レーザ圧接法によるアルミニウム合金と低炭素鋼の接合*

西本 浩司**, 藤井 洋郎***, 片山 聖二****

Laser Pressure Welding of Aluminum Alloy and Low Carbon Steel*

by NISHIMOTO Kouji**, FUJII Hiroo*** and KATAYAMA Seiji****

This paper proposes laser pressure welding technology for joining of dissimilar metals. Laser pressure welding of aluminum alloy A6061 and low carbon steel SPCC sheets was carried out by changing the roller pressure. And a YAG laser beam was irradiated on different locations into the wedge of two sheets by a f. lens and scanned at various frequencies and patterns using two dimensional scanning mirrors. The tensile shear strength and peel strength of welded joints were measured. The tensile shear and peel test specimens made in Ar gas flows fractured in the A6061 base metal and along welded dissimilar metal interface, respectively. The highest tensile strength and peel strength were obtained at the laser power of 1.8 kW, the laser scanning speed of 30 Hz, the laser irradiation position of centerline, the roller pressure of more than 245 MPa and the welding speed of 0.5 m/min in Ar atmosphere. The interfaces of the joints were analyzed by using SEM and EDX, and the formation phases on the peeled surfaces were analyzed with XRD. It was revealed to be important for the production of a sound joint with high mechanical properties to prevent a welding high temperature part from oxidation.

Key Words: Laser welding, Dissimilar metal joining, Aluminum alloy, Steel, Intermetallic compound

1. 緒 言

最近,多くの工業製品には必要とされる機械的性能および使用環境に応じて,高性能化,高付加価値化や軽量化への要求が高くなってきており,低コスト化や高リサイクル性も同時に求められるようになってきた.したがって,重要な組み立て生産技術である溶接・接合においても異種材料の接合に対する要求が高くなってきている.

レーザ溶接法は,各種接合法の中でロボット化,自動化,システム化,ライン化,省力化などが可能な高品質・高精度・低変形・高柔軟性・高速・高生産性の接合法である.このような背景から,レーザ溶接法による異種金属材料の接合に対するニーズが増加している.ところが,従来より異種材料の溶融溶接の場合,例えば鉄とアルミニウムのように金属間化合物を生成する異種材料の組合せは一般に接合が非常に困難であることが知られている.しかし,レーザ溶接法は,高エネルギー密度のビーム熱源の高指向性と短時間加熱・高冷却速度の特長を生かし,異材継手の溶融制御により金属間化合物形成の抑制が容易であると考えられる¹⁾.最近では,高性能なYAGレーザや半導体レーザを用いた鉄鋼材料とアルミニウム合金,銅,チタンなどとの接合が種々検討され,良好な接合特性が得られている^{1)~7)}.

しかし,レーザ照射入熱が十分有効に活用されていないという欠点がある.

そこで,本研究では,異種金属接合法の1つとしてレーザとローラを組み合わせたレーザ圧接法に注目し,様々な異種金属の組合せにおいて高速で安定した接合法を確立するための基礎資料を得ることを目的として接合実験を行った.本手法では,レーザとローラの組合せにより,融接と圧接の両方の効果を得ることができ,レーザをスキャナにより自在に照射することで,接合界面の温度を制御することができる.また,異種金属板を張り合わせ,その合わせ面へレーザを照射・走査した後,ローラにより加圧し接合を行うため,面での接合が可能であるとともに,レーザ反射率の高い金属においても,入熱損失を少なくすることができるため,大きな物性差をカバーしつつ,脆弱な金属間化合物の生成を最小限に抑制することができることが期待される.なお,レーザとローラを組み合わせた接合プロセスとして Sepoldら⁸⁾は,同種鋼板のシーム溶接を4000 mm/sという高速度で溶接できたことを報告している.また,異材接合として,沓名ら^{3,4)}は,低炭素冷間圧延鋼板(SPCC鋼)とA5052アルミニウム合金のレーザロール圧接を行い,レーザによる急熱急冷の熱サイクルにより脆弱な金属間化合物の生成を抑制し,引張せん断試験において高い継手強度を得ることができたことを報告している.ただし,良好な継手を得るためにフラックスが必要とされている.本レーザ圧接法は,フラックスが不要であり,薄板の鉄鋼材料側にレーザを照射し,その熱伝導でアルミニウム合金を溶融させるレーザロール圧接法^{3,4)}とは異なる溶接法である.本論文では,アルミニウム合金と鉄鋼材料のレーザ異材

*原稿受付 平成16年12月9日 平成15年度春季全国大会で発表

**正員 阿南工業高等専門学校 Member, Anan National College of Technology

*** 阿南工業高等専門学校 Anan National College of Technology

****正員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

圧接の可能性に関して、通常の熔融溶接では厚く生成する金属間化合物層を薄く抑え、機械的特性の良好な接合部を得るための適切な接合条件などについて検討を行った。特に、機械的特性低下に及ぼす酸化物相の影響が明らかになった。

2. 実験方法

2.1 供試材

接合材には、Al - Mg - Si 系合金 A6061 アルミニウム合金（以下、A6061 という）の T6 処理材を用いた。主要な合金元素の化学組成（規格値）は 0.8 ~ 1.2% Mg および 0.4 ~ 0.8% Si (mass%)、引張強さは 295 MPa 以上である。相手材には冷間圧延鋼板（以下、SPCC 鋼という）を用いた。主要な合金元素の化学組成（規格値）は 0.12% 以下 C、0.5% 以下 Mn、0.04% 以下 P、0.045% 以下 S (mass%)、引張強さは 270 MPa 以上である。接合材は、厚さ 1 mm、幅 12 mm、長さ 300 mm の帯材である。接合はこれら 2 枚を合わせ、その合わせ面にレーザを照射して張り合わせる面接合である。接合材表面は #1500 番のエミリー紙により研磨し、板表面の油分や酸化物を除去し、アセトンにて脱脂した後、接合実験を行った。

2.2 レーザ圧接法

レーザ圧接法の概略図を Fig.1 に示す。接合には 2kW YAG レーザ（FANUC 社製 Y2000A）を用い、発振器から出射したビームはミラーにより伝送され、ビームスキャナ（SCANLAB 社製 SK1020）に導光される。導光されたビームはコリメータレンズにより平行光となり、X-Y 軸の振動ミラーによりスキャンされ、f レンズを通り帯材の合わせ面に短辺が 0.5 mm、長辺が 2.0 mm のビームスポットとして集光される。レーザは帯材に対して平行になるようにスキャンし、一對のローラにより加圧され配送される。実験条件を Table 1 に示す。レーザ照射位置と焦点は必ずし距離は Fig.2 に示す関係となっている。レーザはスキャナによって自由な軌跡で照射できるため、両金属の合わせ面へ照射し両金属を加熱または溶融、どちらか一方の金属側へのみ照射し加熱または溶融させて接合を行うことができるため、接合における両金属の組成制御を行うことが可能であり、レーザによる急熱急冷効果と併せて金属間化合物の生成を抑制することができる。接合部の酸化を防ぐために、アルゴンガスを流量 30 l/min で帯材の合わせ面へ供給した。さらに、溶接部を覆うようにアルゴンガス雰囲気を作製し、溶接部の特性に及ぼす酸化の影響について調査した。

接合界面は走査電子顕微鏡（SEM）を用いて詳細に観察した。また界面の化学組成分布を SEM に装着された EDX（Energy Dispersive X-ray Spectrometer）を用いて測定した。さらに、剥離面を Cu-K α を使用して X 線回折を行い化合物

Fig. 1 Schematic representation of experimental set-up.

Table 1 Laser welding conditions used.

Laser power	1800 W
Laser beam scanning speed	10, 30, 50, 70, 90 Hz
Laser irradiation position, d	Center
	0.5 mm to SPCC side
	1.0 mm to SPCC side
Defocused distance, f	+ 7 mm
Traveling speed, v	8.3 mm/s
Roller pressure	82 ~ 325 MPa

Fig. 2 Laser beam irradiation situation showing d and f varied.

の識別を行った。

継手の機械的性質は、引張せん断試験および剥離試験で評価した。試験片形状は、幅 12 mm のレーザー圧接のままの継手形状で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 レーザ圧接性に及ぼすビーム照射位置の影響

各種実験条件において接合を試みた結果を接合の可否として Fig. 3 に示す。レーザスキャン速度 10 Hz では、いずれもアルミニウム合金が変形し接合が不可能であった。また、レーザ照射位置を SPCC 鋼側に寄せると接合可能範囲が狭くなり、接合のために適切な溶接条件が必要であることがわかった。

3.1.1 引張せん断試験結果

Fig. 3 において、接合が可能であった条件について、レーザ圧接のままの継手の引張せん断試験を行った。その結果

Fig. 3 Laser pressure welding conditions for formation of sound welds

Fig. 4 Tensile shear test results of A6061 and SPCC joints produced by laser pressure welding.

を Fig. 4 に示す。レーザ照射位置が合わせ面の中心では、すべての条件でアルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。レーザ照射位置を SPCC 鋼側に寄せた場合、強度が低下した。特に、レーザ照射位置が SPCC 鋼側へ 0.5 mm 離れ、レーザスキャン速度が 50 Hz で極端に低下しせん断破断した。レーザ照射位置が SPCC 鋼側へ 1.0 mm では、バラツキが大きく、アルミニウム合金母材から破断するものと、せん断破断するものがあった。

3.1.2 接合部断面の SEM 観察と EDX 分析結果

引張せん断試験において、アルミニウム合金母材で破断した条件について、金属間化合物の生成状況を調べるために、異材接合部の界面近傍を SEM で観察し、EDX で分析を行った。その結果、接合界面には所々にアルミニウム合金側へはみ出すスパイク状の化合物が確認された。これらスパイク状の化合物は、レーザ照射位置が SPCC 鋼側になるほど多く確認された。Fig. 5 に化合物を高倍率で観察した SEM 写真と EDX による面分析写真を示す。面分析の結果から、化合物は Fe と Al の金属間化合物ではなく、Fe の酸化物であることが示唆される。これら化合物は、レーザ照射により SPCC 鋼が加熱され、アルゴンガスシールドが不完全な部分で酸化物を形成し、ローラにより加圧・接合を行う際にアルミニウム合金が押しつけられることにより、軟らかいアルミニウム合金側へはみ出してスパイク状の化合物となったものと考えられる。また、SPCC 鋼側へレーザを照射することにより SPCC 鋼がより加熱され、酸化が促進したために、レーザ照射位置が SPCC 鋼側の場合に化合物が多く形成されたものと思われる。レーザスキャン速度が 30 Hz、レーザ照射位置が合わせ面の中心でスパイク状の化合物のない接合界面の SEM 写真と EDX による面分析結果を Fig. 6 に示し、点分析結果を Table 2 にまとめて示す。接合界面には、はっきりとした金属間化合物層の生成は見られなかった。

Fig. 5 SEM photograph and EDX area analyses results of spiked compound in A6061 and SPCC joint.

点分析の結果から、点 3, 4, 7 および 8 の組成から Fe_3Al といった比較的高い延性、靱性⁹⁾を有する金属間化合物が生成していることが推測され、その層の厚さは 3 μm 程度と非常に薄いことがわかった。

3.1.3 剥離面の EDX 面分析結果および X 線回折結果

次に、レーザ圧接後、接合部を剥離し、その剥離面を EDX による面分析を行うとともに X 線回折を行い、接合界面に生成する化合物についてさらに詳しく検討した。レーザスキャン速度 30 Hz で、レーザ照射位置を合わせ面中心および SPCC 鋼側へ 1.0 mm 寄せたときの剥離面の EDX 面分析結果および X 線回折結果を Fig. 7 に示す。レーザ照射位置が合わせ面の中心では、SPCC 鋼側には EDX 分析および X 線回折結果からほとんどが Fe 相であり、一部 Al が付着していることがわかった。A6061 側ではほとんどが Al であったが、一部 Fe と O の化合物が確認され、X 線回折結果から FeO であることがわかった。また、レーザ照射位置を SPCC 鋼側へ寄せた場合 SPCC 鋼側への Al の付着量が減少し、A6061 側への FeO の増加が見られた。これら FeO は接合部断面で見られたスパイク状の化合物であり、上述したようにレーザ照射位置を SPCC 鋼側へ寄せた場合、SPCC 鋼側がより加熱されて酸化が促進され、多量の FeO が形成したと判断される。X 線回折結果から、SPCC 鋼側には Fe と Al および FeO が検出され、A6061 側には Al と FeO のピークのみが見られ、Fig.5 で見られた Fe_3Al の金属間化合物は見られなかった。これは、金属間化合物が非常に薄かったためと、剥離が Fe と FeO 層の界面かもしくは FeO 層内で起こったためと考えられる。

3.2 アルゴンガス雰囲気中でのレーザ圧接実験結果

アルゴンガスシールド中で得られたレーザ圧接継手では、Fig. 7 に示したように、その剥離面に FeO が形成しており、これが機械的特性の低下や接合不能の原因となっていた。

また、鋼板とアルミニウム板の圧延接合においても鋼板表面の Fe 酸化膜は接合の阻害要因になることが報告されている¹⁰⁾。そこで、接合部の特性に及ぼす接合部界面の酸化の影響を検討するために、接合部をアルゴンガス雰囲気中とし、同様の異材接合実験を行った。

アルゴンガス雰囲気中でレーザ圧接実験を試みた結果、すべての条件で接合が可能であることが判明した。このことから、SPCC 鋼側が酸化し、レーザ照射位置を SPCC 鋼側へ寄せた場合、その酸化がより促進され、アルゴンガスシールドが不完全であったことが推察される。なお、レーザスキャン速度 10 Hz で、アルミニウム合金が過度に変形し接合できなかった条件では、SPCC 鋼側の酸化によりレーザの吸収が増加し、アルミニウム合金側への入熱が過多となったためと考えられる。

3.2.1 引張せん断試験結果および剥離試験結果

引張せん断試験結果を Fig.8 に示す。引張せん断試験では、すべての条件においてアルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。レーザ圧接継手の剥離強度についても検討した。Fig. 9 にレーザ照射位置が合わせ面の中心である場合の剥離試験結果を示す。アルゴンガス雰囲気中での剥離強度は、アルゴンガス吹付けの場合より高いことがわかる。特に、スキャン速度が 30 Hz では、アルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。

3.2.2 剥離面の SEM 観察、EDX 分析および X 線回折結果

スキャン速度 30Hz、レーザ照射位置 SPCC 鋼側へ 1.0 mm の場合の溶接部剥離面の SEM 写真を Fig.10 に示し、Fig.11 に EDX 分析結果および X 線回折結果を示す。また、Fig.10 における点分析の結果を Table 3 に示す。SEM 写真より、剥離面は延性を示すディンプルを呈している。EDX 面分析お

Fig. 6 SEM photograph and EDX area analyses results of Fe and Al near interface layer in A6061 and SPCC joint.

Table 2 EDX point analysis results of interface layer of A6061 and SPCC joint.

Position in Fig.6	Chemical composition (at %)		
	Fe	Al	O
1	98.0	0.8	1.2
2	92.5	5.3	2.2
3	67.3	29.3	3.4
4	67.3	29.3	3.4
5	12.0	83.3	4.7
6	2.3	94.1	3.6
7	71.8	25.2	3.0
8	72.0	25.2	2.8

Fig.7 EDX results of Fe, Al and O elements and X-ray diffractometer results of peeled joint surfaces.

よび X 線回折結果から、SPCC 鋼側には Al が付着していることがわかった。また、FeO の形成は EDX 面分析および X 線回折結果からは認められなかった。点分析の結果から、点 3 および 4 の組成から FeAl が、点 5 および 6 の組成から Fe_3Al といった延性のある金属間化合物の生成が予想されたが、X 線回折結果からは金属間化合物の同定はできなかった。

以上の結果から、接合部付近のアルゴンガスシールドが不完全な場合には接合界面に FeO が生成して継手強度が低下したと判断され、機械的特性の良好な異材溶接継手を作

製するためには酸化の防止が重要であることが判明した。

3.3 接合強度に及ぼすローラ加圧力の影響

次にレーザ圧接における接合部の加圧力の影響を調べるために、スキャン速度 30 Hz、レーザ照射位置が合わせ面の中心でローラの加圧力を 82, 163, 245, 327 MPa と変化させてレーザ圧接実験を行った。Table 4 にレーザ圧接後の SPCC 鋼およびアルミニウム合金の板厚と圧下率を示す。アルミニウム合金側の圧下率が非常に高くなっているが、こ

Fig.8 Tensile shear test results of A6061 and SPCC joints in Ar gas atmosphere.

Fig.9 Peel test results of A6061 and SPCC joints made in Ar gas flows and atmosphere.

Fig.10 Fractured surfaces of A6061 and SPCC joint produced by laser pressure welding in Ar gas atmosphere.

Table 3 EDX point analysis results of interface layer in A6061 and SPCC joint produced in Ar gas atmosphere.

Position in Fig.10	Chemical composition (at %)		
	Fe	Al	O
1	1.8	96.3	1.9
2	1.8	97.1	1.1
3	65.2	34.8	0.0
4	41.3	58.7	0.0
5	70.9	28.8	0.3
6	76.6	23.4	0.0
7	88.7	11.3	0.0

EDX images of peeled surface on SPCC side

EDX images of peeled surface on A6061 side

X-ray diffraction patterns of peeled surfaces

Laser irradiation position along centerline

Fig.11 EDX area analyses results and X-ray diffraction patterns from peeled surfaces of laser pressure welded joint made in Ar gas atmosphere.

れは SPCC 鋼と A6061 との強度差が原因である。

3.3.1 引張せん断試験結果および剥離試験結果

ローラ加圧力 245 MPa で得られたレーザ圧接継手部の引張せん断試験片の写真を Fig. 12 に示す。破断がアルミニウム合金母材で起こっていることがわかる。次に、引張せん断試験結果および剥離試験結果をそれぞれ Fig.13 および Fig.14 にまとめて示す。引張せん断試験の結果、ローラ加圧力 82 MPa では、接合部からせん断破断をし、それ以外ではすべてアルミニウム合金母材から破断した。せん断破断をした接合面を観察したところ、接合されていたと推定される面積は 48 mm^2 程度であり、せん断強度は 42 MPa となった。これは A6061 合金のせん断強さの 44 % に相当する。一方、剥離試験では、剥離強度は、ローラ加圧力が 245 MPa (圧下率 46 %) まで増加するに従って高くなったが、325 MPa (圧下率 60 %) で低下した。特に、ローラ加圧力が 245 MPa 以上では、アルミニウム合金母材破断をする高い継手強度が得ることができた。なお、325 MPa で剥離強度が低下した原因は、高加圧力によりアルミニウム合金の板厚が薄くなったためと考えられる。

Table 4 Sheet thickness and % reduction values of SPCC, A6061 and their joints after laser pressure welding.
(%Reduction values are shown in parentheses).

Roller pressure (MPa)	Thickness, mm (% Reduction)		
	SPCC	A6061	Total
82	0.97 (3.0)	0.85 (15.0)	1.82 (9.0)
163	0.96 (4.0)	0.68 (32.0)	1.64 (18.0)
245	0.94 (6.0)	0.54 (46.0)	1.48 (26.0)
327	0.91 (9.0)	0.40 (60.0)	1.31 (34.5)

Laser power 1800 W
Laser beam scanning speed 30 Hz
Laser irradiation position Center
Roller pressure 245 MPa

Fig.12 Appearance of laser pressure welded joint subjected to tensile shear fracturing.

3.3.2 接合部断面の SEM 観察と EDX 分析結果

接合部の金属間化合物の種類と膜厚に及ぼすローラ加圧力の影響を調べるために、接合部断面の SEM 観察を行うとともに、EDX により接合界面に生成する金属間化合物相について検討した。Fig.15 にローラ加圧力 82 MPa と 327 MPa における接合部断面の SEM 写真、EDX 面分析結果および点分析結果を示す。SEM 写真および EDX 面分析結果から両条件とも、明確な化合物層は認められず、SEM 写真上のラインに沿って点分析を行ったところ、金属間化合物は界面 SPCC 鋼側で Fe_3Al が生成し、A6061 側では FeAl_3 の生成が推察された。その厚さは、接合部を数力所測定したところ、82 および 327 MPa ではそれぞれ約 $1.0 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$ および $0 \sim 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ と極めて薄いことが判明した。加圧力が増加することにより両金属板はより密着して、合金元素の拡散が促進

Fig.13 Effect of roller pressure on tensile shear test results of A6061 and SPCC joints produced in Ar gas atmosphere.

Fig.14 Effect of roller pressure on peel test results of A6061 and SPCC joints produced in Ar gas atmosphere.

Fig.15 EDX area and line analyses results indicating effect of roller pressure on formation of intermetallic phases.

され、金属間化合物層の厚さが増加することが予想されたが、ローラ加圧力が 327 MPa と高いとき、金属間化合物の厚さは薄かった。これは、ローラ加圧力が高い場合、発生した熱がローラへ拡散して接合部が急冷されたため、金属間化合物層の生成が抑制されたものと考えられる。

4. 結 言

レーザとローラを組み合わせたレーザ圧接を提案し、A6061 アルミニウム合金および SPCC 鋼の異材接合に関して基礎研究を行った。種々の条件のもと、レーザ圧接実験を行い、得られたレーザ圧接継手について、引張せん断試験および剥離試験を行った。また、接合部断面および剥離面の SEM 観察、EDX による面分析、点分析ならびに X 線回折を行い、接合界面に生成する金属間化合物と機械的性質との関係について検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 接合可能な条件を明らかにした。
- 2) 接合部のアルゴンガスシールドが不完全な場合、レーザによる加熱後、ローラにより加圧・接合前に SPCC 鋼側に FeO が形成し、アルミニウム合金側へはみ出すスパイク状の化合物が形成した。SPCC 鋼側表面に形成するこれら化合物により Fe と Al の相互拡散が阻害され、接合できないまたは強度が低下することが推察された。
- 3) アルゴンガス雰囲気中において、レーザスキャン速度 30 Hz、レーザ照射位置が合わせ面の中心であるとき、引張せん断試験、剥離試験ともにアルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。
- 4) レーザ圧接継手部の剥離強度は、アルミニウム合金板の圧下率が高くなるほど増加し、圧下率 46 % 以上でア

ルミニウム合金母材から破断する高い継手強度を得ることができた。なお、加圧力が高すぎると、アルミニウム合金の板厚が薄くなるため、強度低下が起こった。

参考文献

- 1) G. Sepold, E. Schubert and I. Zerner: Laser Beam Joining of Dissimilar Materials, IIW, IV (734) (1999), 1-10.
- 2) H. Hiraga, K. Fukatsu, K. Ogawa, M. Nakayama and Y. Mutoh: Nd:YAG Laser Welding of Pure Titanium to Stainless Steel, Quar. J. JWS, Vol.19, No.4 (2001), 717-726. (in Japanese)
- 3) M. Kutsuna, M. Rathod, A. Ammar: Laser Roll Bonding of Mild Steel to Aluminum and Control of Intermetallic Compound Layer, Proc. ICALEO 2002, Section C - Photonics Microfabrication, CD, (2002)
- 4) M. Rathod, M. Kutsuna: Laser Roll Bonding of A5052 Aluminium Alloy and SPCC Steel, Quar. J. JWS, Vol.21, No.2 (2003), 282-294. (in Japanese)
- 5) G. Sepold, M. Kreimeyer: Joining of Dissimilar Materials, Proceedings of SPIE, Vol.4831(2003), 526-533.
- 6) S. Katayama, R. Usui and A. Matsunawa: YAG Laser Welding of Steel to Aluminum, Proc. of the 5th Int. Conf. 'on Trends in Welding Research, Eds. by J. M. Vitek, et al., ASM & AWS, (1998), 467-472.
- 7) S. Katayama and M. Mizutani, Laser One-Pass Welding Utilizing Special Lap- and Butt-Joint of Dissimilar Aluminum and Steel, Proc. ICALEO 2003, LIA, Section E - Forming, Cutting, Drilling and Other Applications, CD, No. 1401, (2003).
- 8) G. Spold, R. Rothe and K. Teske: Laser Beam Pressure Welding - A New Welding Technique, Proceedings of LAMP'87 (Osaka), HTSJ and JLPS, (1987), 151-156.
- 9) M. Yasuyama, K. Ogawa and T. Taka: Spot Welding of Aluminium and Steel Sheet with Insert of aluminium Clad Steel Sheet - Part I, Quar. J. JWS, Vol.14, No.2 (1996), 314-320. (in Japanese)
- 10) H. Oikawa, T. Saito, T. Nagase and T. Kiriya: Effect of Oxide Film on Solid State Bonding of Steel and Aluminium Sheet, J. Iron & Steel Inst, Vol.83, No.10 (1997), 629-634. (in Japanese)