銅とステンレス鋼のレーザ異種材料接合*

佐々木 淳** 池野 順一***

Different Metal Materials Laser Welding of Copper and Stainless Steel

Makoto SASAKI and Junichi IKENO

With a technological advance of the industrial product, weld between the different kind metal is demanded. Above all, demands for welding of the different kind metals, copper and stainless steel, increase. However, forming a welded joint between stainless steel and a copper is difficult because the physical properties of the two metals - such as thermal conductivity and melting point - are different and they do not form an alloy. In this report, laser welding of copper (C1020) plate and stainless steel (SUS304) plate of thickness 1.5mm using a disk YAG laser was examined. The bondable welding conditions were selected, and the structure of welding copper and stainless steel was evaluated by EPMA and X-ray diffraction. As a result, it was found that copper and stainless steel were mixed and were joint by mechanical linking, when laser irradiation position put off in the copper side from 0.1mm to 0.2mm. In addition, it was found that it didn't separate of each component and didn't generate of new alloy in the weld.

Key words: laser welding, YAG laser, stainless steel, copper, EPMA, X-ray diffraction

1. 緒 言

素材や製品の一部材質を変更することで軽量化や高機能化、コストの低減が可能である。そのため、異種金属間での接合が多く行われている。例えば、ラジエータなどの熱交換器では、熱伝導率の高い銅や銅合金と耐食性や機械的強度が高いステンレス鋼の接合が望まれている。ただ、ステンレス鋼と銅は、融点や熱伝導率といった熱物性値が異なり、また冶金学的には合金を作りにくい材料とされている。しかし、近年腕の良い職人によって突合せでの TIG 溶接やロー付けがなされるようになり、さらに拡散接合や摩擦圧接によって接合できるようになった^{1,2)}。今後は技能から技術化を進めるとともに、拡散接合においては接合時間の短縮による生産性の向上、摩擦圧接においては形状や材質の制限、研削などの仕上げ加工も必要となるなどの課題に取り組まなければならない。

一方、レーザによる銅とステンレス鋼の接合はレーザ吸収率の高いステンレス鋼にレーザを照射する重ね合わせ溶接が多く行われている³⁾。しかし、配管や継ぎ手の場合、重ね合わせ接合は形状の制約があり、突合せ接合ができれば技術化と生産性の向上の観点から有益である。突合せ接合例としては青銅鋳物とステンレス鋼を突合せ溶接したものが、一定の強度は得られているが、一部割れの発生が確認されている⁴⁾。銅合金は不純物の影響で割れが誘発される恐れがある。そこで、筆者らは純銅とステンレス鋼で良好な接合条件を同定し、銅合金へ展開するための実験を行った。パルス YAG レーザ(数十 W)を用いて、厚さ 0.3mm の突合せ溶接において、メカニカルリンクングでの接合を成功させた⁵⁾。しかし、これ以上板厚が厚いものに対しては、銅合金のレーザ反射率が高いため出力不足で接合することがで

きなかった。さらに、YAG ディスクレーザ(最大出力 1kW)を用いて、ステンレス鋼と銅の板厚 1.5mm 同士の突合せ接合実験を行い、レーザ照射位置を銅側にシフトさせることにより接合強度に優れた接合条件範囲を同定した⁶⁾。しかし、接合部内で元素の分離、合金化等は把握できておらず、そのメカニズムは解明できていない。接合部内のメカニズムを明らかにすることは形状が変わった場合や他の銅合金の接合を行う際に有用である。そこで、接合部のメカニズムを解明するために接合部内の分析を行ったので報告する。

2. レーザ突合せ接合方法

2.1 実験方法

銅とステンレス鋼は互いに合金を作りやすく濡れ性が悪い組み合わせである。よって突合せ接合する場合、双方を同時に溶融させ強制的に攪拌する必要がある。レーザを用いれば、微小領域に高エネルギーを集中させることができ、両金属を瞬間的に溶融状態にすることができる。さらに、高速マイクロ流体が生じ、溶融池が攪拌される⁷⁾。したがって、銅とステンレス鋼の接合にはレーザの利用が優位である。本研究で銅は無酸素銅(C1020)、ステンレス鋼として SUS304 を使用した。これらの物性値を表 1 に示す。なお、レーザ吸収率は材料の表面状態や組成によって異なるため、使用した材料からレーザ反射率と透過率を測定し、算出した。今回も用いた試料ではそれぞれの表面粗さは銅が Ra0.28 μm 、ステンレス鋼が Ra0.24 μm 、である。これらを比較すると融点はステンレス鋼の方が 1723K と銅に比

Table 1 Physical properties of SUS304 and C1020

	SUS304	C1020
Melting point K	1723	1356
Heat conductivity W/mK	16	399
Rate of absorption %	40	5

* 原稿受付 平成 23 年 7 月 26 日

** 正 会 員 日立金属(株) (埼玉県熊谷市三ヶ尻 6010)

*** 正 会 員 埼玉大学大学院 (埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

べ 367K 高いが, YAG レーザの波長 1064nm での光吸収率は銅が 5% であり, ステンレス鋼の 1/8 である。そこで, 突合せ接合時に突合せ面に対してレーザの照射位置を銅側, またはステンレス鋼にずらすことで, それぞれの試料への入熱量を変化させ, 同時に溶融, 攪拌できる条件を探ることとした。一方, ステンレス鋼はクロムやニッケルが含まれており, 接合時に新たな合金の生成や偏析が生じてしまう可能性がある。とくに偏析が生じた場合, ガルバニック腐食により局所的な腐食が進行する危険性もある⁸⁾。そこで, レーザを用いた適切な突合せ加工条件を同定するとともに, 接合部を観察, 分析し, 接合構造, 局所的な合金, 偏析の有無など加工品位について評価を行った。

2.2 実験装置

図 1 に実験装置の概略を示す。レーザ発振器はトルンプ社製ディスクレーザ HLD1001.5 を用いた。発振形態は連続発振, ビーム波長は 1064nm, 最大出力は 1kW である。伝送ファイバコア径は 0.15mm, 集光レンズの焦点距離は 200mm である。

試料は, 50mm×25mm×1.5mm に切断し, 端面を 1000 番のサンドペーパーで研磨したものを, 加圧機構により側面より圧着して突合せ, XY ステージに固定した。レーザヘッドは固定した状態でレーザ照射し, XY ステージの駆動により材料を走査し, レーザ接合を試みた。なお, 加工中は接合部の酸化を防ぐために, 試料の上下からノズルにおいてアシストガス(アルゴンガス)を噴射させた。なお, 使用したノズル内径は $\phi 4\text{mm}$, ノズルの位置はレーザ照射位置から 5mm 離れており, 45°の角度で銅側から噴射している。また, アシストガス圧は 0.2MPa である。

2.3 評価方法

接合部の構造を解析するために以下の分析を行った。

(1)EPMA 分析

接合部は銅とステンレス鋼が攪拌しているため, 複雑な構造になっていると思われる。接合部でそれぞれの元素がどのような分布をしているか調査するために EPMA 分析を行った。試料を樹脂埋めし, 断面を研磨して, 分析を行った。使用した装置は島津製作所製 EPMA-1610 である。測定条件は広域測定でビーム径 5 μm , 測定エリア 2.4mm×2.4mm, 拡大測定でビーム径

1 μm , 測定エリア 45 μm ×45 μm である。マッピング結果は銅(Cu)と SUS304 の主成分である鉄(Fe)について表示した。

(2)X 線回折

レーザ接合時に合金の分離や新たな合金が生成されていないかを確認するために, 接合した試料を断面研磨し, X 線回折測定をおこなった。使用した装置はリガク社製 X 線回折装置 RINT2500PC である。ビーム径は 10 μm で, 測定条件は出力が 40kV-200mA, 試料回転速度は 60mm¹, スキャンスピード 2°min¹, サンプル幅は 0.02°である。

3. レーザ接合実験

3.1 ビードとシフト量の関係

銅とステンレス鋼の接合可能条件を探るために, レーザの照射位置を変化させ実験を試みた。レーザの照射位置は図 2 に示すようにシフト量で表現し, シフト量は突合せ界面とレーザスポット中心の距離で定義した。

図 3 にレーザ照射位置を変化させた場合の溶接ビードの様子を示す。主な加工条件はレーザ出力 750W, 試料送り速度 300mm・min¹ である。ビームデフォーカス量は材料表面を基準(0mm)にして, 上方に 0.5mm とした。このときの試料表面におけるビーム径(1/e²)は, ビームプロファイラによる実測値で 0.32mm であった。

図中の(a)(b)はレーザ照射位置がステンレス鋼側にシフトさせた時のビードの様子を示している。(c)はシフト量 0mm の場合である。これらより, ビード形状は幅が 0.8mm~0.9mm, ビードの発生間隔は 0.1mm と一般的なステンレス鋼同士の溶接ビードと同様に比較的滑らかな外観となった⁹⁾。なお, 図中には示していないが, ステンレス側に 0.7mm を超えてシフトさせると接合はできなかった。

一方, レーザ照射位置を銅側にシフトさせた場合を(d)に示す。ビード幅は 0.6mm~0.75mm と狭くなり, ビードの発生間隔は 0.5mm と広くなることがわかった。なお, 図示していないが銅側へのシフト量が 0.2mm を超えると接合はできなかった。

3.2 強度とシフト量の関係

レーザ照射位置の違いが, 接合強度に及ぼす影響について調査した。ここでは, レーザ照射位置を変化させて接合実験を行った試料に対して, 引張試験を行った。引張試験には, 島津製作所製オートグラフ AG-X(最大引張力 10kN)を使用した。試

Fig.1 Experimental apparatus of laser butt welding

Fig.2 Laser beam position at the welding

Fig.3 Photographs of weld beads at each laser irradiation position

試験料は幅 5mm, 平行部 50mm とし, 試験速度 $10\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ で試験を行った。試料数は各 8 本である。図 4 にシフト量と破断強度の関係を示す。図中の丸印は銅が母材破断したもので, ×印は接合部で破断したものである。また, それぞれの母材の破断強度は, 焼鈍した銅で 220MPa , ステンレス鋼は 520MPa であった。レーザ照射位置を銅側にシフトさせた接合試料ではすべて銅で母材破断し 220MPa 以上の破断強度が得られた。

一方, レーザ照射位置を突合せ面やステンレス鋼側へシフトさせたものは, 一部の試料が接合部から破断した。また, シフト量がステンレス鋼側に 0.4mm のものはすべての試料が接合部で破断した。接合部で破断したものは, 破断強度が 220MPa を下回り, 銅の母材破断した場合に比べ, 破断強度が低下することがわかった。

3.3 破断強度と接合構造の関係

破断強度の違いの原因を調査するために, シフト量ごとに接合の状態を観察した。図 5 はそれぞれの断面の様子を示す。断面はステンレス鋼母材, 溶接部, 銅母材の 3 領域に分割できる。(a)はステンレス側にシフト量 0.4mm の接合試料である。これにより, 上部のみでわずかに接合している状態であることがわ

Fig.4 Relation between breaking strength and shift amount

Fig.5 Photographs of cross section at each laser irradiation position

かった。接合できている断面積が小さいため, 破断強度が低くなっていたことがわかった。一方(b)はステンレス鋼側にシフト量 0.1mm の接合試料を示す。これにより, 溶接部とステンレス鋼の境界ははっきりと確認できないくらい溶融していた。また, 銅と溶接部の界面にはボイドが発生しているものもあった。また(c)はシフト量が 0mm の接合試料を示している。これにより, 溶接部が(a)(b)に比べると判別しやすいものの, 溶接部とステンレス鋼の界面は不鮮明になっていることがわかった。また, 界面が波打っており, 近傍でわずかに銅の溶融がみられるものの, 溶接部は主にステンレス鋼で形成されていることがわかった。また, シフト量がステンレス鋼側, 0mm のものをいくつか観察したところ, ボイドやマイクロクラックが発生したものも存在していた。(e)(f)にシフト量がステンレス鋼側に 0.1mm の時に発生したボイドとマイクロクラックの一例を示す。破断強度の低い試料では, ボイドやクラックが破断の起点となり, 溶接部で破断が生じたものと考えられる。(d)は銅側にシフト量 0.1mm の接合試料を示している。溶接部が鮮明に判別でき, 溶接部で銅とステンレス鋼がよく混ざり合っている様子が観察できた。なお, 溶接部にボイドやクラックの発生は確認できなかった。銅側へシフトしたものは, 溶接部の欠陥がないため, 高い破断強度が得られたと考えられる。溶接部における銅とステンレス鋼の攪拌がクラックやボイドの発生を抑制している可能性がある。

4. レーザ接合部の分析

レーザ照射位置によって溶融部内の状態が異なり, 接合強度に影響を与えていることがわかった。そこで, 溶接部の構造を分析することにより, その構造の解明を試み, 接合のメカニズムを明らかにする。

4.1 EPMA 分析結果

溶接部内の元素を確認するために, EPMA 分析を行った。ステンレス鋼については, 主成分の鉄(Fe)成分のみをカラーマッピング表示する。図 6 にステンレス鋼側にシフト量 0.1mm の元素カラーマッピングを示す。この結果より, 銅と鉄は分離した状態であり, 溶接部では鉄成分しか検出されず, 銅が存在していないことがわかった。このことより, 溶接部はステンレス鋼がレーザ照射により溶融し, そのまま凝固していることがわかった。そこで, 溶接部と銅の界面の状態を詳細に把握するために局所的に拡大分析を行った。図 7 に図 6(a)の白枠部の EPMA カラーマッピングを示す。図 6 では銅とステンレス鋼が層状に分離しているように見えるが図 7 のように拡大すると, 銅と溶接

Fig.6 EPMA analysis when shift amount is SUS side 0.1mm

Fig.7 EPMA analysis in the white frame of Fig.6

部の界面の幅 20 μm のわずかな領域において、銅とステンレス鋼と絡み合っていることがわかった。また、溶接部に銅が存在していないことより、銅はレーザ照射時にステンレス鋼からの熱伝導により溶融していると考えられる。また、凝固時に銅と接しているため銅界面での冷却速度が速くなり、その結果ひずみが生じクラックが発生し、破断強度が低下したものと考えられる。

図 8 にシフト量が 0mm の EPMA カラーマッピングを示す。ステンレス鋼側にシフトさせた場合と異なり、銅が溶接部全体に分散していることがわかった。図 9 に図 8(a)中の白枠部の EPMA カラーマッピングを示す。銅と溶接部の界面ではステンレス側に 0.1mm シフトさせたときと同様に銅とステンレス鋼

Fig.8 EPMA analysis when shift amount is 0mm

Fig.9 EPMA analysis in the white frame of Fig.8

Fig.10 EPMA analysis in the red frame of Fig.8

Fig.11 EPMA analysis when shift amount is Cu side 0.1mm

Fig.12 EPMA analysis in the white frame of Fig.11

Fig.13 EPMA analysis in the red frame of Fig.11

の攪拌が見られた。このことより、ステンレス側にシフトさせた場合と同様に、銅と溶接部の界面で双方の金属が絡みあり接合されていると考えられる。図 10 に図 8(a)中の赤枠部の EPMA カラーマッピング結果を示す。溶接部では銅が 1 μm 程度の粒状に分散していることがわかった。これは、銅の鉄に対する固溶限界が低いため、銅が析出しているためであると思われる。鉄に溶込んだ銅が粒界侵入することで、機械的性質過大な溶込みが生じた場合、銅に溶込んだ鉄が析出相として偏析や耐食性が低下する可能性がある。そのため、溶接部でクラックが発生し、破断強度が低下することが考えられる。

図 11 に銅側にシフト量 0.1mm の EPMA カラーマッピングを示す。ステンレス側にシフトさせた場合、およびシフト量 0mm の場合と異なり、銅、鉄ともに溶接部内に複雑な形状で存在していることがわかった。レーザ照射時に双方の金属が溶融し、攪拌されるが合金を作らないため凝固時に偏析が生じ、攪拌模様ができていいると考えられる。図 12 に図 11(a)中の白枠部の EPMA カラーマッピングを示す。界面付近では微細構造で絡みあっており、物理的に接合されていると考えられる。図 13 に図 11(a)中の赤枠部の EPMA カラーマッピングを示す。シフト量 0mm に比べ、銅の量が全体的に増加していることがわかった。また、銅が線状に存在している加工もあり、クラック等の欠陥に銅が入り込んでいるものと思われる。

図 14 に接合後の銅の含有率を示す。測定箇所は銅母材、銅と溶接部界面の銅側と溶接部側、溶接部内部、溶接部とステンレス鋼界面の溶接部側とステンレス鋼側、ステンレス鋼母材である。それぞれの値は、EPMA 分析結果より算出している。(a)はステンレス鋼側にシフト量 0.1mm させたものである。銅の母材と銅と溶融層境界でわずかに存在するものの溶融層中心部からステンレス鋼側にかけて銅は存在していない。(b)はシフト量が 0mm のものであり、溶融層でほぼ均一に存在しており、銅

Fig.14 Relation between Cu ratio and measuring point

の量は 10%程度である。(c)は銅側にシフト量 0.1mm であり、複雑な溶融混合が生じているためばらつきがあるものの、溶融層には銅が 20%~40%存在していることがわかった。引張試験の結果を合わせて考慮すると、レーザー照射位置をステンレス鋼側にシフトさせたものは溶融層がステンレス鋼のみであり、通常のステンレス鋼同士の溶接に生じる凝固割れなどによるクラックが生じやすくなっている。また、シフト量が 0mm の場合、溶融層内に銅が存在しているが、10%程度であり、ステンレス鋼中に点在している形態となっている。そのため、ベースはステンレス鋼であり、レーザー照射位置をステンレス鋼側にシフトさせた場合と同様に内部クラックが発生しているものと思われる。一方、レーザー照射位置を銅側にシフトさせたものは、溶融層に銅の偏析が生じており、ステンレス鋼同士の溶接とは異なった構造となっている。また、クラック内に銅が入り込んでいるような個所も見られるため、クラック発生を抑制し強度低下を防止していると考えられる。

4.2 X 線回折分析結果

レーザー溶接では急熱、急冷過程のため、溶融層で新たな合金の生成や組成の分離が生じている可能性がある。新たな合金の生成や合金分離の有無を確認するために、X 線回折による解析を行った。図 15 にシフト量ごとの X 線回折の結果を示す。図中の赤線は銅、青線は SUS304、緑線は鉄のピークである。(a)はステンレス鋼側にシフト量 0.1mm、(b)はシフト量 0mm、(c)は銅側にシフト量 0.1mm である。それぞれの発生ピークに差は見

Fig.15 Result of X-ray diffraction

られなかった。鉄のピークについては 110.7°, 118.1°においてピークが見られず、鉄が分離はしていないことがわかった。また、発生しているピークは銅と SUS304 のみであり、新たな合金は生成していないことがわかった。これらの分析結果より、銅とステンレス鋼をレーザーで突合せ接合を行った場合、合金や金属間化合物が生じておらず、銅と溶融層界面近傍で生じる混合によるメカニカルリンクによって接合されていると推察される。

5. 結 言

本研究は、YAG ディスクレーザーを用いて 1.5mm の厚板ステンレス鋼と銅に対して突合せ接合を試み、条件の選定と、接合状態の分析評価を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) レーザー照射位置を銅側に 0.05mm~0.15mm シフトさせることにより、強度を低下させずに接合することが可能であった。
- (2) レーザー照射位置をステンレス鋼側にシフトさせた場合、溶融層内に銅はほとんど存在していない。
- (3) シフト量が 0mm の場合、溶融層内に銅が点状に存在し、その割合は 10%程度である。
- (4) レーザー照射位置を銅側にシフトさせた場合、溶融層内で銅の偏析が生じ、その割合は 20%~40%である。
- (5) 銅とステンレス鋼を突合せ溶接した場合、溶融層内で新たな合金の生成やステンレス鋼の分離は生じていない。

よって銅とステンレス鋼の結合は、銅と溶融層界面での微小領域におけるメカニカルリンクによるものと思われる。

最後に、本研究を遂行するにあたり多方面でご協力いただいた、日立金属(株)冶金研究所、磁性材料研究所、生産システム研究所の皆様に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 益本広久ら:ベリリウム銅とステンレス鋼の拡散接合, 溶接学会論文集, **13**, 3 (1995) 411.
- 2) 福地雄介, 沖田耕三:銅/ステンレス鋼異種摩擦圧接継手の応力分布, 日本機械学会論文集(A 編), **62**, 599 (1996) 1677.
- 3) 平石誠ら:ステンレス鋼と銅合金のレーザー重ね溶接, 溶接学会論文集, **17**, 3 (1999) 420.
- 4) 宗像哲ら:レーザー溶接した CAC403 銅合金鋳物と SUS304 ステンレス鋼溶接継手の機械的性質, 鋳造工学, **83**, 5 (2011) 268.
- 5) YAMAMOTO, H., and IKENO, J.: A Research on Laser Micro-Joining between Different Metals using YAG Laser, JSPE Autumn meeting, (2002) 374.
- 6) 佐々木淳, 池野順一:レーザー異種金属接合に関する研究, 砥粒加工学会誌, **55**, 6 (2011) 348.
- 7) 片山聖二:各種レーザー溶接欠陥の発生機構と防止技術, 溶接学会論文集, **19**, 1 (2001) 213.
- 8) 山手利博ら:建築設備配管系でのガルバニック腐食とその防止に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, **487** (1996) 51.
- 9) 新井武二ら:レーザー溶接加工, マシニスト出版, (1996) 64.