

# レーザ溶接品位のモニタリング法の開発

千葉大学 工学部 電子機械工学科

教授 渡部武弘

(平成 13 年度研究開発助成 AF-2001022)

キーワード：レーザ溶接，溶接品位，加工音，正反射光，周波数解析

## 1. 研究の目的と背景

アルミニウム合金は、軽量で比強度が高く、優れた加工性と耐食性を有しており<sup>1)</sup>、近年、輸送機械の軽量化などの観点から船舶、各種車両、航空機などへ幅広く利用されている。一方、レーザ光はパワー密度が高く、熱影響や熱歪みなどの少ない溶接法として優れている。しかし、アルミニウム合金はレーザ光に対する反射率が高く、熱伝導率や熱拡散率が高いことから溶接が困難であり、溶接金属部にはポロシティが数多く生成することが知られている<sup>2-5)</sup>。またレーザ出力の不安定性や材料表面の不均一性などによっても溶接欠陥が不規則に発生する。

そこで溶接部を監視し、溶接中に良否を判定するインプロセスモニタリングの確立が望まれている。本研究では、レーザ溶融中の正反射光や加工音の測定、また測定データの周波数解析を行うことで、溶接現象とその品位の関係について明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

試料には一般機械材料として船舶や車両など幅広く使用されている Al-Mg 系アルミニウム合金 A5052 (30×20×1mm<sup>3</sup>) および工業用純アルミニウム A1050 (30×20×3mm<sup>3</sup>) を使用した。Table1 に試料の化学組成を示す。

### 2.2 方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。YAG レーザ発振器は PSL 社製 PYS-2003 を使用した。本レーザ発振器は最大 10 分割のパルス列制御 (パルス幅最大 20ms) が可能であり、余熱・徐冷の効果によりアルミニウム合金の欠陥抑制に効果的である。

実験は板厚 1mm の試料を 2 枚重ねあわせてスポット溶接を行い、同時に入射光、正反射光、加工音を測定する。その際、ダイクロミックミラー (99% 反射) を透過した光を入射光とし、また溶接点の鉛直上方に反射する光を正反射光として測定した。測定はフォトダイオードにより行い、フォトダイオードの前面には NB フィルタを設置してレーザ光の波

長 1.06 $\mu$ m のみを透過させた。加工音はマイクロフォンにより収集し、アンプで増幅させ、トランジェントコンバータにてデジタル化し PC に記憶する。なお、使用したマイクロフォンの主な仕様を Table2 にまとめた。

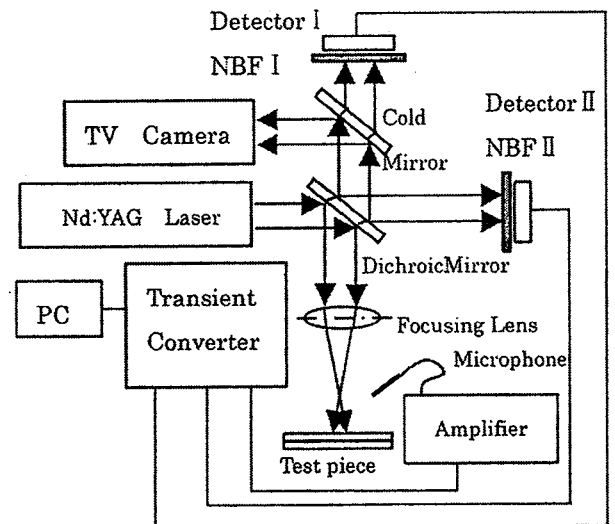


Fig.1 Experimental setup

Table1 Chemical composition of A5052

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	-

Table2 Specifications of micro-phone  
(Bruel & Kjaer; type4135)

Normal diameter	1/4"
Frequency Response Characteristics	Free field & Randam
Open Circuit Frequency Response ( $\pm 2$ dB)	4Hz to 100kHz
Open Circuit Sensitivity	4mV/Pa -48dB re 1V/Pa
Lower Limiting Frequency, -3dB	0.3 to 3Hz
Cartridge Thermal Noise (dB(A))	29.5
Open Circuit Distortion Limit, 3%, at 100Hz (dB re. 20 $\mu$ Pa)	>164

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フォトダイオードの特性評価

フォトダイオードの特性を調べるために、エネルギーを変化させた時の入射波形を測定した。Fig.2にその結果を示す。レーザエネルギーと測定された入射光強度がほぼ比例関係にあることが分かる。

#### 3.2 レーザエネルギーと光強度および加工音強度との関係

レーザエネルギーと光強度および加工音強度の単純な関係をつかむために、合金元素の無い純アルミニウム A1050 (板厚 3mm) の一枚板に照射して測定を行った。Table3 にレーザ照射条件、結果を Fig.3 に示す。

同図に示したように、エネルギーが上昇し、溶融層が増加するにつれて、入射光および加工音の強度が高くなっているのが分かる。特に加工音については、試料にレーザ光が照射された直後に高い強度を示し、その後、徐々に低下していくようすが特徴的である。正反射光についてもわずかではあるが、同じような傾向が見られる。

また加工音は、マイクロフォン保護のため溶接点から適当な距離をおいて設置していることから、レーザ照射から数百 $\mu$ s 程度の測定遅れが発生していると考えられる。したがって、純粋にレーザ照射後から音が発生するまでの時間とは考えられない。

#### 3.3 ポロシティ発生と光強度,加工音強度との関係

3.2 節と同様の条件にて、ポロシティの発生と光強度および加工音強度の関係について調べた。結果を Fig.4 に示す。同図(a)は良好な断面、(b)および(c)はポロシティ発生を示したときのものである。

3.2 節で検証したように、レーザ照射直後に加工

Table3 Irradiated conditions of laser beam

Energy (J)	5.8, 9.0, 11.7, 15.2
Pulse duration (ms)	4
Defocus length (mm)	+2.5

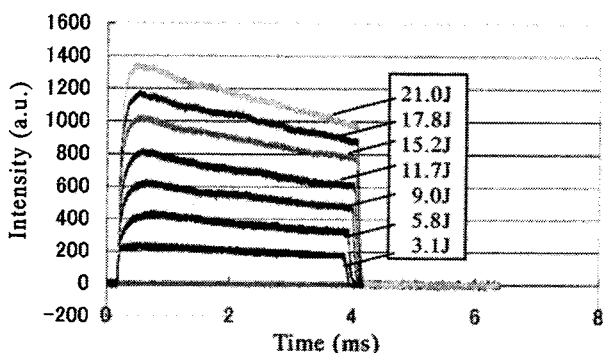
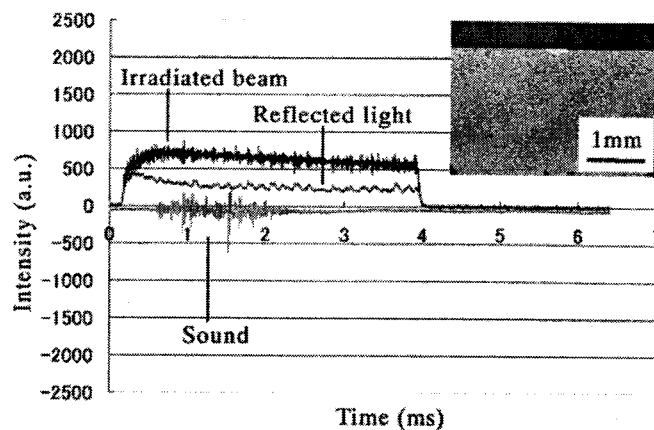
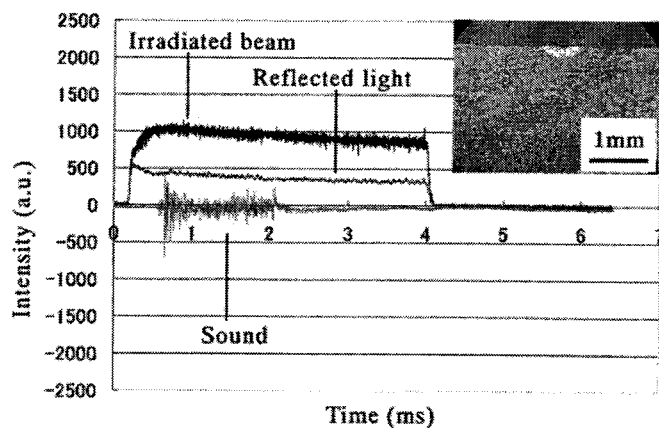


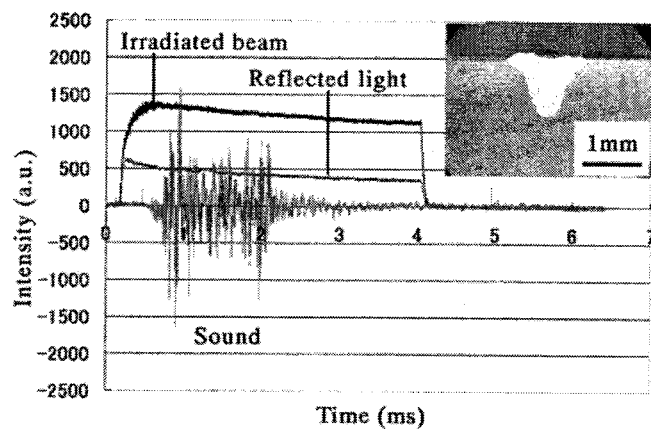
Fig.2 Characteristics of photo-diode



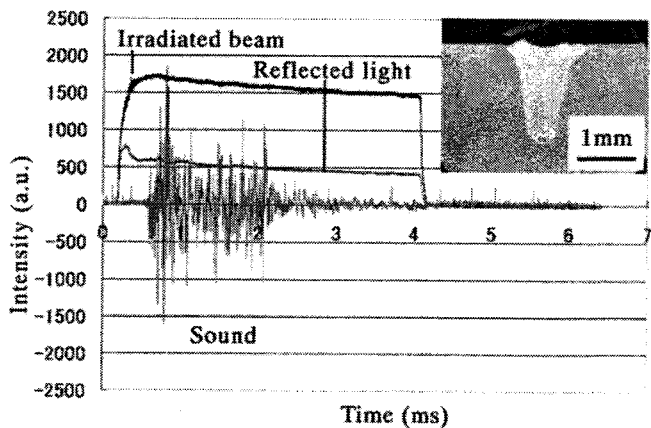
(a) Energy 5.8J



(b) Energy 9.0J



(c) Energy 11.7J



(d) Energy 15.2J

Fig.3 Relationship between time and intensity

音および正反射光が大きな強度を示す。その後の変化が(a)と(b), (c)では異なる。すなわち良好な断面を示す(a)の場合は溶接終了時まで加工音はほぼ一様に激しい振動を続けるが、ポロシティ発生時である(b), (c)の場合には同図に○印で示したように振動に揺らぎが見られる。音とは衝撃によって生じる空気疎密波であるため、その強度としては正負の値を繰り返しつつ振動するが、(b)の場合その振動が不規則で周期が長くなっている。この際の加工音からどのような加工現象が生じているかを推察すると次のようになる。まずアルミニウムにレーザー光が照射され、その一部が蒸発する。このとき加工音はかなり大きな強度を示す。その後、レーザー光は蒸発蒸気や空気の層に照射され、アルミニウムの母材にはあまり照射されない。そのため、蒸発後の一瞬に加工音強度が低下する時間帯が発生する。また蒸気層および母材のいずれに照射されるか不安定な状態であるために、加工音の揺らぎも同時に観測されると考えられる。すなわち、アルミニウム母材に照射されたときおよびその蒸発時に大きな加工音が発生すると仮定すると、その現象が説明できる。

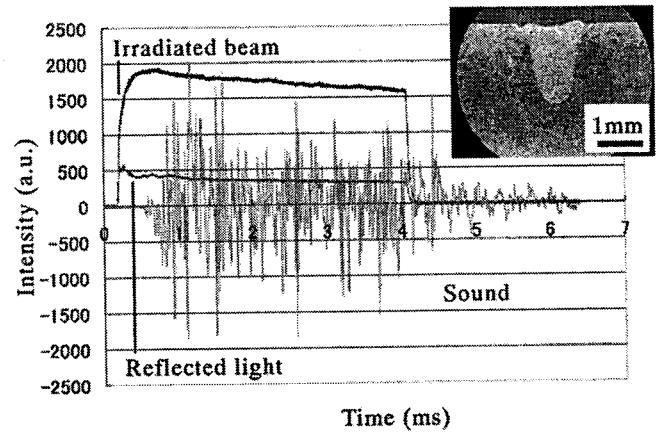
### 3.4 溶接時の加工音強度および正反射光強度と溶接断面形状との関係

次にアルミニウム合金 A5052 (板厚 1mm) の板を 2 枚重ね合わせて溶接したときについて測定を行った。溶接条件を Table4 に示す。なお、余熱・徐冷を行うためパルス列制御を行った。

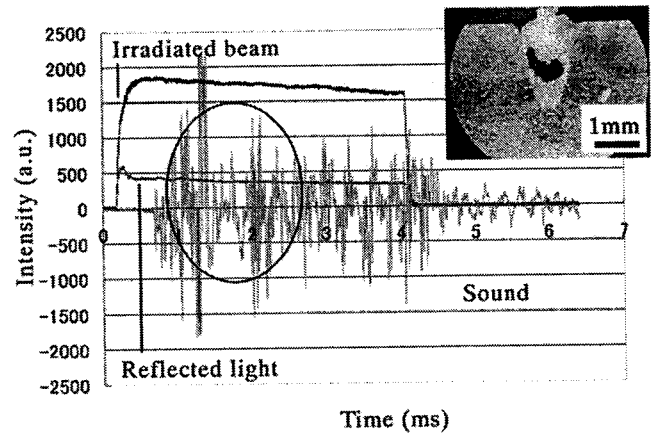
Fig.5 は各エネルギーにおける代表的な溶接断面の写真である。それぞれの状態は、(i)浅い溶け込み、(ii)深い溶け込み、(iii)下板を貫通、(iv)下板を貫通しかつ上板および下板に蒸発除去層が発生、というように分類できる。Fig.6 は光強度と加工音強度の測定結果である。

同図より加工音については、レーザー照射開始点において強度が高く、その後、徐々に低下していくのはこれまでの結果と同様である。エネルギーが高くなり除去層を含む貫通溶融になると、強度の値は低くなる。これはレーザー光が母材に照射されているときに大きな音が発生することを裏付けるものである。

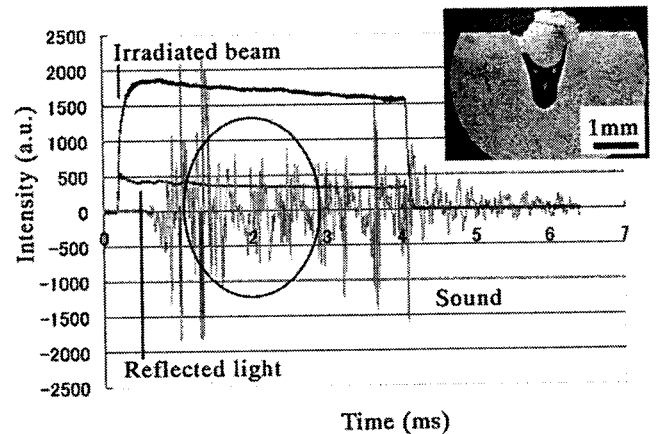
正反射光強度についても、レーザー照射開始点において高くなっており、加工音のデータと傾向は一致する。ただし前節よりもエネルギーが高い分、その傾向はより顕著となっている。特に(iv)の除去層を含む場合は他の3つの条件と比べて、全体的に高い強度を示す。これは、上板の除去層がレーザー照射点中心から半円状に生成されて凹状になるため、レーザー光が鉛直上方に反射されやすくなり、フォトダイオ



(a) Non-porosity



(b) Porosity-1



(c) Porosity-2

Fig.4 Relationship between time and intensity

Table4 Welding conditions of laser beam

Energy (J)	28.4, 30.3, 35.6, 37.4
Pulse train (ms)	0.1+0.2+0.5+0.8+16 +1.0+0.7+0.4+0.2+0.1
Off time (ms)	0.07
Defocus length (mm)	+3

ードがより多く光を検出するものと考えられる。

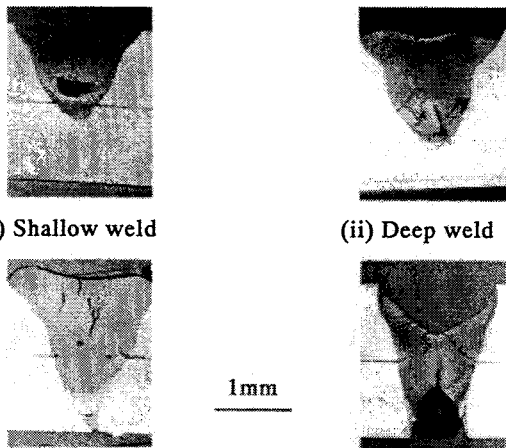
またポストパルス領域 (18ms 以降) においてもやや強い発光が観察されている。これは加工音強度では特に変化は見られなかったものである。ポストパルス領域においては、溶融形状などは大きく変化せず、徐冷している状態であると推定されるため、加工音には変化が出てこないものと考えられる。しかし、正反射光強度に変化が現れることは、ポストパルス領域における溶融部表面状態の変化を示していることが考えられ、有益な情報であるといえる。

なお、ポロシティの残留試料については前述したような加工音強度の揺らぎなどは観察できなかった。溶融層面積に対してポロシティの面積が小さくなってくると、加工音の変化として検出するのは困難になることが原因の一つとして考えられる。より詳細な分析が必要である。

### 3.5 溶接時の加工音強度および正反射光強度の周波数解析

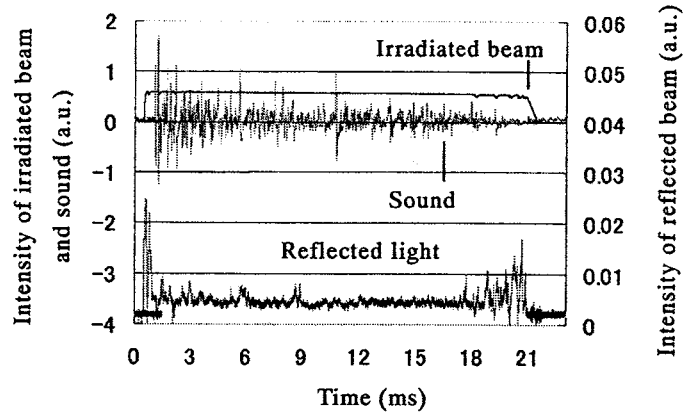
これまでに測定された加工音および光は波の性質を持っていることから、その周波数を分析することで、溶融部表面および内部にレーザ光が照射されることによる詳細な変化や、その現象を解明するのに有効な手法であると考えられる。そこで 3.4 節の条件(i)から(iv)で測定した加工音及び正反射光の FFT による周波数解析を行った。Fig.7 は加工音の FFT 解析結果、Fig.8 は正反射光の FFT 解析結果である。

まず加工音についてであるが、一見してわかるのは主に 2~18kHz の間で発生していること、(ii)および(iii)の溶融層が比較的多い条件では強度のピークがやや高く、(i)、(iv)の条件はピークが低い、ということである。すべての条件であまり変化が無いよう

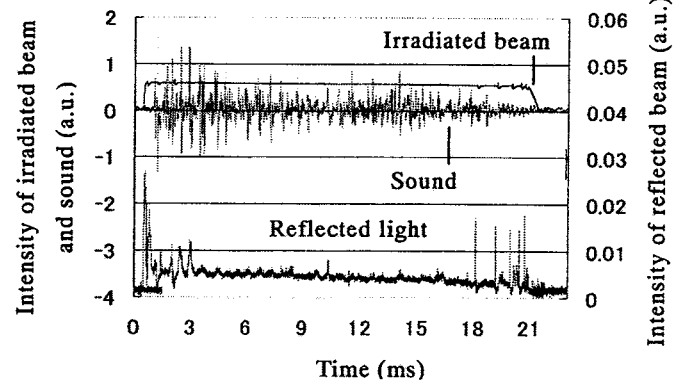


(iii) Penetrated through weld (iv) Penetrated through weld with removed zone

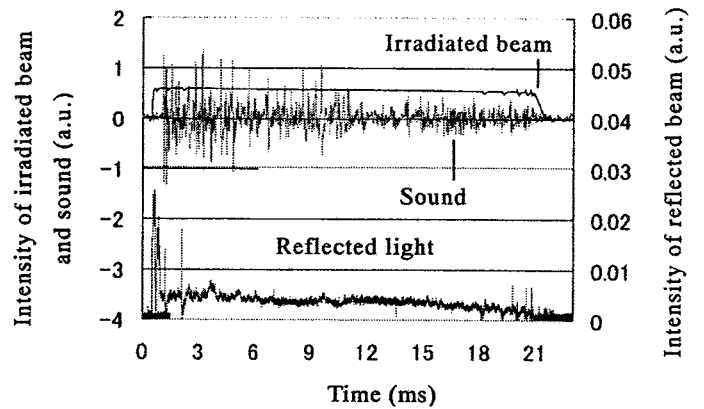
Fig.5 Photographic images of typical cross-sections



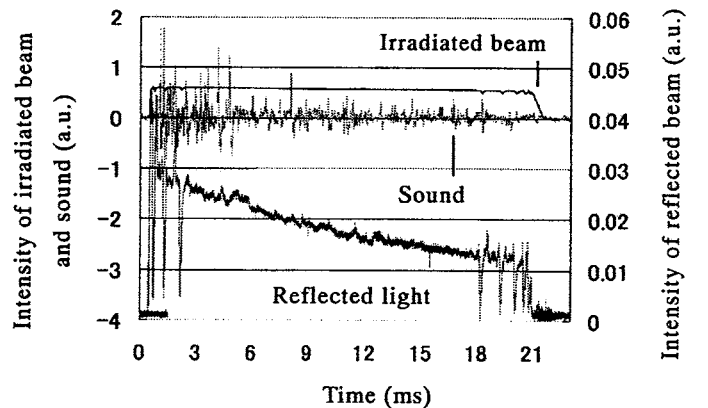
(i) Shallow weld



(ii) Deep weld

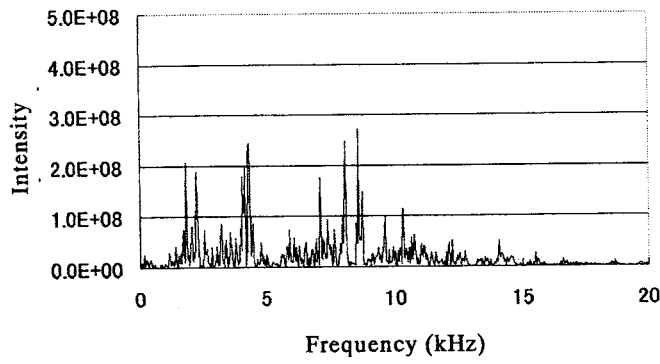


(iii) Penetrated through weld

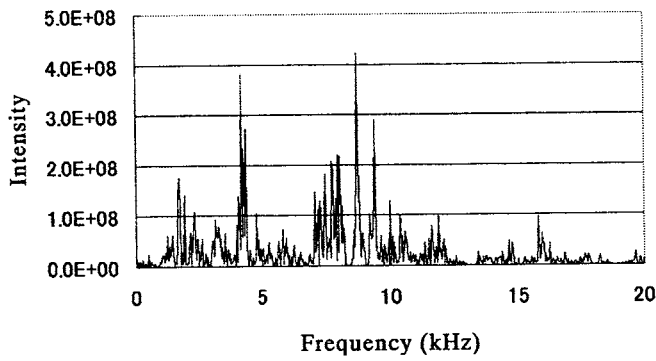


(iv) Penetrated through weld with removed zone

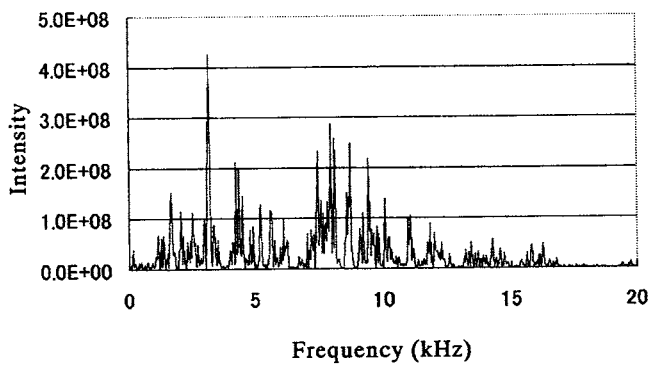
Fig.6 Relationship between time and intensity



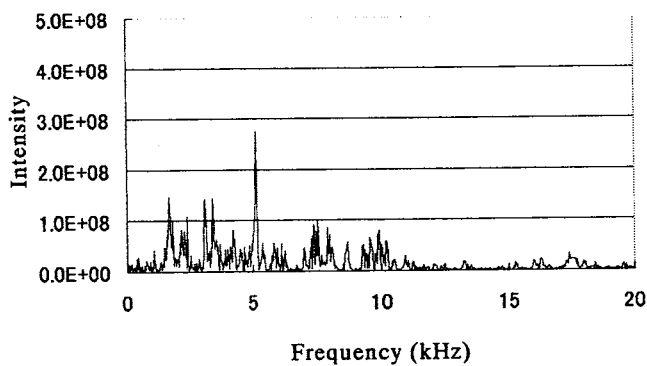
(i) Shallow weld



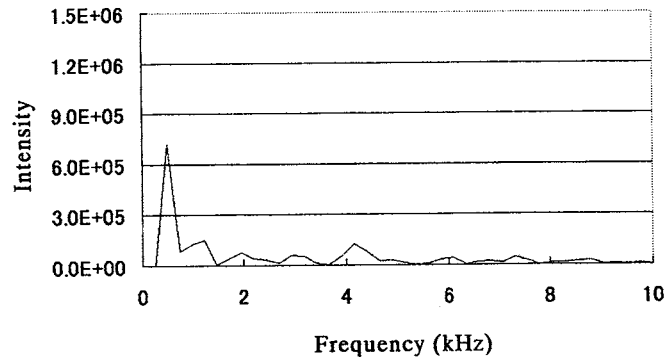
(ii) Deep weld



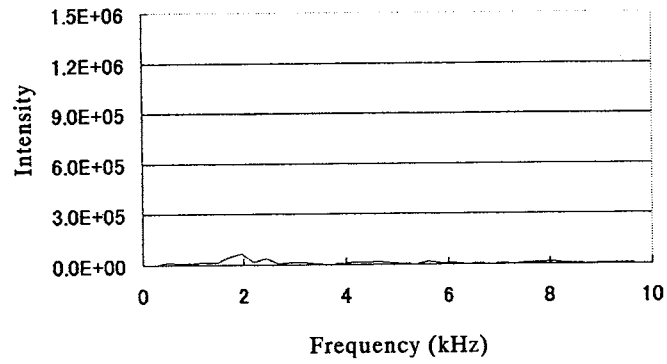
(iii) Penetrated through weld



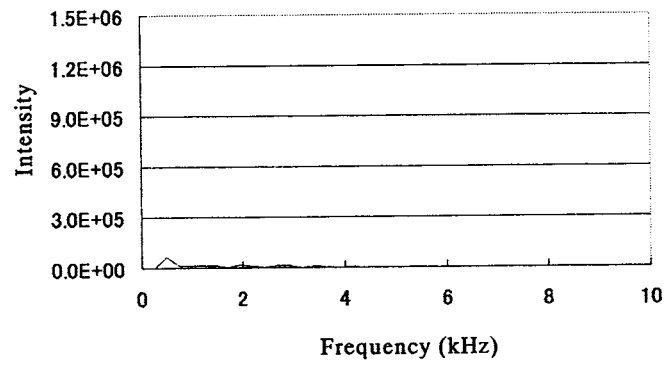
(iv) Penetrated through weld with removed zone



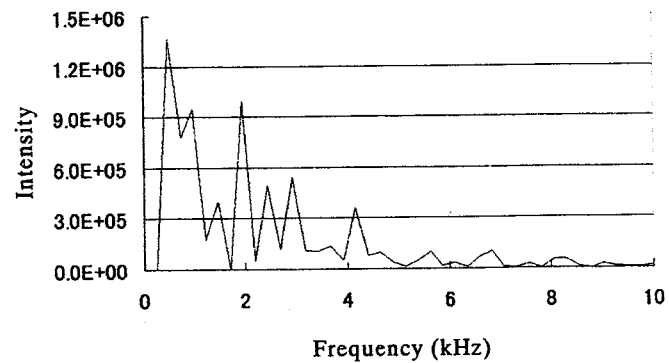
(i) Shallow weld



(ii) Deep weld



(iii) Penetrated through weld



(iv) Penetrated through weld with removed zone

Fig.7 FFT analysis of machining sound

Fig.8 FFT analysis of reflected light

に見えるが、4kHz および 8kHz 近傍でピークが現れていることは特徴的であるといえる。

正反射光については、(ii)および(iii)の条件では強度はわずかに検出されるに過ぎず、(i)、(iv)の条件では 1kHz 近傍で高いピークが現れている。これはレーザー照射点中心における熔融表面の挙動に周期性があるためではないかと考えられる。すなわち、(i)の条件では浅い熔融層表面での動き、(iv)は蒸発除去したのちレーザー照射位置が試料深くになるが、試料表面周囲での熔融層および冷却時の中心部からの反射光によるものではないかと考えられる。このことは Fig.6 において加工音がほとんど発生していないことから予想できる。(ii)および(iii)の条件では、ポストパルス照射時には(i)、(iv)の条件ほど表面の凝固が始まっていない、つまり熔融状態にあるため、光の吸収が良く反射される光の強度が弱くなるものと考えられる。

ただし、周波数解析ソフトの制限上 20 kHz までの光しか解析できておらず、もっと高い周波数の光が発生していることは十分に考えられるため、より詳細な調査が必要であるといえる。

#### 4. 結論

アルミニウム合金 A5052 の YAG レーザスポット溶接および基礎調査としての純アルミニウム A1050 を用いたレーザー照射実験により、特に加工音と正反射光に着目したモニタリング法についての主な結果を以下に示す。

- 1) 加工音強度および正反射光強度は、レーザー照射直後に高くなり、その後、徐々に低下していく。
- 2) レーザ光が試料母材に照射されたときにまたは

蒸発時に大きな加工音が発生する。ポロシティや除去層の発生により、加工音は一時的に低下し、音の揺らぎの原因となる。

3) A1050 の一枚板へのレーザー照射実験において、ポロシティの発生は、加工音の揺らぎにより、ある程度検出できる。

4) A5052 の 2 枚板重ね合わせスポット溶接において、除去層を含む貫通断面の場合は、正反射光が多く検出され、検知可能である。また周波数解析結果より、溶け込みが深く熔融層が多い条件では 4kHz 近傍または 8kHz 近傍の加工音が多く発生し、溶け込みが浅い場合や除去層を含む貫通条件では、1kHz 近傍に高いピークを持った正反射光が検出された。

#### 参考文献

- 1) 武井英雄：金属材料学，理工学社，(1992)，第 14 章，202-212.
- 2) 片山聖二，小島敬士，松縄明：アルミニウム合金のレーザー溶接性（第 2 報）－溶接欠陥とその原因－，軽金属溶接，Vol.36 No.1，(1998)，3-21.
- 3) Akira MATSUNAWA：Defect Formation Mechanism in Laser Welding and Their Suppression Methods，Proc. of ICALEO'94，(1994)，Vol.79，203-209.
- 4) Akira MATSUNAWA, Jong-Do KIM and Seiji KATAYAMA：Porosity Formation in Laser Welding - Mechanism and Suppression Methods -，Proc. of ICALEO'97，(1997)，Vol.83 part2，G73-G82.
- 5) Seiji KATAYAMA, Yasuhiro YAMAGUCHI, Masami MIZUTANI and Akira MATSUNAWA：Evaluation of Mechanical Properties of Laser Welded Aluminum Alloy, Proc. of ICALEO'97，(1997)，Vol.83 part2，G93-G102.