

2章

第1節「レーザーアブレーションによるCFRP加工技術」

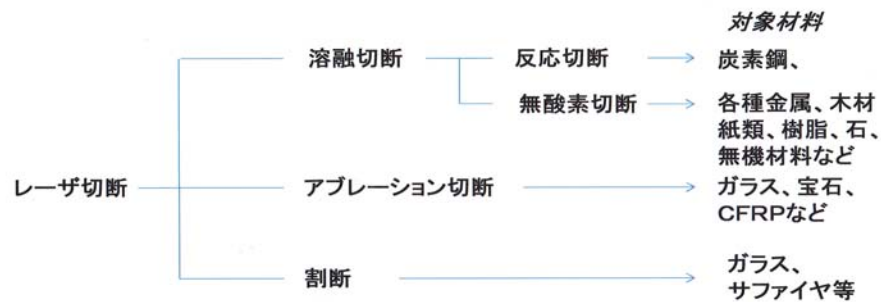
光産業創成大学院大学 沓名宗春*

1. 緒言

炭素繊維強化複合材料の適用の分野は航空機、船舶、スポーツ用品、自動車分野など広い応用が期待されている¹⁾。すでに、ボーイングの B787 旅客機では主翼をはじめ、構造部材の約 50%に CFRP 材が適用されている。自動車産業でも、比重 1.6 で鋼材の 4 分の 1 で引張強度が 10 倍の CFRP 材を適用する試みが始まっている。輸送機器産業への CFRP 部材の適用を考えると、素材が高価であるばかりでなく、この CFRP 材の成形および加工技術が金属材料などに比べ困難である。高価なダイヤモンドカッターを用いたり、ウォータージェット切断機などを用いる必要がある。近年、レーザー加工装置の発展により、CFRP 複合材料の切断、穴あけ、接合など加工に適用が検討されている、ここではその現状を紹介する。

2. レーザー切断の種類と特性

レーザー加工の中でもっとも工業的に利用されているのがレーザー切断である。対象材料も金属、木材、繊維、プラスチック、無機材料など多用である。そのために、各種レーザー切断法がある。大別すると、次のように分類される。

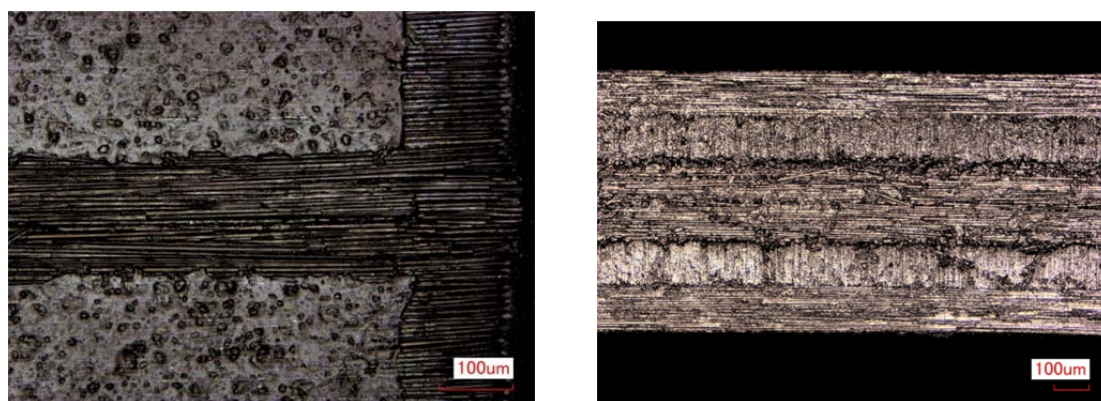


熔融切断はレーザーで材料の融点以上に加熱して、それをアシストガスで吹き飛ばして切断する方法である。アシストガスに酸素を用いて、炭素鋼を切断すると酸素と鉄が発熱反応を起こし、切断が容易に行える。これを反応切断と呼んでいる。しかし、他の金属は通常、酸化反応により高融点のか酸化物が生成するので、酸素以外のガス、例えばアルゴン、窒素、などをアシストガスとして熔融切断をする。これを無酸素切断と呼ぶ。レーザー切断特有のアブレーション切断は高出力密度（例えば、 $1\text{GW}/\text{cm}^2$ 以上）でかつ超短パルスのレーザーで材料を切断すると、その表面層の数 μm が約 $10,000^\circ\text{C}$ 以上の高温になり、プラズマ化して、図1のように飛散して、溝が形成され、これを繰り返すと図2のよ

うに切断溝（カーフ）ができ、切断できる。これをアブレーション切断と呼ぶ。この方法によれば、金属のみならず、石類、ゴム、樹脂、CFRPなどあらゆるものが切断できる。



図1 レーザーアブレーション現象（左から照射10ns、20ns、約50ns後）



(a)平面図（1パス後）

(b)切断溝の縦断面（120パス後）

図2 CFRPのレーザーアブレーション切断の例（板厚0.8mm）²⁾

切断はガラスやシリコンのような熱衝撃に脆い材料に対して適用する切断で、表面をレーザーで加熱し、その熱で材料に割れ目をいれ、切断する方法である。最近ではシリコンウエハの切断には表面でなく、材料内面に亀裂をいれて切断する場合もある。

CFRP複合材料のレーザー切断には2種類の方法が検討されている。1つは連続発振（CW）のレーザーを用いて、高速熔融切断し、熱影響部幅を極小にして切断する方法。もう1つは超短パルスレーザー（パルス幅がナノ秒、ピコ秒のパルス発振のレーザー）を用いて、材料表面をプラズマ化して、繰り返して切断するアブレーション切断である。よって、用いるレーザー装置も異なる。

CFRPの切断品質は用いるレーザー装置の種類によりおよび切断条件に大きく左右される。そこで、まず、加工用のレーザー装置の種類を表1に示す。

3. CFRP等複合材料のレーザー加工

3.1 アブレーション加工

「超短パルスレーザー」とはパルス幅がフェムト秒からナノ秒のパルスレーザーを総称して呼ぶ。これに

表1 加工用のレーザ装置の種類

レーザの種類	発振のタイプ	波長 (nm)	パルス幅	パルス周波数	最大平均出力
YAGレーザ	パルス	1064	0.1~20ms	1~数百Hz	~6kW
半導体レーザ	CW	940	-	-	~30kW
ファイバーレーザ	CW	1070	-	-	~100kW
	パルス	1070	1~100ns	1~数千Hz	~1kW
ディスクレーザ	CW	1030	-	-	~16kW
	パルス	1030	0.1~100ns	1~数千Hz	~1kW
ナノ秒Q-スイッチ YAGレーザ	パルス	1064 532	1~100ns	1~数千Hz	~400W ~200W
ピコ秒パルスレーザ	パルス	1064	10~700ps	1~数百kHz	~1kW
		532			~500W
		355			~100W
フェムト秒パルス レーザ	パルス	940	10~数百fs	1~数MHz	~1kW

対して「短パルスレーザ」とはミリ秒からマイクロ秒オーダーのレーザを呼ぶ。図3 はこれらのパルスレーザのパルス幅と各種レーザ加工を示す。なぜこのような分類をしかたかという、それは断熱的なレーザ加工現象がほぼ数10ナノ秒のパルス幅を境に大きく異なるからである。レーザ加工は非接触プロセスであり、レーザビームと材料の相互作用時間が短時間であると、加工現象が変化する。レーザの出力密度が数GW/cm²と非常に高いレーザを材料表面に照射すると、材料表面の数μmが断熱的に急激に加熱され、10000℃以上に加熱され、プラズマ化（イオン化）して、除去される。この現象をアブレーションと呼び、CFRP材料の切断・穴あけなどの除去加工に有効である。

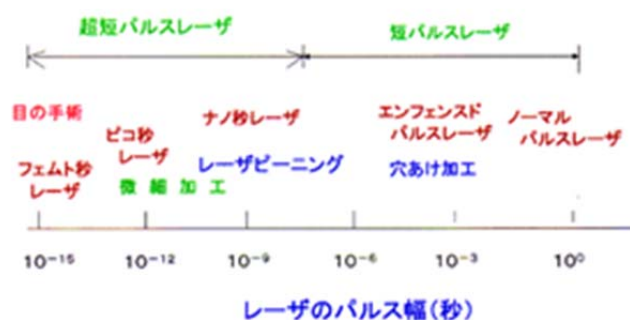


図3 パルスレーザを用いた材料加工.

繊維強化複合材料のレーザー切断に関する研究は、これまではCO₂レーザーおよびYAGレーザーを中心になされており²⁾、加工条件の最適化³⁾、モデル化⁴⁾など様々な研究がなされていた。しかし、その切断結果は工業的に満足できるものではなかった。そこで、近年では短パルスUV固体レーザーによるCFRPの切断の研究などもなされた^{5) 6)}。

ここで紹介する加工技術では、QスイッチYAGレーザーによりCFRP複合材料をアブレーション加工する方法であり、従来の方法と大きな違いがある。その加工現象について考察するとともに、切断部の品質をレーザー顕微鏡などで観察し、高品質な切断加工が可能かどうか検討した。

超短パルスレーザーのパルス幅が数10ナノ秒より短いパルスレーザーでは、高出力密度のレーザーが照射された際、レーザー照射された加工面は極めて短時間であるので深さ数μmの部分のみが断熱的に加熱されるため、表面層のみが約10,000℃以上にもなり、図4に示すように、プラズマ化が起こり、材料の分解・除去加工が可能となる。これをアブレーション加工と呼ぶ。

よって、フェムト秒パルスレーザー、ピコ秒パルスレーザー、ナノ秒パルスレーザーを用いると、金属、ポリマー、無機物、ガラスなどの微細な除去加工が可能になる。

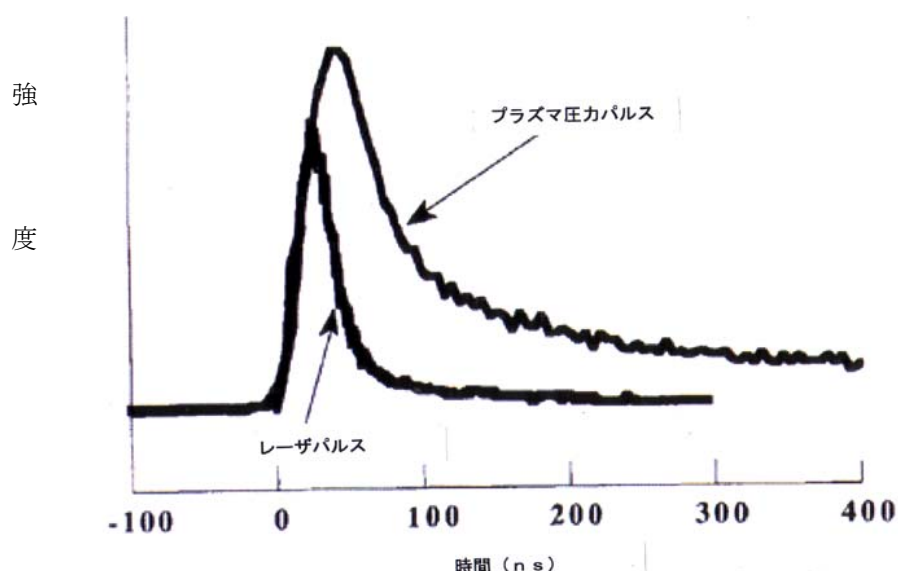


図4 射後のレーザーのパルスおよびプラズマのパルスの変化²⁾

3. 2 レーザーアブレーション加工の基礎実験

まず、定格平均出力 30W、最大パルスエネルギー5mJ、最大繰返し数 50kHz、パルス幅10~80nsのナノ秒パルスYAGレーザーを用いて、図5に示すようなレーザーアブレーション装置によるCFRP等複合材料のレーザーアブレーション加工を行った。

図6は透明樹脂と不透明樹脂にサンドイッチされた金属フィルムを示すが、これを50~100mm/sの速度でレーザーアブレーション加工した断面マクロを図6(b)に示す。このように融点が300℃の樹脂と金属の複合材料のレーザー切断に関する研究は、これまではCO₂レーザーでは困難であった樹脂と反射率の高い金属箔を同時にレーザー切断できるのもレーザーアブ

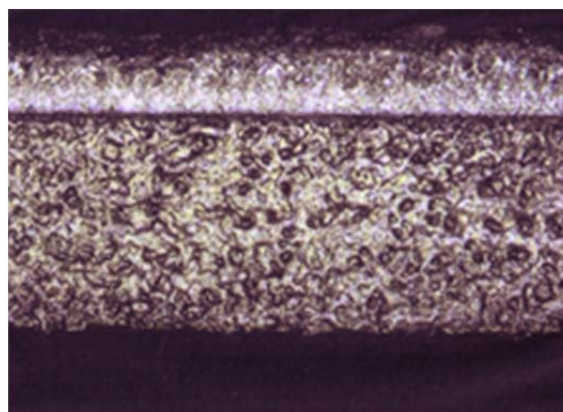
レーゾン加工の特徴である。約 20~30 ns とパルス幅が短かいので金属の熱で樹脂が損傷を受けることなく切断できている。まさに、断熱加工が可能である。



図5 QスイッチパルスYAGレーザー装置とその加工光学系
(ビームスポット径： 30~45 μm)



(a) アブレーション加工された小片



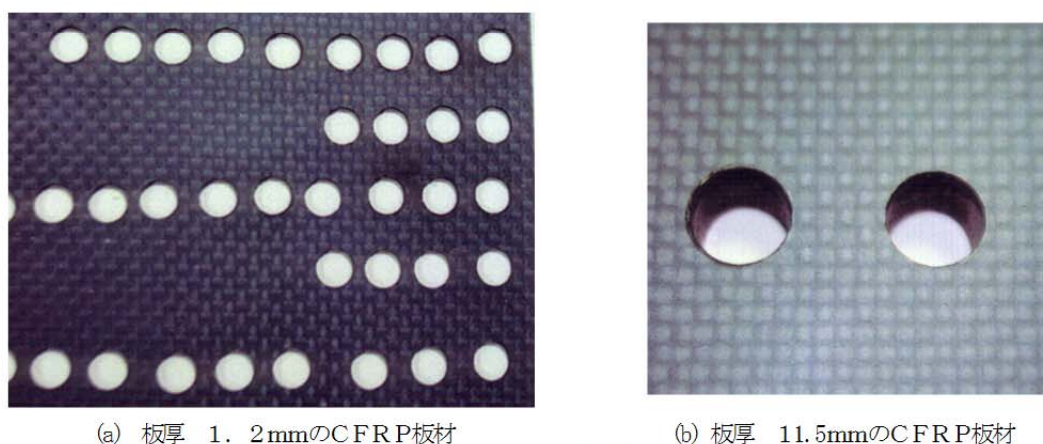
(b) 切断面のマクロ写真

図6 アルミ合金をサンドイッチした複合材料 (板厚：300 μm) のレーザー加工

次に、熱硬化性樹脂のCFRP複合材料にナノ秒パルスレーザー適用したアブレーション加工を紹介する。供試材として板厚1.2mmのCFRP材を用いた。532nmの波長(グリーン色)のパルス繰返し数5kHzのQ-switch YAGレーザーを用いて行った。

6.5mm径の穴あけを約200mm/s~400mm/sの走行速度で、200パスから400パス繰り返して21秒から23秒で1個の穴を開けた部材の外観写真を図7(a)に示す。穴あけ部の周辺の樹脂は表面・裏面ともにダメージやバリがないことが確認できた。また、カーフ幅は約60 μm であった。

さらに板厚 3.5mm 厚の CFRP 材を穴径 6.5mm でレーザーブレイション加工した。平均出力 14W で、パルス周波数 5kHz で、100m/s のスキャン速度で、500 パスを要した。28 分で 1 個の穴を開けた。6.5mm 厚の熱可塑性 CFRP 材に 20mm 径の穴あけに約 1 時間を要した場合と比較するとより長時間を要した。さらに、板厚 11.5mm の CFRP 材に 10mm 径の穴あけをした例を図 7 (b) に示す。板厚が厚くなるほど、加工時間が非常に長くなった。図 8 は熱可塑性 CFRP 部材のレーザーアブレーション加工部の断面マクロ写真を示す。1 本 1 本の炭素繊維が見事に切断されている。とくに、繊維の長手方向はウナギを削いだときのように繊維中央で切断されている、熱影響部もほとんど観察されない。垂直方向の繊維も丸く切断されている。ここにアブレーション加工の切断品質のよさが表れている。



(a) 板厚 1.2mm の CFRP 板材 (b) 板厚 11.5mm の CFRP 板材
図 7 CFRP 部材のレーザー穴あけ加工

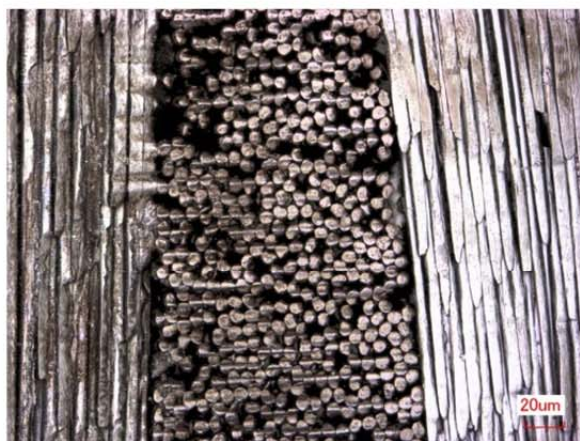


図 8 熱可塑性 CFRP 部材のレーザーアブレーション加工断面

3. 3 フェムト秒およびピコ秒パルスレーザーを用いた CFRP 部材の加工

フェムト秒またはピコ秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザーにより CFRP 部材をアブレーション加工する技術も開発されている。図 9 はパルス幅 200 フェムト秒 (10^{-15} 分の 1 秒) のパルスレーザー及び 100 ピコ秒 (10^{-12} 分の 1 秒) のパルスレーザーで CFRP を切断した時の断面および表面写真を示す。上部がフェムト秒レーザー下部がピコ秒レーザー

の場合である。ただ00フェムト秒

(10^{15} 分の1秒)のパルスレーザー及び100ピコ秒(10^{12} 分の1秒)のパルスレーザーでCFRPを切断した時の断面および表面写真を示す。上部がフェムト秒レーザー下部がピコ秒レーザーの場合である。ただ、切断品質は非常に良いが、これらの切断には長時間を要するので切断速度の向上が問題となっている。

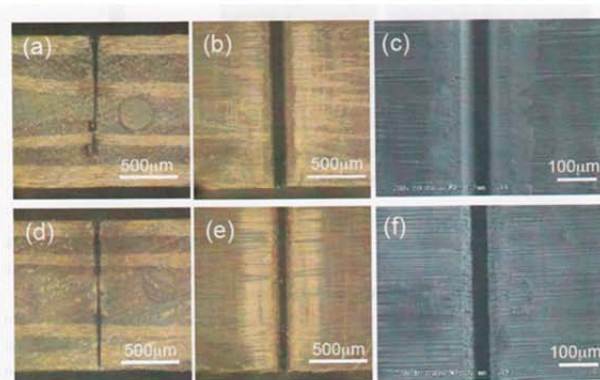


図9 フェムト秒レーザーおよびピコ秒レーザーによるCFRPの切断例⁸⁾

4. レーザーアブレーション加工の開発事例

4.1 自動車用CFRP部材のレーザーアブレーション加工の開発事例

4.1.1 自動車用ハンドル

このようにCFRP複合材料をレーザーアブレーション加工すると、高精度の加工ができることが確認できたので、この技術をどのように産業に応用できるか検討した。まず、自動車分野として、熱可塑性樹脂のCFRP製自動車ハンドル(板厚:6.5mm)に図10に示すように6.5mm径の穴と20mm径の穴を開ける実験を行った。6.5mmの穴は約17分で加工出来たが、20mmの穴は約1時間を要した。穴内面の切断状況をレーザー顕微鏡で観察すると良好な切断面が観察された。レーザーアブレーション加工では表面および裏面にバリや剥離のない、樹脂の付着もないきれいな切断面が得られた。切断面における炭素繊維先端の形状も粗大化がなく、良好であった。



図10 自動車ハンドルのレーザー穴あけ

4.1.2 バッテリーケース

次に、図11に示すように、EV車等のバッテリーケースをCFRP製にする場合のトリミング加工および穴あけ加工にレーザーアブレーション加工を用いた。バッテリーケースはホットプレスを用いて、成形し、そのバリを取るトリミングにレーザー加工を適用した。その後、取付用の穴をレーザー加工で明けた。総重量が270gの軽量のケースが製作できた。



図11 バッテリーケースのレーザー加工

4.2 航空機用CFRP部材のレーザーアブレーション加工の開発事例

4.2.1 スキンパネルへの窓枠加工

さらに飛行機のスキンパネルの窓枠をレーザーアブレーション加工した事例を図12に示す。スキンパネルの大きさが2070mm x 670mm、板厚が6.7mmのもので、

材質は熱硬化性CFRP部材である。切断面はバリや剥離もなく、熱影響部も観察されない。加工精度は寸法200mmの窓枠に対して $\pm 10\mu\text{m}$ の高精度であった。取付け用の穴(径6.0mm)もレーザーで穴あけ加工できた。スキャナーを用いることで高精度に加工できることが確認できた。

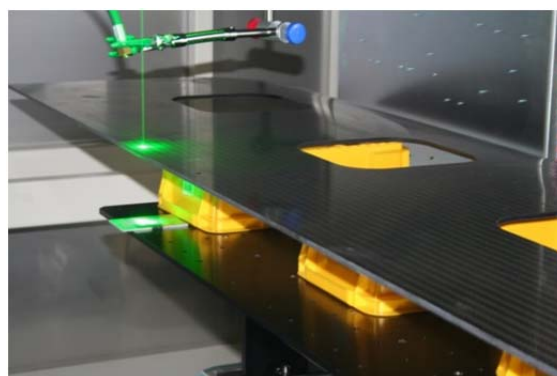


図12 航空機スキンパネルへの窓枠のレーザーアブレーション加工

4.2.2 ジェットエンジンの消音パネル

現在、消音パネルはアルミニウム合金製であるが、これをCFRP製に改良すると非常に軽量のパネルができる。そこで、図13に示すように、上板と下板をCFRP部材とし、ハニカム部材をアラミドハニカムとして消音パネルを図14のように製作した。直径1.0mmの穴、1600個を約100分でレーザーアブレーション加工した。その結果、図15に示すようにバリや熱影響部もなく、穴径精度が $\pm 5\mu\text{m}$ の穴あけができた。

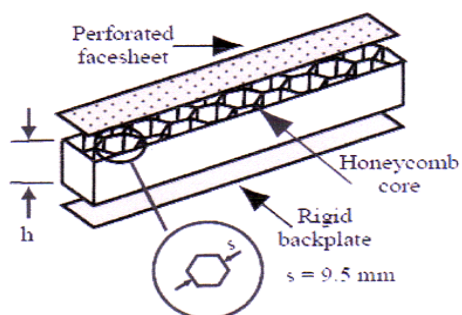


図13 消音パネルの構造



図14 試作したCFRP製軽量消音パネル



図15 消音パネルへのレーザー穴あけ



図16 CFRP部材のモザイク継手

4.3 CFRP部材の突合せ継手

さらに、超短パルスのQスイッチYAGによる微細なアブレーション加工の特徴を生かして、複雑なモザイク形状の開先加工ができることを利用して、熱硬化性CFRP(板

厚：1.2mm)を用い、図16に示す突合せモザイク継手(特開2011-056583)を製作した。この継手引張試験での破断強度は母材強度(520MPa)の78%である400MPaであった。

5. まとめ

超短パルスレーザーを用いたCFRP複合材料のレーザーアブレーション加工について紹介した。さらに、レーザーによるCFRPの溶接についても紹介した。この技術分野においてもドイツは技術開発を精力的に進めている。日本でも著者らはその後塵を踏むことのないように、研究開発に力を入れている。

謝辞

著者はこの技術をさらに工業的レベルで発展させるため、経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業に応募し、平成21~23年度の開発テーマに「CFRP複合材料部材の新レーザ溶接技術の開発」として採択され、名古屋産業科学研究所の管理のもとで名古屋大学田邊研究室、佐宗研究室、大同大学平研究室、愛知県産業技術研究所、(株)齋藤工業、(株)童夢カーボンマジック、今井航空機器工業(株)、(株)最新レーザ技術研究センターが共同研究を実施した。本報告はその研究成果も含めている。

参考文献

- 1)H. Fukagawa: Proc. of LPCC2012, April, 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-2-3
- 2)松田、萬澤ほか: Motor Fan, Vol. 61(2011), p. 60-61
- 3)杵名、井上: 溶接技術、Vol. 59, No. 8(2011)、p. 85-89
- 4)M. Naeem ほか; Proc. of LPCC2012, April, 26-27(2012), Yokohama, paper#LPCC-2-1
- 5)P. Jaeschke, U. Stute ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27(2012), Yokohama paper#LPCC-4-1
- 6)片山、川人ほか; 日本溶接協会LMP委員会資料、LMP一本一〇九(H24年5月)
- 7)A. Klotzbach ほか: Proc. of LPCC2012, April. 26-27, (2012), Yokohama, paper#LPCC-2-1
- 8)M. Fujita ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27、(2012), Yokohama, paper#LPCC-5-1
- 9)Y. Kawata ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-5-3
- 10)H. Niino ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-4-5
- 11)M. Kutsuna ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27 (2012), Yokohama, paper#LPCC-4-3
- 12)K.-W. Jung, S. Katayama ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27(2012), Yokohama paper#LPCC-3-2
- 13) P. Jaeschke, V. Wippo ほか; Proc. of LPCC2012, April. 26-27(2012), Yokohama, paper#LPCC-3-1