レーザーオリジナル

レーザー溶接に関する研究
—レーザー切断面の溶接特性—

木村盛一郎*・牧野吉延*・池田正幸**

(1994年7月1日 受理)

A Study of High-Power CO₂ Laser Welding Process
— Laser Welding Properties of Laser-cut Surface Joints —

Seiichiro KIMURA*, Yoshinobu MAKINO* and Masayuki IKEDA**

(Received July 7, 1994)

We investigated high power CO₂ laser welding properties of stainless steel (SUS304) using a laser-cut surface as a welding joint surface. We used O₂ and N₂ gas-assisted laser cutting and a conventional machined surface in this experiment. Results showed that the tensile strength and an impact value of O₂ gas-assisted laser-cut surface welding joints were 10% and 50%, relatively lower than other joints, because oxide film obtained by O₂ gas assisted-laser cutting, dissolved in the weld zone, and its ductility was reduced. Rather straight bead shape was obtained when using O₂ gas-assisted laser-cut surface welding.

Key Words: CO₂ laser welding, Stainless steel, Laser cut joint, Mechanical properties

1. はじめに

一般的に、加工用レーザーとして使用されているレーザー発振器は、CO₂レーザーとYAGレーザーが大半を占めている。現在、CO₂レーザー加工機は、大型部品の切断や、穴あけに約80%溶接には、約10%、その他、10%に表面改質などの応用に実用化されている。しかし、国内でのレーザー溶接の普及は、欧米に比べて遅れているのが現状である。この原因は、レーザー溶接機の高コスト、レーザー溶接技術者不

足、及びレーザー溶接の品質向上などの技術開発の遅れと考えられる。

現在、国内で研究開発が進められているレーザー溶接テーマは、アルミニウム合金の溶接^{1,2)}、亜鉛メッキ鋼板の溶接^{3,4)}など車体に多く用いられる材料を中心としており、特殊合金鋼などの溶接技術開発や、生産技術を考慮したレーザー溶接の実用化技術開発報告は、比較的少ない。今後は、製品の製造方法を考慮した生産設計の中に位置付けたレーザー溶接の導入とVA/CD (Value Analysis/Cost Down)に寄与で

* (株)東芝重電技術研究所 (〒183 東京都府中市東芝町1)

** 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

* Heavy Apparatin Laboratory, Toshiba Corporation (Toshiba-cho, Fuchu-shi, Tokyo 183)

** Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University (North 13, West 8, Kita-ku, Sapporo 060)

Table I Chemical composition of test pieces.

Thickness	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
6 mm	0.04	0.38	0.84	0.028	0.006	8.3	18.22	Bal.
3 mm	0.07	0.50	0.83	0.025	0.003	8.63	18.10	Bal.

All test pieces were solution heat-treated at 1040 °C for 5 min.

Materials:SUS304	Cut surface	Cross section
Thickness:6 mm O ₂ gas assist cutting	Roughness Ra 6-9μm	Oxide film:Max.50μm 50μm
Thickness:3 mm O ₂ gas assist cutting	Roughness Ra 5-8μm	Oxide film:30μm 50μm
Thickness:6 mm N ₂ gas assist cutting	Roughness Ra 1-2μm	Oxide film :zero 50μm

(Non-etched)

Fig. 1 Test piece surface condition used in this experiment.

きる実用化検討が必要と考える。

この様な背景において、その1手法として、レーザー切断後のレーザー溶接の品質が確保できればレーザー加工機の有効活用が図られ、今後のレーザー溶接の普及につながると考える。

本研究では、溶接継手端面の加工法に①機械加工面、②酸素ガスによるレーザー切断面および③窒素ガスによるレーザー切断面を選び、これらを用いてレーザーによる突合せ溶接試験を行った。材料は、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304材を用いて各種溶接強度特性を検討したので報告する。

2. 供試材および実験方法

本研究では、1040 °C 5分間の固溶化熱処理材

である工業用オーステナイト系ステンレス鋼SUS304を供試材として用い、その寸法は、100 mm幅×200 mm長さで板厚は、3 mmと6 mmのものを使用した。その化学成分をTable Iに示す。なお、レーザー溶接を行う際の継手はI形開先突合せとし、その端面の性状を次の3種類を選択した。まず①熱的な影響を無視できる機械加工仕上げ(フライス加工)、②アシストガスとして酸素を用いて適正な条件で切断した面および③アシストガスとして窒素ガスを用いて切断した面である。

機械加工仕上げの面の肌は、Ra:0.5~2.0 μm(R_{max}: 7.0~10 μm)である。この機械加工面を溶接する際には、エタノールにより脱脂した。一方、レーザー切断面の性状は、Fig. 1に示すが、

Fig. 2 EPMA line analysis for O, N, Fe, and Cr near the cut surface by oxygen assist of 6 mm thickness.

切断面の肌は、酸素を用いた場合には、 R_a :約 $7 \mu\text{m}$ (R_{max} : 約 $60 \mu\text{m}$) であり、窒素ガスを用いて切断した場合の切断面の肌は、 R_a : 約 $2 \mu\text{m}$ (R_{max} : 約 $20 \mu\text{m}$) であった。

レーザーによる酸素切断面に付着している酸化被膜の厚さは、板厚 6 mm の場合には、 $40 \sim 60 \mu\text{m}$ 、板厚 3 mm の場合には、 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ であった。また、窒素ガスによる切断面(無酸化切断)には、溶融凝固層が約 $10 \mu\text{m}$ 存在した。

Fig. 2には、酸素を用いて切断した板厚 6 mm

の SUS 304 材の断面を EPMA により線分析調査した結果を示す。この結果、切断面表面には、約 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ の酸化被膜が存在し、その下部には、溶融凝固層が存在する。この溶融凝固層には、酸素がほとんど含まれていないことが明らかとなった。

溶接実験に使用した発振器は、連続発振の 5 kW クラスの CO_2 レーザーである。発振モードには、マルチモードおよび不安定型共振器から得られるリングモード ($M=2$) を使用した。ビーム径は、マルチモードの場合、約 40 mm でありリングモードでは、約 50 mm である。集光光学系に使用したレンズの焦点距離は、マルチモードでは、 10 in (254 mm)、リングモードでは、 7.5 in (190.5 mm) を使用した。これらの集光点のスポット径は、それぞれ約 0.8 mm 、および約 0.3 mm であった。

溶接実験条件は、板厚によりほぼ固定し、板厚 3 mm の突合せ溶接には、出力 4 kW、溶接速度 1 m/min 、板厚 6 mm の溶接には、出力 6 kW、溶接速度 0.7 m/min を選択した。また、溶接部の溶融形状の比較のために実験を行ったリングモードの溶接条件は、出力 5 kW で、溶接速度 0.7 m/min および 2.8 m/min の 2 条件で試験を行った。なお、溶接実験に採用したシールドガスは、He でありその流量は、 50 l/min である。溶接実験後の評価試験には、溶接ビードの外観検査、溶接部の非破壊検査として、放射線透過試験 (RT) により内部欠陥 (ポロシティ) を評価した。さらに引張試験、衝撃試験、溶融部のガス分析および破面観察などを行い、レーザー溶接の品質を調査した。

3. 実験結果および考察

3.1 板厚 3 mm のステンレス鋼の溶接特性

Fig. 3 にレーザー照射条件：レーザー出力 4 kW、溶接速度 1 m/min における各種溶接についての継手の溶接ビード表面、裏ビードおよび断面の観察結果を示す。どの突合せ溶接結果においても十分に貫通ビードが得られていることから突合せ溶接条件としては適正であると思われる。

Joint Combination	Bead surface	Bead rear surface	Cross-section
Machined +Machined			
Laser cut(O ₂) +Machined			
Laser cut(N ₂) +Machined			
Laser cut(O ₂) +Laser cut(O ₂)			
Laser cut(N ₂) +Laser cut(N ₂)			

Laser conditions

Laser power: 4 kW, Welding Speed: 1 m/min, Shield gas: He

Materials: SUS304, Thickness: 3 mm, Laser mode: Multi-mode

Fig. 3 Welding results for several test piece combinations.

る。ただし、溶融断面形状について若干の違いが観察される。すなわち、機械加工面と機械加工面、無酸化切断面と機械加工面、および無酸化切断面と無酸化切断面の突合せ溶接断面の溶融部の形状は、通常の表面近辺において幅の広いワインカップ状のビードが観察されるが、酸素を用いて切断した試験片(酸素アシスト切断片)を用いて溶接されたものについては、ほぼストレートな溶融断面を示している。また、裏面の溶融幅も広い。これは、酸化被膜の高い吸収率のためキーホール内部における反射が少なくほぼ線熱源の入熱に近くなっているものと考えられる。また、内部欠陥の発生に関しては、

放射線透過試験の結果によるとこの実験の範囲内ですべて1級を呈した。

次に、これらの試験片を用いて溶接部の引張り試験を行った。その結果をFig. 4に示す。0.2%耐力については、どの突合せ条件においても母材と同程度であり、引張強度もほぼ母材と同程度であった。しかし、伸びに関しては、溶接部材については、どの継手も母材に対して15%~20%低下している。また、酸素アシスト切断試料の溶接では、伸びが一段と低下し延性が失われている。これらの観察結果により酸素ガスによる切断面に発生した酸化膜は、溶接部に大きな影響を与えていると思われる。

Fig. 4 Mechanical test results of several joints for 3 mm thickness of stainless steel (SUS304).

Joint Combination	Bead surface	Bead rear surface	Cross-section
Machined +Machined (Multi mode)	 Laser power: 6 kW	 Speed: 0.7 m/min	
Laser cut(O ₂) +Machined (Multi mode)	 Laser power: 6 kW	 Speed: 0.7 m/min	
Machined +Machined (Ring mode)	 Laser power: 5 kW	 Speed: 0.7 m/min	
Laser cut(O ₂) +Machined (Ring mode)	 Laser power: 5 kW	 Speed: 0.7 m/min	
Laser cut(O ₂) +Machined (Ring mode)	 Laser power: 5 kW	 Speed: 2.8 m/min	

All experiment has been carried out under He shielding gas
Materials: SUS304, Thickness: 6 mm

Fig. 5 Welding results for several joint combinations by different laser modes and speeds.

Fig. 6 Mechanical test results of several welding joints with different laser mode for 6 mm thickness stainless steel (SUS304).

3.2 板厚6 mmのステンレス鋼の溶接特性

Fig. 5に板厚6 mmのSUS304ステンレス鋼の突合せ溶接部のマクロ観察結果を示す。この実験では、レーザー光のモードの違い、溶接速度の違いおよび各種継手面仕上げの違いを観察している。溶接条件には、マルチモードでは、裏ビードが十分に得られる条件を選定して0.7 m/minの溶接速度を選んだ。この実験からも溶接外観上の違いは観察されないが溶融断面形状には、3.1で示した結果と同様に機械加工面と機械加工面の溶接では、ワインカップ状、酸素アシスト切断片を使用した場合には、ほぼストレートな溶融断面形状を示している。これは、集光性の良いリングモードを使用した場合も同様な結果を得た。リングモードを使用し、溶接速度を2.8 m/minの高速溶接を行った場合もFig. 5に示す。この場合には、電子ビーム溶接と同様な細い溶接部が得られている。以下にこれらの溶接部の機械的特性およびそれらの破断面の観察などにより各種継手の特性について評価する。

3.3 機械的特性評価

板厚6 mmのステンレス鋼のレーザー溶接継

Fig. 7 Relationship between impact value and Oxygen contents in weld bead. Fig. 8 Mechanical test results comparison with different welding speed in case of ring mode laser beam.

手の機械的強度特性評価結果をFig. 6に示す。0.2 %耐力に関しては、継手部材の影響およびレーザーの集光性による違いは認められない。引張強度においては、酸素アシスト切断と機械加工面の溶接強度が母材に比べて約10 %低下している。伸びに対しては、リングモードで酸

Fig. 8 Mechanical test results comparison with different welding speed in case of ring mode laser beam.

素アシスト切断面と機械加工面の溶接部が最も悪く母材に比べて、約35%低下している。これは、狭い溶接部断面に起因しているものと考えられる。

次に室温における衝撃試験を行った。Fig. 6に示す衝撃試験の結果では、機械加工面と機械加工面の溶接継手でも約10-25%の強度低下をきたしている。さらに酸素アシスト切断面と機械加工面の溶接部では、母材に比べて約30%程度の衝撃値しか得られていない。これらの結果から、衝撃の加わる部分の溶接には、酸素切断部材の採用は難しいと考えられる。

この様に酸素アシスト切断面の溶接部の延性が低下する原因を調査するために溶接部から切り出した切粉から各種溶接継手に含まれる酸素濃度を計測し、衝撃値との関連を検討した。Fig. 7は、衝撃値と溶接部の酸素濃度との関係を示す。機械加工面の溶接部は、酸素濃度が低く衝撃値も大きい。逆に、酸素アシスト切断面の溶接では、酸素濃度が高く、衝撃値も小さく延性が失われている。このことから酸素アシスト切断面の溶接部には、酸化物の介在など酸素の影響が大きいことが明らかである。

Fig. 8は、リングモードおよびマルチモードの機械的強度比較さらに溶接速度の違いによる

溶接部の機械的強度試験結果を示す。0.2%耐力および引張強度に関しては、母材とほぼ同等であるが、伸びについては、低速、高速とも同程度の低下が観察される。衝撃試験の結果では、高速側の溶接速度の方がさらに衝撃値が低下している。さらにFig. 7の酸素濃度と衝撃値の関係の中でリングモードの高速側の溶接の場合、低速溶接に比べ酸素濃度は、約3倍であった。このことは、高速溶接により溶融幅が狭くなったため、酸素濃度が逆に高く呈したと考えられる。したがって、酸素アシスト切断面の溶接には、溶接ビード幅が広がる、比較的低速溶接の方が酸化物の希釈率が低下するため機械的強度は、向上するものと考えられる。

3.4 溶接部の各種ミクロ観察

3.3以前に提示された機械的強度特に伸びや衝撃値の低下につながる原因を調査するためにミクロ観察結果を示す。Fig. 9(a)は、機械加工面と機械加工面のレーザー溶接溶融部のほぼ中央の金属顕微鏡によるミクロ写真を示す。この写真からは、通常の溶接部の微細なデンドライト溶融急凝固層が観察される。Fig. 9(b)には、酸素アシスト切断面と機械加工面の溶接中央部のミクロ写真を示す。写真(a)に比べて明らか

(a) Machied+Machined joint weld part

(b) 0₂ cut +Machined joint weld part

Welding conditions: Laser power 6 kW,
Speed 0.7 m/min, Laser mode: Multi mode

Fig. 9 Micro structure of different weld joint cross sections.

に微細な組織を呈している。結晶の微細化には、2種類考えられる。1つは、冷却速度が非常に早い場合、もう1つは、介在物の数が多い場合、それが結晶成長の核となり微細な組織を呈することがある。そこで、引張試験の破断面をSEM像で観察した結果をFig. 10に示す。この破断面の観察結果から、機械加工面と機械加工面の溶接の場合は、母材破断面のディンプルの大きさとほぼ同じ大きさを呈していることから、溶接部内の介在物は、母材と同じであると推測できる。しかし、酸素アシスト切断面を用いた溶接部の引張破断面は、微細なディンプルを示し、介在物が多数存在していることが確認できる。Fig. 11は、衝撃試験の各継手の破断面のSEM観察結果を示す。3.3で示したように機械加工面と機械加工面および酸素アシスト切断面と機械加工面、それぞれの溶接継手強度を比

(a) Base metal

(b) Machined+Machined joint welding

(c) 0₂ gas cut+Machined joint welding

Laser conditions: Laser power 6 kW,
Speed 0.7 m/min

Fig. 10 Fracture surface observation of tensile test for different joints combinations.

較すると引張試験評価より衝撃試験評価の方が明らかに差が得られた。この写真からも同様に酸素アシスト切断面の方が母材および機械加工面の溶接部よりも微細なディンプルを呈している。この介在物を同定するためにEPMA点分析により定量分析を行った。その結果をTable IIに示す。母材、機械加工面と機械加工面、および酸素アシスト切断面の溶接部を比較する

と、酸素アシスト切断面の場合には、Oが存在する比率が大きいことからCr, Mn, あるいはFeなどの酸化物が存在するものと推定できる。

(a) Base metal

(b) Machined+Machined joint welding

(c) O₂ gas cut+Machined joint welding

Laser conditions: Laser power 6 kW,
Speed 0.7 m/min

Fig. 11 Fracture surface observation of impact test for different joints combinations.

したがって、熱影響が少なく酸化膜の厚さも薄い酸素アシストレーザー切断部材でもレーザー溶接プロセスでは、その溶接部に酸化物が残存するものと思われる。

3.5 内部欠陥と各種溶接継手特性

一般的にリングモードの方がマルチモードに比べ内部欠陥(ポロシティ)の数が多い傾向にあるが⁵⁾、今回の酸素アシスト切断面を使用した溶接継手部の放射線透過試験の結果は、レーザーのモードに関係なく全てRT1級であった。しかし、機械加工面と機械加工面をリングモードで溶接した部材は、RT4級を示した。しかし、この溶接部の種々の機械的強度試験結果では、酸素アシスト切断面の溶接評価より良いことが

Fig. 12 Relationship between number of porosities for different joint combinations.

Table II EPMA quantitative analysis of intervention particles.

Joints/Contents	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	O (%)	Rest (%)
Based metal	19.2	1.0	70.6	—	9.2
Machined+Machined	15.8	7.6	49.2	8	27.4
O ₂ cut+Machined	11.0	20.6	5.8	28	34.6

明らかになった。このことは、多少溶接内部にポロシティが存在していても静的な強度には影響しないものと思われる。Fig. 12では、これらの結果をほぼ中央の溶接ビード幅と溶接内部のポロシティの数により各種継手を評価した。溶接ビード幅が広くなるとポロシティの数は減少する。また酸素アシスト切断面では、溶接ビード幅に無関係に全て放射線透過試験規格である直径0.5 mm以上のポロシティはほとんどないことがわかる。ところが、溶接ビード幅が狭いリングモードなどの機械加工面と機械加工面の溶接では、内部ポロシティが多くなる傾向にあることが明らかとなった。

4. 結言

レーザー切断部材のレーザーによる溶接試験を行い通常の機械加工面のレーザー溶接部などと各種評価試験により比較検討を行った。その結果以下のことが判明した。

- (1) 酸素ガスによるレーザー切断部材の溶接では、ストレートな断面形状が得られた。
- (2) 酸素ガスアシスト切断面には、数十 μm の酸化被膜が存在するがその下部の溶融凝固層に

は酸素が含まれていない。

- (3) 窒素ガスによるレーザー切断部材の溶接では、溶接断面形状および静的強度の点において機械加工面の溶接と同等の特性を得ることができた。

- (4) 酸素アシスト切断面の溶接は、ポロシティの低減に大きく寄与するが溶接部延性が低下し、伸びおよび衝撃値も低下する。

- (4) 酸素アシスト切断面の溶接部には、酸化物が確認され、この理由により延性が低下したと考えられる。

- (5) 比較的低速溶接の方が、酸素アシスト切断面溶接部の酸素濃度が低く、機械的強度も向上することが判明した。

参 考 文 献

- 1) T. Watanabe et al.: LAMP '92 (1992) 505.
- 2) I. Jones et al.: LAMP '92 (1992) 523.
- 3) C. Bagger et al.: LAMP '92 (1992) 553.
- 4) T. A. Marsico et al.: Proc. of ICALEO '93 (1993).
- 5) 牧野ら：1992年溶接学会講演概要集第41回 No. 409.