



Y. Okamoto

高速レーザ走査を用いた 金属箔の精密微細溶接法の開発

岡本 康寛*

1. まえがき

電気、電子産業では各種部品の小型化が進み、それともなつて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と報告している²⁾。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³⁾。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、微小スポットのレーザ光を、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する手法に関し、ステンレス箔の高速微細レーザ溶接特性を検討した。また、試料の変形量を低減するための取り組みに関して検討した内容についても述べる。

2. 溶接特性に関する検討

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ガルバノスキャナにより高速走査し、金属薄板の微細レーザ溶接の基礎的特性に関して検討を行った。

2.1 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1060nmのシングルモードファイバレーザ(SPI社製SP-100C)と波長1064nmのパルスNd:YAGレーザ(HAAS社製HL62P)を用いた。光ファイバにより導かれたレーザ

光は焦点距離80mmのテレセントリックタイプ $f\theta$ レンズで集光されており、焦点におけるスポット径 d_0 は各々22 μm 、160 μm である。試料には厚さ25 μm のステンレス(X5CrNi1810)を用い、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と一定とした。また、パルス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光走査速度の積の値である。

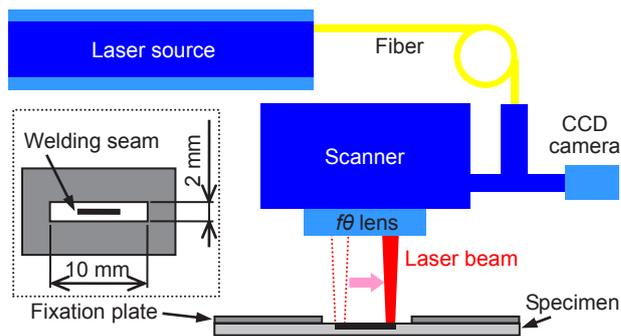


図1 溶接特性検討におけるレーザ光照射装置の模式図

2.2 ビードオンプレート溶接

2.2.1 ステンレス箔の溶接範囲

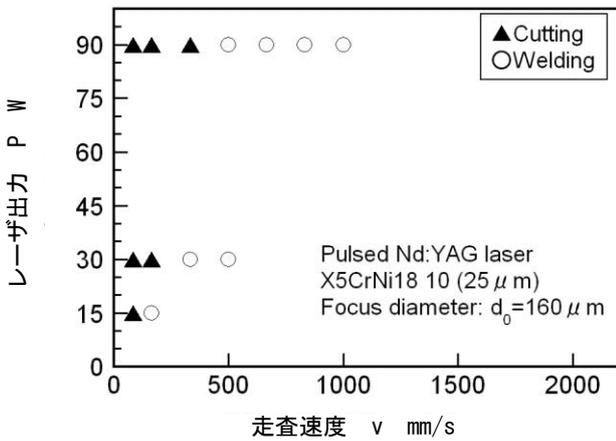
薄板は裏面からの熱流速の反射や、熱量の蓄積のために厚板に比べて温度が上昇しやすく、入熱量をより高精度に制御することが必要となる。そこで、図2に示すように、レーザ出力とレーザ光走査速度を変化させて厚さ25 μm のステンレス箔のビードオンプレート溶接を行い、溶接可能範囲を検討した。図2(a)に示すパルスNd:YAGレーザでは、レーザ出力の上昇ともなつて溶接可能範囲が広がっている。一方、スポット直径が小さいシングルモードファイバレーザでは、図2(b)に示すように、スポット直径の大きなパルスNd:YAGレーザよりも広範囲で溶接条件を制御できる。また、30Wと低いレーザ出力で2000mm/sと非常に高いレーザ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を期待できる。

図3(a)に示すように、スポット直径が大きいパルスNd:YAGレーザの場合、レーザ光照射開始点側では溶接ビ

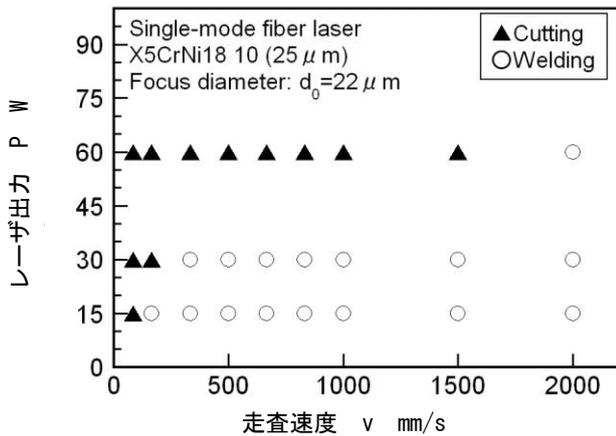
* 岡山大学 大学院自然科学研究科 准教授

ードが明瞭に確認されなかった. 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, Fig. 3(b)に示すようにレーザ光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わかる.

以上のことから, これ以降は低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.

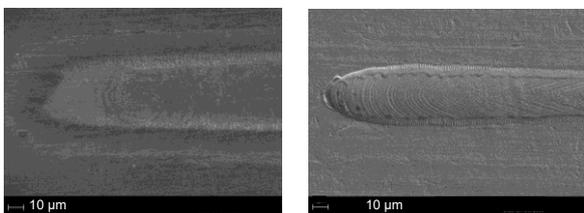


(a) パルス Nd:YAG レーザ



(b) シングルモードファイバレーザ

図2 溶接可能範囲の分布



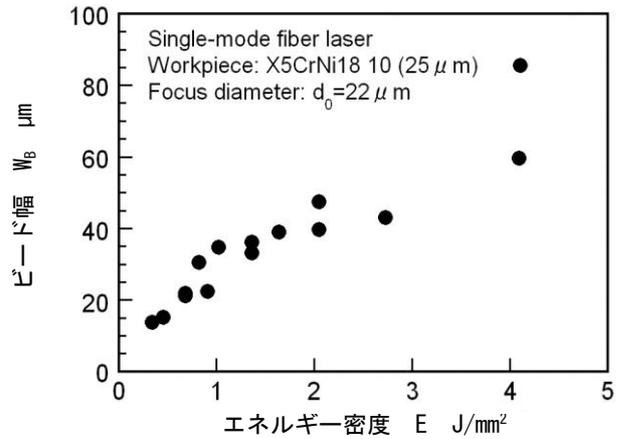
(a) パルス Nd:YAG レーザ (b) シングルモードファイバレーザ
($P=30\text{W}$, $v=333\text{mm/s}$) ($P=15\text{W}$, $v=666\text{mm/s}$)

図3 溶接ビード表面のSEM 写真

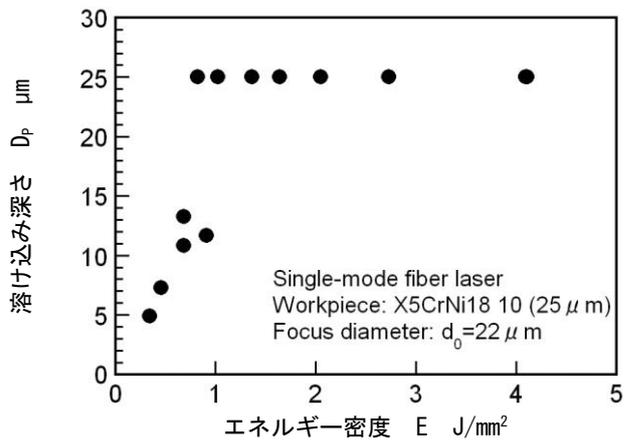
2.2.2 ビード幅と溶け込み深さ

図4はシングルモードファイバレーザによる厚さ 25μm 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. 溶接ビード幅はエネルギー密度の変化に比例して増大している. また, 溶け込み深さもエネルギー密度 1J/mm² 以下ではエネルギー密度に比例しており, 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.



(a) ビード幅

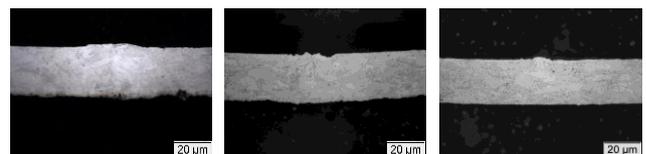


(b) 溶け込み深さ

図4 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

2.2.3 溶接ビードの形状

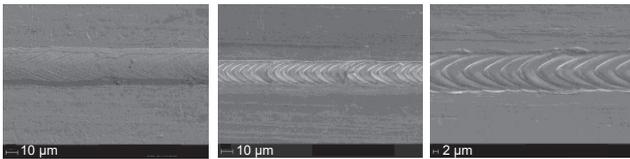
図5は厚さ 25μm のステンレス箔に対して出力 15W のシングルモードファイバレーザを照射したときの溶接ビードの断面写真を示したものであり, いずれのレーザ光走査速度においても欠陥のない良好な溶接ビードが形成されていることがわかる.



(a) $v=666\text{mm/s}$ (b) $v=1000\text{mm/s}$ (c) $v=2000\text{mm/s}$

図5 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

図6は、同条件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 では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。この要因として、レーザ出力の不安定さやファイバの振動によるビームモード変化の影響が懸念されるが、測定の結果それらの安定性が確認された。また、ガルバノスキャナ装置のデジタル動作の影響も懸念されるが、周期構造が形成される周期は本スキャナシステムの制御時間分解能以下であった。したがって、本周期構造の生成メカニズムはレーザ光の走査と溶融材料の挙動が関係しているものと考えられるが、この点に解明に関しては今後の更なる検討を要する。

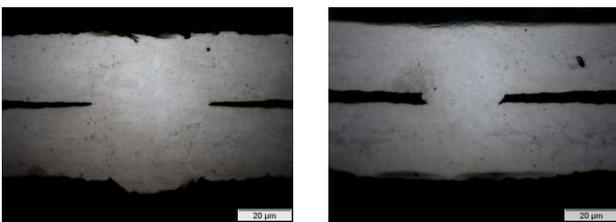


(a) $v = 666 \text{ mm/s}$ (b) $v = 1000 \text{ mm/s}$ (c) $v = 2000 \text{ mm/s}$

図6 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

2.2.4 重ね溶接

シングルモードファイバレーザを用いて厚さ 25 μm のステンレス箔 2枚の重ね溶接を行った。図7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7(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、材料間のギャップ制御は難しいことから、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。



(a) $P = 15 \text{ W}, v = 166 \text{ mm/s}$ (b) $P = 30 \text{ W}, v = 833 \text{ mm/s}$

図7 重ね溶接のビード断面

3. 試料変形に関する検討

金属薄板の溶接では変形量が微小であっても、溶接特性に与える影響は大きい。したがって金属薄板のレーザ微細溶接において薄板の熱変形を理解することはプロセス精度向上のために重要である。そこで金属薄板のレーザ微細溶接における熱変形特性を評価、検討した。

3.1 実験方法

図8に実験装置を模式的に示す。レーザ発振器には波長

1090nm、定格出力 100W の SPI 社製 Yb:ファイバレーザを用いた。ファイバより出力されたレーザ光は連続波であり、直径約 5mm のガウスモードビームをスポット直径にあわせて拡大した。高速レーザ光走査実験を行うために、ガルバノスキャナを用い、厚さ 20, 50 μm の SUS304 薄板に焦点距離 100mm の $f\theta$ レンズを用い、焦点位置にて照射した。

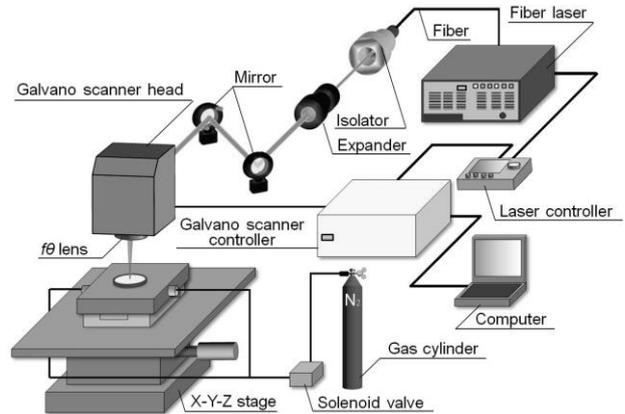


図8 試料変形検討におけるレーザ光照射装置の模式図

レーザ光照射による熱変形量を評価するため、図9に示すようにレーザ変位計を用いてレーザ光照射前後における試料高さを測定した。測定範囲は幅 2mm、長さ 1mm であり、レーザ変位計のスポット直径である 25 μm 間隔ごとにレーザ変位計と試料を相対運動させながら測定することで、測定領域全体の変形量を得た。また、光学顕微鏡を用いて変位測定時と同条件の溶接ビード断面を観察し、レーザ光出力増加にともなうビード形状の変化を評価した。さらに、ビード形状と熱変形との関係を定量的に評価するために式(1)に示すような、溶接ビード断面から得られた溶け込み深さとビード幅との比であるアスペクト比を適用した。

$$\text{アスペクト比} = \frac{\text{溶け込み深さ}}{\text{ビード幅}} \quad (1)$$

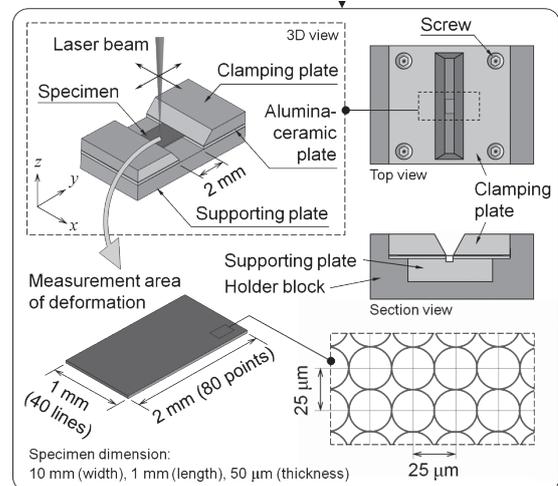


図9 試料の変形量測定方法

3.2 レーザ微細溶接における熱変形

図 10 にビードオンプレート溶接における各溶接モードの断面写真を示す。図に示すように溶接ビード形状は試料を貫通しない(a)熱伝導型(Conduction), (b)半溶け込み型(Quasi-penetration), および、試料を貫通した(c)貫通型溶接(Full-penetration)の3種類に大別される。

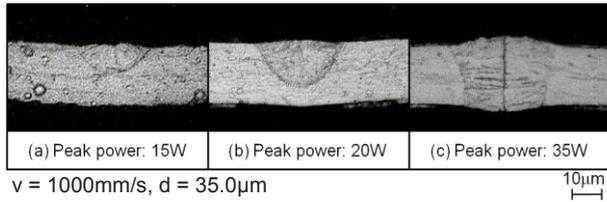


図 10 レーザ出力によるビード形状の比較

図 11 はレーザ照射前後の試料高さの差より、厚さ 20μm における試料の変形量を算出した結果を示している。ここでは、レーザ光走査速度 1000mm/s、スポット直径 35.0μm を一定とし、レーザ光出力のみを変化させた。エネルギー密度が低い場合、レーザ照射後の試料は図(a)に示すように下向き(凹形状)に変形し、溶接モードは熱伝導型または半溶け込み型溶接となった。一方、エネルギー密度の高い場合では図(b)に示すように上向き(凸形状)に変形し、貫通型溶接となった。これは試料厚さが 20μm と非常に薄いことから、貫通型の溶接ビードによって試料が板厚方向に収縮したためと考えられる。以上のように、エネルギー密度の増加にともない、試料は凹から凸形状に変形形状が推移したことから、適切なレーザ照射条件を選択することで、変形を微小に抑えることが可能と考えられる⁴⁾。

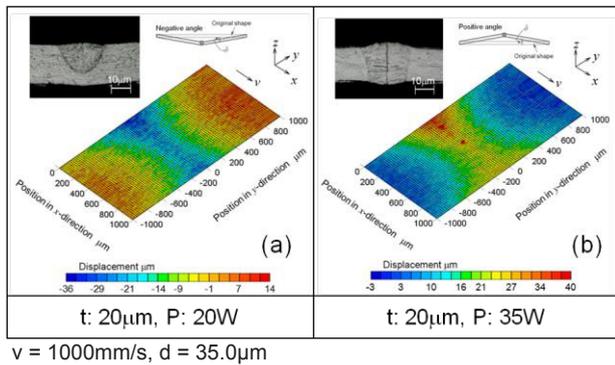


図 11 変形量の測定結果

3.3 ビード形状が熱変形に及ぼす影響

次に、スポット直径 17.5μm でレーザ照射実験を行い、試料厚さ 20μm における変形角とビード形状の関係を検討した。ここでは、レーザ光走査速度 1000mm/s を一定として、スポット直径 35.0μm ではレーザ光出力を 10-35W、スポット直径 17.5μm では 5-30W の切断に至らない範囲でレーザ照射実験を行った。図 12 は各スポット直径での変

形角とアスペクト比の関係を示す。なおアスペクト比および変形角は、同一条件で3回レーザ照射実験を行い、その平均値より算出した。図中、溶け落ちが生じた条件の結果は[]を用いてプロットしており、上部の赤いハッチング領域は、ビード断面の観察によって溶接モードが貫通型溶接であった条件を示している。

図中下部の白い領域、つまり溶接モードが熱伝導型または半溶け込み型溶接の場合、アスペクト比が大きくなると変形角も増大した。一方、貫通型溶接の場合、アスペクト比が増加すると変形角が減少した。また、スポット直径が異なっても同様の傾向を示し、溶接モードとアスペクト比で変形角を整理できる。

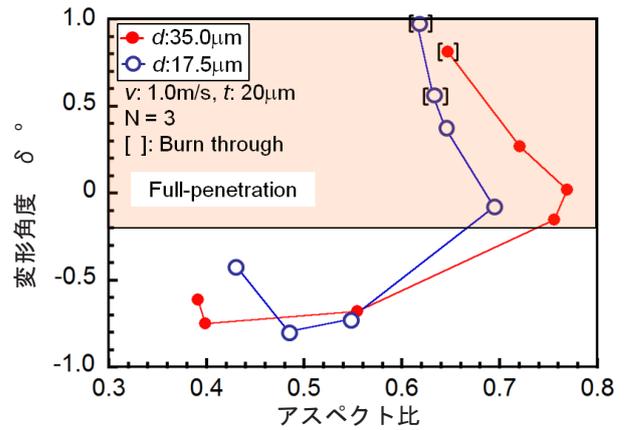


図 12 異なるスポット直径における試料の変形角度と溶接ビードアスペクト比の関係

3.4 変形角度を微小に抑えた照射条件

前述のとおり、適切なレーザ照射条件を選択することで、スポット直径にかかわらず試料の変形角度を微小に抑えることができた。しかし、試料厚さが異なると、図 13 に示すように、試料の変形角度を微小にできる条件において得られたビード形状は各々異なっていた。

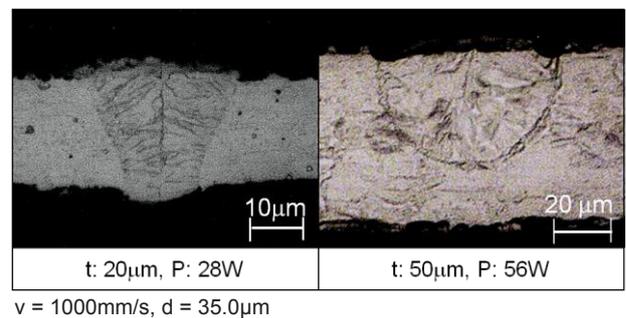


図 13 各試料厚さで低変角度となる溶接ビード形状

3.5 試料厚さの影響

試料厚さが 20μm と 50μm のものを用い、各照射条件で得られた変形角とアスペクト比の関係を図 14 に示す。変形角を微小にできる溶接ビードは試料厚さによって異なったものの、変形が微小となるのは変曲点付近であること

がわかった。

以上のように、熱変形とビード形状の間には相互関係があり、アスペクト比によってその関係性をある程度整理できることがわかる。したがって、試料厚さごとのアスペクト比を理解することで、金属薄板での微細レーザー溶接において熱変形を微小に抑えた接合継手が得られると考えられる。

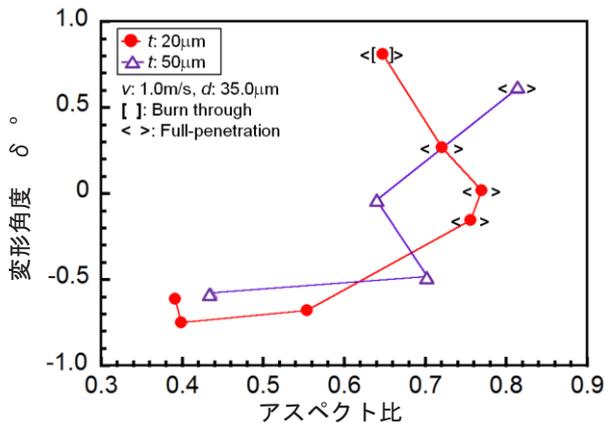


図 14 異なる試料厚さにおける試料の変形角度と試料の変形角度と溶接ビードアスペクト比の関係

4. まとめ

本検討で得られた主な結論は以下のとおりである。

- 1) ステンレス箔に対してビーム直径の小さい方が低入熱で広い条件下にて溶接を行い、レーザー光照射開始点より良好な溶接ビードを形成できた。
- 2) 試料の変形角度を微小にできる溶接モードおよび溶接ビード形状は試料厚さによって異なるものの、溶

接ビードのアスペクト比の変化形態に着目することで試料の変形角度極小化の可能性が示された。

- 3) 微細スポットでは溶接深さをエネルギー密度で制御でき、若干のギャップが存在しても 2 枚のステンレス箔を重ね溶接することが可能であった。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。また、本研究を遂行するにあたり、多大なるご支援を頂いたフラウンホーファー・レーザー技術研究所 Prof. Dr. R. Poprawe と大阪大学名誉教授宮本勇先生に謝意を表す。そして、本研究を遂行するにあたり尽力頂いた岡山大学特殊加工工学研究室に所属した学生の皆様に感謝いたします。

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) D. Radaj: Heat Effects of Welding, Springer-Verlag, (1992), pp.1, 9-11, 14, 149.
- 4) Y. Okamoto, S. Matsuoka, M. I. S. Ismail and A. Okada: Thermal Deformation in Micro-welding of Thin Stainless Steel Sheet by Single-mode Fiber Laser Proceedings of 10th International Conference on Progress of Machining Technology, (2012) pp.199-202.