

小出力レーザーによる異種金属接合に関する研究（第2報）

深澤郷平・勝又信行・佐野正明

Study on Dissimilar Metal Welding by Low Power Laser (2nd Report)

Kyohei FUKASAWA, Nobuyuki KATSUMATA and Masaaki SANO

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、製品の高機能化が期待できる。たとえば、耐食性と高い機械的強度を持つステンレス鋼と熱伝導率の良い銅との接合は熱交換器等の分野で需要がある。本研究ではこれまでに小出力 YAG レーザを用いて SUS304 鋼板と銅板の突合せ溶接を検討し、良好な接合強度を得た。得られた知見を基に本報ではフェライト系ステンレス鋼の代表的な鋼種である SUS430 と銅との接合の突合せ溶接を試み、接合強度、溶込み状況、硬さ分布を評価して最適な条件の検討を行った。その結果、SUS 側へ照射した場合は十分な接合強度が得られず、SUS 側 0.1mm~Cu 側 0.1mm に 35W 以上の出力で照射すると、縦割れが発生し接合強度が低下した。一方、Cu 側 0.2mm に 45W で照射すると、250MPa 以上の良好な接合強度を得ることができた。また、接合部の硬さ分布から両金属への熱影響は小さかった。

1. 緒 言

近年、材料を適材適所で組み合わせる素材の特性を活かし、製品の高機能化を図る異材接合技術のニーズが高まっている。なかでも耐食性と高い機械的強度を持つステンレス鋼と良好な熱伝導率を誇る銅との接合は熱交換器などの分野で望まれている。現在、これらの接合は TIG 溶接やろう付けが主流であるが、いずれも熟練度を要する作業であり、熱影響も大きい。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、熱影響も小さいという利点がある。さらに、融点の異なる場合も時間差なく熔融できるので異種金属間の溶接に適している¹⁾。従来のレーザー溶接機は 600W~6kW の高出力で高価なものが一般的であり導入し難い面があったが、最近では小出力で安価なレーザー溶接機も普及している。当センターでも金型の補修に用いる小出力の YAG レーザ溶接機を保有しており、これを利用してステンレス鋼板と銅板の接合を検討した。

本研究ではこれまでに代表的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼板と銅板の突合せ溶接を試み、良好な接合を得ることができた²⁾。第 2 報ではフェライト系ステンレス鋼の代表的な鋼種である SUS430 と銅との接合について検討を行った。SUS430 はニッケルを含有していないため SUS304 に比べて安価で硝酸への耐食性が優れているなどの特徴もあり、広く利用されている³⁾。一方、溶接性はオーステナイト系ステンレス鋼と比較して難しく、高温状態に保持されるとシグマ脆化や 475℃ 脆化などの問題も発生するため、低入熱の溶接手法が推

奨されている⁴⁾。本報では小出力 YAG レーザを用いて SUS430 鋼板と銅板の突合せ溶接を試み、接合強度、溶込み状況、硬さ分布を評価し最適な条件の検討を行った。

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 のステンレス鋼板 (SUS430, 以下 SUS と記す) 及び無酸素銅板 (C1020, 以下 Cu と記す) 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、図 2 に実験手法の概略をそれぞれ示す。レーザー溶接機は金型の補修にも利用される肉盛溶接装置 (TL-150S テクノコート (株)) 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、このステージ上に両金属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、接合を試みた。パルス条件は周波数 3.0Hz、パルス幅 8ms とし、溶接速度は 60 mm/min とした。また、レーザー照射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 (株) オフィール) により実測した。

2-2 レーザ照射条件

表 1 に両金属の融点及び波長 1064nm におけるレーザー反射率を示す。なお、レーザー反射率は紫外-可視分光光度計 (V-570 日本分光 (株)) を用いて波長 1064nm

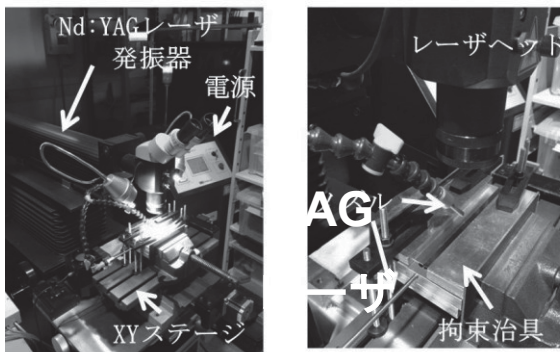


図1 実験装置

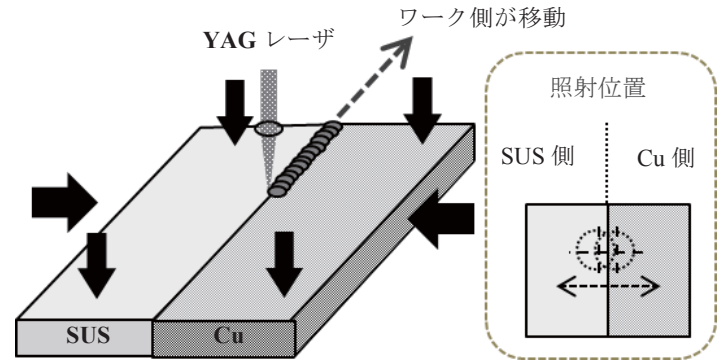


図2 実験装置及び照射位置の概略図

における反射率を実測した。レーザー溶接は融点の異なる異材同士も時間差なく熔融させ、熔融池を攪拌する効果があり、異材接合に適している。両金属の物性値は表1のように異なっており、熔融するために必要なレーザー出力もそれぞれ異なる。例えば、CuはSUSに比べて融点が低く、熔融するために必要な熱量も少ないが、波長1064 nmにおける光の反射率は銅の方が極めて高いため、レーザーによる入熱量は小さい。そのため、実際にYAGレーザーを照射した場合はCuの方がSUSよりも熔融し難い。そこで、両金属への入熱調整を目的として図2で示すように照射位置をずらし、突合せ面からSUS側に0.1 mm, 0.2 mm, Cu側に0.1 mm, 0.2 mm及び突合せ界面に照射し接合を試みた。また、入熱不足による溶込不良や入熱過大による溶落ちなどのない適正な出力を検討するため、レーザー出力を25W, 35W, 45Wに変化させて実験を行った。

表1 各試料の物性値^{3),5)}

	SUS430	C1020
融点 (K)	1763	1356
レーザー反射率 (%)	68	92

2-3 評価方法

(1) 接合強度

両金属の接合強度を評価するために引張試験を実施した。試験片は接合後の試料から幅20 mmに加工した。引張試験機は万能材料試験機 (RTC-1310 (株) オリエンテック), ロードセルは10 kNを用いた。試験速度は1 mm/minで行い、各試料3点を測定し、その平均値を測定値とした。

(2) 溶込み状況

接合部における両金属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製し、光学顕微鏡で観察した。なお、エッチングは塩化第二鉄、塩酸お

よびエタノールの混合液による化学腐食を行った。また、熔融部における両金属の攪拌状態を確認するために電界放出型走査型電子顕微鏡 (JSM-7100F 日本電子 (株)) を用いて観察し、エネルギー分散型蛍光X線分析 (以下EDSと記す) による元素マッピング分析を行った。

(3) 接合部の硬さ分布

レーザー溶接による熱影響について調査するため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 (株) アカシ) を用い、試験荷重0.4903 N, 保持時間10 sの条件で測定した。測定箇所は熔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. 結果および考察

3-1 接合強度

SUSとCuの各条件における接合強度を図3に、ビード外観の代表例を図4にそれぞれ示す。SUS側へ照射した場合はいずれの出力においても十分な接合強度が得られなかった。図3中の黒塗りで示した照射条件 (35W以上SUS側0.1~Cu側0.1 mm) では図4 b)の様にビード中央に縦割れが発生し、強度は低下した。Cu側0.2 mmに照射した場合、35 W以下の出力では溶込不良で接合強度は小さかったが、45 Wの出力で照射した条件 (以下45 W/Cu0.2のように出力/照射位置と記す) では250 MPa以上の良好な接合強度が得られ、ビードにも縦割れが発生していなかった。さらに、引張試験後の破断位置もビード部ではなくCu側の母材であり、十分な接合強度を得ることができたと考えられる。

3-2 溶込み状況

(1) 溶接断面における溶込み状況

図5に溶接部断面の代表例とそれらのEDS面分析結果を並べて示す。SUS側へ照射した中で最も大きい接合強度であった25W/SUS0.1の熔融部はSUS側のみ溶けており、Cu側は溶けていなかった。またEDS面分析結果からも熔融部にはSUSの主成分であるFeのみ存在

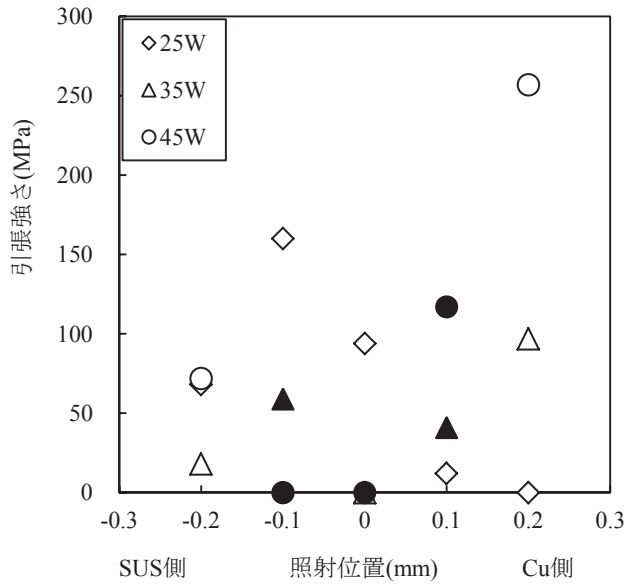


図3 各条件における接合強度
※黒塗りは縦割れ発生条件

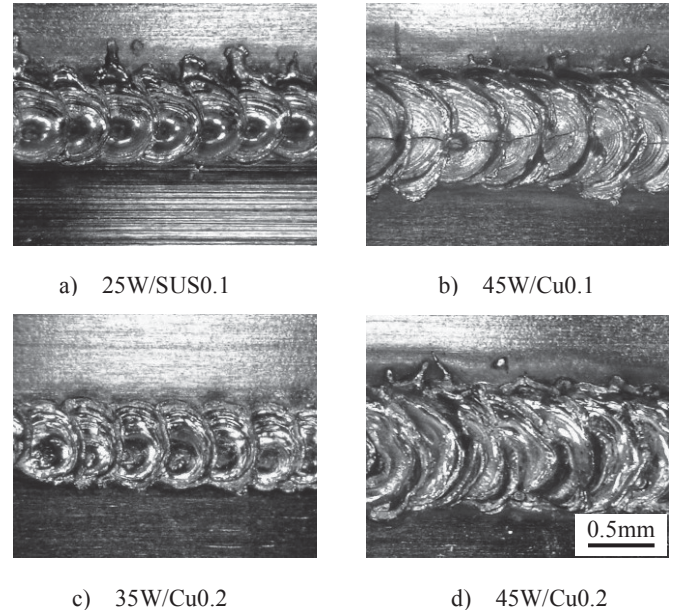


図4 ビード外観の代表例

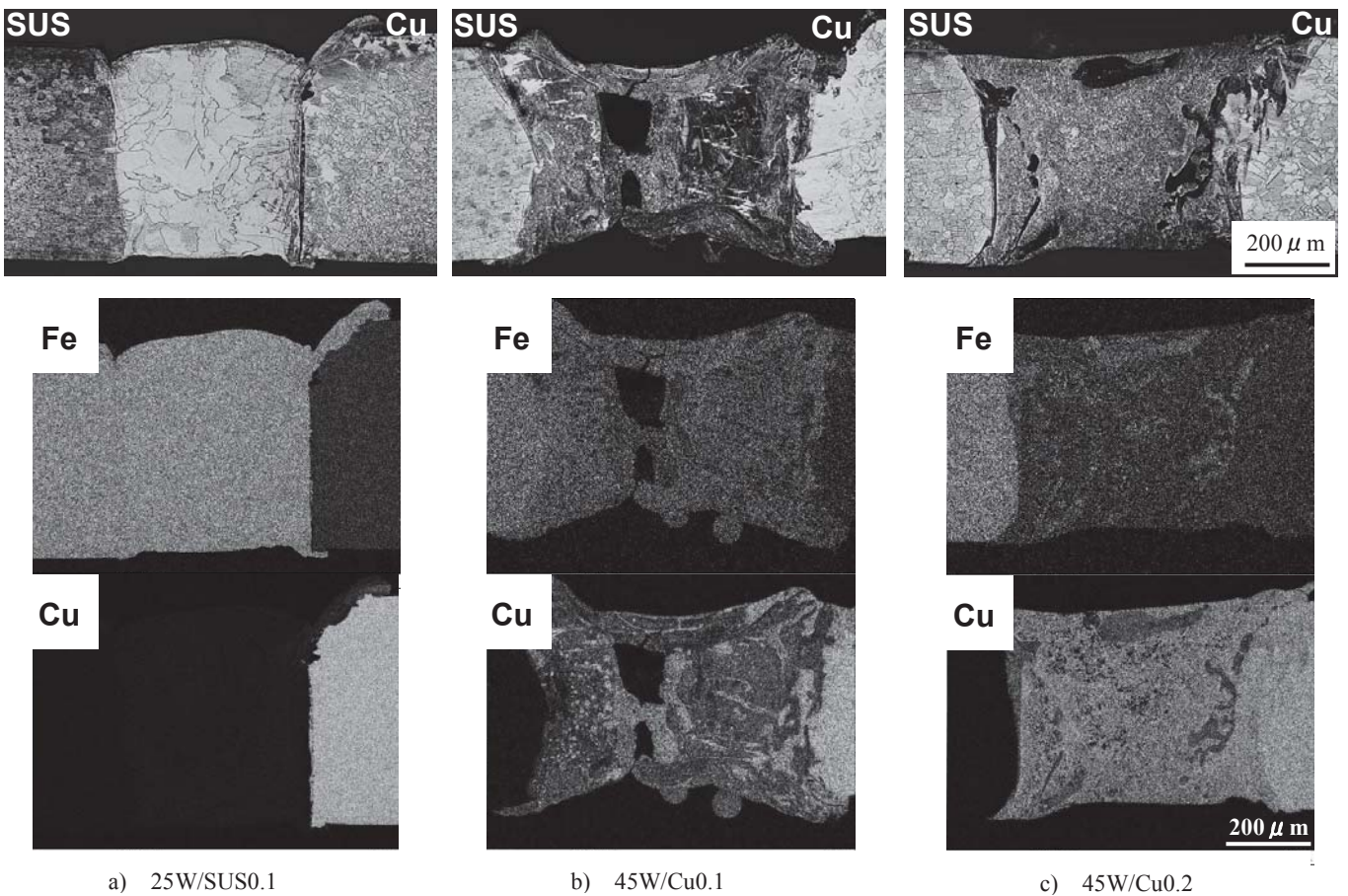


図5 各条件における溶接部断面と EDS 面分析結果

しており、Cu はほとんどなかった。このことから SUS 側へ照射した場合は互いに十分に溶け合わず、接合強度が小さかったものと考えられる。縦割れが発生した 45W/Cu0.1 の溶融部は割れと繋がった空隙が観察された。また、溶融部の EDS 面分析結果を見てみると、両元素

は混ざり合っているものの Cu が不均一に分布していることがわかった。一方、最も良好な接合強度を得た 45W/Cu0.2 の溶融部では両金属が互いに溶け合っており、EDS 面分析結果からも多量の Cu が溶融部全域に渡って均一に分布している様子が確認できた。

(2) 縦割れの原因とその防止について

縦割れの発生原因は高温割れの一つである凝固割れによるものと考えられる。凝固割れとは凝固の過程で成長してきた柱状晶の境界面に残留する液相が溶接金属の凝固直前において収縮ひずみに抵抗しきれずに開口する割れである⁶⁾。溶融部における冷却過程について考えてみると、熱は両金属側へ移動するため、冷却は両金属に接した部分から始まる。1763K以下になると両金属に接した融液中の SUS 成分が凝固し始め、温度の低下に伴い凝固が完了した SUS の熱収縮が発生する。溶融部は SUS の収縮に伴うひずみにより両金属側に引張られるために中央部の融液が不足した状態となる。1356K以下に低下し、Cu の凝固が始まると中央部は収縮ひずみに抵抗しきれずに開口し、割れに至ったと考えられる。図 6 に 45W/Cu0.1 及び 45W/Cu0.2 における溶融部詳細の EDS 面分析結果を示す。45W/Cu0.1 の溶融部は Fe 中に球状の Cu が存在していたのに対し、縦割れが発生しなかった 45W/Cu0.2 では Cu 中に球状の Fe が存在していた。45W/Cu0.2 は溶融部全域に渡って Cu が多量かつ均一に分布していることを考慮すると、SUS 成分の多くはまだ融液状態である Cu の融液中に晶出したと考えられる。従って SUS の収縮に伴うひずみは小さくなり、縦割れを防ぐことができたものと推察される。

3-3 接合部の硬さ分布

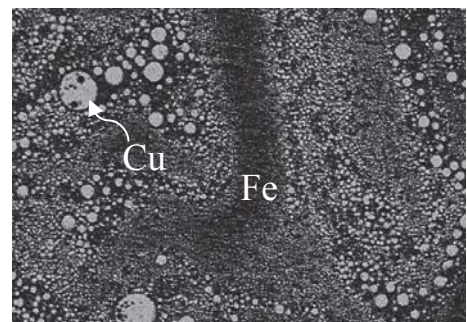
45W/Cu0.2 における接合部の硬さ分布を図 7 に示す。SUS 母材の硬さは約 160HV0.05、Cu 母材は 95HV0.05 程度であった。溶融部は中心から±0.3 mm の範囲に有り、その硬さは 150~320HV 程度のばらつきが見られた。SUS430 は低炭素のため、焼入性と焼入硬さは小さいものの急冷によってマルテンサイト化することが知られている⁴⁾⁷⁾。溶融部は急冷によってマルテンサイト化した SUS430 と Cu が混在したため、SUS 母材を上回る硬さまでばらつきが生じたものと推察される。一方、SUS 母材の硬さにおよぼす熱影響はほぼなかった。また、Cu 母材は中心から 0.4 mm~0.6 mm の範囲で 10HV 程度の僅かな低下が見られたが、銅の焼鈍状態における硬さは 50HV 程度であり⁸⁾、これを考慮すると熱影響は小さいものと考えられる。

4. 結言

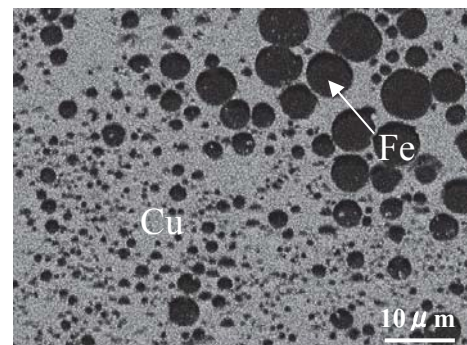
小出力 YAG レーザを用いて板厚 0.5 mm の SUS430 鋼板及び銅板に対して照射位置及び出力を変化させて接合を試み、接合強度、溶込み状況、接合部の硬さ分布を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) SUS 側へ照射した場合は溶融部に Cu が溶け込んでおらず、十分な接合強度は得られなかった。

- 2) SUS 側 0.1 mm~Cu 側 0.1 mm に 35W 以上の出力で照射すると、縦割れが発生し、接合強度の低下を招いた。
- 3) Cu 側 0.2 mm に照射した場合、35W 以下の出力では溶込不良により接合強度は小さかったが、45W の出力で照射すると、250 MPa 以上の良好な接合強度を得た。
- 4) 縦割れは SUS 凝固時の収縮ひずみに伴う割れであり、Cu 側 0.2 mm に照射し、溶融部の Cu を増加させ均一に分布させることで、縦割れを防ぐことができた。
- 5) 接合部硬さ分布から両金属への熱影響は小さいことがわかった。



a) 45W/Cu0.1



b) 45W/Cu0.2

図 6 溶接部詳細の EDS 面分析結果

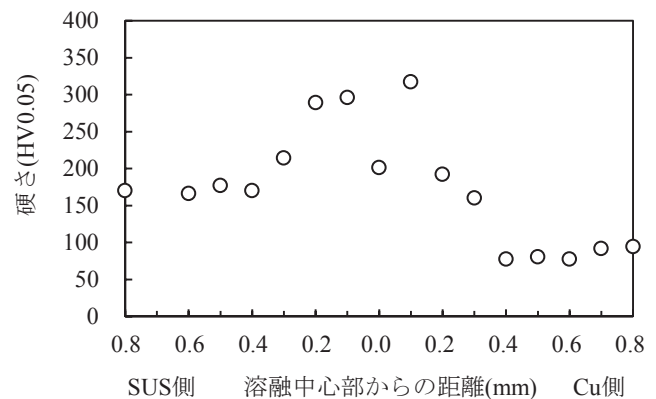


図 7 45W/Cu0.2 における接合部の硬さ分布

参考文献

- 1) 新井武二: 絵ときレーザー加工基礎のきそ (日刊工業新聞社), pp.114-115 (2007)
- 2) 深澤郷平, 星野昌子, 勝又信行: 小出力レーザーによる異種金属接合に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.30, pp.60-64 (2016)
- 3) C・A・ゾッフィー: ステンレス鋼入門 (特殊鋼倶楽部), pp.190-206 (1965)
- 4) 松田福久: 溶接・接合技術 Q&A1000 (美巧社) pp.623-625 (1999)
- 5) 濱住松二郎: 非鉄金属および合金 (内田老鶴團新社), p.37 (1972)
- 6) 本間弘之: 溶接割れとその防止 3 溶接高温割れ, 溶接学会誌, Vol.57, No.7, p.496 (1988)
- 7) 日本鉄鋼協会: 鋼の熱処理 (丸善), p.562 (1969)
- 8) 松田福久: 溶接・接合技術データブック (美巧社) p.385 (2007)