

# 水環境による材料の特性評価に関する研究

## 純チタンおよび 6Al-4V チタン合金のパルス YAG レーザ溶接割れ感受性

朝比奈 敏勝(機械工学科)

### 1. 緒言

チタンは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，その用途は拡大する傾向にある<sup>1)</sup>。著者等は純チタンおよび 6Al-4V チタン合金薄板を超臨界水反応容器内側のライナーに適用することを検討している。また，YAG レーザ溶接は高エネルギー密度加工であるため TIG 溶接に比べ高速溶接が可能であり，高温酸化の軽減，熱影響部および溶接変形を抑制することが期待されている。そこで，チタンのレーザ溶接による溶接性，特に割れ感受性の評価が必要となる。

本研究では，純チタン 2 種および Ti-6Al-4V チタン合金の溶接速度，レーザ出力，パルス幅およびシールドガス流量を変化させ，割れ感受性について検討を行った。

### 2. 試験片および実験方法

試験片には板厚 0.6mm の純チタン 2 種(TP340C) および Ti-6Al-4V チタン合金を Fig.1 に示す形状，寸法に機械加工して実験に供した。溶接直前に研磨後，ブタノンで脱脂洗浄して実験を行った。試験片の機械的性質を Table 1 に示す。

割れ試験機の構造を Fig.2 に示す。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にはばねで強制変位を与えて，荷重を負荷した状態でビードオン溶接を行った。割れ試験条件を Table 2 に示す。

溶接には最大平均出力 550W のパルス YAG レーザ溶接装置を使用し，圧延方向に対し直角にビードオン溶接を行った。アシストガス，バックシールドガスには Ar ガスを用いた。溶接速度，レーザ出力およびパルス幅を変化させた溶接条件を Table 3 に，溶接速度およびシールドガス流量を変化させた溶接条件を Table 4 に示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 純チタン 2 種の割れ感受性

Table 3 の条件で溶接した結果，得られた溶接条件範囲を Fig.3 に示す。以後の実験は判定基準

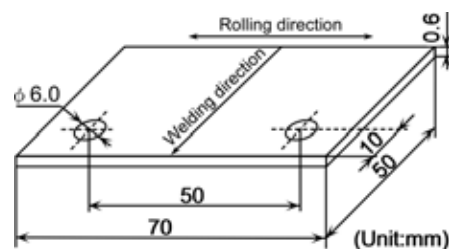


Fig.1 Size and shape of specimen for local tensile strain cracking test.

Table 1 Mechanical properties of base metals.

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HK0.05)
TP340C	343	43	149
Ti-6Al-4V	1037	14	353

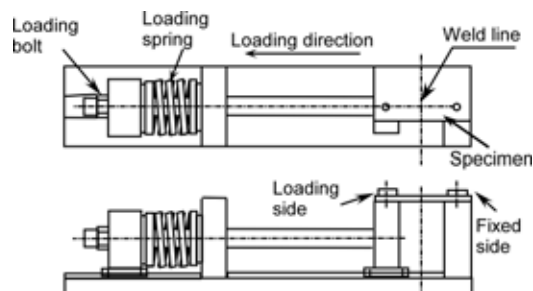


Fig.2 Principle of crack test equipment.

Table 2 Cracking test conditions.

Materials	Load (kN)	Time (s)
TP340C	0.5, 1.5, 2.5	86400(24hr.)
Ti-6Al-4V	3.9, 4.9, 5.9	

Table 3 Laser welding conditions.

Laser output	Q (W)	100, 200, 300, 400, 500
Pulse width	PW (ms)	2.5, 5.0, 7.5, 10.0
Pulse frequency	f (Hz)	20
Welding speed	V (mm/min)	600, 1050
Gas flow rate	Assist G <sub>a</sub> (ℓ/min)	30
	Backing G <sub>b</sub> (ℓ/min)	30

Table 4 Laser welding conditions.

Laser output	Q (W)	400
Pulse width	PW (ms)	5.0
Pulse frequency	f (Hz)	20
Welding speed	V (mm/min)	600, 1050
Gas flow rate	Assist G <sub>a</sub> (ℓ/min)	0, 10, 30, 50, 70
	Backing G <sub>b</sub> (ℓ/min)	0, 10, 30, 50, 70

で となった条件のみ実験を行った。

ビード外観を Fig.4 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が認められなかった。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。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<sup>2)</sup>を満足していると考えられる。

溶融凝固部のミクロ組織を Fig.5 に示す。溶融凝固部は等軸晶組織であった。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 167  $\mu\text{m}$ , 溶接速度 1050mm/min では平均結晶粒径が 131  $\mu\text{m}$  となり溶接速度の増加に伴い平均結晶粒径が微細化する傾向を示した。また, 全条件とも溶融凝固部の平均結晶粒径は母材の値 (約 24  $\mu\text{m}$ ) に比較して粗大化した。

負荷荷重が 0.5kN, 1.5kN では全ての条件で割れが発生しなかった。負荷荷重 2.5kN の条件での割れ試験結果を Fig.6 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。割れが発生した全ての条件で、割れは溶接中に溶接終了直前の位置から発生し、ビード部を溶接方向に対して平行に伸展した。負荷荷重 2.5kN の条件での溶接終了直前の位置の負荷応力は約 350MPa である。このことから割れが発生するためには母材の引張強さと同程度の応力を負荷する必要がある。いずれの溶接速度でもレーザ出力が低く、パルス幅が狭い条件では割れは認められなかった。

割れ長さ測定結果を Fig.7 に示す。レーザ出力および溶接速度の増加に伴い割れ長さが増加する傾向を示した。一般に純チタンの力学的性質は主として結晶粒径の大きさと形状によるとの報告がある<sup>3)</sup>。しかし、本研究では平均結晶粒径が微細化している溶接速度の速い条件で割れ長さが増加する傾向を示した。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、溶融凝固部中心にクレータが発生し、平滑なビードが得られなくなったためと考える。

Table 4 の条件で溶接したビード外観を Fig.8 に示す。いずれの溶接速度においてもガス流量 30  $\ell/\text{min}$  未満の条件では灰色や、青白にビード部が変色し高温酸化および窒化に伴う色調変化が観察

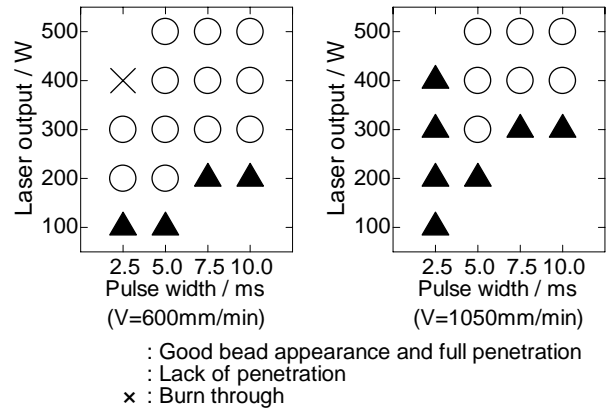


Fig.3 Relation between welding conditions and bead appearances.

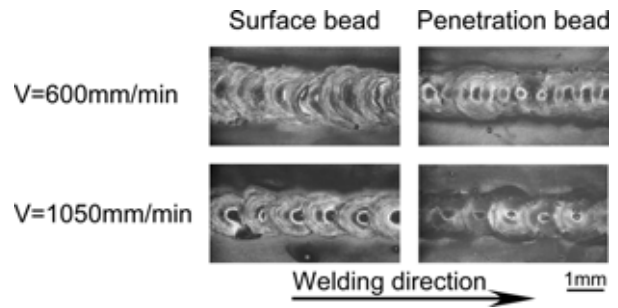


Fig.4 Appearances of weld bead.  
 (Q=400W, PW=5.0ms)

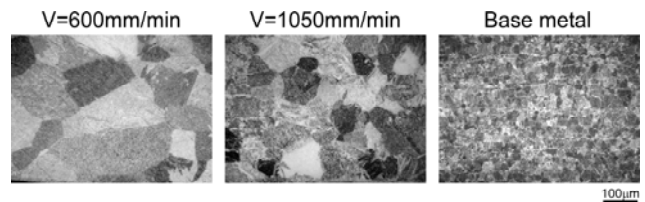


Fig.5 Microstructures of fusion zone.  
 (Q=400W, PW=5.0ms)

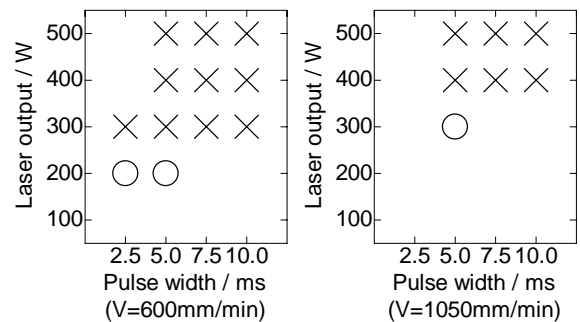


Fig.6 Welding conditions indicating crack occurrence.  
 (P=2.5kN)

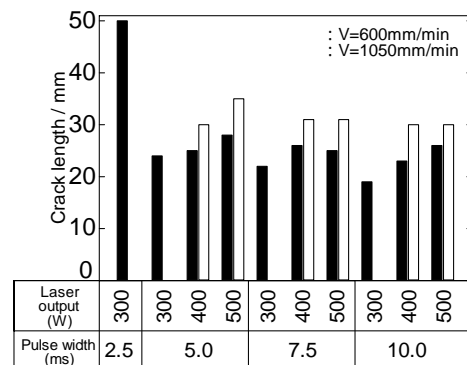


Fig.7 Relation between crack length and welding conditions.

されたが、ガス流量 30 ℓ/min 以上の条件では高温酸化および窒化を伴うビード部の色調変化が観察されなかった。

割れ試験の結果、全ての条件で負荷荷重 0.5kN および 1.5kN の条件では割れが発生しなかったが、負荷荷重 2.5kN の条件では、全ての条件で割れが発生した。割れは溶接中に溶接終了直前の位置から発生し、溶接方向に対して平行に伸展した。ガス流量を変化させた条件であっても割れが発生するためには母材の引張強さと同程度の応力が必要であるということが明らかとなった。

負荷荷重 2.5kN での割れ長さ測定結果を Fig.9 に示す。いずれの溶接速度でもガス流量 0ℓ/min および 10ℓ/min の条件ではガス流量 30ℓ/min 以上の条件に比較して割れ長さが短い結果であった。これは溶接中にシールドガス流量が少ないことによって溶接部が酸化および窒化して、溶接部の硬さが上昇したにも関わらず、継手効率がガス流量 0ℓ/min の条件では約 75%、ガス流量 10ℓ/min の条件では 100%という継手効率が得られ<sup>4)</sup>、継手効率があまり低下しなかったことにより割れが伸展しにくくなったと考える。

負荷荷重 2.5kN での割れ試験後の試験片の外観写真を Fig.10 に示す。ガス流量 10ℓ/min 以上の条件で割れはビード部を伝播したが、ガス流量 0ℓ/min の条件では割れが発生した後、ビード部を伸展せず、熱影響部を伸展した。これは熔融凝固部の硬さが上昇し割れが伸展しにくくなったために、熱影響部を伸展したものと考える。

### 3.2 Ti-6Al-4V チタン合金の割れ感受性

Table 3 の条件で溶接した結果、得られた溶接条件範囲を Fig.11 に示す。判定基準は Fig.4 と同様である。

割れ試験は溶接条件範囲で となった条件のみ行った。負荷荷重 4.9kN および 5.9kN の条件での割れ試験結果を Fig.12 および Fig.13 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。割れが発生した全ての条件で、割れは溶接中に発生し、試験片は完全に破断した。負荷荷重 4.9kN、5.9kN の条件において溶接速度 1050mm/min での割れ発生条件範囲が、溶接速度 600mm/min での割れ発生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る。また、負荷荷重

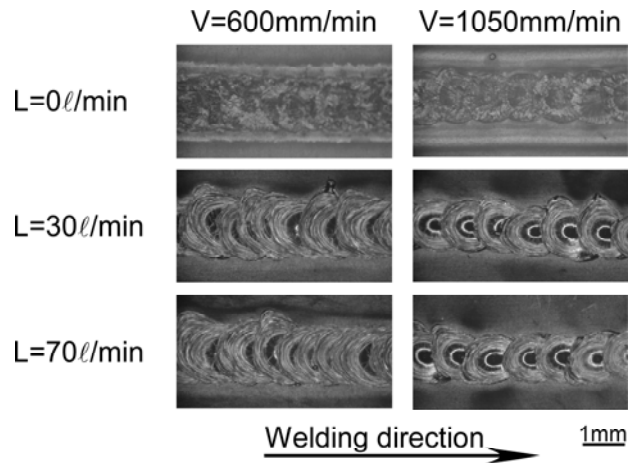


Fig.8 Appearances of weld bead. (Surface bead)

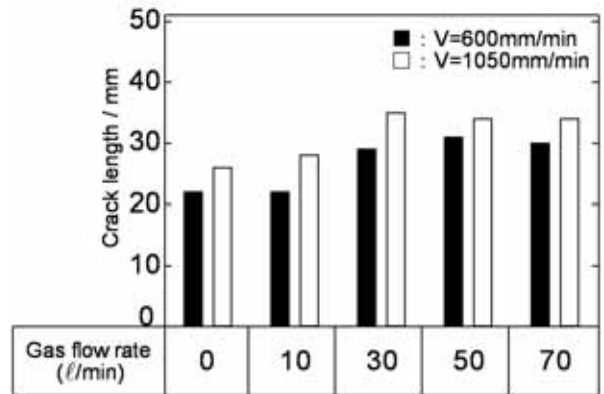


Fig.9 Relation between crack length and gas flow rate.

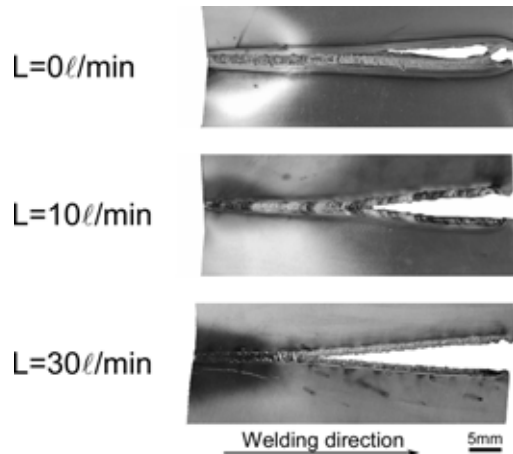


Fig.10 Appearance of crack after cracking test. (P=2.5kN, V=600mm/min)

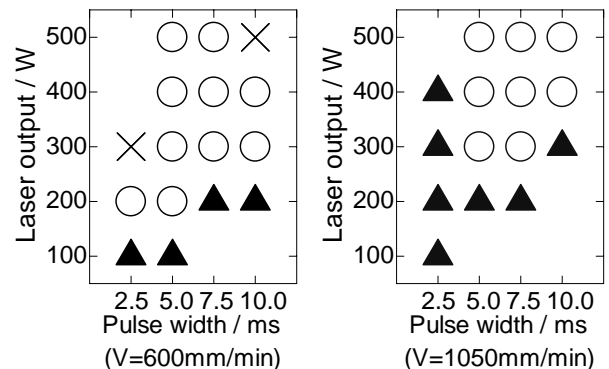


Fig.11 Classification of bead appearances.

3.9kN の条件では全ての条件で溶接後，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。

Table 4 の条件で溶接したビード外観を Fig.14 に示す．ガス流量 30ℓ/min 未満の条件ではビード部が灰色や，青白に変色し高温酸化および窒化に伴う色調変化が観察されたが，ガス流量 30ℓ/min 以上の条件ではビード部が変色し高温酸化および窒化に伴う色調変化が観察されなかった。

負荷荷重 3.9kN 4.9kN の割れ試験結果を Fig.15 に示す．いずれの溶接速度においてもガス流量が 0ℓ/min の条件では割れが発生した．これはシールドガスが少ないことにより溶接部が酸化および窒化して溶接部の機械的性質が著しく低下したためと考える．また，負荷荷重 5.9kN の全て条件で割れの発生が認められた．いずれの負荷荷重においても割れが発生した条件で割れはビード部を伸展し，試験片は完全に破断した。

負荷荷重 5.9kN の条件での割れ試験後の試験片の外観写真を Fig.16 に示す．ガス流量が 0 ℓ/min の条件では溶融凝固部の硬さが他の条件の硬さと比較して硬化しているにも関わらず，割れがビード部を伸展した。

#### 4. 結言

- (1) 純チタン 2 種の割れ感受性は低く，母材の引張強さと同程度の応力を負荷しないと割れが発生しない．また，シールドガス流量を変化させても同様の傾向を示した．
- (2) Ti-6Al-4V チタン合金の割れ感受性は母材の引張強さの約 1/3 程度の応力で割れが発生する．また，シールドガス流量を減らすことにより割れが発生するための応力が低くなるので割れ感受性は純チタン 2 種と比較すると高いと考える．
- (3) 実用的には，シールドガス流量は 30ℓ/min 程度は必要であると考えられる．

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) 福田正人：軽金属，55-11(2005)，544-548．
- 2) (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)，9-10．
- 3) M.J.Donachie, Jr: チタンテクニカルガイド，内田老鶴園 (1993)，163．
- 4) 伊藤洋介，朝比奈敏勝，時末光：軽金属学会第 108 回春季大会講演概要，(2005)，65．

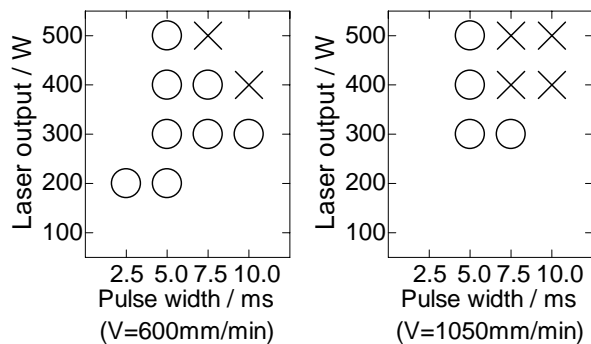


Fig.12 Welding conditions indicating crack occurrence. (P=4.9kN)

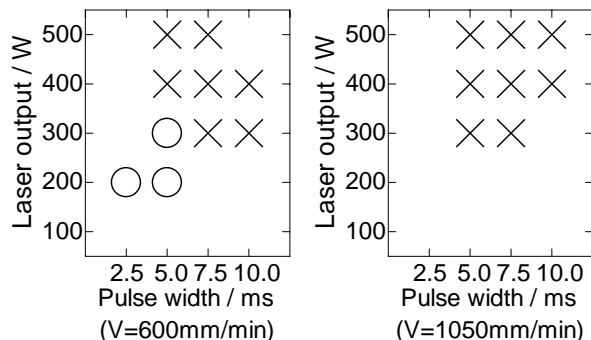


Fig.13 Welding conditions indicating crack occurrence. (P=5.9kN)

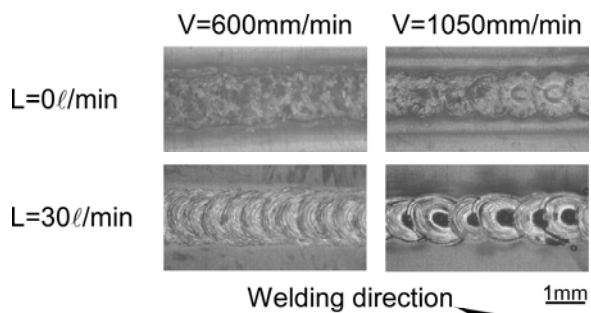


Fig.14 Appearances of weld bead. (Surface bead)

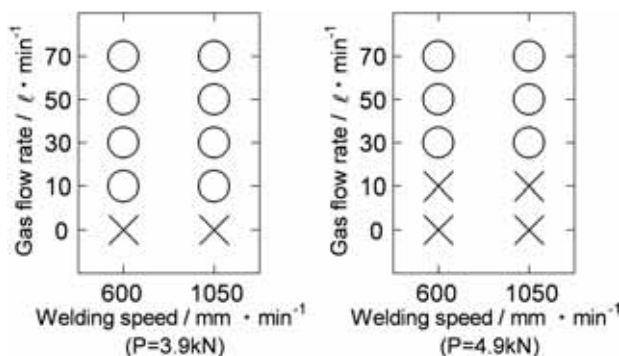


Fig.15 Welding conditions indicating crack occurrence.

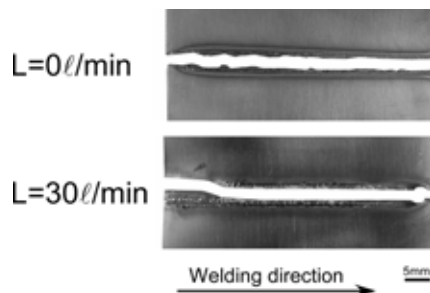


Fig.16 Appearance of crack after cracking test. (P=5.9kN, V=600mm/min)