

高導電率材や二次合金の安定加工・再資源化に寄与するレーザー加工技術

Laser Technologies Contributing to Stable Processing and Recycling of Highly Conductive Materials and Secondary Alloys

外川 隆一 TOGAWA Ryuichi 黄川田 昌和 KIKAWADA Masakazu

環境負荷を低減する取り組みとして、高導電率材や軽量材、再生しやすい材料の製品適用が増えており、精密部品を熱損傷なく接合する技術や、再生化率を向上させる分離技術が課題となっている。

東芝グループでは、熱影響が小さく精密加工ができるレーザー加工技術の特徴を生かし、高導電率の銅材や二次合金を主原料とするアルミニウムダイカスト材（以下、アルミダイカスト材と略記）の溶接や、除去・分離技術としての適用を進めている。溶接ではレーザー波長やパルス照射条件の適正化、加工点モニタリングの適用により安定性、生産性の向上を実現し、ハードディスクドライブ(HDD)などの製造工程に適用した。また、レーザークリーニングでは、製造工程で付着する樹脂を、製品に損傷を与えず除去する技術の適用を進めている。

To reduce environmental impact, more highly conductive materials, lightweight materials, and easily recyclable materials are being used in products, and challenges include developing techniques for joining precision components without causing thermal damage, as well as separation technologies to improve recyclability.

The Toshiba Group is currently using the properties of laser processing technologies that minimize thermal impact and can be used for precision processing to weld highly conductive copper and aluminum die-cast material made from secondary alloys, and for removal and separation techniques. In welding, optimizing the laser wavelength and pulse irradiation conditions, and applying processing point monitoring have resulted in greater stability and productivity, which have been taken advantage of in the hard disk drive (HDD) manufacturing process. In laser cleaning, we are working on applying techniques to remove resin stuck on products in the manufacturing process without resulting in damage.

1. まえがき

カーボンニュートラル(CN)、サーキュラーエコノミー(CE)の実現に向け、製品の電動化、軽量化、資源の再利用率向上に寄与する製造技術が必要であり、導電率の高い銅部材や、軽量化につながるアルミダイカスト材の加工技術、再資源化率を向上させる除去・分離技術が必要となっている。具体的には、銅やアルミニウムを極小領域で接合することや、一体化した複合素材を単一素材に分離すること、表面の付着・生成物を二次廃棄物の発生なく除去することなどが課題になる。

レーザーはその集光性から、限られた領域に非常に高いエネルギーを非接触で与えられる。また材料による光吸収特性の違いを利用し、狙った部分だけを選択的に加熱できる。そのため、低ひずみで周囲への熱影響の小さい加工が可能であり、図1に示すように、金属の精密溶接、デバイス基板表面の熱処理、ぜい性材料の切断、表面生成物の除去、複層材料の剥離など、様々な製品の高機能化、高品質化に貢献している。このようなレーザー加工が持つ特徴を活用することで、熱伝導率が高く溶接が難しい銅・ア

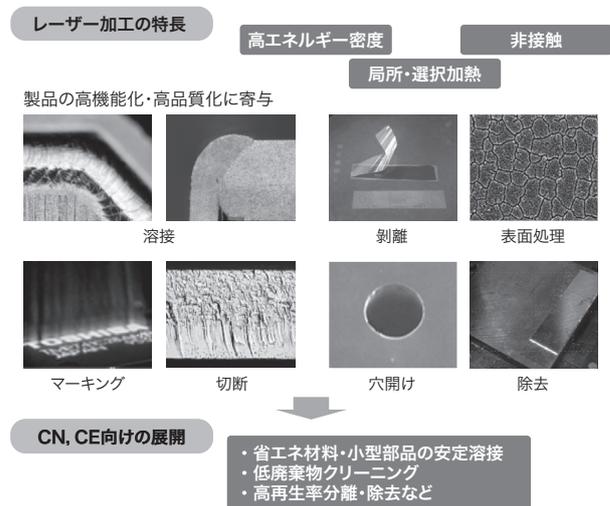


図1. レーザー加工の特長と用途

選択的に局所加熱できることから、低ひずみで周囲への熱影響の小さい加工が可能であり、多くの製造工程に適用されている。

Laser process features and applications

ルミニウムの安定溶接や、二次廃棄物を発生させず、かつ、部材に損傷を与えることなく分離を行う表面クリーニングな

ど、CN、CE向け生産技術としての展開が期待できる。ここでは、これらレーザー加工の実用化技術について述べる。

2. 高出力可視光レーザーによる銅の安定溶接

従来、金属の溶接の用途には近赤外光（波長約1,000 nm）レーザーが多く用いられていたが、近赤外光は銅への吸収率が低く、また、熔融時の吸収率の変化が大きいため、部材ごとのばらつきに加えて、溶接中の入熱量のばらつきが、安定した接合を難しくしている（図2）。

そこで、銅への光吸収率が高く、近年高出力化が進んだ可視光レーザー（波長約500 nm）を用いて、安定な銅溶接の実現を目指した。近赤外光と可視光のレーザーを比較するために、厚さ5 mmのC1020材の銅板にレーザーを照射し、溶け込み深さのばらつきを測定した。近赤外光及び可視光のレーザーにはそれぞれ、Trumpf社製 TruDisk 4001とTruDisk3022を用いた。図3にレーザーを照射した銅板断面の様子を示す。近赤外光のレーザーでは、溶け込み深さにばらつきがあるのに対し、可視光レーザーでは

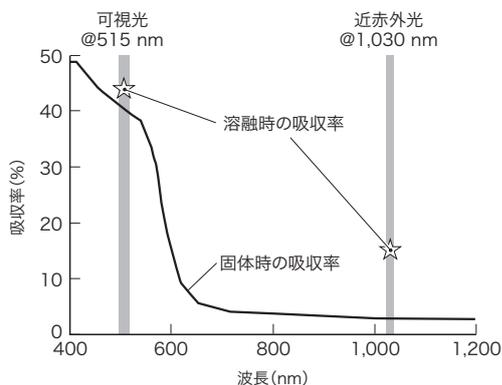


図2. 銅の光吸収率の波長依存性^{(1), (2)}

銅は、600 nm以下で光吸収率が增大する。また、近赤外光は固体時と熔融時の吸収率差が大きく、可視光は吸収率差が小さい。

Wavelength dependence of copper absorption^{(1), (2)}

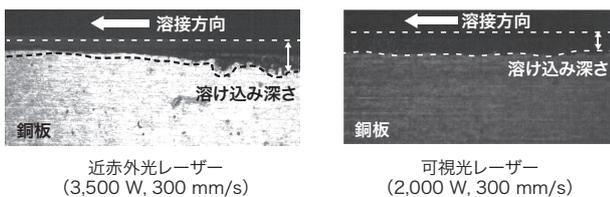


図3. 溶接後の銅板断面の様子

近赤外光レーザーでは溶接中の溶け込み深さに大きなばらつきが見られるのに対し、可視光レーザーでは安定した溶け込み深さが得られる。

Cross-section of copper plate after welding

ほぼ一定の溶け込み深さが得られており、ばらつきを1/5に低減できた。

近年、銅のレーザー溶接は、車載モーターなどにおける平角線ステーターを構成する平角銅線を接合する技術として注目されている。平角銅線は、接合部以外は絶縁皮膜が施されており、溶接部の接合量を確保しつつ、近接した絶縁皮膜の熱損傷を避ける必要がある。そこで、過渡伝熱解析を用いて、効率的に銅に熱を蓄えるレーザーの照射軌跡を適正化した。図4は入熱開始から0.3 s後の過渡伝熱解析結果を示す。平角銅線上で熱源を直線状の軌跡で動かすより、円状に動かした方が、蓄熱効果が高くなることが分かった。この照射軌跡の適正化により銅を効率的に熔融させることで、接合量は確保しつつ、絶縁皮膜への熱損傷を防止することが可能になった。

3. アルミダイカスト材の溶接適正化、加工点モニタリングの適用

アルミダイカスト材は、二次合金を主原料としており、資源循環型材料としても重要な役割を担う。一般的にアルミダイカスト材は展伸材に比べ添加元素の量が多く、その製造過程で内部に取り込まれるガスも多いため、溶接時にブローホールが発生しやすく⁽³⁾、低欠陥で高品質な溶接を行うには高度な技術が必要になる。東芝グループでは、He（ヘリウム）ガスを内部に閉じ込め、高容量、低騒音、低消費電力を実現したHDDの封止技術にパルスレーザー溶接を適用している（図5）。HDDの筐体（きょうたい）にはアルミダイカスト材を用いているが、溶接部に発生するブローホールはリーク不良の要因となる可能性がある。そこで内部ブローホールの発生に及ぼすレーザーパルス波形の影響を調査した。Trumpf社製TruDisk4001を用い、ダイカスト材（ADC12、板厚1.5 mm）にパルスレーザー照射を行った。パルス波形は矩形（くけい）とし、パルス幅を2 msから5 msの範囲で変化させた。レーザー出力は、各パルス波形

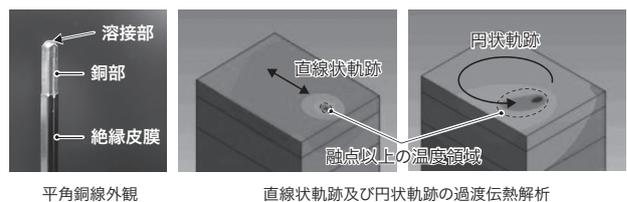


図4. 平角銅線の外観と過渡伝熱解析結果

同じエネルギーを異なる軌跡で平角銅線表面に与えた場合、円状の軌跡では、直線状の軌跡に比べて表面温度が高くなり、効率的に熔融できる。

Rectangular copper wire exterior and results of heat transfer analysis

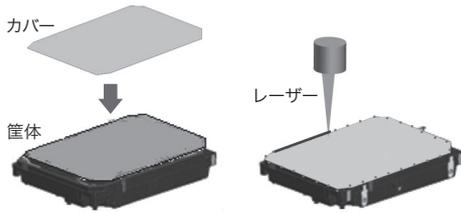


図5. レーザー溶接によるHDD筐体のHeガス封止

Heガスをアルミダイカスト材の筐体を用いたHDD内にパルスレーザーによって封止しており、ブローホールの発生を抑制した低欠陥な封止技術により実現している。

Laser welding of He-filled hard disk drives (HDDs)

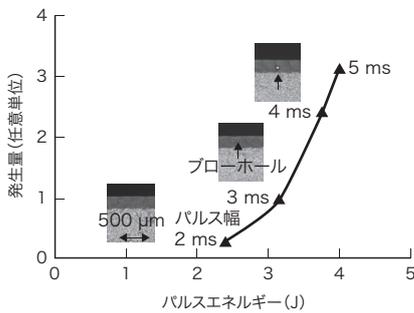


図6. ブローホールの発生量とパルスエネルギーの関係

安定な溶け込み状態が得られる範囲内で、パルスエネルギーを小さくすることで、溶接金属に発生するブローホールの量を抑制できる。

Relation of blowhole generation and pulse energy

で溶け込み深さが同等になるように調整した。断面観察により内部ブローホールの量を測定した結果を図6に示す。パルス幅が長く、パルスエネルギーが大きくなるとブローホールの発生量が多くなる結果を得た。この結果を踏まえ、安定な溶け込み状態が得られる範囲内で、パルスエネルギーが小さくなる条件を選定した。

量産製造では、アルミダイカスト材に含まれる不純物、ガスの量が変動するため、レーザー条件の管理だけでは安定した溶接を継続できない場合があった。図7は、パルスレーザー照射中の高速度カメラ撮影像である。素材中に含まれる低沸点の介在物、又は取り込まれたガスが、レーザー加熱による溶融で噴出することで、溶融物がスパッターとして飛散し、へこみ不良となる。スパッター発生時は、加工点の発光が正常時より強くなる(図8(a))。そこでレーザー加工ヘッドに搭載した赤外光センサーで加工点の発光強度をリアルタイムに測定し、スパッター発生箇所の検出を行うシステムを開発した(図8(b))。へこみ部は、再溶融により修復できるため、溶接完了後、スパッターの発生が検出された場合には自動で該当箇所にレーザーを再照射する機能

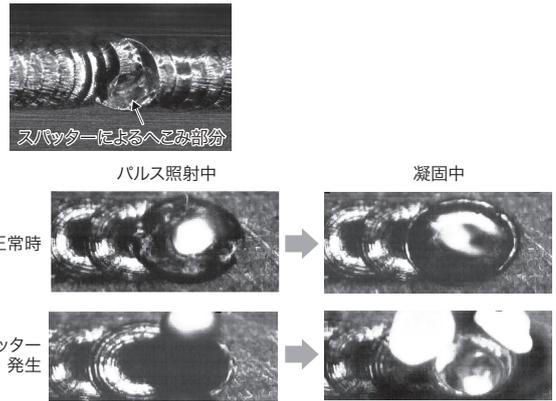
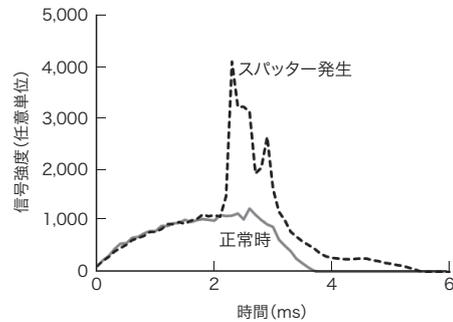


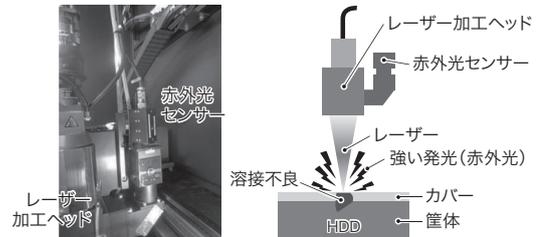
図7. スパッター発生によるへこみの形成

パルスレーザー照射中に大きなスパッターが発生すると、溶接部表面にへこみが形成される。

Formation of indentations from welding spatter



(a) スパッター発生時の発光



(b) モニタリングシステム

図8. 溶接モニタリングシステム

スパッターとともに発生する強い発光を検出して、不良発生位置を特定する。

Welding monitoring system

を搭載している。この機能により、後工程の検査後に実施する方法に比べて不良修正に掛かる時間を1/10以下に短縮した。

4. 製造工程へのレーザークリーニングの適用

レーザークリーニングは、以前から広く検討がなされてきたが^{(4), (5)}、近年のレーザー装置の高出力化、小型化により適用が拡大している。レーザークリーニングのメカニズムは、

対象物の光吸収特性により大きく二つに分けられる。一つは、除去対象の材料にレーザーを吸収させ、加熱蒸発させるものである(図9(a))。鉄材の表面に発生したさびの除去や、紙に印刷されたインクの除去などは、この過程が主体である。もう一つは、除去対象を透過したレーザーを母材表面で吸収させ、母材表面を蒸発させて界面で剥離させる方法である(図9(b))。近赤外光レーザーを用いた金属上の樹脂のクリーニングや、貼り合わせた樹脂とガラスの分離などはこちらが主体になる。実際には上記の二つのメカニズムが混在して除去がなされるが、母材表面を蒸発させて界面剥離させる方法の適用には、ダメージに配慮する必要がある。モーター製品の製造工程で付着する熱硬化樹脂のレーザー除去を対象に、剥離後の母材表面の評価を実施した結果を、表1に示す。レーザー出力を変えて剥離し

た部分の表面粗さ測定、硬度測定、断面観察を実施した。表面粗さは、機械工具により除去した場合よりも小さく、また断面観察でも顕著な組織の変化は見られなかった。ただし、レーザーの強度が高い場合には、硬度の上昇が見られた。同じ強度のレーザーを母材に直接照射した場合には硬度上昇は発生しないことから、蒸発時に発生するプラズマが閉じ込められ、母材面に強い衝撃力が加わったためと考える。このような影響を十分考慮し、対象製品に要求される品質に対応して、適用可否の判断やクリーニング条件の選定を行うことが必要である。

5. あとがき

省エネ製品の小型化、資源循環型材料の使用拡大、インフラ設備の低廃棄物メンテナンスなど、CN、CE向け生産技術への展開が期待できるレーザー溶接やレーザークリーニングの実用化について述べた。今後はモニタリング信号から状態を判定しプロセスを自動制御するCPS(サイバーフィジカルシステム)化⁽⁶⁾や、ロボットの活用による人手作業、危険作業の自動化を進め、適用範囲を拡大していく。

文献

- (1) Johnson, P. B. ; Christy, R. W. Optical Constants of the Noble Metals. Phys. Rev. B. 1972, 6, 12, p.4370-4379.
- (2) Mattern, M. et al. Temporal temperature evolution in laser micro-spot welding of copper considering temperature-dependent material parameters. Mater. Res. Express. 2018, 5, 6, 066545.
- (3) 柳原恵美, ほか. アルミニウム合金ダイカスト材と展伸材の溶接強度に及ぼすガス量と入熱量の影響. 鋳造工学. 2007, 79, 5, p.223-228.
- (4) 白川和臣, ほか. 高出力レーザーを応用した錆除去装置の開発. 電気学会論文誌B, 2005, 125, 11, p.1084-1090.
- (5) 鎌田博文, ほか. レーザーによるコンクリート表層はく離の研究. レーザー研究. 1996, 24, 2, p.182-190.
- (6) 坂井哲男. レーザー溶接のCPS化による製造プロセスの自動化. 東芝レビュー. 2019, 74, 5, p.68-69. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/techreview/2019/05/74_05pdf/r01.pdf>. (参照 2023-10-16).

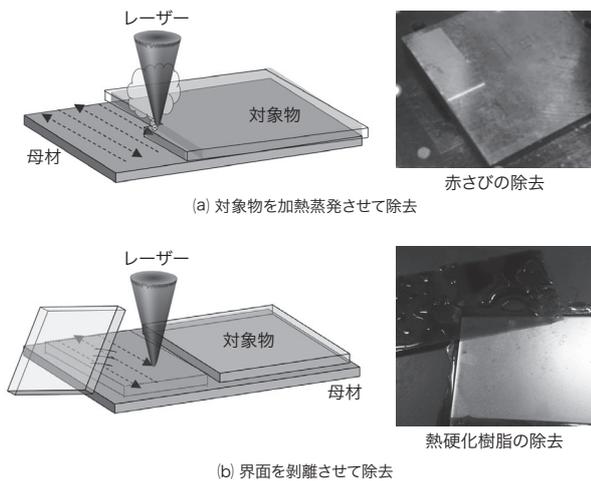


図9. レーザークリーニングのメカニズム

除去対象物及び母材の光吸収特性に合わせて適切な方式と条件を選定する。
Laser cleaning mechanism

表1. クリーニングによる母材表面への影響評価

Evaluation of impact of cleaning on surface materials

項目	未処理	電動工具	レーザー除去 適正出力	レーザー除去 過大出力 (適正値の1.8倍)
外観				
平均粗さ (μm)	0.09	4.74	0.39	1.50
マイクロピカース 硬度 (Hv)	184.2	-	184.9	306.5
断面組織		-		



外川 隆一 TOGAWA Ryuichi

生産技術センター
製造プロセス・検査技術領域 光学・検査技術研究部
レーザー学会・溶接学会会員
Optics & Inspection Technology Research Dept.



黄川田 昌和 KIKAWADA Masakazu, Ph.D.

生産技術センター
製造プロセス・検査技術領域 光学・検査技術研究部
博士(工学)
Optics & Inspection Technology Research Dept.