

出力変調溶接によるポロシティの抑制*

- 大出力 CO₂ レーザ溶接におけるポロシティ抑制に関する研究 (第3報) -

川口 勲**, 塚本 進***, 荒金 吾郎***, 中田 一博****

Suppression of Porosity by Laser Power Modulation*

- Study on Prevention of Porosity in High Power CO₂ Laser Welding (Report 3) -

by KAWAGUCHI Isao**, TSUKAMOTO Susumu***, ARAKANE Goro*** and NAKATA Kazuhiro****

Recent progress in high power laser resonator has been extending the welding application to the heavy section plate structures in a variety of industries. One of the major problems in the deep penetration welding is formation of some weld defects such as porosity and hot cracking. A final goal of a series of our investigations is to develop defect free laser welding process with the depth of more than 20mm. In the present paper, pulse modulation of the laser power has been attempted to suppress the porosity. Dynamic keyhole behaviour was observed by a micro-focused X ray transmission imaging system at the framing rate of 1000 s⁻¹. Keyhole stability was evaluated by variation of keyhole diameter with time. The porosity formation significantly depends on the modulation frequency. If the eigenfrequency of the keyhole radial oscillation is selected as the modulation frequency, the keyhole is perturbed more significantly than the CW welding, resulting in forming a lot of large porosity. On the other hand, the porosity is effectively suppressed at the eigenfrequency of the molten pool oscillation. This is attributed to stabilizing the keyhole by controlling the laser / molten metal interaction periodically.

Key Words: Laser welding, High power laser, Keyhole, Porosity, Capillary instability, Eigenfrequency, Power modulation

1. 緒 言

レーザ発振器の高出力化・高品質化に伴い、厚板の溶接にレーザを適用することが可能になってきた¹⁻³⁾。しかし、溶込み深さの増加と共にポロシティや凝固割れなどの溶接欠陥が発生しやすくなり^{4, 5)}、これが実用化の障害となっている。著者らの一連の研究では、20 mm 程度の深溶込み溶接において、ポロシティの発生を確実に防止する技術を開発することを目的としている。

前報⁶⁾では、非貫通深溶込み溶接におけるキーホールの動的挙動を X 線透過法により観察し、ポロシティがキーホール先端で起こる不安定現象により発生することを明らかにした。Fig. 1 はポロシティの発生機構を模式的に示したものである。元来細くて長いキーホールは不安定な形状であり⁷⁾ (Fig. 1(a))、キーホール深さが円周より大きくなると Fig. 1(b) に示すようにくびれと膨らみが発生し、くびれ部でキーホールが閉じる方向に力が働く。しかし、くびれが発生

した位置では、高パワー密度のレーザが照射されるため高温に加熱され、このときに起こる蒸発の反作用（蒸発反跳力）により、再びキーホールが開く。このように、キーホールは径方向に振動しながらその形状を保つ。一方、くびれ部で、レーザパワーが消費されたり、蒸発時に発生した金属プラズマによりレーザが吸収されたりすると、キーホール底部まで到達するレーザのパワー密度がキーホールを維持するための臨界値より下回る。その結果、先端部付近で不安定現象によりキーホールが閉じ、先端が分離することにより気泡が発生する (Fig. 1(c))。また、先端で起こる不安定現象は、キーホールが径方向に大きく変動し溶融金属とレーザのランダムな相互作用が激しくなるほど起こりやすくなる。したがって、一般にキーホール変動が大きくなるほどポロシティの発生が顕著になる傾向にある。

一方、ポロシティの内部にはシールドガス中の He が残存していることが報告されている^{8, 9)}。このため、溶融鉄に対して溶解度の高いガスをシールドガスとして用いると、シールドガスが溶融金属中に溶解することにより、気泡の発生が防止できる。溶融鉄中の窒素溶解度は、Cr 量の増加とともに大きくなる。このため、Cr を多く含有するステンレス鋼では、ポロシティの発生を防止するために、しばしば窒素がシールドガスとして用いられる^{2, 10)}。このような手法はポロシティの防止に効果的であるが、限られた材料とシールドガスの組み合わせにのみ有効であり、すべての材料には適用することができない。

前述したように、ポロシティはキーホール変動が大きく

*受付日 平成18年8月24日 受理日 平成19年5月14日 平成13年度秋季全国大会で発表

**正 員 物質・材料研究機構 (現・石川島播磨重工業(株)) Member, National Institute for Materials Science (Present address: Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.)

***正 員 物質・材料研究機構 Member, National Institute for Materials Science

****正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

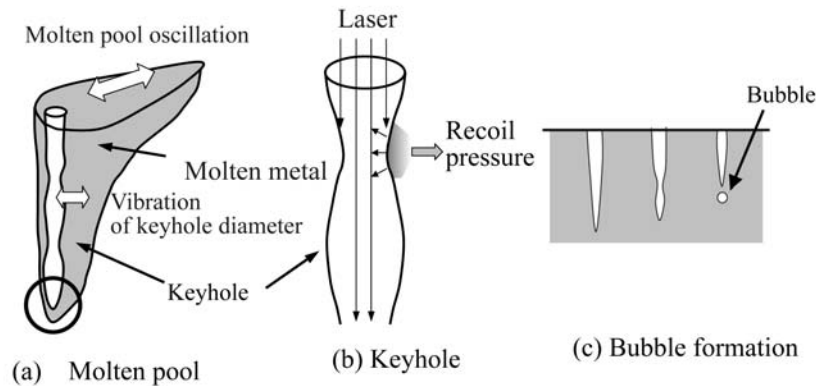


Fig. 1 Formation mechanism of bubble in laser welding.

なるほど発生しやすくなる。このため、キーホール形状を安定に保てば、ポロシティの発生が防止できるはずである。キーホールの径方向への変動は、レーザと熔融金属の相互作用により発生する。通常のCW溶接では、キーホール自身の固有振動や熔融池の固有振動をはじめとして、周波数の異なる数種の振動がキーホール及び熔融池に働く。その結果、キーホール周辺でレーザと熔融金属の相互作用がランダムに激しく起こり、キーホールが自発的に大きく変動するようになる。このようなキーホールのランダムな動きを安定化するには、ある特定の周波数でレーザ出力に変動を付与し、この周波数でキーホールの動きを共振させることが有効と考えられる。Ottoら¹¹⁾は、3.5kHz付近の高周波で出力変調を行うことにより、溶込み深さの変動（スパイク）が抑制されることを見出している。この原因は必ずしも明らかではないが、ある特定の周波数でキーホール変動が制御できる可能性を示している。瀬渡ら¹²⁾は、Al合金のレーザ溶接において、100Hzの周波数でパルス変調を行い、適切なデューティを選択することによりポロシティの発生が低減できると指摘している。また、著者ら¹³⁾は、溶込み深さ20mm程度の鋼板の溶接において、矩形波出力変調がポロシティ低減に対して有効な手段であることを指摘している。

以上のようにレーザの出力変調は、キーホール挙動を制御できる可能性を秘めている。このような観点から、本研究では、種々の周波数のもとでレーザの出力変調を行い、キーホールの安定性に及ぼす周波数の影響を検討した。また、その結果を基に、深溶込み溶接時にポロシティの発生を防止するための手法を提案する。

2. 実験方法

本研究では、レーザ出力に特定の周波数で変動を付与することにより、キーホールのランダムな振動を安定化し、ポロシティを防止することを目的とする。このため、種々の周波数の基でレーザ出力の矩形波変調を行い、キーホールの安定性ならびにポロシティの発生に及ぼす変調周波数

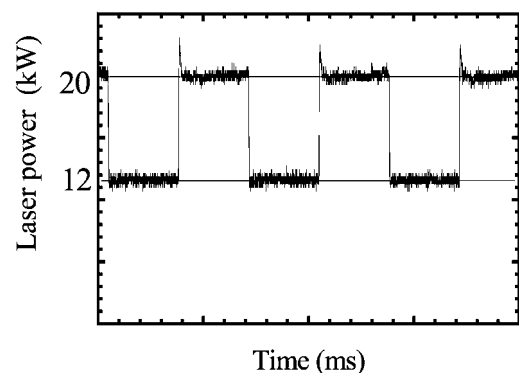


Fig. 2 Pulse modulation of laser power.

の影響を調べた。レーザ溶接装置は、出力変動周波数が5kHzまで追従する20kW CO₂レーザ発振器を用いた。本発振器の最大出力は、加工点で20kWであった。以下、出力の表示は、発振器出口出力を示す。溶接中のレーザ出力の変調波形は、Fig. 2に示すような矩形波を用い、1~1000Hzの範囲で周波数を変化させた。第1報¹³⁾では、ピーク出力一定の下で、ベース出力がポロシティの防止効果に及ぼす影響について検討を行い、ベースとピーク出力の差が小さすぎる場合には防止効果がなく、これが大きすぎるとスパッタの発生を伴ってポロシティが発生しやすくなることを述べた。本研究では、このときに得られた最適出力結果から、ピーク出力を20kW、ベース出力を12kWとし、実験を行った。レーザを集光させる放物面鏡には焦点距離が500mmのものを使用し、下向きビードオンプレート溶接を行った。用いた溶接速度は16.7mm/s、焦点外し距離は、0mmで行った。ガスシールド条件は、Heを内径φ4mmのノズルより前方から50L/minで流した。なお、供試材は、すべて溶接構造用鋼SM490Cを用いた。以上の溶接条件をTable 1にまとめる。溶接は、第1報と同様に、幅15mmの試験片を用いて行った。溶接後試験片側方からX線透過試験を行い、熔融断面積のうちポロシティの総面積が占める割合をポロシティ発生率(Pr(%))とし、この値でポロシティの発生傾向を評価した。

Table 1 Welding conditions.

Max. laser power at processing position	20kW
Peak laser power	20kW
Base laser power	12kW
Power modulation frequency	1~1000 Hz
Focal length	500mm
Shielding gas	He, 50L/min
Defocus distance	0 mm
Welding speed	16.7 mm/s

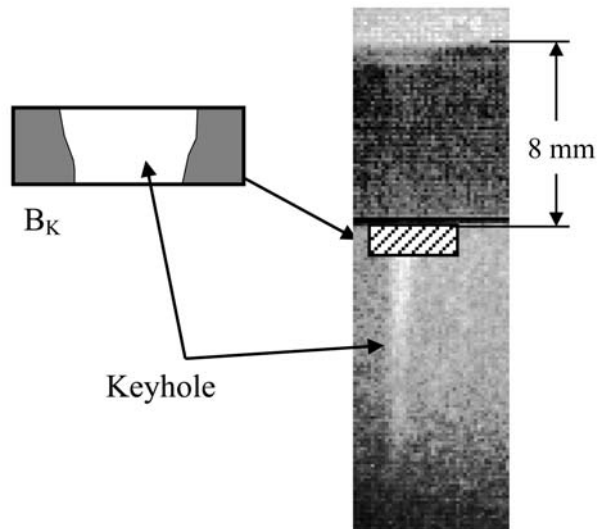


Fig. 4 Evaluation of keyhole fluctuation.

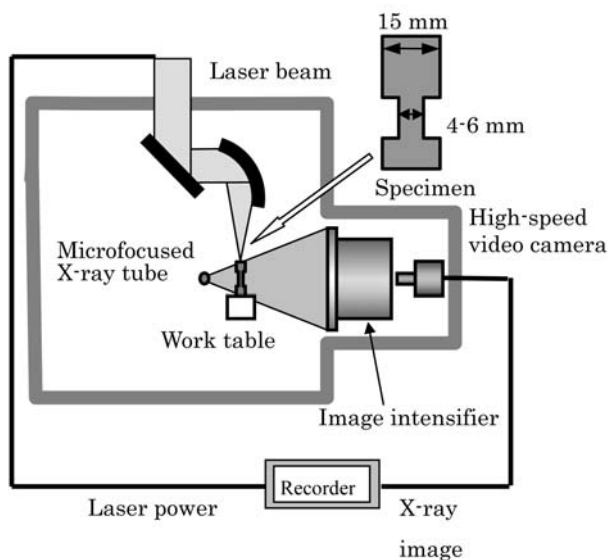


Fig. 3 Experimental setup of in-situ keyhole observation in laser welding.

先に述べたように、ポロシティはキーホールが径方向に大きく変動するにしがいが発生しやすくなる。このキーホールの変動、すなわちキーホールの安定性を評価するために、溶接中、X線透過法によりキーホールの動的挙動を観察した。その方法を Fig. 3 に示す。溶接中、マイクロフォーカス X 線を材料側方から照射し、イメージインテンシファイアによって可視化された透過 X 線像を、高速度カメラにより 1000 frames/s で撮影した。より高解像度な映像を得るために、試験片形状は、Fig. 3 右上図に示すように観察部位のみを狭隘化した。このような装置から得られたキーホールの画像の一例を Fig. 4 に示す。X 線透過像の各フレームにおいて、試験片表面から 8 mm の位置で、キーホールと直行する縦 7 ピクセル、X 横 15 ピクセル (縦 1 mm X 横 2.2 mm, 図中斜線部) の矩形領域を選択し、この矩形内の輝度の積分値 B_K を計測する。X 線透過像ではキーホールが白く、それ以外の部分はグレーに撮影されるため、 B_K はおおよそキーホール径に比例した値となる。そこで、 B_K の時間変化を計測することにより、キーホールの径方向への時間変動すなわちキーホールの安定性を評価した。

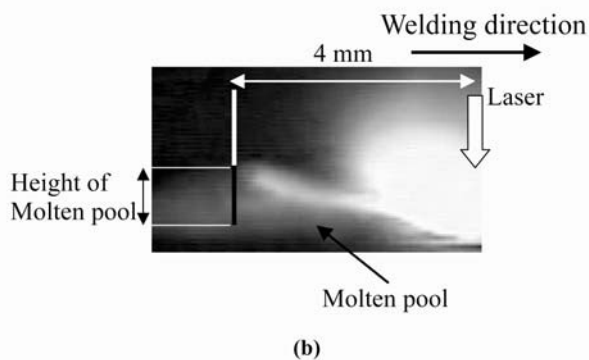
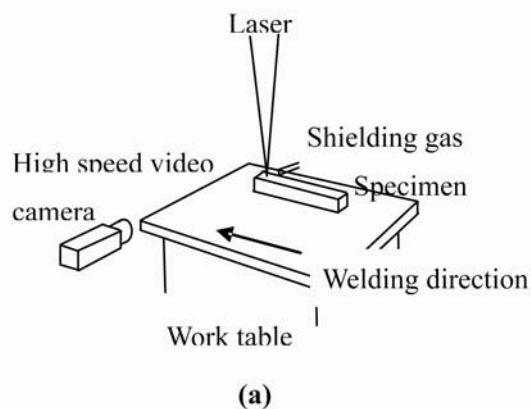


Fig. 5 Definition of molten pool height in laser welding.

また、後述するが、溶融池表面で発生する波の振動とキーホールの安定性が関連すると考えられたため、Fig. 5(a) に示すように、高速度カメラを用いて、溶接方向側方から 500 frames/s で溶融プール表面を撮影した。得られた画像から Fig. 5(b) に示すように、レーザ照射位置の後方 4 mm の位置で溶融池高さを計測し、その時間変動からプール表面における波の挙動を調べた。

3. 実験結果及び考察

3.1 ポロシティ発生率に及ぼす変調周波数の影響

各種周波数のもとで矩形波出力変調を行った結果、ポロシティ発生率が周波数に大きく依存することが分かった。Fig. 6 にパルスデューティ 50% で矩形波変調を行った時の出力変調周波数とポロシティ発生率 Pr の関係を示す。変調周波数が 16 Hz 付近で効果的にポロシティが抑制されていることがわかる。一方、同じ出力変調溶接においても、100 Hz 付近では、欠陥発生率が CW 溶接の結果と比べて非常に高く、最小値の 7.2 倍ものポロシティ発生率となった。したがって、周波数によっては、ポロシティの発生が促進されることがわかった。また、100 Hz を超え、より高周波側の領域では、CW 溶接の欠陥発生率に近づく傾向を示した。次に、デューティを 50% から 70% に変化した場合の欠陥発生率を Fig. 7 に示す。デューティ 50% では、16 Hz 付近で最もポロシティが抑制されていたのに対して、デューティ 70% ではこれが 13 Hz 付近へとシフトしており、最適周波数がデューティにより変化することがわかった。

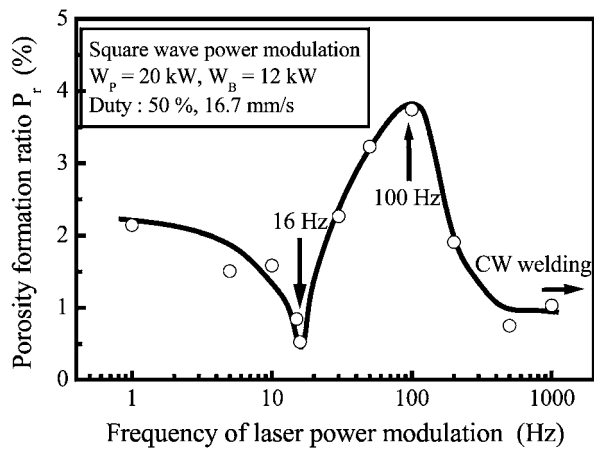


Fig. 6 Effect of power modulation frequency on porosity formation ratio Pr.

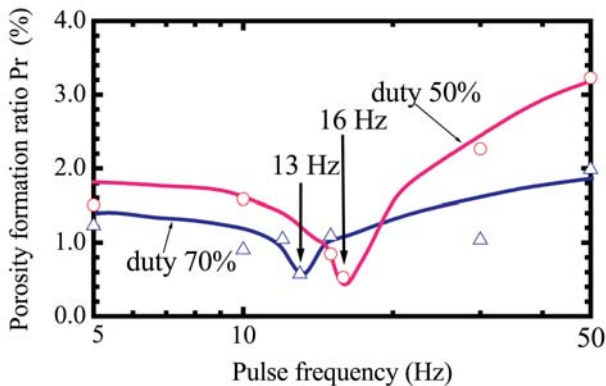


Fig. 7 Effect of duty cycle on optimum pulse frequency.

3.2 最適出力変調周波数と溶融池表面波の固有振動

前節で述べたように、レーザの出力変調はポロシティの防止に効果的である。またその防止効果は、変調周波数に大きく依存する。そこで、この時の最適周波数について解析を行った結果、溶融池表面で発生する波の固有振動周波数と密接に関係することがわかった。

Fig. 8 は、出力変調の各位相 (a)~(f) において、表面におけるプラズマと溶融池の様子を側方から高速ビデオカメラにより撮影した結果を示す。パルス溶接では、ベース出力からピーク出力に急激に出力が増加する (a) の時点で金属蒸気の発生によりプラズマが形成され、その直後 (b) において大量の溶融金属がキーホールから噴出する。噴出した溶融金属は溶融池表面に波を形成し、これが後方に移動し (fig. 8(c)), その後、溶融池後端で反射し (Fig. 8(d)), 再びキーホール内部へ戻る (Fig. 8(e) (f)). このように溶融池表面で波が往復運動を繰り返すが、ポロシティを防止する最適周波数がこの表面波の共振周波数すなわち溶融池の固有振動周波数とよく一致することがわかった。溶融池表面波の固有振動周波数 f (Hz) は、波の移動速度を v_w (mm/s)、溶融池長さ L (mm) とした場合、(1) 式で示される。

$$f = \frac{v_w}{2L} \quad (1)$$

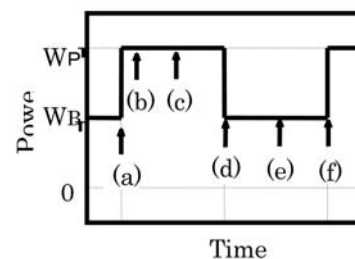
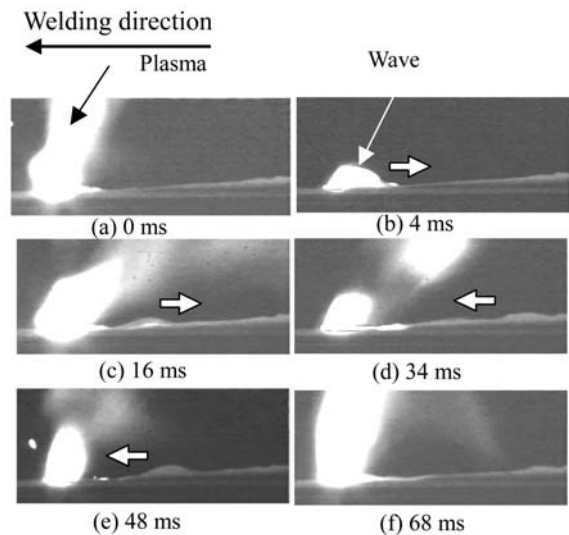


Fig. 8 Molten pool oscillation during pulse laser welding.

波の速度は、溶融池形状や溶融金属の粘性などの材料物性で決まるが、本実験の範囲内ではいずれも 630 mm/s と一定であった。したがって、最適周波数は、溶融池の長さにより決定される。デューティを 50% から 70% に変化させた場合、平均出力が上昇することにより、溶融池長さが、Table 2 に示すように大きくなる。この溶融池長さを、(1) 式に代入することにより得られた最適周波数は、デューティ 50% の場合は 16.1 Hz、70% の場合は 13.2 Hz となり、これは、Fig. 8 における実験により求めた最適周波数とよく一致した。この結果から、出力変動周波数を、表面波の固有振動と一致させることにより、ポロシティの発生を効果的に抑制できることが確認できた。

表面波の動きをより定量的に評価するために、キーホール後方 4 mm の位置で波の高さの時間変化を計測した。その結果を Fig. 10 に示す。変調周波数が溶融池表面波の固有振動と一致する 16 Hz の場合は、共振により波の変動と出力変動がよく対応していることがわかる。これに対して、最適周波数からわずかにずれた 12 Hz 及び 20 Hz の場合は波高の変動に乱れが生じ最適周波数と比べて、変調波形と波高の対応が明瞭ではなくなる。以上のように最適変調周波数においては、溶融金属がキーホールへ戻った時点で出力が高くなるため、溶融金属とレーザービームの相互作用を周期的に起こすことができ、その結果、溶融池の表面波もこの周波数で振動する。一方、周波数が最適値からずれた場合には、溶融金属の戻りと出力変動のタイミングが一致しないため、キーホール内部で溶融金属とレーザーの相互作用がよりランダムに発生するようになる。このため、キーホールの変動も最適周波数の場合と比べて、大きくなると思われる。

Table 2 Eigenfrequency of molten pool oscillation for different duty cycles.

Duty (%)	50	70
Wave velocity v_w (mm/s)	630	630
Molten pool length L (mm)	19.6	23.8
Eigenfrequency f (Hz)	16.1	13.2

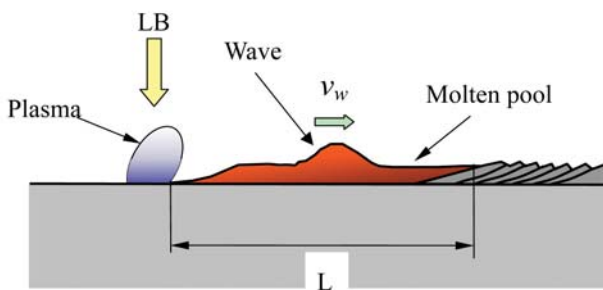


Fig. 9 Molten pool oscillation on pool surface.

3.3 出力変調によるキーホールの安定化

前節において、出力変調周波数を溶融池表面波の固有振動周波数と一致させることにより、ポロシティの発生を効果的に抑制できることがわかった。これは、表面波の固有振動周波数で出力変調を行うことにより、キーホール全体をこの周波数で安定に制御できているためと考えられる。そこで Fig. 4 に示した B_k の時間変化を調べることで各出力変動周波数のもとのキーホールの安定性を評価した。

Fig. 11(a) は、各出力変動周波数に対する B_k の時間変化を比較したものである。いずれの周波数においても B_k が出力変動に対応してゆるやかに大きな変化を示していることが

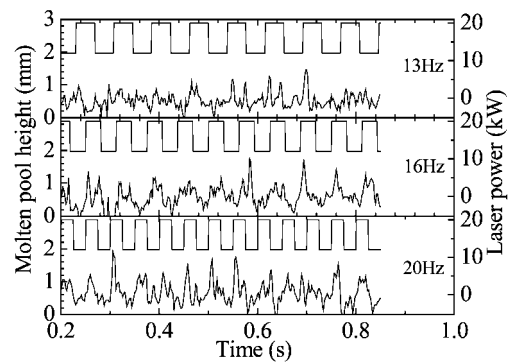


Fig. 10 Variation of molten pool height defined in Fig. 5(b) for various frequencies of square wave power modulation.

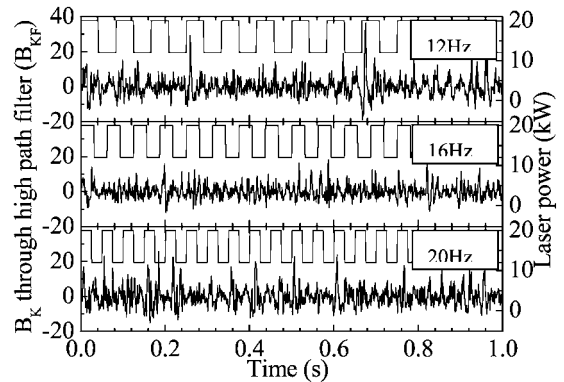
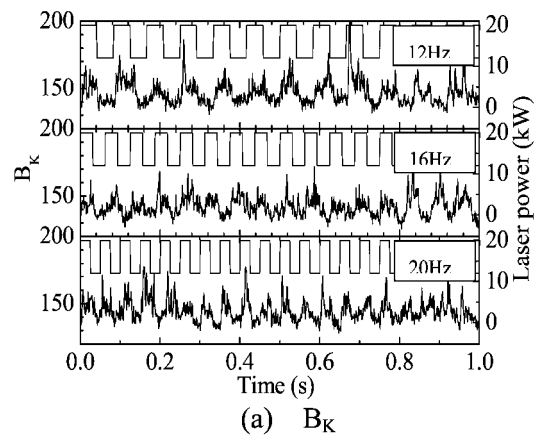


Fig. 11 Variation of B_k and B_{kF} for various frequencies of square wave power modulation.

分かる。B_Kにはさらに高周波の変動が観察されるが、画像を詳細に解析した結果、これがキーホールの径方向への変動すなわちキーホールの径方向の乱れを示すことがわかった。そこでキーホールのランダムな変動のみを明確にするため、Fig. 11(a)の信号を30Hzのハイパスフィルタ処理し、B_Kの中の出力変調周波数成分をカットした。その結果をB_{KF}として、Fig. 11(b)に示す。これを見ると、最適周波数16HzのもとでB_{KF}の変動が最も小さくなっていることがわかる。これをさらに定量的に評価するため、B_{KF}の標準偏差σ_{BKF}を求め、その結果をFig. 12に示す。Fig. 12からポロシティ発生率Prが最も小さくなる16Hzにおいて、σ_{BKF}が最小値を示し、径方向への変動すなわちキーホールの乱れが最も抑制されていることがわかる。すなわち、パルス変調の周波数が溶融池の固有振動周波数と一致したとき、キーホールが最も安定化され、その結果、ポロシティが効果的に抑制できることが実証された。

Fig. 13は、周波数12Hz、16Hz及び20Hzで出力変調を行ったときのX線透過像から、各フレームにおいてキーホール深さを測定し、各位相ごとにプロットした結果を示す。すなわち、レーザ出力の変動に対するキーホール深さ変動の応答性を示す。これらを見ると、いずれの周波数においても、出力がベースからピークに立ち上がった後、次第にキーホール深さが増加し(図中グレーの領域)約10~15msで一定値に達していることが分かる。この時のキーホール深さは20kWでCW溶接を行ったときの溶込み深さにはほぼ対応しており、最大出力となる時間が10~15ms以上あれば、出力変調を行っても最大出力でCW溶接を行った場合と同等の溶込みを得ることができる。言い換えれば、出力変調の半波長が約15ms以上あれば、すなわち変調周波数が33Hz以下であれば、溶込み深さがピーク出力におけるCW溶接とほぼ同等になることを意味している。従って、溶融池の固有振動周波数で出力変調を行うことにより、溶込み深さを減少させることなく、ポロシティの発生を効果的に抑制することができる。

3.4 キーホールの固有振動とポロシティの発生

溶融池の固有振動周波数と一致した出力変調を行うこと

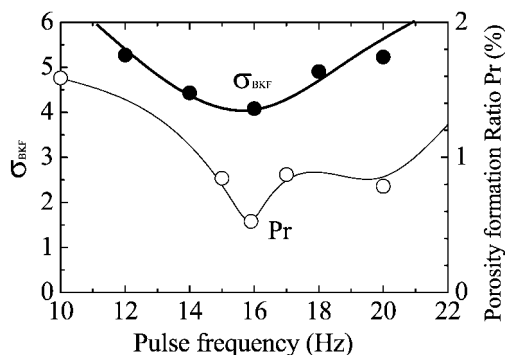


Fig. 12 Standard deviation of B_{KF} (σ_{BKF}) for various frequencies.

とにより、レーザと溶融金属の相互作用が適切に制御され、ポロシティの発生が効果的に防止できることを示した。これは、最適周波数を用いた出力変調により溶融金属とレーザの相互作用を周期的に起こすことができ、これによりキーホールが安定化するためである。

一方、変調周波数が30Hz以上の領域では、Fig. 6で示したように、逆にポロシティの発生が増加し、100Hz付近で最も多くのポロシティが発生した。Fig. 14は、各変調周波数の下で撮影したキーホールのX線透過像を示すが、100Hz付近で変調周波数と共振した非常に激しいキーホール変動が観察され、これに伴って、多数のポロシティが発生していた。Fig. 15にCW溶接時に撮影したX線透過像からキーホール深さの時間変動を測定し、その周波数解析を行った結果を示す。100~110Hz付近に小さなピークが見られ、この周波数はポロシティが最も発生しやすくなる周波数とほぼ一致している。前述したように、キーホールは径方向に振動を繰り返しており、これに伴ってレーザと溶融金属が

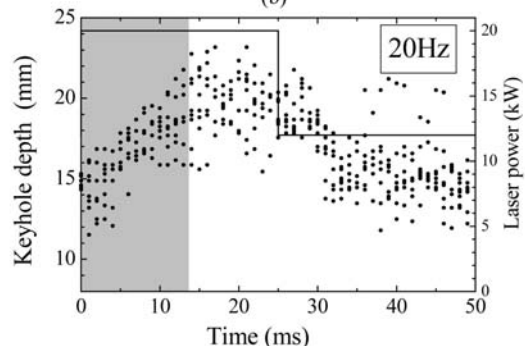
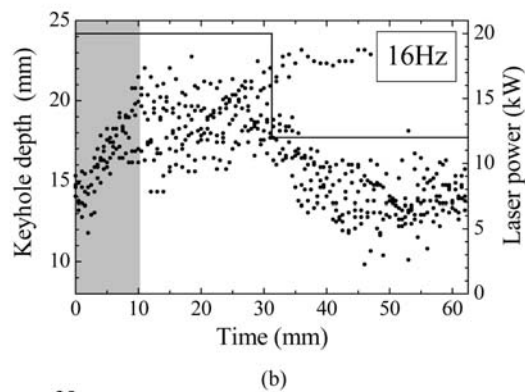
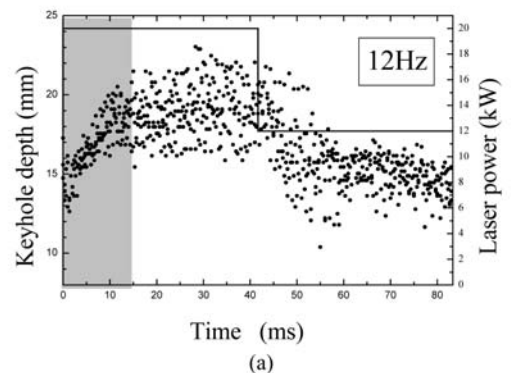


Fig. 13 Variation of keyhole depth in each power modulation cycle.

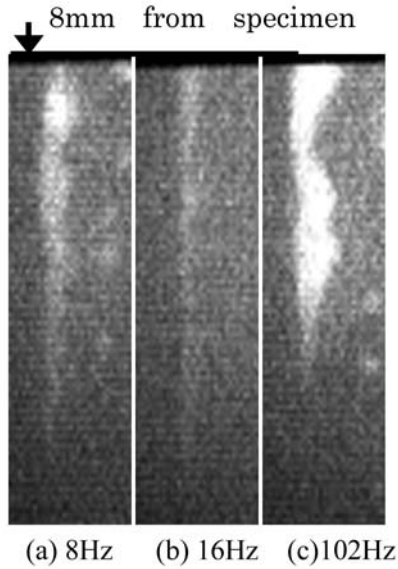


Fig. 14 Keyhole behavior for various pulse modulation frequencies.

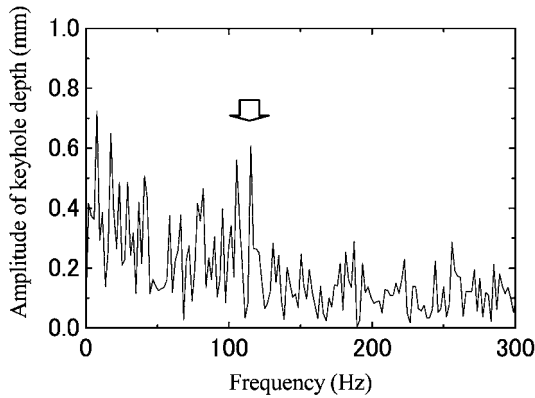
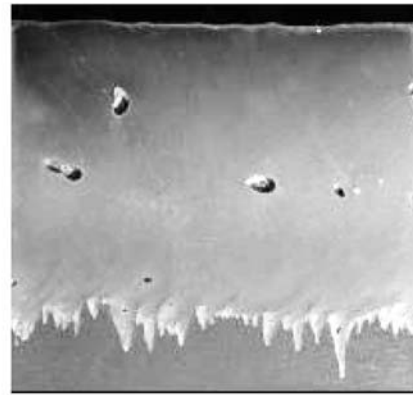


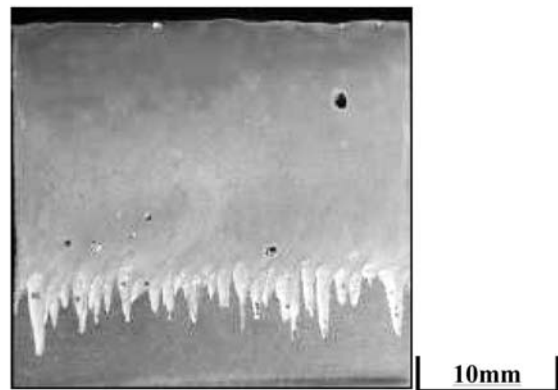
Fig. 15 FFT analysis of keyhole depth variation in CW laser welding.

相互作用を起こすときに溶込み深さが低下する。すなわち、スパイクはキーホールの径方向への振動と対応して発生すると考えられる。Fig. 15 より、スパイクの発生周波数が 100 Hz 付近でピークを持つことから、キーホールの径方向への固有振動周波数がこの付近であることが予想される。Otto¹⁴⁾は、キーホールの径方向への固有振動周波数を数値解析により計算しており、このモデルにより本実験条件下でのキーホール固有振動周波数を求めた結果、130 Hz と比較的良い一致を得た。このため、100 Hz 付近でパルス変調を行うと、キーホール自身が共振により径方向に大きく変動し、これによりポロシティが大量に発生したと考えられる。

Fig. 16 に、最適周波数の下で、出力変調を行った場合と、20kW CW 溶接を行った場合の欠陥発生状況を、縦断面マクロ観察結果により示す。適切な周波数で出力変調を行うことにより、ポロシティの発生が減少しており、出力変調の効果が顕著に認められる。ただし、本手法では、最適周波数の下でも若干のポロシティが残留している。ポロシティ防止効果をさらに大きくするためには、波形制御を行うことが効果的であるが、この点については、次報で詳細に述べる。



(a) CW welding



(b) Square wave power modulation (16Hz)

Fig. 16 Longitudinal cross-sections of laser welds in CW welding and pulse welding with optimum frequency.

4. 結 言

本研究では、非貫通深溶込みレーザー溶接において、レーザー出力の矩形波変調を行い、ポロシティの防止効果を調べた。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 各種周波数の下で出力変調を行った結果、10~20 Hz の低周波領域において、ポロシティの発生が効果的に抑制できることが明らかとなった。
- 2) 溶融池表面では、変調周波数と同期して溶融金属がキーホール内部から噴出し、これが表面波を形成する。この波は溶融池後方へと伝播し、後端で反射した後にキーホールへ向かって移動する。上記の最適周波数は、この溶融池表面波の固有振動周波数と一致した。
- 3) 溶接時のキーホール挙動を X 線透過法により in-situ で観察し、径方向へのキーホールの変動を定量的に評価した結果、上記の最適周波数の下でキーホールが最も安定化することが明らかになった。
- 4) 通常の CW レーザ溶接では、レーザーと溶融金属の相互作用がランダムに起こり、これがキーホールの径方向への変動を大きくする。一方、最適周波数で出力変調を行った場合には、レーザー出力の変動と同期して溶融金属がキ

ーホール内部に流入するため、溶融金属とレーザの相互作用を周期的に起こすことができる。このため、キーホールのランダムな変動が抑制され、キーホールを安定に制御することができる。

- 5) 100 Hz 付近で出力変調を行った場合、キーホールが激しく変動し、これによりポロシティの発生が大幅に増加する。これは、径方向へのキーホール振動の固有振動周波数がこの付近に存在するため、出力変調によりキーホール振動が共振し、ポロシティが発生しやすくなる。

参 考 文 献

- 1) F. Roland: Latest Trends of Laser Welding in European Shipbuilding, *Welding Technology*, Vol.59 11 (2003), 92-97. (in Japanese)
- 2) Y. Shimokusu, S. Fukumoto, M. Nayama, T. Ishide, S. Tsubota, A. Matunawa and S. Katayama: Application of Pulse Modulated High Power YAG Laser to Thick Plate Welding: *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 20-4 (2002), 477-483. (in Japanese)
- 3) F. Vollertsen, J. Schumacher, K. Schneider and T. Seefeld: Innovative Welding Strategies for the Manufacture of Large Aircraft, *Proceedings IIW international Conference* (2004).
- 4) G. Arakane, S. Tsukamoto, I. Kawaguchi and H. Honda: Porosity Formation in Full Penetration Welding of Thick Plates Using High Power CO₂ Laser, *Journal of the High Temperature Society*, 29-4 (2003), 164-170. (in Japanese)
- 5) G. Arakane, S. Tsukamoto, I. Kawaguchi and H. Honda: Formation Mechanism and Suppression of Hot Cracking in Full Penetration Welding of Thick Steel Plate using High Power CO₂, *Journal of the High Temperature Society*, 30-3 (2004), 148-153. (in Japanese)
- 6) I. Kawaguchi, S. Tsukamoto, G. Arakane and H. Honda: Formation Mechanism of Porosity in Deep Penetration Laser Welding, Submitted to *Quarterly Journal of The Japan Welding Society* 24-4, (2006), 338-343. (in Japanese)
- 7) S. Chandrasekhar: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford Clarendon Press, (1961)
- 8) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: Porosity Formation Mechanism and Reduction Method in CO₂ Laser Welding of Stainless Steel, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 19-4, (2001), 600-609. (in Japanese)
- 9) A. Matsunawa, Kim J. D., N. Seto, N. Mizutani and S. Katayama: Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding, *Journal of Laser Applications*, 10 (1998), 247-254.
- 10) T. Ishide, Y. Nagura, O. Matsumoto, T. Nagashima, T. Kidera and A. Yokoyama: High power YAG laser welded sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants., *Proceedings LAMP'92*, (1992), 957-962.
- 11) A. Otto, M. Geisel and M. Geiger: Nonlinear dynamics during laser beam welding, *Proceeding ICALEO'96*. Vol. 81 (1996), B30-B39.
- 12) N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa: Porosity Formation Mechanism and Suppression Procedure in Laser Welding of Aluminum Alloy, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 18-2, (2000), 243-255. (in Japanese)
- 13) I. Kawaguchi, S. Tsukamoto G. Arakane and H. Honda: Characteristics of High Power CO₂ Laser Welding and Porosity Suppression Mechanism by Nitrogen Shield, *Quarter Journal of the Japan Welding Society*, 23-2, (2005), 259-264. (in Japanese)
- 14) Private Communication and A. Otto : Dynamics of Laser Beam Welding, *Proceedings Hirschegg Workshop* (2005).

