

ファイバーレーザーとホットワイヤ法を併用した

高品質・高能率溶接技術の開発

広島大学大学院 工学研究院 材料・生産加工部門

助教 門井浩太

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009210)

キーワード：ホットワイヤ・レーザー溶接，すみ肉溶接，低変形

1. 緒言

造船や橋梁の建設において中厚板のすみ肉溶接が多く実施されている。これらの溶接には利便性や経済性を考慮し、CO₂ 溶接が広く適用されている。近年では、溶接施工の高速化や高品質化のため、タンデムアーク溶接やフラックスコートワイヤの適用なども進められている¹²⁾。しかしながら、高速化や高溶着量化のための溶接施工条件では、アンダーカットなどの溶接欠陥が発生しやすくなる。さらに、母材への投入熱量が増加するために、母材変形量の増大を招いてしまう。そのため、高速、高溶着量などの高能率化だけでなく、投入熱量や母材希釈の低減、スパッタ発生がないなどの高品質化も達成可能な溶接施工技術の開発が求められている。

レーザー溶接^{3,4)}やレーザー・アークハイブリッド溶接^{5,7)}は、高速化と低入熱施工が可能な溶接技術である。しかし、レーザー溶接をすみ肉溶接に適用し、深い溶込みを得るためには、高出力レーザーが必要となる。さらに、余盛部形成のためには、高精度な位置制御下での溶加材の添加が必要となり、レーザーで溶加材と母材の溶融しなければならず、詳細な溶融制御は困難となる。一方、レーザー・アークハイブリッド溶接は、レーザーで深い溶込みを得、そこにアーク溶接によって余盛が形成されるため、CO₂ 溶接やレーザー溶接に比べてすみ肉溶接に適している。しかしながら、本施工法は、アークとレーザーとの複合プロセスであるため現象が複雑や、高溶着化を行うと欠陥形成やスパッタの発生などは避けられない。

本研究では、ホットワイヤ法とレーザー溶接を組み合わせたホットワイヤ・レーザー溶接を適用し、高品質(低入熱、低変形など)かつ高能率(高溶着量、高速など)なすみ肉溶接技術の開発を行った。ホットワイヤ法は、通電加熱によって溶加材である添加ワイヤの溶融の制御が可能となる⁸⁻¹⁰⁾。したがって、添加ワイヤの溶融は印加電流によって、母材の溶融はレーザーによって溶融させることでそれぞれの溶融を独立制御でき、母材溶融の低減、高溶着量化を達成できる。本報告では、溶接現象に及ぼす溶接条件の影響を検討した。高速ビデオカメラを用いたその場観察を実施することで、溶接施行中の母材やワイヤの溶融現象を調査することで、溶接現象を詳細に評価し、本溶接法における溶接現象の解明や最適溶接条件の導出を行った。

2. 実験方法

母材には板厚 9 mm の SS400 を、添加ワイヤにはφ 1.4 mm の YGW11 を用いた。化学組成を Table 1 に示す。

熱源のレーザーには、定格出力 3 kW のファイバーレーザーと 6 kW の半導体レーザーを用いた。ファイバーレーザーは溶接現象や再適用条件の導出に用い、出力を 3 kW 一定として用いた。一方、半導体レーザーは高速化の検討に用いた。

溶接条件を Table 2 に示す。レーザーおよびワイヤ挿入の条件をそれぞれ変化させて実験を行った。レーザースポット径は焦点外し距離を設けることで制御した。Fig. 1 に実験外様子を示す。レーザー反射光のレーザーヘッドへの侵入を抑制するため、レーザーヘッドは溶接方向に 5° 傾けた。また、レーザーヘッドおよび添加ワイヤは、溶接線垂直方向に 45° 傾けた。添加ワイヤは、溶接後方より挿入し、レーザースポット中心からワイヤ中心までの距離をワイヤ挿入位置とした。ワイヤ挿入角度は、母材表面から溶接方向への傾け角とした。

溶接中の母材やワイヤの溶融現象、溶融池の動きを詳細に検討するため、高速度ビデオカメラによるその場観察を行った。Table 3 に撮影条件を示す。カメラ A は溶融池の動きや母材の溶融などの前方の撮影に用いた。980 nm の照明用レー

Table 1 Chemical compositions of used materials. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ti+Zr
Base material	<0.16	<0.17	<0.73	<0.016	<0.006	-	-	-
Wire	0.04	0.68	1.55	0.014	0.013	0.03	<0.01	0.23

Table 2 Welding conditions.

Welding speed, m/min	0.3 - 2.0
Laser type	Fiber, LD
Laser power, kW	3.0 - 5.8
Spot size, mm	3.0 - 7.5
Wire feeding position, mm	0 - 3.0
Wire current, A	100 - 292
Wire feeding speed, m/min	1.6 - 12.0
Wire feeding angle, deg	55 - 75

Table 3 Conditions of in-situ observation.

Camera type	A	B
Frame rate, fps	250	125
Shutter speed, s	1/1000	1/250
Diaphragm	16	22
Transmitted wave length of filter, nm	980±5	950±10
Lighting laser, nm	980	-

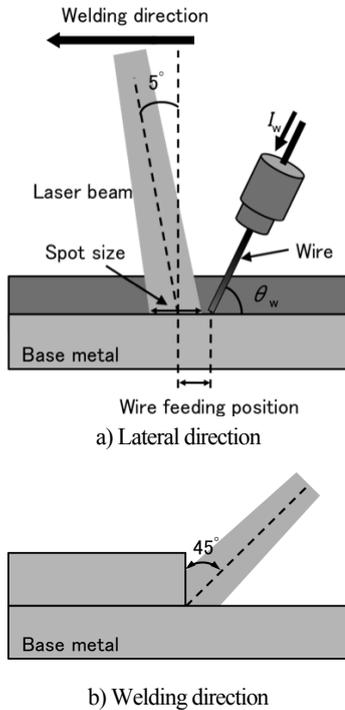


Fig. 1 Schematic illustrations of experimental setup.

ザを用い、単焦点マクロレンズの先端に $980 \pm 5 \text{ nm}$ のバンドパスフィルターを設置することでレーザー光を避けた波長帯での撮影を行った。カメラ B は添加ワイヤの溶融を確認するため、後方からの観察に用い、照明は用いず、単焦点マクロレンズの先端に $950 \pm 5 \text{ nm}$ のバンドパスフィルターを設置して撮影を行った。得られた継手を切断し、断面組織観察、のど厚および脚長の測定を行った。また、継手の引張試験を行い機械的特性の評価を行った。

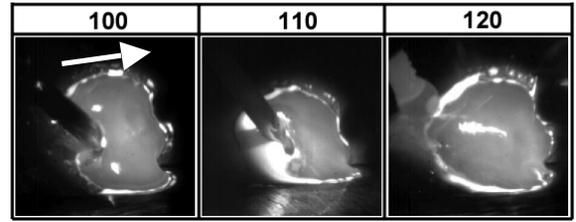
3. 実験結果

3.1 添加ワイヤの溶融とワイヤ条件の関係

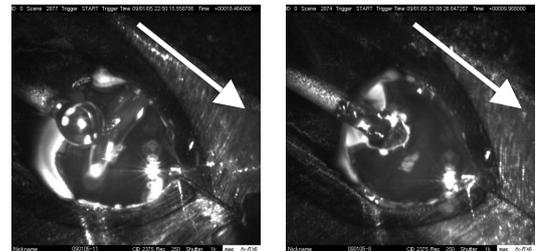
はじめに、ワイヤの溶融現象および安定したワイヤ溶融のための適正条件導出のため、添加ワイヤ溶融に対するワイヤ条件（ワイヤ電流、挿入位置、挿入角度）の影響を検討した。

Fig. 2 にワイヤ電流を変化させて溶接した際の高速度ビデオカメラ像を示す。ワイヤ電流 110 A では、安定したワイヤの溶融が確認できる。一方、100 A ではワイヤの加熱が不十分となり、溶融池底部の固体部（母材）に接触している様子がわかる。また、120 A では、過剰な加熱により、ワイヤの溶断が確認できる。

続いてワイヤ挿入位置を変化させた際の高速度ビデオカメラ像を Fig. 3 に示す。ワイヤ挿入位置 2 mm の場合、ワイヤが安定的に溶融する様子が確認できる。一方、レーザースポット中心にワイヤを挿入した場合は、レーザー光が添加ワイヤに直接照射によってワイヤが溶断することがわかる。なお、3 mm 以上の挿入位置では、溶融池の大きさが 3 mm 以下であったため、安定した挿入ができなかった。



Spot diameter: 7.5 mm, Wire feeding position: 2mm, Wire feeding speed: 1.8 m/min, Wire feeding angle: 55°
Fig. 2 High speed camera images on each wire current.



Spot diameter: 7.5 mm, Wire current: 110 A, Wire feeding speed: 1.8 m/min, Wire feeding angle: 55°
a) 0 mm b) 2 mm
Fig. 3 Effect of wire feeding position on welding.

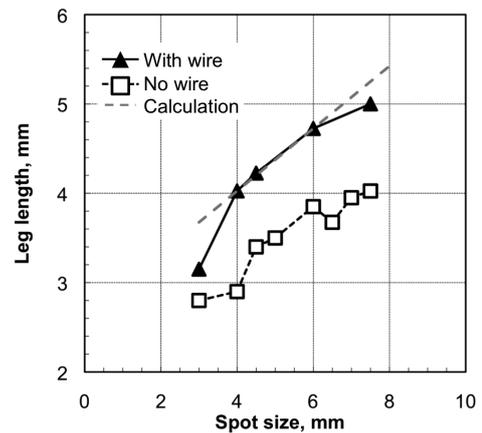


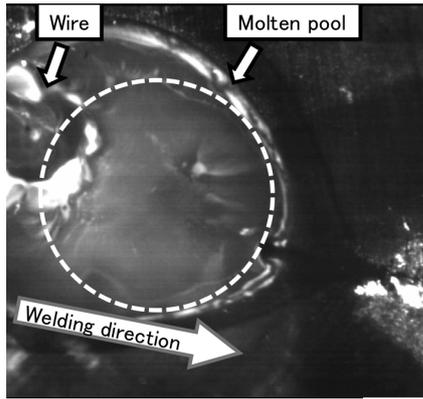
Fig. 4 Leg length change with spot diameter of laser.

ワイヤ挿入角度を変化させたところ、 55 および 75° の挿入角度では、安定したワイヤの送給および溶融が確認された。しかし、 35° では、溶融池後端部の凝固後の固相に接触しやすくなり、粗いビード外観を呈していた。

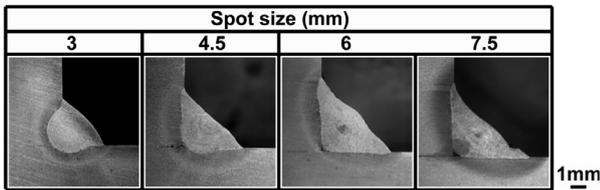
以上より、安定したワイヤの送給および溶融を達成するには、レーザー、添加ワイヤ、溶融池の大きさや位置を考慮した上で適正溶接条件を決定する必要があることがわかる。

3.2 溶接現象およびビード形成現象に及ぼす溶接条件の影響

Fig. 4 にレーザースポット径と脚長の関係を示す。なお、レーザーにはファイバレーザーを用い、出力は 3 kW、溶接速度は 0.3 m/min 一定とした。図中の破線は、スポット径より算出したレーザーの照射領域を示している。添加ワイヤの有無にかかわらず、スポット径の増大とともに脚長は増大することがわかる。また、いずれの脚長においてもワイヤを添加した方が大きな脚長を示し、レーザー照射域よりも大きな値となる。こ



Spot size: 6.0mm, Wire current : 114A, Wire feeding angle: 55°
Wire feeding position: 1.5mm, Wire feeding speed : 2.2m/min,
Fig. 5 High resolution high speed camera image.



Wire feeding angle: 55°, Wire feeding position: 1.5 mm,
Wire current : 84-122 A, Wire feeding speed: 1.1-2.4 m/min
Fig. 6 Cross sections of weld bead on each spot diameter.

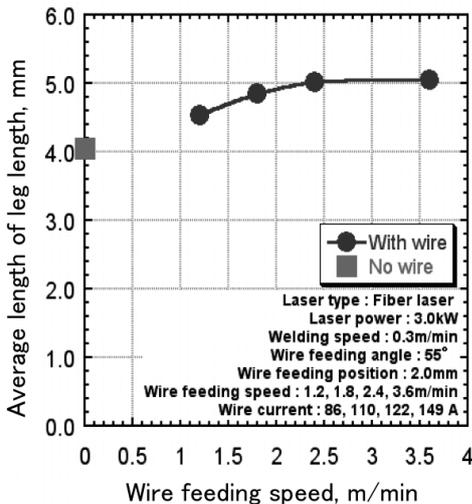
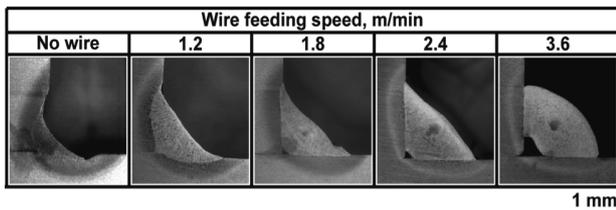


Fig. 7 Relationship between leg length and wire feeding speed.



Spot diameter: 7.5 mm, Wire feeding position: 1.5 mm
Wire current: 0-149 A Wire feeding angle: 55°

Fig. 8 Cross sections of weld bead on each wire feeding speed.

のワイヤ添加による脚長の増大を検討するため、レーザスポット径 6 mm での高速ビデオカメラ像を Fig. 5 に示す。図中

の破線はレーザ照射領域を示している。溶融池の外端は他の部分に比べて明るくなっている。溶融金属のレーザ光の反射率は高いため、レーザ光は、溶融池表面で反射しやすい。したがって、溶融池表面（特に溶融池外端）で反射してレーザ光が、主として母材を溶融するため、脚長が増大すると考えられる。

Fig. 6 に Fig. 4 で示した条件におけるビード断面を示す。3 mm のスポット径では、他の条件に比べて溶込み深さが深くなっている。これは、同一のレーザ出力であるため、スポット径が小さいことでエネルギー密度が上昇したためと考えられる。レーザスポット径 4.5 mm では、母材の溶融量（希釈率）が非常に小さいことがわかる。さらに、オーバーラップやアンダーカットなどの溶接欠陥は観察されなかった。しかし、スポット径が 6.0 や 7.5 mm では、単位面積辺りの投入熱量が減少するため、ルート部において融合不良が発生することがわかる。

Fig. 7 にワイヤ送給速度と脚長の関係を示す。脚長はワイヤ送給速度の増大とともに増大し、3 m/min を越えるとおよそ一定の値となることがわかる。その一定値はおよそ 4 mm を示し、レーザの反射光によって母材を溶融するため、ワイヤを送給していない条件に比べて大きな値を示す。しかし、Fig. 8 に示す様に、ビード断面は、送給速度の増大とともに三角形から扇型へと遷移し、ルート部の融合不良部が増大することがわかる。これは、ワイヤ送給速度が増大に伴い溶融池の体積が増大し、溶融池の形状変化による反射状態の変化や投入熱量に不足によるためと考えられる。したがって、単にワイヤ送給速度を変化させるのみでは、レーザの反射光を利用した脚長の増加に限界があると考えられる。したがって、溶接現象の制御には、各因子の相互作用を考慮した上で適切な選択が求められる。

最適な条件下で得られた溶接継手では、母材希釈率：数％、粗粒域での平均粒径：60 μm、熱影響部幅：1 mm を示し、引張強度も設計強度を十分に超えた値を示していた。

以上の結果より、本プロセスは溶接現象に影響を及ぼす様々な因子があり、因子の最適化によって安定したワイヤや母材の溶融現象を得ることができ、低入熱、低希釈かつ高エネルギーな溶接継手を得ることが可能となる。

3.3 高出力レーザを用いた高速化の検討

Fig. 9 に半導体レーザを用いて、種々のレーザ出力および溶接速度で得られたビード断面を示す。3 kW の場合、0.6 m/min の溶接速度で安定したビードが得られている。安定したビードの得られる最大の溶接速度はレーザ出力の増大とともに増大し、4.0 kW では 1.0 m/min、5.8 kW では 2.0 m/min であることがわかる。さらに、最大溶接速度が増大しても、母材の希釈率や脚長などの溶接ビードの特性に大きな違いはない。レーザ出力 5.8 kW、溶接速度 2.0 m/min で得られた溶接ビードは、脚長：4 mm 母材希釈率：1％、粗粒域での平均粒径：60 μm、熱影響部幅：1 mm を示している。したがって、レーザ出力の増大させることで、溶接継手品質（低希釈、

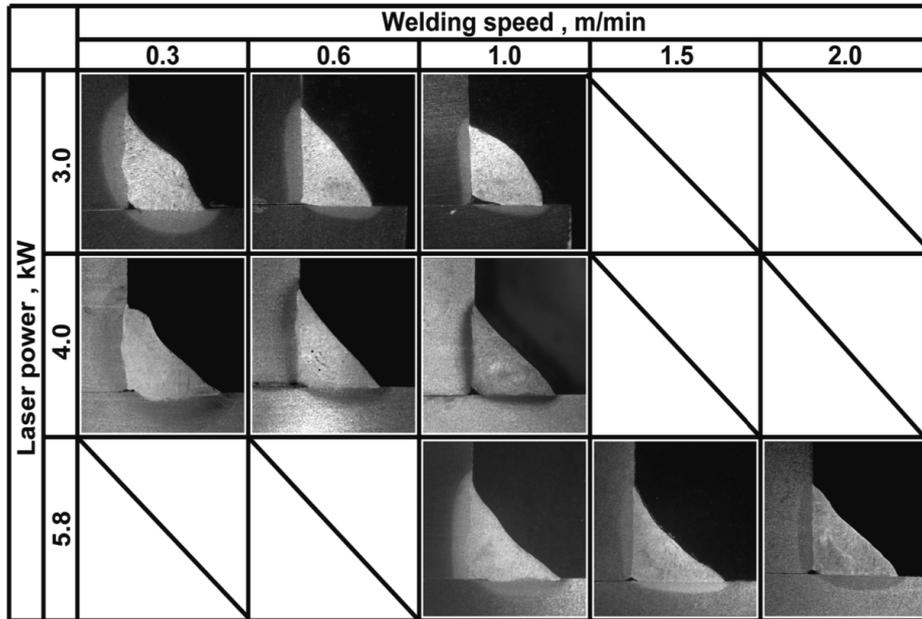


Fig. 9 Cross sections of bead welded on each wire welding speed and laser power using laser diode.

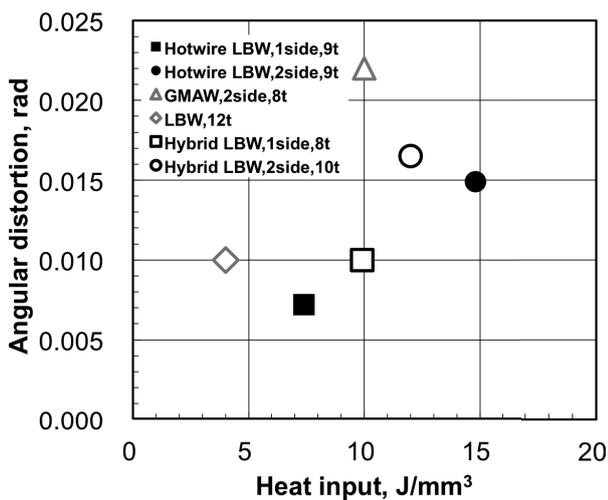


Fig. 10 Angular distortion on each welding process.

低入熱、高能率)を維持したままでの高速化が可能となる。

3.4 角変形量の測定

Fig. 10 に核溶接法における角変形量を示す¹¹⁾。ホットワイヤ・レーザ溶接での片面溶接における角変形量は、レーザ溶接およびレーザ・アークハイブリッド溶接と同等の値を示す。また、ホットワイヤ・レーザ溶接での両面溶接では、レーザ・アークハイブリッド溶接とおおよそ同一の値を示すのに対し、一般的な GMA での変形量に比べて著しく小さくなっていることがわかる。ホットワイヤ・レーザ溶接法で得られる溶接ビード形状(脚長など)は、GMA 溶接とほぼ同一の値が得られるにもかかわらず、角変形量は小さい。一方、レーザやレーザ・アークハイブリッド溶接での角変形量はほぼ同一の値であるのに対し、得られる溶接ビードはホットワイ

ヤ・レーザ溶接法に比べて小さくなる。したがって、ホットワイヤ・レーザ溶接は、角変形量が小さくかつ高溶着量、母材低希釈など優れた特性を有する溶接技術であると考えられる。

4. まとめ

高品質かつ高能率なすみ肉溶接技術の開発を目的とし、ホットワイヤ法とレーザ溶接の併用によるホットワイヤ・レーザ溶接法の適用を検討した。高速度ビデオカメラを用いたその場観察を実施し、溶接現象の詳細な検討および適正溶接条件の導出を行った。得られた結言を以下に示す。

- レーザ光は母材表面に直接照射されず、熔融池表面で反射したレーザ光が熔融池近傍の母材を僅かに溶融し、レーザ照射範囲よりも大きな脚長を有する母材希釈の極めて少ない継手が得られる。
- ホットワイヤは、溶接方向後方から、レーザの直接照射による溶断が発生しない熔融池後端部へ、適正なワイヤ電流による加熱を行うことで、安定して供給できる。
- レーザ出力：5.8 kW、溶接速度：2.0 m/min において、脚長：4.4 mm、希釈率：1%、HAZ 幅：0.45 mm、融合部の粒径：66 μ m の継手が得られた。また、溶接継手部の引張強度は設計基準強度を十分に満足していた。
- ホットワイヤ・レーザ法により、GMA 溶接等に要求されるすみ肉部形状を維持しつつ、レーザ単独溶接やレーザ・アークハイブリッド溶接と同等の低変形を実現できる。

参考文献

- 1) 上山：溶接学会誌, 78 (2009), 693-708

- 2) 長岡, 橋本, 横田, 岸本 : 神戸製鋼技報, 54 (2009), 20-24
- 3) S. Katayama, Y. Kawahito, M. Mizutani: Physics Procedia, 5 (2010), 9-17
- 4) X. Zhang, E. Ashida, S. Katayama and M. Mizutani: Quarterly J. Japan Welding Soc., 27 (2009), 64s-68s
- 5) U. Dilthey, A. Wieschemann: IIW Doc., XII-1565-99 (1999)
- 6) 牧野, 椎原, 浅井 : 溶接学会誌, 70 (2001), 400-404
- 7) F. Vollertsen, S. Grünenwald, M. Rethemeier, A. Gumenyuk, U. Reisinger and S. Olschock: Welding in the World, 54 (2010), R62-70
- 8) 堀, 渡辺, 明賀, 草野 : 溶接学会論文集, 21 (2003), 362-373
- 9) M. Yamamoto, K. Shinozaki, T. Myoga, T. Kanazawa and H. Arashin: IIW Doc. XII-1927-07 (2007)
- 10) M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Mitsuhashi, T. Nagashima, T. Kanazawa and H. Arashin: Welding in the world, 55 (2011)
- 11) 猪瀬 : 第 74 回レーザー加工学会講演論文集, (2010), 131-136