

# 2 | アーク溶接の概要

## 2.1 アーク溶接とその分類

アーク溶接はアーク熱を利用して被溶接材（母材）の接合部を加熱、溶融することによって、母材の溶融金属あるいは母材と溶加材を融合させた溶融金属を生成し、それらの溶融金属を凝固させて接合する手法である。アーク溶接は、連続的に一体化された継手部を形成できるため、以下のような長所を持つ。

- ① 継手効率（継手強度）が高い。
- ② 継手構造を簡素化することができる。
- ③ 優れた気密性や水密性を持つ。
- ④ 厚さに対する制約をほとんど受けない。
- ⑤ 材料を節減でき、経済的である。

一方、継手部の加熱あるいは溶加材添加などの影響を受けるため、以下のような短所も併せもつ。

- ① 溶接金属という新しい異質な材料が生成される。
- ② 溶接熱によって、母材の性質が局所的に変質する。
- ③ 局所的な加熱と冷却によって、溶接変形が発生する。
- ④ 残留応力が発生し、継手強度に悪影響を及ぼすことがある。
- ⑤ 溶接品質に対する外観での良否確認が困難である。

このようなアーク溶接は、アークを発生する電極の特性によって大別され、電極の溶融をほとんど生じない非溶極式（非消耗電極式）溶接と、電極が連続的に溶融、消耗する溶極式（消耗電極式）溶接の2種類に分類される。非溶極式溶接での電極はアークを発生させるためのみ用いられ、それ自体はほとんど溶融しない。したがって図2.1 (a) に示すように、溶着金属の添加が必要な場合には溶加材を別途加えなければならない。しかし、溶接電流と溶加材（棒またはワイヤ）の添加量はそれぞれ独立に変化させることができ、溶接条件選定の自由度は大きい。ただし溶加材の溶融は、一般に、アークおよび溶融池からの熱伝導によって行うため、非溶極式溶接の作業能率は比較的低い。

一方、溶極式溶接での電極は、アークを発生させると同時に、それ自体が溶融して溶着金属を形成するため、高能率な溶接作業を行うことが可能である。ところが図2.1 (b) に示すように、電極（ワイヤ）の溶融

量は溶接電流に強く依存し、電極の溶融量と溶接電流とをそれぞれを独立に制御することができない。そのため溶接条件選定の自由度は制限され、適切な溶接条件の設定には熟練が要求される。

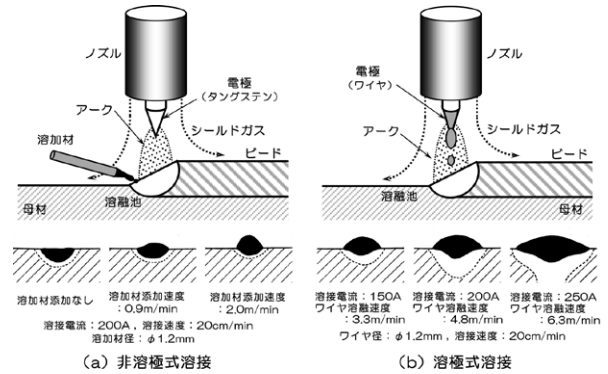


図2.1 溶極式溶接と非溶極式溶接

溶融金属中に大気（空気）が混入すると、図2.2 (a) に示すように、ポロシティ（プローホールおよびピット）発生の大い要因となる。すなわち母材を溶融して溶接するアーク溶接では、大気中の窒素や酸素から溶融金属を保護することが重要である。溶融金属を大気から保護する手法には、図2.2 (b) に示す、「フラックスを利用する方法」と「シールドガスを利用する方法」がある。

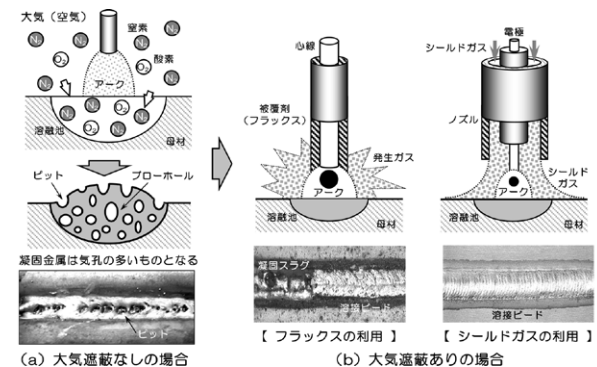


図2.2 溶融金属（溶接金属）の大気からの保護

フラックスを利用する方法では、被覆剤（フラックス）の溶融によって発生するガスで溶融池金属を大気から保護する。この場合、ビード表面は凝固スラグで覆われるため、溶接後にその除去が必要である。シールドガスを利用する方法では、アルゴン、炭酸ガスあるいはそれらの混合ガスなどを溶接部近傍に吹き付け、溶融池金属を大気から保護する。フラックスを用

いないためスラグの剥離はほぼ必要なく、自動化やシステム化などにも比較的容易に対応することができ、広範囲な産業分野で適用されている。なお、シールドガスを利用して溶融金属を大気から保護するアーク溶接法は、“ガスシールドアーク溶接”と総称される。

ガスシールドアーク溶接に用いられるシールドガスには表2.1に示すようなものがあり、適用できるガスの種類や組成は溶接法および母材の材質によって異なる。タングステン電極を用いるティグ溶接やプラズマアーク溶接で使用するシールドガスは、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He) または Ar+He 混合ガスなどの不活性ガス、あるいはアルゴンと水素の混合ガス (Ar+H<sub>2</sub>) などに限定され、酸素 (O<sub>2</sub>) を含むガスは使用できない。タングステンは、融点が三千数百℃の高融点金属であるが、酸化すると融点が千数百℃まで急激に低下するためである。また Ar+H<sub>2</sub> 混合ガスが使用できるのは、ステンレス鋼 (SUS) とニッケル (Ni) およびその合金に限られる。

表2.1 シールドガス組成と母材材質の組合せ

溶接法	シールドガス組成	母材材質						
		軟鋼	低合金鋼	SUS	Al合金	Cu合金	Ni合金	Ti合金
ティグ プラズマ	Ar	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + H <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
マグ	CO <sub>2</sub>	○	○	●	○	○	○	○
	Ar + CO <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + O <sub>2</sub>	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He + O <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> )	●	○	○	○	○	○	○
ミグ	Ar	○	○	○	○	○	○	○
	Ar + He	○	○	○	○	○	○	○

○：一般的な適用    ●：特殊用途

消耗ワイヤを電極とするマグ溶接では、軟鋼・低合金鋼の場合、100%炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) あるいは Ar+20%CO<sub>2</sub> の混合ガス (いわゆるマグガス) が多用される。またステンレス鋼では、ソリッドワイヤの場合は Ar+2~5%O<sub>2</sub> あるいは Ar+5~10%CO<sub>2</sub> の混合ガスが、フラックス入りワイヤの場合は主に 100% CO<sub>2</sub> あるいは Ar+20%CO<sub>2</sub> の混合ガスが使用される。ステンレス鋼や軟鋼・低合金鋼には、シールドガスに不活性ガスを用いるミグ溶接を適用することはできない。シールドガスに 100% Ar を用いると、アークの著しいふらつきや偏向現象が生じ、多量のスパッタが発生し、ビード外観も不均一なものとなるためである。このような不安定現象には陰極点を形成する酸化物が大きく関与しており、Ar に数%の O<sub>2</sub> あるいは CO<sub>2</sub> を添加して母材表面での酸化物生成を助長することによって陰極点の形成を安定化し、アークの偏向現象を

抑制する。

アルミニウム (Al)、銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、チタン (Ti) およびそれらの合金には O<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> を含むガスは使用できないため、100% Ar あるいは Ar+He 混合ガスをシールドガスとするミグ溶接が用いられる。これらの非鉄金属の場合、母材表面には十分な酸化物が存在し陰極点は安定して形成され続けるため、シールドガスに O<sub>2</sub> や CO<sub>2</sub> を添加しなくてもアークやビード形状が乱れることはない。

アーク溶接を細分化すると図2.3のように分類され、非溶極式溶接には“ティグ溶接”と“プラズマアーク溶接”があり、いずれの溶接法もシールドガスを利用して溶融金属を大気から保護する。溶極式溶接には、フラックスを利用して溶融金属を大気から保護する“被覆アーク溶接”、“サブマージアーク溶接”および“セルフシールドアーク溶接”と、シールドガスを利用して溶融金属を大気から保護する“ミグ溶接”、“マグ溶接”および“エレクトロガスアーク溶接”がある。なお“アークスタッド溶接”はフラックスもシールドガスも用いない溶接法であり、溶融金属を外周部に排出することによって健全な溶接継手を形成する。

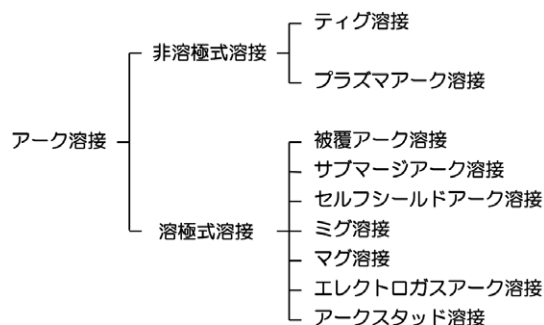


図2.3 アーク溶接の分類

## 2.2 溶接アークの性質

### 2.2.1 アークの特性

アークは、図2.4に示すように、2つの電極を接触 (短絡) させて通電し、そのままの状態では引き離すと電極間に発生する。溶接棒、溶接ワイヤあるいはタングステン電極棒などの比較的細径電極と母材との間に発生するアークは、一般に電極から母材に向かって拡がりベル形の形状となる。アークは高温の気体であり、例えばティグアークの場合、中心部で1万数千℃、外周部でも1万℃程度の高温を示す。アークは、原子や分子などの中性粒子と、その一部が電離して生じる

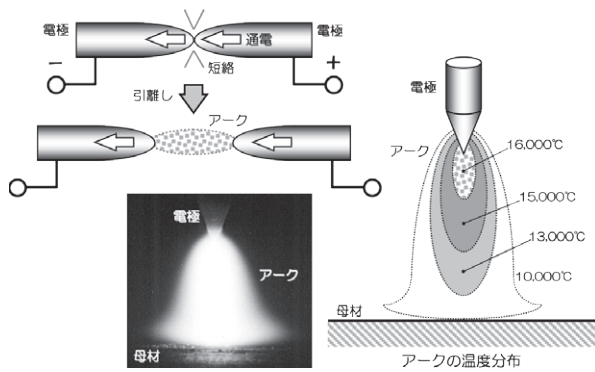


図 2.4 アークの性質

イオンや電子のような荷電粒子とで構成された導電性を持つ電離気体（プラズマ）である。その電流はほとんど電子によって運ばれ、電流と電圧との積で表されるエネルギー（電力）によって維持される。

アーク電圧は図 2.5 に示すように、陰極（マイナス極）および陽極（プラス極）近傍の電圧降下と、その間のアーク柱電圧降下とで構成される。アーク柱電圧はアーク長に応じて変化するが、陰極降下電圧および陽極降下電圧はアーク長が変化してもほとんど変わらない。このためアーク長を極端に短くしても、アークが発生している限り、アーク電圧が数V（陰極降下電圧と陽極降下電圧の和）以下になることはない。

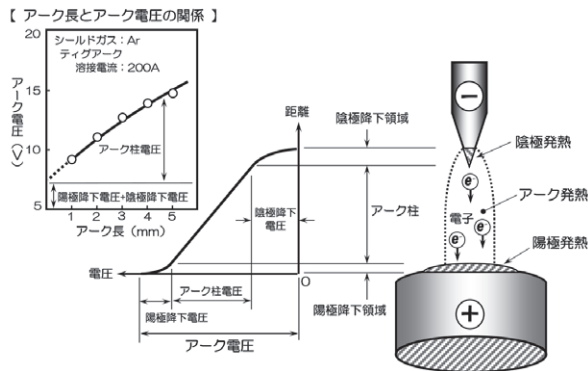


図 2.5 アーク電圧の構造

溶接電流とアーク電圧の関係（アークの電流 - 電圧特性）は図 2.6 のようであり、大電流域では電流の増加にともなって電圧が緩やかに増大する“上昇特性”を示すが、小電流域では電流の減少にともなって電圧が急激に増加する。またアーク長が変化すると、この特性曲線は電圧（縦）軸に沿って上下方向にほぼ平行移動する。すなわちアーク長とアーク電圧はほぼ比例し、アーク長を短くするとアーク電圧は減少し、長くするとアーク電圧は増大する。

アーク長が同じであっても、シールドガスの種類によってアーク電圧は変化する。アークを維持するため

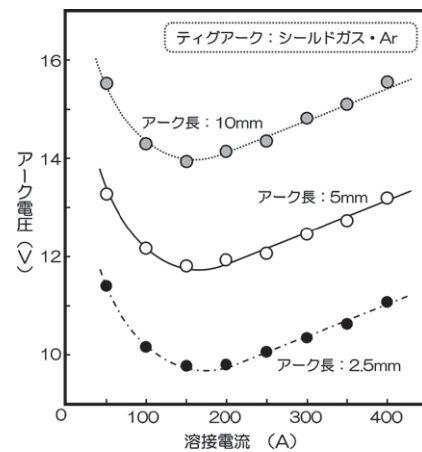


図 2.6 溶接電流とアーク電圧の関係

に必要なエネルギーは、ガスの種類によって異なるためである。たとえば熱損失の大きいHeをシールドガスに用いると、図 2.7 に示すように、アーク電圧はArを用いた場合の2倍近い値となり、母材への入熱が増加して深い溶込みが得られる。ただし、アークの電圧増加はアーク切れを生じやすいことにつながるため、He 使用時には十分な出力電圧が得られる溶接電源を用いなければならない。

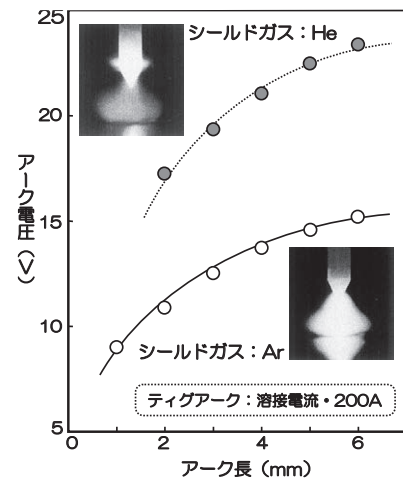


図 2.7 シールドガスの影響

アークで発生した熱は、電子流とガス気流からの熱伝達とによってアーク柱を介して母材へ運ばれる。その一部は熱放射によって失われるが、大部分の熱は母材に持込まれ、母材を溶融して溶融池を形成する。母材に投入された熱のほとんどは溶融池内を移動し、溶融池と母材との境界（固液界面）を通過して母材へ流れ、熱伝導によって散逸する。また溶融池金属の蒸発が発生する場合には、その表面からも熱の散逸がある。

平行な導体に同一方向の電流が通電されると、導体間には電磁力による引力が発生する。アークは気体で

構成された平行導体の集合体とみなせるから、平行導体間に発生する引力はアークの断面を収縮させる力として作用する。このような作用を“電磁的ピンチ効果”といい、その力を“電磁ピンチ力”という。

電磁的ピンチ効果は、溶接ワイヤにおいても同様に作用する。図 2.8 に示すように、固体部分は電磁ピンチ力を受けても変形することはないが、液体となった先端部の溶滴は電磁ピンチ力の作用で断面が減少し、溶滴にはくびれが発生してワイヤ端から離脱する。なおアークには、冷却作用を受けると断面を収縮させ、表面積を減少させることによって熱損失を抑制しようとする作用もあり、この作用は“熱的ピンチ効果”と呼ばれる。

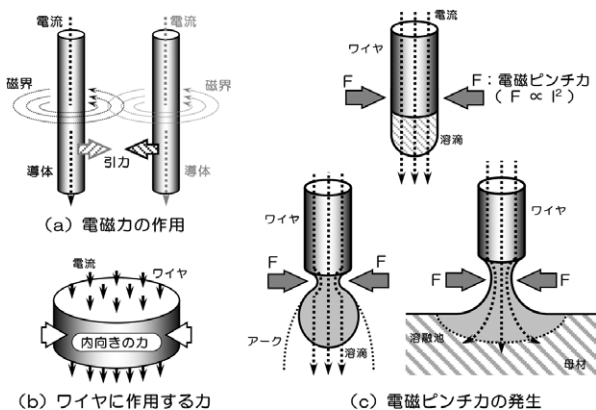


図 2.8 電磁ピンチ力

アーク溶接では、その周囲に溶接電流による磁界が形成され、図 2.9 に示すように、フレミング左手の法則に従う電磁力が発生する。またアークの電流路は電極から母材に向かって拡がるため、電流密度の大きい電極近傍での電磁ピンチ力は、電流密度が小さい母材近傍でのそれよりも大きく、アーク柱内部の圧力は母材表面より電極近傍の方が高くなる。このような電磁力と圧力の差は、シールドガスの一部をアーク柱内に引き込み、“プラズマ気流”と呼ばれる電極から母材に向かう高速のガス気流を発生させる。

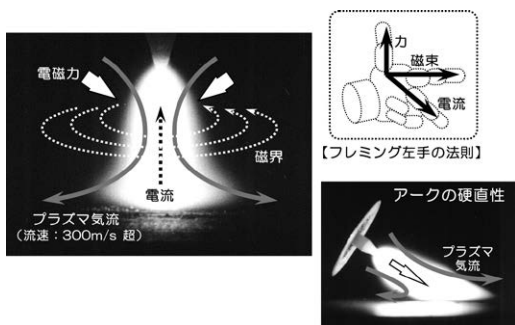


図 2.9 プラズマ気流とアークの硬直性

プラズマ気流の流速は 300m/秒を超えることもあり、溶滴移行や溶込みの形成に大きく関与する。上向溶接や横向往溶接などにおいて、重力が作用するにもかかわらず溶滴が溶融池へスムーズに移行するのは、プラズマ気流が存在するためである。またアークは電極と母材との最短距離で発生するとは限らず、トーチを傾けてもプラズマ気流の作用で軸方向に発生しようとする傾向がある。このようなアークの直進性を“アークの硬直性”という。なお電磁ピンチ力は電流値に大きく依存し、電流値が小さくなるとその力は低下してプラズマ気流も弱くなるため、小電流域でのアークは硬直性が弱まり不安定でふらつきやすくなる。

溶接電流によって発生した磁界や母材の残留磁気がアーク柱を流れる電流に対して著しく非対称に作用すると、その電磁力によってアークは偏向する。このようなアークの偏向現象を“アークの磁気吹き”といい、典型的な例を図 2.10 に示す。(a) は母材の中央部と端部とで磁界の形成形態が異なることによって生じる現象である。磁界を形成する磁束は鋼板中に比べて大気中の方が通りにくいいため、アークが母材端部に近づくとき非対称な磁界が形成されてアークが偏向する。(b) は溶接線近傍に断面積の大きい鋼ブロックが存在する場合に発生しやすい現象で、鋼ブロック側に磁束が吸い寄せられて非対称な磁界が形成されることが原因で発生する。(c) は母材側ケーブルの接続位置に起因したもので、溶接電流の通電によって形成される電流ループの影響によって生じる現象である。溶接電流のループによって形成される磁界の強さ（磁場）は、ループの外側より内側の方で強くなるため、磁場の弱い方すなわち電流ループの外側へアークが偏向する。

磁気吹きは磁性材料の直流溶接で発生しやすい現象であり、極性が頻繁に変化する交流溶接や非磁性材料の直流溶接などで発生することは比較的少ない。磁気吹きの防止対策としては、母材へのケーブル接続位置

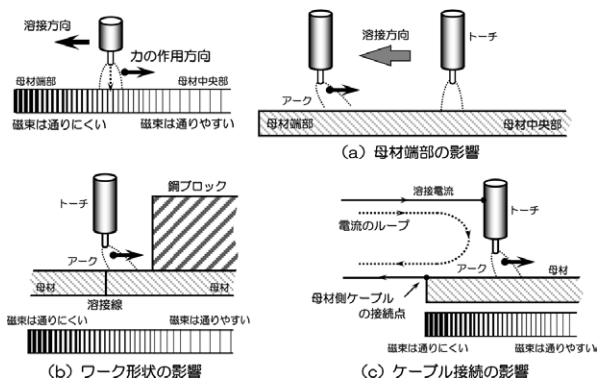


図 2.10 磁気吹き

や接続方法を工夫する、母材やジグの脱磁処理を実施するなどが基本的な対処方法であるが、現実的には試行錯誤の繰返しとなることが多い。

## 2.2.2 母材の溶融

アーク溶接の溶融池には、図 2.11 に示すような力が作用して溶融池金属の流れを支配する。すなわち溶融池内には、プラズマ気流によって生じる対流、溶融池表面上の温度勾配に起因した表面張力対流、溶融池内を流れる電流によって生じる電磁対流および溶融池内の温度差によって生じる熱対流の 4 種類がある。なお表面張力対流は、母材中に含まれる微量元素の影響を受けてその流れの方向が逆転することが知られている。表面張力は、通常（不純物濃度が低い場合）、温度が高くなるほど低下するため、表面張力によって生じる溶融池金属の対流は高温の溶融池中央部から低温の周辺部へ向かう方向に形成される。しかし酸素 (O) や硫黄 (S) などの不純物濃度が高くなると、温度が高くなるほど表面張力が増大して、対流の方向は溶融池周辺部から中央部に向かう方向へと変化する。

これら 4 種類の対流が複合され、中央部から周辺部へ向かう溶融金属の流れが形成されると、溶込みは幅が広く浅いものとなる。反対に周辺部から中央部に向かう方向の流れが形成されると、幅が狭く深い溶込みとなる。

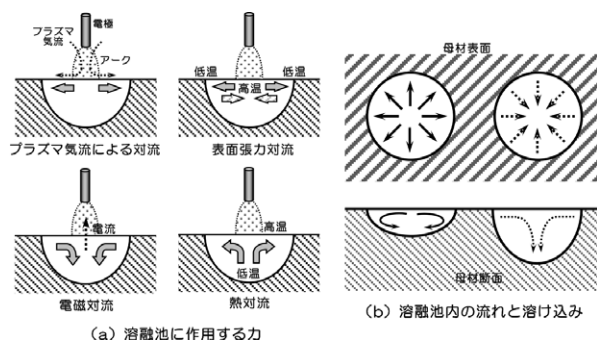


図 2.11 母材の溶融形態

溶接ビード形成におよぼす溶接条件（溶接電流、アーク電圧および溶接速度）の影響を、溶加材を添加しないティグ溶接の例で示すと図 2.12 のようである。アーク電圧（アーク長）と溶接速度を一定にして、溶接電流を増加させると母材への入熱が増加して、ビード幅と溶込み深さが増大する。溶接電流と溶接速度を一定にして、アーク電圧を高くするとビード幅が広がって溶込み深さは減少する。しかし所定値以上にアーク電圧を高くすると、母材への入熱が過度に分散してビード幅と溶込み深さはともに減少し、母材を溶

融することができなくなる。また溶接電流とアーク電圧を一定にして溶接速度を速くすると、単位長さ当たりの入熱量が減少するためビード幅と溶込み深さはともに減少する。

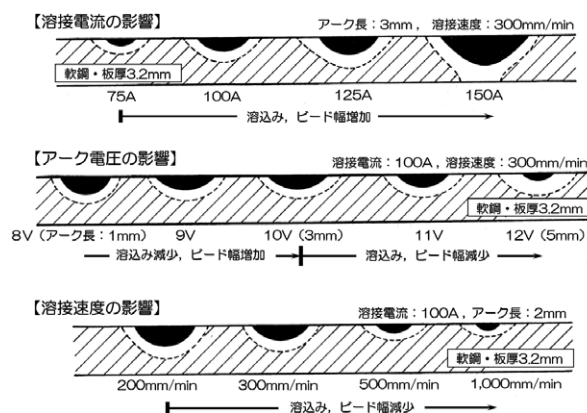


図 2.12 溶込みにおよぼす溶接条件の影響（ティグ溶接の場合）

溶接ビードの形成におよぼす溶接電流と溶接速度の関係は、一般に図 2.13 のようである。溶接電流が小さく溶接速度が速い小電流 / 高速域では、入熱が不足して母材に十分な入熱が付与されないため溶込み不足が生じる。反対に溶接電流が大きく溶接速度が遅い大電流 / 低速域では、母材に過大な熱が加えられて溶接金属の溶落ちや薄板では母材の穴あきが発生する。また溶接電流が大きく溶接速度も速い大電流 / 高速域では、アークによる母材の掘り下げ作用が強くなるため、母材の溶融幅がビード幅より広がって、アンダーカットやハンピングが発生しやすくなる。溶融池金属は一旦溶融池の後方へ押しやられた後、逆流して溶融池前方に戻される。しかし溶接速度が速くなると、溶融池は後方へ長く伸びて形成され、十分な溶融池金属が前方まで戻りきる前に後方で凝固して、溶融池前方でのビードを形成する溶融金属量が不足するためである。

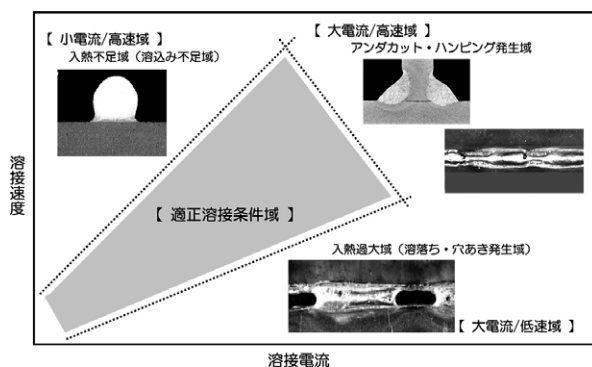


図 2.13 ビード形成におよぼす溶接条件の影響

アーク溶接は図 2.14 に示すような種々の溶接姿勢

に適用されるが、そのビード形成や溶接作業性は溶接姿勢によって大きく異なる。下向溶接では重力による溶融池金属の垂れ落ちを考慮する必要がないため、大きい溶融池が形成される高能率な溶接も可能である。立向上進溶接では、重力の影響を受けて溶融池金属が溶融池後方に垂れ下がり、溶込みは深くビードは凸となりやすい。立向下進溶接では、溶融池金属の垂れ下がりを防ぎ、溶融池金属の垂れ落ちが生じないようにしなければならない。ビードは扁平で溶込みが浅く、裏波ビードの表面は凹形になりやすい。上向溶接では、表面張力で溶融池金属を保持してビードを形成しなければならない。溶融池が大きくなり過ぎると重力が表面張力より大きくなって溶融池金属の落下が生じる。溶込みは浅くビードはやや凸形で、裏波ビードは立向下進溶接と同様に凹形となりやすい。横向溶接では溶融池金属の上部が垂れ下がり、ビードの上端部が凹、下端部が凸のビード形状（ハンギングビード）となりやすいため、下向溶接のように大きい溶融池を形成することはできない。

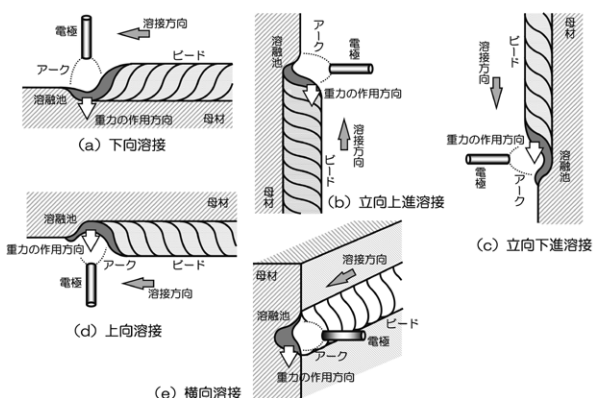


図 2.14 溶接姿勢の影響

なお下向き溶接であっても溶接線が傾斜している場合には、アーク力および重力の影響を受けて、図 2.15 に示すように、上り坂溶接では立向上進溶接に近い特性となつて凸ビードになりやすく、下り坂溶接では立向下進溶接に近い特性となつて溶融池の先行が生じやすくなる。

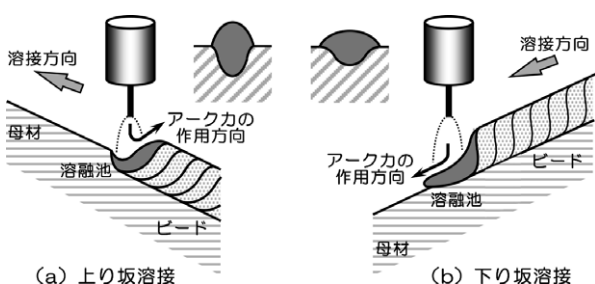


図 2.15 傾斜のある溶接

## 2.2.3 溶滴の移行形態

溶極式溶接では溶滴が電極先端部から離脱して溶融池へ移行するが、その形態は溶接法、溶接条件あるいはシールドガスの種類などによって異なる。例えば I IW（国際溶接学会）では、溶滴の移行形態をその大きさ、形状および形態によって図 2.16 のように分類している。

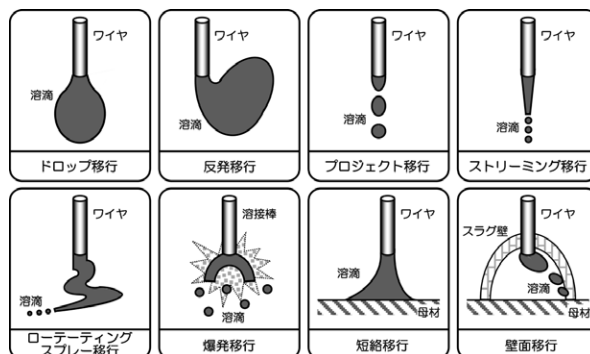


図 2.16 溶滴移行モードの I IW 分類

ドロップ移行はワイヤ径より大きい径の溶滴がワイヤ端から離脱する移行形態、反発移行は大塊となった溶滴がワイヤ方向へ押し上げられて不規則な挙動を呈しながらワイヤ端から離脱する移行形態であり、両者を包含してグローブール移行という。

プロジェクト移行はワイヤ径とほぼ等しい径の溶滴がワイヤ端から離脱する移行形態、ストリーミング移行は先鋭化したワイヤ端からワイヤ径より小さい径の溶滴が離脱する移行形態、そしてローテーティングスプレー移行は比較的長く伸びたワイヤ先端部の溶融金属が回転しながら小粒の溶滴を離脱する移行形態で、これらを包含してスプレー移行という。

また、爆発移行は内包されたガスが膨張して溶滴を破裂させる被覆アーク溶接で生じやすい移行形態、短絡移行は 1 秒間に数十回以上の短絡とアークを交互に繰り返す移行形態、壁面移行は溶融したフラックスで形成される空洞壁面に沿って移行するサブマージアーク溶接での移行形態の 1 つである。

溶極式ガスシールドアーク溶接でのアークおよび溶滴の挙動は、シールドガスの種類によって大きく異なる。その詳細については、後述する 3.6.2 項で述べる。

## 2.3 主なアーク溶接法の原理と特徴

### 2.3.1 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接は、図 2.17 に示すように、金属心線に被覆剤（フラックス）を塗布した被覆アーク溶接棒を電極としてアークを発生させる溶接法である。溶

接棒と被溶接材（母材）との間に発生させたアークは、その熱で溶接棒と母材を溶融する。溶接棒に塗布されたフラックスは、溶融されてガスを発生し、溶融金属を大気から保護する。また同時に溶融スラグを形成し、その溶融スラグは溶融金属との間で冶金反応を行うとともに凝固時のビード形状を整形する。

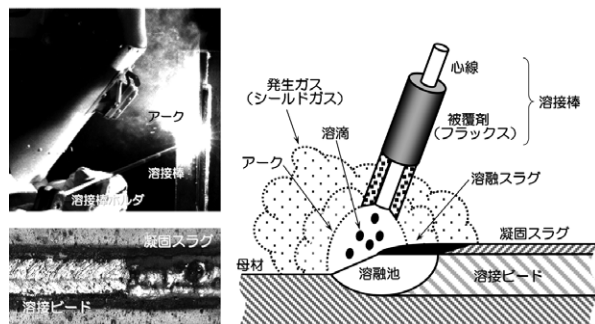


図 2.17 被覆アーク溶接

被覆アーク溶接は簡便な溶接法で適用範囲も広いことから、炭素鋼や合金鋼などの鉄鋼材料を始めとして、ニッケル合金や銅合金などの非鉄金属材料の溶接にも広く適用されている。溶接は、一般に、溶接作業者が溶接棒ホルダを手動で運棒操作して溶接を行うが、傾斜したスライドバーに取り付けられた溶接棒ホルダが、溶接棒の溶融につれて自重で下降して自動溶接する“グラビティ溶接”と呼ばれる方法もある。

被覆アーク溶接には次のような長所がある。

- ①簡便な機器で信頼度の高い溶接が手軽に行える。
- ②溶接設備費は安価である。
- ③グラビティ溶接機などの簡易溶接装置を1人で数台使用すれば、溶接能率の向上が可能である。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接の出来栄が溶接作業者の技量によって大きく左右される。
- ②マグ溶接に比べ溶着速度が遅く、溶接能率が劣る。
- ③溶接棒交換による溶接の中断が多く、長尺の連続溶接ができない。

わが国での被覆アーク溶接の適用比率は、マグ溶接・ミグ溶接の普及に伴い減少している。

### 2.3.2 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接は、図 2.18 に示すように、散布した粒状フラックス中にワイヤを自動送給し、ワイヤと母材との間にアークを発生させて溶接する方法

である。すなわち、被覆アーク溶接棒の心線とフラックスを分離させて、自動溶接を可能にした溶接法といえる。ワイヤには、通常、直径 3.2~6.4mm 程度の太径ワイヤを用い、数百~千数百 A 程度の大電流を通電することによって、高溶着・高能率な溶接を行うことができ、溶込みの深い溶接ビードが得られる。

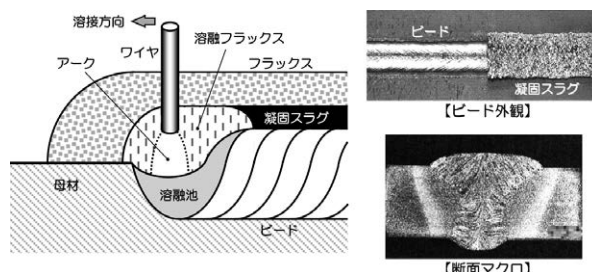


図 2.18 サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接には次のような長所がある。

- ①太径ワイヤによる大電流溶接が可能で、溶着速度が極めて大きい。
- ②小断面開先で溶込みの深い溶接ができ、能率的である。
- ③アークはフラックス中で発生するため、アーク光に対する遮光は不要である。
- ④スパッタや溶接ヒューム（気化した金属が急冷却凝縮して生成する 0.1~数 μm の固体粒子）の発生が少ない。
- ⑤風の影響をほとんど受けない。
- ⑥作業者の技量によらず、安定したビード形状と均質な継手品質が得られる。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接姿勢は下向、水平および横向きに限られる。
- ②継手形状は直線またはそれに近い形状あるいは曲率の大きい曲線などに限定される。
- ③フラックスの供給・回収やスラグの剥離が必要となる。
- ④溶接入熱が過大になると、熱影響部の軟化やぜい化を生じることがある。

サブマージアーク溶接は 1950 年頃わが国に導入され、高能率な溶接法として、主に造船、橋梁、建築分野や大径鋼管の製造に適用されている。

### 2.3.3 ティグ (Tungsten Inert Gas) 溶接

ティグ溶接は、図 2.19 に示すように、高融点金属であるタングステンまたはタングステン合金を非溶極式電極として、母材との間にアークを発生させて溶接

する方法である。炭素鋼・低合金鋼・ステンレス鋼・ニッケル合金・銅合金・アルミニウム合金・チタン合金・マグネシウム合金など、ほとんどの金属に幅広く適用できる。また他の溶接法に比べ溶接金属の清浄度が高く、じん性・延性・耐食性に優れるなどの特長をもつ。

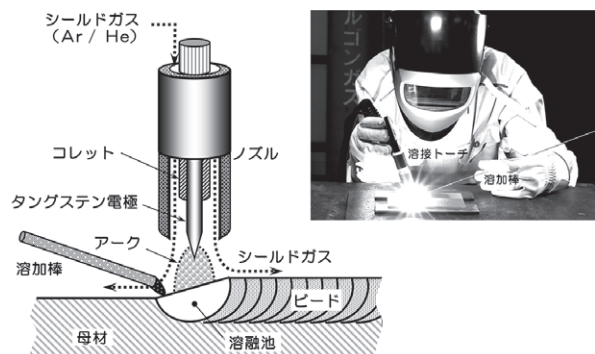


図 2.19 ティグ (TIG) 溶接

適用できるシールドガスは、Ar、HeまたはAr+Heなどの不活性ガスあるいはArとH<sub>2</sub>の混合ガスなどに限定され、酸化性ガス（活性ガス）は使用できない。タングステンは融点が三千数百℃の高融点金属であるが、酸化すると千数百℃程度まで融点（昇華点）が急激に低下するためである。

溶着金属が必要な場合には、溶加材（棒またはワイヤ）を別途添加しなければならない。しかしこのことは、溶接入熱と溶着量をそれぞれ独立に制御できることを意味し、全姿勢溶接や初層裏波溶接などを比較的容易に行うことができる。

ティグ溶接には次のような長所がある。

- ①酸化のない美しいビード外観および高品質・高性能の溶接継手が得られる。
- ②小電流から大電流までの広範囲な電流域で安定なアーク状態が得られる。
- ③母材への入熱と溶着量をそれぞれ独立に設定・制御でき、溶接姿勢や継手形状の制約が少ない。
- ④溶融池の挙動は穏やかで安定しているため、その挙動を明瞭に観察できる。
- ⑤溶接ヒュームの発生が少なく、作業環境が良好である。
- ⑥スパッタやスラグの発生はほとんどなく、溶接後の仕上げ作業が不要である。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接速度が一般に遅く、作業能率が劣る。
- ②溶込みは比較的浅く、深い溶込みが必要な溶接

には適さない。

- ③手動溶接での溶加棒添加が必要な場合、トーチ操作と溶加棒添加動作を左右それぞれの手で、個別に行わなければならない、作業者にはかなりの熟練と技量が要求される。
- ④風の影響を受けやすいため、状況に応じた防風対策が必要になる。
- ⑤アルゴンやタングステン電極は比較的高価で、溶接経費がやや高くなる。

### 2.3.4 マグ (Metal Active Gas)・ミグ (Metal Inert Gas) 溶接

マグ溶接およびミグ溶接は、図 2.20 に示すように、自動供給される細径ワイヤ（直径0.8～1.6mm程度）と母材との間にアークを発生させて溶接する方法である。ワイヤはアークを発生する電極としての役割を果たすとともに、それ自体が溶融して母材の溶融部とともに溶融池を形成する。アークと溶融池はシールドガスによって大気から保護される。

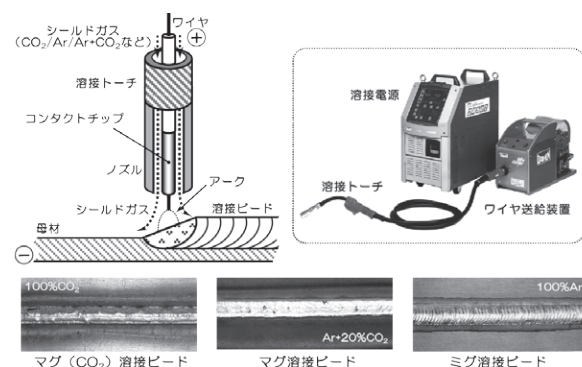


図 2.20 マグ・ミグ溶接

マグ溶接とミグ溶接はシールドガスの種類で区別され、CO<sub>2</sub>あるいはAr+CO<sub>2</sub>混合ガスなどの活性ガス（酸素を含む酸化性ガス）をシールドガスとして用いるものを“マグ溶接”、Arなどの不活性ガスをシールドガスとするものを“ミグ溶接”という。なおCO<sub>2</sub>のみをシールドガスに用いる溶接法は“炭酸ガスアーク溶接”と呼ばれ、マグ溶接とは区別されることもあるが、炭酸ガスアーク溶接はマグ溶接の一種である。またArに微量のO<sub>2</sub>またはCO<sub>2</sub>を添加した混合ガス（Ar+数%O<sub>2</sub>・Ar+数%CO<sub>2</sub>）を用いる場合、慣例的にミグ溶接として取り扱われることもあるが、これらのガスも活性ガスであるため、マグ溶接に分類される。

マグ溶接およびミグ溶接には次のような長所がある。

- ①細径ワイヤに比較的大電流を通電する高電流密度の溶接法であるため、溶着速度が速く、深い溶込みを得ることができる高能率な溶接法である。
- ②ワイヤが機械的に連続供給されるため、連続溶接が可能である。
- ③簡便な装置で半自動・自動溶接が行え、ロボット溶接にも適する。
- ④ソリッドワイヤを用いると、溶接金属中の拡散性水素量が少なく、低温割れ感受性が低い。
- ⑤アークや溶融池の状況を目視観察できる。
- ⑥溶接姿勢の制約を受けることが少なく、種々の溶接姿勢に適用できる。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①CO<sub>2</sub>のみをシールドガスに用いると、中・大電流域でのスパッタが多くなる。
- ②横風によるシールド性劣化があるため、屋外作業などでは防風対策が必要である。
- ③被覆アーク溶接に比べてトーチが重く長さの制約もあるため、作業範囲が制約される。
- ④アーク光の強度は被覆アーク溶接より強く、作業者に与える負荷が大きい。
- ⑤磁気吹き現象が生じやすく、アークが乱れる場合がある。

マグ溶接では、溶滴が短絡移行やグロービュール移行する条件で溶接を行うことが多く、ワイヤ先端に形成された溶滴が頻りに溶融池へ短絡する。短絡を解放してアークを再生するためには大電流の通電が必要であり、ヒューズの溶断と同様に、その通電によって溶滴や溶融池金属の一部が周囲に飛散してスパッタとなる。スパッタは母材やトーチのノズルなどへ比較的強固に付着して作業性やビード外観を損ねるため、その抑制や低減がマグ溶接では重要な課題となる。

### 2.3.5 その他のアーク溶接

#### (1) プラズマアーク溶接

プラズマアーク溶接は、ノズル電極による熱的ピンチ効果を利用して得られる細く絞られたプラズマアークを熱源とする溶接法である。その原理をティグ溶接と比較して図 2.21 に示す。プラズマアーク溶接では、ノズル電極に設けた直径 1~3mm 程度の小径穴を通して、タングステン電極と母材との間にアークを発生させる。一般に、プラズマアークを発生させるための作動（プラズマ）ガスには Ar を、溶融金属を大気から保護するシールドガスには Ar または Ar+H<sub>2</sub> の混合ガスを用いる。ティグアークは母材に向かって拡が

るベル形の形状を呈するが、プラズマアークは集中性が向上して拡がりが少ないくさび形の形状となる。

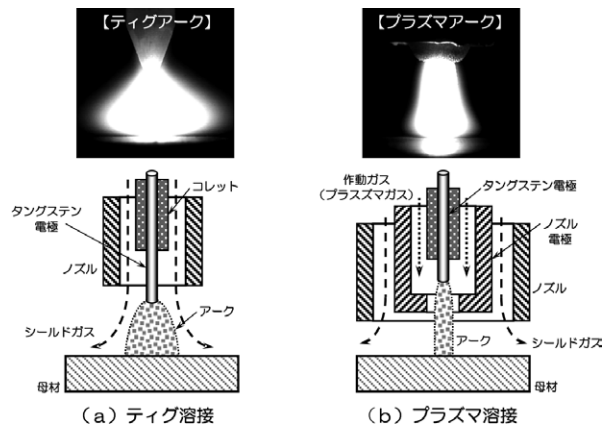


図 2.21 ティグ溶接とプラズマ溶接の比較

プラズマアークの発生方式には図 2.22 に示す 2 つの方式がある。(a) は“移行式プラズマ”と呼ばれ、タングステン電極とノズル電極との間に高周波高電圧で小電流のパイロットアークを起動し、このパイロットアークを介して、タングステン電極と母材との間にプラズマアークを発生させる。溶接では通常この移行式プラズマを用いる。(b) は“非移行式プラズマ”と呼ばれ、タングステン電極とノズル電極との間にプラズマアークを発生させる方式である。母材への通電が不要で、非導電材料への適用も可能であるが、熱効率が悪くノズル電極の熱負担も大きいため、溶接に用いることは少ない。表面改質などを行う溶射にはこの非移行式プラズマが用いられ、プラズマジェットと呼ばれることもある。

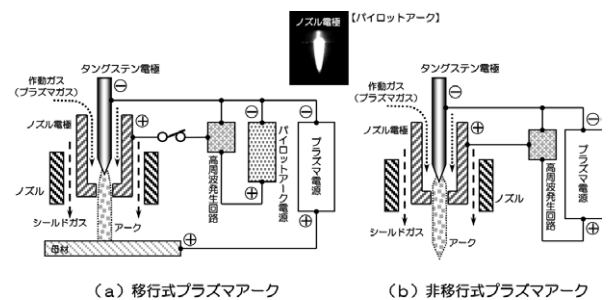


図 2.22 プラズマアークの発生機構

#### (2) セルフシールドアーク溶接

セルフシールドアーク溶接は、図 2.23 に示すように、自動供給されるフラックス入りワイヤを電極として、シールドガスを流さずに大気中で自動または半自動溶接する方法である。ワイヤに内包されたフラックスはアーク熱で溶融され、ガスを発生してアークおよ

び溶融金属を大気から保護するとともに、溶融金属を強力に脱酸および脱窒する。

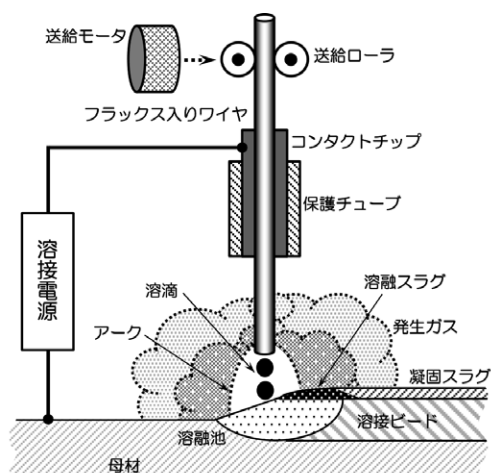


図 2.23 セルフシールドアーク溶接

シールドガスによる大気からの遮蔽がないため、ワイヤ先端に形成される溶滴は直接大気にさらされることが多く、大気中の酸素や窒素を多量に吸収しやすい。そのためフラックスには合金剤、アーク安定剤ならびにスラグ形成剤などの他に、大気の侵入軽減を目的としたガス発生剤、侵入した酸素や窒素を除去・固定するための脱酸および脱窒剤が含まれている。

セルフシールドアーク溶接には独特の施工要領があり、ワイヤ突出し長さは長め（30～50mm 程度）にし、アーク長は極力短くしてシールド性を十分確保する。また後戻りスタート法によってアーク起動部で発生しやすい溶接欠陥を再溶融するなどの操作も行う。

セルフシールドアーク溶接には次のような長所がある。

- ①シールドガスを必要としない。
- ②風の影響を受けにくい。
- ③トーチは軽量で操作性が良い。

一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接ヒュームの発生量が多い。
- ②溶込みが浅い。
- ③継手の機械的性質や耐気孔性は他の溶接法に比べて多少劣る。

セルフシールドアーク溶接は現場溶接作業に適した溶接法であるため、建築鉄骨、鉄塔、海洋構造物あるいは鋼管杭などの現地溶接に適用されている。

### (3) エレクトロガスアーク溶接

エレクトロガスアーク溶接は、立向姿勢で厚板を1パス溶接する高能率な自動ガスシールドアーク溶接で

ある。図 2.24 に示すように、溶接部の表裏面を水冷銅当て金で挟み、ワイヤと溶融池との間にアークを発生させ、トーチとは別系統でシールドガスを供給して溶接する。溶融池を銅当て金で保持して凝固させ、溶接の進行とともに銅当て金を移動させて溶接ビードを形成する。

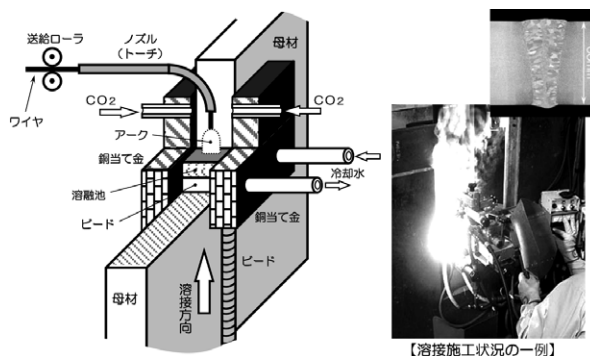


図 2.24 エレクトロガスアーク溶接

シールドガスには  $\text{CO}_2$  を用いることが多いが、場合によっては  $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 、 $\text{Ar}+\text{O}_2$ 、 $\text{Ar}$  あるいは  $\text{Ar}+\text{He}$  も用いられる。溶接ワイヤには細径のフラックス入りワイヤまたはソリッドワイヤを用いるが、通常はスラグを形成して優れたビード外観が得られるフラックス入りワイヤを使用することが多い。溶接電源には直流定電圧特性電源が多用されているが、直流定電流（垂下）特性電源が用いられることもある。

エレクトロガスアーク溶接には次のような長所がある。

- ①大電流を使用するため溶着速度が大きく、高能率な溶接ができる。
  - ②1パス溶接施工が基本であり、角変形が小さい。
  - ③開先精度に対する裕度が比較的大きい。
- 一方、短所としては次のようなものがある。

- ①溶接姿勢は立向に限られる。
- ②溶接入熱が大きく継手の軟化やぜい化を生じやすい。
- ③溶接を中断すると修復に時間を要する。

エレクトロガスアーク溶接は1パス溶接が基本で、その適用板厚は通常 10～35mm 程度である。しかし、固定式の銅または固形フラックスを裏面の当て板に用い、電極（トーチ）揺動や2電極溶接を採用して、より厚板にも適用できる手法が開発され、船の側外板・貯槽タンク・圧力容器・橋梁などの立向突合せ継手の溶接に適用されている。

#### (4) アークスタッド溶接

アークスタッド溶接は、図 2.25 に示すように、ボルト、丸棒、鉄筋またはそれと同様な部品（スタッド）そのものを電極として、母材との間にアークを発生させ、電極としたスタッドを母材上に植えつけるようにして溶接する方法である。

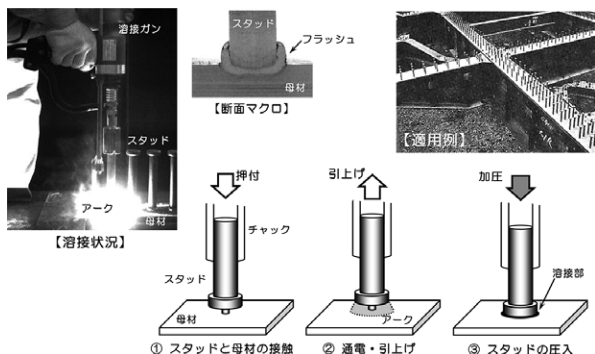


図 2.25 アークスタッド溶接

耐熱性磁器で外周部を覆われた補助材（フェルルールまたはカートリッジ）をスタッドの先端部に取り付け

た後、特殊な溶接ガン（スタッド溶接ガン）を使用して、スタッドと母材との間でアークを発生させる。アーク発生から所定の時間が経過して、スタッドの先端部が十分に加熱された状態になると、その先端部を電磁力やスプリング力などを利用して母材に押し付けて溶接部を形成する。

フェルールの内部にはシールド補助剤も兼ねる導電性物質が充填されており、これを介して通電することによってスタッドの端面全体にアークが発生する。その結果、溶接部はスタッドの全端面にわたって形成され、周辺部にはフラッシュと呼ばれるバリが発生する。

アークスタッド溶接は、建築鉄骨の梁や床板、橋梁の床板、海洋構造物など広範囲な産業分野で適用されている。なお、船舶の断熱材・防水材、車両のバンパー・計器・内装材あるいは配電盤・家電製品フレームなどで使用される細径の取付けボルトの溶接には、コンデンサ放電式（CD式）スタッド溶接が用いられ、このスタッド溶接の加熱方式はアークスタッド溶接とは異なる。

本書は、「国立科学博物館 技術の系統化調査報告《第 23 集》」に掲載されているものです。

本書の著作権は、独立行政法人 国立科学博物館が有します。