

高速レーザー走査を用いた金属箔の精密微細溶接法の開発

岡山大学大学院 自然科学研究科
助教 岡本康寛
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007204)

キーワード：微細溶接，高速走査，レーザー溶接，金属箔，ファイバレーザ，パルス YAG レーザ

1. 研究の目的と背景

近年，電気，電子産業では部品の小型化が進み，それにとともに金属薄板の接合に対する要望が高まっている．しかし，薄板は材料の保持が難しく，特に微小部品ではプロセスの自由度も重要となる．また，薄板では材料への入熱により変形が生じやすく，それによりギャップのコントロールが不安定になるなど，その適応には困難がともなう．一般に，薄板の溶接にはパルスレーザによる溶接が行われるが，加熱と冷却のサイクルが繰り返されることから試料がひずむ可能性が高くなる．また，熱伝導型の溶接を適応する報告もなされているが¹⁾，試料厚さに対して大きな接合領域を必要とする．一方，フラウンホーファー・レーザ技術研究所はピークパワーが高いパルスレーザを高速で走査する溶接手法 SHADOW[®]を開発し，試料のひずみを抑えた溶接が可能であり，高反射率の材料へも適応できる．さらに，パルス溶接に比べて滑らかな溶接ビードを形成でき，微小部品の溶接に適した手法であると報告している²⁻⁵⁾．また，集光性の高いシングルモードファイバレーザによる高速溶接も報告されている⁶⁾．しかし，試料厚さが非常に小さい場合，入熱により試料のゆがみは容易に生ずる．また，より微細な溶接ビードが求められている．それらを満足するためには，微細なビードであり，かつ試料への投入エネルギーを低く抑える必要がある．つまり，微細スポットに集光された高いエネルギー密度を高速で走査する手法により，ひずみの低減と微細ビードが期待できるなど，高速走査と微小スポットの組み合わせは薄板の溶接に有効であると考えられる．

そこで本研究では，ビーム径の異なるパルスレーザとシングルモードファイバレーザを，材料の保持に自由度を持たせることが可能なガルバノスキャナシステムで高速に走査し，ステンレス箔の微細レーザー溶接特性に関する基礎的検討を行った．

2. 実験方法

実験装置の模式図を図 1 に示す．発振器には波長 1090nm のシングルモード Yb ファイバレーザ (SPI 社製 SP-100C) と波長 1064 nm のパルス Nd:YAG レーザ (HAAS 社製 HL62P) を用いた．シングルモードファイバレーザより出射された直径 5.45mm のレーザー光を 2 倍に拡大した．また，直径 200 μ m のファイバより出力されたパルス

Nd:YAG レーザを焦点距離 100mm のレンズにより直径 18mm にコリメートした．これらを焦点距離 80mm のテレセントリックタイプ $f\theta$ レンズで集光した．試料には厚さ 25 μ m のステンレス (X5CrNi18 10) を使い，2 \times 10mm の開口部を有するプレートにて固定した．溶接実験はシールドガスを用いない大気中とし，焦点を試料表面に合わせて行った．溶接長さはシングルモードファイバレーザの場合は 6mm と一定にした．また，パルス Nd:YAG レーザではパルス幅 20ms を一定としたことから，溶接長さはパルス幅とレーザー光走査速度の積の値である．

図 2 は，同等のレーザー出力条件にて焦点におけるレーザー光の強度分布をマイクロスポットモニタ (PRIMES 社製) により測定した結果である．シングルモードファイバレーザは良好なビームモードを示しており，焦点におけるスポット直径 d_0 は 22 μ m である．一方，パルス Nd:YAG レーザは若干マルチモードとなっており，焦点におけるスポット直径は 160 μ m である．

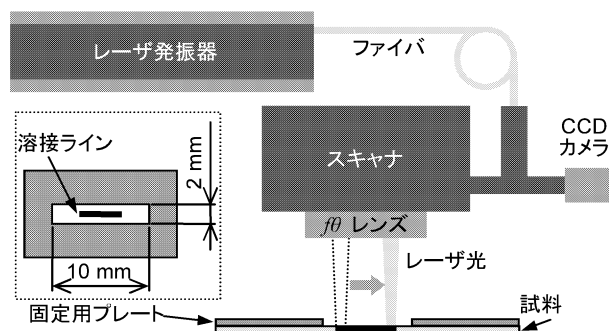
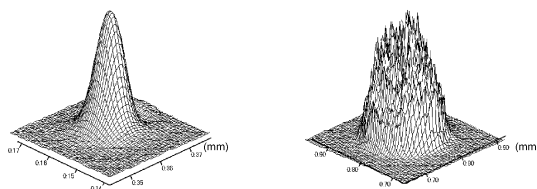


図 1 実験装置の模式図



(a) SM ファイバレーザ

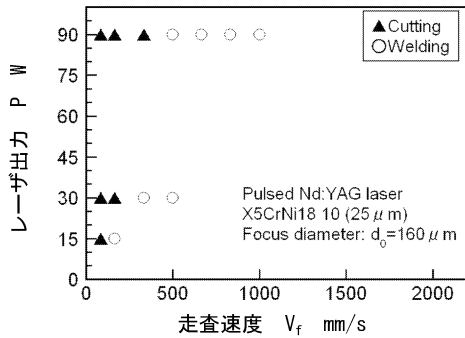
(b) パルス Nd:YAG レーザ

図 2 焦点におけるレーザー光の強度分布

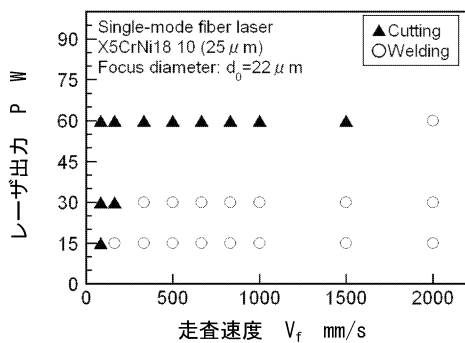
3. ビードオンプレート溶接

3. 1 ステンレス箔の溶接範囲

薄板は裏面からの熱流速の反射や，熱量の蓄積のため



(a) パルス Nd:YAG レーザ

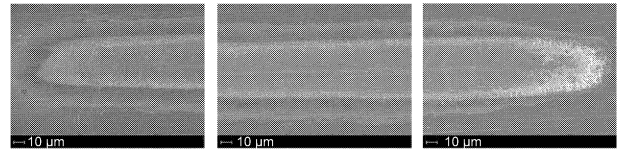


(b) シングルモードファイバレーザ

図3 溶接可能範囲の分布

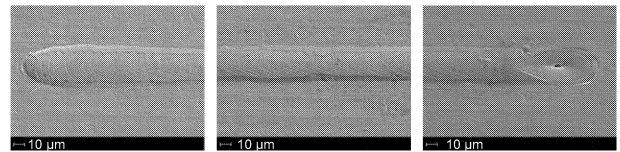
に厚板に比べて温度が上昇しやすく、入熱量をより高精度に制御することが必要となる。そこで、図3に示すように、レーザー出力とレーザー光走査速度を変化させて厚さ25 μm のステンレス箔のビードオンプレート溶接を行い、溶接可能範囲を検討した。図3(a)に示すパルスNd:YAGレーザの場合、レーザー光走査速度が小さい時は切断領域となっている。しかし、レーザー光走査速度が大きくなるにしたがって溶接可能な条件が現れ、レーザー出力の上昇にともなってその溶接可能範囲も広がっている。溶接可能領域以降のレーザー光走査速度の条件では、本レーザー出力範囲では試料を熔融させることはできなかった。一方、スポット直径が22 μm と小さいシングルモードファイバレーザでは、図3(b)に示すように、スポット直径の大きなパルスNd:YAGレーザよりも広範囲で溶接条件を制御できる。また、30Wと低いレーザー出力で2000mm/sと非常に高いレーザー光走査速度まで溶接が可能であることから、試料への入熱を低減でき、ひずみの抑制に繋がることが期待できる。

図4はパルスNd:YAGレーザを用いた時の溶接ビード表面のSEM写真を示したものである。スポット直径が大きいパルスNd:YAGレーザの場合、波長1064nmにおけるステンレス材料の吸収率が約30%でもあることから、レーザー照射開始点側では溶接ビードが明瞭に確認されなかった。この点を改善するために、パルス波形制御を行い、パルス初期のピーク出力を高くする手法も考えられる⁵⁾。しかし、試料厚さに対してビーム直径が5倍以



(a) 開始点 (b) 中央 (c) 終点

図4 パルスNd:YAGレーザによる溶接ビード表面のSEM写真($P=30\text{ W}$, $V_f=333\text{ mm/s}$, $d_0=160\text{ }\mu\text{m}$)



(a) 開始点 (b) 中央 (c) 終点

図5 シングルモードファイバレーザによる溶接ビード表面のSEM写真($P=15\text{ W}$, $V_f=666\text{ mm/s}$, $d_0=22\text{ }\mu\text{m}$)

上と大きい。更に、避けることの出来ない初期のレーザー光の加速時間は、プロセス開始時における試料への入射エネルギーやレーザー光の位置制御を難しくする。そのため、レーザー照射開始点における溶け落ちや位置制御エラーの危険性をともなうと考えられる。

一方、スポット直径の小さいシングルモードファイバレーザの場合、図5に示すようにレーザー照射初期より良好な溶接ビードが形成されていることが確認でき、走査照射開始点から良好にレーザー光が吸収されていると考えられる。また、レーザー照射終了点ではキャビティを観察できたことから、キーホールが形成されていたことが推測され、良好な溶接が行われていたことも確認された。

以上の結果より、これ以降は低レーザー出力で溶接可能範囲が広く、良好な溶接ビードが形成されるシングルモードファイバレーザを用いた溶接特性に関して検討を行った。

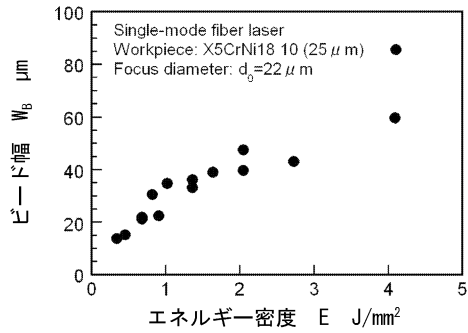
3.2 ビード幅と溶け込み深さ

図6はシングルモードファイバレーザによる厚さ25 μm のステンレス箔の溶接ビード幅および溶け込み深さとエネルギー密度の関係を示したものである。エネルギー密度 E は次式(1)により決定した。

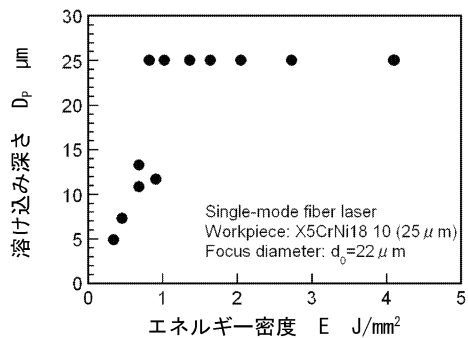
$$E = \frac{P}{V_f \times d_0} \quad (1)$$

ここで、 P はレーザー出力、 V_f はレーザー光走査速度、 d_0 はスポット直径である。

図6に示すように溶接ビード幅はエネルギー密度1J/mm²以下ではエネルギー密度の変化に比例して増大しており、エネルギー密度1J/mm²以上では溶接ビード幅



(a) ビード幅



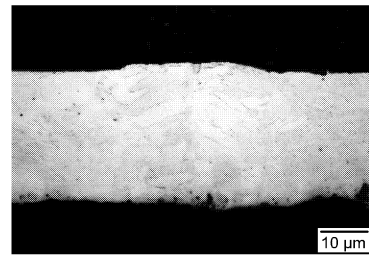
(b) 溶け込み深さ

図6 シングルモードファイバレーザにおけるビード幅および溶け込み深さとエネルギー密度の関係

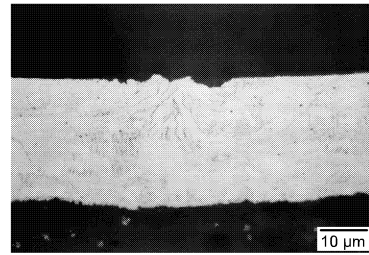
の増加率は低下している。一方、溶け込み深さは、エネルギー密度 1J/mm^2 以上では試料厚さに達し、貫通溶接となっている。また、溶け込み深さもエネルギー密度 1J/mm^2 以下ではエネルギー密度に比例して溶け込み深さが増大しており、この領域では溶け込み深さをエネルギー密度で制御可能である。エネルギー密度 1J/mm^2 で溶け込み深さは $13\mu\text{m}$ から貫通の $25\mu\text{m}$ まで急増している。この急激な変化は試料裏面における熱流束の反射が影響しているものと考えられる。

3. 3 溶接ビードの形状

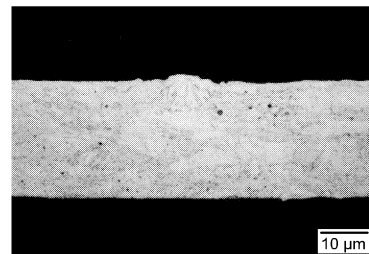
図7は厚さ $25\mu\text{m}$ のステンレス箔に対して出力 15W のシングルモードファイバレーザを照射したときの溶接ビードの断面写真を示したものである。いずれのレーザ光走査速度においても欠陥のない良好な溶接ビードが形成されていることがわかる。ところで、高速のレーザ光走査条件で形成されているビード形状は熱伝導型に近いことがわかる。しかし、定常熱伝導解析により求めた試料表面温度は沸点以上で、パワー密度は $3.9 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ であった。試料表面は沸点を超えており、キーホールが形成されていると考えられるが、レーザ光の走査速度が非常に大きいこと、またパワー密度が熱伝導溶接とキーホール溶接の境界領域に近いことから、キーホールが十分な大きさを形成、維持できず、熱伝導型の溶接ビード形状に類似したものになったと考えられる。



(a) $V_f = 666 \text{ mm/s}$

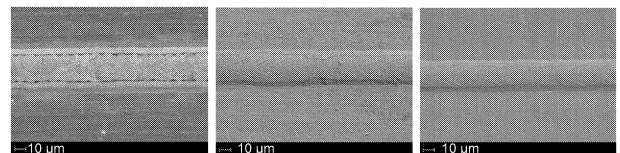


(b) $V_f = 1000 \text{ mm/s}$

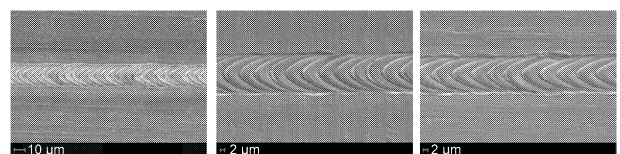


(c) $V_f = 2000 \text{ mm/s}$

図7 シングルモードファイバレーザ 15W における溶接ビード断面



(a) $V_f = 500 \text{ mm/s}$ (b) $V_f = 666 \text{ mm/s}$ (c) $V_f = 833 \text{ mm/s}$



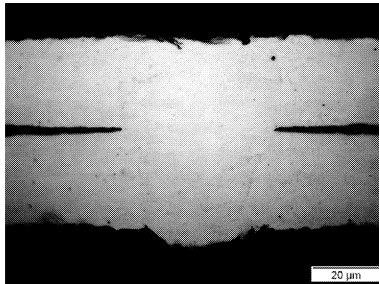
(d) $V_f = 1000 \text{ mm/s}$ (e) $V_f = 1500 \text{ mm/s}$ (f) $V_f = 2000 \text{ mm/s}$

図8 シングルモードファイバレーザ 15W における溶接ビード表面のSEM写真

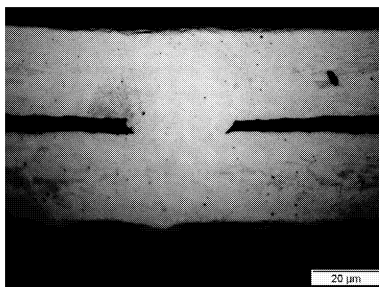
図8は、厚さ $25\mu\text{m}$ のステンレス箔に対して出力 15W のシングルモードファイバレーザを照射したときの各レーザ光走査速度における溶接ビード表面のSEM写真である。レーザ光走査速度 666mm/s 、 833mm/s では、ハンピングの無い、幅 $30\mu\text{m}$ 以下の良好な溶接ビードが形成されている。一方、レーザ光走査速度 1000mm/s 以上では、溶接ビード表面に周期構造が確認された。この要因

表1 周期構造の生成周期

走査速度 (mm/s)	1000	1500	2000
周期 (μs)	4.49	3.79	3.31



(a) $P = 15 \text{ W}$, $V_f = 166 \text{ mm/s}$



(b) $P = 30 \text{ W}$, $V_f = 833 \text{ mm/s}$

図9 重ね溶接のビード断面

として、レーザー出力の変動、ファイバの固定不良によるレーザー光強度分布の変動、ガルバノスキャナシステムのデジタル動作等の影響などが懸念される。しかし、測定を行ったところ、レーザー出力、レーザー光強度分布ともにその安定性が確認された。また、周期構造が形成される周期を求めたところ、表1に示すような結果であった。周期構造の形成周期は本スキャナシステムの制御時間である $10\mu\text{s}$ 以下であり、その動作が周期構造形成に及ぼす影響は無いものと考えられる。したがって、本周期構造の生成メカニズムはレーザー光の走査と熔融材料の挙動が関係しているものと考えられるが、この点の解明に関しては今後の更なる検討が必要と考えている。

4. 重ね溶接

シングルモードファイバレーザーを用いて厚さ $25\mu\text{m}$ のステンレス箔2枚の重ね溶接を行った。図9に示すように欠陥の無い微細な溶接ビードが形成されている。また、図9(b)に示すように、2枚のステンレス箔の間に若干のギャップが存在しても重ね溶接が可能であった。薄板の溶接の場合、たとえ材料間のギャップが無い状態で固定したとしても、試料自体の剛性が低いことから、レーザー光照射による入熱で照射開始点からの材料変形は避けられない。そのため、レーザー溶接プロセス中の材料間のギャップ制御には困難がともなう。このようにギャップが存在しても重ね溶接可能である点は、薄板の接合には特

に有効であると考えられる。さらに、少ない入熱量は材料変形を抑制する上でも効果的である。したがって、微細スポットを高速で走査する手法は金属箔の微細溶接に有効であると考えられる。

5. 結言

ビーム径の異なるパルス YAG レーザとシングルモードファイバレーザーを高速で走査し、ステンレス薄板への微細溶接特性に関する基礎的検討を行った。本研究で得られた主な結論は以下のようである。

- (1) スポット直径の小さい方が低入熱で、広い条件下で溶接を行うことが可能である。
- (2) スポット直径が小さい場合、パルス波形を制御することなく、レーザー光照射初期より良好な溶接ビードが形成される。
- (3) スポット直径 $22\mu\text{m}$ のを用いた場合、エネルギー密度が $1\text{J}/\text{mm}^2$ 以下ではエネルギー密度によって溶け込み深さを制御可能である。
- (4) スポット直径が小さなレーザー光を高速で走査した場合に特徴的な繰り返り形状を有する溶接ビードが形成される。
- (5) 若干のギャップが存在しても厚さ $25\mu\text{m}$ の箔2枚を重ね溶接することが可能であった。

謝辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興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) 舟田義則, 阿部信行: 半導体レーザーの直接加工による超薄板ステンレス鋼の重ね溶接, 先端加工学会誌, 25, 1 (2007) 45.
- 2) T. Kramer, A. Olowinsky and F. Durand: SHADOW – A New Welding Technique, Proceedings of SPIE 4637, (2002) 545.
- 3) T. Kramer and A. Olowinsky: Out of SHADOW: Watch Parts in the Spotlight, Proceedings of SPIE Vol. 4977, (2003) 481.
- 4) K. Klages, A. Olowinsky and J. Gedicke: Performance of SHADOW, Proceedings of Laser Assisted Net Shape Engineering in Erlangen, (2004) 633.
- 5) J. Gedicke, A. Olowinsky and K. Klages: Advance-ments of SHADOW® – Laser beam welding of com-pression molded copper, Proceedings of LPM2005 in Williamsburg, (2005) On-line.
- 6) I. Miyamoto, S. Park and T. Ooie: Ultrafine-Keyhole Welding Process Using Single-Mode Fiber Laser, Pro-ceedings of ICALEO2003 in Jacksonville, (2003) CD-ROM.