異波長重畳レーザによる各種金属材料の溶融特性*

文 鍾賢**, 水谷 正海***, 片山 聖二***, 松縄 朗***

Melting Characteristics of Various Metals with Combined Lasers of Different Wavelengths*

by MOON Jonghyun**, MIZUTANI Masami***, KATAYAMA Seiji*** and MATSUNAWA Akira***

Infrared CO₂ and YAG lasers have great difficulty in melting metals such as pure aluminum and copper possessing high reflectivity and high thermal conductivity. On the other hand, the laser absorption of such metals generally increases with a decrease in the wavelength, and thus the development of a laser of higher power and shorter wavelength is promising. Recently, Q-switched SHG (Second Harmonic Generation) YAG laser of the maximum power of 50 W, the wavelength of 532 nm and the maximum repetition rate of 50 kHz has been developed; however, this laser has never been employed as a welding heat source.

In this study, therefore, coaxially focusing optical system, in which a pulsed YAG laser beam was combined with a Q-switched SHG laser beam, was designed and constructed to evaluate melting characteristics of various metals with respective laser beams and especially the effect of the combined SHG laser. A deep penetration type of a needle-like weld bead could be produced with the SHG laser alone. It was also found that the penetration of the weld fusion zones produced with the combined laser beams of different wavelengths was 2 to 4 times deeper than that with pulsed YAG laser only. The absorption efficiency of pulsed YAG laser in a metal was confirmed to greatly increase by the combination of the Q-switched SHG YAG laser. The increases in penetration and beam absorption were attributed to the effect of keyholes produced by the high peak power density of Q-switched SHG laser.

Key Words: YAG laser, Q-switched laser, SHG laser, Combined lasers, Laser absorption, Melting efficiency

1. はじめに

近年、産業界に CO₂ レーザや YAG レーザ装置が多数導入されてきている。ところで、軽量のアルミニウム合金や高電気伝導度の純銅などは、輸送や電子工業の分野で注目され、レーザ溶接を行いたいという要望が強い。しかし、純アルミニウムや純銅などの高反射率・高熱伝導率の金属材料は、遠・近赤外線レーザの吸収率が極めて低いため、溶融溶接が困難である。そこで、アルミニウム合金などの溶融性を促進する目的で、通常の連続またはパルス YAG レーザに高繰返しの Q スイッチ YAG レーザまたは短波長のエキシマレーザを重畳させ、溶融性やプラズマとの相互作用について検討されている^{1,2)}。また、YAG レーザの高パワー化を目的として複数のレーザビームをファイバー結合する方式も検討されている³⁻⁷⁾。金属材料表面でのレーザの吸収率は一般に波長が短いほど高いが、波長が短いと、超微粒子などによるレーザ散乱やレーザ誘起プラズマとの

相互作用が顕著になりレーザエネルギーの伝達が阻害されることが知られている⁸⁾。ところで、最近、最大出力 50 W、波長 532 nm (第 2 高調波 (SHG: Second Harmonic Generation)) の Q スイッチ YAG レーザ装置が市販された。しかし、この種のレーザの単独照射による溶接性、波長 1,064 nm の基本波 YAG レーザに重畳させた場合の溶融特性などについては検討された例がない。

そこで、本研究では、金属の溶融促進に対する SHG YAG レーザおよび異波長重畳レーザの有効性を明確にするため、各種金属材料にパルス YAG レーザおよび Q スイッチ SHG YAG レーザをそれぞれ単独にまたは重畳して照射を行い、各金属材料の溶融特性とレーザビームの吸収率について基礎的な検討を行った。

2. 使用材料、実験装置および実験方法

2.1 使用材料

使用材料は、高反射率・高熱伝導率の純銅 (板厚 5 mm)、工業用純アルミニウム A1050 (板厚 6 mm) およびアルミニウム合金 A5083 (板厚 6 mm) ならびに低反射率・低熱伝導率のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 (板厚 10 mm) である。それらの物理定数⁹⁻¹¹⁾を Table 1 に示す。A1050 の物理定数は純アルミニウムのものである。銅の熱

*原稿受付 平成13年8月20日 平成12年度春・秋季全国大会で発表

**学 生 員 大阪大学工学研究科 Student Member, Graduate School of Engineering Osaka University

***正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute Osaka University

Table 1 Physical properties of several materials used.

	Melting point [K]	Specific heat [kJ/kg · K]	Density [Mg/m ³]	Thermal conductivity (20 °C) [W/m · K]
Cu	1350±0.1	0.385 (20 °C)	8.93	394±2
Al050	993	0.932 (100 °C)	2.8	209.4
Al5083	911	0.9 (20 °C)	2.66	120
SUS304	1703	0.501 (20 °C)	8.0	16.3

伝導率はステンレス鋼より約20倍以上大きいことがわかる。

2.2 使用レーザ装置および合成光学系と溶接条件

使用したレーザは、ミヤチテクノス(株)製パルス Nd:YAG レーザ (波長 λ : 1,064 nm; 最大平均出力 P_0 : 400 W; 以下では、パルス YAG レーザまたは 1 ω YAG laser と記す) および Lee Laser 社製 Q スイッチ 第 2 高調波 (SHG) YAG レーザ (λ : 532 nm; P_0 : 50 W, 以下では、Q スイッチ SHG YAG レーザまたは 2 ω YAG laser と記す) である。なお、Q スイッチ SHG YAG レーザの平均パワー密度は、48 W, 10 kHz, 120 ns, ビーム径 0.1 mm とすると、約 5 MW/mm² となり、非常に高いと判断される。それぞれのレーザを単独または重畳照射を行って、各金属材料の溶融特性を調査した。

異波長レーザ重畳による溶融特性の検討では、まず、Fig. 1 に示すように、Q スイッチ SHG YAG レーザの集光光学系が固定されているため、その光学系に対してパルス YAG レーザを 30° 傾けて合成重畳照射を行った。

レーザ溶接条件を Table 2 に示す。レーザ照射は、大気中または N₂ シールドガス中 (30 l/min) において、通常、試料表面をレーザの焦点位置に設定して行った。溶接速度は重畳レーザ照射の場合 0.6 mm/s である。このとき、パルス YAG レーザ照射による溶融部のラップ率は 90% 以上であり、10 kHz の Q スイッチ SHG YAG レーザのラップ率は (ビーム径を 0.1 mm とすると) 99.9% 以上となる。

2.3 同軸集光光学系

異波長重畳レーザによる溶融特性の向上効果を明確にするため、同軸集光光学系を製作した。その模式図を Fig. 2 に示す。レーザビームの重畳は、パルス YAG レーザビーム

Fig. 1 Schematic optical arrangement showing combined laser beams of two different wavelengths.

Table 2 Welding conditions.

Laser	Pulsed YAG laser ($\lambda = 1,064$ nm)	SHG YAG laser ($\lambda = 532$ nm)
Conditions		
Energy (E)	5.5 ~ 65 J/P	4.95 mJ
Pulse width (τ)	1 ~ 10 ms	125 ns
Avg. power (P)	275 ~ 325 W	40 ~ 49.5 W
Frequency (f)	5 ~ 50 Hz	10 kHz
Atmosphere	Air, N ₂ shield gas (30 l/min)

Fig. 2 Schematic representation of coaxial focusing optics of combined laser beams of two different wavelengths.

をダイクロイックミラーに対して上側から透過させ、QスイッチSHG YAG レーザビームを横側から反射させて行っている。また、重畳レーザは単レンズ ($f=100\text{ mm}$) で集光されている。

2.4 レーザビームの吸収率の測定法

レーザ吸収率の測定は、試作した熱量計を用いて行った。その方法を模式図的に Fig. 3 に示す。試料を熱量計の上部に設置してレーザを照射し、その直後、試料を水中に落下させ、熱量計が平衡状態になったときの温度上昇を測定した⁸⁾。吸収熱量 $P_a(W)$ は次式(1)で求めた。

$$P_a(W) = (c_m M_m + c_w M_w + Q) \Delta T \quad (1)$$

ここで、 c_m ：金属材料の比熱

c_w ：水の比熱 ($4.2\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$)

M_m ：金属の質量

M_w ：水の質量 (0.1 kg)

Q ：熱量計の水当量 (17.26 J/K)

ΔT ：熱量計の温度上昇

一方、集光レンズ透過後のレーザ出力 P_l をパワーメータにより測定し、それを照射レーザパワーとした。そして、レーザの吸収率 A は次式(2)により求めた。

$$A = (P_a / P_l) \times 100 (\%) \quad (2)$$

なお、実験での測定誤差は $\pm 5\%$ である。

Fig. 3 Schematic calorimetric measurement of laser beam absorption in metals.

3. 実験結果および考察

3.1 QスイッチSHG YAG レーザによる溶融特性

従来、QスイッチSHG YAG レーザ単独照射による溶融特性については検討された例がない。そこで、異波長レーザ重畳照射による溶融特性について調べる前に、まず、各種金属材料にQスイッチSHG YAG レーザを単独照射し、それぞれの溶融状態を調査した。各金属材料における溶融部の断面形状を Fig. 4 に比較して示す。いずれの材料においても、細長い高アスペクト比の溶込みが得られている。特に、平均出力が50 W とあまり高くないが、高熱伝導率の純銅や純アルミニウム A1050 でも針状の深溶込み形状の溶融部が得られている。しかし、いずれもアンダーフィルの形状を呈している。これはレーザ照射時のスパッタによる融液の飛散損失による。また、微小なポロシティも見られることがあった。

次に、焦点はずしの条件において各金属材料の溶融状況を調査した。溶融部の溶込み深さに及ぼす焦点はずし距離

Fig. 4 Cross sections of various materials welded with Q-switched 2ω YAG laser.

Fig. 5 Effect of defocused distance on penetration depth of weld fusion zones made in various metals with Q-switched 2ω YAG laser.

の影響を各材料に対して Fig. 5 に示す。いずれも、溶込みは焦点位置付近で最も深く、銅、A1050、SUS 304 および A5083 の溶込み深さは、それぞれ約 0.4 mm、0.7 mm、0.8 mm および 1.1 mm となっている。すなわち、溶込みは材料によって異なり、A5083 で最も深い溶込みが得られている。これは、蒸気圧の高い Mg が含まれているためと考えられる。また、いずれの材料でも焦点はずし距離が長くなるに従って浅くなっている。したがって、深い溶込みを得るためには、板表面を焦点位置近傍にセットして、高パワー密度のレーザーを照射する必要があることがわかる。

3.2 合成レーザー重畳照射による溶融特性

A5083 に対して、パルス YAG レーザと Q スイッチ SHG YAG レーザをそれぞれ単独照射および重畳照射を行った。それぞれの溶融断面の観察結果を Fig. 6 にまとめて示す。なお、パルスレーザーは斜め後方から照射されている。パルス YAG レーザに Q スイッチ SHG YAG レーザを重畳すると、溶融部が大きくなり、溶込み深さが深くなることがわかる。

そこで、次に、Q スイッチ SHG YAG レーザの照射条件を一定にして、パルス YAG レーザのエネルギーを変化させ、単独および異波長重畳レーザー溶接を行った。それぞれで得られた溶込み深さを Fig. 7 に示す。重畳レーザー溶接では、溶込み深さはパルス YAG レーザによる溶融と Q スイッチ SHG YAG レーザ重畳効果によって形成されたものに分けて、それぞれ d および D として表示している。溶込み深さは、SHG YAG レーザ単独照射の場合約 1 mm で

Fig. 6 Cross section of weld beads produced in A5083 alloy with pulsed 1ω YAG laser, Q-switched 2ω YAG laser and combined lasers.

Fig. 7 Effect of pulsed YAG laser energy on penetration depths of A5083 welds made with pulsed 1ω YAG laser and combined lasers.

あり、パルス YAG レーザの場合、エネルギーが 10 から 55 J/P に増加するに従って約 0.25 mm から 0.95 mm に深くなっている。異波長レーザー重畳照射溶接部の溶込み深さ d および D は、それぞれパルス YAG レーザおよび SHG

YAG レーザ単独照射の場合より深くなっている。

以上の結果より、A5083 では、パルス YAG レーザに平均パワー約50 W のQスイッチ SHG YAG レーザを重畳するだけで溶融特性が極めて改善されることが明らかとなった。

3.3 同軸集光光学系による溶融特性

前節では、Qスイッチ SHG YAG レーザ (垂直照射) とパルス YAG レーザの重畳照射による溶融性の増加効果が確認された。そこで、重畳効果を明確にするために、SHG

YAG レーザとパルス YAG レーザとの同軸照射型の集光光学系を製作し、重畳レーザを各種金属材料に照射した。その結果を単独照射の結果と比較して Fig. 8 に示す。SHG YAG レーザ単独照射では、すでに明らかにしたように、いずれの材料でも細長い針状の溶込みが得られている。一方、パルス YAG レーザ単独照射では、A1050 および A5083 では溶込みが浅く、SUS 304 でキーホール型の深溶込みとなっている。そして、重畳レーザ照射では、いずれもキーホール型の深溶込み形状となり、溶接部の溶込み深さと溶融断面積が大幅に増加することが確認される。また、純銅に対する各レーザによる溶融性を Fig. 9 に示す。純銅は、ピークパワー6.5 kW のパルス YAG レーザ単独照射ではまったく溶融しなかったが、SHG YAG レーザとの重畳照射を行った場合、SHG YAG レーザによる細長い溶込みの他にパルス YAG レーザによる深さ50 μm 程度の溶融部が生成した。

以上の結果より、異波長レーザ重畳照射では、パルス YAG レーザ単独照射による溶融性を大幅に向上できることが確認された。なお、高反射・高熱伝導材料の場合、溶融金属の底部に主に SHG YAG レーザによる細長い溶込みが形成されていた。同軸集光光学系では、合成光学系の場合より、溶込みが深かった。この理由としてはQ-スイッチ SHG YAG レーザにより開いたキーホールの中に基本波 YAG レーザビームがより入りやすく、エネルギーがより有効に利用されたことなどが考えられる。

パルス YAG レーザにおいて、パルス幅と繰返し数を変化させて平均パワー一定の条件で溶融溶接を行った。A1050 の溶込み深さの測定結果をパルス幅に対して Fig. 10 に示す。溶込み深さは基本波と SHG YAG によって形成される溶込みを分けて評価した。基本波 YAG レーザ単独照射では、パルス幅の増加につれて0.1~0.3 mm の浅い溶込みである。一方、異波長重畳レーザ照射では、溶込み深さ d および D はそれぞれ約1~1.7 mm および2.2~2.9 mm に増加している。したがって、パルス YAG レーザの照射条件としては、繰返し数の増加よりもパルス幅が約5~10 ms と長く、1パルス当たりのエネルギーが比較的大きい方が溶込み深さの増加により有効であると判断される。

続いて、各金属材料において、同様のレーザ溶接条件で溶接し、得られた溶融部の断面積を測定した。その結果を Fig. 11 に示す。パルス YAG レーザ単独照射の場合の溶融断面積は、すべての材料においてパルス幅の増加に従って増加し、特に熱伝導の低い材料ほど大きく増加している。また、重畳レーザ照射の場合も溶融断面積はパルス幅の増加に従って大きく増加することがわかる。なお、重畳の効果は高熱伝導材料の方が大きいようである。

以上の結果より、異波長重畳レーザ照射は、いずれの材料においても、溶融性を大幅に改善できることが判明した。

Fig. 8 Cross sections of weld beads in A1050, A5083, SUS 304 with Q-switched 2 ω YAG laser, pulsed 1 ω YAG laser, and their combined lasers.

Fig. 9 Weld beads of pure Copper produced with Q-switched 2 ω YAG laser, pulsed 1 ω YAG laser and their combined lasers.

Fig. 10 Effect of pulse duration on penetration depths of weld beads produced in A1050 alloy with pulsed 1ω YAG and combined lasers.

Fig. 11 Effect of pulse duration on cross sectional area of weld beads made with pulsed 1ω YAG laser and combined lasers.

3.4 レーザビームの吸収率

各種金属材料に対して、パルス YAG レーザと Q スイッチ SHG YAG レーザを単独または重畳照射し、ビーム吸収率を測定した。各金属材料にパルス YAG レーザを単独照射したときの吸収率を Table 3 に示す。純銅、A5083 および SUS 304 の吸収率はそれぞれ 2～4% (平均 3%)、16～17% (平均 17%) および 27～29% (平均 28%) であり、反射率が低く熱伝導率が低い材料ほどレーザーの吸収率が増

加し、溶込み深さと溶融断面積が増加することがわかる。

Table 4 に Q スイッチ SHG YAG レーザを単独照射したときの各金属材料の吸収率を示す。レーザーの吸収率は 52～73% であり、パルス YAG レーザ単独照射より大幅に増加することがわかる。吸収率が高い理由は、波長が 532 nm と短くなり、しかも高パワー密度のためにキーホールが形成され、エネルギーが有効に吸収されたためと考えられる。

次に、Table 5 に異波長レーザー重畳照射での各金属の吸

Table 3 Absorbed heats of pulsed 1ω YAG laser in various metals.

P_a (W)	Pulsed 1ω YAG laser ($1,064 \text{ nm}$) ($f = 5 \text{ Hz}$, $\tau = 10 \text{ ms}$)					
	Measured absorbed average power (W)					
275 W (100%)	6.8 (2%)	No melt	45.5 (17%)		74.2 (27%)
325 W (100%)	14.1 (4%)	No melt	53.3 (16%)		92.9 (29%)
	Copper		A5083		SUS304	

Table 4 Absorbed heats of Q-switched 2 ω YAG laser in various metals.

P_a (W)	Q-sw. 2 ω YAG laser (532 nm) ($f=10$ kHz)					
	Measured absorbed average power (W)					
49.5 W (100 %)	35 (70 %)		25.6 (52 %)		35.9 (73 %)
	Copper		A5083		SUS304	

Table 5 Absorbed heats of combined laser beams in various metals.

P_a (W)	Pulsed 1 ω YAG laser (1,064 nm) ($f=5$ Hz, $\tau=10$ ms) + Q-sw. 2 ω YAG laser (532 nm) ($f=10$ kHz)					
	Measured absorbed average power (W)					
275 W (1,064 nm) +49.5 W (532 nm) (100 %)	68 (21 %)		95.7 (29 %)		112.9 (35 %)
	Copper		A5083		SUS304	

収率を示す。重畳照射による吸収率は、純銅、A5083 および SUS 304 においてそれぞれ21%、29%および35%であり、パルス YAG レーザ単独照射による場合に比べて大幅に増加することがわかる。特に、高反射率・高熱伝導率の金属材料ほど増加の程度が大きい。すなわち、第2高調波レーザによる重畳の効果はパルス YAG レーザによる溶融が困難な高反射・高伝導材料ほど大きいと判断される。

3.5 異波長レーザ重畳照射による溶融現象に関する考察

各種金属にパルス YAG レーザおよび Q スイッチ SHG YAG レーザを単独または重畳照射し、得られた溶融部の断面を観察した結果、各材料とも溶融性が大幅に改善できることが判明した。なお、溶融部形状は、材料特性によって異なることも確認された。そこで、各レーザ照射で得られる溶融部の生成状況を模式的にまとめて Fig. 12 に示す。

パルス YAG レーザ単独照射の場合、高反射・高熱伝導の金属ほど、溶融が困難で、熱伝導型の浅い溶込みとなるが、低反射・低熱伝導の材料では、キーホールが形成し、深い溶込みが得られる。一方、高ピークパワーの Q スイッチ SHG YAG レーザでは、いずれの材料でもキーホールが形成し、深く細長い溶込みとなる。ただし、その溶込み深さは、熱伝導率が低い材料とか蒸気圧の高い合金元素を多く含んだ材料ほど深くなる傾向が認められた。

したがって、異波長レーザ重畳照射では、Q スイッチ SHG YAG レーザによって細いキーホールが形成され、このキーホールにパルス YAG レーザビームの一部 (Q スイッチ SHG YAG レーザのビーム径が小さく、キーホール径が小さいため) が入り、両方のビームの投入によって溶込み深さはパルス YAG レーザ単独照射より深くなると推察される。なお、高反射・高熱伝導の金属材料では、パルス YAG レーザによるキーホールの底部に Q スイッチ SHG YAG レーザによるキーホールが生成しても、パルス YAG レーザの底部でのエネルギーは、吸収レーザ光のパワー密度不足や熱伝導損失の影響により、そのキーホール周辺を十分溶融させることができなくなり、パルスレーザによる溶融部の底部に SHG YAG レーザによる細長い溶融部が生成する2層の溶融部となると考えられる。一方、熱伝導の低い金属材料では、パルス YAG レーザによって開いた太いキーホールの中に SHG YAG レーザビームが入り、その底部に SHG YAG レーザによるキーホールが形成して深くなると、さらにそのキーホール内にパルス YAG レーザビームが投入・吸収され、溶込み深さがより深くなると考えられる。

Fig. 12 Schematic representation indicating effect of combined laser beams on enhanced penetration in metals with high and low conductivity.

4. 結 論

各種金属材料に対して、パルス YAG レーザと Q スイッチ SHG YAG レーザの単独または重畳照射を行い、熔融特性について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) SHG YAG レーザ単独照射の場合、いずれの金属材料においても高アスペクト比の細長い針状の深溶込み形状の溶接ビードが得られた。ただし、ポロシティとアンダーフィルの溶接欠陥が見られた。溶込み深さは、低熱伝導材料とか蒸気圧の高い合金元素を多く含んだ材料ほど深くなった。このような高アスペクト比の溶融部が得られた理由は、ビーム径の小さい高パワー密

度のレーザが高繰返しの条件で照射されたためと考えられる。

- (2) 異波長重畳レーザ照射では、パルス YAG レーザ単独照射に比べて溶込みが深くなり、溶融面積も大幅に増加した。高熱伝導の金属材料では、溶融金属の底部に SHG YAG レーザによる針状の溶融部が形成していた。一方、低熱伝導の金属材料では、溶融金属の底部がより太い溶融部となり、溶込み深さも深かった。
- (3) 異波長重畳レーザ照射によって溶込み深さと溶融部の断面積が増大した理由としては、高パワー密度の SHG YAG レーザによって開いた細かいキーホールの中にパルス YAG レーザビームの一部が閉じ込められ、さらに、パルス YAG レーザで空いたキーホール内に SHG YAG レーザビームが投入されたためである。

うと考えられる。

- (4)パルス YAG レーザの吸収率は、純銅、A5083 および SUS 304 においてそれぞれ約 3%, 17% および 28% であった。したがって、パルス YAG レーザの吸収率は、反射率が低く熱伝導率が低い材料ほど高く、それに伴って溶込み深さと溶融断面積が増加することがわかった。
- (5)Q スイッチ SHG YAG レーザの吸収率は、約 52~73% であり、いずれの材料でも非常に大きいことが判明した。これは、深いキーホールが生成され、エネルギーがより効果的に吸収されたためと考えられる。
- (6)異波長重畳レーザ照射によるビームの吸収率は純銅、A5083 および SUS 304 においてそれぞれ約 21%, 29% および 35% であり、パルス YAG レーザ単独照射より 2~5 倍以上増加することがわかった。

謝 辞

本研究は、国際共同プロジェクト研究 IMS/SLAPS (Intelligent Manufacturing System/Self-Tuning and User-Independent Laser Material Processing Units) の一環として行われたものである。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) I. Sarady, Th. Beck, G. Bostanjoglo, K. Richter and H. Weber: "Aluminum Welding by Beam Addition of cw. and Repetitively Q-switched Multi-kW Nd: YAG lasers", Proc. of ICALEO'97, LIA, Vol. 83 (1997), Section G pp. 229-237.
- 2) T. Ooie, J. Matsuda, A. Utsumi, M. Yoneda and M. Katsumura: Absorption of Nd-YAG laser by Excimer Laser-induced Plasma, Preprints of the National Meetings of J.W.S., 64, (1999), pp. 40-41.
- 3) S. Fujinaga, H. Miura, T. Narikiyo, S. Katayama and A. Ohmori: "Welding characteristics with three Nd: YAG laser beams transmitted through single optical fiber", Proc. of ICALEO'97, LIA, Vol. 83 (1997), Section G pp. 263-271.
- 4) Th. Beck, G. Bostanjoglo, K. Richter and H. Weber: "Beam Addition of Nd: YAG High-Power Lasers", Proc. ECLAT '96, (1996), pp. 797-804.
- 5) T. Ishide, Y. Hashimoto, S. Hamada, T. Akaba and M. Onozuka: Hybrid YAG laser transmission with optical fiber coupling, Preprints of the National Meetings of J.W.S., 57, (1995), pp. 464-465.
- 6) Y.N. Liu and E. Kannatey-Asibu, JR.: "Experimental study of dual-beam laser welding of AISI 4140 steel", Welding Journal, Vol. 76 (1997), pp. 342-s to 348-s.
- 7) I. Norris, T. Hault, C. Peters and P. Wileman: "Material Processing with a 3 kW Nd: YAG Laser", Proc. LAMP '92, (1992), pp. 489-494.
- 8) A. Matsunawa, H. Yoshida and S. Katayama: "Beam-Plume Interaction in Pulsed YAG Laser Processing", Proc. ICALEO'84, LIA, Vol. 44 (1984), pp. 35-42.
- 9) 金属データブック (3 版), 丸善, (1993).
- 10) アルミニウムの組織と性質, 軽金属学会, (1991).
- 11) 草道, 村上, 木村: 金属チタンとその応用, 日刊工業新聞社, (1983).