

チタン合金薄板パルス YAG レーザ溶接割れ感受性

日大生産工（院） 石 野 貴 則
日大生産工 朝比奈 敏 勝

1．緒言

チタン合金は軽量，高強度であり，その性質を生かして，航空機材料にまた，高耐食性材料として海水淡水化装置，熱交換器などの用途に使用されている．近年では，チタンの特徴を生かして，地球温暖化防止の観点から軽量化を目的とした自動車部品などに適用が検討されており，その用途は拡大する傾向にある¹⁾．このため，溶接に関する検討が必要である．そこでチタンの構造物の溶接品質を保証するために，割れ感受性の検討が極めて重要になる．

著者らは，既に，純チタン2種の割れ感受性について検討を行った．その結果，純チタン2種の割れ感受性は極めて低いことを明らかにした²⁾．

本研究では，高強度のチタン合金である Ti-6Al-4V の溶接割れ感受性の検討をした．

2．試験片および実験方法

2．1 試験片

試験片には市販の Ti-6Al-4V チタン合金（板厚 0.6mm）を Fig.1 に示す形状，寸法に機械加工して実験に供した．溶接直前にエメリーペーパーで研磨後，ブタノンで脱脂洗浄し実験を行った．試験片の機械的性質を Table 1 に示す．

2．2 割れ試験

試験機の構造を Fig.2 に示す．負荷荷重は，試験片の一方を固定台に固定し，他方を直動レール上の台車に固定して台車に取付けた軸をばねにより強制変位を与えて調整した．負荷荷重の大きさはばねの変位とばね定数により求めた．また，試験片に負荷される応力の校正曲線は，Fig.3 に示す溶接試験片を想定した 50mm × 70mm の

Ti-6Al-4V の試験片中心線上の A 側の端から 5mm 間隔でゲージ長が 2mm のひずみゲージを 9 枚貼付して引張試験機により引張荷重を負荷して測定した．その結果を Fig.4 に示す．試験片の応力分布は A 側 5mm, 10mm の位置では圧縮応力を，他の測定位置では引張応力を示し，試験片 A 側の端から 45mm の位置で引張応力は最大値を示した．割れ試験では荷重 3.9kN，4.9kN，5.9kN の3条件とし，24 時間荷重を負荷して実験を行った．

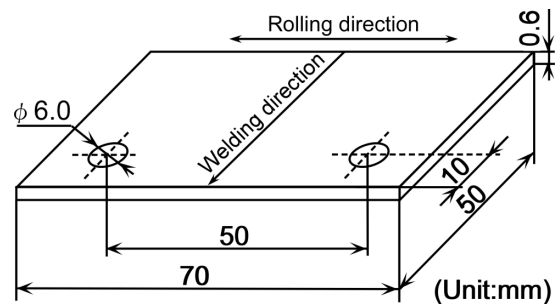


Fig.1 Size and shape of specimen for local tensile strain cracking test.

Table 1 Mechanical properties of base metal.

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HK0.05)
1037	13.8	353

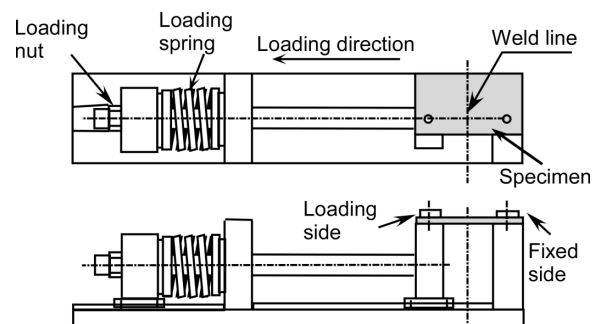


Fig.2 Principle of local tensile strain cracking test equipment.

Crack Sensitivity of Pulsed YAG Laser Welded Titanium Alloy Sheet.

Takanori ISHINO and Toshikatsu ASAHINA

2.3 溶接条件

溶接には最大平均出力 550W(最大パルスエネルギー70J)のパルス YAG レーザ溶接装置を使用し，圧延方向に対して直角にビードオン溶接を行った．レーザヘッドは母材からの反射光を避けるために前進角 20°で固定した．焦点位置を焦点距離 80mm の集光レンズにより試験片表面とした．アシストガスおよびバックシールドガスにはアルゴンガスを用い，溶接直前にレーザヘッド内のガス置換を 20 秒以上行った．溶接条件を Table 2 に示す．

3. 実験結果および考察

3.1 溶接条件の選定

充分裏ビードが生成する適正溶接条件範囲の選定を行った．レーザ出力，パルス幅，溶接速度を変化させた結果，得られた溶接条件範囲を Fig.5 に示す．ビード外観および溶込みの良否は目視にて判定した．良否の基準は，パルス幅の重なりが 30% 以上で良好な溶込みが得られた継手を，パルス幅の重なりが 30% 未満となりビード形状が不安定および溶込み不良の継手を，溶落ちによってビードが形成されなかった継手を × とした．溶接条件範囲は溶接速度 600mm/min の条件範囲が溶接速度 1050mm/min に比較して広くなる傾向を示した．また，いずれの溶接速度でもパルス幅 5.0ms の条件が他のパルス幅に比較して広範囲となる傾向を示した．以後，主としてパルス幅 5.0ms の条件について述べる．

ビード外観を Fig.6 に示す．全ての条件で無負荷状態ではビード表面および裏面に割れは認められなかった．溶接条件によらずビード表面および裏面にはスパッタが発生した．溶接速度 1050mm/min の条件では，溶接速度が速いためにビームスポットの重なりが粗となり，溶融凝固部中心にクレータの発生が認められた．また，いずれの溶接条件でもビード表面および裏面にはチタン特有の高温酸化および窒化を伴う色調変

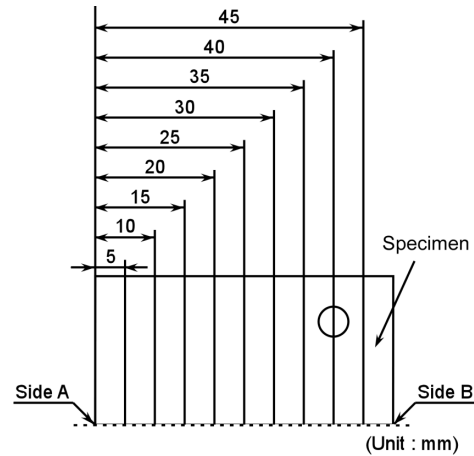


Fig.3 Measuring positions of stress.

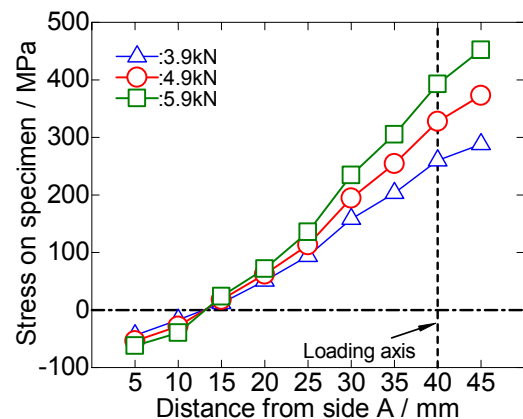


Fig.4 Stress distributions on specimen

Table 2 Laser welding conditions.

Pulse width	PW(ms)	2.5, 5.0, 7.5, 10.0
Laser output	Q(W)	100 ~ 500 (5steps)
Pulse frequency	f(Hz)	20
Welding speed	V(mm/min)	600, 1050
Head angle	θ (deg.)	20
Gas flow rate	Assist Ga(ℓ /min)	30
	Backing Gb(ℓ /min)	30

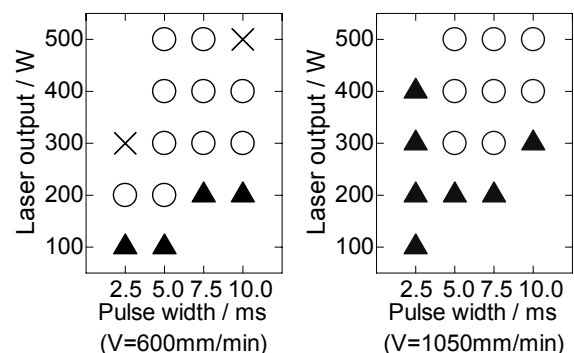


Fig.5 Classification of bead appearances.

化は認められなかった．このため，ビード外観観察では全溶接条件でチタンおよびチタン合金のイナートガスアーク溶接作業標準 WES7102 の判定基準³⁾を満足していると考えられる．

3.2 溶接部の組織および硬さ分布

溶接部横断面のマクロ組織を Fig.7 に示す．いずれの溶接条件においても，アンダーフィルはほとんど観察されず，その他アンダーカットおよびブローホール等の溶接欠陥も観察されなかった．

溶融凝固部のミクロ組織を Fig.8 に示す．レーザ出力 400W, パルス幅 5.0ms の条件で溶接速度 600mm/min の平均結晶粒径が約 69 μm ，溶接速度 1050mm/min では平均結晶粒径が 55 μm となり溶接速度の増加にともない平均結晶粒径が若干微細化する傾向を示した．このことは，ビームスポットの重なりが粗となり溶接部が急熱急冷されたことによると考えられる．また，全条件の溶融凝固部の平均結晶粒径は母材の値（約 9 μm ）に比較して著しく粗大化した．

溶接部横断面の板厚中央の硬さ測定結果を Fig.9 に示す．全ての条件で溶接部および熱影響部が硬化する傾向を示した．一般的にチタン溶接部の硬さは不純ガス量に比例して上昇する⁴⁾とされている．WES7102 によれば，チタン合金溶接継手の硬さは，母材に比較して+80HV 程度までは不純ガス量が少ない健全な継手³⁾とみなされている．しかし本実験では溶接部および熱影響部の硬さは基準値を超える値になった．このことは溶接部への空気の混入により硬さが上昇したと考える．

3.3 割れ試験結果

負荷荷重 3.9kN の条件では溶接後，荷重を 24 時間負荷し続けたが全ての溶接条件で割れが発生しなかった．負荷荷重 4.9kN，5.9kN の条件での割れ試験結果を Fig.10 に示す．割れが発生しなかった条件を○，割れが発生した条件を×とした．割れが発生

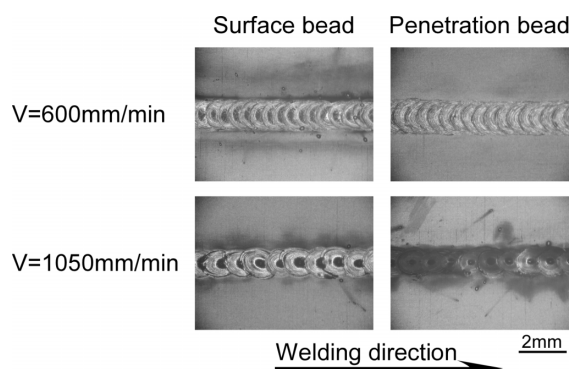


Fig.6 Bead appearances of welded joint.
(Q=400W, PW=5.0ms)

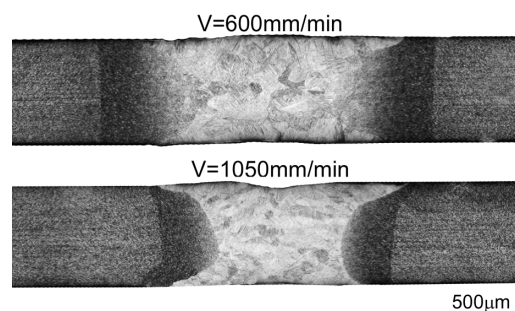


Fig.7 Macrostructures of welded joint.
(Q=400W, PW=5.0ms)

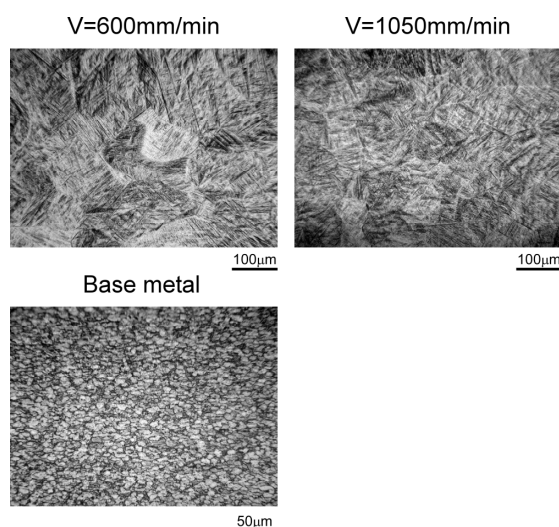


Fig.8 Microstructures of welded joint.
(Q=400W, PW=5.0ms)

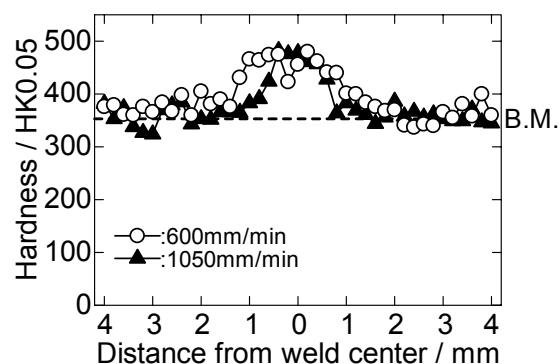


Fig.9 Hardness distributions of welded joint.
(Q=400W, PW=5.0ms)

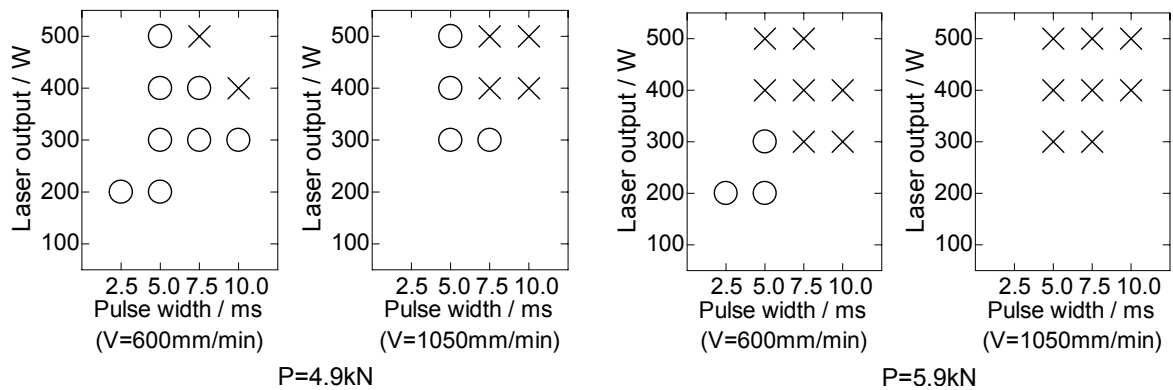


Fig.10 Result of cracking test.

した全ての条件で、割れは溶接中に発生した。負荷荷重 4.9kN, 5.9kN の条件において溶接速度 1050mm/min での割れ発生の条件範囲が、溶接速度 600mm/min での割れ発生の条件範囲に比較して広がる傾向を示した。これは溶接速度の速い条件でビームスポットの重なりが粗となり、熔融凝固部中心にクレータが認められ、平滑なビード形状が得られなくなったためと考えられる。

荷重 5.9kN での割れ試験後の外観写真および SEM による破面観察結果を Fig.11 に示す。割れ開始位置は全ての条件で Fig.4 のグラフに示す負荷応力が最大となる溶接終了直前から発生し、ビード上を溶接方向と平行に進展した。外観は分岐のない直線的な割れとなった。さらに、割れが発生した全ての条件で、割れ長さは 50mm であった。また、SEM による破面観察では、割れ発生部 A では熔融状態で割れが発生し、凝固したため波目状の破面となり、割れ発生直後 B の位置では熔融金属と凝固金属が混合した状態で割れが発生したため凹凸のない破面であり、C および D では延性破面が観察された。

本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業の一部として行われた。特記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤井秀樹, 高橋一浩, 山下義人, 新日鉄技報, 378(2003), 62.
- 2) 石野貴則, 朝比奈敏勝, 星野和義, 中川一人, 軽金属学会第 114 回春季大会講演概要, (2008), 51.
- 3) (社)日本溶接協会規格委員会, イナートガスアーク溶接作業標準, (1983), pp.9-10.
- 4) (社)溶接学会編, 溶接・接合便覧, 丸善 (2003), pp.1012.

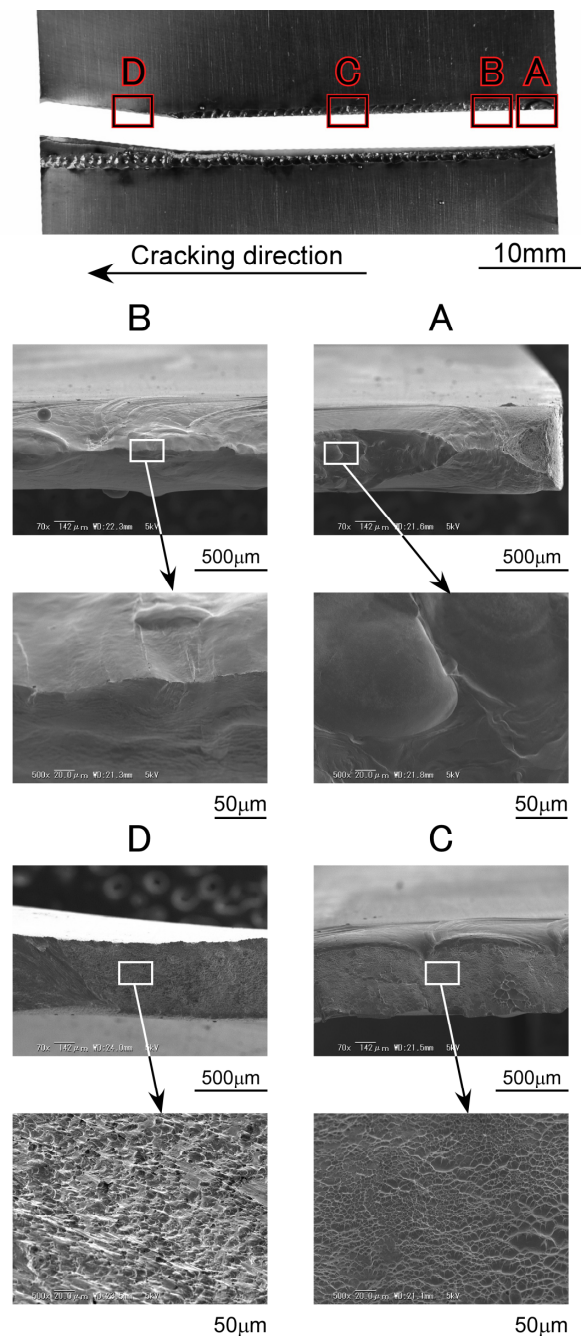


Fig.11 Appearance of crack on weld bead and fractographs of specimen. (V=1050mm/min, Q=400W, PW=5.0ms, P=5.9kN)