

展 望

溶 接 技 術 の 展 望 と 将 来*

稲 垣 道 夫**

Prospects of Welding Technology

Michio INAGAKI

1. はじめに

溶接技術の展望と将来を述べるにあたって、まず現代の技術革新の方向と溶接技術の位置づけを考えなければならない。つぎに溶接技術の未来像のとらえ方に関する態度を明確にしておく必要がある。

その上で、溶接技術の方向づけとして、溶接エネルギーの問題、材料の問題、溶接構造物製作上の問題およびこれらの問題から集約される溶接生産における無人化の問題に言及していきたいと思う。

1.1 溶接技術の位置づけ

溶接技術は表1に示すように、基本的には溶接工学があり、換言すれば溶接現象の解明があり、実用的には溶接構造物の製作にあたっての一連の工程がある。

溶接工学は材料、エネルギー、力学の方面に分けられ、溶接の各種現象の解明により、材料と溶接法の開発および継手の精度と強度の向上を計らなければならない。この場合溶接工学をいちじるしく発展させるためには、溶接現象解明のための応用的科学が大切であり、さらにさかのぼって共通の基礎的科学すなわち物理、化学、数学の理解が大切である。昨今の技術革新の時代では、基礎的科学を身につけ、さらに革新技術を導入する才能がとくに要求される場所である。

実際の溶接構造物の製作にあたっては、生産性の向上をはかるために労働、資本、原材料の各生産性を分析し合理的かつ経済的な溶接の究明が必要である。その具体的な方策として、能率化、省力化、原価低減、品質の向上を目ざし、各応用分野における設計、施工、検査管理の方式および使用性能の確保について検討されなければならない。そして技術の改善および新技術の導入を積極的に進めて行かなければならない。かくして、溶接技術の発展には、溶接工学とその実用化を短期間に密着させることが大きな課題である。

以上のように、溶接技術は溶接構造物の製作における縦の工程の重要な技術であると同時に各応用分野と横に広く関連した重要な加工技術である。すなわち、溶接技

術はこれらの縦横に織りなす交点に立つ技術で、施工会社はもちろん、材料メーカーおよびユーザも見過ごしえない重要な技術である。溶接技術は科学技術の進歩を吸収して成長するとともに、各応用分野の技術革新のいな手としてその進歩の鍵を握るものといつても過言ではないと考える¹⁾²⁾。

1.2 技術革新と溶接技術

現代の技術革新は「物質」と「エネルギー」の創造に新たに「情報」が加わり、情報革命時代として特徴づけられている。溶接技術もこれら「物質」、「エネルギー」および「情報」に関する3方面の科学技術にささえられて進歩している。

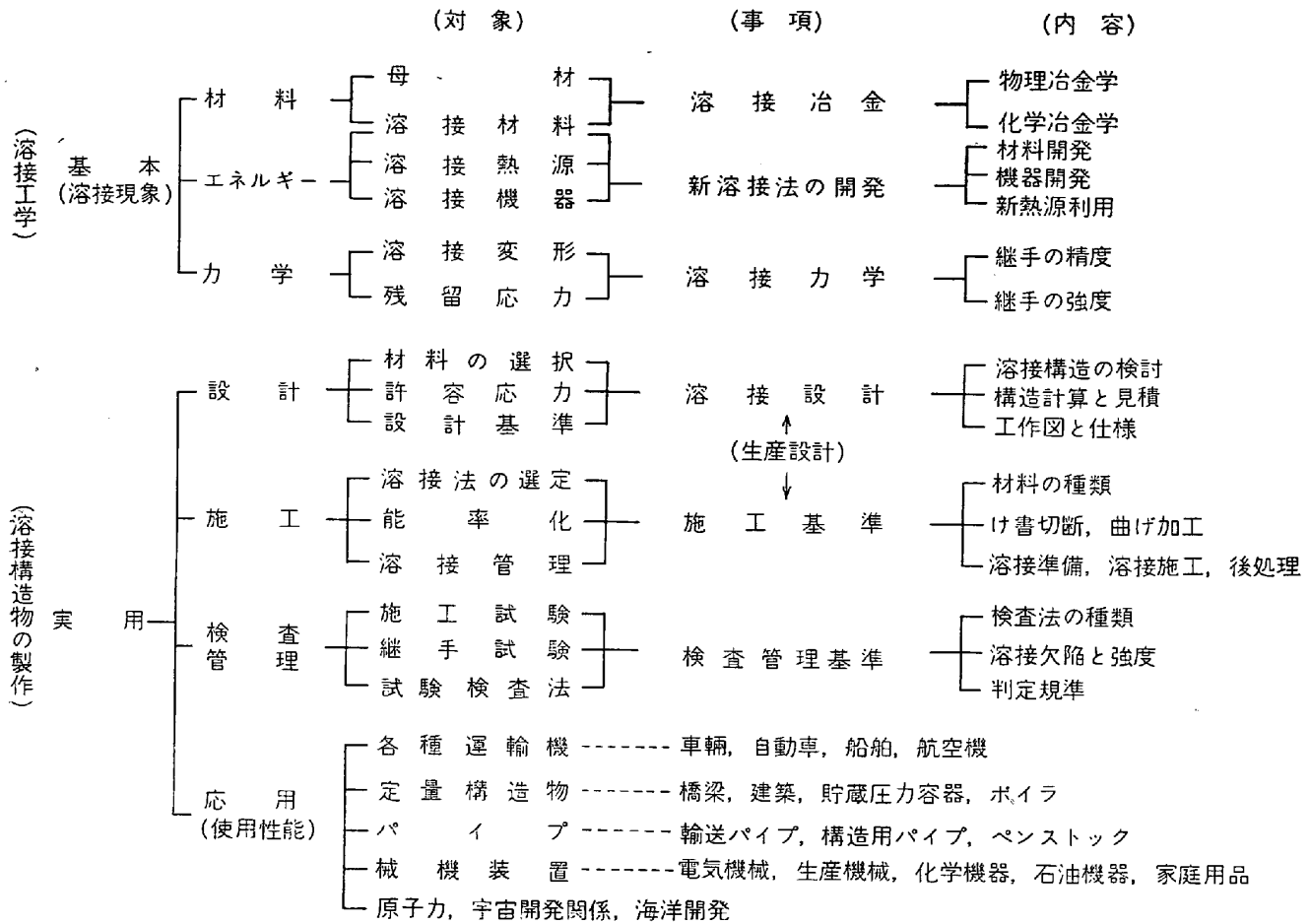
「物質」に関する技術革新の典型的・代表的なものとしては、分子工学があげられる。物質の認識は、巨視的な物理的あるいは化学的現象に関する性質と微視的構造に基づいているが、近年とくに化合物を対象として、その性質を分子構造に基づいて理解する立場が強調されるようになり、これを分子科学と呼びまたこれを工業的に利用しようとする学問を分子工学と呼ぶようになった。物質の性質はその微視的構造に起因し、物質の微視的構造は温度や圧力などの条件によつて変化する。たとえば黒鉛を 5×10^4 気圧以上に加圧し、 $1200 \sim 2400^\circ\text{C}$ に加熱することによりダイヤモンドを得ることができるが、実際にはその変化を促進させるために適当な金属を触媒として用いる。分子工学のもつともはなばなしい成果は、有機合成化学工業に見られる。いまや所望の物質をまったく人工的に作りだそうとする努力は、これらの化成品を一つの頂点として、まさに人類の歴史が石器時代から金属の時代を経て有機合成物の時代をつくるかの感がある。ここでわれわれは、分子科学と分子工学の技術革新によつてすでに材料を期待し探す期間は過ぎて、予定し創造する時代に入っていることに気づく。

「エネルギー」に関する技術革新の典型的・代表的な

* 昭和45年10月6日受付 (依頼展望)

** 金属材料技術研究所 工博

表1 溶接技術の構成



ものとしては、原子力があげられる。これまで人類が地球上において利用しているエネルギーは、石炭や石油およびガスなどの燃焼熱によるいわゆる化学的なエネルギーおよび水力による機械的なエネルギーであるが、原子力は物質をつくっている基本的な粒子である原子核の結合のエネルギーを利用する画期的なものである。化学的なエネルギーにおいては、原子核は変化しないでその外を回っている電子が結びついたり離れたりする化学反応によつて発生する熱を利用するものであるのに対して、原子核反応のエネルギーは原子核をつくっている陽子や中性子が結びついたり離れたりするときに発生するけた違い（約 10^6 倍）の熱を利用するものである。太陽の熱は実は原子核反応によつて生ずるエネルギーであると考えられており、われわれはこれを水力などとして間接に利用しているが、原子核反応を地球上でわれわれが直接利用するには幾多の困難な問題があつた。これはまず核分裂反応の確認から始まり、核分裂の連鎖反応を持続させることと制御することが問題であつた。原子力の平和利用の形としては、原子力発電や原子力船のほか放射線の利用や多目的熱源などがあるが、これの実用化にあつては、原子力に関する科学技術の研究開発とともに安全性の確保が重要である。このため、総合的な組織と技

術が必要であり、溶接技術も原子炉の製作に必須の生産技術である。

なお原子核エネルギーの利用に核融合が考えられる。上述の核分裂反応は中性子を使えば常温でも持続できるが、別の方法として $1\sim 10$ 億 $^{\circ}\text{C}$ という超高温を実現することができれば、一般の原子核反応が持続される。水素爆弾はこの核融合反応を利用した恐るべき破壊力をもつエネルギーであるが、これを平和的に利用するには反応の速さを制御しなければならぬ。核融合反応ではその制御方法が大きな研究課題である。原子力の利用は、人類の幸福と生活の向上にあるが、その取り扱いをあやまると人類の破滅あるいは安全をおびやかすものとなるので、政治的ならびに社会的な重大問題として解決していかなければならない。

なお、物質やエネルギーの状態を人工的に変換させるための共通の問題として、高温・高圧の科学技術が発達している。「情報」に関する技術革新の典型的・代表的なものとしては、電子技術があげられる。電子技術あるいはエレクトロニクスといわれるのは、真空管、トランジスタなどを電子計算機や電子頭脳、それに自動制御や生産機械の自動化などに利用することである。このような電子計算機で代表されるエレクトロニクスは現代の情報

革命時代の立役者である。世界は物質を中心とする時代からエネルギーを中心とする時代に進み、現代は「情報」という概念が主役を演ずる時代となつたともいわれる。電子計算機は従来人間の頭脳がある程度やつていた情報処理を、より正確かつ迅速に自動的に行なう機械である。この情報処理の自動化は、生産工程の能率化、無人化という形をとっている。また科学技術計算や事務処理の自動化、さらに事業の管理や経営研究 (operation research) の分野まで広範に活用されつつある。

たとえば、機械加工、ガス切断加工、溶接加工などの生産工程において数値制御、フィードバック制御あるいはシーケンス制御などによつて複雑な加工の自動化はかかっている。また石油精製、製鉄製鋼、化学、セメント、ガスなどの装置工業において、所望の製品を得るために装置に適切な状態を与えること、物質やエネルギーの流れを制御することなどを、計算機制御によつてほとんど完全に遂行させている。最近ではさらに、動物の神経の働きの機構をまねようとする新しい研究分野としてバイオニクスというものが生まれ、学習の機能やパターン認識をもつ機械あるいはロボットをつくりうる可能性も考えられる。

最近量子エレクトロニクスと呼ばれる科学技術が生まれてきた。これは、原子あるいは分子を使つてエレクトロニクスのような仕事をさせるものである。真空管やトランジスタでは比較的周波数が低く波長が長い (センチ波やミリ波) の電波を発振したり増幅するのに有効であ

るが、原子・分子を使つて波長のきわめて短いマイクロ波や光を発振したり増幅する可能性が見つかった。これらの装置をレーザーおよび光レーザーといっている。光レーザーはレーザーとも呼び、ルビーを使つたものをルビーレーザー、ネオンや炭酸ガスなどを使つたものを一般に気体レーザーと呼ぶ。レーザー光の特徴は、波長・振動数が一定で方向性がよいことである。このため、出力は小さくてもエネルギーを著しく集中させることができる。レーザーの利用は、通信、スペクトル分析、光化学合成、精密切断加工、精密溶接などが考えられ、今後の発展が大きく期待される²⁾。

また最近では、気体などの流体を使つて電気回路のような仕事をさせる、いわゆるフルイディスクという科学技術も開発され、省力化のために各種の自動制御などたとえば工業用ロボットに適用されようとしている。

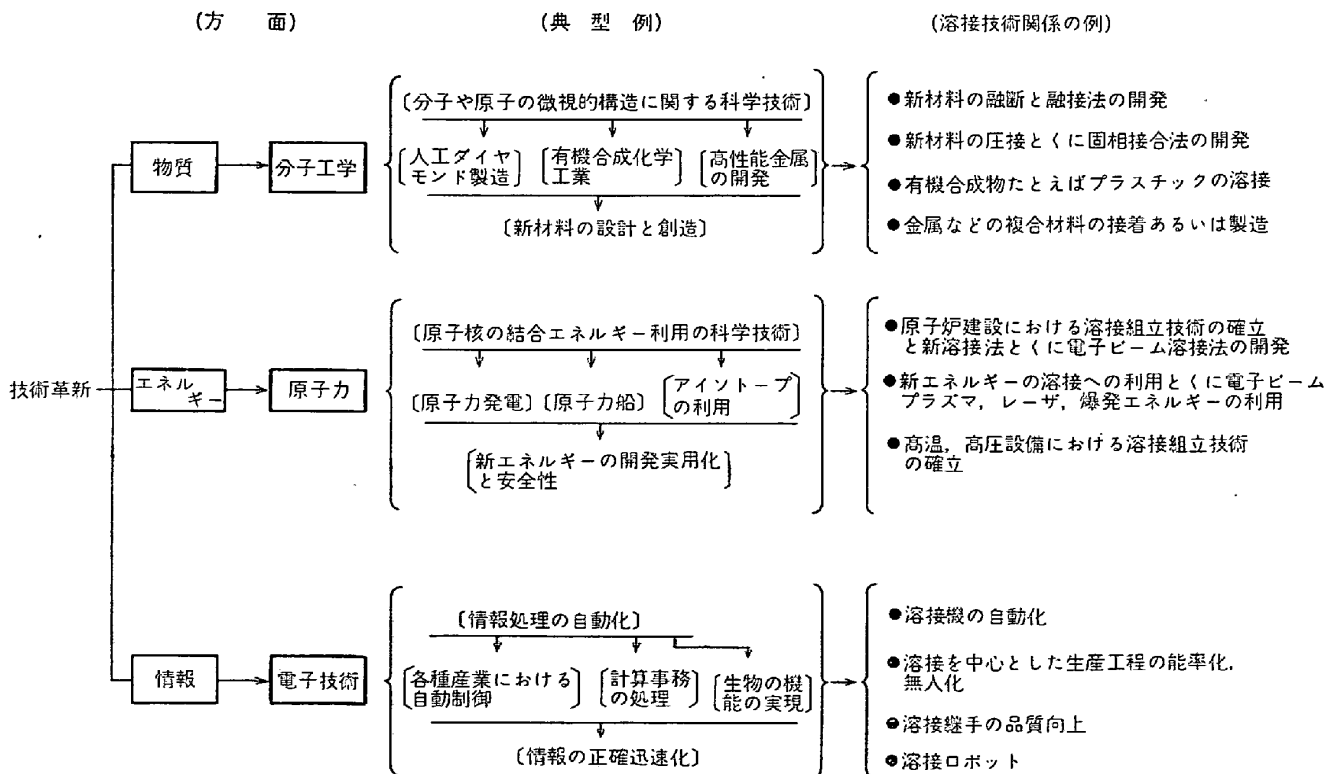
現代の技術革新の一般的特徴は、科学技術の基礎研究と実際の産業における技術が密接な形で結びついており、合目的的な新技術の開発実用化の期間が急速化していることである。また新技術の内容が広汎な規模をもち多様化しているため、システム技術の重要性が増大していることである。

以上で現代の技術革新について概観したが、この方向と溶接技術との関係を要約すると表2のようになる。

1.3 溶接技術の未来像

科学技術の未来像を画く場合、どのような方法によつてまたどの程度さきの将来をとらえるかによつて、その

表2 一般的な技術革新の方向と溶接技術との関係



内容が大きく変わってくる。まずもつとも現実的な方法として、過去の歴史的な背景を検討し現在を見てその因果関係のなりゆきとして現在を延長し将来を見る方法がある。この方法では、ここ数年先の近い将来を考えることは可能であろうが、現在のように急テンポの発達の時遠い未来を考えるには適当でない。

溶接技術のような場合には、現在の技術や計画にある程度将来の可能性も含めて、未来はこうあるべきだという積極的意欲に満ちた未来像でなければならない。また21世紀の溶接というような遠い未来については、ある程度現実から飛躍して奇抜なアイデアや発見を想定して未来像を空想することも必要であろう。ここでは主として、現代の技術革新の動向を基盤として、溶接技術の未来像を画いてみたい。

現代の溶接の歴史は、20世紀の当初1900年ごろの産業革命の時代にガス溶接や被覆アーク溶接が出現したことに始まり、1940年前後の大戦をきっかけとして各種の自動溶接法や抵抗溶接法が開発され、戦後1950年以降エレクトロスラグ溶接、炭酸ガスアーク溶接などが相ついで開発され、1960年ごろからこれらの溶接法を利用して溶接の能率化が積極的に進められると同時に、新エネルギー利用の各種溶接法やノンガスアーク溶接法が急ピッチに開発され実用化されつつある。

わが国は戦争中溶接技術の鎖国時代があり、諸外国に立ちおくれたが、1950年ごろから各種自動溶接法の導入があり、わが国自身も炭酸ガスアーク溶接法や片面自動溶接法などの開発実用化を行ない、ここ15年間にともかくにも世界の溶接技術の水準に到達した。現在では、米国、ソ連、日本、欧州諸国がほぼ一線上に並んで、溶接の未来に向かって突進している。わが国の溶接技術は、従来主として外国の技術を導入し、これを急速に消化し発展させていくことに特徴が見い出されるが、今後はわが国独自の手で基礎研究から開発実用化まで進めていかなければならない。このためには、人と組織と運営のあり方をこの際考え直してみる必要がある。

人については、溶接人口の質と量のバランスと技術革新に即した人材の育成が大切である。現代の技術革新には前述のように物質とエネルギー、それに情報の各方面があるが、溶接技術はまさしくこれらの2方面を総合した技術であるので、これらの広い知識を導入し活用する人材が必要である。とくに、溶接技術へのコンピュータの活用はきわめて重要で、その技術の習得は高級溶接技術者にとつてほとんど必須のものとなる。また溶接作業者は新技術に即した溶接作業の習熟と適切な断判力が要望される。組織としては、日本の溶接界および関連産業が総力を結集できるような体制が必要で、その運営にあたっては相互が一体となつて緊密に協調できることが望ましい。

ところで、わが国の溶接技術に関する産業構造は他の

諸外国に比べてかなりちがった形態をもっているようである。すなわち、日本では大手材料メーカーが溶接用母材を研究・製造するかたわら、直接溶接材料を研究・製造するかまたは大手材料メーカーが溶接材料を中心としたおもな研究を担当し、製造はその系列の溶接材料メーカーが担当している。いつぼう溶接機器の製造は、比較的小規模の独立した機器メーカーが行なっている。施工会社はユーザの要求による溶接構造物の種類や使用性能などに応じて、母材、溶接法、溶接材料、溶接機器を選択し、これらの組み合わせに適合した溶接工法を確立し溶接管理を行なっている。米国ならびに西欧諸国では、米国のリンデ (Linde) 社、エアコ (Airco) 社、リンカーン (Lincoln) 社、英国のBOC社、スウェーデンのエサブ (ESAB) 社、ベルギーのアーコス (Arcos) 社、スイスのエリコン (Elikon) 社などにみられるように、一般にはガスメーカーや機器メーカーが溶接材料を製造している場合が多い。ソ連ならびに東欧諸国では、中央集権的な国営の大研究所で溶接機材および施工法の一環した基礎・開発・実用の総合的研究を行ない、溶接構造物製作上の一連の設計・施工・検査・管理関係のそれぞれについての標準化と仕様書の作成まで行ない、これまた国営の溶接機材メーカー、施工会社がこれらの製造を担当する仕組みになっている。

以上のように、各国で溶接技術に関する産業機構が異なっており、そのうちのいずれがよいかについては議論の別れるところであろうが、いずれにしても将来の溶接技術の開発には各分野の総合力が有効に発揮できる姿でなければならない。とくに、わが国では溶接機器の研究・製造の面がやや弱体で、これを解決するために施工会社や大手メーカーが積極的に乗り出す時機が到来している。溶接機器の概念は、将来溶接個所まわりの溶接作業に直接関与する比較的小形の機器に限定する傾向が強かつたが、現代および将来においては、溶接を中心とした一連の生産工程を有機的に結びつけた大形溶接プラントとして把握しなければならない。

たとえば将来の造船業の生産形態としては、現在の自動車工業に見られるような流れ作業式の自動化、すなわち建設工業的な工業から製造業的な工業への転換が計られており、その手段として部材精度向上を基盤として組立諸工程の完全自動化あるいは省力化を推進している。この場合、生産形態の総合的な施策と同時に各生産工程における専門化が強調され、さらにこのための標準化が要求されてくる。かくして施工会社と材料メーカーの役が問題になつてくる。こうしたことは、ただ単に造船業の生産技術のみにとどまらず、社会・経済・労働などの広い観点に立つた産業構造の開発再編成にもつながる重大な問題である。この一つの現われが、鉄鋼会社の主宰する鋼材流通加工センタであると考えられる。しかしこの運営については、施工会社ならびにユーザとの緊密

な連けいによつて集約化されなければならない。

溶接技術は溶接しようとする母材が対象であり、これを接合するためのエネルギーが必要である。溶接の理想的なすがたは、できるだけ少ない材料の消費と少ないエネルギーで、速く完全に接合することである。そこで以下材料の問題、溶接エネルギーおよび溶接法の問題、溶接構造物製作上の問題について順次話を進めていきたい。しかしこれらの問題は単独のものでなく、相互に関連したものであるので、随所で相互の問題をとりあげて行かなければならない。

2. 材 料 の 問 題

材料を溶接の立場から見ると、母材と溶接材料に分けられる。母材の要素としては、材質、厚さ、形状がありこれらの組み合わせによつて多種多様の母材がある。材質を大別して結晶体と非結晶体に分けられ、また化学的物質を大別するとき、無機物質と有機物質に分けられる。結晶体は金属、合金、黒鉛、金属化合物たとえばセラミックを含み、非結晶体は無機ガラスや有機プラスチックを含む。従来溶接用母材の材質としては、鉄鋼を中心にアルミニウム、銅、チタンなどの非鉄金属および合金があり、黒鉛やセラミックもある程度溶接が可能である。ガラスはガス溶接と同じような方法で加工され、プラスチックは溶接用母材または接着剤として注目を集めている。

材料開発の重要な方向として、溶接性良好な母材の開発がある。このうち、溶接用高張力鋼、溶接用アルミ合金およびチタン合金、さらに溶接用プラスチックなどは特筆すべきものであろう。しかし、新しい構造物からの要求は、溶接性ばかりでなく、強度の向上、耐食性、異種材質の組み合わせ材として複合材料あるいは合成材料などへと発展している。これらの要求を同時に満足する材料の開発は、製造技術の発達によりある程度可能であるが、技術上または経済上溶接性などが犠牲にされる場合も多い。これに対処して、溶接法の開発設計と施工法の改善が望まれるところである。この場合溶接構造物の設計を中介とした母材の選択と溶接工法の歩みよりの節点が問題である。

溶接材料には一般に、溶加材（溶接棒、溶接ワイヤ、ろう材、接着剤など）、フラックスおよびガス（シールドガス、燃料ガス、プラズマガス）などがある。これらについては、母材と溶接法に見合ったものの選択と開発が重要である。溶接法には融接、圧接、ろう接その他溶射や接着があるが、融接法および若干の圧接法は母材の一部を溶融凝固させて接合する方法で、このため溶接部には母材と性質の異なった溶接金属と母材の熱影響部ができる。しかし、これらの溶接法の利点は、母材の接合面の処理の影響を受けることが比較的少なく、材料の厚さや形状、継手形式に対して広く順応できることである。

いつぼう、母材の一部を溶融しないで接合する圧接法、ろう接、溶射、接着などでは母材の接合面の状態に大いに影響される。欠点があり、また比較的せまい範囲の材料の厚さや形状、継手形式に対して適用されるにすぎない。したがって、このような接合法では材料の接合すべき面の処理が重要である。材料の接合面を清浄にするには、ワイヤブラシやサンドブラストあるいは摩擦などによる機械的な方法、化学薬品を用いて行なう化学的処理法、イオンボンバードのように棒プラスの TIG アークを用いアルゴンガスイオンを母材表面に衝突させる電気的処理法あるいは電気化学的処理法などがあるが、将来は接合面の前処理方法がさらに発達するであろう。

2.1 構造用鋼

近年の構造用鋼の発達の傾向は、つぎの4つに分けられる。

- (1) 汎用鋼の範囲の拡大
- (2) 強度の向上
- (3) 板厚の増大
- (4) 使途別鋼材の開発

(1) 汎用鋼の範囲の拡大については、一般構造用の SS 材 (JIS G3101) および溶接構造用の SM 材 (JIS G 3106) が 1966 年大幅に改正され、SS 材では HT55 級の SS55 が新設され、SM 材では HT60 級の SM58 まで含められた。しかしこれらの汎用鋼といえども、溶接上問題がないわけではない。溶接構造物が大型化した複雑になると、厚板の需要が多くなりまた継手様式と負荷状態が多様化し思わぬミスをおかすことがある。たとえば、SS 材や厚板の場合には施工上割れ防止のために予熱を考慮しなければならないときがあり、SM53 級の鋼材の T 継手におけるすみ肉溶接のヒールクラック (heel crack) は最近明らかにされた問題である²⁾。(写真1参照) また板厚方向に大きな負荷をうけるような溶接継手ではラメラティア (lamellar tear) の発生する問題もある。(写真2参照) したがって、汎用鋼でも乱用することは禁物であり、また非調質鋼で耐力をあげるために安価な Mn, Si, V, Nb などが添加されているが、冶金的にとくに Si, V, Nb などの挙動について十分深く検討すべき問題が残されている²⁵⁾。

(2) 強度の向上については、高張力鋼および超高張力鋼あるいは超強力鋼が開発実用化されつつあり、破壊じん性 (fracture toughness) や溶接性の問題が大きい⁶⁾。わが国の高張力鋼の広範な規格は、WES-I35 および HPIS-B101 の HW 規格として 1964 年に作成され、耐力基準で HW36 (HT 55級) から HW90 (HT 100 級) まで 9 鋼種が規定され、わが国の高張力鋼の開発実用化に大きな貢献をしていると考えられる。最近 (1970) ではこの規格の改正を進めており、HW 鋼の溶接性の規定の再検討と斜め Y 開先拘束割れ試験における割れ感受性指示数 P_c 値⁷⁾の導入について検討を行なっている。

いつぼう、HW規格と同時期に作成された「低温構造用、鋼板判定規準」(LT規格)もこのほど改正が行なわれ

た。このおもな改正点は、適用最低使用温度を従来の -170°C から -196°C まで拡大し、9%Ni鋼をも包含したことである。そのほか、最低使用温度が約 -100°C 付近より低温側でVシャルピー試験温度が若干高温側に移行して緩和された。したがって今回のLT規格(WES-136-1970およびHPIS-105)では、適用範囲としては板厚が6mm以上50mm以下、最低使用温度が 0°C 以下 -196°C 以上となつた。

切欠じん性や溶接性を確保するために、化学成分を調整した焼入れ焼もどしの調質を施したり、あるいは各種の特殊な処理たとえばIN処理、DM処理、MB処理などが開発され実用化されている。常用の溶接構造物に対する商用鋼としては、引張強さが 100 kg/mm^2 級(HT100)程度の中厚板までと考えられるが、宇宙開発、艦艇や海洋開発用潜水船などに対してはHT100級、HT150級さらにHT200級までのいわゆる超高張力鋼あるいは超強力鋼で比較的薄い鋼板が開発されつつある。

(3) 板厚の増大については、近年溶接構造物が大形化する傾向にあり、また従来の鑄鍛鋼品に代わつて厚肉圧延材によつて溶接組立てされることも多くなり、このため鋼板は厚くなりまた板厚低減のため高張力鋼が採用される傾向になつている。たとえば、船舶とくにタンカーでは50万tあるいはそれ以上のものの建造が実現しようとしており、HT50級で厚さ50mm以上の鋼板を必要とするようになった。長大橋でもHT50~HT60級で厚さ50mm以上の鋼板が多く使われ、またHT80級の使用が検討されている。高層建築でも同様であり、ニューヨークの世界貿易センタービルの場合には100mmを超えるHT60やHT80級まで使用されている。球形タ



写真1 JIS SM53級鋼材T形すみ肉継手におけるヒールクラックの例

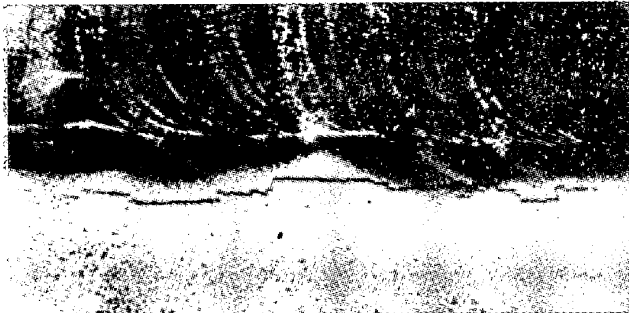
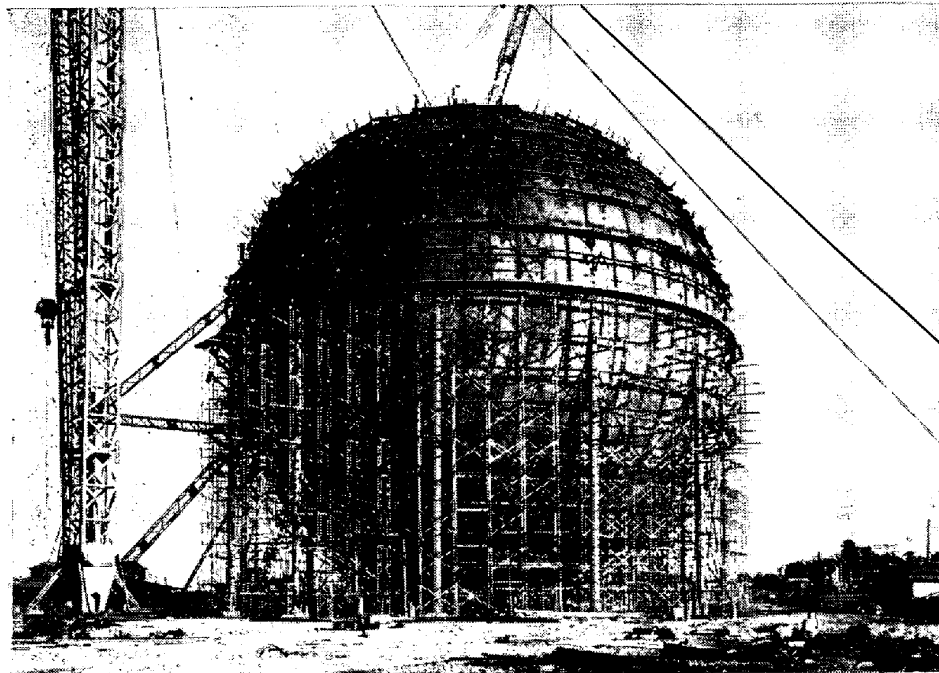


写真2 構造用鋼板の圧延面に直角方向に高い拘束応力を受けたT形すみ肉継手におけるラメラティアの代表例



内 容 物：都市ガス
 設計圧力： $5.5\text{ kg/cm}^2\text{G}$
 設計温度：常温
 幾何容積： $20\,000\text{ m}^3$
 球 内 径： $33\,680\text{ mm}$
 球中心高さ： $18\,000\text{ mm}$
 脚 柱：上部 WEL-TEN 80C(8mm t)
 下部 SS41 (8 mm t)
 外径 $500\text{ mm}\phi \times 12$ 本
 適用法規：圧力容器構造規格、
 建築基準法

写真3 WEL-TEN 80C 製 $110\,000\text{ Nm}^3$ 都市ガス球形タンクの建設現場 (石川島播磨重工(株))

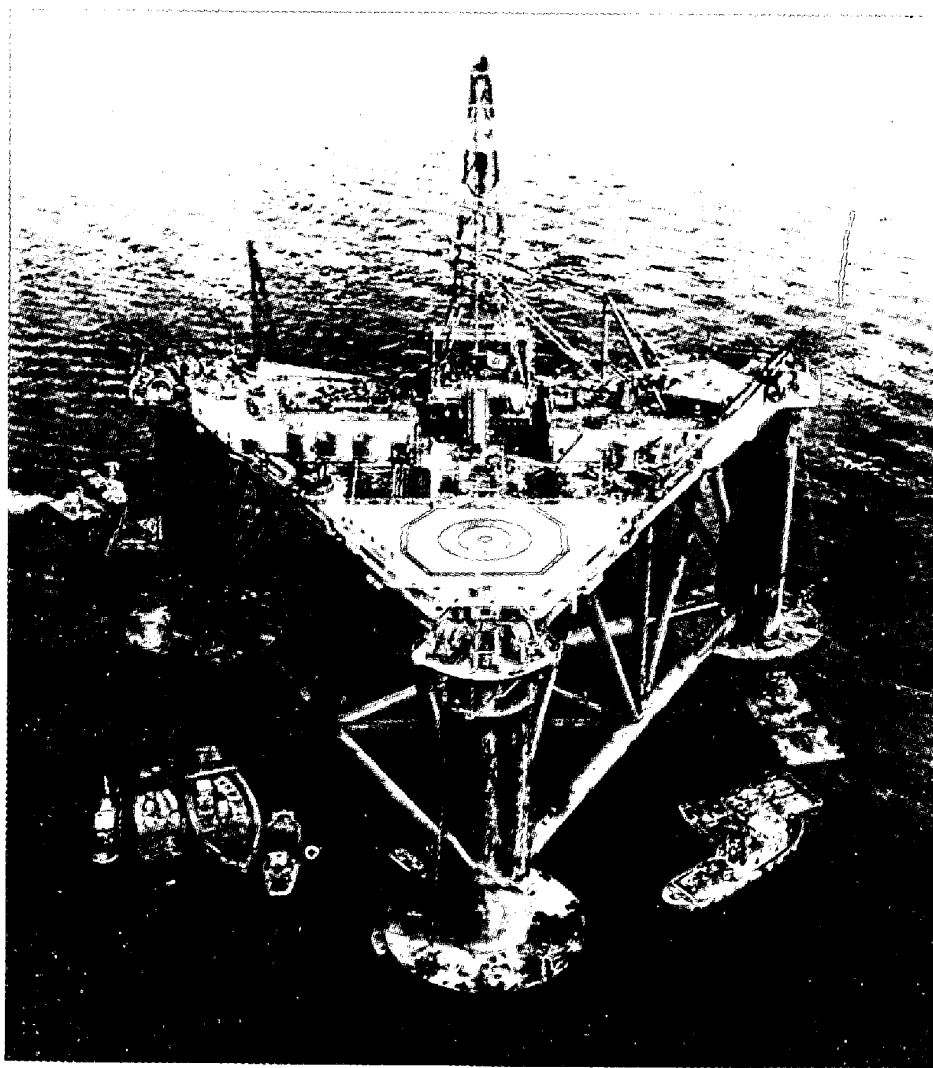


写真 4 海底油田掘削用半潜水式移動掘削装置 (SEDCO 135 形, 三菱重工(株))
使用鋼材: SS 41 および SM 50, 総重量: 8 500 t

ンクでは、その内容物が硫化物腐食割れを起こさないような高強度の鋼材の使用がとくに有利で、HT80 級の高張力鋼が古くからかなり多く使われており(写真 2 参照) HT100 級の実績もある⁹⁾。水力発電所あるいは揚水形発電所のペンストックでは、HT70~HT80 級で厚さ 50 mm 程度の高張力鋼が必要で実用化されている。また発電用原子炉の圧力容器には、150~200 mm の超厚肉の HT50~HT60 級高張力鋼が使われており、海洋構造物には現在各国の船級協会規格鋼材や低温用鋼材が多く使用されているが、しだいに高張力鋼の使用も多くなってくるであろう¹⁰⁾(写真 4 参照)。将来とくに 3 000 m 以上の深海用には HT100~HT150 級の厚板が必要であるといわれている。

一般に強度が高くなるとぜい性破壊を起こす限界切欠き長さが小さくなる傾向にあり、高強度でかつ厚肉の鋼材や溶接構造物はぜい性破壊を起こしやすいので問題である。とくにその溶接継手については、溶接金属と母材熱影響部の境界のいわゆるボンダ付近のぜい化が問題で

この付近には溶接割れやアンダカットなどの溶接欠陥が集中しやすく、また継手の溶接角変形によりトウ部に応力集中が起こりやすいので、その部分のぜい性破壊には十分注意しなければならない。ボンダ付近のぜい化防止対策としては、母材熱影響部がぜい化しないような鋼材の開発と溶接法あるいは施工法の開発が大切である。溶接施工上の立場からは、溶接継手の品質の向上とともに作業能率が重要で、この能率向上のため大入熱自動溶接たとえばエレクトロスラグ溶接やエレクトロガス溶接あるいは多電極サブマージアーク溶接などが開発実用化されているが、このような大入熱に対しても溶接部がぜい化したり強度低下を起こさないような鋼材が望ましい。すなわち、安価で酷使に耐える鋼材の開発が期待されるが、むずかしい問題ではある。しかし一般には高強度の鋼材になると溶接性が悪くなる傾向にあるので、溶接構造物の高度の要求に対しては鋼材がある程度高価になつても、きびしく調整され標準化された鋼材とこれにマッチした溶接施工法と溶接条件が望ましいことがある。こ

のような場合には、鋼材の規格はシビアになり、溶接施工は十分管理されなければならない。したがって、材料メーカーと施工会社との技術的に緊密な連繋が必要である。

ところで、引張強さが約 175 kg/mm² 以上になると、従来の低合金鋼系では破壊じん性の点で無理があるようで、Ni を約 9% 以上含む中・高合金鋼が開発されている。米国では低合金鋼系から出発した超高張力鋼として US Steel Co. がシリーズの HY150 および HY200 などを開発しており、HY200 になると Ni が約 10% も含む成分 (0.1C-10Ni-1~2Cr-1Mo-6~8Co) となつている。この HY シリーズの母材に対応する溶接金属を得ることはかなり困難な問題で、このため溶接法の選択と溶接材料の開発が行なわれている。アーク溶接法としては TIG 法が酸素の混入が少ないのもつともよい方法のようである。溶接材料としては、真空溶解によつて調製した極低酸素 (約 0.002% 程度) の溶接ワイヤがよいようである。図 1 はこのような溶接材料を用いた各種のアーク溶接法により溶着金属を作製した場合の衝撃値と降伏強さの関係を示した例である。これによると、降伏強さが 15×10⁴ psi (105 kg/mm²) 以上でかつ V ノッチシャルピー吸収エネルギーが 80° F (26.7°C) で 50 ft-lbs (6.9 kgm) 以上を有する溶着金属を得る溶接法は TIG 法以外にないことがわかる¹⁰⁾。

いつぼう、INCO 社が 18%Ni-8Co-5Mo 系などのマルエージング鋼 (HT200 級, C≤0.03%, Ni martensite) を開発して以来、この系統の鋼材の開発も盛んである。近年 Republic Steel Co. が medium carbon bainite の 9Ni-4Co-0.20C 系 (引張強さ 126 kg/mm²) や 9Ni-2Co-0.20C 系を開発し注目されている。わが国では低・

中合金鋼系としてたとえば IN 処理を施した 5Ni-0.5Cr-0.5Mo-0.08V-0.20C 系, HT150N), MB 鋼や PZ 鋼, また日本冶金の MA-164 (5Ni-12Co-13Cr-5Mo 系, HT170 級) などが開発されている。

超高張力鋼あるいは超強力鋼は強化方法として、焼入れ焼もどしあるいはベーナイト処理, 時効強化や固溶体強化あるいはオースフォーム法 (ausforming) などを取り入れている。マルエージング鋼などの母材は通常, 溶体化処理または焼なまし状態で成形加工後溶接され, そのあとで継手とともに強化時効処理を行なうが, ひずみの防止や後熱処理の方法がめんどうなので, できれば溶接のままの状態ですぐれた継手性能をもち, また後熱処理を行なうにしてもごく低温かつ短時間の簡単な処理によつて使用目的に耐える鋼材と溶接継手の開発が望まれる。

以上のように, 高級な溶接構造物に対しては材料メーカーと施工会社の技術的な領域の境界はなくなつてきており, 両者の技術の合体が必要になつてくる。

(4) 用途別鋼材としては, 使用条件に応じて低温切欠じん性を強調した低温用鋼, 高温性能とくに高温強度と耐クリープ性を重視した高温用鋼, 種々の内容物に対する耐食性, たとえば耐硫化物腐食割れ¹¹⁾性鋼, 高温高圧における耐水素性鋼¹²⁾, 風雨と公害あるいは海水に強い耐候性鋼あるいは耐海水性鋼, 金属間あるいは土岩に対する耐摩耗性鋼などが, それぞれ開発されており今後一層この傾向は強いと見られる。

また具体的な用途として圧力容器用, ボイラ用, 建築用, 電気機器用, 橋梁用, 自動車用, ロケット用, 原子炉用, 化学機器用などに分けられ規格においても用途別が要望される傾向が強い。現に, ボイラ用圧延鋼材や各種用途の鋼管などが JIS に規定されており, 近年新規に「圧力容器用鋼板」や「高圧ガス容器用鋼板」などが JIS 化された。また原子炉用鋼材の標準化が要望され JIS 化が進められている。

このように用途別鋼材の規格化が進められているが, この材質規格だけにとどまらず, 応用別に構造規格すなわち, 設計基準, 施工基準および検査管理基準など一連の標準化が要望される。これらには物質的な問題だけでなく, 技術者および管理者などの人材の問題も含まれる。

従来鋼材の製造には溶接技術はほとんど採用されず, せいぜいやむを得ぬ補修溶接程度であつたが, 最近では大電流の溶接方法が発達し, 鋼材の製造にもそれが採用されるようになった。エレクトロスラグ溶接またはエレクトロスラグ溶解がその代表的なものである。たとえば小形の鋼塊をエレクトロスラグ溶接によつて一体化して大形鋼塊とし, その後圧延, 熱処理を行ない鋼材を完成する。また複雑な形状の鍛鋼品や鋳鋼品をエレクトロスラグ溶接などによつて肉盛り成形する方法も実用化され

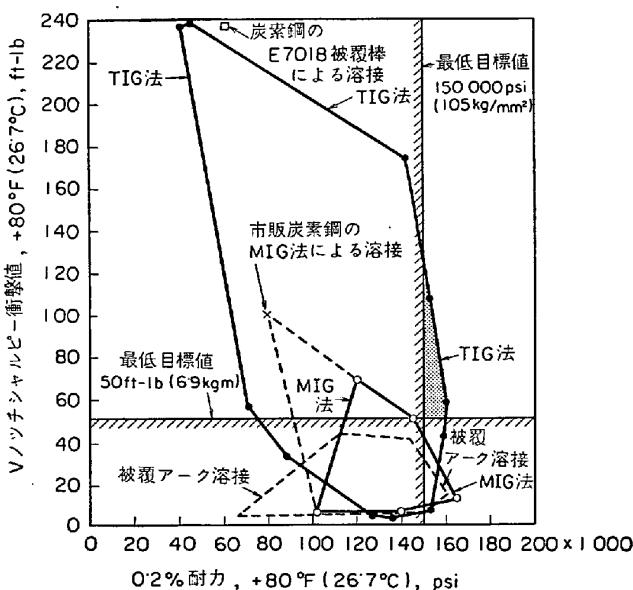


図 1 真空溶解した構造用鋼溶接棒およびワイヤによる溶着金属の衝撃値と降伏強さ(耐力)との関係

ている。さらにエレクトロスラグ溶解による大形鋼塊の製造や精製が行なわれている。

またエレクトロスラグ溶接とエレクトロスラグ溶解の中間的な母材を使わないで溶着金属だけでもつて製品を造形する、いわゆる「溶造法」も開発実用化されている。たとえば、JIS SB42 や ASTM A387 Gr. D または A542 ($2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼) に相当する材質をもつ圧力容器 (Multi-Welded Vessel) や従来石油化学における改質反応管 (Reformer Tube) としてよく用いられている ACI 規格の HK40 遠心鑄造管 ($0.4\text{C}-25\text{Cr}-21\text{Ni}$ 系) に相当する溶造管 (Weld Formed Tube) を製作した¹³⁾。溶造用素材としては、市販の比較的low級な薄鋼板を電極として使用し高品質の溶造材を得ることができ、また製造上の一連の品質管理が容易に行なえる利点がある。なお、溶造品は圧延鋼板による溶接品に比べて冶金的および形状的な不連続がなく、また異方性とくに板厚方向の強度や延性の低下がないので、構造物の負荷状態によつては、さらに有利な応用範囲が期待されるものと考えられる。

溶接構造の利点として、種々の寸法形状の部材が比較的簡単に組立てられることである。たとえば、建築用の H 形鋼は従来鉄鋼メーカーで多量に圧延生産されているがこれの大形のものでは溶接組立ての方が有利であり、鉄鋼メーカー自身が溶接組立てによる H 形鋼の生産を進めている。さらに複雑な形状の構造部材でも、これを標準化しユニット化して建築、橋梁あるいは造船などへの適用を計っている。

普通の鉄鋼の欠点として大気中で腐食されやすいことがあるが、このため各種の表面処理鋼板や異種材料とのクラッドが開発されている。薄鋼板はプレス加工しやすく、強度が高く丈夫であり、溶接しやすく塗装や表面処理がしやすいので、自動車、電気製品、家具、建材、缶類などに広く応用される。薄鋼板の溶接には、比較的小電流のアーカ溶接、ガス溶接、抵抗溶接、ろう接などが使われ、また新しい溶接法としてプラズマアーカ溶接、電子ビーム溶接、高周波溶接あるいは超音波溶接などが考えられる。薄鋼板の融接では一般に溶落ちとひずみが問題であり、これらの欠陥を防止しうる安定した薄板溶接法の開発が要望される。表面処理鋼板には亜鉛メッキ、すずメッキ、クロムメッキ、アルミメッキなどがあるが、これらの抵抗溶接では接合面の抵抗変化に対する溶接条件の設定が問題であり、アーカ溶接ではメッキ材の蒸発などが問題である。塗装したコート材は一般に溶接が困難で、これを解決する溶接法の開発が重要である¹⁴⁾。

航空宇宙関係では比重強度比の高い材料が要望され、薄板の超強力鋼、アルミ合金およびチタン合金などが競合するが、さらに超塑性の性質をもつ TRIP 鋼や超強力繊維材による複合材料などが開発されつつあり、これ

らの接合方法が問題である。また薄板の剛性を保つために、ハニカム構造の利用とその製作のための接合法が問題になる。

2.2 ステンレス鋼および耐熱鋼

ステンレス鋼の日本工業規格は JIS G4303~9 に規定され、耐熱鋼は JIS G4311~12 に規定されている。形状別製品規格になつている。ステンレス鋼および耐熱鋼の種類はきわめて多く、その選択が問題である。ステンレス鋼では SUS 27 がもつとも多く、用いられており、ついで SUS 32 および 13Cr, 18Cr 系の順によく用いられている。このほか耐食性や熱処理に対する安全性をとくに考慮した極低炭素の SUS 28 や SUS 33 などが用いられる。形状別では板材が圧倒的に多く、ついで管が多く用いられており、棒材や鑄鍛鋼品はあまり使用されていない。

ステンレス鋼は施工上の問題として、マルテンサイト系では低温割れ、オーステナイト系では高温割れがある。また使用時の問題点として、腐食、応力腐食割れ、腐食疲労、熱疲労などがある。このためステンレス鋼の開発も盛んで、たとえば米国の INCO 社では近年高温 $\text{H}_2\text{S}-\text{H}_2$ 雰囲気の腐食につよい Al 入りの 30Ni-20Cr-1~4 Al 系ステンレス鋼を開発しており、US Steel 社では応力腐食や高温酸化につよい 18Ni-18Cr-2Si 系鋼を開発している。わが国の日本金属工業(株)では耐海水熱交換器用として、25Cr-5Ni-1.5Mo 系の二相組織ステンレス鋼 NTKR-4 を開発実用化している。この NTKR-4 の溶接は普通のオーステナイトステンレス鋼とほぼ同様に取扱うことができ、予熱や後熱は不要で通常 TIG または被覆アーカ溶接法を用い入熱は極力少なくして施工することが望ましい¹⁵⁾。また最近、日新製鋼では高価な Ni を含まない 15Cr-10Mn-3Cu 系オーステナイトステンレス鋼を開発し実用化に乗り出した。

化学関係や原子力関係ではステンレス鋼の使用も多く、特殊な使用環境によつて多くの問題がある。わが国の JPDR 水冷却動力試験炉ではステンレスクラッド肉盛部のきれつの発生が問題になつたことがあり、水冷却形発電用原子炉の圧力容器の製作にあつて、ステンレス鋼肉盛用溶接材料や溶接法の選択および溶接後熱処理などの選定が重要である¹⁶⁾。また現在開発中の高速増殖炉には 40 mm 程度の厚板ステンレス鋼が使用され、この鋼材の製造と施工法が問題であり、また高温 (500~650°C) の液体ナトリウム中でのステンレス鋼およびその異材継手の挙動が問題になつている。

使用温度が 450~600°C の範囲では C-Mo 系や Cr-Mo 系の低合金耐熱鋼が使用され、またこの種の新しい鋼材として Cr-Mo-Nb 系や Cr-Mo-W 系などが開発されているが、600~750°C の温度になると Cr 系ステンレス鋼、Ni-Cr 系ステンレス鋼、析出硬化形ステンレス鋼、ステンレス系耐熱鋼、Cr-Ni-Fe 系合金や Cr-Ni-

Co-Fe系合金などが使用される。米国などでは種々のすぐれた耐熱鋼を開発しているが、わが国ではまだ安定した良好な品質の各種耐熱鋼があまり生産されていないようで、両国の差は需要の量に大きく影響されていると思われるが、今後一層の開発実用化が望まれるところである。溶接性としては、溶接金属や熱影響部の高温割れや熱疲労が問題になる。

2.3 非鉄金属

(1) 耐熱超合金その他

前述に引続いて、使用温度が800~1000°Cの高温用にはNi基のインコネル(Inconel)、ハステロイ(Hastelloy)系などの耐熱超合金や、Co基耐熱超合金が使われ、1000°C以上ではNb, Mo, W, Taなどの耐熱金属やまた金属と炭化物、硅化物、硼化物、あるいは金属間化合物などの分散物を組み合わせたいわゆる分散強化合金が考えられ、さらに非金属材料として黒鉛、サーメット、セラミックが採り上げられてくる。これらは一般にもろい性質のため溶接が困難であるが、雰囲気アーク溶接、電子ビーム溶接、特殊ろう接、固相接合(solid phase bonding)や拡散接合(diffusion bonding)、またこれら材料の粉末のプラズマ溶射が開発実用されつつある。

(2) アルミ合金

アルミ合金には非熱処理合金(2S, Al-Mg合金の52~56Sなど)と熱処理合金(析出硬化性のジュラルミン系42S, 75Sなど)に大別される。従来、非熱処理系のAl-Mg系合金(5000シリーズ)などが溶接用としてよく用いられているが、近年熱処理系のCuを含めぬAl-Zn-Mg系合金(7000シリーズ, 75S級)が脚光をあび、溶接構造用高力アルミ合金として開発実用化が進められている。この合金は引張強さが30~45 kg/mm²で加工性、耐食性および溶接性が良好であり、しかも時効硬化性の合金であるが、溶接後室温に放置するだけで溶接部の強度がほとんど元の強度まで回復する特性を有しているため、大形の溶接構造物用として注目されている。わが国では大手メーカー数社が独自に改良し市販しており、鉄道車両などに使用された実績をもっている。そのほか徒橋、ダンパカーボディ、プラットホーム、圧力容器など、その数量はともかくとして、応用範囲は各方面に及んでいる。しかしまだ安定した品質とはいえず、ことに溶接割れの問題があり、溶加材の開発とともに今後の改善が期待される。

アルミ合金の需要は近年急に増大し、建築、低温容器、コンテナ、圧力容器や配管など、薄板から厚板までまた各種の形状のものが広くかつ多く使用されているが、その溶接では一般にブローホールが発生しやすい。このブローホールの防止や他の異種材料との接合の問題も重要である。

なおマグネシウム合金は比強度が高いため、軽量化が

重視されるミサイル、電気部品、輸送用コンテナなどに使われるが、一般に溶接がむずかしく、わが国ではほとんど使われていない。しかし、将来十分考慮すべき材料である。

(3) 銅とその合金

銅とその合金は周知のとおり電気および熱の伝導がよく、また耐食性もよいので、古くから電気材料、各種容器および管に広く用いられているが、アーク溶接性はあまりよくない。銅はその酸素量によつて溶接性が大いに変化し、酸素が多いと水素禍やブローホールを生じやすく、耐食性も悪くなる。銅合金の種類はきわめて多く、その溶接性も異なるが、厚板では溶接中に溶接金属が高温割れを起こしやすい。最近銅の価格が高くなり入手も困難になつてきているので、構造物の銅使用量を必要最小限におさえないという要求から、銅とステンレス鋼あるいはアルミ合金などの異材継手の溶接が問題になつて

(4) チタンとその合金

チタンとその合金は軽量で常温および高温の強度が大きく耐食性がよいので、化学工業装置および航空機関係などに実用されている。大気中の窒素、酸素、水素および炭素の悪影響をうけてもろくなるので、融接としては可変雰囲気中のイナートガスアーク溶接や電子ビーム溶接が望ましい。ライニングや異材継手の溶接には爆(発)圧接や拡散接合が有利であり実用化も進められている。単純な α 形合金(純チタン, Ti-Al合金など)および単純な β 形合金(高Cr-Ti合金など)は、強さと延性のすぐれた良好な継手を作ることができる。2相の α - β 形合金は熱処理性があつて高強度のものが得られるが、溶接性が若干悪い。高温高強度のTi合金としては α - β 形合金が多く、米国では6Al-4V-Ti合金がもつとも多量に使用され、わが国では5Al-2Cr-1Fe-Ti合金(KS150B)がジェットエンジンや高速車両に若干使用されている。8Al-4Co-Ti合金(金材研Ti合金)は高温強度が著しくすぐれているが、溶接性の点で問題があり検討されている。

最近宇宙ロケット関係で、Ti合金が一般に重量強度比が高いことや低温じん性や高温強度にすぐれていることなどから注目され米ソなどで種々のTi合金が開発されており、たとえば米国で6Al-2Sn-4Zr-2Mo, 7Al-4Moおよび8Al-8V-1MoなどのTi合金が開発され実用化が検討されている。

2.4 複合材料

複合材料の定義はまだ明確ではないが、要するに「2種以上の物質を組み合わせるとして力学的あるいは物理的または化学的にすぐれた性質を付与させた材料」と解釈される。したがつて、複合材料は母材(マトリックス)と組み合わせ材とから構成され、組み合わせ材には繊維状のもの、粒状のものおよび板状のものがある。ま

たこれらには金属系のものと、非金属系のガラス、炭素、ボロン、炭化けい素(SiC)、金属化合物 (Al_2O_3 , ThO_2 , ZrO , TiC , WC , TaC など) などがある。そして組み合わせ材のうちとくに強化用としたものを強化材とよぶ。マトリックとしては、高分子材料とくにプラスチック、金属材料およびセラミックなどに分けられる。

複合材料の代表的なものとして、繊維強化プラスチック (fiber reinforced plastics 略して FRP)、繊維強化金属 (fiber reinforced metals 略して FRM) などがあるが、粒子分散強化形合金 [たとえば、 Al_2O_3 の微粒子をアルミニウム中に分散させた焼結体 (sintered aluminium powder 略して SAP や Ni 地のなかに微細な Th_2O 粒子を分散させた TD ニッケル (thoria-dispersed nickel) など]、超硬合金 (たとえば、 WC と金属コバルトを主成分とした粉末合金) およびクラッドなどの積層材 (ラミネーツ) も含まれる。しかし、粒子分散強化材と繊維強化材とは同じように複合材料といつても、その強化機構がまるで違うようである。

表 3 にマトリックスと強化材との組み合わせによる複合材料の種類を示す²⁾。

将来、複合材料は新しい材料としてさらに開発実用化されていくものと大きな期待がかけられているが、これらの問題点としては、

- (1) 組み合わせ材とくに各種繊維材やホイスカー (whisker) の開発、
- (2) 複合材料の製造法の開発実用化、
- (3) 複合材料の力学的現象の解明のための微視力学の開発、
- (4) 構造物として複合材料を使用するときの複合材料相互あるいは他の材料との接合法や組み立て技術の開発実用化、
- (5) 複合材料による構造物の設計と使用性能の解明

などが考えられる。このうち溶接技術の立場から複合材料の製造および接合技術として、固相接合、ろう接、爆発加工、溶射、粉末冶金などの加工技術の開発実用化が注目される。

3. 溶接法の問題

溶接には溶接しようとする対象に母材があり、これを接合するためのエネルギーが必要である。溶接の理想的なすがたは、いうまでもなく、できるだけ少ない材料の消費と少ないエネルギーで、速く確実に接合することである。そこでまず溶接エネルギーについて考えることにする。

3.1 溶接エネルギーについて

従来われわれは溶接において、母材を接合状態にするために、加熱によつて接合部の温度を上昇させる方法あるいは加圧によつて接合を密着させる方法また両者を併用する方法をとつてきている。加熱による接合方式においては、熱エネルギーをできるだけ集中させることが有利である。加圧による接合方式においては、とくに母材接合部の表面状態が重要な因子となる。

溶接に利用されるエネルギーとしては、アーク、抵抗、電子ビーム、プラズマなどの電気的エネルギーが圧倒的に多く、そのほか加圧、摩擦などの機械的エネルギー、燃焼、爆発、テルミット反応などの化学的エネルギー、高压流体、間接的な炉加熱、超音波振動、レーザー光、太陽熱や接着力などの物理的エネルギーがあげられる。

いま、溶接に利用する各種熱源のエネルギー集中度を比較すると、表 4 のようになる。通常のアーク溶接ではせいぜい $10kW/cm^2$ のオーダーであるが、電子ビームやレーザーになると $1000\sim 100万kW/cm^2$ のオーダーに飛躍する。このような新熱源の 1 つの大きな魅力は、熱エネルギーの集中にある。熱エネルギーの集中は点熱源とし

表 3 マトリックスと強化材との組み合わせからみた複合材料の種類*

マトリックス		強化用材料		
系 統	具体的な例	各種繊維, ホイスカー	粒 子	積層その他
金 属	研究例として Al, Mg, Ti, Ag, Fe, Co, Ni, Ta, Au など多数	繊維強化金属 (ホイスカー強化金属) フィラメントワイディング材	粒子分散強化金属 超硬合金など	クラッド材 バイメタル
プラスチック	熱可塑性プラスチック 熱硬化性プラスチック	強化プラスチック フィラメントワイディング材	フィラーを含むプラスチック	
エラストマー	各種ゴム	たとえば ラジアル・タイヤ	カーボン・ブラックを含むゴム	
セラミック	アルミナ, 礫子, ガラスコンクリートその他	金属線強化ガラス 鉄筋コンクリート	セラミック基のキーマットその他	
その他	木材, フォーム材			特殊な電気部品合板

* 各材料ごとに状況はかなり異なり、この表はわかりやすさを第一に、かなり強引にまとめたものである。

表 4 各種融接法における熱エネルギーの集中度

熱源の種類	熱エネルギーの集中度 KW/cm ²
酸素アセチレンガス	1
金属アーク TIGアーク サブマージアーク エレクトロスラグ	2~10
プラズマ	10~100
{MIGアーク CO ₂ アーク	~150
高電圧電子ビーム, レーザ	~5 000~10 ⁶

て局所的な温度上昇を得るために必要なことであるが、一方溶接熱源としては大容量のエネルギーが得られるものであることが望ましい。エネルギー集中度が高く大容量の熱源が得られれば、点熱源から線熱源へ、さらには面熱源に進めることができる。

現状の電気を利用するアーク溶接や抵抗溶接などでは点熱源を移動させたり多電極を用いることによつて線熱源に近づけている。電子ビーム溶接やレーザ溶接ではエネルギー集中度の高いこととその指向性を利用して、電子ビームやレーザの指向方向に線熱源が得られ、高速溶接によつて面熱源に近づけることができる。ただし現状のレーザでは大容量の熱源を得ることが困難で、このため将来の開発が望まれる。フラッシュバット溶接、高周波溶接、摩擦圧接、爆発圧接などは、接合面を同時に加熱する方式で面熱源を利用しているが、接合部の形状寸法に制約を受けることが多い。アーク溶接においても、アークを電磁場や駆動ガスによつて制御し、回転を与えたり指向性を与えることによつて線熱源や面熱源に近づけることができる。面熱源によれば、同時溶接が可能であり、高能率精密溶接が実現されるであろう。

熱による接合方式は、融接で代表され多種多様で現状の接合法の主流であるが、溶接部が加熱によつて変質したり変形したりする不可避的な問題がある。材料を接合するには、接合部のごく薄い表面層を接合状態にもつていくために、何らかの方法で表面エネルギーを減少させ、原子間の結合力がおよぶ範囲に両材料の原子を接近させればよいわけで、加熱するにしても接合部のごく近傍にかぎつてできるだけ低い温度とし、接合を助成するために加圧するとしても変形を極限することが望ましい。こうした意図から固相接合や拡散接合などの圧接法が開発され、また特殊なろう接法が開発されつつある。一方、熱をまったく与えない接合法として接着が考えられる。

以上は接合方式をエネルギーの面から見つめてきたが、もう一つの要素として母材側の材質と接合面の状況が大切である。とくに加熱を極力さげた圧接やろう接お

よび接着においては、母材接合面の処理が重要である。母材がそのままではうまくくつつかないのは、接合すべき面が汚れていたり凹凸があつたりするためである。母材の接合面を清浄にするには、ワイヤブラシやサンドブラストあるいは摩擦などによる機械的な方法、化学薬品を用いて行なう化学的処理法、イオンボンバードのように棒プラスの TIG アークを用いアルゴンガスイオンを母材表面に衝突させてクリーニングする電氣的処理法などがあるが、将来化学的あるいは物理的処理法が著しく進んで、表面処理を行なうと同時に接合も行なう方法が発達するであろう。

3.2 溶接方法の開発実用化の動向

溶接方法の開発は、高能率化、経済性、労働力、安全性、品質向上、製品精度の向上などの要求を満たすために行なわれるが、現実の問題としてすぐ解決すべきものと、将来の利用を考えて行なわれるものがある。前者の必然的な要求からなされる開発を規範的な開発とよぶ。

近年これらの要求にマッチした新しい溶接方法がつぎつぎに開発されており、これは溶接の技術革新の重要な特徴の一つである。溶接方法の開発には、熱源の制御あるいは新熱源利用のための溶接機器を開発する方面と溶接材料を開発する方面とがあるが、両者の協調が大切である。これらの開発の対象としては、溶接しようとする母材の材質、寸法形状、溶接姿勢および環境やまた構造物の種類、生産方式、使用性能に応じて考えられる。

溶接方法の実用化に当たっては、純技術的な立場ばかりでなく、その導入の方法やこの変革を推進するための管理手段を総合的に検討しシステム化しなければならない。技術的な要素について考えると、まず溶接方法を構成する機材の確立と、つぎに生産工程におけるその技術の位置づけに大別される。前者の溶接機材の確立は実用化の第1段階と考えられ、溶接機材の原理機構 (hardware) と適用機構 (software) に分類され、機材メーカーの主務と考えられる。後者の生産工程の技術は実用化の第2段階と考えられ、溶接技術の分野とそれを取りまく組立技術の分野にわけられ、施工会社の主務と考えられる。しかし、実用化の第1段階において機材メーカーは生産工程における溶接技術の指向性を把握しておく必要があり、施工会社は第2段階の生産工程において溶接機材の選択と適用機構の設定に関与しなければならない。また生産工程の変革につれて、種々検討され、機材メーカーと施工会社の情報交換が行なわれ、さらに変革を繰り返して完全なものになつていく。

最近の傾向として、溶接技術が生産工程における同期的な流れ作業にする自動化のための中核技術として大形化されプラント化されつつあり、また一方機材メーカーの加工部門への進出もあつて、いまや機材メーカーと施工会社の領域は互に融合あるいは合体した形になつていくで

あろう。

溶接方法の開発と実用化の距離と時間すなわち速度は技術的な問題と運営上のシステム化の問題に支配されると考えられる。さきに、溶接方法を構成する機構を hardware 的なものと software 的なものにわけたが、溶接方法によつて hardware 的な性格の強いものと、hardware と software が 組み合つた性格のものがある。割り切つて言えば、一般に融接法はその汎用性のために hardware と software の組み合つた性格をもち、圧接法は元来専用の hardware 的な色彩が強い。そして hardware 的な性格の強い溶接法ほど、開発から実用化までの速度が技術的にはやくできる傾向をもっている。融接法においても、近年専用化や自動化がさけばれ、hardware と software の各機能の一体化が技術的にも運営的にもはかられて、開発から実用化までのスピードアップがなされている。

ところで、溶接方法の hardware 的な原理機構の要素としては、第 1 に機械化、第 2 に溶接特性——溶接エネルギーと冶金的特性、第 3 に継手開先があげられる。software 的な適用機構としては、構造物の種類とその溶接のための運搬設置方式があげられる。そして、これらの要素がそれぞれ独立した変数になると、その溶接方法は複雑化し開発と実用化の間の道は遠くなる。そこで、各要素の機能を統一して目的を達成するために、相互を結ぶ情報システムが必要になつてくる。溶接技術はこれらの組み合わせによつて、急速に進展しつつあるのである。

3.3 融接法

(1) 被覆アーク溶接の重要性

従来、被覆アーク溶接法は万能形の全姿勢溶接法として親しまれており、その使用量は年々増加しているが、他の溶接法との使用比率は低下する傾向にある。一方、被覆アーク溶接棒は専用化がはかられ、薄板用、裏波用、すみ肉用、立向下進用などが開発されている。たとえば、高能率棒として鉄粉系の使用がふえており、立向下進用に低水素鉄粉系棒が有効に使われている。また重力式や傾斜式溶接として長尺被覆棒が比較的長いすみ肉溶接に能率よく使用されている。被覆棒は高張力鋼の強度レベルや切欠じん性に比較的よくマッチして、高強度の溶接金属 (HT100 程度まで) を得ることができる利点があり、この方面の開発も進められている。なお、種々の構造物の補修に被覆アーク溶接が広い範囲の環境下が任意の姿勢で簡便に利用される。以上のように、被覆アーク溶接は融接法の基本的なもので、他の溶接法にない汎用性があり、他の溶接法ではできない分野を持っているので、その重要性は依然として変わらない。

(2) 溶接の自動化

近年溶接の自動化がさけばれ、被覆アーク溶接棒による手溶接から半自動溶接あるいは自動溶接への移行の傾

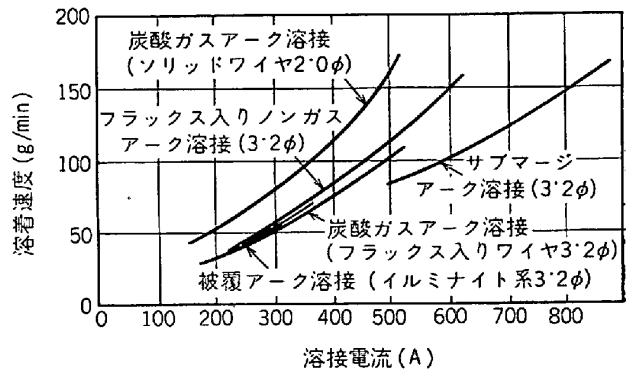


図 2 各種アーク溶接における溶着速度の比較

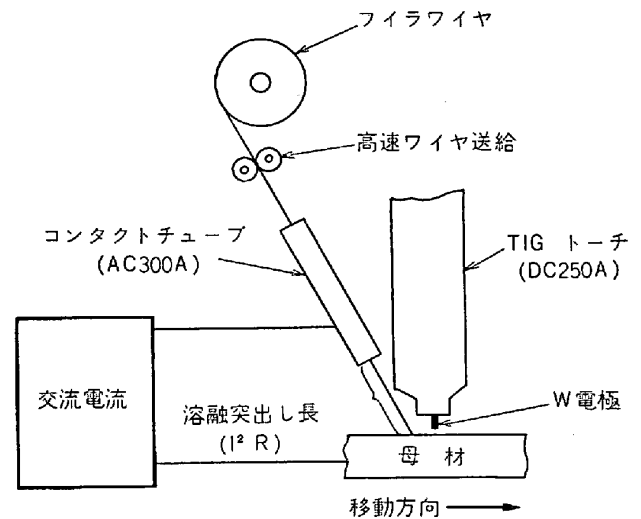


図 3 TIC-ホットワイヤ溶接法 (リンデ社)

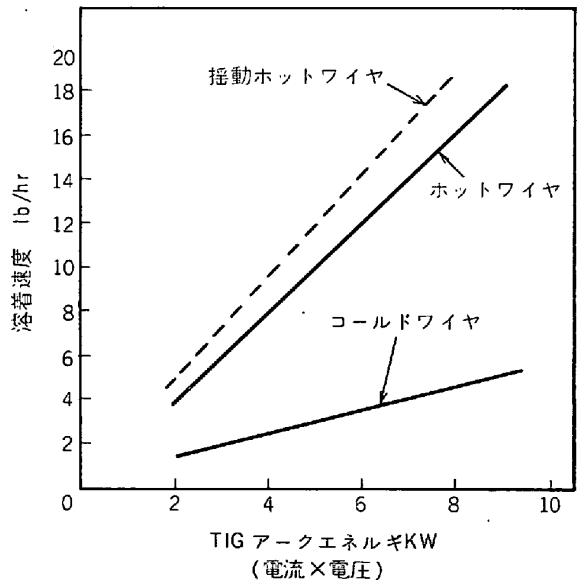


図 4 ふつうの TIG コールドワイヤ溶接と TIG-ホットワイヤ溶接の溶着速度の比較

向を示しており、自動化の程度は現在平均約 20% であるがこれが 50% 程度になるのは間近かであろう。図 2 に各種アーク溶接における溶着速度の比較例を示す。ソリッドワイヤあるいはフラックス入りワイヤによるガス

シールドアーク溶接は全姿勢半自動溶接法として、被覆アーク溶接法と競合して進出してきている。とくに、フラックス入りワイヤはノンガスアーク溶接への利用と各種の金属材料や構造物に対する通用範囲も広いので、その使用量が今後一層増加するものと考えられる。ノンガスアーク溶接は風の影響を受けることが少ないので、野外の現地溶接に有利で、鉄骨などの現場溶接に使用される。TIG法は高品質の溶接金属を得ることができるが非効率であることが欠点である。そこで、溶加ワイヤを自動的に供給すると同時にこれを抵抗加熱して溶着速度を増加させる方法として、いわゆる“TIG-hot wire法”(図3)が開発実用化された。これによれば、図4に示すように従来のTIGコールドワイヤ法に比べて高能率の溶接ができる。

一方、サブマージアーク溶接は主として工場溶接における下向専用の自動溶接法として活躍してきているが、さらにその高速化や平板の片面自動溶接法へと進展している。溶接の自動化の波は、エレクトロスラグまたはエレクトロガス溶接などの立向専用自動溶接法の開発実用化によつて拍車がかげられ、傾斜あるいは横向の自動溶接へと、各種姿勢に対する自動溶接法の適用範囲が広がられている。

(3) 制御アークの利用

アーク溶接法の開発の一つの方向として、プラズマ、パルスアーク、電磁場あるいは機械的な方法などを利用してアークを制御し、アーク現象や溶滴移行現象および溶融池の挙動の改善を計り、作業性や能率および品質の向上を目指している。図5はふつうのTIGアークとプラズマアークの温度分布とアーク電圧を比較したもので、プラズマアークはエネルギー集中がよく高温が得られ、またアーク電圧が高い¹⁷⁾。図6はMIGアークにおける電極直径と適正パルス電流範囲を示す¹⁸⁾。たとえばパイプの全姿勢形片面溶接は各種溶接法がそれぞれ粋を集めて競合しあつており、パイプ専用TIGあるいはMIG溶接[米国Astro-Arc社の“アストロアーク”法あるいは英国BOC社の“マンバ(Mamba)”法など]、裏波専用棒による被覆アーク溶接、ショートアーク法やパルスアーク法あるいはプラズマアーク法およびそれらの専用治具などの適用が検討されている。また全姿勢形厚板溶接用に“狭開先溶接(narrow-gap welding)”が開発され、狭開先による溶着量の低減と低入熱による溶接熱影響部幅の減少もねらつており、能率と品質の向上の両面を解決する有力な方法として期待されている。

(4) プラズマアーク溶接

プラズマアーク溶接はTIG溶接の変形ともいふべきもので、両者ともタングステン電極を陰極として使用しているが、プラズマアークではアークをノズルとシールドガスによつて絞つて拘束しているのので、アークのエネルギー密度を高くすることができる。タングステンアーク

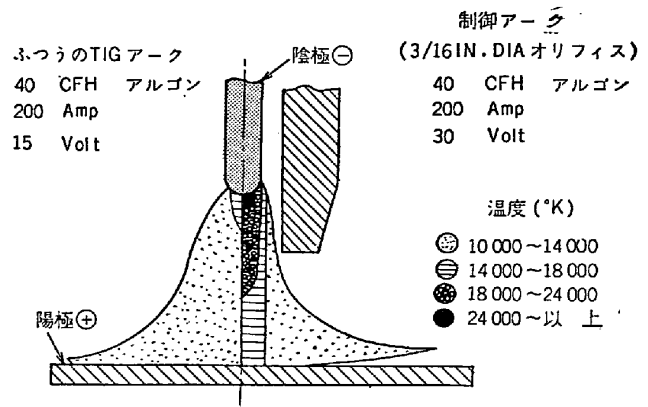


図5 TIGアークとプラズマアークの温度分布とアーク電圧の比較

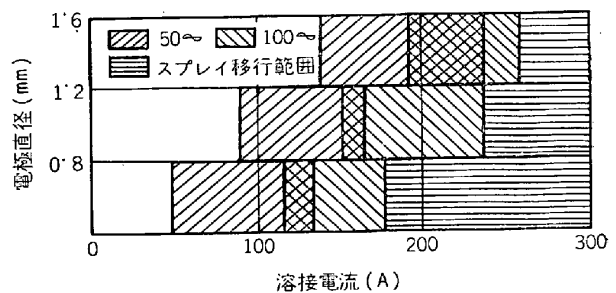


図6 普通鋼に対する電極直径と適正パルス電流範囲

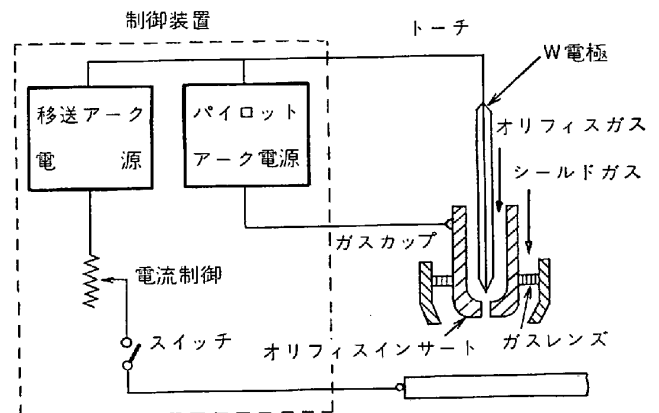


図7 低電流プラズマアーク溶接の略図(リンデ社のプラズマニードルアーク溶接)

ークでは一般に溶接金属のガスによる汚染が少なく性能がよいが、プラズマアークはこれに加えてアークが安定で作業性がよく高入熱で能率がよい利点がある。

低電流プラズマアークは極薄肉の手溶接用として注目され、高電流プラズマアーク(100 Amp以上)はTIG法に比べて熱影響部の幅をせまくすることができる。図7および図8に低電流プラズマアーク溶接法およびこれとTIG法との電圧-電流特性の比較を示す。プラズマ溶接でも肉盛り用に加熱ワイヤを使用し、高溶着速度かつ希釈の少ない溶接ができる。アークスポット溶接用に、パイロットアークを通常のタングステンアークと組み合わせて、一種の半移送形プラズマアークとし、溶加

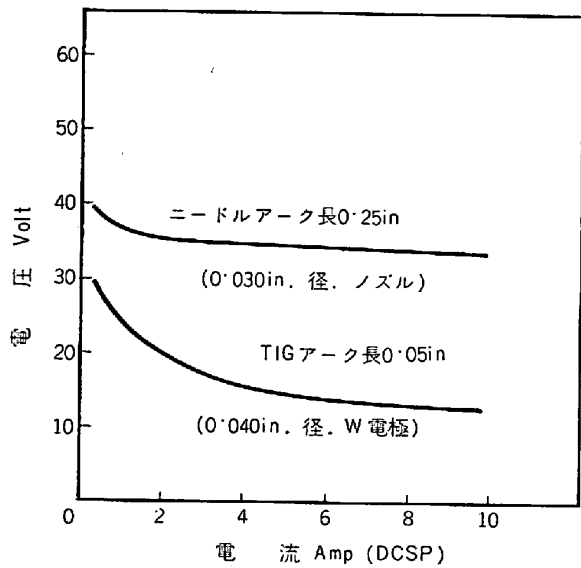


図 8 プラズマニードルアークと TIG アークの電圧電流特性の比較 (アルゴン気流中 10 Amp 以下の場合)

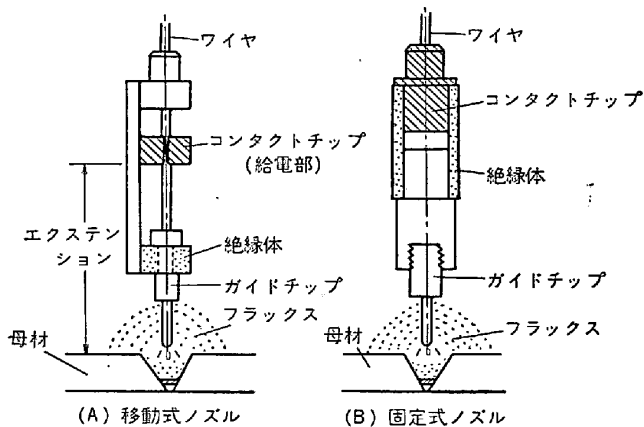


図 9 サブマージアーク溶接における I²R 法専用ノズル

表 5 片面溶接法の種類

片面溶接法	裏あてを使用する方法	バックングストリップを用いる法	普通法 鋼帯・銅バックング併用法
		銅バックング法	普通法* フラックス・銅バックング法*
裏あてを使用しない方法	裏あてを使用しない方法	フラックスバックング法	普通法* 熱硬化性物質添加フラックス使用法 シートフラックス法 二層フラックス法
		その他の方法—ファイバークラス・アルミテープバックング法	一層目低入熱溶接法 裏波用フラックス使用法

* 開先内に鉄粉, カットワイヤ, FN バーなどを充填する場合もある。

材なしで能率よく溶接することができる。この場合、パイロットアークは溶接アークの発生を容易にし、またタングステンを適度に加熱してタングステン巻込みによる欠陥を少なくし匡正なしで長時間安定な溶接ができる。なお、プラズマアークは水中においても安定させるので水中溶接と切断に有用になると考えられる¹⁰⁾。

(5) サブマージアーク溶接

サブマージアーク溶接においては、高能率化のために電極ワイヤの突出した長さを長くして抵抗加熱する I²R 法(図 9)、被覆アーク溶接棒やフラックス入りワイヤあるいは金属粉末などを添加する埋立て法、6 電極程度が多電極法、帯状電極法などが開発実用化されている。たとえば I²R 法では電力を 10% だけあげる程度で 1.5 倍の溶着速度の向上がある。帯状電極法はステンレス鋼などの肉盛り溶接に大きな効果を発揮し、高能率で溶込みおよび希釈が少なく 1 層肉盛りでも可能なほどである。片面溶接法には表 5 に示すように各種あるが、とくに造船における工場内板継ぎ用の裏あてを使用する片面自動溶接法は多電極化、裏当て方式、I²R 法、埋立て法などを総合的に組み合わせ、なおかつ自動制御機構を配備して完全自動化あるいは無人化の方向に進展している大形溶接技術である。

(6) 立向自動溶接

エレクトロスラグ溶接およびエレクトロガス溶接は立向きで one-run 溶接ができる画期的な自動溶接法として、圧力容器、造船、鉄骨構造などの広範な分野に適用が広がられている。この方法は、はじめ超厚肉の圧力容器や鍛鋼品の組み立てに活用されてきたが、その後中厚板の船殻の現場エレクトロガス溶接や鉄骨構造の比較的短い立向溶接に簡易な消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接(図 10)が実用されてきた。そして炭素鋼や低合金鋼のほか、ステンレス鋼にも適用されてきている。また種々の形状の構造物を母材なしではじめからエレクトロ

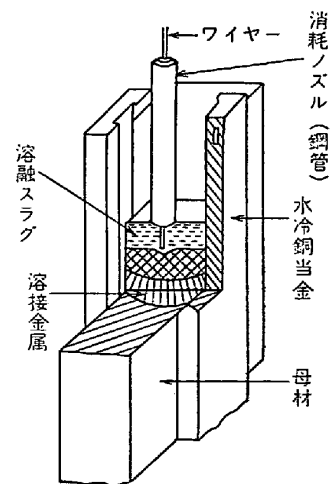


図 10 消耗ノズル式エレクトロ・スラグ溶接法の機構

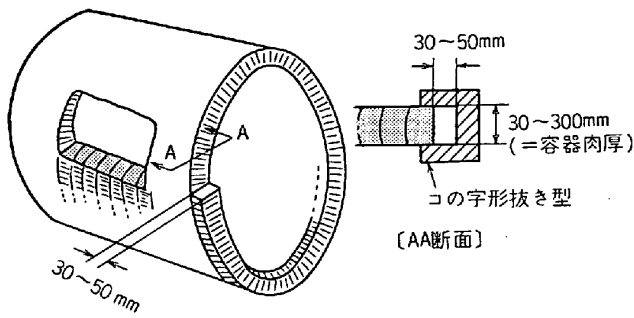


図11 溶造法による容器円筒の製作

スラグ溶接法を用いて連続鑄造式に製造する、いわゆる“溶造法”も開発実用化されている。

三菱重工ではこの溶造技術の積極的な開発実用化研究を進めており、圧力容器用円筒製作のための専用機を製作し、炭素鋼 SB 材および $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼などの薄板を電極として図 11 に示すような肉厚 30~300 mm の円筒を溶造し焼入れ焼もどしの調質を施して製品としている。溶造技術(weld forming technique)は従来の鑄造、鍛造、板金溶接加工技術に比べて、つぎのような利点をもつと考えられている。すなわち、鑄造のように鑄型が不要で溶解、鑄込みなどの工程を必要としない。また鍛造や板金加工のように大形プレス設備が不要でプレスなどの工程を必要としない。溶造機は工作機械のように自動化、省力化、NC化が容易で、かつ工作機械の刃物に相当するエレクトロスラグメルト用抜き型を取り換えるだけで各種寸法製品の溶造が可能となり、また造形しつつ機械加工もでき一貫工程が可能である。したがって溶造機の稼働率や操業率が高く能率も高くなる。素材は電極として市販の安価な薄鋼板を使用するので経済的で、母材を必要としないので従来の母材発注期間が不要で納期の短縮をはかることができる。さらに溶接金属の品質はエレクトロスラグ精錬によつて不純物が少なくなり優秀であり、検査も含めて連続作業が行なえるので品質管理も容易である。溶造後調質を行えば組織が均一となり、圧延材のような機械的性質の異方性がない特徴ももっている。なお溶造技術は圧力容器円筒のほか、石油化学における長尺(10m程度)の改質反応管(リフォーマチューブ)や熱交換器の管板と管の継手などにも利用できる。

(7) 電子ビーム溶接

電子ビーム溶接法はここ 12 年間もつとも有力な接合法の一つとして脚光をあびてきている。この方法は雰囲気気圧によつてつぎの3つに大別される: ①高真空(Hard Vacuum)電子ビーム法(10^{-4} Torr 以上)で、通常 15~150kV, 1~35kW, 材厚数千 Å~9", ②大気中またはイナート雰囲気電子ビーム法(Non Vacuum System or Out-of-Vacuum System or Inert Atmosphere System)で、現状の溶込み限度は鋼材では約 1/2" 程度であるが

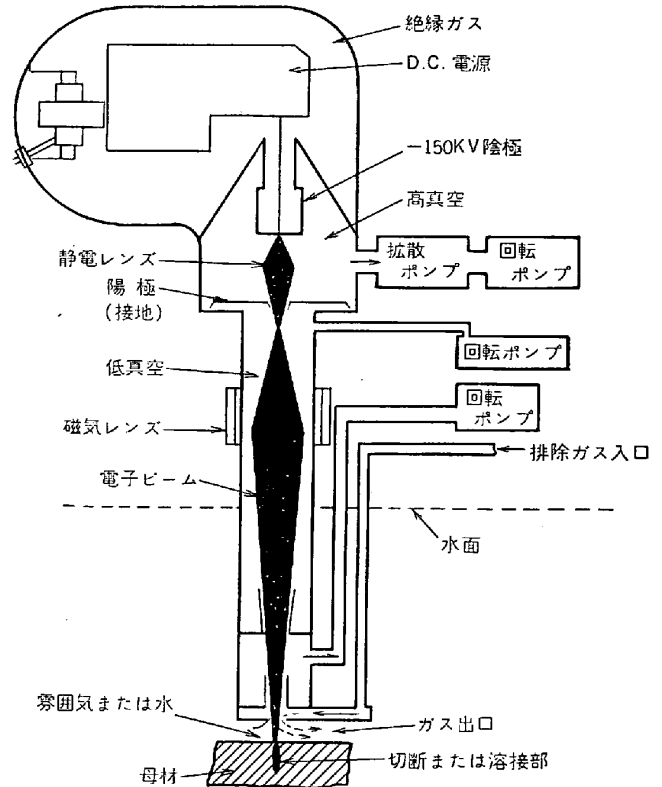


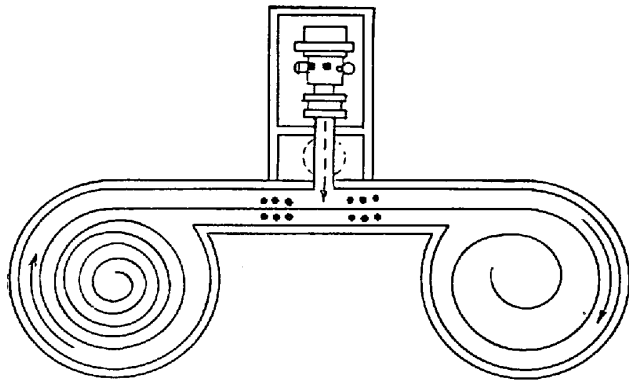
図12 大気中または水中用電子ビームガンの概略

今後 300 kW 程度の強力な装置も出現するであろう。なお、たとえば図 12 に示すような Westinghouse の電子ビーム溶接機(150~200kV, 20 kW)のガンは空气中だけでなく水中溶接も可能とのことであるが、この方法では水深が増すと溶接が著しく困難になると考えられる。

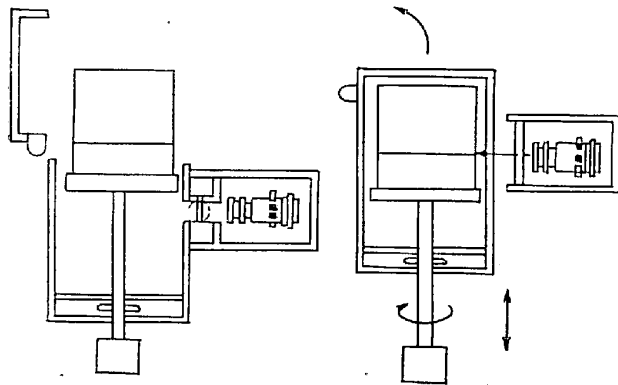
③低真空商用電子ビーム法 (Soft-Partial Commercial Vacuum System) で、真空度が 10^{-2} ~ 10^{-1} Torr.

電子ビーム溶接の応用分野としては、自動車工業などの小物多量生産精密溶接用として溶接用チャンバと専用治具の工夫、テープ制御、数値制御あるいはコンピュータプログラミング制御などが行なわれている。近年この方面でも低真空形(図13)が強調されてきている。なおプラズマ電子ビーム法(カソビーム法)と称し、図14に示すようにプラズマ放電を起している冷陰極から電子ビームを被溶接物を囲むように放出させる方法(雰囲気気圧 10^{-3} ~ 10^{-1} Torr)が開発されつつある。この方法によると、小径パイプ(たとえば直径 100 mm 以下、厚さ 6 mm 以下)などを 2~3 sec で同時溶接することができ、ひずみの少ない精密溶接が可能である¹⁾²⁰⁾。

原子力関係でははじめ(1951年)フランスのサークレイ原子力研究所の J. A. STOHR が燃料要素被覆管の溶接に成功し、電子ビーム溶接利用のきっかけをつくつた。その後利用範囲が拡大され、とくに上述の自動車関係での実用が著しい。航空宇宙関係では飛行機の構造部材用に低真空形または大気中形が開発実用され、また大形ロケット部品接合用に特殊な局部高真空形などが開発



(a)



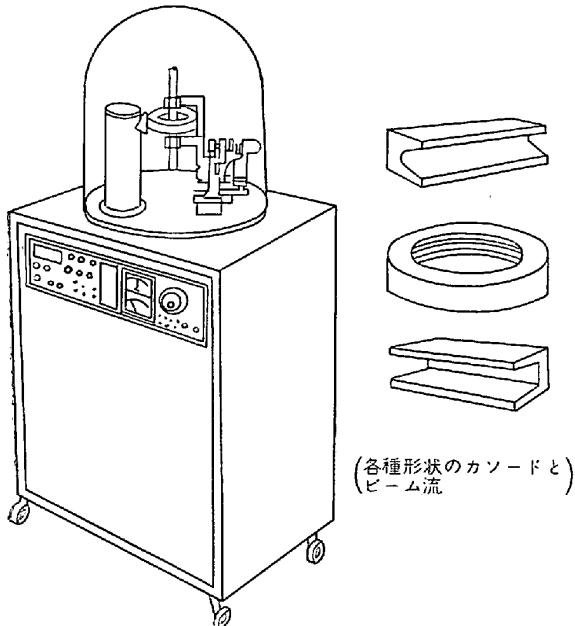
(製品の取出し)

(b)

(溶接位置)

(a) バイメタルボンド鋸刃製作用 (b) 円筒組立て用

図13 低真空電子ビーム溶接法による多量生産向き溶接装置の例



(各種形状のカソードと) ビーム流

図14 プラズマ電子ビーム(カソードビーム)装置と電極の形状

実用されている。電子技術関係ではマイクロ電子ビーム溶接と称して、微細な電子部品の精密溶接が行なわれて

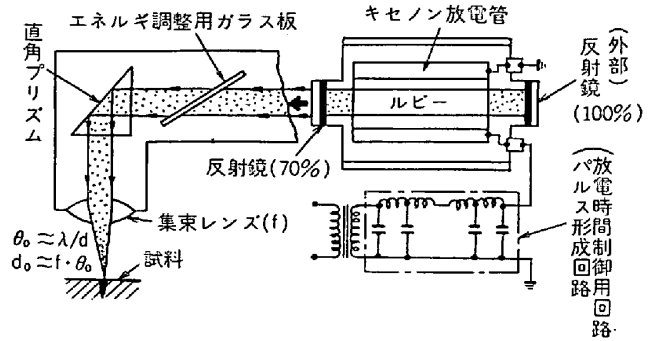


図15 ルビーレーザー溶接装置の原理

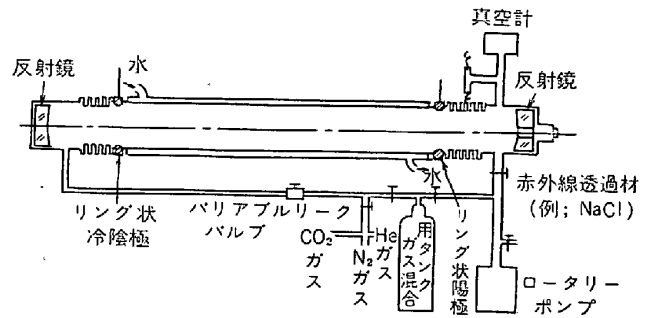


図16 ガスレーザー溶接装置の原理

おり、金属加工産業では製管用の大気中形、パイプ突合せ継手用の高真空形あるいは低真空形などが開発実用化され、またパイプライン現地円周溶接用の局部真空形なども開発されつつある。電子ビーム溶接の適用は今後いつそう、溶接技術を利用するほとんどあらゆる分野に広く深く滲透していくものと考えられる²¹⁾²²⁾。

(8) レーザ溶接

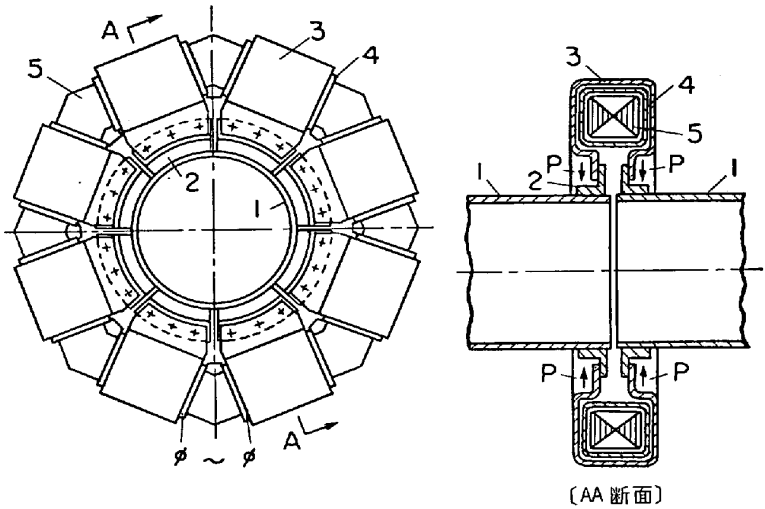
レーザービーム溶接は熱エネルギーの集中度が電子ビーム溶接に匹敵した遠隔溶接が可能であるなど、熱源として興味深いものであり、これにはルビーレーザーを利用する方法(図15)とガスレーザーを利用する方法(図16)がある。現状ではルビーレーザーの場合パルス持続時間が短いこと、炭酸ガスレーザーでも大出力(10kW程度)の発生に問題があり、装置が面倒で熱効率も悪い。また母材への入熱は母材表面の物性に極端に支配される。したがって、レーザー溶接の利用は限定され特殊な精密部品の製作や人が近づけないような個所の遠隔溶接などにかぎられると考えられ、まだ将来の開発に負うところが多い。

ただし、レーザーガス切断はレーザーのエネルギーに加えてガスの燃焼と動圧のエネルギーを重畳することによって協同効果が得られ、すでに十分実用の段階に到達している。たとえば、数百Watt程度のレーザーエネルギーでステンレス鋼数mm程度、チタン10mm程度の板厚のものが切断できる。しかもその切断幅はきわめて狭く、プラズマ切断やガス切断などよりもすぐれた面をもっている。とくに薄板の精密な切断法として注目される²³⁾。

3.4 圧接法

(1) 抵抗溶接

圧接法のうち従来から活用されている抵抗溶接においては、自動制御方式が進展し高品質の継手が安定して得られるようになってきている。抵抗溶接はとくに多量生産工業において、低コストで比較的単純な方法として、流れ作業工程中に導入されて重量な役割を果たしている。発達の一つの方面として、フラッシュ溶接用に3相電源や低短絡抵抗特性をもった回路変圧器の導入(図17)などがあげられる。前者の3相電源は主としてアルミニウムや銅用であり後者の回路変圧器はラインパイプ、レール、圧延形鋼などの工場溶接あるいは現場溶接用である。これらによれば能率よく比較的低電力でフラッシュ溶接が可能であり、たとえば後者の場合、75 kg/mレールが容量 150 kVA 程度の溶接機でフラッシュ溶接することができる²⁴⁾。



1. パイプ, 2. コンタクトシュー(contact shoes),
3. 二次巻き線, 4. 一次巻き線, 5. リング磁性ワイヤ

図17 大形パイプのフラッシュバット溶接用回路変圧器

スポット溶接と接着 (adhesive bonding) の組み合わせ継手は、航空機構造用に有望である。この方法は他の分野たとえば自動車工業などにおいても、接着によつてせん断強度をもたせ、スポット溶接によつて引張強度をもたせるような両者の特徴を生かした活用方法が考えられる。また、宇宙溶接²⁵⁾では、宇宙空間における仮付け組立て用にスポット溶接を適用し気密用に接着を併用することも考えられる。

(2) 高周波溶接

高周波抵抗溶接は製管や複雑な形状の銅製ラジエータ管、アルミニウム注水管、フィンチューブ、バイメタルなどの溶接組立てやラインパイプの仮付け溶接などに利用されているが、高価な設備投資が必要なのが難点である。

(3) 超音波接合

超音波接合は電子部品などの正確な位置づけ継手用にアルミニウム、ニッケル、銅、金あるいは銀などの各種材料の 0.05 mm 程度の箔の溶接に利用される。また超音波を利用したろう付法も開発されている。

(4) 摩擦圧接

摩擦圧接は被接合面の回転摩擦によって加熱し圧接する方法で、圧接終了時に回転が停止するものと回転が持続するものがあり、回転エネルギーの与え方にモータ駆動のみによるものとフライホイールを併用してイナーシャを利用するものがある。これらの代表的な摩擦圧接機を図 18 に示す。装置の形態は旋盤に類似しており、もつとも大量生産向きで異材継手の接合も可能であるが、継手の形状に制限がある。この方法はとくに自動車工業などの軸類、エンジンバルブ、アクセル、ディスクブレーキ、ホイールリムなどに利用され、また航空機用タービン部品、自動織機部品、電気化学工業用銅-ア

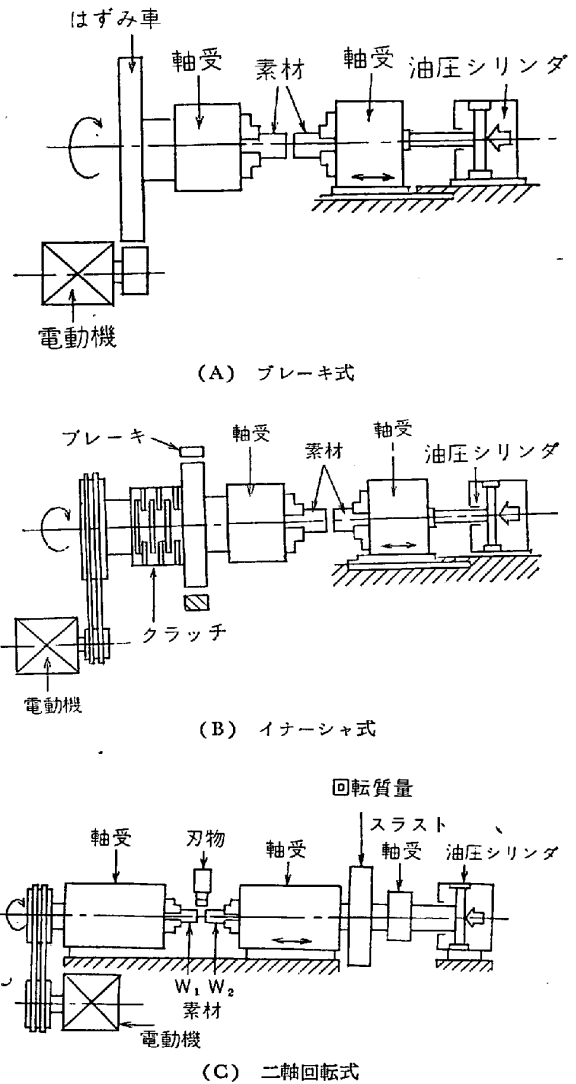


図18 代表的な摩擦圧接機の機構

ルミトランジション継手 (transition joints), 切削工具, ドリル, 砲身などに利用される. 摩擦圧接では現在直径 5~100 mm 程度の丸棒および直径 750 mm 程度以下の管の突合わせ継手の接合が可能で, 自動化した装置では 1 hr に 600 個以上の生産が可能であり, 高速流れ作業工程にマッチさせることができる²⁰⁾.

(5) 固相接合その他

近年複合材料 (composite materials) の開発が進められ, 今後これらの接合が問題になつてこようが, これに対して, 接着や拡散接合, 固相接合, ろう接などがクローズアップされてくると考えられる. 図 19 は高温ロール圧延中のアルミナと Si との反応による Al と Si の共晶変態を利用して接合する, いわゆる共晶接合法の例である¹⁾.

(6) 爆発圧接

爆発圧接は異種材料の板や管のクラッドの製造や継手の接合に脚光をあびてきているが, クラッドは複合材料の一種とも考えられる. 爆着クラッド (explosive clad) の応用としては化学プラント機器, 圧力容器, 原子力関係機器, 貨幣, 電気機器, 船舶, 車輛, 冷凍工業, 金属工業, 土木建築および軍事関係などである. このうちもつとも多く用いられている分野は化学プラント機器類で反応器内張り, 管板, タンク内張り, オートクレーブ, 熱交換器などがある. またノズルクラッドやパイプクラッドが開発されている. パイプクラッドはこれを冷間あるいは熱間引抜き加工により細径パイプとして使用される. 合材としてはステンレス鋼が多く, これについてチタン, ハステロイ, インコネル, ネーバルプラス, アームブロンズなどがある. 合材厚さは 1~5 mm, 母材の厚さは 6~400 mm にもおよんでいる.

爆着クラッドの変わった用途としては, 米国における 50セント, 25セントおよび 10セントの貨幣に銀合金-銅合金のクラッドを圧延し打抜き後刻印したものがある. そのほか, 圧延機ロールガイドまたはショックライナ, 電解工業用ブスバー接続部(写真5), 各種電機部品などの銅および銅合金-鋼クラッド, 銅-アルミクラッド, アルミ-鋼クラッドなどがある. アルミと鋼のトランジション継手は上述のブスバーのほか船舶の上部構造をアルミニウムとしデッキ部を鋼材とするときの接合や熱交換

器の管板などにも用いられる. またスクリーにもステンレス鋼やブロンズなどのクラッドが用いられる. 車輛用にはエンジンパッキング部, 架台とアルミタンクの接合が考えられ, 冷凍工業では低温用容器, タンク車などにアルミニウムと鋼材のトランジション継手が用いられる. このような例は, 土木建築用, 原子力用, 航空宇宙開発用, 海洋開発用, 軍事用などにも多種多様に考えられ開発実用化が進められている. ただし, 爆発圧接はどこでもだれでもが自由勝手に使用できるものではなく使用上の制限がある. 材料を局部的に接合する方法とし

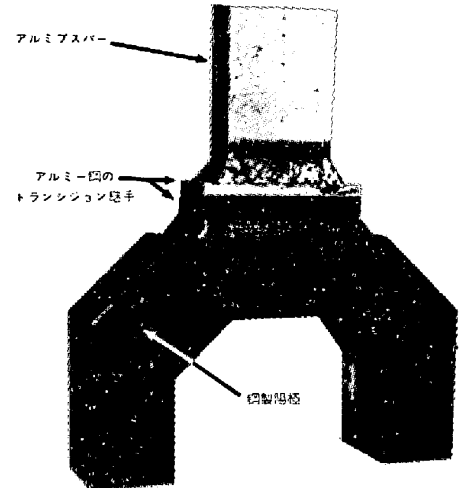


写真5 電解工業用ブスバー接続部の爆着クラッド

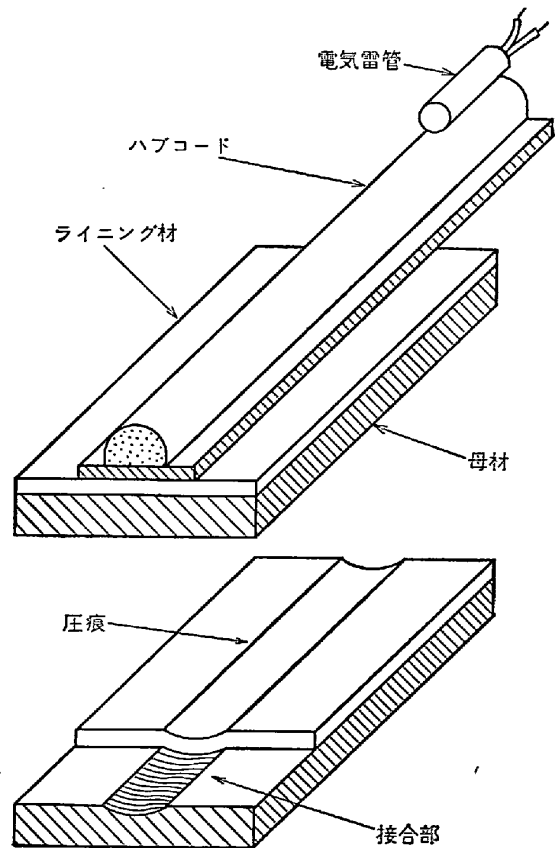


図20 線爆接法

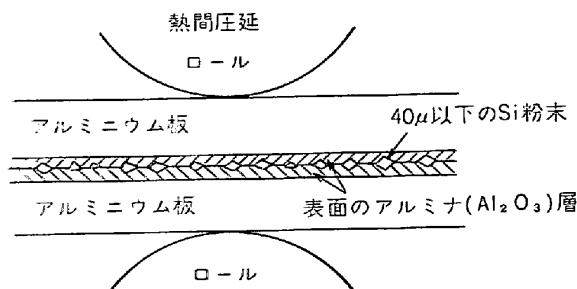


図19 共晶接合法 (Eutectic bonding method)

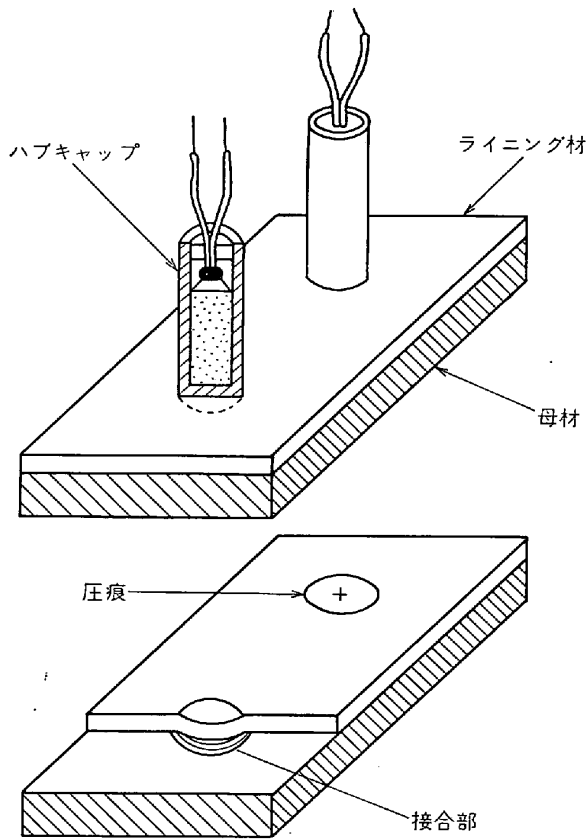


図21 点爆接法

て線爆接(図20), 点爆接(図21)がある²³⁾²⁷⁾。

3.5 溶接の自動制御

溶接プロセスの特徴を制御の面から考えてみると、溶接は構造物組み立ての一つの重要な工程であつて、溶接前の作業工程が溶接品質に直接影響をおよぼす。また溶接後の溶接部の修正が困難で、これの検査や修正に手間をかけることは溶接能率を著しく低下させる。したがつて、溶接の品質を確保し能率を向上させるためには、作業工程の標準化と自動制御が大切である。しかし溶接の作業内容は、物理、冶金、電気、機械その他各溶接の応用分野の科学技術に広くかつ深く関係しており、とくに溶接現象は一般に高温あるいは高圧下の過渡的な冶金現象などの複雑な不確定要素を含み、単純な数式モデルで表現できるようなプロセスではない。また溶接現象を直接示す諸量の検出は一般に困難で、多くの場合検出を行なわないで、経験の蓄積によつて溶接諸条件をあらかじめ設定してそのまま溶接を行なつている。

溶接の自動化や省力化が叫ばれている昨今では、溶接の自動制御を検討し今後の溶接の方向づけに資する必要がある。

(1) 溶接の無人化

一般に自動制御にはフィードバック制御とフィードフォワード制御があり、またこれらを組み合わせたシーケンス制御がある。ふつうのアーク溶接のように、ある時

間一様な状態が保持されて溶接が進行する、いわゆる連続溶接と、スポット溶接のように溶接1点ごとに加圧通電を繰り返して溶接が行なわれるバッチ式溶接とでは自動制御の方式がかなり異なつてくる。いずれにしても自動制御を有効に使つて溶接の無人化の方向へ進展しつつある。

(2) フィードフォワード制御

溶接におけるフィードフォワード制御としては、広い意味で母材や溶接法および溶接材料の選択、母材の加工精度の向上、溶接条件の設定などが含まれる。アーク溶接においては電源特性の選択も重要で、アーク電流が比較的小さい場合には垂下特性またはサイリスタ制御による定電流特性が有利であり、アーク長が変化しても電流が変わらないほうが都合がよい。またアルゴンガスアーク溶接や炭酸ガスアーク溶接のように、細径ワイヤに大電流を通じる場合には、電源として定電圧特性が適しており、アークの自己制御作用を利用してアーク長が一定になる方向にワイヤの溶融速度が変化する。定電流特性の電源によるサブマージアーク溶接では、アーク長を一定に保つためにアーク電圧を検出してこれが一定になるようにワイヤ送給速度を制御する方式が用いられている。

スポット溶接、プロジェクション溶接、シーム溶接などの抵抗溶接では、比較的短時間の通電を制御するためにイグナイトロンあるいはサイリスタが活用され、電流波形制御も行なわれている。

電子ビーム溶接や摩擦圧接では、最初から自動機として発達する傾向にありまたハードウェア的性格を持つているものと考えられる。この場合には被溶接材の寸法精度などを十分高くする必要がある。

(3) フィードバック制御

以上のような溶接のフィードフォワード制御を行なつても、溶接に関係するあらゆる因子をととのえて環境条件を十分安定にすることは困難である。そこで、溶接中に直接溶接現象のめやすとなる何かを検出し、フィードバック制御を行なう必要がでてくる。

たとえば、溶接中の溶込みを間接に溶接トーチの位置を測定し電極先端が被溶接材の表面に対してどんな高さにあるかを検出したり、溶接の裏側への赤外線放射(infrared radiation)をIR検出器で測定しこれによつて溶込みの程度を検出する(米国 Sciaky Co. 法²⁸⁾)。

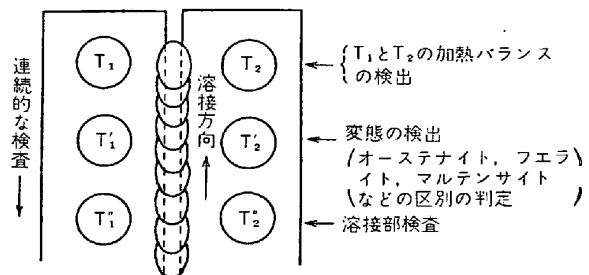


図22 電流による溶接過程の検出と制御

金材研では、溶接アークの到達すべき位置に検出テープを設置して溶込みの位置および形状寸法を検出する方法などを開発した²⁹⁾。また米国 Ohio 州立大では図 22 に示すように、突合わせ継手のアーク溶接中うず電流を両部材間に通じて溶接ビードの位置、溶接部の冷却中の変態挙動および溶接部の検査を連続的に行なう方法を試みている³⁰⁾。スポット溶接においては、溶接部の固体から液体に変化する時の熱膨張を検出して適当な時期に溶接電流を停止させる熱膨張制御方式、溶接電流値と溶接部の電圧降下との積の積分すなわち溶接部に消費されるエネルギーを測定してこれが規定値に達したときに電流を停止させるエネルギー制御方式、あるいは電極に超音

波を導き溶接部における超音波の反射または通過状態の変化を検出して電流を制御する超音波検出方式などが試みられている³⁰⁾。

(4) シーケンス制御

以上のようなフィードバック制御方式を適応制御 (adaptive control) ともよび、今後の重要な課題である。

溶接におけるフィードフォワード制御とフィードバック制御を適当に組み合わせて、予定された一連の制御動作の系列を順次行なつていくいわゆるシーケンス制御の代表的な例を図 23 に示す。このような考え方で、著者らがとくに片面自動溶接において実施した制御機構を図 24 に示す。

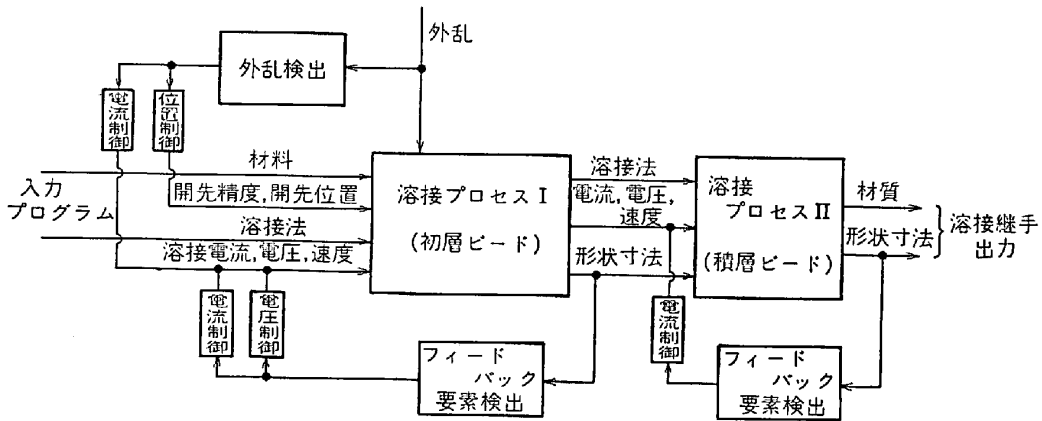


図23 アーク溶接におけるシーケンス制御の代表例

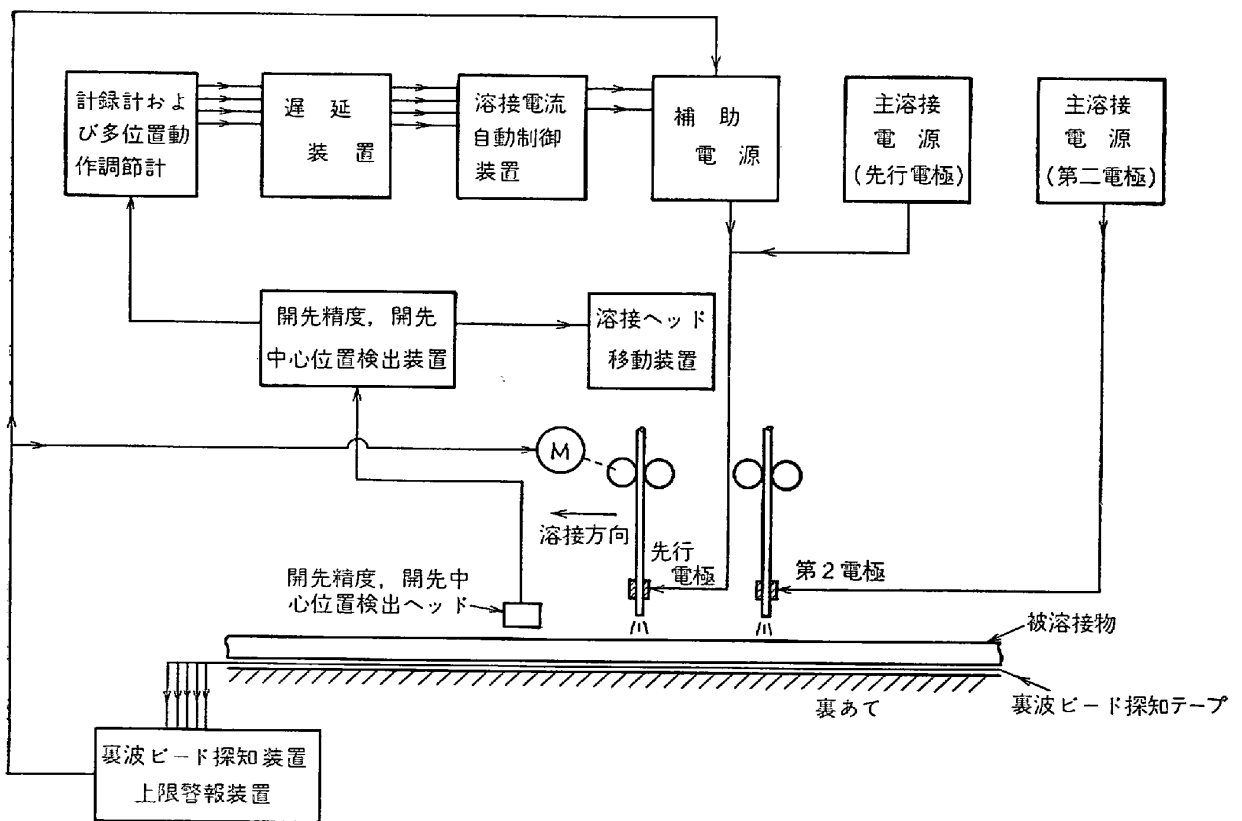


図24 金材研で試作した片面溶接自動制御装置のブロック図

この図はタンデム2電極サブマージアーク片面自動溶接の例で、先行電極の溶接方向前方に開先精度ならびに開先中心位置検出ヘッドが取り付けられ、溶接直前にこの検出電極により開先に無接触で連続して開先条件の変化たとえばルート間隔、仮付けビードの有無などを検出し、さらに検出電極を挿入した位置と開先中心位置とのずれも検出する。開先精度に対する検出出力は記録計に送られ、記録されるとともに一定溶接電流で許容できる開先条件の範囲に応じて設定した多位置動作調節器によりパルス信号に変換され、さらに検出ヘッドと溶接先行電極との間の時間おくれだけ遅延させた後溶接電流制御装置に送られる。いつぼう開先中心位置と検出電極との相互位置の偏差による検出信号は、溶接ヘッド移動装置に送られ、駆動モータにより2電極溶接ヘッド全体を左右に移動させる。これらの機構によつて溶接前のフィードフォワード制御ができる。先行電極による裏波ビードの形成はその溶接条件および開先条件以外に裏あて条件によつてもある程度左右され、とくに裏あての密着度が完全でないと裏波ビードが過大になつたり溶落ちが起る。そこで、溶接中の裏波ビードの形成状態を探知する特殊な裏波ビード探知テープを敷き、溶接作業者がこの探知テープからの探知信号により、溶接中つねに裏ビードの状況を監視することができ、また裏波ビードが過大になつたり溶落ちが起りそうになつたときは警報装置が作動し、溶接補助電源を主電源から切離しある一定電流を瞬間的に減少させるかあるいは溶接ワイヤの送給をあげるわずかな時間だけ停止させ、アークを開先上部に引き上げるにより、裏波ビードを一定に保つフィードバック制御機構をもっている。

なおこの図では裏波ビードを形成する先行電極のみ溶接電流の自動制御を行なっているが、次層以後の開先条件の変化の検出により開先の溝を満たす必要な溶融金属量が容易に推定でき、最終溶接電極の電流制御による余盛量の制御も容易に行なうことができる。

近年数値制御または NC 制御 (Numerical Control) 法が発達し、省力化の有力な手段として検討されている。これは加工するものの形状寸法や作業の順序を数値化しテープまたはカードに記録し電子計算機によつて機械を操作し加工物を自動的に加工する方法である。この方法は工作機械、金属成形機械、切断機および溶接機などの各種生産機械に利用しうが、溶接の場合とくにアーク溶接においては組立ての作業内容や溶接現象が複雑で、工作機械や切断機に比べて技術的に多くの困難がある。この場合数値制御とシーケンス制御をうまく結合させる必要がある。

アーク溶接においては、まず溶接準備のため

の位置ぎめのステップ、溶接条件の設定、溶接時の溶接線に追従するステップの各段階が必要となるが、数値制御は一方的な命令伝達システムであつて、加工対象からの情報を加工方法にフィードバックする能力はもっていない。そこで、溶接開先の状況や溶接結果を溶接条件にフィードバックして溶接の信頼性と無人化の可能性を高める工夫が重要な課題となる。したがつて、このための演算機能をもち、かつ総合的生産管理あるいは溶接の最適条件制御を行なうためのコンピュータシステムが望ましい。

いつぼう、スポット溶接などでは、工作物の位置ぎめ作業の NC 化は工作機械の NC ボール盤と類似であり、またスポット溶接機のガンは、工業用ロボットと組み合わせるとそのままロボットの手となり、汎用性のある自動機となることが考えられる。このように、溶接作業への工業用ロボットの適用は、スポット溶接やスタッド溶接では十分その可能性があることが明らかである。図 25 は米国ゼネラルモータ社で実用化している工業用ロボット (ユニメート) 付スポット溶接機の例で、乗用車のサイドフレームのかなり複雑にカーブした部分のスポット溶接 (18点, 55sec) に利用している。しかしこれはロボットとしてはきわめて低級なもので、視覚などの感覚器や移動機器などをそなえていない。このロボットは米国ユニメーション社で開発したもので、わが国では川崎重工(株)がここと技術提携を行ない、最近「川崎ユニメート」の生産を開始した。

海洋開発は近年とくにクローズアップされてきており海洋の調査、計測、探索および海中作業機器の開発が共通の技術的問題として注目されている。このための技術として必然的に将来をになつて登場するのが海洋ロボ

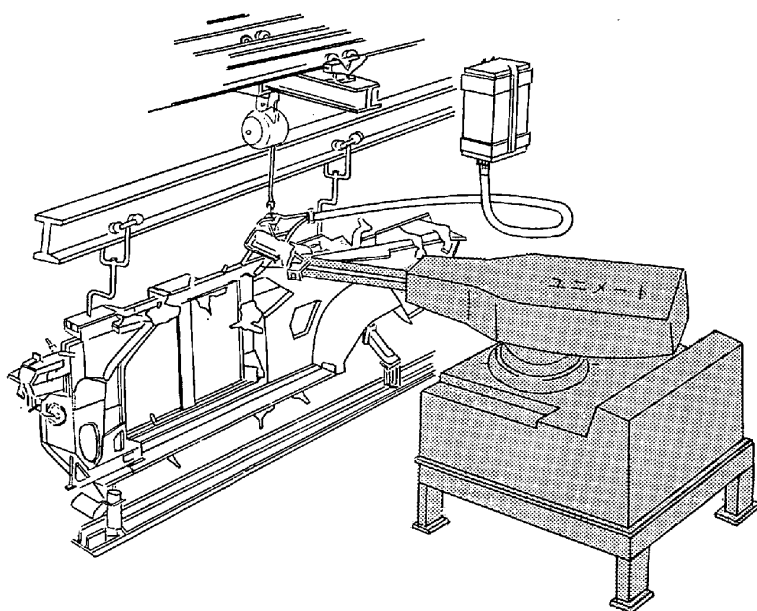


図25 スポット溶接作業への工業用ロボット(ユニメート)の実用例

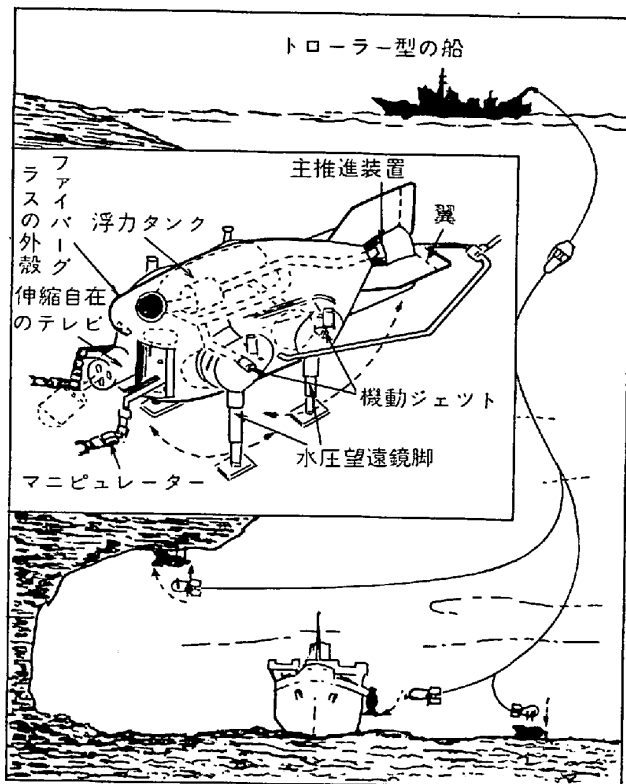


図26 多くの作業をこなす海洋ロボット

トである。そして、人間が潜水できないような深海での水中溶接作業などはロボットにたよらざるを得ないようになるであろう。そしてさらに今後、海中を自由に目的にそつて移動し、さまざまな作業をこなす海洋ロボット(図26参照)が登場してくるものと考えられる³¹⁾。

以上のように、溶接の自動制御は溶接に関する不確定要素の排除のための標準化によつて促進され、溶接作業へのならい制御や数値制御の応用も多くなるであろうし、電子計算機による制御や管理も十分に期待できることである。また将来感覚、知能およびこれに应答する動作機能を有するロボット装置を中心とした生産システムの発達が注目されることである。

4. 溶 接 の 将 来

以上で現代の技術革新の方向を「物質」、「エネルギー」、「情報」の3本の柱に大別して概観し、これらに対応する溶接技術の現状を「材料」と「溶接法」に大別して展望し問題点について述べてきた。これによつて、ある程度溶接の将来が予見されてくるわけである。

溶接技術は要するに、数多くの材料と数多くの溶接法のなかから選定した適材適法の組み合わせを中心として溶接構造物をまとめあげるシステム化の技術である。

近年、科学技術の将来予測の調査がはやつており、その結果を収斂させて将来の“needs”の探究が進められている。溶接技術は技術革新のための構造物の製作の鍵を握る重要な生産技術であつて、各応用分野の技術革新

のない手として受動的な立場にある。と同時に各分野の技術革新に培われて生長していく技術である。それだけに、各分野の技術革新の動向を予測し、溶接の進むべき方向を見きわめる必要がある。そして各分野の“needs”に対してすぐ対処しうる現実的な研究とともに先行的な研究開発を進めていかなければならない。

各応用分野の代表的な“needs”の例をあげると、

- ① 造船では流れ作業方式による組立工場への転化、全姿勢片面自動溶接、船台あるいは塔載工程における省力化、現場の移動式工場。
- ② 鉄骨・橋梁ではH形鋼や鋼管構造の活用、現地組立て溶接、安全溶込み溶接。
- ③ 圧力容器・パイプラインでは現地における片面自動溶接、予熱の自動制御、溶接管理。
- ④ 産業機械では高能率溶接。
- ⑤ 鉄道車両では溶接ひずみの防止、バックバーなしのスポット溶接。
- ⑥ 自動車工業では品質管理の自動化、高能率溶接、マイクロ溶接、工業用ロボット。
- ⑦ 航空機工業では板金構造の結合方式、ハニカム構造への拡散接合の利用、接着とスポット溶接の組み合わせ。

⑧ 化学プラント工業では各種耐熱、耐食材料の溶接異種材料の溶接、溶造法による成形。

⑨ 重電機関係では超厚板のエレクトロスラグ溶接や狭開先溶接、超厚板の溶接割れ防止。

⑩ 原子力工業では高品質溶接、放射能下における遠隔補修溶接。

⑪ 宇宙開発では宇宙環境下の高真空無重力状態での溶接(宇宙溶接)、宇宙ステーション組立てのための軽量溶接熱源とリモートコントロールの開発。

⑫ 海洋開発では水中溶接、深海溶接。

⑬ 電子工業では超小形電子部品、半導体素子のマイクロ溶接。

などがあげられる³²⁾。いずれにしても、これら各応用分野の共通的な問題としては、溶接作業や熟練度の不足、労働賃金の節約、作業環境の改善などのための省力化さらには無人化の方向が大きくクローズ・アップされている。また高能率、高品質、精密溶接が注目される。そして今後の海洋開発や宇宙開発などではきびしい環境下における溶接の問題がある。一方、材料の種類は技術革新に伴つて豊富になり、また各種構造物に使用される要求がシビアになつてくる。かくして材料の選択とそれに適合した溶接法の選択が重要な問題であり、その組み合わせが多様化してくるであろう。

現在の溶接の欠点として溶接によるひずみや残留応力の発生があり、これの防止方法として高集中エネルギーによる同時溶接、精密溶接あるいは熱を与えない接着などが考えられる。また消極的な方法として溶接ひずみの

コンピュータ予測により、あらかじめ逆ひずみをとつておくことも考えられる。

ここで、「精密溶接」という言葉の解釈について言及したい。「精密」とはある機能を果たすための合目的な考察であつて、その物の精度の絶対値をいつているのではないと考へたい。すなわち、これは元来物を対象にしながら物そのものではなく、無形的な思考の予測の精確さとして把握したい。そしてその結果として予期した範囲に精度がおさまればよいと考へる。「精密溶接」は溶接後機械加工を要しない溶接というように解釈されることもあるが、本来は予測と結果が一致する溶接のことであると解釈される。将来の溶接の無人化はこの意味の精密溶接に連帯するものである。

溶接構造物の製作にあつては、設計、施工、検査、管理が必要であるが、将来これらの各段階で種々の変革が予想される。

設計においては、構造の形状、強度計算、マトリックス構造計算、図面の作成などがすべて電子計算機またロボットなどによつてなされるようになるであろう。

施工においては、切断、曲げ加工、組立て、溶接の一連の工程が著しく自動化され、人間が作業に関与する箇所はきわめて少なくなるかあるいは皆無になるだろう。

検査と管理においても、施工中およびその前後の適当な時期にすぐれた検出装置によつて検出し、これらの信号に基づいて自動制御することによつて、品質と能率を保証するシステムがとられるであろう。かくして溶接は無人化の方向をたどるであろう。

そうなると、一人人間の役割として残るのはなんだろうかという問題がでてくる。従来、人間は機械と別物であつたが、21世紀ごろの世界では、人間の動作と機械の一体化の時代(ロボット時代)となり、相互の交流が物質的にも精神的にも盛んとなるが、人間の役割としては未来の創造活動と意志決定が重要となるであろう。またそのうちに人間も含めて生物特有の増殖機能も人間の創造による機械によつて可能になるかも知れない。

21世紀の世界は人間学も含めて生物学の時代ともいわれ、物心両面の接合が一つの焦点になる²⁾。

追記

本稿は日本鉄鋼協会和文会誌分科会から数カ月前に依頼されていたが、この間著者のソ連旅行などもあつたしまた標題の占める範囲の広さとむずかしさもあつて、ついおくれてしまつたことをお詫びする。しかし、幸い著者はここ3年間に米国、ソ連、東西欧州諸国の溶接関係の国際会議に出席し、また溶接事情を見学することができた。また金材研溶接研究部の活動や国内の溶接技術に肌で接する機会を得て、これらを総合して本稿をまとめた。

文 献

- 1) 稲垣道夫: 金属材料, 7(1967)10, p. 2~18
- 2) 稲垣: 溶接ニュース '69新年特別号, (1969), p. 47~49
- 3) 大河内一男, ほか: 技術革新, (1969), p. 253 [東京大学出版会]
- 4) 寺井清, ほか: 日本造船工業会創立20周年記念論文, (1969), p. 43
- 5) 木原, 稲垣, 堀川, 栗山: 溶接学会誌, 39 (1970) 3, p. 156~166; IIW Doc. IX 674-70 (1970), p. 16
- 6) JIWI IX QT Subcommittee: IIW Doc. IX-673-70(1970), p. 117. [溶接学会]
- 7) Y. ITO and K. BESSYS: IIW Doc. IX-576-68 (1968), p. 45; IIW Doc. IX-631-69(1969), p. 18
- 8) M. INAGAKI: Trans. NRIM, 10(1968) 10, p. 23~39; 高圧力, 7(1969) 5, p. 1779~1794
- 9) 富田真己: 溶接技術, 18(1970) 8, p. 49~54
- 10) J. HEUSCHKEL: Weld. J., 43(1964) 8; Welding J., 46(1962) 2
- 11) LPガス貯蔵タンク保安調査研究委員会: LPガス貯蔵タンク保安対策研究報告書, (1964), p. 139 [日本LPガスプラント協会]; H. KIHARA, M. WATANABE, K. HORIKAWA, and M. INAGAKI: Text of Seventh World Petroleum Congress, (1967), P.D. No 27
- 12) 日本溶接協会委員会 JH委員会: 耐水素性 Welcon-2HCr 鋼板の溶接性ならびに使用性能, (1965), p. 54, [日本溶接協会]
- 13) 氏家昭, ほか: 三菱重工技報, 6(1969) 3, p. 1~7; 同, 6(1969) 4, p. 1~9; 同, 6(1969) 6, p. 1~8
- 14) 小谷, 堀田, 羽鳥: 溶接技術, 17(1969) 11, p. 85~90
- 15) 水野誠: 火力発電, 21(1970) 3, p. 337~354
- 16) 原子力研究委員会 SCS 小委員会: 原子炉用ステンレス鋼肉盛りクラッドの欠陥防止に関する試験研究, (1970), p. 151 [日本溶接協会]
- 17) R. L. O'BRIEN: Plasma Arc Metalworking Processes, (1967), p. 50, [American Welding Society]
- 18) 長谷川: 金属材料, 7(1967) 10, p. 37~41
- 19) 蓮井: 日本機械学会誌, 73(1970)616, p. 51~52
- 20) R. BAKISH: Reports of the International Symposium of Scientific Problems of Welding and Special Electrometallurgy, devoted to the 100th Birth Anniversary of E.O. Paton, Sec. I (1970) May, p. 20-35, [Kiev, USSR]
- 21) 金谷, 橋本, 田中: 電子ビーム, (1968), p. 89 [日刊工業新聞社]
- 22) 黒田: 電子ビーム溶接技術資料, 133(1969), p. 49. [NEC日本電気(株)]
- 23) 岡, 荒田, 蓮井, 富安, 橋本: 新溶接法の原理・応用と問題点, (1970), [溶接学会第17回講習会テキスト]
- 24) B. E. PATON: E.O. Paton Institute of Electric Welding, (1967), p. 100~106, [Kiev, USSR]
- 25) B. E. PATON, A. E. ASNIS ほか: Reports of the International Symposium of Scientific Problems of Welding and Special Electrometallurgy,

- devoted to the 100th Birth Anniversary of E. O. Paton, Section I (1970) May, p. 142~154
および p. 7~19 [Kiev. USSR]
- 26) N. E. ORROK: Metal Progress, (1969) Oct., p. 147~150
- 27) 福山: 高圧力, 8(1970) No 5
- 28) H. A. JAMES and E. P. VILKAS: Tooling and Production Magazine, (1967), Dec.
- 19) 稲垣, 岡田: 特許公告, 昭45-11411
- 30) 沢井: 日本機械学会誌, 73(1970) 616, p. 669~676
- 31) 岡部, 清原, ほか: 溶接ニュース '70 夏季特別号 (1970), p. 91~122
- 32) 三浦, ほか: 金属材料, 9(1969)11, p. 2~163 [日刊工業新聞社]
- 33) 寺井, ほか: 溶接技術, 17(1969)11, p. 22~77