



入門講座

鋼を接合する-3

構造体のための溶融溶接技術 -アーク溶接-

Structural Engineering of Welding and Joining
- Arc Welding -

中村照美

Terumi Nakamura

(独) 物質・材料研究機構
元素戦略材料センター 構造材料ユニット
構造体化グループ 主幹研究員

1 アーク溶接の原理

鋼構造物をはじめとした多くの材料は、アーク溶接を使用して構造体にされる。このアーク溶接では、溶接対象物を溶融するためにアークが使用される。アークは二つの電極の間で放電（アーク放電）をさせることによって形成されたプラズマの一種で、電車のパンダグラフで時々発光するのも、電気コードがショートした時に発光するのもアーク放電のためである。アーク溶接では電流が数十から数千A以上の電流が使用され、アークの温度は10000K以上になる¹⁾。このアークが消えることなく持続して発生するように様々な工夫がなされ、安定したアーク溶接としての使用が可能となる。このアークは、プラズマ物理学、電磁流体力学、分光学など様々な専門分野で研究される興味深い研究分野と言える。

溶接について辞書を調べると、様々な定義が載っている。一番シンプルな例は、「二つ以上の部材を溶融・一体化させること」、溶接施工の実情に近い例として、「材料に応じて、接合部位が連続性を持つように、熱または圧力もしくはその両者に加え、さらに必要があれば適当な溶加材を加えて部材を接合する方法」、日本工業規格の溶接用語では、「原子間の結合により二個以上の物体を局部的に原子間接合させる方法」とある。ミクロ的に見れば原子間の接合を達成する方法であり、マクロ的に見れば被溶接材料を溶融することで一体化（接合）する方法と言える。

金属の表面には酸化皮膜、油などによる汚れ、さらに表面には凹凸があり、一般的にこれらの金属表面を強く接触させても原子間の接合は生じない。酸化物や凹凸により金属面同士の接触が妨げられるためである。これらの問題を解決するために、超高真空中で酸化物や汚れを除去して表面の原子を露出させた平滑な表面を作り、表面原子同士を接触させると常温（熱を加えなくても）接合が可能になる（表面活性化常温接合 SAB : Surface Activated Bonding)²⁾。また、一般的

な雰囲気で酸化物や表面凹凸の影響を受けることなく原子間の接合を達成するためには、「溶融」を利用することが有効となる。金属の表面を溶融することにより、原子間の接合を阻害する酸化皮膜や汚れを接合面から除去し、その影響を少なくできる。さらに、溶融により、表面の凹凸の影響を無くすることができるので、広い面積で金属原子同士の接合を容易に達成することができる（図1）。

このように、溶融プロセスは、溶接における主要な接合メカニズムであり、溶融を効果的、効率的に行うために様々な試みがなされてきた。溶融を得る熱源としては、表1に示すように、電気的エネルギー、化学的エネルギー、力学的エネルギー、光エネルギーを使用し、機械的接合、冶金学的接合など様々なものが挙げられる。アーク溶接は、主に電気的エネルギーを使用し、冶金学的接合を行うもので、これら分類すると図2のようになる。本稿では、溶融溶接に分類されるアーク溶接について主に取り上げる。

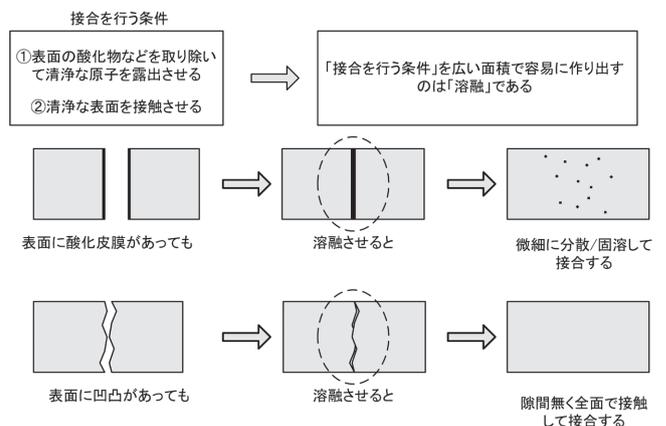


図1 溶接・接合のメカニズム

2 アーク溶接法の分類と特徴

(1) 被覆アーク溶接 (SMAW : Shielded Metal Arc Welding または MMA : Manual Metal Arc welding)

アーク溶接ではアークを溶接材料と被溶接材料の間で発生させ、溶接材料と被溶接材料を溶融する。被溶接材料 (母材) には、図3に示すように開先と呼ばれる溝が加工され (二つの被溶接材料を突き合わせた時に溝が形成される)、この溝の周囲を溶融し、同時に溶接材料で埋めながら、溶接継ぎ手が形成される。開先の形状は、アーク溶接方法、母材の板厚さ、溶接姿勢、継ぎ手形状などにより、適切な形状が選定される。溶接部には溶接材料が溶融凝固した溶接金属、溶融部の境界であるボンド、溶接時の熱により母材の組織や特性に影響を受けた熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) が生じる。

被覆アーク溶接は、アークを溶接材料と被溶接材料の間で発生させ、最も古くから使用される溶接法である。溶接装置

は、被溶接材料 (母材)、溶接材料 (溶接棒)、溶接電源からなる最もシンプルな構成となる。このとき使用される溶接材料は、図4に示すように金属棒 (芯線) の回りに被覆剤を塗布した溶接棒が使用される。アークは溶接棒の先端部と被溶接材料の間で生じる。被覆剤は、アークに触れると分解されてガスが発生し、シールドガスとなる。これにより溶融した金属 (溶融池や溶滴) が大気から遮断され、酸化や溶接部の欠陥の発生を防ぐことができる (溶融金属が大気中の窒素に触れるとブローホールと呼ばれる空洞が多数発生する)。さらに、被覆剤の一部はスラグとなり、溶融した金属 (溶接金属) の上に残り、ビードの酸化を防ぎ、溶接金属に元素を添加して特性の改善や溶接時の作業性の向上に寄与する。ただし、溶接後にスラグを取る必要があるので手間がかかる。溶接棒は、溶接の進行に伴い溶けて短くなり、アーク長 (溶接棒と被溶接材の距離 : アーク放電の距離) が大きくなる。これを放置するとアーク放電が困難となり溶接ができなくなる。このため、溶接棒の先端 (アーク発生位置) と被溶接材料の間隔を一定に保つように、手で溶接棒の位置を常に調節する必要がある。電流、溶接棒、被覆剤の種類により、アークの性質

表1 金属の接合方法

	電氣的エネルギー	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 ボルト 焼きばめ	
冶金接合	圧接	抵抗溶接	爆発圧接 圧接、鍛接 超音波接合 摩擦圧接、FSW 拡散接合	
	融接	アーク溶接 エレクトロスラグ溶接 電子ビーム溶接	ガス圧接 テルミット溶接	レーザー溶接
	ろう接	半田付け	ろう付け	レーザーろう付け
接着		接着		

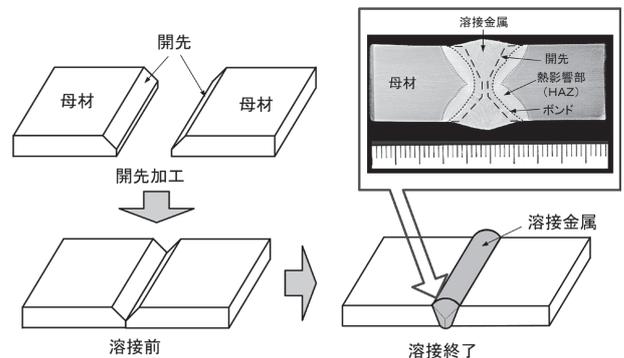


図3 アーク溶接継ぎ手

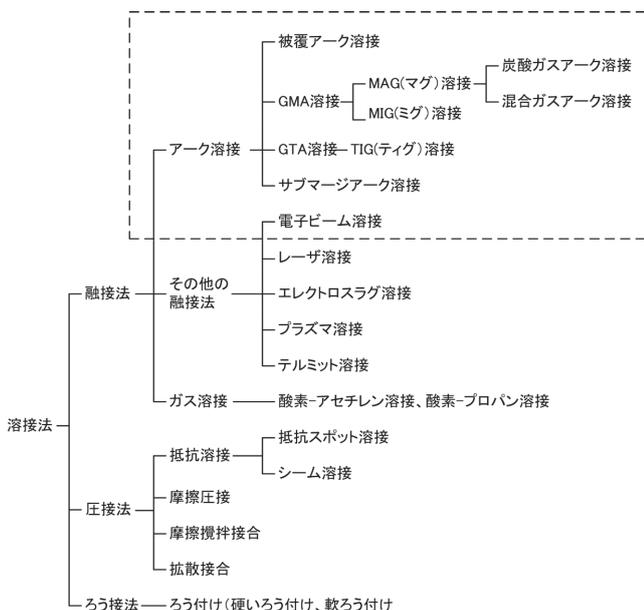


図2 溶接方法の分類

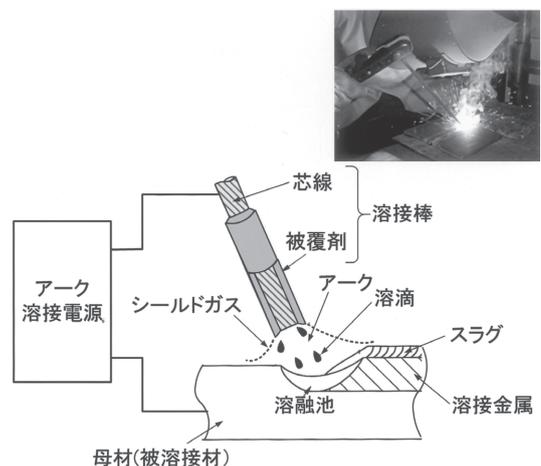


図4 被覆アーク溶接

や溶接棒の溶け方が異なる。このため、きれいで欠陥の無い安定したビードを置くためには、技量が要求されるが、手溶接は溶接装置が簡単であり柔軟性の高い溶接法として広く使用されている。

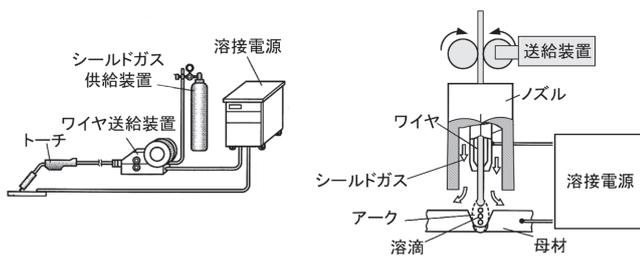
(2) 消耗電極式溶接 (GMAW : Gas Metal Arc Welding)

被覆アーク溶接では、使用できる電流範囲が小さく、長尺物や大型構造物、大量生産品の溶接を行うためには溶接棒を何度も変えることが必要となり、溶接能率を高くすることができない。そこで、消耗電極式溶接 (GMA溶接 : Gas Metal Arc Welding) では、溶接棒をワイヤに代えて、モータでワイヤを高速送給し、溶着量 (ワイヤの溶融量) を増して溶接施工能率を上げる。溶接棒の外側に塗布された被覆剤は強度も低く変形しないので、溶接棒のようにワイヤの外側に塗布して使用できない。よって溶接部にシールドガスを供給して溶融金属を大気から遮断する。GMA溶接は、電流を大きくするとワイヤの溶融量 (溶着量) を増やすことができる。大電流に応じてワイヤ送給量を増やすとさらに溶着量を増やした高効率溶接が可能となるので、大電流を供給できる溶接電源が使用される。GMA溶接装置は、図5 (a) に示すように、ワイヤ送給装置、溶接電源、シールドガス供給装置、トーチから構成される。トーチ先端はノズルと呼ばれ、シールドガスと溶接ワイヤが供給され、溶接が進行する (図5 (b))。

GMA溶接は、シールドガスの種類によりワイヤの溶融する様子やアークの状態が大きく異なる。GMA溶接はシールドガスにより表2に示すように、Arシールドガスに2~5%の酸素を加えたMIG溶接 (Meta Inert Gas Welding)、Ar

シールドガスに20%の二酸化炭素を加えたMAG溶接 (Meta Active Gas Welding)、シールドガスに二酸化炭素を使用した炭酸ガスアーク溶接に分類される。二酸化炭素は、他のガスに比べて安価であるため、炭酸ガスアーク溶接が広く使用されている。

MAG溶接を高速ビデオカメラ (9000コマ/S) で観察すると、図6に示すように、ワイヤ先端からワイヤ径程度の溶滴が安定的に離脱する。MIG溶接では、図7に示すように、ワイヤの先端から小さな溶滴が生じるスプレー移行と呼ばれる溶滴移行形態となる。この時、ワイヤ先端には、溶融した金属が連なり溶融金属の液柱が形成される。シールドガスを100%Arガスとすると図8に示すように液柱はさらに長く伸び、不安定に動き回るようになる。その結果、溶接が不安定になり、蛇行したビード (溶接金属) が形成される。このため、シールドガスを100%ArガスとしたGMA溶接は実用化されなかった。この液柱はシールドガスに含まれる酸素や二酸化炭素の量が多くなると短くなる。MIG溶接では2~5%の酸素を、MAG溶接では20%の二酸化炭素を加えることにより長く伸びた液柱の発生を防ぎ、ワイヤ先端から安定した液滴の離脱を行うことにより安定的な溶接ができる。しかし、こ



(a) GMA溶接装置の構成 (b) GMA溶接の詳細

図5 消耗電極式溶接 (GMA溶接)

表2 GMA溶接法の分類

名称	シールドガス
MIG溶接 (Metal Inert Gas welding)	98%Ar+2%O ₂ 、 95%Ar+5%O ₂
MAG溶接 (Metal Active Gas welding)	80%Ar+20%CO ₂
炭酸ガスアーク溶接	CO ₂



図6 MAG溶接の溶滴移行 (溶接電流300A、1.2mm鋼用ワイヤ)



図7 MIG溶接の溶滴移行 (溶接電流300A、1.2mm鋼用ワイヤ)



図8 Ar-MIG溶接の溶滴移行 (溶接電流300A、1.2mm鋼用ワイヤ)

これらの酸素や二酸化炭素を含んだシールドガスを使用すると、溶接金属中に酸化物の介在物が生じるため、延性や韌性の低下が生じる。これを回避するため、シールドガスに酸素や二酸化炭素を含まない純Arシールドガスを用いた新たなGMA溶接(クリーンMIG溶接)の開発が進められており、高強度鋼や高合金鋼の溶接技術として期待されている³⁾。また、MAG溶接では溶滴を確実に安定に離脱させるためにはパルス電流を使用し、ピーク電流時(大電流時)に生じるピンチ力(電磁力)を用いて溶滴を離脱させる溶接プロセスの開発が行われてきた⁴⁾。現在は、これをさらに高度化した安定溶接プロセスや、専用CPUを搭載した溶接電源が開発されている⁵⁾。

炭酸ガスアーク溶接では、ワイヤ径よりも大きな溶滴を形成し、離脱時や溶滴が溶融池に落ちる時に、スパッタと呼ばれる微小な溶融金属の粒を飛散させる。ロボットを使用した自動溶接ではスパッタがトーチに付着し、トラブルの原因となる。また、溶接継ぎ手の外観を損ねるため、スパッタの除去が必要になるなどの問題が生じる。近年では、電源の改良が進み、ナノ秒オーダーで溶接制御を行う電源や高度な電流波形制御を行う溶接電源⁵⁾、溶接ロボットと電源を一体化した溶接システムにより、スパッタの低減が実用化されている⁶⁾。さらにスパッタが生じない溶接ワイヤの開発も進められ^{7,8)}、従来のスパッタの多い炭酸ガスアーク溶接とは全く異なる新たな展開を示している。

溶接の能率を上げるためには短時間でなるべく多くのワイヤや母材を溶融することが有効である。GMA溶接の実用上の溶着速度(ワイヤが溶ける速度)は500Aの時には150~200g/min程度(1.6mmワイヤ)である。さらに大きな電流を使用すると溶着速度が大きくなり能率向上が期待できる。しかしながら、これより大きな電流を使用すると、ローティティンク移行と呼ばれる非常に不安定な溶滴移行となり、実用溶接としての使用は困難となる。このために、500A以上の大電流で、4.0mm以上のワイヤを使用する時には、図9(a)に示すように、シールドガスの代わりに粒状のフラックスを

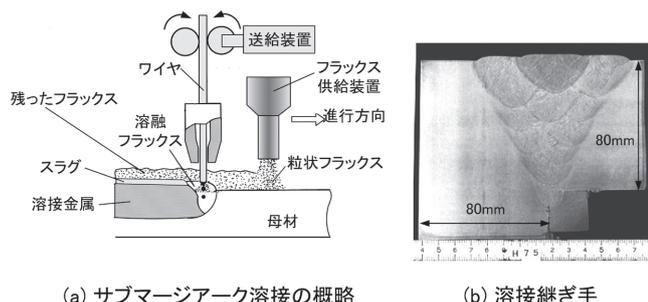


図9 サブマージアーク溶接

溶接部に直接供給し、フラックスの下で溶接を行うSAW溶接(Submerged Arc Welding)が使用される。これは、主に厚板の溶接に使用され(図9(b))、大型構造物の製作や大径管の生産などで使用される。SAW溶接では能率を上げるために、トーチを2~5本とした多電極SAWが使用される。近年、GMA溶接では、1つのトーチの中に2つの溶接ワイヤ(1つのトーチ内にワイヤ供給口を2個持つ)を送給し、おのこの電極に電流を流すタンデムGMA溶接⁹⁾も使用されるようになり、アーク溶接の高性能化・高効率化が大きく進められている。

(3) 非消費電極式溶接 (GTAW: Gas Tungsten Arc Welding)

非消費電極式溶接は、電極にタングステンを使用し、母材とタングステン電極の間でアークを出して溶接を行うもので、GTA溶接(Gas Tungsten Arc welding)または、TIG溶接(Tungsten Inert Gas arc welding)と呼ばれる。この溶接法は、図10に示すようにシールドガスにArガスを使用し(Heも使用されるが、日本では高価なのであまり使用されない)、必要に応じて溶加棒を加える。電極の消耗を伴わないのでアークは非常に安定であり、欠陥がほとんど無い高品質な溶接継ぎ手作成が可能となる。さらに、低入熱での溶接も可能となるので、薄板の溶接や非鉄材にも多く使用される。継ぎ手性能が優れているのがこの溶接法の最大の利点であるが、タングステン電極の溶融を防ぐために、大電流での溶接が困難となるので、溶接能率はGMA溶接ほど大きくならない。しかし、品質や性能が要求される構造物の継ぎ手やパイプの配管溶接などでは多く使用されている。

(4) 電子ビーム溶接 (EBW: Electron Beam Welding)

熱源としてアークよりもエネルギー密度の高い熱源を使用すると、入熱範囲を狭くした溶接が可能となる。高エネルギー密度熱源としては、電子ビームやレーザーが使用され、それぞれ電子ビーム溶接や、レーザー溶接が実用化されている。

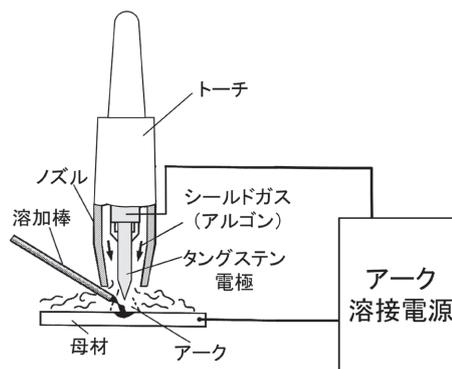


図10 非消費電極式溶接 (GTA溶接)

レーザー溶接については、本入門講座シリーズで詳細が述べられる予定なのでここでは省略する。

電子ビーム溶接は、図11 (a) に示すように電子銃、電子線の制御部 (集束レンズ、偏光コイルなど)、被溶接物を入れる真空室と真空排気系から構成される。電子線を被溶接物に当てるためには高真空環境が必要となるが、熱源を集中して狭くできるので、溶融部はアーク溶接よりも大幅に狭くすることができる。アーク溶接法では変形が見られ、図11 (b) では板の片側が浮き上がっているが、電子ビーム溶接の継ぎ手は平坦で溶接変形はほとんど認められない。母材については高真空中で溶接するので、酸化はもちろん他の不純物元素などの混入が生じないのでアーク溶接が困難な材料などに使用される。このように電子ビーム溶接は、アーク溶接に無い特徴を持ち初期から研究開発が行われ、図11 (c) に示すように1960年に電子ビーム溶接の国産1号機が作成された。当時の装置は、電子銃の容量も小さく真空室も大きくはないが、現在では電子銃の容量も大きく大型の真空室での溶接が行われている。

求められ、各種の高エネルギー溶接法が適用される。溶接品質に関しては、多くの場合、溶接継ぎ手は母材よりも優れた特性を持つことが少なくなる。これは、溶接では熱源を使用し溶融金属を短時間で形成し急速に凝固させるので、局所的に急速な熱サイクルと歪み履歴を伴い、溶接金属部やそれに隣接する熱影響部 (HAZ) では組織変化が生じるためである。しかし、構造体製作では溶接部に同質特性や同一強度といった性能が求められ、溶接材料、母材、溶接施工法について多くの開発が行われてきた。実際の溶接施工では、溶接工程だけではなく、関連する各種工程 (母材管理、溶接材料管理、溶接機器や電源の管理、開先形状管理、予熱、後熱、変形矯正、補修、各種試験検査) も重要である。そのため要求された溶接品質を満足するための溶接施工要領がJISで規定されており、溶接施工要領書 (WPS: Welding Procedure Specification) に基づいて、管理された状態で溶接施工が行われる。この溶接施工要領書には、継ぎ手の溶接品質に影響を与える因子が記載されており溶接管理技術者により管理される (JIS Z3421-1-2003)。継ぎ手の溶接品質に影響を与える因子としては、材料 (母材) の規格、板厚、溶接材料の種類と規格、シールドガスの種類と混合比、継ぎ手の種類、開先形状、溶接姿勢、溶接条件、予熱温度、後熱温度、電極数などが挙げられる。この施工要領書が正しいことを確認するために、溶接施工試験 (WPQT: Welding Procedure Qualification Test) として、引っ張り試験、曲げ試験、衝撃試験、マクロ/ミクロ試験、硬さ試験が行われ、これらの試験片の採取要領もJISで決められている (JIS Z3422)。溶接作業についてもJISに定める試験方法と判定基準に基づき、(社) 日本溶接協会や、(社) 軽金属溶接構造協会等で技能認定が行われ、管理された技能による溶接が行われている。また、各種構造物にあわせた各種規格も整備され、法律に基づいた規格も数多くある。例えば、压力容器関係規格 (労働安全衛生法)、発電設備 (電気事業法)、石油タンク (消防法) などが挙げられる。海外では、ASME (アメリカ機械学会)、API (アメリカ石油学会)、ロイド (船舶) などが有名で、実際の構造物はこれらの規格に則って溶接施工される。構造物の大型化や特殊な用途に対しては、個別に溶接施工試験等も実施され、溶接継ぎ手に関しては十分な安全性と信頼性を確保して製作が行われる。

3 溶接施工法の管理

ここで紹介したアーク溶接は鋼構造物全般で広く使用されている。近年、超大型インフラ構造物が製作され、高さ600mを超えるタワー (東京スカイツリー 634m) や、東京国際空港滑走路 (栈橋部面積520000m²)、東京港臨海大橋等が建造されている¹⁰。これらの構造物では、高エネルギーで高品質な溶接が

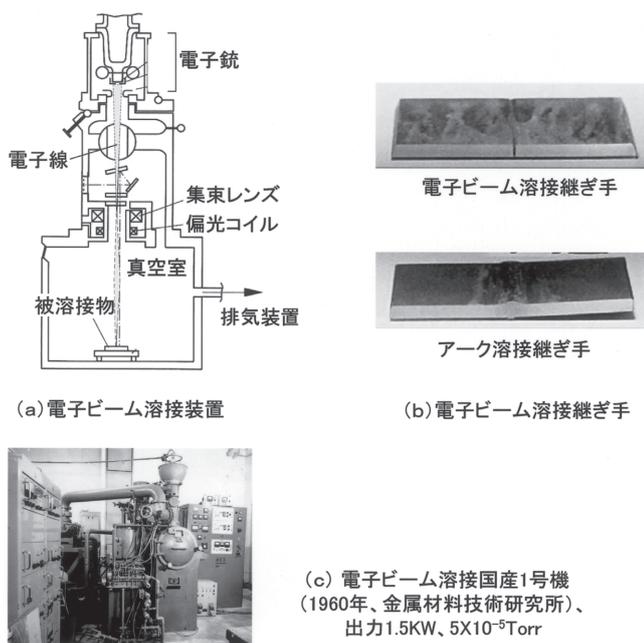


図11 電子ビーム溶接

4 まとめ

実用構造物の製作には、接合技術が必要であり、溶接は材料とともに進歩してきた。そしてその中でアーク溶接が多く使用されている。アーク溶接以外にも本入門講座シリーズでは各種の優れた接合技術が紹介されるのでご参照いただきたい。

アーク溶接は技量が必要な職人技と言われてきたが、管理された状態で品質が変わらない溶接継ぎ手が安定的に作成されるようになってきた。さらに、近年発展してきた計測技術やコンピュータによる解析技術により、アーク溶接現象の詳細が解明されつつある。アーク溶接は、溶融、熱伝導、凝固、熱による変形、力学などいろいろな分野の知識を必要とし、サイエンスとしての溶接技術の発達と安心安全を保障する構造化技術としての発展を期待したいと思う¹¹⁾。

参考文献

- 1) J.E.Lancaster : The physics of welding, Oxford Pergamon Press.
- 2) 須賀唯知 : まてりあ, 35 (1996) , 496-500.
- 3) シンポジウム : 溶接技術イノベーションのシナリオー NEDO 「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基板研究開発」プロジェクトからー, 溶接学会全国大会講演概要, 84 (2009) , S1-S37.
- 4) S.Ueguri, K.Hara and H.Komura : Welding Journal, 64, 8 (1985) , 242s-250s.
- 5) 井出章博, 西坂大志, 恵良哲生, 山口耕作, 上園哲郎, 上山智之 : 溶接学会全国大会講演概要, 88 (2011) , F3-F10.
- 6) 藤原潤司 : 溶接技術, 59, 2 (2011) , 51-56.
- 7) 山崎圭, 鈴木励一, 清水弘之, 興石房樹 : 溶接学会全国大会講演概要, 88 (2011), F11-F16.
- 8) 片岡時彦, 池田倫生, 小野守章, 安田功一, 平田好則 : 溶接学会全国大会講演概要, 84 (2009), F11-F16.
- 9) 塩崎秀男, 恵良哲生, 上園哲郎, 上山智之 : 溶接技術, 57, 5 (2009) , 95-98.
- 10) シンポジウム : 超大型インフラ構造物とその溶接, 溶接学会全国大会講演概要, 88 (2011) , S1-S48.
- 11) 溶接・接合技術のアカデミックロードマップ : 溶接学会誌, 79, 1 (2010) , 58-95.

(2011年5月19日受付)