レーザ・アークハイブリッド溶接の一般商船建造工程への 導入に向けた諸検討

正会員 後 藤 浩 二^{*1}
正会員 津 村 秀 一^{*3}
内 野 一 成^{*5}

学生会員 上 村 崇 杜^{*2}
正会員 竹 下 竜 平^{*4}
森 山 厚 夫^{*6}

Study on Application of Laser-Arc Hybrid Welding to Hull Construction Stage of General Merchant Ships

by Koji Gotoh, *Member* Takamori Uemura, *Student Member*
Shuichi Tsumura, *Member* Ryuhei Takeshita, *Member*
Issei Uchino Atsuo Moriyama

Summary

The application of advanced welding technologies is important for improving the efficiency of hull construction processes and reducing production costs. Laser-arc hybrid welding (LAHW) technology, which combines the advantages of laser and normal arc welding, is of high quality and is expected to improve productivity. However, there are some challenges in applying LAHW to the hull construction stage of general merchant ships, because the thickness of the main structural members is thicker than that of passenger ships and high-speed ships.

The present study focused on investigating the following key aspects for involving LAHW in construction stage of commercial vessels, and useful knowledge was obtained. (1) Suitable welding conditions to fabricate the full-penetration tee joint by one-side single-pass welding, (2) Influence of the weld groove cutting process method, (3) Influence of retained primer and oxide film on joint quality, (4) Confirmation in the production by prototyping with long welding length, and (5) Improvement of welding quality by applying the rare earth metal bearing weld wire.

1. 緒 言

我が国造船業界は激しい国際競争の環境にあるが、この状況を克服する方策の一つとして、耐疲労性能に優れる等の高性能な船殻構造を建造可能な生産技術の積極的な適用により船舶建造工程の生産性を一層高める必要がある。この目的を達成するため、日本財団の助成を得て一般財団法人日本船舶技術研究協会により推進された「船舶建造高品質化・効率化技術の調査研究」プロジェクトにおいて、レーザ・アークハイブリッド溶接（以下、ハイブリッド溶接と記す）の調査研究委員会が設置され、同溶接技術の船舶建造工程への適用に向けた研究が実施された¹⁾。

ハイブリッド溶接は、現状の船舶建造工程で標準的に使用されているアーク溶接と比べて溶接入熱が小さいため、溶接変形を大幅に抑制出来る高精度・高品質の溶接技術である。また、同溶接法を採用するには高出力のレーザ光に対する作

業者への安全性に配慮し、遮光環境を整備した自動溶接とする必要があるものの、建造工程に導入が期待される種々のデジタル生産技術との親和性が高いと考えられることから、現状の船体ブロック建造工程そのものを大幅に合理化できる可能性を有する技術であると期待される²⁾。

ハイブリッド溶接に関する研究は Steen ら³⁾により最初に報告されたが、当時はレーザ出力が小さくレーザ発振器も高価であったため、大出力を必要とする溶接にレーザを適用しても経済的利点は得られないものであった。その後、Bayer ら⁴⁾により YAG レーザと TIG 溶接を組み合わせたハイブリッド溶接法が発表され、この発表を契機に、特に欧州圏においてハイブリッド溶接法の研究⁵⁾が盛んとなり、造船分野においてもレーザ溶接、またはハイブリッド溶接を船体建造工程へ適用する際の船級規則が整備された⁶⁾が、欧州圏の研究は、客船や艦艇など比較的板厚が薄い部材が多用される船種が対象であり、国内造船所で主に建造される一般商船に多用されるレベルの板厚の溶接に関しては十分に研究がなされているとは言い難い。

国内造船所におけるハイブリッド溶接の適用例として、古賀ら⁷⁾による炭酸ガスアーク溶接をアーク熱源とするハイブリッド溶接を一般商船建造において板厚 13mm 以下の板継ぎ溶接に適用した事例や、木村ら⁸⁾による板厚 8mm 程度までの板厚を対象に、商船上部構造や大型巡視船の甲板の一部にハイブリッド溶接を適用した事例が報告されている。また、橋梁建造の分野では、猪瀬ら⁹⁾により、板厚 8mm 並びに 10mm の補剛材の一部の取り付けをハイブリッド溶接に

*1 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門

*2 九州大学 大学院工学府 博士後期課程

*3 海上技術安全研究所（研究当時 九州大学大学院工学府）

*4 JFE スチール（研究当時 九州大学大学院工学府）

*5 株式会社 名村造船所

*6 日本船舶技術研究協会

原稿受理 令和 2 年 5 月 15 日

より施工し、ハイブリッド溶接継手の健全性を検証するなど、種々の研究が報告されている。

ハイブリッド溶接による実構造体建造において健全な溶接継手を製作するには、

- (1) 高精度なギャップ管理が要求されるため、フライス切削等の機械加工による開先加工の必要性。
- (2) 溶接欠陥発生の防止やスパッタ低減のため、溶接時のシールドガスとして不活性ガス (Ar) または混合ガス (Ar+CO₂) の利用が必要。
- (3) 溶接欠陥を確実に防ぐために、施工前に接合部近傍の防錆プライマを除去。

等の対策が必要である。

一般商船の船体主要構造には上述の先行研究や先行事例で適用された部位以上の板厚に対する適用性の検証に加え、建造コストの観点から、上記 (1) に対しては熱切断法により開先加工したものに対する適用性検証、上記 (2) に対してはシールドガスとして 100%CO₂ ガスの適用性検証、が必要である。

これら種々の課題に対して、先行研究⁹⁾や上述の先行事例^{7)~9)}である程度の目処はついているものの、上記 (3) などの実船建造への適用のために克服すべき課題や、一連の研究成果として、船体構造設計に新たな思想を導入し得る契機になると期待される継手の製作方法等の新たな知見を得たため、本論文にて報告する。

2. 片側 1 パス施工による完全溶込み T 継手

2.1. 溶接施工条件の導出

広く一般商船建造工程にハイブリッド溶接技術を導入する事を念頭に、先行研究⁹⁾と同様に標準的な溶接材料 (ソリッドワイヤ MG-50¹⁰⁾、ワイヤ径 1.6mm) とシールドガスは 100%CO₂ ガスを採用した。溶接材料 MG-50 は JIS Z 3312 に規定される YGW11 および AWS A5.18 ER70S-G を満たす高張力鋼用の船級認定ワイヤである。供試材は一般商船船体平行部への適用を念頭に、板厚 14mm、並びに 21mm の NK 規格¹¹⁾を満たす船体構造用鋼 KD36 を採用した。

継手外形を Fig. 1 に示す。立板 (板厚 14mm) 側の接合部界面はレーザ切断面であり、切断後に開先面に残存した酸化被膜は溶接施工前にグラインダにより除去した。また、鋼材には防錆プライマが塗装されていたが、気孔欠陥の発生を懸念し、立板及び主板 (板厚 21mm) それぞれの接合部近傍のプライマを剥離した後に溶接施工した。

本研究に適用したハイブリッド溶接装置の主要構成を Table 1 に示す。適切な溶接条件導出のためには、種々の溶接パラメータ設定を考慮する必要があるが、これらの溶接パラメータを各々変化させた全ての組み合わせについて実験を行うことは多大な労力を要するため、品質工学の手法¹²⁾を取り入れた実験を実施した。なお、本節の詳細については

参考文献¹³⁾を参照されたい。

Table 2 に示す各種パラメータを制御因子及び誤差因子に設定し、ビード外観が良好となる溶接条件を検討した。その他の溶接条件は Table 3 に示す一定値として施工した。

Fig. 1 Test assembly of tee-shaped joint for investigating suitable welding conditions.

Table 1 Overview of applied laser-arc hybrid welding systems.

Laser systems	Arc welding equipment
<ul style="list-style-type: none"> Oscillator: YLS-20000-S2T (IPG Photonics) Processing head: BIMO 90° (HIGHYAG) Fiber cable: QBH process fiber, core diameter 0.3mm, length 20m (Opto Science) Chiller: RKE18000A-V-IPG (Orion Machinery) 	<ul style="list-style-type: none"> Power supply: TPS5000 MV-R (Fronius) Maximum current: 500 A Filler wire diameter: 1.6mm Wire feed system: VR7000 Push pull Water cooling system: FK4000R-FC

Table 2 Control factors and noise factors for investigating suitable welding conditions.

Control factor	Number of Levels
Laser power	2
Arc current	3
Arc voltage	3
Defocusing distance, D_f	3
Arc torch angle with horizontal, θ_A	3
Laser head angle with horizontal, θ_L	3
Arc push angle, θ_p	3
Laser drag angle, θ_d	3
Noise factor	Number of Levels
Wire extension, d	2
Height of laser radiation point from flange surface, H_L	2
Horizontal distance between web surface and arc torch aiming point, D_{AW}	2

(Note.)

Table 3 Fixed welding conditions applied in this study.

Item	Value
Gap of joint (mm)	less than 0.05
Travel speed (mm/min)	1,000
Vertical distance between laser radiation point and arc torch aiming point, D_{LA} (mm)	3

上記の溶接施工条件探索実験の結果、ビード外観は良好でも、Fig. 2 に例示するように内部に融合不良が生じる場合が確認された。

Fig. 2 Example of lack of fusion.

そこで、レーザ照射域内に主板と立板の境界面が位置するようにレーザ狙い角度を低角度に、焦点はずし距離を大きくとりレーザ照射域を拡大することで融合不良を防止することを考え、焦点はずし距離 D_f を 20mm に設定して固定条件とした。一方、焦点はずし距離 D_f を 20mm と設定すると単位面積当たりのレーザ出力（パワー密度）が低下して立板を貫通できないことが懸念されたため、溶接速度を一定値から制御因子に変更し、追加実験を実施した。

以上の結果、ビード外観と内部欠陥が無いことを評価指標として、健全な継手が得られる溶接条件を同定した。同定した溶接条件の一部を Table 4 に、断面マクロを Fig. 3 にそれぞれ示す。なお、ギャップに応じて溶接電流及び電圧のみを適切に設定すれば、その他の溶接条件は変更すること無く、

ギャップ 1.5mm まで健全な継手を製作できることを確認している。

Table 4 Detected suitable welding condition.

Item	Value
Travel speed (mm/min):	900
Laser power (kW):	20
Arc current (A):	425
Arc voltage (V):	27.3
Vertical distance between laser radiation point and arc torch aiming point, D_{LA} (mm):	3
Allowable maximum gap of joint (mm):	1.5

(a) $H_L = 1.65\text{mm}$

(b) $H_L = 2.0\text{mm}$

(Note) Arrows indicate the direction of laser and arc incidence.

Fig. 3 Example of macroscopic observations.

2.2. 継手性能評価

本溶接施工法を実船建造に適用するには溶接施工要領書の承認が必要となる。そこで、日本海事協会によるレーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン¹⁴⁾に沿って継手品質評価を実施した。同ガイドラインで要求される溶接長が 1,000mm 以上であるため、Fig. 1 に示す継手形状・板厚と同様に溶接長を 1,000mm に延伸した継手を Table 3 に示す施工条件下で製作した。その後、外観試験、複数の非破壊試験（UT、MT 及び RT）、ガイドラインによる指定箇所から抽出した試験片に対する断面マクロ観察及びビッカース硬さ試験を実施した。継手外形及び試験片抽出位置等を Fig. 4 に示す。

Fig. 4 Test assembly tee-shaped joint.

Fig. 5 に溶接線長さ中央位置付近（溶接開始位置から 515～535mm 付近）のビード外観を示すが、良好なビード外観が得られたことが確認できる。Fig. 6 には各々の観察位置における断面マクロ写真および NK ガイドラインに規定され

た測定点におけるビッカース硬さ（測定荷重 10kgf）の測定値を示す。断面マクロ写真から無欠陥の健全な溶接継手が製作できていることが確認できる。また、ビッカース硬さ最高値は 258HV（試験片 M1（溶接スタート側）の溶接入射側、主板側溶接止端部、Fig. 6 の枠囲み値）であり、ガイドラインで規定された上限値 380HV を十分に下回る値であった。なお、3 種類の非破壊検査（UT, MT 及び RT）断面上）においても、有害となる欠陥は検出されなかった。

(a) front side, overview

(b) front side, center of specimen

(c) back side, overview

(d) back side, center of specimen.

Fig. 5 Appearance of weld beads.

(i) Macro

(ii) Hardness (Unit: HV)

(a) Specimen M1

(i) Macro

(ii) Hardness (Unit: HV)

(ii) Hardness (Unit: HV)
(b) Specimen M2

(c) Specimen M3

Fig. 6 Macroscopic observations and Vickers Hardness distributions.

2.3. 疲労強度評価

船級協会の溶接施工法承認を取得するためには疲労強度に関する検証は要求されないものの、船体構造中で生じる損傷事故の大半は疲労損傷に起因するものである。従って、本研究で検討している完全溶込み溶接継手について疲労強度の確認を行った。

Fig. 4 中に “Fatigue test specimens” と示した採取位置から疲労試験片を採取した後立板高さを 60mm に減じ、その後溶接線長さ方向に主板厚と等しい 21mm ごとに切断した疲労試験片を製作した。疲労試験は ISO TR14345¹⁵⁾ に準拠して三点曲げ負荷（応力比 0, 周波数 10~15Hz）により実施した。疲労亀裂はすべて主板側溶接止端部より発生したが、溶接入射側、出射側については明確な傾向はなかった。

また、同一の鋼材、溶接材料、及び溶接施工条件を適用し、Fig. 4 に示す試験体において立板長さを 65mm に変更して基板裏面側にも取り付けることで、荷重非伝達型十字継手（片面ごとに片側からの 1 パス施工）を製作し、疲労試験（応力比 0.01, 周波数 5Hz）を実施した。T 継手三点曲げ疲労試験の結果と十字継手軸力疲労試験の結果を比較したものを Fig. 7 に示す。

Fig. 7 Comparison of S-N curves of tee-shaped joint subjected to three point bending and a cruciform joint subjected to axial loading.

同図中には参考のため、IIW 疲労設計曲線¹⁶⁾ FAT100（荷重非伝達型付加物継手，K 開先突合せ溶接，止端グラインダ仕上げ），JSSC 疲労設計曲線¹⁷⁾ Class E（荷重非伝達型溶接継手，溶接まま），及び IIW 設計曲線 FAT80（荷重非伝達型の付加物継手，すみ肉溶接，溶接まま）も示す。

片側完全溶込み T 継手の疲労強度は，3 点曲げ試験では荷重非伝達型溶接継手の設計曲線である JSSC Class E，並びに IIW 設計曲線 FAT80 よりも十分安全側であり，グラインダ仕上げされた設計曲線（IIW FAT100）と比較しても安全側であることが確認された。また十字継手の軸力疲労試験においても，IIW 疲労等級 FAT80 を上回ることを確認した。

片側貫通 T 継手の優位性について更に検討するため，立板両側から各 1 パスずつ溶接して製作した完全溶込み T 継手（以降，両側完全溶込み T 継手と称する）から採取した試験片を用いた疲労試験結果¹⁸⁾との比較を Fig. 8 に示すが，片側貫通継手の方が良好な疲労強度特性を有することが確認できる。この理由を検討するため，Fig. 1 中の溶接長中央部（500mm 付近）における溶接止端形状，及び弾性 FE 解析から得た応力集中係数について比較した。結果を Table 5 に示す。なお，溶接入射側と反対側の数値のうち，小さな測定値であった値を示した。この結果より片側貫通継手は両側貫通継手と比較して溶接止端部の応力集中が低いことが確認できる。その結果が両継手の疲労強度の相違を生じていると推察される。

Fig. 8 Comparison of S-N curves between single-pass and twin-pass tee-shaped joint subjected to three point bending.

Table 5 Geometry of the weld bead shape and stress concentration factor.

Welding pass	Single	Twin
Weld toe radius [mm]	2.2	0.78
Leg length on the base plate [mm]	4.70	5.37
Frank angle [deg.]	45.7	51.9
Stress concentration factor [-]	1.89	2.44

これまでに示した片側完全溶込み T 継手に関する疲労強度検討では，溶接中断・再開箇所についての検討を行っていない。実船適用に際してはこのような溶接欠陥が生じやすい場所に対する疲労強度について十分に知見を蓄積することが必要であろう。

2.4. 長尺継手の試製作

供試材は 2.1 節で述べたものから，基板板厚のみ 17mm に変更したものを使用した。なお，実機適用という観点から，開先面及びその近傍に残存した防錆プライマ及び酸化被膜は除去せずに溶接施工した。

本施工は溶接長が長い場合，立板の仮付が必要である。また，ハイブリッド溶接とはいえ従来のアーク溶接と比べると狙い位置のズレに対する裕度は厳しいため，自動車製造時の溶接向けに開発されたシームトラッキング装置^{19)~21)}と同様の機構を有する装置を導入し，これを活用した溶接線全長 5,000mm の継手製作を試みた。なお，本研究で使用したレーザー発振器の特性上，施工距離が延びる（連続施工時間が延びる）に従いレーザー出力が低下することを考慮し，溶接長 2,000mm の段階で一旦施工停止し，その後 3,000mm の施工を実施した。加えて，シームトラッキング装置が検出したギャップ幅に応じてレーザー出力を自動的に微修正した。初期ギャップはトラッキング検知の観点から，厚さ 1.5mm のフィラーゲージをスペーサーとして 500mm 間隔で立板と基板の間に挿入することで 1.5mm に設定した。

Fig. 9 に施工中のレーザー出力変化，Fig. 10 に前半部である溶接長 2,000mm のビード外観の一部，Fig. 11 に後半部である溶接長 3,000mm のビード外観の一部を示す。

Fig. 10 及び Fig. 12 に示す通り，表ビードは一部の区間でビードオン溶接のように立板から離れて基板上にビードが形成され，裏ビードはレーザーにより裏に一層流し込まれたような形跡が確認された。施工後にアークトーチの固定部を確認したところ，一部の保持用ネジに緩みが確認された。また，(a) に示す施工中のレーザー出力変化を参照すれば，フィラーゲージ挿入位置ではギャップ 0.0mm と判断されたため，瞬間的にレーザー出力が増大しており，トラッキングによるギャップ幅検知とこれに応じたレーザー出力制御は問題なく動作したと考えられる。そこでアークトーチを十分に固定し直して同一施工条件で後半の溶接長 3,000mm の施工を実施した。Fig. 11 に示す通り，3,500mm 付近までは安定した溶接施工が行えている。これらの結果から，トラッキング装置の不調ではなく，物理的な理由でアークトーチ位置が実施工時にずれたと考えられる。

一方，3,500mm 地点付近から裏ビードが波打つような現象が確認できる。3,500mm 地点はフィラーゲージ（スペーサー）投入位置であるため，3,700mm 地点（約 113 秒付近）のレーザー出力に着目すると，レーザー出力は約 17kW 程度の出力であった。一方，溶接長 2,750mm（50 秒付近）並びに 3,200mm

(80 秒付近) 地点でも同程度の出力であるが安定した裏ビードが形成されていた。

Fig. 9 History of laser power during the welding.

同程度のレーザ出力でも裏ビード形状が異なった理由として、

- (1) 熱レンズ効果によるレーザ焦点シフト。
- (2) 長時間のレーザ照射に際してのレーザ出力低下。
- (3) 溶接装置への固着が不十分であったことに起因する、施工中のレーザヘッドやアークトーチの微小振動の結果としての安定した熔融池形成の阻害。
- (4) ヒューム等の滞留に起因する加工点でのレーザ出力低下。

等が考えられるが、主因の特定には至っていない。一方、

本研究では最大出力 20kW のレーザ発振器を実験に用いており、本節の実験では最大出力の 90%を設定値として溶接実験を行っている。先に挙げた原因(1)及び(2)については、適用板厚を小さくし、最大出力近傍でのレーザの利用を避けることで解決可能であり、(3)については、周辺機器の進歩により解決可能であると期待される。

また、表ビードは脚長が非常に短く、立板に沿うビードを形成した。裏ビードの溶加材量も考慮すると、現状の溶接条件(ワイヤ送給量)では全体の溶加材量が不足していると考えられ、溶接速度の低減等の対策を講じる必要がある。レーザ出力は 6 区間で変動しているが、これは溶接長 3,000mm におけるフィラーゲージ設置間の区間数(設置間隔 500mm)と合致している。すなわち、トラッキング装置の各機能は十分に発揮されていたことが確認できる。

以上に説明したように、実機レベルの溶接長(2,000mm 及び 3,000mm)の完全片側溶込み T 継手の製作を試みたが、溶接長全体に渡っての良好な継手製作には至っていないと考えられる要因を 4 つ挙げたが、(4)を除き、レーザ発振器の最大出力と適用可能板厚を考慮した適切な適用継手の選定、あるいはレーザ発振器を含む周辺機器の進歩により十分解決可能であると期待される。加えて、本研究で導入したシームトラッキング装置を適切に活用することで、施工中に生じる溶接変形には十分に対処できるものと期待される。

Fig. 10 Example of weld bead appearance of full-penetration tee-shaped joint fabricated by one-side single pass welding. (Welding section from 0mm to 2,000mm, Initial gap 1.5mm, using seam tracking system).

Fig. 11 Example of weld bead appearance of full-penetration tee-shaped joint fabricated by one-side single pass welding.
(Welding section from 2,000mm to 5,000mm, Initial gap 1.5mm, using seam tracking system).

3. 突合せ溶接継手の品質改善に向けた諸検討

ハイブリッド溶接の有する利点として、深溶込みと溶接変形の抑制効果があるため、船体建造工程導入の一候補として、現状のサブマージアーク溶接を適用した板継施工(突合せ溶接)への導入が期待される。突合せ溶接部は船体強度確保上、高い安全性が求められるため、高品質な継手の製作が必要である。本章ではハイブリッド溶接を用いた突合せ溶接継手の製作に関して、この品質に及ぼす諸因子を検討すると共に実機レベルの溶接長を有する長尺継手の製作を試みた。

3.1 開先加工面性状の影響

ハイブリッド溶接では開先加工精度が継手品質に影響を及ぼすため、客船建造へのハイブリッド溶接導入で先行する欧州の造船所では、開先面を機械加工仕上げしている。一方、一般商船建造に際してはコスト面の観点から熱切断による開先加工が志向される。そこで先行研究⁹⁾では熱切断の中で加工精度に優れるレーザ切断で開先加工することとして、良好な品質を有する継手製作を可能としたが、一般商船を主に建造する国内造船所ではプラズマ切断やガス切断が多用されている上、Y開先のようにガス切断のみで開先加工可能な場合もある。そこでプラズマ切断及びガス切断により開先加工した場合でも、ハイブリッド溶接により良好な品質の継手を製作するための条件について検討した。

溶接材料及びシールドガスは2.1節で述べたT継手の検討と同じものである。供試鋼板も同種のKD36であるが、板厚17mm、板幅100mm、板長300mmの板2枚用いて突合せ継手を製作した。開先形状はI形であり、切断後に開先面に残存した酸化被膜は溶接施工前にグラインダにより除去した。加えて、気孔欠陥の発生を懸念し、接合部近傍の塗布された防錆プライマは剥離した後に溶接施工した。

3.1.1 溶接施工条件の検討

安定した突合せ継手製作のための溶接施工条件を、レーザ切断により開先加工した継手を用いて検討した。溶接ビード外観と溶接線長さ中央部付近の断面マクロ観察に基づいて品質を判断し、良好な継手が得られた溶接施工条件について

その一部をTable 6に示す。本検討ではギャップをほぼゼロとして裏当て材を用いることなく施工した。なお、溶接電流及び電圧を微調整することで、ギャップ0.5mmまで良好な溶接施工が可能であることを確認している。

Table 6 Detected suitable welding condition.

Item	Value
Travel speed (mm/min):	1,200
Laser power (kW):	12
Arc current (A):	400
Arc voltage (V):	26.0
Defocusing distance (mm):	-5

(a) Front side (b) Back side
Fig. 12 Appearance of weld beads.

試験体のビード外観をFig. 12に示す。表ビード周辺ではスパッタが飛散しているものの、表ビード及び裏ビード共に無欠陥の比較的良好なビード外観を確認できる。

(a) Macroscopic observations. (b) Measured Vickers hardness
Fig. 13 Macroscopic observation and Vickers hardness distribution.

次に、レーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン¹⁴⁾に沿って溶接部のビッカース硬さを測定した。断面マクロ写真と測定結果を Fig. 13 に示すが、内部欠陥は無いことが確認できる。測定点におけるビッカース硬さ（測定荷重 10kgf）の最高値は 297HV であり、ガイドラインで規定された上限値 380HV を十分に下回る値であった。

3.1.2 切断面粗度

通常の船体建造工程に適用可能な切断条件下でレーザ切断、プラズマ切断、並びにガス切断の 3 種類の熱切断により得られた開先加工面の表面粗度を JIS B 0601²²⁾に規定された算術平均粗さにより評価した。

算術平均粗さの測定には、小型表面粗さ測定機（ミットヨ、サーフテスト SJ-210）を用いた。参考のため、機械加工面の粗さも測定した。Fig. 14 に測定対象の断面写真を、Fig. 15 に測定結果を示す。

Fig. 14 Measured beveled surface by each cutting method.

Fig. 15 Arithmetic average roughness of beveled surface by each cutting method.

機械加工面と比較するとガス切断面の粗度は非常に大きい。また、レーザ切断鋼板とプラズマ切断鋼板の表面粗度は

機械加工面に比べると大きいものの、両者はほぼ同レベルであった。この結果より、レーザ切断と同様にプラズマ切断により準備した開先でも健全な継手が製作できることが期待される。Fig. 14 においてプラズマ切断面の表面上部が暗く見えるのは、プラズマ切断特有の R 形状（肩ダレ）によるものである。

3.1.3 継手品質評価

開先加工をプラズマ切断およびガス切断により行い、突合せ継手を製作した。得られたビード外観及び溶接長中央付近の断面マクロ観察を行い、断面マクロ観察面に対してレーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン¹²⁾にしたがって溶ビッカース硬さを測定した。プラズマ切断材について Fig. 16 に、ガス切断材について Fig. 17 に示す。両者とも表ビード側にスパッタが散見されたものの、ビード形状自体は良好であった。また、測定点におけるビッカース硬さ（測定荷重 10kgf）の最高値はプラズマ切断材で 267HV、ガス切断材で 276HV であり、ガイドラインで規定された上限値 380HV を十分に下回る値であった。

Fig. 16 Weld bead fabricated a test piece with a bevel by plasma cutting.

Fig. 17 Weld bead fabricated a test piece with a bevel by gas cutting.

一方、プラズマ切断材では裏ビードの余盛高さが 2.2mm あり、ガス切断材の 1.7mm と比較して高い結果が得られた。なお、Fig. 13 に示したレーザー切断材では 1.2mm であった。この原因は、プラズマ切断特性から形成される R 形状（肩ダレ）の結果、他の試験体よりも試験体裏側のルートギャップが相対的に大きくなったことが原因と推察される。また、断面マクロ観察では内在欠陥は確認されなかった。

以上の結果、現状の造船所で標準的に採用されている切断条件を守れば、プラズマ切断やガス切断により開先加工してハイブリッド溶接を施工しても、継手品質に大きな影響を与えないと推察される。一方、プラズマ切断特有の切断面肩ダレ等が溶接施工結果に影響を与える可能性が考えられることや、開先面が長尺となる場合は切断精度にもバラツキが生じるであろうから、プラズマ切断やガス切断による開先加工材に対するハイブリッド溶接の適用に関しては、疲労強度を含む継手強度に関する更なる検討が必要であろう。

3.2 長尺継手の試製作

実機建造への適用性検証のため、溶接線全長 5,000mm の継手製作を試みた。なお、前述の完全溶け込み片側貫通 T 継手の場合と同様に、施工距離が延びる（連続しての施工時間が延びる）に従いレーザー出力が低下することなどを考慮して施工回数を複数回に分割し、数分程度の小休止後に施工を再開した。仮付け溶接については、250mm 間隔でレーザー単独照射（レーザー出力 6kW、フィラーワイヤ無し）による点付けによる仮付けを行った。また、始終端にはエンドタブは取り付けしていない。

なお、本施工に先立ちアーク溶接電源を変更（Fronius TPS5000 MV-R からダイヘン Welbee Inverter M500G に）したため、予備試験により溶接条件を再検討し Table 6 に示す条件のうち、初期ギャップに応じて Table 7 に示すものに変更し溶接施工を行った。

Table 7 Updated welding conditions.

Item	Gap: 0mm	Gap: 0.2mm
Laser power (kW):	16.0	12.0
Arc current (A):	320	350
Arc voltage (V):	26.5	30.0

3.2.1 初期ギャップ 0mm の場合

溶接長 250mm 毎にレーザー出力を初期指令値よりやや高い指令値に変更することで意図するレーザー出力を平均的に維持する対策に加えて、溶接長 1,000mm ごとに一旦施工を 3 分程度休止し、施工を再開する対策を講じた。

Fig. 18 にビード外観の一部を示す。表ビードの一部で溶け落ちに近い現象が見られるものの、全体的に安定したビードが形成できた。一方、スパッタが多く見られるが、ビード

上にも金属粒が常に付着していたことを考えると、アーク溶接に起因するスパッタではなくレーザー照射によるキーホールから上空方向に向かって噴出されたブルームにより散った金属粒であると考えられる。裏ビードは第 3 施工区間（溶接長 2,000mm から 3,000mm 区間）が他の区間と比べてビード形成が不安定であった。これは溶加材が必要以上のレーザー照射により吹き飛ばされたことによる溶け落ちと考えられる。本溶接条件はレーザー切断 I 型開先で初期ギャップが 0mm に対するものであるが、ギャップが拡大した場合に同様な溶け落ちが確認されている。したがって、この区間では仮付けを外すような面外変形が発生していたと推察される。-

3.2.2 初期ギャップ 0.2mm の場合

できる限り連続して長尺の溶接施工を行うことを念頭に、溶接長 2,000mm の施工後一旦休止し、数分後に施工を再開して 3,000mm の溶接を施工した。初期ギャップを 0.2mm 以上確保するために厚さ 0.5mm のフィラーゲージ（スペーサー）を溶接始端から 250mm 毎に設置し、これをレーザー単独照射により溶かして仮付け溶接することで、ギャップを設定した。この結果、溶接長全体にわたるギャップが 0.2mm 程度となった。また、前節と同じくレーザー出力の定期的な指令値更新も行った。

Fig. 19 にビード外観の一例を示す。Fig. 18 に示した初期ギャップ 0mm の結果と比較して、溶接距離が長いにもかかわらず表ビードと裏ビード共に非常に安定した外観を得た。一方、一部仮付け溶接のところで溶加材過剰による溶落ちが生じたことが確認できる。表側では初期ギャップ 0mm の場合と比較してスパッタの低減が確認できる。初期ギャップを設けた試験体では、レーザーがアーク溶接により形成される溶融池を裏面に押し出し出す際、突合せ部に隙間があることで隙間の無い初期ギャップ 0mm の試験体に比べてブルームの発生量が低下したと共に、発生したブルームが裏面にも流れ出やすくなったことが影響していると推測される。溶接長 4,800mm 以降に見られた溶け落ちは、エンドタブを設置せずに施工した上、面内回転変形を抑制する治具を定盤都合により十分に設置できなかったことによる拘束力の不足に起因すると推察される。

Fig. 18 Weld bead appearance of butt welded joint. (Initial gap 0mm).

Fig. 19 Weld bead appearance of butt welded joint. (Initial gap about 0.2mm).

4. 溶接線近傍に残存する防錆プライマおよび酸化皮膜の影響

気孔欠陥防止のためには、溶接施工前に接合部近傍の防錆プライマ除去することが有用である。また熱切断により開先面を加工する場合、切断面に酸化皮膜が残存すると同様に溶接欠陥を誘発することが懸念される。一方、アーク溶接を用いる現在の船体建造工程では、プライマや酸化皮膜を事前に除去せずに施工し、かつ適切な施工条件を守れば有害な欠陥が発生することは無い。したがって、ハイブリッド溶接を船体建造工程に導入するには、プライマや酸化皮膜が残存しても良好な継手品質を確保できることが必要であろう。そこで、これらが残存した場合の継手品質に及ぼす影響について検討した。

溶接施工に先立ち、試験材のプライマ及び酸化被膜の厚さについて膜厚計（サンコウ電子計測器 SWT9200、プローブ：FN-325）を用い測定した。試験材はレーザ切断により切断されたものを使用した。このため、鋼板下面にレーザ切断時に付着したと思われるヒュームによる汚れが確認された。膜厚計測位置は板幅中央位置の端部から試験体長さ方向 100mm 及び 200mm の 2 箇所を 5 回ずつ、6 試験体（合計 60 点）について測定した。酸化被膜に関しては、板厚中央位置で長さ方向の 100mm、200mm、300mm の 3 箇所を 7 回ずつ、4 試験体（合計 84 点）について測定した。測定結果の平均値は試験材上面のプライマが 50.0 μ m、下面のプライマが 63.2 μ m、切断面の酸化皮膜が 23.0 μ m であった。試験材上面と下面ではプライマ膜厚には約 10 μ m の差が確認されたが、これは切断ヒュームによる汚れも一緒に計測したためと考えられる。各測定点におけるプライマ及び酸化被膜の膜厚計測値のばらつきはほとんど無かった。

4.1 突合せ継手

試験材上面のみにプライマを残存させ下面のプライマ及び切断面の酸化皮膜を除去した試験片（ID: B1）、同様にして下面プライマのみ残した試験片（ID: B2）、酸化被膜のみを残してプライマを全て除去した試験片（ID: B3）を準備し、それぞれ突合せ継手を製作した。ギャップはおよそ 0.5mm であり、本節の検討では Table 6 に示す条件のうち、レーザ出力、溶接電流、溶接電圧の設定値を Table 8 の値に変更し溶接施工を行った。

Table 8 Updated welding conditions.

Item	Value
Laser power (kW):	12.0
Arc current (A):	450
Arc voltage (V):	27.3

製作した継手のビード外観及び溶接中央位置での断面マクロをそれぞれ Fig. 20～Fig. 22 に示す。Fig. 20 に示す上面のみにプライマを残存させた試験片を用いた継手では、表ビード高さが若干低くなっているもののビード外観及び断面マクロは良好である。一方、Fig. 21 に示す下面のみにプライマを残存させた試験片を用いた継手では、表裏の両ビードにアンダーフィルが生じた。Fig. 22 に示す酸化皮膜を開先面に残存させた試験片を用いた継手でも同様に表ビードにアンダーフィルが生じた。

Fig. 20 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: B1)

Fig. 21 Weld bead appearance and macroscopic observation (ID: B2)

小野ら²³⁾はレーザ溶接により製作された突合せ溶接継手を対象として、突合せ面に酸化被膜が存在する場合、溶接中に表面、及び裏面から激しいスパッタが観察され、表面にアンダーフィルが生じることを報告している。また、この理由として溶融金属中の酸素濃度が高くなり、表面張力が低下するとともに、ガス生成による攪拌・放出により材料表裏面からスパッタが飛散したと考察している。レーザ溶接により酸化被膜が熱分解され生成されるガス²³⁾とプライマがアーク溶接により熱分解され生成されるガス²³⁾では共通して CO が多く含まれていることから、本実験においても小野らが考察した要因により、アンダーフィルが発生したと考えられる。また、試験体上面のみプライマ残存の場合 (ID:B1) は溶接時に生成されたガスは大気中に放出され溶融金属内に混入しないため、プライマ影響が確認されなかったと推測される。

以上の結果より、ハイブリッド施工において試験体下面のプライマ及び酸化被膜が溶接継手製作時の欠陥形成の要因となる可能性が懸念される。一方、酸化被膜が原因となる欠陥の低減には、フラックス入りワイヤ (FCW) 等を用い生成されたガスを速やかに排出することが有効であると考えられる。

4.2 完全溶け込み片側貫通 T 継手

完全溶け込み片側貫通 T 継手について、接合面近傍のプライマ及び酸化被膜を除去した試験体 (ID:T1)、プライマ及び酸化被膜ままの試験体 (ID: T2) を 2 章に示した施工条件により製作した。製作した継手のビード外観及び溶接中央位置での断面マクロを Fig. 23 及び Fig. 24 に示す。いずれの試験体のビード外観及び断面マクロには欠陥は確認されず、完全溶け込み片側貫通 T 継手製作時にはプライマ及び酸化被膜の除去は不要と判断できる。

T1 試験体と T2 試験体のビード形状を比較すると、T2 試験体の方が緩やかなビード形状となっている。この結果は 4.1 節で考察した、溶融金属中の酸素濃度が高くなり表面張力が低下した可能性を支持している。一方、突合せ溶接継手では欠陥が生じたにも関わらず、すみ肉溶接継手では無欠陥となった理由については、すみ肉溶接継手ではギャップ 0mm で溶接施工を行ったため溶融金属がスパッタとなって飛散

しても、継手形成に必要な溶融金属を最低限確保できたためと考えられる。

5. 極低スパッタアーク溶接技術を活用したスパッタ低減に関する検討

ハイブリッド溶接ではレーザとアークという二つの異なる熱源が複雑に作用し合うため溶融池の挙動が安定にくく、現時点で同定した溶接条件ではスパッタが飛散しやすいといった課題が残されている。一方、極低スパッタを実現した炭酸ガスアーク溶接技術として J-STAR® Welding²⁵⁾が提案されている。同溶接法は極性を従来の棒プラスに対して逆の棒マイナスとし、適量の希土類金属 (Rare earth metal: REM と記す) を添加したワイヤを用いる炭酸ガスアーク溶接法である。この溶接法では溶滴移行を微細かつ連続化した微細スプレー移行にできるため、従来のアーク溶接と比較して深い溶込みが得られ上に、スパッタも大幅に低減できる。また、同溶接法をハイブリッド溶接に適用することで、本研究とはシールドガス成分は異なるもののハイブリッド溶接におけるスパッタ低減対策に関する有用性が示されている²⁶⁾。そこで、これをハイブリッド溶接に適用し、スパッタの低減を試みた。

試験材は板厚 17mm の KD36 鋼であり、アーク溶接ワイヤとして J-STAR® Welding 用のワイヤ KC-550 (ワイヤ径

1.6mm) を用いた。同ワイヤは JIS Z 3312 における YGW11 に該当しつつ微量の REM が添加されたものである。また、ビード外観を基準に溶接条件を検討し、適切な外観を得つつ溶接速度をできるだけ速くできる施工条件を同定した。施工条件のうち、本項で改めて設定したものを Table 9 に示す。

Table 9 Welding condition by using J-STAR® Welding.	
Item	Value
Travel speed (mm/min):	1,600
Arc current (A):	450
Arc voltage (V):	29.2

Fig. 25 に J-STAR® Welding を適用した場合の外観を示す。同図には比較のため、これまでの研究で適用してきたソリッドワイヤ (MG-50) を用いて施工した際のビード外観も示す。この結果より J-STAR® Welding の適用により大幅なスパッタ低減を達成できることを確認した。なお、溶込み形状の比較においても、通常のアーク溶接を適用した場合と比較して J-STAR® Welding を適用したほうが、より高温割れを生じにくい溶込み形状となることも確認している。

同溶接法の実機への適用拡大のためにも、疲労強度を含む継手強度の検証を一層進める必要がある。

(a) J-STAR® Welding

(b) Conventional welding consumable (Solid wire MG-50)

Fig. 25 Front side appearance of butt welded joint by using J-STAR® Welding and conventional arc welding in case of Laser arc hybrid welding.

6. 結 論

本研究では、従来のアーク溶接と比較して優れた性能を有する溶接継手を製作可能なレーザー・アークハイブリッド溶接技術を、一般商船の建造工程に導入するために克服すべき複数の課題に取り組み、以下の成果を得た。

- (1) 片側からの 1 パス施工による完全溶込み T 継手製作について、一般商船で適用される板厚レベルでの同施工法を確立するとともに、疲労強度面 (十字継手の軸力疲労試験において IIW 疲労等級 FAT80 を上回る) を含めて良好な継手性能を有することを確認した。
- (2) 実機レベルの溶接長を有する完全片側溶込み T 継手の

製作を試みたが、溶接長全体に渡って良好な継手の製作には至らなかったが、レーザー発振器の最大出力に応じて適切に板厚を設定すること、あるいはレーザー発振器を含む周辺機器の進歩による解決が期待される。

- (3) 現状で多くの造船所で採用されているプラズマ切断やガス切断で開先加工しても、外観上の欠陥、内部欠陥、及び硬さの観点から評価し、問題なく施工できることを確認した。
- (4) 接合線近傍に残存する防錆プライマや酸化皮膜は、突合せ継手製作時には溶接施工前に除去する必要があるが、片側完全溶込み T 継手の場合は除去不要であることを確認した。
- (5) 実機レベルの溶接長を有する突合せ継手の製作を試み、0.2mm 程度の初期ギャップを設定することで、0mm 程度の初期ギャップと比較してビード外観が比較的良好な継手を製作できることを確認した。また、ギャップ量に応じた施工条件を与えれば、本研究で利用したトラッキング装置を適切に活用することで、ギャップ量のみならず施工中のギャップ変動に対応して施工条件を自動的に変更し、良好な継手を製作できると期待される。
- (6) ハイブリッド溶接におけるスパッタ低減対策として J-STAR® Welding の有用性を確認した。

今後の課題としては、実機レベルの溶接長において安定した溶接施工を実現するために考慮が必要な仮付方法などの影響因子に関する調査、複数パス施工や深溶込み部分溶接施工も考慮した適用可能板厚の増大、横向きや立向き溶接姿勢への適用、荷重伝達型継手に対する疲労強度評価、などが挙げられる。

謝 辞

本研究は、(一財)日本船舶技術研究協会に実施委員会を設置し、(一財)日本造船技術センター他との共同研究として実施したものである。

供試鋼材および J-STAR® Welding の溶接材料は JFE スチール株式会社より提供いただきました。2.2 節に示した諸検査は三菱重工海洋鉄構株式会社にご担当いただきました。2.3 節に示した荷重非伝達十字継手の疲労試験は、海上技術安全研究所の岩田知明氏にご協力いただきました。シームトラッキング装置の導入に際しては、前田工業株式会社の鳥越功様を始めとする皆様に種々ご支援をいただきました。

本研究の実施委員会委員各位及び(一財)日本船舶技術研究協会の杉山哲雄様には、本研究の遂行に際し、多大なるご協力を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Japan Ship Technology Research Association: R&D of the practical method of laser-arc hybrid welding for thick plates, <https://www.jstra.jp/en/R&D/>, accessed on March 14, 2020. 一般財団法人日本船舶技術研究協会：船舶建造高品質・効率化技術の調査研究，2013年度研究成果概要報告書 <https://www.jstra.jp/html/PDF/2013%20Project%20Unei%20Kanri%20Houkokusyo.pdf>, accessed on March 14, 2020, (in Japanese).
- 2) The Shipbuilders' Association of Japan, Subcommittee of Production technology in 2020s: Future Vision of the Japanese Shipbuilding Industry –Outlook for Production Technology-, 2011, (in Japanese). 一般社団法人日本造船工業会生産部会 2020年検討会：第二期生産技術グループ報告書 日本造船業将来ビジョン — 生産技術の展望 —, 2011.
- 3) Steen, W.M. and Eboo, M.: Arc augmented laser welding, Metal Construction, 11-7, pp.332-335, 1979.
- 4) Beyer, E., et al.: New aspects in laser welding with an increased efficiency, Proceedings of LCALEO'94, pp.182-192, 1994.
- 5) Gerritsen, C. HJ. and Howarth, D.J.: A Review of the Development and Application of Laser and Laser-Arc Hybrid Welding in European Shipbuilding, Proceedings of the 11th CF/DRDC International Meeting on Naval Applications of Materials Technology, Halifax, June 2005.
- 6) DNV GL: Hybrid laser-arc welding, DNVGL-CG-0287, 2015.
- 7) Koga, H., et al.: First Application of Hybrid Laser-arc Welding to Commercial Ships, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.47, No.3, pp.59-64, 2010.
- 8) Kimura, R., et al.: Application of Laser-Arc Hybrid Welding to Japan Coast Guard Patrol Vessel Lange, Mitsui Zosen Technical Review, No.216, pp.13-19, 2016. 木村陵介 他：レーザ・アークハイブリッド溶接の海上保安庁向け大型巡視船への適用，三井造船技報，No.216, pp.13-19, 2016.
- 9) Inose, K., et al.: Functional assessment of laser arc hybrid welded joints and their application for bridge construction, Welding in the world, Vol. 56, No. 7, pp.118-124, 2012.
- 10) <http://www.kobelco.co.jp/welding/catalog/files/catalog.pdf>, p.88, accessed on March 10, 2020.
- 11) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Rules for the Survey and Construction of Steel Ships, Part K Materials, 2019. 一般財団法人日本海事協会：鋼船規則 K 編材料，2019.
- 12) For example, Taguchi, G. and Yokoyama, Y.: Basic Off-line Quality Engineering, Japan Standards Association, 2007, (in Japanese). 例えば，田口玄一，横山巽子：ベーシックオフライン品質工学，日本規格協会，2007.
- 13) Tsumura, S. (2015): Fundamental Study of the laser-arc hybrid welding applying to the hull construction, Chap. 2, Kyushu university Graduate School of Engineering. https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_download_md/1654824/eng2516.pdf, accessed on June 09, 2020, (in Japanese). 津村秀一 (2015)：レーザ・アークハイブリッド溶接の船体建造工程適用に向けた基礎研究，第2章，九州大学工学府 博士（工学）学位論文
- 14) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Guidelines on Laser-Arc Hybrid Welding, (Ver. 3), 2016. 一般財団法人日本海事協会：レーザ・アークハイブリッド溶接ガイドライン（第3版），2016.
- 15) ISO / TR14345-2012, “Fatigue -Fatigue testing of welded components- Guidance”, 2012.
- 16) Hobbacher, A.F.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components (2nd Edition), DOI 10.1007/978-3-319-23757-2, Springer, 2016.
- 17) Japanese Society of Steel Construction: Fatigue Design Recommendations for Steel Structures (2012 revised edition), Gihodo Syuppan, 2012, (in Japanese). 一般社団法人日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 一付・設計例一（2012年改定版），技報堂出版，2012.
- 18) Gotoh, K. and Tsumura, S.: Fatigue Strength and Angular Distortion of the Full-Penetration Tee Type Joint Fabricated by One-Side Single-Pass Laser-Arc Hybrid Welding, Proceedings of OMAE 2016, OMAE2016-54173, 2016.
- 19) Maeda, T., et al.: Study on Seam Tracking for Laser Welding, Preprints of the National Meetings of Japan Welding Society, Vol. 99, pp.64-65, 2016, (in Japanese). 前田利光 他：レーザ溶接におけるシームトラッキング技術の研究，溶接学会全国大会講演概要，Vol.99, pp.64-65, 2016.
- 20) Maeda, T., et al.: Study on Seam Tracking and Adaptive Control for Laser-Arc Hybrid Welding, Preprints of the National Meetings of Japan Welding Society, Vol. 100, pp.58-59, 2017, (in Japanese). 前田利光 他：レーザ・アークハイブリッド溶接のシームトラッキングと継手ギャップ適応制御の研究，溶接学会全国大会講演概要，Vol.100, pp.58-59, 2017.
- 21) Maeda, T., et al.: Study on Seam Tracking System for Laser Welding using Tack Welds Identification Function, Preprints of the National Meetings of Japan Welding Society, Vol. 101, pp.358-359, 2017, (in Japanese). 前田利光 他：仮付ビード識別機能を持ったレーザ溶接

- 用シームトラッキングシステムの研究, 溶接学会全国大会講演概要, Vol.101, 2017, pp.358-359.
- 22) Japan Industrial Standards: JIS B 0601: Geometrical Product Specification (GPS) -Surface texture: Profile method- Terms, definitions and surface texture parameters, 2017.
日本工業規格: JIS B 0601 製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状: 輪郭曲線方式—用語, 定義及び表面性状パラメータ, 2013.
- 23) Ono, K., et al.: Laser Welding Phenomena of Mild Steel with Oxide Film, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.20, No.2, pp.213-219, 200.
小野数彦 他: 酸化膜付着鋼材のレーザー溶接現象, 溶接学会論文集, Vol.20, No.2, pp.213-219, 2002.
- 24) Kamata, M.: Types of rust preventive primers and porosity resistance, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 62, No.7, pp.507, 1993.
鎌田政男: プライマの種類と耐気孔性, 溶接学会誌, Vol.62, No.7, pp.507, 1993.
- 25) Sumi, H., et al.: Application of Narrow Gap Welding Process with “J-STAR™ Welding” to Shipbuilding and Construction, JFE Technical Report, No.20, 112-117, 2015.
- 26) Sumi, H., et al.: Laser-arc Hybrid Welding using REM Bearing Wire,
角博幸 他: REM 添加ワイヤを適用したレーザー・アークハイブリッド溶接技術, 第 81 回レーザー加工学会講演論文集, 2014, pp.29-32.