

炭酸ガスレーザーによるチタンの溶接

CO₂ Laser Welding of Titanium

萩野 秀樹*, 野口 修一*, 増井 清徳**

Hideki Hagino, Shuichi Noguchi, Kiyonori Masui

(2000年7月10日 受理)

This paper describes the technical merits of CO₂ laser welding for titanium using simple shielding system. As the results of CO₂ laser welding for titanium plates, excellent mechanical properties were obtained without after shielding. It was found from the results of calculating the thermal fields of specimen during the welding process that in the laser welding, both temperatures of the welding zone and of the heat affected zone rose rapidly as the heat source was approaching and subsequently fell rapidly after the heat source passed through. So atmospheric contamination (oxidation and nitriding) in the laser welding was thought to be less than in the TIG arc welding.

キーワード：炭酸ガスレーザー，チタン，溶接，シミュレーション，アフターシールド，温度分布

1. 緒言

チタンは比強度（強度／比重）と耐食性に優れた金属であり，近年急速に用途が拡大している．一般にチタンの溶接は TIG 溶接で行われるが，溶接速度は遅く，入熱も大きいため溶接ビード幅が広くなり，大きな熱ひずみを生じやすい．また，チタンは非常に活性な金属であり，比較的低温でも容易に酸素や窒素と反応し，溶接部は硬くなり脆化する．そのため溶接は真空中，あるいは不活性ガス雰囲気中で行い，大気から溶接部を溶接中および溶接終了後も遮断し，酸素や窒素の溶接部への吸収を防がなければならない．

一方，レーザーを用いた溶接は TIG 溶接に比べてエネルギー密度が高く，高速で高精度な溶接ができると期待される．これまでレーザーをチタンの溶接に適用することについて，その可能性は示されている¹⁾²⁾が，TIG 溶接と比較した場合の特徴や利点についての系統的な研究はほとんどなされていない．

そこで本研究では，炭酸ガスレーザーを用い，比較的簡易なシールド方法でチタンの溶接を行い，最適な溶接条件を

* 生産技術部 レーザ加工グループ

** 生産技術部 電気加工グループ

調べた．また，溶接の品質に影響を及ぼす溶接部の温度変化や分布状態の解析結果をもとに，TIG 溶接の場合との比較検討を行い，レーザー溶接の優位性を示した．

2. 実験方法

実験には高速軸流型の最大定格出力 5kW の炭酸ガスレー

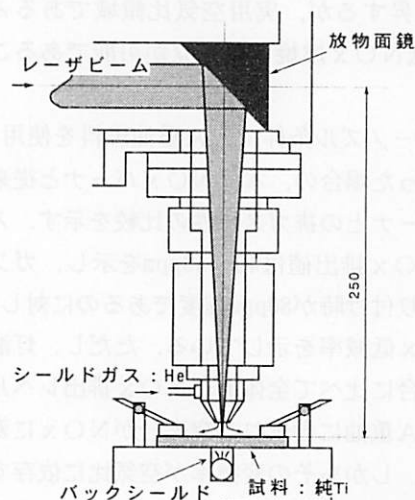


図1 実験装置の概略図

Schematic diagram of laser welding system

ザを用いた。レーザビームは二アシングルモード (TEM₀₁) で、焦点距離 250mm の放物面鏡を用いて試料表面上に収束させ、焦点位置で溶接を行った。

大気溶接部への吸収を防ぐために、レーザノズルからビームと同軸に 15ℓ/min の He ガスを流してシールドを行った。なお、溶接部の裏面にも 5ℓ/min の He ガスを流し、バックシールドを行った。また、TIG 溶接では通常、溶融池後方のビードをシールドするためにアフターシールドを行うが、本研究では行わなかった。図 1 に実験装置の概略を示す。

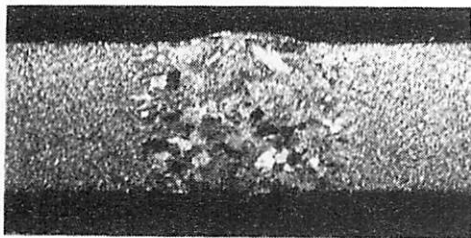
供試材としては板厚 2mm の純チタン (JIS 2 種) を用い、100×60mm の板の中央部にレーザパワー 1.2~4kW、溶接速度 10~100mm/s の条件でビームを照射し、溶接を行った。

3. 溶接部の特性

溶接部の状態を評価するためにビード横断面のマクロ組織観察、引張試験およびビッカース硬さ試験を行った。

レーザパワー $W_b=3kW$ 、溶接速度 $v_b=40mm/s$ の溶接条件で得られたビード横断面の一例を図 2 に示す。溶接ビードには余盛、裏波が形成されており、割れやポロシティなどの欠陥は発生していない。溶接ビードの溶融部および熱影響部では結晶粒が粗大化し、その境界部である溶接ポンドは不明確である。

図 3 にレーザパワー W_b と溶接速度 v_b を変化させた場合



1mm

溶接条件: $W_b=3kW$, $v_b=40mm/s$

図 2 溶接ビード断面写真の例

Macro-photograph of laser welded specimen

に得られる溶接ビード形状を示す。ビード形状はレーザパワーを一定とすると溶接速度とともに次のように変化する傾向がみられた。溶接速度が高速な場合は 2mm の板厚を貫通せず部分溶込みとなり、速度を低下させていくと裏面にアンダーフィルを生じた。さらに速度を低下させると良好な裏波を持つビードが得られた。その状態からさらに速度を低下させると裏面にアンダーカットを生じ、ついには溶落ちビードとなった。

2mm の板厚を貫通する溶接を行うことができた条件の試料を用いて引張試験を行った。試験片は JIS Z 2201 の 5号試験片のハーフサイズとし、引張方向は溶接線に対して垂直とした。なお、溶接部の余盛および裏波は研磨により除去した。引張試験の結果を表 1 に示す。引張強さは母材の強さとほぼ同等もしくはそれ以上であり、良好な強度が得られた。破断は母材部あるいは溶接部のいずれかで起こり、試料によって異なったが、破断位置と強度の関係は明瞭ではなかった。また、溶接した試験片では熱影響を受けていない母材と比べて、延性の低下が認められた。

次に、各溶接条件の試験片についてビード横断面の板厚の中央部における横方向のビッカース硬さ分布と、ビード中央部の板厚方向のビッカース硬さ分布を測定し、その際に得られた値のうち最も高いものを最高硬さとした。荷重

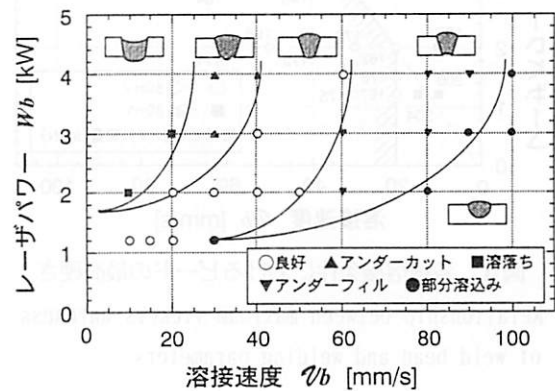


図 3 各種溶接条件におけるビード形状
Relationship between bead profile and welding parameters

表 1 各種溶接条件における引張強さ [MPa] 母材引張強さ 405MPa
Relationship between tensile strength and welding parameters

		溶接速度 v_b [mm/s]							
		10	20	30	40	50	60	70	80
レーザ パワー W_b [kW]	1.2	406	398	440	-	-	-	-	-
	2.0	437	407	430	440	433	391	-	-
	3.0	-	-	-	382	-	416	-	-
	4.0	-	-	-	391	-	419	-	424

は9.8Nで行った。図4に溶接条件と最高硬さの関係を示す。図中の数値はそれぞれの条件での最高硬さである。それぞれのレーザパワーにおいて溶接速度を低下させると溶接部は硬化する傾向が見られる。これは、溶接入熱（レーザパワー/溶接速度）が大きくなるにつれて、大気中の酸素や窒素の溶接部への吸収量が多くなり、硬くなったためと思われる。

チタンの溶接作業標準³⁾では純チタンの場合、正常な溶接部の硬さの目安をピッカース硬さにおいて母材の硬さ+40HV以内としている。本実験のレーザ溶接の場合も180HV（母材132HV）程度以下では溶接部の酸素や窒素の影響が小さいと思われる。その条件を満たす領域は溶接速度20mm/s以上、入熱量100J/mm未満であった。

溶接部に含まれる酸素量および窒素量と硬さの関係を調べるために最高硬さが180HV以上になった条件（ $Wb=2kW$, $v_b=10mm/s$ ）と180HV未満の条件（ $Wb=2kW$, $v_b=40mm/s$ ）について溶接部の酸素と窒素の含有量を酸素窒素同時分析装置（LECO社製TC-436、酸素分析法：赤外線吸収法、窒素分

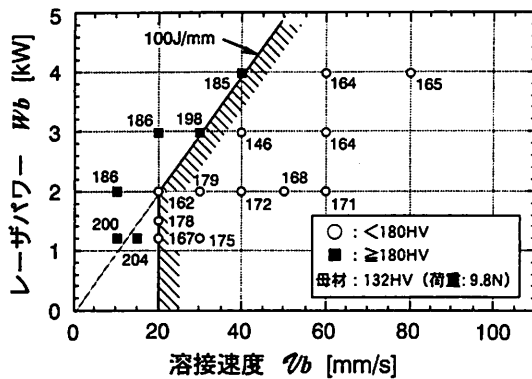


図4 各種溶接条件におけるビードの最高硬さ
Relationship between maximum vickers hardness of weld bead and welding parameters

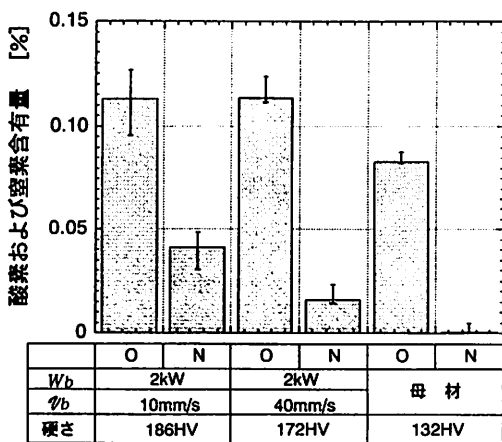


図5 酸素・窒素量分析結果
Results of oxygen and nitrogen analysis

析法：熱伝導度法）を用いて測定した。その結果を図5に示す。図5から酸素含有量はどちらの条件の場合もほとんど差はないが、窒素含有量は180HV以上の条件の試料の方が多く、窒素含有量の差が硬さに大きく影響していると思われる。

図6は、ビード形状の観察および硬さ試験の結果をまとめたもので、今回得られた良好な溶接が可能な領域は、レーザ出力4kW以下で溶接速度は20mm/s以上、入熱量は50~100J/mmの範囲で図6の斜線部分で示した領域である。

4. 溶接時の温度解析 —TIG溶接との比較—

これまでの実験から炭酸ガスレーザを用いると、アフターシールドを行わなくても良好な溶接を行うことのできる条件があることがわかった。これは溶接熱源がエネルギー密度の高いレーザビームであるため、溶接部が急熱急冷状態になり、溶接条件によっては溶接部が高温で空気に触れる時間が非常に短くなっているためと思われる。このことを明らかにするために実際に溶接時の温度変化を測定し、その結果をもとに温度に関するシミュレーションを行い、溶接部の温度分布と温度変化についてTIG溶接の場合と比較検討を行った。

(1) シミュレーションモデルと基礎式

計算に用いたモデルを図7に示す。試料の大きさを長さL、幅M、厚さh(≪L, M)とする。一般に比較的薄い板の貫通溶接の場合、板厚方向の温度変化を無視できる⁴⁾ので、レーザ溶接、TIG溶接いずれの場合においても、熱源を板厚方向に一樣な半径r₀の円柱状と仮定し、この熱源が速度v_bで移動するモデルを考える。座標系の原点を熱源に固定し、溶接方向をx軸、x軸に対し試料表面上で垂直方向をy軸とした。

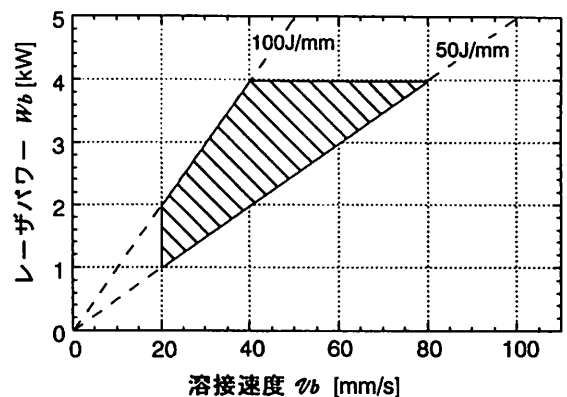


図6 レーザパワーと溶接速度における適正条件範囲
Suitable welding condition of laser power and welding speed

境界条件には x, y 軸に垂直な面から流出する熱量が境界面の温度の関数になっていると仮定し、ニュートンの冷却則³⁾を用いた。熱伝導方程式には板表面からの熱放散を考慮した次式を用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \alpha^2 (T - T_\infty) \quad (1)$$

ただし、

$$\alpha^2 = \frac{2\alpha}{cph}$$

$K = \lambda / (\rho c)$: 熱拡散率 [m^2/s],

ρ : 密度 [kg/m^3],

c : 比熱 [$J/(kg \cdot K)$],

α : 熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$],

λ : 熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$],

T : 境界面での温度 [K],

T_∞ : 外部流体の無限遠方での温度 [K].

(2) 温度変化計算時のパラメータ

温度変化の計算に用いた試料の大きさや熱源の半径を表2に示す。熱源の半径はレーザーの場合、ビーム径 0.4mm の

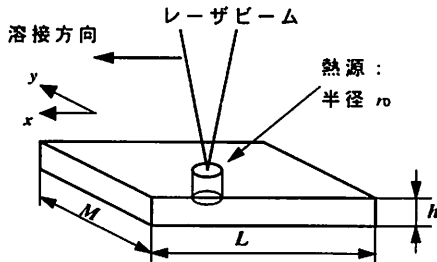


図7 シミュレーションに用いたモデル
Schematic diagram of simulation model

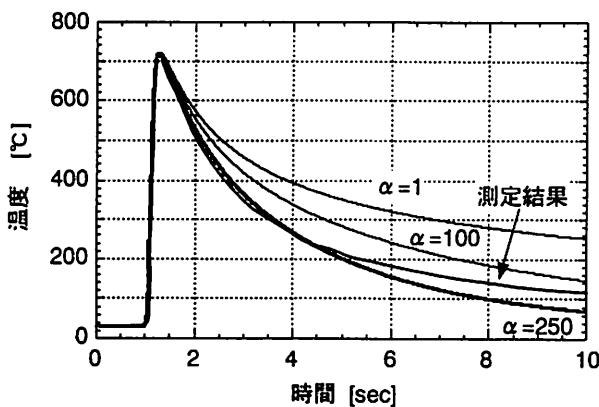


図8 温度変化の計算結果と測定結果の比較
(レーザー溶接, $y=1.8mm$)

Comparison between experimental and calculated results of temperature (for laser welding)

半分 0.2mm, TIG 溶接の場合は電極径 1.6mm の半分 0.8mm とした。また、チタンの熱物性値は温度依存性を考慮し、文献⁶⁾をもとに表3のように近似した。密度と比熱の積は熱拡散率 K の近似式から計算により求めた。

熱伝達率 α , 熱効率 η (試料に供給した熱量と試料が吸収した熱量の比) は加工条件, 系の状態などと複雑な関係にあるが, 簡単のためこれらを状態に関係なく一定な値と仮定し, 溶接時の温度変化の測定結果と同一条件での計算結果との比較から決定した。

温度変化の測定は厚さ 2mm の Ti 板 (純 Ti, 100×60mm) 上に熱電対をスポット溶接した試料にビードオンプレート溶接を施して行った。この際、レーザー溶接では、パワー $P=2kW$, 溶接速度 $v=40mm/s$ の良好なビードを得ることが

表2 計算で用いた試料および熱源の大きさ
Size of specimen and heat source used in calculation

試料の長さ	L [mm]	100
試料の幅	M [mm]	60
試料の厚さ	h [mm]	2
熱源半径 (レーザー)	r_0 [mm]	0.2
熱源半径 (TIG)	r_0 [mm]	0.8

表3 チタン物性値の近似式
Thermal properties of titanium

T [°C]	λ [W/(m·K)]	K [m^2/s]
$0 < T \leq 150$	27.0	14.75×10^{-6}
$150 < T \leq 1200$	$1.774 \times 10^{-5} T^2 - 0.02696 T + 29.34$	$1.47 \times 10^{-11} T^2 - 2.45 \times 10^{-8} T + 1.647 \times 10^{-5}$
$1200 < T$	22.0	7.85×10^{-6}

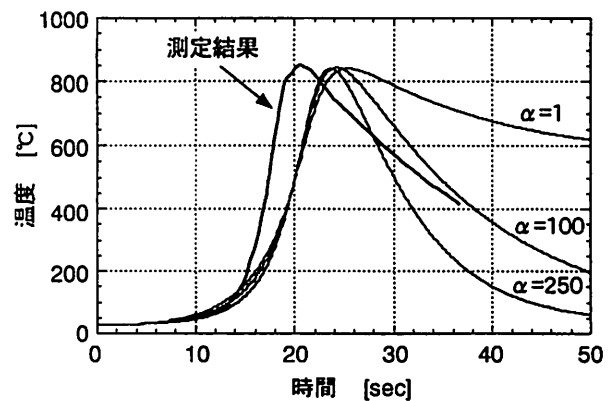


図9 温度変化の計算結果と測定結果の比較
(TIG 溶接, $y=7.0mm$)

Comparison between experimental and calculated results of temperature (for TIG arc welding)

できる条件とし、溶接線から 1.8mm 離れた位置の温度を測定した。TIG 溶接では、溶接電流 $I=90A$ 、アーク電圧 $V=12V$ 、溶接速度 $v_b=2mm/s$ とし、溶接線から 7.0mm 離れた位置の温度を測定した。

熱伝達率をそれぞれ $\alpha=1, 100, 250 W/(m^2 \cdot K)$ とした場合の温度変化の計算結果と、測定結果を図 8, 9 に示す。熱効率 η の値は α の値によって異なるため、ここでは計算

結果の最高到達温度が測定結果と一致するように η の値を決めた。図 8 から、レーザ溶接では、 α の値は測定結果と比較的よく一致している $\alpha=250 W/(m^2 \cdot K)$ とし、熱効率の値はその場合の値である $\eta=0.73$ とした。同様に図 9 から TIG 溶接では、 $\alpha=100 W/(m^2 \cdot K)$ とし、熱効率の値は $\eta=0.51$ とした。

(3)レーザ溶接とTIG溶接との温度に関する比較

図 8, 9 からシミュレーション結果は若干のずれが生じるが、変化の傾向は類似しており、これを用いてレーザ溶接と TIG 溶接の比較を行うことはある程度可能であると思われる。そこでレーザ溶接の場合と、TIG 溶接の双方について、溶接終了時の温度分布の計算ならびに溶接線上の一点(試料中心)の熱源通過後の温度変化の計算を行った。その結果を図 10, 11 に示す。なお、図 11 の横軸はレーザビームが通過してからの経過時間を示す。図 10 から溶融部の幅は実験で得られたビード幅とほぼ一致しており、このことから計算結果はある程度は妥当であると思われる。

チタンは約 500℃以上で酸素や窒素を吸収するため溶接を行う際には、溶融部とその周辺の温度がおよそ 500℃以下に冷却するまでシールドしなければならない⁷⁾。図 10 から溶接時の温度が 500℃を越える範囲はレーザ溶接の方が幅は小さいが、長さは長く、TIG 溶接と同じようにシールドの必要性があるように思われる。しかし、図 11 から熱源が通過してから 500℃まで冷却するのに TIG 溶接の場合は 15 秒程度要するが、レーザ溶接の場合は 1.5 秒程度であり、その結果、酸素や窒素を吸収する時間が短くなるために、簡易なシールドで良好な溶接が可能になったと思われる。

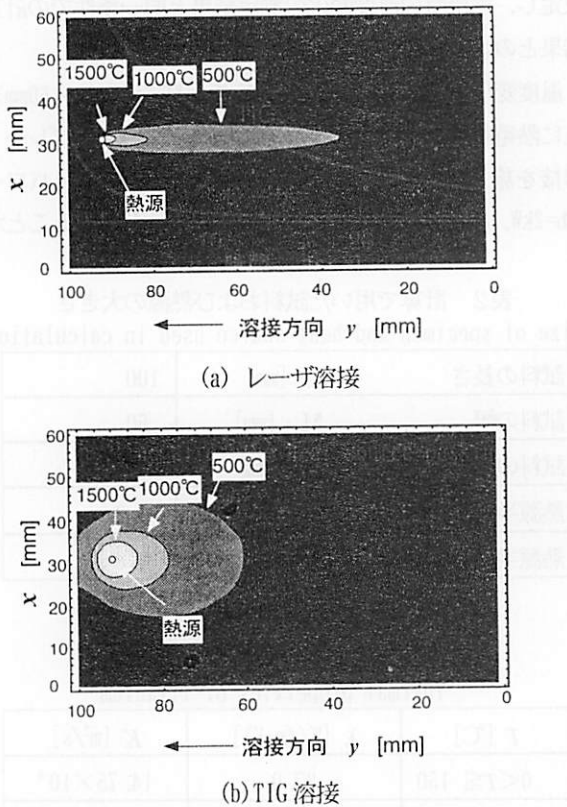


図 10 溶接終了時の温度分布の比較

Comparison of the temperature distribution at the end time of welding

5. 結 言

炭酸ガスレーザを用いて板厚 2mm の純チタンの溶接をアフターシールドなしで行い、溶接部の特性を検討した。その結果、溶接欠陥がなく、引張り強さ、硬さが母材と同程度となる条件の領域を見つけることができた。

また、溶接部の温度について実験結果との比較のもとでシミュレーションを行い、レーザ溶接は TIG 溶接に比べて高温になる領域の幅が狭く、冷却に要する時間は非常に短いことを示した。

以上の結果から、TIG 溶接では一般に溶接部を不活性ガスで十分にアフターシールドしなければならないのに対して、レーザ溶接では TIG 溶接に比べ、溶接による熱の影響部が小さいうえに、熱源が通過した後、急速に冷却するため酸素や窒素の溶接部への吸収量が少なくなり、比較的簡易なシールドにより高速・高品質な溶接を行うことができることを確認した。

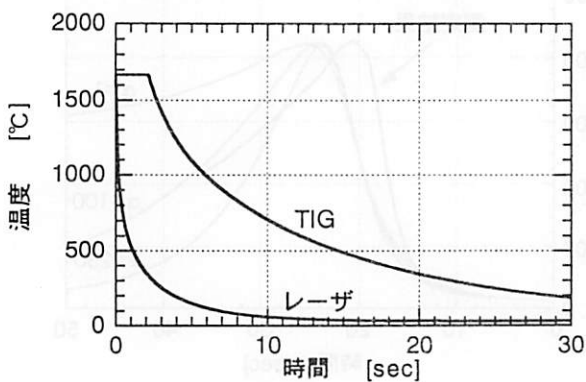


図 11 溶接線上の一点における熱源通過後の温度変化の比較

Comparison of the temperature change at a point on the welding line after the heat source passing through

参考文献

- 1) レーザ熱加工研究会, レーザ溶接の現状と将来技術, pp. 432-435, (1994)
- 2) 篠田剛, 松永憲一, 新原基衛, 軽金属溶接, Vol. 28, pp. 49-56, (1990)
- 3) 日本溶接協会規格, WES7102 イナートガスアーク溶接作業標準 (チタン及びチタン合金), pp. 1429-1438, (1983)
- 4) 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 溶接力学とその応用, pp. 162-229, 朝倉書店, (1965)
- 5) 黄地尚義, 溶接・接合プロセスの基礎, pp. 47, 産報出版, (1996)
- 6) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第四版, pp. 316, (1986)
- 7) 溶接学会 編, 溶接・接合便覧, pp. 1041-1057, 丸善, (1990)