特集

アーク溶接の最新技術 ―溶接機器・溶接材料・シールドガスからのアプローチ―

シールドガスによるアーク溶接の 溶接品質・溶接部性能の改善*

池上 祐一**, 宮内 秀樹**, 山本 信也***, 内原 正人****

池上 祐一

宮内 秀樹

山本 信也

内原 正人

Shielding Gases for Improved GMAW and GTAW Processes*

by IKEGAMI Yu-ichi**, MIYAUCHI Hideki**,
YAMAMOTO Shin-ya*** and UCHIYAMA Masato****

キーワード

シールドガス, アルゴン, 溶接品質, 溶接欠陥, アーク溶接, GMAW, GTAW

1. はじめに

溶接材料の生産量の大部分が GMAW 用であり, また活性金属を含む広い範囲の母材を高品質で溶接するためには GTAW プロセスが不可欠であることを背景に, ガスシールドアーク溶接法に対して, 多くの切り口で高機能化が望まれている¹⁾.

ガスシールドアーク溶接法は, 溶接ロボットシステムによる生産の自動化に適し, これまで, 溶接機器や溶接材料を主体として多くの技術開発が進められてきた^{2, 3)}.

一方, アーク現象や溶融池現象に大きく影響する溶接用シールドガスについては, ISO14175 と整合する包括的な規格が JISZ3253 (2003) 「アーク溶接及びプラズマ切断用シールドガス」が規定され, 原規格の改訂 (2008) にもない2010年に内容が拡充される⁴⁾. 国内でも実用的に入手可能なシールドガスの選択の範囲が広くなり, 指針も充実してきたといえる.

本報告では, 用途に応じたシールドガスの適切な選択によって, 溶接品質・溶接部性能の改善に役立つと思われる事例を紹介する.

2. 消耗電極式ガスシールドアーク溶接 (GMAW) におけるシールドガス組成と施工条件の最適化

2.1 すみ肉溶接の低スパッタ化と溶け込み形状の改善

産業機械, 建設機械等に用いられる厚鋼板の GMAW すみ肉溶接で, シールドガスに炭酸ガスを単独で用いる場合, 溶接中に溶融金属の微小な粒子が周囲に飛散するスパッタが比較的多く発生する. そこで, スパッタを低

Fig. 1 スパッタ量におよぼすシールドガスの影響

*原稿受付 平成22年7月8日

**正 員 エア・ウォーター㈱ Member, Air Water inc.

*** エア・ウォーター・プラントエンジニアリング㈱ Air Water Plant & Engineering inc.

****正 員 住友金属工業㈱ Member, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

Fig.2 開先 およびトーチ設定

Fig.3 ビード寸法測定要領

シールドガス	外観写真	断面マクロ写真	ビード寸法
Ar+3.5%O ₂			L1: 7.11mm L2: 6.57mm D1: 2.09mm D2: 2.33mm
(Ar+3.5%O ₂) +20%CO ₂			L1: 6.59mm L2: 6.01mm D1: 2.35mm D2: 2.68mm

Fig.4 供試溶接部の外観 および断面マクロ写真

減するために、従来はアルゴンをベースに20%程度の炭酸ガスを混合した組成のシールドガスで、溶滴移行がスプレー移行領域になるような溶接条件を設定するのが一般的であった。Fig. 1にスパッタ損失（供給したワイヤ重量に対するスパッタ重量の割合）とCO₂混合率の関係を示すが、CO₂の比率が少なくなる（Ar比率が多くなる）ことによってスパッタ量が減少する。本試験条件では炭酸ガス100%のときの不規則かつ大粒のグロービュール型の溶滴移行形態が、Ar比率の増加にともなってやや小粒で規則的な溶滴移行となり、さらに、20%、10%のCO₂混合率でスプレー型の溶滴移行形態に変化してスパッタが少なくなる⁵⁾。しかし、CO₂混合率を0%とし、純アルゴンを用いるとアークが不安定になり、スパッターも多くなる。また、純アルゴンではビードも不安定になる場合もあることから、すくなくとも1%程度の炭酸ガスや酸素のような酸化性ガスの添加が必要である⁶⁾。一方、工業的に容易に入手可能なAr+3.5%O₂ 2成分ガス（JISZ3253 区分M-2-2）をベースガスにして、炭酸ガス混合率0%の条件では、さらにスパッタ量を低減することができる。Ar+3.5%O₂のみで溶接した場合は炭酸ガス100%の1/10程度のスパッタ量であり、本条件では周囲に飛散するスパッタはわずかに発生するが、母材にスパッタがほとんど付着しない施工が可能となる。しかし、炭酸ガス混合率が10%より低い場合、プラズマ気流の影響を受け、溶込み形状がややフィンガー状になる^{7,8)}。この場合、開先内、あるいはT継手の溶接では、溶込み底部の両脇で開先面の溶融が不完全になり、融合不良となることが懸念される。

適切なワイピング条件を設定し、開先面をじゅうぶん溶融させることが可能か確認する目的で、Fig. 2に示

Fig.5 スパッタ量におよぼすシールドガス組成とアーク電圧の影響

す開先、トーチ設定で、母材肉厚6mmのSM490A鋼板のT継手を、脚長約6.5mm狙いですみ肉溶接した。溶込み寸法は、Fig. 3の要領で測定した。溶接部の外観写真、および断面マクロ写真をFig. 4に示す。Fig. 4から、Ar+3.5%O₂ 2成分ガス単独で溶接した場合も開先ルート部周辺を問題なく溶融させることができ、(Ar+3.5%O₂)+20%CO₂と同等の溶込み深さで、ビード外観も良好であることがわかる。Fig. 5にスパッタ損失とシールドガス、およびアーク電圧の関係を示すが、炭酸ガスの混合率が20%の場合は、アンダーカットを防止するためにアーク電圧を低めに設定するとスパッタ量が増加す

Table 1 供試材料

No.	母材組合せ	溶接ワイヤの化学成分 [mass.%]						シールドガス
			C	Si	Mn	Cr	Nb	
1E	1.5mmt SUH409L	JIS Y430	.018	.40	.40	18.80	—	Ar+3.5%O ₂
1A	/1.5mmt SUH409L	1.0mmφ						Ar+20%CO ₂
2E	1.5mmt SUS430J1L	Y442	.015	1.07	.61	18.58	.16	Ar+3.5%O ₂
2A	/1.5mmt SUS302B	1.0mmφ						Ar+20%CO ₂

- ①指定の母材、ワイヤ組合せで突き合わせ完全溶け込み溶接テストピースを製作
 ②溶接金属にVノッチをいれたシャルピー試験類似の試験片に加工
 ③試験片3枚重ねで、衝撃破壊試験を実施 試験温度 20℃

Fig. 6 溶接金属の衝撃破壊試験方法

Fig. 7 溶接金属の衝撃破壊試験結果

るのに対し、Ar+3.5%O₂では低スパッタと良好なビード外観を両立するのが容易である。

2.2 フェライト系ステンレス薄鋼板のGMAW溶接金属の機械的性質の改善

耐高温酸化性能、耐食性に優れ、比較的低コストの材料として、多くの用途にフェライト系ステンレスが適用されている。とくに、自動車排気系部品には、近年の排気ガス温度の上昇、耐マフラー凝縮水腐食性能、耐塩害腐食性能の要求から、使用温度と環境に応じ、フェライト系ステンレスの薄鋼板が重要な役割を果たしている^{9, 10)}。自動車排気系用途のフェライト系ステンレスの溶接の分野でも、低合金鋼用で一般に用いられるAr+20%CO₂をそのまま用いている場合があり、溶接部の機械的性質についてAr+3.5%O₂と2成分ガスと比較した。

Table 1に示す母材、フェライト系ステンレスソリッドワイヤ、およびシールドガスの組合せで突合せGMAW溶接継手を製作し、Fig. 6のように溶接金属に2mmVノッチを入れたサブサイズのシャルピー試験片を用いて衝撃試験を実施した。Fig. 7に、試験温度20℃、3枚重ねでの吸収エネルギーとぜい性破面の有無を示す。SUH409L/SUH409L、SUS430J1L/SUS302Bのどちらの母材組合せも、酸素添加のAr+3.5%O₂ 2成分ガスをシールドガスに用いることによって良好な衝撃特性を示す。

Fig. 8 衝撃破壊試験片の外観写真の例

Fig. 9 供試溶接金属の断面マイクロ写真

Fig. 10 供試溶接金属のマイクロ組織と硬さ試験結果

一方Ar+20%CO₂は吸収エネルギーが比較的低く、破断面はぜい性破面であった。Fig. 8に、試験片破面の外観写真の例を示す。Ar+3.5%O₂を用いた試験片は延性破面であり、変形が比較的大きいのに対し、Ar+20%CO₂は、フラットなぜい性破面を含むことがわかる。

Fig. 9に示す溶接金属の断面マイクロ写真から、酸素添加のAr+3.5%O₂の場合、フェライト単相の組織である。一方Ar+20%CO₂はフェライト粒界に別の組織が成長している。Fig. 10のフェライト粒界付近のマイクロビッカース硬さ試験結果から、Ar+20%CO₂による溶接金属のマイクロ組織はフェライト単相ではなく、フェライト粒界にフェライト素地よりも硬いマルテンサイト組織が生じていると考えられる。溶接金属の化学分析の結果、いずれの母材組合せもAr+3.5%O₂による溶接金属の炭

素量が Ar+20%CO₂ よりも低い。溶接金属の炭素は、強力なオーステナイト形成元素として働き、シェフラー図での Ni 等量を増加させるため、Fig. 11 に示すように、Ar+20%CO₂ による溶接金属の化学成分は、ミクロ組織の一部にマルテンサイトが存在する領域に入る。一方、シールドガスに炭素の供給源のない Ar+3.5%O₂ による溶接金属は、マルテンサイトのない領域に入り、Ar+3.5%O₂ が、溶接金属の機械的性質の改善に有効であることがわかる。

Fig.11 シェフラー図上での供試溶接金属の科学成分

2.3 フェライト系ステンレス薄鋼板の GMAW 溶接金属の耐粒界腐食性能の向上

自動車排気系用途のフェライト系ステンレスの粒界腐食については、溶接熱影響部の耐粒界腐食について研究が進められ¹¹⁾、C、N の低減と安定化元素の適正量の添加によって母材側での対策が講じられている。しかし、実際の部品の GMAW 溶接部では、使用環境によって溶接金属での粒界腐食が問題となることがある。自動車排気系部品に多く使用される 11.5%Cr 系の SUH409L ステンレスには、17%Cr 系の JISZ3321 Y430 溶接材料が一般に用いられる。本報では、Y430 をベースに、安定化元素を添加した SUS430J1L の成分系の溶接ワイヤによる溶接金属の耐粒界腐食性能について検討した。

母材に板厚 1.5 mm の SUH409L、溶接ワイヤに安定化元素を添加した 17%Cr 系の SUS430J1L のソリッドワイヤを用い、Ar+3.5%O₂ 2 成分ガス、および炭酸ガスを添加した Ar+(5, 10, 20%)CO₂ との組合せで 4 種類の重ねすみ肉溶接継手を製作した。溶接部の断面ミクロ、および Strauss 試験 JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」に準拠して、溶接金属の粒界腐食の有無を調べた。本腐食試験は、11.5%Cr 系の SUH409L

Fig.12 供試溶接金属の断面ミクロ写真（溶接ワイヤSUS430J1L）

Table 2 腐食試験後の試験片評価結果

No.	母材	ワイヤ		シールドガス混合比[vol.%]			溶接条件				試験片外観評価		試験片断面ミクロ評価
		銘柄	線径 [mm]	製品ガス (Ar+3.5%O ₂)	Ar	CO ₂	設定	溶接電流 [A]	アーク電 圧[V]	溶接速度 [mm/min]	試験片 No.	溶接金属	
1	SUH409L	SUS430J1L	1.2	100	(96.5)	(3.5)	ステン レス MIGパ ルス	110	21	700	①	○	○
											②	○	—
											③	○	—
2	↓	↓	↓	—	95	5	↓	↓	22	↓	①	○	× ×
											②	○	—
											③	○	—
3	↓	↓	↓	—	—	10	↓	↓	23	↓	①	○	× × ×
											②	○	—
											③	○	—
4	↓	↓	↓	—	—	20	↓	↓	24	↓	①	△	× × ×
											②	△	—
											③	△	—

○：合格，△：一部腐食有り，×：腐食有り，××：欠落有り，×××：欠落が激しい

Fig.13 腐食試験後の溶接部断面ミクロ写真

Fig.14 溶接金属のC量におよぼすシールドガスCO₂量の影響

である熱影響部及び母材では、全部の組合せで腐食（粒内，粒界を問わず減量をともなって腐食）する試験条件であるが，17%Cr系の溶接材料を用いた溶接金属の粒界腐食の有無に着目して実施した。

Fig. 12 に溶接金属の断面ミクロ写真を示す。Ar+3.5% O₂ および，Ar+(5, 10, 20%)CO₂の全部で，溶接金属が，フェライト単相のミクロ組織であった。Ar+3.5%O₂では，Ar+(5, 10, 20%)CO₂よりもミクロエッチング（ピレラ）による腐食が浅く，良好な耐食性を有すると思われる。

4種類の溶接継手から，溶接金属を長手中央とした約10mmL×100mmwの試験片を溶接ビード表面を研磨しない状態で各3枚切り出した。試験溶液は16%H₂SO₄+5.7%CuSO₄+Cuの組合せの沸騰溶液であり，試験片を72時間浸漬した後，試験片の外観を観察した。

Table 2 に試験片の外観観察結果を示す。外観の目視観察では，安定化元素添加17%Cr系ソリッドワイヤSUS430J1Lの場合，溶接金属はAr+3.5%O₂，95%Ar+5%CO₂，90%Ar+10%CO₂で原形をとどめ，減肉を伴うような著しい腐食は見当たらなかった。

しかし，Fig. 13の断面ミクロから，安定化元素を添加

Table 3 供試溶接金属の化学成分

No	[wt.%]					[ppm]				
	C	Cr	Ti	Nb	N	Creq	Nieq	Nb/(C+N)	(Nb+Ti)/(C+N)	
1 SUS430J1L/Ar+3.5%O ₂	0.007	14.46	0.065	0.38	106	14.99	0.52	21.59	25.28	
2 SUS430J1L/95%Ar+5%CO ₂	0.015	14.42	0.065	0.37	105	14.95	0.76	14.51	17.06	
3 SUS430J1L/90%Ar+10%CO ₂	0.019	13.99	0.07	0.33	101	14.52	0.86	11.34	13.75	
4 SUS430J1L/80%Ar+20%CO ₂	0.022	13.94	0.07	0.32	100	14.47	0.95	10.00	12.19	
母材 SUH409L	0.006	10.8	0.161	0.002	74	11.46	0.56	0.15	12.16	
溶接ワイヤ SUS430J1L	0.009	16.08		0.38	135	16.53	0.61	16.89	16.89	

したSUS430J1Lワイヤを用いても，シールドガスに炭酸ガスを添加したAr+(5, 10, 20%)CO₂には，溶接金属にも脱粒をとまなう粒界腐食が生じているのに対して，Ar+3.5%O₂による溶接金属には粒界腐食が見当たらず，良好な耐粒界腐食性能を有することがわかる。

Fig. 14 に溶接金属の炭素量におよぼすシールドガス中のCO₂量の影響を示す。シールドガスのCO₂量の増加にともなって，溶接金属の炭素量も増加するが，5%程度の少ないCO₂量でも，シールドガスからの炭素の供給のないAr+3.5%O₂と比較して70ppm程度の炭素量が増加することが，溶接金属の耐粒界腐食性能の差に影響していると考えられる。

しかし，Table 3の各サンプルの溶接金属の化学成分から，0.4%程度のNbを含むSUS430J1LとAr+3.5%O₂の組合せ，およびAr+5%CO₂との組み合わせで，熱影響部での粒界腐食防止に有効^{11, 12)}とされる(Nb+Ti)/(C+N)≥16は満足している。したがって，溶接金属での粒界腐食防止には，(Nb+Ti)/(C+N)を，16よりも若干高い値にする必要があると判断する。

実用的に溶接金属からの粒界腐食を防止するためには，適切な量の安定化元素を添加した溶接ワイヤと，シールドガスからの炭素の供給のないAr+3.5%O₂成分ガス等のAr-O₂系シールドガスの組み合わせが有効である。

Fig. 15 溶接金属の伸びにおよぼす水素の影響

3. 非消耗式電極ガスシールドアーク溶接 (GTAW) における事例

3.1 フェライト系ステンレス薄鋼板の溶接部延性におよぼすシールドガス水素添加の影響

TIG 溶接やプラズマアーク溶接では、溶込み深さを深くするためにアルゴンに水素を混合したシールドガス (JISZ3253 区分 R-1) が用いられる^{7, 8)}。筆者らは、自動車用プレス成形素材を溶接によりつなぎ合わせるテーラードブランク工法への適用を目的に、低合金薄鋼板の突合せプラズマアーク溶接にアルゴンと水素を混合したシールドガスを用い、溶接部の機械的性質を検討した。水素の混合によっても成形性は同等であり、機械的性質には影響をおよぼさないことを明らかにした¹³⁾。このような低合金薄鋼板の突合わせ溶接では、水素入りシールドガスを用いることによって溶接金属に水素が吸収されるが、その水素は短時間に放出される¹³⁾ため、成形性に悪影響をおよぼさなかったと考えられる。

一方、上記の自動車部品のほか、給湯ボイラ用途等に用いられるフェライト系ステンレスの場合、鋼中の水素 (H) の拡散速度が低合金鋼の 1/10～1/25 である⁹⁾ため、水素入りシールドガスによる溶接部の成形性の低下¹⁴⁾に注意する必要がある。肉厚 1mm の SUS444 薄鋼板の TIG 突合せ溶接金属から、溶接長手方向に引張試験片を採取し、全溶接金属の引張試験伸びにおよぼす水素混合率の影響を Fig. 15 に示す。シールドガスへの水素添加にともなって、ばらつきがあるものの溶接金属の延性が大きく低下している。Fig. 16 に、継手の曲がり取り後にマクロ試験したサンプルの一例を示すが、曲がり取りの際のひずみによって、溶接金属の中央に微細な割れを生じていることがわかる。フェライト系ステンレスを水素入りシールドガスで溶接する場合、溶接のままで溶接金属の伸びが母材と比較して低く、溶接部に塑性加工等による変形が加えられる用途では溶接金属に割れが生じる可能性がある。

フェライト系ステンレスの溶接部を溶接のままで成形加工する用途では、不活性ガスのみで構成されるシールドガス、たとえばアルゴン 100%、または Ar + 30～50%He (JISZ3253 区分 I-3) を使用する必要がある。ま

Fig. 16 供試TIG溶接金属の断面マクロ およびミクロ写真

た、溶接部を後熱処理することが可能な場合は、水素入りシールドガスを用いても、鋼種に応じた適切な熱処理条件を設定することによって溶接金属の延性を回復させることが可能である¹⁴⁾。

4. 結 言

シールドガスの観点から、溶接品質・溶接部性能の改善の事例について紹介した。実際の施工では、シールドガスのほか、溶接機、溶接材料、設計に関する知見も活かし、総合的な取り組みによって理想的な溶接プロセス、高性能な製品を実現することが望まれる。

今後も、シールドガスの開発を通じ、溶接に関連した問題の解決、技術の進歩にすこしでも役立つよう取り組む所存である。

参考文献

- 1) 溶接法研究委員会：溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開，溶接学会誌 vol.77 (2008)，No.2，112-128。
- 2) 例えば 上山：アーク溶接機器の進歩と未来，溶接学会誌 vol.78 (2009)，No.8，693-708。
- 3) 例えば 橋本，森本：ガスシールドアーク溶接材料における低スパッタ化，溶接学会誌 vol.75 (2006)，No.7，560-564。
- 4) 日本溶接協会 他：溶接技術 vol.57 (2009)，No.9，106-112。
- 5) 池上，宮内，山本，内原：シールドガスによるスパッタ低減について，溶接学会誌 vol.75 (2006) No.7，570-574。
- 6) 内原，高橋，迫田，高：自動車技術会学術講演会前刷集 962，(1996)，p.169-172。
- 7) 安藤，長谷川：溶接アーク現象(増補版)，産報(1967)，365。
- 8) 佐藤：溶接品質および作業性に及ぼすシールドガスの影響，溶接学会誌 vol.69 (2000) No.8，645-648。
- 9) 西本，夏目，小川，松本：ステンレス鋼の溶接，産報出版 (2000)。
- 10) 井上，菊池：新日鉄技報，vol.378 (2003)，56。
- 11) 辻，小野山，竹村，大岡：鉄と鋼，vol.60 No.4 (1974)，165。
- 12) J. J. Demo: Metal Trans., vol.5 (1974)，1054。
- 13) 内原，池上：鉄鋼材料のアーク溶接およびレーザ溶接におけるシールドガスからみた欠陥防止・溶接性，溶接学会誌 vol.74 (2005) No.6，426-429。
- 14) ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧，539。