

氏名	佐々木 淳
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 871 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	銅合金とステンレス鋼のレーザ突合わせ接合に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 池野 順一 委員 教授 堀尾健一郎 委員 教授 加藤 寛 委員 連携教授 大森 整

論文の内容の要旨

技術の向上に伴い、接合の要求も単純につなぎ合わせることから、より付加価値の高い接合へと変化してきている。異種材料の接合もその一つであり、工程の高効率化やコスト低減、異なる機能を持つ材料同士の接合で付加価値向上といった効果が期待でき、その要求も多くなっている。中でも、銅合金とステンレス鋼の直接接合は、熱伝導率の高い銅合金と、機械的強度に優れたステンレス鋼の組合せであり、品質や耐久性の高いボイラーやラジエータなどの熱交換器や水配管などへの適応が期待されている。銅合金とステンレス鋼は、双方の金属の主成分である銅と鉄の固溶限界が低く、濡れ性が悪い。さらに、合金を作らないため接合をいっそう困難なものにしている。そこで本論文では、このように合金を作らない材料の組み合わせに対して、レーザを用いた新たな接合方法の提案を行った。その方法の特徴は、双方の金属が熔融状態にあるときに、攪拌させることによって機械的に接合させる点である。その際、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ること、レーザに対する吸収率が異なることなどに考慮しなければならない。そのためには、レーザの照射位置を変化させて、材料に与える入熱のバランスを調整しながら良好な接合範囲を同定する必要がある。そこで、本研究はレーザによる銅合金とステンレス鋼の接合を試み、その接合性能の評価、接合構造と接合メカニズムの解明を行い、銅合金とステンレス鋼のレーザ接合技術を確立させることを目的とした。

実験で対象とした銅合金は、純銅、銅合金では無酸素銅、真鍮、リン脱酸銅である。真鍮は銅と亜鉛の合金であり、通常の接合時には亜鉛が気化して欠陥が発生し易いことが知られている。また、リン脱酸銅はリンが残留しているため、ステンレス鋼との接合においては、割れが発生し易いことが知られている。そこで、純銅とステンレス鋼の接合についてはじめに検討し、その知見を基にして真鍮、リン脱酸銅への応用展開を図った。使用したレーザはディスク YAG レーザであり、最大出力 1kW である。接合の形態は突合わせ接合で、用いた材料の板厚は全て 1.5mm である。

まず、純銅とステンレス鋼の接合では、レーザの照射位置を突合わせ部から銅側に 0.05mm~0.15mm 寄せた時、接合部内で攪拌が生じることがわかった。一方、ステンレス鋼側にレーザ照射位置を寄せていくと、熔融部の攪拌は生じなかった。引張試験を行って接合部の評価を行ったところ、接合部内で攪拌が生じたものは、銅の母材強度 220MPa 以上の引張強度が得られ、融合部ではなく銅の母材内で破断した。また、

1MPaの高圧窒素で気密試験を行ったところ、接合部からの窒素の漏れは確認されなかった。塩水による腐食試験、温度サイクル試験においても接合部は良好な強度が得られた。また、接合部の分析としてEPMA、X線回折を行ったところ、ステンレス鋼は接合部内でも分離しておらず、新たな合金の形成は見られなかった。以上より、レーザー照射位置を銅側に特定距離だけ移動させることで、提案する新たなレーザー接合技術が成立することを明らかにした。

次に真鍮とステンレス鋼の接合を試み、レーザー照射位置を真鍮側に0.1mm~0.2mm寄せることで、欠陥のない接合が可能であることがわかった。ただし、断面の観察では無酸素銅の場合のような激しい攪拌は生じなかった。引張試験により接合強度を評価したところ、真鍮とステンレス鋼においても真鍮の母材以上の強度が得られた。気密試験、腐食試験、温度サイクル試験に関しても良好な結果が得られた。接合部内のEPMA、X線回折分析からは、レーザー照射位置がステンレス鋼側に寄せられた場合は真鍮に含まれる亜鉛が気化するが、真鍮側にレーザーを移動させて加工したものは亜鉛の気化が抑制されることがわかった。この時の接合部を詳細に観察したところ、接合部内では突合せ境界面の浅いところで微細な攪拌が多く生じており、それによって亜鉛の気化を抑制しつつ真鍮とステンレス鋼がしっかりと接合されていることが判明した。

最後にリン脱酸銅とステンレス鋼の接合を試み、これまでの銅合金同様、レーザー照射位置をリン脱酸銅側に特定距離だけ移動させた場合に接合部内で攪拌が生じ、強固な接合が可能となった。引張試験、気密試験でも良好な結果が得られた。接合部の観察の結果、ステンレス鋼に割れが発生したと思われる箇所があり、それをリン酸銅が充てんする様子が観察された。

以上より、本論文で提案した銅合金とステンレス鋼のレーザー接合法は、レーザー照射位置を銅合金側にシフトさせることにより接合性能の優れた接合が実現できることを明らかにした。

論文の審査結果の要旨

本論文の学位審査委員会は平成 24 年 2 月 6 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表及びそれに引き続いた質疑応答、論文内容の審査を行った。審査結果の要旨は以下のとおりである。

本学位論文では、合金を形成し難く、接合が困難とされる銅合金とステンレス鋼に対して、新たなコンセプトに基づくレーザ接合法が提案され、実験とシミュレーションにより突き合わせ接合の可能性を探るとともに、徹底した分析、評価を行い、加工特性の把握と加工メカニズムの検証がなされている。本論文の概要を以下に述べる。

製品の高機能化に伴い、接合への要求も単純なつなぎ合わせから、より付加価値の高いものにシフトしている。例えば異種金属材料同士の接合もその一つであり、工程の効率化やコスト低減、機能の合成による付加価値創成効果が期待されている。中でも、銅合金とステンレス鋼の直接接合は、熱伝導率の高い銅合金と、機械的強度に優れたステンレス鋼の組合せであり、エネルギー効率の良い耐久性の高いボイラーやラジエータなどへの適応が期待されている。ところが銅合金とステンレス鋼は、双方の金属の主成分である銅と鉄の固溶限界が低く、濡れ性が悪いため合金を作り難く接合が難しいとされてきた。本学位論文では、この合金を作りにくい異種金属同士の突き合わせ接合を可能にする新たなレーザ接合法について検討している。

銅とステンレス鋼は融点や熱伝導率など熱物性値が異なるため、双方の金属が同時に熔融状態となることは難しい。しかし、高エネルギー密度のレーザ光によって瞬時に両金属を熔融させ、マイクロ渦流体でこれらを攪拌できれば、メカニカルリンキングによる接合が可能になると考えた。そのため、金属の突き合わせ界面とレーザスポット中心をずらし、供給エネルギー比率を変化させ最適加工条件の同定を試みている。なお、実験に用いた銅合金は、板厚 1.5mm の無酸素銅、真鍮、リン脱酸銅である。真鍮の接合では亜鉛が気化することで欠陥が発生し良好な接合は難しいとされている。一方、リン脱酸銅はリンが接合部に残留すると、ステンレス鋼との接合において割れが発生しやすく、これも良好な接合は難しいとされている。そこで本論文では、まず無酸素銅とステンレス鋼の接合で新接合法の有効性を確認し、次に真鍮、リン脱酸銅への展開を図っている。

無酸素銅とステンレス鋼の接合実験では、レーザスポット中心を接合界面よりもステンレス鋼側にシフトさせるとステンレス鋼に穴があいてしまうこと、一方で銅側に 0.05mm~0.15mm シフトさせた場合は、穴などの欠陥が生じず、接合内部で両金属の攪拌が生じることを見出している。さらに接合部評価では、まず引張試験を行い接合部内で攪拌が生じたすべての試料で銅の母材強度 220MPa 程度の強度が得られた。この場合、接合部で破断せず、銅の母材での破断となることを確認している。次に、1MPa の高圧窒素による気密試験では接合部からの窒素漏れは検出されないことを確認している。塩水による腐食試験、温度サイクル試験においても、接合部が良好な強度を保持していることを明らかにしている。また、分析では EPMA、X 線回折を行い、ステンレス鋼は接合部内で分解しておらず、新たな合金の形成は確認されなかった。以上より、レーザスポットを突き合わせ界面に対して銅側に特定量シフトすることで接合部内に両金属の攪拌が生じ、各金属は特性を維持しつつ攪拌されメカニカルリンキングされていることを明らかにしている。

真鍮とステンレス鋼の接合では亜鉛の蒸発が懸念されるため、できる限り微小領域で細かな攪拌を形成さ

せることに注力している。その結果、レーザスポット中心を接合界面よりも真鍮側に0.1mm～0.2mmシフトし、特定条件下で亜鉛の蒸発を抑えることに成功している。引張試験では接合部での破断は観察されず、真鍮の母材で破断が生じており、十分な強度を有していることが判明した。そのほか気密試験、腐食試験、温度サイクル試験に関しても良好な結果が得られている。リン脱酸銅とステンレス鋼の接合においても、銅側にレーザスポット中心をシフトさせることでメカニカルリンクングが可能であることを見出している。

以上より、銅合金とステンレス鋼の突き合わせ接合において、両金属をレーザで同時に溶融させ、メカニカルリンクングできることを見出した。これらの研究成果は、日本機械学会英文ジャーナル (Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing) に1編、砥粒加工学会誌に1編が掲載され、本年3月精密工学会誌に1編、5月砥粒加工学会誌に1編の掲載が確定している。また国内学会での講演論文は6件が発表されている。これらの研究成果は関連学会・産業界で高く評価され、3月には国内学会で招待講演1件が予定されている。よって、当学位審査委員会では本論文が博士(工学)の学位授与に十分値する論文であると認め、合格と判定した。