

# 高出力レーザ溶接における欠陥の発生とその抑制策

大阪大学 接合科学研究所

片山 聖二

Defects and Their Suppression Procedure in High Power Laser Welding

by Seiji Katayama

## 1. はじめに

レーザ加工法は、ロボット化、自動化、ライン化等が容易であり、各種金属材料の高品質・高精度・高柔軟性・高速加工法として注目されている。このため、最近、 $\text{CO}_2$ 、YAG、エキシマ、半導体、LD励起固体レーザなど、各種高出力レーザ装置の開発が活発化してきており、これらを利用する溶接や表面処理などの種々の加工法に関する研究開発も盛んに行われている。その内、レーザ誘起プラズマ／プルームの発光・吸収・散乱特性とその加工への影響、モニタリング技術の開発、レーザ溶接現象やキーホール挙動の解析と解明、溶接欠陥発生機構の解明と欠陥防止対策の開発、レーザ溶接継手部の特性評価などに関する研究が精力的に行われている。特に、高出力レーザの場合、深溶込みの溶接部が高速度で作製できるが、ポロシティや高温割れなどの溶接欠陥が発生する場合があるため、欠陥生成機構の理解と低減・防止法に関する対策が必要である。そこで、本フォーラムでは、高出力レーザ加工に関連して、溶接欠陥の種類、特に、レーザ溶接時のポロシティおよび凝固割れの発生条件、原因、発生機構および低減・抑制法ならびに機械的特性に及ぼすポロシティの影響に関する検討結果について紹介する。

## 2. レーザ溶接欠陥

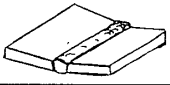
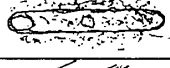
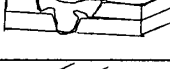
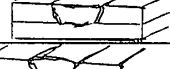
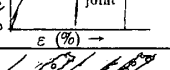
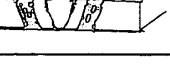
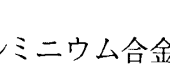
レーザ溶接時には、材料の種類と組成、溶接条件等によって、種々の溶接欠陥が発生する<sup>1,2)</sup>。それらの種類と低減・防止法をまとめて **Table 1** に示す。レーザ溶接欠陥の特徴は、アーク溶接時の欠陥と同様に、形状欠陥、内部欠陥および特性欠陥に分類できる<sup>2)</sup>。特に、大出力連続 $\text{CO}_2$ レーザ溶接の場合、約 10 kW 以上のパワーでは、Arシールドガス中では深溶込みの溶接部が得られなくなること<sup>3,4)</sup>、Heシールドガス中での深溶込み溶接部には大きなポロシティが非常に生成しやすいこと、高温割れ感受性の高いと言われているある種のアルミニウム合金やニッケル基合金では、熱影響部に液化割れが発生し、溶接金属部に凝固割れが発生しやすいことなどが報告されており、ポロシティと高温割れが、解消すべき重要な溶接欠陥である<sup>1,2)</sup>。

## 3. ポロシティ（気孔、ブローホール）

各種合金の $\text{CO}_2$ レーザ溶接を3～40 kWのパワーで行った結果、深溶込みの溶接ビード部に、直径1 mm以上の大きいポア、ルートポロシティ、直径0.1～0.4 mm程度の小さい球状のポロシティ、凝固中に融液によって充填されたポロシティなどが認められている。**Fig. 1**に10 kWで溶接したA5083合金の例<sup>4)</sup>を示すが、ポロシティは、主に、上部に球状の大きなポロシティ（Type S）、中央部に楕円形状の大きいポロシティ（Type E）、そして底部にルートポロシティ（Type R）が見られる。パワーが高いほど、大きなポロシティが認められるようになる。

**Fig. 2**に示すマイクロフォーカスX線透視映像観察装置を用いて、キーホール現象とポロシティの生成挙動をリアルタイムに高速度ビデオで観察・記録されている<sup>4-6)</sup>。その結果の一例を**Fig. 3**および**4**に示す。キーホールの激しい動きと気泡が主にキーホール先端部近傍から

**Table 1** Various kinds, characteristics, causes and preventive procedures of laser welding defects.

| Features           | Kinds                                                                                                 | Depiction                                                                           | ○Causes and ○Remedy for prevention                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geometrical defect | ① Deformation (Strain) (Distortion)                                                                   |    | ○Great thermal effect<br>○Incomplete Jigging and restraint conditions<br>○High speed, deep penetration welding<br>○Utilization of rigid jig                                                                                                                                                    |
|                    | ② Bad appearance (Dirty surface) (Rough surface)                                                      |    | ○Improper welding conditions<br>○Low power density welding<br>○Removal (Blow-away) of evaporated particles                                                                                                                                                                                     |
|                    | ③ Drop-through (Burn-through)                                                                         |    | ○Thin sheet<br>○Wide bead width due to excessive energy<br>○Optimization of welding conditions (Lower heat)                                                                                                                                                                                    |
|                    | ④ Undercut                                                                                            |    | ○Slow welding speed and high heat input<br>○Properties of weld fusion zone (viscosity)<br>○Proper welding conditions (gas, etc.)                                                                                                                                                               |
|                    | ⑤ Underfill                                                                                           |    | ○Spattering due to excessively power density and small melt zone<br>○Avoidance of low energy and focused conditions<br>○Optimization of pulsed laser welding                                                                                                                                   |
| Internal defect    | ① Crack (Hot crack) (Solidification crack) (Liquation crack) (Crater crack) (Bead crack) (Cold crack) |    | ○Low melting point products and segregation<br>○High stress/strain (rapid strain rate)<br>○Proper selection of alloying compositions in weld metal and base metal<br>○Optimization of pulsed laser welding<br>○Avoidance of high speed welding<br>○Prevention of rapidly augmented strain-rate |
|                    | ② Porosity (Blowhole) (Pore) (Pit)                                                                    |    | ○Elimination of hydrogen & oxygen sources<br>○Formation of stable keyhole<br>○Proper selection of shielding gas & flow rate                                                                                                                                                                    |
|                    | ③ Swell in lap joint                                                                                  |   | ○High power welding of sheets (deformation)<br>○Close adhesion (No gap in lap part)<br>○High speed welding at low heat input<br>○Utilization of Pulsed laser welding                                                                                                                           |
|                    | ④ Incomplete penetration<br>⑤ Lack of fusion                                                          |  | ○High reflectivity and effect of plasma<br>○Proper conditions for deep penetration<br>○Prevention of misalignment                                                                                                                                                                              |
|                    | ⑥ Inclusion (Oxides, etc.)                                                                            |  | ○Surface polishing<br>○Proper shielding conditions                                                                                                                                                                                                                                             |
|                    | ⑦ Evaporation loss of alloying elements                                                               |  | ○Volatile elements and low temperature of melt<br>○High-speed, deep-penetration welding<br>○Pulsed deep-penetration welding                                                                                                                                                                    |
|                    | ⑧ Macrosegregation                                                                                    |  | ○Incomplete mixing of dissimilar materials<br>○Mixing due to beam oscillation or pulsation                                                                                                                                                                                                     |
|                    | ⑨ Microsegregation                                                                                    |  | ○Elements of low distribution coefficients<br>○Welding at high speed and low heat-input<br>○Solution heat treatment after welding                                                                                                                                                              |
| Property defect    | ① Mechanical properties                                                                               |  | ○Formation of soft zones (disappearance of age- or stain-hardening) and defects<br>○High speed, deep-penetration welding<br>○Welding conditions for prevention of defects<br>○Optimum heat treatment                                                                                           |
|                    | ② Chemical properties                                                                                 |  | ○Stress corrosion cracking<br>○Grain boundary corrosion due to precipitates<br>○Low heat-input (deep-penetration) welding<br>○Relief and Relaxation of residual stress                                                                                                                         |

生成する状況が観察されている。アルミニウム合金で観察されたポロシティの生成状況を模式図的に Fig. 5 に示す<sup>2, 4, 5)</sup>。アルミニウム合金の場合、気泡は、主に、キーホール先端部近傍の前壁面の蒸発によって後壁の溶融部がくぼんで生成し、速い湯流れで溶融部上方へ移動するが、その途中で凝固壁にトラップされてポロシティとなり、一部は、表面に脱出するものも認められている。レーザパワーが大きくなると、キーホールの中央部分などからも気泡が生成するようになる。一方、ステンレス鋼では、気泡が表面まで浮上することは少なく、ポロシティは溶接ビードの下部に形成することが多いようである<sup>6)</sup>。なお、ポロシティの内面を走査型電子顕微鏡で観察し、分析した結果によると、A5XXX 系合金では、Mg の濃化した酸化物が観察

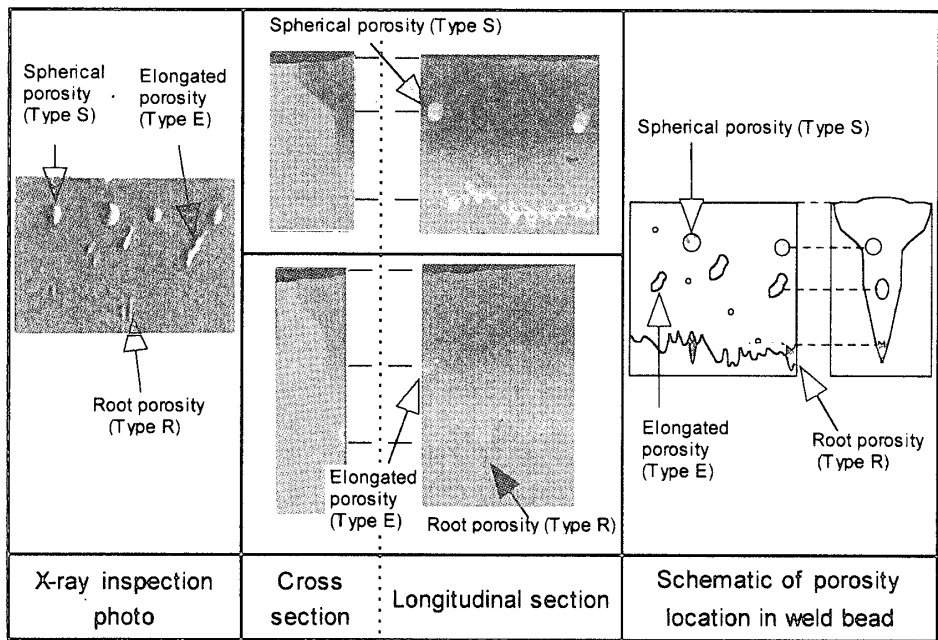


Fig. 1 Examples of porosity in aluminum alloy A5083 welded with CO<sub>2</sub> laser at 10 kW.

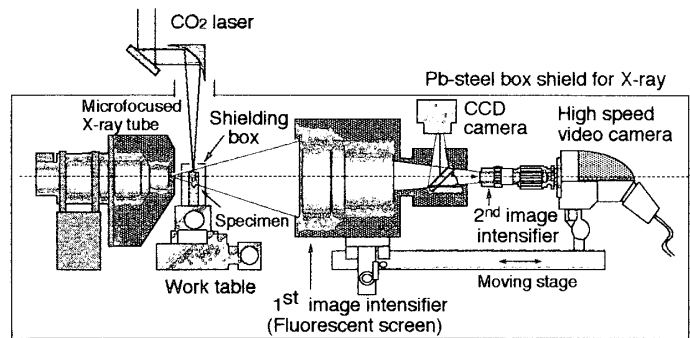


Fig. 2 Schematic arrangement of microfocused X-ray transmission imaging system for observation of behavior of keyhole, bubbles and porosity during laser welding.

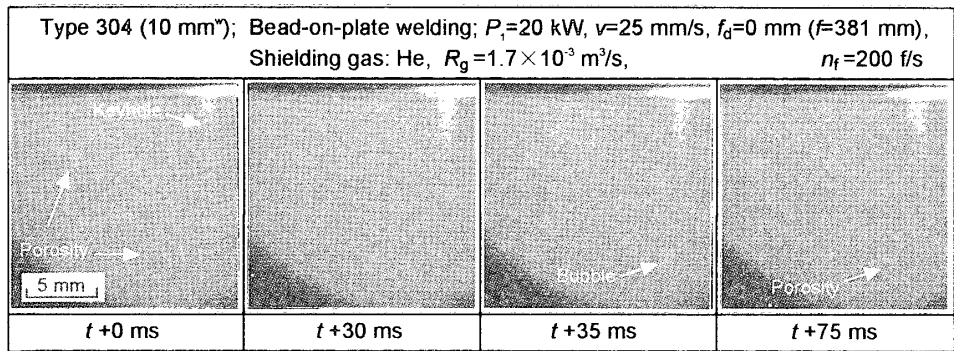


Fig. 3 X-ray transmission images taken by high speed video during CO<sub>2</sub> laser welding of Type 304 at 20 kW, 25 mm/s and fd=0 mm, showing keyhole behavior, in-site formation of bubbles and pores.

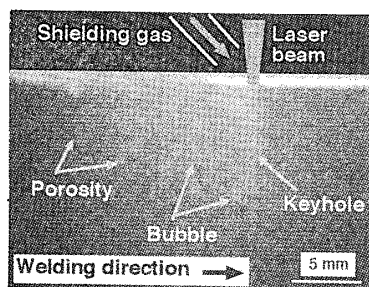


Fig. 4 X-ray transmission image taken by high speed video during CO<sub>2</sub> laser welding of A5083 alloy at 10 kW, 25 mm/s and  $f_d=0$  mm, showing keyhole behavior, in-site formation of many bubbles and pores.

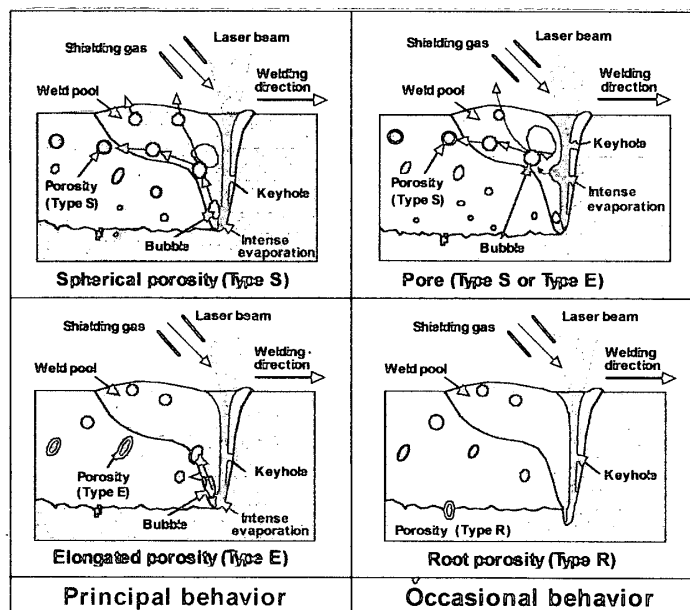


Fig. 5 Schematic of chiefly or occasionally observed mechanism of porosity formation during cw CO<sub>2</sub> laser welding of Al alloys.

され、Mgの蒸発が多いことが推察される<sup>4,7)</sup>。一方、ステンレス鋼などでは、融液が侵入した形跡も観察される場合がある<sup>6)</sup>。さらに、ポロシティ内のガス成分を分析した結果、シールドガスと水素ならびに一部大気成分が検出されている<sup>4-7)</sup>。したがって、気泡とその結果形成するポロシティは、キーホール前面での蒸発現象によって生成し、キーホールの変動に伴って吹き付けられるシールドガス成分等も巻き込んで生成するものと考えられる。

以上のような観察結果より、ポロシティの原因としては、キーホールを形成する金属蒸気、吹付けガス、シールドガス等が巻き込まれる場合が多く、材料表面やガス中の水分等として存在する水素の影響がある場合には微細なポロシティが多数生成し<sup>2,7)</sup>、ルートポロシティやパルスレーザ溶接の場合にはキーホールの急激な崩壊により生成すると推察される。このため、それぞれに対して低減・防止策を講じる必要がある。特に、高パワーレーザの連続照射をパルス化し、適切な条件（繰返し数とデューディ）を選択すると、Fig. 6に示すように、ポロシティが減少できている<sup>4)</sup>。また、大出力レーザ溶接の場合、適切な条件での貫通溶接もポロシティ

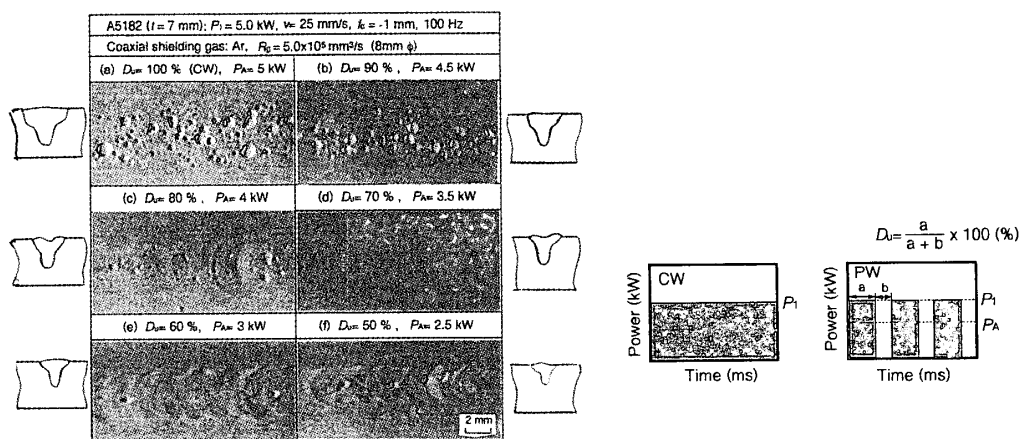


Fig. 6 X-ray inspection photos of A5182 laser welds, showing effect of pulse duty on porosity formation.

低減に有効であった<sup>4-6)</sup>。さらに、部分溶込みで不活性ガス利用時の前進溶接、 $N_2$  シールドガス中または真空中でもポロシティが減少できることが認められている<sup>4-7, 8)</sup>。

#### 4. 高温割れ（凝固割れと液化割れ）

厚板の高パワーレーザ溶接の場合、高速度溶接では、溶接金属部に凝固割れが発生しやすく、低速度溶接では、熱影響部に液化割れが発生しやすい傾向が見られる<sup>1, 2)</sup>。高温割れは結晶粒界に発生する。A2090 レーザ溶接部での割れとマイクロ組織との関係および凝固割れ破面の SEM 観察例<sup>2, 9)</sup>を Fig. 7 に示す。厚板の A6XXX および 7XXX 系合金の場合、低速度連続  $CO_2$  レーザ溶接では割れが発生しないのに対して、25~50 mm/s 以上の高速溶接で割れの発生が認められている<sup>10)</sup>。一方、薄板の連続発振（一部パルス変調）のレーザ溶接では、通常の溶接で割れが発生しやすい 2024、6061 および 7075 でも、割れは発生していない<sup>11)</sup>。

以上の結果より、ある合金系における割れの発生傾向とレーザ溶接プロセスおよび板厚との関係を模式的に Fig. 8 に示す<sup>2)</sup>。割れは、薄板（1~3 mm 程度）に対する連続発振の条件で最も発生しにくい（大入熱・高速溶接では発生する場合がある）。一方、厚板の溶接や高速度溶接では、割れが発生しやすくなり、割れ感受性の高い合金で割れが認められるようになる。さらに、パルスレーザによるスポット溶接では、パルス時間が 20 ms 以下と短く、繰り返し数も少ない条件では、大部分の市販アルミニウム合金や完全オーステナイト系ステンレス鋼などで割れが容易に発生し、最も割れの発生しやすいプロセスであることなどがわかっている<sup>2)</sup>。

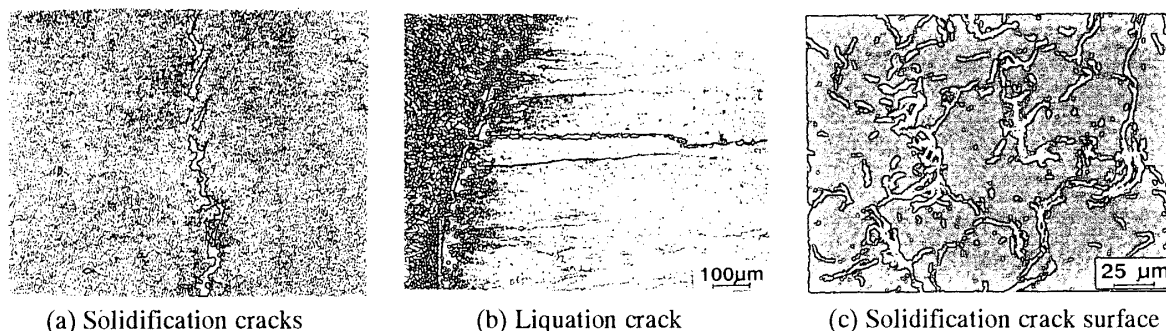


Fig. 7 Examples of hot cracks: solidification cracks in weld metal and liquation crack in HAZ, and SEM photo.

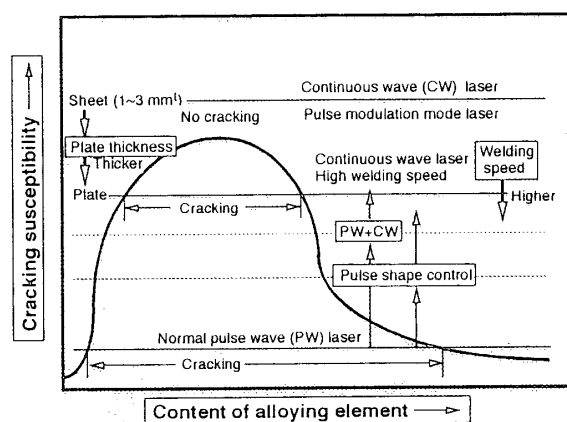


Fig. 8 Summarized relationship between cracking susceptibility, alloying element content, plate thickness and laser welding process conditions.

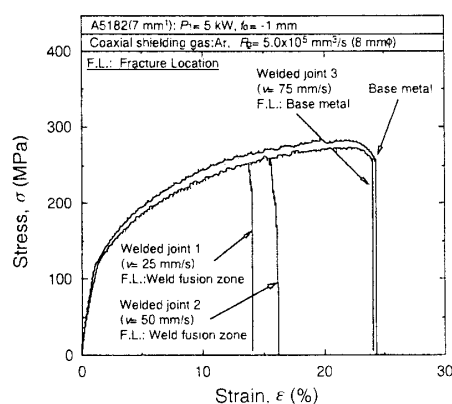
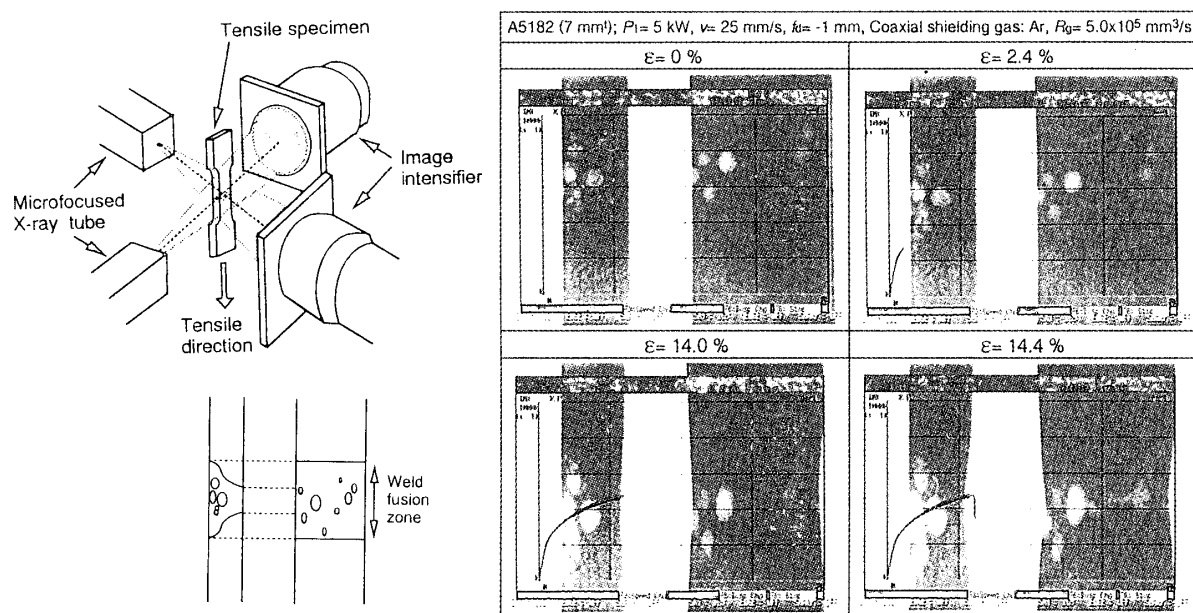


Fig. 9 Comparison of stress-strain curves of A5182 base alloy and welds made at various welding speeds, showing recovery of elongation with increase in speed.

## 5. 機械的特性に及ぼす溶接欠陥の影響

アルミニウム合金の引張強度特性および疲労特性に及ぼすポロシティの影響について検討した結果、通常、溶接金属部の特性が母材と同等かそれより劣るため、大きなポロシティや割れが存在すると、機械的特性の低下が顕著に現れる。**Fig. 9** に A5182 合金の母材と種々の速度で作製した溶接部の引張試験での応力-歪み（荷重-伸び）曲線を示す<sup>2, 12)</sup>。溶接速度が速くなると、ポロシティが小さくなり、継手性能が改善されていることがわかる。次に、**Fig. 10** に引張試験中の伸び特性や亀裂の発生・破断挙動が観察できる X 線透過映像システムの模式図ならびに 2 方向から観察した試験片（3 mm<sup>t</sup> x 6 mm<sup>w</sup>）の X 線透過映像を荷重-伸び曲線と重ねて一緒に示す。大きいポロシティが存在すると、その周辺が変形し、その端部から亀裂が発生して破断に至ることが観察され、歪み（伸び特性）が大きく低下することが確認されている<sup>12)</sup>。アルミニウム合金のように、溶接金属部の特性が母材と同等か劣る場合、ポロシティの影響は大きくなる。一方、鉄鋼材料では、急冷組織の溶接金属部は引張強度や硬度が母材より一般に高く、引張強度特性の低下に及ぼすポロシティの影響は少ないことが観察された。



**Fig. 10** Schematic of configuration of microfocused X-ray inspection system and tensile, and in-situ observation results and stress-strain curve of A5182 laser-welded joint with porosity during tensile-testing, showing elongation of porosity and fracturing initiation at large pore near surface.

## 参考文献

- 1) 片山：第 26 回レーザ熱加工研究論文集, (1991), 145-158.
- 2) 片山、松縄：第 43 回レーザ熱加工研究論文集, (1998), 33-52.
- 3) Ishide, et al.: Proc. of LAMP 78, Osaka, (1987), 187-191.
- 4) S. Katayama and A. Matsunawa: Proc. CISFFEL 6, Toulon, (1998), 215-222.
- 5) 瀬渡、金、水谷、片山、松縄：第 44 回レーザ熱加工研究論文集, (1998), 7-13.
- 6) S. Katayama, et al.: Proc. ICALEO '97, 83(1997), G83-G92.
- 7) 片山、小島、松縄：軽金属溶接, 36 -1 (1998), 3-21.
- 8) 片山、水谷、松縄、中林：溶接学会全国大会講演概要第 63 集, (1998,10), 250-251.
- 9) 片山、C. D. Lundin: 軽金属溶接, 29-9(1991), 403-415.
- 10) 片山、金、松縄：シンポジウム「アルミニウム合金のレーザ溶接の現状と将来動向」, 軽金属溶接構造協会, (1999, 1), 67-77.
- 11) 片山、C. D. Lundin: 軽金属溶接, 29-8(1991), 349-360.
- 12) S. Katayama, et al.: Proc. ICALEO '97, 83(1997), G93-G102.