



小特集 数値シミュレーションによる熱プラズマ制御に関する研究の現状と展望

5. 外部磁場による溶接アークプラズマの制御

平田好則, 野村和史, 荻野陽輔

大阪大学大学院工学研究科

(原稿受付: 2011年4月26日)

外部磁場を熱プラズマに対して加えることにより, 電磁力を介して熱プラズマの形態を制御することが可能となる. 例えば, 本章で取りあげるカスプ型磁場による磁気制御では, アークプラズマの断面形状を楕円化することができる. 本章では永久磁石を用いることでカスプ型磁場を実現し, アークプラズマの温度分布などの特性や溶接に及ぼす影響について実験的, 解析的に検証した.

Keywords:

arc plasma, magnetic control, permanent magnet, TIG arc welding, 3D-analysis model

5.1 はじめに

溶接アークは外部磁場の影響を受けるため, 磁気吹きによるアークの偏向などが生じ, 生産現場における溶接施工において問題となることがよくある. しかし, こういった特性に注目し, 逆に外部磁場を積極的に活用することによって溶接性能の向上をめざす研究が古くより行われている[1, 2]. 図1に様々な磁気制御の概略図を示す. たとえば, 安藤ら, 浮田らは, 溶接線後方に引っ張られるアークを磁場によって前方へ引き戻す, といった制御を行い, 高速溶接時に生じる溶接欠陥の改善に成功している[3, 4]. 小林らによると, 溶接線方向に磁場を交互に付加することでアークを左右に揺らし, 凸ビード化を低減したとの報告がある[5]. 棚原らは, 溶接線方向に直角な双方向磁場を作用させることで溶融池を振動させ制御を行っている[6]. 丸尾らは, カスプ型磁場によってアークの断面形状

を楕円にし, 溶接線方向に沿ってアークを緊縮することで深溶け込み効果を得ている[7]. ここに挙げたすべての報告は電磁石を用いたものであり, 励磁電源を必要とする比較的大きな装置となる.

一方, 永久磁石では, もとより励磁電源は不要であり, さらに近年は小型化・強力化が進んでおり, 装置サイズも極めて小さくすることができる. 本章では, 荒田・丸尾らが考案したカスプ型磁場を小型磁石で実現し, その効果について検証した. また, 近年の計算機の発展に伴い, 複雑なアーク現象に対するシミュレーションが多くなされるようになってきている[7, 8]. これを受けて, 磁気制御下でのアークプラズマの状態を評価, 予測するための解析モデルを構築した. このモデルは, アークの三次元的な変化の評価となるので, 軸対称二次元モデルではなく三次元解析モデルを必要とする. さらに, 永久磁石によるカスプ型磁場をTIG溶接に適用した実験を行い, ビードオンプレート溶接へ応用した際の磁気制御の影響を調査し, 永久磁石を用いたアーク形状制御の可能性を検証した.

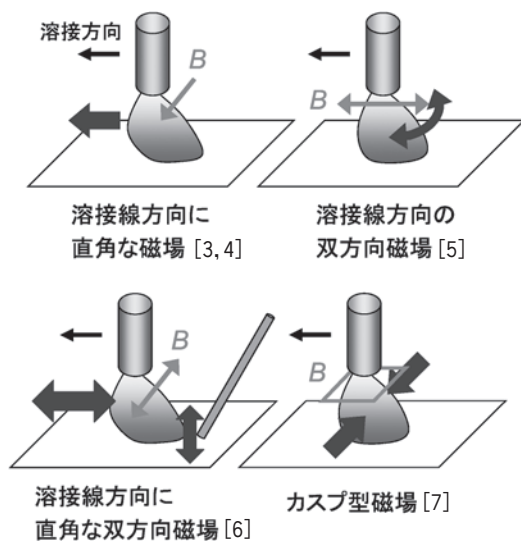


図1 様々な磁気制御例.

5.2 カスプ型磁場によるアーク楕円形状化の原理

カスプ型磁場を用いることによって, 理論上, アークの断面形状は円から楕円となる. 図2はこの原理を示したものである. まず(a)はアークのみによる電磁場を表している. 電流の向きが紙面に垂直手前方向のとき, アンペールの法則により反時計回りに磁場が発生し, フレミングの左手の法則からアーク柱中心に向かって電磁ピンチ力が均等に生ずる. 一方, 同図(b)は4つの磁極を図のように配置したときの磁場の向きを示している. これら2つの図を組み合わせると同図(c)が描ける. アークが作る磁場と磁極の作る磁場の方向は, 上下では等しいため強め合い, 左右では逆方向であるため弱められる. すなわち電磁ピンチ力に偏りが生じ, ここでのアークは上下方向に緊縮し, 左右

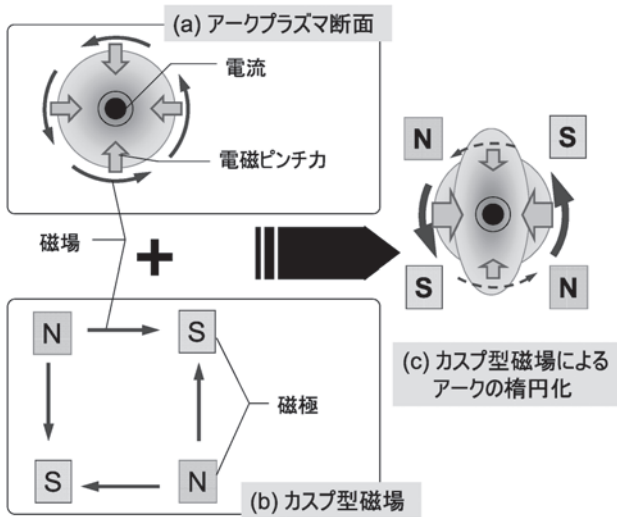


図2 カスプ型磁場によるアーク楕円形状化の原理。

方向に引き伸ばされる。このようにして、アークの断面形状を円から楕円に変形させることができる。

5.3 静止 TIG アークの磁気制御実験結果

上述した効果を検証するため、カスプ型磁場を TIG 溶接へ適用した実験結果について述べる。装置としては図3に示すように、4つの磁石がカスプ型磁場配置となるようなリング状の水冷却治具を作製し、これを TIG 溶接のトーチノズルに取り付けることになる。磁石は、 $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ の大きさで残留磁束密度 1.39 T (表面磁束約 300 mT) の Nd-Fe-B 系小型磁石を用いた。その他の条件は図中に示すとおりである。図4に静止 TIG アークに磁気制御を適用した結果を示す。磁気制御のない場合は、アークの外観は通常の釣鐘型となり、陽極母板上の溶融跡 (クレーター) はほぼ真円となっている。ここにカスプ型の磁気制御を適用すると、アークプラズマが変形し、緊縮して見える方向と、それに直角な方向から観察するとアークプラズマが拡大していることがわかる。そして、クレーター形状は明らかに楕円形になっている。このように永久磁石を用いた磁気制御によっても TIG アーク形状を制御することができた。

5.4 三次元解析モデルの概要と解析結果

ここでは、磁気制御下でのアークプラズマの状態を評価、予測するための解析モデルについて、その概要と解析結果について述べる。カスプ型磁場によるアークの楕円形

状化は三次元的な現象であることから、その解析には (x, y, z) 系の三次元モデルが必要となる。アークの解析には、プラズマが局所熱平衡状態にあり電磁粘性流体であると仮定することによって成り立つ、熱輸送現象および流動現象の支配方程式群を適用した。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \vec{v} \vec{v}] = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} H = -\nabla \cdot (-\kappa \nabla T) + W - Ra \quad (3)$$

順に質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則を表しており、 ρ : 密度 [kg/m^3], \vec{v} : 流速ベクトル [m/s], P : 圧力 [Pa], τ : 粘性応力テンソル [Pa], \vec{g} : 重力加速度ベクトル [m^2/s^2], H : エンタルピー [J/kg], κ : 熱伝導率 [W/mK], T : 温度 [K], Ra : 放射損失 [W/m^3] である。これらの式を解くことでアークプラズマの温度場、速度場、圧力場などが求められる。また、 \vec{F} は外力項 [N/m^3], W は内部発熱項 [W/m^3] であり、これらはアークプラズマの電磁場から求められる電磁力とジュール熱であるとした。

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

$$W = \frac{\vec{j}^2}{\sigma} \quad (5)$$

TIGアーク条件

アーク長: 5 mm
 電流: 150 A
 シールドガス: Ar, 10 l/min
 電極径: $\Phi 3.2 \text{ mm}$
 電極先端角度: 60°

母材: SUS304

磁石の条件

Nd-Fe-B系磁石
 サイズ: $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$
 残留磁束密度: 1.39 T
 磁石間距離: 20 mm
 母材からの高さ (= H_m): 7 mm

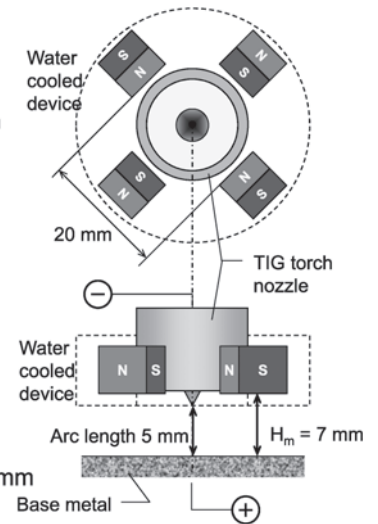


図3 実験装置の概要と実験条件。

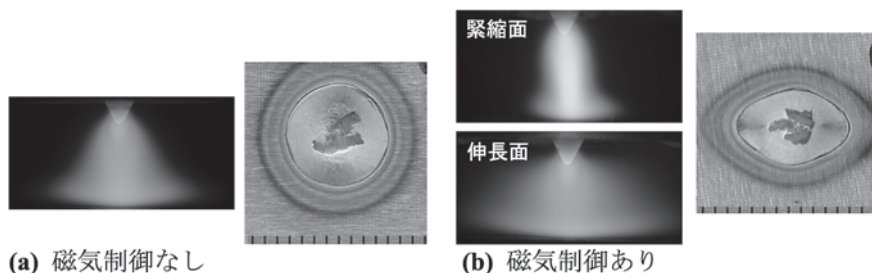


図4 アーク形状と母板上の溶融跡 (クレーター) 形状への磁気制御の影響。

ここで、 \vec{j} : 電流密度ベクトル[A/m²], σ : 電気伝導率[S/m], \vec{B} : 磁束密度ベクトル[T]である。磁束密度ベクトルはアークの磁束 \vec{B}_{Arc} と後述する磁石による磁束 \vec{B}_{Magnet} の和、 $\vec{B} = \vec{B}_{Arc} + \vec{B}_{Magnet}$ で与える。アークの電磁場に対しては以下の式を適用する。

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \tag{6}$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla V \tag{7}$$

$$\vec{B}_{Arc} = \nabla \times \vec{A}_{Arc}, \quad \nabla^2 \vec{A}_{Arc} = -\mu_0 \vec{j} \tag{8}$$

ここで、 V : 電位[V], \vec{A} : ベクトルポテンシャル[N/A], μ_0 : 真空の透磁率[H/m]である。まず式(6), (7)から導かれる V についてのポアソン方程式を解くことによりアーク中の電位分布を求め、電流密度 \vec{j} はその勾配で与える。またアークによる磁束密度 \vec{B}_{Arc} は(8)により求める。カスプ型磁場による磁場を求めるには、次の式を用いた。

$$\vec{B}_{Magnet} = \nabla \times \vec{A}_{Magnet}, \quad \nabla^2 \vec{A}_{Magnet} = -\nabla \times \vec{M} \tag{9}$$

ここで、 \vec{B}_{Magnet} : 永久磁石による磁束密度[T], \vec{A}_{Magnet} : ベクトルポテンシャル[N/A], \vec{M} : 磁化ベクトル[T]をそれぞれ表している。磁化ベクトルは磁石の内部においてS極からN極の向きに残留磁束密度の大きさと与えられる。この支配方程式においてまず、各方向におけるベクトルポテンシャルを収束計算によって求め、その後永久磁石の磁束密度を求める。この磁場は計算中、常に一定であるとしている。

図5に解析モデルの模式図を示す。本研究ではスタックガード格子を用いた不等間隔の差分モデルを適用した。まず、適当な温度分布を与え、対応するアークプラズマの温度依存物性値を計算する[9]。その値を用いて、電位分布を求め、電磁力、ジュール熱を計算する。この際、カスプ型磁場がある場合は、磁石による磁場を足し合わせたときの

TIGアーク条件

アーク長: 5 mm
 電流: 150 A
 シールドガス: Ar, 10 l/min
 電極径: Φ 3.2 mm
 電極先端角度: 60°

磁石の条件

サイズ: 5 x 5 x 5 mm³
 残留磁束密度: 1.39 T
 磁石間距離: 20 mm
 母材からの高さ(= H_m): 7 mm

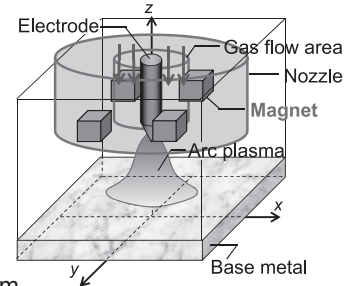


図5 解析モデルの模式図と解析条件。

電磁力を用いる。これらを駆動力として式(1)~(3)を解き、アークプラズマの温度分布が更新される。以上の流れを変化が十分なくなるまで繰り返すことによってアークプラズマの速度場、温度場、電磁場などが三次元的に求められる。解析条件は図中に示すとおり先の実験条件と同じである。図6に解析結果として得られるアークプラズマの温度分布を示す。磁気制御なしの場合は、軸対称現象であるので電極をとるxz面、yz面両面において等しくその形状は通常の釣鐘型のアークであり、母材直上においては円形となっている。磁気制御のある場合は、xz面で広がりyz面で緊縮しており、母材直上で楕円形状の温度分布となっている。このような結果は先の実験結果と良く一致するものであり、解析的にもカスプ型磁場によってアークが楕円化するのを定性的に確認できた。

5.5 母材-磁石間距離の影響

磁石群の高さを変えると、外部磁場分布のアークプラズマとの位置関係が変わり、磁気制御としての影響も変わると考えられる。ここでは、先に示した母材から磁石までの高さ H_m を7 mmから5 mmとして母材に近づけたときの結

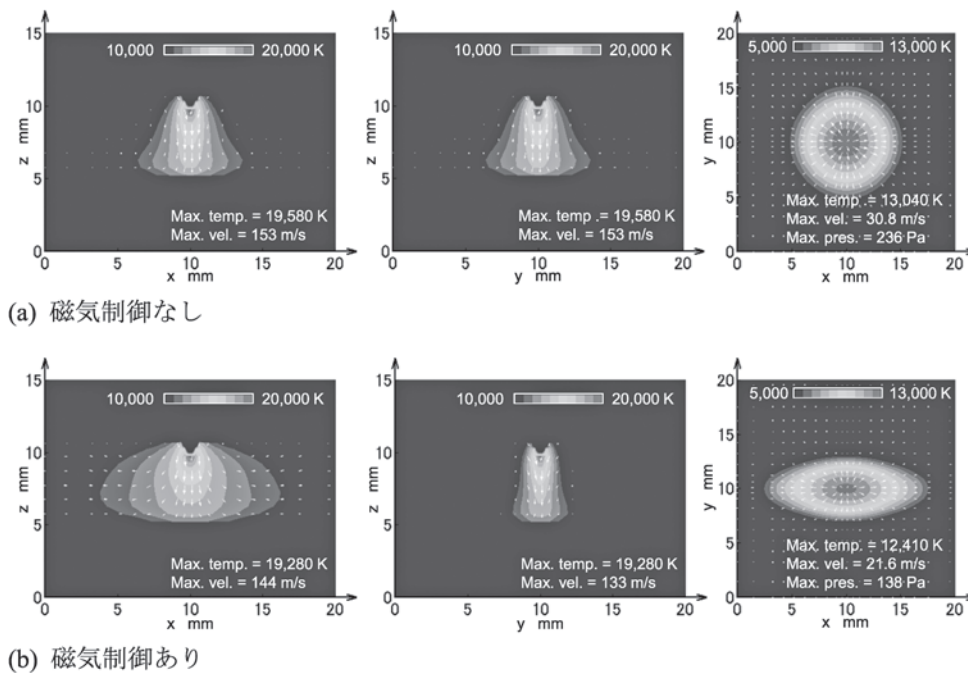


図6 アークプラズマの温度分布解析結果 (左から順に領域中心の電極を通るxz面, yz面, 母材直上xy面)。

果について述べる。

まず、解析モデルにより母材直上での温度分布がどのようになるかを予測した。解析条件は磁石配置以外先と同じである。結果を図7(a)に示すが、これと図6(b)を比較すると、磁石を母材に近付けた場合の方が楕円化効果は強くなっていることがわかる。

同様の条件で静止 TIG アークに対し実験を行い、母材上に形成されるクレーター形状を観察した。その結果を図7(b)に示す。こちらでも同様に、磁石-母材間距離が近い方がクレーター形状の楕円度合いが大きくなった。解析ではアークプラズマの温度分布、実験ではクレーター形状、とそれぞれ異なる結果の比較ではあるが、解析結果による予測に準じた実験結果が定性的に得られているといえる。

なお解析結果より、こうした楕円化アークの熱源特性として母材直上での最高温度および最高圧力が低下することが示されている。磁気制御のない通常の TIG アークでは 13,040 K, 236 Pa であるのに対し、磁石母材間距離 7 mm および 5 mm の楕円化アークでは 12,410 K, 138 Pa および 11,970 K, 105 Pa となっている。楕円化効果が高いほど温度、圧力ともに低下することが解析的に示されている。

5.6 ビードオンプレート溶接への適用

次に、カスプ型磁石デバイスによるアークの楕円形状化を比較的高速なビードオンプレート溶接に応用し、そのビード外観への影響を調べた[9]。150 A、アーク長 2 mm の TIG アークに対してカスプ型磁場を作用させ、楕円化アークの長軸方向と溶接線方向を一致させた状態でビードオンプレート溶接を行った。この結果を図8にまとめる。まず、磁気制御を行わない場合は、通常ビードが得られる溶接速度 100 cm/min を超えると徐々にハンピングビードと呼ばれるビード欠陥が現れ、140 cm/min 以降では完全にハンピングビードとなった(同図(a))。溶接条件を一定にしても溶接スタート時の状態や溶接長さによって、実験結果がばらつくので、図の縦軸はハンピングビードとなる確率を示している。一方、磁気制御を用いた場合は通常ビードとなる範囲が大幅に広がり、ハンピングが現れるのは 180 cm/min を超えてからであった(同図(b))。よって、磁石のない場合の通常ビードとなる溶接速度限界が 100 cm/min であったのに対し、磁気制御によって 180 cm/min に広がったといえる。一般にハンピングビードを抑えるにはアーク圧力を低減する必要がある。よってここで得られた結果は、先に述べた楕円化アークにおけるアーク圧力の低下によるものであるといえる。なお、このような楕円化アークの圧力低下は実測によっても確認している[10]。

5.7 まとめ

本研究では、小型の永久磁石によるアーク形状制御の可能性に着目し、カスプ型磁場を4つの磁石で実現し、これによる TIG アークの楕円形状化を試みた。その結果、アーク形状、クレーター形状ともアークの楕円形状化が実験的に確認できた。また、磁気制御下でのアークプラズマの状態を評価、予測するための三次元解析モデルを構築し、解

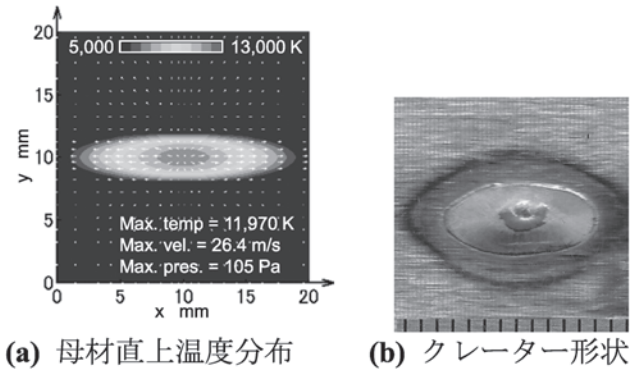


図7 アークプラズマ解析結果とクレーター形状(磁石母材間距離 7 mm)。

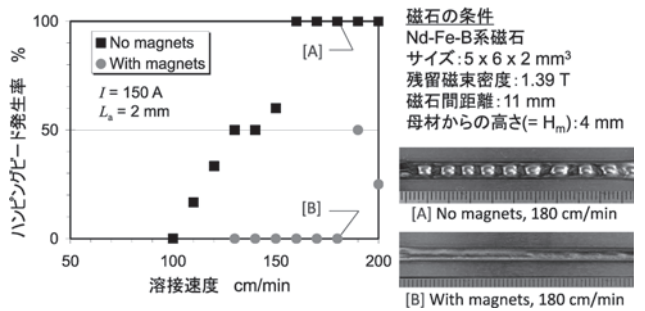


図8 高速溶接時におけるハンピングビード抑制効果。

析的にもアークの楕円化を確認し、このモデルを用いて磁石の配置の影響を予測し、実証した。また、楕円化アークをビードオンプレート溶接へ応用したところ、カスプ型磁場による楕円化効果によってビード欠陥の生じない通常ビード領域が拡大された。これは解析結果で示唆されたアーク圧力の低下によるものと考えられる。

今後は、アークプラズマだけでなく溶融池への磁気制御の影響や、適用範囲の明確化など、解析モデルによる予測と実験による検証を通し、より有用な溶接技術として確立することをめざしたい。

参考文献

- [1] G.B. Serdyuk, *Automat. Weld.* 13, 31 (1960).
- [2] I.A. Bachelis, *Svar. Proiz.* 1, 17 (1965).
- [3] 安藤弘平, 西川 淳, 山内信幸: *溶接学会誌* 37, 249 (1968).
- [4] 浮田静雄, 増子和樹, 入江俊幸, 小久保邦雄: *溶接学会論文集* 20, 484 (2002).
- [5] 小林秀雄, 中原征治: *溶接学会論文集* 7, 341 (1989).
- [6] 棚原 靖, 羽地龍志, 松本幸礼, 真鍋幸男, 玉城光輝, 松田昇一: *溶接学会全国大会講演概要* 85, 142 (2009).
- [7] Y. Arata and H. Maruo: "Magnetic Control of Plasma Arc and Its Application for Welding", *IIW Doc.*, IV-53-71. (1971).
- [8] B. Murphy, *Plasma Chem. Plasma P.* 15, 279 (1995).
- [9] 野村和史, 荻野陽輔, 平田好則: *溶接学会論文集* 27, 170 (2009).
- [10] K. Nomura, Y. Ogino, K. Murakami and Y. Hirata, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena* 9, 83 (2011).