

レーザーにより溶滴移行を制御する Ar-MIG 溶接プロセスの開発

独立行政法人 物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 構造体化グループ

グループリーダー 中村照美

(平成 22 年度 一般研究開発助成 AF-2010211)

キーワード: レーザ, MIG 溶接, 溶滴移行

1. 研究の目的と背景

溶接ワイヤを一定の速度で送給し、ワイヤ先端と母材の間でアークを発生させてワイヤと母材を熔融させる消耗電極式溶接(GMA 溶接)は広く使用されている。靱性や延性などの溶接部の性能向上を図るためにはシールドガスに純 Ar ガスを用いることが有効である¹⁾。しかし、シールドガスに純 Ar ガスを用いると、ワイヤ先端部には図 1 に示すように長く伸びた熔融金属液柱が生じる。この熔融金属液柱は不安定に動き、アークもこれに連動して動き回るので溶接が不安定になる。このため、純 Ar ガスを使用した MIG 溶接 (MIG 溶接は GMA 溶接のシールドガスに Ar と酸素の混合ガスを使用したものであり、純 Ar シールドガスを使用した場合を Ar-MIG 溶接と称する) は不安定であるとされ実用化されなかった¹⁾。Ar-MIG 溶接で安定な溶接を可能とするために、融点の異なる材料を組み合わせた同軸複層ワイヤ(図 2)

が開発された²⁾。同軸複層ワイヤは、融点の異なる材料を芯線(内側)とフープ(外側)に使用することによりワイヤ先端部の熔融挙動を変え、熔融金属液柱を短くすることができる。この同軸複層ワイヤにより安定な Ar-MIG 溶接が初めて可能になった²⁾。

液柱を短くする観点からは、図 1 に示す液柱を切断・除去すると同軸複層ワイヤと同等な効果が得られ安定な Ar-MIG 溶接が可能になる。これを実現するには非接触で高精度な切断ができるレーザーが最も有効である。そこで、本研究では溶接アーク中で熔融金属液柱を切断・除去するための基礎的検討を行った。

2. 実験方法

図 3 に実験に用いた装置の概略を示す。10 kW のファ

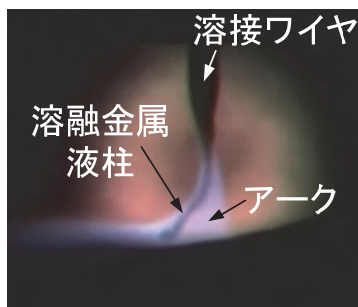


図 1 純 Ar-MIG 溶接で生じる熔融金属液柱

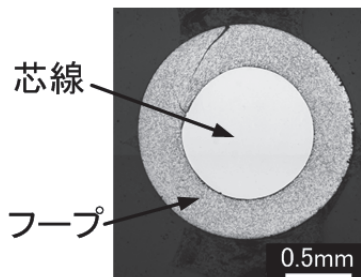


図 2 同軸複層ワイヤの断面

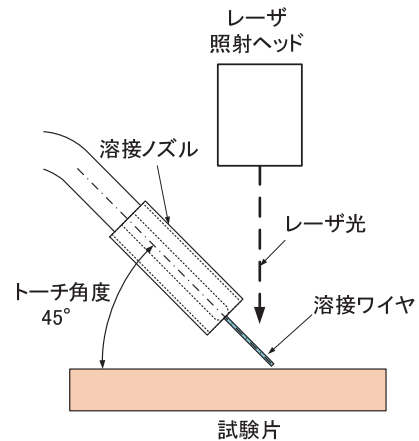
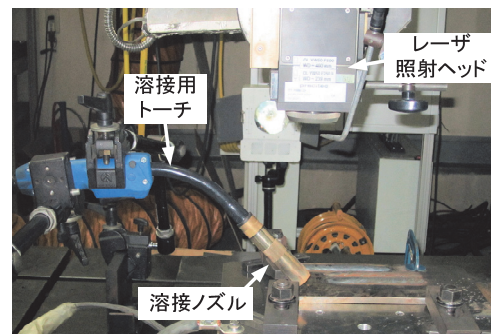


図 3 実験装置

イバーレーザ（ファイバー径 0.2 mm, 焦点距離:250 mm）を使用した。レーザ発振形態は CW と PW(パルス)である。溶接機には最大電流として 500 A が使用できる市販の溶接機を使用した。純 Ar シールドガスの流量は 25 l/min とし、市販の鋼用溶接ワイヤ(ワイヤ径: 0.9 mm)を使用した。

初めに純 Ar シールドガス中で溶接のみを行った結果を図 4 に示す。電流は 250 A, 電圧 34 V とし溶接ワイヤの熔融挙動を高速度ビデオカメラ (撮影速度: 10000 fram/s) で観察した。ワイヤの突出し長さは 10 mm である。ワイヤ先端には熔融金属液柱が生じ、不安定に動き回ることが観察できた。この溶接条件下で熔融金属液柱が生成する位置を明確にすることができた。

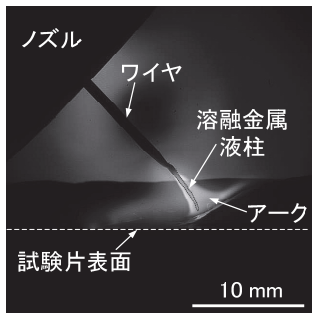


図 4 ワイヤの突出長さとその先端に生じる熔融金属液柱

レーザ照射位置とワイヤ切断条件の関係を調べるために、ノズル先端から 10 mm の所をレーザの焦点位置基準 (A) とし、焦点がこれよりも上にある時を+, 下にある時を-として焦点位置の影響を調べた。さらに、レーザを左右にシフトさせ、A 点よりも焦点が左にある時を+, 右にある時を-として(図 5), ワイヤ切断挙動に対するレーザ照射位置の影響を調べた。

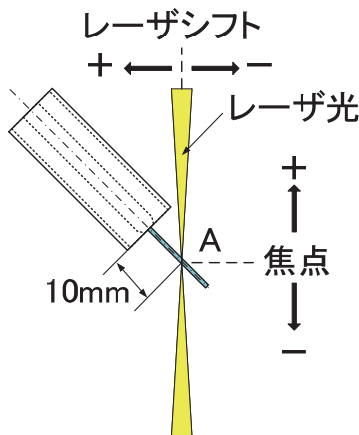


図 5 レーザの焦点位置とレーザシフト

3. 実験成果

3・1 コールドワイヤの切断試験結果

初めにアーク無しでワイヤの切断試験を行った。レーザ発

振条件は CW とし、ワイヤを安定に切断できるレーザ出力条件を求めた。レーザの焦点位置はワイヤ表面とし(焦点位置 ± 0 mm), ワイヤ送給速度 v_f が 5.0 と 10.0 m/min の場合について調べた。なお, $v_f=5$ m/min は電流が 250 A の時のワイヤ送給速度に相当し, $v_f=10$ m/min は, 電流が 350 A の時のワイヤ送給速度に相当する。

試験結果を表 1 に示す。ワイヤ送給速度 $v_f=5$ m/min の時に安定な切断を行うには, レーザ出力は 2.0 kW 以上必要であり, $v_f=10$ m/min の時には 3.0 kW 以上必要である。ワイヤ送給速度が大きい場合にはレーザが照射された位置が移動し, 静止した材料を切断する通常のレーザ切断よりもより大きなレーザパワーが必要となった。また, 2.0 kW 以上のレーザ装置ではチラー等の冷却装置が必要となるので装置の大型化が避けられない。

表 1 ワイヤを安定に切断できるレーザ出力条件 (CW モード)

発振形態	出力 (kW)	ワイヤ送給速度 v_f (m/min)	
		5.0	10.0
CW	1.0	△	×
	2.0	○	△
	2.5	○	△
	3.0	-	○
	4.0	-	○

○:切断可能, △:切断に失敗することがある
×:切断不可能, -:実施しない

次に, レーザの出力を下げてもワイヤを安定に切断するためにレーザをパルス化 (PW) して切断試験を行った。ここではパルスレーザのピーク出力を 6.0 と 4.5 kW とし, ピーク出力時間を 10 ms, パルス周波数を 10 Hz, ワイヤ送給速度 $v_f=5$ m/min とした。

ワイヤ切断に対するレーザパルスの影響を調べた結果を表 2 に示す。焦点位置がワイヤ表面(焦点位置 ± 0 mm) の時には, ピーク時のレーザ出力を 6.0 kW とすると安定な切断が可能である(記号 B)。この時の平均レーザ出力は 0.6 kW であり, CW の時よりも小さくできる。レーザ出力を 1 kW

表 2 ワイヤを安定に切断できるレーザ出力条件 (PW モード)

レーザ発振形態	記号	ピーク時のレーザ出力 (kW)	平均レーザ出力 (kW)	焦点位置 (mm)	ワイヤ切断
PW	A	4.5	0.45	± 0	×
	B	6.0	0.60		○
	C	4.5	0.45	± 2	×
	D	6.0	0.60		○
	E	4.5	0.45	± 4	△
	F	6.0	0.60		○

○:切断可能, △:切断に失敗することがある
×:切断不可能, -:実施しない

以下にできるので、装置は空冷のみで対応可能となりチラー等が不要なコンパクトな装置が可能である。

ピーク時のレーザー出力が 4.5 kW の時にはワイヤの安定な切断ができなかった(記号 A)。そこで、この時の切断状況を高速ビデオカメラで調べた結果を図 6 に示す。レーザー照射初期からレーザーがワイヤに当たり明るくなっている(図 6 (A)-(a))。レーザー照射直後からワイヤの一部が溶融しているが、レーザー照射終了後ではワイヤ全面の溶融には至らず切断はできなかった(図 6 (A)-(c))。ピーク時のレーザー出力が 6.0 kW の時にはレーザー照射終了直前でワイヤ細くなり(図 6 (B)-(b))、ワイヤの全面の切断が可能になった(図 6 (B)-(c))。

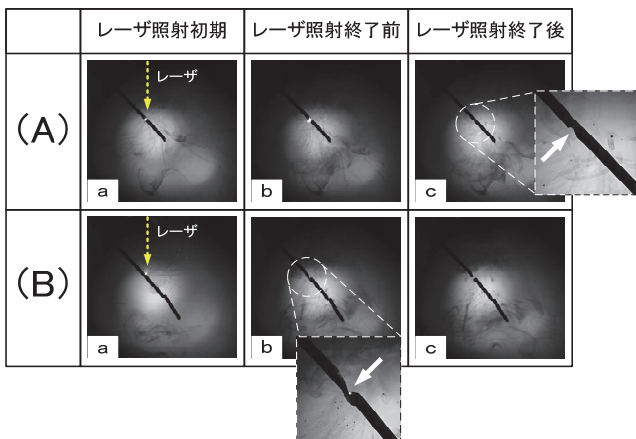


図 6 焦点位置 ± 0 mm の時のワイヤ切断状況

ファイバーレーザーは集光特性が良く焦点位置がわずかにずれただけでレーザーがワイヤに当たらなくなり安定なワイヤ切断が困難になる。そこで、焦点位置をずらしてデフォーカスさせてレーザーの照射範囲を広げた時の切断特性を調べた。焦点位置を+2 mm, +4 mm とした時の結果を表 2 に示す。ピーク時のレーザー出力を 6.0 kW, 焦点位置を+2 mm とすると(記号 D), レーザー照射終了時にはワイヤは完全に切断され(図 7 (D)-(c)), 安定な切断が可能になる。しかし、レーザーピーク出力を 4.5 kW とした時にはワイヤの切断はできなかった(記号 C)。ピーク時のレーザー出力が 4.5 kW, 焦点位置が+4 mm の時には(記号 E), ピーク時のレーザー出力 6.0 kW, 焦点位置 ± 0 mm の時と同様に(記号 B), レーザー照射部分は細くなり切断できるものの、切断の失敗も認められた。レーザー照射範囲が広がるとワイヤ切断に対して有効

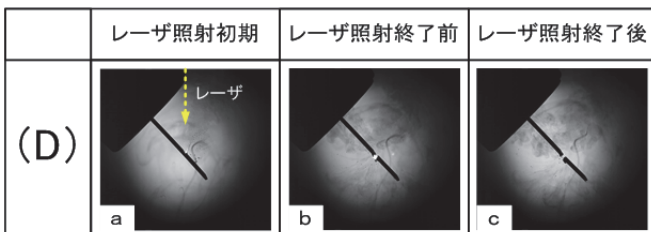


図 7 レーザーピーク出力 6.0 kW, 焦点距離 +2 mm でのワイヤの切断状況

であるが、レーザーのエネルギー密度低下が生じ切断性能が低下する。このことから、ピーク時のレーザー出力 4.5 kW ではデフォーカスしても切断能力は十分とは言えない。したがって、ピーク時のレーザー出力 6.0 kW, 焦点位置を+2 mm が安定な切断条件であることがわかった。

3・2 溶接時のワイヤの切断試験結果

アークが無い時の溶接ワイヤの切断条件が明らかになったので、実溶接時のアーク中でのワイヤ切断試験を行った。ここで溶接電流は 250 A とし、 $v_f=5$ m/min, 溶接速度は 5 mm/s である。初めに、レーザー発振条件を CW とした時の結果を表 3 に、ワイヤの切断状況を図 8 に示す。なお、レーザーの焦点位置はワイヤ表面(焦点位置 ± 0 mm)である。

レーザーの出力が 1.0 kW の時には(記号 G), レーザー照射初期では図 8 (G)-(a) のように溶融金属液柱が切断され、切断された溶融金属液柱は溶滴となり落下する。その後は図 8 (G)-(b) に示すように、溶融金属液柱がレーザー照射位置から折れ曲がり、溶融金属液柱を切断することができなかった。レーザー出力を上げ 2.0 kW としても(記号 H), 同様な傾向となり溶融金属液柱の切断には至らなかった。レーザーが当たった部分の反跳力により溶融金属液柱が曲がり効果的な切断には至っていない。今回の試験ではレーザーを一方から照射したので溶融金属液柱の屈曲が生じた。これを回避するには、二方向からレーザーを照射するなどのレーザー照射方向を変える検討や、さらに大きなレーザーパワーの検討が必要である。

表 3 CW 条件での溶融金属液柱の切断試験結果

発振形態	記号	出力 (kW)	焦点位置 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	ワイヤ/液柱の切断可否
CW	(G)	1.0	± 0	220	37	×
	(H)	2.0	± 0	250	34	×

○:常に切断可能、△:切断できるが後液柱が曲がる
×:切断不可能

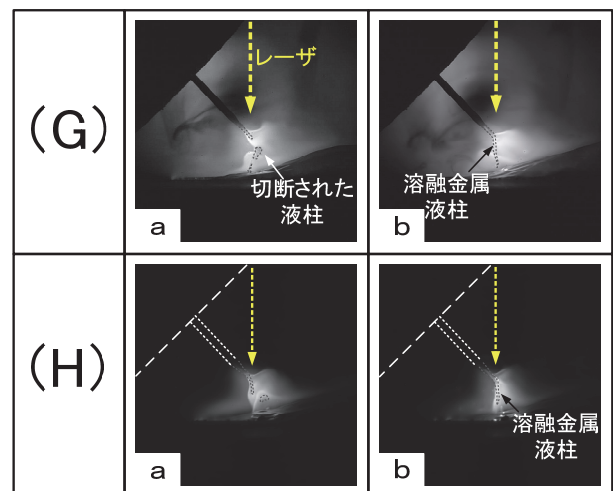


図 8 溶接時のワイヤ切断特性 (CW モード)

次にレーザー発振条件をパルス(PW)とした時の結果を表4に示す。ここではパルス条件の時にワイヤの切断特性が良好であったレーザー焦点距離を+2mmとし、パルス周波数の影響を見るために周波数を10と20Hzとした。さらに、レーザーの最小照射エネルギーを調べるためにパルスピークを3.0kWにした時の切断特性を調べた。

表4 PW条件での熔融金属液柱の切断試験結果

発振形態	記号	ピーク出力 (kW)	周波数 (Hz)	焦点位置 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	ワイヤ/液柱の切断可否
PW	(I)	6.0	10	+2	250	34	△
	(J)	6.0	20	+2	240	34	△
	(K)	3.0	20	+2	250	34	△

○:常に切断可能、△:切断できるが後液柱が曲がる
×:切断不可能

パルスピークが6.0kWの時のワイヤ先端部の切断挙動を図9に示す(記号I)。レーザー照射前では熔融金属液柱が生じている(図9(a))。レーザーが照射されると、この熔融金属液柱の先端部が切断される(図9(b))。その後、熔融金属液柱が伸びCWの時と同様に(図8 記号G-(b), H-(b))、熔融金属液柱が折れ曲がり(図9(c))、この状態がレーザー照射終了まで続いている。レーザー照射が終了すると熔融金属液柱が再び伸び、レーザー照射前の状態に戻った(図9(d))。

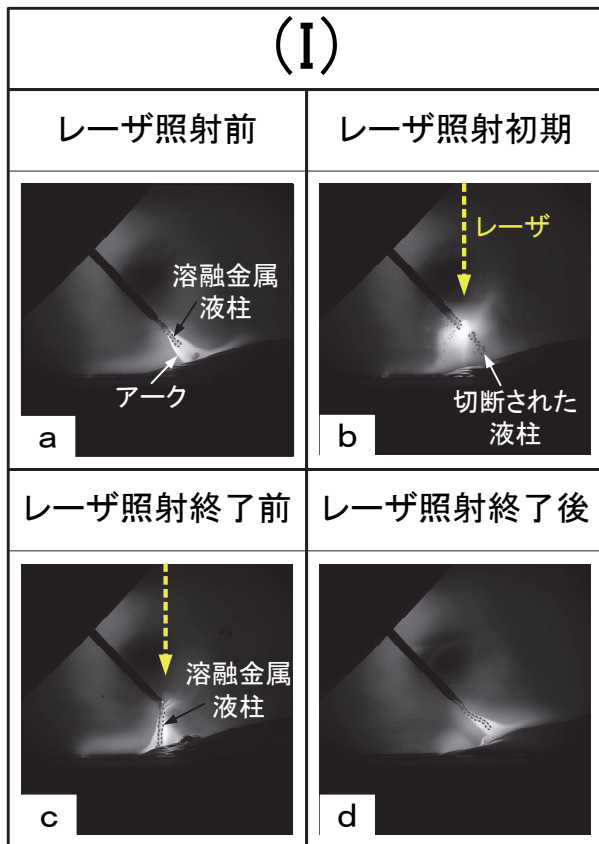


図9 溶接時のワイヤ切断特性(PWモード)
パルスピーク 6.0kW

周波数を20Hzにしても同様な傾向が得られた(記号J)。すなわち、レーザー照射初期では熔融金属液柱の切断が可能であるが、熔融金属液柱部にレーザーが照射されると、熔融金属液柱が屈曲する。20Hzの時には図9(c)の状態が短くなるだけで、熔融金属液柱の切断に対してはほとんど効果が無いことがわかった。

レーザーの照射エネルギーの最小レベルを調べるためにレーザーピークを3.0kW(記号K)とした時の結果を図10に示す。レーザー照射初期では熔融金属液柱の切断ができるものの、切断後はレーザーピークが6.0kWと同様な結果となった(図10(b), (c))。

このように、熔融金属液柱を効果的に切断するためには熔融金属液柱そのものにレーザーを照射することは得策とは言えない。レーザーを照射しても曲がらない部位にレーザーを照射することが必要である。すなわち、ワイヤの温度が低く剛性が確保できるトーチ側にレーザー照射位置を変えることが有効である。その他に、レーザーを相対する二方向から行うことも有効な手法と考えられる。今回は装置の制約上からレーザー照射位置を変えた試験を行った。

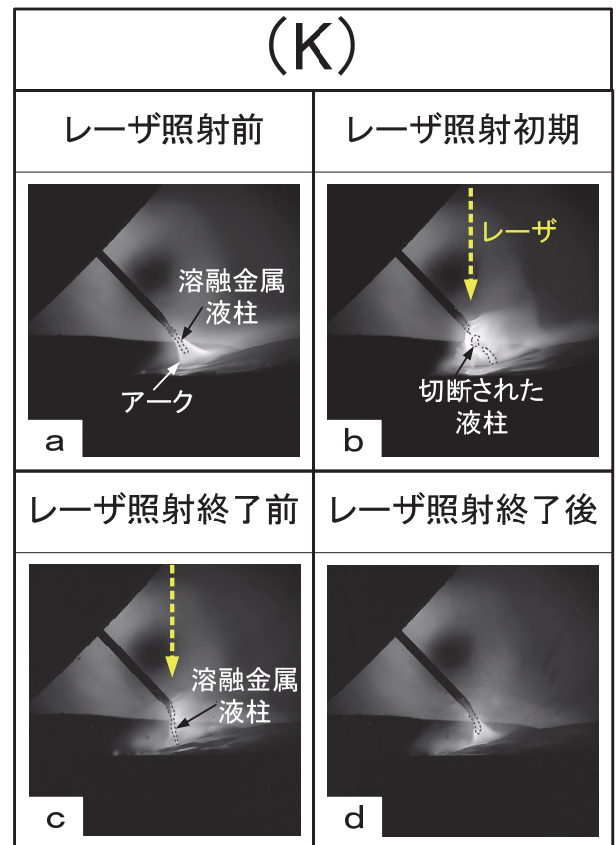


図10 溶接時のワイヤ切断特性(PWモード)
パルスピーク : 3.0kW

レーザー照射ヘッドをトーチ側に移動させ、完全に溶融していない剛性のある部分のワイヤ切断を試みた。具体的にはレーザーシフトを+2 mm, +4 mmと変えて切断特性を調べた。レーザーの焦点位置はワイヤ表面から+2 mm の位置に来るようにレーザー光学系の調整を行った。試験結果を表 5 にワイヤ先端部の切断状況挙動を図 11(記号 L), 図 12(記号 M) に示す。

表 5 レーザシフトを変えた時の溶融金属液柱の切断試験結果

発振形態	記号	ピーク出力 (kW)	レーザーシフト (mm)	周波数 (Hz)	焦点位置 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	ワイヤ/液柱の切断可否
PW	(L)	6.0	+2	10	+2	245	33.5	△
	(M)	6.0	+4	10	+2	255	33.5	○

○ :常に切断可能、△:切断できるが後液柱が曲がる
×:切断不可能

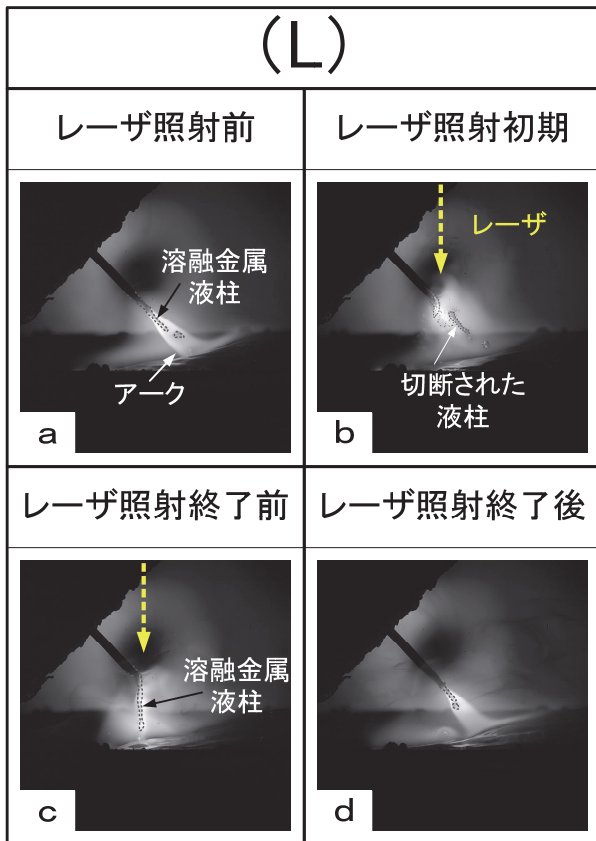


図 11 溶接時のワイヤ切断特性(PW モード)
パルスピーク : 6.0 kW, レーザシフト+2 mm

レーザーシフトが+2 mm の時(記号 L)の時には、記号 I(図 9), 記号 J, 記号 L(図 10) の時と同様に、レーザー照射初期で溶融金属液柱の切断ができるが、その後に形成される溶融金属液柱が曲がり、安定なワイヤ切断には至らなかった。

そこで、レーザー照射位置をさらにトーチ側に寄せレーザーシフトを+4 mm (記号 M)とした。図中の(A)の破線はレーザーシフト 0 mm の位置で、(B)の破線はレーザーシフトが+4 mm の位置である。レーザー照射初期で溶融金属液柱が切断された後でも溶融金属液柱が伸びることなく切断が可能になっている(図 12 (c), (d), (e))。溶融金属液柱の安定な切断を行うためには、ワイヤの剛性が確保できている部分にレーザーを照射することが必要である。レーザー照射による反跳力とワイヤの剛性の大小により溶融金属液柱が曲がるか、切断されるかが決まる。これについては今後の詳細な検討が必要である。

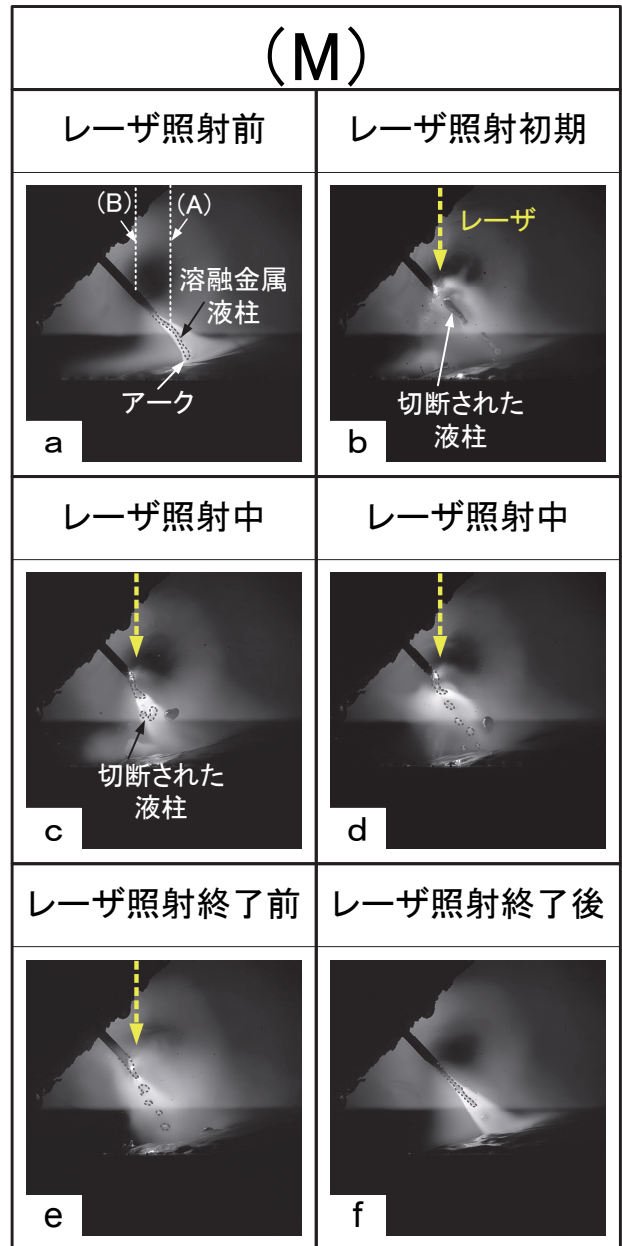


図 12 溶接時のワイヤ切断特性(PW モード)
パルスピーク : 6.0 kW, レーザシフト+4 mm

レーザを使用し小電流域のグローバル移行の制御が試みられている⁴⁶⁾。ワイヤ先端に形成される溶滴にレーザを照射し、反跳力を利用して溶滴離脱を制御するものである。本研究はこれらよりも大電流域で形成される熔融金属液柱の形成を防ぐことを目的としてワイヤにレーザ照射を行っている。本研究の方法によりより安定な Ar-MIG 溶接のためのレーザ照射条件を明らかにすることができた。

3・3 ビード形状

レーザシフトが+4 mm の時の溶接ビードの外観を図 13 に示す。ここでは短絡や目立ったスパッタもなく良好な溶接ビードが得られた。このように、レーザを使用することで安定な Ar-MIG 溶接が可能になった。



図 13 溶接ビードの外観

4. 結論

純 Ar シールドガス中で生じる熔融金属液柱を切断するためのレーザ照射条件について検討を行った。本研究ではレーザを一方向から照射する単純な方法であるが、溶接時のワイヤの切断特性について基礎条件を求めることができた。今後はレーザ照射ヘッドを溶接トーチに組み込み、実溶接施工が可能な装置開発とレーザ照射条件を検討する。得られた結論を以下に示す。

- (1) 発振モードが CW の時には、ワイヤを切断するために必要なレーザパワーは 2.0 kW 以上必要である。ワイヤ送給速度が大きい $v_f = 10 \text{ m/min}$ の時には 3.0 kW 以上必要である。
- (2) 発振モードが PW の時にはパルスピーク時のレーザ出

力を 6.0 kW とすると安定な切断が可能である。この時の平均レーザ出力は 0.6 kW となり CW の時よりも低くできる。

- (3) 発振モードが CW の時に溶接アーク内でワイヤにレーザ照射を行うと、熔融金属液柱が折れ曲がり、熔融金属液柱が切断されることはなかった。レーザ出力を 2.0 kW としても、同様な傾向となり熔融金属液柱の切断には至らなかった。
- (4) 発振モードを PW として溶接アーク内でワイヤにレーザ照射を行う(パルスピーク時のレーザ出力を 6.0 kW)、照射初期には液柱の切断が可能である。しかし、熔融金属液柱部にレーザが当たるようになると熔融金属液柱が折れ曲がり、熔融金属液柱が安定に切断されることはなかった。
- (5) ワイヤ未溶融で剛性のある部分にレーザを照射(レーザシフト+4 mm)したところ、熔融金属液柱の折れ曲がりもなくワイヤの安定な切断が可能になり、良好なビード外観が得られた。ワイヤの剛性が確保できる部分にレーザ照射することが重要であることが明らかになった。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団より研究助成を受けて行われたものである。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 銭谷哲・中村照美・平岡和雄・篠崎賢二, : 溶接学会論文集, 25-1 (2007), 187.
- 2) T. Nakamura, K. Hiraoka and S. Zenitani: Science and Technology of Welding and Joining, 13-1(2008), 25.
- 4) Y. Huang and Y. M. Zhang: Welding Journal, 89, 9(2010), 181s.
- 5) Y. Huang and Y. M. Zhang: Welding Journal, 90, 9(2011), 205s.
- 6) Y. Huang and Y. M. Zhang: Welding Journal, 91, 9(2012), 140s.