ で割ることで求めた。図 2 の温度上昇では、レーザ吸収が 80 % と算出される。

各レーザ出力において、カロリメトリー法で算出されるレーザ吸収率を同条件で 3 回計測した平均値、ならびに得られた溶接ビード部の断面形状、ビード幅および溶込み深さの結果を図 3 に示す。断面形状は、ビード幅が狭

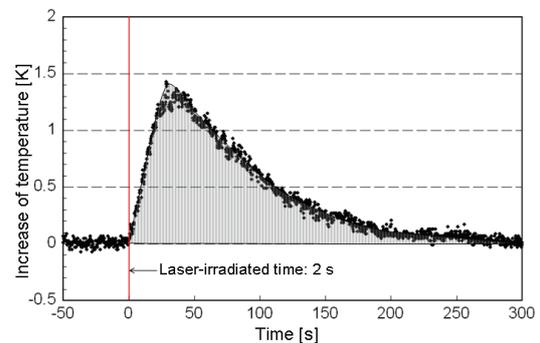


図 2: 超高パワー密度ファイバレーザ溶接時に上昇した温度（出力：10 kW、溶接速度：50 mm/s）

Laser power	2 kW	4 kW	6 kW	8 kW	10 kW
Cross section					
Bead width	1.3 mm	1.4 mm	1.3 mm	1.9 mm	1.9 mm
Penetration	3.4 mm	6.2 mm	8.6 mm	10.4 mm	11.5 mm
Absorption	63 %	74 %	81 %	83 %	84 %

図 3: 超高パワー密度ファイバレーザ溶接における溶込みとレーザ吸収

く深くくさび状の溶込みが形成され、従来レーザー溶接時のワインカップ状とは異なっていることがわかる。ビード幅も 2 mm 以下で細く、溶込みは、レーザー出力 2 kW から 10 kW の増加とともに深くなり、10 kW で 11.5 mm に達した。また、レーザー吸収率は、2 kW の 63% から、レーザー出力の増加とともに増加し、10 kW で 84% の高い値を示した。

以上の結果より、レーザー吸収率は、高出力化により大幅に増加することが判明した。

(2) 基礎現象解明 2 : X 線透視観察および高速度観察によるレーザー吸収に及ぼす出力の影響に関する検討

本実験条件下では、出力の増加に伴い、レーザー吸収率は増加した。そこで、各レーザー出力において、X 線透視撮影装置による熔融池内部のキーホール観察および高速度カメラによるキーホール口の詳細な観察を実施した。X 線透視観察結果、および入射ファイバーレーザービームの集光軌跡とキーホールとの位置関係を示す模式図を図 4 に示す。なお、キーホール深さは、撮影中に明確に観測できたキーホールを 10 回測定し、その平均値を採用している。レーザー出力が 2 kW から 10 kW へと増加すると、キーホール深さも 3.2 mm から 10.2 mm まで増加した。また、各レーザー出力での模式図から、入射レーザー光のパワー密度が高い中心部分が、キーホールの底にまで届いている位置関係にあることが確認された。

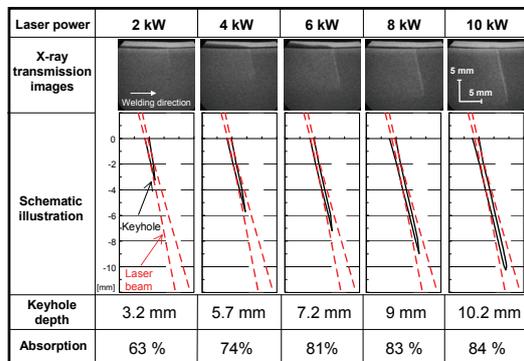


図 4: 超高パワー密度ファイバーレーザー溶接におけるキーホールの X 線透視観察結果

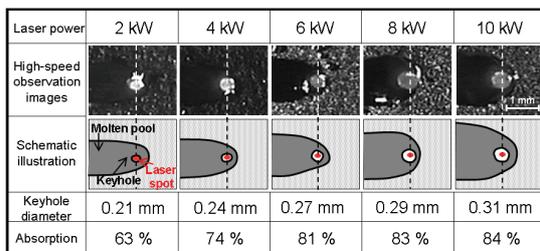


図 5: 超高パワー密度ファイバーレーザー溶接におけるキーホール口の高速度観察結果

さらに、キーホール口とレーザー光との位置関係を含め、キーホール口の詳細な調査を、高速度カメラを用いて実施した。その観察結果を図 5 に示す。なお、キーホール口径は、撮影中に明確に観測できたキーホールを溶接方向に 20 回測定し、その平均値を採用した。レーザー出力の増加に伴い、キーホール口径は大きくなっており、最大 0.31 mm にまで拡大していた。これに対し、レーザー吸収は、レーザー出力 6 kW 以下のキーホール口径 0.27 mm 未満では、2 kW 増える毎に吸収が 7 % 以上も改善されていたが、6 kW よりも高い出力では、吸収は 2 % 以下しか増加しないことがわかった。キーホール口径 0.27 mm は、焦点位置でのビーム形状と比較すると、数 kW/mm<sup>2</sup> レベル強度まで含めることになる。そのパワー密度は、これまで報告されているキーホール型溶接と熱伝導型溶接との境界にあるパワー密度の値と同程度である。また、スポット径が入射エネルギーの 86 % のレーザー光が含まれる一般的なスポット径で議論してきたが、実際のレーザー光の広がり、0.3 mm 程度まで計測される。よって、レーザー出力 8 kW および 10 kW で高い吸収が得られたのは、入射レーザー光のほとんどがキーホール口内に投入され、キーホール内部の壁面と底部で吸収されたためと考えられる。

(3) 基礎現象解明 3 : レーザー吸収に及ぼす溶接速度の影響と溶接現象の観察

近年、YAG レーザー溶接において 100 mm/s 以上の溶接速度では、レーザー吸収率が増加するという研究結果が示された。そこで、SUS304 鋼板を吸収測定用ジグに固定し、レーザー出力 10 kW で、溶接速度を 17 mm/s から 250 mm/s に広範囲に増加させて、ビード・オン・プレート溶接を行い、レーザー吸収測定を実施した。なお、溶接速度 100 mm/s 以上では、本ジグの計測可能な最大ビード長 200 mm に達するので、レーザーの入射エネルギーを半分の 10 kJ とし、レーザー吸収を算出した。各溶接速度におけるレーザー吸収率、ならびに得られた溶接ビード部の断面形状、ビード幅および溶込み深さを図 6 に示す。断面形状は、250 mm/s の高速度溶接でも、高輝度レーザー特有のビード幅が狭いくさび状の溶込みが形成された。

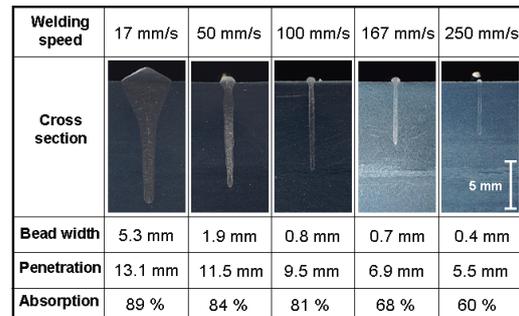


図 6: レーザー吸収に及ぼす溶接速度影響

ビード幅は、低速度 17 mm/s では 5.3 mm と太く、250 mm/s の高速度では、スポット径の 2 倍程度の 0.4 mm にまで狭くなった。溶込み深さは、低速度 17 mm/s で 13.1 mm に達し、250 mm/s でも 5.5 mm と深いことが確認された。また、レーザ吸収率は、17 mm/s で本溶接条件下での最大 89 % となり、溶接速度の増加とともに減少し、250 mm/s では 60 % にまで低下することがわかった。

次に、溶接速度を 17 mm/s から 250 mm/s まで変化させた場合の X 線透視観察結果を図 7 に示す。溶接速度の増加に伴い、キーホール深さの減少が観察された。溶接速度 50 mm/s 以下では、入射レーザ光のパワー密度が高いところが、キーホールの底まで届いていることがわかった。なお、キーホール内部のプラズマが入射レーザに与える影響は、波長が 1 μm 帯で、炭酸ガスの 10 μm 帯に比べ影響が大幅に少ないことが知られており、また、弱電離プラズマ状態にあるブルームは、ブルーム高さが低い場合、溶込み深さの減少に大きな影響は及ぼさないことが報告されているので、重大な影響はないと考えられる。一方、100 mm/s 以上の溶接速度では、速度増加に伴い、入射レーザ光がキーホールの前壁に当たる傾向が見られ、特に溶接速度 250 mm/s では、大部分のレーザ光がキーホール前壁に照射される位置関係となっていることが推察された。

さらに、入射レーザ光とキーホール口との相関を詳細に調査するため、高速度ビデオカメラを用いて溶融池表面を観察した。観察結果

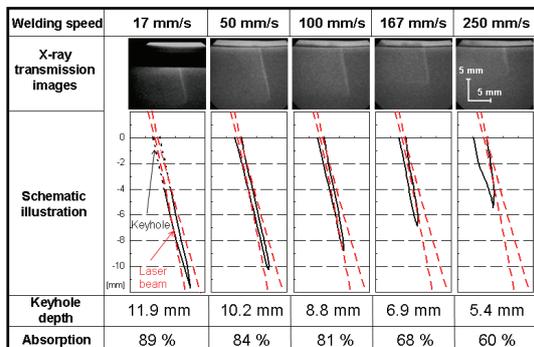


図 7: 各溶接速度でのキーホール挙動の X 線透視観察結果

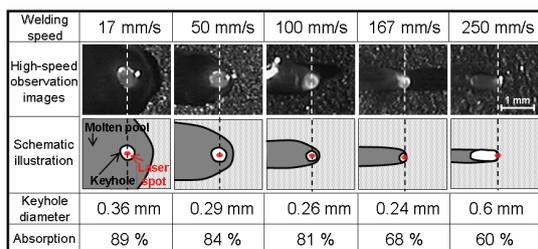


図 8: 各溶接速度でのキーホール口の高速度観察結果

を図 8 に示す。キーホール口は、溶接速度 17 mm/s では 0.36 mm と広く、167 mm/s までは速度増加とともに 0.24 mm まで減少するが、溶接速度 250 mm/s では、再び 0.6 mm まで拡大していた。高速度になると、レーザ照射位置とキーホール口の位置がずれ、167 mm/s 以上の高速度では、キーホール位置がレーザ照射位置より後方側にずれ、レーザスポットの一部がキーホール口から外れていることが観察された。したがって、低速度の場合、キーホール口が低速度ほど大きいのは、高出力のレーザがキーホール内に照射され、照射時間が長く、より多量の蒸発が起こり、ブルームがキーホール口から上方に噴出した結果であると考えられる。一方、250 mm/s の高速度の場合では、大部分のレーザ光がキーホール前壁に照射され、前壁からブルームが激しく後方に発生し、キーホール後壁面を溶融池後方に押し広げたため、キーホール口も拡大し、キーホール形状も他の条件のキーホールと異なると考えられる。

そこで、撮影中に明確に観測できたキーホール口に対し、溶接方向とそれに垂直な方向のサイズを測定し、20 回平均をとり、それらを基に楕円近似によって平均的なキーホール口を求め、それにレーザ集光スポットを重ね、重なる比率を算出した。得られた重なる比率とレーザ吸収率との関係を図 9 に示す。なお、重なり比率 100 % は、レーザスポットがキーホール口の内に存在していることを意味する。溶接速度が増加すると、重なり比率は溶接速度 167 mm/s で 100 % を下回り 88 % となり、250 mm/s では 65 % にまで低下する。つまり、近年、報告されている結果と異なり新しい知見が得られており、溶接速度が増加すると、キーホール口がレーザ照射位置より後方側になり、その結果、レーザ光の一部がキーホール口からはずれ、キーホール口前方の溶融池および金属表面で強く反射され、レーザ吸収率が低下したと考えられる。

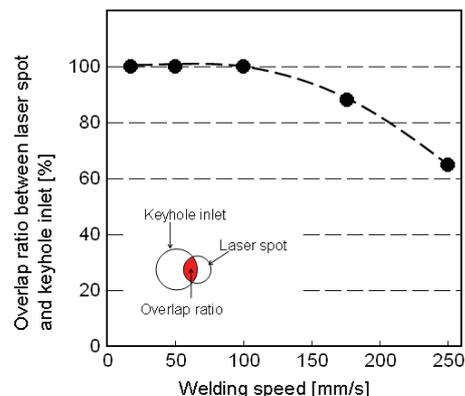


図 9: 各溶接速度でのキーホール口とレーザスポットとの重なり関係の結果

(4) 基礎現象解明 4 : 超高パワー密度ファイバレーザ溶接時のエネルギー損失

本研究でのレーザ吸収は熱量を基に算出しているため、溶接中のエネルギー損失としては、図 10 に示すように、レーザ光の反射、溶融池からの熱放射（輻射）、レーザ誘起プラズマとの相互作用、試料の蒸発に伴う損失（蒸発潜熱）、スパッタによる損失などが考えられる。これまで、炭酸ガスレーザ溶接時のエネルギー損失について、一番大きな損失は、反射による損失で約 10 % ~ 12 %、プラズマや溶融池からの輻射損失は約 3 % ~ 4 %で、蒸発潜熱は 2 %以下との報告がされている。本溶接条件下の蒸発潜熱によるエネルギー損失を調査するため、長さ 120 mm、幅 25 mm、深さ 20 mm の寸法で、SUS304 鋼板に対して、レーザ出力 10 kW で、溶接速度 17 mm/s、50 mm/s および 250 mm/s で、ビード・オン・プレート溶接を行い、長さ約 90 mm の溶接ビードを形成して、溶接前後の質量を分銅内蔵型電子天秤にて計測した。その計測結果を表 1 に示す。なお、蒸発熱に関しては、各元素の蒸発熱の値を基に、ステンレス鋼の組成比から求めた蒸発熱 6.26 kJ/g を使用した。

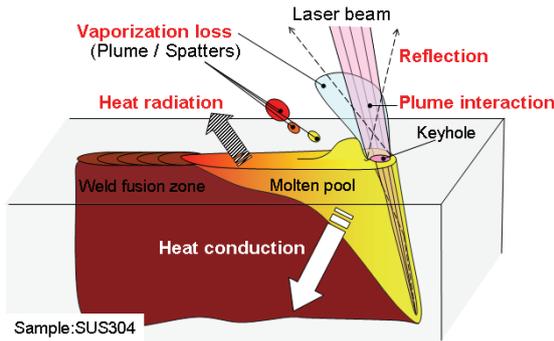


図 10: 溶接時のエネルギー損失の概略図

表 1: 超高パワー密度ファイバレーザ溶接時の蒸発によるエネルギー損失

Welding speed	Input energy	Evaporation	Evaporative latent heat	Ratio of latent heat for Input energy
17 mm/s	6.03 kJ	46 mg	288 J	0.5 %
50 mm/s	1.83 kJ	17 mg	106 J	0.6 %
250 mm/s	0.33 kJ	14 mg	88 J	2.7 %

表 2: 超高パワー密度ファイバレーザ溶接時のレーザ吸収

	Fiber laser	CO <sub>2</sub> laser
Heat conduction (Absorption)	84 ~ 89 %	80 ~ 85 %
Vaporization loss	0.5 ~ 0.6 %	~ 2 %
Reflection	10.5 ~ 15 %	10 ~ 12 %
Heat radiation	(Including plume interaction)	3 ~ 4 %

蒸発量は、低溶接速度 17 mm/s で 46 mg で、蒸発潜熱は 288 J となり、ファイバレーザの入射エネルギー 6.03 kJ に対しては、0.5 % の低い値が得られた。溶接速度 50 mm/s でも、入射エネルギーに対して蒸発潜熱 0.6 % と低かった。しかしながら、250 mm/s の高速域では 2.7 % の蒸発潜熱となり、エネルギー損失としては 4 倍以上に増加した。

また、本溶接条件下のレーザ出力 10 kW で溶接速度 50 mm/s 以下のレーザ吸収について、炭酸ガスレーザの報告結果と追記して表 2 に示す。高出力・高パワー密度ファイバレーザ溶接は、従来の炭酸ガスレーザ溶接と比較して、蒸発潜熱が 0.6 % 以下と小さく、ファイバレーザによる入射エネルギーの 84 % 以上をエネルギー変換される高効率の溶接プロセスになっていることが判明した。これは、ほとんどの入射レーザ光がキーホール口内に投入され、ピークパワーの高い中心部が、キーホールの底に直接達する配置を取っているためと考えられる。

(5) 溶接プロセスの知能化 :

シングルモード・ファイバレーザを用いて、純チタン薄板の重ね溶接を行い、溶接速度がレーザ照射中に 50 mm/s から 10 mm/s に減速する場合において、裏面ビード幅を一定にするため、減速と同時にレーザ出力を 75 W から 45 W に変化させた。その結果を図 11 に示す。表面ビード幅は溶接速度の減速に伴って拡大したが、裏面ビード幅は減速領域で部分溶込みとなっていた。また、表面ビード幅と裏面ビード幅の比から溶込み形状が劇的に変化することがわかった。次に、計測された熱放射光

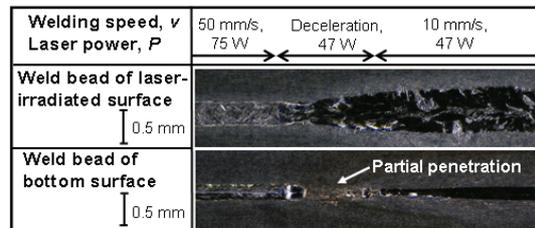


図 11: シングルモードファイバレーザ溶接における減速時のビード形状

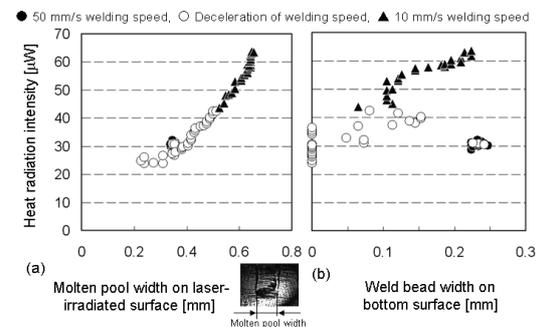


図 12: 溶融池のサイズとビード幅（レーザ入射表面および裏面）との関係

強度と溶融池幅および裏面ビード幅との関係を図 12 に示す。溶融池幅と熱放射光の間には明瞭な比例関係があることが確認される。一方、裏面ビード幅と熱放射光との間に明確な関係は見出せなかった。反射光に関しては、レーザー照射中に明瞭な変化は観測されなかった。そこで、溶接速度が変化する間も一定の裏面ビード幅が得られるように、種々の溶接速度で裏面ビード幅がおよそ 0.24 mm になる条件を見つけ、そのときのレーザー出力と熱放射光の関係（表 3 参照）に基づく制御を行った。図 13 に適応制御のフローチャートを示す。

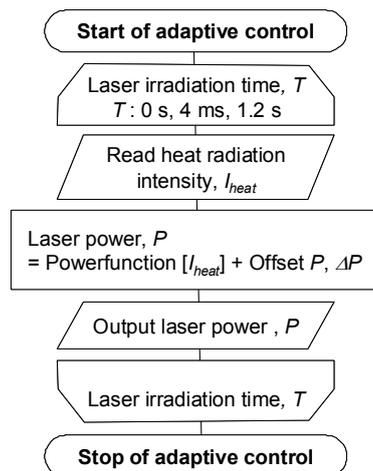


図 13: レーザ適応制御フローチャート

表 3: 減速時のレーザー適応制御における熱放射光強度とレーザー出力の関係

Intensity of heat radiation, $I_{heat}$ [ $\mu W$ ]	Powerfunction [W]
$I_{heat} \leq 34.5$	75
$34.5 < I_{heat} \leq 42.3$	65
$42.3 < I_{heat} \leq 50.0$	60
$50.0 < I_{heat} \leq 54.2$	57
$54.2 < I_{heat} \leq 56.6$	56
$56.6 < I_{heat} \leq 60.5$	53
$60.5 < I_{heat}$	47

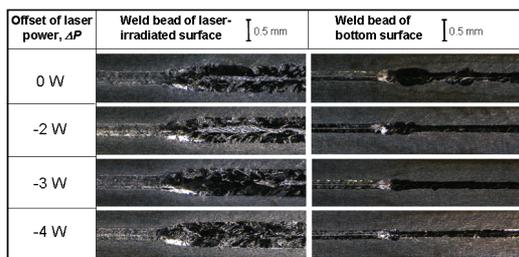


図 14: 蓄熱を考慮したレーザー適応制御法による溶接ビードの外観

本適応制御法は計測された熱放射光強度から表 3 の関係によって出力するレーザー出力を決定するものである。本適応制御を用いた溶接の結果が図 14 の最上段の写真である。減速領域において裏面ビードが膨らんでいることがわかる。これはチタンの熱伝導率が低いため減速時に適切な熱の散逸が行われず、それに伴って蓄熱量が増加し、結果として裏面ビードが拡大したと考えられる。この蓄熱の効果をレーザー出力のオフセット量として考慮し、制御を行った場合の溶接結果が図 14 の 2 段目から 4 段目の写真である。オフセット量を -3 W とした結果、裏面ビード幅を減速領域でもほぼ一定に保つことができおり、蓄熱を考慮することで適応制御結果を改善できることが判明した。さらに、16 kW 高輝度ディスクレーザを使用し、ステンレス鋼にビード・オン・プレート溶接を行い、これまでの研究成果と同様に熱放射光が溶融池サイズのリアルタイム指標であり、適応制御の有効な入力信号となることも確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 川人洋介, 水谷正海, 片山聖二, 10 kW 高出力ファイバーレーザー溶接におけるステンレス鋼のレーザー吸収特性, 溶接学会論文集, 査読有, 27-3, 2009, pp.183-188
- ② 川人洋介, 大西輝政, 片山聖二, In-Process Monitoring and Feedback Control for Stable Production of Full-Penetration Weld in Continuous Wave Fiber Laser Welding, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 42-8, 2009, 085501

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 川人洋介, ファイバーレーザーに対するアルミニウム合金とステンレス鋼の吸収特性, 溶接学会平成 20 年度秋季全国大会, 北九州国際会議場, 2008 年 9 月 11 日
- ② 川人洋介, 高輝度・高効率レーザーによるステンレス鋼の溶接特性, 溶接学会平成 21 年度秋季全国大会, 徳島大学, 2009 年 9 月 10 日

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

川人 洋介 (KAWAHITO YOUSUKE)  
大阪大学・接合科学研究所・准教授  
研究者番号: 70379105