

銅の微細レーザー溶接における 光吸収率と溶け込み深さの安定化に関する検討

岡山大学 大学院自然科学研究科
准教授 岡本 康寛
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF- 2015221)

キーワード：銅，微細レーザー溶接，光吸収率

1. 研究の目的と背景

近年，電気電子制御技術の発達によりオール電化住宅，ハイブリットカー，電気自動車などの普及が進んでいる。また，持続的な社会の発展を実現するためには，電気エネルギーを効率的に利用する必要があり，優れた導電特性を有する銅の接合に関する要求が増大している¹⁾。しかし，従来の溶接法では銅の高い熱伝導性のために吸収された熱は急速に母材側に拡散し，接合不良が生じやすいことなどが問題となっている。このため，熱が拡散しても入熱部分を熔融させるために，エネルギー密度が高く，かつ非接触で微細な接合が実現できるレーザー溶接法が注目されている²⁾。

近赤外光に属する波長 1064nm の Nd:YAG レーザの基本波では，銅に対する光吸収率は約 1.5%，波長 532nm の第二高調波は約 35.6% の吸収率を示しており³⁾，波長変換により短波長化することによって光吸収率は約 24 倍と大幅に向上することから，銅に対しては波長 532nm の Nd:YAG レーザの第二高調波の方が高効率な加工が期待できる^{4, 5)}。また，微細溶接を行うためにはマイクロ秒程度のパルスレーザーが有効であるが，Nd:YAG レーザの第二高調波である波長 532nm を用いた銅に対する微細溶接特性はまだ明らかとなっていない点が多い。そこで，本研究では LD 励起パルス Nd:YAG レーザを第二高調波に変換し，得られる波長 532nm のパルスグリーン YAG レーザ，および比較のために波長 1064nm の基本波を用いて非熔融，熱伝導型，キーホール型溶接における光吸収率を明らかにし，レーザー光波長とプロセス形態の関係性も議論した。また，波長 532nm の Nd:YAG レーザの第二高調波を用いたとしても，銅の溶接においては溶け込み深さが突発的に変動することが報告されており，特に微細溶接においては溶け込み深さの精密な制御が求められる。そこで，ミリ秒パルスレーザーを用いた銅の微細レーザー溶接法において，溶け込み深さ安定化のための適切な入熱方法も検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

使用したレーザー発振器は，直接変調方式の LD 励起パルス型 Nd:YAG レーザであり，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 の第二高調波を得る。そ

の後，ハーモニックセパレータを介して第二高調波のみを出力することが可能である。

図 1 は光ファイバを用いた実験方法を示しており，レーザー光の伝送にはコア直径 100 μm の SI 型光ファイバ及び，コリメーションレンズ $f=30\text{mm}$ ，集光レンズ $f=60\text{mm}$ を用いて焦点にてスポット直径 200 μm を得た。

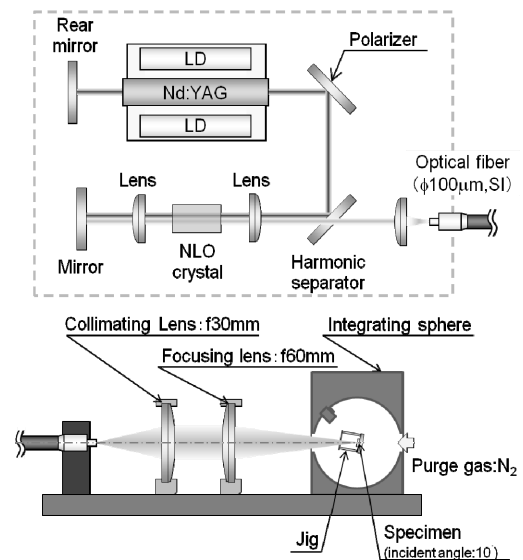


図 1 波長 532nm レーザの光ファイバ伝送による直射照射システムと積分球による反射率測定方法

図 2 は直接照射による実験方法を示しており，集光レンズ $f=60\text{mm}$ を用いてスポット直径 100 μm を得た。いずれの場合においても，レーザー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。レーザー光照射の際にはレーザー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。溶接ビードの断面形状は，熔融領域を明確にするためにアンモニア水と過酸化水素水の混合液でエッチング処理を行った後に観察した。

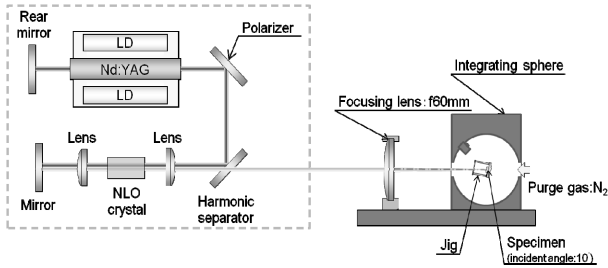


図2 波長 532nm レーザによる直射照射システムと積分球による反射率測定方法

3. レーザ光波長が光吸収率に及ぼす影響

試料に対してレーザー光を照射することによって発生する現象は、①照射レーザー強度が低く加工（溶融）現象が発生しない場合、②照射レーザー強度が中程度で熱伝導型溶接となる場合、③照射レーザー強度が高くキーホール型溶接となる場合の3つに大別することができる。この3つの現象はそれぞれでレーザー光照射部の温度や形状に違いがあることから、レーザー光吸収率にも変化が現れると考えられる。したがって、試料の光吸収率の測定はこの3つの現象それぞれにおいて実施した。具体的には、まずレーザー光の照射出力を変更して試料に照射することによって、非溶融、熱伝導型、キーホール型の各々の加工状態となる出力を確認し、次にそれぞれの出力によって積分球内で加工を行い、試料の光吸収率を測定した。なお、吸収率の測定は各条件で10回ずつ行いその平均値を算出した。

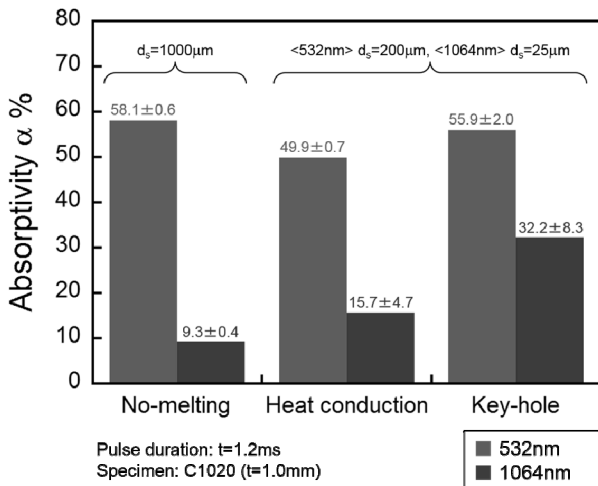


図3 銅のレーザー溶接実験におけるプロセス形態と光吸収率

試料に対してパルス Nd:YAG レーザの基本波およびパルスグリーン Nd:YAG レーザを照射して測定した試料の光吸収率を図3示す。図より、波長 1064nm の基本波と波長 532nm の第二高調波で吸収率が大きく異なっていることが確認できる。さらに、いずれの波長も加工状態によって吸収率に変化が生じているが、この変化の傾向も波長

によって異なっていることがわかる。基本波の光吸収率は、非溶融の状態において 9.3% と最も低い値を示しており、熱伝導型、キーホール型の順に上昇している。すなわち、レーザー光の照射出力が上昇し、溶込み深さが増加するほど光吸収率が向上することを示している。キーホール型の加工となる場合、試料にレーザー光を照射することで発生する金属蒸気の圧力によって溶融部の形状が変化し、中心付近に深い凹形状のキーホールが形成される。これにより、キーホールの内壁で吸収されず反射されたレーザー光はさらにキーホールの内部へ導光され、再び試料へ照射されるため熱伝導型に比べて吸収率が向上したと考えられる。熱伝導型の加工の場合、レーザー光の照射により試料表面は溶融するがその形状に大きな変化は現れないため、キーホールのように光吸収率を向上させる効果は生じないと考えられる。しかしながら、光吸収率は非溶融の状態と比較して大幅に向上している。このことから、銅に対する基本波の光吸収率は試料温度の上昇とともに、あるいは溶融にもなって増加する可能性が高いと考えられる。

一方、波長 532nm の第二高調波の光吸収率は、非溶融の状態において基本波の6倍以上となる 58.1% となっており、基本波に比べ高い光吸収率を示している。しかし、基本波の場合と異なり照射するレーザー光の強度に対する相関性は見られず、熱伝導型における光吸収率は 49.9% と非溶融の場合に比べ低い値となっていた。レーザー光の強度をさらに上げてキーホール型の加工形態となった場合、光吸収率はやや向上し 55.9% となっていた。キーホールが発生した場合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生じる。第二高調波においても同様の現象が発生した結果、キーホール型加工の光吸収率が非溶融や熱伝導型に比べ高い値を示したと考えられる。一方、熱伝導型加工の光吸収率が非溶融に比べ低下していることから、銅に対する第二高調波の光吸収率は試料温度の上昇、溶融開始にもなって生ずる試料表面の変化やプラズマ等の諸現象が影響していると考えられる。

4. 溶け込み深さと試料温度が光吸収率に及ぼす影響

図4は銅に Nd:YAG レーザの第二高調波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。図5は、そのレーザー光照射表面と断面の一例である。非溶融と熱伝導型の試料の状態においては実験装置として図1を、キーホール型では図2に示すものを使用した。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⁶⁾。これと同様に、キーホール型溶接では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。一方、非溶融から熱伝導型の溶接形態においてはそれとは逆に、溶け込み深さが増大するにつれて光吸収率は低下した。

図6は波長 1064nm のパルス Nd:YAG レーザと波長 532nm のパルスグリーン Nd:YAG レーザの銅に対する光吸収率の温度依存性の測定結果を示す。最高温度を 773K として 100K 刻みで 5 設定と常温 (295K) の合計 6 設定の温度において測定を行い、各条件で 5 回ずつ測定した吸収率の平均値を算出した。測定は両波長ともパルス幅 4ms、ピーク出力 0.46kW の山型波形を用いて行い、レーザ光によって供給されたエネルギーによる試料の温度上昇を避けるために照射エネルギーの低い非溶融の条件とした。図より、試料の光吸収率は僅かではあるが温度によって変化し、さらにその変化する傾向が波長によって異なっていることがわかる。常温から 500K 程度まではいずれの波長においても光吸収率はほぼ一定の値を示しており大きな変化は見られない。しかし、500K を超える温度域においては、波長 1064nm のパルス Nd:YAG レーザでは試料の温度上昇と共に光吸収率も上昇しているが、波長 532nm のパルスグリーン Nd:YAG レーザではこれと逆に試料の温度が上昇するほど光吸収率が低下する傾向を示している。加工形態による試料の光吸収率の変化を示した図3より、波長 1064nm では非溶融に比べて熱伝導型加工の方が高い光吸収率を示しているが、波長 532nm ではこれと逆の傾向を示すことが確認されている。この原因は試料の光吸収率に温度依存性が影響したと考えられる。光吸収率の測定はヒータ出力の制限により 773K を上限温度としたが、熱伝導型溶接となる場合は銅の融点である 1356K を超える温度に達しているため、光吸収率の変化はさらに大きくなり、それによる影響もより明確に現れるのではないかと考えられる。

以上の結果から、試料の光吸収率は波長のみではなく試料温度によっても変化し、その変化する傾向が波長 1064nm と 532nm で異なっていることから、これが加工形態による光吸収率の変化に影響を及ぼしているものと考えられる。

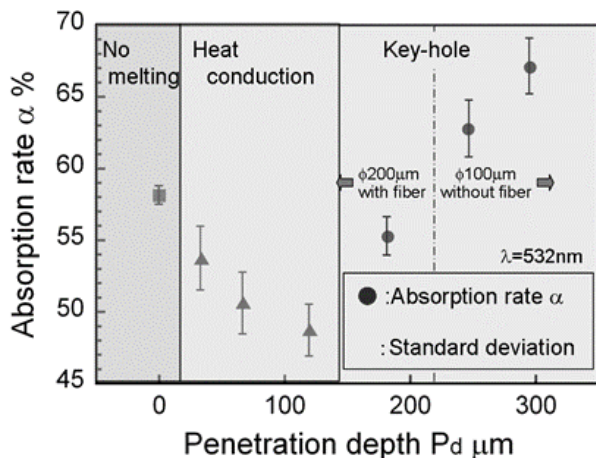


図4 波長 532nm を用いた銅のレーザ溶接実験における光吸収率と溶け込み深さ

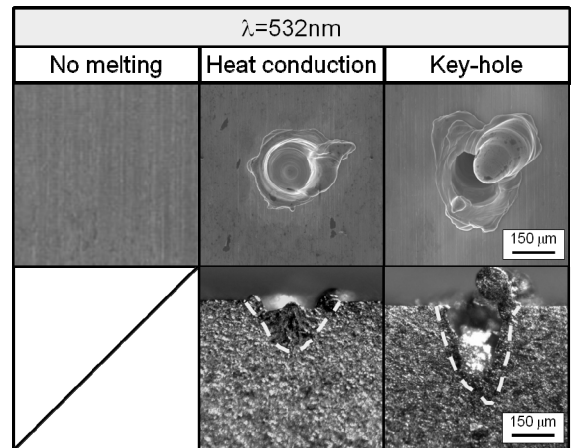


図5 波長 532nm を用いた異なるプロセス形態における銅のレーザ照射痕

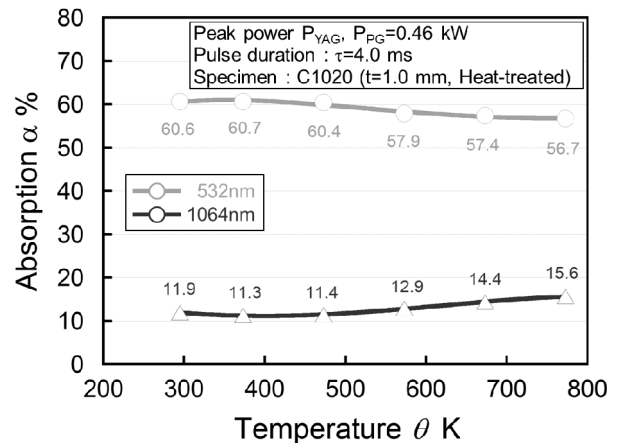


図6 固相状態の銅に対するレーザ光吸収率と温度の関係

5. パルス波形がプロセス特性に及ぼす影響

次にパルス波形制御を用いて溶融状態を制御することでより高効率な光吸収の実現が可能ではないかと考え、最適なパルス波形を検討した。照射するレーザパルスの波形は、パルスエネルギー 2J/pulse、パルス幅 2.4ms、ピーク出力 1.2kW に統一した山型波形とし、最大ピーク出力の時間的位置を変化させた。さらに、それらのパルス波形の中で最も良好な加工結果の得られたものに対して、パルスエネルギーを一定としたままでパルス幅を変更してその変化を検証した。加工は各パルス波形で 5 回ずつ行い、レーザ光を照射して得られた加工痕はこれまでと同様に照射面および断面の観察を行った。

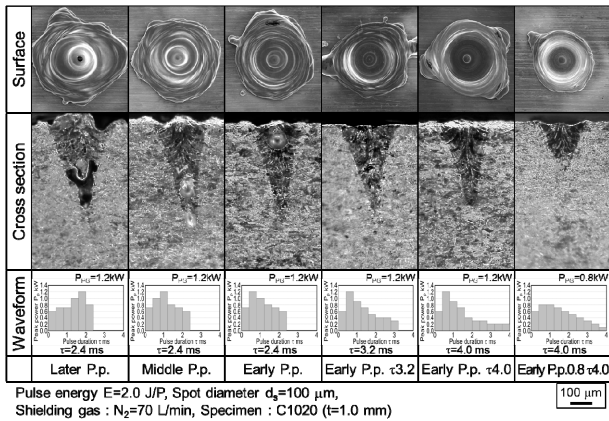


図7 波長 532nm を用いた銅のレーザ溶接実験においてパルス波形が溶け込み状態に及ぼす影響

パルス波形を構成する最小時間単位を 1 ステップ 0.4ms とし、6 ステップでパルス幅 2.4ms の 1 つのパルスを構成している。図6の左の3種類のパルス波形は、それぞれ5ステップ目、3ステップ目、2ステップ目に最大ピーク出力 1.2kW が存在するパルス波形とし、最大ピークの前後は出力がなだらかに増加、減少するように同一のパルスエネルギーで階段状のパルス波形とした。これら3つのパルス波形は、後半、中盤、前半にピーク出力をもつことから、図中ではそれぞれ“Later P.p.”、“Middle P.p.”、“Early P.p.”との名称で表示し識別している。さらに、Early P.p.のパルス波形を基にパルス幅を 3.2ms および 4.0ms とし、いずれもパルス波形 Early P.p.と同様に最大ピーク出力が 2 ステップ目に位置するパルス波形とした。パルスエネルギーおよび最大ピーク出力はこれまでと同様にそれぞれ 2J/pulse および 1.2kW と設定した。なお、これら新たに作成したパルス波形はそれぞれ“Early P.p. τ 3.2”、“Early P.p. τ 4.0”との名称で表記している。加えて、パルス幅 4.0ms、パルスエネルギー 2J/pulse でピーク出力を 0.8kW としたパルス波形 Early P.p.0.8 τ 4.0 として比較のために用いた。

図7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状態を示している。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。

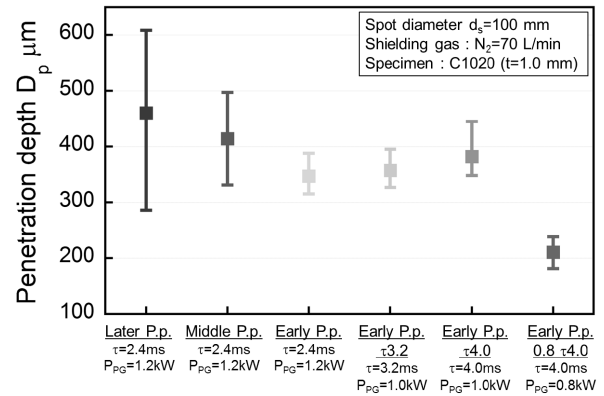


図8 波長 532nm を用いた銅のレーザ溶接実験においてパルス波形が溶け込み深さに及ぼす影響

図8は図7で用いたパルス波形が溶け込み深さに及ぼす影響を示している。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。以上のように、前半に最大ピークがあり照射終了までなだらかに低下するパルス波形で、かつパルス幅を長くすることによってポロシティなどの溶接欠陥や溶け込み深さのバラつきを低減した良好な加工結果が得られることが確認できた。

図9に、Nd:YAG レーザの第二高調波のパルス波形を変化させた場合の光吸収率を示す。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。実験装置は図1に示す光ファイバ伝送方式を使用した。図より、非溶融の状態における光吸収率はパルス波形に依存せずほぼ一定であることがわかる。非溶融の状態とは、すなわちレーザ光を照射した際に試料の温度がほとんど変化しない状態であり、このような照射結果を得るために照射するレーザ光の出力は非常に低い。したがって、いずれのパルス波形においても試料の温度がほとんど上昇せず、単純に銅板上に微弱な光を当てて吸収率を測定している状態になっていたため、パルス波形による違いが現れなかったと考えられる。逆に、非溶融の状態において吸収率の測定結果にパルス波形の影響が現れなかったことは、パルス波形に起因する誤差の少ない正確な測定結果が得られていると考えられる。

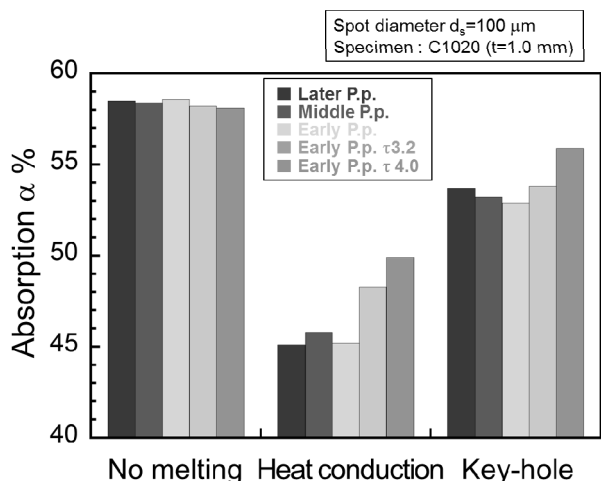


図9 波長 532nm を用いた銅のレーザ溶接実験においてパルス波形が光吸収率に及ぼす影響

これに対して、熱伝導型の場合はパルス波形による違いが明確に現れており、パルス幅が同一の Later P.p., Middle P.p., Early P.p.では、ほぼ同一の光吸収率を示しているが、パルス幅が長くなる 3.2ms, 4.0ms ではパルス幅が長くなるにつれて徐々に光吸収率が増加している。図6で示した試料温度による光吸収率の変化の測定結果から、波長 532nm でキーホールをともなわない加工を行った場合、試料温度が高いほど吸収率が低くなる傾向が明らかとなっている。さらに、用いたパルス波形はいずれも同一のパルスエネルギーとなっていることから、パルス幅が長いほど最大ピーク以外のステップの出力が低下する。このことを考慮すると、パルス幅が長いほど照射エネルギーが時間的に分散してレーザ照射部の最高到達温度が低くなった結果、吸収率が上昇したものと考えられる。

また、キーホール型溶接の場合もパルス幅が長いほど光吸収率が上昇する傾向にある。前述の通り、キーホール型溶接の場合、レーザ光はキーホールの内壁で多重反射されながら中心部へ導光されるため、熱伝導型と比べて試料の光吸収率は上昇する。したがって、パルス幅が長いほどキーホールの持続時間が長くなり、このために光吸収率が上昇したと考えられる。

図7で示した加工はいずれもキーホール型溶接となっていたことから図9の右側に示した一群がこの加工結果に対応する光吸収率である。パルス幅 2.4ms である3つのパルス波形 Later P.p., Middle P.p., Early P.p.を比較すると、溶込み深さおよび光吸収率はいずれも Later P.p. > Middle P.p. > Early P.p.の順に大きくなっており、両者の間に正の相関があることがわかる。また、最大ピーク出力が前半に位置するパルス幅の異なる3つのパルス波形 Early P.p., Early P.p. τ 3.2, Early P.p. τ 4.0を比較すると、これらも溶込み深さおよび光吸収率に正の相関性があり、両者の値は Early P.p. τ 4.0 > Early P.p. τ 3.2 >

Early P.p.とパルス幅が長くなる順に光吸収率も大きくなっている。したがって、ある程度の相似性を有したパルス波形同士であれば溶込み深さと光吸収率の間に相関性があり、光吸収率が大きいほど深い溶込みが得られる。本実験で実施した光吸収率の測定方法では、レーザ照射中の試料に外部から全く影響を与えないため、加工しながら光吸収率を測定することによって加工を行った試料の溶込み深さを推定することが可能になると考えられる。

6. 結言

本研究で波長 532nm および波長 1064nm のミリ秒パルスレーザを用いた銅の微細レーザ溶接法において、光吸収特性や溶け込み深さ安定化のための適切な入熱方法に関して検討した。本研究で得られた主な結言は以下のとおりである。

- (1) 銅の光吸収率は波長や加工形態によって異なり、非熔融の条件では波長 532nm の光吸収率は波長 1064nm に比べ5倍以上高い値を示す。しかし、キーホールの発生をともなう場合は波長 532nm の方が高い光吸収率を示すものの、波長 1064nm に対する増加倍率は約 1.7 倍と低くなる。
- (2) 波長 532nm 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する。
- (3) 照射エネルギーが同一であってもパルス波形によって加工結果に変化が生じ、前半に最大ピーク出力を有し、かつパルス幅の長いパルス波形を用いることで、ポロシティの残留が少なく溶込みの深い良好な加工結果が得られる。
- (4) 非熔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する。
- (5) パルス波形によって光吸収率に変化が生じ、相似性をもつパルス波形同士であれば光吸収率と溶込み深さの間に正の相関関係を見出すことができる。しかし、パルス幅も波形形状も大きく異なるパルス波形同士では、光吸収率と溶込み深さに相似関係は示されない。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の研究助成を受けて行われたものであり、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金属材料活用事典編集委員会：金属材料活用事典，(2000)，pp. 74-77, 648-650, 産業調査会。
- 2) 永井治彦：増強改訂版レーザプロセス技術，(2008)，pp. 64-6, オプトロニクス社 8。
- 3) 国立天文台編：理科年表 1990 年版，(1990)，pp. 99, 丸善株式会社。

- 4) S. Engler, R. Ramsayer and R. Poprawe : Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers, Physics Procedia, 12, (2011) 339–346.
- 5) F. Otte, S. Pamin, J. Hermsdorf, D. Kracht and R.

Kling : Enhancement of Process Stability for Laser Spot Micro Welding by Using 532 nm Radiation, Proceedings of LAMP2009, (2009) #09-114.

- 6) 宮本勇 : レーザ溶接(1), 第40回レーザー熱加工研究会論文集, (1997), pp.93-102.