高出力・高ビーム品質グリーンレーザー

High Power and High Beam Quality Green Laser

中 村 強*

Tsuyoshi NAKAMURA

Key Words: Green Laser, Second Harmonic Generation, High Power, High Beam Quality, Disk Laser, Wavelength Conversion, Copper Welding, Reflection Ratio

1. 緒 言

20 世紀最大の発明と言われるレーザーは 1960 年に発明されてから非常に広範な分野で使われるようになった。現在も多くのレーザーが開発され、通信・測定・加工・娯楽などで新たな用途が生み出されている。特に産業用途に関しては非接触、局所加熱などの特徴を生かしレーザー発明以前の従来工法ではなし得なかった高生産性、高精度加工などを実現した。産業の製造工程で使用される主要な用途は溶接や切断であるため、これまではより高速により厚物の加工をするために高出力・高ビーム品質の開発に主眼が置かれていた。レーザーが産業用の加工に使用され始めた当初は高出力レーザーは CO₂ レーザーのみであったがその後固体レーザーの開発が進み kW 級の Nd:YAG レーザーが開発された。その後 2000 年以降に、高出力・高ビーム品質・高エネルギー変換効率・長寿命・小型・低価格のディスクレーザー¹⁾ やファイバーレーザー²⁾ が開発・実用化され製造工程における固体レーザーの使用比率と重要性が一変した。高出力化により高速で深い溶接が可能になり、板金業界、自動車業界、電気・電子業界を始め幅広い産業分野で使用されるようになった。しかしながら、レーザーは光であるため照射対象物に対し反射と吸収の現象が生じる。一部のエネルギーは加工対象（ワーク）に吸収され熱となり加工に寄与するがそれ以外のエネルギーはワーク表面で反射され加工に寄与しない。そのため、加工効率や加工状態は対象ワークの物性に依存する。例えば銅の場合、反射率は 10 μm の波長で 98.8%、1 μm で 98.5% であるのに対して 0.5 μm の波長では 60.0% である³⁾。近年自動車が内燃機関エンジンから電動に置き換わる動きが加速し、銅の使用比率が急速に高まり、銅の加工工程も増加している。このような中で銅をレーザーで加工したいとの要望が高まっている。しかしながら現行の高出力固体レーザーは波長が 1 μm 前後で、銅に対する吸収率が非常に低い。そこで銅に対する吸収率の良い短波長のレーザー開発が望まれていた。こ

のような要望に対応すべく、今般 TRUMPF は高出力グリーンレーザーを開発した。本稿ではこの高出力・高ビーム品質のグリーンレーザーについて解説する。

2. レーザーによる銅の加工特性

前述のように、銅の反射率は高出力が可能である CO₂ レーザーや固体レーザーの波長帯域 10 μm ~ 1 μm では 98.5% 以上と非常に高い。一方、本稿で述べるグリーンレーザーの波長近傍である 0.5 μm では 60.0% と低くなる。銅の分光反射率を Fig. 1 に示す。本データは銅を真空蒸着してつくった清浄な表面での反射特性であるためこの反射率は通常の研磨面よりも高い。実際に加工に使用される銅はこれよりも若干反射率が下がる。

Yb:YAG レーザーの基本波である 1.03 μm の波長（以下基本波という）とその第二高調波である 515 nm の波長（以下グリーンレーザーという）のレーザーによる銅の溶融状態の違い⁴⁾ を以下に示す。

2.1 同一パルス幅による溶融状態の違い

Fig. 2 にパルス幅 5 ms の基本波（図中 IR : infrared と表

Fig. 1 Spectral reflection factor of copper.

* トルンプ株式会社 レーザー技術部 (〒 226-0006 神奈川県横浜市緑区白山 1-18-2)

Laser Engineering Department, TRUMPF CORPORATION (1-18-2, Hakusan, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-0006, Japan)

Fig. 2 Variation in spot diameter using (a) IR and (b) green laser.

Fig. 3 Difference of melting phase transformation in 5 ms using (a) IR and (b) green laser.

示) とグリーンレーザーを粗い表面状態の銅に数十回照射したときの溶融状態の写真とその溶融径を測定した結果のヒストグラムを示す。基本波では同一条件で照射したにもかかわらず溶融状態が大きくばらつくのに対しグリーンレーザーではどの溶融状態も同一で再現性のよい溶融となっている。この溶融径を測定した結果のヒストグラムから明らかなように基本波による溶融径は 300 μm から 525 μm まで幅広く分布しているのに対してグリーンレーザーによる溶融径はほぼ 500 μm に集中しておりばらつきが非常に小さく再現性の高いものになっている。一般的に金属にレーザーが照射されると、金属表面でレーザーが吸収され金属が加熱される。この加熱温度が融点に達すると溶融が始まり、さらにレーザーのパワー密度が上昇すると溶融金属の蒸発時に受ける反力によりキーホールが形成される。Fig. 3 は 5 ms のパルス幅のレーザーを照射した時の銅の加熱、溶融、キーホール形成への変化をそれぞ

れの形態へ何 ms で移行したかを調べたものである。基本波、グリーンレーザーとも複数回実施した。基本波による溶融は図に示すように加熱、溶融、キーホール形成と形態が変化する時間がばらつくのに対してグリーンレーザーによる溶接は加熱から溶融に関してほぼ同一の時間で形態が変化している。また、基本波による溶融は短時間の熱伝導型の溶融状態からすぐにキーホール型の溶融状態に移行してしまう。熱伝導型の状態で留めておくことはできず短時間でキーホール型に移行してしまうため、このキーホール型の溶融状態が 5 ms のうち何 ms であったかが溶融径や溶融深さを決定する要因となる。一方、グリーンレーザーによる溶融は加熱からすぐに熱伝導型の溶融に移行し、その後熱伝導型の状態が保持される。そのため溶融深さや溶融径はこの熱伝導型の時間で決まり、また、この熱伝導型の状態で留めることが可能であるため、溶融深さのコントロールも可能となる。

Fig. 4 Difference of copper melting condition with CW (a) IR and (b) green laser.

2.2 CW レーザーによる溶融状態の違い

Fig. 4に連続波 (Continuous Wave, CW) の基本波とグリーンレーザーによる銅の溶融状態を示す。これはレーザー照射開始から溶融が開始されるまでをそれぞれ5回繰り返した写真である。前述した溶融のメカニズムにより、基本波による溶融はレーザー照射から溶融開始までの時間にばらつきが生じるが、グリーンレーザーではほぼ同時に溶融が開始されている。また、基本波による溶融はキーホールの形成が見られ、レーザー照射から溶融が開始されるまでに時間を要するにもかかわらず、一旦溶融が開始されると短時間でキーホール状態にまで進むことがわかる。一方グリーンレーザーによる溶融はレーザー開始後すぐに始まり、熱伝導型を保っていることが分かる。

2.3 銅の表面状態の差による溶融状態の違い

Fig. 5に異なる表面状態の銅の溶融状態を示す。表面状態は(1)未処理(2)粗し(3)研磨(4)酸処理した4種類である。基本波による溶融は銅の表面状態に大きく依存し、例えば、研磨状態のものでは溶融が開始されていない状態にもかかわらず粗しおよび酸処理した表面のものは強く溶融されておりスパッタの発生も確認される。一方、グリーンレーザーによる溶融はいずれの表面状態でも同一の溶融状態となっている。通常、レーザーの反射率は金属表面状態によって変わり、研磨面のような清浄な表面の反射率が高く、粗い表面の反射率が低く吸収率が高い。前述のように銅に対する基本波の吸収率は低く、未処理表面の銅に対しては5%程度と考える。表面を粗し・酸処理あるいは研磨した面では未処理表面より吸収率が数%増減する。このような数%の変動でも研磨面と粗し表面では吸収率は数倍の相違となり溶融状態に大きな影響が生じる。一方グリーンレーザーは未処理表面の銅に対して40%程度の吸収率で

Fig. 5 Welding condition differences between CW (a) IR and (b) green laser with different surface condition.

あるため、表面処理による数%の増減は変動率としては小さく溶融にほとんど影響しない。

2.4 基本波とグリーンレーザーの銅溶融メカニズム

前述のように基本波の銅の反射率は98.5%、すなわち吸収率は1.5%、一方のグリーンレーザーの反射率は60%、すなわち吸収率は40%である。また、この吸収率は表面温度や銅の形態によっても変わる。表面温度が上昇するとともに吸収率も徐々に上昇する。その後温度が融点に達し形態が固体から液体になるときに吸収率がステップ上に上昇する。さらにこの溶融が熱伝導型からキーホール型に移行しキーホールが形成され始めると吸収率がさらに上昇し深いキーホールが形成されると最終的に90%以上まで吸収率が上昇する⁵⁾。この状態になると基本波でもグリーン波長でも同程度の吸収率になる。この変化の状態をFig. 6に示す。すなわち基本波による銅の溶接は室温の非常に吸収率の低い状態から液体、さらにキーホールが形成されるにしたがって急激に吸収率が上昇し、この吸収率の上昇をコントロールできず溶接が不安定になる。また銅が固体状態のとき吸収率が低いため溶融させるためにパワー密度の高いレーザーを照射する必要があるが一旦溶融を開始するとこのパワー密度では一瞬のうちにキーホール溶接に移行してしまう。すなわち、基本波による銅の溶接は熱伝導型の溶接状態を保持できず、固体の加熱状態かキーホール型溶融のいずれかの状態になってしまう。以上のように基本波による銅溶接の不安定はこのような最終的には20~30倍にもなる吸収率の変化に大きさに因るものと考えられる。一方、グリーン波長の吸収率も同様に变化するが、固体の室温状態ですでに吸収率が40%

Fig. 6 Change of absorption rate with laser power intensity.

Fig. 8 Input-output characteristics of 1 kW CW green laser.

Fig. 7 Green laser oscillator.

程度であるためその後の熔融状態への吸収率の変化や深いキーホール状態での吸収率の上昇は変化率としては大きくなくせいぜい倍程度となる。この変化率の大きさの差が基本波長とグリーン波長による銅の溶接のしやすさの差になっていると考えられる。

3. グリーンレーザー発振器

TRUMPF のグリーンレーザーは波長変換方式を用い、Disk レーザーの基本波 (1030 nm) から第二高調波 (515 nm) を発生させる。Fig. 7 に発振器の基本構造を示す。Disk レーザーの共振器内に波長変換用の非線形結晶を配置し、基本波がこの結晶を通過することで第二高調波である 515 nm の波長のレーザーが生成される。その後 1030 nm と 515 nm のレーザーが共振器内で共存するが、共振器内に 515 nm の光のみを透過する膜をコーティングした折り返しミラーを設けることで、この折り返しミラーから 515 nm の光のみを取り出す。共振器内で波長変換を行うことで変換効率が高い。

Fig. 8 に 1 kW のグリーンレーザーの変換前の基本波の出力と変換により生成される第二高調波の出力の関係を示す。図から分かるようにグリーンレーザー 1 kW 発振時の基本波から第二高調波への光-光変換効率は約 47% である。このグリーンレーザーは Disk レーザーの基本波を波長変換し生成しているため、基本的には基本波の特徴を有しており、高出力にもかかわらず高ビーム品質を維持している。TRUMPF はパルス発振と連続発振の 1 kW および 2 kW のグリーンレーザーを有している。Table 1 に TRUMPF のグリーンレーザー発振器の仕様を示す。平均出力 400 W、ピーク出力 4 kW のパルスレーザーは BPP=4 mm・mrad でコア径 100 μm のファイバーに導入可能、出力 1 kW の CW レーザーは BPP=2 mm・mrad と BPP=4 mm・mrad の 2 機種でそれぞれ 50 μm と 100 μm のコア径のファイバーに導入可能、出力 2 kW の CW レーザーは BPP=6 mm・mrad でコア径 150 μm のファイバーに導入可能である。また、ディスクレーザーは発振器から出射されたレーザーをファイバーまで空間伝送させファイバーのコア径以下に集光しファイバーに導入する。このように空間を伝送させるため、折り返しミラーを複数設置することでビーム品質を維持したまま複数光路のファイバーに導入可能である。現在、標準で 2 光路仕様である。

4. グリーンレーザーによる銅溶接への適用

グリーンレーザーによる銅溶接の特徴は前述のように再現性が高いことと熱伝導型溶接により精密な溶接深さのコントロールが可能なことである。この特徴を生かしたアプリケーションの一例として銅薄板のボンディングがある。セラミックス基板上にボンディング層として 0.15 mm 厚の銅コーティングを施しその上に 0.3 mm 厚の銅板を溶接するのにグリーンレーザーを用い、0.3 mm 厚の銅板を貫通溶融後 0.15 mm 厚の銅コーティング層の中間で溶接を止める。このような浅い溶接の深さ制御は基本波では不可能で

Table 1 Specification of TRUMPF green laser.

	TruDisk Pulse 421	TruDisk 1020	TruDisk 1021	TruDisk 2021
Pulse peak power	4 kW	1 kW	1 kW	2 kW
Average Power	400 W	1000 W	1000 W	2000 W
Wavelength	515 nm	515 nm	515 nm	515 nm
Pulse duration	0.3 ... 50 ms	cw	cw	cw
Max. pulse energy	40 J	---	---	---
Min. fiber core diameter	$\geq 100 \mu\text{m}$	$\geq 50 \mu\text{m}$	$\geq 100 \mu\text{m}$	$\geq 150 \mu\text{m}$
Fiber cable length	10, 20 m	10, 20 m	20 m	10, 20 m
Number of outputs	max. 2	max. 2	max. 2	max. 2
Beam Parameter Product	4 mm·mrad	2 mm·mrad	4 mm·mrad	6 mm·mrad

Fig. 9 Welding of copper bonding layer with green laser.

Fig. 10 Welding of copper terminal with green laser.

あり、銅に対して吸収率の高い短波長でのみ可能となる。**Fig. 9**に0.15 mm厚のコーティング層の中間で溶接を止めた時の外観と断面の写真を示す。

また、グリーンレーザーは銅に対して吸収率が高く反射光が少ないため、反射光による周囲への影響が少ない。こ

の特性を生かし、**Fig. 10**のような樹脂に囲まれた位置にある端子の溶接が可能となる。基本波による同様の溶接では溶接部からの反射光により端子周囲の樹脂に焼けや溶けが生じてしまうが、グリーンレーザーはこのような周囲のダメージがないため、直接銅端子の溶接が可能になる。画像

認識により端子の溶接位置を特定することで自動化を図ることも可能である。

5. 結 言

以上述べてきたようにグリーンレーザーは銅に対して吸収率が高いため、再現性が良く安定した加工ができ、熱伝導型溶接による精密な溶融深さ制御が可能という様々な加工上の利点を有する。今後車の電動化や情報社会の高度化により電気を流し駆動するデバイスが増え、銅の加工需要が格段に増える。このような加工に対して高品質な銅の加工ができるグリーンレーザーは加工ツールとして重要性が高まっていくものと思われる。また、基本構造がディスクレーザーで波長変換によりグリーンレーザーを生成する方式は堅牢性、高出力、高ビーム品質など多くの利点を有し、レーザーの自動化への高い適用性とあいまって今後多くの

量産ラインへの導入が期待される。

参 考 文 献

- 1) A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. OPOWER: "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers", *Appl. Phys. B*, **58** (1994), 365.
- 2) H. Po, J. Cao, B. Laliberte, R. Minns, R. Robinson, B. Rockney, R. Tricca, and Y. Zhang: *Electron. Lett.* **17** (1993), 1500.
- 3) 国立天文台編: "理科年表", 丸善, (2007), 445.
- 4) S. Engler, R. Ramsayer, R. Poprawe: "Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers". *Physics Procedia* **12** (2011), 339-346.
- 5) 片山聖二: "レーザー溶接", 溶接学会誌, **78-2** (2009), 40-54.

代表者メールアドレス

中村 強 tsuyoshi.nakamura@trumpf.com