

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05725

研究課題名(和文) 溶接困難材料に対する高効率・高信頼精密微細レーザー溶接法の開発

研究課題名(英文) Development of High-quality and High-reliable Laser Micro-welding of Difficult-to-weld Materials

研究代表者

岡本 康寛 (Okamoto, Yasuhiro)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40304331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：連続発振半導体レーザーを重畳することでパルスNd:YAGレーザーの基本波においても照射部温度を高温に維持することでアルミニウム合金の高効率微細溶接が実現できる。また、波長変換により得られるパルスグリーンレーザーは高反射率の銅であっても適切な溶接形態で高いエネルギー吸収量を示す。さらにパルス幅を長くすることでエネルギー吸収量を増大させ、溶接欠陥の少なく良好な接合が可能であった。パルスレーザーを用いた微細溶接では、微細スポットを用いることで高い制御性を有する微細接合が期待でき、そのプロセス特性を明確にすることで、今後も溶接困難材料への適応が広がっていくことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The combination of a pulsed Nd:YAG laser and a continuous diode laser could perform the high-performance micro-welding of aluminum alloy. A pulsed Nd:YAG laser was absorbed effectively from the beginning of laser scanning by pre-heating Nd:YAG laser pulse with the superposition of continuous LD, and wide and deep weld bead could be obtained with better surface integrity.

As for micro-welding of copper material, the stable absorption state could be achieved by using a pulsed green Nd:YAG laser, since its absorptivity showed almost constant values with change of power density. A longer pulse duration is effective to achieve not only high absorptivity but also low deviation of absorptivity. The pulse waveform with maximum peak at the early period and a long pulse duration led to stabilizing the penetration depth with less porosity.

研究分野：特殊加工学

キーワード：アルミニウム 銅 レーザ溶接 パルスレーザー 微細溶接 溶け込み深さ 重畳 吸収率

1. 研究開始当初の背景

持続的な社会の発展のためには、低炭素社会を実現していく必要があり、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーに関する研究開発と利用促進が進んでいる。この自然エネルギーを有効に活用するためには、エネルギーの効率的な利用とそれを実現するためのデバイスの開発が必要不可欠である。そのためには、装置の軽量化や効率的なエネルギー伝送が求められており、軽量化として比強度の高いアルミニウム、エネルギー伝送には優れた導電性を有する銅の利用拡大が進んでいる。したがって、社会の要求に応えた製品開発を検討する上で、アルミニウムや銅に対する加工の要求が高まっている。効率的な加工を実現するために接合技術は重要な手法であるが、アルミニウムや銅は熱伝導率が高く、効率的に温度上昇をさせることが難しい。また、鉄系材料と比較して融点が高いアルミニウムや銅は接合の難しい材料とされており、熔融金属中に空孔として残存するポロシティが発生すること、表面性状の悪化などが課題となっている。これら高熱伝導率材料の温度を効果的に上昇させるためには、エネルギー密度の高い熱流束を用いることが有効であり、電子ビームやレーザー光による手法が試みられている。しかし、電子ビームは真空装置を必要とすることから、取り扱いと作業性の面でレーザー光を適用したいという要望が強い。

ところでレーザー加工では光と材料の相互作用により光エネルギーが熱エネルギーへと変換される。産業界で多用されている固体レーザーの波長は 1064nm と近赤外に属し、その波長領域における室温でのアルミニウムの光吸収率は 5%、銅の光吸収率は約 1.5% と鉄の 35% と比較して非常に低い。そのため、これらの材料を熔融させるためには高いエネルギーを入熱する必要があることから、大きな溶け込み深さと良好なビード表面性状を両立することは難しい。また、たとえ高いエネルギーを投入したとしても、熔融できたりできなかったりなど、その現象は不安定である(同一のエネルギー密度条件下)。したがって、アルミニウムや銅はレーザー加工において溶接困難材料とされており、安定したレーザープロセスの開発が望まれている。

2. 研究の目的

一般に光吸収率を向上させるためには材料温度を上昇させることが知られている。しかし、微細溶接においてアルミニウムや銅の材料温度を上昇させることは材料の変形につながるばかりか、パッケージング等のアプリケーションにおいては、温度上昇を好まない場合が多い。そこで我々はこれまでにアルミニウムでは光吸収率が大きくなる波長 800nm 付近のレーザー光を重畳する手法によりパルス Nd:YAG レーザであっても溶け込み深さを大きくできることを明らかとして

きた。しかし、その詳細な加工メカニズムに関しては、まだ不明な点が多く、更なる安定化、高効率・高品位化を目指すためには、その特性とメカニズムを明らかにする必要がある。一方、銅に関しては、波長 600nm 以下で光吸収率が急激に上昇する。しかし、この波長領域ではナノ秒以下の短パルスレーザーが主流であり、溶接に必要なミリ秒以上のパルス幅を有するレーザー発振器はほとんど無い。そこで Nd:YAG レーザを波長変換することにより得られる 532nm を用いた銅の高効率微細溶接法に関して検討する。この 2 つのアプローチによりレーザー加工で溶接困難材料とされるアルミニウムと銅の高効率・高信頼精密微細レーザー溶接法の開発を目指す。

3. 研究の方法

3.1 アルミニウムのパルスレーザー溶接

図 1 にアルミニウムのパルスレーザー溶接で用いた LD 重畳パルス YAG レーザ照射システムの模式図とパルス発振 Nd:YAG レーザおよび連続発振 LD の波形を示す。本レーザー発振器はパルス Nd:YAG レーザと連続発振 LD より構成されている。レーザー発振器内部に設置した波長 1064 nm を透過、808 nm を反射するダイクロイックミラーによって、波長 808 nm の連続発振 LD を波長 1064 nm のパルス Nd:YAG レーザと同一光軸上に重畳した。2 波長が重畳されたレーザー光は集光レンズによってコア直径 300 μm の SI 型光ファイバへ入射され、1 本の光ファイバのみによって加工ヘッドまで伝送される。そして加工ヘッド内部に設置したコリメーションレンズ(焦点距離 80 mm)および集光レンズ(焦点距離 80 mm)を通り、加工試料表面に対して 5° 傾けて照射した。焦点は加工試料表面とし、いずれの波長ともスポット直径は約 300 μm である。LD が連続的に出力されているとこれへパルス Nd:YAG レーザが所定の繰り返し数で照射される。加工試料には板厚 0.5 mm の Al-Mn 系アルミニウム合金 A3003 を使用し、ステージに所定の送り速度を与えてレーザー光照射実験を行った。シールドガスとして窒素を 70 L/min で直径 5 mm のノズルより供給した。

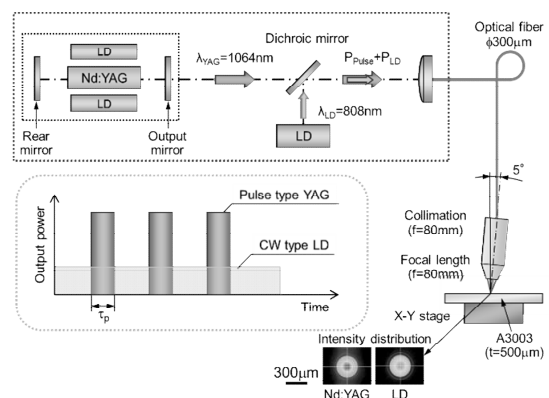


図 1 アルミニウムの溶接実験に用いた LD 重畳パルス YAG レーザ照射システム

3.2 銅のパルスレーザ溶接

銅のパルスレーザ溶接実験において用いたレーザ照射システムの模式図を図2に示す。直接変調方式の半導体レーザ励起パルス型 Nd:YAG レーザにおいて、YAG ロッドから出力された波長 1064nm の基本波を共振器内部の非線形光学結晶を通過させることで波長 532nm の第二高調波を得た。レーザ光の伝送にはコア直径 100 μ m の SI 型光ファイバ及び、コリメーションレンズ $f=30$ mm, 集光レンズ $f=60$ mm を用いてスポット直径 200 μ m を得た。一方、より微細なスポット直径 100 μ m を得るためには、光ファイバを用いることなく直接照射で集光レンズ $f=60$ mm を用いた。いずれの場合においても、レーザ光を積分球内の試料に照射し、反射光のエネルギーを計測することで銅の吸収率を求めた。なお試料には厚さ 1.0mm の無酸素銅を用いた。レーザ照射の際にはレーザ光軸に対して試料を 10 度傾け、焦点は試料表面に合わせた。また、比較として波長 1064nm を用いた時も同様に、積分球内に設置した試料にレーザ光を照射して反射率を測定することで光吸収率を算出した。

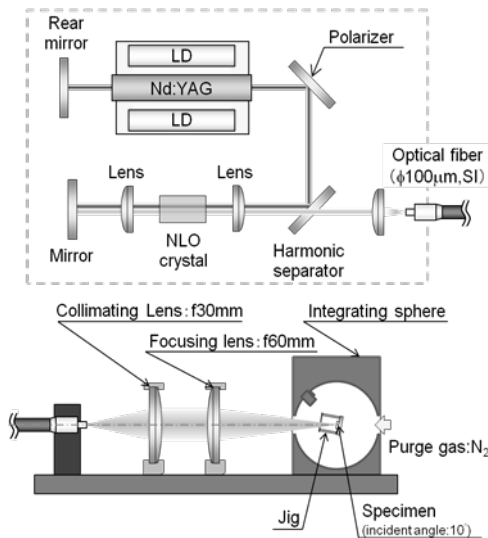


図2 銅の溶接実験に用いたグリーンパルスレーザ照射システム

4. 研究成果

4.1 アルミニウムのパルスレーザ溶接

一般に、レーザ光走査開始点の溶け込み深さは小さく、大きな溶け込み深さを得ようとするとレーザ出力を大きくする必要があるので、表面性状が悪化する。そこで、レーザ光走査開始点における溶融領域を安定して大きなものにするために、図3に示すようにパルス Nd:YAG レーザ照射前に試料表面が溶融しない程度の出力で予熱パルスを照射する手法を検討し、レーザ照射前の試料温度が溶接結果に及ぼす影響を検討した。

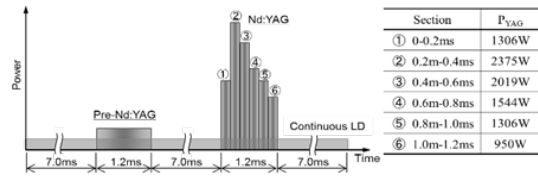


図3 アルミニウムの溶接実験で用いたレーザパルス波形

図4にレーザ光走査初期における走査方向の中央断面の光学顕微鏡写真ビード形状を示す。パルス Nd:YAG レーザのみでは溶け込み深さが不安定となっているが、連続発振半導体レーザ重畳と予熱パルス法により、1パルス目から深く安定した溶け込みが得られている。1パルス目における溶け込み深さは予熱パルスを照射しない場合と比較して約 200 μ m 増加した。

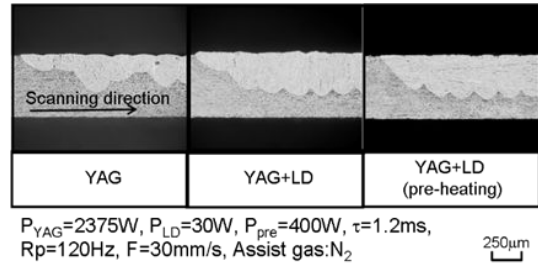


図4 アルミニウムのレーザ溶接実験における余熱パルスの効果

図5に非定常熱伝導解析から得られたパルス Nd:YAG レーザ照射前の加工試料表面温度を示す。パルス Nd:YAG レーザ光のみでは、それ以前に入熱が無いことから、1パルス目照射前の試料表面温度は室温であるが、パルス Nd:YAG レーザに先行して連続発振半導体レーザを重畳すると 40K 程度上昇していた。一方、予熱パルスと連続発振半導体レーザ重畳の組み合わせにより、1パルス目照射前の試料表面温度は 200K 上昇していた。この温度状態により、プロセス初期よりパルス Nd:YAG レーザ光の吸収特性が向上し、安定的

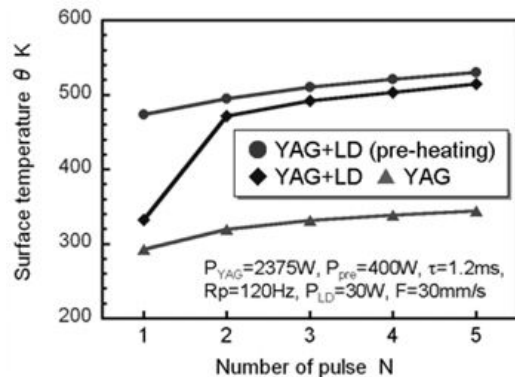
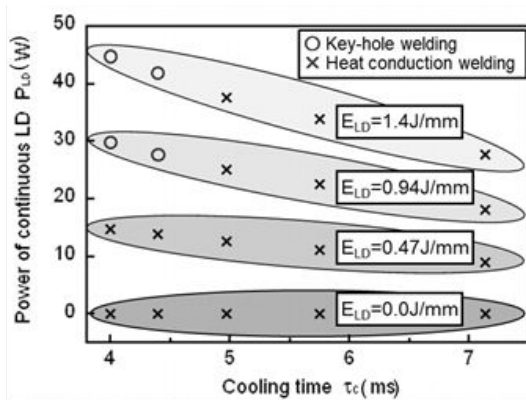


図5 アルミニウムのレーザ溶接実験におけるメインパルス照射前の試料表面温度

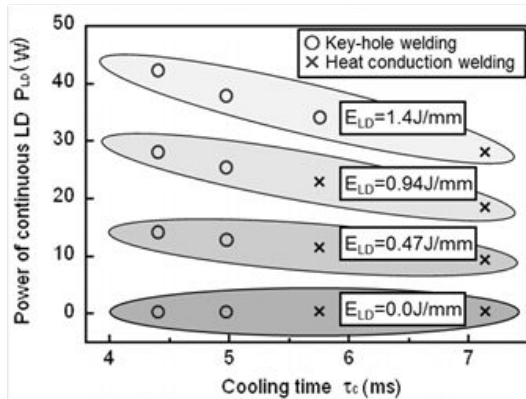
に大きな溶け込み深さが得られたと考えられる。すなわち、パルス YAG レーザ照射前の試料温度がレーザ光エネルギーの吸収に大きく影響すると考えられる。

ところで、アルミニウムのレーザ溶接において良好な表面性状と大きな溶け込み深さを得るためには、熱伝導型とキーホール型溶接の境界近傍の条件を用いることが良いが、その条件でレーザ光エネルギーの吸収量を安定させることは容易ではない。しかし、先に述べたように本レーザ光照射システムではパルス YAG レーザ照射前の試料温度を高く維持できることから吸収エネルギー量の安定化が期待できる。そこで、熱伝導型とキーホール型溶接の境界近傍における現象を検討した。

図 6 にパルス Nd:YAG レーザのピーク出力 $P_{YAG}=1782\text{ W}$, 1841 W におけるキーホール型溶接の発生状態をまとめた結果を示す。図中の ○印はキーホール型溶接、×印は熱伝導型溶接となった条件を示している。どちらのパルス Nd:YAG レーザのピーク出力条件においても図の左上側、すなわち連続発振 LD の単位長さ当りの出力が大きく、かつパルス休止時間が短い場合にキーホール型溶接が現れていることがわかる。パルス Nd:YAG レーザの照射される時間間隔が短くなり、前のパルスにより供給された熱が拡散、冷却される前



(a) $P_{YAG}=1782\text{ W}$



(b) $P_{YAG}=1841\text{ W}$

図 6 アルミニウムのレーザ溶接実験でのキーホール発生近傍における溶接形態

に次のパルスが照射されるため、これがキーホールの発生に影響を及ぼした。特に、パルス Nd:YAG レーザのピーク出力 $P_{YAG}=1782\text{ W}$ ではパルス休止時間が短く、かつ連続発振 LD の出力が高い条件でのみキーホール型溶接となっている。連続発振 LD を重畳した場合、パルス Nd:YAG レーザ照射後の温度低下を抑制する効果があることから、前述のパルス休止時間が短い場合と同様に、レーザ光照射部の試料温度が低下する前に次のレーザパルスが照射され、キーホールを発生しやすい状況が整っていたと考えられる。

以上の様に、連続発振半導体レーザ重畳パルス YAG レーザによる本手法は、アルミニウム材を高品位かつ高効率に溶接することが可能である。さらに、パルス照射方法を工夫することで、表面性状を良好に保ちながらレーザ光走査開始初期より大きな溶け込み深さを安定的に得ることができる。

4.2 銅のパルスレーザ溶接

波長 1064 nm と波長 532 nm による銅の光吸収率を測定した結果を図 7 に示す。ここで用いたのはパルス幅 1.2 ms の矩形波であり、照射径とピーク出力を変更することによって、非溶融状態、熱伝導型、キーホール型とそれぞれのプロセス形態を得た。これまで報告のように、いずれのプロセス形態においても、波長 1064 nm より波長 532 nm の方が高い光吸収率を示している。特に非溶融状態においては、波長 532 nm の光吸収率が波長 1064 nm の光吸収率の約 6 倍以上もの値を示しており、溶接の初期において効率良くエネルギーが吸収されると考えられる。ここで興味深いのは、プロセス形態の変化にともなう光吸収率の変化傾向である。波長 1064 nm では非溶融状態から、熱伝導、キーホール型と変化するにともなって、光吸収率は増大し、キーホール型では非溶融状態の 3 倍以上となっている。一方、波長 532 nm ではプロセス形態ごとの光吸収率の変化割合は少ない。さらに熱伝導型とキーホール型においてはそのばらつきも波長 532 nm の方が波長 1064 nm と比較して $1/4$

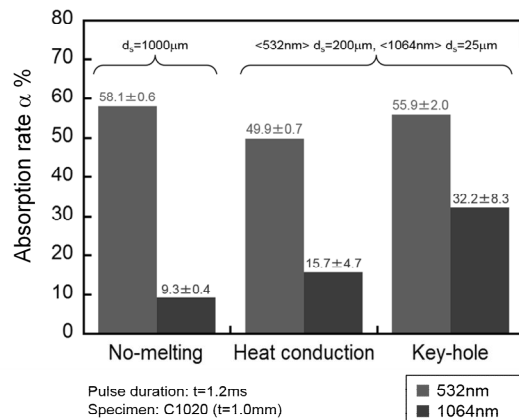


図 7 銅のレーザ溶接実験におけるプロセス形態と光吸収率

以下と小さくなっている。すなわち、波長 532nm では波長 1064nm よりもパワー密度の変化に対して光吸収率が安定しており、効率的なエネルギー利用のみならず、安定したプロセスが期待できると考えられる。

図 8 は銅に波長 532nm のパルス Nd:YAG レーザを照射した際における溶け込み深さと光吸収率との関係を示したものである。非溶融と熱伝導型の試料の状態においては光ファイバを用いて、キーホール型では直接照射にて実験を行った。非溶融から熱伝導型に変化するにつれて光吸収率が減少した。これは試料表面の一部が溶融状態となることで、光反射率が増大し、試料上方に反射光が拡散したためと考えられる。一方、キーホール型の溶融形態においては、レーザー光がキーホール内壁で多重反射されることにより光吸収率が向上する効果が知られている。これと同様に、溶け込み深さが増すほど光吸収率は上昇したと考えられる。すなわち、溶融ビード断面形状により光吸収率が変化すると言える。

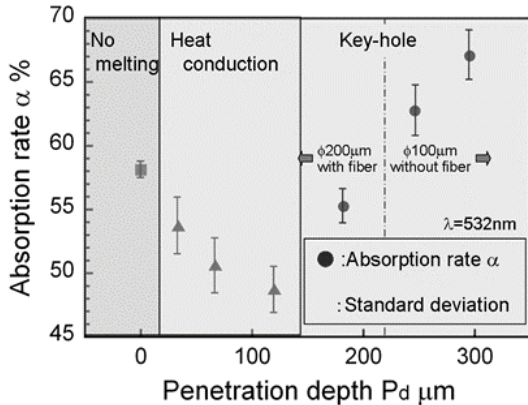


図 8 波長 532nm を用いた銅のレーザー溶接実験における光吸収率と溶け込み深さ

図 9 に、波長 532nm の Nd:YAG レーザのパルス波形を変化させた場合の光吸収率を示す。全てパルスエネルギーは一定であり、パルス幅 2.4ms でピーク出力位置が後半、中間、前半と異なる 3 種と、ピーク出力位置は前半で、パルス幅が 3.2ms と 4.0ms の 2 種、合計 5 種のパルス波形を用いた。照射実験は光ファイバを用い、スポット直径 100micrometers で焦点を試料表面に合わせて行った。なお、シールドガスとして窒素を流量 70L/min で直径 5.0mm のノズルから噴出させた。図に示すように非溶融形態では、パルス波形は光吸収率に大きな影響は及ぼさないが、熱伝導型溶接において、パルス幅が長くなるほど光吸収率は上昇した。また、キーホール型溶接においては、パルス幅 2.4ms と 3.2ms で光吸収率に大きな差は無いが、パルス幅 4.0ms は高い光吸収率を示した。これは、キーホールの持続時間が長くなり、光吸収率が上昇したためと考えられる。

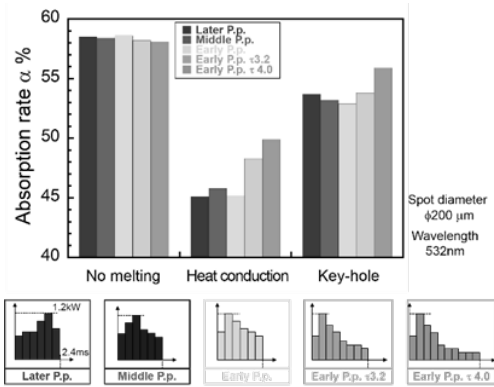


図 9 銅のレーザー溶接実験においてパルス波形が光吸収率に及ぼす影響

図 10 はパルスエネルギーを 2.0J/P と統一して、図下部に示すパルス波形を用いた時の試料表面状態と溶け込み深さを示している。表面状態に関してはパルス幅が長くなるにつれて表面の状態が安定する傾向が得られた。また、溶接欠陥においても、発生量、その大きさ共にパルス幅が長くなるにつれて減少する傾向が見られた。溶融領域内部でポロシティとなりうる気泡の発生後、密度差から気泡は外部へ排気される様に上昇する。しかし、レーザー光照射が終了し、冷却が急激に進行すると気泡が外部に放出される前に凝固が始まり、内部に残留する。そこで、パルス幅を長くすると、溶融状態が長く続き、気泡の排出が促されることから溶接欠陥の低減に繋がったと考えられる。また、溶け込み深さのバラつきは最大ピーク出力のステップ位置に強い相関を示し、溶け込み深さのバラつきを低減するためには、パルス波形における最大ピーク出力をパルスの前半に位置させることが重要であった。

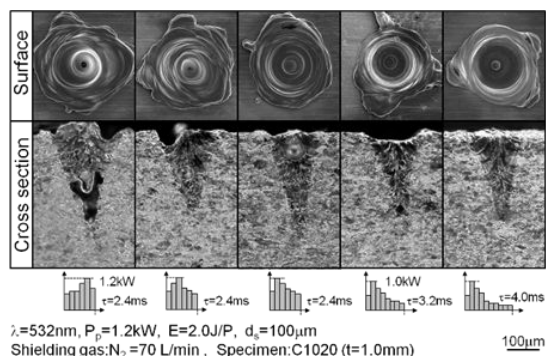


図 10 銅のレーザー溶接実験においてパルス波形が溶け込み状態に及ぼす影響

波長 532nm のパルス Nd:YAG レーザにおいても波長 1064nm と同様、熱伝導型からキーホール型へ溶接形態が変化することで、その光吸収率は増大した。非溶融状態においてパルス波形は光吸収率に影響を及ぼさないが、熱伝導型およびキーホール型溶接ではパルス幅の長い方が光吸収率は増大した。また、

パルス幅を長くすることでポロシティの発生も抑制され、高効率で良好な接合が期待できることが示された。

4.3 まとめ

連続発振半導体レーザを重畳することでパルス Nd:YAG レーザの基本波においても照射部温度を高温に維持することでアルミニウム合金の高効率微細溶接が実現できる。また、波長変換により得られるパルスグリーンレーザは高反射率の銅であっても適切な溶接形態で高いエネルギー吸収量を示す。さらにパルス幅を長くすることでエネルギー吸収量を増大させ、溶接欠陥の少なく良好な接合が可能であった。パルスレーザを用いた微細溶接では、微細スポットを用いることで高い制御性を有する微細接合が期待でき、そのプロセス特性を明確にすることで、今後も溶接困難材料への適応が広がっていくことが期待される。

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)

Reiki Inoue, Takuya Wada, Yasuhiro Okamoto, Akira Okada, Effects of Surface States on Light Absorption Characteristics in Micro-welding of Copper by Pulsed Nd:YAG laser, Proceedings of the International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies IC3MT 2016, 査読有, 2016, pp.66-1 – 66-4.

岡本康寛, 中芝伸一, 酒川友一, 岡田晃キーホール発生境界におけるアルミニウム合金の高品位微細レーザ溶接, レーザ加工学会誌, Vol. 22, No. 3, 査読有, 2015, pp.22-27.

〔学会発表〕(計 5 件)

濱田一樹, 井上礼輝, 岡本康寛, 篠永東吾, 岡田 晃, 中芝伸一, 酒川友一, Nd:YAG レーザを用いた銅の微細溶接における光吸収特性 - 光吸収率と溶融量の評価 -, 2017 年度精密工学会中国四国支部山口地方学術講演会講演論文集, November 25, 2017, Ohshima, Japan.

Yasuhiro Okamoto, Effects of Surface States on Absorption Characteristics in Laser Micro-welding of Copper, Select Committee on Research Developments and Applications in Micro- and Nano-Joining Technologies, the 69th International Institute of Welding Annual Assembly and International Conference, July 12, 2016, Melbourne, Australia.

岡本康寛, パルスレーザによる微細溶接—銅の光吸収特性およびガラスとシリコンの接合—, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, September 5, 2015, Sendai, Japan.

Yasuhiro Okamoto, Smart Laser Micro-welding of Difficult-to-weld Materials, Select Committee on Research Developments

and Applications in Micro- and Nano-Joining Technologies, the 68th International Institute of Welding Annual Assembly and International Conference, June 30, 2015, Helsinki, Finland.

Takuya Wada, Yasuhiro Okamoto, Akira Okada, Norio Nishi, Sin-ichi Nakashiba, Tomokazu Sakagawa, Investigation of Absorptivity in Micro-welding of Copper by Pulsed Laser, 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2015), May 26, 2015, Kokura, Japan.

〔図書〕(計 0 件)

該当無し

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

該当無し

取得状況(計 0 件)

該当無し

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 40304331

(2) 研究分担者

岡田 晃 (OKADA AKIRA)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 60263612

(3) 連携研究者

該当無し

(4) 研究協力者

該当無し