



Title	炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ低減に関する研究
Author(s)	片岡, 時彦
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/519
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

炭酸ガスアーク溶接における
スパッタ低減に関する研究

平成 21 年 9 月

片岡時彦

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ低減に関する研究

目次

第1章 緒論	-----1
1.1. 研究の背景	-----1
1.2. 炭酸ガスアーク溶接における課題と本研究の目的	-----2
1.3. 本研究に関する従来の研究	-----4
1.3.1. 溶滴の移行形態	-----4
1.3.2. 溶滴に作用する力とバランス	-----4
1.3.3. スパッタの発生機構	-----5
1.3.4. 溶接電流および機器の制御	-----7
1.3.5. ワイヤ組成の検討	-----7
1.4. 本論文の構成	-----9
第2章 極性棒プラスにおけるスパッタ発生量に及ぼすワイヤ微量元素の影響	-----12
2.1. 緒言	-----12
2.2. 実験方法	-----12
2.2.1. 供試材料	-----12
2.2.2. 溶接条件	-----13
2.2.3. 評価方法	-----14
2.3. 実験結果および考察	-----14
2.3.1. スパッタの発生機構	-----14
2.3.2. スパッタ発生量に及ぼす Ti の影響	-----15
2.3.3. スパッタ発生量に及ぼす REM, Ca, K の影響	-----15
2.3.4. スパッタ発生量に及ぼす短絡時間率の影響	-----17
2.3.5. スパッタ発生量に及ぼすアーク形態の影響	-----20
2.4. 結言	-----23
第3章 高周波パルスを用いたスパッタ低減技術の開発	-----24
3.1. 緒言	-----24
3.2. 実験方法	-----24
3.2.1. 供試材料	-----24
3.2.2. 溶接条件	-----25
3.2.3. 評価方法	-----25

3.2.3. 溶滴移行の観察	-----	26
3.3. 実験結果	-----	26
3.3.1. ノンパルス溶接における溶滴移行	-----	26
3.3.2. 炭酸ガスパルスアーク溶接法における溶滴移行	-----	27
3.3.3. 炭酸ガスパルスアーク溶接法におけるスパッタ発生量	-----	32
3.3.4. 高周波パルス溶接法の特性	-----	32
3.4. 考察	-----	34
3.5. 結言	-----	36
第4章 アークの安定性とスパッタ発生に及ぼす極性と REM 添加の影響	---	37
4.1. 緒言	-----	37
4.2. 実験方法	-----	37
4.2.1. 供試材料	-----	37
4.2.2. 溶接条件	-----	37
4.2.3. スパッタ発生量の評価	-----	38
4.2.4. 溶滴移行の観察	-----	38
4.3. 実験結果および考察	-----	39
4.3.1. 極性とアークの安定性	-----	39
4.3.2. スパッタ発生量に及ぼす極性と REM 量の影響	-----	39
4.3.3. アーク形態と溶滴移行に及ぼす極性と REM 量の影響	-----	40
4.3.4. REM 添加ワイヤの溶接性	-----	42
4.4. 結言	-----	44
第5章 電極ワイヤの溶融速度とアーク形態に及ぼす REM 添加の影響	----	45
5.1. 緒言	-----	45
5.2. 実験方法	-----	45
5.2.1. 供試材料	-----	45
5.2.2. ワイヤ溶融速度	-----	47
5.2.3. アーク現象の観察	-----	47
5.3. 実験結果	-----	48
5.3.1. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径	-----	48
5.3.1.1. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径に及ぼすワイヤ REM 量の影響	----	48
5.3.1.2. ワイヤ溶融速度に及ぼすワイヤ突出し長さの影響	-----	52
5.3.1.3. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径に及ぼす溶接電流の影響	-----	55
5.3.2. アーク陰極点の観察	-----	60
5.3.3. 溶滴の保有熱量と温度	-----	64

5.3.3.1.	極性 DCEP における溶滴の保有熱量と温度	-----66
5.3.3.2.	極性 DCEN における溶滴の保有熱量と温度	-----67
5.4.	考察	-----68
5.4.1.	アークによるワイヤ溶融の等価電圧と電子電流率	-----68
5.4.1.1.	陽極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧	--68
5.4.1.2.	陰極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧	--70
5.4.2.	極性 DCEN における陰極の電流密度と温度の関係	-----72
5.4.3.	極性 DCEN における溶滴移行形態への REM の影響	-----74
5.5.	結言	-----76
第 6 章	極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の実用化	-----78
6.1.	緒言	-----78
6.2.	極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法	-----78
6.2.1.	極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接用ワイヤ	-----78
6.2.2.	極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の特徴	-----79
6.3.	薄板の溶接	-----79
6.3.1.	電流波形制御の適用	-----79
6.3.1.	新しい波形制御電源の適合性	-----83
6.4.	厚板の溶接	-----83
6.4.1.	狭開先溶接技術の開発	-----83
6.4.2.	狭開先化による溶接の能率向上	-----88
6.4.3.	狭開先溶接法の開先標準	-----88
6.4.4.	実大柱-梁接合部の載荷試験	-----91
6.5.	結言	-----93
第 7 章	結論	-----94
	謝辞	-----97
	参考文献	-----98
	本研究に関する発表論文	-----104

第1章 緒論

1.1. 研究の背景

溶接は、接合箇所が連続性を持つように分子原子レベルで融合一体化する技術であり、鋼構造物の製作には不可欠である。溶接は紀元前の青銅器にもちいられた「湯かけ」あるいは鍛接が始まりとされ^{1,3)}、現在までに数多くの方法が考案実用化されている。溶接方法は、供給するエネルギー、熱原および機構によって細かく分類されている。

アーク溶接法は、その名のごとくアーク放電を熱源とし、接合部を加熱・熔融させる溶接法である。歴史的には、1800年にアーク放電現象（電極間に火花が散るスパーク現象）が発見されたのが始まり^{1,3)}であるが、20世紀初頭に被覆溶接棒（通称手棒）が発明され³⁾、実用技術として健全な溶接金属を作成することが可能になった。日本では1930年駆逐艦の製造に初めて被覆溶接棒が用いられ、艦船の軽量化と工期の短縮に貢献し、1950年代には、熔融部を大気からガスでシールドするガスシールドアーク溶接法が開発された。

ガスシールドアーク溶接法は、電極が熔融する溶極式と非溶極式に分類^{1,4)}され、非溶極式にはティグ溶接法とプラズマ溶接法があり、ともに電極に W(タングステン)、シールドガスにアルゴンガス(Ar)またはヘリウムガス(He)を用いるアーク溶接法である。一方、電極自身が熔融(溶極式)して溶接金属の一部を形成するガスメタルアーク溶接法は、シールドガスの種類によって、Ar, He等の不活性ガスを用いるMIG(metal inert gas)溶接法、Arと活性ガスである酸素(O_2)、炭酸ガス(CO_2)の混合ガスを用いる混合ガスシールドアーク溶接法、安価な CO_2 をシールドガスに用いる炭酸ガスアーク溶接法に分類される^{1,3)}。また、混合ガスシールドアーク溶接法および炭酸ガスアーク溶接法は活性なガスを用いることからMAG(metal active gas)溶接法に分類される^{1,3)}。

ガスシールドアーク溶接法であっても溶極式と非溶極式ではアーク現象が異なる。非溶極式であるTIG(ティグ)溶接法はアルミニウム合金やステンレス鋼などの特殊材料の溶接に多用されている。電極であるW(タングステン)の溶損を防ぐことを目的に棒マイナス(DCEN)での使用が安定とされる。その原理は、熱電子放出に伴う電極自身の冷却作用にあり、松田、牛尾らは、電極であるWへのREM(Ce, La, Y)添加がアークの集中と電極の長寿命化に有効であること、およびWへの2%の酸化物(CeO_2 , La_2O_3 , Y_2O_3)混入が電極の溶損抑制に有効であることを報告している^{5,6)}。

一方、溶極式であるガスメタルアーク溶接法は普通鋼および780MPa級鋼以下の高張力鋼の溶接に広く用いられている。電極である鋼ワイヤを棒プラス(DCEP)で使うことが安定な多層溶接に適しているとされる⁷⁾。棒マイナス(DCEN)の溶接においては陰極である電極ワイヤの熔融速度が増加し、陽極である鋼板の溶込みが浅くなることでスラグ巻き込み・オーバーラップ等の欠陥が発生し易いことが知られている。また、スパッタ、ヒュームの発生も多いことから棒プラス(DCEP)での使用が常識とされてきた⁷⁾。棒マイナス(DCEN)のアーク現象について西口、松縄らは、高気圧雰囲気下でのMIGアークの安定

化効果について報告している⁸⁾。その他、棒マイナス(DCEN)のアーク現象についての報告は少ない。

また、ガスシールドアーク溶接法は環境、用途および要求特性によってガスの種類が使い分けされている。日本においては溶接施工コストの削減を目的に安価な炭酸ガスをシールドガスに用いる炭酸ガスアーク溶接法が主流を占めている³⁾。この炭酸ガスアーク溶接法はアジア圏においては高い使用比率を占めるが、北米、ヨーロッパ圏においてはAr(He)の価格が比較的安価であることからTIG溶接法、MIG(metal inert gas)溶接法、および混合ガスシールドアーク溶接法の使用が比較的多い。炭酸ガスアーク溶接法は、アジア圏その中でも特に技術的に先行してきた日本で発展した溶接法であると言える。

1.2. 炭酸ガスアーク溶接法における課題と本研究の目的

炭酸ガスアーク溶接法は開発から約60年が経過し、これまでの溶接電源および溶接材料の改良・開発によって、近年ではアーク溶接法の主流を占めるまでに発展してきた³⁾。Fig. 1.1に炭酸ガスアーク溶接中の状況を示す。中央の白い部分がアークであり、青白く立ち昇るのがヒュームである。さらに、アークから周囲に向かって発光する飛散物が確認できる。これがスパッタ(溶融金属)である。このように炭酸ガスアーク溶接では溶接時に多量のスパッタが発生する。Fig. 1.2に溶接材料に対する市場ニーズを示す^{9,10)}。最も高いニーズはスパッタレスであり2番目のニーズであるヒュームレスを含めるとその比率は40%を超え、現在でもスパッタに関わる溶接作業性の改善が最重要課題とされている。

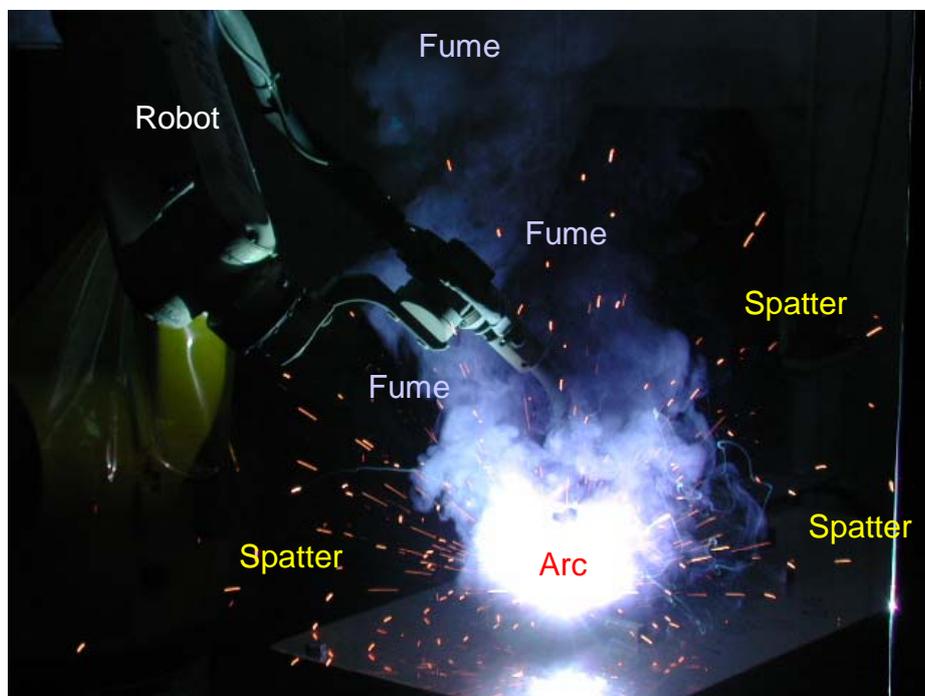


Fig.1.1 Photograph showing CO₂ gas shielded arc welding process.

Fig. 1.3 に炭酸ガスアーク溶接法の構成を示す。電源、制御装置、ワイヤ送給装置、ガス装置、トーチより構成され、シールドガスは熔融状態の溶接金属を大気中の窒素や酸素から保護する目的で用いられる。この炭酸ガスは多原子分子であり、高温のプラズマ中での解離・吸熱反応 ($\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$, $\text{CO} \rightarrow \text{C} + 1/2\text{O}_2$) によってアークを緊縮させる^{1,2,12)}。単原子分子の Ar や He をシールドガスの主成分とするミグ溶接やマグ溶接と比較して、炭酸ガスアーク溶接におけるアーク形態は円柱状となる。

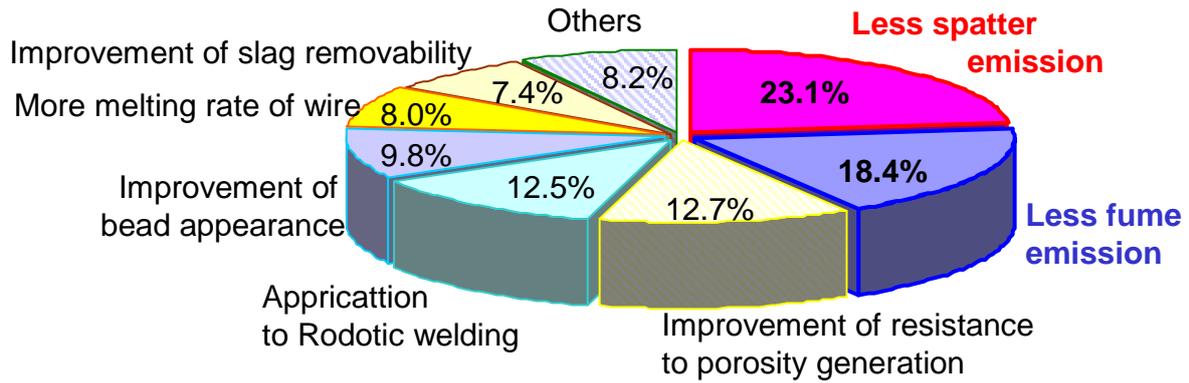


Fig.1.2 Market needs for welding consumables.

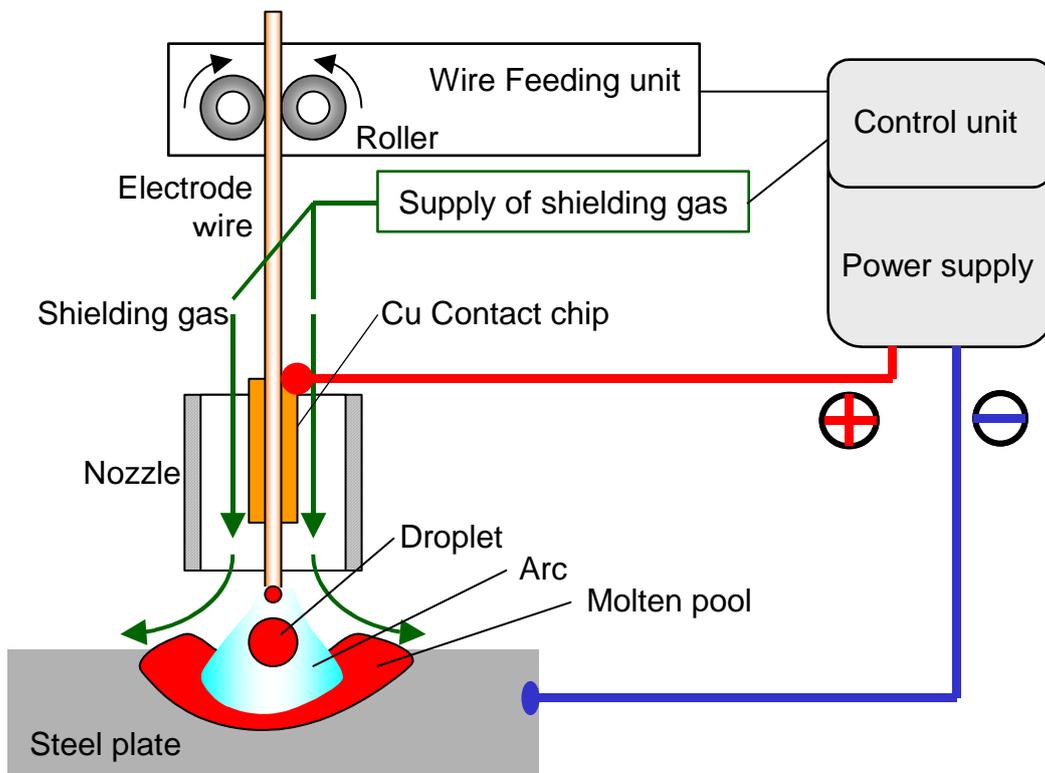


Fig.1.3 Schematic explanation of CO₂ gas shielded arc welding process.

田中らは溶接アークの熱的ピンチ効果についてのシミュレーションによる仮想実験を通して、炭酸ガスなど比熱の高いガスが著しくアークを緊縮させることを報告している¹²⁾。炭酸ガスアークの高速ビデオを用いた観察においてワイヤ先端に懸垂した溶滴にはあたかも上向きの力が強く作用しているようにも見える。さらに、溶滴下部のアーク点は激しく変位するため粗大化した溶滴は不規則に揺動する。この炭酸ガスを使用するかぎりは避けられない現象がスパッタ発生根本的原因であり、多くの研究にもかかわらず低スパッタ化は本質的に難しいとされてきた。

1.3. 本研究に関する従来の研究

炭酸ガスアーク溶接法はアーク現象の観察と解明によって発展し、スパッタの発生形態の観察と分類、溶接電源とその制御方法の改良、電極ワイヤ組成の改良が試みられてきた。

1.3.1. 溶滴の移行形態

Table 1.1 に IIW における溶滴移行形態の分類を示す¹³⁾。中電流域(溶接電流 250～350A)の炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行形態は 1.1 グロビュール移行に分類され、1.2 スプレー移行と比較して極めて不安定であり、その特徴はワイヤ径よりも粗大に成長した溶滴の不規則な揺動にある。この揺動によってワイヤに懸垂する溶滴はワイヤの中心軸から外れる。その結果、時としてアークの発生点と方向はワイヤ中心軸の延長線から大きく外れ、溶滴の溶融プールへの安定移行が妨げられる。

1.3.2. 溶滴に作用する力とバランス

炭酸ガスアーク溶接における溶滴移行現象は複雑である。平田らはアーク現象のモデリングについて検討し、アーク現象の解明にはアーク放電、アークプラズマの物性、電極近傍の現象、および高温での電極材料の物性と挙動を明らかにする必要があると報告している¹⁴⁻¹⁵⁾。Fig. 1.4 にワイヤ先端に懸垂する溶滴に作用する力を示す。溶融金属は表面張力によって液滴となりワイヤ先端に懸垂する。これに各種の力が作用して溶融プールに落ちれば溶接金属、うまく溶融プールに落ちなければスパッタとなる。この溶滴に働く力として重力があり、下向きの溶接であれば表面張力は溶滴を保持する力として、重力は溶滴を離脱させる力として働く。さらに、溶接アークではアーク電流によって発生する電磁力が溶滴およびプラズマに強い影響を与える^{1,16)}。電磁力によって生じるアーク圧力は電流の 2 乗に比例し、その直径の 2 乗に反比例する。溶接電流 300A、アーク半径 2mm における中心部の圧力は 716Pa と試算され¹⁾、ベルヌーイの式からプラズマ温度 10,000K、密度 0.05kg/m³ におけるプラズマ気流の速度は 170m/s と試算されている¹⁾。また、田中らはエネルギーバランスから導き出したモデルを用いて炭酸ガスアークプラズマの最大流速はアルゴンアークプラズマの 3.5 倍に達すると試算している¹²⁾。電磁力はアークの中心に向かって作用し、電流経路が最も狭い部分で最大となる。粗大な溶滴を形成しその下部にアークが集中する炭酸ガスアーク溶接では電磁力の強弱によって時として溶滴の移行を妨げる上向きの力が作用する。

Table 1.1 Classification of droplet transfer modes by IIW.

Droplet transfer modes	Typical welding process
1. Free flight transfer	
1.1. Globular transfer	
1.1.1. Drop transfer	Low-current GMA
1.1.2. Repelled transfer	CO ₂ -shielded GMA
1.2. Spray transfer	
1.2.1. Projected Transfer	Intermediate-current GMA
1.2.2. Streaming transfer	Medium-current GMA
1.2.3. Rotating transfer	High-current GMA
1.3. Explosive transfer	SMA(Covered electrode)
2. Bridging transfer	
2.1. Short-circuiting transfer	Short-arc
2.2. Continuous bridging transfer	Welding with filler wire addition
3. Slag-protected transfer	
3.1. Flux-wall guided transfer	Submerged arc
3.2. Other modes	SMA, Cored wire, Electro slag

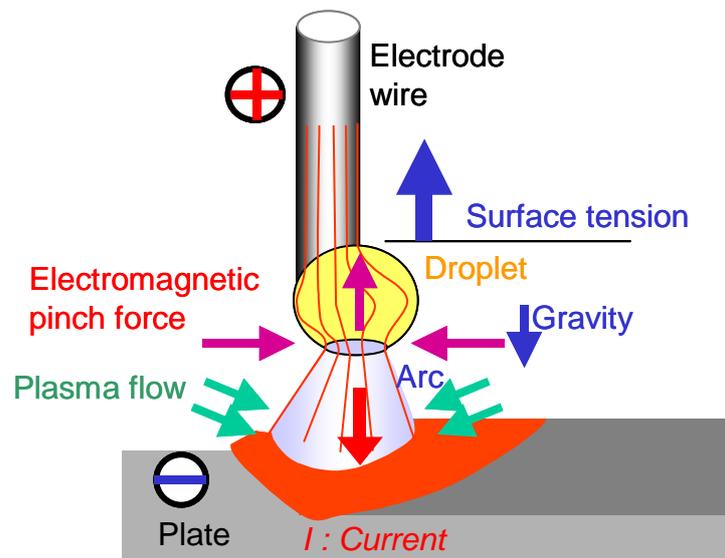


Fig.1.4 Forces of acting on droplet.

1.3.3. スパッタの発生機構

スパッタの発生形態は数多くの観察結果と分類が報告されている。安藤ら^{11,17~20)}による報告を Fig. 1.5 に示す。図中の(f, g, h)に見られるスパッタの発生形態はアーク再生時のヒューズ作用によって発生する現象、(c, d, e)の形態はアーク力そのものによって溶滴が飛散する現象、(a, b)は溶滴・溶融プールからの気泡とともに発生する現象としている。山田らは分類毎にスパッタの発生頻度を観測し、炭酸ガスアーク溶接では短絡後の再アーク時に発生するスパッタが最も多く、アーク力そのものによって溶滴が飛散する現象では中粒および大粒のスパッタが発生すると報告している²¹⁾。荒井らはこれに加えて溶滴移行における急激な電流と電圧の変動にともなうスパッタの発生を報告している²²⁾。また、ワイヤ先端に懸垂する溶滴が粗大なものほど大粒のスパッタが発生すると報告している。木村らは炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの粒度分布と形状を観察し、14メッシュ以上(直径1.2mm以上)のスパッタは除去が困難であること、その発生が溶滴粗大域に多く観察されることを報告している²³⁾。田中らは炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの飛散挙動を観察し、初期の飛散角が水平から70°の範囲にあること、および速度が10m/s以下であることを報告している²⁴⁾。三田らは低電流域での炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生量を調査し、低電圧領域では粒径0.25mm以下のスパッタが高電圧領域では粒径1mm以上のスパッタが増すこと、更に、スパッタの抑制には溶接速度を低速とすることが有利であると報告している²⁵⁾。安らは高電流域での炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生量を調査し、粒径1.0mm以下のスパッタが全体の80%以上を占め、アーク電圧の上昇とともに粒径1mm以上のスパッタの発生が増すことを報告している²⁶⁾。

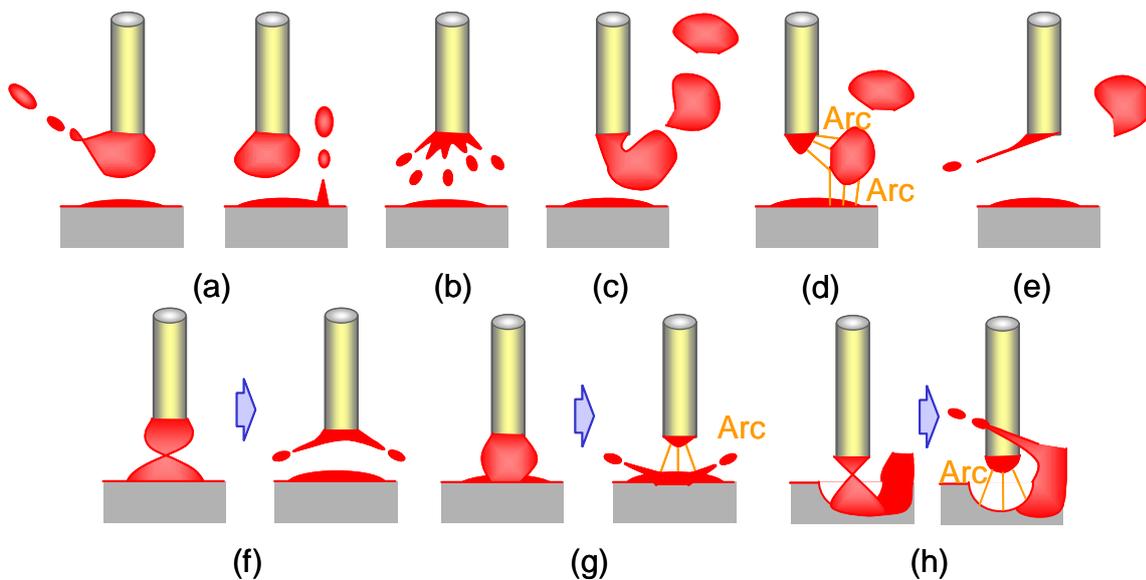


Fig.1.5 Typical spatterings in CO₂ gas shielded arc welding.

1.3.5. 溶接電流および機器の制御

炭酸ガスアーク溶接法では主として定電圧特性の電源が用いられる。電極ワイヤである直径 1.2mm 前後の細径ワイヤを一定速度で送給し、電源の自己制御作用を利用してアーク長(電圧)を安定化させる。この自己制御作用はアーク長の変化に応じて電流を増減させてアーク長を復元しようとするものである。すなわち、アーク長が短くなると、電圧が下がるので、定電圧の電源特性により電流が増加し、ワイヤの溶融速度が増加する結果、アーク長が復元する。一方、アーク長が長くなると、電圧が上がるので、電流が低下し、ワイヤの溶融速度が減少することでアーク長が復元する。また、従来のサイリスタ制御電源に対して 100 倍以上の高速制御を可能にしたインバータ制御電源²⁷⁻²⁹⁾と高速演算技術の進歩により開発されたデジタル化技術³⁰⁻³¹⁾はより細やかな電流制御を可能にした。

スパッタの低減は第1の要因である短絡—アーク再生時のスパッタ抑制が重要である。アークの自己制御作用では短絡により急激に減少したアーク長(=電圧)を復元するために電流が急増し、再アークにより溶滴と溶融プールを激しく飛散させる。これに対して、波形制御技術は短絡初期において電流を低下させ、アーク再生前にこれを予知して電流を抑制することでよりスムーズな短絡移行とアーク再生を達成している³²⁻⁴⁰⁾。また、井手らはワイヤ送給速度制御により混合ガスシールドアーク溶接におけるスパッタレスの可能性を報告している⁴¹⁾。これらの低電流域でのスパッタ低減に対して、中電流域でのスパッタ低減を目的として電流の矩形パルス化による溶滴移行の制御が試みられている。電流の矩形パルス化は混合ガスシールドアーク溶接において1パルス1溶滴移行を達成し大きなスパッタ低減効果を得ている⁴²⁻⁴⁷⁾。一方、炭酸ガスアーク溶接において松田、牛尾らは1パルス1溶滴移行を目的としてスパッタ発生形態の分類、パルスパラメータの最適化、ワイヤ組成の影響について調査し、スパッタ発生量を通常の1/6に低減したと報告している⁴⁸⁻⁵¹⁾。また、王らは2パルス1溶滴移行を指向し、スパッタ発生量を通常の1/2に低減したと報告している⁵²⁻⁵³⁾。しかし、ここで用いられたパルス周波数は120Hzまででありその検討範囲は狭い。

溶接電源の性能向上により開発された電流の波形制御技術は、低電流域の短絡移行における短絡とアーク再生をスムーズにしスパッタの低減を達成した。一方、中高電流域における自由溶滴移行の安定化とスパッタ低減に対しては、電流のパルス化による溶滴移行制御の有効性が示されているものの広く実用化されるまでには至っていない。

1.3.4. 電極ワイヤ組成

炭酸ガスアーク溶接に用いられる電極ワイヤの組成は溶接金属としての機械的特性、溶接性、ビード成型性、加工性および脱酸反応を考慮して設計される。脱酸元素であり溶接金属の強化元素でもあるC、Si、Mn、Al、Tiに加えてP、S、Cr、Ni、Mo、Nb、V、B、等が適宜加えられている³⁾。電極ワイヤの組成設計に重要な脱酸反応による酸化ロスを勘案した移行率は、実験的にC:50~235%、Si:30~60%、Mn:40~70%、Ti:20~40%、Cr&Ni:90~100%であるとされている³⁾。

溶接アーク現象に及ぼす電極ワイヤ組成の影響に関し、これまでに多くの研究成果が報告されている^{21,22,54~58)}。山内らは、スパッタ発生に及ぼす電極ワイヤ中の微量元素の影響について検討し、スパッタの低減には0.08%のTiが必要であり、REM(rare earth metal)の添加は避けるべきであると報告している⁵⁴⁾。荒井らはC, Si, Mn, P, Sに加えてTi, Al, REM, Seの影響を調査し、REMとAlを除いてスパッタの発生量は短絡回数とともに増加し、ワイヤ中のMn, Si, Tiの増加およびC, Al, REMの低減とともに減少する傾向を報告している²²⁾。松山らは、REMが陰極側である鋼板に含まれることによってスパッタの発生量が増すと報告している⁵⁹⁾。また、阿草らは電極ワイヤへのREM添加はMIG溶接における陰極点の安定化に大きな効果があると報告している⁶⁰⁾。REMはアーク現象に大きな悪影響を与えるが炭酸ガスアーク溶接におけるその機構についての検討は報告されていない。また、A. LesnewichらはMIG溶接・MAG溶接においてアークの安定化、溶滴移行のスプレー化に対してアルカリ金属(Li, Na, K)が有効であると報告している⁶¹⁾が、アルカリ金属は熱的に不安定であり鋼中に添加することは困難である。これに対して、電極ワイヤ製造におけるめっき工程や伸線工程を利用してK, Naを付与する技術が考案されている⁶²⁾。しかし、炭酸ガスアーク溶接におけるアーク現象および溶滴移行への影響についての報告はない。

炭酸ガスアーク溶接によって得られる溶接金属は、ガスメタル反応によって多量の酸素を含み、その量は600ppmに達する³⁾。吉川らは熔融金属の表面張力への酸素の影響について検討し、溶鋼中の酸素量(O)が0から600ppmへ増加することによって溶鋼の表面張力は40%低下すると報告している⁶³⁾。一方、Ti, Niを除き合金元素の添加は溶鋼の表面張力を低下させる⁶⁴⁾。更に、Ti, C, Si, Mn, Al等の脱酸素元素は、ガスメタル反応によって増加した固溶酸素量を低減させることが可能であり、炭酸ガスアーク溶接における溶接金属の表面張力低下を抑制すると考えられる。酸素の固溶および脱酸素は溶鋼とシールドガスである炭酸ガスとの反応であり、溶鋼の表面反応であることから溶鋼中の酸素量以上の変化が溶鋼表面で生じている可能性がある。Tiは、脱酸素元素の中でも高い反応性を有することから溶鋼の表面張力、および溶滴の移行現象とその安定性に大きな影響を与える重要な元素であると考えられる。

炭酸ガスアーク溶接においては溶接ワイヤ中のC量低減とTi量増加等によりスパッタを低減できることが示されている²²⁾が、そのスパッタの低減効果は標準とされる電極ワイヤの20%減に留まっており、これら電極ワイヤに関する検討によって十分なスパッタ低減効果が得られたとはいえない。

1.4. 本論文の構成

本研究では、建築鉄骨、産業機械、造船分野などの重構造物の製造に欠かせない炭酸ガスアーク溶接法に関して、アークの安定化とスパッタの低減を取り上げ、スパッタの発生形態の観察、電極ワイヤ組成と極性の溶滴移行とその安定性への影響を調査するとともに、スパッタ低減のメカニズム解明を目的として電極での発熱と溶滴移行形態へのREM添加の及ぼす影響を調査する。更に、極低スパッタ化を達成したREM添加ワイヤを用い極性を棒マイナス(DCEN)とする新しい溶接法の実用化を目的として、高能率溶接技術としての優位性について検証する。

Fig. 1.6 に本論文の構成と流れを示す。

第1章は緒論であり、本研究を行うに至った背景として、炭酸ガスアーク溶接法の重要性とこれまでのスパッタ低減に関する研究結果をまとめるとともに本研究の重要性と目的を明確にしている。

第2章では、極性を棒プラス(DCEP)とし、炭酸ガスアーク溶接における溶接ワイヤ中の微量元素(Ti, REM(rare earth metal), Ca および K 添加)の影響について検討している。まず、スパッタ発生の主要因である短絡とアーク再生に着目し、電極ワイヤと鋼板のTi量を変化させてTi添加のスパッタ低減効果とアーク形態への影響を観察した。これによってTi添加による短絡の減少とそのメカニズムを明確にしている。次に、アーク形態に大きな影響を与えるREM, Ca, Kを電極ワイヤに付与し、スパッタ発生量の測定に加えてアーク現象を調査することで、混合ガスシールドアーク溶接におけるスプレー化臨界電流との関係を明確にしている。

第3章では、混合ガスシールドアーク溶接法において既に実用化され高い評価を得ているパルス溶接法に着目し、炭酸ガスアーク溶接法における溶滴移行への電流パルスの影響を実験的に調査している。炭酸ガスアーク溶接法において、溶滴移行に及ぼす電流パルスの検討は、これまでパルスと溶滴移行の同期を目的とした1パルス1溶滴移行あるいは2パルス1溶滴移行の現象を観察することにとどまっていたが、本研究では、電流パルス周波数を750Hzまで変化させて検討し、溶滴移行間隔、溶滴サイズ、およびスパッタの発生量への電流パルス周波数の影響を調査し、スパッタ発生量の低減に有効なパルス周波数を明確にしている。さらに、溶滴移行への液滴振動の影響を解明するために静止懸垂溶滴形状で近似したモデルを提案し、これを用いて溶滴の共振現象を解析している。

第4章では、第1章に述べたアーク現象に大きな影響を与えるるとされるREMに着目し、従来の極性棒プラス(DCEP)とともに、一般に不安定とされる極性棒マイナス(DCEN)についても、アークの安定性と溶滴移行形態を観察しながら、スパッタの発生量を測定している。とりわけ、極性棒マイナス(DCEN)におけるREM添加ワイヤのアーク安定化効果とスパッタ低減効果を明確にしている。

第5章では、REM 添加ワイヤを使用したときに得られる安定なアークとスパッタ低減のメカニズムを解明にすることを目的として、電極ワイヤの REM 量がワイヤ溶融速度、陰極点、溶滴挙動とその大きさに与える影響を調査している。そして、熱伝導論から導出されたワイヤの溶融速度式と熱電子放出理論に基づいて、溶滴の保有熱量、温度、陰極と陽極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧を求め、電極ワイヤへの REM 添加が陰極の発熱と電子電流率に対する影響を考察している。さらに、アーク観察により、溶滴の移行形態とスパッタ低減現象を検討している。

第6章は、電極ワイヤに適量の REM を添加し、極性を棒マイナス(DCEN)とすることで極低スパッタ化を可能にした炭酸ガスアーク溶接法の実用化を目的として、電流波形制御の適用による薄鋼板の溶接性向上、および開発した溶接法の特徴である深溶込みを活用した狭開先高能率溶接技術の開発と鉄骨建築への適用性評価を目的として、超狭開先である I 形開先 - ギャップ長 5mm、およびレ形開先 25° - ギャップ長 2mm の溶接施工性とその能率向上を明確にするとともに狭開先溶接を適用した柱-梁継手の載荷試験を実施してその変形能力を明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究によって得られた主な結果を総括して結論としている。

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ低減に関する研究

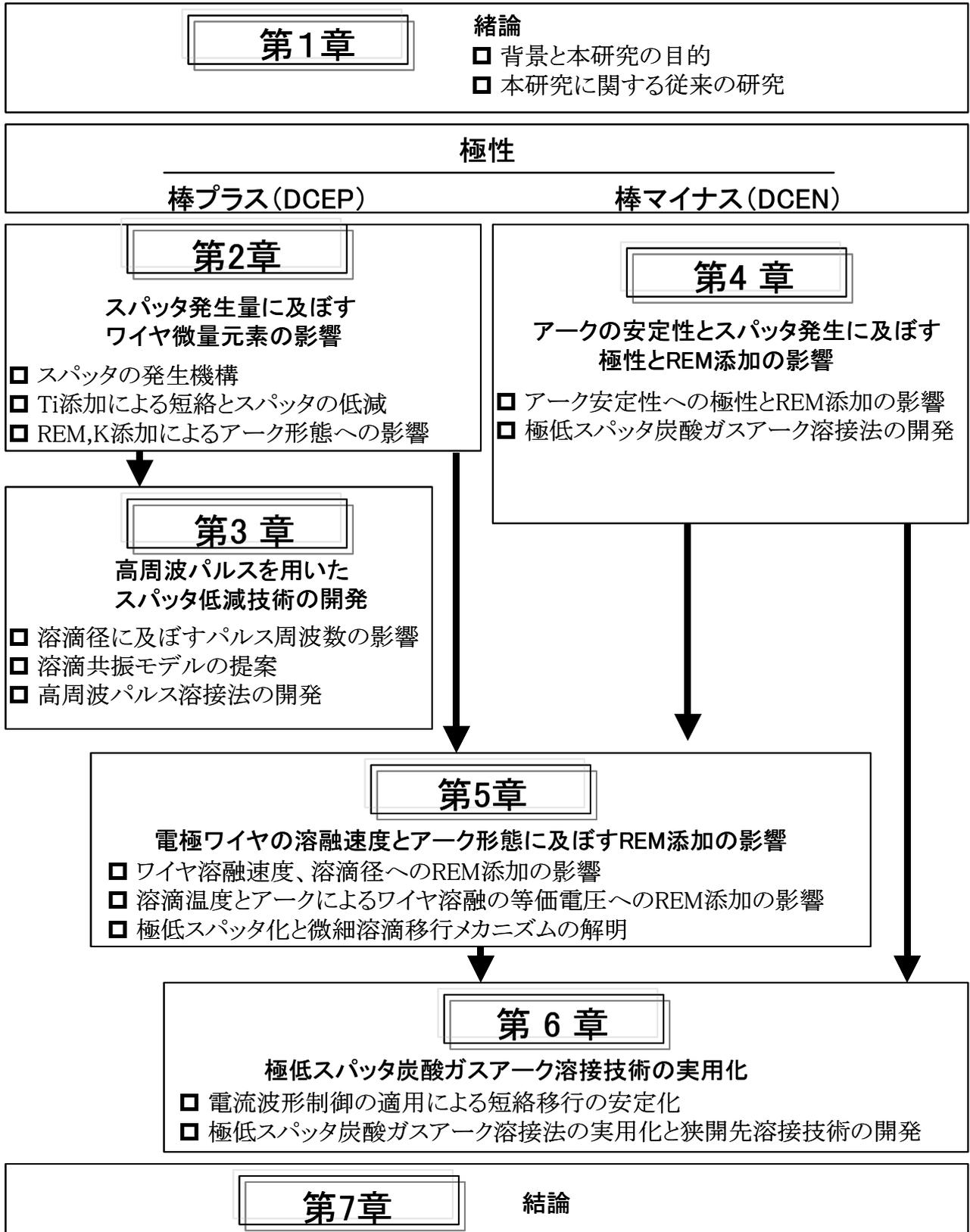


Fig.1.6 Flow chart for this research

第2章 極性棒プラスにおけるスパッタ発生量に及ぼす ワイヤ微量元素の影響

2.1. 緒言

炭酸ガスアーク溶接法は極性棒プラス(DCEP)での使用が安定とされ⁷⁾、そのアーク現象に及ぼすワイヤ組成の影響について多くの研究成果が報告されている^{21, 22, 54, 55)}。IIWにおいて炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行形態はグロービュール移行に分類され¹³⁾、スパッタの発生形態として短絡後の再アークが最も多く²¹⁾、ガス放出、アーク電圧の急激な変動、およびアーク力による溶滴の飛散が報告されている¹⁸⁻²⁰⁾。電極ワイヤ組成からのスパッタ発生量低減に関する研究成果としてC量低減とTi量増加により短絡現象の抑制とスパッタ低減効果が報告されている^{21, 22, 54, 55)}が、そのスパッタの低減効果は標準とされる電極ワイヤの20%減に留まっている²²⁾。装置面からの検討として溶接電流の波形制御による低スパッタ化が検討され、薄鋼板の溶接を対象とする低電流域のスパッタ低減に大きな成果が得られている^{32-38, 65)}。さらに、電極ワイヤ組成によって得られる効果が異なると報告されており⁶⁶⁾、炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ低減には電極ワイヤ組成の検討が不可欠であると考えられる。

本章では、極性を棒プラス(DCEP)とし、スパッタの低減が未だ達成されていない厚鋼板の溶接に用いられる高電流域(250~350A)の低スパッタ化を目的に、溶接ワイヤ中のTi, REM(rare earth metal)、Ca および K 添加によるアーク形態およびスパッタ発生量の変化について検討した。

2.2. 実験方法

2.2.1. 供試材料

Table 2.1 に供試電極ワイヤの化学組成を示す。供試電極ワイヤは、JIS Z 3312 において YGW11, 12 および 15 に規定される市販溶接ワイヤ、および市販の YGW11 溶接ワイヤの化学組成をベースに Ti, REM, Ca および K をそれぞれ微量添加した直径 1.2mm のワイヤを用いた。REM は Ce, La, Y からなる混合物でその比率 6:3:1 を使い、溶鋼中に添加することで鋼中に S, Ti からなる金属間化合物として分散させた。Table 2.2 に供試鋼板の化学組成を示す。鋼板の Ti 量が短絡およびスパッタの発生に与える影響を調査するためにバタリングによって鋼表層の Ti 量を 0.01%以下、0.07%および 0.14%に変化させた鋼板 B1, B3, B4 を用いた。バタリングは、シールドガスとして Ar-5%CO₂ を使い、溶接電流 300A、アーク電圧 30V、溶接速度 40cm/min で 2 層溶接した。供試鋼板におけるバタリング厚さはおよそ 8mm、表面性状の影響を除くために、切削加工によりバタリング表面の凹凸とスケールを除去して溶接実験に供した。鋼板 B1, B3, B4 の Si, Mn 量の SM490 に対する増加はバタリングに用いたワイヤの Si, Mn 量がいずれも SM490 に対して多かったためであり、Cu 量の増加はワイヤの表面に施された銅めっきが溶接金属として希釈した

ためと考えられる。また、0量の増加はシールドガスに用いた Ar-5%CO₂ から活性な酸素を固溶、析出したためと考えられる。

Table 2.1 Chemical composition of electrode wires used (mass%).

Wire	JIS Z 3312	C	Si	Mn	P	S	Ti	K	Ca	REM
W1	YGW12	0.061	0.91	1.39	0.01	0.023	<0.01	—	—	—
W2	YGW15	0.080	0.56	1.29	0.01	0.003	0.08	—	—	—
W3	YGW11	0.048	0.70	1.65	0.01	0.010	0.20	—	—	—
W4	YGW14	0.046	0.70	1.62	0.01	0.007	0.40	—	—	—
W5	YGW11	0.044	0.76	1.67	0.01	0.006	0.22	0.001	—	—
W6	YGW11	0.045	0.70	1.62	0.01	0.008	0.21	—	0.004	—
W7	YGW11	0.048	0.69	1.61	0.01	0.007	0.21	—	—	0.03

Table 2.2 Chemical composition of steel plate and buttering layers used (mass%).

Steel plate	Buttering wire	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti	O	N
SM490	—	0.16	0.21	0.79	0.01	0.004	0.01	<0.01	0.0006	0.0036
B1	W1	0.11	0.60	1.07	0.01	0.016	0.17	<0.01	0.0172	0.0076
B3	W3	0.09	0.45	1.18	0.01	0.006	0.15	0.07	0.0140	0.0048
B4	W4	0.10	0.47	1.22	0.01	0.006	0.16	0.14	0.0064	0.0037

2.2.2. 溶接条件

Table 2.3 に標準の溶接条件を示す。溶接実験は定電圧特性のサイリスタ電源を用い、溶接電流は自由溶滴移行となる 300A、アーク電圧は一般的に使用されるアーク電圧 31～35V において最も平滑かつ均一な溶接ビードが得られる適正電圧 33V を標準条件とし、溶接速度は中厚鋼板の溶接において一般的な 40cm/min を、シールドガスは 100%CO₂ ガスを用いた。

Table 2.3 Standard welding condition.

Shielding gas	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Wire extension (mm)
CO ₂	Electrode Positive	300	33	40	20

2.2.3. 評価方法

スパッタ発生量は、表面を研削した鋼板を銅製の捕集箱内でビードオンプレート溶接し、箱内に飛散したスパッタを全量回収して評価した。溶接中にアーク電圧が平均電圧の1/2以下に低下した状態を短絡と評価し、アーク時間に対する短絡時間の比率を短絡時間比率とした。また、溶接ワイヤのアーク特性の評価指標として、マグ溶接（シールドガス Ar-20%CO₂, アーク電圧 30V）におけるスプレー化臨界電流値を測定した。Fig. 2.1 に高速度ビデオを用いたアーク現象の観察方法を示す。溶接の進行方向に対して側方および斜め上方から溶滴の移行形態および鋼板に形成した溶融プールの挙動を観察した。高速度ビデオの撮影速度は 1,000 frame/s、シャッター速度は 1/12,000s とし、レンズは F4-200mm、フィルタは ND400 を用いた。

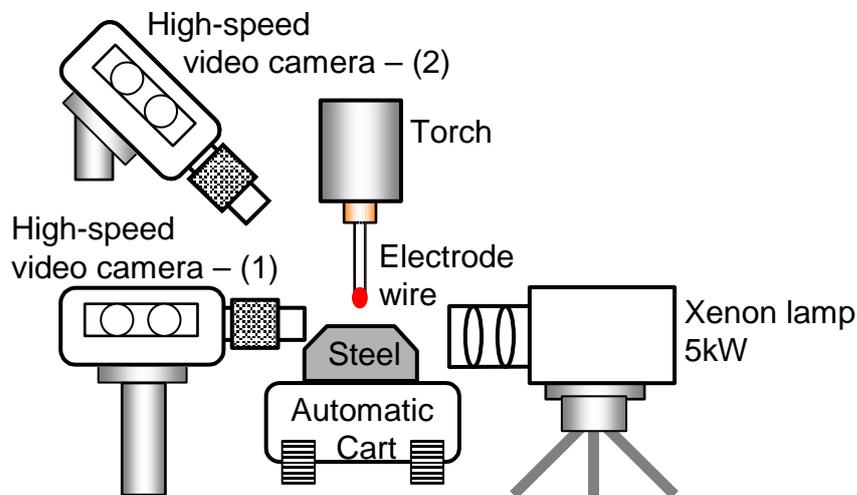


Fig. 2.1 Experimental apparatus for observation of arc phenomena.

2.3. 実験結果および考察

2.3.1. 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生機構

炭酸ガスアーク溶接では、炭酸ガスの解離吸熱反応によって緊縮したアークが溶滴下部に集中することでアーク形態は円柱状となる。そのため単原子分子の Ar をシールドガスの主成分とするマグ溶接と比較して炭酸ガスアーク溶接のワイヤ先端に懸垂する溶滴は粗大であり、溶滴下部のアーク点は激しく変位するために溶滴は不規則に揺動する。この炭酸ガスアーク溶接特有の現象により、溶接電流 250~350A でのスパッタ発生過程は主に Fig. 2.2 に示した 2 つのタイプに分けることができる。Fig. 2.2 の観察における溶接電流は 300A、電極ワイヤは高電流炭酸ガスアーク溶接用として一般的な W3 を用いた。a) は短絡後の再アーク時に溶滴および溶融プール中の溶接金属が飛散するタイプで

あり、短絡が発生し易い比較的低いアーク電圧で多く観察される。b)は溶滴がアーク力によって上方に飛ばされるタイプであり、溶滴揺動の激しい比較的高いアーク電圧で生じ易い。以上のことから、スパッタ発生現象は溶接中の短絡およびアーク形態が大きく影響していると考えられる。

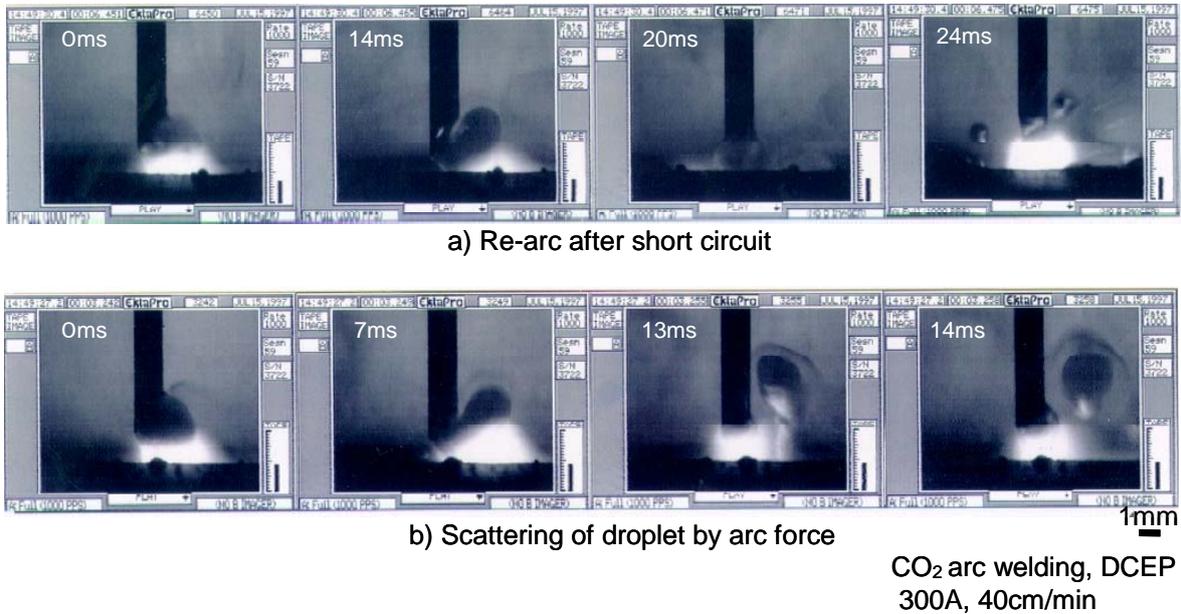


Fig.2.2 Spattering processes in CO₂ arc welding.

2.3.2. スパッタ発生量に及ぼすTi量の影響

Fig. 2.3 にワイヤ中のTi量を変化させたときのアーク電圧とスパッタ発生量の関係を示す。溶接電流300Aにおいて良好なビード形状が得られるアーク電圧範囲は31~35Vであり、この適正なアーク電圧範囲全域においてTi量0.2mass%の溶接ワイヤを用いた場合のスパッタ発生量は、Ti量0.01mass%以下および0.08mass%と比較して大きく減少した。また、適正アーク電圧範囲では、アーク電圧の上昇とともに、短絡時間比率およびスパッタ発生量は減少する傾向を示した。

2.3.3. スパッタ発生量に及ぼすREM, Ca, K添加の影響

Fig. 2.4 にREM, CaおよびKを各々微量添加したときの溶接電流300Aにおけるアーク電圧とスパッタ発生量の関係を示す。図中に点線で示したのは、Ti量0.2mass%のベースワイヤW3を用いた場合のスパッタ発生量である。このベースワイヤに対してREM, Caを添加した電極ワイヤのスパッタ発生量はアーク電圧31Vから37Vの間で大きく増大した。このREM, Caの微量添加によるスパッタ発生量の変化は、短絡が減少するアーク電圧の高い領域で生じており、アーク形態(広がり)が影響していると考えられる。一方、Kを添加した電極ワイヤでのスパッタ発生量は短絡の多いアーク電圧29Vから33Vの間で大きく減少しており、短絡が影響していると考えられる。

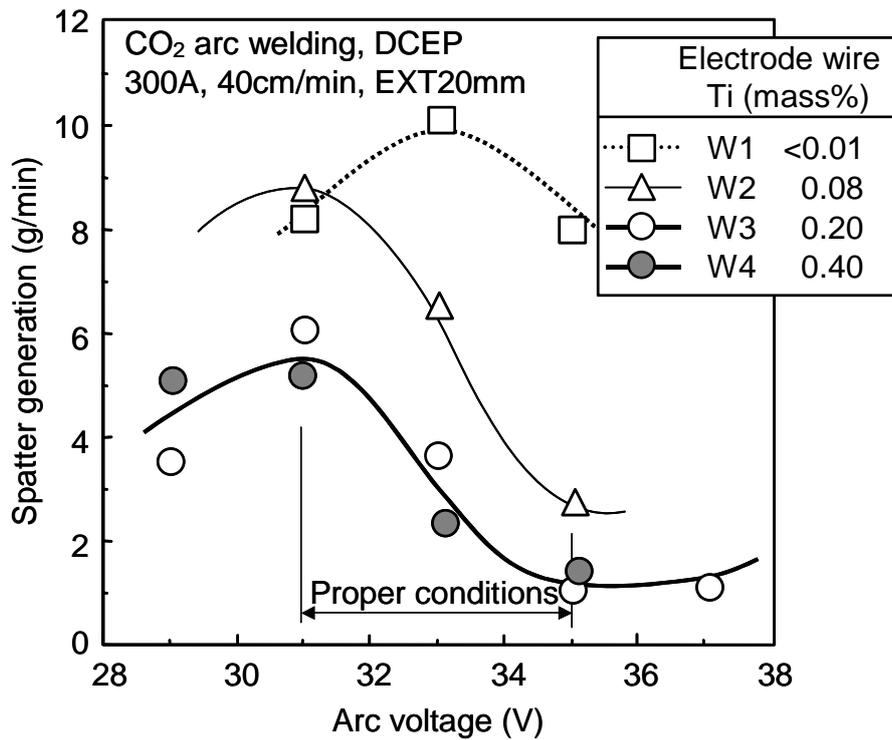


Fig.2.3 Effect of Ti content in electrode wire on spatter generation.

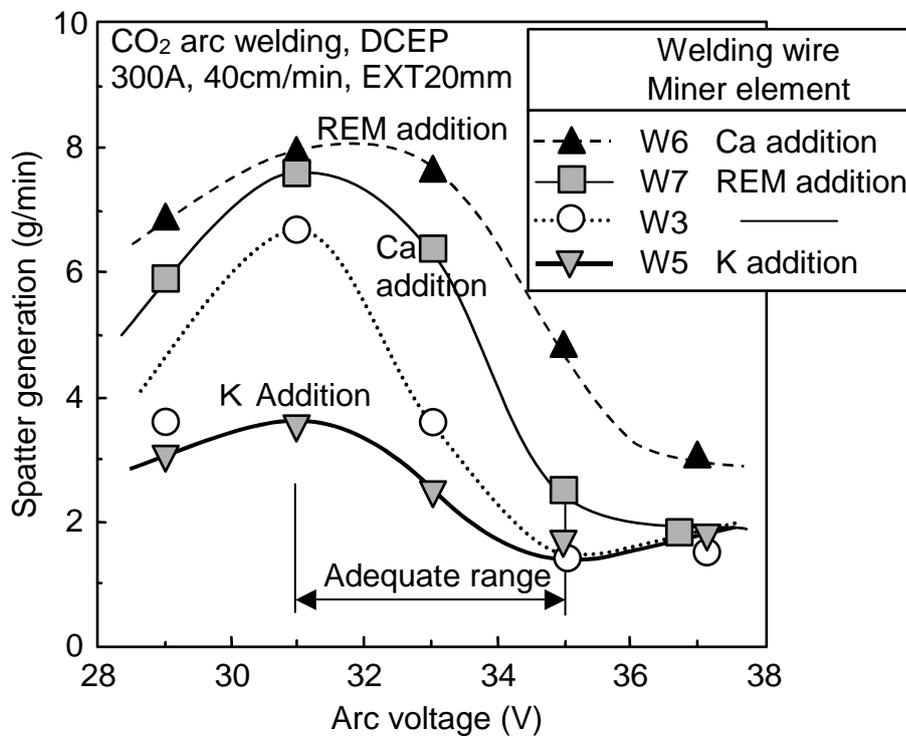


Fig.2.4 Effect of minor elements of electrode wire on spatter generation.

2.3.4. スパッタ発生量に及ぼす短絡時間比率の影響

スパッタ発生量の主要因である溶滴と溶融プールの短絡がスパッタの発生量に及ぼす影響について検討した。Fig. 2.5 に標準溶接条件における短絡時間比率とスパッタ発生量の関係を示す。短絡時間比率は、電極ワイヤのTi量<0.01mass%で2.6%、0.08mass%で1.6%、0.20mass%では0.8%以下に減少した。K, Ca, REMを添加した電極ワイヤW5, W6, W7を用いた溶接では、短絡時間比率は0.3%以下に激減した。CaとREM添加ワイヤを除きスパッタ発生量は、短絡時間比率とともに減少する傾向にあり、荒井らの報告²²⁾と同様の結果となった。Ti量を変化させたワイヤに限定すればスパッタの低減には短絡の抑制が有効であり、Fig. 2.2 a)のタイプのスパッタ発生が抑制されたものと考えられる。しかしながら、CaおよびREMを添加した電極ワイヤを用いた溶接では、短絡時間比率が低いにもかかわらずスパッタの発生量は減少しなかった。また、粒径0.5mm以上のスパッタ発生量は、ワイヤW3を用いた溶接では1.5g/min、飛散した全スパッタ量に占める比率は50%であったのに対して、Ca, REMを添加した電極ワイヤW6, W7を用いた溶接ではそれぞれ4.3g/minおよび5.2g/minに増加し、飛散した全スパッタ量に占める比率はそれぞれ70%および75%に増加した。このことは、スパッタ低減のためには短絡に起因するFig. 2.2 a)のタイプのスパッタ発生を抑制するだけでは十分ではないことを示唆している。

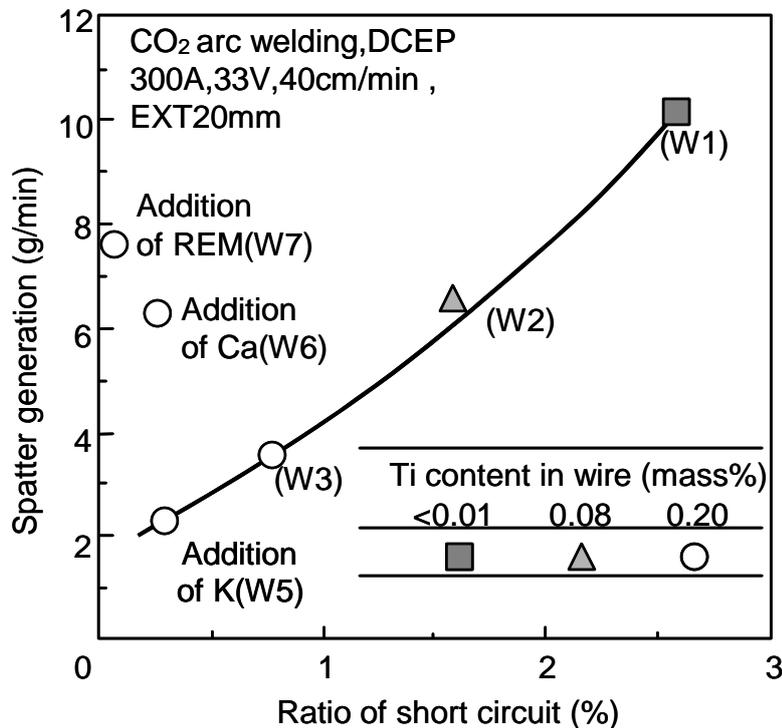


Fig.2.5 Relationship between ratio of short circuit and spatter generation.

次に、電極ワイヤの Ti 量の増加により短絡時間比率が減少する機構について検討した。短絡の発生機構を理解するには、溶滴と熔融プールの挙動を把握することが重要である。そこで、Ti 量の溶滴と熔融プールの挙動への影響を区別するため電極ワイヤおよび鋼板の Ti 量を各々変化させて短絡時間比率およびスパッタの発生量を測定した。得られた結果を Fig. 2.6 および 2.7 に示す。鋼板の Ti 量<0.01mass%においては電極ワイヤの Ti 含有量を増加させることで短絡時間比率およびスパッタ発生量は減少し、電極ワイヤの Ti 量<0.01mass%においては鋼板中の Ti 量を増加させることで短絡時間比率およびスパッタ発生量は減少した。溶接金属の Ti 量をワイヤおよび鋼板側から変化させたが、スパッタ発生量と溶接金属中の Ti 量には良い相関が認められる。このことから、溶滴中の Ti 量よりも熔融プールの Ti 量がスパッタの発生を支配していると考えられる。

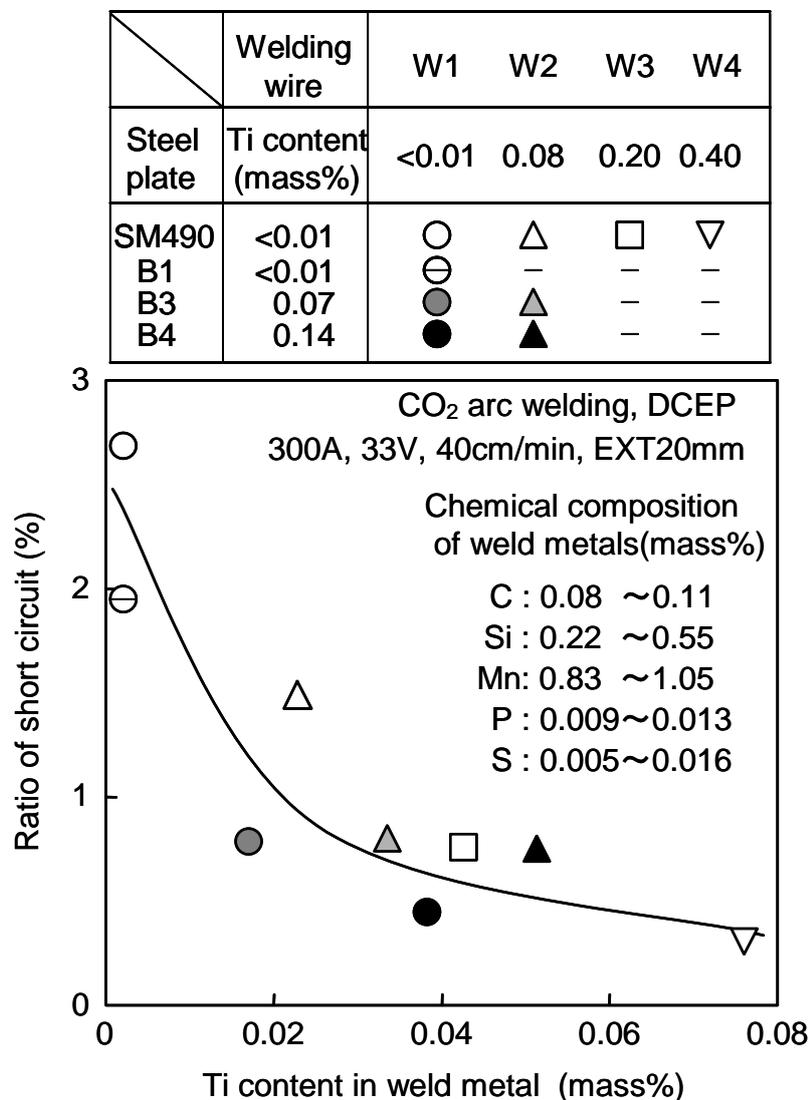


Fig.2.6 Relationship between Ti content in weld metal and ratio of short circuit .

そこで、高速ビデオを用いて溶接金属のTi量<0.01mass%および0.04mass%におけるアークの形態を比較観察した。その一例をFig. 2.8に示す。この比較より溶接金属のTi量が高い場合は、熔融池の揺動が抑制され、溶滴と熔融プールの間隔が保たれることで短絡が生じ難い状態にあることが明らかとなった。Tiは強い脱酸作用を有することから熔融プール表面の酸素濃度を低下させることで表面張力(粘性)が増し、熔融プールの揺動が抑制され短絡が生じ難くなったと推定される。

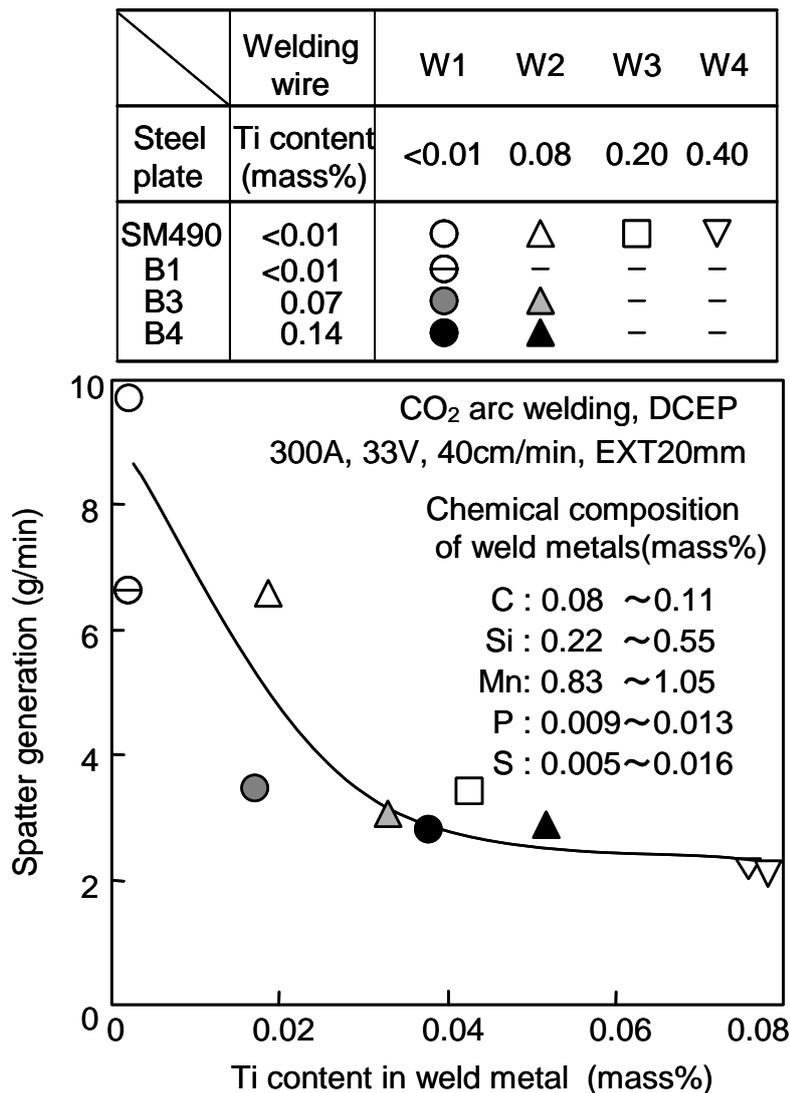


Fig.2.7 Relationship between Ti content in weld metal and spatter generation.



a) <math><0.01\text{mass\% Ti}</math> in weld metal



b) 0.04mass\% Ti in weld metal

CO_2 arc welding, DCEP
300A, 40cm/min, EXT20mm

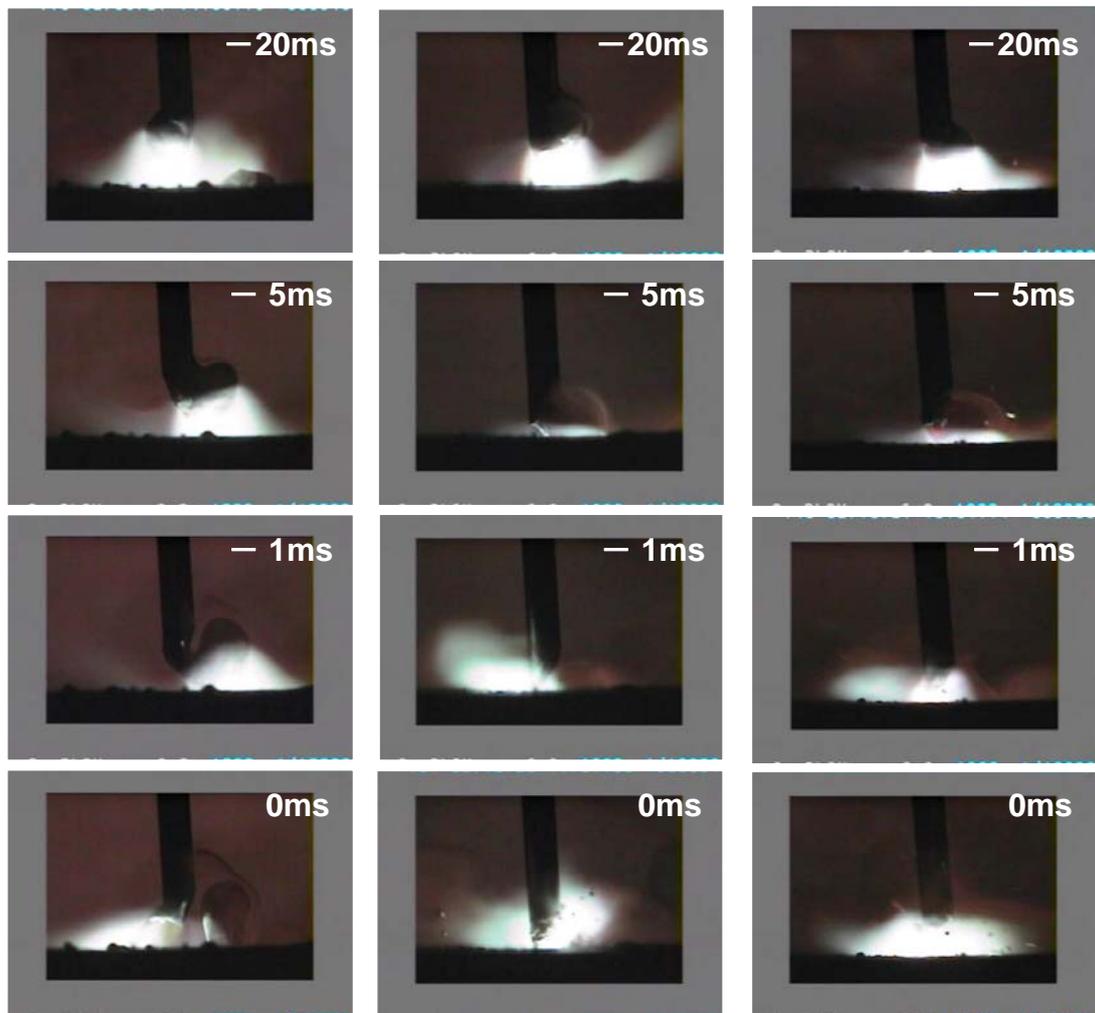
Fig.2.8 Effect of Ti content in weld metal on arc behavior.

2.3.5. スパッタ発生量に及ぼすアーク形態の影響

炭酸ガスアーク溶接において電極ワイヤへのKの添加は短絡時間比率を減少させるとともにスパッタの発生量を減少させた。これに対してREM, Caの添加は短絡時間比率を減少させたがスパッタの発生量は逆に大きく増加させる傾向を示した。Fig. 2.9 にベースの溶接ワイヤW3, Kを添加した電極ワイヤW5 およびREMを添加した電極ワイヤW7を用いた炭酸ガスアーク溶接のアーク現象を示す。Kを添加した電極ワイヤW5を用いた炭酸ガスアーク溶接のアーク形態はベースの電極ワイヤW3に対してアーク柱が広く、溶滴移行そのものが安定化する傾向を示した。これに対してREMを添加した電極ワイヤW7のアーク柱はベースの電極ワイヤW3に対して長く、溶滴の揺動とともにアークの向きを大きく変化させた。更に、溶滴そのものがアーク力によって飛散する Fig. 2.2 b)タイプのスパッタの発生が多く観察された。スパッタ発生量の低減には短絡に起因するFig. 2.2

a)のタイプのスパッタ発生の低減とアークの偏向と溶滴の揺動による Fig.2.2 b)タイプのスパッタ発生の抑制が重要であることを示唆している。

Kは沸点が1032K、電離電圧が4.3Vと低く(アルゴンの電離電圧15.7V)⁷²⁾、電極ワイヤに添加されたKは気体となりイオン化することでアークを広げる効果があると考えられる。一方、REMは鋼板に含まれることによって大粒のスパッタが増すと報告されており⁵⁹⁾、ワイヤ側のREMが鋼板側に移行することで鋼板側のアーク点(陰極点)に変化が生じアークが大きく偏向した可能性が考えられる。



a) Addition of REM (W7)

b) non-addition (W3)

c) Addition of K (W5)

CO₂ arc welding, DCEP
300A, 40cm/min, EXT20mm

Fig.2.9 Comparison of metal transfer behavior in REM addition, K addition and non-addition electrode wire.

炭酸ガスアーク溶接のアーク形態を定量的に評価することは困難であるがマグ溶接 (Ar-CO₂ 混合ガス) においては、溶滴の移行形態の変化点 (グロービュール移行からスプレー移行) によって差異を評価することが可能である。マグ溶接 (Ar-20%CO₂) において K を添加した電極ワイヤ W5 はベース電極ワイヤ W3 に対してスプレー化を 40A 低い溶接電流で可能とし、ワイヤへの REM および Ca 添加 (W6, W7) はスプレー化に対してそれぞれ 50 および 70A 高い電流を必要とした。このマグ溶接でのスプレー化臨界電流値と炭酸ガスアーク溶接のスパッタ発生量との関係を Fig. 10 に示す。マグ溶接でのスプレー化臨界電流値が低下するとともに炭酸ガスアーク溶接でのスパッタ発生量は減少しており、マグ溶接でのスプレー化臨界電流値によって炭酸ガスアーク溶接での溶滴移行の安定性を間接的に評価することが可能であると考えられる。しかし、マグ溶接のスプレー移行現象に対する電極ワイヤへの K, Ca, REM 添加の影響については今後の検討が必要である。

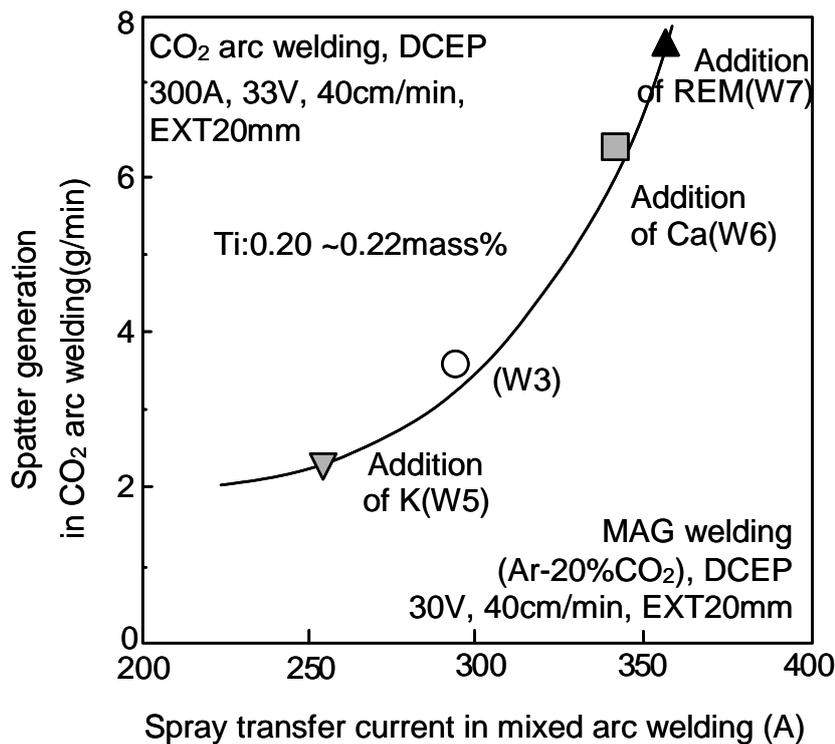


Fig.2.10 Relationship between spray transfer current in MAG welding and spatter generation in CO₂ arc welding.

3.4. 結言

炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ発生量の低減についてその発生形態と電極ワイヤ微量元素の影響について調査した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 低電圧域でのスパッタの多くは、短絡—再アーク時の溶滴および溶接金属の飛散によって生じ、高電圧域でのスパッタの多くは、アーク力による溶滴そのものの飛散によって生じる。
- (2) 溶接ワイヤへの Ti 添加は、溶融プールの揺動と短絡を抑制することでスパッタ発生量の低減が可能である。
- (3) 溶接ワイヤへの K 添加は、アークおよび溶滴移行の安定化によってスパッタ発生量の低減が可能である。
- (4) 溶接ワイヤへの REM および Ca の添加は、溶滴の揺動とアークの偏向によりスパッタ発生量の増大を引き起こす。
- (5) マグ溶接でのスプレー化臨界電流値によって炭酸ガスアーク溶接での溶滴移行の安定性を間接的に評価することが可能である。

第3章 高周波パルスを用いたスパッタ低減技術の開発

3.1. 緒言

MIG 溶接および MAG 溶接を含めたガスシールドアーク溶接法は、施工上必要とされるスパッタの低減およびアークの安定性向上を目的として数多くの研究がなされ、溶滴移行現象、スパッタ発生現象、溶接電流・電圧の過渡現象が解明されてきた。その成果として、シールドガスに Ar-20%CO₂ を用いインバータ式パルス電源と溶滴の離脱を容易とした電極ワイヤを組み合わせたマグパルス溶接法はスパッタ発生を極限にまで低減できる溶接法として高い評価を受けている⁴²⁻⁴⁷。しかし、マグパルス溶接法を含めスパッタ低減に効果的とされる溶接法は Ar-CO₂ 混合ガスを使用するマグ溶接がベースとなっており、低スパッタ化のためにはより高価な Ar ガスを使用しなければならないのが現状である。一方、炭酸ガスアーク溶接法は、Ar ガスを使用しない低コストの溶接方法として現在では鋼構造物の製作において主要な溶接法となっているが、溶接作業性の向上あるいはスパッタ発生量の低減などについて多くの検討がなされてきたもののマグ溶接と比較してスパッタの発生は依然として多いのが現状である¹⁷⁻²⁶。炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタ低減技術の開発の要望に対して、マグパルス溶接法と同様にパルス電流を適用し 1 パルス 1 溶滴移行あるいは 2 パルス 1 溶滴移行により低スパッタ化を図る検討がなされた⁴⁸⁻⁵³。炭酸ガスアーク溶接における溶滴移行間隔はマグパルス溶接法の約 10 倍と広く^{1-4, 11, 16}、この溶滴移行とパルス電流を同期させ安定化させることを目的として用いられたパルス周波数は 120Hz 以下と低く、その範囲は狭い。また、一定の効果が認められたものの溶接技術として広く実用化されるまでには至っていない。

そこで、本章では、パルス電流に着目し、パルス条件が炭酸ガスアーク溶接における溶滴粒径、溶滴移行形態およびスパッタ発生量に及ぼす影響について広く検討し、高周波パルス電流適用によるスパッタ低減技術の確立に取り組んだ。

3.2. 実験方法

3.2.1. 供試材料

Table 3.1 に供試溶接ワイヤの化学組成を示す。供試溶接ワイヤは、JIS Z 3312 において YGW11 に規定される線径 1.2mm の市販溶接ワイヤを用いた。溶接用母材は研削処理により表面スケールを除去した SM490B 鋼板を用いた。

Table 3.1 Chemical compositions of electrode wire used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Ti	K
0.044	0.76	1.67	0.01	0.006	0.22	0.0006

3.2.2. 溶接条件

本研究では、市販のマグパルス溶接用電源に高周波パルス電流波形を制御するパルスパラメータ設定ユニットを取り付けて実施し、溶滴移行およびスパッタ発生量に及ぼす電流波形パラメータの影響を調査した。Table 3.2 に実験に用いたパルス溶接機の電源特性と設定できる電流波形パラメータを示す。各波形パラメータは、ピーク電流値 (I_p) 250~600A、ベース電流値 (I_b) 10~250A、パルスピーク時間 (T_p) 0.4~40ms、立上り時間 (T_{up}) および立下り時間 (T_{dn}) 0.4~3.0ms の範囲で設定変更が可能である。溶接電流は自由溶滴移行となる 300A、アーク電圧は一般的に使用されるアーク電圧 31~35V において最も平滑かつ均一な溶接ビードが得られる最適電圧 33V を標準条件とし、溶接速度は中厚鋼板の溶接において一般的な 40cm/min を、突出し長さは電流のパルス化によるワイヤ溶融速度の増加を調整する目的で 18mm (パルスレスでは 20mm) とし、シールドガスは 100%CO₂ ガスを用い、ベース電流値 (I_b) 100A、立上り時間 (T_{up}) および立下り時間 (T_{dn}) 0.4ms とした。

Table3.2 Welding equipment and pulse parameter.

Power source	Inverter controlled	
Arc-length controlled	Constant voltage characteristic	
Pulse controlled	Constant current characteristic	
	Pulse parameter	Experimental range
	Peak current: I_p	250 ~ 600A
	Base current: I_b	10 ~ 250A
	Peak current duration: T_p	0.4 ~ 40ms
	Down-slope duration: T_{dn}	0.4 ~ 3.0ms
	Up-slope duration: T_{up}	0.4 ~ 3.0ms

3.2.3. 評価方法

幅 250mm×長さ 600mm×高さ 200mm の銅製容器内で 1 分間のビードオンプレート溶接を行い、ノズルに付着したスパッタ量および容器内に飛散したスパッタ量をすべて測定することで、溶接時に発生する 1 分間当りのスパッタ量を評価した。さらに、アナライジングレコーダーを用いてアーク電圧を測定し 10V 以下に電圧が低下した箇所を短絡移行、設定したアーク電圧より電圧が急上昇した箇所をグロービュール移行と判定することで溶滴移行間隔を測定し、これによって求められた平均移行間隔とワイヤ送給速度から移行溶滴の平均重量と溶滴径を算出した。

3.2.3. 溶滴移行の観察

溶滴移行現象は高速度ビデオ観察によって解析し、炭酸ガスアーク溶接に高周波パルス波形を適用した場合の溶滴形状、溶滴揺動および溶滴移行形態の変化を評価した。高速度ビデオの撮影速度は6,000 frame/s、シャッター速度は1/20,000s、レンズはF4-200mmとし、960nmバンドパスフィルタを用いた。

3.3. 実験結果

3.3.1. ノンパルス溶接における溶滴移行

ガスシールドアーク溶接におけるアーク現象はシールドガス組成によって大きく変化する。炭酸ガスアーク溶接におけるグロービュール移行は、Ar-20%CO₂のスプレー移行に対して不安定とされている。グロービュール移行におけるスパッタの発生は、粗大な溶滴とその揺動が大きく関係し、短絡と再アーク、アーク力そのものによる溶滴の飛散が挙げられる。これらグロービュール移行におけるスパッタ発生抑制には、溶滴の不安定な揺動の抑制が重要であると考えられる^{1-4, 11, 16)}。

Fig. 3.1 に平均溶接電流 300A、アーク電圧 33V としたノンパルスでの炭酸ガスアーク溶接における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。アーク電圧の変動から判断できる溶滴の移行間隔は 29~48ms と広くばらつきも大きい。ワイヤ溶融量(送給速度)と移行回数から算出される溶滴は平均で 59mg、真球とした場合の直径は 2.4mm でワイヤ径の 2 倍に相当する。

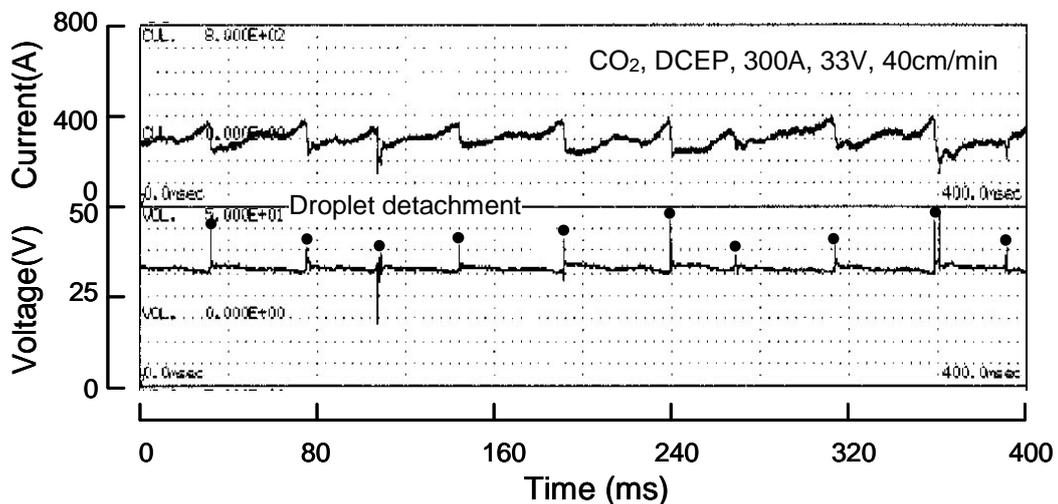


Fig.3.1 Current and voltage waveform in non-pulse welding.

3.3.2. CO₂パルスアーク溶接法における溶滴移行

炭酸ガスアーク溶接におけるパルス電流と溶滴重量および溶滴移行間隔について検討した。Fig. 3.2 にパルス周波数と平均溶滴重量の関係を示す。平均溶接電流 300A、アーク電圧 33V、ベース電流(I_b)100A、立上り時間(T_{up})および立下り時間(T_{dn})0.4ms とし、パルスピーク電流(I_p)350, 400, 450, 500, 550A においてパルスピーク時間を変化させることでパルス周波数を 20~740Hz に調整した。1 パルスあるいは 2 パルスで 1 溶滴移行が生じる周波数 40~100Hz において溶滴重量は 41~52mg に減少し、パルス周波数 40~55Hz ではパルス電流に同期した 1 パルス 1 溶滴移行が得られた。パルス周波数 100~300Hz の溶滴重量は 55~65mg に増加したが、さらに高いパルス周波数とした 400~750Hz では溶滴は再度微細化する傾向を示し、パルスピーク電流 450, 500, 550A、パルス周波数 500~750Hz における溶滴重量は 34~37mg、パルス周波数 40~100Hz の領域よりも溶滴重量は減少し、球換算した直径は 2.0mm であった。

Fig. 3.3 にパルス周波数 50Hz における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。ピーク電流(I_p)は 450A、ピーク期間(T_p)は 11ms、ベース電流(I_b)100A とした。このパルス周波数 50Hz においてパルス電流と溶滴移行が同期した 1 パルス 1 溶滴移行が観察された。マグ(Ar-20%CO₂) および MIG パルス溶接における 1 パルス 1 溶滴移行は、ピーク電流期間における溶滴の成長とくびれの形成、ベース電流期間における溶滴のワイヤ先端からの離脱と溶融プールへの移行が観察されている⁴⁸⁻⁵¹。

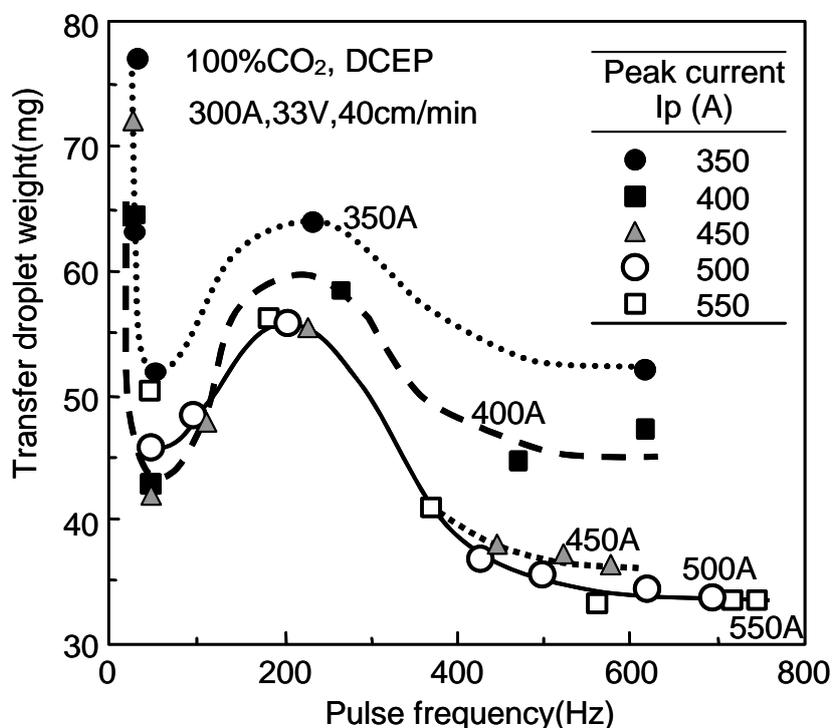


Fig.3.2 Relationship between transfer droplet weight and pulse frequency.

これに対して CO₂ パルスアーク溶接の 1 パルス 1 溶滴移行における溶滴移行は、ピーク電流期間前半の 2~6ms の間に観察された。溶滴移行後のピーク電流後半の溶滴は成長とともに強いアーク力によってワイヤ上方へ押し上げられ、アーク力が弱くなるベース電流期間の溶滴は下方へ伸びることでワイヤ間にくびれを形成し、このくびれに強い電磁ピンチ力が作用することで溶滴はワイヤ先端から離脱し溶融プールへと移行した。ベース電流期間におけるアーク長は短く短絡が生じやすい。

また、1 パルス 1 溶滴移行の乱れは粗大な溶滴をワイヤ先端に懸垂させることでさらに短絡が生じやすく、短絡後の再アークによって多くのスパッタが飛散する現象が観察された。CO₂ パルスアーク溶接法における 1 パルス 1 溶滴移行の安定化にはベース電流および期間の設定が重要と考えられる。また、パルス条件の設定（ベース電流 120A 以下）によってはベース期間にアーク切れが発生すると報告されている⁵¹⁾。

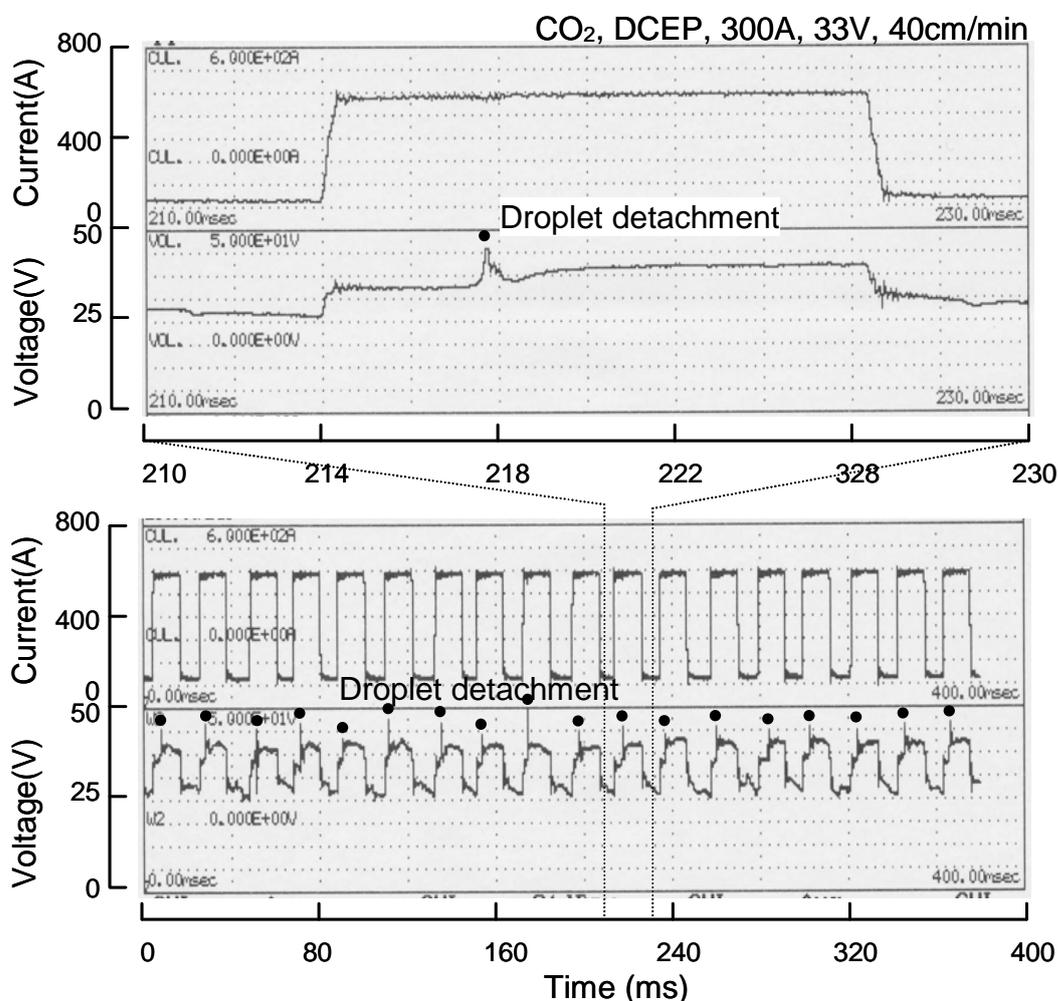


Fig.3.3 Current and voltage waveform in 50Hz pulse welding.

Fig. 3.4 にパルス周波数 220Hz における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。ピーク電流(I_p)は 450A、ピーク期間(T_p)は 2.0ms、ベース電流(I_b)100A とした。パルス周波数 220Hz における 1 秒間の溶滴移行回数は 31 回、1 溶滴移行に要するパルス数は約 7 パルス、その範囲は 4 から 12 パルスと広く、溶滴の移行周期は 18~55ms と大きくばらついた。このパルス周波数 220Hz においては、パルスを与えることで溶滴に不規則な揺動が生じ、溶滴の移行を大きく乱す現象が観察された。

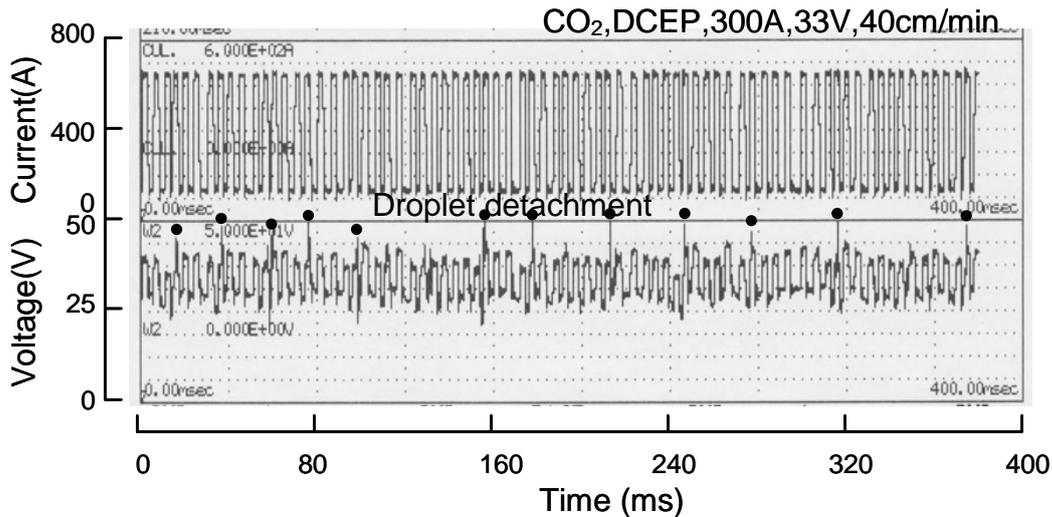


Fig.3.4 Current and voltage waveform in 220Hz pulse welding.

Fig. 3.5 に周波数 580Hz における溶接電流とアーク電圧の波形測定結果を示す。ピーク電流(I_p)は 450A、ピーク期間(T_p)は 0.6ms、ベース電流(I_b)100A とした。パルス周波数 580Hz における 1 秒間の溶滴移行回数は 58 回、1 溶滴移行に要するパルス数は約 10 パルス、溶滴の平均移行間隔はノンパルス溶接の場合の 37ms から 17ms に低減した。また、溶滴移行間隔の範囲は 14~20ms と非常に狭く規則的な溶滴移行であることが確認された。

Fig. 3.6 にパルス周波数 625Hz における 1 溶滴の成長から離脱までの連続画像を示す。ピーク電流(I_p)は 500A、ピーク期間(T_p)は 0.4ms、ベース電流(I_b)100A とした。溶滴移行直後の画像を 0ms とし、5.2ms から 6.0 ms の画像は溶滴移行後 3 パルス目、8.5ms から 9.3 ms は 5 パルス目、12.3ms から 13.0 ms は 8 パルス目、15.0ms と 15.5 ms は 10 パルス目である。ワイヤ先端の溶滴は時間の経過とともに成長し、パルスピーク期間の溶滴はアークによって上方に押し上げられ扁平化し、ベース期間の溶滴は下方に伸びることで中心が下方へ移動する現象が観察された。このベース期間に観察された溶滴中心の下方への移動は、溶滴の小さい 4.7ms および 8.0ms においては小さく、その形状はほぼ真球である。

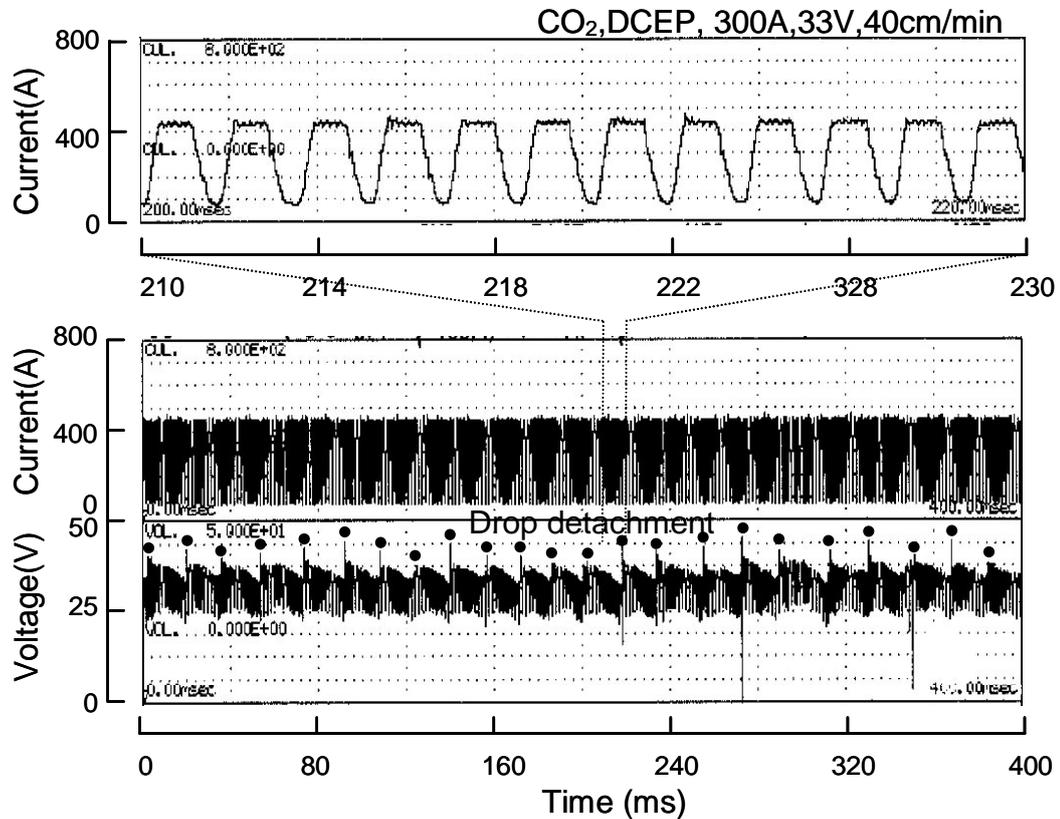


Fig.3.5 Current and voltage waveform in 580Hz pulse welding.

これに対して、溶滴がワイヤ径以上に成長した 11.8ms の溶滴は縦方向に伸びた形状となっており、その中心は下方に大きく移動した。溶滴とワイヤ間のくびれの形成はこの直後の 12.3ms の画像に認められ、その後、溶滴離脱までに要する時間は約 3ms であった。1 パルス 1 溶滴移行における溶滴離脱までのピーク電流期間 2~6ms (Fig. 4) とも一致している。この高周波パルス溶接における溶滴移行の特徴として、パルスによる溶滴のワイヤ軸方向への振動(上下動)とその成長のなかで溶滴とワイヤ間にくびれを形成し離脱に至る現象が観察された。また、溶滴移行間隔の短縮と規則性の向上、溶滴の微細化と溶滴揺動の抑制が確認された。溶滴の成長から移行に至る過程は a) 溶滴の成長、b) パルスによる溶滴の上下動とくびれの形成、c) 溶滴のくびれの成長、d) 溶滴の離脱に大別できる。

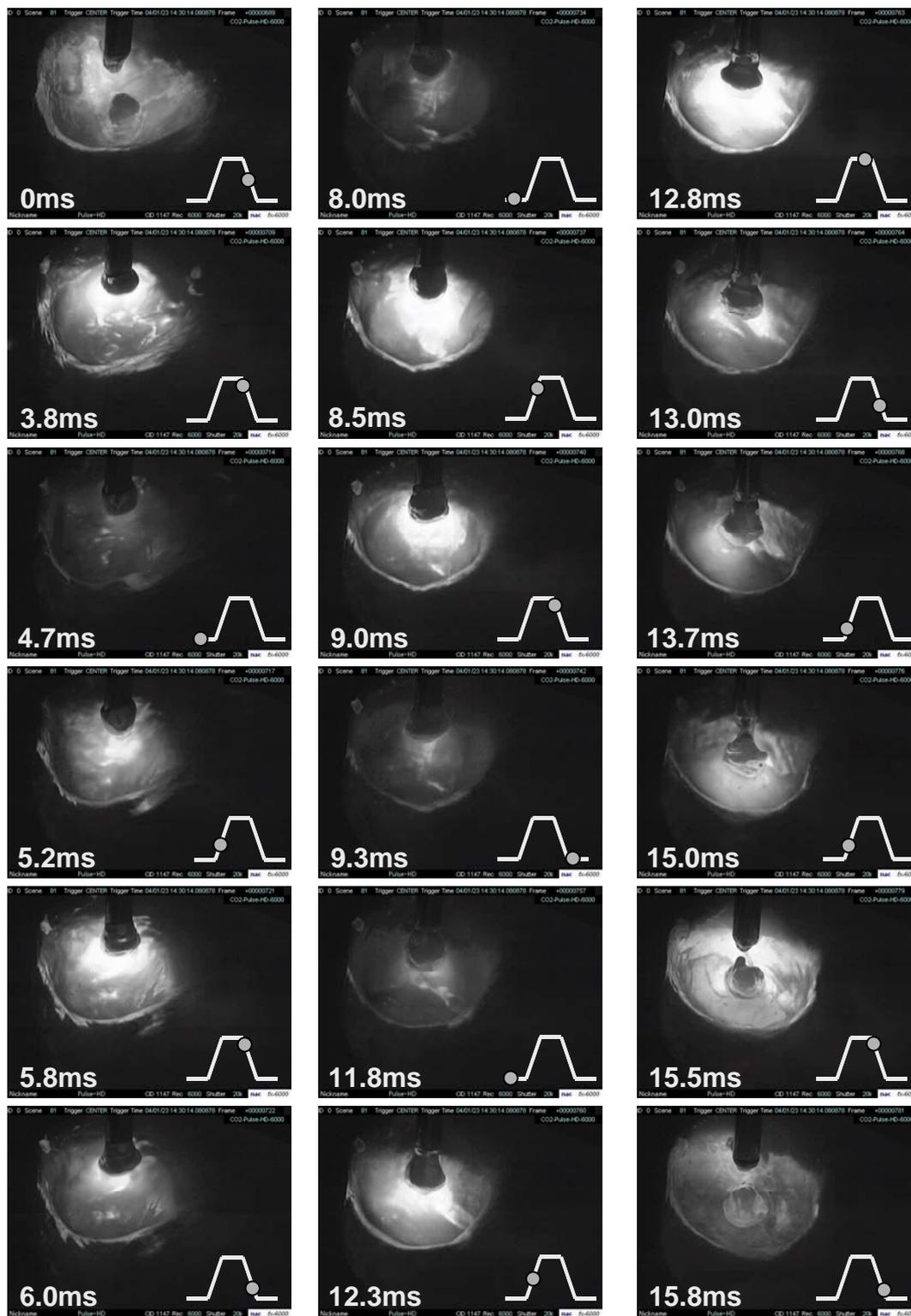


Fig.3.6 Example of droplet transfer behavior in 625Hz pulse welding.

3.3.3. CO₂パルスアーク溶接法におけるスパッタ発生量

Fig. 3.7 に平均溶接電流 300A、アーク電圧 33V におけるパルス周波数とスパッタ発生量の関係を示す。スパッタ発生量はパルス周波数 20~25Hz の領域では 2.3~3.2g/min と多く、パルス周波数 50~100Hz の領域および 400Hz 以上の領域では 1.2g/min 以下に低減しており、Fig. 3.2 のパルス周波数と平均溶滴重量との相関が認められた。特に、ピーク電流 500A、ベース電流 100A、パルスの立上り時間(Tup) 0.4ms、立下り時間(Tdn) 0.4ms、周波数 625Hz におけるスパッタ発生量は 0.7g/min にまで低減した。Fig. 3.8 にノンパルス溶接および 625Hz の高周波パルス溶接におけるスパッタ粒度分布を示す。高周波パルス溶接のスパッタは小粒となり、粒径 0.5mm 以下のスパッタ比率はノンパルス溶接の 52% から 78%に増加した。また、溶接ビード近傍への付着と除去が問題視される粒径 0.5mm 超えのスパッタ発生量はノンパルス溶接の 1.5g/min から 0.2g/min に激減した。

3.3.4. 高周波パルス溶接法の特性

Fig. 3.9 に平均溶接電流 300A、アーク電圧 33V における従来のノンパルス溶接と高周波パルス(Ip500A, 625Hz)溶接の断面マクロ組織とビード外観を示す。電流のパルス化によって溶込み深さが 1.3 倍に増加した。一方、ビード近傍への大粒のスパッタ付着が減少しておりスパッタ除去作業の大幅低減が期待できる。

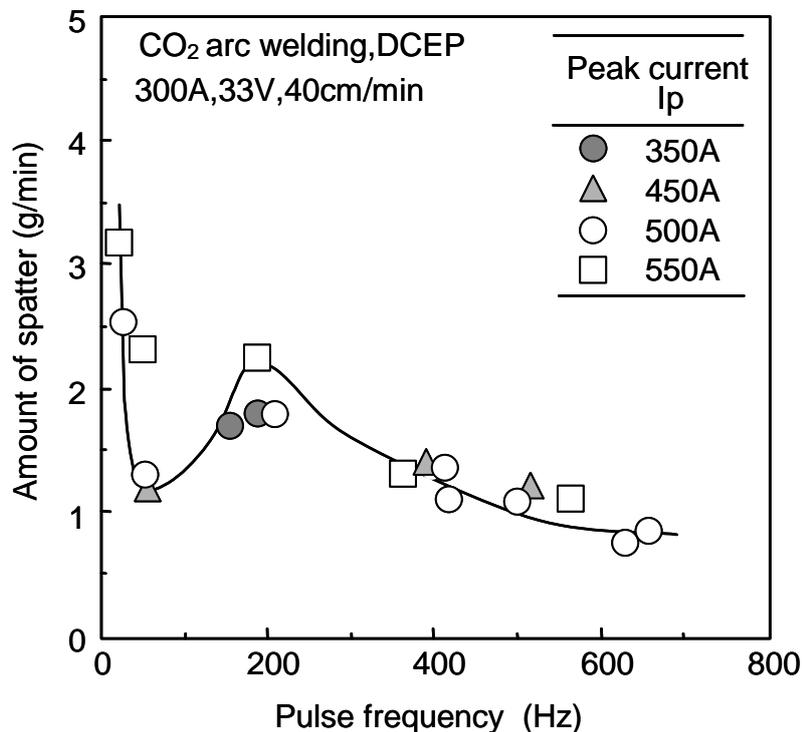


Fig.3.7 Relation between pulse frequency and amount of spatter.

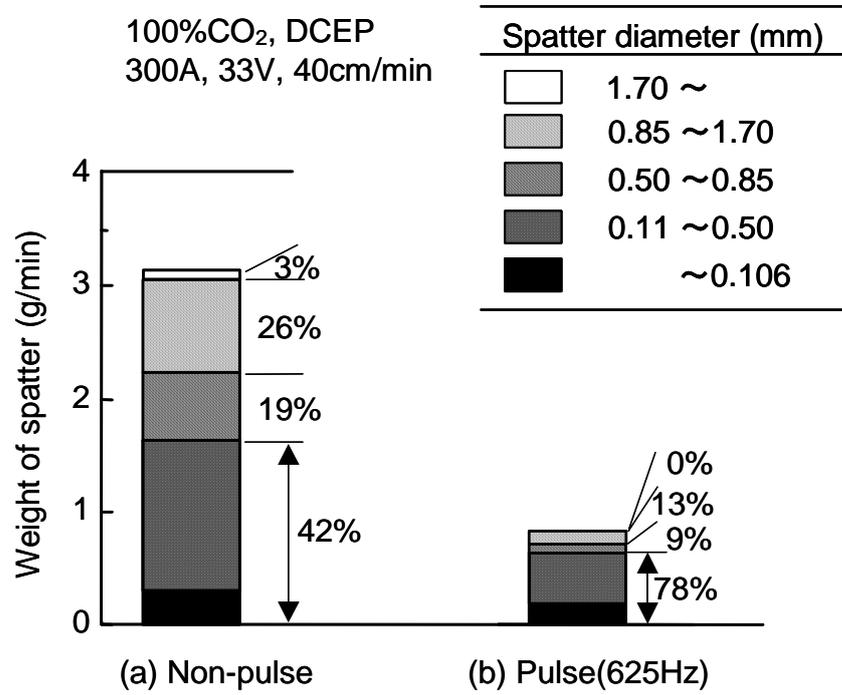


Fig.3.8 Comparison of spatter generation in non-pulse and high frequency pulse CO₂ welding.

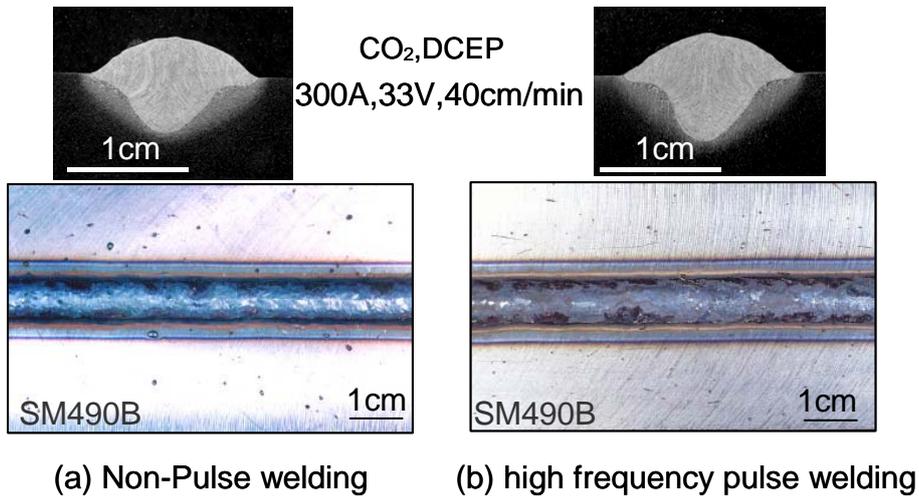


Fig.3.9 Appearance of bead-on-plate welding.

3.4. 考察

高周波パルス溶接における溶滴の挙動について固有振動モデルを用いて考察する。炭酸ガスアーク溶接のグロービュール移行におけるスパッタ発生形態としては、①短絡と再アーク、②アーク力による溶滴の飛散等が挙げられるが、その発生は、溶滴がワイヤ端で成長する過程で、アーク点の変位するため溶滴が大きく揺動し溶滴移行が不規則になることに起因するとされている¹¹⁻²⁶⁾。したがって、スパッタの発生を減少させるためには、溶滴の不安定な揺動を抑制することが特に重要である。高周波パルスを用いた CO₂ パルスアーク溶接では、9~11 パルスで 1 溶滴が移行する形態が極めて安定であり、かつ、溶滴の大きさは小さくなることから、スパッタ発生量を大幅に低減できることを 3.3.2 項および 3.3.3 項で述べた。このスパッタ低減現象は Fig. 3.7 に示したパルスによる溶滴の強制的な振動によるくびれの形成に加えて、ピーク電流期間にくびれ部分に生じる強いピンチ力がワイヤ軸方向への規則的な溶滴移行を実現していることによると考えられる。

Fig. 3.3 に示したように、パルス電流を適用したときの溶滴重量が周波数依存性をもつことから、溶滴の大きさと固有振動数の関係を調べることにした。溶滴の振動現象を単純化するために、平田らにより解析されている手法⁶⁸⁾を用いて、Fig. 3.11 に示すような質点振動系に置き換え、次式から固有振動数を求めることにした。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 m は溶滴の等価質量(kg)、 k は溶滴の等価バネ定数 (N/m) である。もとより、溶滴の大きさによって、ワイヤ端に懸垂する溶滴形状は異なり、表面張力による等価バネ定数は変化する。たとえば、熔融軟鋼の表面張力を 1.2N/m とすると、溶滴体積が 5mm³ の場合、等価バネ定数は約 16(N/m) と計算される。したがって、熔融軟鋼の密度を 7.5×10³kg/m³ とすると、溶滴質量は 3.8×10⁻⁵kg となり、固有振動数は(1)式から約 100Hz となる。このようにして求めた懸垂溶滴の体積と固有振動数の関係を Fig. 3.11 に示す。溶滴の体積が大きくなるほど、固有振動数が低下することが分かる。Fig. 3.11 には懸垂溶滴を球換算したときの直径も併記しているが、溶滴直径が 1.2~1.5mm での固有振動数は 300~600Hz となっている。Fig. 3.2 に示すようにパルス周波数 300Hz 超えにおける溶滴サイズは周波数の増加にともない小さくなっており、パルス電流による共振作用によって溶滴に振動が生じている可能性があると考えられる。

なお、Fig. 3.11 は単純化したモデルでの固有振動数の計算結果であり、実際には下向きの力に加えて上向きの力が加わり、さらには電磁ピンチ力も作用するため、今後、溶滴振動および溶滴離脱に関する詳細な検討が必要である。

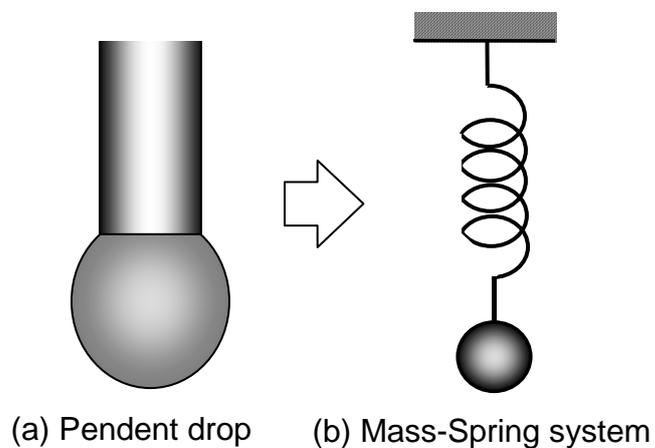


Fig.3.10 Mass-spring system equivalent to oscillation of pendent drop in axial direction.

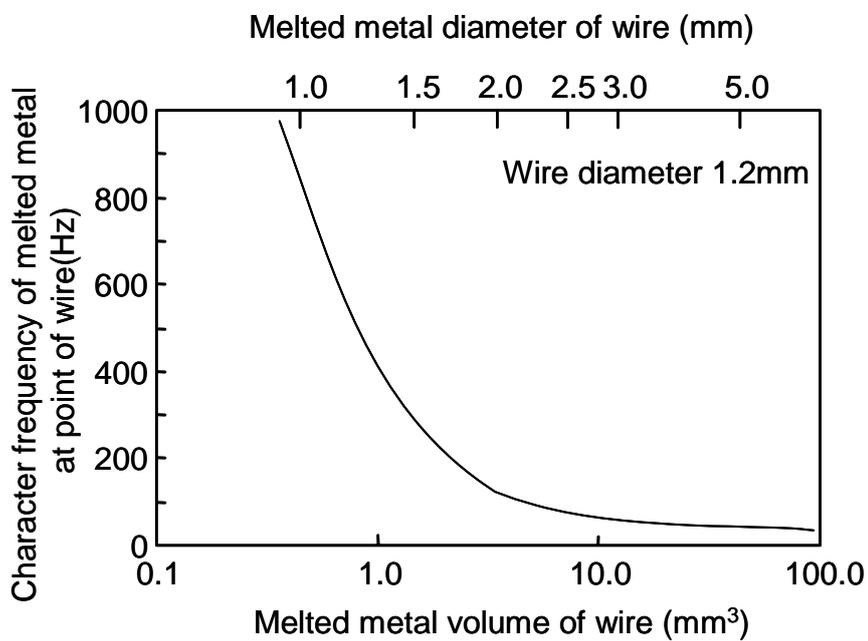


Fig.3.11 Relation between volume and the calculated character frequency.

3.5. 結言

炭酸ガスアーク溶接においてパルス溶接電流による溶滴移行形態の安定化を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) パルス周波数が 300Hz を超える領域では周波数の増加とともに溶滴は微細化する傾向を示し、ピーク電流 500A、周波数 625Hz での平均溶滴重量はノンパルスの 59mg から 34mg にまで減少した。
- (2) また、高周波パルス溶接法によって溶滴の微細化とともに移行間隔の規則性向上が認められた。
- (3) 高周波パルス溶接によって生じたスパッタ総発生量は、従来比で 70%低減しており、ビード近傍への付着が懸念される粒径 0.5mm 以上の大粒のスパッタは 13%に激減した。
- (4) 静止懸垂溶滴形状で近似したモデルにより得られた直径 1.2~1.5mm での固有振動数は 300~600Hz となり、高周波パルス溶接における溶滴には共振によって溶滴振動が生じた可能性が考えられる。

第4章 アークの安定性とスパッタ発生量に及ぼす極性と REM 添加の影響

4.1. 緒言

炭酸ガスアーク溶接法を含めた溶極式のガスシールドアーク溶接法は鋼の溶接において電極である鋼ワイヤがプラスとなる棒プラス (DCEP) が安定とされる⁷⁾。第2章および第3章において極性 DCEP におけるスパッタの低減を電極ワイヤ組成と電流パルスの観点から検討したが十分なスパッタ低減効果が得られたとは言えない。一方、経験的に不安定とされる極性棒マイナス (DCEN) のアーク現象に関する検討は少なく、平本らは薄鋼板の溶落ちの抑制を目的として溶込みの浅い極性棒マイナスでのアーク安定化を検討し、波形制御の適用によるスパッタ低減効果を報告している⁶⁹⁾。薄鋼板など低電流溶接においては有効な使用が可能であるが、中高電流域は、極性棒プラスに対して品質および安定性の両特性に劣る⁷⁾これらのことから極性 DCEN におけるアーク安定化とその現象に関する報告は少ない。一方、非溶極式である TIG 溶接法は DCEN での使用が安定とされ、電極である W (タングステン) への REM (Ce, La, Y) 添加がアークの集中と電極の長寿命化に有効であるとされている⁵⁾。

本章では、炭酸ガスアーク溶接において Ar ガスを主とする混合ガスシールドアーク溶接法並みの極低スパッタ化を達成することを目的に、従来の極性棒プラス (DCEP) に加えて一般に不安定とされる極性棒マイナス (DCEN) について、電極ワイヤへの REM (rare earth metal) 添加がアーク安定性、スパッタ発生量および溶滴移行形態に及ぼす影響について検討した。

4.2. 実験方法

4.2.1. 供試材料

Table 4.1 に供試電極ワイヤの化学組成を示す。供試ワイヤは、JIS Z 3312 において YGW11 に規定される化学組成をベースに C : 0.031~0.050%, Si : 0.60~0.72%, Mn : 1.62~1.74%, P : 0.010~0.013%, S : 0.009~0.017%, Ti : 0.16~0.26% とし REM 量を 0 ~450ppm に変化させた 9 種類の試作ワイヤを用いた。REM は Ce, La, Y からなる混合物でその比率 6:3:1 を用い、溶鋼中に添加することで鋼中に S, Ti からなる化合物として分散させた。ワイヤ直径は 1.2mm とし、表面には厚さ約 0.4~0.6 μm の Cu めっきを施した。

4.2.2. 溶接条件

Table 4.2 にアーク安定性およびスパッタ発生量に及ぼす極性とワイヤ REM 量の影響についての評価条件を示す。溶接は、定電圧電源、100%CO₂ シールドガスを用い、溶接電流 300A、溶接速度 40cm/min、突出し長さ 20mm、アーク電圧は平滑な溶接ビード形状が得られる適正電圧とし、電極ワイヤの極性棒プラス (DCEP) は 33V、棒マイナス (DCEN) は 30V を標準条件とした。

Table4.1 Chemical composition of electrode wires (mass%).

Wire	C	Si	Mn	P	S	Ti	REM	Ca
W0	0.048	0.70	1.65	0.010	0.010	0.19	Tr	0.0004
W1	0.031	0.71	1.67	0.013	0.007	0.16	0.010	0.0005
W2	0.044	0.72	1.74	0.011	0.009	0.20	0.014	0.0004
W3	0.036	0.70	1.68	0.011	0.017	0.26	0.016	0.0004
W4	0.045	0.67	1.71	0.011	0.010	0.20	0.025	0.0006
W5	0.032	0.71	1.72	0.012	0.009	0.18	0.033	0.0002
W6	0.050	0.60	1.62	0.010	0.012	0.20	0.038	0.0001
W7	0.032	0.71	1.72	0.012	0.009	0.18	0.043	0.0001
W8	0.044	0.70	1.74	0.011	0.007	0.20	0.045	0.0004

REM : rare earth metal, Ce:La:Y ≒ 6:3:1

Table4.2 Welding conditions.

Polarity	Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (cm/min)	Wire extension (mm)
Electrode positive	33	300	40	20
Electrode negative	30			

4.2.3. スパッタ発生量の評価方法

250mm×長さ600mm×高さ200mmの銅製容器内で1分間のビードオンプレート溶接を行い、ノズルに付着したスパッタ量および容器内に飛散したスパッタ量をすべて測定することで、溶接時に発生する1分間当りのスパッタ量を評価した。

4.2.3. 溶滴移行の観察

アーク形態、溶滴の形状およびその移行を側面および斜め上方に配置した高速度カメラを用いて観察した。側面の背光法による撮影は、撮影速度1,000frame/s、シャッター速度1/12,000sとし、レンズF4-200mm、アーク形状の観察を目的として減光フィルターND400を用いた。斜め上方からの観察は、撮影速度6,000frame/s、シャッター速度1/20,000sとし、レンズF4-200mm、アーク光の透過を抑制することで溶滴移行および溶融プールの鮮明な観察を目的として透過波長960±15nmのバンドパスフィルタを用いた。

4.3. 実験結果および考察

4.3.1. 極性とアークの安定性

極性棒プラス(DCEP)における炭酸ガスアーク溶接のグロービュール移行は、Ar ガスを主とする混合ガスシールドアーク溶接のスプレー移行に対して安定性に劣るとされ、このグロービュール移行におけるスパッタの発生は、粗大な溶滴とその揺動が大きく関係し、短絡と再アーク、アーク力そのものによる溶滴の飛散が挙げられる(第2章)。また、スパッタ発生の抑制には、溶滴の微細化と揺動の抑制が重要であると考えられる(第3章)。炭酸ガスアーク溶接における溶滴移行現象は、炭酸ガスの解離吸熱反応等によってアークが緊縮することで、アークはあたかも溶滴を下部から押し上げるように作用し、溶滴は移行を妨げられることで粗大に成長する。さらに、アーク点が大きく変位するために溶滴は不規則に揺動する。Table 4.3 に極性とワイヤの各組合せによるアーク安定性の評価結果を示す。極性DCEP, REM を添加していないワイヤW0 のアークを基準とすると、REM を含有するワイヤはアークそのものの向きが変化するために不安定な溶接となる(第2章)。一方、棒マイナス(DCEN)では、ワイヤW0 は粗大な溶滴を形成するためアークが非常に不安定になるのに対して、REM を250~450ppm 含有するワイヤW4 からW8 はマグ(Ar-20%CO₂)溶接におけるスプレー移行と同様に安定したアーク形態となった。このようにアークの安定性は、極性とワイヤのREM 含有の有無によって大きく変化した。

Table4.3 Evaluation of effect of polarity/wire combinations on arc stability.

Polarity	Electrode wire	
	W0(Si-Mn-Ti)	W5(Si-Mn-Ti-REM)
Electrode positive(EP)	Normal	Poor
Electrode negative(EN)	Poor	Excellent

4.3.2. スパッタ発生量に及ぼす極性と REM 量の影響

Fig. 4.1 に炭酸ガスアーク溶接におけるワイヤ中のREM 量とスパッタ発生量の関係を示す。極性DCEP のスパッタ発生量は、REM を添加していないワイヤW0 が3.5g/min であるのに対して、REM 量330ppm では約2倍の7.6g/min に増加した。REM の含有によりアークの安定化する傾向を示したDCENにおいて、REM を添加していないワイヤW0 のスパッタ発生量は4.3g/min、REM 量の増加とともに減少し、REM 量140ppm で2.5g/min、REM 量250ppm で0.6g/min、REM 量330~450ppm においては0.3~0.4g/min に減少した。

REM 量 330ppm の電極ワイヤを用いた炭酸ガスアーク溶接によって発生するスパッタ量は、極性DCEPの場合はREMを添加していない電極ワイヤを用いた溶接の約2倍の6.7g/minに増加したが、極性DCENにおいては0.3g/minにまで著しく減少した。特に粒径0.5mm以上のスパッタの比率は、REMを添加していない電極ワイヤW0を用いた極性DCEPでは85%であるのに対して、極性DCENでは5%にまで激減した。

以上より、極性DCEPの炭酸ガスアーク溶接では長く伸びたアークとアークそのものの向きが変化するために不安定な溶接となりスパッタの増大を招く(第2章)現象が観察されたREMを添加した電極ワイヤを極性DCENの炭酸ガスアーク溶接で用いることで混合ガスシールド(Ar-20%CO₂)アーク溶接法並みの極低スパッタ化が達成された。

4.3.3. アーク形態と溶滴移行に及ぼす極性と REM 量の影響

溶滴とアーク形態を評価するために高速度ビデオを用いた観察を実施した。Fig. 4.2に溶滴移行直前の撮影画像を示す。溶接進行方向に対して側面からの撮影とし、キセノンランプを用いた背光法を用いた。溶接電流はアーク点の観察が容易な100Aおよび自由溶滴移行となる300Aとし、電極ワイヤはREMを添加していないW0とREMを330ppm含有するW5を用い、極性は棒プラス(DCEP)および棒マイナス(DCEN)とした。電極ワイヤW0を用いた溶接では、極性DCEPにおいて溶接電流100Aでは微小な短絡移行が、溶接電流300Aでは、グロービュール移行が観察された。

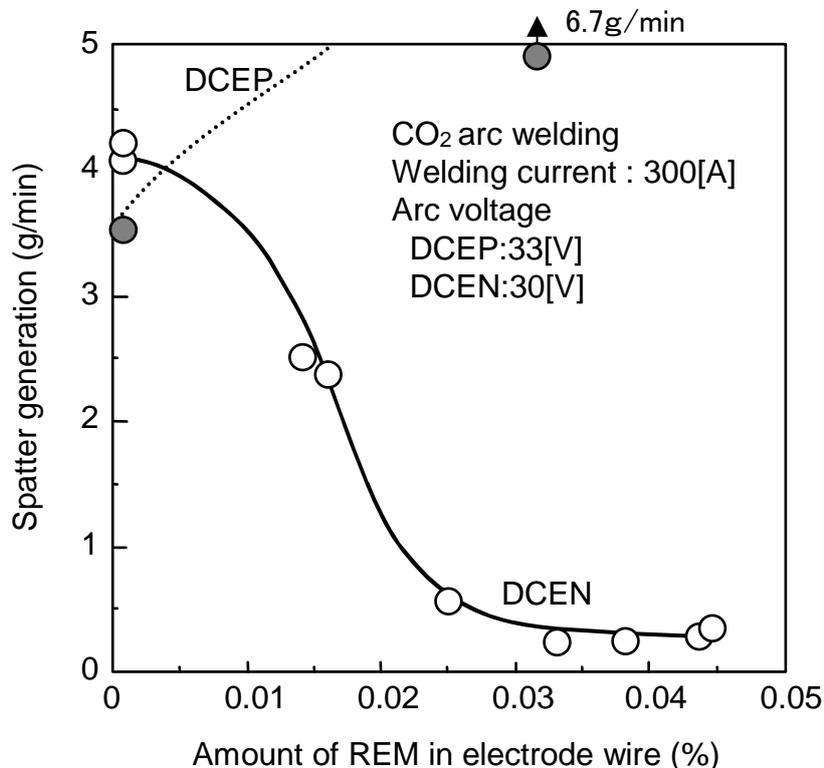


Fig.4.1 Relationship between spatter generation and amount of REM in electrode wire.

極性棒マイナス (DCEN) においては、溶接電流 100A および 300A とともにワイヤ先端から溶滴下部の広い範囲にかけてアーク点が激しく変移する現象が観察され、これによって、溶滴は激しく揺動し、移行が妨げられることでワイヤ径の3倍にまで粗大化した。

これに対して、REM を 330ppm 含有する電極ワイヤW5 を用いた極性 DCEN の溶接では、溶接電流 100A では粗大な溶滴を形成するものの溶滴下部にアーク点が集中し、溶滴の揺動が抑制され、溶接電流 300A では電極ワイヤ先端を頂点とする円錐状のアークが形成され、溶滴径は 1.2mm 程度まで微細化した。炭酸ガスアーク溶接においてパルス電流の溶滴微細化効果によるスパッタ発生量の低減 (第3章) が得られており、電極ワイヤW5 を用いた極性 DCEN の溶接においても溶滴の微細化効果によってスパッタ発生量は低減したと考えられる。

溶滴移行を撮影するために斜め上方に高速度カメラを設置し、バンドパスフィルタを用いてワイヤ先端から移行する溶滴と熔融プールを直接観察した。Fig. 4.3 に撮影した連続画像を示す。電極ワイヤは REM を 330ppm 含有する W5 を用い、極性を DCEN とした。従来の REM を添加していない電極ワイヤを用いた極性 DCEP での炭酸ガスアーク溶接の溶滴移行間隔は、平均で 37ms と長く、しかもその間隔は 29~48ms と大きく変動する (第3章) のに対して、REM を 330ppm 含有するワイヤW5 を用いた極性 DCEN の溶滴移行は、非常に短い約 4.5ms 間隔で観察された。また、熔融池は、揺動の抑制と形状の安定化およびアーク点が深く押し下げられる現象が観察された。これらの現象は、微細溶滴の揺動抑制と連続的な移行およびワイヤ先端を頂点とする円錐状のアーク形成による効果であると考えられる。

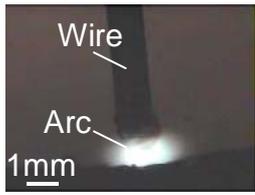
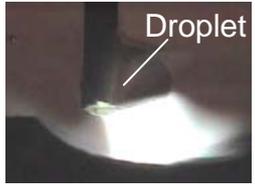
Polarity	Electrode positive	Electrode negative	Electrode negative
Welding wire	W0 (Si-Mn-Ti)	W0 (Si-Mn-Ti)	W5 (Si-Mn-Ti-REM)
Welding current 100A			
Welding current 300A			

Fig.4.2 Comparison of arc and droplet behavior with various polarity/wire combinations. (photographed from side video camera)

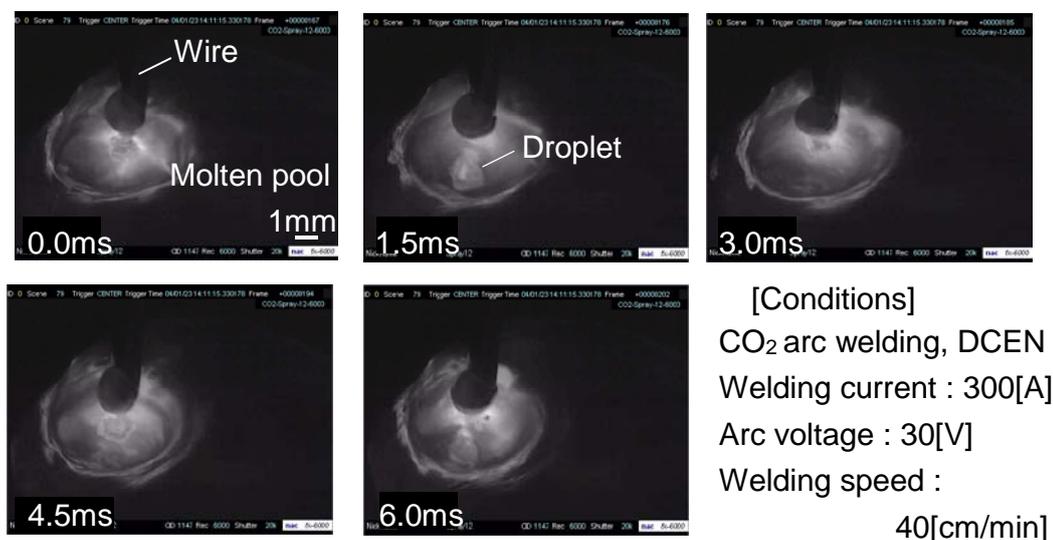


Fig.4.3 Continuous images of droplet transfer in electrode negative welding with W5 wire. (photographed from upper diagonal direction video camera)

4.3.4. REM 添加ワイヤの溶接性

高電流域の炭酸ガスアーク溶接における自由溶滴移行の形態は、IIW での分類におけるグロービュール移行であるとされ¹³⁾、電極ワイヤへの REM 添加は極性 DCEP においてスパッタの増大を招く(第2章)、しかし、A. LESNEWICH らは、DCEN の Ar ガスシールド溶接において REM コーティングワイヤがアークの安定化とスプレー移行に効果があると報告⁶¹⁾しており、REM は溶滴移行形態に大きく影響し、極性 DCEN での溶接ではアーク安定化に有効な元素であると考えられる。

Fig. 4.4 に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。REM を 330ppm 含有する電極ワイヤ W5 を用いた極性 DCEN の溶接および従来の REM を添加していない電極ワイヤ W0 を用いた極性 DCEP の溶接の 2 条件とした。炭酸ガスアーク溶接において極性を DCEN とし REM を 330ppm 含有した電極ワイヤ W5 を用いることで、従来の極性 DCEP の溶接と比較して大幅なスパッタ低減が達成されており、その効果は、微細溶滴移行となる溶接電流 250~380A の範囲で著しい。

Fig. 4.5 に REM を 330ppm 含有する電極ワイヤ W5 を用いた極性 DCEN のビードオンプレート溶接におけるビード外観と断面マクロ組織を示す。外観からはビード近傍へのスパッタ付着のない安定したビード形状、さらに、20 箇所以上の断面マクロ組織を観察したがいずれも安定した深い溶込みが確認された。

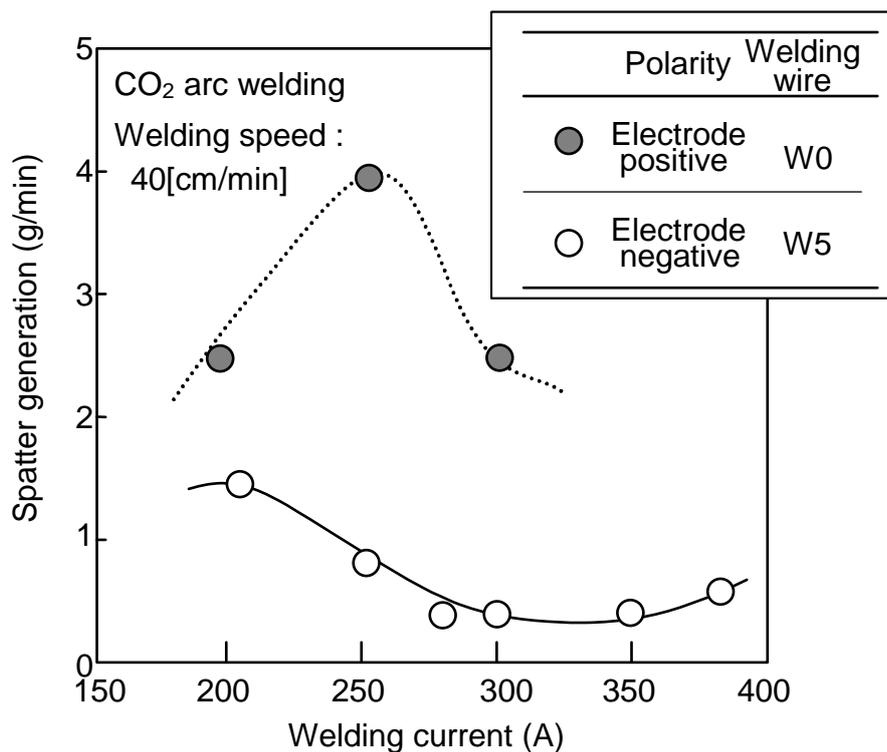


Fig.4.4 Relationship between welding current and spatter generation.



a) Bead appearance



b) Macrostructure of cross section

[Conditions]
 Electrode negative
 100%CO₂
 Welding current : 300[A]
 Arc voltage : 30[V]
 Welding speed :
 40[cm/min]

Fig.4.5 Weld bead appearance and macrostructure in bead-on-plate welding using W5 wire.

4.4. 結言

極性と電極ワイヤへの REM (rare earth metal) 添加がアーク安定性、スパッタ発生量および溶滴移行形態に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 極性を棒マイナス(DCEN)とし、REM を 330~450ppm 添加した電極ワイヤを用いることにより、アークの安定化と極低スパッタ化(0.3g/min)が達成された。
 - 1) スパッタの低減効果は電流範囲 250~380A の範囲で著しい。
 - 2) 高速度カメラによる観察によって、微細かつの連続的な溶滴移行(間隔約 4.5ms)が確認された。
 - 3) ビードオンプレート溶接においてビード近傍へのスパッタ付着はなく、安定した深い溶込みが確認された。
- (2) 従来ワイヤ(REM \leq 20ppm)を用いた極性棒マイナス(DCEN)の溶接はワイヤ先端に懸垂する溶滴をワイヤ径の3倍(DCEPでは2倍)にまで粗大化させ、スパッタの発生量を4.3g/min(DCEPでは3.5g/min)に増加させた。

第5章 電極ワイヤの溶融速度とアーク形態に及ぼすREM添加の影響

5.1. 緒言

炭酸ガスアーク溶接における高電流域の溶滴移行形態はグロービュール移行である¹³⁾とされてきたが、極性を棒マイナス(DCEN)とし、電極ワイヤに適量のREM (rare earth metal) を添加することによってスパッタ発生量の少ない微細スプレー移行が得られた。この溶接法の適正溶接電流範囲は250~380Aと広く、そのアーク形態の特徴はワイヤ先端の陰極点を頂点とする安定な円錐状アークであることを第4章で明らかにした。通常の電極ワイヤを用いた極性DCENの溶接は、ワイヤ溶融速度が高く、母材側の溶け込みが浅いことから極薄鋼板の溶接において溶落ち欠陥の防止に有効とされ、厚鋼板の継手に用いられる多層溶接においてはオーバーラップによる溶接欠陥が発生し易いとされる⁷⁾が、REMを適量添加したワイヤを用いることで極性DCENであっても極性DCEPよりもさらに深い溶込みを得ることが可能であることを第4章で明らかにした。また、極性DCEPにおいて電極ワイヤへのREM添加はスパッタの発生を増大させることを第2,4章で明らかにした。電極ワイヤへのREM添加は、アーク形態と溶滴移行に大きな変化を生じさせており、その現象とメカニズムの解明が必要である。

本章では、電極ワイヤへのREM添加によって得られた微細スプレー移行のメカニズム解明を目的として、電極ワイヤREM量のワイヤ溶融速度、陰極点および溶滴挙動への影響を調査し、電子放出と電極の発熱に対するREM添加の影響について検討した。

5.2. 実験方法

5.2.1 供試材料

Table 5.1 に供試した電極ワイヤの化学組成を示す。JIS Z 3312 において YGW11 に規定される化学組成をベースに C:0.031~0.048%、Si:0.67~0.71%、Mn:1.65~1.72%、P:0.010~0.013%、S:0.007~0.010%、Ti:0.16~0.19% とし REM 量を 0(≤20ppm)、100~390ppm に変化させた 5 種類の試作ワイヤを用いた。REM は Ce, La, Y からなる混合物でその比率 6:3:1 を用い、溶鋼中に添加することで鋼中に S, Ti からなる化合物として分散させた。ワイヤの直径は 1.2mm とし、表面には厚さ平均 0.4~0.6 μm の Cu めっきを施した。

Fig. 5.1 に鋼合金の電気抵抗率⁷⁰⁾を Fig. 5.2 に比熱⁷⁰⁾を示す。実験に用いた電極ワイヤ R0 の常温での電気抵抗率 R は $27 \times 10^{-5} [\Omega \text{mm}]$ であり、供試ワイヤの電気抵抗率と比熱として R0 電気抵抗率に最も近い 0.033C-0.55Mn-0.173Cr-3.47Ni 合金の電気抵抗率と比熱を用いた。0.033C-0.55Mn-0.173Cr-3.47Ni 合金の電気抵抗率は常温では $27.1 \times 10^{-5} [\Omega \text{mm}]$ 、温度とともに増加し、約 1200K 以上では他の鋼合金に同様に $120 \times 10^{-5} [\Omega \text{mm}]$ に収束する。Table 5.2 に各元素とその酸化物の仕事関数^{1,2,5,11,16,71-72)}と沸点を示す。Fe は仕事関数 4.3V、沸点 3023K、酸化物である FeO は仕事関数 3.8V、沸点 3687K であり、Fe に対して FeO はより電子を出しやすく熱的にも安定である。

Table 5.1 Chemical composition of electrode wires (mass%).

Wire	C	Si	Mn	P	S	Ti	REM	Ca
R0	0.048	0.70	1.65	0.010	0.010	0.19	Tr	0.0004
R1	0.031	0.71	1.67	0.013	0.007	0.16	0.010	0.0005
R2	0.031	0.71	1.67	0.013	0.007	0.16	0.020	0.0005
R3	0.031	0.71	1.67	0.013	0.007	0.16	0.031	0.0005
R4	0.032	0.67	1.72	0.012	0.009	0.18	0.039	0.0002

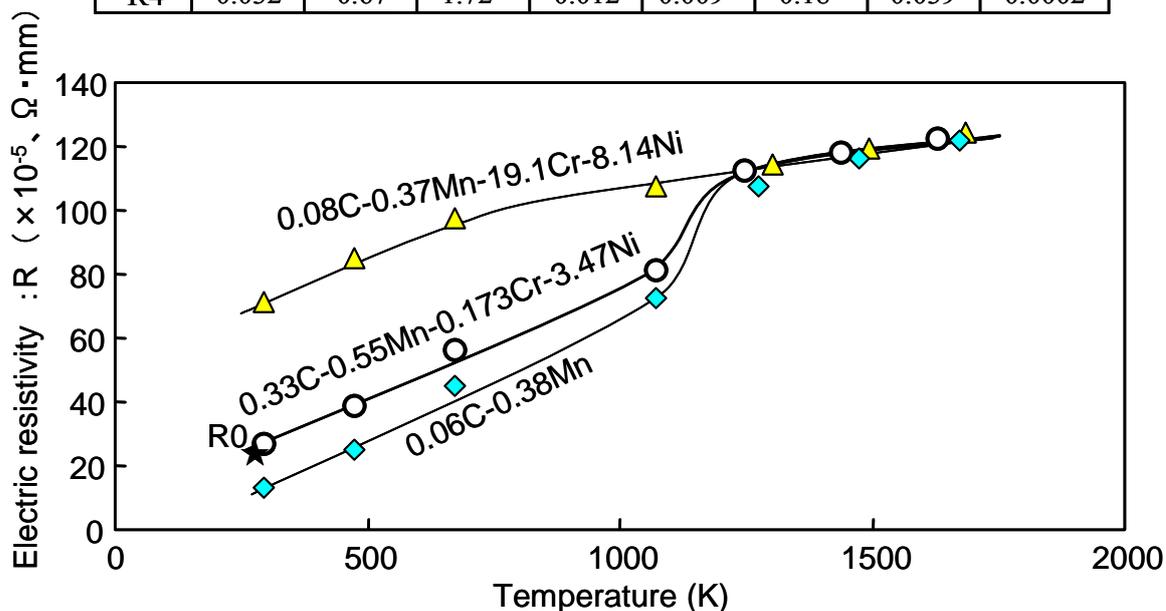


Fig. 5.1 Relation between electric resistivity and temperature.

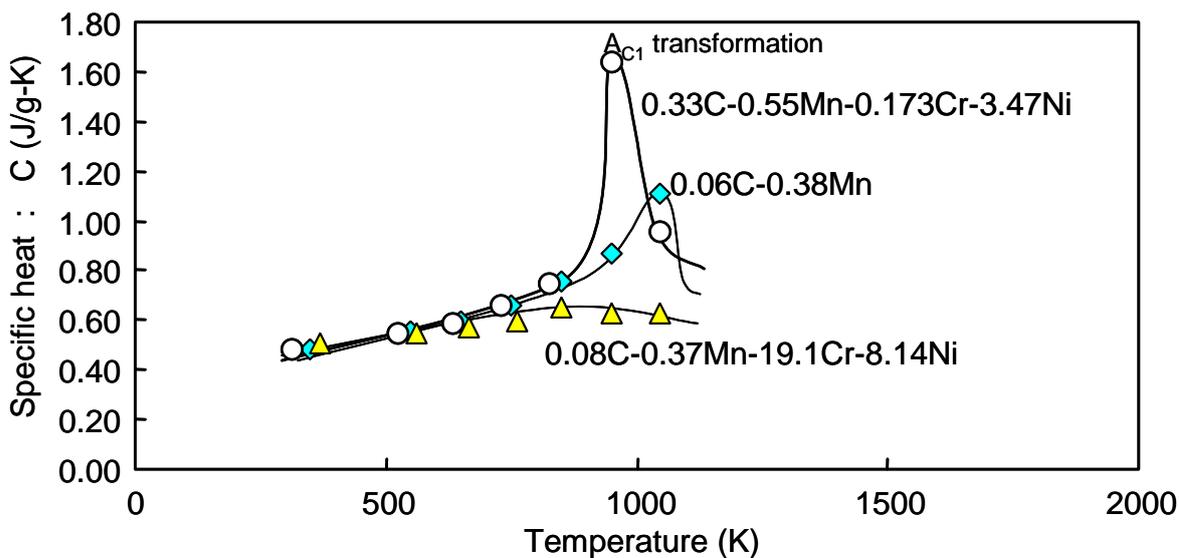


Fig.5.2 Relation between specific heat and temperature.

REMの構成元素であるCe, La, Yはいずれも仕事関数は約3.0V、沸点は3600K以上と更に安定であり、その酸化物の仕事関数は約3.0Vである。

Table 5.2 Boiling points and work functions of materials.

Material	Boiling point (K)	Work function (V)
Fe	3023	4.3
FeO	(3687)	3.8
Ce	3716	2.7
La	3730	3.3
Y	3609	3.3
Ce ₂ O ₃	—	3.2
La ₂ O ₃	—	3.1
Y ₂ O ₃	—	2.8

5.2.2. ワイヤ溶融速度の測定

Table 5.3 に溶接条件を示す。溶接は、定電圧電源、100%CO₂シールドガスを用い、溶接電流300A、溶接速度40cm/min、ワイヤの突出し長さ18mmを標準条件とし、極性棒プラス(DCEP)および棒マイナス(DCEN)におけるワイヤ送給速度を計測し、ワイヤ溶融速度とした。

5.2.3. アーク現象の観察

ワイヤ送給(溶融)速度の計測と同時に高速度ビデオを用いて溶滴移行を観察し、ワイヤ溶融速度と溶滴移行回数から移行溶滴径を求めた。高速度ビデオは、撮影速度5,000frame/s、シャッター速度1/20,000sとし、レンズF4-200mm、溶滴形状の鮮明な観察を目的として透過波長960±15nmのバンドパスフィルタを用いた。アーク点の大きさには溶接電流が大きく影響することからアークの観測は、溶接電流の変動を抑える外部特性を選択した。

(<例>アーク電圧1Vの低下に対する電流出力の増加を2Aに抑制)

Table 5.3 Welding condition.

Shielding gas	Polarity	Current (A)	Welding speed (cm/min)	Wire extension (mm)
CO ₂	Electrode positive	50~300	40	10~30
	Electrode negative			

5.3. 実験結果および考察

5.3.1. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径

5.3.1.1. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径に及ぼすワイヤREM量の影響

Fig. 5.3 に電極ワイヤのREM量とワイヤ溶融速度の関係を示す。溶接電流は自由溶滴移行となる300A、ワイヤの突出し長さは18mmとした。棒プラス(DCEP)におけるワイヤの溶融速度は何れの電極ワイヤも175~187mm/sの範囲にあり、電極ワイヤのREM量による明確な傾向は認められなかった。一方、棒マイナス(DCEN)におけるワイヤの溶融速度は電極ワイヤREM量200ppm以下(R0~2)が217~220mm/sと高いのに対して、REM量310, 390ppm(R3, 4)では極性DCEPと同等の182mm/sにまで減少した。

Fig. 5.4 に溶接電流300Aにおける電極ワイヤREM量と移行溶滴径の関係を示す。極性DCEPにおける移行溶滴径の平均は2.2~2.4mmであり、電極ワイヤのREM含有量による明確な傾向は認められなかった。一方、極性DCENにおける移行溶滴径の平均は電極ワイヤREM量200ppm以下(R0~2)が2.9~3.2mmと粗大であったのに対して、REM量310, 390ppm(R3, 4)では1.1~1.2mmにまで微細化した。

極性DCEPにおける電極ワイヤへのREM添加量は、ワイヤ溶融速度および移行溶滴径に対して明確な影響が認められなかったのに対して、極性DCENにおいては、REM量200ppm以下ではDCEN特有の高いワイヤ溶融速度と粗大な溶滴、REM量310, 390ppmではワイヤ溶融速度の減少と溶滴の微細化が確認された。Fig. 4.1(第4章)に示した極性DCENにおけるスパッタとREM量の関係と同様にワイヤの溶融速度と溶滴径に対しても200~310ppmのREM添加によって大きな変化が生じた。

電極ワイヤへのREM添加によってワイヤ溶融速度と溶滴径に大きな変化が生じた極性DCENにおけるアーク形態とその挙動を観察した。Fig. 5.5およびFig. 5.6にREMを添加していない電極ワイヤR0およびREMを390ppm含有する電極ワイヤR4を用いた溶接電流300Aにおける溶滴移行直前の0.2ms毎の連続画像を示す。高速度ビデオは溶接進行方向に対して側面に配置した。REMを添加していない電極ワイヤR0のアーク点(陰極点)は広く、その発生位置は固体であるワイヤと液体である溶滴との境界部から溶滴下部にかけて激しく変位する現象が観察され、その変位は0.2ms毎の観察においてもその軌跡を全て把握することはできなかった。この高速で変位するアーク点によってアークは激しく変向し、溶滴の表面の著しい凹凸と溶滴の形状そのものの大きな変形が観察された。また、溶滴が成長し、溶滴全体が母材側へ移動することでアーク長が短く詰まった状態でのアーク点は、溶滴下部を激しく変位することで溶滴の移行を妨げる現象とそれによってワイヤ径の3倍以上にまで粗大に成長した溶滴が観察された。

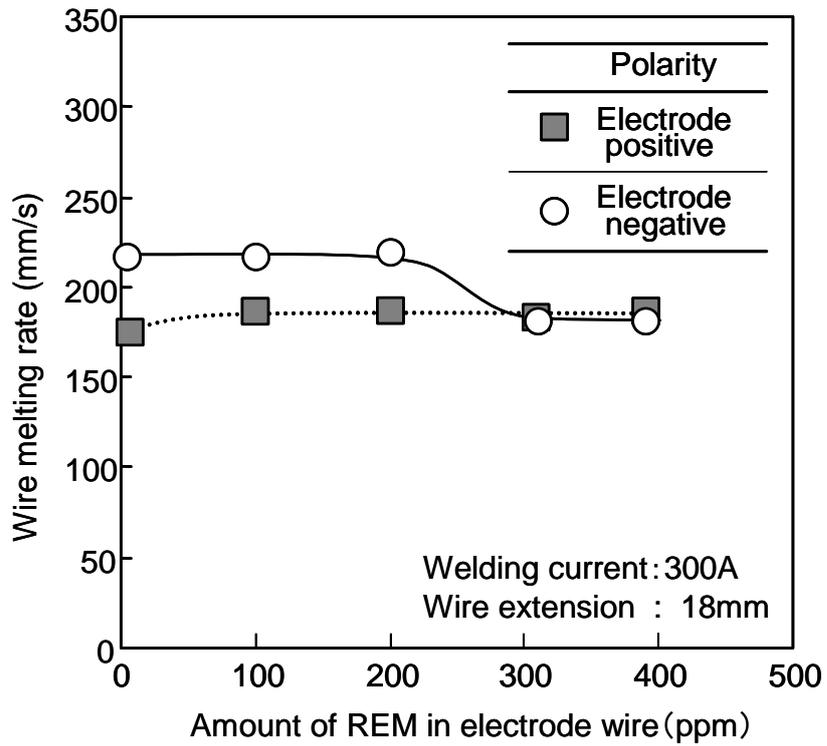


Fig.5.3 Relationship between wire melting rate and amount of REM in electrode wire.

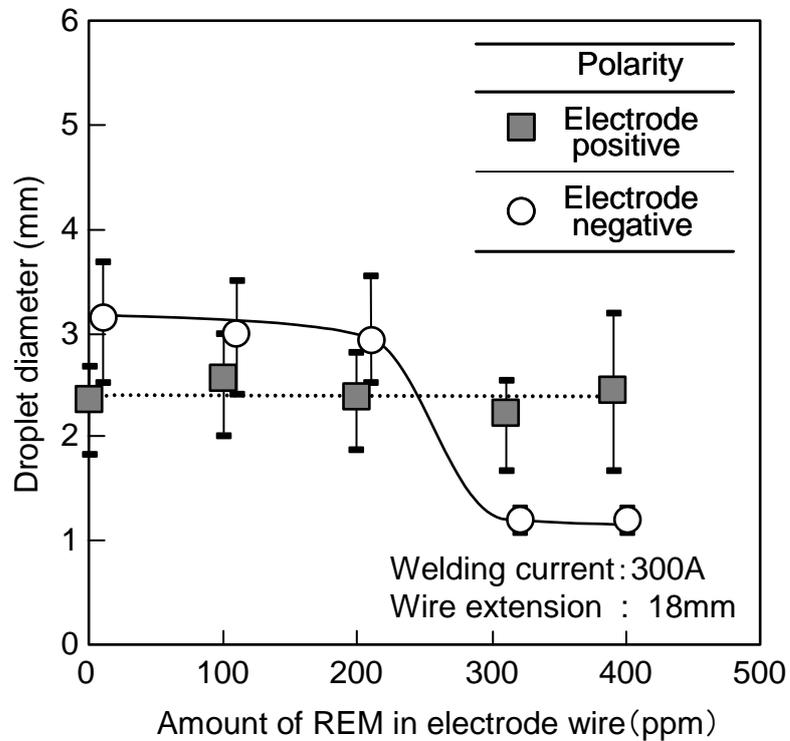


Fig.5.4 Relationship between droplet diameter and amount of REM in electrode wire.

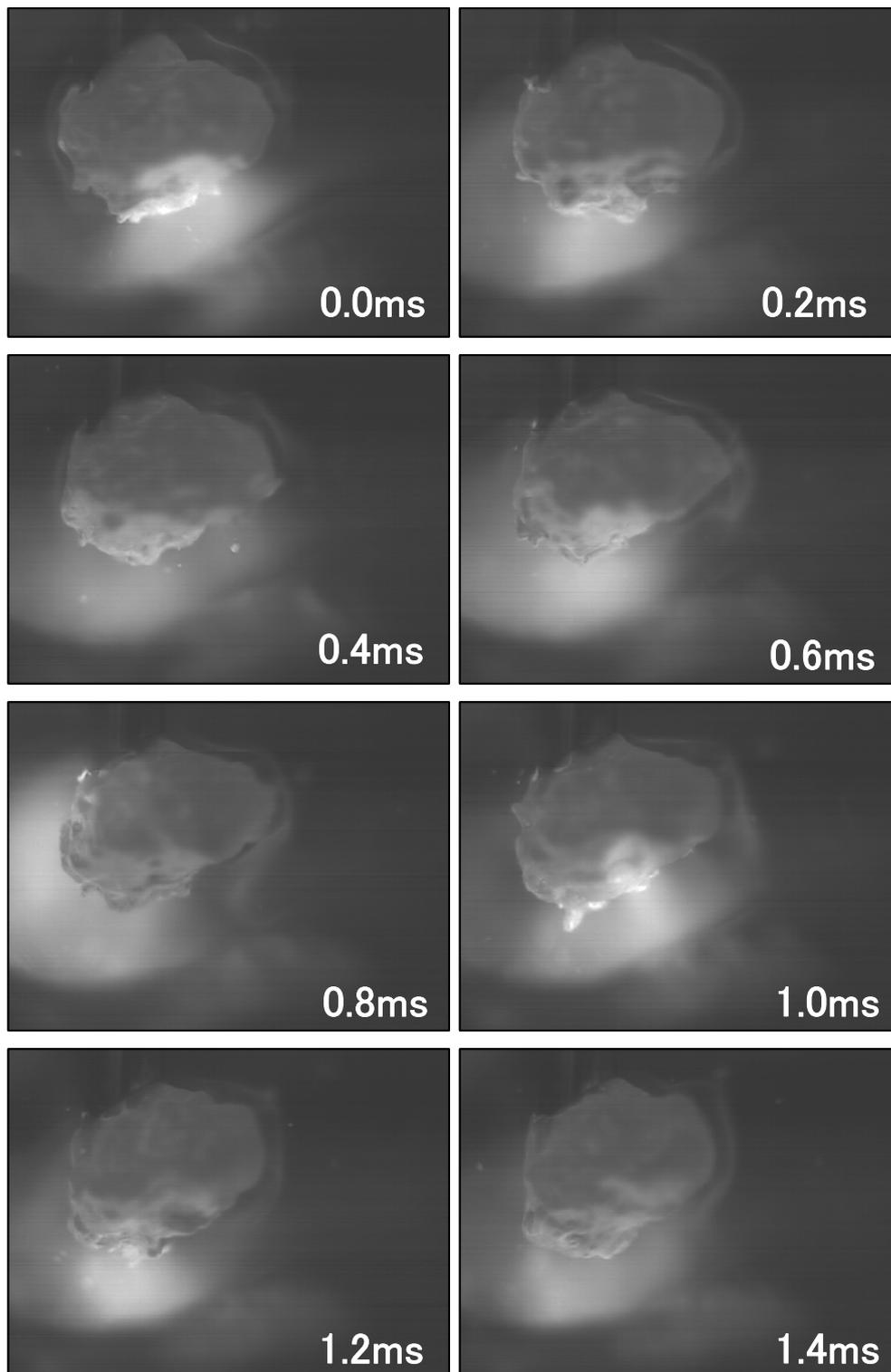


Fig.5.5 Continuous images of droplet in electrode negative welding with R0 wire.

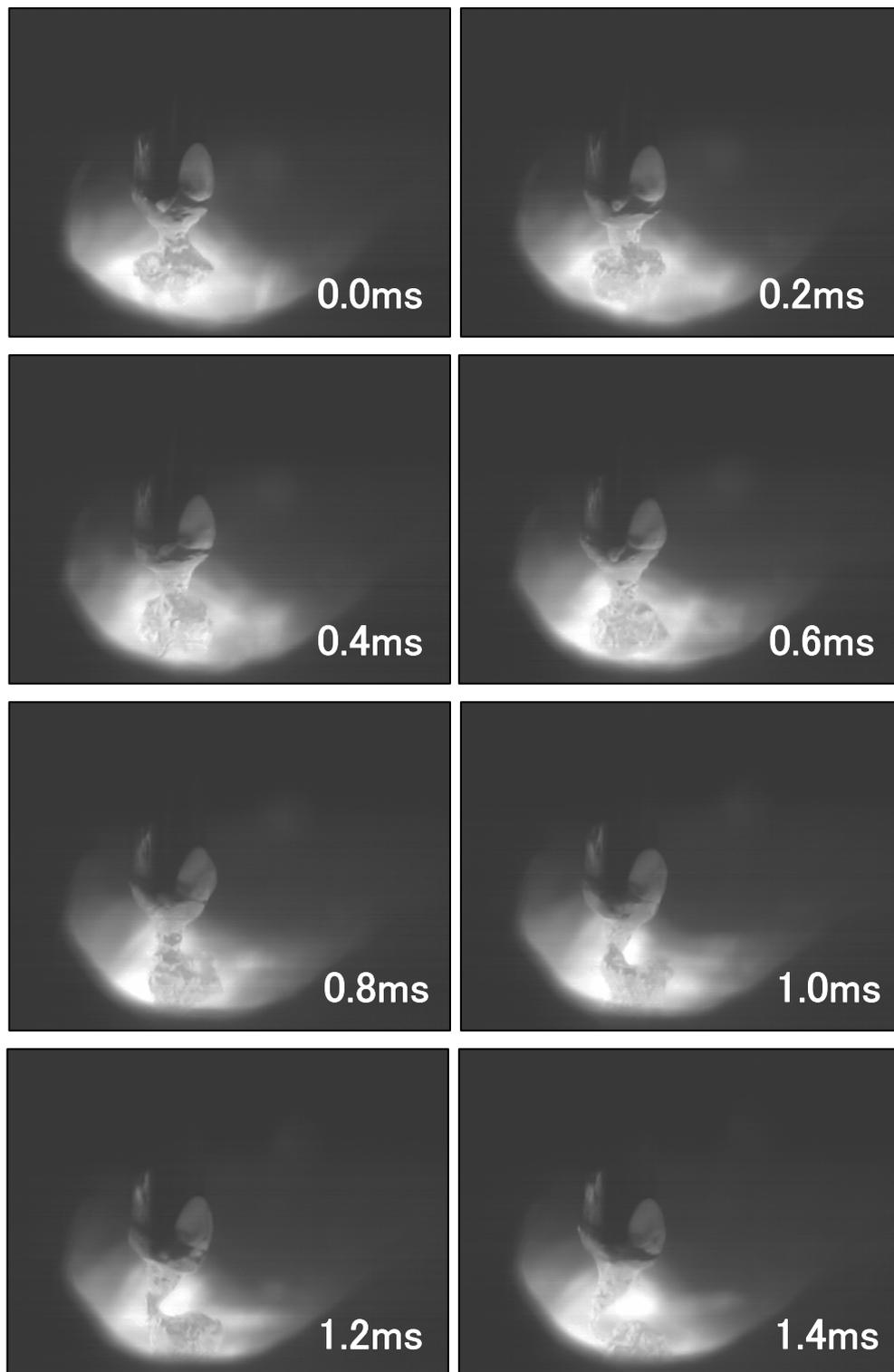


Fig.5.6 Continuous images of droplet in electrode negative welding with R4 wire.

REM を 390ppm 含有する電極ワイヤ R4 を用いた溶接では、ワイヤ先端にアークが集中しワイヤ軸線を中心として母材に対して常に安定な円錐状のアークが観察された。この円錐状アーク中で溶滴の成長と離脱が観察されており、溶滴の移行に対して電磁力とプラズマ気流が有効に作用していると考えられる。一方、固体であるワイヤ先端に移行する溶滴とは別の液滴の付着が観察される。これは、アークの集中するワイヤ先端に強い電磁力が作用することでワイヤ先端周辺の溶融金属の一部が押し上げられたと考えられるが、溶滴の移行とは無関係であり、輝度が高く、固体であるワイヤとの境界線が明瞭であることから鉄より低融点かつ高温において輝度の高い酸化物(スラグ)の可能性も考えられる。

5.3.1.2. ワイヤ溶融速度に及ぼすワイヤ突出し長さの影響

Fig. 5.7 および Fig. 5.8 に極性棒プラス(DCEP)および棒マイナス(DCEN)における電極ワイヤ突出し長さ l とワイヤ溶融速度 v の関係を示す。また、この測定より求めたワイヤ突き出し長さ Ex とワイヤ溶融速度 v の関係(1次元の近似式)をTable 5.4に示す。溶接電流は150Aと300Aの2条件とし、電極ワイヤはREMを添加していないR0とREMを390ppm含有するR4を用いた。いずれの条件においてもワイヤの溶融速度は突出し長さとともに増加する傾向を示した。極性DCEPにおけるワイヤの溶融速度は電極ワイヤR0およびR4において大きな差異は認められなかったが全ての測定点においてワイヤR4はR0より僅かに高く、溶接電流300Aにおける電極ワイヤR4のワイヤ溶融速度はR0に対して3~6%高い値が得られた。ワイヤ突出し長さ1mmの増加に対するワイヤ溶融速度の変化(傾き)は、溶接電流150AでR0およびR4ともに1.1mm/s(1.2mm³/s)、溶接電流300AではR0で5.6mm/s(6.3mm³/s)、R4で5.8mm/s(6.6mm³/s)であり、大きな差は生じなかった。ワイヤ突出し長さ0mmにおけるワイヤの溶融速度は、溶接電流150AにおいてR0:57.7mm/s(65.2mm³/s)、R4:65.7mm/s(74.2mm³/s)、溶接電流300AではR0:82mm/s(92.7mm³/s)、R4:86mm/s(97.6mm³/s)と推定される。電極ワイヤR4のワイヤ溶融速度はR0に対して僅かに増加した。その増加量は溶接電流300Aにおいて僅か5%であるがこの差異は明瞭であり、この傾向を明らかにするためには陽極における発熱とワイヤ溶融速度の増加について詳細な解析が必要であると考えられる。

一方、極性DCENにおけるワイヤの溶融速度はREM含有の有無によって大きな差異が生じた。ワイヤ突出し長さ1mmの増加に対するワイヤ溶融速度の変化(傾き)は、溶接電流150Aでは電極ワイヤR0およびR4ともに1.4mm/s、溶接電流300Aでは電極ワイヤR0が5.2mm/s、R4で5.5mm/sであり大きな差異は認められなかったが、ワイヤ突出し長さ0mmにおけるワイヤの溶融速度は、REMを含有するR4が溶接電流150Aで43mm/s、溶接電流300Aで83mm/s、REMを添加していないR0は、溶接電流150Aで79mm/s(1.8倍)、溶接電流300Aで147mm/s(1.8倍)と推定される。陰極におけるアークによる発熱が電極ワイヤのREM含有によって大きく変化したと考えられる。

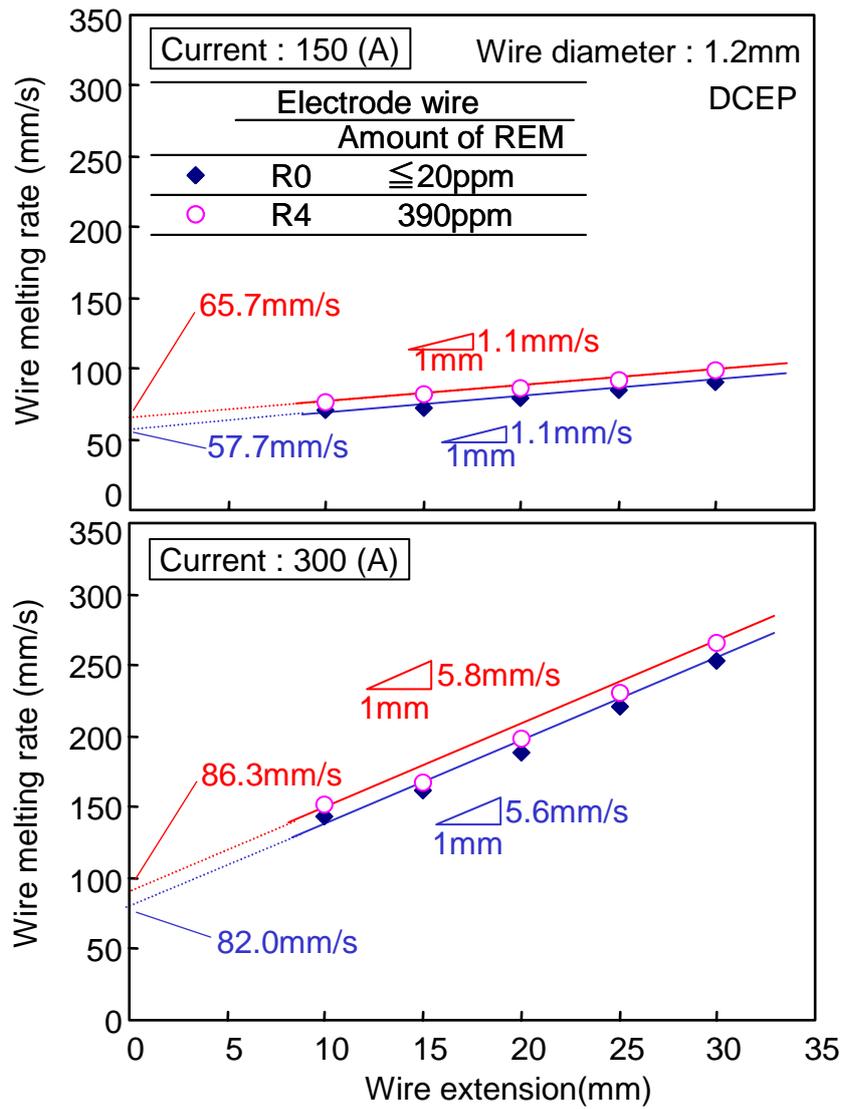


Fig.5.7 Relationship between wire melting rate and wire extension in DCEP.

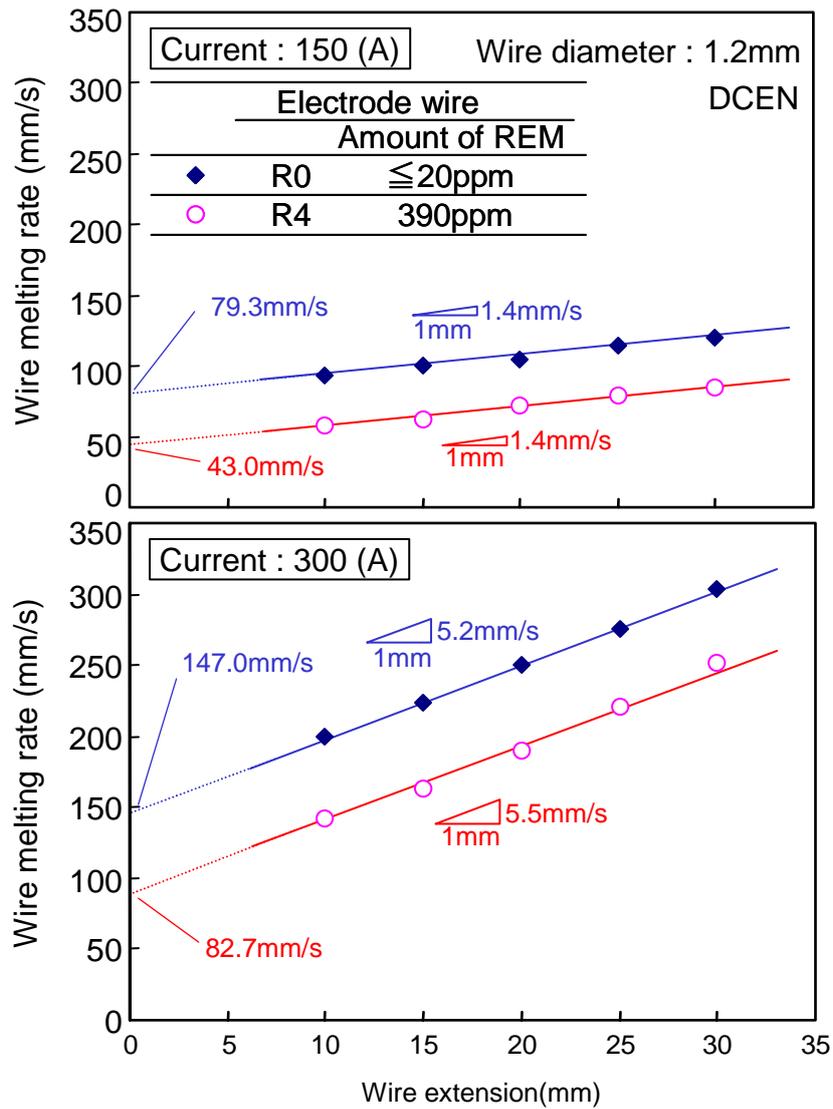


Fig.5.8 Relationship between wire melting rate and wire extension in DCEN.

Table 5.4 Wire melting rate v.

Current (A)	Polarity	Wire	Current (A)	wire melting rate: V (mm/s)
150	DCEP	R0	150	$v = 1.1Ex + 58$
		R4	150	$v = 1.1Ex + 66$
	DCEN	R0	150	$v = 1.4Ex + 79$
		R4	150	$v = 1.4Ex + 43$
300	DCEP	R0	300	$v = 5.6Ex + 82$
		R4	300	$v = 5.8Ex + 86$
	DCEN	R0	300	$v = 5.6Ex + 147$
		R4	300	$v = 5.8Ex + 83$

v : wire melting rate[mm/s]
Ex : wire extension [mm]

5.3.1.3. ワイヤ溶融速度と移行溶滴径に及ぼす溶接電流の影響

Fig. 5.9 に極性棒マイナス (DCEN) における溶接電流とワイヤ溶融速度の関係を示す。ワイヤはREMを含有していないR0と微細スプレー移行が可能R4 (REM390ppm)を用いた。いずれもワイヤ溶融速度は溶接電流の増加とともに増加し、電極ワイヤR0のワイヤ溶融速度に対してR4は一樣に高く、REM添加によって溶接電流域に関係なく陰極の発熱(ワイヤ溶融)に変化が生じたと考えられる。

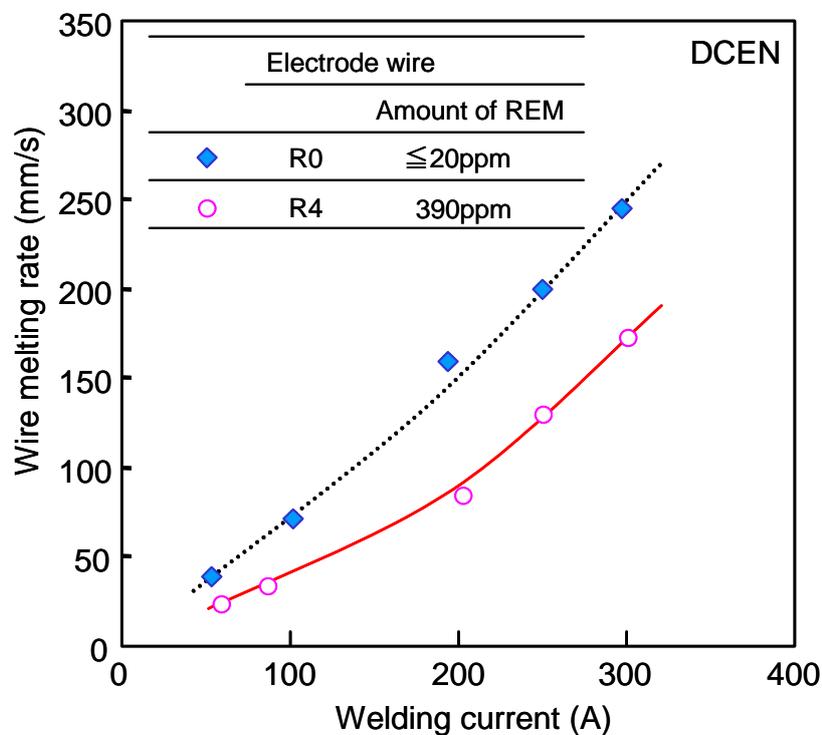


Fig.5.9 Relationship between wire melting rate and welding current.

Fig. 5.10 に極性 DCEN における溶接電流と移行溶滴径の関係を示す。ワイヤは REM を添加していない R0 と REM を 390ppm 含有する R4 を用いた。また、Fig5.11、5.12、5.13 に電極ワイヤ R4 を用いた極性 DCEN の溶接電流 88、203、301A における溶接電流とアーク電圧の波形を示す。REM を添加していない R0 の移行溶滴径の平均は 2.2~3.3mm、溶接電流 200A までは電流とともに僅かに増加する傾向を示し、溶接電流 200~300A においてはほぼ一定の 3.3mm であった。REM を 390ppm 含有する R4 の移行溶滴径の平均は溶接電流 200A までは電流とともに増加する傾向を示し、溶接電流 60、88A においてはそれぞれ 2.6 と 2.9mm であった。溶接電流 88A のアーク電圧波形から溶滴移行は、0.2 から 1 秒周期の非常に粗い(ドロップ)移行であることが分かる。溶接電流 200A における移行溶滴径の平均は 3.6mm にまで増大した。また、アーク電圧波形からは、溶接電流 88A と同様の粗いドロップ移行に加えて溶接電流 301A と同様にアーク電圧と溶接電流が安定した溶接(スプレー移行)が含まれていることが分かる。さらに、溶接電流 250、301A においては溶滴径 1.0~1.2mm の安定した微細溶滴移行が観察され、Fig5.13 に示す溶接電流 301A における溶接電流とアーク電圧の波形からは溶滴移行に伴う電圧の変動が殆どない安定な溶接(スプレー移行)が得られていることが分かる。

これらのことから混合ガス (Ar-20%CO₂) を用いた極性 DCEP の溶接と同様に移行形態がドロップ移行からスプレー移行に遷移するスプレー化臨界電流が炭酸ガスを用いた極性 DCEN の溶接においても存在しており、電磁力が溶滴移行形態に大きく影響していると考えられる。

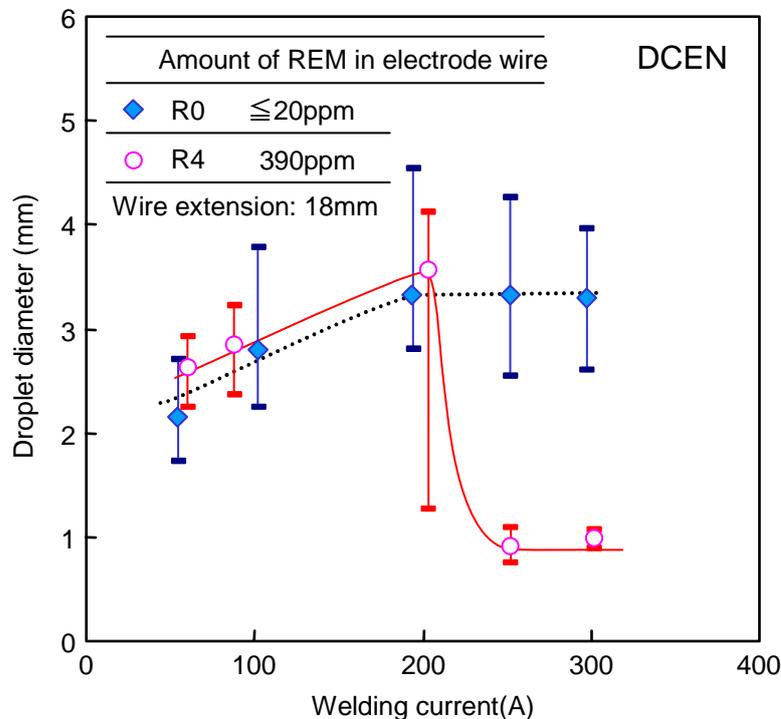


Fig.5.10 Relationship between droplet diameter and welding current.

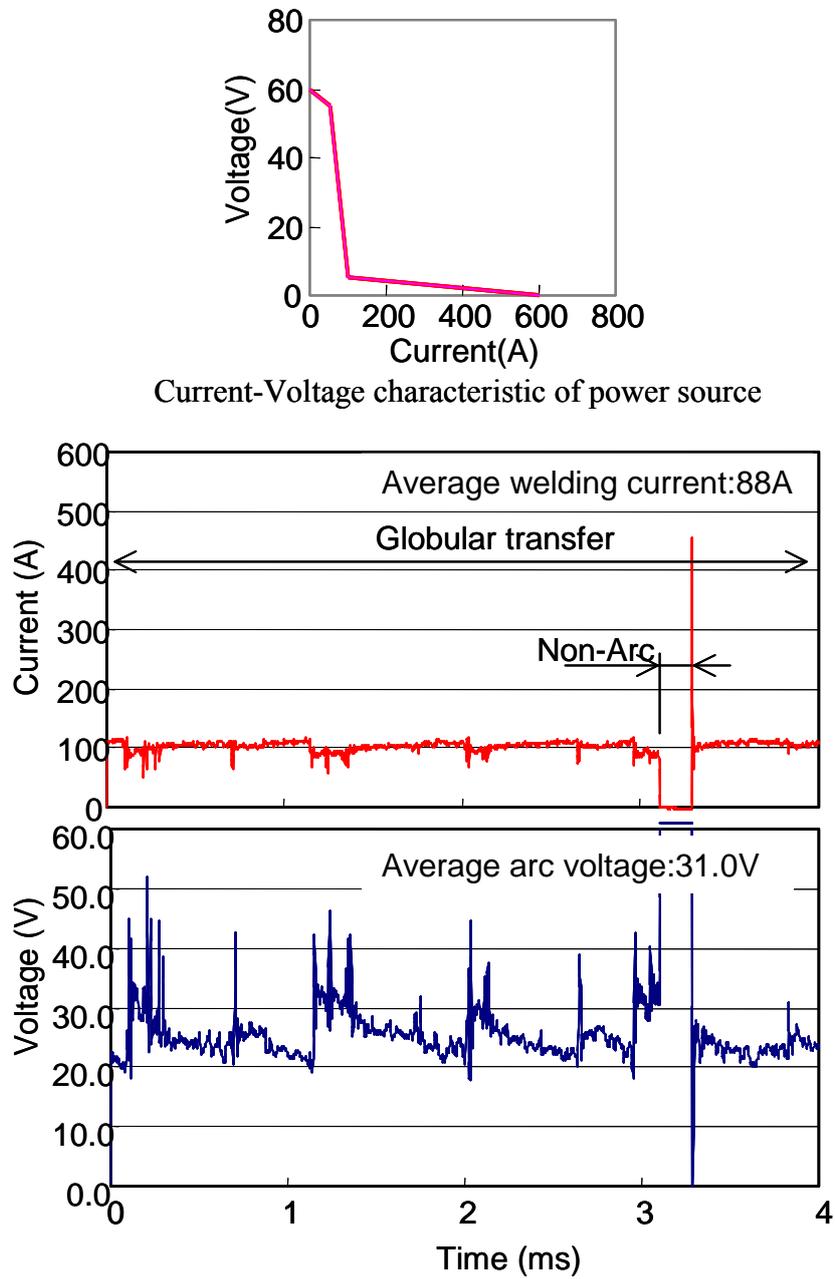


Fig.5.11 Current and voltage waveform used R4 in DCEN.

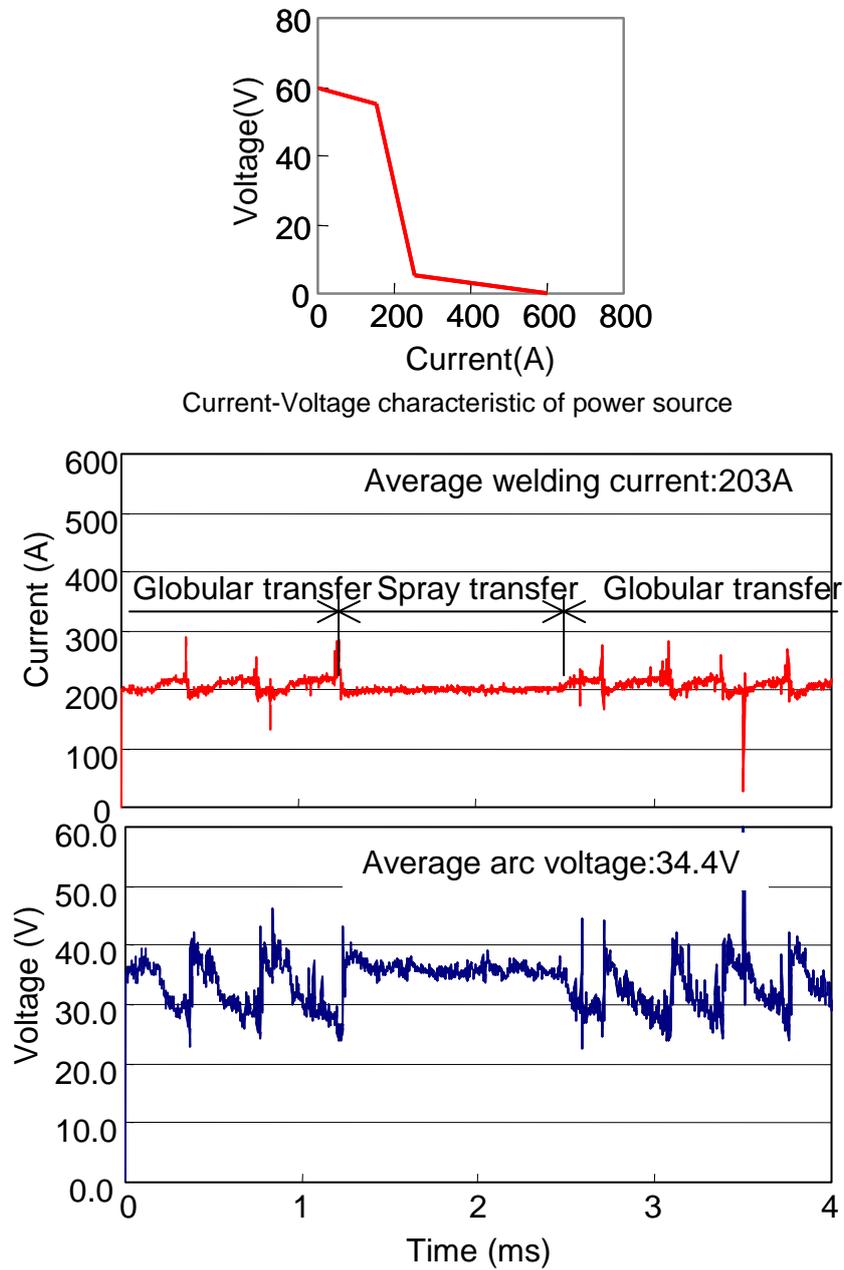


Fig.5.12 Current and voltage waveform used R4 in DCEN.

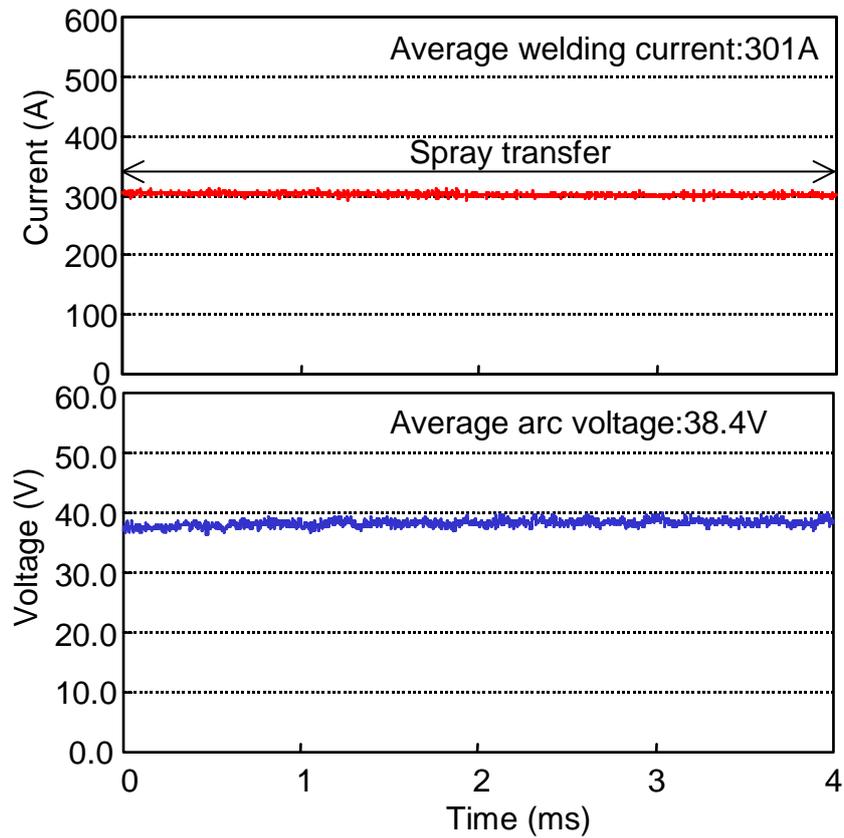
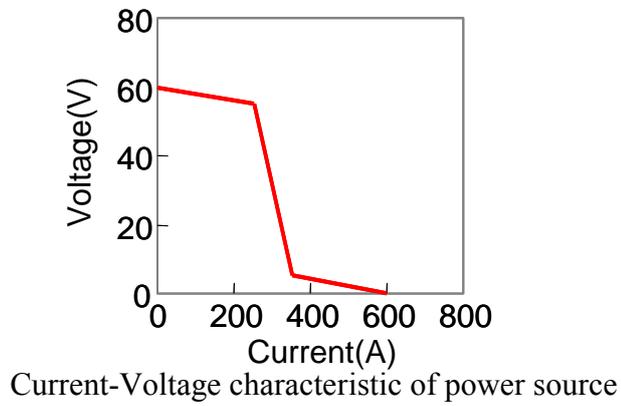


Fig.5.13 Current and voltage waveform used R4 in DCEN.

5.3.2. アーク陰極点径の観測

高速度ビデオを用いてアーク点とその挙動を観察した。Fig. 5.14、5.15 および 5.16 に溶接電流 50～300A におけるアーク点(陰極点)の撮影画像を示す。電極ワイヤはREMを添加していないR0, REMを390ppm含有するR4を用い、極性は棒マイナス(DCEN)とし、高速度カメラは溶接進行方向に対して側面に配置し、高速度カメラのシャッター速度、絞り、ゲイン(明るさ調整)は溶接電流、電極ワイヤに関係なく一定とした。得られた映像の明暗によって定性的ではあるがプラズマの輝度(電流密度)が比較できる。

電極ワイヤR0およびR4のプラズマは溶接電流とともに輝度とその面積の広がりが増えられた。REMを含有していない電極ワイヤR0を用いた溶接電流50, 100Aのアーク点は輝度が低く不明瞭であるのに対して、REM量390ppmの電極ワイヤR4を用いた溶接の

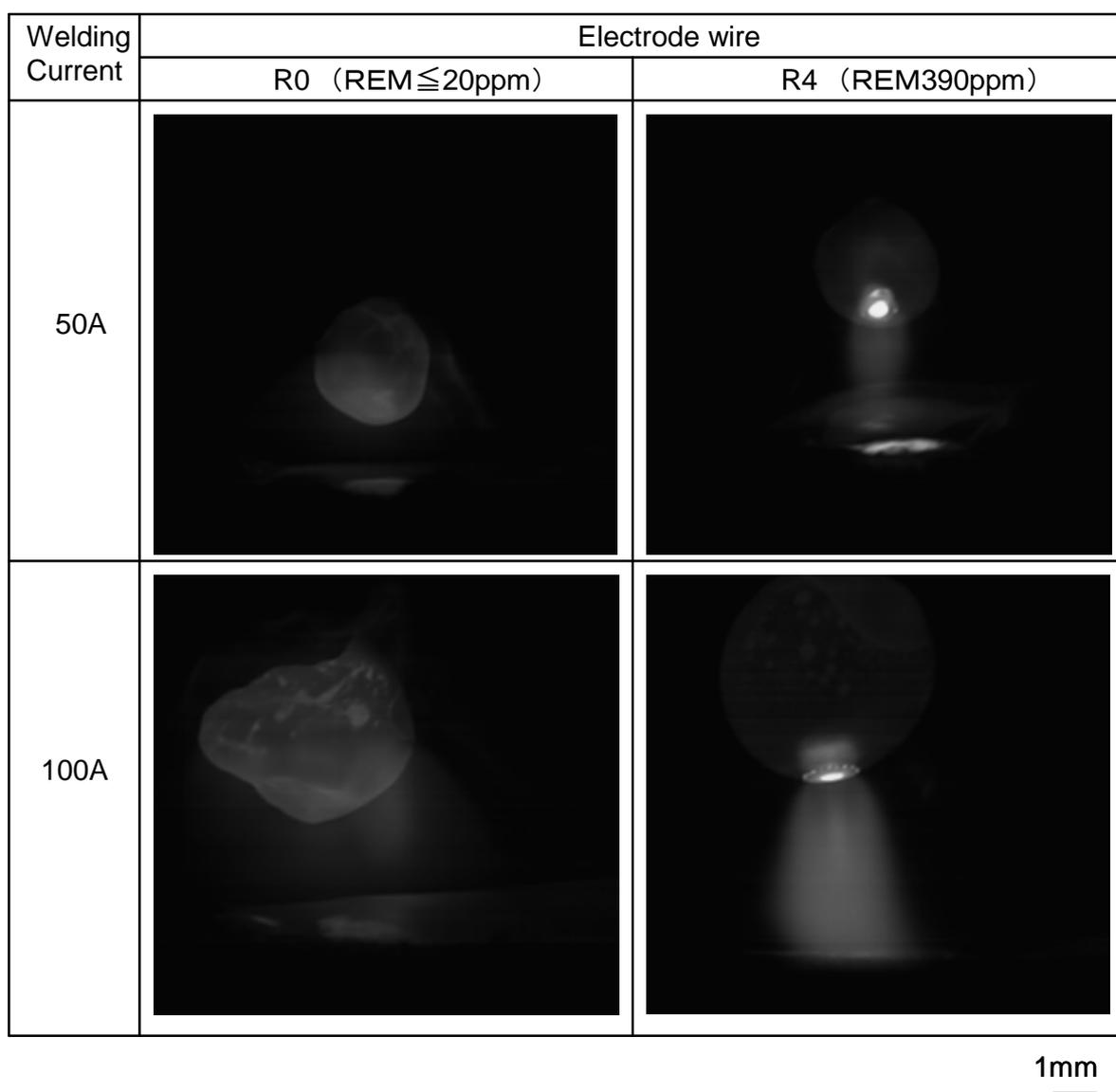


Fig.5.14 Comparison of arc behavior in electrode negative welding.

アーク点は溶滴直下に集中し、中心部に高い輝度(1次フレイム、例: Fig. 5.14 右上写真の中央≒0.5mmΦ)が観察された。また、R4の溶滴は粗大ではあるがR0に対して凹凸の少ない安定した表面形状が観察された。

溶接電流200Aにおいて、REMを添加していないR0のアーク点は固体であるワイヤ端とそれに懸垂する溶滴の境界部まで広がる現象が、REM量390ppmの電極ワイヤR4においては、粗大な溶滴の移行に加えてほぼワイヤ径と同径の微細溶滴移行(スプレー移行)が観察された。Fig. 5.12に示した溶接電流200Aの電流電圧波形における安定した領域がこの微細溶滴移行と考えられる。

Fig. 5.17に溶接電流とアーク点径の関係を示す。アーク点は、高速度ビデオ観察によりその直径と高さを求め、溶滴径よりもアーク点径が小さい場合は楕円として、溶滴径

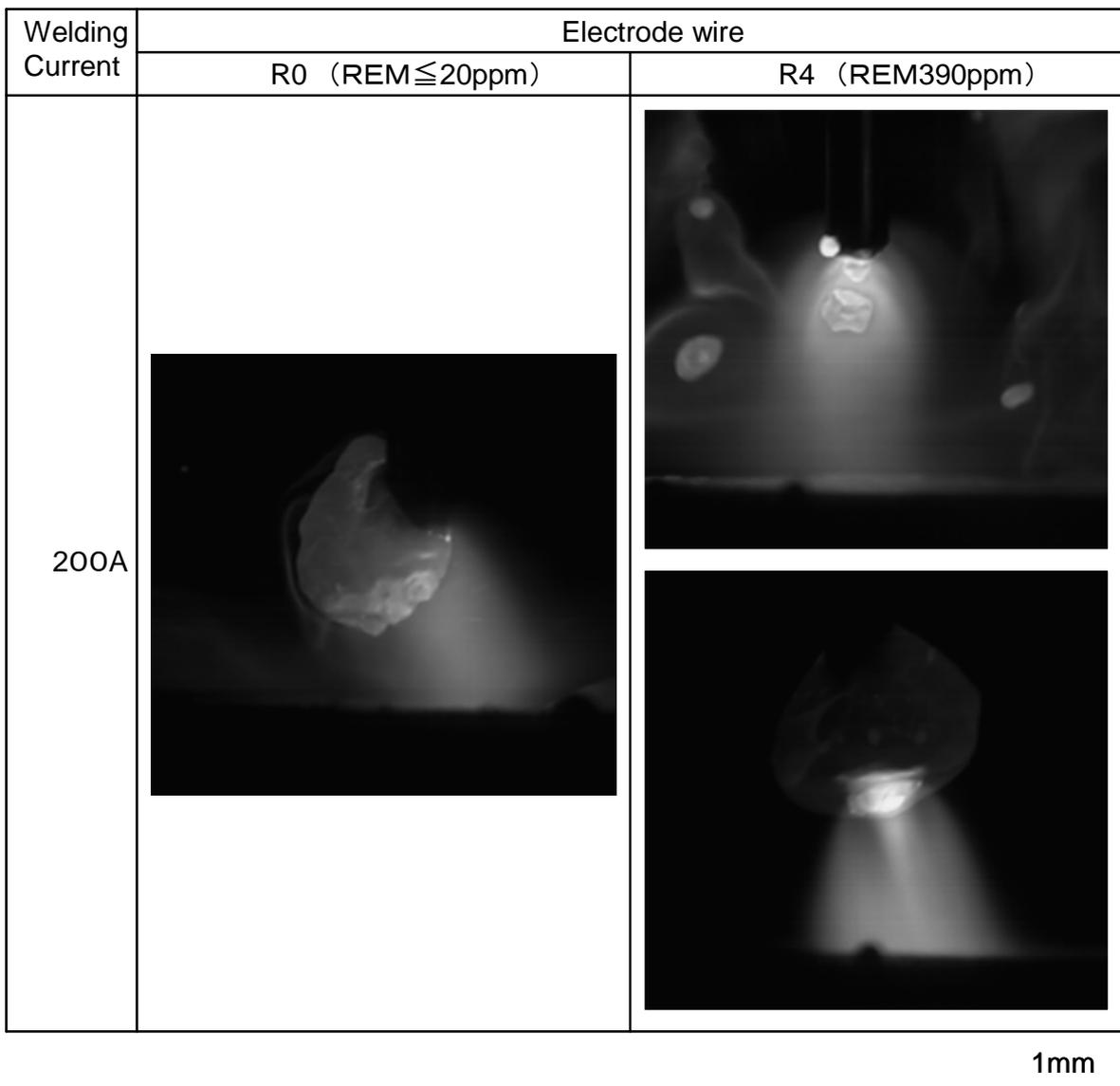


Fig.5.15 Comparison of arc behavior in electrode negative welding.

よりも大きい場合は円錐(溶滴移行直後の観察)としてその面積を求め、それを平面としてアーク点径を求めた。Fig. 5.18 に溶接電流と電流密度の関係をそれぞれ示す。電流密度は溶接電流をアーク点の面積で割ることで求めた。電極ワイヤ R0 および R4 とともに溶接電流とともに増加し、REM 量 390ppm の R4 の電流密度は、輝度の高い1次フレームのみを電流経路とした場合は $2.2\sim 8.6\times 10^8 \text{ A/m}^2$ 、2次フレームを含め平均化した場合の電流密度は $1.4\sim 3.2\times 10^8 \text{ A/m}^2$ 、REM を添加していない R0 を用いた溶接では1次フレームが観察されず、2次フレームを平均化した場合の電流密度は $0.49\sim 0.84\times 10^8 \text{ A/m}^2$ であり、電極ワイヤ R4 における電流密度の $1/3\sim 1/4$ であった。電極ワイヤのREMの含有によって電流密度に大きな変化が生じた。

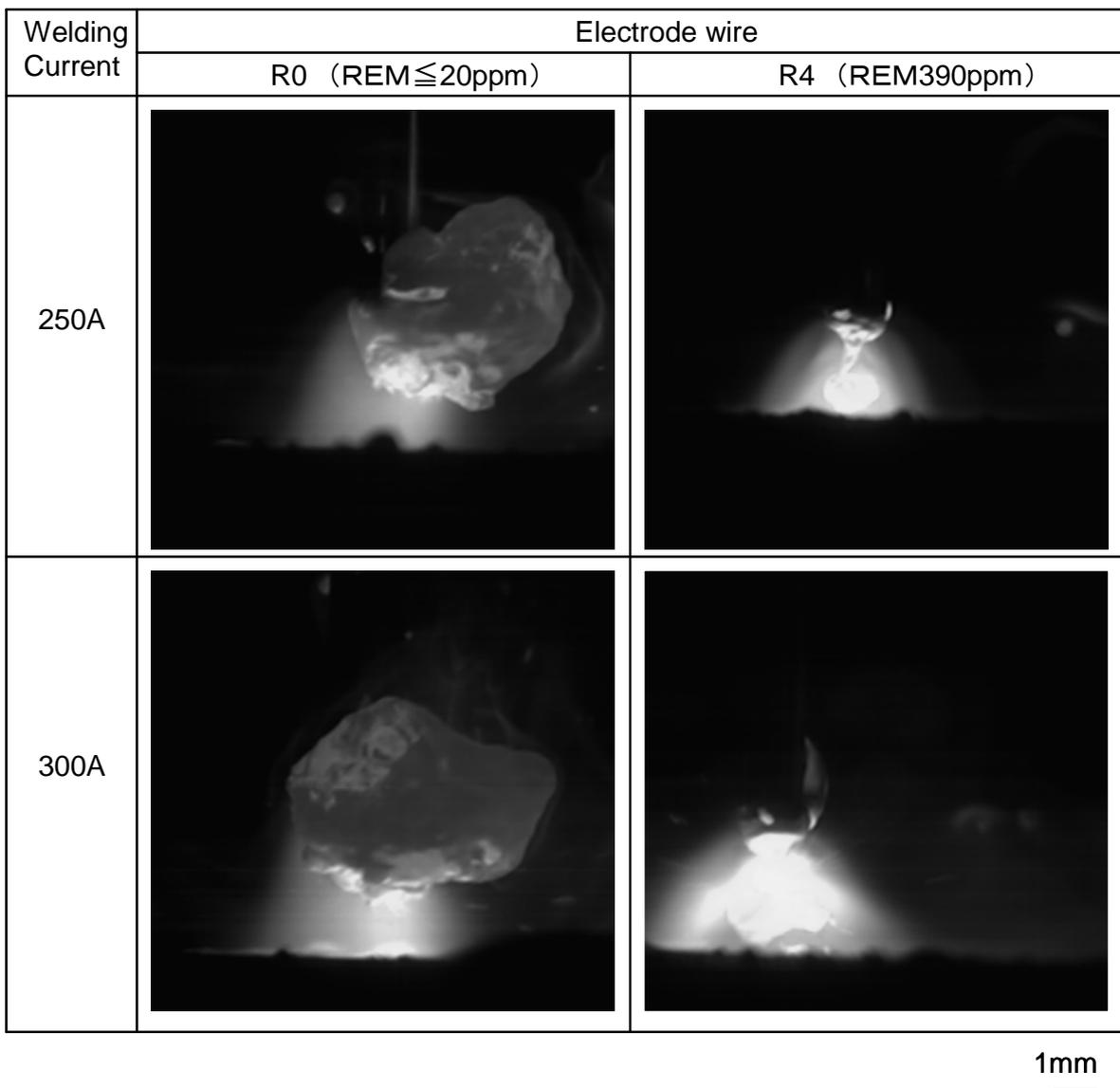


Fig.5.16 Comparison of arc behavior in electrode negative welding.

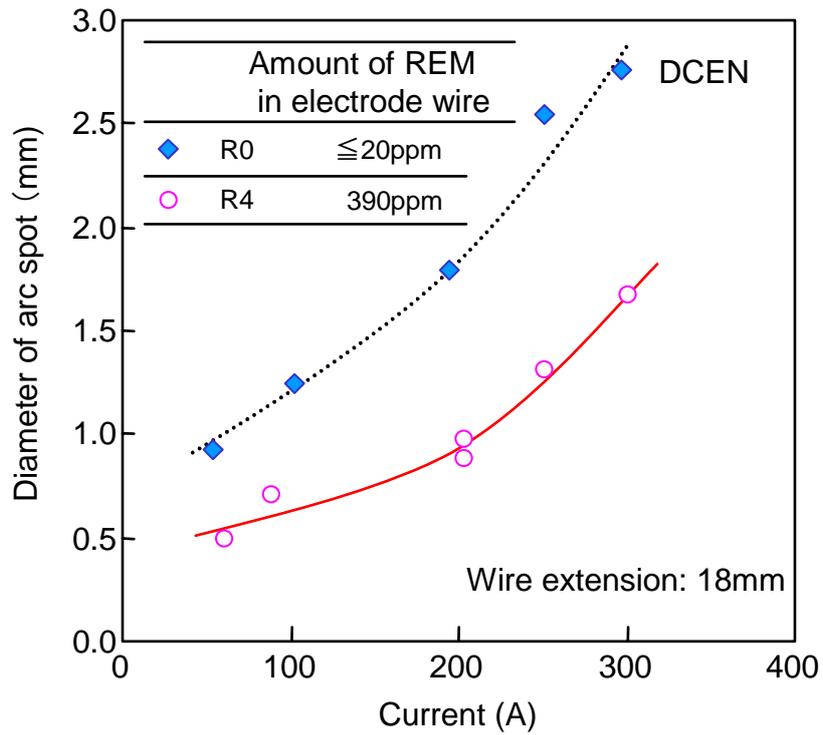


Fig.5.17 Relationship between arc spot diameter and welding current.

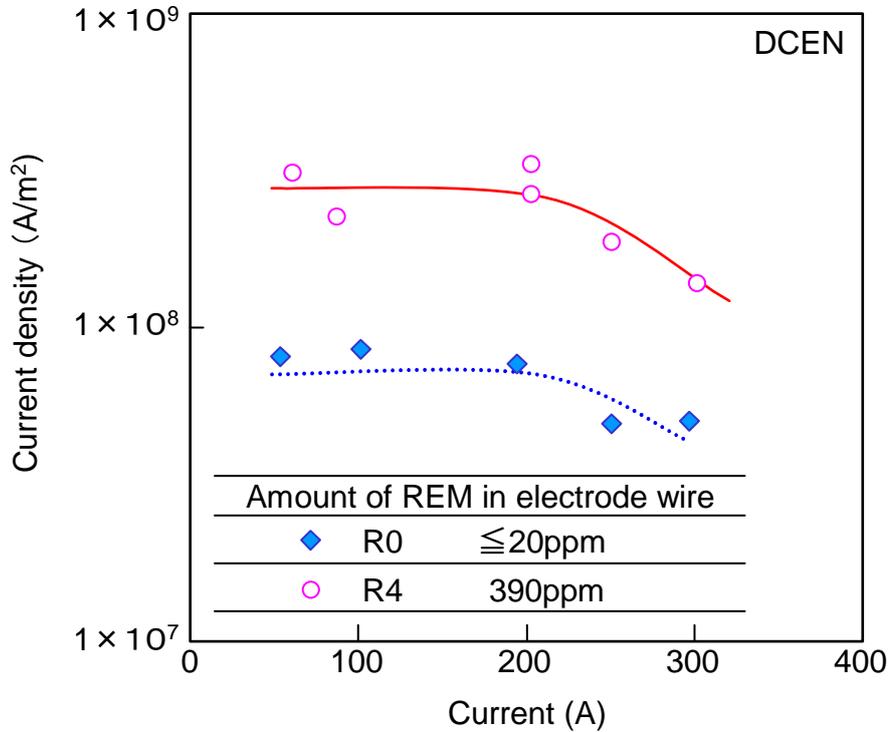


Fig.5.18 Relationship between current density and welding current.

5.3.3. 溶滴の保有熱量と温度

Fig. 5.19 に電極ワイヤの給電チップからの突出しとその発熱を模式的に示す。放射による熱損失が無いものとした場合の溶滴の発熱量 Q [J/s] は保有熱量 H_0 [J/mm³] から (2) 式で得られる。

$$Q = H_0 v S \quad [\text{J/s}] \quad (2)$$

ここで、ワイヤの溶融速度 v [mm/s]、ワイヤの断面積 S [mm²] である。

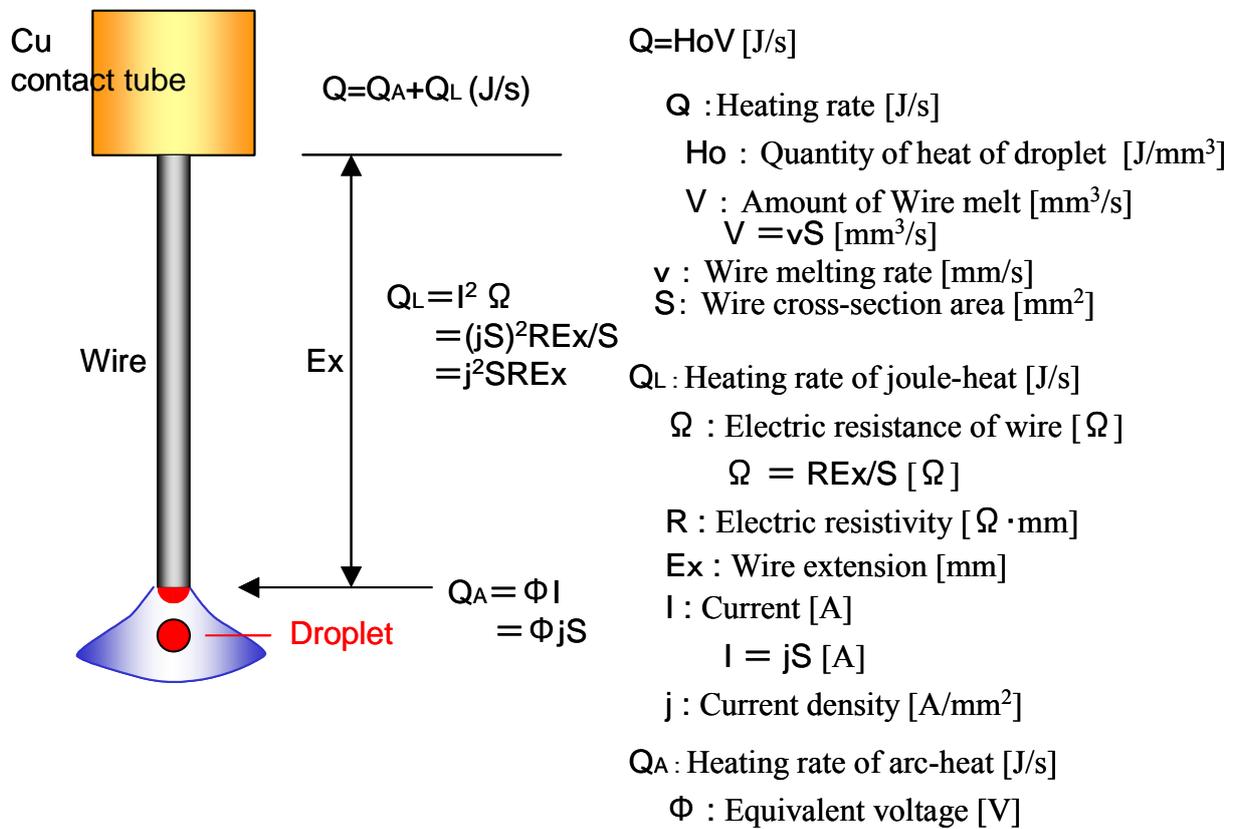


Fig.5.19 Schematic illustration of wire extension and heating rate.

発熱量 Q [J/s] は、突出し部 (長さ Ex [mm]) でのジュール発熱 Q_L [J/s]、アークによる発熱 Q_A [J/s]の和であり(3)、(4)、(5)式が得られる。

$$Q = Q_L + Q_A \quad [\text{J/s}] \quad (3)$$

$$Q = H_0 v S = \phi j S + j^2 R Ex S \quad [\text{J/s}] \quad (4)$$

$$H_0 v = \phi j + j^2 R Ex \quad [\text{J/s} \cdot \text{mm}^2] \quad (5)$$

(5)式より電極ワイヤの溶融速度式が得られる⁵⁻⁸⁾。

$$v = \frac{1}{H_0} (\phi j + R Ex j^2) \quad [\text{mm/s}] \quad (6)$$

ここで、 j は電流密度 [A/mm²] ($j = I/S$ 、 I は溶接電流[A]、 S はワイヤの断面積[mm²])、

H_0 は溶滴の熱量 [J/mm³]、 R は電気抵抗率 [$\Omega \cdot \text{mm}$]、 Ex は電極ワイヤの突出し長さ [mm] である。

電極ワイヤの電気抵抗率は常温では低く ($27 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$)、鋼合金の電気抵抗率は温度とともに増加し、約 1200K 以上では何れの鋼種においてもほぼ $120 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$ に収束する (Fig5. 1)。平田はワイヤ突出し部でのジュール発熱による温度上昇は突出し長さと同接条件によって変化すると報告している⁷³⁾。突出し 20mm におけるワイヤが給電チップを出てから溶融されるまでの時間は、ワイヤ溶融速度より溶接電流 300A で 0.08~0.11 秒、150A で 0.19~0.26 秒であり、この間にワイヤはジュール発熱により昇温すると考えられる。発熱量は電流の 2 乗 (150A に対して 300A では 4 倍) と時間に比例する。ジュール発熱 (時間、電気抵抗と電流の 2 乗の積) を比熱で割ることで求めた温度は、電気抵抗率 $120 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$ とした場合、電流 300A、通電時間 0.1s で 1700K、電流 150A、通電時間 0.2s で 960K であった。ワイヤの発熱はジュール発熱に加えて溶滴からの熱伝導を考慮する必要があるが短時間であることからその影響は小さいと考えられる。Fig. 5. 1 に示した電極ワイヤ R0 の電気抵抗率に最も近い 0.033C-0.55Mn-0.173Cr-3.47Ni 合金の電気抵抗率から、電気抵抗率 R は溶接電流 150A で $85 \times 10^{-5} [\Omega \cdot \text{mm}]$ 、溶接電流 300A で $120 \times 10^{-5} [\Omega \cdot \text{mm}]$ とした。比熱 C は 0.033C-0.55Mn-0.173Cr-3.47Ni 合金の 348~1048K の平均値 $0.77 [\text{J/g} \cdot \text{K}]$ を用いた。

電極ワイヤの突出し長さ l と溶融速度の関係から得られた実験式 $v=aEx+b$ (Table 5.4) と(6)式の関係より溶滴の保有熱量 H_0 [J/mm³]、アークによるワイヤ溶融の等価電圧 ϕ [V]、溶滴温度 T_m [K]は(7)、(8)、(9)式で得られる。

$$\frac{R E x j^2}{H_0} = a E x \text{ より、 } \frac{R j^2}{H_0} = a \text{ よって}$$

$$H_0 = \frac{R j^2}{a} \text{ [J/mm}^3\text{]} \quad (7)$$

$$\frac{1}{H_0} \phi j = b \text{ より、 } \frac{\phi j}{H_0} = b \text{ よって、}$$

$$\phi = \frac{H_0 b}{j} \text{ [V]} \quad (8)$$

$$T_m = \frac{H_0 - Q_m}{C} + T_0 \text{ [K]} \text{ に (6) 式を代入すると、}$$

$$T_m = \frac{\left(\frac{R j^2}{a M} - Q_m \right)}{C} + T_0 \text{ [K]} \quad (9)$$

ここで、 M はFeの密度(0.0078g/mm³)、 C は鋼の比熱(0.77J/g・K)、 Q_m はFeの融解熱(247J/g(13.8kJ/mol、原子量55.8))、 T_0 は電極ワイヤの初期温度(298K)である。
1mm³の鋼を常温の298Kから1800Kの溶鋼とするために必要な熱量は10.9J/mm³(((1800[K]-298[K])・0.77[J/g・K] + 247[J/g])・0.0078[g/mm³])である。

5.3.3.1. 極性DCEPにおける溶滴の保有熱量と温度

Table 5.5に極性DCEPにおける溶滴の保有熱量と温度を示す。(7)および(9)式より求めた。REMを含有していない電極ワイヤR0の溶滴の保有熱量 H_0 は、溶接電流150Aで14.0J/mm³、溶接電流300Aで15.2J/mm³、REM390ppmを含有する電極ワイヤR4を用いた溶接の溶滴保有熱量は、溶接電流150Aで14.0J/mm³、溶接電流300Aで14.6J/mm³、REMを含有しない電極ワイヤR0の溶滴温度は、溶接電流150Aで2310K、溶接電流300Aで2500K、REM390ppmを含有する電極ワイヤR4の溶滴温度は、溶接電流150Aで2310K、溶接電流300Aで2400Kが得られた。溶接電流150Aにおける溶滴温度は溶接電流300Aと比較して電極ワイヤR0、R4ともに90~190K低い値が得られた。この要因として、溶接電流が低く(入熱が小さく)、溶滴の成長が遅いことによりアーク点とその近傍の過剰な加熱が抑制

され、溶滴内の温度勾配が小さく抑制(均一化)されているのではないかと考えられる。

Table5.5 Metal droplet temperature and equivalent voltage in DCEP.

Electrode wire	Welding current I (A)	Quantity of heat of droplet $H_o(J/mm^3)$	Temperature of droplet T_m (K)	Equivalent voltage $\Phi_A(V)$
R0	150	14.0	2310	6.1
	300	15.2	2500	4.7
R4	150	14.0	2310	6.9
	300	14.6	2400	4.7

5.3.3.2. 極性 DCEN における溶滴の保有熱量と温度

Table 5.6 に(6)および(8)式より求めた極性 DCEN における溶滴の保有熱量と温度を示す。REM を添加していない電極ワイヤ R0 の溶滴保有熱量は溶接電流 150A で $10.9J/mm^3$ 、溶接電流 300A で $16.3J/mm^3$ 、REM390ppm を含有する電極ワイヤ R4 を用いた溶接の溶滴保有熱量は溶接電流 150A で $10.7J/mm^3$ 、溶接電流 300A で $15.3J/mm^3$ 、電極ワイヤ R0 の溶滴温度は溶接電流 150A で 1780K、溶接電流 300A で 2670K、REM390ppm を含有する電極ワイヤ R4 の溶滴温度は溶接電流 150A で 1740K、溶接電流 300A で 2490K が得られた。REM の含有(390ppm)によって溶滴の保有熱量は約 2~7%、溶滴温度は約 40~180K 低い値が得られた。ワイヤ溶融速度の低下 45% (Fig. 5.8, $Ex=0mm$) と溶滴の保有熱量の変化から電極ワイヤの REM 含有(390ppm)によって陰極点における発熱量は半減したと考えられる。

Table5.6 Metal droplet temperature and equivalent voltage in DCEN.

Electrode wire	Welding current I (A)	Quantity of heat of droplet $H_o(J/mm^3)$	Temperature of droplet T_m (K)	Equivalent voltage $\Phi_c(V)$
R0	150	10.9	1780	6.5
	300	16.3	2670	9.1
R4	150	10.7	1740	3.5
	300	15.3	2490	4.8

溶接電流 150A の溶滴の保有熱量と温度は溶接電流 300A に対して大きく低下し、溶滴の温度は、融点に近い温度(1740~1780K)が得られた。経験的に極性 DCEN における低電流溶接は鋼板の溶込みが浅く薄鋼板の溶落ち防止に効果があり、この検討結果から、その1因として溶滴温度の低下が考えられる。また、Fig. 5. 14 に示す溶接電流 50、100A での溶滴の画像は、Fig. 5. 16 に示す溶接電流 250、300A での溶滴の画像に対して暗く、溶滴の温度が低いことが推測される。特に、電極ワイヤ R4 を用いた溶接電流 50、100A における撮影した溶滴サイズは直径 3~5mm(R0 とほぼ同等)であるがその輪郭はほとんど確認できない。

溶滴温度は熱量計や2色放射温度法を用いた実測が試みられている⁷³⁻⁷⁹⁾。平田らは熱量計を用いた実測において 1900~2300K、2色放射温度法を用いた測定において 2300~2500K と報告している⁷⁵⁻⁷⁶⁾。また、山崎、田中、中田らは2色放射温度法を用いた測定において 2100~2450K と報告している⁷⁷⁻⁷⁹⁾。この実験によって求めた溶滴温度は、極性 DCEN における溶接電流 150A での結果を除きこれらの実測における測定結果に対してほぼ同等かやや高い結果となった。

5. 4. 考察

5. 4. 1. アークによるワイヤ溶融の等価電圧と電子電流率

(8)式より、陽極および陰極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧を求めた。また、電流密度 j [A/mm²]は(10)式で与えられる^{1, 16, 72)}。

$$j = j_i + j_e \quad [\text{A/mm}^2] \quad (10)$$

ここで、 j_i はイオン電流密度[A/mm²]、 j_e は電子電流密度[A/mm²]である。イオン電流密度 j_i は陽極においては ≈ 0 と考えられるが陰極における電流は電子の放出とイオンの衝突の総和であり、(11)式で与えられる電子電流率 s によって陰極での発熱は大きく影響される^{1, 16, 72)}。

$$s = \frac{j_e}{j} \quad (11)$$

5. 4. 1. 1. 陽極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧

(8)式より、極性 DEEP における REM を添加していないワイヤ R0 のアークによるワイヤ溶融の等価電圧は溶接電流 150A で 6. 1V、溶接電流 300A で 4. 7V、REM 量 390ppm のワイヤ R4 は溶接電流 150A で 6. 9V、溶接電流 300A で 4. 7V が得られた。

Fig. 5. 20 に陽極における電気の流れを模式的に示す。陽極においては大きなエネルギーを必要とするイオンの放出はなく陽極における電流は 100%が電子の移動によると考えられる。この電子はアーク柱から陽極降下領域で加速され、アーク中よりもポテンシャルの低い陽極金属内に吸収されることで発熱すると考えられる^{1, 16, 72)}。

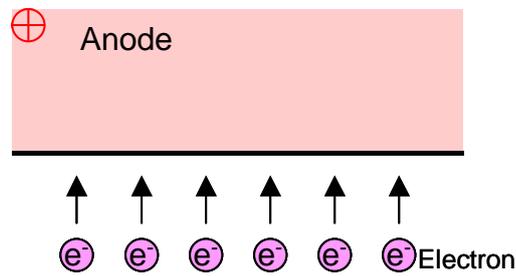


Fig.5.20 Anode phenomenon of CO₂ arc welding.

陽極への入熱 Q_A [J/s] および陽極におけるワイヤ溶融の等価電圧 ϕ_A [V] は放射による熱損失が無いものとする (12) 式および (13) 式で与えられる^{1, 11, 16, 72)}。

$$Q_A = j(V_A + V_{WA} + V_T) = j \phi_A \quad [\text{J/s}] \quad (12)$$

$$\phi_A = V_A + V_{WA} + V_T \quad [\text{V}] \quad (13)$$

ここで、 V_A は陽極降下電圧[V]、 V_{WA} は陽極物質の仕事関数に相当する電圧、

V_T はアーク柱 (プラズマ) の等価電圧、 $V_T = \frac{5}{2} \cdot \frac{k T_e}{e}$ で与えられる。

ここで、 e は電子電荷 1.602×10^{-19} coulomb、 k はボルツマン定数 1.38×10^{-23} J/K、 T_e は電子温度である。電子温度を 10,000K と仮定すると $V_T = 2.2\text{V}$ が得られる。

V_{WA} は電極ワイヤの材質によって与えられる。今回の試験に供したいずれの電極ワイヤは 97%以上が Fe で占められおり、 V_{WA} としてはいずれの供試ワイヤも Fe の酸化物 FeO の仕事関数 3.8 V と考えられる。 $V_T = 2.2\text{V}$ とすれば陽極降下電圧 V_A (V) は、溶接電流 150A においては電極ワイヤ R0 で 0.1V、電極ワイヤ R4 で 0.9V、溶接電流 300A では電極ワイヤ R0 および R4 とともに -1.3V が得られた。安藤らは、陽極降下電圧 V_A は低電流域で高く、電流の増加とともに減少し中電流域を過ぎると上昇に転じると報告している¹¹⁾。また、田中、牛尾らはラングミュア・プローブ法を用いて陽極近傍の空間電位を測定し、溶接電流 50A では正の陽極降下、溶接電流 150A では負の陽極降下が得られ、アーク電流が陽極降下に大きな影響を与えると報告している⁸⁰⁻⁸²⁾。

一方、電極ワイヤへのREM添加の有無はアークによるワイヤ溶融の等価電圧、ワイヤ溶融速度、溶滴の保有熱量および温度に対して大きな差を生じさせなかった。このことから、陽極における発熱とアーク現象に対してREMの微量添加は大きな影響を与えないと考えられる。

5.4.1.2. 陰極におけるアークによるワイヤ溶融の等価電圧

(8)式より、REMを添加していないワイヤR0のアークによるワイヤ溶融の等価電圧は溶接電流150Aで6.5V、溶接電流300Aで9.1V、REM量390ppmのワイヤR4は溶接電流150Aで3.4V、溶接電流300Aで4.8Vであり、電極ワイヤへのREMの添加の有無によって等価電圧は大きく異なる結果が得られた。

Fig. 5.21 に陰極における電気の流れを模式的に示す。陰極における電流密度 j [A/mm²] は、電子の放出 j_e [A/mm²] とイオンの衝突 j_i [A/mm²] の総和であり、イオンは陰極への衝突と電子との再結合によってエネルギーを陰極に与え、電子は陰極物質の仕事関数 V_{wc} [V] に相当するエネルギーをもってアーク空間に放出されることで陰極を冷却すると考えられる。

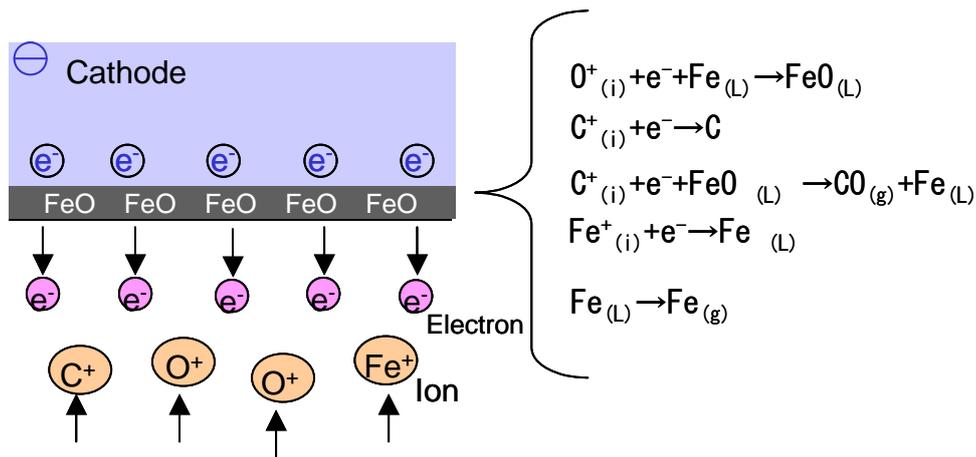


Fig.5.21 Cathode phenomenon of CO₂ arc welding.

極性 DCEN における電極ワイヤ R0, R4 のワイヤ溶融速度 v 、溶滴の保有熱量 H_0 および温度 T_m に大きな違いが生じた要因として電流密度 j [A/mm²] に対する j_e [A/mm²] の比率 (電子電流率 s 、(11)式) の変化が考えられる。陰極における発熱量 Q_c [J/s]、陰極降下等価電圧 ϕ_c [V] および電子電流率 s の関係は(14)、(15)および(16)式で与えられる^{1,16,72)}。

$$Q_c = \phi_c \cdot j = j(1-s)(V_c + V_l - V_{wc} + V_T) - j \cdot s \cdot V_{wc} \quad [\text{J/s}] \quad (14)$$

$$\phi_C = (1-s)(V_C + V_I - V_{WC} + V_T) - s \cdot V_{WC} \quad [V] \quad (15)$$

$$s = \frac{V_C + V_I - V_{WC} + V_T - \phi_C}{V_C + V_I + V_T} \quad (16)$$

ここで、 V_C は陰極降下電圧で約 10V^{1, 11, 16, 72)}、 V_I は電離電圧で炭素は 11.3V、酸素は 13.8V、鉄は 7.9V とされている^{1, 11, 16, 72)}。 V_T はアーク柱 (プラズマ) のエネルギー等価電圧(≒ 1V)^{1, 11, 16, 72)}である。

Table 5.7 に(16)式より求めた電子電流率 s を示す。炭素の電離電圧 11.3V での電子電流率 s は、電極ワイヤ R0 の溶接電流 150A で 0.54、溶接電流 300A で 0.42、電極ワイヤ R4 の溶接電流 150A で 0.67、溶接電流 300A で 0.61 が得られた。酸素の電離電圧 13.8V での電子電流率 S は、電極ワイヤ R0 の溶接電流 150A で 0.58、溶接電流 300A で 0.48、電極ワイヤ R4 の溶接電流 150A で 0.70、溶接電流 300A で 0.65 が得られた。

Table5.7 Rate of electron current of cathode in DCEN.

Electrode wire	Welding current : I (A)	Equivalent voltage : Φ_c (V)	Ratio of electron in current : S			
			Ionization voltage : V_I (V)			
			11.3 (C→C ⁺ +e ⁻)	13.6 (O→O ⁺ +e ⁻)	7.9 (Fe→Fe ⁺ +e ⁻)	Average 10.9
R0	150	6.5	0.54	0.58	0.46	0.53
	300	9.1	0.42	0.48	0.32	0.41
R4	150	3.5	0.67	0.70	0.61	0.67
	300	4.8	0.61	0.65	0.55	0.61

田中、中田らは TIG 溶接アークの金属蒸気の挙動について解析をおこない鉄金属蒸気のアークプラズマ中での存在と電流密度への影響を報告している⁸⁴⁾。そこで鉄の電離電圧 7.9V での電子電流率 s を求めた。電極ワイヤ R0 では溶接電流 150A で 0.46、溶接電流 300A で 0.32、電極ワイヤ R4 では溶接電流 150A で 0.61、溶接電流 300A で 0.55 が得られた。これらイオンとして考えられる元素の比率は不明であるがそれぞれ等量(数)として得られる平均電離電圧 10.9V を用いて電子電流率 s を求めると電極ワイヤ R0 を用いた溶接電流 150A で 0.53、溶接電流 300A で 0.41、REM を 390ppm 含有する電極ワイヤ R4 を用いた溶接電流 150A で 0.67、溶接電流 300A で 0.61 が得られた。このことから REM

添加によるワイヤ溶融速度低下の要因として電子放出能の高いREMによって電子電流率 s が向上(1.3~1.5倍)することで電極ワイヤの発熱が抑制されたと考えられる。

さらに、酸素イオンはFeとの反応により酸化エネルギーを溶滴に与えると考えられる。反応式と反応熱は $\text{Fe(固体)} + 1/2\text{O}_2(\text{気体}) \rightarrow \text{FeO(固体)} + 241,090\text{J/mol (at 297K)}$ ⁸⁵⁾、アボガドロ数 6.023×10^{23} より、FeOの生成エネルギーは1原子当り 4.00×10^{-19} J、これを電子電荷 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ (クーロン) で除すことで等価電圧 2.5V が得られる。陽イオン全てが酸素イオンであると仮定すると酸素の電離電圧(13.8V)に酸化反応による等価電圧 2.5V を加えた電子電流率 s は、電極ワイヤR0の溶接電流 150A で 0.62、溶接電流 300A で 0.52、REMを390ppm含有する電極ワイヤR4を用いた溶接電流 150A で 0.73、溶接電流 300A で 0.68 が得られた。酸化エネルギーを考慮することで電子電流率 s は 0.03~0.04 上昇しており、溶滴の発熱と温度、電流と電子の密度およびアーク現象の解明において冶金反応を十分に考慮する必要があると考えられる。

5.4.2. 極性DCENにおける陰極の電流密度と温度の関係

アーク放電は電子の放出機構から熱陰極型と非熱陰極型に分類される。熱陰極型のアーク放電では、金属内で自由に運動している電子が高温に加熱されることで仕事関数に相当するエネルギーを持って飛び出す。この電流(電子)密度は次式Richardson-Dushmanの熱電子放出電流密度式^{1, 11, 16, 72)}で求めることができる。

$$j_2 = A T_c^2 e^{\left(-\frac{e\phi}{kT_c}\right)} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (17)$$

ここで、 j_2 は電流密度 $[\text{A/m}^2]$ 、 A は定数 $6 \times 10^5 [\text{A/m}^2 \cdot \text{K}^2]$ ^{1, 11, 16, 72)}、

e は電子電荷 : 1.602×10^{-19} [coulomb]、 T_c は陰極点の温度[K]、

k はボルツマン定数 1.38×10^{-23} [J/K· ϕ] である。

Fe、FeO および REM(Ce:La:Y=5:3:2)のそれぞれの仕事関数 ϕ 4.3、3.8 および 3.0V についてそれぞれ(17)式を用いた電流(電子)密度 j_2 [A/m²] と陰極点温度 T_c [K] の関係を Fig. 5.22 に示す。REM量 390ppmの電極ワイヤR4の電流密度は、輝度の高い1次フレームおよび2次フレーム内で平均化することでそれぞれ $2.2 \sim 8.6 \times 10^8$ A/m² および $1.4 \sim 3.3 \times 10^8$ A/m² を得ている。同様にREMを添加していない電極ワイヤR0は2次フレームで平均化することで電流密度 $0.49 \sim 0.84 \times 10^8$ A/m² を得ており、これに電子電流率 s を乗じて電子密度を得ることができる。(16)式で得られた電子電流率 s の範囲を含む 0.4~1.0 における電子密度と陰極点温度を Table 5.7 に示す。電子電流率 s の範囲 0.4~1.0 における陰極点温度の変化は小さくREMを添加していない電極ワイヤR0で得られた陰極点温度範囲は 3450~3820K、REM 390ppmを含有する電極ワイヤR4で得られた陰極点温度

範囲は3030~3780Kであり、ワイヤの溶融速度より求めた溶滴温度1740~2670Kより900~1300K高い。田中、山崎らの赤外線二色放射測温法による炭酸ガスアーク溶接のアーク点は局所的に高温部が存在し、その温度は2900~3300Kと報告している⁷⁸⁾。発熱点であるアーク(陰極)点は、溶滴全体の温度より高いと考えられるが鉄の沸点を超えるとは考え難い。Richardson-Dushmanの式(17)、およびFig. 5.22に示す仕事関数と陰極点温度の関係から明らかなように仕事関数が陰極点温度および電流密度に大きな影響を与える。田中らはTIGアーク中のW電極の仕事関数を測定し理論値に対する低下とその要因としてショットキー効果を指摘している⁸⁶⁾。ショットキー効果は電界強度に大きく依存し、電界強度 $8 \times 10^8 \text{V/m}$ において電子放出密度を1400倍に高めると報告されており⁸⁷⁾、その影響についてより詳細な解析が必要であると考えられる。

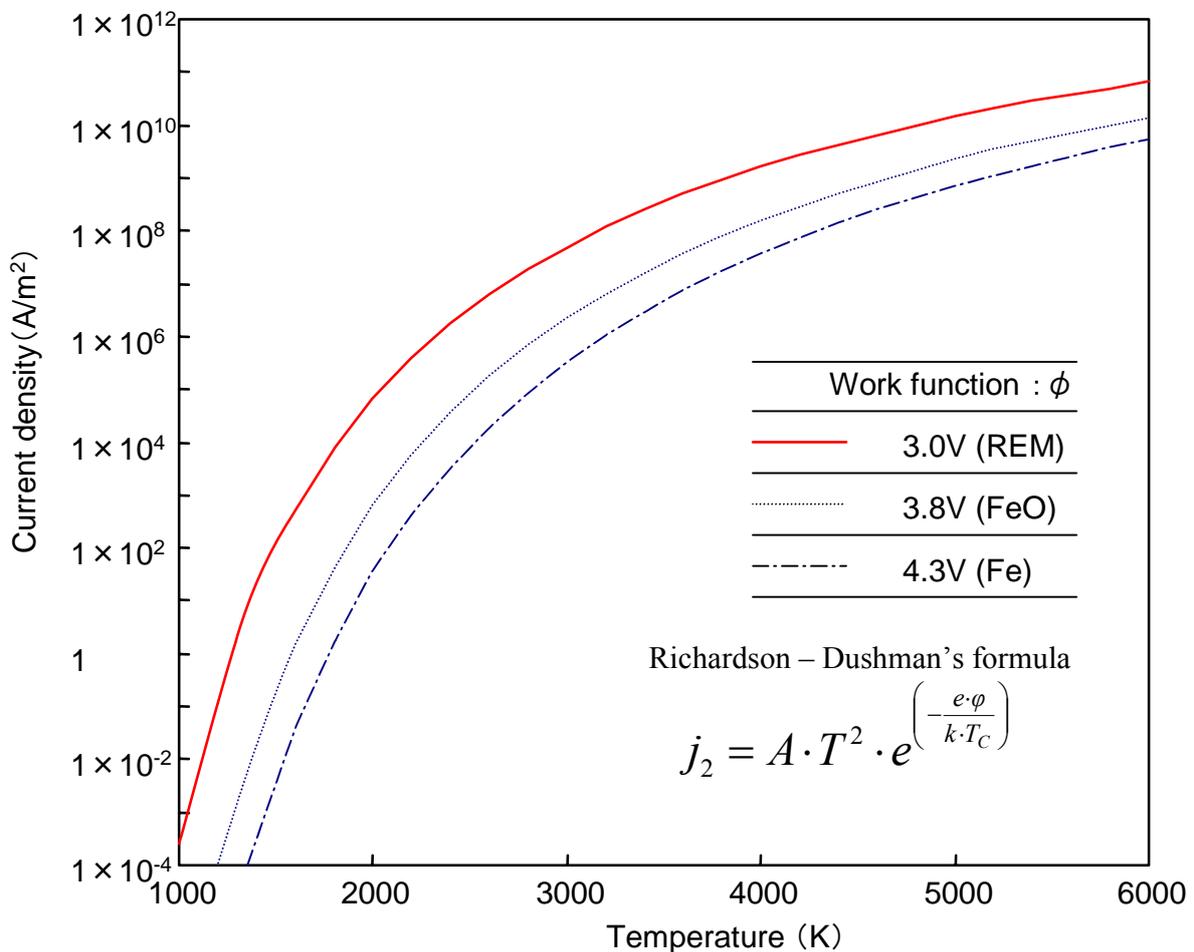


Fig.5.22 Relationship between current density and temperature.

Table 5.8 Temperature of cathode spot

Electrode wire	Current density ($\times 10^8$, A/m ²)	Work function Φ (V)	Rate of electron current	Electron current density	Temperature of cathode spot
			s	J ₂ ($\times 10^8$, A/m ²)	T _c (K)
R0	0.49~0.84	3.8 (FeO)	1.0	0.49 ~ 0.84	3670 ~ 3820
			0.8	0.39 ~ 0.67	3610 ~ 3750
			0.6	0.29 ~ 0.50	3540 ~ 3670
			0.4	0.20 ~ 0.34	3450 ~ 3580
R4	2.2~8.6	3.0 (REM: Ce,La,Y)	1.0	2.20 ~ 8.60	3370 ~ 3780
			0.8	1.76 ~ 6.88	3310 ~ 3710
			0.6	1.32 ~ 5.16	3230 ~ 3610
			0.4	0.88 ~ 3.44	3130 ~ 3490
	1.4~3.2		1.0	1.40 ~ 3.20	3250 ~ 3470
			0.8	1.12 ~ 2.56	3190 ~ 3410
			0.6	0.84 ~ 1.92	3120 ~ 3330
			0.4	0.56 ~ 1.28	3030 ~ 3220

一方、渡辺らは大電流 MIG 溶接法におけるアーク現象と溶滴移行現象の解明において気化にともなう蒸気の発生によって溶滴の移行形態が影響を受けると報告している⁸⁸⁾。活性雰囲気下の陰極点は酸化物(FeO 他)によって覆われていると考えられるが陰極現象においては金属の気化による瞬間的な陰極点圧力の上昇と金属(Fe)イオンによるアーク現象への影響を十分考慮しなければならないと考えられる。

5.4.3. 極性 DCEN における溶滴移行形態への REM の影響

Fig. 5.23 に炭酸ガスアーク溶接現象の模式図を示す。極性 DCEN における REM を適量含有する電極ワイヤを用いた微細スプレー移行現象と REM を添加していない電極ワイヤの粗大溶滴移行を比較する。REM を適量含有する電極ワイヤを用いた極性 DCEN での炭酸ガスアーク溶接現象の特徴として、ワイヤ下部へのアーク集中、円錐状のアーク形態、微細溶滴移行の3つが挙げられる。松田らは TIG 溶接において REM が熱的に Fe や Al よりも安定で仕事関数は約 3V と最も低く、放出電流密度を高めるため陰極点のアーク集中に効果があると報告している⁵⁾。また、西口らは Ar のガスシールドアーク溶接では、アークの緊縮により陰極点(ワイヤ側アーク点)が集中しストリーミング移行(微細溶滴移行)が観察されたと報告している⁸⁾。この現象は、REM を含有する電極ワイヤを用いた極性 DCEN での炭酸ガスアーク溶接における陰極点の集中と微細溶滴移行現象と類似の現象であると考えられる。

REM を添加していない電極ワイヤ R0 のアーク点(陰極点)は Fig. 5.5 に示すように広く、その発生位置は固体であるワイヤと液体である溶滴との境界部から溶滴下部にかけて激しく変位する。この高速で変位するアーク点によってアークは大きく偏向し、溶滴は表

面の著しい凹凸とともに溶滴全体が大きく変形する。また、アーク点は溶滴下部を激しく変位し、溶滴の移行を妨げる現象とワイヤ径の3倍以上にまで成長した溶滴が観察されている。このアーク点が定まらない要因として金属であるFeの仕事関数は4.3Vであるのに対して酸化物であるFeOの仕事関数は3.8Vであり、電子放出はFeよりFeOが有利であることから陰極点はより電子放出に有利な酸化物を求めて移動すると考えられる。更に、陰極点では高いエネルギー密度によって酸化物を破壊するクリーニング作用⁵⁻⁸⁾が生じ、結果として酸化物の生成と破壊が繰り返されていると考えられる。この不安定な陰極点によって溶滴は移行が妨げられ粗大化すると考えられる。また、陰極点の気化にともなう瞬間的な気圧上昇が溶滴移行の阻害要因として挙げられる。

一方、REMを390ppm含有する電極ワイヤR4の溶接電流50、100Aの溶滴は電極ワイヤR0と同様に粗大であるが、アーク点が集中することで電極ワイヤR0において観察された陰極点の激しい変位は観察されなかった。これは電子放出に有利なREMの効果であると考えられる。また、溶滴の微細化は溶接電流200A以上で観察されており、溶接電流の増加による溶滴の温度上昇、それにとともなう表面張力(粘性)の低下、陰極点の広がり、電磁力の作用が考えられる。また、アーク点が安定化することでREMを添加していない電極ワイヤでは得られなかったアーク中での溶滴の安定成長により溶滴の微細化が達成されたと考える。この溶接電流200Aにおけるアーク形態は円柱状であり、ワイヤ先端から離脱した溶滴の多くが溶融プール周辺に飛散する現象が観察されており、より安定なスプレー移行には、溶接電流250、300Aで観察された円錐状のアーク形態が有効であると考えられる。

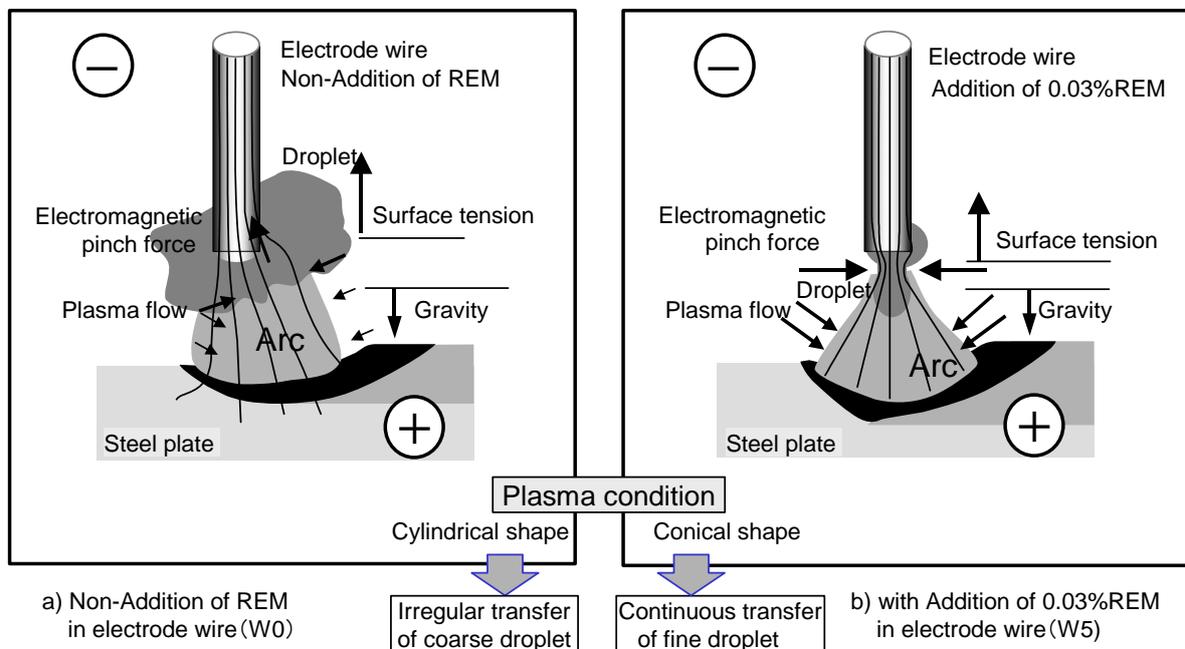


Fig.5.23 Arc phenomena in CO₂ gas shielded arc welding.

円錐状のアークは強いプラズマ気流が円錐の頂点であるワイヤ先端から底辺である鋼板に向かって流れていると考えられ、田中らはA-TIGのアーク現象解明においてプラズマ気流は最大で200m/sに達すると報告されており⁸³⁾、溶滴移行の安定化にはプラズマ気流が極めて重要であると考えられる。

以上のことから、炭酸ガスアーク溶接において極性をDCENとし、電極ワイヤに適量のREMを添加することで得られた溶滴の微細スプレー移行現象の解明には電磁力、プラズマ気流、金属蒸気、陰極点の表面構造、溶滴内の温度分布および溶滴の運動エネルギーを総合的に明らかにし、トータル的な溶滴移行モデルの構築が不可欠であると考えられる。

5.5. 結論

電極ワイヤREM量のワイヤ溶融速度、陰極点および溶滴挙動への影響を調査し次の結論を得た。

- (1) 極性DCEPにおいては、電極ワイヤへのREM添加はワイヤ溶融速度および移行溶滴径に対して明確な影響が認められなかった。これに対して、極性DCENにおいては、REM量200ppm以下ではDCEN特有の高いワイヤ溶融速度と移行溶滴の粗大化、REM量310, 390ppmにおいてはワイヤ溶融速度の減少と移行溶滴の微細化が確認された。
- (2) 極性DCENにおいてREMを390ppm含有する電極ワイヤの移行溶滴径は溶接電流100A以下においては約3mm、溶接電流200Aにおいては3.6mmにまで増大したが粗いドロップ移行に加えてスプレー移行が混在した移行が観察された。さらに、溶接電流250, 301Aにおける溶滴径は1.0~1.2mmの微細溶滴移行が観察された。この炭酸ガスアーク溶接におけるスプレー移行には従来の混合ガスアーク溶接におけるスプレー移行と同様に臨界電流が存在することが確認された。
- (3) 極性DCENにおいて電極ワイヤのREM含有によって陰極点径と電流密度に大きな変化が生じた。REMを添加していない電極ワイヤを用いた溶接では1次フレームが観察されない。2次フレームを平均化した場合の電流密度は $0.49\sim0.84\times 10^8\text{A/m}^2$ であった。REM量390ppmの電極ワイヤを用いた溶接の電流密度は、輝度の高い1次フレームのみを電流経路とした場合は $2.2\sim8.6\times 10^8\text{A/m}^2$ 、2次フレームを含め平均化した場合の電流密度は $1.4\sim3.2\times 10^8\text{A/m}^2$ 、電極ワイヤのREM含有によって電流密度は3~4倍に増加した。
- (4) 熱損失がないものとしてワイヤの溶融速度から溶滴の温度を求めた。得られた溶滴温度は電極ワイヤへのREM含有の有無による明瞭な差は無く、極性DCEPでは2310~2500K、極性DCENでは溶接電流150Aにおいて溶滴温度は融点近くまで低下し、溶接電流300Aでは2490~2670Kであった。
- (5) 極性DCENにおける電子電流率は0.32~0.71が得られた。REM量390ppmの電極ワイヤR4の電子電流率はREMを添加していない電極ワイヤR0に対して1.3~1.5倍高い値が得られており、REM添加によるワイヤ溶融速度低下の要因として電子放出能の高いREMによる電子電流率の増加が考えられる。

- (6) 仕事関数、電子電流率と Richardson-Dushman の式より求めた陰極点温度は 3030 ~3850K が得られた。ワイヤの溶融速度より求めた溶滴温度より 900~1300K 高く、鉄の沸点よりも高いことから、陰極のアーク現象には金属(Fe)の気化と金属イオンを考慮しなければならないと考えられる。
- (7) 極性 DCEN の溶滴移行において、REM を添加していない電極ワイヤ R0 では酸化物の生成と破壊により陰極点の変位し溶滴の移行を妨げることで粗大化すると考えられ、電子放出に有利な REM の添加は、アーク点の固定とアークの不規則な動きを抑制することで溶滴の成長と離脱が安定化し微細スプレー移行に繋がったと考えられる。

第6章 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術の実用化

6.1. 緒言

炭酸ガスアーク溶接において極性を従来の棒プラス(DCEP)に対して逆の棒マイナス(DCEN)とし、REM(rare earth metal、希土類金属)を適量添加したワイヤを用いることで極低スパッタ化を達成した(第4章)。この現象として250A以上の高電流溶接においてワイヤ先端を頂点とする円錐状のアークプラズマとワイヤ先端から熔融池へ移行する溶滴の「微細スプレー移行」が確認された(第4, 5章)。しかし、溶接電流200A以下において溶滴は粗大である。この粗大な溶滴はスパッタを増大させるが、溶滴の表面形状およびアーク形態は安定であり、電流の波形制御の適用と最適化による溶滴移行の安定化とスパッタ低減を検討した。また、溶接電流300Aにおいて微細スプレー移行とともに深い溶込みが得られることを確認(第4章)しており、この特性を利用した狭開先溶接について検討し、I形 - Gap5mm およびレ形 25° - Gap2mm の高能率溶接施工技術を確立とその施工能率を評価した。さらに、狭開先溶接を適用した実大の柱-梁継手の載荷試験を実施し、その変形能力を評価した。

6.2. 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術

従来の炭酸ガスアーク溶接法の極性が棒プラス(DCEP)であるのに対して、開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法は陰極点の安定化を目的として適量のREM(rare earth metal)を電極ワイヤに添加し、極性を棒マイナス(DCEN)とした溶接法である。

6.2.1. 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接用ワイヤ

極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接用電極ワイヤ(Si-Mn-Ti-REM系)の化学組成の一例をTable 6.1に示す。JIS Z 3312におけるYGW11に該当し、微量のREMを添加したワイヤである。Table 6.2に全溶着金属試験結果を示す。490N/mm²級鋼用溶接ワイヤとして十分な強度と靱性を有している。また、溶接ワイヤ中に微量のREMを含有させることで、強度レベルに関係なく極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接としての溶接諸特性が得られることを確認しており、540N/mm²級および590N/mm²級鋼用溶接ワイヤへの展開も容易である。

Table 6.1 Example of chemical composition of developed welding wire (mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S	Ti	REM
Si-Mn-Ti-REM KC-500*	0.05	0.7	1.6	0.01	0.01	0.2	0.04

* JIS Z 3312 YGW11

Table 6.2 Chemical composition and mechanical properties of welding metal

Chemical composition (mass%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Absorbed energy 0°C (J)
0.06	0.40	0.96	0.01	0.01	470	560	32	160

6.2.2. 極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の特徴

極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法は、ワイヤ先端を頂点とする安定した円錐状アークを形成し、最も理想的な溶滴移行形態と考えられる微細スプレー移行を炭酸ガスアーク溶接において初めて実現した技術である。以下に、開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の特長を列挙する。

- (1) スパッタ発生量は従来の 1/10 に低減する。
- (2) 溶接ビード近傍のスパッタ付着がない。
- (3) ヒューム発生量は従来の 1/2 に低減する。
- (4) 溶込み深さは従来の 1.5 倍に増加する (Fig. 6.6)。
- (5) アーク音がソフト、音圧は従来の 1/2 に低減する。

6.3. 薄板の溶接

開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法は、微細なスプレー移行の実現により極低スパッタ化を可能にしたが、この効果を得るには、比較的高い電流 (250A 以上) を必要とする。Fig. 6.1 (a) に板厚 2.0mm の T 隅肉溶接継手の溶接部外観と断面マクロ組織を示す。155c m/min の高速溶接では、高速化により微細なスパッタの発生が増加したがスパッタ付着のない平滑な溶接ビード形状を得た。その溶込みは板厚の 80% を超えており大きなギャップを有する溶接、あるいは、板厚 1.6mm 以下の溶接においては溶落ちの発生が懸念される。より薄板の安定な溶接には、より低電流域でのアークの安定化が必要である。

6.3.1. 電流波形制御の適用

Fig. 6.2 に低電流溶接における電流波形制御を示す。溶接電源の基本特性 (定電圧特性) において溶接電流は電圧変動に相反する出力特性により電圧変動を抑制する。この基本特性に加えて波形制御は、電圧の急激な減少から短絡を検知し電流出力を制御することで安定な溶滴移行と再アークを実現する。溶滴と溶融池の短絡が避けられない低電流溶接には不可欠な制御技術である。

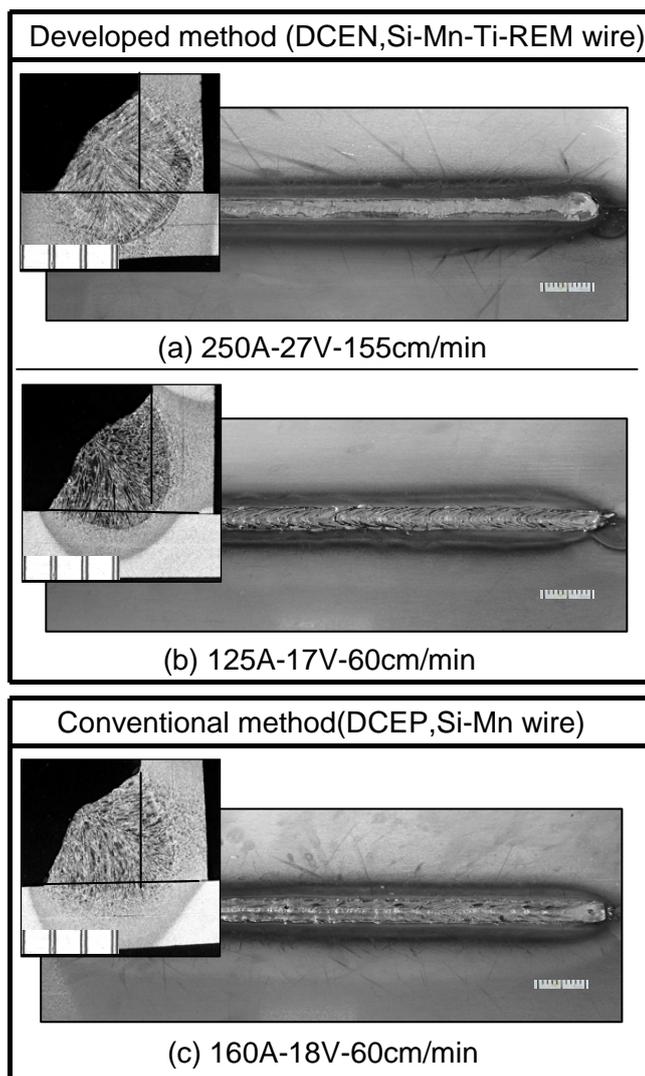


Fig.6.1 Welding bead appearance and cross-sectional macroscopic organization.

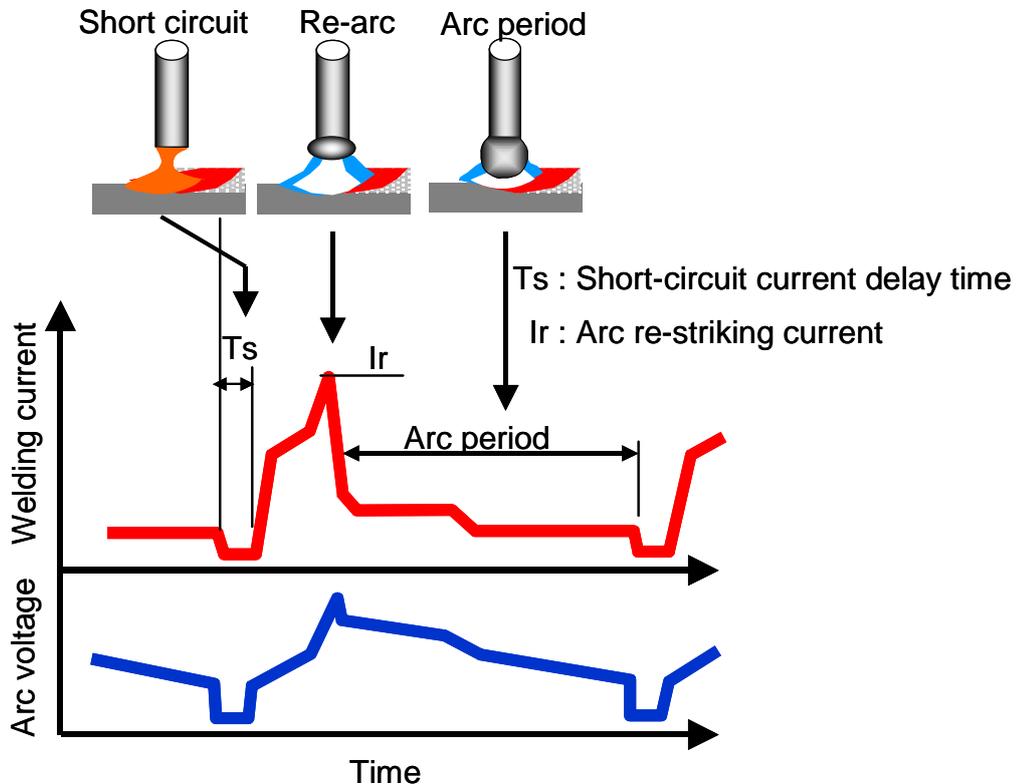
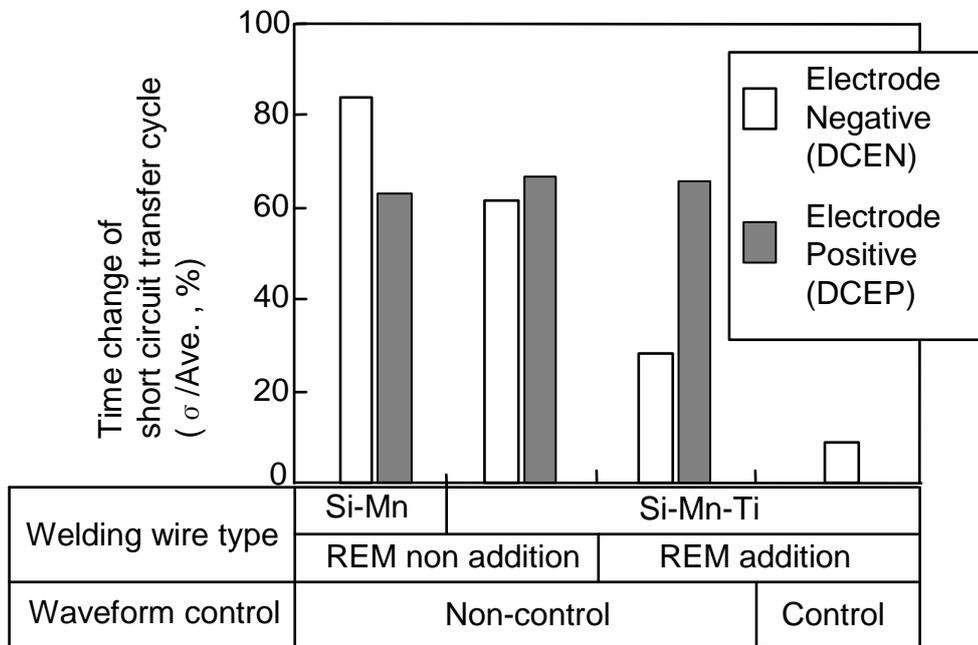


Fig.6.2 Waveform control of welding current.

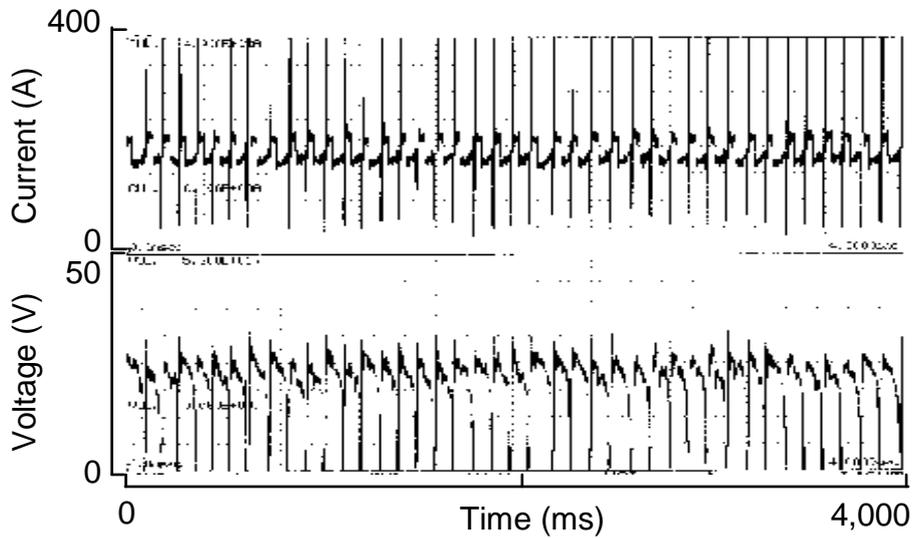
開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の低電流溶接における溶滴は従来の炭酸ガスアーク溶接の溶滴よりもさらに粗大となり移行回数は毎秒数回にまで減少する。この極性棒マイナス特有の粗大な溶滴に合った波形制御パラメータについて検討し、最適パラメータとして短絡移行期間 $T_a=10\text{ms}$ 、再アーク電流 $I_b=400\text{A}$ を得た。また、アーク期間の段階的な低電流化により溶滴の移行回数を約 2 倍に増加させることが可能である。

Fig. 6.3 に電流電圧波形と溶滴の短絡移行周期のバラツキを示す。従来の極性棒プラス(DCEP)では、溶接ワイヤ組成の違いによる短絡移行周期のバラツキに大きな差は認められないが、極性棒マイナス(DCEN)ではREMを適量添加したワイヤを用いることで短絡移行周期のバラツキは1/2に減少し、最適波形制御の適用により1/6に減少した。

Fig. 6.4 に溶接電流とスパッタ発生量の関係を示す。スパッタ発生量は波形制御の適用により溶接電流 200A以下の領域で大幅に低減した。



a) Time change of short-circuiting-transfer cycle



b) Waveform of current and voltage

Fig.6.3 Short circuit transfer cycle.

6.3.2. 新しい波形制御電源の適合性

近年の溶接用電源は高速インバータ回路とデジタル制御技術によりその特性が飛躍的に向上し、極性棒マイナス(DCEN)のアーク特性にも対応した電源が開発されている。この新しい波形制御電源は、短絡期間中の橋絡柱が細くなる(くびれ)現象を検出することで再アーク発生を的確に予測し、アーク電流の急減制御を行うとともに、アーク再生後のアーク電流を最適に制御する CBT(Controlled Bridge Transfer)法を採用している⁸⁹⁾。この新電源と開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の適合性について調査した。

Fig. 6.5 にスパッタ発生量とその粒度構成を示す。板厚 2.0mm の T 継手を溶接トーチ角 45°、前進角 10° とし、ワイヤ突出し長さ 12mm で隅肉溶接した。スパッタ発生量は、従来の標準条件(160A-18V-60cm/min) に対して、開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法を用いた高電流高速条件(250A-27V-155cm/min) は 49%、新電源を用いた低電流低速条件(125A-17V-60cm/min) では 10% にまで激減した。

Fig. 6.1 (b) に低電流低速条件での溶接ビード外観と断面マクロ組織を示す。溶込みは板厚の約 2 割に抑制されており、より板厚の薄い鋼板の溶接にも十分適用可能である。また、試験体へのスパッタ付着はなく、溶接を必須とする自動車足回り部品的美観と塗装性の向上、付着スパッタの除去工数の削減が期待される。

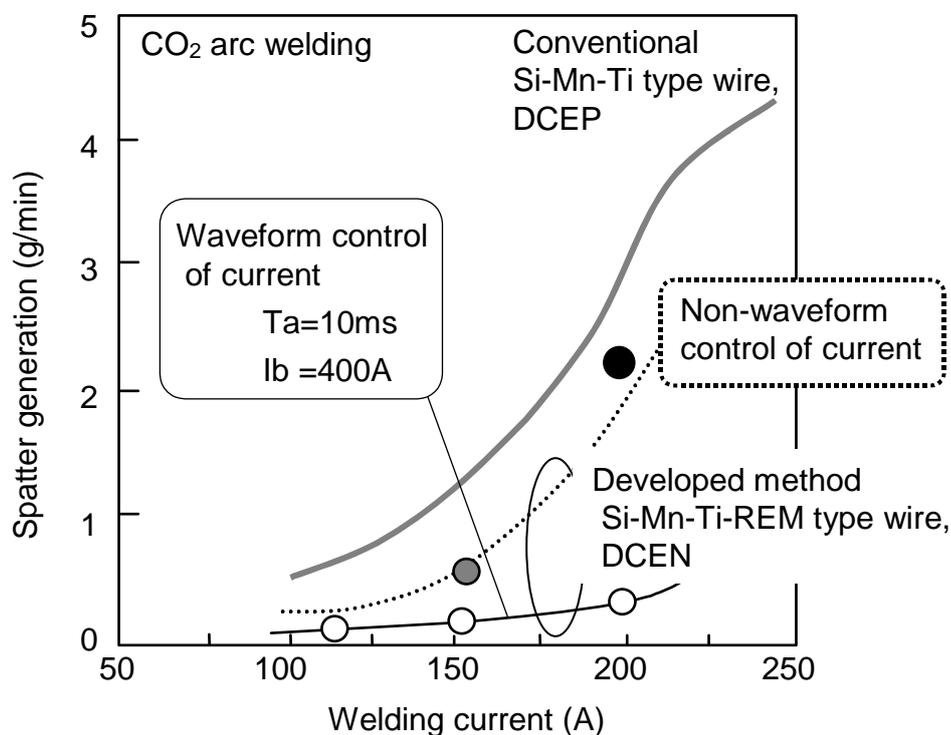


Fig.6.4 Relationship between welding current and spatter generation.

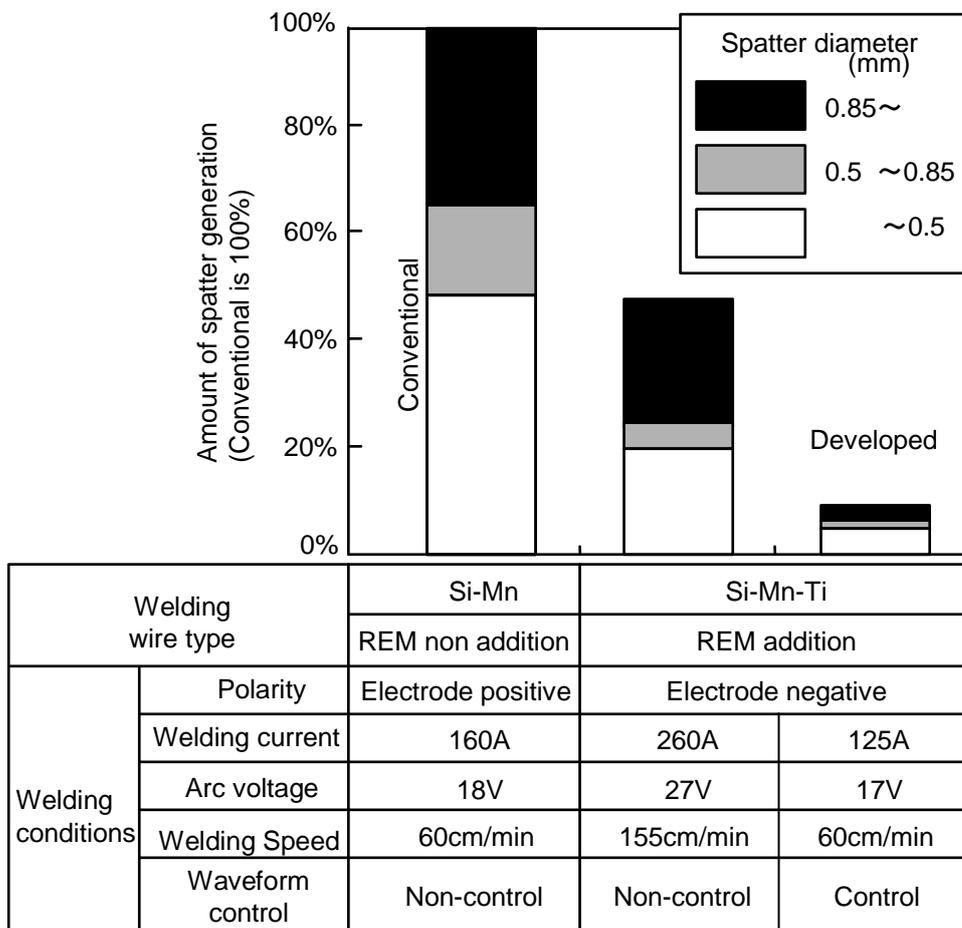


Fig.6.5 Particle diameter and amount of emergence of spatter.

6.4. 厚板の溶接

開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法は、従来溶接と比較して大幅なスパッタ低減が可能であり、その効果は溶接電流 250~380A の広い範囲で著しい。

ビードオンプレート溶接における断面マクロ組織を Fig. 6.6 に示す。開発技術は、安定かつ集中した円錐状アークの形成により棒マイナスの溶接でありながら従来の棒プラスの炭酸ガスアーク溶接に対して約 1.5 倍の深い溶込みが得られた。

6.4.1. 狭開先溶接技術の開発

狭開先溶接は、開先断面積の低減と溶接施工時間の短縮が可能であるが、初層溶接における開先底部での安定したアーク発生および積層溶接における開先面へのスパッタ付着防止が重要となる。この課題を解決する方法として、電流波形制御あるいはシールドガス組成制御が有効との報告⁹⁰⁾がなされている。開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法はスパッタの発生が少なくアークの集中と安定性に優れることから、これら制御機構を用いることなく狭開先の溶接が可能である。

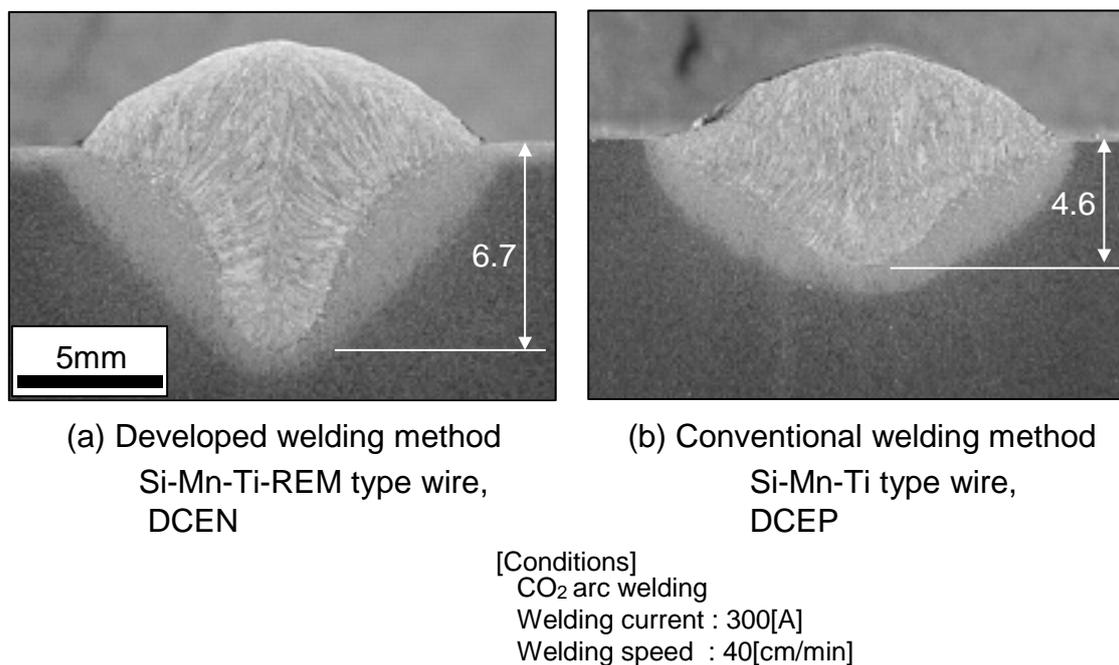
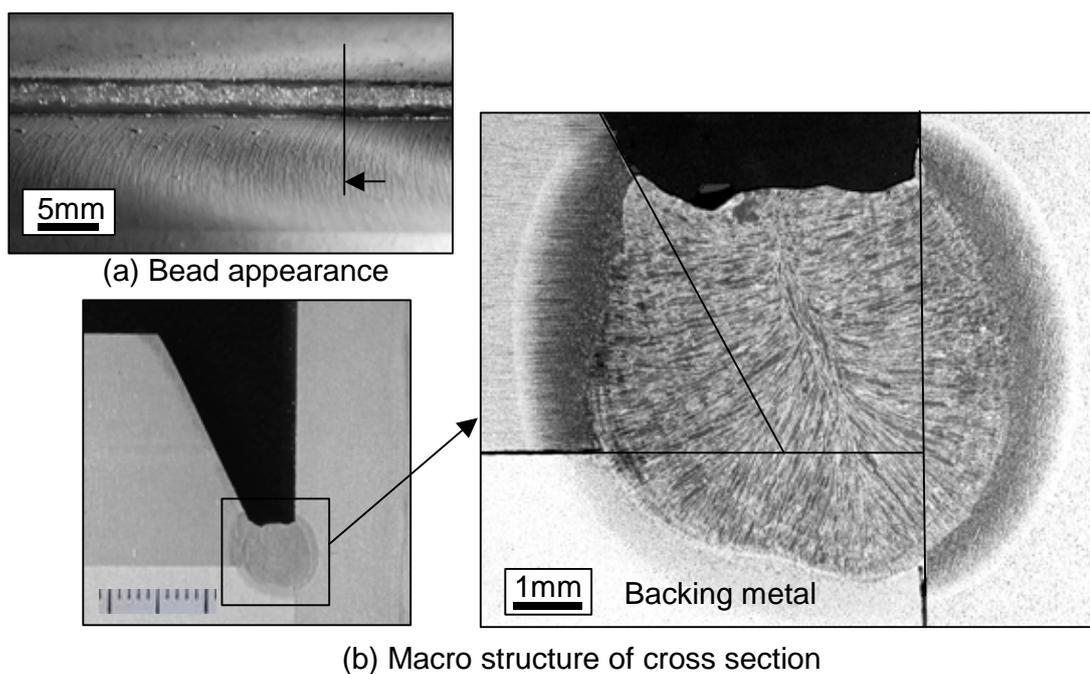


Fig.6.6 Macrostructure of bead-on-plate welding.

Fig. 6.7 に開発法を用いたレ形 25° - Gap2mm 狭開先の初層溶接部の外観とマクロ組織を示す。溶接電流は 350A、溶接速度は 80cm/min とした。従来の棒プラスの炭酸ガスアーク溶接および混合ガスシールドアーク溶接では、アーク変動による溶込みの不足およびビードの不均一を生じやすい。これに対して開発法を用いることでスパッタ付着がなく、均一な溶接ビード形状と深さ約 2mm の安定した溶込みを得ることが可能である。

Fig. 6.8 に開発法を用いた板厚 25mm の突合せ溶接継手のマクロ組織を示す。開先形状は(a)無開先 (I 形) - Gap5mm、(b)レ形 25° - Gap2mm、(c)レ形 35° - Gap7mm(日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様)とした。いずれの継手も開発技術の特徴である低スパッタ性とアーク集中による深い溶込みによって欠陥のない良好なマクロ組織が得られた。Fig. 6.9 に突合せ溶接可能な開先角度とギャップ(ルート間隔)の関係を示す。開発法は、従来法に対してより狭い角度および狭い Gap の溶接が可能である。Table 6.3 にパス間温度 250°Cでの J-STAR 狭開先溶接における溶接金属の機械的性質を示す。溶接金属の 0°Cシャルピー吸収エネルギー(ノッチ位置: 溶接金属中央, 1/2t)はともに 100J 以上、引張り強さは(a)無開先 654N/mm²、(b)レ形 25° 開先 517N/mm²を得た。490MPa 級鋼の継手として十分な強度と靱性である。

狭開先の多層溶接継手は高冷速となることから溶接金属の継手強度と靱性の確保が容易であり、パス間温度の緩和が期待できる。



[Conditions]

Developed CO₂ arc welding method
Si-Mn-Ti-REM type wire,
DCEN
Welding current : 350[A]
Arc voltage : 34[V]
Welding speed : 80[cm/min]

Fig.6.7 Bead appearance and macro structure of T joint specimen after 1 pass welding.
(Single bevel groove, Groove angle 25° , Gap 2mm)

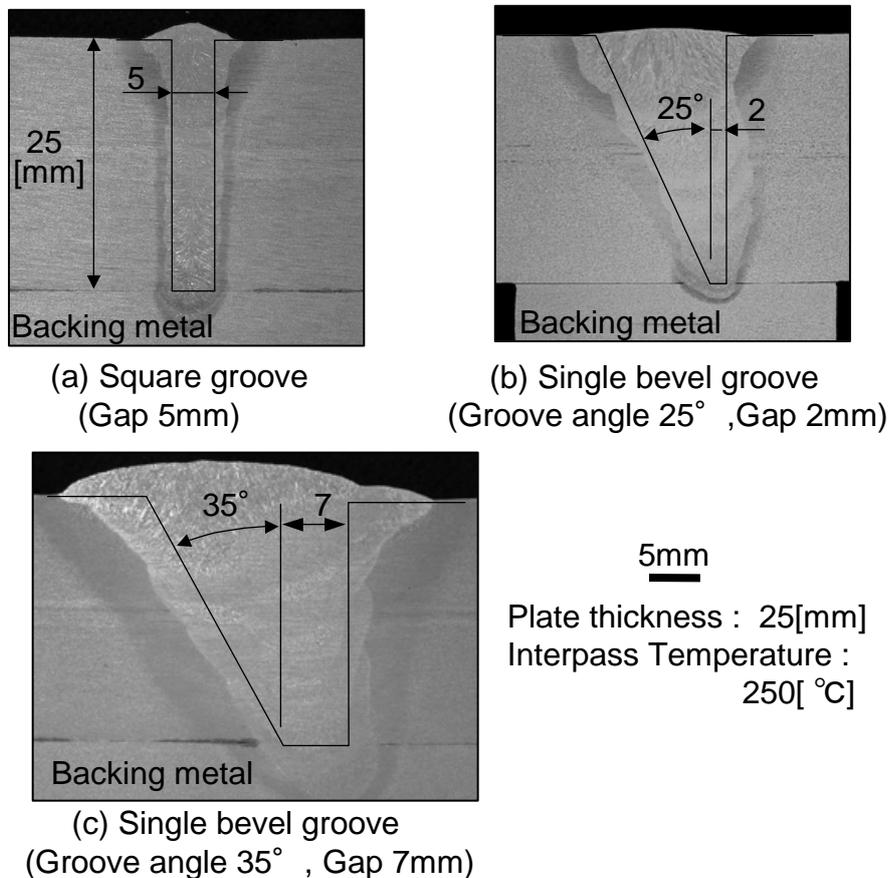


Fig.6.8 Macrostructure of butt joints.

Table 6.3 Mechanical properties of welded metal with narrow gap welding.

Groove type	Heat Input (kJ/cm)	Mechanical properties			
		0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Absorbed energy 0°C(J)
Square groove (Gap5mm)	6-10	612	654	29	138
Single bevel groove (25° - Gap2mm)	6-30	412	517	34	143

Butt joint
Plate thickness : 25[mm]
Interpass Temperature : 250[°C]

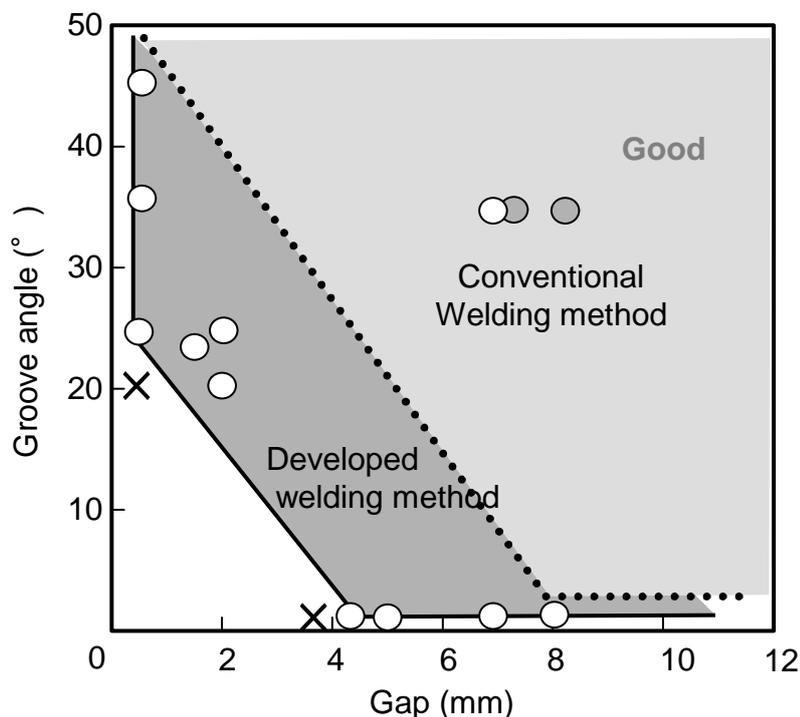


Fig.6.9 Gap and groove angle map for good welded joint.

6.4.2. 狭開先化による能率向上

Fig. 6.10 に溶接パス間温度 250°C以下の管理における溶接電流と鋼板温度履歴を示す。継手は、板厚 25mm、溶接長さ 300mm の突合せとし、開先形状は (a) I 形 - Gap5mm, (b) レ形 25° - Gap2mm, (c) レ形 35° - Gap7mm とした。開先断面積は (a) 125m², (b) 196 m², (c) 394m²となり、この時のアークタイムは (a) 198s、(b) 341s、(c) 536s と開先断面積にほぼ比例した。溶接施工時間はパス間温度 250°Cの管理によりそれぞれ(a) 447s、(b) 778s、(c) 1954s とアークタイム以上の差が生じ、(c) レ形 35° - Gap7mm(日本建築学会 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事 標準仕様)に対する溶接施工時間比率は(a) I 形 - Gap5mm の施工で 1/4, (b) レ形 25° - Gap2mm で 2/5 にまで減少した。以上のことから、パス間温度の管理を必要とする多層溶接において、狭開先溶接は冷却待ち時間の短縮によりさらなる高能率化が期待できる。

6.4.3. 狭開先溶接法の開先標準

Table 6.4 に開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法を用いた狭開先溶接技術の標準開先を示す。推奨の開先形状は無開先(I 形) - Gap5mm、レ形 25° - Gap2mm である。なお、開発技術である「KC-500 を用いた J-STAR 狭開先溶接法」は、建築鉄骨分野への適用拡大を考慮して財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明を 2007 年 5 月に取得した⁹¹⁾。

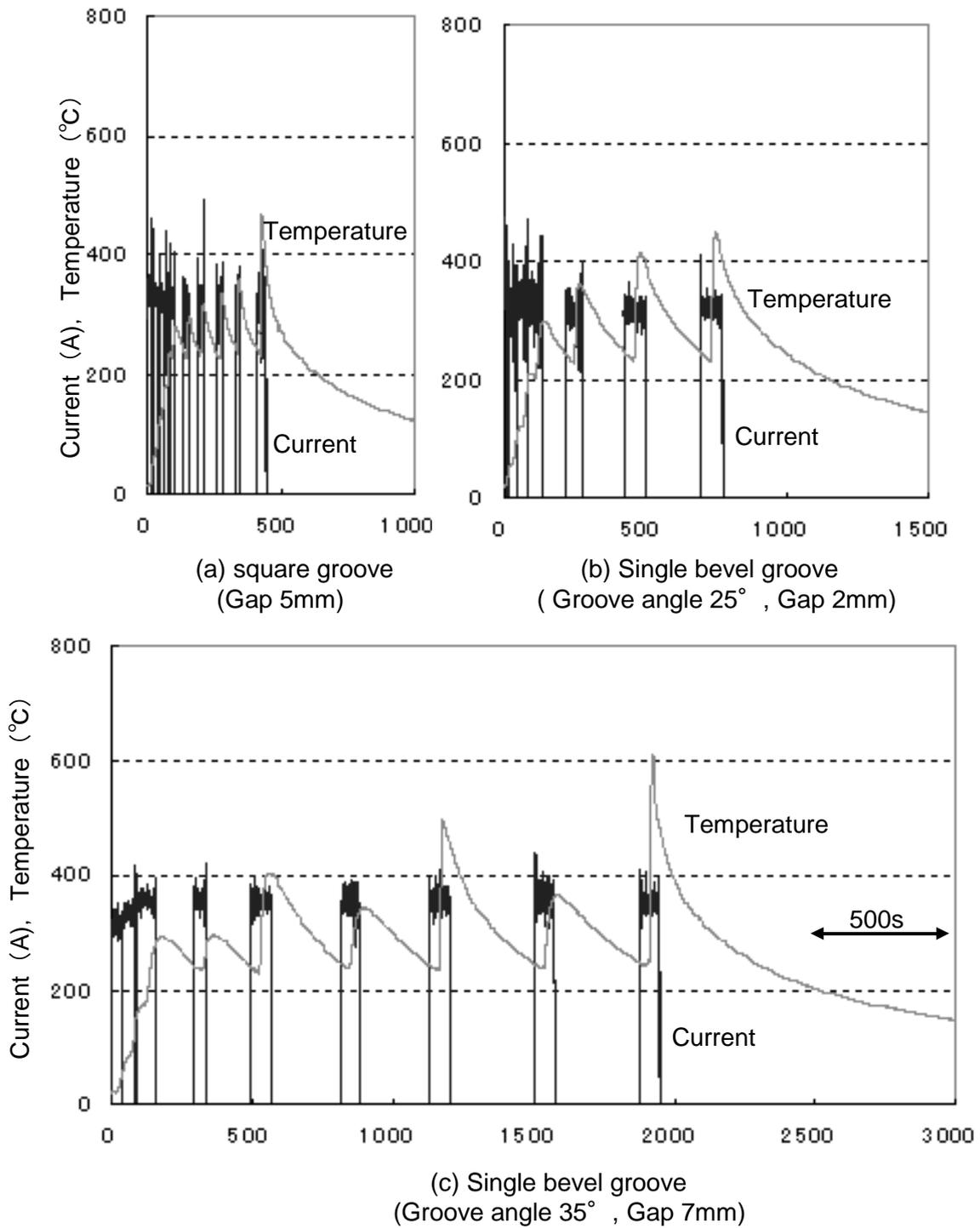


Fig.6.10 Change in welding current and temperature of specimen.

Butt joint
 Plate thickness : 25[mm]
 Welding length : 300[mm]
 Interpass Temperature : 250[°C]

Table 6.4 Groove standard of developed narrow gap welding.

Groove type : Single bevel groove		
Welding position	Parameter	range
Flat position and Horizontal position	T: Thickness (mm)	$6 \leq T$
	G: Gap (mm)	$1.5 \leq G$
	R: Root face (mm)	$0 \leq R \leq 2$
	α : Groove angle (°)	$23 \leq \alpha$
Groove type : Square groove		
Welding position	Parameter	range
Flat position	T: Thickness (mm)	$6 \leq T \leq 25$
	G: Gap (mm)	$4.5 \leq G$

6.4.4. 実大柱-梁接合部の荷重試験

角形鋼管柱とH形鋼梁の仕口部を対象に繰返し荷重実験を行い、開発した狭開先溶接による梁フランジ継手の性能を評価した。Fig. 6.11 に荷重装置および試験体形状を示す。梁は溶接組立H形鋼(SN490B)、柱は冷間成形角形鋼管(BCR295)、通しダイアフラムは板厚 28mm (SN490C)とすることで梁以外は塑性化しない断面寸法とした。継手部はノンスカラップとし算出される梁端接合部係数は1.29 であり、ひずみ硬化を考慮する場合の接合部係数を満足している。梁フランジとダイアフラムの溶接部に開発した狭開先溶接 (a)無開先-Gap 5mm、(b)レ形 25° 開先-Gap 2mmを適用した。溶接条件は、両試験体とも最大入熱 30kJ/cm 以下、パス間温度 250 °C 以下である。荷重試験体の固定は柱端部を高力ボルト接合とし、梁端部に交番繰返し荷重 (図中、黒矢印と白矢印を交互に繰返す) を与えた。

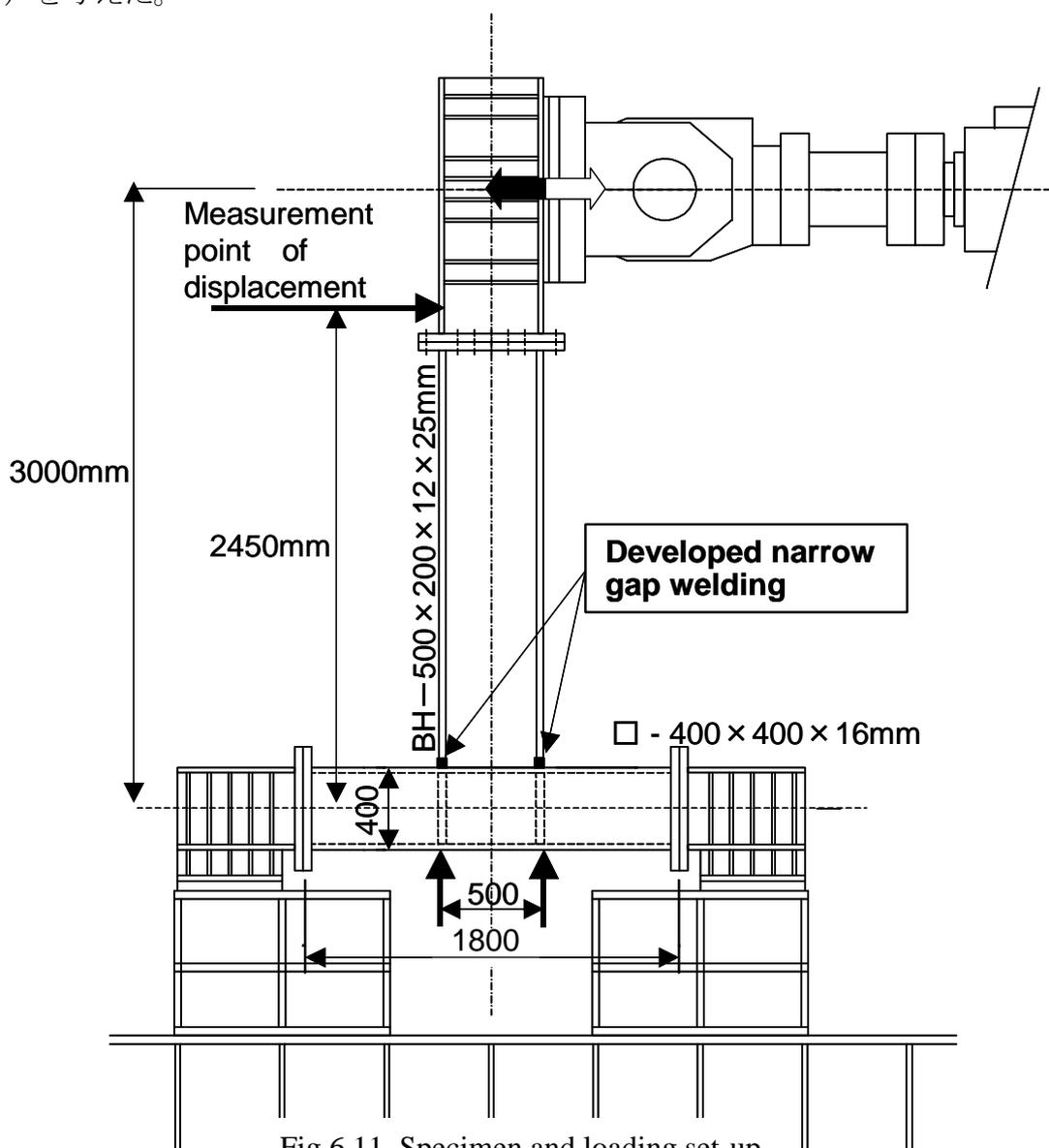


Fig.6.11 Specimen and loading set-up.

Fig. 6.12 に荷重プログラムを示す。全断面を有効として得られる梁部材の全塑性モーメント M_p 時における弾性変形角計算値 θ_p を基準にして $2\theta_p$, $4\theta_p$, $6\theta_p$ で各 2 回正負に繰返し荷重するプログラムとした。この時点までに終局に至らない場合は、破壊するまで $6\theta_p$ で正負に繰返し荷重し続けることとした。なお、荷重に先立ち、試験体の初期不整を取り除くことや実験治具とのなじみを取ることを目的に弾性範囲内で 2 回正負繰返し荷重を行った（予備荷重）。また、荷重中の柱梁接合部は冷却 BOX で囲み、その中に液体窒素を送り込むことで試験体溶接部の温度を 0°C に保持した。

Fig. 6.13 に梁端相対変形角 θ と梁端フェースモーメント M の関係を示す。開先形状を I 形 - gap5mm とした試験体 (a) は、 $\pm 6\theta_p$ の 1 サイクル目の荷重までは安定した紡錘形の履歴特性を示したが $6\theta_p$ の 2 サイクル目正荷重時に梁フランジと梁ウェブの交差部から梁フランジが脆性破壊した。起点部にはほとんど延性亀裂は観察されなかった。なお、梁端フランジ溶接始末端部には延性亀裂が確認された。開先形状をレ形 25° - gap2mm とした試験体 (b) は、 $\pm 6\theta_p$ 3 サイクル目の荷重までは安定した紡錘形の履歴特性を示したが、 $6\theta_p$ の 4 サイクル目負荷荷時に梁フランジとダイアフラムの溶接部始末端から脆性破壊した。また、累積塑性変形倍率 η_A は試験体 (a) 47、試験体 (b) 111 であり、構造ランク I を条件とした場合の耐振安全性に問題ないとされる累積塑性変形倍率 $\eta_A \geq 10^{(92)}$ を大きく超えた。また、通しダイアとコラム溶接部に試験体 (b) と同じレ形 25° - Gap2mm の狭開先溶接を施し、柱-柱接合部の荷重試験を実施しており、この荷重試験においても変形能力としては十分であることを確認している⁹³⁻⁹⁴⁾。

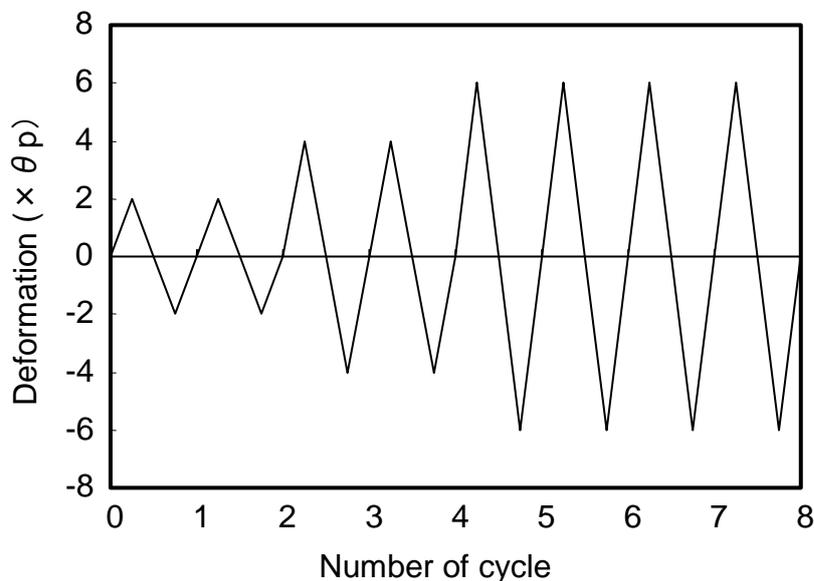
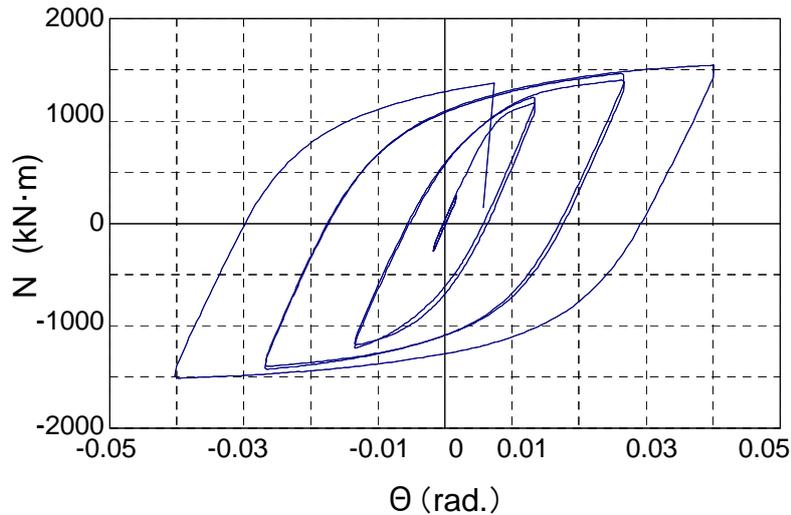
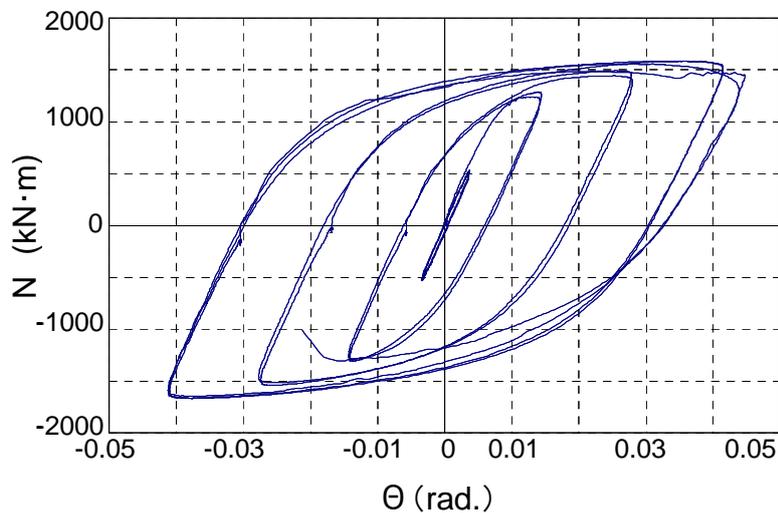


Fig.6.12 Schematic illustration of deformation cycle.



(a) Butt joint of square groove(Gap : 5mm)



(b) butt joint of 25° single bevel groove(Gap : 2mm)

Fig.6.13 Relation between relative rotation of beam end connection and moment of beam end.

6.5. 結言

開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接技術はアーク安定剤として適量のREM(rare earth metal)を電極ワイヤに添加し、通常とは逆の棒マイナス(DCEN)を採用した溶接方法である。その特性は、微細スプレー移行の実現により極低スパッタ化が可能であり、炭酸ガスアーク溶接では避けられなかった溶接後の付着スパッタ除去作業や手直しが削減できる。電流波形制御の適用により板厚の薄い鋼板の溶接にも十分適用可能である。また、狭開先溶接技術は、開先断面積の低減にともなうアークタームの短縮と多層溶接における冷却待ち時間の短縮による溶接施工の高能率化が期待できる。さらに、微細溶滴の連続的な移行は、アーク電流値を安定化させることから溶接金属の品質、溶接ビード形状の安定化にも効果があると考えられ、今後、厚板の高能率組立溶接での活用が期待される。

第7章 結言

アーク溶接技術は開発から約 100 年が経過したにすぎない比較的新しい技術である。しかし、重厚長大の基盤技術として既に開発が終わった技術のように思われている。アークは電気・電子制御技術の進歩とその応用技術によって身近な熱エネルギーとして広い分野で使用されているが、その研究開発において全ての現象と可能性を知り尽くしたとはとても言えない。

アーク溶接の現象は、電極およびプラズマ、母材熔融池が相互に作用し、その現象の解明には、アークプラズマの温度分布・流速分布や電極の温度分布・物性などを総合的に解析していく必要がある。本研究のテーマとした「炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの低減」は、その根本的原因が多原子分子である炭酸ガス(CO₂)の解離吸熱反応に起因しており、この解決は困難であると考えられてきた。また、アーク溶接分野における研究開発は、不活性ガスのアルゴン(Ar)、ヘリウム(He)ガスを使用する TIG 溶接や MIG 溶接および Ar-CO₂を用いる混合ガスシールドアーク溶接の検討が先行しており、現象の複雑な炭酸ガスアーク溶接については十分な取組みが行われてこなかった。また、炭酸ガスアーク溶接に用いる鋼電極ワイヤは、鉄鋼材料の進歩とともにその種類を増やし、その組成に関する研究開発は溶接金属の特性に重点が置かれ、既に、アーク安定化の観点での電極ワイヤ組成は完成したかのように思われてきた。

そこで、製造各分野からのニーズとしては大きいですが、解決は難しいとされる炭酸ガスアーク溶接のスパッタ低減に対して、本研究では、スパッタの発生形態とその原因を明確にするとともに、電極ワイヤへの REM 添加と極性に着目することで極低スパッタ溶接技術を開発した。そして、そのメカニズムと溶滴移行形態を解明し、実用性と有効性を明確にした。

本研究において得られた成果を以下に総括する。

第1章はスパッタ低減に関するこれまでの研究結果をまとめるとともに本研究の重要性と目的を明確にした。

第2章では、極性棒プラス(DCEP)における炭酸ガスアーク溶接のスパッタの発生形態とそれに及ぼす組成の影響を明らかにした。低電圧領域のスパッタの多くは、短絡アーク再生時の溶滴および溶接金属の飛散によって生じ、高電圧領域のスパッタの多くは、アーク力による溶滴そのものの飛散によって生じた。スパッタの低減に有効とされるチタン(Ti)の効果は、Tiをワイヤからだけではなく鋼板からも添加することで、短絡の抑制とスパッタの低減効果が熔融プールの安定化にあることを明確にした。次に、アルカリ金属であるカリウム(K)はアークおよび溶滴移行の安定化に有効であり、電極ワイヤへの K 付与により 30%のスパッタ低減を達成した。また、REM(rare earth metal)および

カルシウム (Ca) の添加はアーク柱を長くし、溶滴の揺動とともにアークの向きを大きく変化させることでスパッタの発生量を増大させた。この K, REM, Ca の炭酸ガスアーク溶接におけるアークの安定性を定量的、かつ、簡易的に評価する手法として Ar-20%CO₂ を用いた混合ガスシールドアーク溶接におけるスプレー化臨界電流値による評価が可能であることを示した。

第3章では、極性棒プラス (DCEP) における電流のパルス化による溶滴移行の安定化と低スパッタ化について検討した。Ar-20%CO₂ を用いた混合ガスシールドアーク溶接では既にマグパルス溶接法 (1 パルス 1 溶滴移行) が実用化されている。一方、炭酸ガスアーク溶接においては、1 パルス 1 溶滴移行 (60Hz 以下) あるいは 2 パルス 1 溶滴移行 (120Hz 以下) の実現によるスパッタの低減効果が報告されているが、広く実用化されるまでには至っていない。

これらの知見を踏まえて、パルス周波数をより広い範囲で検討し、パルス周波数が 300Hz を超える領域において周波数の増加とともに溶滴が微細化する現象を見出した。これに基づいて開発した高周波パルス (ピーク電流 $\geq 500\text{A}$, 周波数 625Hz) 溶接法は溶滴の重量を約 1/2 に低減した。更に、溶滴の微細化とともに溶滴の移行間隔の規則性が向上し、スパッタの発生量は電流パルスを与えない従来の溶接法の 30% に減少し、ビード近傍への付着が懸念される粒径 0.5mm 以上のスパッタに限定すれば従来法の 13% に減少した。また、静止懸垂溶滴形状を近似したモデルを提案し、直径 1.2~1.5mm 懸垂溶滴の固有振動数が 300~600Hz であること、および高周波パルス溶接法の溶滴には共振による溶滴振動の可能性があることを示した。

第4章では、炭酸ガスアーク溶接法は電極である鋼ワイヤがプラスとなる棒プラス (DCEP) が安定とされてきたが、本章では極性 DCEP の評価に加えて従来の常識では不安定とされる棒マイナス (DCEN) の評価を実施した。更に、電極ワイヤは従来の検討において不安定とされる REM (rare earth metal) 添加について検討した。

その成果として、極性を棒マイナス (DCEN) とし、REM を 330~450ppm 添加した電極ワイヤを用いることで従来にないアークの安定性とスパッタの低減効果を見出した。その適正溶接電流の範囲は 250~380A と広く、安定した溶接が可能であることを明確にした。更に、極低スパッタ化が達成された REM 添加ワイヤを用いた極性 DCEN の溶接において極性 DCEP よりもさらに深い安定な溶込みが得られることを明らかにした。

第5章では、第4章で開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の低スパッタ化のメカニズムとアーク現象の解明を目的として電極ワイヤ REM 量のワイヤ溶融速度とアーク現象への影響を調査し、電子放出に及ぼす REM 添加の影響について考察した。

極低スパッタ化は、円錐状アークの形成と安定した微細スプレー移行によって達成されることを明確にした。微細溶滴移行と同時にワイヤの溶融速度が減少しており、この

効果は、極性 DCEN で電極ワイヤの REM 量 310ppm 以上としたとき、溶接電流 200A 以上で生じることを明確にした。極性 DCEN における陰極点の電流密度は電極ワイヤの REM 含有 (390ppm) によって 3~4 倍に増加した。電子電流率は REM を添加していない電極ワイヤに対して 1.3~1.5 倍に向上していると考えられ、REM 添加によるワイヤ溶融速度の低下要因として電子放出の増加による陰極点の発熱抑制効果が考えられることを示した。極性 DCEN における従来電極ワイヤ (REM を添加していない) の不安定なアーク形態は、酸化物の生成と破壊により陰極点が激しく動き回り、溶滴の移行が妨げられることで溶滴は粗大となり、相乗効果によってアークが不安定になると考えた。

一方、電子放出に有利な REM の添加はアークの不安定な動きを抑制し、微細スプレー移行はアーク点の固定による溶滴の成長と離脱の安定化、更に、極低スパッタ化は円錐状アークによる移行溶滴の安定化によって達成されると考えた。また、熱電子放出に関する Richardson-Dushman の式とアーク点の実測より求めた陰極点温度はワイヤの溶融速度より求めた溶滴温度より約 1000K 高く、鉄の沸点よりも高い 3030~3850K が得られた。

第6章では、第4章で開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法の実用化を目的として、電流波形制御の適用による薄鋼板の溶接性向上、および従来比 1.5 倍の深い溶込みを活用した狭開先溶接技術は、従来比 4 倍の溶接施工能率の向上が可能であることを示した。

最後に、開発した極低スパッタ炭酸ガスアーク溶接法は、微細溶滴の連続的な移行とアーク電流値の安定化効果による溶接金属の品質向上および溶接ビード形状の安定化に効果があり、今後、厚板の高効率組立溶接での活用が期待される。また、本技術において提案したガスシールドアーク溶接における陰極点制御という取り組みは、今後の溶接アーク物理現象解析、MIG 溶接等も含めた新たな溶接技術開発に対しても方向性・展開をもたらすものとして期待している。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科、マテリアル生産科学専攻教授 平田好則工学博士の懇切なるご指導、ご教示および激励を賜って遂行し得たものでありここに謹んで深甚なる謝意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、有益なご討論とご指導を賜りました大阪大学 接合科学研究所 所長 中田一博 博士、大阪大学 接合科学研究所 教授

田中 学 博士、大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻教授 廣瀬明夫 博士に深く御礼申し上げます。

本研究は、J F E スチール株式会社 スチール研究所で実施したものであり、論文として取り纏める機会を与えて頂きました J F E スチール株式会社 代表取締役 馬田 一社長、現 J F E テクノリサーチ株式会社社長(前スチール研究所長)影近 博 博士、スチール研究所 関田貴司所長(専務執行役員)、廣畑和宏副所長(常務執行役員)、津山青史副所長(常務執行役員)の深いご理解とご助言に感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたっては、同社スチール研究所 主席研究員 安田功一 博士、接合・強度研究部長 小野守章 博士、池田倫正主任研究員のご指導とご協力に心から御礼申し上げます。さらに、実験の遂行にあたっては同所接合・強度研究部の研究員、技術員の方々をはじめ同所の数多くの方々にご協力とご討論を頂きました。

本論文を終えるにあたり、これらの方々的心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 黄地：溶接・接合プロセスの基礎，(株)精興社（1996）
- 2) 石崎：アーク溶接の物理，(株)アグネ（1994）
- 3) 安藤，菊田，木村：現代溶接技術大系5・溶接材料，産報出版（1980）
- 4) (社)溶接学会：溶接・接合便覧，丸善(株)，第2版（1994）
- 5) 松田，牛尾，熊谷：ランタン，イットリウム，セリウム入り各タングステン電極によるアーク特性の比較研究，溶接学会論文集，Vol.6(1988)，No.2，p199-204
- 6) 松田，牛尾，熊谷：酸化物入り各タングステン電極の消耗形態，RIM 形成について，溶接学会論文集，Vol.6(1988)，No.2，p199-204
- 7) 日本溶接協会 溶接棒部会編：マグ・ミグ溶接Q&A，産報出版（1999）
- 8) 西口，松縄，堀：高圧アルゴン気中におけるアーク特性，溶接学会誌，Vol.46(1977)，No.8，pp73-80.
- 9) 黒川：マグ溶接フラックス入りワイヤの開発と発展，KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS，Vol.50(2000)，No.3
- 10) 輿石：特集 溶接プロセスの高効率化“溶接材料” 溶接学会誌，Vol.72(2003)，No.2，p16-19
- 11) 安藤，長谷川：溶接アーク現象，(株)産報 第4版(1970)
- 12) 田中，田代：溶接アークの熱的ピンチ効果に関する一考察，溶接学会論文集，Vol.25(2007)，No.2，p336-342
- 13) Anon.:Classification of Metal Transfer, IIW Document XII-636-76 (1976)
- 14) 平田：溶滴移行現象とそのモデリング，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.57(1995)，No.10
- 15) 平田，黄地：溶接のアーク物理の現状と展望，溶接学会誌，Vol.67(1998)，No.1，p44-47
- 16) (社)溶接学会 溶接アーク物理研究委員会：溶接プロセスの物理，黒木出版社（1996）
- 17) 安藤，山本，西川：炭酸ガス・アーク溶接のアーク現象について，溶接学会誌，Vol.30(1961)，No.9
- 18) 安藤，山本：炭酸ガス・アーク溶接におけるスパッタについて(第1報)，溶接学会講演概要集，Vol.31(1962)，p.60

- 19) 安藤, 山本: 炭酸ガス・アーク溶接におけるスパッタについて(第2報), 溶接学会講演概要集, Vol. 31(1962), p. 61
- 20) 安藤, 山本: アーク現象の立場から見た炭酸ガスアーク溶接について, 溶接学会講演概要集, Vol. 31(1962), No. 3, p. 63
- 21) 山田, 六条: CO₂ アーク溶接におけるスパッタ発生, 神戸製鋼技報, Vol. 31(1981), No. 4, p.69-72
- 22) 荒井, 六条, 山田, 菅: 炭酸ガスアーク溶接におけるスパッタの発生, 溶接学会論文集, Vol. 1(1983), No. 2, p.177-182
- 23) 木村, 橋口: 炭酸ガスアーク溶接におけるアークの安定性, 熊本県工業試験所研究報告, No. 21(1983), p. 72-82
- 24) 田中, 南斉, 井田, 西脇, 堀: 炭酸ガスアーク溶接時に発生するスパッタの飛散挙動および温度に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 20(2002), No. 3, p. 363-368
- 25) 三田, 坂部, 横尾: CO₂ アーク溶接における作業性評価の定量化, 溶接学会論文集, Vol. 5(1987), No. 1, p. 75-80
- 26) 安, 李, 巖: グロビュラ移行域におけるスパッタ発生におよぼすアーク電流およびアーク電圧の影響, 溶接学会全国大会概要集, Vol. 57(1995), p. 100-101

- 27) H. Yamamoto: Recent Advances in Inverter Controlled, Gas Shielded Arc Welding Power Sources and other Applications, INDIAN WELDING JOURNAL, Vol. 23(1993), No. 3, p.15-23
- 28) 山本, 中俣: アーク溶接電源の最近の進歩, 電気製鋼, Vol. 67(1996), No. 3, p. 193-199
- 29) 三田: 知って得するマグ・ミグ溶接の基礎知識, 溶接技術, (1999), No. 2, p. 62-68
- 30) 上山, 最近のミグ・マグ溶接電源の開発と特徴, 溶接技術, (2000), No. 1, p. 104-110
- 31) 上山, 益城: 最近のアーク溶接機器, 溶接技術, (2000), No. 4, p. 65-70

- 32) 山本, 長坂, 岡崎, 原田: トランジスタ制御形電源によるCO₂アーク溶接の諸特性(第1報) —インバータ制御形電源の開発—, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 35(1984), p. 224-225
- 33) 丸山, 佐藤, 樋田: ガスシールドアーク溶接における電源の出力波形制御方法, 溶接学会誌, Vol. 57(1988), No. 7, p. 509-517
- 34) 松本, 平沢, 高木: 短絡移行領域におけるCO₂溶接性の改善, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 27(1980), p. 86-87
- 35) 西田: 波形制御によるスパッタ低減について, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 45(1989), p. 33-35
- 36) 三田: CO₂アーク溶接の波形制御方法の検討, 溶接学会論文集, Vol. 6(1988), No. 2, p. 13-18

- 37) T. Mita, T. Shinada : Wavefome Control for Reducing Spatter in CO₂ Gas Shielded Arc Welding, 5th International Symposium of the Japan Welding Sociaty, April 1990 Tokyo
- 38) 小笠原, 丸山, 佐藤, 樋田 : 短絡移行溶接における電流波形制御, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS/Vol. 35 No. 3 (1985), p. 22-26
- 39) 庵地, 丸山 : 各種溶接法による薄板のアーカ溶接, 溶接学会誌, Vol. 57(1988), No. 3, p. 164-168
- 40) Z. M. Zhu, W. K. Wu, Q. Chen: Effective Control Approach on Molten Droplet Size in Waveform Controlled Short Circuit CO₂ Arc Welding, Science and Technology of Welding and Joining, 12-1 (2007), 55-62.
- 41) 井出, 河野, 児玉 : ワイヤ送給制御による新スパッタレス溶接法の開発, 三菱重工技法, Vol. 30(1993), No. 6, p. 539-542
- 42) 松縄, 山本, 平本 : パルスアーカ溶接法, 溶接学会誌, Vol. 53(1984), No. 6, p. 284-290
- 43) K. Hamamoto, Y. Nishida, M. Takagi, N. Kawai, M. Minooka : Newly Developed Pulse-MIG Machine, 5th International Symposium of the Japan Welding Sociaty, April 1990 Tokyo.
- 44) Y. Takeuchi, T. Shinada: Spatter and Blowhole Formation Phenomena in Pulsed Gas Shielded Metal Arc Welding, Materials Science and Technology, 7-9 (1991), 869-876.
- 45) G. Wang, P. G. Huang, Y. M. Zhang: Numerical Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding under Modified Pulsed Current Conditions, Metallurgical and Materials Transactions B, 35-5 (2004), 857-866.
- 46) P. K. Palani, N. Murugan: Metal Transfer and Burn off Characteristics of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding, A review, Int. J. of Materials and Product Technology, 18- 3-4(2006), p76-85.
- 47) D. Langus, V. Kralj, J. Grem: Optimization of Welding Parameters in Pulsed MIG/MAG Welding with Width-controlled Sine-wave Current Pulses, Int. J. of Materials and Product Technology, 29- 1-4(2007), 255-271.
- 48) F. Matsuda, M. Ushio, K. Itonaga, T. Yokoo: Pulsed CO₂ Arc Welding, Transaction of JWRI, 12-2(1983), p. 167-168.
- 49) 松田, 牛尾, 糸永, 西川, 横尾 : GMA パルス溶接の溶滴移行現象に関する研究, 第3報-炭酸ガスパルス溶接とスパッタリング-溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 35(1984), p. 36-37

- 50) F. Matsuda, M. Ushio, H. Nishikawa, T. Yokoo: Spattering in Pulsed CO₂ Welding, Transaction of JWRI, 14-1(1985), p.13-19.
- 51) 伊藤, 輿石, 佐藤, 菅, 牛尾: 炭酸ガスパルスアーク溶接法におけるスパッタ低減に関する検討, 溶接学会論文集, Vol. 15(1997), No. 3, P432-437
- 52) 王, 井原, 印南: 新CO₂溶接法「PCプロセス法」の開発, 溶接技術, (1996) No. 10, p. 107-111
- 53) 王, 井原, 印南, 浜本, 田中: パルス CO₂ アーク溶接法の検討, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 61(1997), p. 72-73

- 54) 山内, 阿草: 電極ワイヤ中の微量元素の影響, 溶接学会誌 Vol. 50(1981), No. 11, p1059-1065
- 55) 阿草, 山内: 母材およびシールドガス中の微量元素の影響, 溶接学会誌 Vol. 50(1981), No. 11, p1066-1074
- 56) Masumoto, Sekiguchi, Kawasaki: Effect of Titanium in Steel Electrode Wire for CO₂ Arc Welding on the Usability and Mechanical Properties of Welding Metal, IIW Doc. XII-B-135-73(1973)
- 57) 菅: スパッタはどこまで防止できるか? 溶接材料からのアプローチ, 溶接学会誌, Vol. 59(1990), No. 8, p17-21
- 58) 庵地, 丸山: 各種溶接法による薄板のアーク溶接, 溶接学会誌 Vol. 57(1988), No. 3, p38-44

- 59) 松山, 坪井: REM、Ca 処理鋼のガスメタルアーク現象, 溶接学会講演概要集, Vol. 25(1979)
- 60) 阿草, 西山, 坪井: 純アルゴン気中でのガスメタルアークの安定化法, 溶接学会第56回溶接アーク物理研究委員会資料, No. 79-418
- 61) A. Lesnewich: Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, Welding Journal, Vol. 37(1958), pp343-353, pp418-425.
- 62) 特許 2720925 号

- 63) 吉川, 山本, 田中, 森田: 溶融合金の表面張力に及ぼす表面活性成分の研究に関する一考察, 高温学会誌, Vol. 32(2006), No. 9, p. 289-294
- 64) 鉄鋼基礎共同研究会, 溶鉄・溶滓部会編「溶鉄・溶滓の物性値便覧」日本鉄鋼協会, (1972)

- 65) 丸山, 佐藤, 樋田: ガスシールドアーク溶接における電源の出力波形制御方法, 溶接学会誌, Vol. 57(1988), No. 7, p. 509-517
- 66) 三田: スパッタと溶接作業性の検討, 溶接学会論文集, Vol. 6(1988), No. 2, p. 18-23

- 67) 庵地, 丸山: 各種溶接法による薄板のアーカ溶接、溶接学会誌, Vol. 57(1988), No. 3, p. 164-168
- 68) 平田, 辻村, 黄地, 片岡, 池田: 溶滴振動現象のモデル解析, 溶接学会論文集, Vol. 25(2007), No. 3, p. 421-425
- 69) 平本, 島田, 殖栗, 田畑, 小村, 木谷, 鶴飼, 田村, 近藤: 正極性パルスマグ溶接現象の特徴, 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 30(1982), p. 120-121
- 70) 日本金属学会編: 改訂3版金属データブック, 丸善 (1993)
- 71) ゲ・ヴェ・サムソフ監修, 元素の物理的性質, 日・ソ通信社, p. 309-318 (1979)
- 72) Lancaster, J.F.: 溶接のアーカ物理, 溶接学会 溶接アーカ物理研究委員会訳, 黒木出版 (1990)
- 73) 平田: 溶接アーカプロセスの物理Ⅲ—電極ワイヤの溶融速度と温度分布—, 溶接学会誌, Vol. 63(1994), No. 7, p. 484-488
- 74) 安藤, 西口, 福田: MIG 溶接における移行粒子の保有熱量と温度, 溶接学会論文集, 溶接学会誌, Vol. 36(1967), No. 10, p. 1117-1124
- 75) 丸尾, 平田, 野田: パルス MIG 溶接における溶滴の保有熱量と温度, 溶接学会論文集, Vol. 2(1984), No. 4, p. 573-578
- 76) 平田, 恩田, 永木, 黄地: GMA 溶接における溶滴の音波計測, 高温学会誌, Vol. 30(2004), No. 3, p. 140-147
- 77) 山崎, 山本, 鈴木, 興石, 小野, 田代, 田中, 中田: 溶接ヒューム発生に及ぼす溶接法の影響, 溶接学会 第197回溶接法研究委員会資料, (2007)
- 78) 山崎, 山本, 鈴木, 興石, 和木, 田代, 田中, 中田: 赤外線二色放射测温法による GMA 溶接の溶滴温度測定, 溶接学会論文集, Vol. 26(2008), No. 3, p. 214-219
- 79) 山崎, 山本, 鈴木, 興石, 宮廻, 田代, 田中, 中田: 赤外線二色放射测温法による溶融池表面温度測定, 溶接学会論文集, Vol. 27(2009), No. 1, p. 34-40
- 80) M. Tanaka, M. Ushio: Observation of the anode boundary layer in free-burning argon arcs, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 32, p. 909-912 (1999)
- 81) M. Tanaka, M. Ushio, C. S. Wu: One-dimensional analysis of the anode boundary layer in free-burning argon arcs, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 32, p. 605-611 (1999)
- 82) 牛尾, 田中: アルゴン GTA プラズマにおける局所熱平衡, 日本金属学会誌, Vol. 63, No. 1, p. 9-14 (1999)
- 83) 田中: A-TIG 溶接におけるアーカ現象, 溶接学会誌, Vol. 74 (2005), No. 2, p. 113-119
- 84) 山本, 田中, 田代, 中田, 山崎, 山本: 数値計算シミュレーションによるガスタングステンアーカ溶接の金属蒸気挙動解析, 溶接学会論文集, Vol. 25 (2007), No. 3 p. 443-449
- 85) 大谷: 鉄冶金熱力学, 日刊工業新聞社, 第9版, p. 201-204 (1983)

- 86) M.Tanaka, M.Ushio M, Ikeuchi, Y. Kagebayashi: In situ measurements of electrode work functions in free-burning arcs during operation at atmospheric pressure, J. phys.D:Appl. Phys, Vol.38(2005), p29-35.
- 87) 牧野, 飯吉:表面電荷法によるショットキー陰極の電界解析, 愛知工業大学研究報告, Vol.41-B(2006), p33-40.
- 88) 渡邊, 鈴木, 小嶋, 平野:鋼の大電流 MIG 溶接法におけるアーク現象と溶滴移行形態, 溶接学会誌, Vol.52(1983), No.2, p.177 - 185

- 89) 恵良, 井手, 廣田, 上山:低スパッタ・低入熱 GMA 溶接ロボットシステムの開発, 溶接学会溶接法研究委員会, SW-3075-05(2005)
- 90) 中村, 平岡:GMA 溶接におけるワイヤ突出し部の非定常熱伝導解析—超狭開先 GMA 溶接プロセスの開発(第2報)—溶接学会論文集, Vol.19(2001), No.1, pp44-53
- 91) 財団法人日本建築総合試験所 性能証明 第07-02号, 技術名称「J-S T A R溶接法による狭開先溶接接合」, 申込者: J F E スチール株式会社, 2007年05月08日
- 92) 日本建築学会:造接合部の力学性状に関する研究の現状, 1993.10
- 93) 石井, 中川, 片岡, 池田:REM添加ワイヤを用いた高能率CO₂アーク溶接技術の建築鉄骨への適用—第1報—, 溶接学会講演概要集, 第80集(2007), p92-93
- 94) 石井, 中川, 片岡, 池田:REM添加ワイヤを用いた高能率CO₂アーク溶接技術の建築鉄骨への適用—第2報—, 溶接学会講演概要集, 第80集(2007), p94-95

本研究に関する発表論文

- 1) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一: 炭酸ガスアーク溶接のスパッタ発生現象に及ぼすワイヤ微量元素の影響、溶接学会論文集, Vol. 25(2007), No. 3, p. 410-415
- 2) 平田好則, 辻村晃介, 黄地尚義, 片岡時彦, 池田倫正: 溶滴振動現象のモデル解析、溶接学会論文集, Vol. 25(2007), No. 3, p. 421-425
- 3) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一, 平田好則: 高周波パルスを用いた低スパッタ CO₂ 溶接技術の開発、溶接学会論文集, Vol. 25(2007), No. 4, p. 480-485
- 4) T. KATAOKA, R. IKEDA, M. ONO, K. YASUDA: Development of ultra-low spatter CO₂ gas shielded arc welding process, IIW Document, 212-1093
- 5) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則: 炭酸ガスアーク現象に及ぼすワイヤへの REM 添加の影響、溶接学会論文集, Vol. 26(2008), No. 1, p. 37-41
- 6) T. KATAOKA, R. IKEDA, K. YASUDA, Y. HIRATA: Development of Low Spatter CO₂ Arc Welding Process with High Frequency Pulse Current, Science and Technology of Welding and Joining, to be published

本研究に関するその他の刊行資料

- 1) 片岡時彦, 池田倫正, 阪口修一, 安田功一, 時乗健次: スパッタの発生を大幅に低減した高周波パルス CO₂ アーク溶接法の開発、まてりあ, Vol. 43(2004), No. 2, p. 151-153
- 2) T. KATAOKA, R. IKEDA, K. YASUDA, K. TOKINORI, Y. HIRATA: Development of Low Spatter CO₂ Arc Welding Method Using High Frequency Pulse Current、溶接学会 溶接法研究委員会 ガイドブック 5 (2004)
- 3) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一: 次世代 CO₂ アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発、溶接技術, Vol. 53(2005), No. 3, p64-69
- 4) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一: 「J-STAR Welding」を用いた高能率 CO₂ アーク溶接技術の開発、溶接技術, Vol. 54(2006), No. 9, p62-67
- 5) 片岡時彦, 池田倫正, 安田功一: 極低スパッタ CO₂ アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発、JFE 技報, No. 16(2007), p. 50-53
- 6) 片岡時彦, 中川郷司, 石井匠: 「J-STAR Welding」を用いた高能率溶接技術の開発、JFE 技報, No. 18(2007), p. 41-46
- 7) 片岡時彦, 池田倫正, 小野守章, 安田功一, 平田好則: スプレー移行を可能にした CO₂ アーク溶接技術「J-STAR Welding」の開発、まてりあ, Vol. 47(2008), No. 2, p. 99-101
- 8) T. KATAOKA, R. IKEDA, M. ONO, K. YASUDA, Y. HIRATA: Development of Ultra-low Spatter CO₂ Gas Shielded Arc Welding Process, “J-STAR Welding”、溶接学会 溶接法研究委員会 ガイドブック 6 (2009), p. II-54