

船殻外板自動溶接プロセス

Automatic Welding Process for Ship's Shell Plates

西 泰彦 エンジニアリング研究所 生産技術研究部 主査
佐野 孝信 エンジニアリング研究所 生産技術研究部
水谷 和時 津製作所 船殻プロセス部 船殻プロセス室 室長
上野 充由 津製作所 船殻プロセス部 船殻プロセス室 主査

Yasuhiko Nishi
Takanobu Sano
Kazutoki Mizutani
Atsuyoshi Ueno

船殻ブロック同士の突き合わせ溶接を上向き姿勢ワンラン施工にて完了することのできる新溶接法を開発した。この新溶接プロセスにおけるビード形成モデルの構築とその数値解析を通し、実適用での安定施工と溶接部の健全化を達成した。

Quite new automatic arc welding process and equipment have been developed that can weld ship's shell plates, upwards from the ground. The welding equipment can complete a butt joint of ship's shell plates with one running process. In order to keep the welding process under control, it is important to know formation mechanism of the weld bead in this process. A control system based on a weld bead formation model has achieved a smooth running process and a quality weld deposit.

1. はじめに

船舶建造工程において、工場内での溶接自動化は大幅な進歩が見られるが、建造ドック内でのブロック搭載工程およびドックサイドでのブロック接合工程における溶接は、その多くが未だ手作業にて行われている。そこで、船殻ブロックの突き合わせ溶接を下側より上向きのアプローチにて、かつワンランにて全板厚を溶接することのできる船殻外板自動溶接法¹⁾を開発した。本法は、カーブした溶接トーチを鋼板裏面から開先ギャップ内に挿入して溶接を行う従来にない特異な溶接プロセスである。本稿では、船殻外板自動溶接法の概要とその溶接プロセスのモデル解析より得られた制御方法について述べる。

2. 船殻外板自動溶接法の概要

溶接装置は、Fig.1 に示すように渠底内を走行可能な自動走行台車と溶接ヘッド、および溶接ヘッドを船殻外板に押し付けるためのアーム機構よりなる。溶接ヘッドに取り付けられた2輪のガイドローラを開先内に挿入することにより、溶接トーチが開先線に倣うとともに、部材の傾斜に対応して溶接ヘッドも傾斜する機構となっている。アーム機構は、エアシリンダにより溶接ヘッドを部材に押し上げるとともに、伸縮することで曲り部 45 度傾斜地点まで溶接ヘッドを移行させることが可能である。また、アームの根元はガイドローラの動きに追従して自由に旋回および横移動するようになっており、この2つのスライド機構の変位を検出して自動走行台車が溶接線に沿って走行するよう操舵輪を制御している。自動走行台車には制御装置、溶接電源、ワイヤ送給装置、冷

却水循環装置、エアコンプレッサーなど関係機材一式を搭載している。

船殻外板自動溶接法の概要を Fig.2 に示す。板厚 25mm までのワンラン溶接が可能のように2電極とし、先行電極は溶接線方向に湾曲したトーチを開先内に挿入し、水冷銅板で支えられたガラステープ上で裏波ビードを形成する。

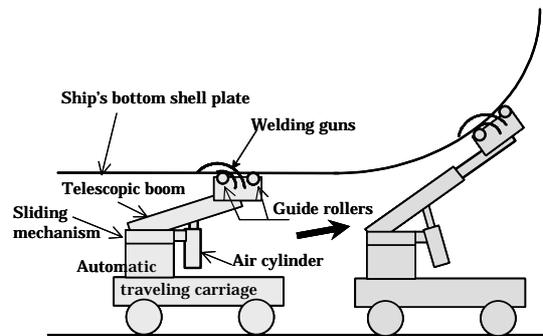


Fig.1 Automatic welding equipment for ship's shell plate

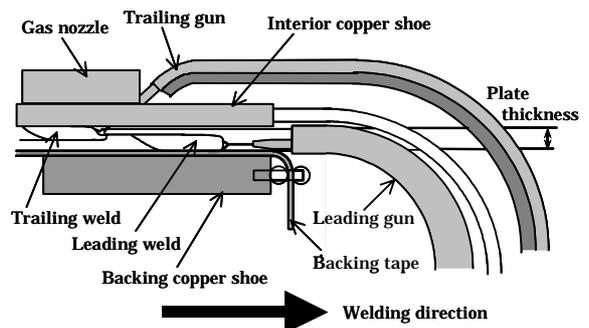


Fig.2 Outline of the developed welding process

後行電極は開先ギャップ内を通り、先行ビード上に仕上げビードを形成する。開先形状は 11mm 以上のギャップを有する開先である。溶接ワイヤは 1.6mm のソリッドワイヤを、シールドガスは CO₂100%を用いている。溶接電源は、定格 600A タイプの定電圧直流溶接電源を使用し、先行電極をワイヤマイナス、後行電極をワイヤプラスとしている。また、各電極は開先幅方向にウィーピングする。先行電極と後行電極のアーク間の距離（極間距離）は約 150mm であり、両者の溶融池は完全に分離している。なお、先行電極と後行電極の間にある内面水冷銅板は、先行電極のシールドガス送給口として、また、傾斜部のエレクトロガス溶接時の内面摺動銅板として用いるものである。

3. 先行溶融池のモデル化

本法の先行電極は、カーブした溶接トーチを鋼板裏面から開先ギャップを通して溶接を行うため、形成される溶接ビードの軸と溶接トーチのそれが同軸となる従来にない溶接プロセスである。そこで、特に水平部におけるこの溶接法を「水平同軸アーク溶接」²⁾と呼んでいる。これは、丁度立向きのエレクトロガス溶接を水平にしたような格好であるが、溶融池が開先前方に流れぬよう物理的に保持するための水冷銅板などがいないため、溶接ビードの形成速度は溶接現象そのものに依存すると言える。そこで、この水平同軸アーク溶接法の溶接現象を定量的に理解し、溶接を安定に制御する方法を開発するために、本溶接現象のモデル化とモデルによる解析を実施した。

3.1 モデル化における主な仮定

モデル化に際して用いた主な仮定と基本式を以下に示す。

- (1) 溶融池に作用する力は表面張力と重力、およびアーク力のみとする。
- (2) 溶融池先端は開先幅方向に直線とし、裏ビードも板裏面ツライチとする。また、開先壁への溶け込み量も考慮しない。
- (3) アーク力は半径 r_a の円内に均等に分布し、すべて溶融池に働く。

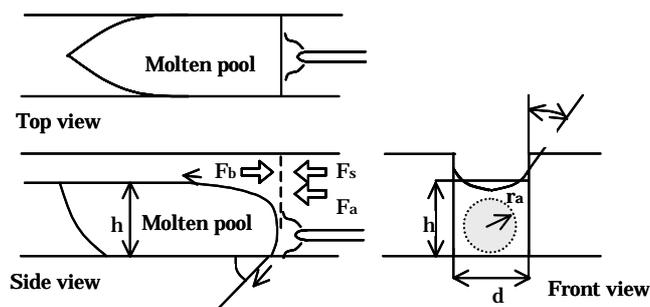


Fig.3 Static model of molten pool in horizontal coaxial arc welding

3.2 基本式

上記仮定のもと、溶融池前面全体での水平方向の力のバランスを考えると次式を得る。

$$F_b = F_a + F_s \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

F_b : 溶鋼に働く重力、および開先壁との接触角により生じる表面張力との和

F_s : 水平方向の表面張力

F_a : アーク力

ここで、

$$F_b = \int_0^h (\rho g y - \frac{2T \cos\alpha}{d}) dy \times d = \frac{1}{2} \rho g h^2 d - 2Th \cos\alpha \quad \dots\dots(2)$$

$$F_s = dT(1 - \cos\theta) \quad \dots\dots(3)$$

$$F_a = \pi r_a^2 \cdot P \quad \dots\dots(4)$$

ただし、

ρ : 溶鋼の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

T : 溶鋼の表面張力 (N/m)

h : ビード高さ (m)

d : 開先幅 (m)

α : 溶鋼の開先壁との接触角

θ : 溶鋼の前方接触角

P : アーク圧力 (Pa)

r_a : アーク半径 (m)

式(1) ~ (4)より

$$\frac{1}{2} \rho g h^2 d - 2Th \cos\alpha = dT(1 - \cos\theta) + \pi r_a^2 \cdot P \quad \dots\dots(5)$$

よって、 P がわかれば式(5)より溶融池の高さ h が求まる。

3.3 アーク圧力の推定

式(5)において、 $\alpha = 90^\circ$ 、 $\theta = 180^\circ$ とすると、式(5)は次のように簡素化される。

$$\frac{1}{2} \rho g h^2 d = 2dT + \pi r_a^2 \cdot P \quad \dots\dots(5')$$

式(5')は、式(5)から溶鋼の開先壁との接触角に起因する表面張力の影響を無視したものである。

Table 1 に水平同軸アーク溶接における溶接電流変化時のビード高さの実測値を示す。このように水平同軸アーク溶接では、溶接電流の増加に伴いビード高さが上昇する。また、Table 1 にはビード高さの実測値をもとに式(5')より逆算したアーク圧力の推定値も合わせて示す。これは、半径 5mm の円にアーク圧力が均等に作用するものとして求めたもので、溶鋼の密度 $\rho = 7300\text{kg/m}^3$ 、重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 、溶鋼の表面張力 $T = 1\text{N/m}$ としている。このように、アーク圧力は Table 1 の実験結果より電流の関数として、次式で近似できる。

$$P = 3.62 \times 10^{-4} \times I^{2.45} \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 I は溶接電流(A)

Table 1 Comparison of estimated and measured bead height

| Welding Current I (A) | Bead height (Measured) h' (mm) | Arc pressure (Estimated) P (Pa) |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 280 | 10.9 | 372 |
| 395 | 14.0 | 829 |
| 488 | 17.1 | 1400 |
| 592 | 21.0 | 2280 |

Fig.4 は、式(6)を式(5)に代入し、開先幅が変化した場合のビード高さを推定したものである。図中に合わせて示すビード高さの実測値と良く対応していることから、本モデルにより水平同軸アーク溶接のビード高さをおおよそ推定することが可能であるとして以後の検討を実施した。

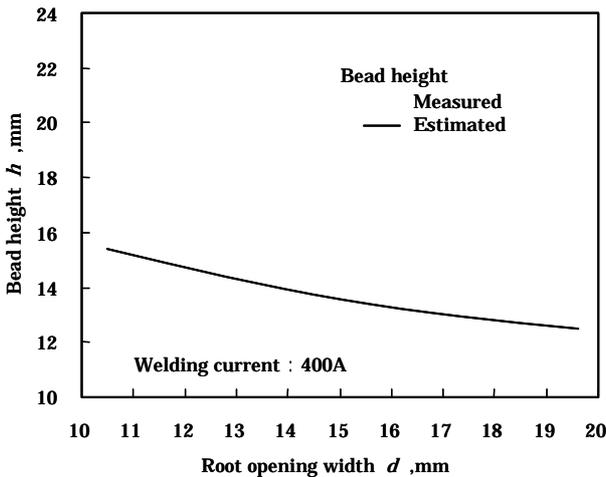


Fig.4 Comparison of estimated and measured bead height

4. 溶接現象のモデル解析

4.1 ビード形成速度

水平同軸アーク溶接プロセスでは、溶接トーチの移動速度とは無関係に溶接ビードの形成速度が決定される。しかしながら、形成されるビードの高さがわかれば溶接ビードの形成速度が推定できる。開先の場合、溶着効率を100%とすると溶接ビードの形成速度 W (m/s)は次式で表される。

$$W = V_f \cdot S / (d \cdot h) \quad \dots\dots(7)$$

ただし、

V_f : ワイヤ送給速度 (m/s)

S : ワイヤ断面積 (m²)

ワイヤ送給速度が一定の場合、ビード形成速度は開先幅 d とビード高さ h の積に反比例する。各開先幅におけるビード

形成速度を式(7)および(5)を用いて計算した結果と、実溶接での平均速度の計測値とを合わせて Fig.5 に示す。両者はほぼ同様の变化傾向を示しており、本モデルによりビード形成速度の推定もほぼ可能である。

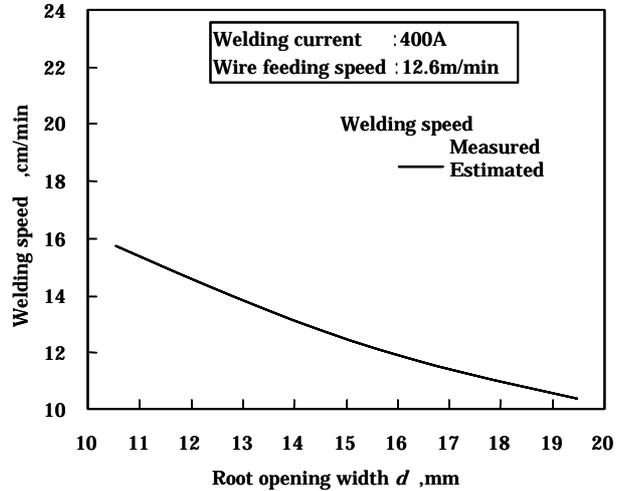


Fig.5 Comparison of estimated and measured proper welding speed

4.2 ワイヤ突き出し長さの変化とビード形成速度の自己平衡

溶接トーチを一定速度で走行させた場合、トーチの移動速度 V と式(7)で表される溶接ビードの形成速度 W との間に差異があると Fig.6 と式(8)で示すようにワイヤ突き出し長さが増加することになる。

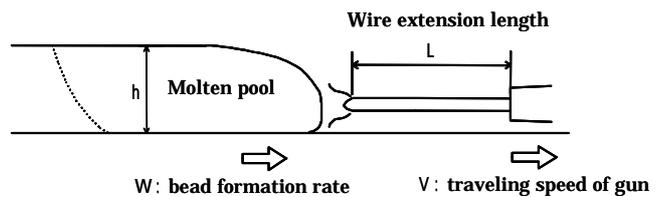


Fig.6 Estimation of bead formation rate, W , and wire extension length, L

$$dL / dt = V - W \quad \dots\dots(8)$$

しかし、 V と W の差異が小さい場合、 L の変化による溶接電流の変化により V と W が自己平衡することが考えられる。つまり、トーチの移動速度 V が大きいとき、ワイヤ突き出し長さ L は長くなるが、定電圧特性の溶接電源の場合、アーク長がほぼ一定となるまで溶接電流が減少するので、ビード高さ h が減少する。そのため、式(7)により溶接ビードの形成速度 W が増加してトーチの移動速度 V と等しくなることが考えられる。

今、開先幅が±2mm 急激に変化した場合のワイヤ突き出し長さの時間的変化を考察する。式(8)に式(7)を代入して次式を得る。

$$dL / dt = V - V_f \cdot S / (d \cdot h) \quad \dots\dots(9)$$

ここで、式(5)、式(6)および Lesnewich⁴⁾のワイヤ溶融特性に関する関係式(10)を用いて式(9)よりワイヤ突き出し長さの時間変化を数値計算した結果を Fig.7 に示す。Fig.7 に示すようにワイヤ突き出し長さは徐々に変化するが最終的にはある値に自己平衡する。このように本モデルは、溶接現象の動特性を表現できるので、プロセスの制御方法を考察する上で有効な手段となる。

$$V_f = aI + bLI^2 \quad \dots\dots(10)$$

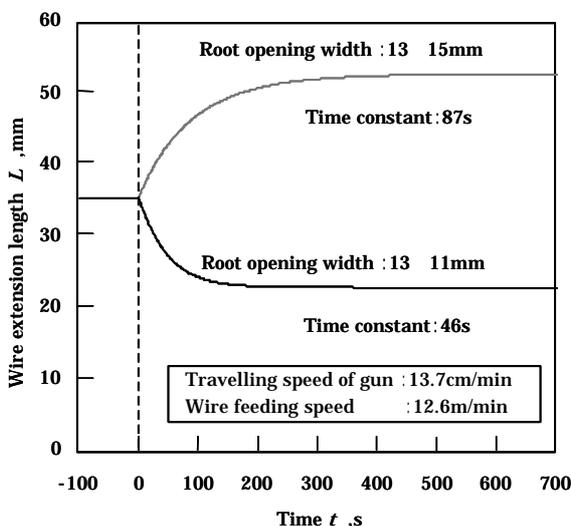


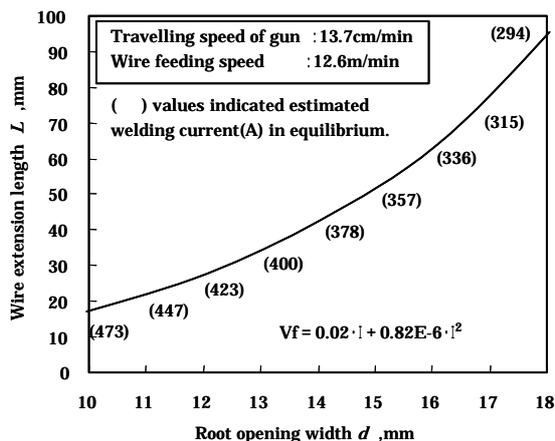
Fig.7 Numerical calculated results of wire extension length in the case of changing root opening

4.3 プロセス制御への応用

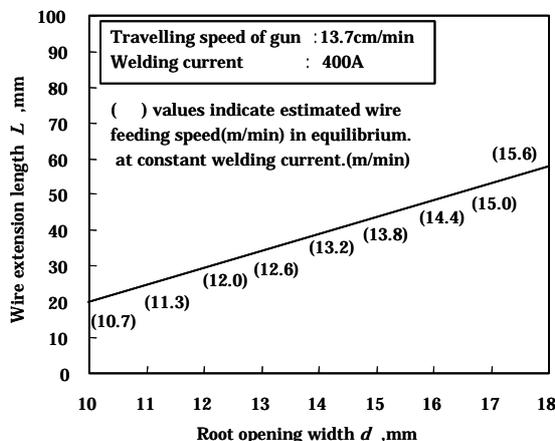
本溶接プロセスでは、溶接ビードの形成速度 W と溶接トーチの移動速度 V が等しくならなければ溶接が継続しない。最も一般的な制御手法として、溶接電流が一定となるように溶接トーチの移動速度 V を制御する方法が考えられるが、本溶接プロセスにおいて溶接トーチの移動速度 V は溶接速度そのものであり、溶接速度を急峻に変化させることは溶接品質上、またプロセスの安定性の観点からも好ましくない。なぜならば、溶接電流の変化は先行電極の問題であり、それによって後行電極の溶接速度をも変化させることは後行の溶接に悪影響を及ぼす。さらに、先行電極の電流変化は開先幅の変化だけに起因するものではなく、短周期では他のさまざまな溶接現象（たとえば溶滴移行や瞬間短絡、さらに溶融池の振動など）に起因して発生し、一般に短周期の現象に起因する変化ほど大きい。ここでは、先に作成したモデルを用いて V と W をバランスさせる制御法について考察する。具体的には、ワイヤ送給速度の制御によりビードの形成速度 W

を変化させ、 V と W をバランスさせる方法について以下に考察を加える。

ワイヤ突き出し長さの変化によるビードの形成速度 W の自己平衡は、式(9)においてビード高さ h が変化することによりもたらされるものであった。式(9)より、ワイヤ送給速度 V_f を変化させることによっても同様な平衡がもたせることがわかる。Fig.8(a)は、溶接速度およびワイヤ送給速度を一定として溶接した場合に、開先幅の変化によってワイヤ突き出し長さ L がどの程度変化するかをモデルにより計算したものである。ワイヤ突き出し長さの適用範囲を設定値の±10mm程度とすると、溶接が続行可能な開先幅の精度は±1mmとなる。一方 Fig.8(b)は、溶接電流が一定となるようにワイヤ送給速度を制御した場合の各開先幅におけるワイヤ突き出し長さの値を計算したものである。自己平衡の場合の Fig.8(a)と比べると、開先幅に対するワイヤ突き出し長さの変化が小さくなり、かつ直線的なものになっていることがわかる。このようにモデル解析の結果、ワイヤ送給速度を変化させて溶接電流を一定に制御することは、ワイヤ突き出し長さの変化を減少させるのに有効であることがわかる。



(a) Case of constant wire feeding speed



(b) Case of controlling wire feeding speed

Fig.8 Estimated values of wire extension length in equilibrium in various root opening width

5. 自動制御法の開発

本溶接プロセスを実適用するにあたり、前述のモデル解析をもとに開先幅の変動に対応する制御法を開発した。つまり、上記のように溶接電流が一定となるようにワイヤ送給速度を制御するワイヤ送給速度制御を行うことにより、比較的速い溶接現象に対応するとともにワイヤ突き出し長さの変動量を小さく抑える。さらにこれに加え、ワイヤ突き出し長さの偏差が減少する方向に溶接速度を制御するものである。ワイヤ突き出し長さは、溶接電流値とワイヤ送給速度より推定し、制御ゲインを低く抑えて溶接速度を制御している。この2つの制御法を組み合わせることにより、溶接速度の制御変化量を必要最小限にするとともに、その変化も緩やかにすることができ、船殻外板溶接プロセスの安定化を達成した。本制御法の適用により、板厚 22mm、開先幅 11mm から 20mm までの船殻ブロックを連続溶接することが可能であった。Photo 1 に、ドックサイド定盤での船殻ブロック溶接時の状況を示す。



Photo 1 Automatic welding of ship's shell plates

6. おわりに

船殻外板自動溶接法に用いられる先行電極は、形成される溶接ビードの軸と溶接トーチの軸が同軸となる従来にない溶接法で、これを水平同軸アーク溶接と呼んでいる。この溶接プロセスの溶融池モデルを作成し、ビード形成に関するモデル解析を実施した。その結果、溶接プロセスの安定制御法を開発し、その有効性を確認することができた。

本研究開発の一部は、競艇公益資金による日本財団の補助金を受けて、(財)シップ・アンド・オーシャン財団が行う研究開発の委託を受けて実施しました。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西泰彦ほか. “船底外板自動溶接法の開発”. 溶接法研究委員会資料, No.SW-2705-2000(2000).
- 2) 西泰彦. “水平同軸アーク溶接現象のモデル解析と制御”. 溶接アーク物理研究委員会資料, ア物-01-116(2001).
- 3) 黄地尚義. “溶接・接合プロセスの基礎”. 東京, 産報出版.
- 4) A. Lesnewich. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-shielded Metal-Arc Welding, Part 1 Control of Electrode Melting Rate, Welding Journal, 37-8 (1958), 343s-353s.

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 生産技術研究部

Tel. 059 (246) 3062 西 泰彦

E-mail address : ynishi@lab.tsu.nkk.co.jp