

## SPCC鋼とアルミニウム合金のレーザーロール溶接施工

沓名 宗春\*、 尾崎 仁志\*\*

\* (株) 最新レーザー技術研究センター

\*\* 三重 大学

### 1. 緒言

地球の温暖化を防止する対策として、自動車産業ではエンジンが排出する炭酸ガスの低減対策として、エンジンの改良、燃費向上と並行して、車体の軽量化による燃費向上CO<sub>2</sub>削減対策が進んでいる。本研究では後者の車体軽量化に関して、特性の比重の異なる材料、例えば低炭素鋼と軽金属のアルミニウム合金などを車体の適材適所に配置したハイブリッド構造部材を実現するため、名古屋大学で開発したレーザーロール溶接（特許第3535152号）を適用するときのレーザーロール溶接の施工条件について検討した。すなわち、これらの異種材料を高い信頼性と生産性で接合する接合技術について研究した。

現状では、熔融溶接では脆性な金属間化合物が生成するため接合が困難であり、リベットやメカニカルクリンチ方法などの機械的接合法、またはこれらと接着剤とを併用した方法がアルミニウム合金と鋼材の接合に用いられているが、大幅なコスト増、生産上の制約、およびリサイクル性の問題がある。そこで、信頼性の高いレーザーロール溶接が可能か検討した。

### 2 レーザロール溶接の開発と今までの研究

すでに、名古屋大学で平成10年ころより、アルミニウム合金とSPCC鋼を接合する研究を行ってきた。はじめはアルミニウム合金とSPCC鋼の接合界面でどのような反応が起こるか加圧力を変化させ、600℃以下の加熱で、保持時間を0秒から10000秒まで変化させ、金属間化合物の生成過程を注意深く観察した。また、生じる生成物の機械的性質についても調査した。その結果、図1に示すFe-Al系平衡状態図において示されるように、図2に示すような延性を示す金属間化合物FeAlまたはFe<sub>3</sub>Alの生成は、600℃以下の加熱または熱サイクルでは困難であり、図3に示すように、400℃以上に加熱すると脆性なFeAl<sub>3</sub>またはFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>が非常に短時間に数μmあるいは数10μm生成することが確認された。

1999年ごろ、ドイツのBIAS (Bremen Institute for Application of Beam) 研究所よりアルミニウムと低炭素鋼のレーザー溶接の報告があった[3][4]。この研究ではレーザー加熱部の温度分布を解析し、

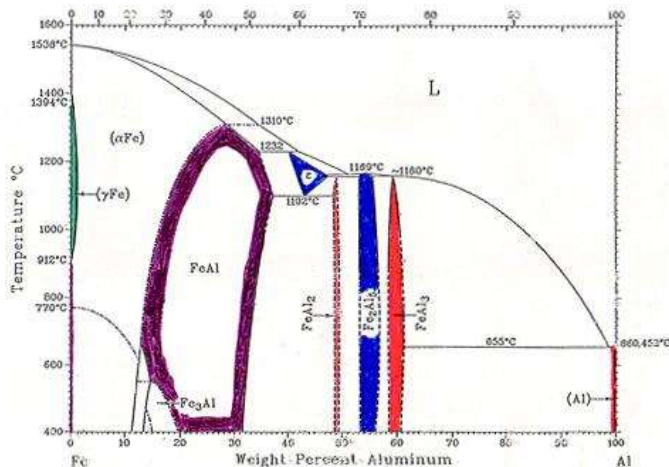
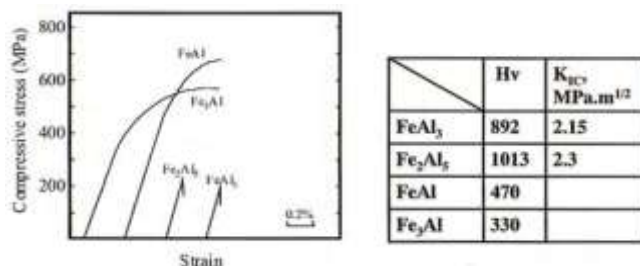


図1 Fe-Al系平衡状態図 (Hansen)

図4のように小入熱でレーザー加熱し、これら金属間化合物の

図2 Fe-Al系合金に生じる金属間化合物の



機械的性質 (泰山ら) [1]

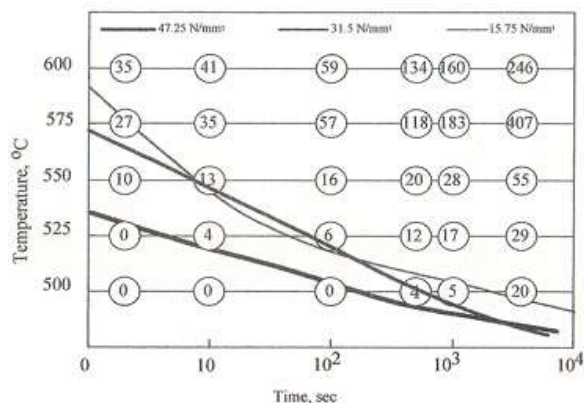


図3 加圧力を変えた時の金属間化合物層の厚さの変化 (沓名, M. Rathod) [2]

厚さを8ないし10μm以下に制御することによりA6061板とSPCC鋼板を接合し、自動車のボンネットやルーフパネルの軽量化を実現しようとの試みであった。

その頃、沓名研究室ではFeAlまたはFe<sub>3</sub>Alがより延性および韌性に富むことを文献より知った[1]。そこで、これらの金属間化合物を得る条件を検討した結果、BIASの研究よりより高い温度（約1200℃以上）に加熱しないと延性に富む化合物は得られないと思い、延性に富む化合物は発生させるためには図5に示すようなレーザーロール溶接法を考案した。この方法は図6に示すように、従来の溶接法の分類（熔融溶接、固相接合、ろう付）にない溶接法で、このレーザーロール溶接法は片面熔融溶接法とも言える溶接法である。

さらに、このレーザーロール溶接が工業的に応用できるかその溶接施工方法を検討した。すなわち、熔融溶接が困難とされてきたアルミニウム合金と鋼材とのレーザーロール溶接を3kWシングルモードのファイバーレーザー装置を用いてを行い、その接合界面に生成する金属間化合物の組成状況を制御するとともに、望ましい金属間化合物の生成を確認し、その継手性能についても調査した。

この方法はドイツのブレーメンビーム応用研究所（BIAS）のSepold氏らにより考案され<sup>4)</sup>、アルミニウムと鋼のレーザー溶接法と類似しているが、根本的な違いは加熱温度が約1200℃と高いことと、冷却が速いことである。そこで、2002年に特許申請したところと、アルミニウムとSPCC鋼などの異材継手をレーザーロール溶接する方法として、特許第3535152号が公告された。この方法でアルミニウム合金と低炭素鋼[5][6]、銅と低炭素鋼[7]、チタンと低炭素鋼[8]、アルミニウム合金とチタン[9]

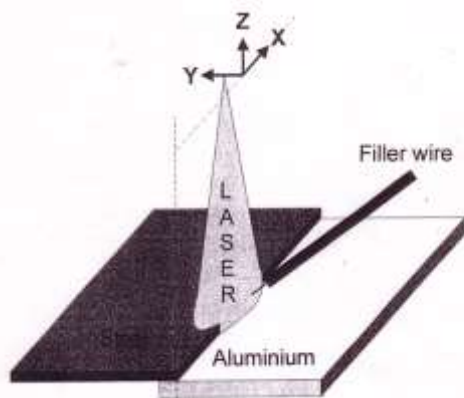
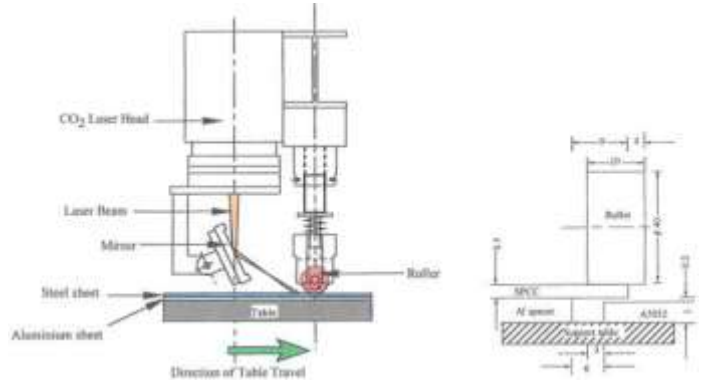


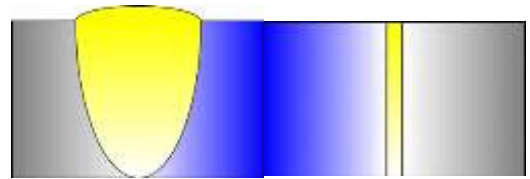
図4 BIASが開発したレーザー異材溶接法[3]

の異種金属継手の溶接について報告している。すでに過去の研究で、接合界面の金属間化合物の生成相、その層の厚さの変化などを調査し、脆性なFeAl<sub>3</sub>の生成を避ける条件について検討してきた。すなわち、炭素鋼板の表面を約1300℃にレーザーで加熱した後、その鋼の下面をローラでアル

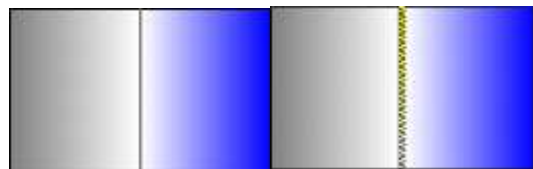


ミニウムに圧接して、接合した異材継手はその接合界面に、  
2な

(a) 側面図 (b) 正面図  
図5 名古屋大学で開発したレーザーロール溶接法



(a) 熔融溶接 (b) ろう付



(c) 固相接合 (d) 片面熔融溶接

図6 各種溶接法の分類方法（沓名）

いし10μmの厚さの金属間化合物層（最大5種類）が生成するが、良性の金属間化合物であるFe<sub>3</sub>Al、またはFeAlが生じる溶接条件を選ぶ必要がある。もし、悪性のFeAl<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、またはFeAl<sub>3</sub>が多く生じると、脆い継手となり、継手強度も低い。たとえば、A6061板(t=1.0mm)とSPCC鋼板((t=0.5mm)の異種金属継手では、図7に示すように破断強度が十分で、炭素鋼母材で破断した。SPCC鋼とアルミニウムのエリクセン試験でも図8に示すようにアルミニウム母材で亀裂が発生している。この技術で自動車のボンネットやルーフパネルを鋼とアルミニウムのハイブリッド構造で製造することができないか、今回はその溶接を溶接施工面から検討した。



図7 A6061板とSPCC鋼板のレーザーロール溶接継手

(SPCC鋼母材で破断)

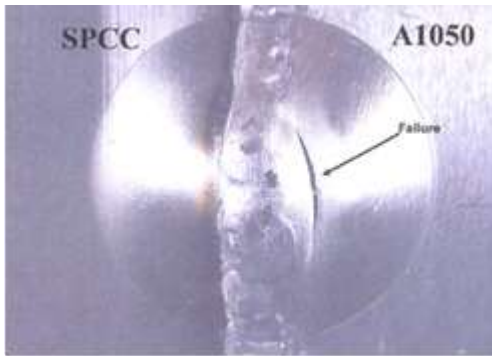


図8 SPCC鋼とアルミニウムの異材継手のエリクセン試験結果

このように、アルミニウムと炭素鋼間に生成する金属間化合物 ( $Fe_3Al$ ,  $FeAl$ ,  $FeAl_2$ ,  $Fe_2Al_5$ ,  $FeAl_3$ ) の機械的性質に注目し、より延性のある鉄リッチの化合物である $Fe_3Al$ ,  $FeAl$  を生成するレーザー溶接施工条件を求めることにより、健全な継手を造ることを目指している。なお、本レーザーロール溶接法はすでに、米国金属学会のAMS HandbookのVol. 1. 6 Aに詳しく記載されている<sup>10)</sup>。

## 2. SPCC鋼とA6022合金のレーザーロール溶接実験

レーザーロール溶接継手の品質を確保するには種々の特性要因を検討して溶接施工する必要がある。今回とくに、SPCC鋼とA6022合金を対象継手として、3kWシングルモードファイバーレーザーとレーザーロール溶接機を用いてレーザーロール溶接する際の、レーザー溶接条件、表面前処理および裏当て金の材質について検討した。これらの結果について報告する。

### 2.1 供試材

供試材として、SPCC鋼は亜鉛メッキしたGA材で、板厚0.7mmおよび1.0mmで、寸法23mm x 200mmおよび40mm x 200mmの試験片を用いた。溶接前に、接合面を#120のエメリー紙で研磨し、反対の面にグラファイト塗布をレーザー吸収剤として塗布した。他方、アルミニウム合金は自動車用パネルに適用されるA6022およびA6K21合金を用いた。板厚1.2mmで、寸法23mm x 200mmおよび40mm x 200mmのものを用いた。溶接前に、接合面を#400のエメリー紙で研磨し、その面にアルミニウムのろう付用フラックスFL-7を塗布した試験片と塗布しない試験片を準備した。これらの接合面

実験した。

### 2.2 用いたレーザーロール溶接装置

用いたレーザーロール溶接装置は3kWのシングルモードファイバーレーザー装置、1500Nまで、加圧が可能な加工テーブルおよびこれらの制御盤からなっており、著者らが開発した装置である、図9はこの装置の外観と試験片のセット状況を示す。アルミニウム合金は下に、SPCC鋼は上にセットして、レーザーでは上部のSPCC鋼のみを加熱する。鋼表面が約1300℃~1400℃になるようにレーザー加熱する。レーザー装置としてシングルモードファイバーを用いたのはより効果的に急加熱、急冷させるためである。ビームをデフォーカスし、鋼表面では約7mm x 11mmの楕円になるようにした。加熱部位はロール直下から約10~20mmの部位とした。加圧ローラでSPCC鋼をアルミニウム合金板に所定の圧力で押さえ付けて走行し、溶接を終える。この時の加圧力を100から800Nまで変化させ実験した。なお今回はアルミニウム合金板の下に置いた裏当て金の種類を、ステンレス鋼、炭素鋼、アルミニウム合金、純銅と変えてアルミニウム合金の冷却速度を変えてレーザーロール溶接を試みた。



### Laser Roll Welding Facility



を約7mm重ねて、200mm長さの重ね継手として



(a) 3 k W シングルモードファイバーレーザー

(

(b) レーザロール溶接装置での溶接状況

図9 レーザロール溶接装置の概要

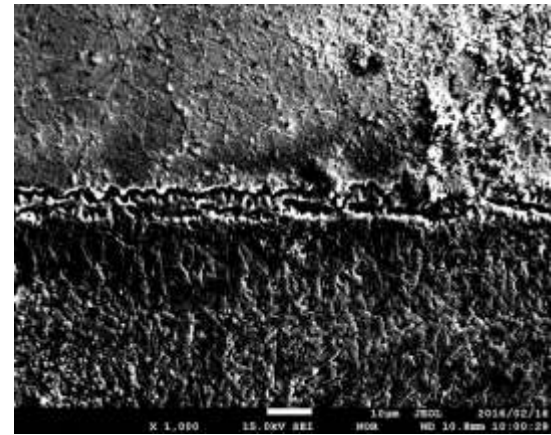
### 2.3 溶接施工条件

はじめに、ろう付用フラックスの塗布の影響について実験を行った。その時の溶接施工条件を表1に示す。AT-1~AT-28はSPCC鋼板厚1.0mmとA6022との組み合わせで、AT-1およびAT-2はフラックスなしで溶接したものである。接合状態が良くないので、他の試験片はすべて、フラックスありで溶接した。

表1 レーザロール溶接条件(その1)

試験片No.	レーザー出力 (W)	焦点はずし距離Df (mm)	走行速度 (mm/sec)	加圧力 (N)	シールドガス及び流量 Can. after	備考
AT-1	2200	16.5	15	100	Ar 15+15	Fluxなし 鋼裏当て金
AT-2	2200	16.5	20	100	Ar 15+15	Fluxなし 鋼裏当て金
AT-3	2100	16.5	13	800	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-9	2100	16.5	14	800	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-10	2100	16.5	15	800	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-11	2100	16.5	16	800	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-12	2100	16.5	17	800	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-25	2200	16.7	8	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-26	2200	16.7	10	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-27	2200	16.7	12	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-28	2200	16.7	14	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
FA-2	2200	16.7	15	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
FA-4	2200	16.7	12	100	Ar 15+15	Fluxあり 鋼裏当て金
FA-5	2200	16.7	12	100	Ar 15+15	Fluxあり B18裏当て金
FA-6	2200	16.7	12	100	Ar 15+15	Fluxあり A1裏当て金
AK-25	2200	16.7	8	100	Ar 15+15	Fluxあり A1裏当て金
AK-26	2200	16.7	10	100	Ar 15+15	Fluxあり A1裏当て金
AK-27	2200	16.7	12	100	Ar 15+15	Fluxあり A1裏当て金

FA-2~FA-6は裏当て金を変化させて溶接した場合の実験で、ここではSPCC鋼の板厚は0.7mmのものを用いた。AK-25~27はSPCC1.0mmとA6K21合金1.2mmを溶接した試験片である。



### 2.4 実験結果

#### および考察

レーザーロール溶接継手の断面マクロ写真の一例を図10に示す。裏面のアルミニウム合金は融点が約550℃くらいと低いので、1200℃の鋼との接触で接触面が溶融し、先端部がSPCC鋼に濡れ広がっている。よって合せ面が7mmであったものが接合面としては約10mm以上に広がっている。よって、重ね継手が突合せ継手ようになった。

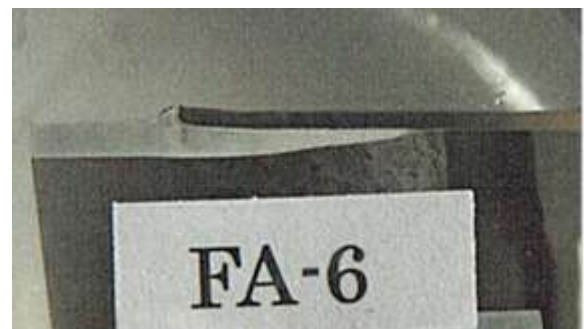


図10 FA-6継手の断面マクロ写真 (下部がアルミニウム合金)

この接合界面には図11に示すように、厚さ10μmくらいの金属間化合物層が生成している。

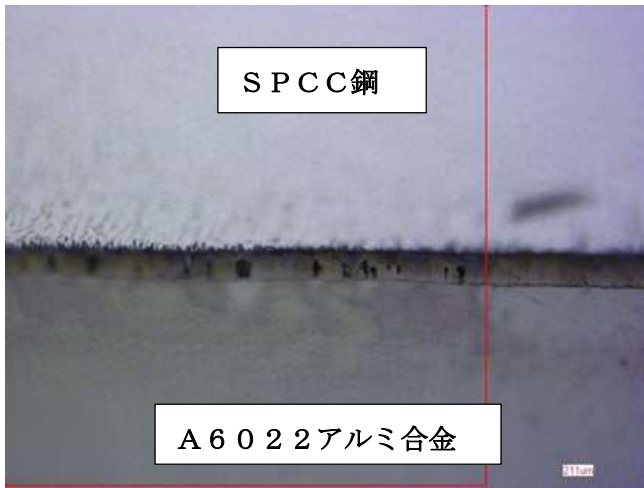


図11 継手FA-2の接合界面の金属間化合物層

図11に観察される界面の金属間化合物層は2層になっており、上層部はボイドがないが、下層部にはカーケンダル効果のためか、四角のボイド状の黒点が多数観察される。

上層部はボイドのないFeAlであり、下層部は鉄が欠乏したFeAl<sub>3</sub>またはFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>と思われる。

次に、接合界面に生成した金属間化合物を調査するために、EPMA線分析を行った。その結果を図12及び13に示す。

図12 EPMA線分析した接合界面（中央の縦線部）

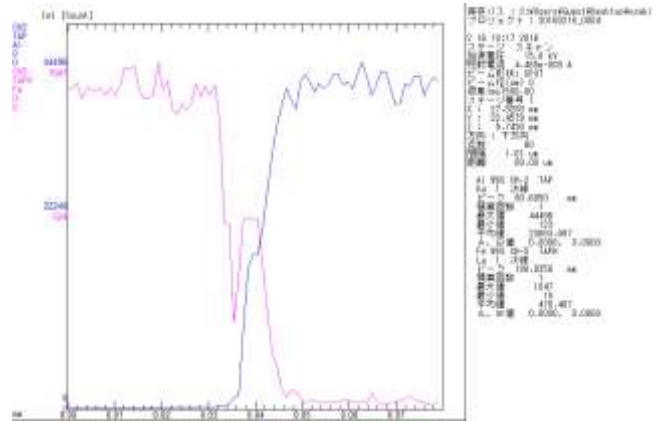


図13 図12の縦線部のEPMA線分析結果

このEMPMAの分析結果より、FA-2継手の接合界面の幅は約10μm程度であるが、その中にはFeAlが主に生成している。

さらに、レーザーロール溶接継手の引張試験を実施し、継手の性能を評価した。

レーザーロール溶接継手より、80mm x 20mmの引張試験片を採取し、インストロン万能試験機で引張試験を実施した。その結果を表22に示す。

ここで、注目すべきことは裏当て金を種々変えて、アルミニウム合金の冷却速度を高めるほど継手強度が高くなっている点である。銅板を用いたFA-2継手は図14に示すようにSPCC鋼の母材で破断し、330MPaの強度を示した、異種金属継手としては十分な強度である。



図14 継手引張試験後のレーザーロール溶接継手（母材破断。破断強度 330MPa）

参考文献

1) M.Yasuyama, K.Ogawa and T.Taka : Spot welding of aluminium and steel sheet with insert of aluminium cold steel sheet -Part 1- Quar.Jour.JWS Vol.14, No.2(1996), p314-320(in Japanese)

- 2) 杓名, M.Rathod : SPCC とアルミニウム合金のレーザーロール溶接, レーザ応用工学研究所, 報告書, 2002年3月28日
- 3) E.Schubert, G.Sepold : SPIE Volume 3097 (1997)
- 4) E.Schbert, I.Zerner, G.Sepold : IIW Doc. IV-734-99 (1999)
- 5) 杓名, M.Rathod : 溶接学会論文集, 第21集 (2003-1)
- 6) M.Kutsuna and M.J.Rathod : Welding Journal, 83-1 (2004)
- 7) 杓名, 西村 : 溶接学会全国大会講演概要, 第73集 (2003-10) , 292-293
- 8) 杓名, 市岡 : 溶接学会全国大会講演概要, 第75集 (2004-9) , 192-193
- 9) 杓名、尾崎、林、ラトウド・M  
溶接学会 東海支部 第14回講習会
- 9) ASMI Handbook, Vol.6A, pp 719-724

試験片No.	レーザー出力 (W)	焦点はずし距離Df (mm)	走行速度 mm/sec (m/min)	加圧力 (N)	継手強度 (MPa)	備 考
AT-25	2200	167	8	100	169	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-26	2200	167	10	100	153	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-27	2200	167	12	100	119	Fluxあり 鋼裏当て金
AT-28	2200	167	14	100	179	Fluxあり 鋼裏当て金
AK-25	2200	167	8	100	102	Fluxあり A1裏当て金
AK-26	2200	167	10	100	168	Fluxあり A1裏当て金
AK-27	2200	167	12	100	215	Fluxあり A1裏当て金
FA-2	2200	167	15	100	330	Fluxあり 鋼裏当て金
FA-4	2200	167	12	100	126	Fluxあり 鋼裏当て金
FA-5	2200	167	12	100	153	Fluxあり SUS裏当て金
FA-6	2200	167	12	100	294	Fluxあり A1裏当て金

表2 継手引張試験結果