

レーザ異材溶接

大阪大学 接合科学研究所

片山 聖二

Laser Welding of Dissimilar Materials

by KATAYAMA Seiji

キーワード：レーザ溶接、異材、金属間化合物 **Keywords:** laser welding, dissimilar materials, intermetallic compounds

1. はじめに

レーザ溶接法は、各種溶接・接合法のなかで、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・高生産性の溶接・接合法として認められつつある。一方、工業製品の高機能化、高性能化、高品質化などへの要望から、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、異種材料の熔融溶接の場合、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、溶接が非常に困難であることが知られている。しかし、最近、高性能な YAG レーザや半導体レーザを用いて鉄鋼材料とアルミニウム合金または銅などとの溶接が種々検討され、良好な溶接特性が得られることが報告されている¹⁻¹⁵⁾。そこで、本フォーラムでは、レーザ異材溶接の最近の主要な成果を紹介する。

2. レーザ異材溶接例とその特徴

最近、異種金属材料のレーザ溶接が種々検討されている¹⁻¹⁴⁾。その組合せと適用レーザや溶接条件、特徴などをまとめて表 1 に示す。CO₂レーザ、YAG レーザまたは半導体レーザが対象材料の種類と板厚や継手形状に応じて連続またはパルス発振の条件で利用されている。一般に、レーザのパワーは低く、薄板の検討例が多い。なお、通常のパルス YAG レーザによる溶接の場合、純金属や共晶合金に近い組成以外の熔融溶接部では高温割れが起こりやすいので、溶融部の組成に特に注意を払う必要がある。

3. 異種金属材料のレーザ溶接

3. 1 鉄鋼材料と銅または銅合金

鉄鋼材料と銅のレーザ溶接として、オーステナイト (γ) 系ステンレス鋼と純銅の接合について、突合せ面に対して CO₂ レーザまたは YAG レーザの照射位置を種々変化させ、また、シールドガスも Ar、He、N₂ および空気と変化させて検討されている¹⁻⁴⁾。過去に、Au ろう粉末¹⁴⁾ や純 Ni フィラー材¹⁶⁾ を用いた例があるが、最近はフィラー材を用いない場合が多い¹⁻⁴⁾。管の接合では、レーザを鉄鋼側に照射し、回転により溶接部に圧縮応力が働くように支持棒も含めて工夫されている³⁾。

Ar ガス中で作製された ASTM 304L (1.5 mm^t) 板と純 Cu (1 mm^t) 板の溶接ビード部の横断面³⁾を図 1 に示す。ステンレス鋼側の上部が広く溶けているが、ビード



図 1 ASTM 304L と純銅のレーザ 突合せ溶接部の断面写

表1 異材の組合せ例と適用レーザ、溶接条件およびその特徴¹⁻¹⁴⁾

種類	異材の組合せ	板厚 (mm)	継手形式	レーザの種類	溶接条件	特徴	文献 (年)
鉄鋼材料と銅合金	AISI 304 DHP Cu	2 2	突合せ	CO ₂	2 kW, 20 mm/s Ar, He, N ₂ + O ₂ gas	溶込みに O ₂ の効果大, ミクロキャビティ形成	1 1986
	AISI 304 99.9 Cu	3.2 3.2	突合せ	CO ₂	3 kW, 25 mm/s Ar, He, Air gas	照射位置重要, Air 貫通, Ar, He 部分溶込み	2 1993
	ASTM304L Cu	0.7 0.8	突合せ	CO ₂	1.3 kW, 1 m/min Ar, He, N ₂ gas	He ではビード幅狭く, 割れ多い. 引張試験では Cu で破断.	3 1997
	ASTM304L Cu	1.5 1	突合せ	CO ₂	830 W, 1 m/min Ar, He, N ₂ gas	管状溶接, 継手や支持棒工夫	
	AISI 316 無酸素銅		突合せ	YAG	495 W (パルス), f=80 mm, He gas	Cu にレーザ照射 部分溶込み	4 2001
	SUS 304 70/30 黄銅	0.5 0.6	重ね	CO ₂	1.2~2.9 kW, Ar gas 33.3~100 mm/s	板, パイプ, 304 側から照射, 再溶融処理で割れ除去	5 1999
鉄鋼とチタン	SUS 304 Ti (第1種)	0.4 0.3	重ね	YAG	3~12 J (パルス), 2.5, 10 mm/s, Ar 0, +2 mm (f=100 mm)	板, パイプ, Ti 側から照射の方が広い条件範囲で良好	6 2001
鉄鋼とアルミニウム合金	低炭素鋼 A6xxx	0.8 1.2	重ね	半導体	1.4 kW, 0.7 m/min	機械的特性良好	7 1998
	低炭素鋼 A6xxx	0.8 1.2	重ね	YAG	1.6 kW, 焦点はずし (8 mm 直径)	機械的特性 (引張強度) 良好	8 2001
	冷間圧延鋼 A5052P-0	1 1	重ね	YAG	1.5 kW (連続, パルス変調), f=68.5 mm 15~60 mm/s	鉄側照射により, せん断引張荷重大	9 1998
	99.8%Fe A1050	0.8 1	重ね	YAG	1.5 kW (連続), Ar, 焦点位置 f=100 mm, 40~80 mm/s	鉄板側から照射 Al の溶融抑制で せん断引張荷重大	10 1998
	SUS 304 A5182	1 1	重ね	YAG	1.5 kW (連続), Ar, 表面焦点位置, f= 100 mm, 30~70 mm/s	SUS 304 側から照射 合金の溶融抑制で せん断引張荷重大	
	SPCC A5052	2 3	突合せ+重ね	YAG	1.8~3 kW, Ar, 25 & 58.3 mm/s	突合せと重ね同時溶接, 鉄側に照射, 突合せ部の Al 溶融, 底部は重ね溶接	11 2000
	SPCC A5052	0.5 1	重ね	CO ₂	1.5 kW (連続), 1.2~2 m/min	ロール圧延を併用	12 2001
鉄鋼とマグネシウム	SPCC (SUS 304) AZ31	1.2 (2) 3	突合せ	YAG	1.2 kW (連続), 15 (10) mm/s	鉄鋼側にレーザ照射の方が広い条件範囲で特性良好	13 2001
チタンとアルミ	Ti6Al4V AlMg0.4Si1.2	0.8 1.2	重ね	YAG	1.6 kW, 焦点はずし (8 mm 直径)	機械的特性良好, A6xxx 母材破断 (220 MPa)	8 2001
その他	モネル AISI 316	薄管	突合せ	YAG	パルス	インコネル 82 添加材利用で割れ防止	14 1987
	モネル Be 銅	薄管	突合せ	YAG	パルス (ニッケル 61 添加材では割れ発生)	BAu-4 粉末ろう材利用で割れ防止	
	A6061 Be 銅	薄管	突合せ	YAG	パルス	A4043 添加材で割れ防止	

幅が比較的狭くて割れのない溶接部が作製されている。このようなビード幅の狭い接合は、レーザや電子ビームなどの高パワー密度熱源による溶接の特徴である。一般に、鉄・低炭素鋼やステンレス鋼のレーザ溶接は比較的容易であるが、純銅は高光反射率と高熱伝導（拡散）率のためにレーザ溶融が困難である。したがって、連続 CO₂ レーザ溶接の場合は、ステンレス鋼の方を十分に溶かして純銅を少量溶かすことにより良好な溶接部が作製されている¹⁻³⁾。なお、割れない溶接部が作製できるシールドガスについては、論文によって異なった結果^{2, 3)}が報告されており、異種材の溶融割合から考察する必要がある。このような継手の引張試験では、一般に銅のHAZにおいて軟化が起こり、破断するが、比較的高い強度が得られている。

一方、高ピークパワー発振が可能なパルス YAG レーザによる溶接では、逆に、銅を溶かすことができ、ステンレス鋼の溶融を抑えて割れのない溶接金属部が得られている⁴⁾。しかし、ステンレス鋼のHAZではCu融液の侵入による割れが発生しているようである。また、パルスレーザを主に AISI 316 鋼の方に照射すると、溶接金属部に大きな割れが発生する⁴⁾ので、注意が必要である。

鉄鋼と銅の異材溶接の場合、Fe-Cu 2 元系状態図によると、金属間化合物は生成しないが、両者を溶融・混合させると、約 10~95 %Cu の組成で初晶 γ -Fe 凝固の固液共存域が広い融液となるため、凝固割れが起こりやすいことが推察される。また、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、銅が混入されると、 γ 相が生成しやすくなり、初晶 γ 相凝固を行うと、P、S などの不純物元素が結晶粒界にミクロ偏析しやすくなるために、凝固割れが起こりやすくなる¹⁷⁾。さらに、鉄鋼材料側の熱影響部（HAZ）に引張応力が付加されていると銅の融液が鉄鋼材料の結晶粒界に侵入し、液体金属脆化割れが起こる可能性がある。したがって、鉄鋼材料と銅の異材接合では上述の 3 点の割れ発生に注意を払う必要がある。

気化器部品を構成する SUS 304 と 70Cu-30Zn 黄銅のパイプ同士の接合に SUS 304 側からレーザを照射する重ね溶接が検討されている⁶⁾。下板の黄銅の溶融量が多いと、ステンレス鋼側の溶融部の結晶粒界に Cu が膜状に濃化し、一部の粒界には割れも認められている。一方、黄銅の溶融量が少ない溶接条件では割れのない接合が可能であること、SUS 304 側溶接部の表面を再溶融処理を行うことにより、割れを除去し、リークが抑制されて密閉性が確保されることなどが明らかにされている。

鉄鋼材料と銅合金のレーザ溶接では、どちらか一方の金属を多く溶かし、他方の溶融を最小限に抑える方策が重要である。なお、レーザは鉄鋼材料を溶かすのに利用するのが有利である。

3. 2 鉄鋼材料とアルミニウム合金

使用量の多い鉄鋼材料と軽量のアルミニウム（以下、Al と記す）合金の異材接合は現在最も注目されている。

YAG レーザまたは半導体レーザを用いて、低炭素鋼と A6xxx 合金薄板の接合が試みられ、機械的特性の良好な継手が得られたことが報告されている^{7, 8, 15)}。異材接合用として特別な押さえジグが開発されている。半導体レーザによる接合部の例を図 2⁷⁾に示す。レーザは鋼と Al 合金に同時に照射されているが、高融点材料（鋼）を溶融させず、Al 合金のみを溶融させる方法であり、金属間化合物層を極めて薄くできるという特徴がある。ただし、Al 合金の濡れをよくするため鋼板も溶融しない程度にレーザで高温まで加熱されている。機械的特性の観点から、金属間化合物層の厚さは 10 μ m 以下に制御されている。Fe-Al 2 系合金の平衡状態図を図 3 に示す。Fe-Al 系金属間化合物の物性について検討された結果¹⁸⁾によると、FeAl および Fe₃Al 相は比較的高い延性・靱性を有するが、FeAl₃ および Fe₂Al₅ 相は高硬度で脆性的な相であることが明らかにされているので、Al 成分が多い側の金属間化合物（後者）の生成量を少なくするとよいことになる。

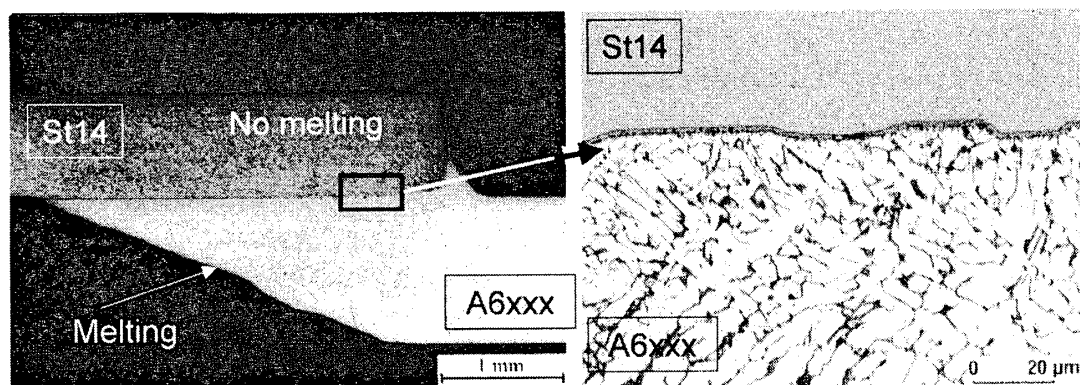


図2 低炭素鋼と A6xxx 系合金の半導体レーザ溶接部の断面マクロ写真および重ね接合部の境界近傍のミクロ組織

低炭素鋼(St14)と Al 合金のレーザ異材継手は、引張強度が 128~198 MPa (平均 171 MPa) であり、エリクセン値が 2.6~3.8 で Al 同士の継手(6061 合金: 6.3~6.9; 6060 合金: 3.65~4.27) より 30%低い程度であり、疲労特性も良好である^{8, 15)}。さらに、テーラードブランク溶接の例や AlSi12 フィラーワイヤを用いることにより、有効なレーザ溶接条件の裕度が拡大することが明らかにされている¹⁵⁾。なお、この方法では、鋼板を溶融させないため、適用板厚は約 1.5 mm 以下に限定される。

一方、上板の鉄や低炭素鋼またはステンレス鋼をレーザで溶融させ、下板の Al または Al 合金の溶融を適当(約 0.1~0.2 mm 程度の深さ)に制御する重ね溶接法^{9, 10)}でも、高いせん断強度が得られている。この場合、溶融部の大部分は Al が数%~20%程度に固溶された組成で、若干硬化した鉄系の相となっており、金属間化合物は溶融部と Al 合金母材との境界部に沿って薄く生成する¹⁰⁾。このように Al 合金の溶融を制御できると割れのない接合部が生成でき、引張せん断試験では、溶融部が Al 合金に対してアンカー効果のように作用し、高強度を示す。しかし、引裂き力に対しては弱いという欠点がある。

ところで、鉄や炭素鋼板にレーザを照射し、Al 合金のみを溶融させる突合せ継手溶接では、薄い金属間化合物で接合されるが、一部、気孔や融合不良部があるため、十分な引張強度が得られず、衝撃強度も低い。

そこで、重ね溶接法と同様に鉄鋼材料をレーザで溶融させ、その熱で Al 合金を溶融させて重ね溶接と突合せ溶接を同時に 1 パスでレーザ接合する方法も考案されている¹¹⁾。その接合部の模式図と接合例を図 4¹¹⁾に示す。この場合、重ね溶接部と突合せ溶接部の欠点が補完され、十分な機械的特性が得られている。

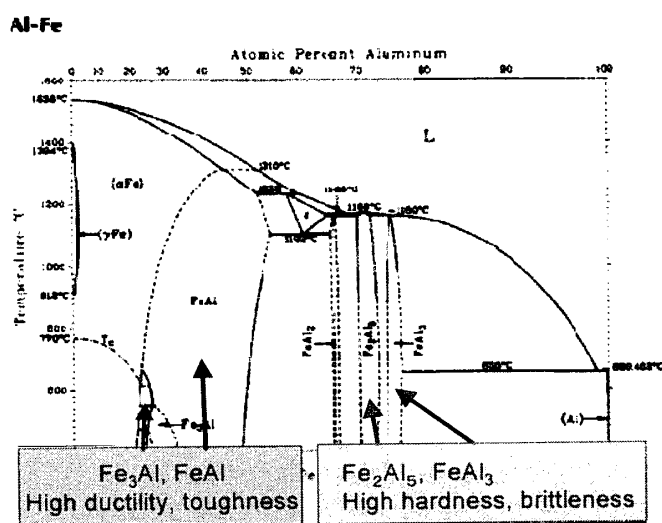


図3 Fe-Al 2元系状態図と金属間化合物の特性

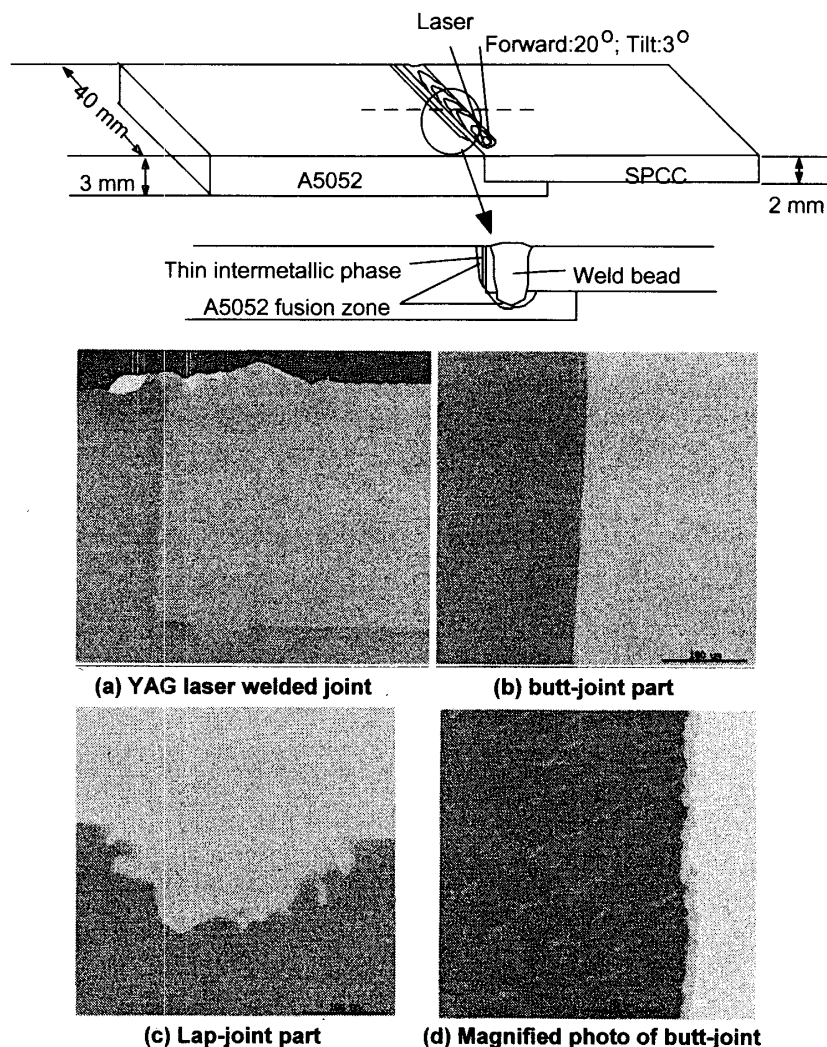


図4 低炭素鋼とアルミニウム合金のレーザー重ね・突合せ
同時1パス溶接法と溶接部のSEM断面写真

3. 3 その他の合金の組合せ

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 と純 Ti 薄板のパルス Nd:YAG レーザによる重ね溶接では、Ti を上板にする方が金属間化合物の生成が抑制され、広い溶接条件範囲で高い引張せん断強度が得られている⁶⁾。

Ti 合金 (Ti6Al4V) と Al 合金 (AlMg0.4Si1.2) のレーザー重ね接合では、Al 合金のみを溶融させた場合、その溶融部と Ti 合金板との境界に薄い金属間化合物層が生成している⁸⁾。この接合は低炭素鋼と Al 合金の場合より容易であり、引張試験では Al 合金の母材で破断し、220 MPa の破壊応力が得られている⁸⁾。

鉄鋼材料と Mg 合金とのレーザー溶接では、ビーム照射位置を種々変化させて照射位置と接合性および継手強度との関係について検討されている¹³⁾。その接合部の写真を図5に示す。良好な接合強度が得られ

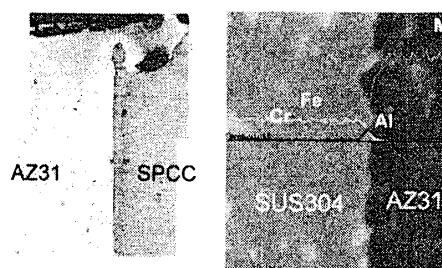


図5 鉄鋼材料と Mg 合金のレーザー溶接部界面近傍の写真と EDX 分析結果

るのは、鉄鋼側にレーザを照射して溶融させ、その熱で低融点の Mg 合金を溶融させた場合である。なお、Mg との接合面において鉄鋼材料が溶融しない方が強度は高い。また、Fe と Mg の溶接では金属間化合物が形成しないので、継手は鋼と Mg 合金の溶融部を通じて相互拡散で接合されるため、適切に溶接された場合、その引張強度はかなり高いことが判明した。

4. おわりに

レーザ異材接合では、通常の溶接と同様に、突合せ部や重ね部において異材を共に大きく溶融させて混合させると、固液共存域が広い組成や金属間化合物が生成する組成の領域が広範囲に形成し、高温割れが発生する。このため、異材接合では、一方の材料を溶かし、他方の溶融を抑制するような溶接法を採用することである。また、レーザとしては、高輝度のレーザが一般に有利であるが、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの薄板の溶接やろう付を利用する溶接では、パワー密度があまり高くない条件で半導体レーザも利用できる。特に、薄板になると、入熱の制御の点から他の熱源が利用できなくなり、パルス (YAG) レーザが有利になる。ただし、パルスレーザの場合、高温割れが起こりやすいので、溶融部の組成に注意を払い、割れやすい組成にならないようにする必要がある。

レーザ異材溶接技術に関して、研究・検討例は蓄積されつつあるが、実用化例はあまり報告されていない。しかし、自動車、航空機、車両、船舶、真空容器、電子・電気機器分野等では異材接合の適用が期待されており、本解説が今後の展開に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) M. Dell' Erba, et al.: Proc. ICALEO ' 86 (Laser Materials Processing), Virginia, Nov. (1986), pp. 57-62.
- 2) S. Copinathan, et al.: Proc. ICALEO ' 93, Orlando, (1993), pp. 661-671.
- 3) C. Lampa, et al.: Proc. ICALEO ' 97, San Diego, Nov., Vol. 83, Section G (1997), pp. 171-180.
- 4) H. Shen et al.: Proc. ICALEO 2001, Oct. (2001), Section C, 1302. (CD)
- 5) 平石他: 溶接学会論文集, 17-3(1999), pp. 420-425.
- 6) 平賀他: 溶接学会論文集, 19-4(2001), pp. 717-726.
- 7) E. Schubert, et al.: Proc. ICALEO ' 98, Orlando, Nov., Vol. 85, Section G (1998), pp. 111-120.
- 8) F. Wagner, et al.: Proc. ICALEO 2001, Oct. (2001), Section C, 1301.
- 9) 藤井他: 第 44 回レーザ熱加工研究会論文集, (1998), 121-129.
- 10) S. Katayama, et al.: Proc. 5th Int. Conf. on TRENDS IN WELDING RESEARCH, Georgia, June (1998), pp. 467-472.
- 11) S. Katayama, et al.: Copenhagen, (June, 2002), IIW Doc. IV-814-02.
- 12) 沓名他: 溶接学会全国大会講演概要 第 69 集(2001-10), pp. 92-93.
- 13) 森田他: 溶接学会全国大会講演概要 第 69 集(2001-10), pp. 90-91.
- 14) A. C. Lingenfelter, et al.: Proc. ICALEO ' 87 (Laser Materials Processing), San Diego, Nov. (1986), pp. 69-74.
- 15) G. Sepold, et al.: Lisbon, (1999), IIW Doc. IV-734-99.
- 16) R. C. Salo: Proc. of the conf. on The Laser vs The Electron Beam in Welding, Cutting and Surface Treatment - State of the Art 1987, Reno, Nov., (1987), p. 318.
- 17) S. Katayama, et al.: Trans. JWRI, 14-1 (1985), pp. 123-138.
- 18) 泰山他: 溶接学会論文集, 14-2(1996), pp. 314-320.

(本文は、片山:「レーザ異材接合」, 溶接技術, (2002, 2月号), 69-73. とほぼ同じである。)