

© 1983 ISJ



水中溶接技術の現状

蓮井 淳*・菅 泰雄*

Present Status of Underwater Welding Technology

Atsushi HASUI and Yasuo SUGA

1. 緒 言

資源およびエネルギー源の枯渇，陸地面積の不足，公害による生活環境の破壊など深刻化しつつある諸問題を解消する一つの方途として，海洋の開発に関心が高まっている。すでに，海底油田の掘削はメキシコ湾あるいは北海などにおいて大規模に行われているが，さらに，各国において石油，天然ガス，鉱物資源などの探査が盛んに続けられている。また，人工島，海洋貯油タンク，海底トンネル，その他多くの海洋構造物建造の構想もある。

このような海洋開発の発展とともに，水中における構造物の建造，構造変更，修理などの量が増加し，種々の工法の確立がますます要求されるようになるであろう。その中で，水中切断と溶接技術の必要性は高くなるものと予想される。水中での切断と溶接は，その作業環境が苛酷で，良好な結果を得るのははなはだしく困難であるから，構造物の製作は，極力，陸上で行つてから，水没するようにし，水中作業量は少なくするのが肝要である。

しかし，構造物が複雑になり，大形化し，設置水深が大となると，建設に当たつて，また，建造後の構造物の改造，とくに不慮の事態による修理にせまられる場合，水中での切断，溶接は必須の加工法の一つとなるであろう。

本文は，水中溶接技術の現状について概説するものである。

2. 水中溶接法

水中溶接法は，湿式法と乾式法に大別される。前者は直接水の中で溶接を行う方法であり，溶接アーク，溶接箇所は溶接雰囲気である水に接している。後者は，溶接箇所を完全に覆うことのできる容器内に入れ，その中に気体を満たし，気中で溶接を行うものである。

2.1 乾式水中溶接

2.1.1 大気圧下溶接

大気圧下溶接 (one atmosphere welding) は，支援

船からつり下げられた大形容器で溶接部を完全に覆い，容器内の圧力を大気圧に保ち，溶接作業員がその中で溶接を行う方法である。溶接雰囲気は，作業水深に関係せず，大気中と同一の状態に制御するので，水中溶接とはいいながら，陸上での溶接となんら変わるところがない。従つて，大気中溶接と全く同一の性能を有する継手を得ることができ，他のいずれの方法より信頼性の高い水中溶接法といえる。しかし，容器内を外部から完全に密封する必要がある，水圧に耐えられる十分な強度の容器を必要とする，作業員の安全性を確保・維持するためのシステムを必要とする，単純な形状の構造物にしか適用できない，施工経費が著しく高くつくなどの欠点を有する。

例えば，この方法によつて 1977 年に北海の水深 150 m において，直径 405 mm のパイプラインとライザの接合に成功している。ここでは，直径 2.44 m，長さ 3.66 m の円筒形の水中容器を用いて，パイプとライザー接合部を囲んだ。溶接作業員は，支援船からサービスカプセルによつて容器まで輸送される。容器内の呼吸ガスは空気で，作業員はダイビング装備を着用しない。この場合，溶接法として 75%Ar+25%CO₂ シールドガスによるミグ溶接が用いられた。

2.1.2 ハイパーバリック溶接

ハイパーバリック溶接 (hyperbaric welding) は，支援船からつりがね状の容器を降下し，溶接箇所をその容器で囲み，その中の水をガスにより排除して，その水深に相当する高圧のガス雰囲気下で溶接作業を行う方法である。このハイパーバリック溶接法は，さらにハビタット溶接 (habitat welding) とドライチャンバ溶接 (dry chamber welding) とに分類されている²⁾。

ハビタット溶接は，作業員が活動できる十分な大きさの容器内を，人間の呼吸ガスで排除し，作業員がダイビング装置を着用せずに，水深と釣り合う高圧雰囲気中で直接溶接を行う方法である (図 1)。この方法では，作業員は身軽に動けるので，溶接の作業性が確保され，比較的高能率の溶接作業が期待されるが，作業員の安全

昭和 57 年 9 月 22 日受付 (Received Sept. 22, 1982) (依頼解説)

* 慶応義塾大学理工学部 工博 (Faculty of Science and Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi Kohoku-ku Yokohama 223)

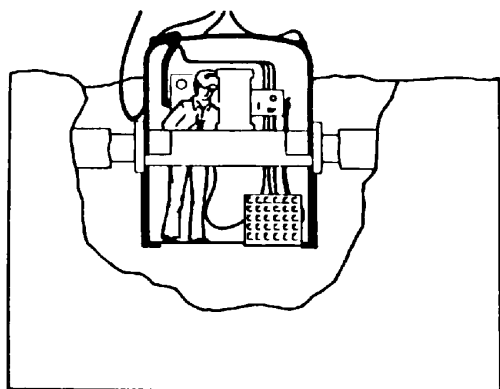


図 1 水中ハビタット溶接

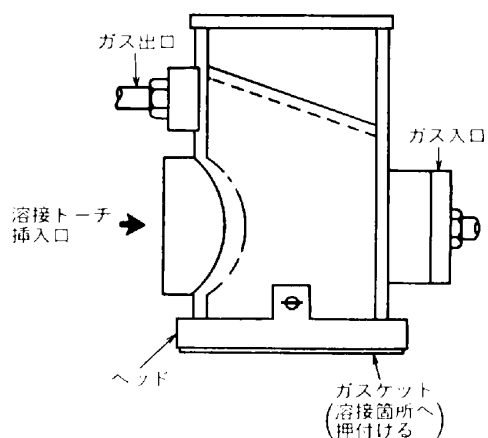


図 2 ポータブルドライスポット (PDS)

性、溶接アークの安定性の両面から、水深に限度がある、生命維持装置などの設備費が高くつく、複雑な形状の構造物の溶接には適用できないなどの欠点を有する。

ドライチャンパー溶接は、溶接部を容器で囲い、チャンパー内の水をガスで排除し、高圧雰囲気中で溶接する方法である。雰囲気ガスには任意のガスを用いる。従って、溶接作業者は、潜水服を着たまま作業を行わなければならない。このため、ハビタット溶接に比べて、容器および周辺設備は比較的簡単でよく、溶接に適したガス雰囲気を使えるなどの利点を有するが、反面、作業者の作業性が損なわれるために溶接作業の能率が低下するなどの欠点を有する。

ハイパーブリック溶接を実用した例に、1967年アメリカのメキシコ湾のルイジアナ沖約 40 mile の海面下 34 m において、送油パイプラインに新しいパイプラインを接続するため、支管 (150 mm) を本管 (255 mm) に T 形に接合したホットタップ (hot-Tap) 溶接がある⁹⁾。ハイパーブリック溶接は、その後、多く実用されている¹⁾。

2-1-3 局部乾式水中溶接

局部乾式水中溶接 (dry spot welding) は、小型のポータブルドライスポット (PDS)⁴⁾ と呼ばれるカップ (図

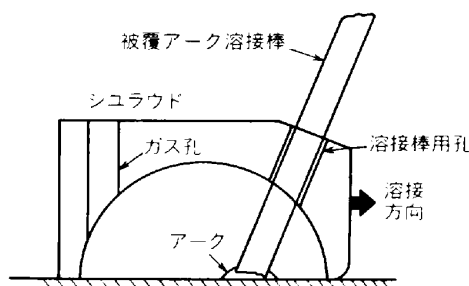


図 3 局部乾式水中溶接用シユラウド

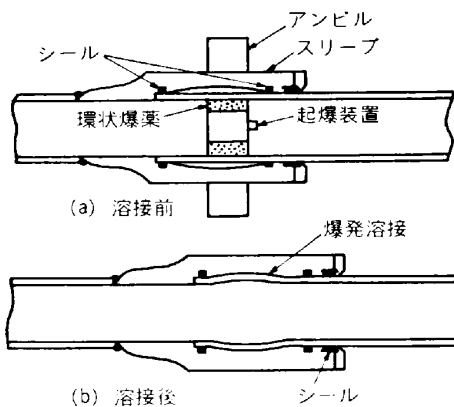


図 4 水中爆発溶接

2) を溶接部にかぶせ、アーク雰囲気のみ水を排除して気中で溶接する方法である。従って、溶接作業者が水中に組み立てられた足場に立つて、溶接トーチおよび PDS を直接手で支持しつつ溶接箇所を移動させて溶接を行うという手段をとる。この方法では、十分な水の排除が困難である、溶接箇所が十分観察できない、溶接作業者は潜水装置を身につけた状態で水中で作業を行わなければならないため作業が極めて困難である、などの理由から、優れた性能の溶接継手を得ることは期待できない。しかし、大きな溶接用容器などの大規模な設備を必要とせず、作業コストが安くつくため、簡単な補修作業などには向いている。

また、シユラウド (shroud) と呼ばれる小さな空洞をもつ容器 (図 3) で溶接部を覆ってアーク溶接する方法もある⁵⁾。

2-1-4 水中爆発溶接

図 4 はパイプの水中爆発溶接の状況を示している⁶⁾。図 (a) に示すように、パイプ内部に環状爆薬を設置し、それを起爆して、パイプ先端部をスリーブの内面に溶接する。スリーブの内面を凹ませておくことは良い溶接を得る骨である。表面状態と乾燥状態は溶接の品質に及ぼす重要な因子であるので、専用のパイプ先端部の加工装置が開発されている。

2-2 湿式水中溶接

湿式水中溶接は、水の中で直接溶接を行う方法であり、溶接箇所は水深に対応する水圧の水にまともさら

されている。従つて、溶接部は溶接雰囲気である水の分解によつて生じた水素の影響および水による急冷などを受けることになる。しかし、莫大な経費を必要とする溶接容器、各種の設備などを必要としないため、簡単な補修溶接や緊急を要する溶接、容器の適用が困難な大形あるいは複雑な形状の構造物の溶接などに利用できるという長所をもつているため、その実用化のための研究が多くの研究機関で精力的に継続されている。以下、現在研究開発中の主な湿式溶接法について述べる。

2.2.1 被覆アーク溶接法

熟練したダイバー溶接作業者が被覆アーク溶接を直接水の中で行う方法である。本法は 15~20 m までの作業が対象で、緊急を要する場合、簡単な補修溶接、自動溶接が困難な箇所の溶接などに便利である。

水中溶接では、大気中溶接に比べて 20% 増の電流、2~3 V 高い電圧が用いられる。本法は、高度の潜水技術と溶接技能を兼ね備えた熟練作業者を必要とする、作業において視界が悪く溶接欠陥を生じやすい、水深の増大に伴つて溶接金属中に気孔を生じやすい、作業の能率が悪いなどの欠点を有する。なお、ダイバー溶接作業者を養成する場合、ダイバーに溶接を教えるよりも、溶接工に潜水を教える方が教育効果が上がるといわれる。

2.2.2 重力式溶接法

重力式溶接法は、溶接原理そのものは、前項の被覆アーク溶接棒による手溶接法と変わらないが、重力を利用して溶接棒の連棒を自動的に行うもので、ダイバー溶接作業者の技能を必要としないため、手溶接に比べて安定した品質の溶接継手が得られるものと期待される⁷⁾。その原理より比較的溶接長の短い、直線状のすみ肉溶接に適している。また、本法は立向き⁸⁾ 上向き⁹⁾ 溶接にも適用することができる。ほとんどの系統の溶接棒の使用が可能であるが、とくに高酸化チタン系溶接棒を用いると、いずれの溶接姿勢においても安定して良好な結果が得られている。ただし、水深の増大とともに溶接金属中に気孔を生じやすくなり、適用しうる水深に限度がある。

2.2.3 フラズマ溶接法

プラズマジェットを併用したプラズマアークは、エネルギー密度が高く、指向性が大であり、かつ、水中においても極めて安定して発生維持できるため、水中における自動溶接に適している。図5は、水中プラズマ溶接の要領を示したもので、溶接部をシールドする方法として、不活性ガス¹⁰⁾、粘性液¹¹⁾、水¹²⁾のカーテンの利用など種々の方法が検討されている。本法によると、水深 300 m までであれば、溶接欠陥の認められない溶接継手が得られている¹²⁾。

2.3.4 サブマージアーク溶接法

一般の水中溶接は、周囲の水による冷却効果が大きく、硬化しやすい。これに対して、サブマージアーク溶

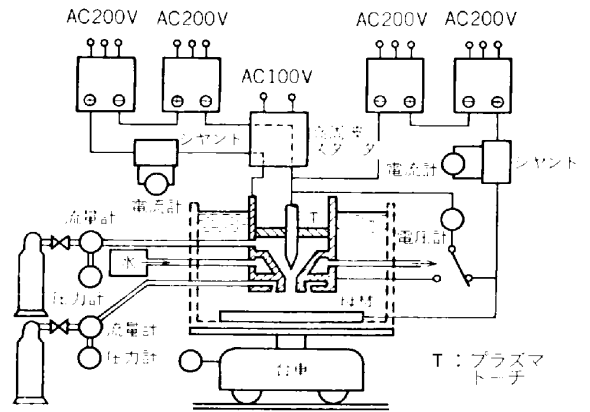


図5 水中プラズマ溶接

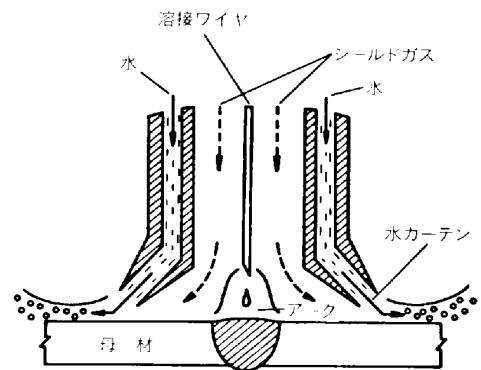


図6 水カーテン式ガスシールドアーク溶接

接法では、大電流溶接が可能であり、かつ、溶接箇所を覆っているフラックスが溶接部を周囲の水から隔離しているために冷却速度を緩和できる、また、自動溶接が可能という長所を有していると考えられるので、水中溶接への適用の可能性が検討されている¹³⁾。溶接ワイヤには、フラックス入りワイヤが用いられ、フラックスとして、その水中への飛散と流失を防止するために粘性液を混入したものが用いられている。実験結果によると、溶接欠陥の認められない外観の良好な溶接が得られ、また、溶接部の冷却速度が低くて、継手の機械的性質は良好である。しかし、高水深では溶接金属中に気孔を生ずるため、使用できる水深が限られているという欠点がある。

2.2.5 炭酸ガス・ミグ溶接法

シールドガスとして CO₂、Ar あるいはこれらの混合ガスを用いたガスシールドアーク溶接では、海水が汚染されない。従つて、溶接直後の溶接部を TV カメラなどで監視しやすい、比較的大電流による自動溶接が可能であるなどの特徴をもつているので、我国において実用化のための研究が旺盛に行われている¹⁴⁾¹⁵⁾。CO₂ ガスシールドの場合には、水圧の上昇と共にスハッタリング現象が著しくなるため、現在では、Ar-CO₂ 混合ガスが用いられることが多い。

なお、シールドガスの気泡がトーチと母材の間に形成され、それが浮上するとき生ずるアーク雰囲気の脈動を

防止し、かつ、アーク雰囲気中に安定したガス空洞を確実に形成するために、水カーテンを利用する方法が開発されている¹⁴⁾¹⁵⁾。図6にその原理を示す。これは、溶接ノズル先端より、スカート状に円錐形水噴流を流出させ、その内側に噴出するシールドガスを細かい泡として外へ流出させつつ、安定空洞を形成するものである。また、後述するように、本法によつて得られた溶接金属中には拡散性水素量が極めて低いのが特徴で、水深 90 m までであれば、溶接欠陥の発生の認められない健全な溶接が得られている¹⁶⁾。本法は湿式水中溶接法として定着し実用されてゆくものと期待される。

2.2.6 その他の溶接

以上の他に、種々の溶接法の水中溶接への適用の可能性が検討されている。例えば、電子ビーム溶接法¹⁷⁾、摩擦圧接法¹⁸⁾、テルミット溶接法¹⁹⁾、エレクトロスラグ溶接法²⁰⁾などによる湿式水中溶接の報告がある。

3. 水中溶接部の性質

3.1 乾式水中溶接

乾式法の場合、水中溶接といつても実質的には溶接は気中で行われるわけであるから、溶接継手の性能そのものに関する問題は少ない。とくに、大気圧下溶接では、大気中溶接と全く同等の継手が得られる。

ハイパーバリック溶接では、水深の増大に伴つて、溶接雰囲気中の圧力も高くなるから、その影響を受けることになる。一般に、圧力の増大は、アーク柱の著しい緊縮をもたらす。その結果、アーク電圧が高まり、その変動幅が大となるとともに、アークが不安定となる²¹⁾²²⁾²³⁾。また、圧力の上昇に従つて、ヒュームの発生が増大するとともに溶接金属中に気孔が生成しやすくなる。さらに、しばしば、雰囲気圧力によつて溶接金属の化学成分

が変化する²⁴⁾。図7に、ミグ溶接における溶接金属の C, Si, Mn, Ni 含有率に対する雰囲気圧力の影響を、また表1に種々の圧力下で得られた突合せ溶接継手の機械的性質を示す²⁵⁾。

被覆アーク溶接、ティグ溶接、フラックス入りワイヤを用いるミグ溶接によるハイパーバリック溶接で、150 m までの水深でのパイプラインの溶接において米国の規格 (API 1104)、英国規格 (BS 4515) などに合格する良好な品質の溶接継手が得られ²⁴⁾、さらに、現在、300 m あるいはそれ以上の水深における溶接について研究が進められている²⁶⁾。

3.2 湿式水中溶接

湿式法は、直線水の中で溶接する方法であるから、溶

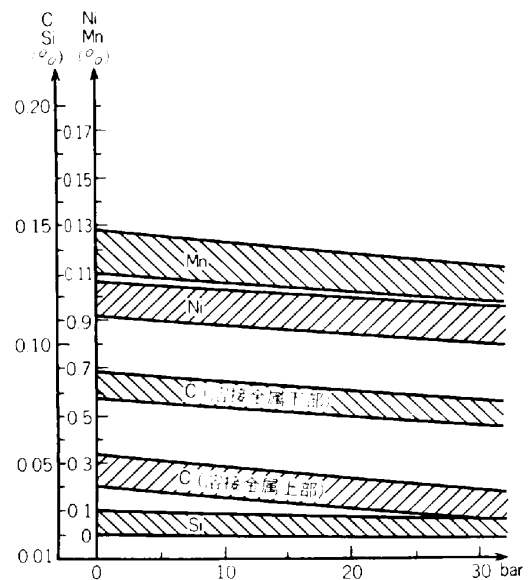


図7 ミグ溶接における溶接金属の元素含有率に対する雰囲気圧力の影響

表1 種々の圧力下で得られたハイパーバリック溶接継手の機械的性質

溶接法, 溶接材料, 溶接姿勢	水深 (m)	鋼種, 寸法	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	シャルピー衝撃値 (Vノッチ)		最高硬さ (10PN)
						溶接金属(J)	温度(°C)	
被覆アーク溶接 (低水素系溶接棒)	36	St 52.3N				95	10	268
	65	AP 15L×60				107	0	260
	125	"				133	0	262
	155	"				88	-10	263
被覆アーク溶接 低水素系溶接棒 (2.5 mm) 溶接姿勢 5G ¹⁾	300	AP 15L×65 肉厚: 20 mm 外径: 20 in	620	690	16	45	-10	257
ミグ溶接 He/O ₂ シールド 0.8 mm 径ワイヤ ルート溶接	300	AP 15L×65 肉厚: 20 mm 外径: 20 in	595 ²⁾	645	20	54	-10	244
ミグ溶接 He/O ₂ シールド 1.0 mm 径ワイヤ 溶接姿勢 5G ¹⁾	300	AP 15L×65 肉厚: 20 mm 外径: 20 in	575 ³⁾	620	20	65	-10	244
被覆アーク溶接 低水素系溶接棒 溶接姿勢 5G ¹⁾	通常のハイ プライン	AP 15L×65 肉厚: 11.7 mm 外径: 48 in	485	595		76	-30	173

注 1) AWS: Welding Terms and Definitions (1980), p. 46 参照
 2) 通常のミグ溶接用電源を使用
 3) 特殊な直流電源を使用

接冶金学上極めて苛酷な環境の中での溶接が強いられる。ここで湿式水中溶接における継手性能に及ぼす重要な問題点をまとめると、以下の3点に要約される。

- (1) 溶接環境である水による溶接部の急冷及びその硬化。
- (2) 溶融金属に溶解した水素によつて誘起される溶接部の水素脆化。
- (3) 水圧の上昇に伴つて生成される溶接金属中の気孔。

(1)と(2)は相まつて溶接部を著しく脆化させ、とくに、SM 50 kgf/mm² 級以上の高張力鋼では、溶接金属および熱影響部に割れが発生しやすい²⁷⁾。また、(3)は、各種の湿式溶接法の高水深での適用を阻む重大な問題の一つとなつている。

3.2.1 溶接部の冷却と硬化

溶接部の冷却に関する研究は、多くの研究者によつて手掛けられている。

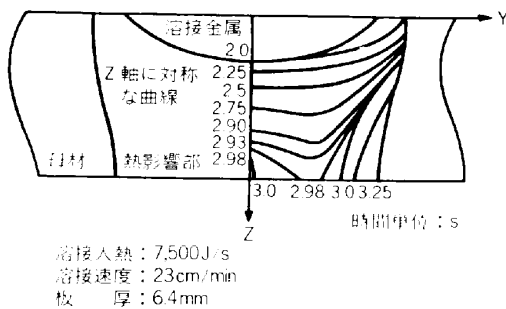


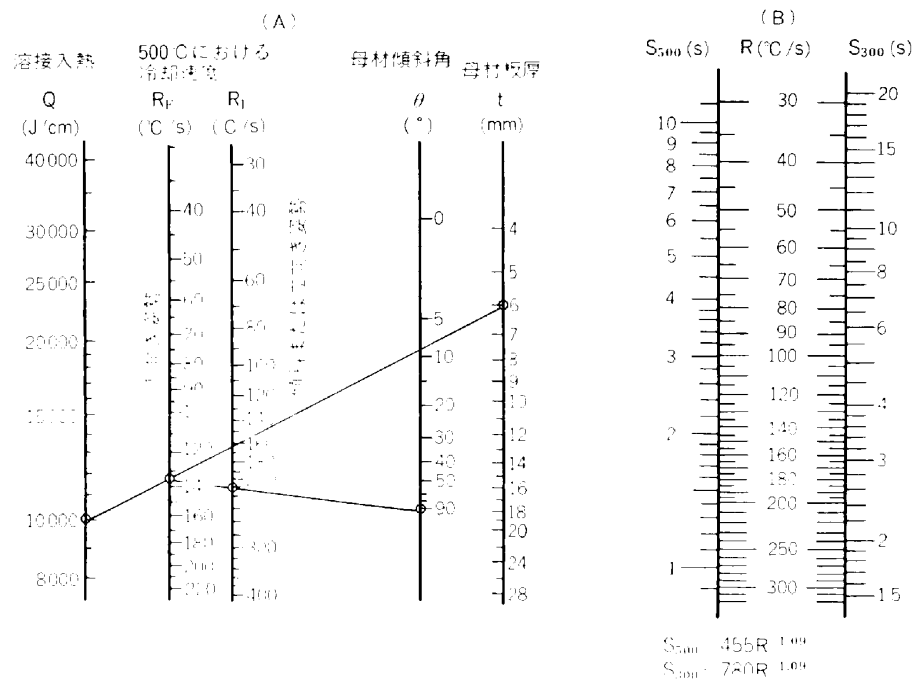
図 8 湿式水中アーク溶接部における 800~500°C 冷却時間

まず、水中溶接部は急冷されるが、これは溶接アーク周辺の気泡の浮上で激しく動く水に母材表面から熱を取られることに原因するという根拠から溶接部の冷却が理論的に検討されている²⁸⁾。図 8 は、厚さ 6.4 mm の鋼板のアーク溶接における熱影響部において等しい 800°C~500°C 冷却時間をもつ箇所を結んだものである。図において、高い冷却速度は母材表面に現れている。これは母材面から水への熱放出が母材内への熱伝導よりも熱影響部の冷却速度に大きな効果をもっていることを示している。

また、プラズマ溶接法を用いて、水中溶接部の冷却過程の特徴、すなわち、冷却途上で、その冷却速度が 700°C~800°C の温度域で極大になること、冷却曲線が不連続になることなどが明らかにされ、それは水の沸騰現象と密接に関連していること、また、小溶接入熱においては 800°C~700°C、800°C~500°C、800°C~300°C の冷却時間と入熱とはほぼ比例関係にあるが、入熱が増大するにつれて冷却時間延長の割合がしだいに減少することなどが示された²⁹⁾。

また、重力式溶接における溶接部の冷却状態に及ぼす溶接諸因子の影響についての実験的な研究によつて冷却速度に及ぼす主要な因子は、板厚、水温、水圧、溶接入熱、溶接姿勢、対象点の位置(例えば、溶接開始部、溶接ビード中央部、クレータ部)であることが明らかにされ、さらに、これらの因子の値が与えられた場合、溶接部の冷却速度を推定するための実験式およびノモグラフが作成された(図 9)³⁰⁾。

また、大気中でのガスシールドアーク溶接部の硬さ



(A) 500°C における冷却速度を求めるノモグラフ (水温: 20°C)
 (B) 500°C における冷却速度と 800~500°C および 800~300°C 冷却時間 (S₅₀₀ と S₃₀₀) の関係

図 9 水中重力式溶接における溶接ボンド部の冷却

表 2 種々の湿式水中溶接における冷却

溶 接 法	溶 接 電 流 (A)	溶 接 入 熱 (J/cm)	板 厚 (mm)	冷 却 速 度 R_{500} (C/s)	冷 却 時 間		文 献
					S_{500}	S_{300}	
重力式アーク溶接	150	10×10^3	9	140	1.9	3.4	7
重力式アーク溶接 (立向き)	150	9.5	9	230	1.2	2.0	8
プラズマ溶接 (A_r シールド)	150	39	12	96	3.1	5.2	11
プラズマ溶接 (水ガラスシールド)	150	38	12	44	6.5	11.2	11
サブマージアーク溶接	160	18	9	13	16	32	13
"	240	13	9	15	14	30	13
CO_2 -ミグ溶接 (水カーテン式円形ノズル)	300	18	12	-	1.7	3.7	31
CO_2 -ミグ溶接 (水カーテン式トレイサーノズル)	300	18	12	-	3.5	7.9	31

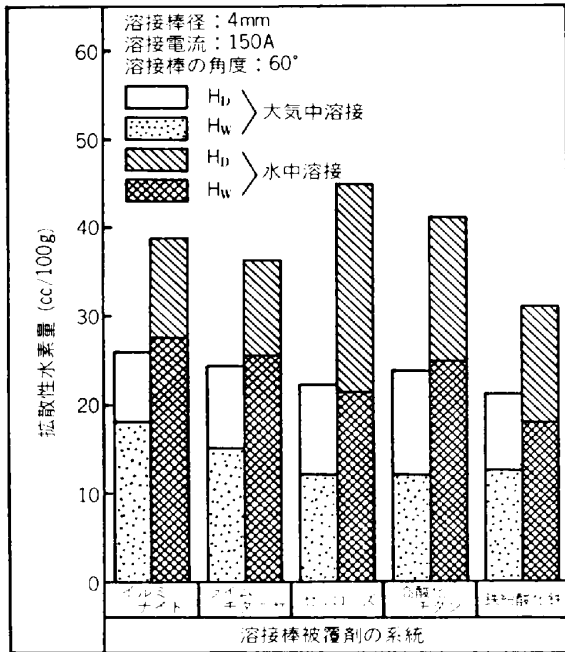


図10 水中溶接部と大気中溶接部における拡散性水素量の比較

は、溶滴移行形態の異なる溶接条件であつても、ほぼ同一曲線上にプロットできるが、水カーテン式のガスシールドアーク溶接においては、同一溶接入熱であつても、シールドの方法の相違あるいは溶接速度の違いによつて硬さははなはだしく異なってくる。これは同一入熱であつても、溶接速度が異なれば、溶融池の形状が異なり、大電流、高速溶接を行うと溶融池は長くなり、カーテン水によつて急冷され始める部分の温度が高くなるためであることなどが示された³¹⁾³²⁾。一方、この現象を理論的に解析して、溶接条件と形成すべきガス空洞の大きさを適正に選定しないと、溶接部に思わぬ硬化を生じる可能性のあることが明らかにされた³³⁾。

表2に種々の溶接法による冷却速度、冷却時間をまとめて示してある。

溶接部の硬さは、その部分の冷却速度と母材の化学成分によつて決まる。一般に、溶接部の冷却速度がわかれば、同種材料のCCT線図によつて、その到達する硬さを推定することができる。なお、この場合、冷却速度の指標として、 $800 \sim 500^\circ C$ の冷却時間 S_{500} が使用され

ることが多いが、 S_{500} が同じ値であつても、水中溶接部の方が、大気中溶接部より硬度が高いという報告³⁴⁾があるので注意を要する。

3.2.2 水素脆化

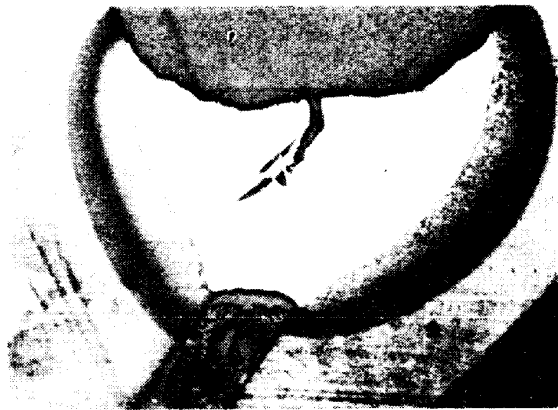
硬化した溶接部に水素が存在すると、溶接応力によつて割れが発生する。湿式水中溶接では、溶接部は硬化しやすく、また、水素の供給源である水そのものが溶接環境であるから、水素脆化という観点からすれば、最悪の溶接環境ということになる。

図10は、種々の系統の被覆アーク溶接棒を用いて水中でビード溶接した場合の拡散性水素量を大気中溶接におけるそれと比較したもので、前者は後者の約1.5~2倍の値を示している³⁵⁾。なお、図中、 H_D は溶着金属100g当たりの拡散性水素量を、 H_W は溶接金属100g当たりの拡散性水素量を示したものである(棒グラフ H_D も H_W も横軸を基準0として読む)。

被覆アーク溶接棒を用いて高張力鋼を水中溶接した例は多く報告されているが、その大多数に、溶接部に割れが発生することが報告されている²⁷⁾³⁶⁾³⁷⁾。オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケルあるいは鉄-ニッケル系の溶接棒を用いると、母材熱影響部および溶接金属における割れ発生防止に有効とされている³⁶⁾³⁸⁾。これは、これらの溶接棒を用いると、溶接金属中にオーステナイトが生じ、熱影響部の水素濃度が低下すること、溶接金属の硬さが低く、延性に富むために熱影響部に作用する拘束応力がこれらの溶接金属の塑性変形により緩和されることなどによるものであると考えられる³⁸⁾。しかし、この場合、写真1に示すような高温割れが溶接金属中に発生することがあるので、オーステナイト系溶接棒を用いれば、必ず割れの発生を防止できるというわけではないので注意を要する³⁶⁾。

水中溶接部は、大気中溶接部に比べて、靱性に乏しいが、この試験片を大気中にて常温ないし $200^\circ C$ に加熱保持して溶接部からの水素の逸出を促すと、その性質が著しく改善されるという事実がある³⁹⁾。これは溶接部における水素がその靱性を低下させていることを示唆するものである。

水中溶接部の水素逸出の促進と水中熱処理を行う方策として、水中溶接後に、その部分を電磁誘導加熱する方式が開発されている⁴⁰⁾。これは鋼管を円周溶接した後、



(母材: HY-80 鋼 溶接棒: E31016)

写真 1 水中溶接金属に生じた割れ

×8×4/5

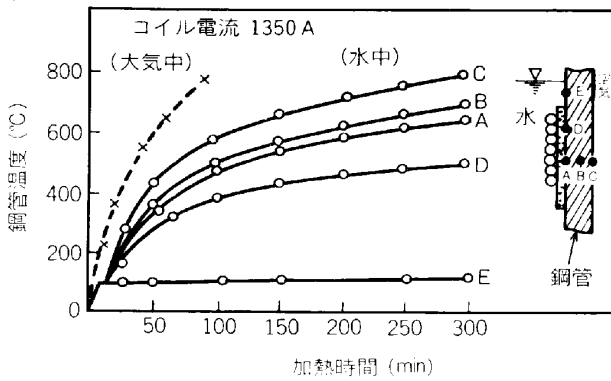


図11 水中鋼管の電磁誘導加熱

その周囲に誘導コイルを設置して、溶接部を加熱するものである。誘導加熱は熱の集中性が良く、水深に影響されないのが有効な加熱方法であるが、被加熱部近傍に水が直接接触すると、蒸発と対流による熱放散が大きく、熱処理に必要な昇温が得がたい。そこで、ここでは、被加熱部に耐水布を巻き付け、放熱を抑制した状態で加熱を行っている。例えば、外径 400 mm の鋼管 (肉厚: 12 mm) をコイル電流 1350 A, 周波数 60 Hz の条件で加熱すると、図 11 のような昇温曲線が得られ、約 700°C まで加熱でき、水中での熱処理が十分可能なことが実証されている。

水中サブマージアーク溶接法では、溶接部における拡散性水素量は少なくないが、溶接部の冷却速度が著しく低いから、SM 50 鋼程度までの鋼であれば、割れの発生は防止できる¹³⁾。

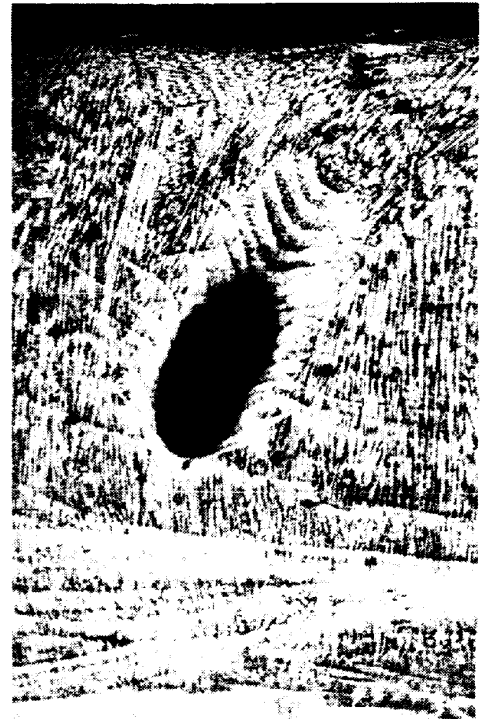
一方、水カーテン式の高圧シールドアーク溶接では、溶接部における拡散性水素量が著しく少なく、28 V, 300 A の溶接条件下で、わずか 2 cc/100 g にすぎない。したがって、HT 50 および HT 60 高張力鋼の水中溶接でも、割れの発生は認められなかつたと報告されている³¹⁾。

3.3 気孔の生成

浅い水深における溶接であれば、現在研究開発されつ

表 3 水中溶接金属に生じた気孔中のガス組成

溶接法	成分 (体積%)				文献
	H ₂	CO	CO ₂	残	
重力式アーク溶接	96.3	0.40	0.09	3.21	42
" "	97.5	0.24	0.04	2.22	42
CO ₂ アーク溶接	64	10	—	26	41
" "	76	12	—	13	41
ミグ溶接	67	14	—	19	41



(水中サブマージアーク溶接、水深: 2kgf/cm²)

写真 2 溶接金属に生じた気孔の断面形状とその周囲の凝固組織

つある前述の湿式溶接法を用いて、溶接欠陥の発生の認められない継手を得ることは容易である。しかし、水深の増大に伴って雰囲気水圧が上昇すると、溶接金属中にしばしば気孔が発生する^{41)~43)}。表 3 に、気孔中のガス組成の分析結果をまとめて示してある⁴¹⁾⁴³⁾。組成は、溶接法、溶接条件によつて若干異なるが、その主なる成分は水素であり、気孔生成の主要な原因が水素にあることが推察される。

水中溶接部の気孔生成に関する系統的な研究報告は少ない。0~6 kgf/cm² (ゲージ圧) の水圧下での重力式溶接およびサブマージアーク溶接において、溶接金属中の気孔の生成状況とその形態に及ぼす水圧の影響が検討された⁴³⁾。例えば、重力式溶接の場合、水圧が 2 kgf/cm² までの範囲で生成される気孔は溶接ボンド近傍から発生

し、その形態は円筒形が多く、これは水素濃度が余り高くない状態で生成する水素濃化型の気孔である。一方、水圧の上昇とともに熔融金属中の水素濃度が高くなると、熔融金属中に生成した気泡が凝固面に捕えられ、溶接金属の比較的上方に比較的小形の多数の気泡型の気孔として残存するとしている。

また、サブマージアーク溶接において溶接金属に生成した気孔は、写真2に示すように、その周囲に特殊凝固線を伴っていること、また、しばしば気孔が溶接金属中の凝固線から発生していることなどから考察して、気孔の生成状態が熔融金属の凝固過程における気泡中への水素の拡散現象、凝固の進展に伴う水素の濃化現象、気泡の浮上力学などと密接な関係をもっていることが明らかにされた⁴⁰⁾。

いずれにしても、溶接金属における気孔の生成を防止するためには、アーク雰囲気の水素分圧をできるだけ低下することが必要であり、その点、水カーテン式のガスシールドアーク溶接法は、溶接部における拡散性水素レベルが極めて低いので実用上とくに有望である。

4. 結 言

本文では、水中溶接法の開発と実用の状況ならびに現在の技術によつて得られている水中溶接部の性質などについて述べた。現在、各方面の研究機関、産業界において、種々の立場からより良質な溶接継手を作る水中溶接法の開発研究および施工法の改善が試みられているとともに、実用体験に基づくデータが蓄積されつつあるので、水中溶接技術は着々と進歩している。

ノルウェーで開かれる 1983 年度国際溶接学会 (IIW) 年次大会においても水中溶接に関する公開会議とコロキウムが行われることになつている。コロキウムでの課題として次のようなものが提案されている⁴⁵⁾。

1. 溶接および関連技術

- 1.1 水中で用いられる溶接法の特徴
- 1.2 溶接作業の監視と制御
- 1.3 溶接要員と自動溶接

2. 溶接の機械的および金属学的問題

- 2.1 水中溶接性
- 2.2 実用される溶接部の挙動：疲労、腐食など
- 2.3 補修の事例

3. 溶接部の検査

- 3.1 建造中の水中検査
- 3.2 使用中の水中検査

4. 既に完成した建造物についての説明

いずれも、水中溶接の進歩にとつて重要な課題である。米国においては、溶接学会 (AWS) が水中溶接施工における明細事項をまとめ、検討しつつある⁴⁶⁾。

前の第2節において、水中溶接法の最近の展開について述べたが、現実には、我が国における実用の大部分は

水中構造物の補修⁴⁷⁾⁴⁸⁾、改造⁴⁹⁾、サルヴェージ用⁵⁰⁾、あるいは鋼構造物の陰極防食のための陽極の溶接⁵¹⁾などであつて、本格的建設の活用は余り進んでいない。これは、水中溶接技術の確立が不十分であるのが、その理由でもあろう。今後、海洋開発の進展によつて水中溶接に対する社会的要求が増大することによつて、この技術が日ましく進歩することが期待される。

文 献

- 1) 尾崎弘憲：高温学会誌，5 (1979) 5, p. 202
- 2) AWS: AWS Specification-Underwater Welding, Apr. 1980
- 3) R. P. LYNCH and F. J. PILIA: Welding J., 48 (1969) 3, p. 183; B. C. GILMAN: OTC 1252, p. II-244 (1970)
- 4) H. O. MOHR, M. KLUTTZ, and E. W. BILL: OTC 1782, p. I-515 (1973)
- 5) E. A. SILVA and T. H. HAZLETT: Welding J., 50 (1971) 6, p. 406
- 6) P. R. REDSHAW, A. W. STALKER, and K. ALLEN: OTC 3349, p. 2581 (1978); P. R. REDSHAW and A. W. STALKER: OTC 3523 (1979), p. 1431
- 7) 蓮井 淳, 菅 泰雄: 溶接学会誌, 43 (1974) 8, p. 767
- 8) 蓮井 淳, 菅 泰雄, 当麻英夫: 溶接学会誌, 44 (1975) 4, p. 337
- 9) 蓮井 淳, 菅 泰雄, 当麻英夫: 溶接学会誌, 44 (1975) 6, p. 459
- 10) 蓮井 淳, 猪又初夫: 溶接学会誌, 40 (1971) 7, p. 622
- 11) 蓮井 淳, 衣川純一, 菅 泰雄: 溶接学会誌, 42 (1973) 1, p. 18
- 12) 衣川純一, 福島貞夫, 福島 孟: 溶接学会誌, 43 (1974) 2, p. 73
- 13) 蓮井 淳, 菅 泰雄, 岸 伸典, 寺西光夫: 溶接学会誌, 48 (1979) 11, p. 916
- 14) 浜崎正信, 榊原実雄: 溶接学会誌, 42 (1973) 9, p. 897; 43 (1974) 9, p. 868 他
- 15) 西尾安弘, 和田宏一, 八島 実, 岡本善一郎, 信重忠志: 三菱重工技報, 11 (1974) 2, p. 229; K. SHINADA, S. SHONO, Y. NISHIO, and H. WADA: IIW, XII-B-237 (1978) 他
- 16) 荒田吉明, 浜崎正信, 榊原実雄: 溶接学会誌, 46 (1977) 10, p. 728
- 17) Marine Tech. Soc.: Underwater Welding, Cutting and Hand Tools (1969), p. 195
- 18) J. D. RUSSEL and C. R. G. ELLIS: OTC 1906 (1973), p. II-803
- 19) K. MASUBUCHI and A. H. ANDERSEN: OTC 1910 (1973), p. II-847
- 20) 入江隆博, 松永恒文: 溶接技術, 27 (1979) 7, p. 21
- 21) 小林卓郎, 桑名 武, 木口立而: 溶接学会誌, 43 (1974) 8, p. 758
- 22) 中山 繁, 山下清司, 尾崎弘憲, 服部 晃: 溶接学会誌, 50 (1981) 8, p. 794
- 23) 西口公之, 松縄 朗, 堀 正樹: 溶接学会第 30 回溶接アーク物理研究委員会資料
- 24) G. M. CORIATT and G. P. BELLAMY: OTC 3351 (1978), p. 2601
- 25) M. R. INGLIS and T. H. NORTH: Weld. Metal

- Fab., Apr. (1979), p. 165
- 26) C. J. ALLUM, P. E. PINHOLD, and J. H. NIXON: *Welding J.*, 59(1980) 7, p. 200-S; GKSS: IIW Doc. DREAU-52-80; Institut de Soudure: IIW Doc. CREAM-20-79
- 27) 安藤精一, 朝比奈敏勝, 鶴羽正敏: 溶接学会講演概要 11 集(1972)
- 28) C. L. TSAI and K. MASUBUCHI: OTC 3469 (1979), p. 973
- 29) 衣川純一, 福島貞夫, 福島 孟: 溶接学会誌, 44 (1975) 10, p. 834
- 30) 蓮井 淳, 菅 泰雄: 溶接学会誌, 48 (1979) 12, p. 1077
- 31) 浜崎正信, 榊原実雄: 溶接学会誌, 48 (1979) 2, p. 115
- 32) 佐藤邦彦, 田村 屯, 大前 堯, 真鍋幸男, 品田幸三郎: 溶接学会誌, 50 (1981) 8, p. 800
- 33) 松縄 朗: 高温学会第 3 回高エネルギー加工問題研究委員会資料 (1980)
- 34) 衣川純一, 福島貞夫, 福島 孟: 溶接学会誌, 50 (1981) 1, p. 65
- 35) 蓮井 淳, 菅泰雄: 未発表
- 36) H. OZAKI, J. NAIMAN, and K. MASUBUCHI: *Welding J.*, 56 (1977) 8, p. 231S
- 37) C. E. GRUBBS and O. W. SETHI: OTC 1620 (1972), p. II-42
- 38) 鯉淵正夫, 横田武男: 溶接学会誌, 50 (1981) 5, p. 489
- 39) 蓮井 淳, 菅 泰雄: 未発表
- 40) 品田幸三郎, 田村 屯, 大前 堯, 和田宏一, 真鍋幸男: 溶接学会講演概要集, 28 (1981), p. 36
- 41) 益本 功, 近藤 穆, 中島義光, 松田一夫: 溶接学会誌, 40 (1971) 8, p. 748
- 42) 蓮井 淳, 菅 泰雄, 当麻英夫: 溶接学会誌, 45 (1976) 11, p. 967
- 43) 蓮井 淳, 菅 泰雄, 栗原 幹: 溶接学会誌, 50 (1981) 12, p. 1225
- 44) 蓮井 淳, 菅 泰雄: 溶接学会溶接冶金委員会資料 WM-884-82 (1982)
- 45) IIW Select Comm. "Underwater Welding", IIW CRE-au-46-81
- 46) AWS D36 Subcommittee: Underwater Welding Specification, Final Draft. Appr. 16 (1980)
- 47) N. ISHIKAWA: IIW CREAM-47-81
- 48) 永田義也, 戸山征二, 村上憲明, 大前 堯, 和田宏一, 真鍋幸男: 溶接技術, 27 (1979) 7, p. 42
- 49) M. SHUIN and Y. MOTOYAMA: IIW CREAM-13-79
- 50) 大谷本鏡三: 溶接技術, 27 (1979) 7, p. 36
- 51) 元川米夫: 溶接技術, 27 (1979) 7, p. 48