

| | |
|--------------|---|
| Title | CFRPの高速レーザ切断法およびCFRPと各種金属とのレーザ直接接合法に関する基礎研究 |
| Author(s) | 鄭, 光云 |
| Citation | 大阪大学, 2013, 博士論文 |
| Version Type | |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/59936 |
| rights | |
| Note | 著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。 |

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

| | |
|------------|---|
| 氏名 | 鄭光云 (Kwang-Woon Jung) |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 第 26188 号 |
| 学位授与年月日 | 平成 25 年 3 月 25 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科機械工学専攻 |
| 学位論文名 | CFRP の高速レーザ切断法および CFRP と各種金属とのレーザ直接接合法に関する基礎研究 |
| 論文審査委員 | (主査) 教授 片山 聖二 (副査) 教授 高谷 裕浩 教授 近藤 勝義 准教授 藤原 順介 |

論文内容の要旨

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) は、金属に比べて軽量で高強度であるから、航空産業や自動車産業などの多くの産業分野に利用が拡大している。一方、CFRP の最終製品は、成形加工のみで完成させることが難しいので、切断や穴加工技術が必要である。そのため、機械加工法やアブレーション加工法が以前から広く使用されてきた。しかし、工具の摩耗損失、層間剥離の問題が起こりやすく、長い加工時間とともに高速切断が困難であった。これらの問題を解決する一つの方法として、レーザを用いたCFRPの切断研究が活発に報告されてきた。しかし、これらの報告では、CFRPのレーザ切断時にすべて切断用ヘッドから供給されるアシストガスの使用における低速度 (≤ 1 m/min) で実験を行い、CFRPの貫通切断が得られたが、レーザとCFRPの長い相互作用時間によって切断面に数mm程度の広い熱影響部が形成することがわかった。そこで、本研究では、熱的ダメージによる母材の強度低下がなく、約100 μ m以下の狭い熱影響部を有する良好な切断品質を得るため、三種類の高品質レーザを用いてPAN系またはPITCH系CFRPの高速レーザ切断実験を実施した。まず、ディスクレーザによるレーザ出力10 kW、切断速度0.25 m/sで板厚3 mmのPAN系CFRPの切断結果、1パスで貫通切断が可能であったが、レーザの入熱量が大き過ぎるため、切断部表面に数mm程度の広い熱影響部が形成し、引張試験後母材強度が約5 ~ 14 %程度減少した。それで、レーザの入熱量を小さくするため、速度制御がよいレーザスキヤナヘッドを用いてもっと速い速度でマルチパスレーザ切断実験を実施した。速度5 m/s、一回毎の待機時間1 sおよび焦点位置0 mmで実験を行った結果、出力2 ~ 5 kWではすべて貫通切断が1分以内で可能であり、切断面に約50 μ m以下の狭い熱影響部が生成し、なお、引張試験後母材の強度低下がない高品質なレーザ切断品質が得られた。また、PAN系CFRPではなく、PITCH系CFRPの高速レーザ切断時にも切断面に熱影響部がほとんど発生しなく、強度低下ない良好な切断品質が得られた。一方、切断面品質を改善する可能性を確認するため、極めて高い出力密度を持つシングルモードフ

ファイバーレーザによるCFRPの高速レーザ切断結果、出力1 kWまたは2 kWで貫通切断が可能であり、切断面に約100 μ m以下の狭い熱影響部が得られた。さらに、同等の出力で得られたディスクレーザのものより加工時間を大きく短縮できた。そして、ピコ秒パルスレーザによるCFRPのレーザ切断結果、適当なレーザの入熱量とレーザビームの照射間距離を適切に選択すると、熱影響部がほとんど発生しない良好な切断品質が得られたが、加工時間が数十分程度で長くなり、大きな問題になった。

また、切断や穴加工以外にも多くの産業分野にCFRPを活用するため、高機能性・高柔軟性を持つハイブリッド構成品を生産できる接合加工技術が必要である。これまでのCFRPと金属の接合は、接着剤による溶着およびボルトなどの機械的な締結が多く利用されてきた。しかし、揮発性有機化合物が発生し、接着に長時間を要し、なお、設計の自由度が制限され、生産性が上がらない問題があった。これらの問題を解決する一つの方法として、本研究では、片山らが開発した金属と樹脂のレーザ直接接合法を適用し、ディスクレーザと半導体レーザを用いてCFRPと各種金属の接合の可能性およびその接合機構について検討した。その結果、PAN系CFRPとステンレス鋼、アルミニウム合金および亜鉛めっき鋼板のレーザ直接接合の可能性を確認し、作製した接合継手に対して引張せん断試験結果、それぞれ約4800 N、3000 Nおよび3300 Nの最大荷重を有する強固な接合継手が得られた。接合部界面の微細構造の特性を考察した結果、数百 μ m以下の多くの気泡は樹脂と金属のレーザ直接接合時の接合部界面に近いところに局所化されるだけでなく、炭素繊維の高い熱伝導率と配列特性によって溶融したCFRP中の全域に発生した。その気泡の発生および熱分解後急速な膨脹に起因する高圧力によって溶融した樹脂は活発に流動したことがわかった。そして、接合部界面に生じる接合機構について考察した結果、溶融した樹脂は金属表面の凹凸部分に入り込んで生じる機械的結合(アンカー効果)が得られ、なお、溶融した樹脂は金属表面上に存在している数nmの酸化皮膜と原子分子レベルでしっかりと溶着されていることがわかった。このことから、接合部界面で化学結合または物理的結合(ファンデルワールス力)が可能であることが推察された。

論文審査の結果の要旨

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) は、金属に比べて軽量で高比強度であるから、航空産業や自動車産業、スポーツ分野などの産業分野に利用が拡大している。一方、CFRP の最終製品は、成形加工のみで完成させることが困難であるため、切断や穴加工が必要である。そのため、従来、機械加工法やアブレーション加工法が以前から広く使用されてきた。しかし、工具の摩耗損失やCFRPの層間剥離が起こりやすく、高速切断が困難であり、加工時間が長いという問題点がある。これらの問題を解決する一つの方法として、レーザを用いたCFRPの切断法が研究開発されている。しかし、これらの報告では、厚さ1 ~ 2 mmのCFRP板の貫通切断が可能であるが、数mmの広い熱影響部が形成し、高品質な切断部の作製が困難であると判断されてきている。

そこで、本研究では、高品質なレーザ切断部を高速で製作するため、3種類の高品質レーザを用いて板厚3 mmのPAN系およびPITCH系CFRPの切断実験を行っている。まず、各種PAN系CFRPのディスクレーザによる切断では、出力10 kW、移動速度0.25 m/s (15 m/min)の高パワー・高速度の条件で、1パスで貫通切断が可能であることを明らかにしている。そして、切断面の熱影響部幅は約0.2 mm程度と従来の報告より熱影響部幅を狭くできることを明らかにしている。しかしながら、レーザ切断試験片の引張強度は熱影響の悪影響で母材強度の約85 ~ 95%程度に低下することも明らかにしている。そこで次に、高速ビーム移動の可能なレーザスキヤナを用いて、PAN系およびPITCH系CFRPの切断実験を実施している。その結果、出力2 ~ 5 kW、移動速度5 m/s (300 m/min)の超高速の条件では、20 ~ 50パスの繰返し照射により、約50 μ m以下の狭い熱影響部で、強度低下のない高品質なレーザ切断品の作製が可能であることを明らかにしている。さらに、加工時間の短縮と切断面品質の改善を目的として、極めて高いパワー密度を持つシングルモードファイバーレーザおよびピコ秒パルスレーザによるCFRPの切断実験を行った結果、ファイバーレーザでは、出力1 kWまたは2 kWで、同出力のディスクレーザより加工時間が半分程度に短縮できることを証明し、ピコ秒パルスレーザでは、適切な条件(2.5 W, 10 Hz, 0.2 m/s)を選択すると、熱影響部がほとんど見られない良好な切断部の作製が可能であることを明示している。しかし、後者の場合、1000パスでも板厚3 mmの貫通切断ができず、加工時間が極めて長くなるのが懸念されることを指摘している。そこで、時間短縮を目指してさらに高出力・高繰返し・高速の条件(12.5 W, 50 Hz, 1 m/s)で

レーザー切断を行うと、広い熱影響部が形成してしまい、高出力化では熱の蓄積を抑制する必要があることが示されている。このことから、ピコ秒の極短パルスレーザーは適切な条件で極めて高品質な切断が可能であるが、加工時間の短縮は困難であると結論されている。

次に、CFRP をさらに広範囲な産業分野に活用するためには、高機能なハイブリッド品が生産できる接合加工技術が必要である。これまでの CFRP と金属の接合は、接着剤による溶着およびボルトなどの機械的な締結が利用されている。しかし、接着剤では揮発性有機化合物が発生し、接着に長時間を要するし、機械的な結合法では設計の自由度が制限され、生産性が上がらないという問題点がある。そこで、これらの問題を解決する一つの方法として、ディスクレーザーと半導体レーザーを用いて、CFRP と金属の接着剤を用いない直接接合の可能性とその接合機構について検討している。その結果、PA 基の PAN 系 CFRP (板厚 3 mm, 板幅 20 mm) とステンレス鋼, アルミニウム合金および亜鉛めっき鋼板の異材において検討され、レーザー直接接合が可能であり、作製した接合継手の引張せん断最大荷重(強度)は、それぞれ約 4800 N, 3000 N および 3300 N で、強固な接合継手が作製できることが明らかにされている。また、接合部界面の微細構造について検討した結果、サブ mm 以下の小さい気泡が炭素繊維の周囲に発生し、溶融した CFRP のプラスチック基母材の全域に発生していることが示されている。そして、その気泡の発生による急速な膨張により高圧力が発生し、溶融した CFRP 樹脂が流動して金属表面の凹部に入り込み、金属表面を覆う数 nm の酸化皮膜と原子・分子レベルでしっかりと溶着し、強固な接合部が作製できることを明らかにしている。このことから、接合部界面ではアンカー効果と化学結合および物理的結合(ファンデルワールス力)が起こっていることが推察されている。なお、大きな気泡が多く存在すると、引張試験での破断は、その大きな気泡を伝播するように起こるため、破断経路となることが示され、大きさと量の最適化が必要であることも明らかにされている。すなわち、CFRP と金属のレーザー直接接合部の気泡の発生は、界面の密着性向上に良好な効果があるが、破断経路の一部となり、マイナスの効果もあること、そして、その発生状況は、金属と樹脂のレーザー直接接合の場合、金属界面に近いところに局在して発生している状況と異なり、炭素繊維周辺に形成することも明らかにされている。

以上のように、本論文は、CFRP のレーザー高速切断法について多数の重要な知見を得るとともに、CFRP と金属のレーザー直接接合法について世界で初めてトライし、高強度接合継手の作製が可能であることを示したものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。