アルミニウム合金のレーザーマイクロスポット重ね溶接における インプロセスモニタリングと適応制御 — 熱放射による部分溶込み溶接のための適応制御法 —

川人 洋介¹, 片山 聖二²

¹大阪大学大学院 工学研究科 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

²大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

In-Process Monitoring and Adaptive Control in Laser Micro-Spot Lap Welding of Aluminum Alloy

— Adaptive Control by Heat Radiation for Partially-Penetrated Welding —

Yousuke KAWAHITO¹ and Seiji KATAYAMA²

¹Graduate School of Engineering, Osaka University, 11-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

²Joining and Welding Research Institute (JWRI), Osaka University, 11-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

(Received January 5, 2004)

This paper presents a new procedure for in-process monitoring and adaptive control that has been developed for micro-spot lap welding of A3003 aluminum alloy sheets of 0.1 mm and 1 mm in thickness. The objective of this process is to consistently produce sound laser partial-penetration welds. Observations revealed that the reflected laser beam and the heat radiated from the weld area were effective as process-monitoring signals in detecting melting, keyhole formation and hole generation during laser irradiation. Laser pulse width and peak power during the irradiation of a fundamental YAG laser beam were controlled at regular 0.15ms intervals on the basis of the heat radiation signal being employed to detect hole generation. Investigation of 20 samples revealed that only four non-bonded welds with holes were formed under conventional conditions. In contrast sound partially penetrated spot welds were produced in all 20 samples subjected to laser lap welding under the proposed in-process monitoring and adaptive control method.

Key Words: Aluminum alloy, In-process monitoring, Adaptive control, Keyhole, Micro-spot lap welding

1. 緒 言

レーザー溶接は、抵抗溶接など他の溶接方法に比べ、加工コストが高い。そのため、レーザーの加工特性を活かした高信頼性や高精度などの付加価値を創造しなければならない。

近年、自動車産業や電気・電子機器産業の分野で、軽量化などの理由からアルミニウム合金が多用されるようになってきた。しかし、アルミニウム合金は、一般に用いられる基本波YAGレーザーや炭酸ガスレーザーの波長では反射率が高く、また、純銅と同じく高熱伝導性を有し、さらに純銅よりも線膨張率が高く、表面張力が小さいため、加工部およびその周辺部の変形が起こりやすいと考えられる難加工材料である。特に、電子機器デバイスなどのマイクロサイズの高精度接合に用いる場合には、個々の試料の表面状態や接合箇所毎の熱容量の微妙な差などにより、穴あき不良など溶接品質の異なる状況が発生しやすく、プロセスを安定維持するのは非常に困

難である。この課題を解決する方法の1つとして、製造過程のモニタリング技術および適応制御技術の開発が重要であり、最近、モニタリング技術および適応制御技術に関する検討結果が報告されている¹⁻⁴⁾。前回報告したインプロセスモニタリングと適応制御の研究⁵⁾では、純銅の厚み0.1 mm薄板のスポット重ね溶接において貫通接合への適用を試み、接合部を安定して作製できることを明らかにした。一方、貫通溶接とともに産業に多く用いられる板厚の異なる材料の部分溶込み溶接法の確立も期待されている。

そこで、本研究では、アルミニウム合金の薄板に基本波パルスYAGレーザー光を照射する重ねスポット溶接を行い、レーザー溶接中の反射光および熱放射光の計測と同時に、加工表面の溶融状態とレーザー誘起プラズマの高速画像観察を行った。そして、反射光と熱放射光については、高速画像観察結果や溶接結果との関連性に基づいて、プロセスや溶接結果のモニタリングとしての有効性を評価した。特に、各継手の引張せん断強度を測定

し、継手強度と熱放射光との相関を調査した。また、レーザー照射中の個々の溶接部からの熱放射に基づいて、レーザー照射時間とレーザーパワーを適応制御することにより、接合強度の安定化と穴あき不良抑制が可能であることを明らかにした。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は約1.25 %マンガンを含む純度96 %以上のアルミニウム合金A3003であり、そのサイズは30×5 mmで、厚さが0.1 mmと1 mmのものを用いた。

本実験で使用したレーザーは、ミヤチテクノス製ML-3163Aをベースに開発され、外部からの指令電圧を与えることにより、レーザーのピークパワーは5 kW以下の範囲において0.1 ms間隔で制御できる平均パワー50 Wの適応制御型基本波YAGレーザー装置である。加工方法としては、Fig. 1に示すように、1 mm厚のサイズの薄板に0.1 mmの薄板を重ね合わせ、ファイバーで伝送した基本波YAGレーザー光を厚み0.1 mmの薄板に大気中で照射し、スポット溶接を試みた。そのときのレーザー溶接条件をTable 1に示す。また、レーザー照射中の反射光および熱放射光をモニタすると同時に、加工表面およびレーザー誘起プルームの高速画像を観察して加工現象を明確にした。各モニタ信号を計測した方向は、反射光と熱放射光については、基本波YAGレーザーと同軸方向である。一方、加工表面の高速観察画像では、MELLES GRIOT製の10 mWのHe-Neレーザーを撮影用背光として水平から45度傾けて入射させ、その正反射光を受光するために、水平から45度傾けた方向であり、レーザー誘起プルームについては水平方向から観察した。反射光計測では、共焦点型光学系を用い、加工表面からの反射光をSiフォトダイオードで計測した。計測に使用した機器は、浜松フォトニクス製C6386である。熱放射光の計測では、レーザーと同軸方向から計測するため、nWオーダーの非常に微弱な

Fig. 1 Schematic drawing of experimental set-up of in-process monitoring and laser control system.

Table 1 Welding conditions with pulsed YAG laser.

Power	4.6 J
Pulse shape
Laser focusing condition	@focus
Spot diameter	150 μm

熱放射光でも、正反射光と同軸方向で計測できるようにするため、正反射光を選択的にOD8以下に減衰させるノッチフィルターと半値幅10 nmの1.3 μm干渉フィルターを透過させ、InGaAsフォトダイオードで計測を行った。フォトセンサの増幅器は、参考文献^{6,7)}の構成をもとに作製した遮断周波数100 kHzで増幅率 6.8×10^5 のプリアンプを使用した。熱放射光を計測しているスポット径はφ500 μmである。画像観察では、KODAK製EKTAPRO HS MOTION ANALYZER MODEL 4530での1秒間に9,000コマの高速画像撮影を行った。

さらに、20サンプルについて、溶接加工と穴あきのモニタリング結果ならびに引張せん断強度の測定結果を基に、熱放射光により加工状態と引張強度を150 μs間隔で推測し、サンプル毎に適応制御型パルスYAGレーザーの照射時間とピークパワーの制御を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 アルミニウム合金のレーザーマイクロ溶接におけるインプロセスモニタリング

20サンプルに対して、厚み1 mmのA3003板に0.1 mmのA3003薄板を上板にして重ね合わせ、基本波YAGレーザーによりマイクロスポット溶接を行った。そして、それぞれの溶接中には、基本波YAGレーザーの出力波形ならびに熔融池からの熱放射光および反射光を計測し、さらに、加工表面の熔融状態とレーザー誘起プルームの高速ビデオ観察も同時に行った。

3.1.1 レーザースポット溶接結果

20サンプルに対してレーザースポット溶接を行った結果、16サンプルについては重ね溶接ができた。しかし、残り4サンプルについては、上板に穴があき、未接合となった。溶接ができたものの表面状態と断面形状をFig. 2に示し、未接合となったものの、上板の表面状態と、上

Fig. 2 Surface and cross section of laser micro-spot weld in A3003 alloy.

Fig. 3 Top surface of upper sheet and cross section of non-bonded A3003 weld with hole.

板と下板の断面形状をFig. 3に示す．接合できた溶融溶接部の直径の平均値とその標準偏差は $650\text{ }\mu\text{m}$ と $32\text{ }\mu\text{m}$ であり，溶接部の形状は熱伝導型ではなく，キーホール型に近いことがわかった．さらに，溶接部周辺の上板は，浮き上がった形状となっており，上板と下板の境界面には大きな空隙が発生していた．一方，未接合の上板には， $255\text{ }\mu\text{m}$ の大きな穴が形成され，下板表面にはレーザーによる照射根が確認できた．上板の溶融溶接部の直径の平均値とその標準偏差で $565\text{ }\mu\text{m}$ と $28\text{ }\mu\text{m}$ であり，溶接ができたものに比べて，穴あき未接合は溶融部のサイズが小さかった．

以上の結果，通常の適応制御をしない同一のレーザー溶接条件では，上薄板の溶接が可能な場合と不可能な場合があることが判明した．

3.1.2 高速画像観察結果

溶接ができた場合の加工表面の溶融状態とレーザー誘起ブルームを高速ビデオで観察した．その結果の一例をレーザー照射時間に対してFig. 4に示す．Fig. 4の上図は，加工表面の溶融状態の高速画像を示し，下図は，水平方向からのレーザー誘起ブルームの高速画像を示す．溶接ができた場合の溶融状態に関しては，レーザー照射

開始 0.3 ms 後から溶融が開始し，その溶融領域はレーザーパワーが一定の間，拡大し続けている．また， 1.0 ms から溶融部の中央部にくぼみが確認でき，そのサイズは溶融領域の増加に伴い，増加した．ピーク強度を下げるに従って， 4.0 ms ではくぼみ内部から盛り上がりが生じ，その後，溶融部全体が落ち込み，溶接溶融部表面が形成された．一方，レーザー誘起ブルームに関しては， 1.0 ms の溶融部の中央部にくぼみが確認できる時点では，ブルームが確認できる．レーザーパワーが一定の間では，溶融部の拡大とともに，ブルームのサイズが増加する傾向にあった．その後，レーザーパワーを下げると，ブルームも小さくなり消滅した．

以上，加工表面の溶融状態とブルームの観測結果から，溶融部の中央部のくぼみは，キーホールであると考えられる．

穴あき未接合の場合の表面溶融状態とレーザー誘起ブルームを観察した結果をFig. 5に示し，上図には，加工表面の溶融状態の高速画像，下図には，水平方向からのレーザー誘起ブルームの高速画像を示す．

未接合の場合の溶融状態に関しては，照射開始 0.4 ms 後から溶融が開始し，その溶融領域はレーザーパワーが一定の 2.7 ms までは拡大し続けた．しかし， 2.8 ms では，溶

Fig. 4 High speed photographs of typical change in molten pool behavior and plasma/plume during YAG laser spot welding of A3003 alloy in air in case of formation of partially-penetrated weld.

Fig. 5 High speed photographs of change in molten pool behavior and plasma/plume during YAG laser spot welding of A3003 alloy in air in case of formation of non-bonded weld with hole.

融部の中央部にくぼみが確認できないほど、表面状態が荒れ、3.0 msでは穴の形成が観測された。この時、レーザー照射中にスパッタの発生は確認できなかった。したがって、この穴あきスパッタで融液が吹き飛ばされたために発生したのではなく、Fig. 3に示すようにレーザー照射中に融液がキーホール周辺部に逃げたために生じたものと考えられる。

レーザー誘起プルームに関しては、1.0 msの溶融部の中央部にくぼみが確認できる時点では、確認できた。その後、プルームのサイズも2.7 msまでは溶融部の拡大とともに増加した。しかし、2.8 ms以降、穴があいた後、プルームは消滅した。

以上、溶融部表面とレーザー誘起プルームを高速度観察した結果、溶融状態およびプルーム発光強度は、上板に穴があくことによって、溶接が可能な場合と未接合となる場合とで大きく異なることがわかった。

3.1.3 反射光によるインプロセスモニタリング

溶接ができた場合と穴あき未接合の場合における反射光強度の計測結果をFig. 6に示す。横軸はレーザー照射開始からの時間で、単位は[ms]であり、縦軸は反射光の強度で、単位は[mW]である。

溶接ができた場合では、反射光はレーザー照射開始0.5 msまで増加し、その後レーザーパワーが一定であるにもかかわらず減少し続けた。なお、反射光は、パワーを下げた場合、4.0 msから4.4 msまでの間再び増加し、第2のピークが観測された。これは、表面状態の高速観察画像の4.0 ms近傍におけるくぼみ内部からの盛り上がりの生成時間と一致しており、キーホールが閉じて平坦部が形成し、さらに一部周辺から凝固が起こったためと考えられる。

穴あき未接合の場合では、反射光は、レーザー照射開始から2.7 msまでは溶接が可能な場合とほぼ同様に増加した。しかし、2.8 ~ 3.0 msでは強度が急激に増加した。これは、Fig. 3に示した下板のレーザー溶接痕から考えると、上板に穴があいたために、下板では溶融とキーホールの生成がスムーズに起こらなかったこととそれによる下板表面からのレーザーの正反射光が急激に増加したことが考えられる。

以上の結果より、反射光の計測は溶融の開始やキー

Fig. 6 Monitoring results of reflected beams detected in case of formation of partially-penetrated laser weld and non-bonded weld with hole.

ホールの生成がモニタでき、キーホールが閉じる状況や上板に大きな穴があいた情報もモニタできることがわかった。したがって、反射光は、プロセスのモニタとしては、溶融開始やキーホールの生成・消滅をモニタでき、溶接結果のモニタとしては、穴あき未接合をモニタできることがわかった。

3.1.4 熱放射光によるインプロセスモニタリング

溶接ができた場合と穴あき未接合の場合における熱放射光の計測結果をFig. 7に示す。横軸はレーザー照射開始からの時間で、単位は[ms]であり、縦軸は熱放射光の強度で、単位は[μW]である。

溶接ができた場合では、熱放射光の変化は、レーザー照射開始から熱放射強度が1.7 μWに達するまでは、溶接ができた場合と穴あき未接合の場合において大差がなく、溶融部の拡大とともに増加した。しかし、1.7 μW前後を境に、溶接が可能な場合はさらに増加し、穴あきの場合は減少したため、熱放射光のモニタリングした波形は大きく異なった。その後、溶接できた場合の熱放射強度は、レーザーパワーが一定の間は増加傾向にあり、パワーを下げるとともに減少した。一方、穴あき未接合の場合では、熱放射強度は、急激に減少し、穴あきが確認できた3.0 msからは、ゆるやかな増加傾向を示し、パワーを下げるとともに減少した。

以上、高速画像の観察結果から判断すると、熱放射光は溶融状態と相関があり、さらに上板に大きな穴があいた情報もモニタできることがわかった。また、穴あき未接合の場合における高速画像計測の結果と熱放射モニタの結果から、計測した近赤外光は、プルームからのものが主ではなく、溶融部からのものが主であることが確認できた。

3.1.5 引張せん断強度の評価結果

熱放射光に関して、さらにモニタ信号としての解析を進めるため、20サンプルについて、引張せん断試験を行った。その結果をFig. 8に示す。横軸は、熱放射強度1.7 μWを超えている時間で、単位は[ms]であり、縦軸は、せん断接合強度で、単位は[N]である。引張せん断強度は、1.7 μW熱放射強度以上の0 msから1.2 ms程度までは増加

Fig. 7 Monitoring results of heat radiation in case of formation of partially-penetrated laser weld and non-bonded laser weld with hole.

Fig. 8 Relationship between period of heat radiation power level over 1.7 mW and shear strength of lap-welded joint.

し、1.2 ms以上では、ほぼ一定となった。接合強度は平均値10 Nで、その標準偏差は5.5 Nであった。したがって、熱放射光には、せん断接合強度の情報も含まれており、溶接結果の情報もモニタできると判断される。

以上の結果より、反射光も熱放射光も溶接結果をモニタできるが、レーザー適応制御に適したインプロセスモニタリング信号としては、溶融し接合するプロセス前後の情報をモニタできる反射光に比べ、溶接中の情報や接合強度との相関情報をモニタできる熱放射光が有効であると判断された。したがって、本研究では、以下、適応制御用モニタ信号として熱放射光を採用した。

3.2 アルミニウム合金のレーザーマイクロ溶接における適応制御

本研究の適応制御法としては、20サンプルに対し、接合強度のバラツキ抑制と穴あき未接合の再溶融溶接との2種類の適応制御について検討した。そのときのフローチャートをFig. 9に示す。

接合強度のバラツキ抑制に関しては、レーザー照射時間を、3.1.5で明らかにした接合強度との対応関係を確認した熱放射強度 $1.7 \mu\text{W}$ を超えている時間を1.5 ms以上になるように適応制御した。また、穴あき未接合の再溶融溶接に関しては、レーザー照射開始から6 ms以降に、熱放射強度 $1.7 \mu\text{W}$ を超えているかいないかをもとに、溶接状態が穴あき未接合状態であるかを判断し、レーザーパワーの初期設定値である1.07 kWから1.39 kWに引き上げ、上板

Fig. 9 Flow chart of adaptive control based upon intensity level and period of heat radiation.

の穴周辺部を溶かし、さらに、下板も溶かすことにより溶融部の融液量を増加させ、穴を埋め、その後、接合強度バラツキ抑制のための適応制御をすることを試みた。

20サンプルに対してレーザースポット溶接時に適応制御を行った結果、すべて溶接・接合することができた。特に、20サンプル中7サンプルにおいて、溶接中に、上板表面に穴が発生したが、設定の適応制御により穴を解消して溶接できることが確認された。溶接したサンプルについて、接合強度のバラツキ抑制を目的とした適応制御をただけのものの表面状態と溶接形状は、Fig. 2と同様であり、溶融溶接部の直径の平均値とその標準偏差は $675 \mu\text{m}$ と $20 \mu\text{m}$ であった。一方、穴あき未接合の再溶融溶接を目的とした適応制御をしたものの表面状態と断面形状についてはFig. 10に示す。溶融溶接部の直径の平均値とその標準偏差は $765 \mu\text{m}$ と $45 \mu\text{m}$ であった。穴あき未接合の再溶融溶接をした場合は、しない場合に比べて $90 \mu\text{m}$ 程度溶融部の直径が増大した。溶接部の形状は、キーホール型であり、接合部の周辺の上板は浮き上がり、上板と下板の境界面には大きな空隙も発生していた。

穴あき未接合の再溶融溶接用の適応制御を行った場合における加工表面の溶融状態とレーザー誘起プルームの観察結果をFig. 11に示す。Fig. 11の上図は、加工表面の溶融状態の高速画像を示し、下図は、水平方向からのレーザー誘起プルームの高速画像を示す。

加工表面の溶融状態に関しては、レーザー照射開始3.0 ms後には、穴が観測でき、6.0 msから6.8 msまで穴の内部が白く輝きはじめ、その後穴内部から融液の盛り上がりが生じて、7.6 msでは穴が融液で埋められ、キーホールがある溶融部が形成されている。さらに、溶融部の拡大が起こるが、レーザーパワーを下げると、8.1 msでは、キーホール内部から盛り上がりが生じ、その後、溶融部全体が落ち込み、溶融溶接部が形成された。このような溶接後期の状況は、穴あきが発生しない場合と同様であった。

レーザー誘起プルームに関しては、6.0 msからはプルームも確認でき、レーザーパワーが一定の間、溶融部の拡大とともに、プルームのサイズも増加した。パワーを下げた場合の変化は、穴あきが発生しない場合と同様に、プルームも小さくなり消滅した。

熱放射光の計測結果をFig. 12に示す。レーザー照射開始2.8 ms程度で穴あきが発生しており、適応制御システムは、6 msで上板の穴あき状態を認識し、パワーを1.07 kW

Fig. 10 Surface and cross section of laser micro-spot weld produced in A3003 alloy under adaptive control for hole repair.

Fig. 11 High speed photographs of change in molten pool behavior and plasma/plume during YAG laser micro-spot welding of A3003 alloy under adaptive control for hole repair.

Fig. 12 Monitoring result of heat radiation during laser spot welding of A3003 alloy under adaptive control for hole repair.

から1.39 kWまで引き上げ、その後、熱放射強度が $1.7 \mu\text{W}$ を越えている時間を1.5 msを目標に0.15 msを時間単位として制御した結果、約1.89 msとなっていた。これは、適応制御時の熱放射光の上昇時に $1.7 \mu\text{W}$ 近傍で変動した影響

であろうと考えられる。

以上の結果より、接合強度のバラツキ抑制用の適応制御と穴あき未接合の再溶融溶接用の適応制御が設定どおり機能したことが確認できた。

さらに、適応制御を行った20サンプルについて、引張せん断試験を行った結果をFig. 13およびTable 2に示す。Fig. 13の横軸は、熱放射強度 $1.7 \mu\text{W}$ を越えている時間[ms]であり、縦軸は、接合強度[N]である。Fig. 13に示すように、熱放射強度 1.7 mW を越えている時間のバラツキを1.5 msから2.0 ms程度までに抑えることができた。その結果、Table 2に示すように、接合強度の平均値は15 Nで、その標準偏差は1.9 Nでき、溶接結果を改善することができた。

Table 2 Experimental results of shear strength of lap welded joint under adaptive control and without adaptive control.

		(N=20)	
Shear strength of lap-welded joint	Average [N]	Under adaptive control	Without adaptive control
	Standard deviation [N]	1.9	5.5

Fig. 13 Relationship between period of heat radiation power level over 1.7 mW and shear strength of lap-welded joint made under adaptive control for hole repair in addition to data under conventional control.

Table 3 Improved tailing shape of laser pulse for repair of gap between sheets, showing characteristics of long period of power decrease in comparison of conventional pulse.

Fig. 14 Cross sections of laser micro-spot welds, showing effect of tailing power and period on gap formation between sheets.

以上の検討結果から、熱放射光のインプロセスモニタリングに基づいて、接合強度バラツキ抑制と穴あき未接合の再溶融溶接との2種類の適応制御により、穴あきによる未接合を防止し、適応制御を使用しない場合に比べ、接合強度の標準偏差も1/3程度に低減することがわかった。

なお、上板と下板の境界面には大きな空隙が生成されるという問題が認められた。一般に上板が薄い場合、このような空隙が生成しやすいことが知られている。これに対する改善を試みた結果、効果が確認されたレーザー波形とその溶接断面形状をTable 3およびFig. 14に示す。レーザー終了時に少しパワーを増加させて溶融を促進し、パワーの低下に際しては、空隙部上部の急速な凝固を抑制するように、徐々にパワーを低下させることが効果的であろうと考えられる。

4. 結 言

本研究では、アルミニウム合金のレーザーマイクロスポット溶接におけるインプロセスモニタリングと適応制御について検討を行った。本研究で得られた結論は以下のとおりである。

1) 通常のレーザーマイクロスポット溶接の結果

①適応制御を行わない通常のレーザー溶接の場合、同一の溶接条件では、上薄板の溶接・接合が可能な場合と不可能な場合があることが判明した。

②溶融部表面とレーザー誘起ブルームを高速ビデオで

観察した結果、溶融現象およびブルーム発光強度は、上板に穴があくことによって、溶接が可能な場合と穴あき未接合となる場合とで大きく異なることがわかった。

2) インプロセスモニタリングの結果

①反射光の計測は溶融の開始、キーホールが閉じる状況や上板に大きな穴があいた情報もモニタできることがわかった。したがって、反射光は、プロセスのモニタとして、溶融し接合するプロセス前後をモニタでき、溶接結果のモニタとしては、穴あき未接合をモニタできることがわかった。

②熱放射光は溶融状態をモニタしており、さらに上板に大きな穴があいた、溶接中の情報もモニタできることがわかった。また、熱放射光からの情報には、せん断接合強度の情報も含まれていることを見出し、穴あき未接合と接合の溶接結果以外の情報もモニタできることがわかった。

3) 適応制御結果

①熱放射光のインプロセスモニタリングに基づいて、穴あき未接合の再溶融溶接と接合強度におけるバラツキ抑制を目的として適応制御を行うと、穴あきによる未接合を防ぎ、適応制御を使用しない場合に比べ、接合強度の標準偏差も1/3程度に低減することができた。(サンプル数：20)

②レーザー照射中に溶融状態の情報や接合強度との相關情報をモニタできる熱放射光は、レーザー適応制御に適したインプロセスモニタリング信号として有効であることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、ご助言とご協力を頂きました、大阪大学接合科学研究所 松縄 朗 名誉教授および水谷 正海 技官に対し、深く感謝致します。そして、本研究を実施するに当たり、ご支援頂いた松下電器産業、FMEおよび軽金属溶接構造協会の関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Allen Sun, Elijah Kannatey-Asibu, Jr., and Mark Gartner: Journal of Laser Applications, **14** (2002) 114.
- 2) Markus Kogel-Hollacher, Marius Jurca, Christoph Dietz, Ger Jassen, and Eric F. Davila Lozada: Proc. ICALEO '98, Section-C, pp. 168 ~177.
- 3) S.Postma, R.G.K.M.Aarts, Johan Meijer, and J.B. Jonker: Journal of Laser Applications, **14** (2002) 210.
- 4) Tsuneo Kurita, Tomohiko Ono, and Tsuyoshi Nakai: The Review of Laser Engineering, **27** (1999) 777. (in Japanese)
- 5) Yousuke Kawahito, Kouji Funami, Toshiharu Okada, and Seiji Katayama: The Review of laser Engineering, **31** (2003) 231. (in Japanese)
- 6) Takashi Ueda, Takahiro Iriyama, and Tadaaki Sugita: Transactions of the Japan Society of Precision Engineers, **61** (1995) 278. (in Japanese)
- 7) Takashi Ueda, Yasuyuki Kanada, Masahiko Satou, and Tadaaki Sugita: Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 58-545C (1992) 302. (in Japanese)