

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06473

研究課題名(和文) レーザを用いた高温溶融金属液柱の制御システム

研究課題名(英文) Control of molten metal column at the wire tip using laser system

研究代表者

中村 照美 (Nakamura, Terumi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・材料創製・加工ステーション・ステーション長

研究者番号：20354277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：純Arシールドガスを用いた消耗電極式溶接(Ar-GMA溶接)、ワイヤ先端には長く伸びた溶融金属液柱が生じるので安定なAr-GMA溶接は困難である。そこで、不安定の原因である溶融金属液柱をレーザーにより切断・除去できる方法を開発する。溶融金属液柱を最適な条件で切断・除去するためのレーザー照射技術を開発した。これを用いることでワイヤ先端部の溶融挙動を制御することができ、溶接安定性がさらに向上したAr-GMA溶接を開発した。

研究成果の概要(英文)：A fiber laser was used in order to achieve stable consumable-electrode welding with pure Ar shielding gas (Ar-GMA). Ar-GMA welding is unstable welding because of a long column of liquid molten metal (CLM), which is generated at the wire tip. This long CLM causes arc instability and irregular short-circuit. Therefore, to stabilize the Ar-GMA welding, it is necessary to shorten this CLM. To shorten the CLM, we have developed a method for cutting the CLM by using of a fiber laser.

Cutting conditions using a fiber laser were investigated. By using appropriate cutting conditions, we were able to control the welding behavior of Ar-GMA welding.

研究分野：溶接・接合技術

キーワード：アーク溶接 ファイバーレーザー 溶融金属液柱 純Arシールドガス 切断

### 1. 研究開始当初の背景

980MPa 級の高強度鋼や 9%Ni 鋼などの低温用鋼では、シールドガスに純 Ar ガスを使用した消耗電極式溶接(Ar-GMA 溶接)を使用すると、酸化物などの介在物が少ない清浄な溶接金属となるので、靱性や延性が向上した溶接継手が得られる。しかし、Ar-GMA 溶接は安定な溶接施工が不可能とされ、実用化はされなかった。市販の溶接用ワイヤを使用して Ar-GMA 溶接を行うと、ワイヤ先端には溶融した金属が長く連なった溶融金属液柱が形成され、これが不安定に動き回ることによって溶接が不安定になる。この溶融金属液柱を切断・除去することができれば、市販の溶接用ワイヤであっても安定な Ar-GMA 溶接が可能となる。

これを実現するために非接触で金属材料の切断が可能なレーザーを使用した。適切なタイミングでレーザーを照射して液柱の切断・除去を行うことで液柱を短くすることができる。液柱を安定に切断・除去するためには、液柱の挙動を理解し最適条件でレーザーを照射することが必要である。さらに、溶融金属液柱の切断・除去が自由にできれば、ワイヤ先端部の溶融挙動を制御することができる。従来の GMA 溶接では困難であったワイヤ先端部の溶融挙動を直接制御できる革新的 Ar-GMA 溶接プロセスが実現できる。

### 2. 研究の目的

市販の溶接用ワイヤを使用し、溶接アーク(MIG アーク)中で溶融金属液柱をレーザーで切断・除去する技術を確立することを目的とした。

- (1) 溶接アーク中でレーザーを照射し、溶融金属液柱を切断するための条件を求める。ここでは、市販の溶接用ワイヤを使用し、液柱の切断による溶接安定性の向上を検証する。
- (2) 溶融金属液柱の切断・除去によりワイヤ先端部の形状を制御するための基礎条件を実験から求め、ワイヤ先端部の溶融挙動を制御するためのレーザー照射条件を確立する。さらに、各種材料に対する切断条件を検討する。
- (3) 大電流ではワイヤ先端部はローテーション移行と呼ばれる不安定な溶滴移行状態となる。本提案溶接法では不安定となるワイヤ先端部を切断・除去することで、安定な溶滴移行を実現し安定な溶接が可能となることを検証する。このように、電流やワイヤの材質に依存することなく溶接プロセスを直接制御することで、従来 GMA 溶接とは異なる革新的 Ar-GMA 溶接の基盤を確立する。

### 3. 研究の方法

ファイバーレーザー(最大出力: 6kW、ファイバー径: 50 $\mu$ m、焦点距離: 150mm)を使用し、レーザーを溶融金属液柱に照射し液柱を切

断・除去するための条件を求める。使用する装置の構成を図 1 に示す。トーチと母材の距離を 25 mm とし、コンタクトチップ先(ノズル先端)から 15 mm 離れたワイヤ表面を焦点とするようにレーザーヘッドの位置を調整した。溶接機は最大 500 A が使用できる市販電源である。シールドガスは純 Ar ガス

を使用し、流量は 25 l/min である。市販の鋼用溶接ワイヤ(ワイヤ径: 1.2 mm)を使用し、溶接条件は電流: 250-300 A、電圧: 25-38 V、溶接速度: 15-30 cm/min、ワイヤ送給速度: 4.0-7.0 m/min である。

アーク内で溶融金属液柱の切断状況の観察を行うことができようレーザー照明装置を使用した。この観察装置により、レーザーの照射位置を明瞭に観察でき、レーザー照射位置の最適化のための検討が可能となった。

さらに、高速ビデオカメラと同期して溶接電流、電圧、レーザー信号の計測が可能となる装置とインターフェスを導入した。この計測システムにより、パルスレーザー照射時の溶融金属液柱の切断時挙動と溶接条件の関係を求めることができた。

これらの方法を鋼ワイヤ、ステンレスワイヤ、Ni 合金ワイヤに適用し、各ワイヤについて適正な切断位置と溶融金属の切断挙動の解析が可能になった。

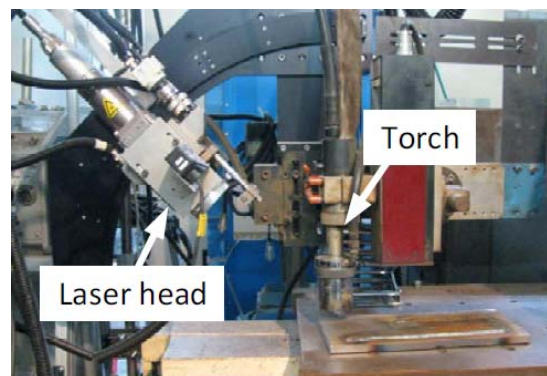


図 1 レーザー照射ヘッドと溶接トーチ

### 4. 研究成果

#### (1) レーザー照射による溶接安定性の向上

MIG アーク中でレーザー光を溶融金属液柱に照射し、レーザー照射の効果調べた。パル

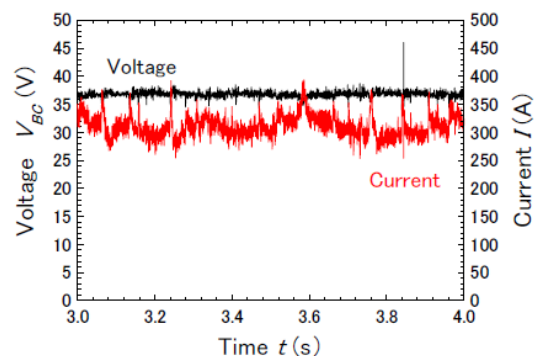


図 2 パルスレーザー照射前  
 $I=273$  A,  $V=37.8$  V,  $v=35$  cm/min

スレーザ照射前の電流、電圧波形を図 2 に示す。純 Ar シールドガス中なので電流は不規則に変動し不安定になっている。

同じ条件でパルスレーザ照射を行った結果を図 3 に示す。パルスレーザのピークパワー時には液柱が切断されアーク長が長くなるので電流が減少し電圧が増加する。パルスレーザのベースパワー時には液柱が切断されず長さが伸びるのでアーク長が短くなり電流が増加し電圧が減少する。パルスレーザを照射することで溶接電流と電圧は安定なパルス状に変化する。図 3 に示すように 3.56 s 付近でパルスレーザを切ると、パルスレーザ照射前と同様な不安定な状態になる。

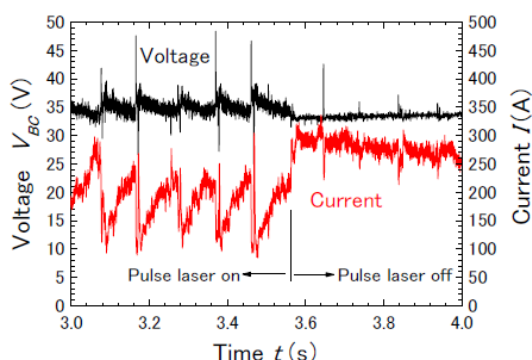


図 3 パルスレーザ照射後  
 $I=261\text{ A}$ ,  $V=38.6\text{ V}$ ,  $v=35\text{ cm/min}$

この時のビード外観の変化を図 4 に示す。パルスレーザが照射されないパルスレーザ off の状態ではビード止端部の凹凸の変化が大きい。パルスレーザが照射されるパルスレーザ on の状態では、ビード止端部の凹凸はほとんど認められず良好なビード形状が得られた。このようにワイヤパルスレーザを照射することで液柱を切断し、安定なパルス状の電流、電圧を作ることによって溶接安定性が向上した Ar-GMA 溶接が可能になった。

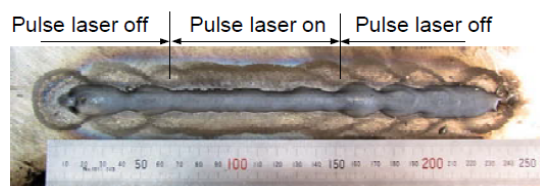


図 4 パルスレーザ照射によるビード外観の変化

## (2)液柱の切断条件の検討

市販の鋼用溶接用ワイヤ(直径 1.2 mm)について、アーク溶接中にワイヤ先端に生じた液柱を安定に切断するためのレーザパワー、レーザのパルス条件、レーザの照射位置を求めた。この時の溶接条件は電流が 240-260 A、電圧 32-34 V、ワイヤ送給速度が 7 m/min である。

パルスレーザのピーク出力の効果を調べるために、レーザのパルス周波数を 10 Hz とし、ピーク出力を 1 kW から 6 kW まで変えて試験を行った。ピーク出力が 3 kW 以上ではワイヤの安定な切断が可能となり液柱は生成しなかった。ピーク出力が 2 kW 以下ではワイヤの切断ができず液柱が生じた。

レーザのパルス周波数の影響を調べるために周波数を 5 Hz、10 Hz、20 Hz、50 Hz と変えた条件で試験を行った。周波数が 10 Hz 以上ではワイヤの切断が可能となり液柱は生じないものの、5 Hz の時には液柱が連なり安定な切断はできなかつた。パルス周波数は 10 Hz 以上が必要であることがわかった。

液柱の下部(先端に近い部分)にレーザを照射するとレーザの反光力により液柱が曲がり安定な切断ができない。そこで、レーザ照射位置を変えた条件での溶接試験結果を行った。レーザの照射条件は同じとし、レーザ照射位置を変えて(レーザシフトを+4 mm から-2 mm まで変えた)切断性能を調べた。レーザシフトとレーザ、ワイヤの位置関係を図 5 に示す。

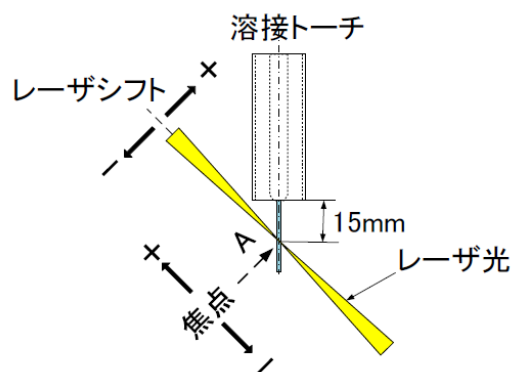


図 5 ファイバーレーザの照射位置

レーザシフトが-1mm や、-2mm の時には、レーザが熔融金属液柱に照射される場合である。この時はレーザ照射直後に熔融金属液柱が切断されるものの、しばらくすると熔融金属液は折れ曲り熔融金属液柱を切断することができなかつた。これに対し、レーザシフトを 0mm や、+2mm とすると、熔融金属液柱の安定な切断が可能となり良好なビード形状が得られた。

レーザシフトを+4mm とし、トーチに近い固相部にレーザを照射した場合には、ワイヤの切断が可能となり液柱は生じなかつた。しかし、トーチ位置に近い位置でワイヤが切断された直後では、アーク長が長くなるため電流の減少と電圧の増加が急に生じるため、溶接条件の変動が大きくなり溶接が不安定になる傾向が認められた。このため、固液共存相部の領域から離れてトーチに近い固相部を切断することは溶接安定性を確保する上で望ましくない。すなわち、熔融部と固相部が共存した領域からワイヤ 4 個分以上(5 から 6mm) トーチ側に離れた固相部では溶接条件

の変動が生じることがわかった。

切断に対するワイヤ材質の影響とレーザー照射位置を調査した。市販の鋼ワイヤ、ステンレスワイヤ、Ni合金ワイヤの3種類ワイヤ(直径: 1.2 mm)を使用した。アーク溶接中にワイヤ先端に生じた液柱を安定に切断するため、レーザーパワー、レーザーのパルス条件を固定し、各種材料に対するレーザーの照射位置を求めた。鋼ワイヤ、ステンレスワイヤ、Ni合金ワイヤでは長く伸びた液柱が生じ、液柱下部(径が 0.5-0.6 mm となる部分)にレーザーを照射するとレーザーの反兆力により液柱が曲がり安定に切断することができなかった。これより径が細くなる部分(板に近い下端部)では液中が不安定に動き回り、液中にレーザーを命中させることが困難であった。ワイヤ先端に生じる液柱は直径が 1.2mm より狭くなった部分であり、固体部分はワイヤ径が 1.2 mm の部分である。径が 0.8-1.0 mm 付近では中心部に固体部が存在し液柱の動きがほとんど無いので、この部分を照射するとレーザーの命中率もあがり、レーザーの反兆力に影響されることなく安定に切断できるようになった。

アルミニウムワイヤでは長く連なった熔融金属液柱は生じないが、レーザーをアーク発生位置付近に照射するとアークが安定し突き出し長さの変動が小さくなることが観察でき、同時に安定なワイヤの切断特性が良好であることがわかった。

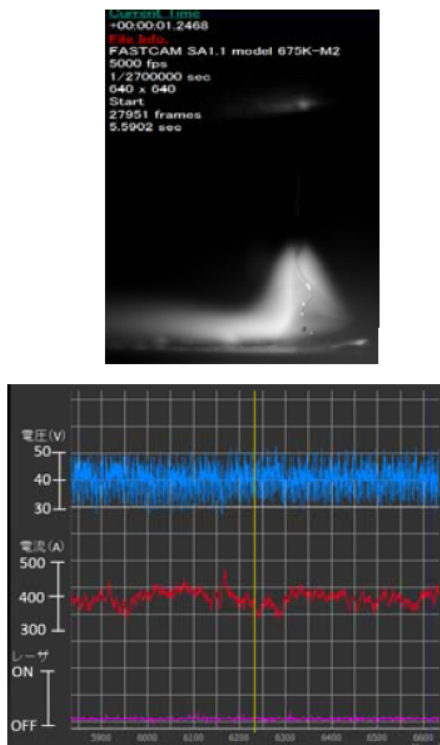


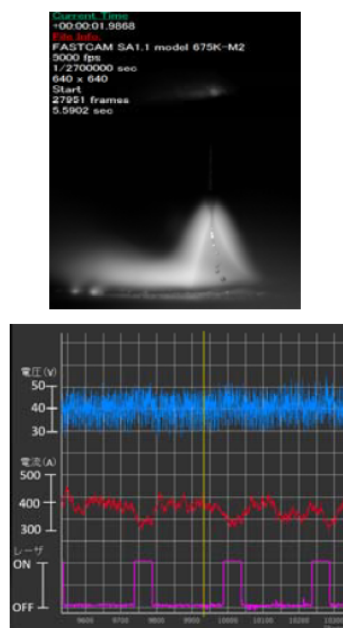
図 6 ローテータティング移行形態と  
電流・電圧波形  
 $I=413\text{ A}$ ,  $V=45.0\text{ V}$ ,  $v=45\text{ cm/min}$

### (3)ローテータティング移行の改善

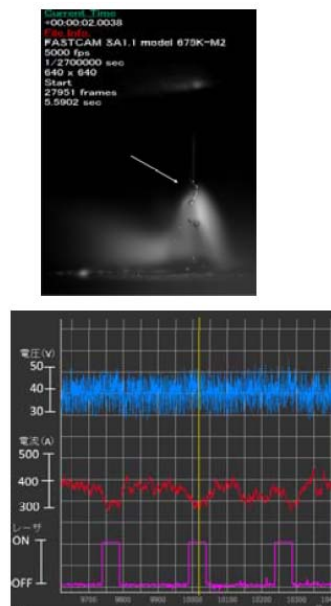
大電流条件下でのローテータティング移行について、レーザーを固体部(液柱の径が 0.8-1.0 mm で、位置が大きく変動しない所)に照射し、本システムによりワイヤの安定な切断が可能で、溶接の安定化に効果があることを実験的に検証した。

大電流(400 A 付近)では図 6 に示すようにローテータティング移行となり溶接が不安定となる。下図の黄色い線で示した時の画像が上に示されている。

レーザーを液柱の位置が大きく変動しない場所に照射した結果を図 7 に示す。ここではレーザー照射前から連続的に示す。

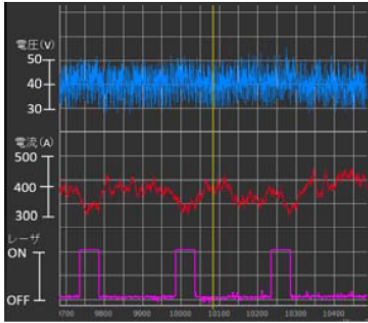


(a)レーザー照射前



(b)レーザー照射中

図 7 レーザー照射による液柱の制御  
 $I=416\text{ A}$ ,  $V=45.0\text{ V}$ ,  $v=45\text{ cm/min}$



(c) レーザ照射後

図 7 レーザ照射による液柱の制御 (続き)

図 7(a)に示すようにワイヤ先端には長く伸びた液柱がある。レーザを照射すると (白矢印がレーザ照射位置)、図 7(b)に示すように液柱は切断される。液柱の切断によりアーク長が伸びるので、電流が低下している。レーザ照射が終了すると (図 7(c))、液柱が生じている。ただし、図 6に見られたように液柱がローテーティング移行することはなかった。ローテーティング移行する前に液柱が周期的に切断されローテーティング移行を防ぐことができた。

GMA 溶接では電流の最大値に制限があるが、本手法により大電流条件下でのローテーティング移行の防止についても目処を得ることができた。

一般的にワイヤ溶融を行う GMA 溶接では電流の最大値に制限があるが、本手法を使用すると大電流での溶接が可能となり今後の展開が期待できる。レーザシステムの小型化、照射部の小型化により MIG 溶接トーチに搭載するための検討を今後進める。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

T. Nakamura, Laser-Enhanced Ar-GMA Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2015, Vol. 33, No. 2, 63s-66s, (査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

T. Nakamura, Laser-Enhanced Argon-Gas Metal Arc Welding, IIW Doc. XII-2227-15,

International Institute of Welding,  
Helsinki, Finland, 2015

[産業財産権]  
○取得状況 (計 1 件)

名称:Ar シールドガスを使用した消耗電極式  
溶接方法

発明者: 中村照美、荒金吾郎

権利者: 国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特許第 06304646 号

取得年月日: 平成 30 年 03 月

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 照美 (NAKAMURA.Terumi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・材料  
創製・加工ステーション・ステーション長

研究者番号: 20354277