防風シールドチャンバーの突合せ継手への適用に関する基礎的検討*

—ガスシールド溶接法に適した流体式シールドチャンバーの研究（第2報）—

森川 茂弘**, 神谷 修***

Fundamental Examination of Fluid Chamber with Multilayer Jet applicable to Butt Weld Joint * — Study on Fluid Chamber applicable to Gas - Shielded Arc Welding (Report 2) —

by MORIKAWA Shigehiro**, KAMIYA Osamu***

This paper deals with the Fluid Chamber applicable to gas-shielded arc welding in strong wind environment. In the case of single annular air curtain jet structure, this air curtain jet becomes turbulent in the groove position, this turbulent flow invades into welding atmosphere along the groove, and welding becomes impossible. The main causes of this phenomenon are for a part of jet stream invading into welding atmosphere along with the groove according to the big pressure slope generated in the inner side produced by the thrust of annular air curtain. So, this paper reports the subject solution method based on the above-mentioned phenomenon.

Key Words: Fluid chamber, Air curtain, Turbulent flow, Entrainment Effect, Coanda Effect, Swirl flow, Negative pressure, Wind velocity, Gas-shielded arc welding, TIG Arc Welding, MAG Arc Welding, Shielding gas, Oxygen concentration, Visualization

1. 結 言

ガスシールドアーク溶接法は、既に成熟した溶接法として重要構造物の溶接に採用されている。しかし、高い溶接品質を保証する為には、僅か毎秒数 m の微風も溶接雰囲気内に侵入しないように防風処置をすることが前提条件となることは周知のとおりである。

既報¹⁾では、この課題を解決する方法として、

(1) 軸斜め下方向、且つ周斜め方向に噴射する薄層の環状噴流（以下、環状エアーカーテンという）の推力によって、溶接雰囲気の防風と流れを旋回・層流化する。

(2) 環状エアーカーテンの流れを等分割に分断する内外貫通ホールを形成する。この貫通部からの外気導入によって、溶接雰囲気の圧力勾配を緩和して流れを層流化する。

以上の方法で、風速 7m/s の環境で平板ワークの溶接が可能なガスシールド雰囲気が得られることを明らかにした。

しかし、突合せ継手に適用した場合に、開先に沿って環状エアーカーテンの分岐流が溶接雰囲気に侵入して溶接が不可能になることが判明した。環状エアーカーテン内外間および母材開先部と平面部間に圧力勾配が生じて、噴流が開先内に逆流する現象に起因すると推察した。

そこで、本研究では、前述の推論をもとに、この課題を解決する目的で新たな流体式シールドチャンバーを考案・試作して、基本的な流れ挙動および防風シールド性能を明らかにした。

また、ガスシールドアーク溶接法として代表的な TIG 溶接および MAG 溶接への適用の可能性を検証した。

2. 実 験 装 置

2.1 流体式チャンバーの構造

Fig.1 に既報で報告した流体式チャンバーと同様に平板ワークに適用できると共に突合せ継手ワークにも対応できる流体式チャンバーを示す。

この流体式チャンバーは、下記の構造によって突合せ継手への適用が可能となった。

(1) メイン噴射ノズル

流体式チャンバー下端部に環状配列した複数の小径ノズルから軸斜め 25° 下方向、周斜め 25° 方向にエアが噴射する。この噴射流で形成される環状エアーカーテンの推力によって、溶接雰囲気の防風と流れを旋回・層流化する。

環状配列した複数の小径ノズルによって、圧縮エアが噴射する部分と当該ノズル間に挟まれた噴射しない部分からなる構造にする。この構造によって、噴射口近傍に環状エアーカーテン（以下、メインエアーカーテンという）の貫通ホールが形成される。この下流側は隣接する噴流同士との合流による速い流れと遅い流れが形成される。

*原稿受付 平成 16 年 9 月 21 日

**正 員 秋田大学大学院工学資源学研究科 Member,
Graduate School of Engineering and Resource Science,
Akita University

***正 員 秋田大学工学資源学部 Member, Faculty of
Engineering and Resource Science, Akita University

(2) サブ噴射ノズル

メイン噴射ノズルの上部 (12mm 離隔, $69^\circ \times 2$ 領域) に配置した複数の小径ノズルから 15° 上方向, 放射状にエアーを噴射する. この噴射流 (以下, サブエアーカーテンという) の推力は, 開先に沿って溶接雰囲気へ侵入する流れを外側に向かう流れに反転する要素になる.

Fig.1 Fluid chamber with multilayer jet applicable to gas-shielded arc welding.

(3) 内筒

メインエアーカーテン内側に生じた負圧領域に, 流体式チャンバー本体とシールドノズル間に設けた内筒間の流路を介して多量の外気を導入・補充する. エアーカーテン内外の圧力を略同一に保つことによって, 開先に沿って溶接雰囲気へ侵入する流れを抑制する要素になる.

2.2 計測装置

流体式チャンバー内の流れ速度分布を計測するための熱線式風速計および流体式チャンバー内のガスシールド雰囲気状態を計測するための酸素濃度計の計測方法を Fig.2 に示す. 何れのセンサーもエアーカーテンを貫通して任意の測定位置に移動して計測できるようになっている.

Fig.2 Sensor probes of thermal anemometer and oxygen analyzer.

3. 流体式チャンバーの原理と考察

基本的にはメインエアーカーテンのバリアによって風の侵入を阻止する. しかし, 単一のメインエアーカーテンで溶接部を囲む方法では, Fig.8 に示すように, 無風環境下においても開先面に衝突したエアーカーテン噴流の一部が分岐, 開先溝に沿って溶接雰囲気へ侵入する. この侵入する流れの方向は, 開先内に挿入した「タフト」で局所的な流れ方向を目視にて確認した. そこで, Fig.1, Fig.3 に示すように, サブエアーカーテン流れを付加する手段およびメインエアーカーテン内側の広範囲な負圧領域に多量の外気を導入する手段で, メインエアーカーテン内外の圧力勾配を緩和してこの課題を解決した.

以下にこの原理を説明する.

(1) メイン噴射ノズルの上部に配置した複数のサブ噴射ノズルから上方向, 放射状に噴射するサブエアーカーテンの推力による「エントレイメント効果」²⁾ によって, 環状エアーカーテン流れが局部的に上方向に誘引され, この溶接線方向の領域 ($69^\circ \times 2$) のメインエアーカーテンが母材に衝突する角度を小さくする. また同時にメインエアーカーテンの周斜め方向に噴射する角度を小さくする. この結果, 形状が不連続な開先部の乱流発生が抑制されて開先 (溶接線) に沿って外側方向に流れ易くなる.

(2) メインエアーカーテンの推力に起因する「エントレイメント効果」によってその内側雰囲気は負圧になる。環状エアーカーテンの壁面衝突噴流がこの負圧雰囲気に向かって開先に沿って侵入する。そこで、内筒の外周に沿って多量の外気をこの負圧雰囲気に導入、圧力勾配を緩和して侵入する流れを抑制する。

Fig.3 Schematic illustrations of fluid chamber with multilayer jet with swirl generating function.

(3) 環状配列した小径ノズル口近傍は、隣接する噴流の双方の「エントレイメント効果」で噴流同士が引きあって合流、隣接噴流に囲まれたメインエアーカーテンの貫通部が形成される。この貫通部を介してエアーカーテン内側に近接した負圧領域に外気が自然流入されることがタフトの流れで認められる。これは、多量の外気をチャンバー内の中心寄りの負圧領域に導入する手段のみではエアーカーテ

ンに近接した負圧領域の圧力勾配の緩和が出来ないことに起因すると推察する。

(4) メインエアーカーテン内側を旋回する流れ場に前述の内筒を配置して溶接雰囲気から遮断、内筒外周の速い旋回流による誘引の影響を緩和して溶接雰囲気の流れを安定化する。

以上の要素によって、平板状ワークはもとより突き合せ継手ワークの溶接の適用が可能となる。

Fig.4 は表面が滑らかな発泡スチロール板に 5mm 間隔で複数の同心円を描き、その表面にタフト（木綿糸を裏面で固定）を取り付け、この同心円の中心に流体チャンバーの中心が一致するように配置してエアーカーテン噴流およびその内側の流れの可視化したものである。サブエアーカーテン配置領域で、メインエアーカーテンが壁面に衝突する角度が小さくなる共にメインエアーカーテン内側の旋回する流れが外側方向に偏向することが認められる。

尚、タフトの流れは、板面に平行になるに従って流速が大きいことを示している。

Fig.4 Visualization of swirl flow which used Taft.

Fig.5 は上述の構造の流体式チャンバーを使用して、内径 16mm の CO_2/MAG 溶接ノズルからドライアイスミストを供給して V 形突き合せ継手（板厚 10mm、開先角度 60° ）におけるガスシールド雰囲気を可視化した一例である。開先内にドライアイスミスト（シールドガスに相当）が万遍なく行渡っていることがわかる。尚、開先に沿ってエアーが侵入する場合は、開先内に到達しないで途中で飛散する。

Fig.5 Flow visualization of shielding gas which used dry ice mist in V-groove joint.

4. 実験結果および考察

4.1 サブエアーカーテン、外気導入の効果

Fig.6 はメインエアーカーテンのみが形成される構造の流体式チャンバーで、突合せ継手に適用した場合の溶接線方向の流れを開先中心で縦断した場合の模式図である。この構造の場合は、開先面に衝突した噴流の一部が分岐して開先の溝に沿って内側方向に流れることが「タフト」による流れの可視化で確認された。尚、開先面の流れは図中の右手前と左奥でそれぞれ開先面を下降後に流体チャンバー内に侵入する。

Fig.6 Schematic illustrations of invasive air flow condition in v-groove joint.

Fig.7 はメインエアーカーテンのみが形成される構造で、且つ流体式チャンバー内に内筒外周に沿って外気を導入しない場合の溶接線方向の流速を計測したものである。流体式チャンバーと母材間距離（以下、スタンドオフ距離という）が 10mm の場合の中心流速が約 4m/s、15mm および 20mm の場合における中心流速が約 8.0~8.5m/s の分岐噴流が溶接雰囲気内に侵入することが判明した。

Fig.7 Measurement results of flow velocity in chamber with single annular air curtain jet.

Fig.8 は環状エアーカーテンのみが形成される構造で、外気を導入してその影響を検証したものである。その結果、依然として分岐噴流が溶接雰囲気内に侵入することを阻止することは出来なかった。しかし、その効果として、環状エアーカーテン内の流速値のバラツキが少なくなった。

また、内筒内雰囲気の流れの速度がスタンドオフ距離の違いを少なくする効果が認められた。

Fig.8 Measurement results of flow velocity in chamber with multilayer air curtain jet with supplement air.

Fig.9 は上述の構成の他に、更にサブエアーカーテンを付加した場合の影響を検証したものである。この結果、「サブエアーカーテン」と「外気導入」の相乗効果で、流体チャンバー中心位置から外側に向かう流れに反転して、溶接雰囲気内に大気が入り込まない溶接環境が得られた。

Fig.9 Synergistic effect by sub air curtain jet and supplement air which affect the flow velocity in chamber.

尚、Fig.7~Fig.9 の風速計センサの配置は、Fig.6 に図示した如く母材表面から 5.5mm 開先内部に入った位置である。また、Fig.7~Fig.9 においてスタンドオフ距離が大きい場合に流速が大きくなるのは、エアーカーテン噴流による渦流が漸次成長してその影響を受ける為と推察される。

4.2 内筒の効果

Fig.10 は流体式チャンバーの中央部に円筒型内筒を配置した場合のシールドガスの流れ挙動を示した模式図である。この円筒型内筒は、チャンバー本体の下端から全周均一に 1.5mm 突き出すように装着したものである。

この内筒を使用して MAG 溶接を行う場合は、一般的にシールドノズル径が大きくガス流れの指向性が悪いので、ガスが母材に到達する前に拡散される。結果として溶接可能な雰囲気にするには多量のシールドガスが必要になる。

Fig.10 Schematic illustrations of shielding gas flow condition which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with inner cylinder.

Fig.11 は円筒型内筒を装着した流体式チャンバーで、透明アクリル板の I 形突き合せ継手に適用した場合のシールドガスの流れ挙動を内径 $\phi 16\text{mm}$ の MAG シールドノズルから流れるドライアイスミストで可視化確認したものである。

シールドガスが母材に到達する前に拡散して、シールドガス濃度が希薄になっていることが確認された。

Fig.11 Visualization of shielding gas flow which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with no-gate type inner cylinder in I-groove joint.

Fig.12 は前述と同様に、流体式チャンバーの中央部に相対する位置に「切り込み」を設けた門型内筒を配置した場合のシールドガスの流れ挙動を示した模式図である。

この門型内筒は、開先の開放側両端に深さ 5mm の切り込み部を配置されるように装着したものである。

Fig.12 Schematic illustrations of shielding gas flow condition which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with gate type inner cylinder.

この場合のシールドガスは、内筒外周を流れる外気旋回流の影響による拡散が少なく、少ないガス供給量で内筒内の低速旋回流として効率良く母材をシールドすることができる。母材に到達したガスは「コアンダ効果」³⁾によって母材壁面に沿って外側に向かって流れる。また、開先の開放側両端に配置した切り込み部から開先内にも十分にシールドガスが充填される効果があることが確認された。

Fig.13 および Fig.14 は内筒切り込み形状がそれぞれ半楕円形 ($110^\circ \times 2$ 領域開放)、矩形 ($25^\circ \times 2$ 領域開放)にした場合のシールドガスの挙動をドライアイスミストで可視化確認したものである。門型内筒 (半楕円形、矩形)を使用した場合は、側面が長い内筒の外周に沿って導入された外気旋回流によってシールドガスが内筒内にバックされた状態になって高いガス濃度が保持されたものと推察される。

また、切り込み部で旋回力が低下した結果、環状エアーカーテンおよびサブエアーカーテンの推力によって開先内の流れが外側方向に流れ易くなったものと推察される。

Fig.13 Visualization of shielding gas flow which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with semi-ellipse gate type inner cylinder in I-groove joint.

Fig.14 Visualization of shielding gas flow which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with rectangle gate type inner cylinder in I-groove joint.

Fig.15～Fig.17 は円筒型および門型内筒を使用して、内径 $\phi 16\text{mm}$ の MAG ノズルを使用してアルゴンガスを供給した場合の流体式チャンバー内（開先内）の酸素濃度分布を計測したものである。

Fig.15 Oxygen concentration which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with no-gate type inner cylinder in V-groove joint.

Fig.16 Oxygen concentration which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with semi-ellipse gate type inner cylinder in V-groove joint.

Fig.17 Oxygen concentration which used fluid chamber with multilayer air curtain jet and equipped with rectangle gate type inner cylinder in V-groove joint.

Fig.15 は円筒型内筒を使用した場合の流体式チャンバー内の酸素濃度分布である。一般的に使用されるガス流量が $2.50 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s} \sim 4.17 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ の範囲（シールドノズル内径 $\phi 16\text{mm}$ ）では、酸素濃度が高く溶接が可能な雰囲気にするのが困難であることがわかる。

Fig.16 および Fig.17 は、それぞれ半円形門型内筒、矩形門型内筒を使用した場合の流体式チャンバー内の酸素濃度分布である。何れの門型内筒の場合も円筒型内筒と比較して大幅に酸素濃度が低下することがわかった。

以上の結果、本実験範囲では矩形門型内筒（ $25^\circ \times 2$ 領域開放）を使用した場合、ガス流量 $3.33 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ 以上を供給することで酸素濃度計測指示値 $0.2 \sim 0.3\%$ となって溶接が可能なシールド雰囲気であることがわかった。

尚、本実験で使用した酸素濃度計が弱い吸気力で雰囲気ガスをサンプリングする方式である為、流れがある雰囲気では計測指示値に若干の誤差が生じるので相対比較値として評価した。

Fig.18 は円筒型内筒，門型内筒 2 種類を使用した場合のエアーカーテン内側の流速分布を比較したものである。

尚，実験条件は，後述の耐風性能実験と同様である。

本実験の範囲で最適な溶接雰囲気を得られた矩形門型内筒は，内筒外周に沿って自然導入される外気の旋回流速が円筒型内筒と比較して大きく，且つアーク発生位置（チャンバー中心領域）の流速が小さいことが判明した。

この現象・挙動については，今後の研究で明らかにしたいと考えている。

Fig.18 Comparison of the flow velocity in chamber when equipping with non-gate type inner cylinder, and gate type.

3.3 耐風シールド性能

Fig.19～Fig.21 は円筒型および門型内筒を装着した流体式チャンバーで，突き合せ継手ワークに適用した場合の耐風性能を計測したものである。溶接線方向およびその直角方向からブローで送風してチャンバー中心（開先内）の流速変動を検証した。継手形状および風速測定位置は Fig.6，チャンバーと内筒の位置関係は Fig.10 および Fig.12 に示す。

円筒型内筒および門型内筒の耐風性能はそれぞれ約 4m/s，7m/s で，本実験の範囲では矩形門型内筒の耐風性能が最適であることがわかった。エアーカーテン外側から風がチャンバー内侵入する流路等に関する挙動は，今後の研究で明らかにしたいと考えている。

Fig.19 Wind-protection performance of fluid chamber with multilayer air curtain jet which equipped with no-gate type inner cylinder.

Fig.20 Wind-protection performance of fluid chamber with multilayer air curtain jet which equipped with semi-ellipse gate type inner cylinder.

Fig.21 Wind-protection performance of fluid chamber with multilayer air curtain jet which equipped with rectangle gate type inner cylinder.

3.4 溶接確認試験の一例

Fig.22 Observation results showing stable TIG arc welding in V-groove joint in strong wind environment.

Fig.22 は風速 8.5m/s の環境下で、円筒型内筒を装着した流体式チャンバーを使用した場合の TIG 溶接 (板厚 20mm, 60° V) のアーク発生状態 (溶接電流 110A) を示す。

防風シールド性能が最適とは言えない円筒型内筒の場合においても、シールドガスの指向性が良い場合は (ノズル内径 8mm, ガス流量 $1.33 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$) 突き合せ継手ワークで良好なアークが発生されることがわかった。

1. Welding current	: 120~130A
2. Welding voltage	: 16.5~17.5V
3. Welding speed	: 1.67mm/s
4. Weaving width	
Root Pass	: 4.0mm
Cover Pass	: 9.5mm
5. Shielding gas	
Gas component	: Ar 50% + CO ₂ 50%
Flow rate	: $6.67 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$
6. Air flow rate	: $5.23 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}$

Fig.23 Weld bead cross section of multi-layer MAG arc welding in strong wind environment and its welding conditions.

Fig.24 Photograph showing MAG arc welding state which used fluid chamber with multilayer air curtain jet in strong wind environment.

Fig.23 は風速 7m/s の環境下で、円筒型内筒を装着した流体式チャンバーを使用した場合の MAG 溶接の溶接条件および断面マクロ写真である。また、Fig.24 はその溶接中の状況写真である。

多層盛溶接時の溶接ビードによる形状の不連続性およびウィーピングによる流れ変動の影響を受けることなく良好な品質が得られることがわかった。

Fig.15~Fig.17 に示したように、門型内筒を装着することによって、円筒型内筒と比較して大幅に少ないシールドガス流量で安定したシールド雰囲気を得られることが明らかになった。この結果、少ないシールドガス流量においても、高品質の TIG 溶接および MAG 溶接が得られると推察される。

Fig.25 Photograph showing the scattering state of spatter of MAG welding in strong wind environment.

Fig.25 は風速 7m/s の環境下で、流体式チャンバーを使用した場合の MAG 溶接中のスパッタ飛散状況を示したものである。スパッタ⁴⁾は流体式チャンバー内に滞留・落下して溶接部周辺の母材に付着することなく環状エアーカーテンの流れと共に溶接部から離れた位置に排出されていることが観察された。また、アーク熱も同様に排出されることも非接触の流体式チャンバーの利点である。

4. 結 論

本研究では、母材表面が不連続な V 形突き合せ継手への流体式防風チャンバーの適用検討を行なった。

その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 環状エアーカーテンのみで溶接部を囲む方法は、開先面に衝突した環状エアーカーテンが開先に沿って溶接雰囲気に侵入して溶接が不可能になることが判明した。

(2) 環状エアーカーテン噴射口から上側に 12mm 離隔した位置から 15° 上方、放射状に噴射するサブエアーカーテンを付加することは、開先に沿って外気が溶接雰囲気に侵入する流れを阻止する第 1 の要素であることが判明した。

更に環状エアーカーテン中心部に内筒を配置、その外周に沿って外気を広範囲に環状エアーカーテン内側に導入することは、開先に沿って外気が溶接雰囲気に侵入する流れを阻止する第 2 の要素であることが判明した。

以上、この 2 つの要素の相乗効果で、V 形突き合せ継手ワーク溶接が可能なシールド雰囲気が形成できることが判明した。

(3) 円筒型内筒と比較して矩形門型内筒の切り欠き部を開先の開放側両端に配置した流体式チャンバーは、少ないシールドガス流量で溶接を可能にするシールド雰囲気が形成できると共に耐風性能も優れていることが判明した。

(4) サブエアーカーテン付加による環状エアーカーテンとの2層構造は、流体式チャンバーと母材間距離が長くなる開先の開放側の防風脆弱性を補間できることが判明した。

(5) 本実験範囲では、多層盛溶接時の不安定要素と懸念された開先や溶接ビードによる形状の不連続性およびウィーピングによる流れの不安定性の影響を受けることなく良好な溶接品質が得られることが判明した。

(6) 今後の研究において、未解明の流れの詳細挙動をシュリーレン法等で解明することによって更に高性能で経済的な防風シールド方法として確立できるものとする。

謝 辞

本研究遂行するにあたり、(株)ライトステップの高橋悟氏および MAG 溶接確認試験に御協力戴いた J F E 工建(株)技術開発本部・研究開発部の勝木誠氏、岸田仁氏、野木俊克氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) MORIKAWA Shigehiro and KAMIYA Osamu: Fundamental Examination of Coaxial Jet Chamber for Protecting against Strong Wind, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 23-2 (2005), 230-235. (in Japanese)
- 2) Published Patent (Japan): Control Device for Fluid Flow Blowout, 06-87325
- 3) Shigeru MATSUO, Toshiaki SETOGUCHI and Kenji KANEKO: Study on the Characteristics of Supersonic Coanda Jet, Journal of the Visualization Society of Japan, 20-79 (2000), 33-38. (in Japanese)
- 4) TANAKA Koichi, NANSAI Kiyomi, IDA Susumu, NISHIWAKI Nobuhiko and HORI Sankei: Study on the Dispersion Behavior and Temperature of Spatter caused by CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 20-3 (2002), 363-368. (in Japanese)