発表者名に〇付すこと

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

〇著者名\*1，著者名\*2，著者名\*3

**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，CO2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ため，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１，２)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/プルームの発光・音響挙動のモニタリングなど，種々の手法３―８）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，超高速度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，超高速度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/プ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．

**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１)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㈱製パルスYAGレーザ装置（λ=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：λ=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スイッチイング化し，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１，２）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．

原稿受付　202x 年 ○ 月 ○ 日

\*1 学生員　○○大学 大学院工学研究科　Student Member, Graduate School of Engineering, ○○ University

\*2 正　員　○○大学 大学院工学研究院　Member, Faculty of Engineering, ○○ University

\*3 正　員　○○株式会社　Member, ○○ Co. Ltd.

　　**3.2**　異波長重畳レーザ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，レーザ照射中のキーホール挙動と関連性６）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)，(e)，(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)，(e)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の周期で変動した．

　異波長重畳レーザ照射時のキーホール挙動をFig. 7に示す．時刻－25 μs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 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 μs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 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 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 mmの純銅に異波長重畳レーザを照射して，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，全く溶けない純銅でも，異波長重畳レーザ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度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°で測定したものである．反射光強度は，レーザ照射開始後，0.15 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°および45°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照射による溶接を行い，溶接時のレーザ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，異波長重畳レーザ照射の場合，各レーザ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 μs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溶融池は，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溶融池が形成された．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．

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溶融特性」，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 CO2 lasers”, SPIE, Vol.1020 High Power CO2 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 CO2 Laser Welding-Effect of Shielding Gas on Porosity Formation”, Proc. of ICALEO'99 (1999), Section E, pp.19-26