

レーザ・アークハイブリッド溶接における横向水平 溶接の施工法確立に向けた基礎検討

鶴岡, 寿樹
九州大学大学院工学府 : 修士課程

内村, 友哉
九州大学工学部技術部

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/6796166>

出版情報 : 溶接学会九州支部講演論文集. (20), pp.5-8, 2023. 溶接学会九州支部
バージョン :
権利関係 :

レーザー・アークハイブリッド溶接における横向水平溶接の 施工法確立に向けた基礎検討

○鶴岡寿樹*1, 内村友哉*2, 後藤浩二*3

Key Words: レーザ・アークハイブリッド溶接, 横向姿勢, 表当て材, 溶接施工法承認試験

1. 緒 言

一般商船の建造には、板厚 20 mm 程度の厚板が採用され、建造段階ごとに溶接位置や溶接工程が異なる。国内造船所では厚板の突合せ継手に片面サブマージアーク溶接法が採用され、船体ブロックの建造には多層盛り溶接が用いられることが多い。これらの溶接法の多くは、あらかじめ V 形や Y 形などの開先に加工しておく必要があり、溶接工程において、入熱が過大になり溶接継手の品質が低下する可能性がある。¹⁾

レーザー・アークハイブリッド溶接法（以下ハイブリッド溶接と称す。）は、アーク溶接とレーザー溶接の利点を 1 つの溶融池として利用する先進的な溶接方法である。従来のアーク溶接法と同程度またはそれ以上の溶接速度を維持しつつ、局所的かつ深溶込みな溶接により溶接変形を大幅に抑制することが可能であるため、少ない開先加工もしくは開先加工をすることなく、少ないパス数での溶接が見込まれている。ハイブリッド溶接は設備が比較的大きいため、下向姿勢を対象とすることが一般的であるが、適用姿勢の拡大により、ハイブリッド溶接で製作した高品質な溶接部を一般商船などの厚板を主構造部材とする大型鋼構造物の多くの溶接部に適用することが期待されている。近年、安価で高性能なレーザー発信器が開発され、レーザー熱源を用いた接合技術の大型鋼構造物への実用化が進んでいる。^{2,3)}

ハイブリッド溶接を横向姿勢に適用させた研究⁴⁾はすでに行われており、片側貫通完全溶込み 1 パス溶接により板厚 20 mm、溶接長 300 mm の突合せ継手製作は可能であるものの、溶融金属量を調整し表ビードの垂れを抑制する必要があることが報告されている。そこで本研究では、先行研究の技術的知見に基づき、ハイブリッド溶接を横向姿勢に適用し板厚 20 mm の突合せ継手の施工法確立を目的とした。

2. 供試材及び施工方法

先行研究⁴⁾を参照し、本研究では KA36 鋼を供試材とし、アーク溶接には溶滴が微細かつ連続化したスプレー移行により低スパッタを実現できる特殊ソリッドワイヤ KC-550 (JIS Z 3312: YGW18, ワイヤ径 1.6 mm) を使用する J-STAR[®] Welding⁵⁾を用い、シールドガスには多くの造船所で使用される安価な純炭酸ガス (30 L/min, 0.3 MPa) を使用した。試験片および溶接ワイヤの化学組成と機械的性質ならびに化学組成を Table 1 に示す。供試材寸法は板厚 20 mm、板幅 200 mm であり、プラズマ切断により開先を I 形加工された鋼板を 2 枚用いて突合せ継手を製作した。船体建造工程への導入を視野に入れ、開先近傍の酸化被膜及びプライマ等は除去せず、溶接に影響を及ぼす油分等の清掃のみとした。

仮付溶接については、溶接施工中の引裂力が抑制される傾向を示し、溶接施工中の仮付溶接割れ防止とギャップ変動抑制に効果的であるレーザー溶接を用いた溶接全線仮付溶接⁶⁾を採用した。内野ら⁷⁾により、開先裏面に 1.0mm 程度のルートギャップを有する場合に良好な外観を取得する事が報告されているため、スパーサ（フィラージェ等）を用いルートギャップを 1.0mm に設定した。

原稿受付 2023 年 8 月 18 日

*1 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

*2 九州大学 工学部技術部 Technician, Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

*3 正 員 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門 Member, Department of Marine System Engineering, Kyushu University

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of applied steel plate and weld wire.

Welding consumable	Chemical compositions [mass %]					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
KA36	0.157	0.442	1.067	0.013	0.002	416	542	21
KC-550	0.050	0.700	1.900	0.010	0.010	571	621	30

3. 先行研究の再現性確認

先行研究の再現試験として施工した溶接条件を **Table 2** に、製作した溶接長 300 mm 試験体（試験 ID. HB01）の中央断面位置におけるマクロ試験結果を **Fig. 1** に示す。表ビードにおいて溶融金属が垂れ、表ビード上部にアンダカットが確認された。さらに、藤崎らの研究報告⁸⁾に示される表面下側の溶接止端部における応力集中係数を概算すると、 $K_t = 5.1$ と計算された。これより、表ビードの垂れは溶接欠陥の発生および疲労寿命の低下の原因となり得ることがわかった。

Table 2 Welding condition.

Arc current [A]	400
Arc voltage [V]	36.0
Laser power [kW]	16.0
LvsWL [mm]	+0.5
Travel speed [cm/min.]	800
Initial root gap [mm]	1.0

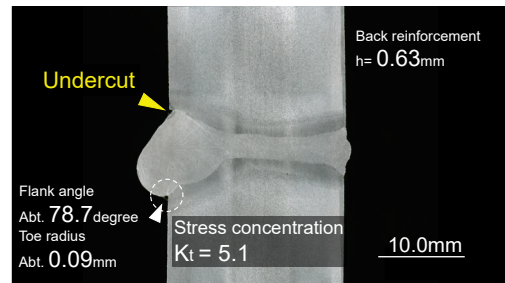


Fig. 1 Result of macroscopic test of HB01.

表ビードの垂れの改善策として溶加材供給量の抑制が挙げられるが、溶加材供給量を抑制した場合、裏ビードの余盛不足が懸念される。そこで、表ビードの垂れを抑制しつつ、抑制した溶融金属を裏面へ流すことを目的に表当て材を使用した溶接施工検討を試みた。横向姿勢における表当て材の役割について、その概略図を **Fig. 2**、本検討で使用する貼付型表当て材（神戸製鋼所製、FAMILIARCTM FB-B3 H）の設置時の様子を **Fig. 3** に示す。

貼付型表当て材を適用した溶接長 300 mm 試験体（試験 ID. HB02）の中央断面位置におけるマクロ試験結果を **Fig. 4** に示す。貼付型表当て材を用いることで表ビードの垂れを防止できていることがわかる。さらに、裏ビードの余盛高さが表当て材を使用すると増加していることも確認できた。さらに、応力集中係数を概算すると $K_t = 2.0$ と計算されることから、表当て材を用いた施工法は継手の疲労強度向上に効果的であると推察される。これらは先行研究と同様の結果であるため、先行研究の再現性は確認された。

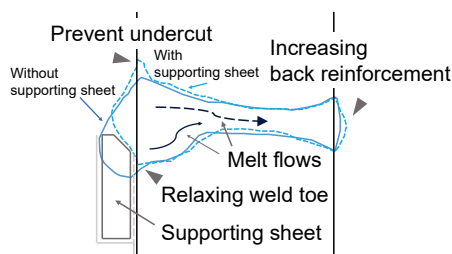


Fig. 2 Hypothesis of using supporting sheet.

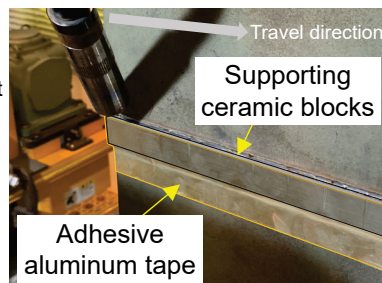


Fig. 3 Setting position view from the side.

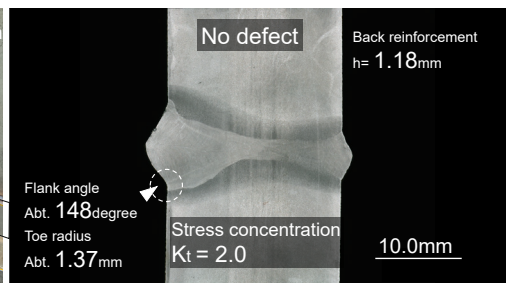
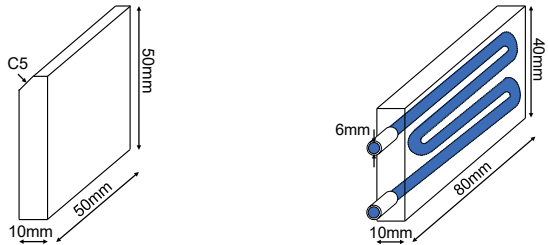


Fig. 4 Result of macroscopic test of HB02.

4. 摺動型表当て銅板の提案

表当て材を用いた施工法は継手の疲労強度向上に有効であると推察されるが、実工程において表当て材の設置作

業が生産効率低下の要因となり得る。そこで、レーザヘッドの移動に伴い摺動する表当て銅板を用いた施工法を考案した。なお、銅の融点は鋼よりも低く、溶接中の熱蓄積により銅板が溶融する危険性があるため、摺動型表当て銅板には水冷機構を備え付けた。溶融金属を支える部分のみ面取り加工された銅板と水冷銅ブロックの概略図を Fig. 5 に示し、配置外観を Fig. 6 に示す。



(A) Supporting plate (B) Cooling plate
Fig. 5 Dimension of sliding copper plate.

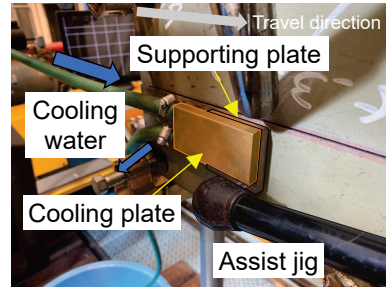
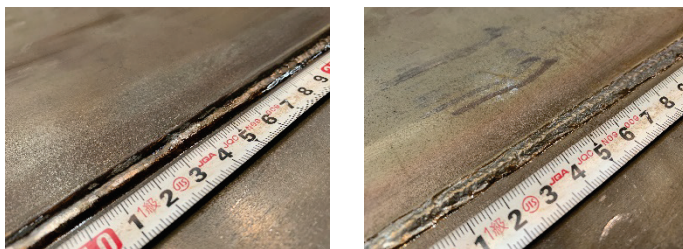


Fig. 6 Setting position view of sliding copper plate.

摺動型水冷銅板を適用した溶接長 300 mm 試験体（試験 ID. HB03）の突合せ継手のビード外観を Fig. 7 に、溶接長の中央断面位置におけるマクロ試験結果を Fig. 8 に示す。貼付型表当て材と同様に表ビードの垂れが改善され、明らかに有害と認められるアンダカットや内部欠陥は確認されなかった。



(A) Front bead (B) Back bead
Fig. 7 Photograph of bead appearance of HB03.

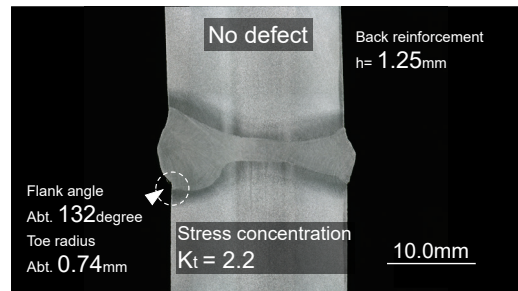
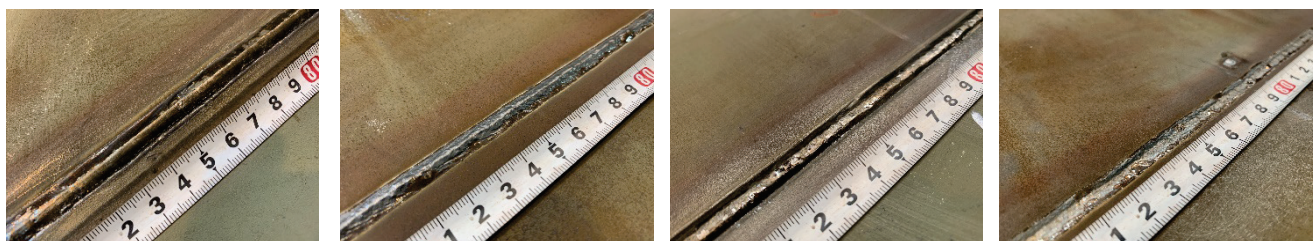


Fig. 8 Result of macroscopic test of HB03.

5. 溶接施工法承認試験

表当て材を用いた施工法を船体建造工程へ導入するにあたり、溶接施工法の信頼性確認および溶接継手の機械的性質保証のため、日本海事協会が発行する「レーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン」⁹⁾に規定される溶接施工法承認試験を実施する必要がある。溶接施工法承認試験で規定される突合せ継手の最短溶接長は 1,000 mm であるため、貼付型表当て材および摺動型水冷銅板を適用した溶接長 1,000 mm 試験体（それぞれの試験 ID を HB02-L, HB03-L と設定）を製作した。溶接施工条件は Table 2 に示す。製作した継手のビード外観を Fig. 9 に示す。両試験体において、溶接線全線にわたりビード高さおよびビード幅はほぼ一定であることが確認された。この製作した継手に検査及び試験を行い、Table 3 に示す結果が得られた。非破壊試験および機械試験の結果、両試験体ともに基準を超える欠陥は検出されなかった。



(A) Front bead (B) Back bead (A) Front bead (B) Back bead
Test ID HB02-L (Sheet), At 750 mm point. Test ID HB03-L (Sliding plate), At 750 mm point.
Fig. 9 Photographs of bead appearance.

Table 3 Approval test type, requirements and results.

Test type	Requirements	Results	
		Test ID HB02-L (Sheet)	Test ID HB03-L (Sliding plate)
Radiographic testing	Reference: ISO 5817 Level B	No defect	No defect
Tensile test	Tensile strength \geq 490 MPa	542 MPa, 544 MPa	543 MPa, 545 MPa
Side bending test	Clack length $<$ 3 mm	No defect	No defect
Charpy impact test	At DEPO: \geq 34 J At fusion line (F.L.): \geq 27 J At HAZ, 2 mm from F.L.: \geq 27 J	At DEPO: 179 J At fusion line: 162 J At HAZ: 104 J	At DEPO: 185 J At fusion line: 149 J At HAZ: 89 J
Macroscopic test	Nothing obvious defects	No defect	No defect
Vickers hardness test	Maximum hardness \leq 380 HV	240 HV	247 HV

6. 結 言

本研究では、ハイブリッド溶接を横向姿勢に適用し突合せ継手の施工法確立を目的として、板厚 20 mm に対する突合せ継手製作ならびに表当て材に関する検討を行った。以下に、本研究で得られた知見ならびに考察を示す。

- 1) 先行研究と同様に、板厚 20 mm の突合せ継手製作は可能であるものの表ビードの垂れが発生するため、対策として表当て材が必要であることを確認した。
- 2) 設置作業省略のため摺動型水冷表当て銅板を考案し、貼付型表当て材と同様に表ビードの垂れを抑制することを確認した。
- 3) 溶接施工法承認試験実施のため、貼付型表当て材および摺動型水冷銅板を適用し溶接長 1,000 mm 試験体を製作し、溶接線全線にわたりビード高さおよびビード幅はほぼ一定であることが確認された。
- 4) 製作した 1,000 mm 試験体に対し非破壊試験および機械試験を実施し、基準を超える欠陥は検出されなかった。
- 5) 実工程においてルートギャップを一定に保つことは困難のため、初期ルートギャップを変更した溶接施工条件の検討が今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 20H02372 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) For example, Lan, L. et al., Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded HSLA steel joints, *Materials and Design*, 90, 2016, 488-498.
- 2) For example, Koga, H. et al., First Application of Hybrid Laser-arc Welding to Commercial Ships, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47-3, 2010, 59-64.
- 3) For example, Roland, F., et al.: Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding, *Journal of Ship Production and Design*, 20-3, August 2004, 200-210.
- 4) 中田智也ら：レーザー・アークハイブリッド溶接における横向水平溶接の板厚範囲拡張に関する検討，溶接学会九州支部講演論文集，18，2021，29-32.
- 5) Kataoka, T., et al., Development of Ultra-low Spatter CO₂ Gas-shielded Arc Welding Process “J-STAR® Welding”, *JFE technical report*, 10, 2007, 31-34.
- 6) Uemura, T., Approach to Optimistic Process of Tack Welding by Laser in Butt Joint, *Journal of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 33, 2021, 341-345. (in Japanese)
- 7) Uchino, I. et al., A Study on Adopting Λ -Shaped Groove for Laser-Arc Hybrid Welding to Construct Thick Plate Butt Welded Joint, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 38(4), 2020, 403-417. (in Japanese)
- 8) Fujisaki, W., et al., Effects of Reinforcement Geometry and Welding Condition on Stress Concentration Factor of Butt Welded Joint, *Journal of the Japan Welding Society*, 39-446, 1990, 1533-1538. (in Japanese)
- 9) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK), Guidelines on Laser-Arc Hybrid Welding <Ver. 3>, 2016.