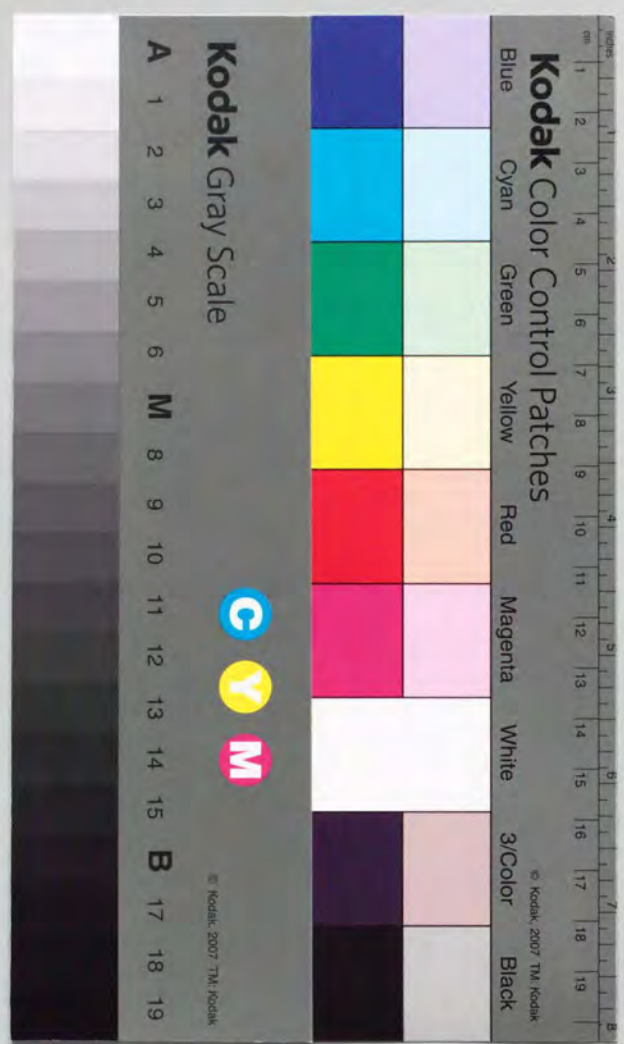


パルスアーク溶接現象と
ノンスパッタアーク溶接機の開発
に関する研究

渡 栗 成 夫



①

パルスアーク溶接現象と
ノンスパッタアーク溶接機の開発
に関する研究

殖 栗 成 夫

目 次

第1章 序論	
1. 1 バルスアーク溶接の概要	1
1. 2 バルスアーク溶接現象とノンスパッタアーク溶接機の研究の進歩	4
1. 3 本論文の位置付けと内容	5
第2章 アルゴン、CO ₂ 混合ガス、長アーク長でのバルスアーク溶接	
2. 1 緒言	12
2. 2 実験方法	13
2. 3 実験結果と考察	
1) 電流波形形状と溶滴移行現象との関連性	17
2) 臨界電流について	20
3) 溶滴の保有熱量	23
4) 溶滴形状のプロフィール	26
5) 溶滴の表面張力の評価	28
6) 電磁ピンチ力を考慮したときのワイヤ端の最大付着溶滴量	29
7) バルス波形と溶滴移行の時間変化について	35
2. 4 結言	38
第3章 アルゴン、CO ₂ 混合ガス、短アーク長でのバルスアーク溶接	
3. 1 緒言	40
3. 2 実験方法	
1) 溶接アーク現象の観測方法	40
2) 電源および溶接条件	41
3. 3 実験結果と考察	42
1) ワイヤ、母材間の接触点から生じるスパッタ (Type A)	43
2) 溶滴のくびれ部分で生じるスパッタ (Type B)	43
3) バルス波形条件とスパッタ発現象	52
4) スパッタ抑制のための電源回路方式	54
3. 4 結言	55
第4章 CO ₂ ガス中のバルスアーク溶接	
4. 1 緒言	58

4. 2	実験方法	
1)	溶接アーク現象の観測方法	5 9
2)	電源系	5 9
4. 3	実験結果と考察	
1)	パルス電流に対する溶滴移行の追従性	6 1
2)	パルス幅 τ が変化したときの離脱周期	6 3
3)	パルス間隔 T_w が変化したときの離脱周期	6 6
4)	ピーク電流値 I_p が変化したときの離脱周期	6 6
5)	溶滴移行現象のばらつきについて	7 0
4. 4	結言	7 5
第5章	ノンスパッタアーク溶接機の実用化	
5. 1	緒言	7 7
5. 2	トランジスタ式パルスマグ溶接機	
1)	開発の背景	7 7
2)	原理	7 8
3)	構成	7 9
4)	パルス制御方式	8 1
5)	溶滴施工例	8 2
5. 3	インバータ式パルスマグ溶接機	
1)	スパッタ抑制の考え方	8 5
2)	電源回路方式	8 5
3)	外乱補償に関する一考察	8 6
4)	溶接結果	8 6
5. 4	ホットワイヤTIG溶接機	
1)	意義	8 9
2)	溶接ビード形状の安定化	8 9
3)	溶接パラメータの適正制御	9 7
4)	溶接の実用化	1 0 5
5. 5	結言	1 0 7
第6章	結論	1 0 9
	謝辞	1 1 1

第 1 章 序 論

本章では、本論文で取扱うアーク溶接、特にパルスアーク溶接の概要およびパルスアーク溶接現象に関する研究の進歩を述べ、本論文の位置付けと内容を明らかにする。

1. 1 パルスアーク溶接の概要

工業生産ラインの自動化が進展し、その高速化がますます強く要請されている。アーク溶接工程は多くの工業生産ラインに組み込まれており、同様に高速化の必要性に迫られている。

アーク溶接は、アーク熱で母材を溶かして接合を行うものであるが、我が国における主流は、シールドガスでアーク部を覆って溶接を行うガスシールドアーク溶接法である。ガスシールドアーク溶接法は、接合部に盛る熔融金属の供給方法によって、大きく二つに分けることができる。一つは、連続的に送られて来る直径約1mmのワイヤと母材の間にアークを発生させて、電極としてのワイヤを溶かし、母材の接合部に移行させるもので、消耗電極式と呼ばれる。消耗電極式のうち、シールドガスがアルゴンなどの希ガスの場合にはMIG(Metal Inert Gas)溶接、希ガスに O_2 あるいは CO_2 を混入させる場合にはMAG(Metal Active Gas)溶接とも呼ばれる。もう一つは、アークをタングステン電極と母材の間に発生させ、ワイヤを側方からアーク部に挿入して溶かし、母材の接合部に供給するもので、非消耗電極式またはTIG(Tungsten Inert Gas)溶接と呼ばれる。なお、極性は、消耗電極式の場合は陰極への熱入力が大きいため、ワイヤを正、母材を負とし、非消耗電極式の場合はタングステン電極を陽極にすると消耗が激しいため、タングステンを負、母材を正とする。

溶接の高速化の観点から考えれば、消耗電極式の方が圧倒的にワイヤ溶融速度が速いので(2倍以上)、高速化に適しており、従来からもその適用範囲は非消耗電極式に比べて数倍以上広い。

溶接の高速化を図るためには、極力、熱を集中的に溶接部に注入することが必要である。これは、ワイヤと母材との間隔を短くし、アーク長を短くすることによって改善されるが、消耗電極式においては、熔融したワイヤと母材が接触短絡し、大電流が流れるため熔融金属が爆発的に周囲に飛散することがある。この現象をスパッタリングといい、金属粒をスパッタと称している。スパッタリングが発生すると、母材の表面に金属粒が付着し、母材

の品質が大幅に低下することになるため、アーク長の短縮には限界があり、従って溶接速度の増加にも限界があった。溶接の高速化を図るためには、このスパッタリングを起こさないようにすれば良いので、この点が研究の対象となってくる。

一方、非消耗電極式の場合は、溶接の高速化は、母材の溶融を支配するアーク電流と溶融した接合部に盛る溶融金属量のバランスによって決められ、これらの適正関係を検討することが高速化の課題となる。

以下、筆者らは、消耗電極式アーク溶接のノンスパッタ化を主題に検討を行うが、上記非消耗電極式の場合、原理的にスパッタの発生がないので、その高速化の検討も、ノンスパッタ溶接機の開発の一環として捕え、本論文に加えることとした。

スパッタの発生は、アーク熱によってワイヤ先端が溶かされてできた溶滴が、本来到達すべき母材へ移行せず、周囲に飛散するものであり、ワイヤ先端部の溶融から始まる溶滴の生成過程が制御されていないことを示すものである。溶滴の生成過程においてワイヤの溶融部に加えられる大きな因子としては、アーク熱、ジュール熱、電磁ピンチ力が考えられる。特に、電磁ピンチ力のワイヤ軸方向成分の向きは、溶滴が母材方向に力を受けるかどうかに関係するもので、溶滴の形状に大きな影響を与える。この力の向きは、溶滴からアーク柱に流れ出る電流経路によって変化する。すなわち、シールドガスがアルゴンの場合のようにアークが広がりやすいときには、図1-1 (b)に示すように、母材方向に働き、逆にシールドガスがCO₂のようにアークが絞られる場合には、図1-1 (a)に示すように母材と反対の方向に電磁ピンチ力が働く。また、アークは、電流を増加させると広がり、ある値を超えると溶滴に働く電磁ピンチ力が母材方向の成分を持つ。従って、溶滴がワイヤから離脱するときの径は、ある電流値を超えると急激に小さくなることが知られており、この電流値は臨界電流値と呼ばれている。⁽²³⁾なお、アーク柱が図1-1 (b)のように広がっているときは、アーク柱において、電極近傍は母材近傍より電流密度が大きいため、電流に基づいてアーク柱の中心に向かうピンチ力も大きく、アーク柱内部の圧力も高い。従って、アーク柱には電極近傍から母材方向に向かう気流が流れやすくなりワイヤ端の溶滴には、上昇気流のような押し上げ力は働かない。⁽²⁴⁾

薄板を溶接する場合のように、平均のアーク電流値を臨界電流値以下に設定する場合でも、上記の電磁ピンチ力の効果を生かして溶滴径を小さくし、ワイヤ端と母材との短絡が発生しないようにすることによってスパッタの発生を防ぐ方法としてパルスアーク溶接法が考案された。⁽²¹⁾この方法は、アークを維持するための小さな直流電流（これをベース電

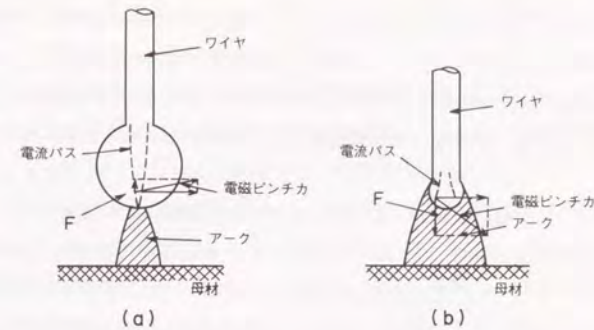


図1-1 ワイヤ端の溶融部に働く電磁ピンチ力

F : 電磁ピンチ力のワイヤ軸方向成分

流という)にパルス電流を重ねてアーク部に供給するもので、そのピーク電流部で溶滴に大きな電磁ピンチ力が働き、溶滴は大きく成長しないうちに母材へ移行する。しかし、従来、このパルス電流は商用周波の交流を半波もしくは全波整流して得られており、パルス波形形状は正弦波に近い。しかもパルス周波数は固定で、パルス幅を変えると、同時にピーク電流値も変わり、高いピーク電流値を得る場合にはパルス幅が広がりすぎ、1パルスの間にワイヤに注入されるエネルギーが多くなって溶滴が大きくなりやすい。そのため、従来のパルスアーク溶接法では、シールドガスとしてアルゴンを用い、可能な限りアークを広げて、電磁ピンチ力を母材方向に働かせるようにしながら溶接を行う必要があった。そうすると母材の溶け込み幅が広がって、母材への入熱も集中できなくなり、高速化に反することになる。従って、従来のパルスアーク溶接法は、母材との反応を嫌うためシールドガスとしてはほぼアルゴン100%のものしか用いることのできない、アルミニウム、ステンレスなどの溶接の場合に適用されるに留まっていた。

以上のように、パルスアーク溶接法は、溶接アーク部に周期的にパルス電流を供給し、その時間変化に応じた溶接アーク現象、溶接母材の溶融現象の変化を積極的に利用し、純直流アークの場合と異なった特徴のある溶接結果をもたらそうというものである。ワイヤ

端での溶滴の生成と母材への移行の制御のほか、母材の溶融、金属組織の改善を目的としたり、特に非消耗電極式の場合にパルス電流の高電流ピーク部の強い電磁ピンチを利用してアークを硬直化し、指向性を高めて安定化させるのに用いることもあるが、本論文で取り扱う、ワイヤの溶融、溶滴移行の制御を狙いとする場合が、最も一般的である⁽¹⁾。

1. 2 パルスアーク溶接現象とノンスパッタアーク溶接機の研究の進歩

パルスアーク溶接法は、1962年にNeedham氏⁽²⁾により初めて発表され、英国、米国で研究開発されてきたが⁽³⁾⁽⁴⁾、そもそもは、鋼ワイヤに比べて溶滴移行の困難なアルミワイヤのMIGアークにおいて、溶滴のスプレー化を促進させることに目的があった。鋼ワイヤを用いた消耗電極式に対しては、CO₂アーク溶接が、ガス費も安く、電源も簡単であるので広く普及した。従ってパルス溶接法の用途も原子力機器部品および航空機部品等のステンレス、アルミ、チタンなどの精密溶接用TIG溶接など一部の特殊な分野に限られていた。

1970年後半以降、溶接材料・継手形状の多様化および溶接の高品質化、高効率化の要求が強まり、自動化が推進されるにつれて、新しい溶接法、溶接機器が望まれるようになった。これらの動きは、溶接電源に使用する制御素子の発展と密接に関連している。すなわち、大電力用トランジスタの普及に伴い、1975年にトランジスタを可変抵抗として動作させるアナログ式トランジスタ制御電源が開発され⁽⁵⁾、パルス波形の制御周波数が15kHzまで飛躍的に増大し、パルスアーク溶接現象に関する研究が再び盛んになり始めた。しかし、この電源は、トランジスタでの発熱が多く、大型であるため、研究対象もアルミニウム、ステンレスなど的高级金属に集中していた⁽⁶⁾。対象を軟鋼まで含み、パルスアーク溶接法を汎用の溶接法として位置づける契機となったのは、1980年、筆者らが発表した、チョップパルス制御電源の開発であり⁽⁷⁾、これ以降、業界、大学等でパルスアーク現象、溶滴移行現象およびそれをういた溶接施工の特徴に関する検討、新溶接法の考案が著しく進展した。

パルスアーク溶接における溶滴移行現象の研究に関し、溶滴移行とパルス波形形状との対応関係が、アルゴンガス中のアルミワイヤ、ステンレスワイヤについて荒谷氏⁽⁸⁾、岡田氏⁽⁹⁾らによって求められている。アルゴン中の軟鋼ワイヤのパルスアーク溶接現象については、丸尾氏らが、ワイヤの溶融速度、1パルス1溶滴移行となる波形条件、溶滴の保有熱量、温度に関する報告をしている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。これらは筆者らの研究と相前後するもの

であるが、アルゴンとCO₂の混合ガス中で軟鋼を用いた実用的な溶接条件においては、研究がなされておらず、しかも波形変化と溶滴移行現象との対応も、溶滴移行が大塊から細粒化される、いわゆるスプレー条件を求めることに注意が注がれている。スプレー条件の中でも、1パルス周期間に数回の溶滴移行が起きる領域では、ワイヤ溶融部が長く伸びて母材と短絡し、その短絡時に大電流が流れると、溶融金属が周辺に飛散するスパッタ発生現象が著しくなる。特に溶接速度を上げるため、母材への入熱幅を狭くする目的でアーク長を短く設定するとその傾向が強い。このような実用的なノンスパッタ化を主眼に電流波形と溶滴移行形態に関連づけた研究は、筆者らの研究⁽⁷⁾以降盛んとなり岡田氏⁽¹²⁾、松田氏ら⁽¹³⁾によってなされている。

パルス溶接を用いた溶接施工現象に関しても、これらの軟鋼に対するパルスアーク溶接法の適用が盛んになるに従い、研究報告が多くなされるようになった。パルス電流波形のベース電流期間では小電流になるためアークの硬直性が失われて、アーク柱が変歪し、アーク長が伸び、維持電圧が高くなってアークが消滅しやすくなるが、遠藤氏は⁽¹⁴⁾ベース電流期間に約1kHzのパルスを重畳することによってアークの安定性を増す方法について報告している。大嶋氏は⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、周期的に変化する非線形特性の電源による溶滴移行現象について、制御論的見地から一連の考察を試みており、アーク長およびトーチ位置の制御方法に新しい検討を加えている⁽¹⁸⁾。平本氏⁽¹⁹⁾、島田氏⁽²⁰⁾らは、パルスアーク溶接のビード形状の特徴について報告している。また、パルスアーク溶接におけるブローホールの形成については、山田氏⁽²¹⁾、岡田氏⁽²²⁾らがスパッタの発生と密接に関係するという実験結果を報告している。

1. 3 本論文の位置付けと内容

アーク溶接現象の研究には、アークによる母材の溶融および冷却、凝固現象の解明や、各種溶接法の現実の溶接物への適用と強度評価など、主に溶接施工面からのアプローチがあるが、筆者らの研究は、高速溶接に適したアークの実現のため、アークによるワイヤの溶融、溶滴の生成と移行現象の把握およびそれに基づいた溶接機の実現に関してなされたものである。

溶接の高速化を図る上で、アーク長の短い状況でワイヤ端に溶滴を生成し、母材へ移行させることが必須となるが、現実的に母材として最もよく使用される軟鋼の溶接を対象として、パルスアーク溶接法を用いたノンスパッタ化を考える場合には、アークの広がりや

抑えるためにアルゴンとCO₂の混合ガスあるいはCO₂のみをシールドガスとして用いる条件のもとで、アーク長を短くしてもスパッタの発生しない方法を見いださなければならない。

筆者らは、まずアルゴンとCO₂の混合ガスをシールドガスとした場合の溶滴の生成および移行現象を高速度写真で観測し、検討を行った。その結果、アーク長を短くしてもワイヤと母材とが短絡することなく、1パルス周期にほぼワイヤ径程度の溶滴が1個ずつ生成し移行していくための電流波形条件を見いだした。この波形は、従来用いられていた波形より立ち上がり立ち下がりが数倍以上急峻で、パワートランジスタを用いたパルス電源の採用によって初めて実用化された。この電源を用いると、従来のサイリスタ制御でなされるパルス電源に比べて、パルス波形の幅、ピーク値、周波数を自由に定めることができるため、母材の板厚などの溶接条件に合わせてアークの平均電流が変わっても、1パルスの波形を上記の最適条件に設定しパルス周波数のみを変えることにより、幅広い溶接条件でノンスパッタの機能が得られる。この研究成果により、パルスアーク溶接法の用途が一般の自動溶接の分野へ大きく拡大した。

溶接の高速化を一層進めるためには、母材の溶け込み幅をより狭くする必要がある。このためには、ワイヤと母材とがほとんど接触短絡を起こすほどアーク長を短くする方法が考えられる。しかし、もし短絡が発生すると、発生時点や短絡時間の長短によるが、溶滴が短絡電流による急激なジュール加熱によって飛散しスパッタとなることが多い。

筆者らは、この短絡を伴うパルスアーク溶接現象を高速度写真、シャドウグラフなどを用いて観測し、スパッタの発生場所およびスパッタの発生と電流波形条件との対応関係を明らかにした。その結果、短絡を伴うパルスアーク溶接において、短絡発生時点は、ワイヤ端で生成された溶滴が電磁ピンチ力によってくびれ、ワイヤから切り離れようとするパルス電流ピーク部の後半以降に発生すること、短絡電流がベース電流程度の小さい値であればスパッタの発生もほとんどないことが分かった。そのため短絡が生じてもそのときの電流値が小さくなるように、パルス電流の立ち下がりを急激にして、同じパルス周期でも電流の小さなベース電流の期間を長くするとともに、短絡がパルス立ち下がり部以降に生じるようにパルス幅を短くし、また短絡時間が長いとき、次の周期の立ち上がり時刻を遅らせる方法を見出した。これらの方法により、従来のパルス電流波形でアーク長を短くした場合と比べて、スパッタの発生を約1/10に抑えることができた。このような短アーク長

でのパルスアーク溶接現象の研究は従来にはほとんどなく、この成果に基づき、高周波インバータ方式を採用しパルス電源が実用化され、特に自動車業界を中心とした薄板の高速溶接用に多用されている。

次に、CO₂ガスのみをシールドガスとした場合のノンスパッタ化について検討を行った。今まで述べてきたようなアルゴンとCO₂の混合ガスをシールドガスとした場合に比べて、アークが絞られるため母材の溶け込み深さが深くなり、溶接の信頼性が上がるので、このCO₂アーク溶接の用途は広い。しかし、アークが細く絞られることにより、ワイヤ端の溶滴には、母材と反対の方向へ押し上げる電磁ピンチ力が働き、溶滴が肥大化してワイヤ端と母材が不規則に短絡し、短絡の際に大きな電流が流れてスパッタが多量に発生するという大きな欠点がある。従来のCO₂アーク溶接では、短絡現象は避けられないものとして、その短絡電流を可能な限り小さくすることで、スパッタの軽減を図ろうとしていた。しかしながら、もともと溶滴が大きく、短絡時に母材へ接触させながら移行させるには、溶滴に径方向の電磁ピンチ力を加えて絞る必要があり、短絡時にある程度の電流値が必要になる。そのため、スパッタの軽減にも必然的に限界があった。

筆者らは、CO₂アーク溶接でのスパッタ抑制を達成するために、パルスアーク溶接法を展開することを試み、溶滴の生成過程と電流波形との対応関係を検討し、溶滴の肥大化を防ぎ、ワイヤと母材の短絡を伴わない溶滴移行形態の実現を試みた。その結果、アークが細く絞られるCO₂アークにおいては、パルス電流を短パルス幅で高周波化することにより、電磁ピンチ力による溶滴の押し上げ効果を抑制して、短絡を伴わない溶滴移行形態を実現できる可能性を見いだした。しかも、アーク電流、電圧の実測値から、時々刻々のアーク長の変化をモニタし、アーク長が変動しないように電流波形を制御することによって、溶滴の生成過程のばらつきが少なくなることが分かった。

ノンスパッタ溶接機の開発の一環として、非消耗電極式アーク溶接の高速化を実現するため、筆者らは、アーク部に側方からワイヤを通電加熱しながら挿入するホットワイヤTIG溶接法を用い、TIG溶接の高速化、安定化の条件について検討した。溶接の高速化には、速度を上げた分だけ電流を上げる必要があるが、それと同時に母材の溶融部へ移行させるためのワイヤ溶融速度を高める必要がある。アーク電流とワイヤ溶融速度とにほぼ板厚によらない比例関係が必要であること、アーク長変動があってもワイヤを一定量ずつ

溶融させるため、ワイヤ加熱部の電圧降下をモニタし、それが一定になるようにワイヤ加熱電流を補正する必要があることを見いだした。この結果に基づいて溶接機が実用化され、1粒のスパッタすら問題となる原子力容器、压力容器等の溶接分野での能率向上を果たすことができた。

本論文は、以上のような一連のノンスパッタ溶接機の開発成果をまとめたもので、構成は以下のようになっている。

第2章では、アルゴンとCO₂の混合ガスをシールドガスに用いたパルスアークにおいて、ワイヤ端での溶滴の生成から母材への溶滴移行現象について観測、検討することにより、ワイヤと母材とが短絡しない状況が実現されるパルス電流の波形条件を明らかにする。

第3章では、高速溶接を狙いとしてアーク長を短くした場合の、ワイヤと母材との短絡を伴うパルスアーク溶接現象について述べ、特にスパッタ発生形態の分類と、パルス波形との対応について明らかにする。

第4章では、パルスアークをCO₂アーク溶接に適用して高電流密度のCO₂アークに対し、短絡を伴わない溶滴移行の実現のための可能性を検討する。

第5章では、溶滴移行現象の検討結果をもとに、新しい溶接機特に電流波形制御型のノンスパッタアーク溶接機群の実現につき、溶接パラメータの制御方法、その効果について述べる。さらに、TIGアーク溶接法の高速度化策としてのホットワイヤ溶接法の新しい溶接パラメータ制御方法について述べる。

第6章では、以上の研究を総括して、本論文で得られた結論をまとめる。

本研究の成果として開発されたノンスパッタアーク溶接機のうち、アルゴンとCO₂の混合ガスをシールドガスとして用いるパルスアーク溶接について、達成された溶接速度とそのときに保持されるアーク長とをまとめて図1-2に示した。従来のサイリスタ制御によるパルスアークでは、アーク長はほぼ3~4mm程度で、ノンスパッタを実現できる溶接速度は400~500mm/minであったが、短絡を伴うパルスアーク溶接機ではアーク長は約1mm近くで、溶接速度も1500mm/minまで上げることが可能となった。

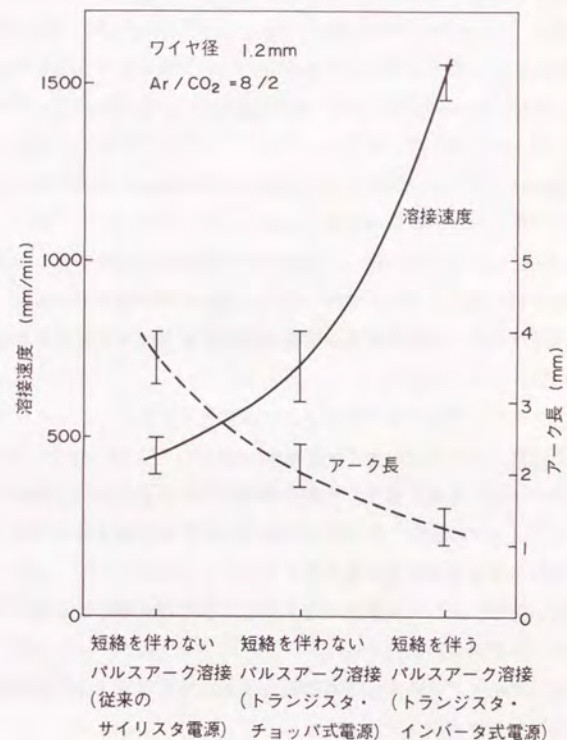


図1-2 溶接方法の改良に伴う溶接速度、アーク長の変化

参 考 文 献

- (1) 松繩、山本、平本；“パルスアーク溶接法”溶接学会誌 vol.53, No.6, P.284 (1984)
- (2) J. C. Neadham ; “Control of Transfer in Aluminium Consumable Electrode Welding”, Conf. Physics of the Welding Arc, Institute of Welding, P.114 (1962)
- (3) J. C. Neadham ; “Pulse Controlled Consumable Electrode Welding Arcs” Brit. Welding. J., vol.12, No.4, P.191 (1965)
- (4) J. C. Neadham & A. W. Carter ; “Material Transfer Characteristics with Pulsed Control”, Brit. Weld. J., vol.12, No.5, P.229 (1965)
- (5) 岡田他；“アナログ・トランジスタ制御直流溶接電源について”、溶接学会講演概要集、第20集、P.184 (1977)
- (6) 岡田、山本、西川；“M I G パルスアークにおける溶滴のスプレー化条件”第60回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 (1980)
- (7) 殖栗、田畑、小村、平本、島田、水野、鶴飼；“トランジスタ・パルス制御によるノンスパッタ・マグ溶接法”溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 80-446 (1980)、溶接学会講演概要集、第28集、P.178 (1981)
- (8) 荒谷、遠藤；“アルミニウム合金のパルスM I G 溶接に関する研究”溶接学会誌、vol.50, No.2, P.201 (1981)
- (9) 丸尾、平田、野田；“パルスM I G 溶接における溶滴移行とビード形成に及ぼす電流波形の効果”溶接学会論文集、vol.2, No.1, P12 (1984)
- (10) 丸尾、平田、野田；“パルスM I G 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, No.4, P.573 (1984)
- (11) 丸尾、平田、野田；“パルスM I G 溶接におけるワイヤの溶融速度”溶接学会論文集、vol.3, No.1, P.191 (1985)
- (12) 岡田、山本、原田、西川；“トランジスタ制御M A G パルス溶接諸現象の検討”第64回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 No.81-467 (1981)
- (13) 松田、牛尾、田中；“パルスアーク溶接現象に関する2, 3の考察”、第69回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 No.82-517 (1982)
- (14) 遠藤、荒谷、金丸、吉永；“パルスM A G 溶接におけるアーク切れ現象に関する2, 3の考察”、第72回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 No.83-533 (1983)
- (15) 大嶋、安倍、窪田；“周期的に変化する非線形特性の電源による強制溶滴移行アーク溶接法”、溶接学会誌、vol.50, No.8, P756 (1981)
- (16) 大嶋、安倍、窪田；“周期的に変化する非線形特性の電源による強制溶滴移行の安定性”、溶接学会誌、vol.51, No.2, P.175 (1982)
- (17) 大嶋、安倍、窪田；“M I G パルスアーク溶接におけるアーク長のサンプル値制御”、溶接学会誌、vol.51, No.8, P.701 (1982)
- (18) 窪田、大嶋、陳；“画像処理計測によるG M A 溶接のトーチ位置およびアーク長のサンプル値制御”、電気学会論文誌 D, vol.107, No.4, P.456 (1987)
- (19) 平本、島田、殖栗、田畑、小村、水野、鶴飼；“トランジスタ制御パルスマグ溶接における溶接現象の特徴”、第64回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 No.81-461 (1981)
- (20) W. Shimada and J. Ukai ; “Effect of Pulsed Current Control on Welding Quality Improvement”, I I W Doc. X I I - B - 11 - 81 (1981)
- (21) 山田、小林；“パルスM A G 溶接におけるブローホールについて”、溶接学会論文集、vol.3, No.4, P.148 (1985)
- (22) 岡田、山本、原田、西川；“トランジスタ電源によるM A G パルス溶接法の研究”第86回溶接学会溶接法研究委員会資料、No.SW-1322-82 (1982)
- (23) 安藤、長谷川；“溶接アーク現象(増補版)”産報 P.260(昭和42年)
- (24) 安藤、長谷川；“溶接アーク現象(増補版)”産報 P.169(昭和42年)

第2章 アルゴン、CO₂混合ガス、 長アーク長でのパルスアーク溶接

2.1 緒言

アルゴンガスのみ、あるいはアルゴンに数%の酸素を混入し、直流電圧に商用周波数あるいはその2倍の周波数のパルス電圧を供給して、低い平均電流値でも、大きなピーク電流値を得てワイヤの細粒化を図る方法が以前から知られていた。しかしながら、この方法ではアークが拡がりすぎ、母材の広い範囲を溶かすため、安定なビードを形成するために必要なワイヤ溶融量が多くなる。したがって、溶接速度を上げたときには、ビード断面で見たとときワイヤ溶融速度が不足するため、ビードの端部が溶けて掘られたまま残ってしまうというアンダーカットの現象が生じ、溶接欠陥となる。これを防ぐため、溶接速度を上げるときには、アークの拡がりを狭くするように、アーク長を短く保持する。そのときには、しばしばワイヤ溶融部が母材と短絡してその短絡電流によって飛散するため、パルスアークで溶滴の細粒化、ノンスパッタ化を目指しているが、ガスが高価なこともあり、極く特殊用途にしか用いられていなかった。すなわち、高級金属であるアルミの溶接用にアルゴンガスをシールドガスとしてパルスアークを用いることはしばしば行われてはいた。

以上のように、従来は、電流を簡易的にパルス化してはいるものの、溶滴移行現象と電流波形との対応関係も詳細に検討されておらず、電流波形を精密に制御するための電源回路技術も十分な展開がなされていなかった。特に、パルスアークにおいて、直流の電流、電圧値に加えて、パルス電流のピーク値、周波数とパラメータが増加するため、溶接条件を選択するのは、各パラメータを手さぐりで行っていたのが現状で、それらのパラメータの相関関係も、統一性に欠くもので、パルスアーク溶接法は、実用的に全く使いづらい方法という感がぬぐえなかった。

以上のような状況を打破するために、トランジスタを用いたパルス発生回路を用いて、電流波形と溶滴移行形態との関係を調べるとともに、本来用いるべきパルスアークの条件選定基準を明確にすること、およびその適正条件が、物理的にどのようなメカニズムで定まるかを明らかにすることが本章の目的である。

まず、電流波形のピーク値とパルス幅との組合せにより、溶滴移行形態を分類する。溶滴の細粒化に大きな影響を与えるピンチ力を代表する量として臨界電流 I_c を選び、静的懸垂モデルによって評価する。さらに、電流とワイヤへの入熱量との関係から、溶滴移行に対するパルス電流時間波形の意味付けを提示する。⁽⁷⁾

2.2 実験方法

図2-1に実験に用いた電流回路構成図を示す。入力電圧をトランスで降圧して整流し、その直流電圧はトランジスタAのオン・オフスイッチング作用によって、ピーク電流値が所定の値になるように設定される。同時に直流電圧はトランジスタBによって、 I_B がほぼ一定電流値50Aになるようにオン・オフスイッチングされる。

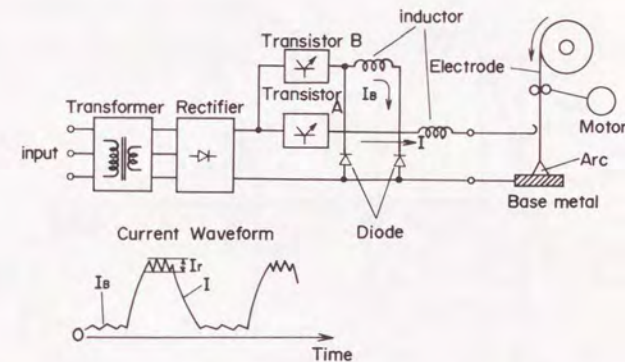


図2-1 パルス電源の構造図

図2-2はパルスパラメータを示す。 I_p はピーク電流値、 τ はパルス幅、 f はパルス周波数である。 I_p は300~550A、 τ は1~10ms、 f は30~500Hzの範囲で変化させることができる。電流波形の立上り、立下り速度は、回路内に内蔵されているリアクトルのインダクタンス値によって制限され、それぞれ約400A/ms、250A/msである。電流ピーク部に見られるリップル(図2-1の波形図中 I_r で示す。)は約80Aである。

溶接トーチは市販の半自動溶接トーチを固定して用い、母材を走行台車に乗せて垂直下向きのビードオンプレート溶接を行った。母材は軟鋼(SPPC)で厚さ約6mmである。ワイヤは混合ガス用ワイヤ(日溶工YM-28S)で直径1.2mmであり、モータで定速送給した。シールドガスはアルゴンと CO_2 ガスの混合ガスで混合比は8:2である。

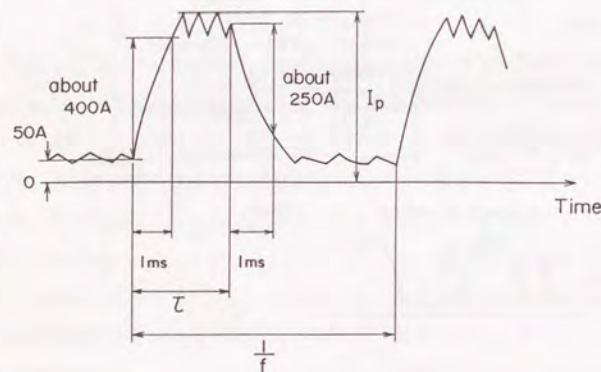


図2-2 パルス電流波形のパラメータ

- I_p : ピーク電流
- τ : パルス幅
- f : パルス周波数

溶滴移行現象の観測方法を示す装置構成図を図2-3に示す。溶接アーク部の背後からキセノンアークランプで照らし、高速度カメラ(Redlake社HYCAM100)を用いて、ワイヤ部、溶接アーク部のシルエット写真を撮った。撮影コマ数は特に断わらない限り毎秒3000コマである。電流波形と溶滴移行との時間的対応をとるために、以下のような方式を採用した。電流波形をCTで検出して、XY表示に設定したシンクロスコープの縦軸に印加する。このとき、電流の変化に応じて、シンクロ上の輝点は、縦の直線上を動く。この動きを光ファイバで高速度カメラに導入して、アーク光(適宜フィルタで減光する)と共にフィルム上に感光させると、走行するフィルム上に電流波形が写し出される。

図2-4には、溶滴の保有熱量を測定するための装置構成を示す。溶滴の保有熱量を知るとは、電流波形とワイヤへの注入熱量との関係を明らかにする意味で重要である。溶滴を捕集用容器に入れるために、トーチを傾斜させている。従来、特にアルゴンガスのみをシールドガスとしたときには、ワイヤを陽極に、タングステン棒を陰極にして溶滴を落下、捕集しているが⁽¹⁾、今回の場合には、シールドガスはアルゴンガスと CO_2 ガスの混合から成り、タングステン電極を急速に消耗させ、アークが不安定となって、通常の溶接時の保有熱量を推定することが困難となる。

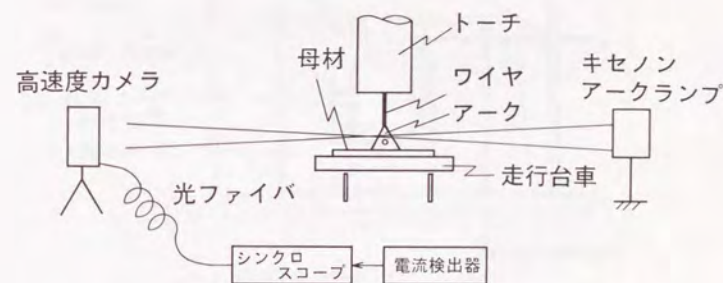


図2-3 溶滴移行現象の観測装置構成図

捕集用容器は、最も中央部に銅製容器を置き、周囲を水で取り囲む。さらにその周囲に断熱材を置くとともに、上部には、中央部のみ孔を設けたスリットを複数枚置いて、アークの放射熱が入らないようにした。溶滴捕集後の水の温度上昇から、溶滴の保有熱量を求めた。

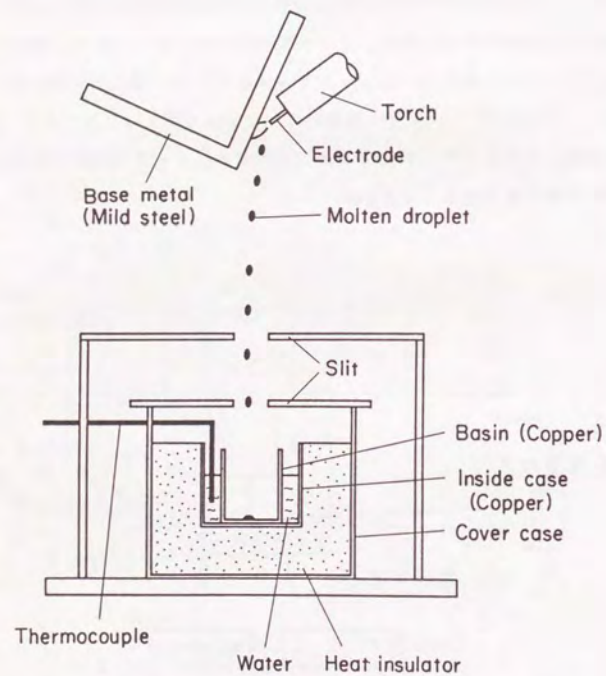


図 2-4 溶滴の保有熱量の測定装置

2. 3 実験結果と考察

1) 電流波形形状と溶滴移行現象との関連性

溶滴移行現象を分類する際に、電流波形を基本パラメータとして取り扱った。それは、アークによるワイヤへの入熱がほぼ電流に比例する⁽²⁾とともに、ワイヤ突出し部のジュール熱も電流の関数となるからである。

図 2-5 は、 I_p と τ とを変数にとり、ワイヤ送給速度 $v_w = 5 \text{ m/min}$ 、突出し長 15 mm のときの溶滴移行形状を分類したものである。

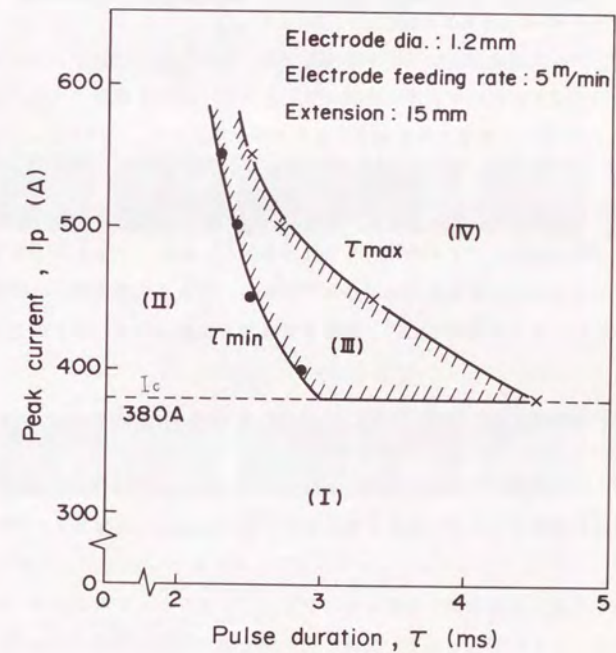


図 2-5 パルス電流波形と溶滴移行形態の分類

<領域Ⅰ> ($I_p < 380\text{A}$)

この領域では、ピーク電流値が低いためにアークが溶滴を充分包み切れず、溶滴に働く電磁ピンチ力も母材方向に作用しないため、パルス幅を少々長くしても溶滴が細粒化されない。図2-6(a)はこの領域での溶滴移行状況を示す図である。 $\tau = 5.6\text{ms}$ に設定してもパルス毎の溶滴移行は行われず、5パルスに1回、大粒の溶滴が落下している。落下するまでにワイヤ先端に形成される溶滴量が多く、その下部からアークが発生するために、溶滴は左右に動かされやすく、図2-6(a)の左端、右端の写真にも見られるように、溶滴の落下方向はワイヤの延長線から外れてしまう。これは往々にして母材溶融部に落下しないで周囲に飛散することとなり、スパックとして観測される。

<領域Ⅱ> ($I_p \geq 380\text{A}$, $\tau < \tau_{\min}$)

この領域では、ピーク電流値はアークが溶滴を包み、母材方向の電磁ピンチ力を及ぼすのに必要な値以上はあるが、その通電時間が短いため、1パルス周期では移行が行われない。図2-6(b)はこの領域での溶滴移行状況を示す図である。 $I_p = 450\text{A}$ 、 $\tau = 2\text{ms}$ のときであり、2パルスに1回の溶滴移行が行われている。1パルス目では溶滴はワイヤ先端部に形成されては行くが、垂れ下がるのみである。2パルス目に、その垂れ下がった溶滴をアークが包み、ワイヤ先端のくびれが進行し、溶滴がワイヤから離脱する。この場合は2パルスで1回の溶滴移行がなされているが、パルス周期と移行の周期とが合わないため、溶滴が大きく残りやすく、領域Ⅰの場合と同様にスパックを生じることが多い。

<領域Ⅲ> ($I_p \geq 380\text{A}$, $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$)

この領域ではパルス電流が、ワイヤ先端を溶融し、かつ母材方向のピンチ力によってくびれを作り溶滴を離脱させるのに必要な時間幅だけ加えられる。ほぼワイヤ径程度の小溶滴が、図2-6(c)に示すように、1パルスに対して1個ずつ規則正しく移行していく。パルスの通電周期と溶滴の移行周期とが同期することは、パルス電流によって溶滴移行を制御できることを意味している。溶滴がワイヤ先端で細長く延びずに細粒化できるため、アーク長を短くしてもワイヤ端は母材に接触せず、短絡電流が流れることによって生じるスパックも抑えられるので、溶接速度を上げた状態でもノンスパック状態を保持しやすい。

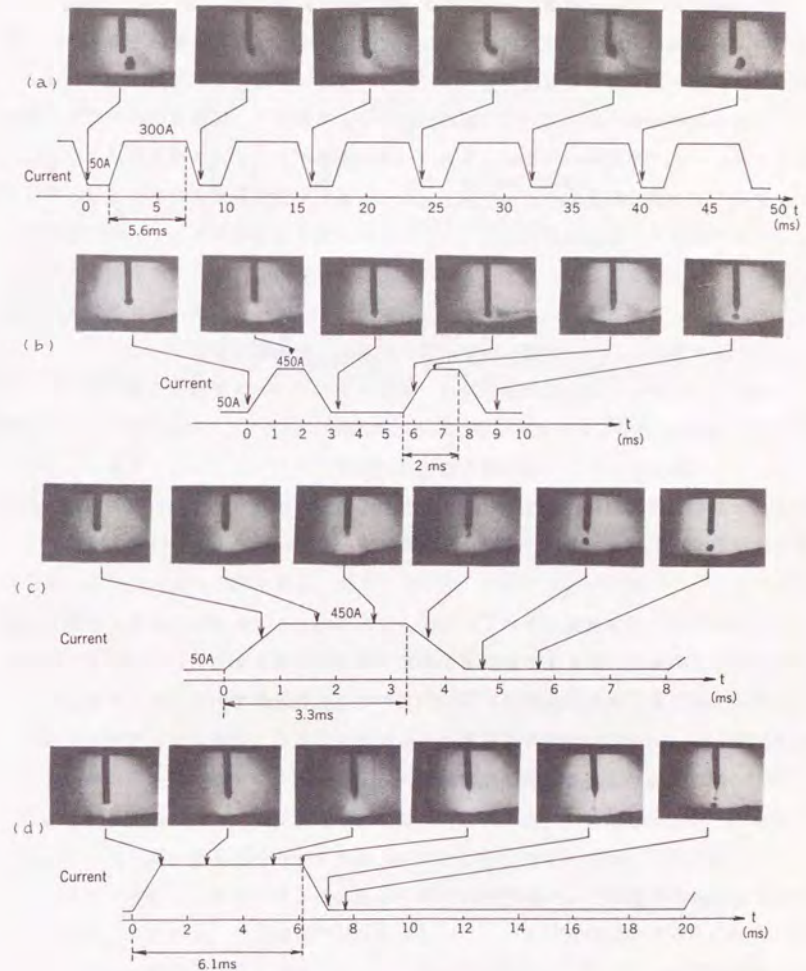


図2-6 溶滴移行現象

<領域IV> ($I_p \geq 380 \text{ A}$, $\tau > \tau_{\text{max}}$)

この領域では、パルス電流が通電される時間が長く、図2-6(d)に示すように、1パルスの通電期間内に1個の溶滴が移行したあと、ワイヤ先端の溶融金属部が長く伸びたまま、引き続き数個の溶滴が移行していく。そのため、ワイヤ溶融部と母材とは、アーク長を比較的長く保っていても接触短絡することが多く、短絡時にパルス電流が流れるため、ワイヤ溶融部の飛散によるスパッタが発生する。この状態を避けようとしてアーク長をより長く設定すると、アンダーカット等の溶接欠陥が生じてしまう。さらに、この領域ではワイヤ送給速度が同じでもパルス幅が長くなる結果として、単位時間当りのワイヤへの入熱を同じくしてアーク長を一定に保つ場合、パルス周波数を低く設定することになる。これは、パルス期間での移行に伴って、アークの長さがより急激に大きくなることを意味し、アーク長を一定に保持することが困難になる。

従来のパルスアーク溶接法においては、前述の通り、パルス周波数は商用周波数(50 Hzまたは60 Hz)と等しいかその2倍であり、溶滴移行形態はこの<領域IV>の状態であった。パルス電流により、一見溶滴の細粒化がなされているように見えるが、1パルス周期中に数個の溶滴が移行しており、アーク長を短くすればワイヤ母材間の短絡に伴うスパッタが発生していた。

以上のように、従来明確にされていなかった溶滴移行とパルス電流波形との関係が図2-5に示されるように、4つの領域に分類できることがわかった。この中で下記の項目を考えれば、パルス電流波形は、図2-5の(Ⅲ)に設定すべきと考えられる。

- I) スパッタの発生を抑えるとともにアーク長を短くし、母材のアーク熱による溶け幅を小さくして高速化を図る。
- II) 同一ワイヤ送給速度で考えたとき、溶滴の単位時間当りの移行回数をできる限り多くしてビード形状およびアーク長をより均一に一定に保つ。
- III) 溶滴移行前後のアーク長変動を少なくする。

2) 臨界電流について

図2-5に示した I_c は、この電流値以下では溶滴の細粒化がなされないという点において、所謂臨界電流値と考えられる。図2-7にワイヤ径が変化したときの臨界電流値 I_c の変化および、一定直流電流の場合の臨界電流値 I_{c0} を併せて示す。臨界電流値はワ

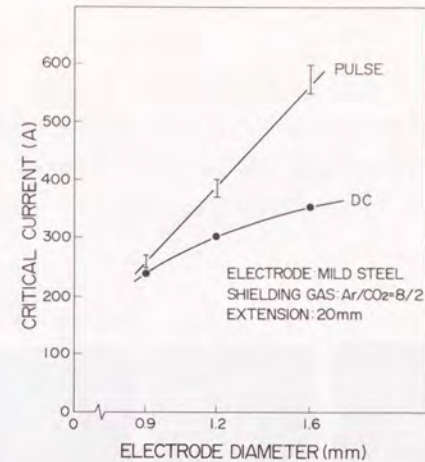
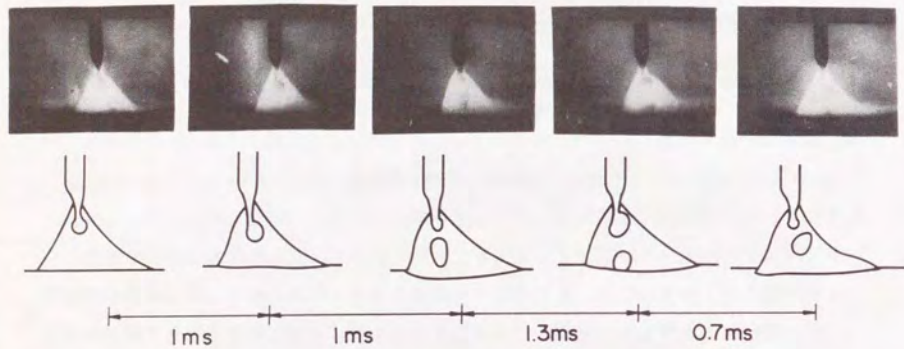


図2-7 臨界電流

イヤ径が大きくなるにつれ、包み込むべき溶滴が大きくなるために大きな量が必要になるが、波形による差を見た場合、パルス電流のときは一定直流電流のときに比べて高くなっている。

図2-8には、一定直流電流の場合の溶滴移行状況を示す。ワイヤ先端の溶融部は、電磁ピンチ力を受けて細長く伸び、その先端に次々と溶融部が積み重なって約2ms毎に溶滴移行が行われていく。この場合のワイヤ送給速度は13.5m/minであり、平均して約4mgずつの溶滴が移行している。図2-8の移行状況と図2-6(c)の移行状況とを比べると、図2-6(c)のパルス波形の場合、溶滴移行後のパルス休止期間にワイヤ先端部は表面張力によってほぼ半球形にもどる。

図2-7に示した波形の違いによる臨界電流値の変化は、下記の理由によるものと考えられる。すなわち、一定直流電流の場合には、ワイヤ先端の溶融部が常時細長く伸びているため、溶滴は落下しやすい。パルス電流の場合は、パルス休止期間中に半球状にもどったワイヤ先端を充分溶かし、かつくびれを形成するには、一定直流電流の場合より、広く溶滴を包み込む必要があり、アークの電流密度がパルスの場合と一定直流の場合とで同じものとすれば、より大きな電流が必要となる。



350A, 37V
 ELECTRODE DIA.: 1.2mm
 SHIELDING GAS : Ar/CO₂ = 8/2
 EXTENSION : 15mm

図2-8 直流電流の場合の溶滴移行現象

3) 溶滴の保有熱量

図2-9にワイヤ送給速度 $v_w = 5 \text{ m/min}$ 、パルス周波数 $f = 125 \text{ Hz}$ のときの溶滴の平均保有熱量の測定値を示す。この場合、 I_p が大きいときには、ほぼ平均アーク長が一定となるように、パルス幅を狭くしている。突出し長が長いときに保有熱量が減るのは、突出し部分でのジュール熱の発生により、溶滴移行が進行しやすいという従来結果⁽³⁾と一致している。

電流波形とワイヤへの入熱量との関係を検討するために、保有熱量 H_0 を突出し部分のジュール熱による分 H_J とアーク熱による分 H_a とに分ける。アーク熱による入熱分を Watt 単位で E_a (Watt) とすると、

$$E_a = \phi \cdot I \quad (2-1)$$

ここで、 ϕ (V) は溶融等価電圧、 I (A) は平均電流値である。この ϕ が電流と入熱とを結びつける量である。

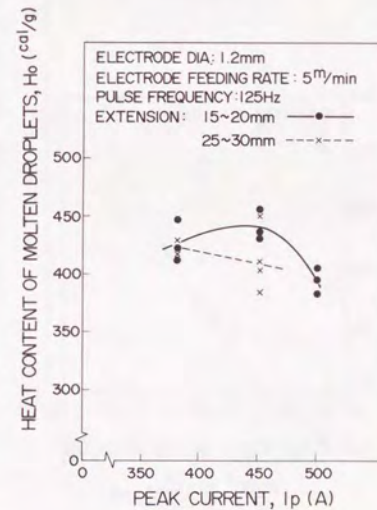


図2-9 溶滴の保有熱量

$$\phi = \frac{E_H}{I} = \frac{4.2 H_H \rho_t v_w S}{I} \quad (2-2)$$

ここで、 ρ_t はワイヤの密度、 S はワイヤの断面積である。

Halmoyによれば、⁽⁴⁾ H_H は電流の実効値 I_{rms} 、突出し長 l 、 S 、 v_w とで表わされる

$$\left[\frac{I_{rms}}{S} \right]^2 \frac{l}{v_w}$$

の関数となる。図2-10に H_H と $(I_{rms}/S)^2 l/v_w$ との関係を、ワイヤ径1.2mmに対して実測した結果を示す。

$l = 15\text{mm}$ 、 $v_w = 5\text{m/min}$ のときの実測値

$$I = 167\text{A}$$

$$I_{rms} = 208\text{A}$$

から

$$\left[\frac{I_{rms}}{S} \right]^2 \frac{l}{v_w} = 6.22 \times 10^7 \text{ A}^2 \cdot \text{s} / \text{cm}^4$$

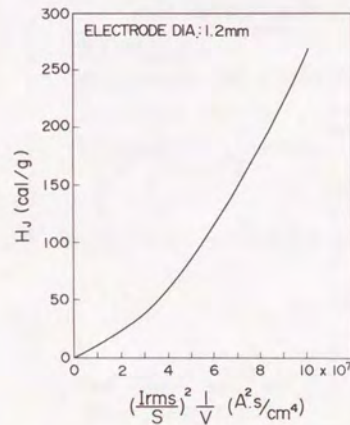


図2-10 ワイヤ突き出し部のジュール熱

となるが、この値を図2-10に当てはめると、 $H_H = 117\text{cal/g}$ となる。図2-9から、溶滴の平均保有熱量 H_0 は、 $H_0 = 430\text{cal/g}$ であるので、 $H_H = 313\text{cal/g}$ となる。この値を(2-2)式に代入すると、

$$\phi = 5.8\text{V}$$

となる。

$H_0 = 430\text{cal/g}$ 、 $\phi = 5.8\text{V}$ の値は、アルゴンガスのみをシールドガスとし、軟鋼ワイヤに対して求めた丸尾氏らの報告結果⁽¹⁾に近い。

各種溶接条件に対して求めた ϕ の値をまとめたものが、図2-11である。

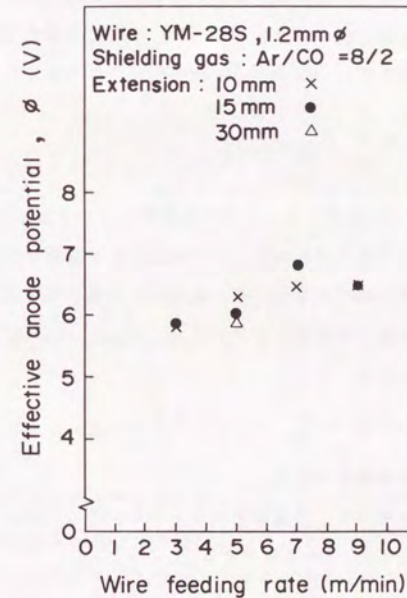


図2-11 溶融の等価電圧とワイヤ送給速度との関係

4) 溶滴形状のプロフィール

パルス電流に対する溶滴移行形態を分類した結果から、実用的に図2-5の(Ⅲ)の領域がノンスパッタ領域であることが分かった。また、同一ワイヤ送給速度のもとで言えば、溶滴量をできる限り小さくして、アーク長を短くできる状況に保持するのが、高速化のためにも望ましい。領域Ⅲを定める I_c および τ_{min} がどのような物理量から規定されるのかを検討する。

図2-6(c)に示したように、領域Ⅲの溶滴移行形態は、パルス同士の休止期間にワイヤ端の熔融金属が半球状にもどって、パルス期間中にはワイヤ端に熔融金属が静かに成長していくという、かなり静的なモデルが成立するとの予測から、表面張力、重力、ピンチ力を考慮した溶滴のプロフィールを求め、 I_c およびワイヤ先端部に懸垂できる最大溶滴量を実測値と比較する。

図2-12に溶滴のプロフィールを計算するための座標の定義を示す。溶滴の表面上の任意の点において、微小な矩形部分を考え、その四辺を直交する円弧の一部と見なして、それぞれの曲率半径を R_1 、 R_2 とし、溶滴の内外の圧力差を ΔP 、表面張力を T とすれば、次式が成立する。⁽⁵⁾

$$T \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] = \Delta P \quad (2-3)$$

軸対称の溶滴においては、 R_1 をプロフィールに内接する球の半径にとれば、 R_2 は、軸を含む平面で切った場合のプロフィールの、その点における曲率半径となる。

外気の密度は溶滴の密度に比べて小さいので無視し、溶滴の最下点($Z=0$)で溶滴は球形(その半径を b とする)であると仮定すると、 $Z=Z_0$ における圧力の釣り合いの式は、(2-3)式を変形して、

$$T \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] = \frac{2T}{b} - \rho_l g Z_0 \quad (2-4)$$

となる。ここで、 g は重力加速度である。

(2-4)式を数値的に解けば、溶滴のプロフィールが得られる。

(2-4)式を $r=0$ から $r=r_0$ まで積分すると、

$$2\pi r_0 T \sin \phi_0 + (\rho_l g Z_0 - \frac{2T}{b}) S_0 = \rho_l g V_0 \quad (2-5)$$

となり、 $r=0$ から $r=r_0$ までの溶滴の体積 V_0 が求められる。ここで ϕ_0 は $r=r_0$ におけるプロフィールの法線と Z 軸とのなす角であり、

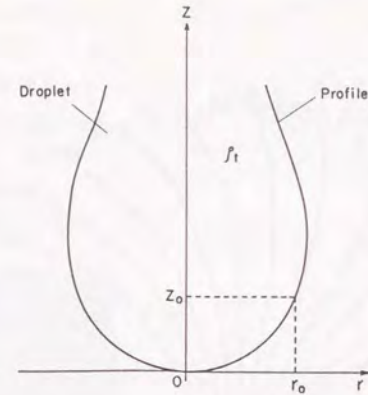


図2-12 座標軸の定義

O: 溶滴の先端

z: 中心軸

ρ_l : 溶滴の密度

(r_0, z_0): 溶滴のプロフィール上の点の座標

$$V_0 = \int_0^{z_0} \pi r^2 dz, \quad S_0 = \pi r_0^2$$

である。

図2-13にプロフィールの計算結果を示す。ワイヤの先端に溶滴が付着しているときのプロフィールは図2-13に示す曲線のうち、ワイヤとの境界において $r=R$ (R はワイヤの半径)という条件を満たすものとする。その曲線は多数あり、溶滴が大きくなるにつれてそれらの曲線群の形状をとりながら変化していくが、(2-5)式から求めた溶滴の体積 V_0 の最も大きいものが、ワイヤに付着できる溶滴のうち最も重量の大きいものであると考えられる。

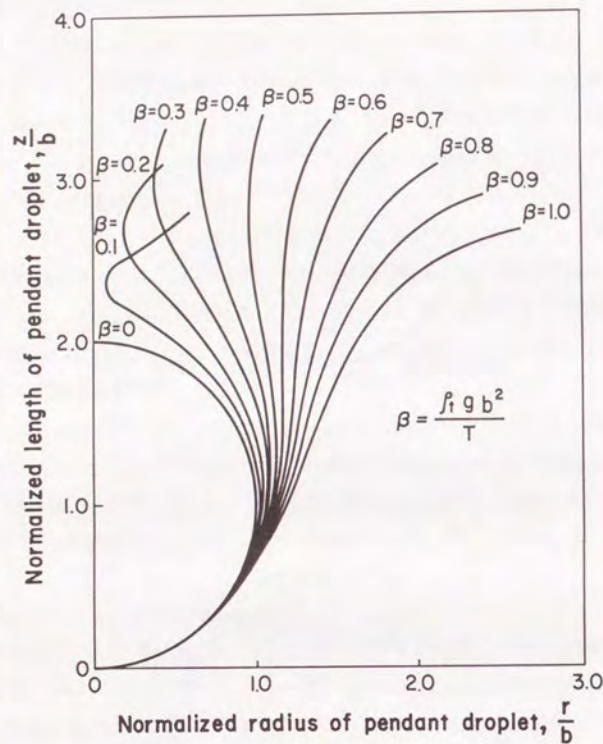


図 2-13 プロフィールの計算結果

5) 溶滴の表面張力の評価

溶滴の表面張力の値を求めるために、実際にワイヤの先端部をアーク熱で加熱して溶融し、そのときの溶滴の実際に得られた形状と、(2-4)式から計算したプロフィールとを比較した。

図 2-14(a)は、ワイヤが TIG アークによって加熱される状況を示した図である。溶

滴が静かに加熱され、体積が大きくなって正にワイヤから落下する直前の溶滴の形状を高速度カメラで撮影したものである。この形状は、図 2-14(b)に示すように、 $T = 1200$ dyn/cmとして計算した場合とよく一致している。この値を用いて以下、ワイヤ先端に付着可能な溶滴量の検討を進めることにする。

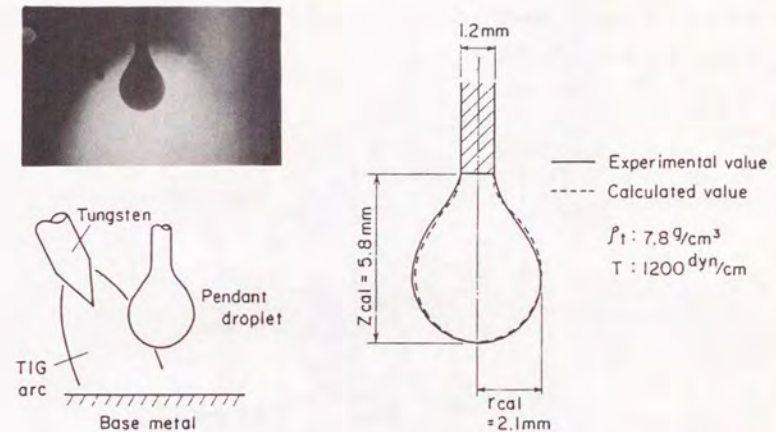


図 2-14 ワイヤ端の溶滴形状とプロフィール計算結果との対比

6) 電磁ピンチ力を考慮したときのワイヤ端の最大付着溶滴量

ワイヤに電流が流れると、その電流と垂直な方向に電磁力が働き、ピンチ力と呼ばれるが、ワイヤ先端の溶滴からアークに接続する部分では、電流が空間的に拡がるので、ワイヤの軸方向の成分が生じる。その母材方向の成分を考えると、これが重力に加わるため、等価的に溶滴重量が増加したのと同等になる。以下、Greene⁽⁶⁾の方法にならって、ピンチ力を計算し、(2-4)式の重力加速度を修正していくこととする。

図2-15に示すように、ワイヤの先端に球形の溶滴が付着しており、電流は一定密度で図の斜線部からアーク部へ流出しているものと仮定する。そのときのピンチ力の母材方向成分Fは

$$F = I^2 \left[\log \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \theta} \right) + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \log \frac{2}{1 + \cos \theta} \right]$$

F (dyn)、I : 電流 (e. m. u) (2-6)

となり、これが重力に加わるため、(2-4)式の ρ_t をピンチ力を考慮した密度 ρ_{total} で置きかえねばならない。

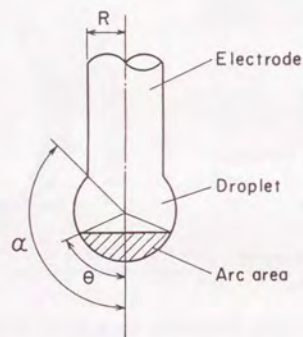


図2-15 溶滴形状の近似

図2-16は、 ρ_{total}/ρ_t とワイヤ端に付着できる最大溶滴量Wとの関係を示す図である。ピンチ力のないときは、 $\rho_{total}/\rho_t = 1$ であり、そのとき370mg相当の溶滴がワイヤ端に付着できるが、ピンチ力が大きくなって $\rho_{total}/\rho_t = 100$ になると溶滴は5mg分以下しか付着できなくなる。

電流Iと電流密度が分かれば、図2-15の溶滴のどの部分までアークが広がるかが分かるのでピンチ力が求められ、図2-16を利用すればWの値が求められることになる。

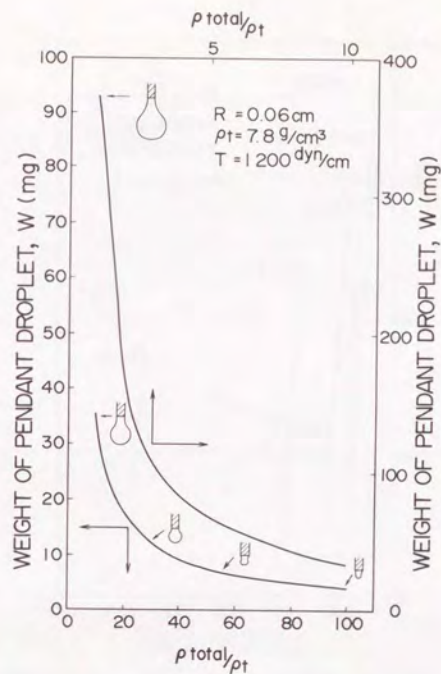


図2-16 ρ_{total}/ρ_t と溶滴量との関係

図2-17に電流と最大溶滴量Wとの関係を示す。ここで、パラメータNは

$$N = \left[\frac{I}{A} \right]^2 \times \frac{R^3}{T} \quad (2-7)$$

であり、Aは放電面積で図2-15に示した記号を用いて

$$A = \frac{2\pi(1 - \cos \theta)}{\sin^2 \alpha}$$

と表わされる。各Nの値において、すなわち、電流密度、表面張力、ワイヤ径一定のもとでアークが溶滴をおおって

$$\theta = \alpha$$

の条件になると、溶滴量Wは最小値 W_c をとる。この条件が臨界電流程度の電流が流れた

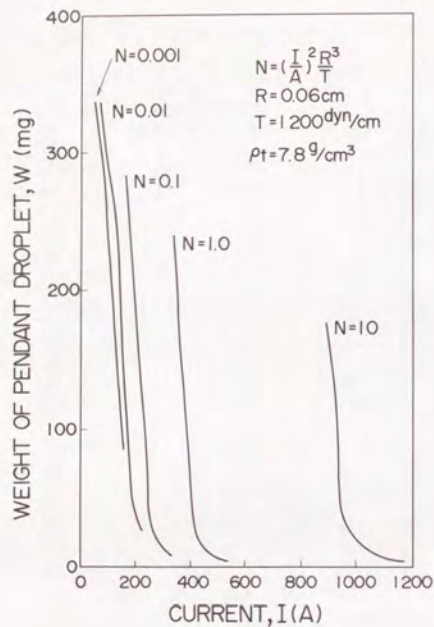


図2-17 溶滴量と電流との関係

ときの状況である。溶滴量が最小値 W_c となるときの電流値を I_c とし、 W_c と I_c とを N を変数として表わしたのが、図2-18である。 N が大きいき、すなわち CO_2 ガス成分が多く、電流密度の高いときには、溶滴細粒化のための電流値が急増加することがわかる。

上記モデルは、図2-15に示したように、溶滴が球形となってワイヤ先端に付着すると見てピンチ力を計算したものであり、図2-6(c)に示すように、領域(Ⅲ)のパルス電流通電時前半部をモデル化するのに適しているものと考えられる。軟鋼ワイヤの一定直流に対する溶融、移行現象は図2-8に示すように、ワイヤ先端部は絶えず細長く伸びており、本モデルを適用するのは不適当である。

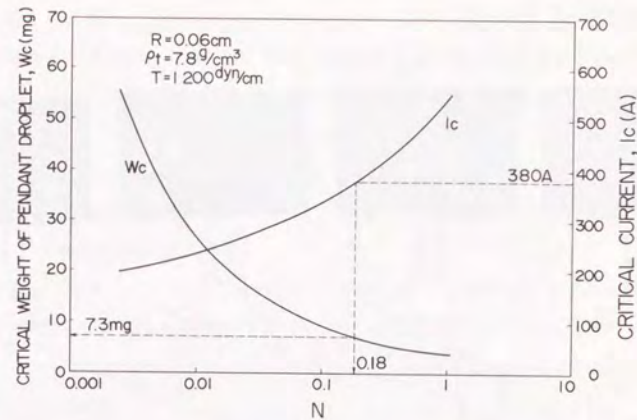


図2-18 W_c と I_c との関係

図2-5に示した実験結果から、ワイヤ径1.2mmの場合の臨界電流値が380Aであるので、これを図2-18に適用すれば、

$$N = 0.18$$

である。この値は平均電流密度でいえば、 $10^4 A/cm^2$ に相当し、高速度写真のアーク光輝度の強い部分の広さから推測される電流密度とほぼ等しい。

このとき、図2-18から

$$W_c = 7.3 \text{ mg}$$

となる。このことから、電流値380Aでは、ワイヤ端の溶滴量が、7.3mgを超えると、溶滴は落下し始めることになる。

図2-19は、ピーク電流380A、 $\tau = 3.3 \text{ ms}$ の領域Ⅲに相当する条件での溶滴移行現象を高速度カメラで撮影した結果である。パルス立上りから約2.6ms後(時刻 t_1)に溶滴にくびれができて始めて母材方向に移動が進み、 t_1 から約2ms後(時刻 t_2)にワイヤから離脱する。 t_1 における溶滴量を、図2-19の写真を拡大して求めると約8mgであり、上述の $W_c = 7.3 \text{ mg}$ の値に近い。すなわち、 t_1 はワイヤ端の溶滴量が7.3mgを超える時間であ

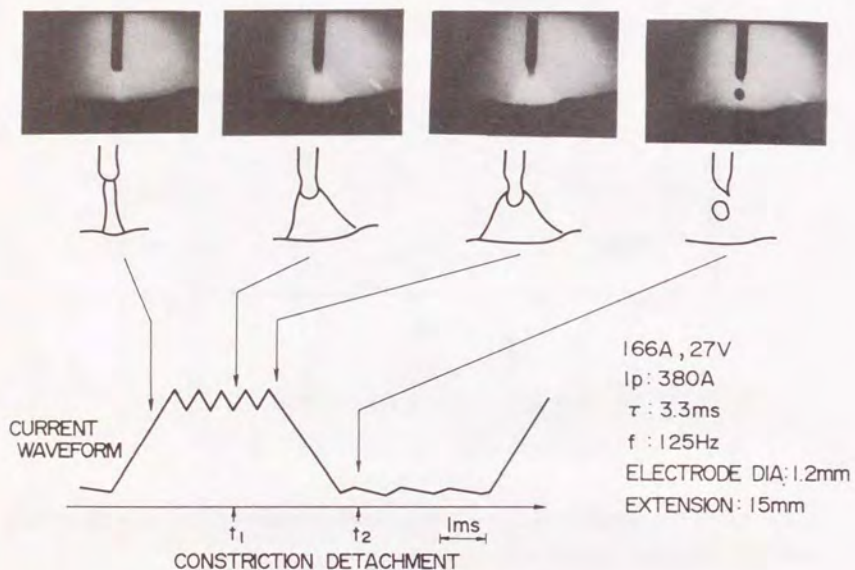


図2-19 パルス電流波形通電時の溶滴移行現象

ると考えられる。

Greenelは、上記の静的モデルを展開するに当たって、現実の溶接条件でどのような場合にそのモデルが適用できるかについては、何ら提示はしていなかった。本項の検討結果から、パルスアークの溶滴移行現象を論じる場合に、静的モデルが適用できることが分かった。このモデルを適用し、以下、さらに、電流波形と溶滴移行現象に関して検討を加える。

7) パルス波形と溶滴移行の時間変化について

ワイヤ先端の溶融部は、くびれが生じた後もアークに包まれて母材方向に落下していく。パルス電流のピーク部は、溶滴に t_1 以降にも電磁力を与えておく必要があるため、 t_1 より長いパルス幅をとらねばならない。パルス幅が t_1 より短いとピンチ力が増加するため、1パルス当りに1回の溶滴移行がなされず、図2-5中(II)の領域に入ってしまう。 t_1 以降も溶滴は加熱を受け続けるため、移行途上の溶滴はその間融点以上に過熱されることとなり、それが結果として $H_0=430\text{cal/g}$ という、融点での保有熱量約300 cal/gを超える値を得る状況に至る。

溶滴の保有熱量から、 $t_1 \sim t_2$ の間のアーク熱によって受ける分を差し引けば時刻 t_1 における溶滴の保有熱量が推定できる。ワイヤ送給速度 $v_w = 5\text{m/min}$ 、パルス周波数 125Hz 、ピーク電流値 380A の場合を例にとり、以下の手順で時刻 t_1 における溶滴の保有熱量 H_1 を求める。

$v_w = 5\text{m/min}$ で、毎秒当りの軟鋼の送給量に直せば 735mg/s であるので、1パルス当りの平均的な溶滴移行量は

$$\frac{735 [\text{mg/s}]}{125 [1/\text{s}]} = 5.88 [\text{mg}]$$

となる。時刻 t_1 から時刻 t_2 までに 5.88mg の移行途上の溶滴に注入される熱量は、電流波形から

$$\int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = 0.583 [\text{A} \cdot \text{s}]$$

であり、溶融等価電圧 ϕ を図2-11から、平均して 6V と仮定すれば

$$0.583 [\text{A} \cdot \text{s}] \times 6 [\text{V}] \times \frac{1}{4.2 [\text{J/cal}]} = 0.833 [\text{cal}]$$

となる。これを単位質量当りに換算し、それを ΔH_1 と書けば

$$\Delta H_1 = \frac{0.833 [\text{cal}]}{5.88 [\text{mg}]} = 142 [\text{cal/g}]$$

となる。したがって、時刻 t_1 における溶滴の平均保有熱量 H_1 は、

$$H_1 = H_0 - \Delta H_1 = 430 - 142 = 288 [\text{cal/g}]$$

となる。この値は軟鋼の融点における保有熱量300cal/gとほぼ等しい。時刻 t_1 には、ワイヤ端の溶融金属は、量は W_e で、ほぼ融点の温度をもっているものと推定される。表2-1に、種々の場合に対して上記の手法で求めた ΔH_1 と H_1 との値を示す。 H_1 はいずれの場合もほぼ300cal/gに近い。

ワイヤは、溶滴離脱後、次の周期のパルスによるくびれの時刻まで、ベース電流50Aおよびパルス電流前半部によって加熱を受ける。この期間にワイヤが得る熱量は、

$$0.798 \text{ [A} \cdot \text{s]} \times 6 \text{ [V]} \times \frac{1}{4.2 \text{ [J/cal]}} = 1.14 \text{ [cal]}$$

である。これは、この期間に形成される1溶滴分の質量で割れば、194cal/gに相当する。ワイヤは、突き出し部のジュール加熱によって、溶接チップ部からアーク端まで送給される間に、図2-10を用いて求めると117cal/gの保有熱量をもつ。従って、次のパルスのくびれ時点では117cal/g+194cal/g=311cal/gの保有熱量となる。これは、 t_1 において溶滴の温度がほぼ融点に近いことを再び示す。表2-1には、このようにして求めた ΔH_2 と H_1 との値を併せてまとめている。

図2-20は、溶滴の保有熱量、電流波形、溶滴移行状況をモデル化したものである。 $t_2 - 1/f$ の時刻に溶滴1の離脱が生じた後、ワイヤ先端には、ジュール加熱による熱量 H_J をもつワイヤが合計 ΔH_2 だけ時刻 t_1 までに加熱され、溶滴量が増加し、7.3mgになる。時刻 t_1 の後、溶滴は離脱しようとするが、アークに包まれるため、 ΔH_1 分だけ融点以上に過熱され、保有熱量は H_0 (= 430cal/g) となり、約2100°Cになる。このような状況がそれ以降周期的に繰り返される。

表2-1 溶滴の保有熱量の計算

Peak current (A)	Electrode extension (mm)	H_0 observed (cal/g)	ΔH_1 calculated (cal/g)	$H_1 = H_0 + \Delta H_1$ (cal/g)	ΔH_2 calculated (cal/g)	H_2 calculated (cal/g)	$H_2 + \Delta H_2$ (cal/g)
380	15	430	142	288	194	117	311
450	15	440	158	282	163	131	294
500	15	400	95	305	207	119	326
450	30	410	91	319	157	161	318

1. Electrode dia.: 1.2 mm
2. Electrode feeding rate: 5 m/min
3. Pulse frequency: 125 Hz

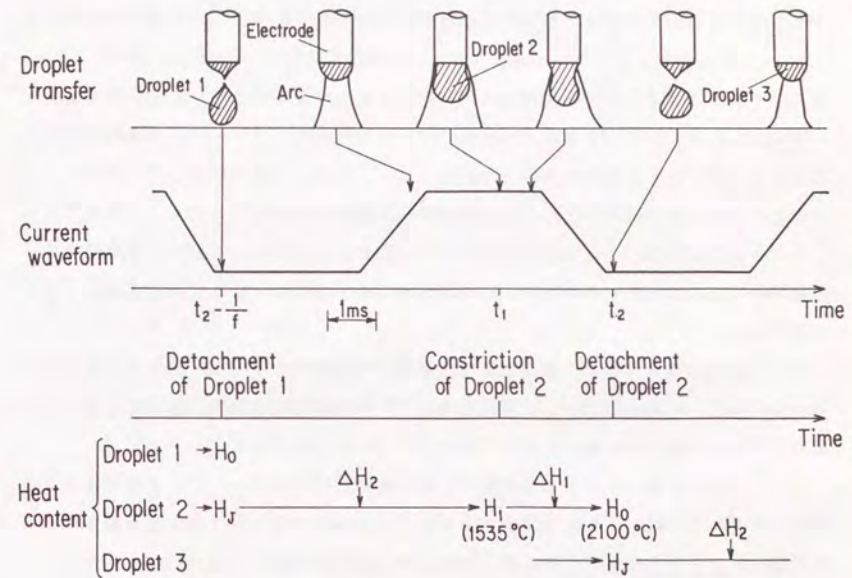


図2-20 電流波形、溶滴移行、保有熱量の時間関係図

このように、図2-5の領域(Ⅲ)において、パルス期間は2つに分けることができる。1つは、時刻 t_1 までの期間で、ワイヤ先端に溶融球が形成されていく期間である。もう1つは、時刻 t_1 以降の期間で、溶滴のくびれが進行し離脱に至る期間である。この期間で離脱途上の溶滴は融点以上に過熱される。

2. 4 結言

以上、長アーク長での混合ガス中のパルスアーク溶接現象について実験検討した結果を以下にまとめる。

- 1) 電流波形形状と溶滴移行形態との関係を調査した結果、従来単純にスプレー移行として考えられていた移行形態がさらに詳細に分類され、実用的にアーク長を短くしてもワイヤが母材と接触短絡しない領域が見出された。軟鋼をワイヤとし、安価なアルゴンと CO_2 ガスとの混合ガスを用いた極めて実用的な溶接条件において明確にできたことは、後に述べるような、実際の溶接機の実現に対して設計の基本概念を示すものである。
- 2) 溶滴移行形態を特徴づける臨界電流は、パルス電流に対しては、一定直流電流の場合に比べて大きな値をとることが明らかになった。これは、一見同様に見えるスプレー移行であっても、使用電流波形によって溶滴移行形態が大きく異なることを示すものである。パルス電流を供給した場合は、そのパルス同士の休止期間においてワイヤ先端の溶融金属が半球状に復帰するのに対し、一定直流電流の場合は、ワイヤ先端溶融部が細長く延びる。
- 3) 溶滴の保有熱量を測定し、溶融の温度に換算して約 2100°C という、融点 1535°C よりも高い値を得た。この値および、溶融等価電圧 6V の値は、次項以降の溶接電流波形と溶滴移行形態との関連性を求める際の基礎データとなるものである。
- 4) パルス電流を供給したときの溶滴移行形態の観測結果に基づき、ワイヤ端の溶滴形状を静的モデルで表現し、臨界電流値およびワイヤ端への付着可能な最大溶滴量を求めて、実験値とのよい一致を見た。その際、溶滴の表面張力を実測し、 1200dyn/cm を得た。
- 5) 溶滴の保有熱量および溶滴のプロフィール計算結果から、電流波形と溶滴移行現象との物理的な意味付けを行った。パルス電流期間の前半、溶滴にくびれが発生するまでは、ワイヤ先端にほぼ融点に近い温度の溶融金属が量を増加させる期間で、くびれは、その量が、プロフィール曲線から決まるワイヤへの最大の付着量に等しくなったときに生じる。パルス電流期間の後半、溶滴にくびれが発生した後は、溶滴は母材方向に離脱へと進むが、その間アークが溶滴を引続き包み込むため、溶滴は融点以上に過熱され、結果として保有熱量の測定結果として得た約 2100°C の高温となる。

参 考 文 献

- (1) 丸尾、平尾、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, No. 4, P. 573 (1984)
- (2) 安藤、長谷川；“溶接アーク現象(増補版)”昭和42年産報
- (3) 小沢、森田；“溶融金属の平均熱量の測定”溶接学会誌、vol. 32, No. 2, P. 130 (1963)
- (4) E. Halmoy；“Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential”, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behavior, P. 49, May 1979
- (5) E. Matijevic；“Surface and Colloid Science vol. 2” John Wiley & Sons, P. 2, (1969)
- (6) W. J. Greene；“An analysis of transfer in gas-shielded welding arcs” Trans. A. I. E. E., P. 194, (1979)
- (7) S. Ueguri, K. Hara and H. Komura；“Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding” Weld. J., vol. 64, No. 8, P. 242-s (1985)

第3章 アルゴン、CO₂混合ガス、 短アーク長でのパルスアーク溶接

3.1 緒言

第2章で述べた通り、アルゴン、CO₂混合ガスにおいて、ワイヤ先端の溶滴を細粒化するための波形条件が明確になった。しかし、溶接工程の自動化の波が溶接ロボットの浸透とともに急ピッチで進み、安定な高速溶接を再現性良く行えるものの出現が要請される状況にあって、ワイヤと母材とがほとんどパルスの毎周期短絡を伴う程度のアーク長の短縮が要求されるようになった。生産ラインの効率的運用のためにラインを構成する機器類、治具類が多様化し、高品質化する中で、上記の短アーク長での溶接は、往々にして多量のスパッタ発生を伴う。スパッタの発生は、複雑化する生産ラインの構成機器類、治具類の目づまりによる損傷、あるいは溶接トーチのシールドガスノズルへの付着に伴う、アーク部へのシールド効果の低減を来し、ブローホールなどの溶接欠陥の原因になる。

このように、高速溶接を目的として、アンダーカットなどの溶接欠陥の発生を防ぐためにアーク長を短く設定したときのパルスアーク溶接現象については、スパッタリングの発生とブローホールの発生とを関連づけた山田ら⁽¹⁾の報告以外にはほとんどない。

本章では、パルスアーク溶接を短アーク長にて行った場合の、発生するスパッタの観測結果、発生する場所、波形条件との対応について検討する。⁽²⁾この検討結果は、後に述べるインバータ式パルスマグ溶接機的设计の指針を与えるものとなっている。

3.2 実験方法

1) 溶接アーク現象の観測方法

溶滴移行現象の観測には、第2章に述べたのと同様の高速度カメラを用いた高速度写真、ガス流および空間密度の過渡的な変化の観測には、シャドウグラフ法を用いた。

溶接母材として板厚2~4mmの軟鋼板を考えると、1500^{mm}/minの下向き溶接を行う場合、シールドガスがAr/CO₂=8/2の混合ガスのとき溶接電流は200~250A、電圧は22V程度に設定する。この条件では、アークが母板表面より幾分埋もれるため、斜め上方から観測を行った。^{(4),(5)}また、シャドウグラフの測定装置は、図3-1に示すよう

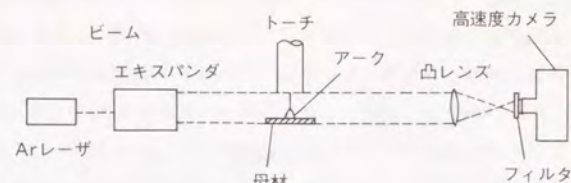


図3-1 シャドウグラフの測定装置

に、約50mWのアルゴンレーザ (Spectra Physics社 Model 164) のビームを直径約30mmの平行光線に拡げてアーク部を通過させる。その光を凸レンズで絞り、干渉フィルタ (透過中心波長 514.5nm) を経て高速度カメラ (Redlake社 HYCAM 100) へ導き入れる。

2) 電源および溶接条件

用いた電源はインバータ制御によるパルス電源でブロック図を図3-2に示す。溶接電流を時々刻々フィードバックし、所定の電流値になるようにインバータを構成するトラン

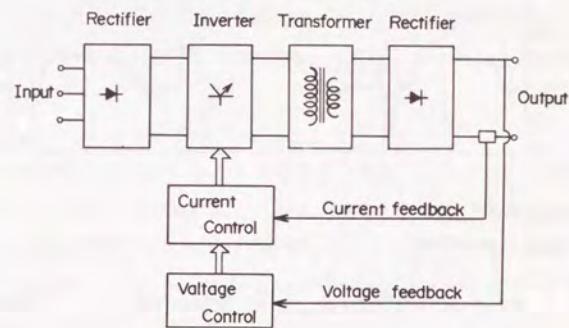


図3-2 インバータ制御電源のブロック図

ジスタの導通時間幅をパルス幅変調する。また、特にワイヤ・母材間の短絡を伴うとき、ワイヤの母材への突込みを防止するためには、アーク電圧一定の制御が必要である。ここでは、ワイヤ送給速度が一定のとき、平均アーク電圧が設定値に等しくなるように、ピーク電流値、パルス周波数を一定のまま、パルス幅のみを微調整している。

ワイヤは、直径1.2mmの混合ガス用ワイヤ（日溶工 YM-28S）で、ワイヤの送給は直流モータで連続して行う。シールドガスは、Ar/CO₂=8/2の混合ガスで流量は20^l/minである。母材は板厚3.2mmのSPCC材であり、溶接はトーチを固定し、母材を走行台車の上に乗せて垂直、下向きのビードオンプレートで行い、溶接速度は1500^{mm}/minで、チップ・母材間距離は15mmである。

3.3 実験結果と考察

ワイヤ送給速度7^{mm}/min、アーク電圧22V、溶接電流約220Aにおける電流、電圧波形を図3-3に示す。アーク長の設定を短くしているため、図3-3の例では毎周期、パルス終了後にワイヤと母材との短絡が発生して電圧が急降下している。短絡時刻は、前章図2-19に示す溶滴離脱時刻 t_2 の直前の、ワイヤ溶融部が最も長く伸びた時に相当する。一方、周期によっては母材溶融部の動きとも関連するが、短絡を伴わずに溶滴移行が行われる場合もある。

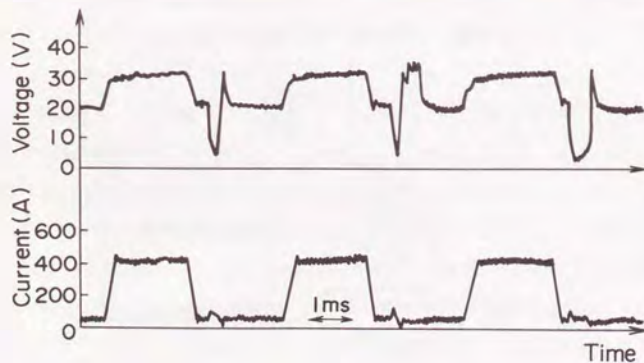


図3-3 インバータ制御電源によるアークの電流、電圧波形

以上のような状況のもとで、スパッタの発生は短絡に伴うものが大部分である。図3-4は、短絡を伴わない場合の溶滴移行現象を明瞭に示すためにアーク電圧を27Vに上げ、水平方向に高速度写真撮影を行った結果である。溶滴がワイヤ端から離脱する直前には（図3-4のd、e、f）、アークは溶滴の先端のみならず、溶滴を包み込むようにくびれ部より上方からも出ており、溶接電流のうち、溶滴を貫通しないものも多いと考えられる。そのため、溶滴がワイヤ先端から離脱するとき、細くなったワイヤ溶融部での急速なジュール加熱が起こらず、溶滴もワイヤ先端形状もワイヤの軸方向以外へは力を受けず、そのまま下向きに母材溶融部方向へ落下し、スパッタの発生は起こらない。したがってここで問題とする短アーク長でのスパッタは、ワイヤ母材間の短絡現象に伴って発生するものを対象に考えても差しつかえない。

短絡を伴う場合のスパッタの発生現象は、短絡中の通電電流値によっても変化するが、主として、ワイヤ先端の溶融部と溶融池との接触形状、すなわち、短絡時にワイヤから溶融池への溶接電流の通電断面積がどこで最小となるかによって分類できる。

1) ワイヤ、母材間の接触点から生じるスパッタ (Type A)

ワイヤ先端が溶融池と接触する場合、まずその接触点で短絡電流の通電断面積が最小となる。図3-5は接触点を中心に発生するスパッタの例で、約4500コマ/secのコマ撮り写真を抽出したものである。ピーク電流期間にワイヤ先端の溶融部に十分なくびれが形成されなかった場合、1パルス周期中に溶滴移行が行われず、最後にワイヤ先端に溶滴が残る。（図3-5a）その溶滴が次の周期のパルスピーク時に溶融池と接触し（c）、ワイヤ溶融部および溶融池の一部が飛散してスパッタとなる（d、e）

2) 溶滴のくびれ部分で生じるスパッタ (Type B)

短絡時に溶滴の移行が起こり、ワイヤ先端からの離脱とともに短絡が解除されてアークが再生するとき、ワイヤ溶融部に細いくびれが生じて、そこで短絡電流の通電断面積が最小になる。図3-6には、短絡がベース電流期間内で、開始したもののそれが長引き、次の周期のピーク期間にかかり、そこでアークが再生する場合の例を示す。aからbにかけて短絡が発生するが、そのときの溶滴のくびれが十分でなく、溶滴のワイヤからの離脱が短時間になされず、次の周期のパルス電流が短絡電流として流れるため、アークの再生とともにワイヤ溶融部および溶融池の一部が飛散してスパッタとなる（c、d、e）。

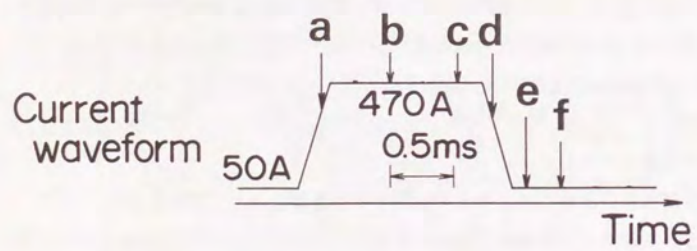
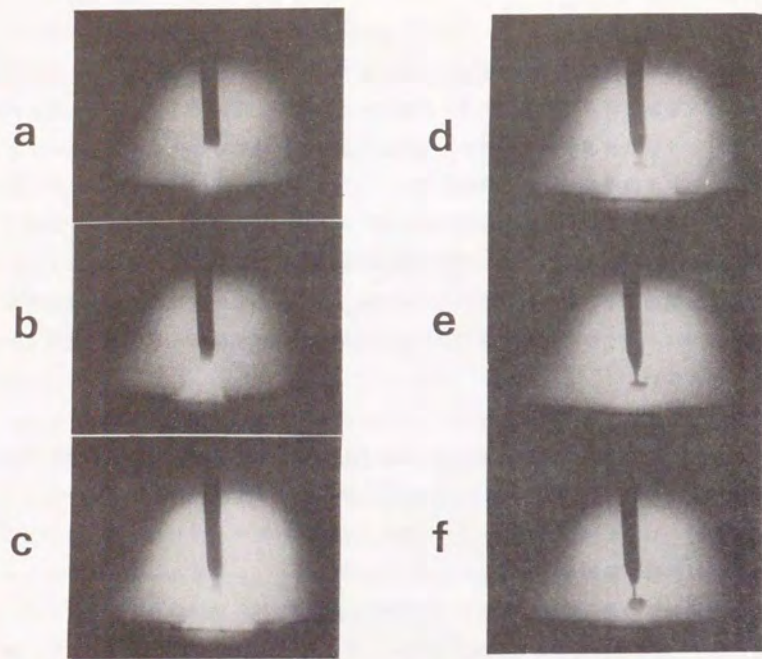


図3-4 短絡を伴わない溶滴移行現象
(27V, 230Hz)

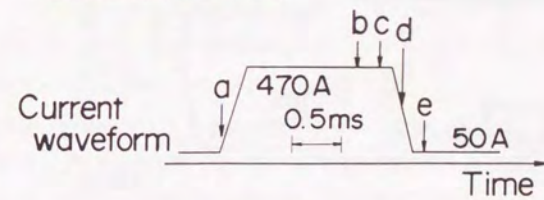
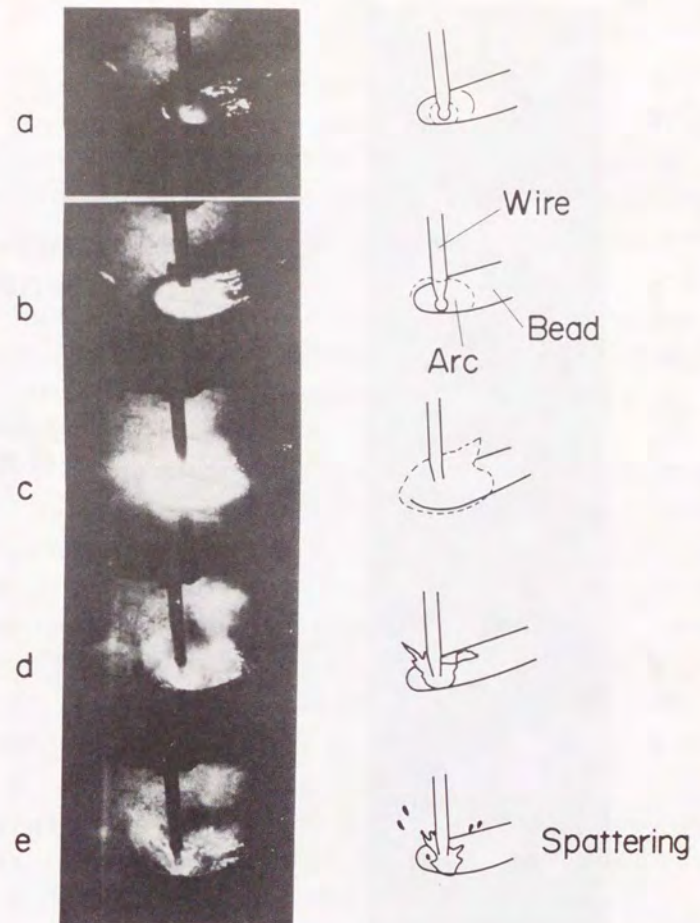


図3-5 ワイヤと溶融池との接触時点で生じるスパッタリング
(22V, 230Hz)

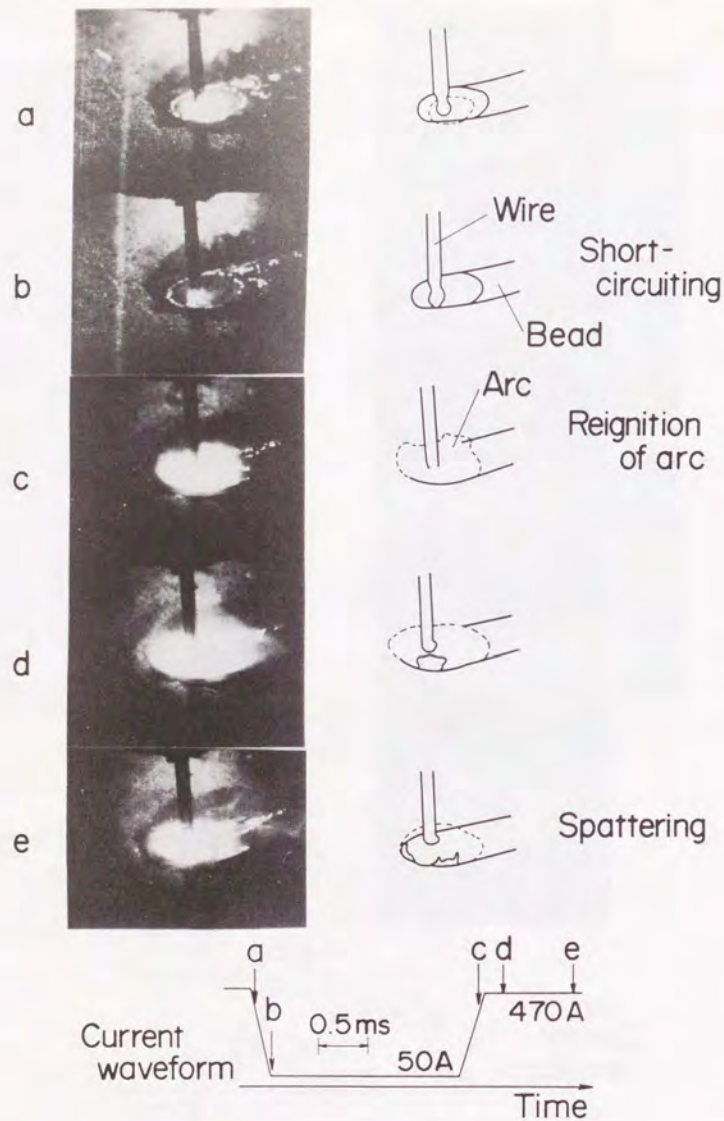


図3-6 後続のパルスピーク期間でのアークの再生時点で生じるスパッタリング
(22V, 230Hz)

図3-7は、図3-6に示したような、アークの再生が次の周期のピーク期間にかかった場合の、アーク再生時およびそれ以降の空間の密度変化を示すシャドウグラフの一例である。シャドウグラフにおいては、空間密度の位置座標に関する2次微分に比例した像の明るさの変化が検出されるが、アーク再生後に(図3-7d、e)、アーク近傍の空間に密度変化が存在することを示す縞模様が見れ、溶融池からは溶融金属の一部がはね上がって飛散するのが見られる。

ピーク電流470Aより小さな50Aの電流値をもつベース電流期間にアーク再生が行われるときでも、溶滴離脱後にワイヤ先端部に溶融金属が細長く残ると、短絡電流による瞬間的な気化作用によって、細長い溶融部分が飛散することがある。図3-8はこのような現象の一例であり、同一ワイヤ送給速度でもパルス周波数を低目にした場合、(ワイヤ送給速度7mm/minでは、210Hz以下の場合)によく生じる。これは、パルス周波数が低いときは、1パルス周期あたりに溶融するワイヤ量が多く、また平均的にアーク電圧を一定にしている関係上、平均パルス幅が長く、その間にワイヤ先端の溶融部は細長く伸び、溶滴離脱後もワイヤ先端部が細く残ることから、図3-8のようなスパッタ発生現象が多く見られる。図3-8では、aおよびbにおいて短絡が生じ、cにおいてアークが再生するとワイヤ先端の残り部分が、飛散速度は遅いもののスパッタとなっている(d、e)。

図3-9は、ベース電流期間でのアーク再生時のシャドウグラフを示す。この場合、スパッタの発生はないものの、アーク近傍に密度変化が生じていることを示す縞模様が見られる(c、d、e)。

このように、短絡がベース期間で開始かつ終わる ばあいには、縞模様は、短絡開始時よりも、アーク再生時に顕著に見られる。この縞模様は、アーク再生時のうち、ワイヤ端、溶融池が大きく乱される時ほど顕著であり、また図3-7からわかるように、アーク再生後、まず細かいスパッタが急速に飛散し、その後にシャドウグラフの縞模様ができることから、アーク再生時の瞬間的な爆発力に伴い、高温アークが周辺に吹き出ることに基づいて縞が形成されるものと推定される。

図3-10は、短絡が発生するときのアーク負荷の電流、電圧波形を一旦デジタルメモリに記憶させ、10μs毎の各サンプリング点で電圧値を電流値で除して求めた抵抗値の時間変化であり、3パルス分を、短絡開始時点をそろえて出力したものである。なお、電圧の検出は、トーチ・母材間で行った。短絡開始部分と終了部分とを比べると、開始部分では50μs程度以下のうちに抵抗が約40mΩの定常値に落ち着くのに対し、終了部分では、

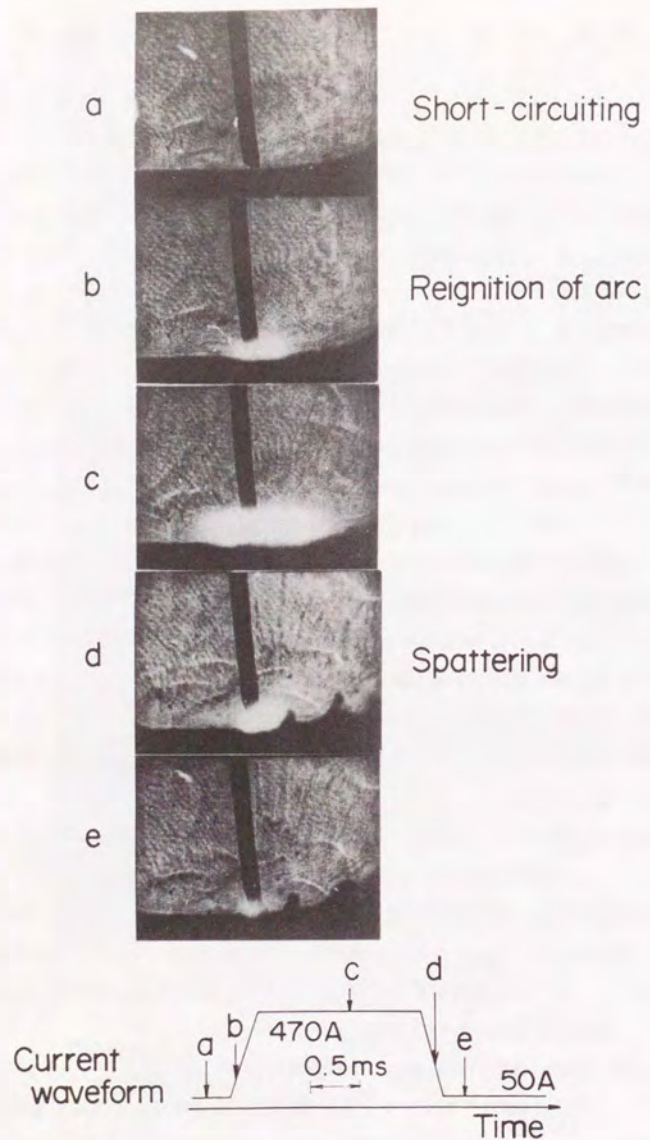


図3-7 アーク再生後のシャドウグラフ
(22V, 230Hz)

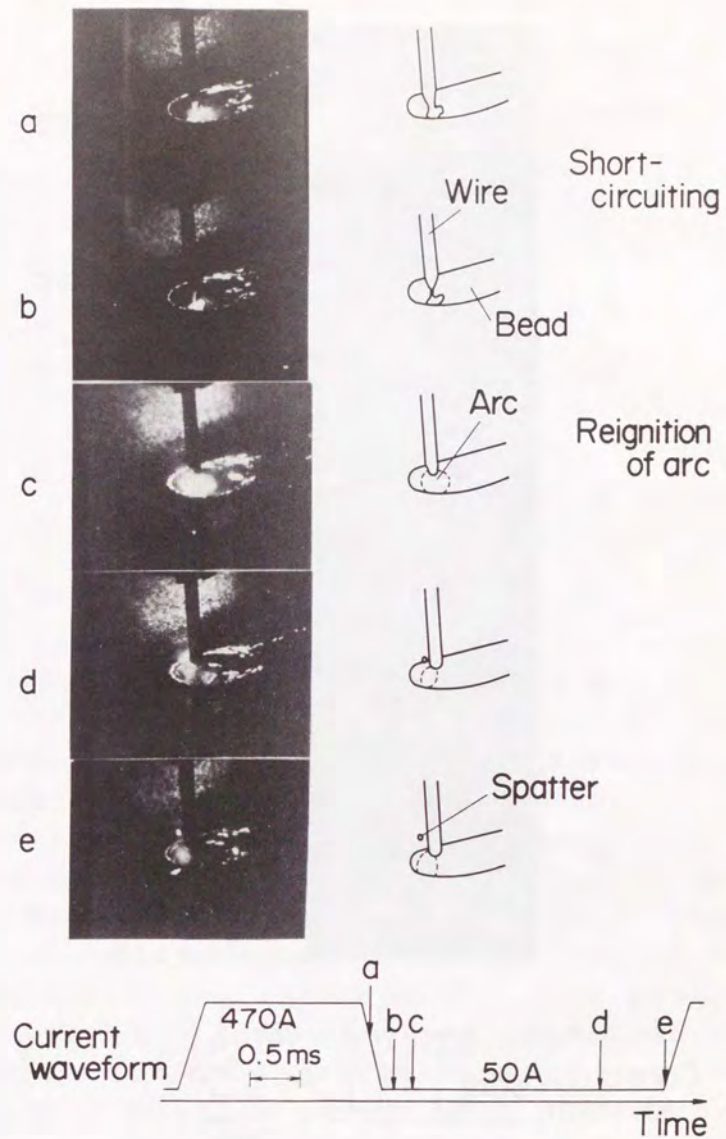


図3-8 溶滴のくびれ部分から生じるスパッタリング
(22V, 210Hz)

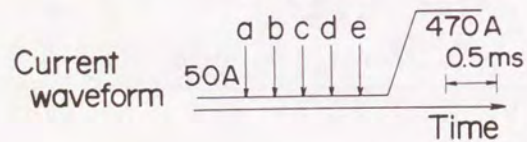
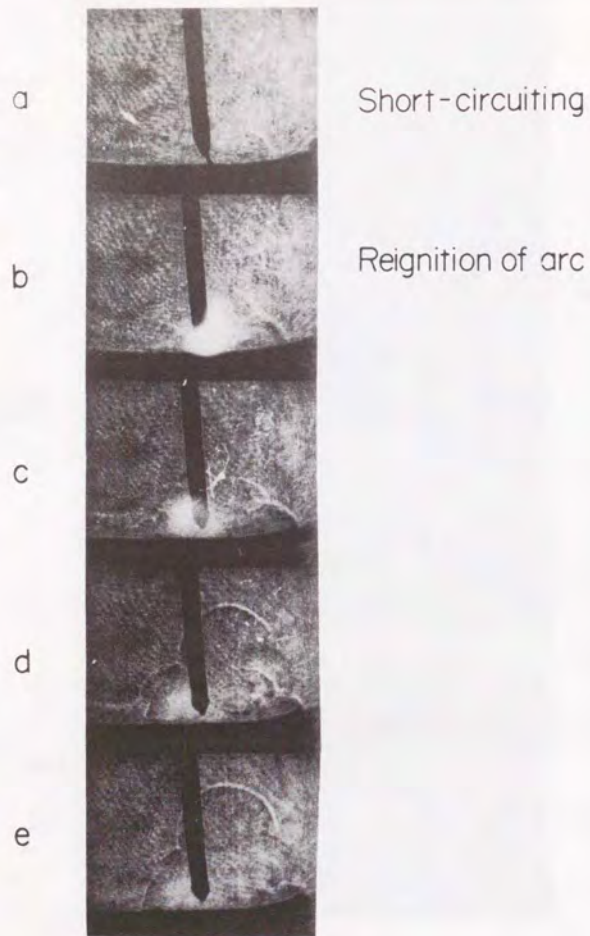


図3-9 ベース電流期間でのアーク再生時のシャドウグラフ
(22 V, 230 Hz)

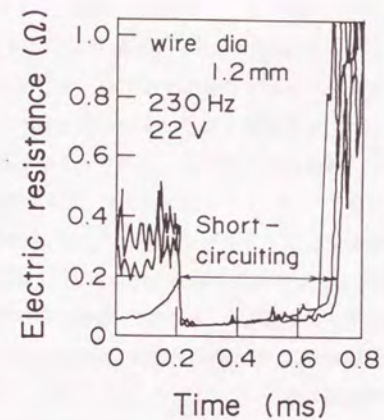


図3-10 抵抗計算波形

抵抗値は徐々に上昇していく。これは、開始部分ではワイヤ先端の溶接部が母材の溶融池に接触すると、直ちにその接触断面積が広がるのに対し、終了部分では、ワイヤ先端溶融部のくびれが徐々に細くなっていくことを示している。図3-9に示したように、短絡開始時よりアーク再生時にスパッタの発生および空間の密度変化が多いのは、約50Aのベース電流値の場合に、細長いくびれ部分のジュール加熱の方が著しいからであろう。なお、図3-10の抵抗波形中にある振動は、電源インバータのスイッチング時に、電圧検出端のインダクタンス分を介して生ずる電圧変化によるもので、また、短絡前に抵抗値が小さい場合があるのは、その周期に短絡がパルス電流の立下り時から発生したため、電流値の大きい場合の小さなアーク抵抗値を示しているからである。

以上のように、短絡を伴うパルスアーク溶接におけるスパッタの発生は、ワイヤ先端から溶融池までの、短絡電流通路の最小断面部で起こる。溶融金属を飛散させる力の成因としては、最小断面部に短絡電流が流れて生じるジュール加熱によって、アーク再生時に金属あるいは金属中に含まれるガスが急膨張するためと推定される。

3) パルス波形条件とスパッタ発生現象

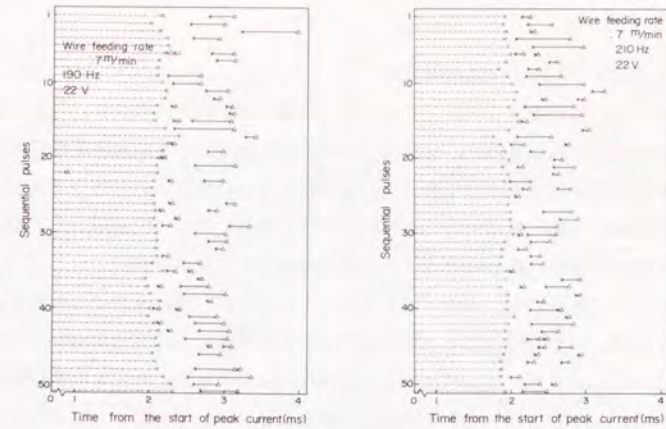
以上のように、スパッタ発生現象は、主として短絡時の溶滴と母材溶融部との接触形状によって分類できることが分かった。パルスアーク溶接においては、大電流パルス期間に、ワイヤ先端の溶融部に径方向のくびれを発生させて母材へ移行させる。溶滴の移行がパルスピーク部の電磁ピンチ力に大きな影響を受け、さらに電流値がピーク値、ベース値を交互にとることから、パルス電流波形条件によってスパッタ発生現象が変わってくる。

図3-11は、ワイヤ送給速度7^m/min、アーク電圧22V、ピーク電流値470A、ベース電流値50Aとして、パルス周波数を变化させたときの、電圧波形から求めた短絡位相図である。図で、横方向が1周期におけるパルス立下り始め(○の点)、短絡開始時刻(×の点)、短絡解除時刻(△の点)を示す。図の縦軸が、下方向に、順番に印加されるパルス周期を示す。なお、パルスの立上り開始時刻、立下り開始時刻は、測定の便宜上、電流値が300Aより大きくなるか小さくなるかで判断した。

パルス周波数が190Hzや210Hzのときは、平均してパルス幅は長く、したがってパルス立下り時あるいはパルス終了後直ちに短絡が発生することが多い。この場合のスパッタ発生現象は、パルス立下り時に短絡が生じたときにTypeAのように接触点で起きるものと、溶滴移行後のワイヤ先端溶融部の残りが飛散するようなTypeBの形態をとるものと2種類がある。パルス立下り時での接触短絡においては、図3-5に示した場合と比べて電流が小さいため、スパッタの発生はさほど著しくはない、1周期当たり2回接触短絡している場合もあるが、特に第1回目の短絡は、ワイヤ先端溶融部と溶融池とが短時間の接触をするときが多く、溶滴移行も伴わずに接触が離れる。

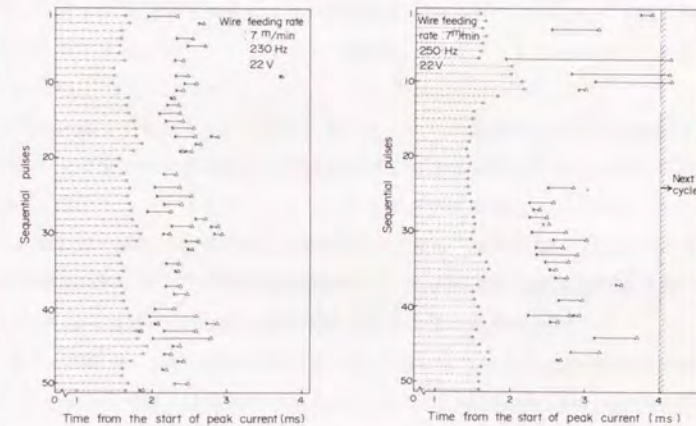
パルス周波数を250Hz程度に高くすると、パルス幅は平均的に短くなり、ピーク期間内で溶滴が径方向にくびれにくくなり、短絡開始時刻は遅く、短絡時間幅も長くなって、図3-6に示したように、次の周期のパルス立上り時に大きなスパッタとともにアーク再生となることもある。また、パルス幅が短く1周期間に溶滴移行ができず、大きな溶滴のまま次の周期のピーク期間に接触短絡が起こると、図3-5のような溶融池部分の溶融金属の飛散を伴う著しいスパッタとなる。

図3-11の特に(c)においてパルス幅が変動しているが、これはアーク電圧が平均して一定となるようにパルス幅を増減調整しているため、短絡時間が長いとその後のパルス幅は長くなる傾向にある。しかし、今回測定した範囲では、パルス幅の増減はその後の現象に影響を与えておらず、短絡位相の変化はほぼ現象から決まるものと考えられる。



(a)

(b)



(c)

(d)

図3-11 短絡の開始と終了の時間的なばらつき

- : パルスピーク期間の終了時点
- × : 短絡の開始時点
- △ : 短絡の終了時点

4) スパッタ抑制のための電源回路方式

以上のような短絡を伴うパルスアーク溶接現象の観測結果に基づき、短絡に伴うスパッタの発生を抑えるためには、短絡時の電流値を小さくし、しかも溶滴離脱後のワイヤ先端の熔融金属の残りを少なく保つことが必要となる。そのためには、基本的考え方として、溶滴移行の際に短絡がないように第2章で述べた領域(Ⅲ)に相当し、短絡がベース電流期間内で開始、終了となるように波形設定をするのが良い。

短絡がベース電流期間内に生じるようにするためには、短絡現象すなわち短絡開始および終了時刻にある程度のばらつきが発生することを考慮し、同一周波数でもベース期間を長くすることが望ましい。パルス電流波形は、ピーク期間、ベース期間の繰り返しであるが、パルスの立上り、立下り時間幅も現実的には無視できない。特に、パルスの立下り部分においては、くびれを形成した溶滴がワイヤ先端から正に離脱しようとする期間であり、立下り時間幅が長くなると、溶滴と溶融池との間の短絡が、まだ小電流のベース値に低下し切らないパルス立下り部で発生することが多い。このため、パルス立下り時間は、短絡に伴うスパッタ発生を抑制するという点で、短く設定することが望ましい。

パルス電流の立下り時間幅は、アーク抵抗と回路のインダクタンス値によって定まり、人為的にはインダクタンス値を小さくするほかない。回路のインダクタンス値は、ケーブルのインダクタンスと電源に内蔵されるリアクトルのインダクタンス値とから成る。したがって電源に内蔵されるリアクトルを省略し、かつ所定の電流を維持するために、スイッチング速度の速い高周波インバータを電流波形整形用に用いることがほぼ必然となる。インバータ制御を用いて発生させた電流波形は図3-3に示したが、トランス2次側の制御周波数が32kHz、リアクトル値はケーブルのインダクタンス分約20 μ Hであり、立下りの時間幅は約0.2msと短い。

一方従来のトランジスタチョップ式電源の場合、図3-12にアーク負荷の電流、電圧波形例を示すが、この場合はトランジスタのスイッチング損失を少なくするため、制御周波数は通常約2kHzで、内蔵のリアクトル値も約100 μ Hと大きく、立下り時間は約2msにも達する。図3-12に示されるように、チョップ式の場合には、パルス立下り部に短絡が発生しており、上記Type Bのスパッタが頻繁に発生する。

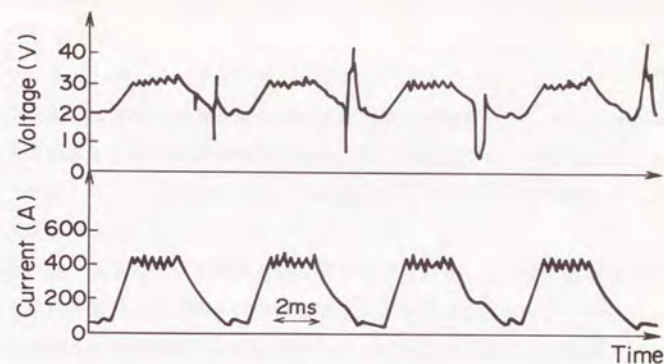


図3-12 チョップ式トランジスタ制御電源を用いたときのアークの電流、電圧波形

3.4 結言

以上、短アーク長における混合ガス中のパルスアーク溶接現象について検討した結果を以下にまとめる。

- 1) 短アーク長においてはワイヤ・母材間の短絡によってスパッタが発生する。スパッタの発生する場所は、ワイヤ・母材間の接触点か、または、ワイヤ先端溶融部のくびれ部分である。
- 2) ワイヤ・母材の接触短絡部で生じるスパッタは、ピーク電流期間にワイヤ先端の溶融部に十分なくびれが形成されなかった場合に、次の周期のパルス期間までワイヤ先端に溶滴が残ることによって次の周期のパルス電流が短絡電流となったときに起こる。
- 3) ワイヤ先端溶融部のくびれ部分で生じるスパッタは、同一ワイヤ送給速度に対して、パルス周波数を低目に設定したとき、1パルス周期内の溶融ワイヤ量が多くなり、溶融部が細長く延びることによって引き起こされる。

- 4) アーク近傍の空間の密度変化をシャドウグラフで観測した結果、アーク再生時に急激な密度変化が生じることが確認された。
- 5) スパッタの発生は、ワイヤ・母材間の短絡電流通路の最小断面における急激なジュール発熱による、溶融金属または内部の混入ガスの急膨張に伴って、ワイヤ溶融部あるいは母材溶融部分が飛散することによって生じるものと考えられる。
- 6) スパッタの発生を抑制するためには、溶滴移行の際に短絡がないようにパルス電流に対し、1パルスに対して1回の溶滴移行が生じる領域Ⅲの条件にパルス電流波形を設定するのに加えて、短絡開始、終了時刻がばらついてもベース電流期間内に短絡が納まるように、パルス波形の立上り、立下りを急峻にする必要があることがわかった。
- 7) パルス電流の立上り、立下りを急峻にするために、回路のインダクタンス分をケーブルのインダクタンスのみとし、その条件でもスイッチング素子のオン、オフによるリップル電流が少なくなるように、電源には高周波インバータの適用が必要となる。

従来のチョップ式トランジスタ電源では、スイッチング損失低減のため、スイッチング周波数を低く保持せざるを得ず、リップル電流の減少のためには、回路内に約 $100\mu\text{H}$ のインダクタンス分を加えることになり、パルス電流の立下りも緩やかで、この部分でのスパッタ発生が顕著に見られた。

これらのことは、現実的に、インバータ式パルスマグ溶接機を実現するに当たり、その設計仕様としての意味をもつものである。

参 考 文 献

- (1) 山田、小林；“パルスMAG溶接におけるブローホールについて” 溶接学会論文集 vol. 3, No. 4, P. 148 (1985)
- (2) 浅沼偏；“流れの可視化ハンドブック” 朝倉 P. 328 (1977)
- (3) 殖栗、田畑、岩田、水野；“パルスMAG溶接におけるスパッタ発生現象” 溶接学会論文集、vol. 4, No. 4, P. 684 (1986)
- (4) 荒谷、遠藤；“アーク現象の写真撮影方法について” 第59回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料 No. 80-430 (1980)
- (5) 殖栗、田畑、岩田、水野、植田；“パルスアーク溶接機の短絡・アーク再生現象 (その1)” 昭和60年電気関係学会関西支部連合大会資料 G1-34 (1985)
- (6) 殖栗、田畑、岩田、水野、植田；“パルスアーク溶接機の短絡・アーク再生現象 (その2)” 昭和60年電気関係学会関西支部連合大会資料 G1-35 (1985)

第4章 CO₂ガス中のパルスアーク溶接

4.1 緒言

CO₂アーク溶接機は、一定速度で送給されるワイヤと母材間にCO₂ガスをシールドガスとしてアークを点弧し、母材およびワイヤの溶接、溶滴の母材への移行を行わせるものである。CO₂アークはアルゴンガス等実用に用いられる希ガスよりも電流密度が高いため、母材への溶け込みが深く、溶接結果の信頼性に富み、かつガス費も安価なため広く普及しているが、スパッタの発生が著しいのが最大の欠点であり、CO₂アーク溶接機のノンスパッタ化は溶接業界の長年の大きな課題であった。

CO₂アークにおいては、ワイヤ端に形成される溶滴に働くアーク電流による電磁ピンチ力が母材方向に働きにくく、溶滴が母材へ移行せず肥大化されやすい。従来のCO₂アーク溶接機では、アーク長を短く保持し、溶滴がさほど肥大化しないうちに母材の熔融池に短絡させて溶滴を接触移行させ、その際に流れる短絡電流に伴う電磁力によって接触部を収縮、分離させて、再度アークを発生させるという形態が採られていた。⁽¹⁾このように、原理的に、短絡からアーク再生に至る過程で、過大な短絡電流が流れるために生じるヒューズ作用により、熔融金属がスパッタとして飛散する。このスパッタの発生を緩和させるために、従来は短絡電流を制限することが行われるのみで、^{(2)・(3)・(4)}根本的な解決にはなっていない。

筆者らは、CO₂アーク溶接機のノンスパッタ化を目指し、従来当然と考えられていたワイヤと母材間の接触短絡を前提とせずに、ワイヤから母材への溶滴移行を実現するために、パルスアーク法の適用を試みた。松田らは、⁽⁵⁾矩形波状のパルス電流を周期的に繰返し、パルス電流によりワイヤ・母材間の短絡を伴わずに溶滴移行が可能であることを示しているが、実際問題としてのノンスパッタ化を実現する上での現象の再現性を含めた議論はなされていない。本章では、現象の再現性を含めてのパルス波形の適正化を図るための実験・検討結果をまとめる。⁽¹⁰⁾

4.2 実験方法

1) 溶接アーク現象の観測方法

本実験では、溶接アークおよび溶滴移行現象を観測するために、高速度ビデオ（KODAK社 SP-2000）を用い、溶接アークの背後からキセノンアークランプを照射して、シルエット写真を得た。コマ数は毎秒4000コマである。図4-1にその観測系を示す。走行台車の速度は800mm/minであり、ワイヤ送給速度は特に断らない限り7m/minである。また、ワイヤのチップと母材との間の距離は22mmである。

2) 電源系

用いた溶接電源は、インバータ制御によるパルス電源で、そのブロック図を図4-2に示す。検出した溶接電流の出力が目標電流波形に等しくなるように、インバータはパルス幅変調を受ける。目標電流波形の入力端には、任意波形発生器（WAVETEK社 MODEL75）の波形出力をパソコンの操作で導入させることができ、多種多様な波形を、再現良くアーク負荷に供給できるようにしている。なお、電流波形の概略図と波形パラメータを図4-3のように定義することとする。

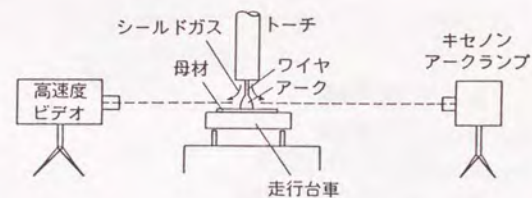


図4-1 溶接アーク現象の観測系

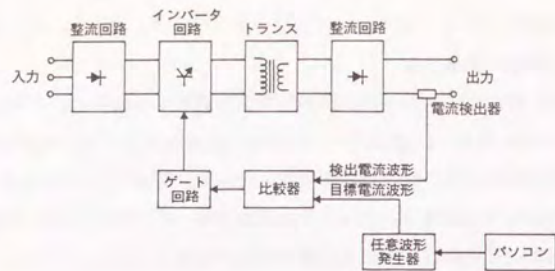
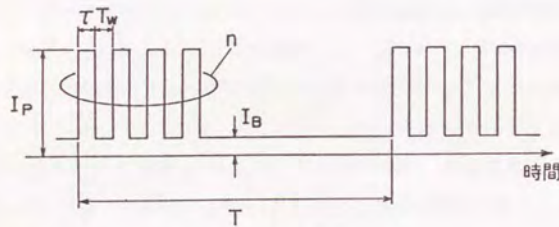


図4-2 電源ブロック図



I_P : ピーク電流値
 I_B : ベース電流値
 T : 小パルスのパルス幅
 T_w : 小パルスのパルス間隔
 $T (= 1/f)$: パルス群周期
 n : 小パルスのパルス個数

図4-3 電流波形と波形パラメータ

4.3 実験結果と考察

1) パルス電流に対する溶滴移行の追従性

ワイヤがアーク熱によって溶融し、溶滴となって母材へ落下、移行していく現象は繰り返し現象であり、これを制御、補償していくために、エネルギー供給源としての電流波形をパルス状の繰り返し波形とする。この繰り返しパルスの波形に対し、まずどこまで現象が追従していくかを見る。

図4-4にパルス群の周波数を変えたときの溶滴離脱から次の溶滴離脱までの平均周期（以下「平均離脱周期」と呼ぶ） T_f がどう変化するかを示す。用いたパルス電流波形は3種類で、図4-4中にその概略を示す。一つは単一パルスの繰り返しであり、他の二つは小パルスを一群としてそれを繰り返した波形で、小パルスのパルス幅が0.56ms、800Hzおよびパルス幅0.56ms、1kHzである。 I_P は500A、 I_B は50Aで、パルス周波数に依らず、パルスデューティは0.224一定である。なお、 T_f は溶滴移行の20回分について高速度ビデオを再生して離脱周期を求め、算術平均をとった。

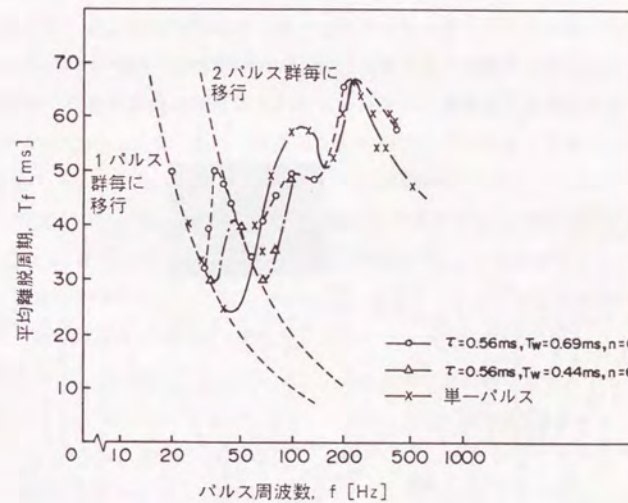


図4-4 離脱周期とパルス周波数との関係

$(I_P=500A, I_B=50A, 一周期当りの$
 $パルスデューティ=0.224)$

単一パルスの場合、約40Hz以下では、ワイヤからの溶滴の離脱はパルスの周波数に同期して発生しているが、50Hz以上では溶滴離脱がパルス周波数からずれ、ほぼ50~65msの周期で発生するようになる。なお、50Hzでは、アーク切れを伴い、一定アーク長を保つことができない。二重パルスの場合、30~40Hz以下では離脱はパルス群の1周期毎に発生し、30~60Hzではパルス群の2周期毎に発生し、それ以上では単一パルスの場合とほぼ同様にパルス周期からずれてしまう。

単一パルスの場合と二重パルスの場合とでは、ワイヤ先端の溶滴の挙動が異なる。図4-5にパルス群周期 $T=15\text{ms}$ のときの双方の場合の溶滴形状模式図を示す。単一パルスの場合、パルスピーク後半部以降、溶滴が横から上方に持ち上げられ、形状は球形から著しく外れて動きも激しくなっている。こうなると、溶滴上に形成されていたアーク点も動き、母材との間のアーク長が長くなり、維持電圧が電源電圧よりはるかに大きくなって、アークが消滅することもある。溶滴の動きが激しいときは、周期的なパルス電流の通電に対しても溶滴の形成、離脱の発生時刻も変動する。

二重パルスの場合、パルス群での溶滴の持ち上がり現象も少なく、図4-5(b)においては、離脱後第1回目のパルス群においてワイヤ端に溶融球が形成され、第2回目のパルス群の終了直後にそれが離脱している。二重パルスの場合、パルス群における溶滴形状の変動が少ないため、このような2パルス群につき1回の溶滴移行が、再現性良く

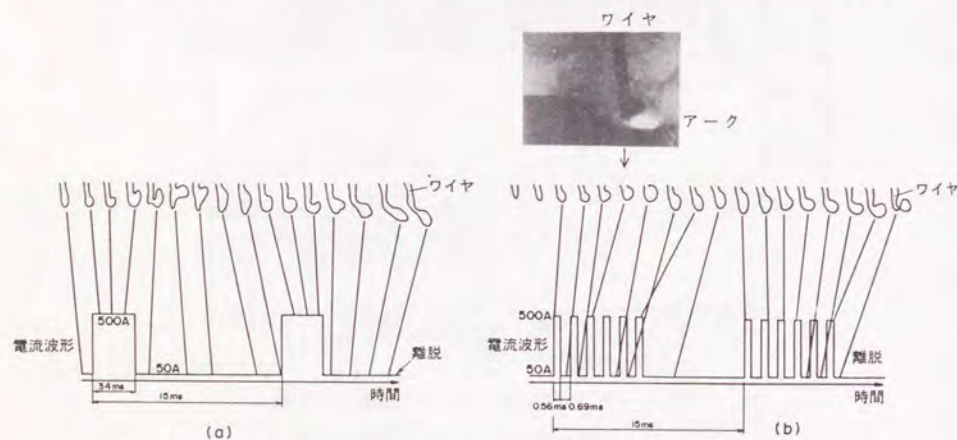


図4-5 溶滴移行状況図 (a) 単一パルスの場合, (b) 二重パルスの場合

実現される。シールドガスが CO_2 のみの場合は、 CO_2 ガス的高温での解離に伴う冷却作用が著しく、アーク柱が絞られやすく、図4-5の写真にもあるように、アークはワイヤ先端の溶滴全体を覆わず、アルゴンと CO_2 との混合ガスの場合ほど強い母材方向のピンチ力成分は働かないが、ワイヤ端のくびれ部に軸方向のピンチ力が働き、溶滴の離脱を行わせているように観測される。

図4-4において、単一パルスの場合に周波数40Hzまで二重パルス波形の場合と同様に、1パルス群につき1回の溶滴移行が行われるが、50Hz、60Hzにおいて、2パルス群につき1回の溶滴移行が生じないで、パルス周波数と溶滴の挙動の同期性がずれていく。これは、図4-5(a)に示したように単一パルスの場合に、パルスピーク期間で溶滴に上向き電磁力が長時間働くため、溶滴形状が変歪しやすく、形状が元に復帰するのに時間がかかるためと考えられる。

以上のように、パルスピーク部を短パルス幅に区切ることによって、 CO_2 溶接のアーク現象に顕著な溶滴の持ち上がり現象を大幅に緩和させることができ、溶滴移行現象がパルス電流と同期しやすくなり、溶滴移行現象がパルス波形によって制御しやすくなる。

2) パルス幅 τ が変化したときの離脱周期

図4-6に、パルス幅 τ が変化したときの離脱周期の変化を示す。(図中に示す%は、20回の溶滴移行のうち、2パルス群で1回の周期的な溶滴移行を起こす回数を%表示したものである。)パルス周波数 f は67Hz、 T_p は図中に示すが、0.38ms~0.44msである。電流平均値を一定に保つために、 τ と個数 n との積 $\tau \cdot n$ は一定に保っている。 τ が0.5ms付近で T_p は最小値30msとなり、かつ離脱周期のばらつきも少なく、2パルス群で1回ずつの離脱が発生していることがわかる。 τ がそれらより小または大のとき T_p は増加し、離脱周期のばらつきも大きくなる。

図4-7には、高速ビデオで撮影したワイヤ先端部の形状の変化のうち、図中に示したようなワイヤ先端のくびれ径の時間変化を示す。図4-7(a)に示されるように、 τ が小さいときには、離脱後最初のパルス群においては、くびれ径はワイヤ径に等しく、ワイヤ先端部が離脱に向かう力を十分に受けていない。逆に τ が大きいときには、パルス群の供給とともに、一旦くびれ径は小さくなるが、その後再び大きくなる。これは、アーク発生に伴う電磁力が τ の大きいときに上向きに溶滴を押し上げるために生じる。特に図4-7(e)の場合は、離脱後2パルス群目においてくびれは全く発生しておらず、溶滴が上向

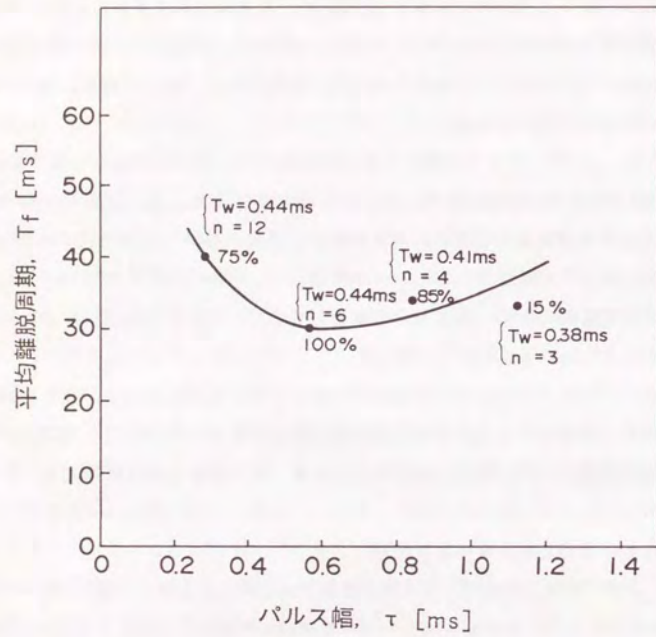


図4-6 離脱周期とパルス幅との関係
($I_p=500A, I_B=50A, f=67Hz$)

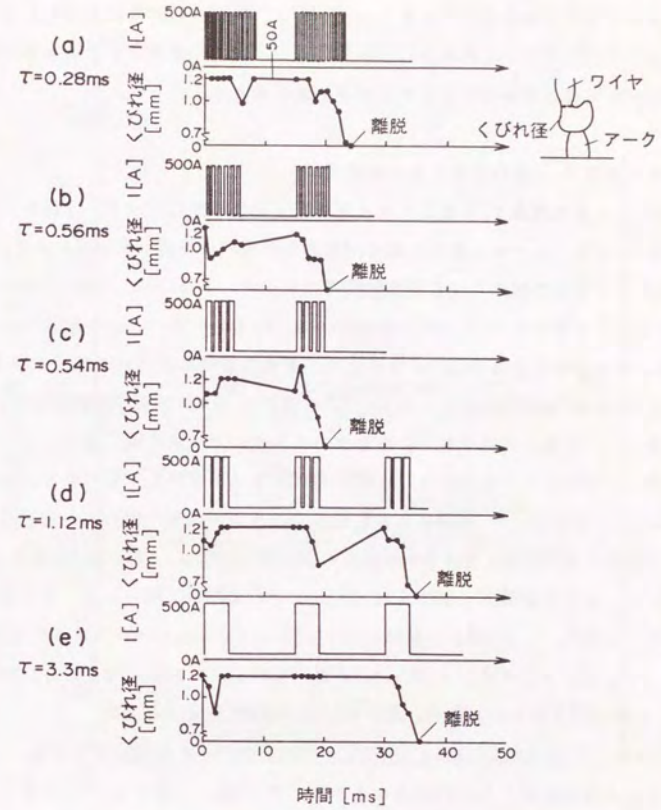


図4-7 溶滴のくびれ径の時間変化
(パルス幅を変化させた場合、 $T_w=0.44ms$)

きに持ち上げられていることを示している。なお、パルス幅が約1msを超えるようになると、アーク切れも生じるようになるが、これは、図4-5(a)の場合と同様に溶滴が横あるいは上方向に持ち上げられると、アークの極点が同時に横あるいは上方向に移動し、アーク柱が長くなり維持電圧が上がるからと考えられる。

3) パルス間隔 T_w が変化したときの離脱周期

図4-8に、パルス間隔 T_w が変化したときの離脱周期の変化を示す。(図中に示す%数は、図4-6と同様、2パルス群で1回の周期的な溶滴移行を起こす割合である。) また、図4-9には、ワイヤ先端のくびれ径の時間変化を示す。 f は67Hz、 τ は0.56ms、 n は1。が500Aのとき6個である。 I_p が、500Aのとき、 T_w が約0.2~0.7msの範囲で T_f は約30msであり、そのばらつきも少ない。すなわち、溶滴の離脱が2パルス群で1回ずつ行われている。 T_w が約0.2msより小さくなると T_f の値にばらつきが生じ、しかも T_w が小さい方が大きい。これは、パルス幅 τ の間にアーク電流によって溶滴に加えられる電磁力の影響が残る、溶滴の変形状況によって離脱周期が変化するからと思われる。また、 T_w が約0.7ms以上になると、 T_f は再び大きくなる。これは τ の間に加わった電磁力が T_w の間に緩和されると考えられ、図4-9の溶滴のくびれ径を見ても、(d)、(e)の場合には、各パルス群においてくびれ径が一旦細くなっても、パルス群終了時には再び太くなって離脱へ進展していない。(e)の場合の極端な例として、パルス群とパルス群の間隔が T_w に等しくなったとき、すなわち、 T_w が15ms/6個-0.56ms=1.94msになると、515Hz (1/1.94ms) の単一パルス波形となり、図4-4に示した特性と同一となる。

図4-8には、 I_p が410A、440A、465A、のときのデータも併せて示した。それぞれ n は9、8、7個である。 I_p が410Aのときは、 T_f が最小の値になる T_w の値は小さく、また T_f の値は全体として大きくなり溶滴の離脱もパルス発生と同期しにくくなる。 I_p が小さいほど溶滴に加えられる電磁力が弱いからと考えられる。

4) ピーク電流値 I_p が変化したときの離脱周期

図4-10に、パルス電流のピーク値 I_p と平均離脱周期 T_f との関係を示す。 f は67Hz、 τ は0.56ms、 T_w は0.44msであり、 I_p を増減させるのに伴い、平均電流値が160A一定となるように、小パルスの個数 n を増減させている。図4-10には比較のために単一パルスの場合の測定結果も併せて示している。図4-10において、 I_p が大きいほど T_f が小さく

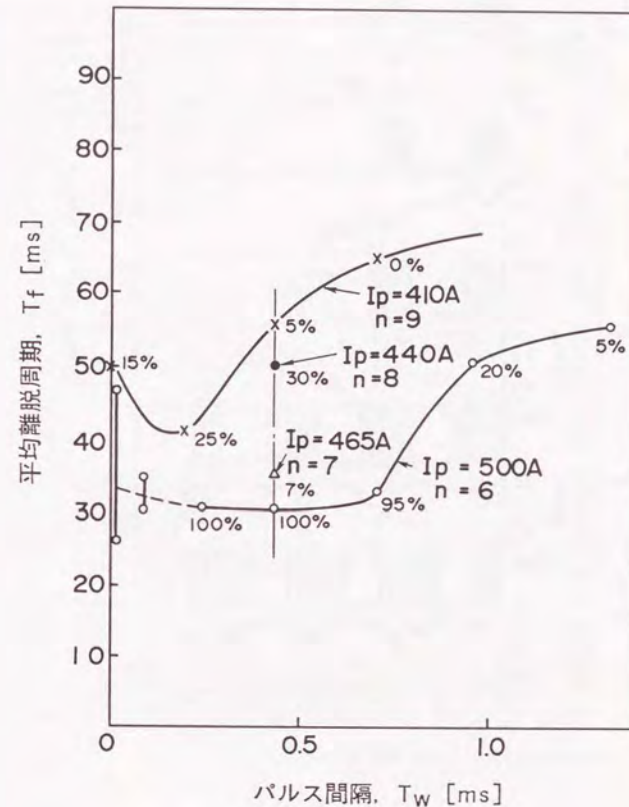


図4-8 離脱周期とパルス間隔との関係

($I_p=500A$, $I_B=50A$, $f=67Hz$, $\tau=0.56ms$)

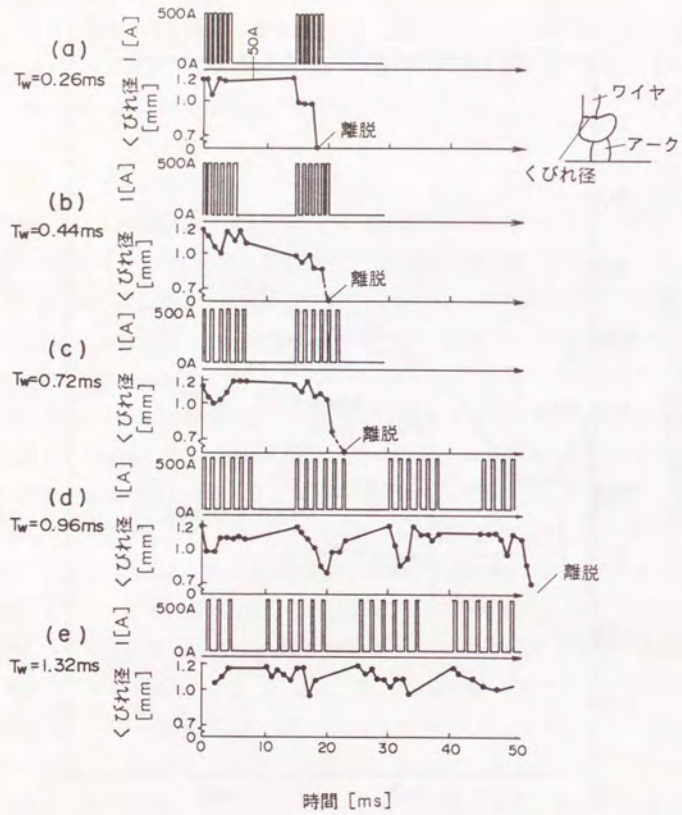


図4-9 溶滴のくびれ径の時間変化
(パルス間隔を変化させた場合、
 $\tau = 0.56\text{ms}$)

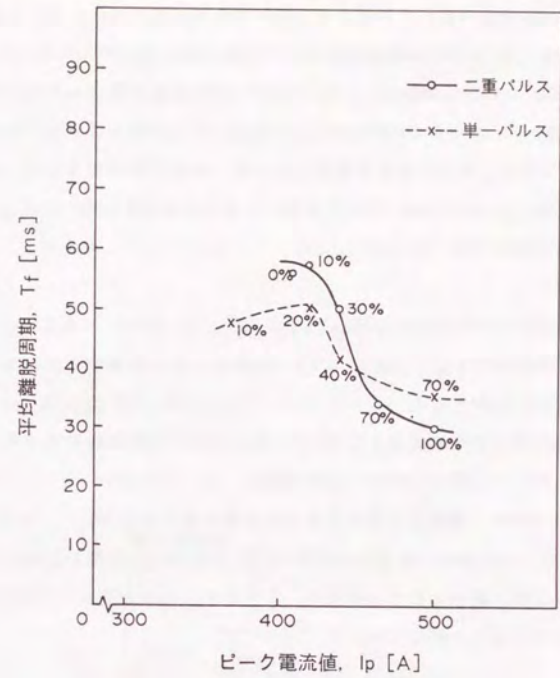


図4-10 離脱周期とピーク電流値との関係
($I_B = 50\text{A}$, $f = 67\text{Hz}$, $\tau = 0.56\text{ms}$, $T_w = 0.44\text{ms}$)

なり、パルス電流と同期して(ただし、この場合パルス群2周期に対して離脱が1回)離脱が生じる確率は I_p が大きいほど大きくなっている。これらは、パルス電流によって溶滴に働く、電流と直角方向の電磁力が大きいほど溶滴の離脱が生じやすいことを示している。また、単一パルスの場合には $I_p=500A$ でも T_f は二重パルスの場合より大きく、パルス電流と離脱とが同期する確率は小さい。松田ら⁽⁸⁾の報告は、単一パルスの現象についてのみ行われたが、 CO_2 アーク溶接において、パルス電流によって、より確実に溶滴移行現象を制御するためには、現象の再現性を含めた議論が必要であり、その点二重パルス波形の有効性は大きいものと言える。

以上の実験結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 二重パルス波形を用いることによって、 CO_2 アークに特有の溶滴の持ち上り現象を緩和させることができる。
- 2) 離脱周期は、ワイヤ送給速度 7 mm/min の場合、パルス周波数を広く変えても $25\sim 30\text{ms}$ 以上で、移行時の溶滴径は約 2 mm である。
- 3) 図4-7、図4-9から、溶滴量が多くなるパルス群2番目の方が、くびれ径は細くなる。 CO_2 パルスアークの場合、溶滴移行現象は「ワイヤ端での溶滴の形成」「形成された溶滴のくびれ進展、離脱」の2つの過程に大別され、溶滴離脱後のパルス群が1番目が前者に2番目が後者に対応する。

5) 溶滴移行現象のばらつきについて

溶滴移行現象は、上記のようなワイヤ送給速度 7 mm/min の場合を例にとっても、毎秒30回程度繰り返される。そのため、溶滴の形成、離脱過程の変動に伴う溶滴金属の飛散およびワイヤ、母材間の接触・短絡に伴う溶滴さらには母材の溶融部の飛散は、溶滴移行の10回に1回起こったとしても、スパック発生となって、溶接結果の良否を左右する要因となる。上記の実験結果を踏まえて溶接機の実用化を検討するに当たり、以下に CO_2 パルスアーク現象のばらつきの要因とその対策に関して記述する。 CO_2 パルスアーク現象は、ワイヤ先端に溶融球を形成し、二重パルス波形の注入によって、形成された溶融球を離脱させるものである。ばらつきの要因として、毎周期のパルス電流の発生直前における溶融球の形状、アーク長について考える。

(イ) パルス電流発生直前の溶融球の形状

パルス電流による電磁力を受ける際に、ワイヤ先端の溶融球の形状が異なると、同一パルス電流を注入しても離脱時刻が変動する。ワイヤ端に形成された溶融球の離脱には充分大きな電磁力が必要で、ピーク電流値の大きなパルスが必要と考えられるが、溶融球の形成過程では必ずしも大きなピーク電流値は必要でないと考えられる。前者を仮に「切断パルス」、後者を「溶融パルス」と呼ぶことにすると、4)までの議論では、両パルスともに同じ波形の場合であり、2パルス群で1回の離脱が生じるとき、離脱を伴うパルス群が切断パルス、伴わないのが溶融パルスに相当する。

溶滴離脱後の次の新しい周期の溶融球の形成過程を変化させるため、図4-11に示すように、4種類のパルス電流波形を用い溶融パルスの印加位相を変化させて離脱がパルス群に同期する割合を測定した。図4-12は、その測定結果を示す。全離脱回数は、各波形に対し、125回をサンプルした。図4-12の結果によれば、溶融パルスは切断パルス後に引き続いて発生させ、次のパルス群の開始の前に大電流パルスの

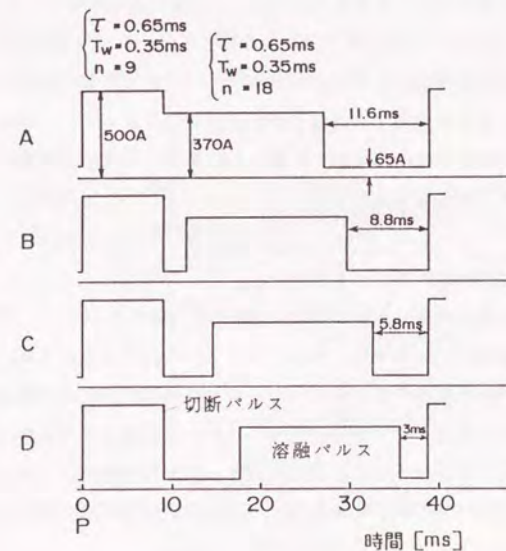


図4-11 パルス電流波形

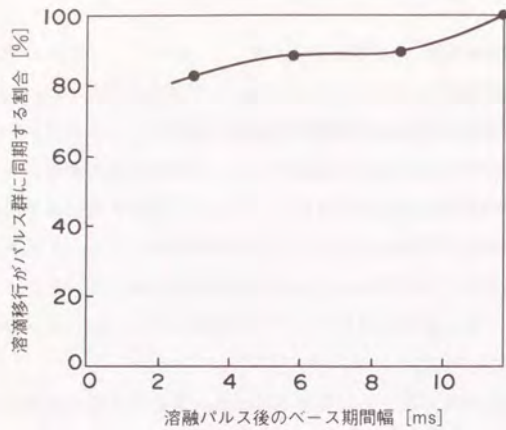


図4-1-2 融融パルスの印加位相の変化に伴う、溶滴離脱とパルス群との同期割合の変化

通電を休止させる時間が長いほど、溶滴移行とパルス群とが同期する。これは、図4-5(b)のパルス休止期間での溶滴形状を見ても分かるように、溶融パルス期間において生ずる溶融球形状の変動が、溶融パルス後のパルス休止期間に減衰し、形状が一様化されることを示している。

(ロ) パルス電流発生直前のアーク長

アーク長が短い場合は、ワイヤ端の溶融球の形状変動に伴い、母材溶融部とワイヤと接触短絡を起こしやすい。また、アーク長が長すぎる場合は、ワイヤ端の溶融球が上方に持ち上げられていることが多く、溶融球の形状の変動が緩和されていない。このため、切断パルス発生直前のアーク長を管理することが、離脱時刻のばらつきを抑えるのに重要となる。特にスパッタ発生抑制という観点から、ワイヤ・母材間の接触短絡を回避させるため、アーク長が所定の長さまで短くなったときに、次の周期のパルスを発生させる方法が考えられる。

アーク長の大きさを概略判断するためには、従来はアーク電圧そのものの値を用いていたが、アーク電圧はアーク長と電流との関数であるため、電流の影響を排除するため、以下のように電圧電流両検出値からアーク長にほぼ比例した電気信号を得る。

すなわち、アークの電流・電圧特性は、アーク長 l 、電流 I 、電圧 V とすると、アーク長に対し電圧が比例して変化するものとし、⁽⁹⁾ また、図4-13に示す電流・電圧特性例から、

$$V = A + B I + C I^2 \dots\dots\dots (4-1)$$

となる。ここで、 A 、 B 、 C は定数である。従って、測定した電圧波形から電流波形に比例した信号および定数 A を差引けば、アーク長に比例した電気信号が得られる。図4-14に、それを実現するアーク検出回路のブロック図とその出力信号例を示す。アーク電圧からアーク長の変化を求める場合にはアーク長に比例した電圧分が全体の電圧に比べて小さく、その精度が低いのに対し、図4-14に示した回路による方法は、検出出力のうち、電圧変化に伴う部分が多く、アーク長の変化を検出しやすい。図4-14に示した出力信号例と併せて示した電圧波形を比較すると、出力信号は小パルスのピーク部、ベース部の周期的変化に伴う電圧変化にほとんど影響されず、ワイヤからの溶滴の離脱時のアーク長の急上昇および短絡発生時のアーク長の急降下に対応して、明確な検出出力が得られている。これにより、従来アーク電圧波形のみでは判

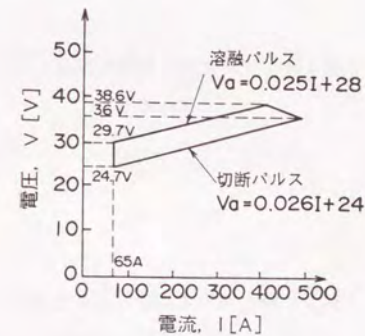
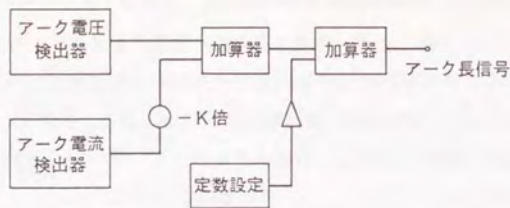
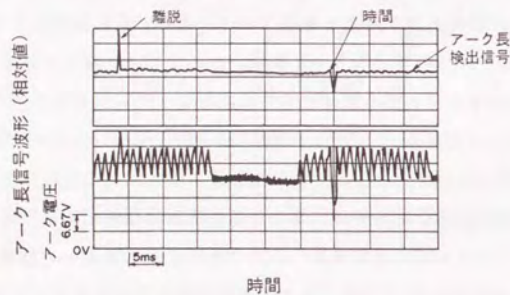


図4-1-3 CO₂アークの電流・電圧特性例



(a) アーク長検出回路ブロック図



(b) アーク長検出信号とアーク電圧波形

図4-14 アーク長検出回路ブロック図
と信号波形

別し難かったアーク長を、時々刻々求めることができる。切断パルス発生直前のアーク長を管理するためには、その前の溶滴の離脱終了後、溶融パルス期間においても電流・電圧波形から(4-1)式によりアーク長を求め、それが所定の値に近づくよう、溶融パルスのピーク値またはパルス幅を増減させる方法が有効と考えられる。

4. 4 結言

以上、種々の二重パルス電流波形を用いたCO₂アーク溶接現象を観察し、パルス電流と溶滴のワイヤ端からの離脱との同期関係を中心に議論した。

本章で明らかになった事柄を以下にまとめる。

- 1) 二重パルス波形を用いることによって、アーク電流の電磁力に起因する溶滴の肥大化を防止することができ、パルス電流と溶滴離脱とを同期させることができる。
- 2) ワイヤの溶融・移行過程は、まずワイヤ端に約2mm径の溶融球が形成され、その後、溶融球の形がくびれ、母材方向へ落下していく形態をとる。
- 3) 溶滴移行現象のばらつきを抑える手段として、パルス群発生直前に、低電流のベース部を設けて溶滴形状の変動を抑えること、および、電流・電圧の実測波形に基づき時々刻々のアーク長を検出する方法により、溶滴の形成過程での電流を補正し、アーク長を補正、制御することが有効である。
- 4) 以上のことから、CO₂ガス中でも、電流密度が高いために生じる母材と反対方向への電磁力を二重パルスによって緩和させれば、母材との接触短絡なしで溶滴移行を行わせることができることがわかった。これは、CO₂ノンスパッタ溶接機の実現に大きく前進したことを示したものである。

参考文献

- 1) 徳永、天野：「高周波スイッチング技術の産業応用VI、溶接装置への応用」、電学誌、第107巻7号、P.659 (1987)
- 2) 山本：「インバータ制御によるアーク溶接機の進歩と自動化への適応」、溶接学会誌、第58巻4号、P.272 (1989)
- 3) 安藤、長谷川：「溶接アーク現象（増補版）」産報出版、P.281 (1967)
- 4) 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」、神戸製鋼技報、第35巻3号、P.22 (1985)
- 5) H. Yamamoto, et.al.: "The Effect Of Short Circuiting Control on the Reduction of Spatter Generation in CO_2 Arc Welding", IIW Doc.212-649-1986 (1986)
- 6) 殖栗、原、田畑、小村：「 CO_2 アーク溶接におけるスパッタの発生現象と電流制御について」、第72回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料、No.83-538 (1983)
- 7) 松縄、山本、平本：「パルスアーク溶接法」、溶接学会誌、第53巻6号、P.284 (1984)
- 8) 松田、牛尾、糸永、横尾：「GMAおよび CO_2 パルス溶接の溶滴移行現象の観察」、第73回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料、No.83-549 (1983)
- 9) 安藤、長谷川：「溶接アーク現象（増補版）」産報出版、P.99 (1967)
- 10) 殖栗、田畑、水野、植田：「二重パルス波形を用いた CO_2 アーク溶接」電気学会論文誌A、vol.110, No.5, P.309 (1990)

第5章 ノンスパッタアーク溶接機の実用化

5.1 緒言

これまでの議論の中で、ワイヤを溶融しかつ母材へ接触短絡なく溶滴移行を実現するためのパルス電流波形について、アーク長の長短およびシールドガスの種類を変えたときの諸特性を明らかにし、パルス電流波形による溶滴移行の安定化の実現の可能性を検討してきた。本章では、それらの検討結果に基づき、ノンスパッタアーク溶接機の実用化について述べる。すなわち5.2では第2章の検討結果に基づいて開発されたトランジスタ式パルスマグ溶接機（商品名“クリーンマグ”）について^{(7)・(8)・(9)}、5.3では第3章の検討結果に基づいて開発されたインバータ式パルスマグ溶接機⁽¹⁰⁾について述べる。さらに、タングステン電極と母材間でアークを点弧させるTIG溶接においての高速化、安定化を実現させた、トランジスタ式ホットワイヤTIG溶接機について、その原理と制御法、特徴について論じる⁽⁶⁾。これらの溶接機群は、“ノンスパッタシリーズ”として当社が業界に先駆けて開発したものであり、進展の目覚ましいパワートランジスタを用いた電流波形制御型の電源から成るもので、溶接アーク現象の補正と安定領域確保を飛躍的に可能にした。これらの電源は、今まで自動化が遅れていた溶接工程の生産性を上げ、効率を高めるのに寄与している。

5.2 トランジスタ式パルスマグ溶接機

1) 開発の背景

溶接の自動化、高能率化の流れの中で、特にシールドガスを CO_2 ガスとした CO_2 アーク溶接法はガス費が安いこともあり、自動溶接機の中でもその使用台数は最も多くなっている。しかし、 CO_2 アーク溶接機は、原理上ワイヤと母材間の接触短絡を伴うことから、著しくスパッタを発生するという大きな欠点がある。本章における“ノンスパッタ溶接機”の開発は、このような、従来の CO_2 アーク溶接機の問題点を解決するためになされたものである。その中で、本節に述べるパルスアーク溶接機は、従来、高級金属であるアルミヤステンレスの溶接機のみにごく限られた分野に適用されていたパルスアークを、市場の大きな軟鋼対象に普及させることを目的に開発された。シールドガスは、従来のアルゴンガスなどの希ガスではなく、アルゴンと CO_2 ガスの混合ガスを用いる。

2) 原理

ワイヤと母材との接触短絡がないように、ワイヤを溶融、移行させるために、電流波形をパルス状とし、図2-5の(Ⅲ)の領域に設定する。このような領域になるときのパルス周波数の最大値に近く、すなわち(Ⅲ)と(Ⅱ)との境界近くの波形に選定する。

溶接機の設定条件としては次の3つがある。

- ① 溶接の対象となる母材の板厚、溶接姿勢などから決まる溶接電流値、これは、消耗電極式溶接機においては、溶接電流値とともに、ワイヤの溶融速度が増減するから、ワイヤ送給速度を変化させることになる。
- ② アーク電圧、これは、アークの長さにはほぼ対応し、溶接継手の種類溶接の姿勢によって変化させる。
- ③ さらに、溶接電源のもつべき特性として、トーチ角度、姿勢等によって、チップからアーク端までのワイヤの突出し長が変化するが、それに対して、アーク特性が安定に動作する必要がある。

本パルス溶接機“クリーンマグ”は、上記の溶接条件の変更に対しても、常にワイヤの溶融、溶滴移行とパルス電流の周波数が同期し、1パルスに対して1回の溶滴移行が規則正しく実現するように、下記の対処を施している。

- ① ワイヤ送給速度に対応して、パルス幅はほぼ固定でパルス周波数をほぼ比例するように変化させている。ワイヤ送給速度を変化させたときの、溶滴移行とパルス電流の周期が同期する最大周波数と、そのときのパルス当りの平均溶滴移行量を図5-1に示す。ワイヤ送給速度に対するパルス幅の設定は、図5-1の特性を基に行うことができる。図5-1において、ワイヤ送給速度を上昇させると、1パルス当りの平均溶滴移行量が少なくなるのは、パルス電流同士の休止期間が、パルス周波数が増えるのに伴って狭くなり、各パルスの溶滴離脱後は、ワイヤ先端の溶融部が半球状にもどり切るまでに次の周期のパルス電流が供給されることになり、ワイヤ端の溶融部の形状が、図2-8の直流電流に対する溶滴移行の形状と類似してくるからと考えられる。
 - ② 突出し長が変化すると、突出し部分でのジュール加熱量が変化してアーク長が変化し、アーク電圧が変化する。この電圧変化をモニタして、電圧の平均レベルが所定の値に等しくなるように、パルス周波数は固定で、パルス幅を変化させている。
- さらに、アーク電圧を用途に応じ設定するために、上記の所定値を変化できるよ

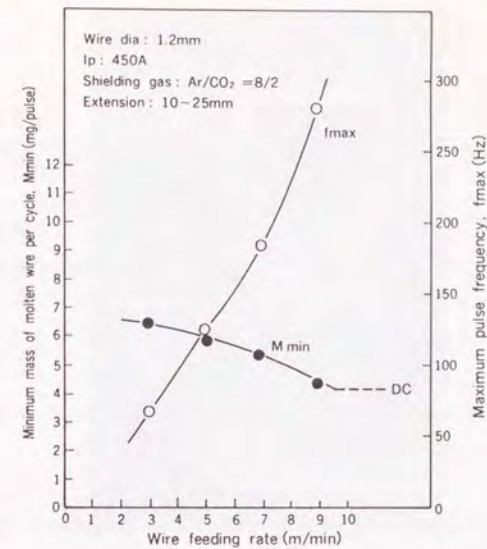


図5-1 1パルス1溶滴移行を満たす最大パルス周波数と最小溶滴移行量

うにしている。なお、ワイヤ送給速度が変化すると溶接電流が変化しそれに応じ、溶接母材との間のアーク長を選ぶ必要があるため、ワイヤ送給速度と同期して、基準のアーク長に相当するアーク電圧を設定している。

3) 構成

装置は図5-2のように、1)溶接電源、2)ワイヤ送給装置、3)溶接トーチ、4)付属品で構成している。図5-3は溶接電源の主回路部の結線を示すもので、3相全波整流により純直流電源を得、 I_p の経路にて、溶接電流値には無関係でワイヤ径により異なる一定のベース電流値を供給する。一方、 I_p の経路にて、ワイヤ送給量に比例した出力周波数で、そのピーク電流値はワイヤ径により異なるパルス電流値を供給している。いずれのトランジスタもスイッチング制御で流れる電流を一定値に制御し、直流リアクトルによりアークの安定化を図っている。この方式により3相平衡負荷状態にて溶接を稼働することができ、契約電力料も従来のサイリスタ電源の約60%に低減することができた。



図5-2 "クリーンマグ"溶接機の外観

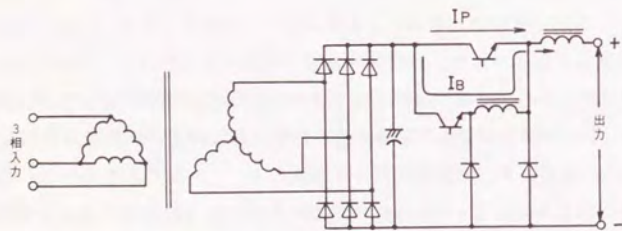


図5-3 パルス電源の主回路構成図

4) パルス制御方式

図5-4は溶接電源の制御方式をブロック線図で示すもので、その機能は大きく3区に分ける。

① パルス周波数

図中Aで囲まれた機能部で、ワイヤ送給量とパルス周波数の関係を作り出している。関数発生器“A”は表5-1に示したワイヤ送給量とパルス周波数の関係を、実験を通して一部修正し、ワイヤ材質径別に、約30~250Hzの範囲で調整できるように設定されている。また、ワイヤ送給装置を取換えた場合でも、ワイヤ送給量とパルス周波数の適正な関係が崩れるのを避けるため、ワイヤ送給装置に調整器を設け、基準電圧に対する回転数が、どのワイヤ送給装置でも同一値となるよう設定している。

② パルス幅

図中Bで囲まれた機能部で、1パルス当たりの適正入熱量を制御している。関数発生器“B”はアーク電圧とワイヤ送給速度の関係を、ワイヤ材質、径別にパルス幅を設定している。実作業においては電源電圧の変動、運棒時の突出長の変動などにより溶

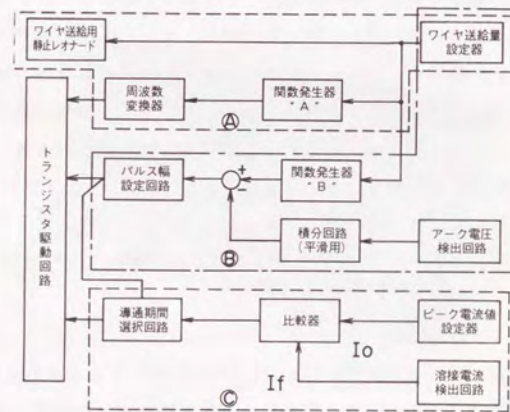


図5-4 制御回路ブロック図

表 5-1 各種条件におけるパルス波形状

ワイヤ材質, 径, シールドガスの種類	IP (A)
軟鋼, Q9mmφ, Ar/CO ₂ = 8/2	350
軟鋼, 1.2mmφ, Ar/CO ₂ = 8/2	450
軟鋼, 1.6mmφ, Ar/CO ₂ = 8/2	550

滴へ与えられる入熱量が変化するため、本回路ではアーク電圧を帰還し、関数発生器“B”の出力と突合わせ、パルス幅を制御することにより、1パルス当たりの溶滴への入熱量を一定に維持する方法をとっている。

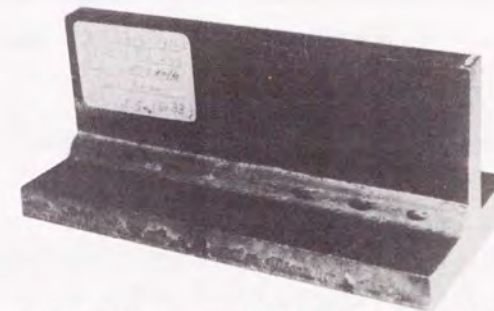
③ パルスピーク電流

図中Cで囲まれた機能部で、パルス電流のピーク電流値をワイヤ材質、径別に一定の値に維持する働きをする。比較器はピーク電流値設定回路からの信号(I_o)と溶接電流検出回路からの信号(I_f)とを比較し、I_o < I_fの場合には出力段トランジスタへOFFの指令を、(I_o - ΔI_o) ≥ I_fの場合には出力段トランジスタへ出力してピーク電流値を一定に維持している。ここで、I_oは前項で述べた臨界電流値以上であれば、大きい値をとるほど溶滴の離脱に有利に作用するが、あまり大きすぎると、熔融金属を吹き飛ばすため、実験を通して、表5-1に示すピーク電流値に設定している。またΔI_oは小さい値となるほど溶接性の面では改善されるようであるが、機器の経済性の面より50~100A程度となるよう、比較器により設定されている。

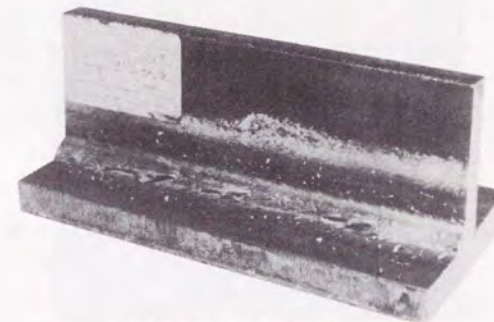
5) 溶接施工例

溶滴の移行形態はシールドガス中のCO₂ガス混合比に大きく左右されるが、《クリーンマグ》溶接機で使用するシールドガスは、市販の混合ガスが使用できるようになっている。軟鋼では5~20%CO₂入りアルゴンガスを使用する。図5-5は板厚12mmでの溶接ビード形状及びスパッタ付着状況をしめたものである。CO₂溶接機ではビード表面が

荒く、スパッタ数多く付着しているのに対し、《クリーンマグ》溶接機ではビード表面が平滑でスパッタもほとんど付着していない。図5-6は実際の製品に《クリーンマグ》溶接機を適用した場合のスパッタの飛散状況をCO₂溶接機と比較して示す写真である。スパッタの発生が激減していることが良くわかる。図5-7はアングル材のすみ肉溶接の例であるが、従来のパルスマグ溶接機では溶接姿勢(例示写真では立向下進溶接から水平すみ肉溶接への変化)が変わると突出長の変化をともなって溶滴移行形態が変わり、アーク長の伸び、もしくはワイヤの突込みなどを発生していたが、《クリーンマグ》溶接機では安定に溶接を行うことができる。



(a) 《クリーンマグ》溶接機(250A, 26V)



(b) CO₂溶接機(250A, 30V)

図5-5 水平すみ肉溶接(板厚12mm)



〈クリーンマグ〉溶接機



CO₂溶接機

図5-6 製品に適用したときのスパッタ飛散状況



図5-7 アングル材の溶接施工例

5.3 インバータ式パルスマグ溶接機

1) スパッタ抑制の考え方

第3章に述べたような、短絡を伴うパルスアーク現象の観測結果に基づき、短絡に伴うスパッタの発生を抑えるためには、短絡時の電流を小さくし、しかも溶滴離脱後のワイヤ先端の熔融金属の残存量を少なく保つことが必要となる。そのためには、基本的考え方として、溶滴移行の際には短絡がないようにするか、短絡を伴う場合はその短絡がベース期間内で開始、終了となるように電流波形を設定するのが良い。以上の考え方をより確実に実現するための電源回路方式、外乱防止対策を以下に検討する。

2) 電源回路方式

短絡がベース期間内に生じるようにするためには、短絡現象すなわち短絡開始および終了時刻にある程度のばらつきが発生するのを考慮し、同一周波数でもベース期間を長くとることが望ましい。パルス電流波形は、ピーク期間、ベース期間の繰り返してであるが、パルスの立上り、立下り時間も現実的には無視できない。特にパルスの立下り部分においては、くびれを形成した溶滴が、ワイヤ先端から正に離脱しようとする期間であり、立下り時間が長くなると、溶滴と熔融池との間の短絡が、まだ小電流のベース値に低下しきらないパルス立下り部分で発生することが多くなっている。このため、パルス電流の立下り時間はできる限り短くすることが望ましい。パルス電流の立下り時間は、アーク抵抗と回路のインダクタンス値によって定まり、人為的にはインダクタンス値を小さくする外ない。回路のインダクタンス値は、ケーブルのインダクタンスと電流に内蔵されるリアクトルのインダクタンス値とから成る。電流に内蔵されるリアクトルを省略し、かつ所定の電流を維持するためには、高周波インバータを用いることがほぼ必然となる。インバータ制御による電流波形は図3-3に示したが、トランス二次側の制御周波数が32kHz、リアクトル値はケーブルのインダクタンス分約20 μ Hであり、立下り時間は約0.2msと短い。従来のチョッパ式電源の場合、図3-12にワイヤ送給速度7m/min、アーク電圧22Vのときの電圧、電流波形例を示したが、トランジスタのスイッチング損失を少なくするため、オンオフ周波数は通常約2kHzで、内蔵のリアクトルの値は約100 μ Hと大きいので、立下り時間は約2msにもなる。そのため、図3-12にも示されるように、チョッパ式の場合、ピーク電流期間を十分得るためには、パルス周波数をあまり上げられないことも手伝って、ピーク期間および立下り部分の短絡が非常に顕著に見られる。

3) 外乱補償に関する一考察

図3-11に示されるように、溶滴移行現象にはばらつきが伴い、短絡時間が長くなって次の周期のパルスの立上り部分にずれ込む場合もある。3.3にも述べたように、アーク発生は、できる限り小電流のベース期間内で発生させるのが望ましい。したがって、短絡時間が何らかの変動によって長くなったとき、アーク再生時点まで次のパルスの立上り動作を遅らせ、その後はまた周期的にパルスが発生させると、アーク再生時に電流が大きくなることも未然に防止できるので、スパッタの発生を抑えられるものと考えられる。実用的には、短絡があまりにも長く続き過ぎるとワイヤが溶融池に突込むため、アーク再生を待つ時間幅には最大許容値を持たせる。

4) 溶接結果

高速溶接時のスパッタ発生量の実測値を図5-8に示す。溶接長250mmの垂直下向きのビードオンプレート溶接を縦230mm、横400mm、高さ270mmの銅製容器内(上面に100mm×300mmの孔あり)で3~4回実施し、ノズルに付着した分を除き、飛散スパッタを捕集した結果である。図中には、3)に述べた補償のある場合を「with control of current rise-up」として合わせて示した。スパッタ発生量は250Hz以上で急激に増加する。周波数が低いときは、パルスピーク期間、立下り部分での短絡が多く、外見上、スパッタの飛散速度も速いが、量的には、あまり増加しない。

周波数が高いときは、図3-5、図3-6に示した現象が多く発生するため、スパッタ量も増加する。周波数が低いときは、平均的にパルス幅が長く、ワイヤ端の溶融金属にもくびれが生じやすく、スパッタ量としてはTypeBのものが効くであろう。

外乱補償の効果は全周波数に対して見られるが、3)に示した狙い通り、周波数の高い場合に顕著である。なお、図5-8に、チョッパ式電源を用いた場合の値も示した。測定点は1パルス1溶滴移行を行わせる最大周波数近傍であり、インバータ式の230~250Hzの場合と条件が似ているが、立下り部分の短絡の影響により、チョッパ式の場合のスパッタ量が多くなっていると思われる。

以上のように、パルス電流によってその周期に同期してワイヤを溶融、移行させ、かつ電源回路方式として、インバータによる高速波形制御によって直流リアクトルを省き、特にパルス電流の立下り部分で発生するワイヤと母材間の短絡時に流れる電流を小さくすることにより、アーク長を短くして高速溶接を行う場合にも、従来のチョッパ式電源の場合よりスパッタ発生量を減らすことができる。

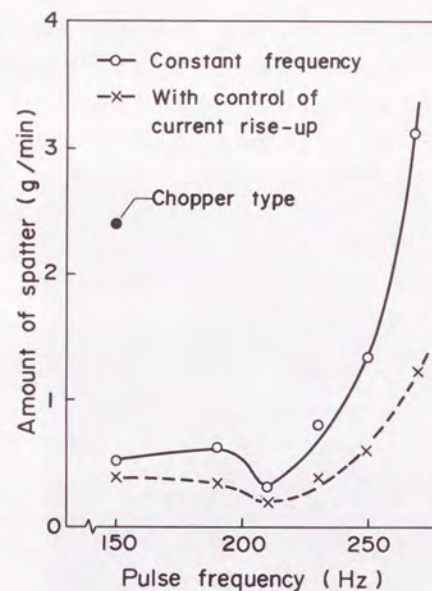


図5-8 スパッタ発生量

図5-9は、インバータ式パルスマグ溶接機の外観を示す。高周波インバータが採用されているため、トランスを小さくすることができ、それに伴って電源全体の大きさ、重量が、図5-2に示したチョッパ式電源に比べて約1/3になっている。



図5-9 インバータ式パルスマグ溶接機の外観

5.4 ホットワイヤTIG溶接機

1) 意義

TIG溶接法は、上述のような溶接ワイヤをそのまま電極とするような、消耗電極式溶接法と異なり、アークが途切れず、スパッタが発生しないという基本的な特徴をもつ。しかし、溶接速度が遅く、またトーチ・母材間距離の変動が直接アーク長の変動を起すため、施工時にアーク長の一定保持のために高度の技量が必要であるという欠点があり、現状では適用分野に制限がある。最近の溶接工程の自動化の流れの中で、TIG溶接の高速化、安定化が要求されているが、特に高速化の一つの手段としてフィラーワイヤを通電加熱してワイヤ溶着量を増加させるホットワイヤTIG溶接法がある。^{(1)・(2)}ただ、従来の方法では、TIGアーク用電源、ワイヤ加熱用電源の2つの電源を個別に調整しており、その調整パラメータの増加および装置の大型化を来し適用範囲の拡大効果は充分ではない。

筆者らは、TIG溶接法の高速化と安定溶接条件の拡大を図ることを目的として、母材への入熱およびワイヤの溶着量の適正組合せ条件を明らかにし、かつ、ワイヤ加熱部分の電圧降下をモニターしてワイヤ加熱電流を調整制御することによる安定化実現のための電源制御方法を提示する。⁽³⁾

2) 溶接ビード形状の安定化

フィラーワイヤを通電加熱すればワイヤ溶融量が増加することは当然であるが、ただ単なるワイヤ溶融量の増大だけで溶接速度の向上を図ることはできない。それはあくまでも健全なビードが形成されて初めて考えられるもので、ワイヤ溶融量の増大とともに、それに見合った母材表面への入熱量を確保する必要がある。そこで、溶接電流とワイヤ送給量との組み合わせ変化に応じてビード形状がどう変化するかを把握するために、板厚、溶接速度も変化させて実験・観測した。

a. 実験方法

図5-10は実験装置を示す図である。TIGトーチの後方から、母材表面と約60°の角度をなし、ワイヤを通電加熱しながらモータで低速送給してアーク後部へ挿入する。この場合、ワイヤと母材との間にアークを発生させると、そのアーク熱もワイヤおよび母材の溶融に利用できるが、ワイヤから母材への溶滴移行時にスパッタが発生することが多く、TIG溶接本来の品質の良さを損なう。また、ワイヤをアークの前方に

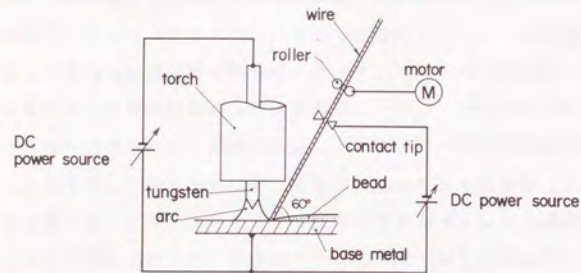


図5-10 ホットワイヤTIG溶接のブロック図

挿入すると、特にワイヤ溶融量が多くなった場合、母材上に堆積した溶融ワイヤの上部にアークが発生するため、母材表面にアークの陽極部が直接到達することなく、母材と溶融ワイヤの境界面が充分溶融せず、融合不良が発生しやすい。以上のことを考慮して、ワイヤはアークの後方へ、常に母材と接触して溶融、移行するように挿入した。

使用した母材は軟鋼(S.P.C.C)、ワイヤは直径1.2mmの軟鋼用ワイヤ(Y.C.W-2)で、ワイヤ加熱長さは、70mm、ワイヤ加熱用の電流は定電圧電源から供給し、その電流の大きさは、ワイヤ未溶融部が母材に突き当たることも、またワイヤが母材から離れることもなく、ちょうど溶融状態となって母材に接触するように調整する。タングステン電極の直径は3.2mm、電極先端部は中心軸を含む断面内の角度が約60°となるように削っており、電極先端から母材表面までの距離は3.2mmである。なお、母材を支持する際には、ビードの裏側には接触するものがないようにした。シールドガスはアルゴンである。

b. 実験結果と考察

板厚、溶接電流、溶接速度、ワイヤ送給速度の組合わせに対して、種々のビード形状が得られる。図5-11は、板厚3.2mm、溶接電流300Aのとき、また図5-12は、板厚1.6mm、溶接電流200Aのときのビード形状を分類、表示したものであり、縦軸はワイヤ

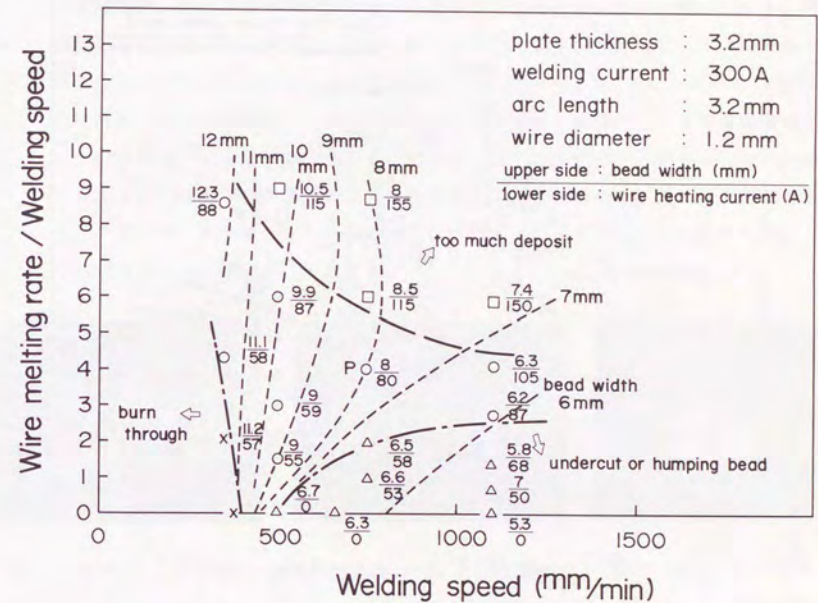


図5-11 ビード形状の分類

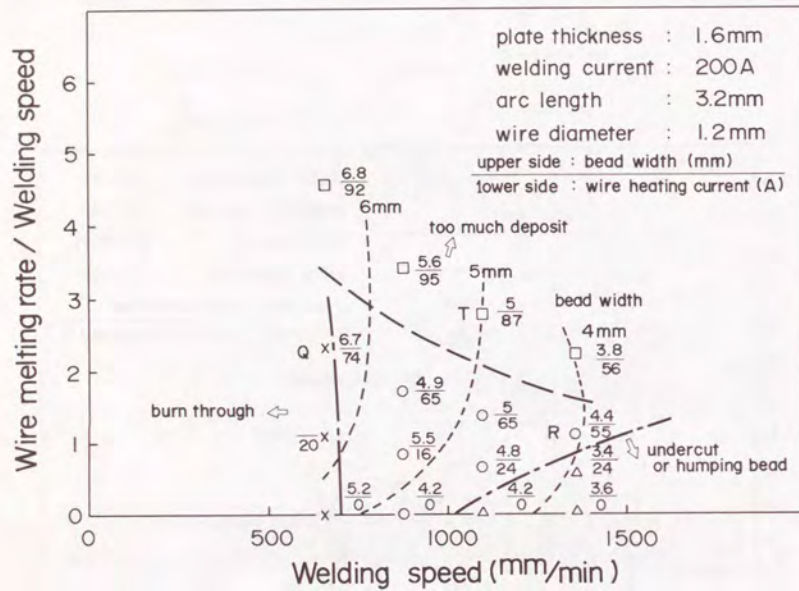


図5-12 ビード形状の分類

送給速度を溶接速度で除した値で、平均的な余盛断面積を示す。図中の各測定点に添字でビード幅(mm)、ワイヤ加熱電流(A)を示す。各測定ポイントのうち、(x)は溶け落ちなど母材への入熱が過多の場合、(△)はアンダーカットまたはハンピングビード、(○)は適正ビード、(□)は余盛が多くビード端部において、熔融金属と母材との溶触角が大きい状態を示す。(○)と(□)との判別基準はやや定性的であり、ここでは一つの目安を与えているに過ぎない。図5-13は、図5-12中、Q、R、Tの各測定ポイントにおけるビード断面形状を示す。

溶接電流、溶接速度が一定の場合、余盛が多くなるに従いビード幅が拡がり、溶け落ちあるいはアンダーカットなどの欠陥ビードとならない健全なビードが広い範囲で得られる。たとえば、図5-11で溶接速度が750mm/min(12.5mm/s)のとき、余盛が少ないときにはアンダーカットまたはハンピングビードとなるが、ワイヤ送給速度を3m/min(50mm/s)として余盛を多くすると(図5-11中P点)、健全なビードが得られる。しかしながら、余盛量をさらに増加させていくと、ビード幅はほとんど変化せず、余盛を増した分だけビード高さが増していき、ビード両側での接触角が増大し、いわゆるなじみの悪いビードとなる。



Q : $v_w = 1.5 \text{ m/min}$ R : $v_w = 1.5 \text{ m/min}$ T : $v_w = 3 \text{ m/min}$
 $v = 662 \text{ mm/min}$ $v = 1360 \text{ mm/min}$ $v = 1100 \text{ mm/min}$

v_w : wire melting rate
 v : welding speed
 plate thickness : 1.6mm
 welding current : 200A

図5-13 ビードの断面

このように、溶融ワイヤの添加による高速溶接ビードの安定化という点では、ワイヤ送給速度を増加させたときにビード幅が順次拡大していく領域において、その効果が著しいことになる。図5-11、図5-12において(○)を付した点ではビード幅一定の点線が右上りに傾き、(□)を付した点ではその点線が除々に縦軸に平行となっており、(○)を付した点でビード安定化の効果が大きいことがわかる。

他の板厚、溶接電流の組合わせに対しても、上記と同様な適正ビード領域を与えることができる。図5-14、図5-15、図5-16は、それぞれ板厚が3.2mm、1.6mm、1.2mmのときの適正ビード領域を、溶接電流をパラメータとして示したものである。溶接電流が小さくなるほど、適正ビード領域が左下方向へ移動していく。溶接電流が小さくなると、溶接速度が遅くても溶け落ちは生じにくくなるので適正領域は左へ移動し、また溶接速度の速い場合には、溶接電流が小さいほどアーク力および母材表面でのアークの加熱面積が狭くなり、アンダーカット、ハンピングビードは生じにくくなるため、適正領域は下方へも移動するものと考えられる。

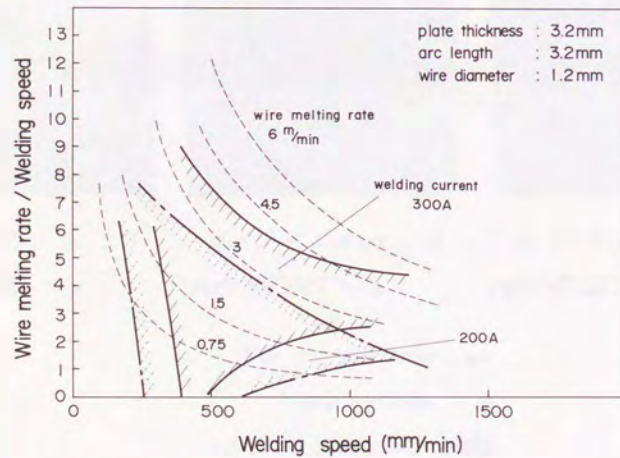


図5-14 安定なビードが得られる範囲(板厚3.2mm)

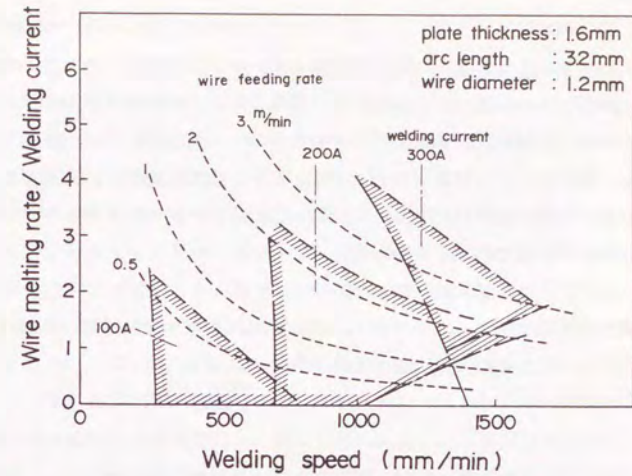


図5-15 安定なビードが得られる範囲(板厚1.6mm)

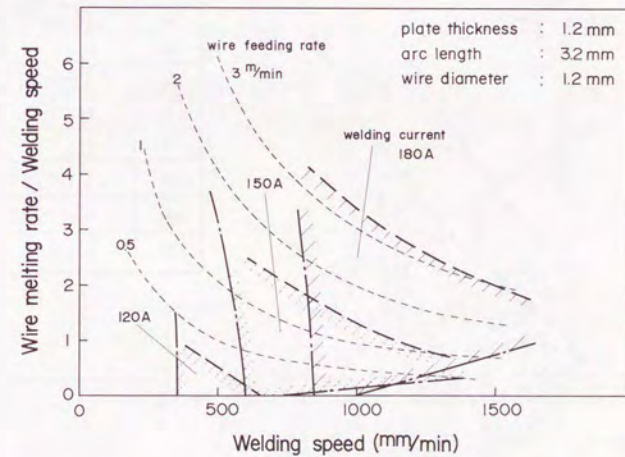


図5-16 安定なビードが得られる範囲(板厚1.2mm)

図5-11、図5-12に示した(○)と(□)の領域の境界についての今一つの考え方を示す。両図に示すようなワイヤ通電加熱方式のビード形成現象は、アーク熱で溶融した母材上に溶融ワイヤを置いていったときの現象に近い。溶融金属が表面張力と重力とによって母材上に置かれて静止している場合のビード釣り合い形状の理論⁽²⁾と比較するために、適正ビードと判断したデータを、ビード幅と余盛部分の断面積Sとの関係で表現し直したのが図5-17である。この図から、適正と判断したビードは、母材表面との接触角 θ で表現すれば、

$$\theta < 30^\circ \sim 40^\circ$$

の条件を満たすものであることがわかる。逆に言えば、 $\theta = 30^\circ \sim 40^\circ$ を図5-11、図5-12の(○)、(□)との境界とほぼ定義したことになる。

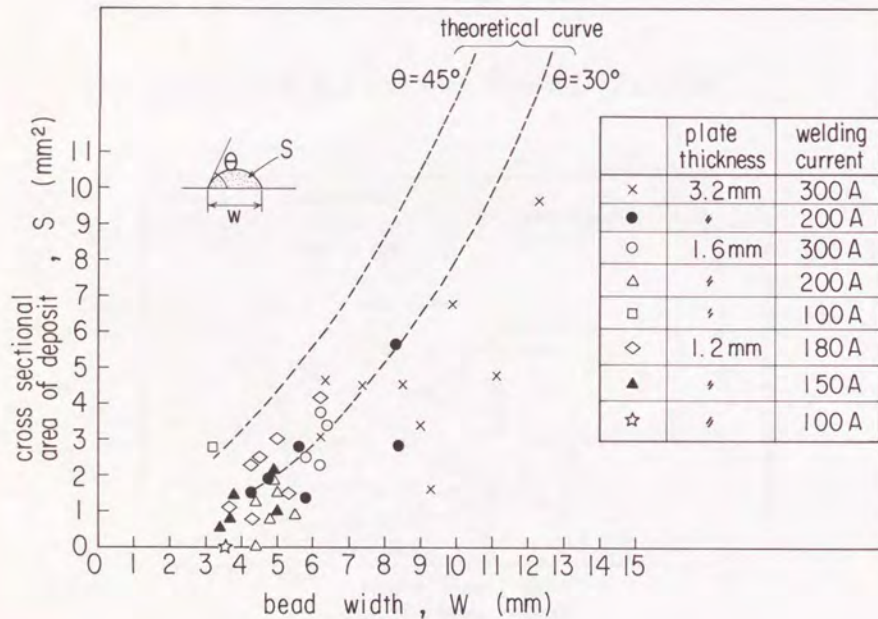


図5-17 ビード形状の計算値と測定値との比較

3) 溶接パラメータの適正制御

筆者らは、ビードオンプレートという単純な母材条件であるが、以上のような実験で求められた適正ビード形状の得られる溶接条件を溶接パラメータ間の標準条件と考え、特に、溶接電流を変化させた場合のパラメータの適正制御方法について以下に検討する。

a. 溶接電流とワイヤ送給速度との関係

母材への入熱量とワイヤ溶融量とを適正に与えて、溶け落ちやアンダーカットなどのない安定なビード形状を得るには、溶接電流に対応してワイヤ送給速度をある一定の範囲に保つ必要がある。たとえば、溶接速度を速くすることに注目すると、板厚が1.6mm、溶接電流が200Aのときに、図5-12から分かるように、ワイヤ送給速度は1~2.5m/min(17~42mm/s)に、また板厚が3.2mm、溶接電流が300Aのときは、図5-11から分かるように、ワイヤ送給速度は2~4m/min(33~66mm/s)の範囲に保つ必要がある。図5-14~図5-16の結果を用い、種々の板厚に対して、溶接電流で表わした母材への入熱量と、ワイヤ送給速度で表わした余盛量とが適正関係を満たす領域を求め、それらをまとめたのが図5-18である。溶接電流とワイヤ送給速度との関係は、実験した範囲では、あまり板厚によらず、図中の二本の直線で挟まれた範囲内に入るように設定すればよいことになる。

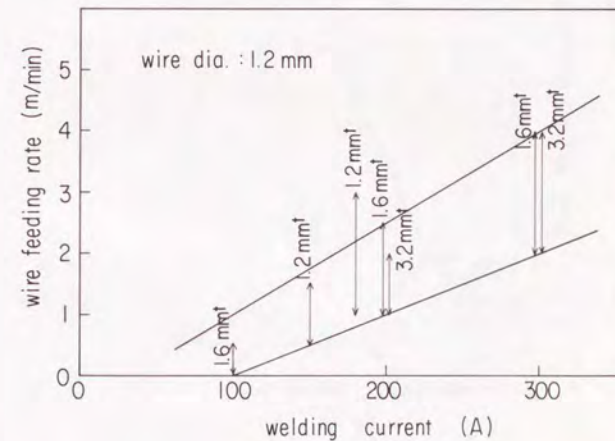


図5-18 溶接電流とワイヤ溶融量との関係

b. ワイヤ送給速度とワイヤ加熱電流との関係

以上の実験では、アーク電流、ワイヤ送給速度を定め、そのワイヤがちょうど母材と接触するときに、ワイヤ加熱電流のジュール熱およびアーク放射熱によって溶融、移行していくようにワイヤ加熱電流を調節した。アーク電流、ワイヤ送給速度をパラメータとして変化させたときのデータを基に、ワイヤの加熱長さを70mmとしたときのワイヤ送給速度とワイヤ加熱電流との関係を示したのが、図5-19である。ワイヤ送給速度が小さい場合には、アーク熱の影響を長時間受けるため、ワイヤ加熱電流の大きさは溶接電流によって変化し、同一ワイヤ送給速度でも溶接電流が大きいほどワイヤ加熱電流は小さくてよい。

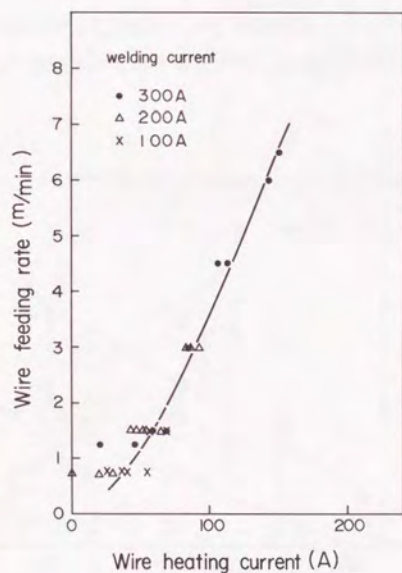


図5-19 ワイヤ送給速度とワイヤ加熱電流との関係

C. トランジスタを用いた電源制御方法

a. bで述べた実験結果をもとに、溶接速度が速い場合にも安定なビード形状が得られるような電源構成、制御方式を考える。ワイヤ加熱用の電源の正負接続方法は、図5-20に示す4種類が考えられる。そのうち(a)と(b)とは、ワイヤに流れる電流の方向が異なり、TIGアークに及ぼす電磁力の方向も異なる。(a)では、アーク電流、ワイヤ加熱電流はほぼ同一方向に流れるから、TIGアークはフィラーワイヤ側へ力を受け、(b)では、アーク電流、ワイヤ加熱電流はほぼ反対方向に流れるから、TIGアークは、ワイヤと反対の方向、すなわち、溶接進行方向に力を受ける。TIGアークによる母材表面の濡れをタングステン電極より溶接進行方向側で早めに確保する方

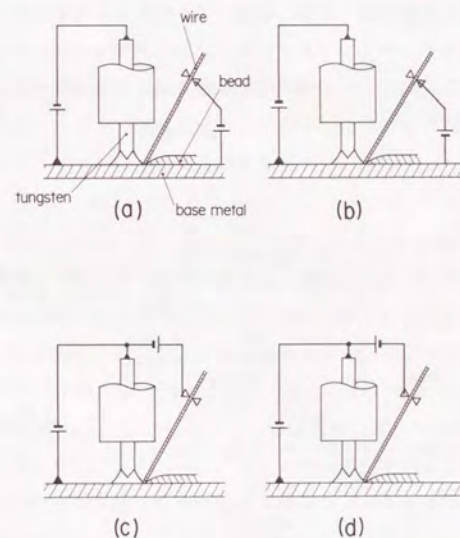


図5-20 各種の電源接続方法

が溶接の高速化のためには一般的に好ましい。ワイヤ加熱電流が溶接電流の1/3程度という今回の実験条件範囲ではこの影響は少ないものの、(a)と(b)とを比べれば(b)の方が有利である。また、(d)の接続方法をとると、TIG電源からの電流、ワイヤ加熱電源からの電流が同時刻に重なって流れると、

母材→ワイヤ→ワイヤ加熱電源→TIG電源

という経路で電流が流れるため、TIGアークは消滅する。(d)の接続方法でTIG電源からの電流、ワイヤ加熱電源からの電流が時間的に同時刻に流れないときは、TIGアークは交流アークとなる。

今回、TIGアークは交流でも、また直流パルスでもない平滑直流とし、しかも電源を簡素化することを考慮して、電源接続方法は、(c)の接続方法を変形し、ワイヤと母材とが必ず接触するよう、一つの電流電源から、溶接電流、ワイヤ加熱電流を振り分けて、それぞれをトランジスタで調整制御するようにした。具体的な電源回路構成を図5-21に示す。

ワイヤに流れる加熱電流 I_w は、母材、TIGアークを経由して溶接電流の一部となり、トランジスタAのオン・オフ制御によって調整される。また他方、トランジスタBのオン・オフ制御によって電流 I が調整され、溶接電流 $I + I_w$ の検出値と設定

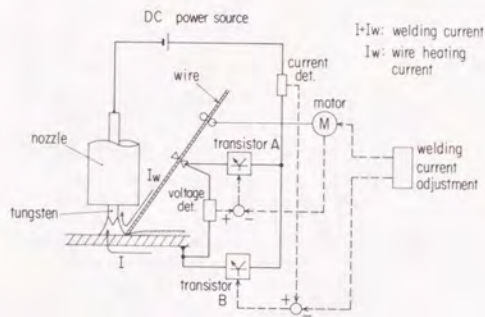


図5-21 開発された新電源の装置構成図

電流値とが等しくなる。図5-21の回路と図5-10の回路とを比べると、TIGアーク電流 I とワイヤ加熱電流 I_w との向きが逆になっているが、今回の実験では、図5-18と図5-19から分かるように、 I は I_w の三倍以上の範囲を主として考えているので、ワイヤ加熱電流とTIGアーク電流との干渉は少ない。⁵⁾したがって、図5-10の電源回路で測定したデータは、図5-21の回路においても成り立つものと考えられる。またワイヤ加熱電流 I_w が溶接電流の一部を成すことは、たとえばワイヤ送給速度を増加させた場合、ワイヤ加熱電流とともに溶接電流も増加するので、図5-18で示されるように、ビードの安定化のためには都合が良い。なお、トランジスタのオン・オフ制御によって、 I および I_w には、ピークピーク値で表わしてそれぞれ最大40A、20Aの電流リップルが重畳する。

ワイヤを溶融させるには、あるワイヤ送給速度に対しては、 I_w を図5-19に示されるような関数関係で調整する方法もあるが、その場合はワイヤ加熱長さの変動が生じると溶け過ぎ、あるいは加熱不足が生じやすい。ワイヤ加熱長さの変動を補償することも考慮し、所定のワイヤ送給速度に対し、ワイヤ加熱部分の電位降下を監視することを検討してみる。

Halmoy氏によれば⁴⁾、一定速度 v_w で送給されているワイヤに均一な電流密度 j にて電流が通電されている場合、通電距離 l の間の電位降下 V_l は、その距離の間に得るジュール熱によるワイヤの平均保有熱量を H_l として、

$$V_l = v_w H_l / j \quad \dots \dots \dots 1)$$

と表わされる。また、 H_l は $j^2 \cdot l / v_w$ の関数として表わされ、今回用いたワイヤに対してその関数関係を測定した結果を示すと、図5-22のようになる。なお、 H_l の測定方法は、文献4)に記載されたものと同じく、与えられた長さのワイヤに、ほぼ矩形の電流を流し、電流給電点間の電圧波形を積分することによって求めた。図5-21には、Halmoy氏のデータ⁴⁾をも付記するが、両者は良く一致している。

図5-19で示される v_w と I_w すなわち j との関係から図5-22を利用して H_l が求められ、その値を1)式に代入すると、 v_w と V_l との関係が計算できる。 v_w が小さいときは、図5-18から、溶接電流も小さく設定することが多いことを考慮して、 $v_w = 1 \text{ m/min}$ (17mm/s) のとき $I_w = 47 \text{ A}$ 、 $v_w = 2 \text{ m/min}$ (33mm/s) のとき $I_w = 70 \text{ A}$ 、 $v_w = 3 \text{ m/min}$ (50mm/s) のとき、 $I_w = 87 \text{ A}$ 、 $v_w = 4 \text{ m/min}$ (67mm/s) のとき $I_w = 107 \text{ A}$ という図5-19に示される結果を用いて、1)式から V_l を計算した結果と、実験によって、 v_w と V_l との関係を求めた結果とをあわせて図5-23に示す。図5-23の実測ポイントには、

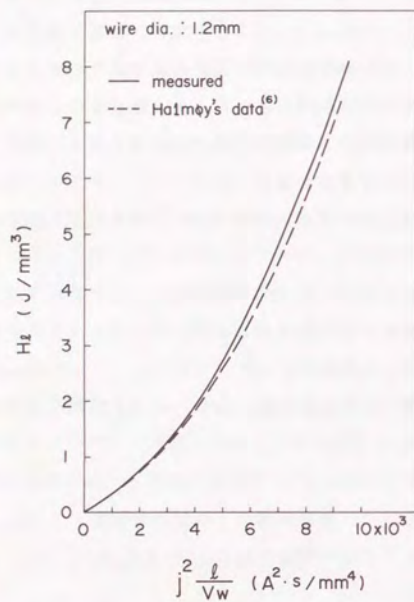


図5-22 ワイヤ突き出し部での保有熱量

ワイヤ加熱電流、溶接電流の値も付記しており、計算結果と実測とが良く一致していることがわかる。

v_1 を図5-23に示すように v_w の関数として与えておき、現実にモニタしたワイヤ加熱部分の電圧降下とその V_1 の値とを比較し、両者が一致するように、図5-21中に示すトランジスタAをオン・オフ制御すれば、ワイヤ加熱長さに少々の変動があってもワイヤは突込みも這上りもしない。

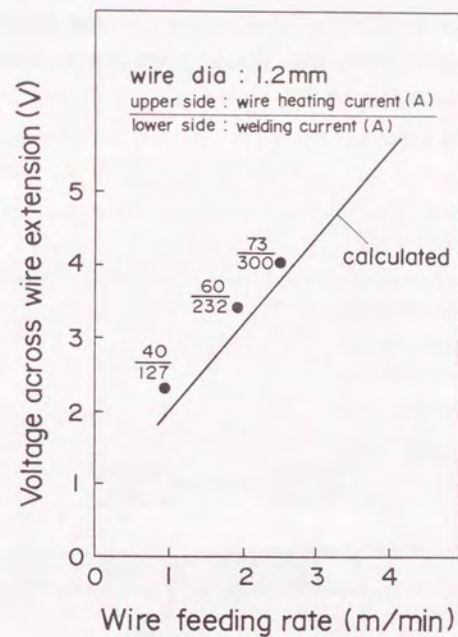


図5-23 ワイヤ送給速度とワイヤ突き出し部の電圧降下との関係

溶接施工時に溶接電流の設定をした後の制御の流れをまとめると、図5-24のようになる。母材に合わせて溶接電流を設定すると、図5-18から求められる適正なワイヤ送給速度が選択され、ワイヤ送給モータが駆動されると同時に図5-23で示されるワイヤ加熱部分の電圧降下の設定値が定められる。ワイヤ加熱部分の電圧降下および溶接電流は、それぞれ検出器で検出されて設定値と比較され、おのおのトランジスタA、Bの制御によって設定値に保持される。なお、実用上、ワイヤ溶融量を微調整する必要があるときは、V₁の設定値を微調整すれば良い。

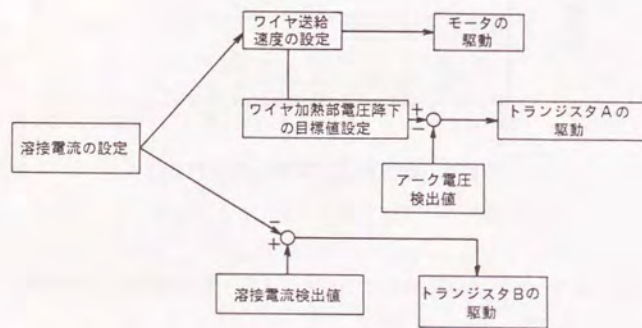


図5-24 溶接パラメータの制御方法

4) 溶接の実用化

従来のTIG溶接法に比べて、ワイヤを通電加熱した分だけワイヤの溶融量は増大するが、母材への入熱量（溶接電流）と余盛量（ワイヤ送給速度）とを図5-18に示すような適正関係に設定しているため、母材の濡れも確保され、溶接速度が上昇する。ワイヤを通電加熱させない通常のTIG溶接法の場合（これを“コールドワイヤ”と呼ぶことにする）と比べて、溶接速度がどの程度向上するかをみている。図5-25は、縦軸、横軸を図5-12と同じ量にとって、コールドワイヤの場合のビード形状を分類したものである。この場合、通常行われているように、ワイヤはトーチの前方からアーク近傍へ挿入している。ビード幅はワイヤ送給速度を増加させると、ほとんどの場合減少し、特に溶接速度約900mm/min(15mm/s)以上に対して安定なビードは得られなくなる。図5-12と図5-25

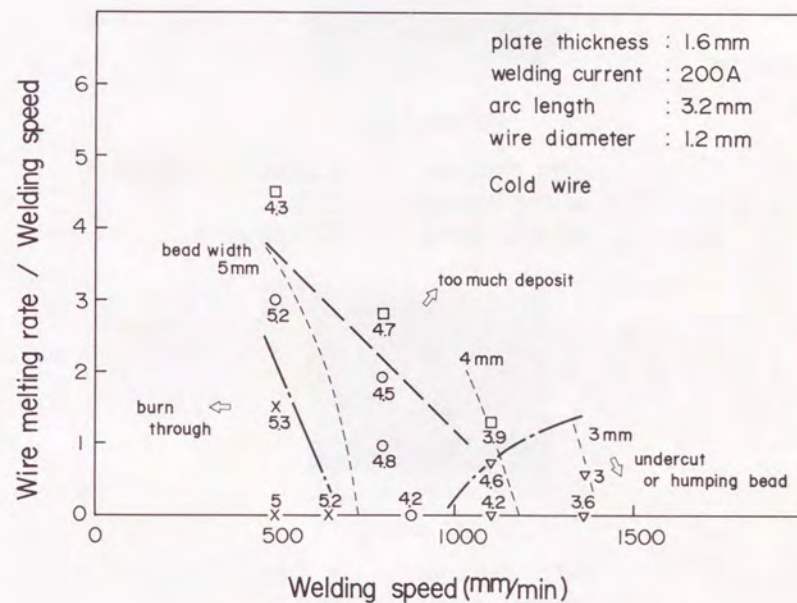
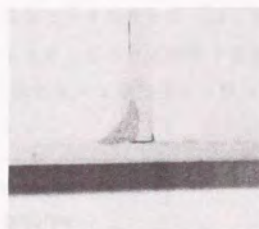


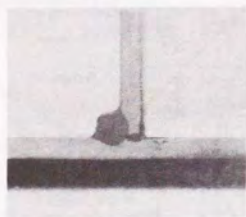
図5-25 安定なビードが得られる範囲
(コールドワイヤの場合)

とを比べると、適正ビード形状を与える溶接速度は、ホットワイヤにすると、1.5~2倍になることがわかる。また、すみ肉、重ね溶接においては、ビードと母材表面とのなじみが良好で、CO₂溶接法とは異なり、ビード外観上も高品質な溶接結果が得られる。図5-26は板厚2.3mm、溶接速度600mm/min(10mm/s)のときの水平すみ肉溶接ビード断面形状である。



Hot Wire TIG

plate thickness 2.3 mm
welding current 230 A
welding speed 600 mm/min



CO₂ arc welding

plate thickness 2.3 mm
welding current 170 A
welding speed 600 mm/min

図5-26 ビードの断面

5. 5 結 言

以上、溶滴移行とパルス電流との時間的対応に関する検討結果、およびTIGアークにおける高速化のための溶接パラメータの選択アルゴリズムの検討結果により、トランジスタを用いた業界初のノンスパッタアーク溶接機シリーズが開発された。本章の内容を以下にまとめる。

- 1) トランジスタチョッパ方式のパルスマグ溶接機を実用化し、特に厚板溶接領域でのノンスパッタ溶接を実現した。
- 2) トランジスタインバータ方式のパルスマグ溶接機を実用化し、薄板領域での高速ノンスパッタ溶接を実現した。
- 3) ホットワイヤ式TIG溶接機を汎用化しTIG溶接の高速化のための溶接条件選定の簡素化ならびに電源の安定化を図った。

以上のような、筆者らの電流波形制御型のアーク溶接機の開発が、溶接工程の自動化および高機能溶接の汎用化に関するさきがけの役割を果たした。

参考文献

- 1) J. F. Saenger and A. F. Manz: "High Deposition Gas Tungsten Arc Welding" Weld. J., vol. 47, No. 5, P. 386 (1968)
- 2) J. F. Saenger: "Gas Tungsten Arc Hot Wire Welding" Weld. J., vol. 49, No. 5, P. 363 (1970)
- 3) 黄地; 大阪大学学位請求論文 P. 11 (1978)
- 4) E. Halmoy: "Wire melting rate, droplet temperature and effective anode melting potential" Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behavior, P49 (1979)
- 5) 小園他; "2電極スイッチング・アーク溶接法に関する研究(第7報)" 溶接学会論文集, vol. 2, No. 2, P. 214 (1984)
- 6) 殖栗、田畑、清水、水野; "ホットワイヤTIG溶接における溶着量制御方法に関する検討" 溶接学会論文集, vol. 4, No. 4, P. 678 (1986)
- 7) S. Ueguri, K. Hara and H. Komura: "Study of Metal Transfer in Pulsed Welding" Weld. J., vol. 64, P. 242-s (1985)
- 8) 殖栗、田畑、平本、水野; "三菱トランジスタパルスマグ溶接機<クリーンマグ>" 三菱電機技報, vol. 55, No. 2, P. 17 (1981)
- 9) 鶴飼、水野; "トランジスタパルスマグ半自動溶接機の特徴" 溶接技術, 1981年7月号, P. 34
- 10) 殖栗、田畑、岩田、水野; "パルスMAG溶接におけるスパッタ発生現象" 溶接学会論文集, vol. 4, No. 4, P. 684 (1986)

第6章 結論

以上、溶接の高速化を狙いとして、消耗電極式アーク溶接の場合には、パルスアーク溶接法を適用し、ワイヤ先端での溶滴の生成と母材への移行現象を明らかにし、また非消耗電極式アーク溶接の場合には、ホットワイヤ溶接法を適用し、母材の溶融量と母材へ移行させる溶融金属量とのバランス条件を明らかにして、いずれもノンスパッタ溶接機の実用化に結びつけた。

本研究で得られた結論を総括すると以下ようになる。

- (1) パルス電流波形形状とワイヤ端の溶滴の生成および母材への移行現象との関係を明らかにし、実用的にアーク長を短くしてもワイヤが母材と接触短絡しない条件が見出された。特に、軟鋼がワイヤで、シールドガスとしてアルゴンと CO_2 ガスとの安価な混合ガスを用いた極めて実用的な溶接条件で明確にされたことは、溶接の実用化に大きく寄与するものである。
- (2) パルス電流に対するワイヤ先端での溶滴の生成過程は、パルス同士の休止期間においてワイヤ先端の溶融部形状が半球状に復帰することから、静的な力のつりあいのモデルで表現できることがわかった。
パルス電流期間の前半では、ほぼ融点に近い温度の溶融金属がワイヤ端に形成されていき、後半、溶滴にくびれが発生した後は、溶滴は母材方向へ離脱していくが、その際、溶滴はアークに包まれ続けるため、約 $2100^\circ C$ まで融点以上に過熱される。
- (3) ワイヤと母材が短絡を伴うまでさらにアーク長を短くしたパルスアーク溶接において、電流波形形状とスパッタの発生現象との関係を明らかにした。その結果、スパッタの発生を抑えるためには、1パルスに対して1回の溶滴移行が生じるための波形条件に設定するのに加え、ベース電流期間で短絡が生じるように、パルス波形の特に立下りを急峻にする必要があることがわかった。
- (4) さらに、ワイヤと母材との短絡を伴うパルスアーク溶接では、毎周期の短絡が解除されて次の周期のパルスの立上りが始まるように、短絡が長引くときには、次の周期のパルス立上り時刻を短絡解除まで遅らせる方策が有効であることがわかった。
- (5) CO_2 ガスをシールドガスとした場合、幅の短い高周波パルスを印加することにより、電磁ピンチ力に起因する溶滴の肥大化を防止することができ、パルス電流と溶滴離脱とを同期させることができる。

加えて、溶滴生成および移行のばらつきを抑える手段として、高周波パルスの発生直前に低電流のベース電流を長く設けること、および電流、電圧の実測波形に基づき時々刻々のアーク長を検出して、それに基づき、溶滴の形成過程を電流で補正、制御することが有効であることが分かった。

- (6) 以上の消耗電極式アーク溶接におけるパルスアーク溶接現象の把握に基づき、トランジスタを用いたノンスパック溶接機を実用化した。
- (7) 非消耗電極式アーク溶接にホットワイヤ溶接法を適用し、母材の溶融量を決めるアーク電流と、母材へ移行させる溶融金属量との適正関係を見出し、それが母材板厚にほとんど依存せず決められることが分かった。さらに、供給するワイヤの加熱長さの変動に対する補償方法として、加熱部の電圧降下をモニタする機能も加え、TIG溶接の高速化を実現する溶接機を実用化した。

以上、本研究で得られた結論を総括したが、(1)電磁ピンチ力の時間変化と溶滴の挙動との対応の解明と、それに基づくパルス電流の詳細波形形状の最適化、(2)アークの電流密度分布の解明、(3)溶滴生成過程のモニタ方法と時々刻々の補正手段の確立、などが今後の研究課題として挙げられる。

本文作成にあたり、終始懇切丁寧なご指導、御鞭撻を賜った、東京大学工学部教授、河野照哉博士に衷心より謝意を表します。また、本文を査読頂き有益な助言を賜った、同大学教授、河村達雄博士、正田英介博士、桂井誠博士および同大学助教授、石井勝博士、小田哲治博士に深く感謝の意を表します。

三菱電機技術本部副本部長、伊藤利朗博士には入社以来温かい御指導を賜わり、特に本研究成果の製品化に対し、基本的なフィロソフィを与えて頂き、深く感謝致します。また、当社中央研究所所長、岩本雅民博士、および当社開発部、新田東平博士、伊丹製作所、田畑則一博士、中央研究所、村井裕博士には、本論文をまとめる機会を与えて下さり、かつ温かい御指導、御激励を賜わり、深く感謝致します。また、当社、小村宏次氏には、入社以来直属の上司として、本研究遂行に際しその英知と洞察力に富む数々の御教示を賜わり、深く謝意を表します。さらに、当社、植田至宏博士には、直属の上司として、本論文作成に対し、温かい御指導、御鞭撻を賜わるとともに激励を頂き、深く感謝致します。また、当社、島田弥博士、平本誠剛氏には、折りにふれ有益な御助言を頂き深く感謝致します。また、当社、田畑要一郎氏には本研究を共に遂行して頂き、数々のご助言を賜わり、原一彦氏、岩田明彦氏ともども、その御援助、御協力に深く感謝致します。さらに、当社名古屋製作所、鶴飼順氏、水野孝治氏、中谷隆男氏、木谷基氏、水野正紀氏、清水孝雄氏、加藤義明氏、長野修氏、および当社豊田営業所、東田賢史氏、加藤圭二氏はじめ関係の方々には、本研究成果を製品としてまとめ上げて下さったことに対し、深く感謝致します。

最後に、本論文の執筆に対して常々筆者を激励し、数々の助言を与えて下さった、当社、田中正明博士、池田彰博士に謹んで謝意を表します。

発表論文、資料リスト

(学会論文)

- 1) S. Ueguri, K. Hara and H. Komura; "Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding", Weld. J., vol. 64, No. 8, 242-s, (1985)
- 2) 殖栗、田畑、清水、水野; "ホットワイヤTIG溶接における溶着量制御方法に関する検討" 溶接学会論文集, vol. 4, No. 4, 24, (1986)
- 3) 殖栗、田畑、岩田、水野; "パルスMAG溶接におけるスパッタ発生現象" 溶接学会論文集, vol. 4, No. 4, 30, (1986)
- 4) 殖栗、田畑、水野、植田; "二重パルス波形を用いたCO₂アーク溶接" 電気学会論文誌A, vol. 110, No. 5, 309, (1990)

(国際会議資料)

- 1) S. Ueguri, Y. Tabata, A. Iwata & T. Mizuno; "Study on Pulsed GMA Welding with Short Circuit" IIW Doc. SG-212-650-1986, (1986)
- 2) H. Yamamoto, Y. Nishida and S. Ueguri; "Trends and Problems of Arc Welding Power Source in Japan" IIW Discussion Meeting in Nagoya, Doc VI-960-1986, (1986)

(参考論文)

- 1) 河野、殖栗; "低温における窒素ガスのインパルスフラッシュオーバー特性と暗電流" 電気学会論文誌A, vol. 94-A, No. 11, 469, (1974)
- 2) 小村、田畑、殖栗; "高気圧グローからアークへの移行現象" 電気学会論文誌A, vol. 99, No. 9, 41 (1979)
- 3) 岩田、田畑、殖栗; "状態平均化法を用いた偏磁電流の解析" 電気学会論文誌D, vol. 108, No. 6, 557 (1988)

(研究会、講演会資料)

- 1) 殖栗、田畑、小村、平本、島田、水野、鶴飼; "トランジスタ・パルス制御によるノンスパッタ・マグ溶接法" 第61回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 80-446, (1980)
- 2) 殖栗、田畑、小村、平本、島田、水野、鶴飼; "トランジスタ・パルスマグ「クリーニングマグ」溶接の原理と特徴" 第81回溶接学会溶接法研究委員会資料No. SW-1252-81, (1981)
- 3) 殖栗、田畑、小村、平本、島田、水野、鶴飼; "トランジスタ・パルス制御によるノンスパッタ・マグ溶接法" 溶接学会講演概要集, 第28集, 319, (1981)
- 4) 殖栗、田畑、小村、平本、島田、清水、水野、鶴飼; "高能率TIG溶接法" 第86回溶接学会溶接法研究委員会資料No. SW-1318-82, (1982)
- 5) 殖栗、原、田畑、小村; "MAGパルス溶接の溶滴移行現象" 第67回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 82-491, (1982)
- 6) 殖栗、原、田畑、小村; "MAGパルス溶接の溶滴移行現象" 第68回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 82-508, (1982)
- 7) 原、殖栗、田畑、小村; "CO₂溶接におけるアークスタート現象" 第70回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 83-519, (1983)
- 8) 殖栗、原、田畑、小村; "CO₂アーク溶接におけるスパッタの発生現象と電流制御について" 第72回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 83-538, (1983)
- 9) 殖栗、原、田畑、小村; "パルスMAG溶接における溶滴移行現象" 第76回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 84-559, (1984)
- 10) 殖栗、田畑、岩田、水野、栗野、松井、鈴木; "高速パルスマグ溶接におけるスパッタ抑制に関する検討" 第80回溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料No. 85-600, (1985)
- 11) 殖栗、田畑、岩田; "パルスMAG溶接における溶滴移行現象" 昭和60年度溶接学会秋季全国大会講演概要集
- 12) 殖栗、田畑、岩田、水野、植田; "パルスアーク溶接機の短絡・アーク再生現象 (その1)" 昭和64年電気関係学会関西支部連合大会G1-34
- 13) 殖栗、田畑、岩田、水野、植田; "パルスアーク溶接機の短絡・アーク再生現象 (その2)" 昭和64年電気関係学会関西支部連合大会G1-35

14) 殖栗、田畑、岩田、植田；”パルスアーク溶接の等密度干渉縞解析”昭和61年電気学会全国大会207

15) 殖栗、田畑、水野、植田；”高周波インバータの溶接機への応用”第4回パワーエレクトロニクス研究会専門講習会(1989)

(技術解説)

1) 殖栗、田畑、平本、水野；”三菱トランジスタパルスマグ溶接機<クリーンマグ>”三菱電機技報, vol. 55, No. 2, 17(1981)

2) 殖栗、田畑、平本、瀬川、木谷；”トランジスタパルスマグ溶接機<クリーンマグII>”三菱電機技報, vol. 56, No. 4, 51(1982)

3) S. Ueguri, H. Komura; "The Clean MAG II, a Transistor-Pulsed MAG Arc Welder", ADVANCE, vol. 20, 10(1982)

4) 殖栗、小林、水野；”パルスマグ溶接における溶滴移行現象”電気製銅 vol. 55, No. 1, 11, (1984)

(本論文に関する特許)

登録特許

1) 消耗電極式アーク溶接機	第1436387号
2) パルスアーク溶接機	第1506370号
3) パルスアーク溶接装置	第1532381号
4) パルスアーク溶接装置	第1506367号
5) パルスアーク溶接機	第1506369号
6) パルスアーク溶接方法	第1513337号
7) パルスアーク溶接機	第1509636号
8) パルスアーク溶接機	第1442814号
9) パルスアーク溶接方法	第1536241号
10) ホットワイヤ式アーク溶接装置	第1720056号
11) ホットワイヤ式アーク溶接装置	第1506404号

公開特許

1) アーク溶接方法	特開昭56-141968
2) パルスアーク溶接装置	特開昭56-134074
3) パルスアーク溶接電源	特開昭56-141969
4) パルスアーク溶接機電源	特開昭57-4381
5) アーク溶接機	特開昭57-19183
6) 消耗電極型パルスアーク溶接機	特開昭57-19174
7) 消耗電極型パルスアーク溶接機	特開昭57-19175
8) パルスアーク溶接機	特開昭57-19176
9) パルスアーク溶接装置	特開昭57-19177
10) パルスアーク溶接機	特開昭57-19178
11) パルスアーク溶接機	特開昭57-19179
12) パルスアーク溶接機	特開昭57-19185
13) パルスアーク溶接機	特開昭57-19162
14) パルスアーク溶接機	特開昭57-19163
15) パルスアーク溶接装置	特開昭57-19167
16) パルスアーク溶接装置	特開昭57-19170
17) パルスアーク溶接機	特開昭57-31477
18) パルスアーク溶接法	特開昭57-44472
19) パルスアーク溶接法	特開昭57-44473
20) パルスアーク溶接機	特開昭57-56160
21) パルスアーク溶接機	特開昭57-56161
22) パルスアーク溶接機	特開昭57-56162
23) パルスアーク溶接機	特開昭57-56163
24) パルスアーク溶接機	特開昭57-56164
25) パルスアーク溶接機	特開昭57-58977
26) 消耗電極式パルスアーク溶接機	特開昭57-72775
27) パルスアーク溶接方法	特開昭57-187175
28) パルスアーク溶接方法	特開昭57-187176
29) パルスアーク溶接方法	特開昭57-187177

- | | |
|--------------------|--------------|
| 30) パルスアーク溶接方法 | 特開昭57-187178 |
| 31) パルスアーク溶接機 | 特開昭57-130772 |
| 32) パルスアーク溶接機 | 特開昭57-130773 |
| 33) ワイヤ通電加熱式アーク溶接機 | 特開昭57-142775 |
| 34) ホットワイヤTIG溶接機 | 特開昭58-38673 |
| 35) ホットワイヤTIG溶接機 | 特開昭58-38674 |
| 36) 非消耗電極式アーク溶接機 | 特開昭58-68472 |
| 37) ホットワイヤTIG溶接機 | 特開昭58-110181 |
| 38) ホットワイヤ式アーク溶接装置 | 特開昭58-119469 |
| 39) ホットワイヤ式アーク溶接装置 | 特開昭58-135774 |
| 40) パルスアーク溶接機 | 特開昭61-262469 |
| 41) パルスアーク放電装置 | 特開昭64-293976 |
| 42) パルスアーク溶接方法 | 特開昭64-118372 |
| 43) パルスアーク溶接方法 | 特開昭64-118371 |
| 44) パルス放電装置 | 特開昭65-30377 |
| 45) パルス溶接装置 | 特開昭64-254385 |

