

発表者氏名に下線を付すこと

# 異波長重畳レーザ・・・(和文タイトル)・・・プラズマとキーホール および反射光の挙動\*

著者名\*\*, 著者名\*\*\*, 著者名\*\*\*, 著者名\*\*\*

## Behavior of Laser-Induced Plasma,・・・(英文タイトル)・・・Keyhole and Reflected Light during Laser Superimposed Beams of Different Wavelengths\*

By 英文著者名\*\*, 姓 名\*\*\*, 英文著者名\*\*\* and 英文著者名\*\*\*

This paper deals with the behavior of a keyhole and a laser-induced plasma observed during laser welding of several metals with a single YAG laser or superimposed two beams through the・・・(アブストラクト)・・・ultra high-speed video camera, with the objective of understanding enhanced beam absorption due to・・・(アブストラクト)・・・two different wavelength laser beams. Moreover, reflected YAG laser beams were measured by photodiodes,・・・(アブストラクト)・・・and the relationship between the keyhole behavior and the reflected-laser photodiode signal was investigated to・・・(アブストラクト)・・・clarify rapid welding phenomena. It was observed that the behavior of a keyhole and a laser-induced plasma・・・(アブストラクト)・・・during laser welding was considerably different between a single beam and combined two different beams.

**Key Words:** Key Words, Key Words, Key Words, Key Words, キーワード, キーワード, キーワード, キーワード

### 1. 緒 言

最近, CO<sub>2</sub>レーザや Nd:YAG レーザを利用した溶接の実用化が図られてきている. ところが, このような赤外・近赤外線レーザは, 純アルミニウムや純銅のような高反射率・高熱伝導率の金属材料に対しては, 反射損失と熱伝導損失が大きいので, 深溶込みの溶融溶接部を得ることが一般に困難である. そこで, 著者ら<sup>1,2)</sup>は, 各種金属材料にパルス YAG レーザと Q スイッチ第 2 高調波 (SHG) YAG レーザとの重畳レーザを照射し, YAG レーザ溶融特性の改善に対する SHG YAG レーザの効果について検討した. その結果, 異波長重畳レーザ照射では, 使用した金属材料すべてにおいて溶融特性が向上し, 特に, 純アルミニウムや純銅などの高反射率の金属材料でも, 溶込み深さやエネルギー吸収率を大幅に増加できることが判明した. この場合, Q スイッチ SHG YAG レーザによって形成されたキーホールの中に基本波パルス YAG レーザが入り, 吸収率と溶融体積が増加したことが推察されたが, その詳細は不明である.

レーザ溶接では, 従来, 短時間の溶接現象を理解するために, 高速度カメラによるキーホール挙動やプラズマ挙動の観察, X 線透視装置によるキーホール挙動のリアルタイム観察, フォトダイオードやマイクロフォンによる溶接中の反射光やプラズマ/ブルームの発光・音響挙動のモニタリングなど, 種々の手法<sup>3-8)</sup>が検討されてきている. ところで, 異波長重畳レーザ溶接における溶込み深さの増加および吸収率の向上のメカニズムを解明するためには, 超高速ビデオ観察法や反射光計測法の適用が有効と考えられるが, それらによる検討はまだ行われていない.

そこで, 本研究では, 異波長重畳レーザ溶接における溶接現象およびレーザ吸収率向上のメカニズムを明らかにするため, 超高速カメラとフォトダイオードを用い, 基本波パルス YAG レーザ単独照射と異波長重畳レーザ照射時のレーザ誘起プラズマ/ブルーム挙動およびキーホール挙動を観察し, それと同時に材料表面からの反射光をリアルタイムに計測して, それぞれの特徴と差異について比較検討を行い, レーザ溶接時の溶融およびキーホール生成挙動, レーザの吸収率と表面状態との関連性, キーホールの安定化などに関する知見を得た.

\*原稿受付 平成〇年〇月〇日 平成〇年度秋季全国大会で発表

\*\*学 生 員 〇〇大学工学研究科 Student Member, Graduate School of Engineering 〇〇 University

\*\*\*正 員 〇〇大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute 〇〇 University

## 2. 使用材料, 実験装置および実験方法

### 2.1 使用材料

使用材料は, 板厚 6 mm のアルミニウム合金 A5083 および純アルミニウム A1050, 板厚 10 mm のステンレス鋼 SUS 304 ならびに板厚 3 mm の純銅であり, 前報<sup>1)</sup>と同一である.

### 2.2 実験装置

使用したレーザ装置は, ミヤチテクノス(株)製パルス YAG レーザ装置 ( $\lambda=1,064$  nm, 最大平均出力: 400 W, ピーク出力: 6 kW) および Lee Laser 社製 Q スイッチ第 2 高調波レーザ装置 (SHG:  $\lambda=532$  nm, 最大平均出力: 50 W, ピーク出力: 40 kW) である. 基本波パルス YAG レーザは, 最大エネルギー: 150 J/P, 最大パルス幅: 30 ms 内で出力とパルス波形を自由に設定でき, 光ファイバ (コア径: 0.6 mm) により伝送される. 本研究では矩形波形を用いた. Q スイッチ SHG YAG レーザは, LD 励起 Nd: YAG レーザの基本波長 1,064 nm の連続発振を音響光学 (Acusto-Optic: AO) 効果によって Q スイッチング化し, 基本波長を LBO 結晶により 532 nm に変調されたものである. 周波数は 5~50 kHz の間で, 1 kHz の桁で設定できる. この Q スイッチ SHG YAG レーザはパワーが安定するまでにある程度の時間を要するため, パワーモニタリング装置を設置して出力の安定化を確認した後で実験を行った. 基本波パルス YAG レーザと Q スイッチ SHG YAG レーザを重畳させるため, 同軸光学<sup>1, 2)</sup>

を製作して両方のビームが一つのビーム経路となるようにし, 焦点距離  $f=100$  mm の単レンズで集光した. 溶接は 0.6 mm/s の速度で行った.

### 2.3 実験方法

キーホール挙動とレーザ反射光との関連性を明らかにするため, 超高速ビデオカメラとフォトダイオードを横河電機(株)製の A/D 変換アナライザにより同期させ, キーホール挙動の撮影と反射光信号の検出を同時に行った. 使用装置とその配置図を Fig. 1 に示す. 用いた超高速ビデオカメラは, 最大 40,500 コマ/秒 (以後, f/s と記す) まで超高速撮影が可能である NAC 製エクタプロ HS-4540 である. 超高速カメラは材料表面に対して俯角 60 度に設置し, 40,500 f/s でキーホール表面挙動の観察を行った. フォトダイオードは, 浜松ホトニクス社製の高速型のフォトセンサアンプ C6386 で, フォトダイオードを内蔵し, 長さ 1 m の光ファイバ (NA: 0.56) を用いて受光できる. フォトダイオードは試料面に対して 80°, 45° および 10° に設置した. フォトダイオードから検出した信号は A/D 変換アナライザにより 100 kHz のデータ処理速度で取り込んだ. 溶接時に熔融池からの基本波パルス YAG レーザのみを受光するために, フォトダイオード用に基本波パルス YAG レーザ専用干渉フィルター (1,064±3 nm) と Q スイッチ SHG YAG レーザの波長を完全にカットするダイクロイックミラーを採用した. キーホール挙動観察のための照明用光源としては Spectra-Physics 社製 BeamLok2060 の Ar<sup>+</sup>レーザ ( $\lambda=514.5$  nm,  $P_0=2$  W) を

図 版

Fig. 1 Aaaaaa aaaaa aaaaa aaaaa aaaaa

用いた. 熔融池を照らす照明光源である Ar<sup>+</sup>レー



### 3.2 異波長重畳レーザー誘起プラズマの挙動

各種金属材料に基本波パルス YAG レーザを単独照射し、溶接中の誘起プラズマを高速度ビデオで観察した。SUS 304 での結果を Fig. 4 に示す。レーザーは、エネルギー27.5 J/P、パルス幅 5 ms の矩形波で、焦点距離 100 mm の集光レンズで、He シールドガス（30 l/min）中で照射されている。レーザー誘起プラズマは、パルス YAG レーザ照射開始（0 μs）から約 150 μs 後に薄いプラズマとして発生し、成長していく。プラズマの発光は、ある時間経過後、強弱を繰り返しながらレーザー照射が終了するまで続き、それから約 0.7 ms 後に完全に消滅した。また、プラズマの発光強度は、レーザー照射後約 3.8 ms で強く、プラズマが膨張していた。SUS304 の誘起プラズマは、レーザー照射中、上方へ成長するにつれて約 15° 程度（逆円錐状に）広がるが、比較的安定な形状を呈していた。このプラズマ挙動は、レーザー照射中のキーホール挙動と関連性<sup>6)</sup>があり、キーホールがあまり大きく変動していないことと対応していると考えられる。この点は次章で検討する。

Fig. 5 は SUS 304 における異波長重畳レーザー照射による誘起プラズマの時間的変動を示す。重畳照射レーザーの条件は、Q スイッチ SHG YAG レーザでは、平均パワー40 W、パルス周波数 10 kHz で、その他の条件は Fig. 4 と同一である。Q スイッチ SHG YAG レーザは 100 μs 毎に照射されており、そのプラズマの例を写真(a), (b), (c), (i)および(l)に示す。時刻約1260 μs の(a)は Q スイッチ SHG YAG レーザ単独照射による励起プラズマを示しており、発光強度は弱いことがわかる。(b), (c)および(i)は、重畳照射時のプラズマであり、発光強度は単独照射の場合より強い。また、プラズマの発光強度は次の重畳レーザー照射が起こる直前には弱い

ことが観察される。すなわち、プラズマ挙動は一般に約 100 μs の周期で激しく変動することがわかった。異波長重畳レーザー照射による誘起プラズマは、(e)でも大きく、基本波パルス単独照射時より速く発光し、その強度も高い。また、写真(l)から、基本波パルス YAG レーザ照射終了後の溶融池に Q スイッチ SHG YAG レーザが照射されると、その発光強度は単独照射の場合(a)より高いことがわかる。さらに、(g)および(h)では、スパッタが白色の塊状に見られる。これは、Fig. 4 の基本波パルス YAG レーザ単独照射では見られなかったものである。

以上の結果から、異波長重畳レーザー照射時の誘起プラズマは、基本波パルス YAG レーザ単独照射時の誘起プラズマより早く発光し始め、激しく変動し、その強度も高いことが判明した。したがって、基本波パルス YAG レーザビームは、Q スイッチ SHG YAG レーザ単独照射により開いたキーホール内に吸収されやすく、キーホールが早期に大きくなり、さらに、そのキーホール中に再び Q スイッチ SHG YAG レーザビームがより容易に繰り返し投入されたため、異波長重畳レーザー照射時にはより深くなり、溶融部体積が増加したことが推察される。

### 3.3 異波長重畳レーザーにおけるキーホール挙動

各種金属材料に基本波パルス YAG レーザ単独照射と異波長レーザー重畳照射を行い、溶融池とキーホール開口部の生成状況を高速度ビデオカメラで観察した。

A5083 の単独照射時の結果を Fig. 6 に示す。キーホールは、パルスレーザー照射後多少時間が遅れて形成され、広がったり、狭くなったり、時間とともに激しい変動した。キーホール径は、最大で 1 mm 程度になり、およそ 430 μs の周期

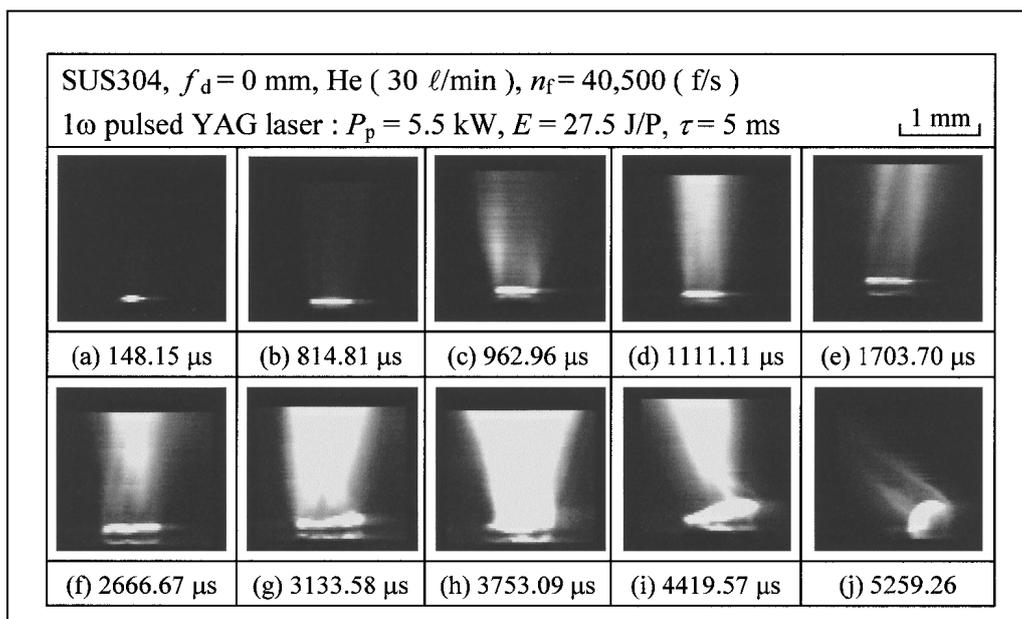


Fig. 4 Ddddddddddddddddd ddddddddd ddddddddd ddddddddddddddddddddddddd

で変動した。

異波長重畳レーザー照射時のキーホール挙動を Fig. 7 に示す。時刻 $-25 \mu\text{s}$ の写真(a)中の黒斜線は、Q スイッチ SHG YAG レーザ照射によって形成されたアンダフィル状の溶接ビードである。Q スイッチ SHG YAG レーザのビーム径は、約 $0.1 \text{ mm}$ であるため、写真上において Q スイッチ SHG YAG レーザによるキーホールの確認は困難であるが、溶込み形状がキーホール型であることから、Q スイッチ SHG YAG レーザ照射によって、キーホールが生成していると考えられる。そして、Q スイッチ SHG YAG レーザ単独照射でのキーホールは、パルス YAG レーザの重畳照射時に、より速く大きくなるが、パルス YAG レーザ単独照射の場合ほど激しく変動しないことがわかる。

以上の結果より、Q スイッチ SHG YAG レーザ照射によって開いたキーホールに、パルス YAG レーザが照射されるため、ビームの吸収率はパルス YAG レーザ照射の初期から高くなる。また、キーホールは SHG YAG レーザの高ピークパワーによって蒸発が促進されるため、基本波パルス YAG レーザ単独照射の場合よりも深くなり、さらに、約 $100 \mu\text{s}$ 毎に Q スイッチ SHG YAG レーザが照射されるために部分的な崩壊が防止されることにより安定化すると考えられる。

A1050 に基本波パルス YAG レーザ単独照射および異波長レーザー重畳照射を行った場合の溶融池とキーホール開口部の時間的挙動を Fig. 8 および 9 に示す。単独照射の場合、純アルミニウムでは、A5083 合金の場合よりピークパワーが高いにもかかわらず、キーホールは約 $2.4 \text{ ms}$ とはるかに遅れて開き始めた。そして、このキーホールは、A5083 の場合ほど激しく変動しなかった。この結果から、キーホールの変動は、キーホール深さや蒸発温度が Al の約 $1/2$ と低く、表面張力を低下させる Mg に大きく影響されていることが推察される。異波長重畳溶接の場合、Fig. 9(a)に Q スイッチ SHG YAG レーザによって形成された溶接ビードが見られ、(b)に Q スイッチ SHG YAG レーザのビーム径に相当する約 $0.1 \text{ mm}$ の黒色のホールが観察される。また、重畳照射の場合、基本波パルス YAG レーザ単独照射より短時間に溶融池が大きくなり、キーホール開口部も広くなる様子が認められる。

Fig. 10 は、板厚 $0.1 \text{ mm}$ の純銅に異波長重畳レーザーを照射して、重ね溶接時に撮影した溶融池挙動を示す。写真(a)は、Q スイッチ SHG YAG レーザにより形成された溶接ビードを示し、(b)~(e)は、異波長重畳レーザー照射によって形成された溶融池を示す。溶融池は、時間と共に大きくなり、最終的には、基本波パルス YAG レーザのビーム径に相当する大きさにまで成長した。しかし、キーホールは確認できなかった。基本波パルス YAG 単独照射では、全く溶けないう純銅でも、異波長重畳レーザー照射では溶融することが観察され、吸収率が増加することが確認された。

### 3.4 異波長重畳レーザーにおける反射光の時間的挙動

A5083 に基本波パルス YAG レーザを単独照射して、反射光をフォトダイオードで測定し、キーホール挙動を高速カメラで同期観察した。測定された反射光強度の時間的変化をその時の観察写真と共に Fig. 11 に示す。フォトダイオードの発光強度は材料に対して俯角 $80^\circ$ で測定したものである。反射光強度は、レーザー照射開始後、 $0.15 \text{ ms}$ までは強いが、その後表面が溶融し始めると急激に低下している。そして、図中の(d)および(e)の写真より、キーホールが開いてからレーザー照射が終わるまで、反射強度は激しく変動している。特に、キーホールが狭くなると、反射光強度が高くなることがわかった。

Fig. 12 は A5083 の反射光の強度変化に及ぼす溶込み形態の影響を示す。図(a)の熱伝導型では、激しい反射光強度の変動は見られず、反射光は浅い角度ではほとんど検出されない。一方、(b)のキーホール型での反射光強度は、いずれの角度でも検出され、キーホールの形成中に激しく変動していることがわかる。以上の結果から、反射光信号の変動は、熱伝導型の溶接では溶融池の揺動は小さいために少なく、一方、キーホール型では溶融池表面が激しく揺動し、キーホールも崩れやすいために大きいと推察される。

次に、A5083 に異波長重畳レーザー照射を行ったときに得られた反射光強度の時間的変化を Fig. 13 に示す。反射光強度は、いずれも基本波パルス YAG レーザの照射開始直後から単独照射の場合よりも低い。これは、SHG YAG レーザ照射によって細いキーホールが予め形成されている効果と考えられる。また、(a)では、 $10^\circ$  および  $45^\circ$  の低角度でも反射光が検出されており、異波長重畳レーザー照射時にはキーホールが開いていることと関連している。なお、異波長重畳レーザー照射の場合、反射光の変動は、Fig. 11 に示したようなキーホール形成時の変動ほど激しくないことがわかる。これは、異波長重畳レーザー照射の場合には基本波パルス YAG レーザ単独照射の場合よりキーホールが安定化していることと対応していると判断される。

## 4. 結 論

本研究では、アルミニウム合金 A1050 および A5083、ステンレス鋼 304 ならびに純銅に対して、基本波パルス YAG レーザ単独照射または異波長重畳レーザー照射による溶接を行い、溶接時のレーザー誘起プラズマやキーホール挙動を観察し、さらに、キーホール挙動観察と反射光の同期計測を行い、基本波パルス YAG レーザと異波長重畳レーザー照射時における溶接現象について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 各金属材料での溶込み深さおよび溶融面積は、異波長重畳レーザー照射の場合、各レーザー単独照射の場合より大幅に増大することが確認された。
- 2) ステンレス鋼に対する基本波パルス YAG レーザ単独照

射では、レーザ誘起プラズマは、照射開始後、多少遅れて生成し、時間の経過につれて成長しながら、高輝度で発光した。このプラズマはパルス照射時間全般的にあまり激しく変動しなかった。

- 3) ステンレス鋼の異波長重畳レーザ照射による誘起プラズマは、パルス YAG レーザ単独照射時より早く発生し、Q スイッチレーザのパルス周波数に相当する 100  $\mu$ s の周期で変動し、スパッタの激しい発生を伴うなど基本波パルス YAG レーザ照射とは異なる挙動が観察された。
- 4) アルミニウム合金のパルス YAG レーザ単独照射によるキーホールは、レーザ照射後、多少遅れて形成し、時間経過に伴って広がったり、狭くなったり激しく変動した。
- 5) アルミニウム合金の異波長重畳レーザ照射時のキーホールは、Q スイッチ SHG YAG レーザにより開いたキーホールの中に基本波パルス YAG が照射されるため、早く空き始め、パルス YAG レーザ単独照射時より安定であることがわかった。
- 6) 基本波パルス YAG レーザ単独照射時の純アルミニウムのキーホールは、あまり激しく変動せずに安定な挙動を呈した。この結果より、Mg が含まれた A5083 はキーホールが不安定になりやすいことが推察された。
- 7) 純アルミニウムの異波長重畳レーザ照射によるキーホールは、Q スイッチ SHG YAG レーザによって形成されたキーホールに基本波パルス YAG レーザが照射され、レーザ照射初期においては、基本波パルス YAG レーザビームの一部は、Q スイッチ SHG YAG レーザによって開いたキーホールの中に入り、その以外のビームは反射されることが確認された。しかし、キーホール開口時間は、基本波パルス YAG レーザ単独照射の場合より、はるかに早いことが判明した。
- 8) 純銅の異波長重畳レーザ照射による熔融池は、時間と共に大きくなり、最後は、基本波パルス YAG レーザのビーム径に相当する熔融池が形成された。基本波パルス YAG 単独照射では、全く溶けない純銅でも、異波長重畳レーザ照射では熔融することが観察され、吸収率が増加することが確認された。
- 9) フォトダイオードで検出された反射光は、キーホール挙動を反映し、熔融状態、熔融部形態、キーホール形状などによって異なることがわかった。特に、基本波パルス YAG レーザ単独照射の場合の反射光は、熔融までは高ピーク強度であるが、熔融に伴って急激に低くなり、キーホールが大きい場合、さらに低いことが確認された。また、キーホールが周期的に大きくなったり小さくなったりするため、反射光もそれに対応して変動した。さらに、異波長重

畳レーザ照射の場合、基本波パルス YAG レーザの場合より金属に対する吸収率が増加し、反射光の強度が低くなることが確認された。

- 10) 異波長重畳レーザ照射は、高ピークパワー密度の Q スイッチ SHG YAG レーザ照射によって開いたキーホールに基本波パルス YAG レーザが照射され、エネルギーの吸収率が増加し、キーホールの空き始める時間が早くなり、より長時間キーホールが形成されることがわかった。また、キーホール形成時には、約 0.1 ms 間隔で Q スイッチ SHG YAG レーザが照射される毎に蒸発が起り、深いキーホールが安定的に形成することが判明した。これらの結果から、長時間のキーホール形成中に、レーザエネルギーがより多く吸収され、より深いキーホールが形成されたことが推察される。

#### 謝 辞

本研究は、国際共同プロジェクト研究 IMS/SLAPS の一環として行われたものである。ここに深甚の謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 文 鍾賢, 水谷正海, 片山聖二, 松縄 朗: 「異波長重畳レーザによる各種金属材料の熔融特性」, 溶接学会論文集, (2002) (投稿中).
- 2) J.H. Moon, Masami Mizutani, Michio Goto, Seiji Katayama and Akira Matsunawa: "Melting Characteristics of Metals by Combined Laser Beams with Different Wavelength", Proc. of ICALEO 2000, LIA, (2000), Section E, pp.143-152.
- 3) W.Gatzwiler, D.Maishcner and E.Beyer: "On-line plasma diagnostics for process-controlling welding with CO<sub>2</sub> lasers", SPIE, Vol.1020 High Power CO<sub>2</sub> laser Systems and Applications, (1988), pp.142-148.
- 4) Akira Matsunawa, J.H. Kim, Seiji Katayama and Vlad Semak: "Experimental and Theoretical Studies on Keyhole Dynamics in Laser Welding", Proc. of ICALEO'96 (1996), Section B, pp.58-67.
- 5) Isamu Miyamoto and Kiyokazu Mori: "Development of In-Process Monitoring System for Laser Welding", Proc. of ICALEO '95, pp.759-767.
- 6) 片山, 金, 松縄: YAG レーザ溶接現象, レーザ熱加工研究会論文集, 40 (1997), pp.21-31.
- 7) Jurgen Griebsh, Helmut Hugel, Friedrich Dausinger and Marius Jurca: Quality Assurance in Pulsed Laser Welding, Proc. of ICALEO'95, (1995), pp.603-612
- 8) Naoki Seto, Seiji Katayama and Akira Matsunawa: "High-Speed Simultaneous Observation of Plasma and Keyhole Behavior during High Power CO<sub>2</sub> Laser Welding-Effect of Shielding Gas on Porosity Formation", Proc. of ICALEO'99 (1999), Section E, pp.19-26