

■ 要旨

金属を接合する溶接は、今日の工業製品にとって欠くことのできない重要な加工技術となっている。その溶接では、接合部を局所的な高温に高めるために、電気的なエネルギーを利用した種々な手法が開発されているが、とりわけ、アーク熱を利用して母材を溶融するアーク溶接があらゆる産業分野で大きな役割を果たしている。アーク溶接に用いられるアークは1807年に発見され、発電機が出現した1860年頃以降アークを用いる溶接法の適用が本格化し、現在の主要なアーク溶接法のほとんどは1950年前後に開発された。1914(大正3)年にアーク溶接が導入されたわが国では、その後の100年間でアーク溶接技術は大きく発展し、近年では、世界の溶接界をリードする主要国としての立場を確立している。

本報告は、このようなアーク溶接技術のわが国における発展経過を中心にまとめたもので、その構成は次のようである。第1章では、本報告のテーマである溶接技術の概要と加工技術としての位置付けを述べるとともに、その中でアーク溶接法の占める役割を説明した。第2章では、アーク溶接法の概要を説明するために、溶接アークの性質ならびに主なアーク溶接法の原理と特徴を述べた。

第3章からは本報告の本題であり、第3章ではアーク溶接プロセスの発展経過をアーク溶接法ごとにまとめた。取り上げたアーク溶接法は、被覆アーク溶接、サブマージアーク溶接、ティグ溶接、ミグ溶接、マグ溶接、パルスマグ・ミグ溶接およびその他のアーク溶接である。その他のアーク溶接としては、プラズマアーク溶接、セルフシールドアーク溶接、エレクトロガスアーク溶接、アークスタッド溶接ならびに狭開先溶接を取り上げている。第4章ではアーク溶接に用いられる溶接機・溶接電源の発展経過について、時期を1900年代前期の萌芽期、1900年代中期の開拓期、1900年代後期の発展期および近代(1969年以降)に分け、それぞれの時期ごとにアーク溶接機および電源の発展経過を記述した。第5章では、溶接棒、溶接ワイヤなどのアーク溶接材料と、アーク溶接に用いられるシールドガスの発展経過について述べた。

第6章は本報告のまとめであり、第3章～第5章で述べたアーク溶接技術の発展経過を整理し、溶接プロセス、溶接電源および溶接材料それぞれの発展経過の概要をフロー図としてまとめた。また、アーク溶接技術の今後の課題についても概説した。

■ Abstract

Welding, the fusing together of metals, has become a processing technology indispensable for the industrial products of today. Many methods using electric energy have been developed to raise the localized temperature at the joint for welding. Arc welding, in particular—using heat from an electric arc to fuse the base material—plays a major role in various industrial fields. The electric arc used in arc welding was discovered in 1807. The application of welding methods using this arc became full-fledged since electricity generators appeared in 1860, and most major arc welding methods in use today were developed around 1950. Arc welding was introduced to Japan in 1914. In the 100 years since, its arc welding technology has developed greatly, and Japan has established itself in recent years as a major country leading the welding world globally.

This report outlines such arc welding technology, focusing on the course of its development in Japan, and is organized as described below. Chapter 1 gives an overview of the theme of the report—welding technology—and where it stands as processing technology, as well as the role played in it by arc welding. Chapter 2 is an overview of the arc welding method, describing the characteristics of the welding arc and the principles and features of the major methods.

The main subject of this report starts in Chapter 3, laying out the course of development of processes in arc welding, categorized by arc welding method. The arc welding methods featured include shielded metal arc welding, submerged arc welding, Tungsten Inert Gas (TIG) welding, Metal Inert Gas (MIG) welding, Metal Active Gas (MAG) welding, and pulsed MAG/MIG welding. Other arc welding featured are plasma arc welding, self-shielded arc welding, electrogas arc welding, arc stud welding, as well as narrow-gap welding. Chapter 4 documents the course of development of welding equipment and welding power supply used in arc welding, classified by period: the embryonic phase of the early 1900's, the pioneering phase of the mid-1900's, the progressive phase of the late 1900's, and the modern phase (since 1969). Chapter 5 describes the course of development of arc welding materials such as welding rods and welding wire, and shield gases used in arc welding.

Chapter 6 is the conclusion of this report, and reiterates the course of development of arc welding technology described in Chapters 3 to 5. The course of development of welding processes, welding power supplies, and welding materials are each summarized in a flow chart. Issues currently facing arc welding technology are also outlined.

■ Profile

三田 常夫 *Tsuneo Mita*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1972年 大阪大学工学部溶接工学科卒業
1991年 大阪大学 博士(工学)
1972年 (株)宮地鐵工所 入社
1975年 同社 退社
1975年 日立精工(株)(現ピアメカニクス(株)) 入社
2005年 同社退社
2006年 ダイヘン溶接メカトロシステム(株) 入社
2015年 同社 退職
2015年 大阪大学接合科学研究所招聘教授

■ Contents

1. はじめに	391
2. アーク溶接の概要	394
3. アーク溶接プロセスの発展経過	405
4. 溶接機・電源の発展経過	479
5. 溶接材料の発展経過	500
6. おわりに	520
付表	523

1 | はじめに

人類が金属を利用し始めたのは紀元前の青銅器時代であるが、それ以来金属を切断したり接合したりして、生活に役立つ様々な品物や道具を製作してきた。現在使用されている金属の種類や製作される品物・道具は、当時とは比べものにならないほど高機能化し、その適用も広範囲にわたり、金属の切断・接合は今日の工業製品にとって欠くことのできない重要な加工技術となっている。

金属の接合方法を、接合機構と接合エネルギーで分類すると、リベットやボルトなどを用いて力学的なエネルギーで部材を接合する“機械的接合”、接着剤や樹脂などを用いて化学的なエネルギーで部材を面で接合する“化学的接合”、および種々なエネルギーを利用して冶金的に接合する「溶接」に大別される。

溶接は、「2個以上の部材の接合部に熱、圧力もしくはその両者を加え、さらに必要であれば適当な溶加材も加えて、連続性を持つ一体化された1つの部材とする操作」である。そしてその接合機構面から、液相（熔融）接合である“融接”、固相または液相接合である“圧接”、および液相-固相反応接合である“ろう接”に細分される。これら溶接の3形態を図示すると表1.1のようであり、“融接”は被溶接材（母材）の接合部を加熱、熔融して、母材の熔融金属あるいは母材と溶加材を融合させた熔融金属を生成し、その熔融金属を凝固させることによって機械的圧力を付加せずに接合する方法である。“圧接”は接合部へ摩擦熱・電気抵抗によるジュール熱などの熱エネルギーを加えた後に、機械的圧力を付加して接合する方法、“ろう接”は母材より低融点の溶加材（ろう材）を熔融し、その毛管現象を利用して接合面の隙間にろう材を充填することによって、母材を熔融せずに接合する方法で

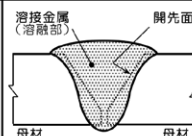
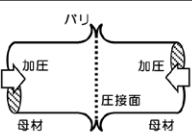

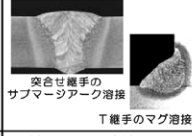


ある。

母材より低融点のろう材を利用して接合する“ろう接”は、高温を作り出すことが極めて困難であった古代でも利用されており、メソポタミア地方で発見された銅製のレリーフの一部に使用されていたことが知られている。また、熱した金属を重ねてたたく（鍛える）と、重ね合わせた金属を接合・一体化することができる。このような接合方法は“鍛接”と呼ばれ、“圧接”に分類される。鍛接の歴史も古く、青銅器や鉄器の接合に多用されていたことが知られている。特に、延性が良好な鉄には適した接合方法であることから、紀元前15世紀頃に鉄が発明された小アジアから、鍛接は鉄とともに世界各地へ広まったようである。わが国へも紀元前3世紀頃に伝わり、後の日本刀は鍛接の代表例となっている。

もう一つの古い金属接合法として、接合母材間に熔融させた金属を流し込んで接合する“鑄掛け”と呼ばれる方法がある。鑄掛けでは、母材の縁が溶けるまで熔融金属を流し込むため、その接合機構は“融接”に極めて近いといえる。鑄掛けの代表例には鎌倉の大仏があり、注意して観察すれば、溶接ビードの余盛りのような鑄掛け部が認められる。鑄掛けは金属製品のひび割れや穴明きを補修する方法として、比較的近年（昭和30年代頃）まで、わが国でも使われていた。

しかし本格的な“融接”を行うためには、比較的狭い部分を集中して加熱することが必要であり、そのためにはかなりの高温が要求される。したがって、近代的な“融接”が行われるのは、電気やガスを利用して母材を集中的に加熱することができるようになる産業革命以降であり、金属を熔融させて接合することが可能となったのは19世紀に入ってからである。

表 1.1 溶接における接合形態

	融接	圧接	ろう接
接合形態			
適用例			
主な溶接法	<ul style="list-style-type: none"> ・被覆アーク溶接 ・サブマージアーク溶接 ・ティグ溶接 ・マグ・ミグ溶接 ・レーザ溶接 	<ul style="list-style-type: none"> ・抵抗スポット溶接 ・アブセット溶接 ・フラッシュ溶接 ・摩擦圧接 ・ガス圧接 	<ul style="list-style-type: none"> ・トーチ（炎）ろう付 ・誘導加熱ろう付 ・光ビームろう付 ・はんだ付

今日では、溶接部を局所的な高温に高めるために、圧力や摩擦力などの力学的なエネルギー、化学反応によって生じる発熱などの化学的なエネルギー、アーク熱や抵抗発熱などの電気的なエネルギーあるいはレーザーに代表される光エネルギーを利用した種々な手法が開発されている。溶接部に加えられるエネルギーと接合形態で主な溶接方法を分類すると表1.2のようであり、化学的エネルギーと電気的エネルギーはいずれの接合形態にも利用されている。

これらのうちのユニークな溶接法としては、接触面を相対運動させることによって発生する摩擦熱で接合部を加熱して溶接する摩擦圧接、超音波振動を利用して母材表面を加熱・加圧して溶接する超音波圧接、酸化鉄とアルミニウム粉末の化学反応で発生する熱を利用するテルミット溶接、火薬を爆発させることによって発生する母材とクラッド材の間の衝撃圧力を利用する爆発圧接などがある。

現在の溶接法の主流は、比較的簡便な機器と操作で溶接を行うことができるアーク溶接と抵抗溶接であるが、これら2つの溶接法のうちでも、アーク熱を利用して母材を溶融するアーク溶接があらゆる産業分野で大きな役割を果たしている。近年レーザー溶接など新しい溶接法の適用・実用化も進んでいるが、適用性・経済性・操作性などを考えると、アーク溶接に大きく取って代わることは当分の間なさそうである。

アークは、産業革命発祥の地英国で1807年に発見された。しかし、比較的大電流を必要とする溶接アークを長時間持続させるためには電力容量の大きい電源が必要である。しかし当時としてはそのような電源は存在せず、溶接アークに関心もたれることはほとんどなかった。アークを用いた溶接が本格化するのには、1860年頃に開発された発電機が出現してからである。

一般に、アーク溶接実用化の第1歩はベナードス(N. V. Benerdos)による炭素アーク溶接の発明とされており、1885年にはその特許が成立している。その後、1892年にスラビヤノフ(N. Slavyanov)が消耗電極溶接法の元祖となる金属アーク溶接法を発見し、1907年にチェルベルヒ(O. Kjellberg)が裸棒に被覆剤を塗布した被覆アーク溶接棒を発明することによって、アーク溶接が本当の意味で実用化されることとなった。なお、現在のアーク溶接の主流であるガスシールドアーク溶接は、1926年のウェバー(L. J. Weber)によるヘリウムシールド裸金属棒溶接法が起源である。

実用化されている主なアーク溶接法が開発された時期は図1.1のようであり、ティグ溶接・ミグ溶接・マグ溶接など、現在の主要なアーク溶接法のほとんどは1950年前後に開発されている。またこの時期には、くしくも、近年のアーク溶接には欠かせない溶接ロボットの原型とも言うべき産業用ロボットの開発も行われている。すなわち20世紀の中期は、溶接技術の黎明期に携わった先人の知恵と工夫が一挙に花開いた時期であるといえる。

わが国にアーク溶接が導入されたのは1914(大正3)年であり、1922年には交流アーク溶接機が、1925年には直流アーク溶接機が国産化された。その後の80年でアーク溶接機は大きく変貌し、主要なアーク溶接法が発明されてから約50年後の20世紀末には、デジタル制御技術の進歩を背景に、溶接電源のデジタル制御化が本格的に始まった。制御回路の大部分をアナログ制御からデジタル制御へと変更することによって、溶接条件の再現性向上、個体差・個人差の排除、操作性・機能の向上などを目指した開発が進められた。そして近年では、高速制御素子を用いた出力

表 1.2 金属の接合方法とそのエネルギー

		電気的 エネルギー	化学的 エネルギー	力学的 エネルギー	光 エネルギー
機械的接合				リベット かしめ ボルト接合 焼きばめ 折り込み	
化学的接合			接着		
冶金的 接合 (溶接)	融接	アーク溶接 エレクトロ・ スラグ溶接 電子ビーム溶接	ガス溶接 テルミット溶接		レーザー溶接
	圧接	抵抗溶接 アプセット溶接 フラッシュ溶接	爆発圧接	常温圧接 摩擦圧接 摩擦攪拌溶接 超音波圧接 拡散接合	
	ろう接	誘導加熱ろう付	トーチろう付 (炎ろう付)		光ビームろう付

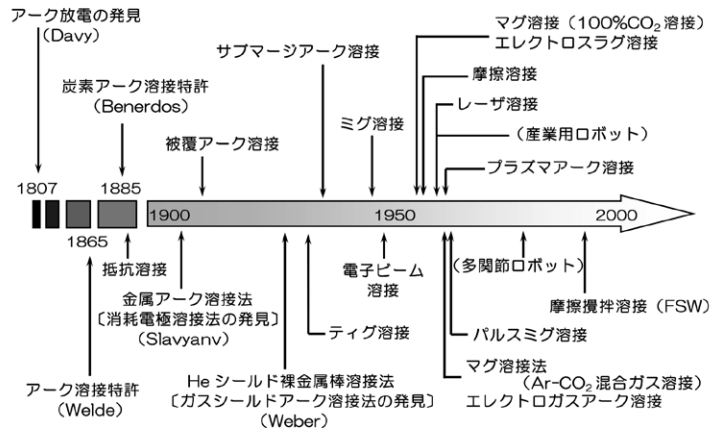


図 1.1 主なアーク溶接法の開発時期

制御の高速化が積極的に推進され、溶接現象やアーク現象を高速で制御することができる高性能なデジタル制御溶接電源も市販されるようになってきている。

アーク溶接は成熟技術であると言われるが、開発されてからわずか 100 年も経過しておらず、必ずしも完成された技術となっているわけではない。作業性

の改良・品質の改良・能率の向上・生産性の向上・作業環境の改善など、現在も地道な開発・改良が続けられている。本報告では、このようなアーク溶接の特徴について概説するとともに、わが国における溶接プロセス、溶接電源・機器および溶接材料・シールドガスの発展経過について報告する。

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。