

アーク現象と溶滴移行

1 アークとは	1
(1) アーク長とアーク電圧	1
(2) 電位傾度	1
(3) アークの硬直性と磁気吹き	2
2 溶滴移行現象	3
(1) 溶滴に作用する電磁ピンチ力	3
(2) 溶滴移行形態の分類	4
(3) 溶滴移行	5
(4) スパッタ発生と防止法	8
3 母材の溶融（溶込み形状）	9
(1) 溶滴移行形態の影響	9
(2) シールドガスの影響	9
(3) 極性の影響	10
(4) トーチ保持角度の影響	10
(5) 溶接速度の影響	11
4 裏波溶接	12



1 アークとは

二つの電極を接触させ通電し、そのまま電極を離れた時に発生する青白い炎がアークである。アークは低電圧、大電流の放電現象のことで、アーク溶接は電極で発生する熱と電極へ輸送される熱を利用して行われている。

(1) アーク長とアーク電圧

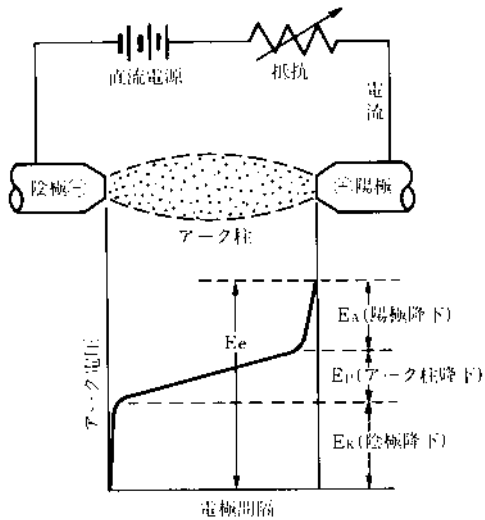


図2-1 アークの電位分布

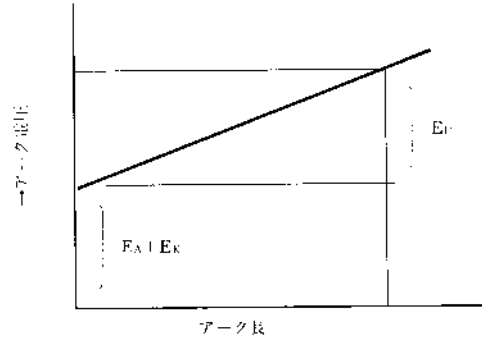


図2-2 アーク電圧とアーク長

溶接電流、電極材料、シールドガスが同一の場合、アーク長が変化しても陽極降下 (EA)、陰極降下 (EK) の値はほぼ一定でアーク柱降下 (EP) が変化する。



アーク長はアーク電圧に比例する

(2) 電位傾度

アーク柱降下 (EP) の度合いを電位傾度といい、主としてシールドガスによって決まる。

表2-1 各種ガス気中の電位傾度の比較

ガス	電位傾度の比
アルゴン	0.5
空気	1.0
窒素	1.1
炭酸ガス	1.5
酸素	2.0
水蒸気	4.0
水素	10.0

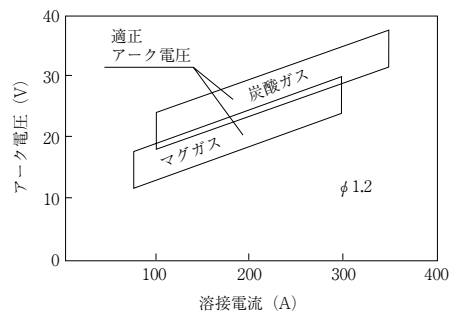


図2-3 溶接電流と適正アーク電圧範囲の一例

炭酸ガス (CO₂) などの多原子分子はアークの高温下では電離している。その電離の際の吸熱反応を補うため電位傾度が高くなる。



同一アーク長にする場合、Ar-CO₂ガスよりCO₂ガスの方がアーク電圧が高くなる。

(3) アークの硬直性と磁気吹き

アーク空間には電流による磁力線とそれらによる力が作用する。(フレミングの左手の法則) また比較的大電流の溶接アークでは電極に近い部分の電流密度が高くなるため、アークに働く電磁圧が下方の母材より高くなる。この圧力差により上方から下方に向かうプラズマ気流が発生する。これらの電磁力とプラズマ気流の影響により電極や母材を傾けてもアークは鉛直方向に指向する。(アークの硬直性)

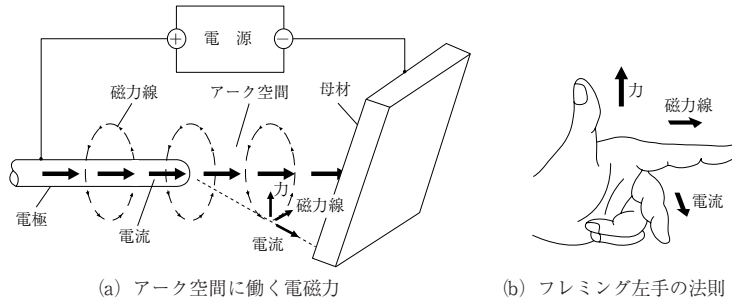


図2-4 アークの硬直性の原因

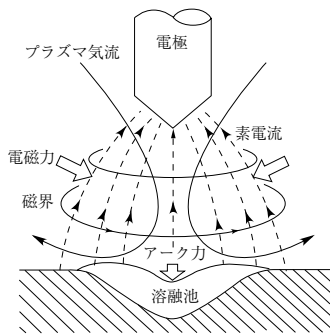
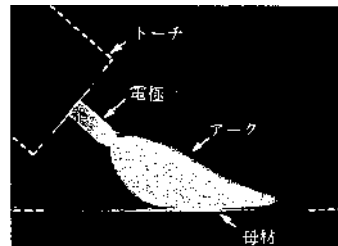


図2-5 プラズマ気流 (TIG溶接)



タングステン電極径 2.4mm 棒マイナス 150A

写真2-1 ティグアークの硬直性

実際のアーク溶接では、アークが通った後の母材を流れる電流による磁界やアーク周辺の磁性体などの影響を受けアークが振れることがある。(磁気吹き)

アース接続位置は磁気吹き発生に大に関係し、一般にアース接続部から遠ざかるように溶接方向を決めることが望ましい。

アーク間の相互作用により、力を受けアーク不安定を生じやすいので電極間隔(トーチ間隔)は出来るだけ広くとることが望ましい。

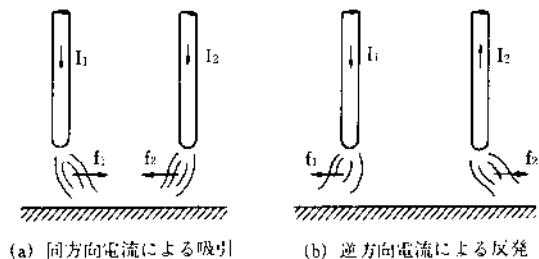


図2-6 アーク間の相互作用

2 溶滴移行現象

(1) 溶滴に作用する電磁ピンチ力

溶接ワイヤから溶滴が溶融池に移行する力は、主として重力、表面張力及び電磁力の組合わせである。また大電流ではプラズマ気流の影響を受ける。

比較的電流の大きなアーク溶接では電磁力の影響が非常に大きい。その力は電流と磁力線により中心方向に働く力で電磁ピンチ力と呼ばれる。

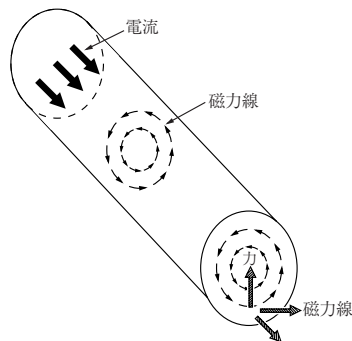


図2・7 ピンチ効果の発生原因

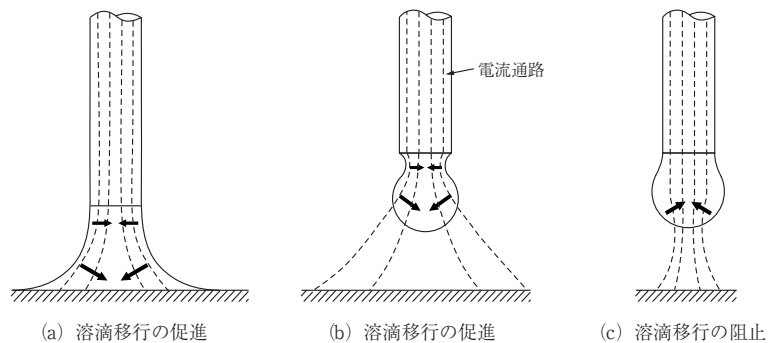


図2・8 液柱および溶滴に働く各種ピンチ力の方向

(a)のように短絡の場合、移行を促進する方向に力が働くため大きな電流を流すと溶滴を引きちぎる。

(b)のように短絡しない場合、内側に働く力だけでなく下の方向にも力が働き離脱が促進される。

大電流ではその力は大きく、プラズマ気流の影響も受けて小さな溶滴で移行する。

(c)CO₂やHeの電位傾度の大きなガスではアークは収縮して溶滴の底部に集中することが多い。この場合、電磁力は上向きに働き溶滴の離脱を阻害する。

(2) 溶滴移行の形態の分類

表2・2 溶滴移行形態の分類

型	分類	形態
自由移行	1 グロビュール移行 1.1 ドロップ移行 1.2 反発移行	
	2 スプレー移行 2.1 プロジェクトド移行 2.2 ストリーミング移行	
	3 爆発移行	
接触移行	4 短絡移行 5 橋絡移行	

自由移行はアーク空間を移行する形態のこと。

- ┌ グロビュール移行：ワイヤ径より大きな溶滴が移行
- ├ スプレー移行：ワイヤ径より小さい溶滴が移行
- └ 爆発移行：溶滴内のガス成分が爆発して移行

なお、アーク形状や極性、シールドガスの種類などの原因子の違いにより形態は細分化されている。

接触移行は、溶滴が溶融池に接触することにより移行する形態のことで接触移行直前の溶滴の大きさにより分類されている。

一般的に使用されるガスシールドメタルアーク溶接での溶滴移行形態は、以下の4種類であり、シールドガス組成や溶接電流、アーク電圧の組合せにより決まる。

- ①短絡移行 ②グロビュール移行
- ③スプレー移行 ④パルス電源によるスプレー移行

表2・3 各溶滴の移行形態の発生要因

溶滴移行形態	シールドガス組成	溶接電流×アーク電圧				溶接電源	備考
		低 ← 高	低 ← 高	低 ← 高	低 ← 高		
短絡移行 (ショートアーク溶接)	CO ₂ Ar+CO ₂ Ar+O ₂	○	—	○	—	一般電源 (定電圧電源)	ガス組成の如何を問わず、低電流×低アーク電圧で発生
グロビュール移行 (粒状移行)	CO ₂	●	○	—	○		アーク長が長くなると電流の高低を問わず発生
	Ar+CO ₂	●	—	—	●		一般的に使用せず
スプレー移行	Ar+CO ₂ Ar+O ₂	—	○	—	○		臨界電流以上で発生 Ar≧70% (CO ₂ では発生せず)
パルス電流による スプレー移行	Ar+CO ₂ Ar+O ₂	○	○	—	○	パルス電源	低溶接電流でも発生 Ar≧70%

●：一般的には使用されない。

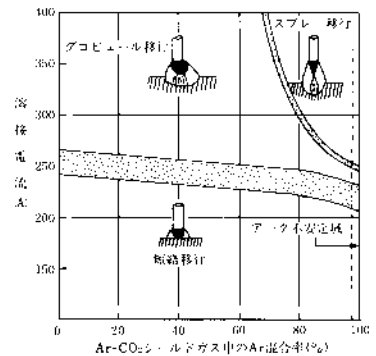


図2・9 Ar-CO₂溶接における溶滴移行形態

(3) 溶滴移行

ア) 短絡移行

ワイヤの先端が母材に接触短絡し、そこで短絡電流によるピンチ力及び溶融池の表面張力等の力により母材へ離脱し、その直後に再アークし、短絡・アークを繰り返しながら移行する形態である。

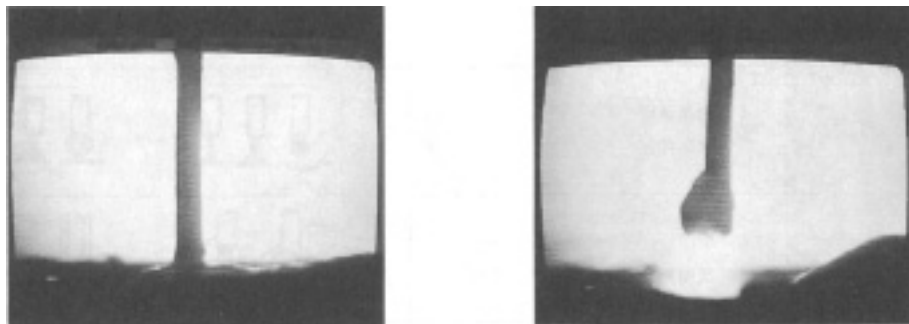
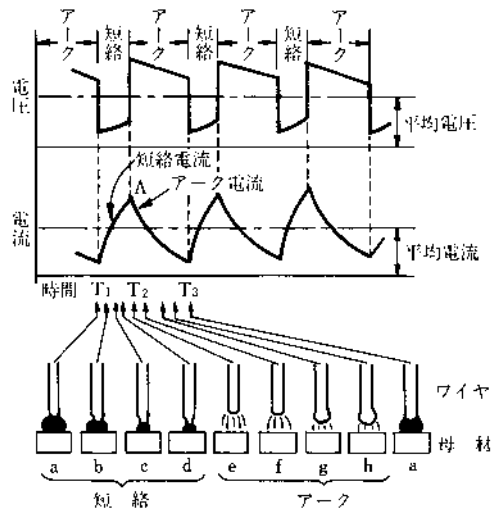


図2・10 短絡移行溶接

短絡回数は、溶接作業性を左右する大きな因子であり、毎秒40～50回以上で良好となり、150回/秒程度に達する

- ・ シールドガス組成の如何を問わず、**低電流×低アーク電圧**で生じる。
- ・ 溶接時、独特の「ジー……」と言うような短絡音が聞こえる。
- ・ 短絡時、アークが消滅して溶融プールが冷却するので、**溶け込みが浅く、薄板（板厚3mm程度以下）の溶接や立向き、上向き溶接、裏波溶接などに使用される。**
- ・ スパッタの発生は比較的少なく、小粒である。
- ・ Ar-CO₂混合ガスの使用により、ビード外観、スパッタが改善される。
- ・ 主として、1.2mm以下のワイヤ径が使用される。

イ) グロビュール移行

溶滴先端におけるアーク集中を生じそこに流入する電流の方向によりピンチ力は溶滴を押し上げるように働き、粒滴は大きく成長しやすい。写真2・2にその一例を示す。

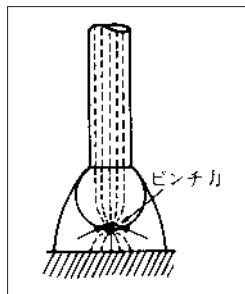


図2・11

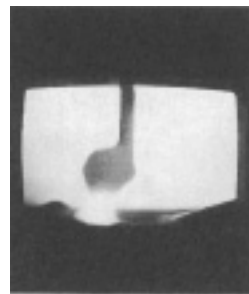


写真2・2

- ・溶滴径がワイヤ径以上になる溶滴移行の総称である。
- ・アーク熱によりワイヤ先端部が溶融し溶滴を形成する。時間経過により溶滴は重量増加し、ついにはワイヤ先端に懸垂できなくなり、溶融プールに向けて落下移行する移行形態である。
- ・CO₂溶接の場合、ならびにAr-CO₂混合ガス溶接で、Ar割合70%以下、あるいは臨界電流以下の低電流溶接の場合生じる。
- ・アークが連続して発生し、溶融プールに供給される熱量が多くなるので、溶込みが深くなり、主として中厚板（板厚4mm程度以上）の下向き姿勢、横向き姿勢の溶接に使用される。
- ・CO₂溶接では、ビード外観形状が劣る場合が多く、スパッタの発生も多い。ただし、Ar添加量の増加につれ改善傾向が見られる。
- ・主として1.2mm以上のワイヤ径が使用される。

ウ) スプレー移行

スプレー移行においては、ワイヤ溶融部先端は先鋭化し、そこに流入する電流の方向により、ピンチ力は溶滴を押し下げるように働き、粒滴は細粒化する。この細粒化域をスプレー移行という。

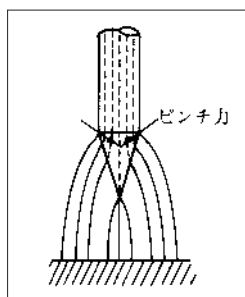


図2・12

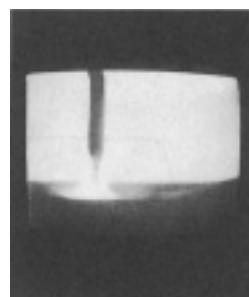


写真2・3

- ・溶滴径がワイヤ径以下の溶滴移行形態に対する総称である。
- ・Ar割合70%以上のAr-CO₂混合ガス溶接で、スプレー化臨界電流（炭素鋼1.2mmワイヤでは260～270Amp程度）以上の高電流を使用する場合に生じる。
- ・アークが極めて安定しており、ワイヤ先端の溶滴は、溶接電流による電磁ピンチ力により細く絞られ、プラズマジェット気流に乗って小さな溶滴となり、連続移行する。
- ・スパッタも少なく、良好なビード形状外観を有する。溶込みが深く、中厚板（板厚4mm程度以上）の下向き溶接、水平すみ肉溶接に使用される。
- ・主として1.2mm以上のワイヤ径が使用される。

エ) パルス電源によるスプレー移行

- ・ 周期的に溶接ワイヤ電極にパルスピーク及びパルスベースエネルギーを付加し、平均溶接電流が臨界電流以下でもスプレー移行が可能となる。

写真2・4

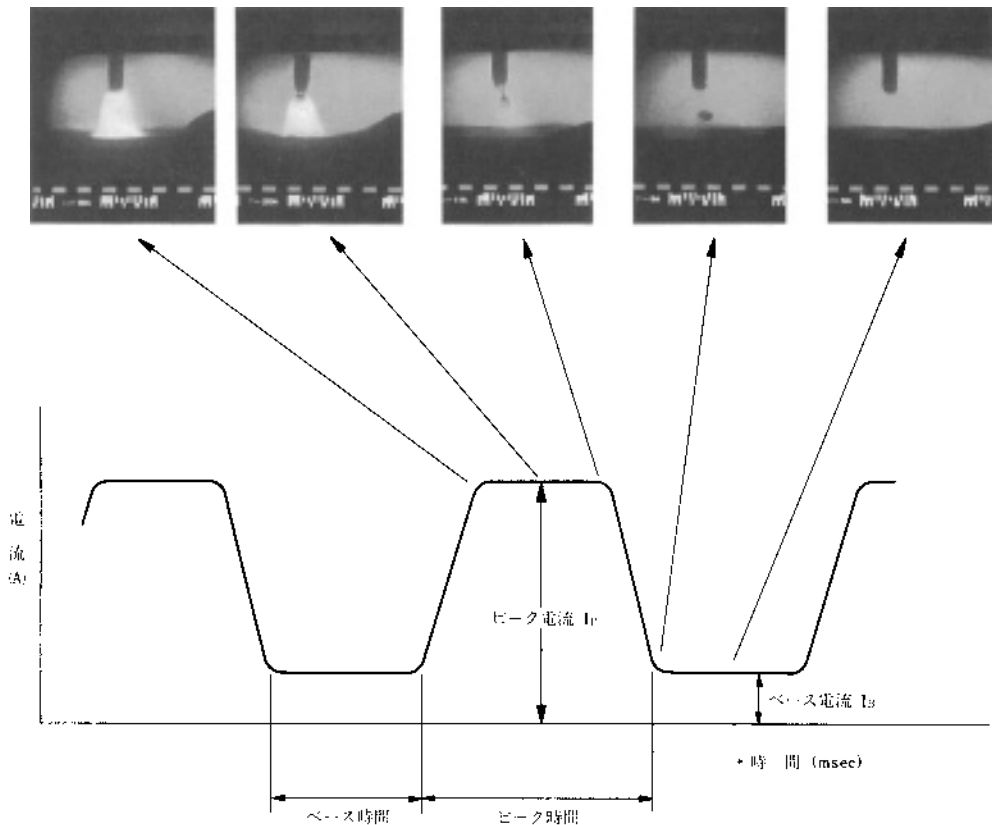


図2・13

- ・ パルス電源による、低電流であるベース電流に周期的に重畳される高電流のパルス電流により生じる。
- ・ ベース電流によりワイヤ先端に形成された溶滴は、引続いて供給されるパルス電流（スプレー化臨界電流以上に設定）によりスプレー化し、離脱・移行する。
- ・ 本形態の溶滴移行（スプレー化）では、平均電流 [(ベース電流+パルス電流)/パルス周期時間] は、通常電源によるスプレー移行の場合より小さくなる。
- ・ スプレー移行の低溶接電流化を図り、短絡移行溶接領域（薄板、全姿勢溶接、裏波溶接など）の低スパッタ化、高速化による高能率化、ビード形状外観の改善を意図した技術である。
- ・ 主として1.2mm以上のワイヤ径が使用される。

(4)スパッタの発生と防止法

CO₂溶接の短所の一つは、スパッタが発生しやすいことである。

発生したスパッタは溶接ビード周辺に付着して溶接部を汚損するとともに、溶接後、除去する工数が発生し、溶接コストアップにつながる。また、溶接トーチのシールドガスノズルに付着・堆積し、シールドガスの流れを妨げ、溶接欠陥発生の要因ともなる。

スパッタの発生状況を観察すると、大きくは4種の形態をとっている。

そのうち最も大きな要因は、アーク再生時に発生するスパッタである。

短絡時、急激な電流上昇が起こると、溶滴は安定に短絡できず、アーク力により吹き飛ばされスパッタとなる。また、溶滴離脱直前に大きな溶接電流が流れていると、細くなった溶滴は急激に焼け切れ、再アーク時のアーク力によりスパッタを発生させる。

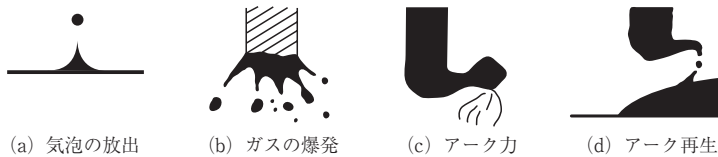


図2-14 スパッタの発生形態とその原因

スパッタ防止対策としては、それぞれ溶接電源、溶接材料（溶接ワイヤ、シールドガス）、溶接条件からの方法がある。以下にその一例を示す。

溶接電源 : 回路インダクタンスの調整、パルス電源、電流波形制御電源の採用

シールドガス : Arリッチガス (Ar-CO₂、Ar-O₂ガスなど) の採用

溶接ワイヤ : 送給性の改善、通電性改善

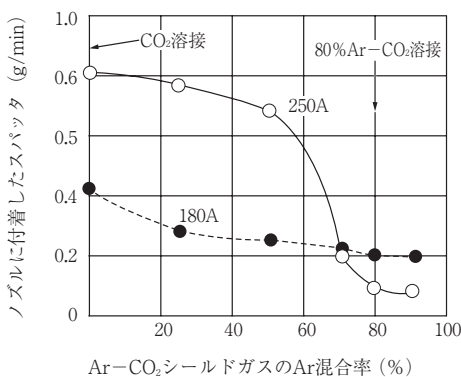


図2-15 シールドガス組成とスパッタ発生量

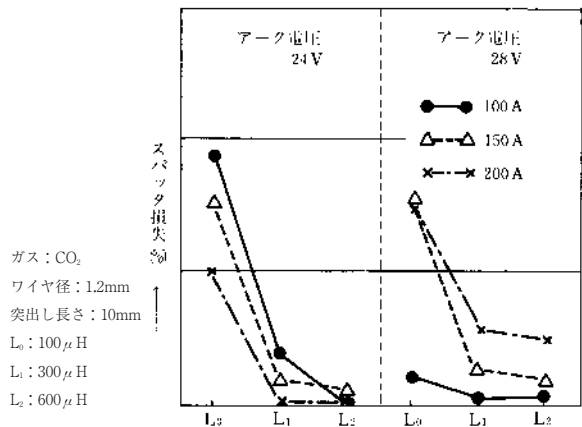


図2-16 スパッタに及ぼす回路インダクタンスの影響

3 母材の溶融（溶込み形状）

溶接ビードの溶込み形状は、溶滴移行形態、シールドガスの種類、溶接速度・トーチ保持角度などの影響を大きく受ける。

(1) 溶滴移行形態の影響

溶込み形状は、おおむね3つに分類され、小電流・短絡移行溶接では熱伝導形（一部対流形）、大電流グロービュール移行（スプレー移行）では中央溶込み形となる。

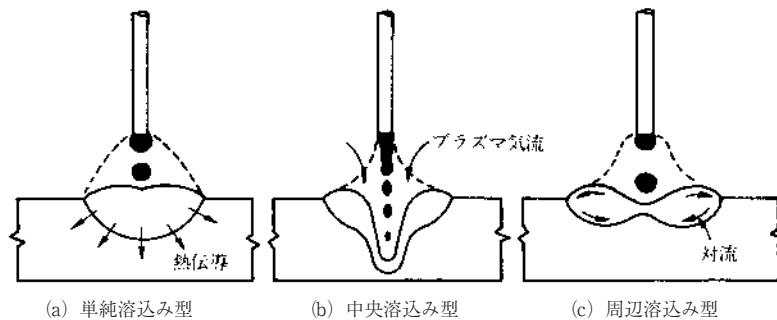


図2-17 溶込み形状の分類

(2) シールドガスの影響

シールドガス組成は溶滴移行形態、溶融プールへの供給熱量の変化をもたらし、それぞれ特徴的な溶込み形状をもたらす。特に大電流溶接条件ではこの傾向が著しい。

CO₂ガスでは鍋底型となるが、ミグ溶接であるAr、Ar-O₂ガスでは強いプラズマ気流の発生により中央部が深くくびれたフィンガー状（あるいはネイル状と呼ぶ）の中央溶込み形状となる。

Ar-CO₂ガスの場合も、Arが70%を超えてスプレー移行が生じると中央溶込み型のフィンガー状の溶込み形状となる。

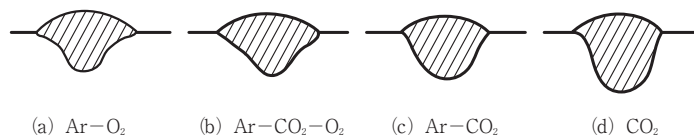


図2-18 シールドガスと溶込み形状の変化傾向

(3)極性の影響

CO₂ (MAG) 溶接は、一般に、ワイヤプラスの極性 (逆極性とも呼ばれる) で使用され、安定したアーク状態とともに適当なビード形状・溶込みが得られる。

一方、ワイヤマイナスの接続は正極性とも呼ばれ、ワイヤ送給速度をワイヤプラスの場合と同一条件に設定したとき、溶接電流の低下・アーク拡がりの減少が生じ、中高で溶込みの浅い溶接ビードとなる。

なお、ティグ溶接では逆傾向が生じ、電極 (-) に接続し、深溶込みが得られる。

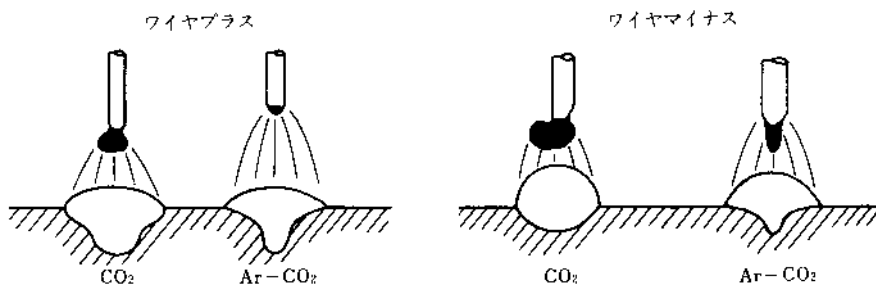


図2-19 極性と溶込み形状

(4)トーチ保持角度の影響

溶接進行方向に対するトーチ保持角度により溶け込み形状は大きく変化する。

- ・前進溶接 : 溶込みが浅く、扁平・広幅ビードを形成。薄板、高速溶接に好適。水平すみ肉溶接などで良好なビード形状が得られる。
- ・後進溶接 : 溶込みが深く、中高・狭幅ビードを形成。厚板の溶接
- ・鉛直保持 : 前進法、後退法の中間の特性。

ただし、立向き下進溶接では、トーチ角度を後進法に保持しても、重力の作用により溶融プールがアーク直下に入り込み、溶け込みが浅く、扁平なビードになりやすい。

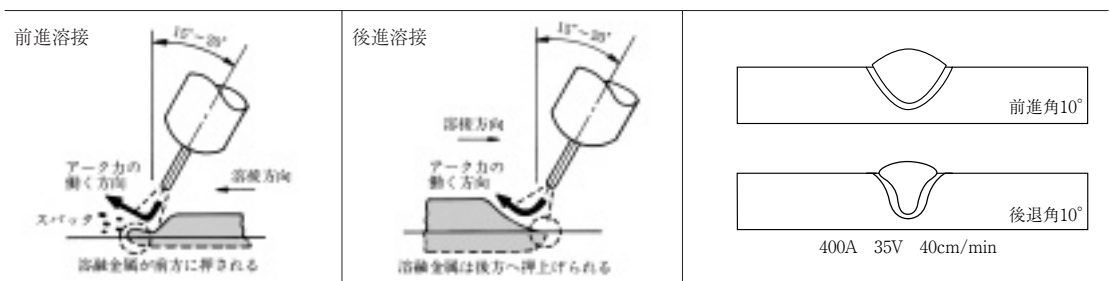


図2-20 トーチ保持角度と溶接ビード形状

(5) 溶接速度の影響

溶接速度はビード形状に大きく影響する。

溶接速度が増加（減少）すると単位ビード長（溶接長さ）当りのワイヤ供給量が減少（増加）し、ビード幅・余盛り高さが減少（増加）する。

また、低速溶接では溶融プール底面流が大きく、安定なビードが形成されるが、高速溶接では表面流が大きくなり、溶融プールの動きが激しく、アンダーカットの発生やハンピングビードを生じ易くなる。表面流が小さい埋れアーク（ベリードアーク）溶接は、高速溶接に適している。周囲の壁に遮られ、スパッタの発生も少ない。低電圧に設定しアーク長を短く保つことが必要となる。

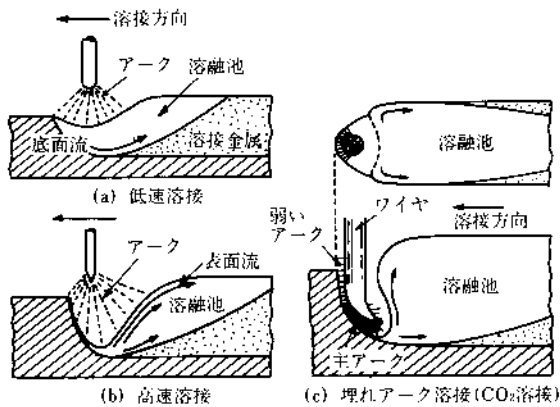


図2・21 溶接速度とアークの発生形態

4 裏波溶接

薄板、あるいは厚板ルート部初層溶接において、裏ビードを形成させることを裏波溶接という。熱伝導形、対流形よりキーホール形の方が裏波ビード幅を広く生成させることができる。

これはキーホールを通じてアークが直接母材裏側を溶融させることによるもので、溶込み形状は(d) のつづみ形になる。

ガスシールドアーク溶接で裏波を出し易くするには、開先部のルート高さ、ルート間隔を適正にし、キーホール形の溶接ができるよう溶接条件を選定する必要がある。また、シールドガスとしてCO₂よりAr-CO₂系の方が安定した裏波を得やすい。

半自動溶接では、短絡移行溶接で施工されることが多い。

また、反対側（裏波ビードが形成される側）に耐熱性のあるセラミックあるいはガラステープ製の消耗式裏当て材、もしくは銅製の裏当て材を装着し、比較的高溶接電流を使用して、裏当て材上に裏波ビードを形成する方法もある。

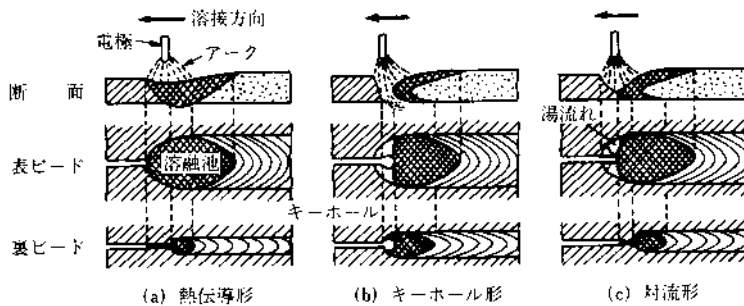


図2-22 裏波溶接におけるビード形成の基本形態

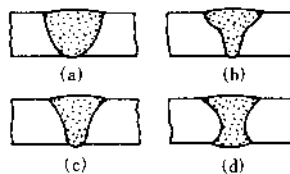


図2-23 裏波溶接における溶込み断面形状