

小出力レーザーによる異種金属接合に関する研究

深澤郷平・星野昌子・勝又信行

Study on Dissimilar Metal Welding by Low Power Laser

Kyohei FUKASAWA, Shoko HOSHINO and Nobuyuki KATSUMATA

要 約

素材の特性を活かして適材適所で組み合わせることにより、製品の高機能化や低コスト化が期待できる。たとえば、熱伝導率の良い銅と耐食性の高いステンレス鋼の異種金属接合は熱交換器等の分野で望まれている。しかし、それらは冶金学的に合金になりにくく熱物性値やレーザー吸収率も異なるため、接合が難しいとされている。本研究は板厚 0.5 mm の純銅及びステンレス鋼板に対して小出力レーザーによる突合せ溶接を試み、レーザー出力と照射位置を変化させて接合可能な条件範囲を調査した。また、接合状況について溶込み状況、接合強度及び接合部周辺の硬さ分布を評価した。その結果、出力 25 W 以上で照射位置 SUS 側 0.1 mm～銅側 0.1 mm の範囲においてビード中央に縦割れが発生し、接合強度が低下した。一方、出力 33 W、照射位置銅側 0.2 mm の条件では溶融部において銅とステンレス鋼による対流効果が確認され、約 240 MPa の接合強度を得た。

1. 緒 言

近年、製品の高機能化を目的とした異材接合のニーズが高まっており、なかでも熱伝導率や電気伝導率の高い銅合金と耐食性と高い機械的強度を持つステンレス鋼との接合は熱交換器等の分野で望まれている。しかし、銅とステンレス鋼は融点や熱伝導率といった熱物性値が異なり、冶金的にも合金を作りにくいとされている¹⁾。現在、銅とステンレス鋼の接合はろう付や TIG 溶接が主流であるが、いずれも熟練度を要する作業であり、熱によるひずみが大きいなどの問題がある。一方、レーザー溶接は入熱量の管理が容易で熟練度を要せず、熱ひずみも小さい等のメリットがあり、異種金属接合にも用いられる。従来のレーザー溶接機は高出力で高価なものが一般的であり、導入に至らない企業も多かったが、最近では金型の補修に用いられる小出力で安価なレーザー溶接機も普及している。本研究は純銅及びステンレス鋼の薄板に対して小出力レーザーを用いて突合せ溶接を試み、溶込み状況、接合強度、硬さ等を評価し、最適な条件を検討した。

2. 実験方法

2-1 試験片及び実験装置

供試材は板厚 0.5 mm の無酸素銅 (C1020) 及び SUS304 鋼板を用いて 50 mm×150 mm に機械加工し、突合せ面を#1000 のエメリー紙で研磨して試料を作製した。

図 1 に実験装置を示す。レーザー溶接機は金型の補修に

利用される肉盛溶接装置 TL-150S (テクノコート製) を用いた。レーザー光源は Nd:YAG、波長は 1064 nm、発振形態はパルス発振である。レーザーヘッドの下に XY ステージを設置し、これに試料を突合せた状態で側面及び上部から固定し、XY ステージの駆動により走査させ、溶接を行った。溶接速度は 60 mm/min とし、接合部は酸化防止を目的として上下ノズルから Ar ガスを 10 L/min 流した。レーザー出力の測定はレーザーパワーメータ FL250A-LP1,NOVA2 (オフィール製) により実測した。

2-2 レーザ照射条件

ステンレス鋼の主成分である鉄と銅は液体状態では溶け合うものの固体状態で互いに溶けにくい相性であり、接合するためには両金属を同時に溶融、攪拌させる必要がある¹⁾。レーザー溶接は母材を瞬間的に溶融、蒸発状態にさせ溶融池を対流する効果があり、銅とステンレス鋼の接合に向いていると考えられる。表 1 のように両金属の物性値は異なっており、溶融するために必要なエネルギーもそれぞれ異なる。例えば、銅に比べて融点の高いステンレス鋼を溶融するためにはより多くのエネルギーが必要となると予測されるが、レーザーに対する光吸収率は銅の方がステンレス鋼よりも大幅に低いと、銅が溶融するためにはその分多くのエネルギーを必要とする。そこで、両金属へのエネルギーを調整するために照射位置を変化させ、両金属が同時に溶融し攪拌する条件を検討した。また、レーザー溶接では出力が小さいと溶融不足に、出力が大きいと溶落ち等の問題を引き起こす可

性能があるため、出力を変化させて適切な接合が可能となる出力条件を探った。

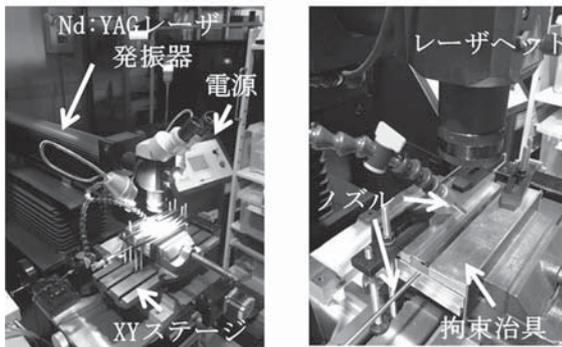


図1 実験装置

表1 各試料の物性値¹⁾

	SUS304	C1020
融点 (K)	1723	1356
熱伝導率 (W/mK)	16.3	398.5
レーザー吸収率 (%)	40	5

2-3 評価方法

(1) 溶込み状況の確認

接合部の溶込み状況を確認するため、溶接方向と垂直に切断して断面試料を作成し、光学顕微鏡で観察した。なお、エッチングは塩化第二鉄、塩酸及びエタノールの混合液による化学腐食を行った。また、溶融部における両金属の攪拌状態を確認するために X 線分析顕微鏡 XGT-5200TypeSL (堀場製作所製) を用いて各元素の面分析を行った。

(2) 接合強度試験

接合部に溶融不足やクラック等の欠陥があると強度は低下する。接合部を評価する目的で引張試験を実施した。引張試験機には万能材料試験機 RTC-1310 (オリエンテック製) を用い、10 kN ロードセル、試験速度 1 mm/min の条件で各試料 5 点を測定し、その平均値を測定値とした。

(3) 接合部周辺の硬さ試験

レーザー溶接による熱影響部を調査するためにビッカース硬さ試験を行った。試験機はマイクロビッカース硬さ試験機 MVK-G3500AT (アカシ製) を用い、試験荷重 0.4903 N、保持時間 10 s の条件で測定した。測定箇所は試料上部より 0.2 mm 内側で、溶融部中心から両金属側へそれぞれ 1.0 mm の範囲を 0.1 mm 間隔で測定した。

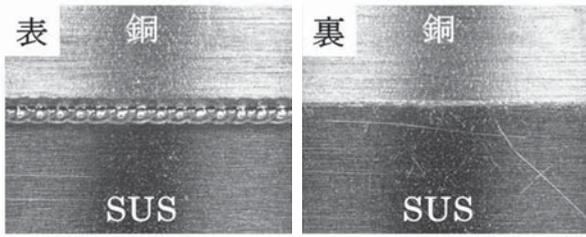
3. 結果

3-1 レーザ出力の影響

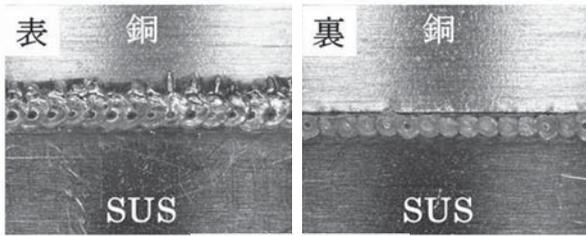
レーザーの照射位置を突合せ面から SUS 側へ 0.1 mm シフトした時の各出力におけるビード外観を図 2 に、溶接断面写真を図 3 に示す。出力 8 W の場合、表ビード幅は約 0.4 mm 程度であり、裏ビードは現れなかった。また、溶接断面は試料上部で SUS が僅かに溶けているだけで銅との接合箇所は確認できなかった。17 W では表ビード幅が約 0.6 mm に広がり、裏面の SUS 側に溶融の痕が確認されたが、銅側は溶融しなかった。溶接断面写真から SUS 側が溶融し、銅側の上面に乗り上がるように接合していることがわかった。25 W 以上になると表ビード幅は 0.8~1 mm 程度に広がり、裏ビード幅は約 0.6~0.8 mm であった。また、25W では表ビード中心部に溶接方向と平行な縦割れが発生した。この縦割れは出力が 33 W になると大きくなり、裏ビードでも確認された。出力 25 W の溶接断面をみると、主に SUS 側が溶融し銅側の上下面で接合しており、ビード中央に発生した縦割れは裏面に至っていない。33 W では縦割れが裏面まで貫通しており、溶融部の中心において 0.23 mm 程度の減肉がみられた。なお、本研究の条件範囲において過大な出力による溶落ち現象は確認されなかった。

3-2 照射位置の影響

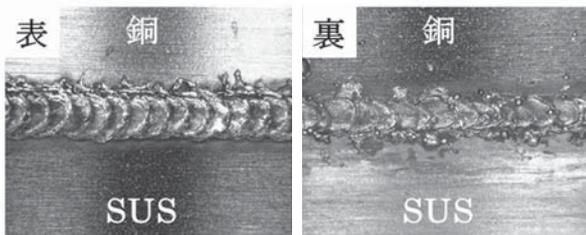
出力 25 W における照射位置とビード外観の関係を図 4 a) ~c) に、33 W で銅側 0.2 mm に照射した時のビード外観を図 4 d) に示す。また、各条件における溶接断面写真を図 5 に示す。出力 25 W で SUS 側 0.2 mm に照射した (以下、25W/SUS0.2 と表記する) 場合、表ビードは SUS 側に偏り、裏ビードは SUS 側のみ現れていた。溶接断面をみても、溶融部は SUS のみで銅は溶けなかった。また、裏面には多くのスパッタが発生しており、0.2 mm 程度の減肉もみられた。前述のように SUS 側 0.1 mm に照射すると、ビード中央に縦割れが生じており、突合せ面~銅側 0.1 mm に照射した場合は縦割れが大きくなり、突合せ面に照射した条件では接合ができなかった。銅側 0.2 mm になると、表ビードが 0.3 mm 程度に狭くなり裏ビードは現れず、溶接断面をみても試料上部が僅かに接合しているだけで溶融不足であった。一方、33W/Cu0.2 条件は表ビードが約 1 mm、裏ビードが 0.8 mm であり、ビード中央の縦割れも発生しなかった。溶接断面写真では両金属が互いに溶合い、全域で接合している様相が観察された。図 6 に XRF 面分析による溶融部の溶込み状況を示す。25W/SUS0.1 条件の場合、溶融部に銅はほとんど存在していないが、33W/Cu0.2 条件では溶融部の広範囲にわたって銅が分布しており、レーザーによる対流効果が確認できた。なお、突合せ面から各金属へ 0.3 mm シフトさせると、接合はできなかった。



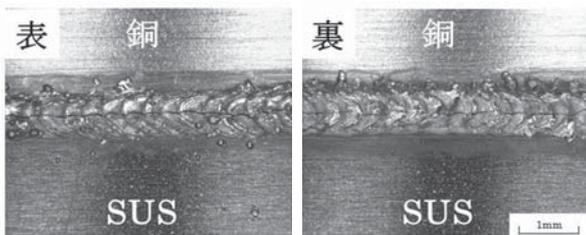
a) 8W/SUS0.1



b) 17W/SUS0.1

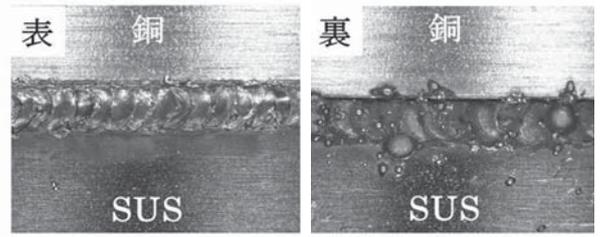


c) 25W/SUS0.1

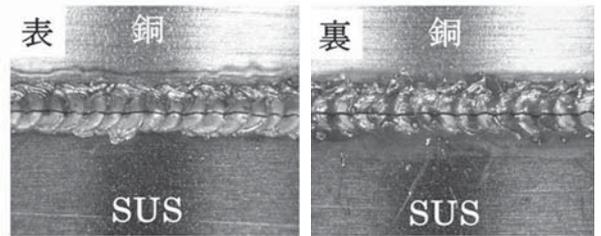


d) 33W/SUS0.1

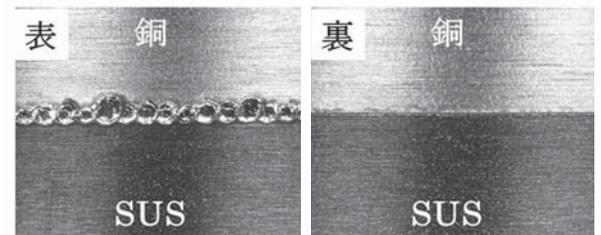
図2 ビード外観と出力の関係



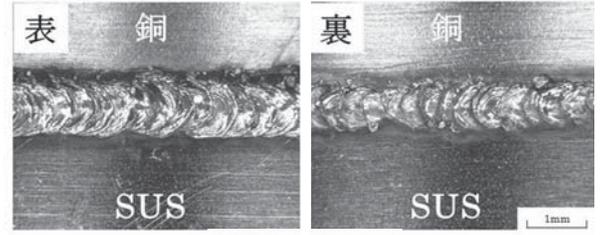
a) 25W/SUS0.2



b) 25W/Cu0.1

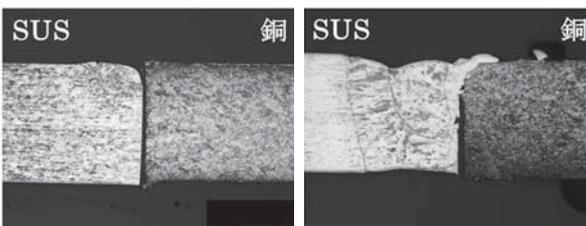


c) 25W/Cu0.2



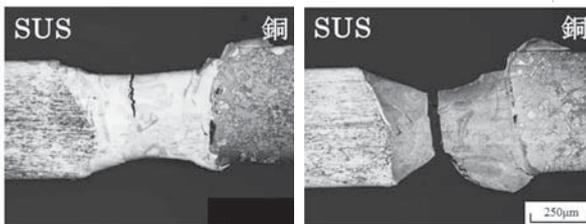
d) 33W/Cu0.2

図4 ビード外観と照射位置の関係



a) 8W/SUS0.1

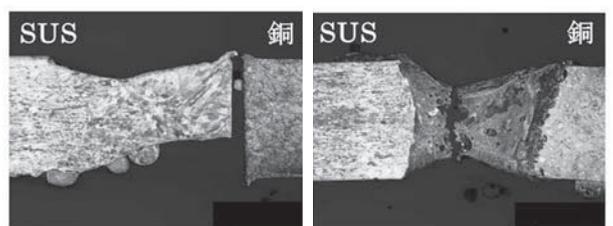
b) 17W/SUS0.1



c) 25W/SUS0.1

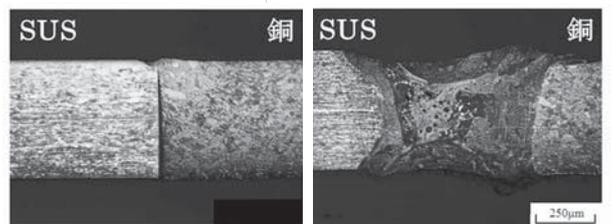
d) 33W/SUS0.1

図3 溶接断面と出力の関係



a) 25W/SUS0.2

b) 25W/Cu0.1



c) 25W/Cu0.2

d) 33W/Cu0.2

図5 溶接断面と照射位置の関係

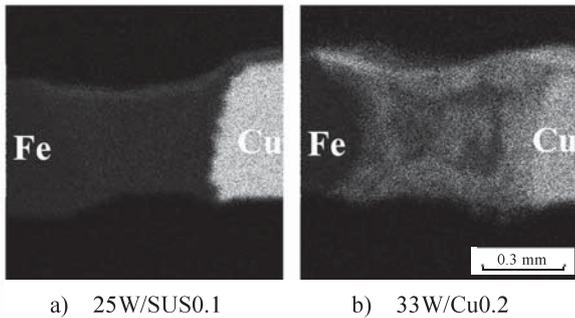


図6 XRF 面分析による溶融部の溶込み状況

3-3 ビード中央の縦割れについて

出力 25 W 以上、SUS 側 0.1 mm～銅側 0.1 mm の範囲において発生した縦割れは溶接直後に観察されており、その発生箇所がビード中央部であることから、高温割れと推察される。高温割れは凝固の際に母材と接する周囲から固まり収縮していくことでまだ液体状態で存在している中央部が広げられ、空間として残る割れである。合金元素の偏析に伴う低融点化や過大な入熱による収縮ひずみ量の増加により起こり易くなる²⁾。本実験でも 25 W 以上の比較的大きい出力において割れが発生した。また、接合界面において少量の銅がステンレス鋼中に固溶することで偏析及び低融点化を招き、高温割れを助長したものと考えられる。一方、33W/Cu0.2 条件の場合は銅側にシフトして照射したことで熱が拡散し易く入熱量が抑えられたため縦割れが発生しなかったと思われる。また、同条件の溶融部は広範囲に渡って銅が分布しているが、鉄中における銅の固溶限は低いことから、その多くは単体として存在している。ステンレス鋼よりも融点の低い銅が溶融部全域に分布していたため、凝固過程において母材と接する周辺部ではステンレス鋼成分から凝固がはじまり、次いで中央部のステンレス鋼成分が凝固し、その後に周辺部及び中央部の銅が凝固することで、高温割れを防いだものと推察される。

3-4 接合強度試験結果

各条件の接合可能な範囲において引張試験を行い、接合強度を評価した。図 7 に照射位置 SUS 側 0.1 mm における出力と接合強度の関係を示す。出力が 25 W 以下の場合、引張強さは出力の増加に伴って上昇し、25 W で約 210 MPa の引張強さを得たが、33 W になると引張強さは小さくなった。出力が小さい時は溶融不足のため強度が低下し、出力の増加に伴い溶融が促されようになると、強度は次第に大きくなったものと思われる。また、25 W ではビード表面に縦割れが確認されるもののその程度は小さく、接合強度にあまり影響しなかったが、33 W になると縦割れは大きくなり強度の低下を招いた。

図 8 に出力 33 W における照射位置と接合強度の関係を示す。照射位置を SUS 側から突合せ面側にシフトするに従い、引張強さが低下し、突合せ面では全く接合しなかった。銅側 0.1 mm になると引張強さはやや上昇し、銅側 0.2 mm で約 240 MPa の引張強さが得られた。SUS 側 0.2 mm に照射した場合は銅側の溶融不足により引張強さが小さく、SUS 側 0.1 mm～銅側 0.1 mm の範囲はビード中央に発生した縦割れの影響を受け、引張強さが低下したと考えられる。銅側 0.2 mm に照射した場合、前述のように良好な溶込み状況であり、接合部の引張強さも大きかったものと思われる。なお、この条件における破断箇所は接合部ではなくビード近傍の銅側母材であったことから、十分な接合強度が得られたといえる。

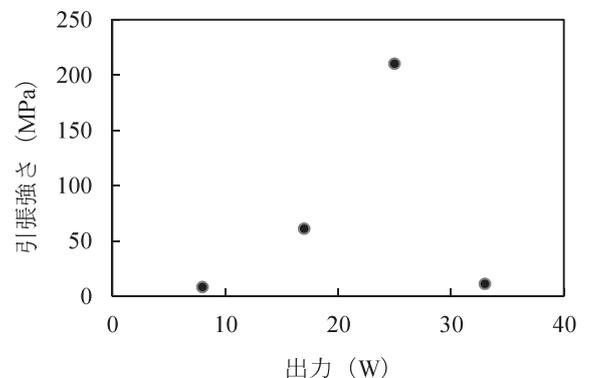


図7 接合強度と出力の関係

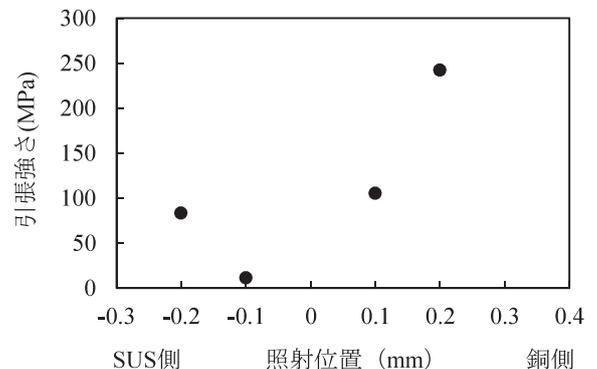


図8 接合強度と照射位置の関係

3-5 接合部周辺の硬さ試験結果

溶接による熱は硬さに影響を及ぼすため、その熱影響部範囲を確認するために硬さ試験を行った。図 9 に 25W/SUS0.1 と 33W/Cu0.2 の各条件における接合部周辺部の硬さ分布を示す。両金属の初期状態におけるビッカース硬さは SUS が約 430 HV0.05、銅が約 100 HV0.05 であり、薄板であるためいずれも圧延による加工硬化の影響を受けていると思われる。接合後の SUS 側の熱影響部は各条件とも接合部中心から約 0.5 mm の範囲であっ

た。また、銅側の熱影響部も接合部から 0.5～0.6 mm 程度であった。接合部近傍の銅母材部の硬さは 80 HV0.05 程度に軟化していたが、無酸素銅の焼なまし状態における硬さが 50 HV 程度であることから³⁾、完全に軟化していないことがわかった。溶融部の硬さは 25W/SUS0.1 が約 180～200 HV0.05、33W/Cu0.2 が 145～180 HV0.05 と、後者の方が小さく、溶融部に多く分布した銅の影響を受けたためと考えている。

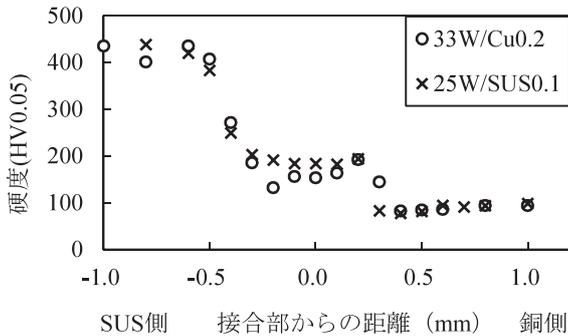


図9 各条件における接合部の硬さ分布

4. 結 言

板厚 0.5 mm のステンレス鋼板及び銅板に対して、出力を 8 W～33 W、照射位置を SUS 側 0.2 mm～銅側 0.2 mm に変化させて接合を試み、溶込み状況、接合強度及び接合部の硬さ分布の評価を行ったところ、以下のことが明らかとなった。

- (1) 出力の増加に伴い表ビードは広がり、17 W 以下では裏ビードは確認できなかった。25 W 以上になると、照射位置 SUS 側 0.1 mm～銅側 0.1 mm においてビード中央に縦割れが発生した。
- (2) 33W/Cu0.2 条件では溶融部において銅とステンレス鋼による対流効果が確認できた。
- (3) 照射位置 SUS 側 0.1 mm 条件における接合強度は出力 25 W 以下の場合で出力の増加に伴い上昇したが、33 W になると縦割れの影響を受けて引張強さは小さくなった。
- (4) 出力 33 W における接合強度は SUS 側から突合せ面側にシフトするに従い低下し、突合せ面では接合しなかった。一方、銅側 0.1 mm にシフトすると接合強度は上昇し、銅側 0.2 mm で約 240 MPa の接合強度を得た。なお、この条件における破断箇所は接合部ではなく、ビード近傍の銅側母材で破断したことから十分な接合強度が得られた。
- (5) SUS 側の熱影響部は接合部中央から 0.5 mm の範囲であり、銅側の熱影響部は 0.5～0.6 mm の範囲であった。溶融部の硬さは 33W/Cu0.2 のほうが 25W/SUS0.1 よりも小さかった。

参考文献

- 1) 佐々木淳, 池野順一: レーザ異種金属接合に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.55, No.6, pp.348-353 (2011)
- 2) 松田福久: 溶接・接合技術 Q & A1000 (美巧社) pp.311-314 (1999)
- 3) 松田福久: 溶接・接合技術データブック (美巧社) pp.385 (2007)