狭開先アーク溶接*

堀 勝義**, 羽田 光明***

堀 勝義

羽田 光明

Narrow Gap Arc Welding*

by Katsuyoshi HORI** and Mitsuaki HANEDA***

キーワード：狭開先、アーク溶接、GMAW、SAW、GTAW、
超狭開先、センサ、開先加工、ホットワイヤ

1. はじめに

厚板の溶接では、母材を削って大きな開先空間を作り、アークでワイヤを融かして埋めている。この開先空間を小さくして作業時間を短くし、ワイヤ消費量も少なくする、即ち狭開先化は誰も考えてきたことであろう。

その結果としての1層1パスや2パス溶接、また小入熱溶接は、継手品質の向上、溶接条件制御の単純さまた溶接姿勢の自在さなどの特徴を生み出し、アークによる厚板溶接の一つの究極の姿に近づきつつある。

狭開先アーク溶接は開先加工、開先合わせなど製缶技術も含めて、工場の総合的な製作能力を要求する¹⁾。しかし狭開先アーク溶接と言えば、溶接装置やフラックスの開発に視点が置かれていた。より一段の飛躍を目指すには、開先精度を向上する技術開発の面から見直しが必要であろう。

日本では1984年に出版された溶接法研究委員会によるガイドブック「ナローギャップ溶接」¹⁾、また国外ではMalinによる1987年のWRC Bulletin「Monograph on Narrow-Gap Welding Technology」²⁾によって、狭開先アーク溶接技術は一旦総括されている。

本稿では上記2文献および過去のレビュー³⁻⁶⁾との重複をなるべく避けながら、「狭開先アーク溶接」を現時点から見直し、また今後の技術開発への展望を試みた。

第2章では、「狭開先アーク溶接」の定義と、初期に技

術を開発した先駆者が何を夢見て、また何を問題としたのかを、その報告や特許から汲み取り紹介した。

第3章では、日本における技術開発の動向について溶接学会全国大会の発表から検討した結果を述べる。

第4章では、現在活用されている溶接装置とガイドブック¹⁾以後に開発されたあるいは開発進行中の技術と適用についてGMAW (Gas metal arc welding), SAW (Submerged arc welding), GTAW (Gas tungsten arc welding), 超狭開先、センサと制御などに分けて紹介する。

第5章では狭開先アーク溶接の今後の開発方向と関連して、周辺基盤技術の課題について述べる。

2. 狭開先アーク溶接が目指すもの

2.1 狭開先アーク溶接の定義について

“Narrow-gap process”と名付けたのは Battelle 研究所のグループで、由来は継手の板厚に関係なく6.4~9.5 mmの空隙を持ったI形開先であることによる⁷⁾。現在の「狭開先溶接」は、国内外とも開先幅10 mm以上のものも多く、彼らの夢は、まだ夢半ばと言うことか。

Malinは、数多くの文献調査⁸⁻¹⁴⁾をしているが、総括した1987年の報告²⁾で次のように定義している。

「狭開先溶接とは、アーク溶接法を用い、狭くて深い四角い溝の中で、他のビードの上にビードを置くようにして1層当たり一定ビード数にしていることを特徴とした、品質志向のビード置き方法」。そして通常1層当たり1~3パスと言っている。

日本のJPVRC 施工部会専門部会の定義「板厚30 mm以上…」¹⁾もあるそうだが、実情は国内外とも、従来の開先より狭いと思ったら勝手に狭開先と言い、また板厚

*原稿受付 平成11年2月1日

**正 員 バブcock日立(株)呉研究所 Member, Babcock-Hitachi K.K.

***正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, Hitachi, Ltd.

30 mm 以下で狭開先と言っている例も多い。

最近、開先間隙 5 mm 以下の溶接法の開発が行われており、それらは超狭開先溶接と呼んだりしている¹⁵⁾。

狭開先アーク溶接を単に厚板での開先面積を小さくし、かつ能率良く溶接するという見方をすると、例えば建築、橋梁などで検討あるいは使用されているような、70 mm などの厚鋼板に 30 度の Y 形開先を切り 2000 A など大電流の 3 電極サブマージアークで 1 パスで溶接完了する方法も該当する¹⁶⁾。しかし熱影響部が大きく、靱性などで満足できないため、圧力容器製作などいわゆる「狭開先アーク溶接」を多用しているところには採用されない。つまり、狭開先アーク溶接は継手品質も配慮している面も多い。

狭開先アーク溶接において、多層盛りの熱影響で前層ビードの性質を改善する考え方は重要な役割を果たしている。エレクトロガス溶接などで狭開先化した場合には、後続パスの熱影響による HAZ 改善効果がない。また電子ビーム溶接やレーザ溶接で 1 パスで溶接終了する場合も同様である。

また狭開先アーク溶接において溶着金属成分の均一性も特徴と考えるなら、1 層 3 パスの中央パスは母材成分の寄与率が格段に違う。また最近では 1 層 3 パスの必要性が無くなった。

以上から本稿では Malin の定義²⁾に準じ、「狭開先

アーク溶接とは幅狭い I 形開先に近い開先を 1 層 1 パスあるいは 2 パスで多層盛りするアーク溶接」と考え、幅や板厚について細かいことは言わないことで考えたい。

2.2 初期の技術開発が目指したもの

表 1 に 1967 年頃までの技術の典型例を示した。継手性質の重視と全姿勢溶接性に着目し細径ワイヤを用いた小入熱量 GMAW を目指した技術と、作業時間短縮の効果を追って太径ワイヤを用いて大電流 GMAW を目指した技術との考え方が既に行われている。

Battelle 研究所の Meister らの技術^{7,17-19)}を纏めると表 1 (a) のようである。

この方法は、大型構造物の全姿勢溶接用に開発されたもので、小入熱、高靱性、高溶接速度、低歪み、低残留応力などを特徴として既に挙げている。これらの点は後述の超狭開先溶接で、現在、将に開発目標として追求し直されている事項である。

この方法の工夫点として、一定曲率に曲げたワイヤを用いてアークが開先隅に向くようにし、接触式開先倣いを採用してトーチ位置決めをしている。しかし実用的にはワイヤ先端位置の安定さに難点があった^{20,21)}。

この技術はその後、図 1 に示す一定曲率のワイヤをワイヤ送給軸方向に捻転してワイヤ先端を交互に開先両隅に向ける LOOPNAP 法^{1,22,23)}に発展した。その結果細径

表 1 開発初期の溶接装置^{7,19,24,28)}

方 式	(a) Battelle	(b) Linde	(c) A.O.Smith
装置の原理
開先幅 板 厚	6.4~9.5mm <75mm	12.7mm <150mm	(記載なし)
溶接条件と 装置の説明	<ul style="list-style-type: none"> DCSP, 270A, 1m/min 2 電極タンデム式 1 層 2 パス φ 0.9~1.6mm 細径ワイヤを一定曲率に曲げ開先隅に向ける 	<ul style="list-style-type: none"> DCEN, 450A, 380mm/min 1 電極, φ 3.2mm 1 層 1 パス Extension: 50~165mm ワイヤの振動をサポートで押さえる 	<ul style="list-style-type: none"> GMAW 1 電極 1 層 2 パス。 1 パス毎に曲がった通電チップの向きを変える
シールド	<ul style="list-style-type: none"> 母材表面上にボックス 開先内にガス仕切の壁 	通常のシールドノズルで母材表面上から	開先内でワイヤの前後にシールドノズル挿入
特 徴 その他	<ul style="list-style-type: none"> 小入熱: 2.9~3.9kJ/cm 高靱性の HAZ 全姿勢溶接 高溶接速度 残留応力, 歪み小 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 大入熱, 高溶着速度 DCEN でも狭開先内では溶滴移行が安定する現象を利用 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 <p>(詳細記載なし)</p>
問題点	ワイヤ位置不安定による溶接不良	<ul style="list-style-type: none"> 梨型ビードによる割れ 開先隅の溶融不良 	<ul style="list-style-type: none"> チップの摩耗 ワイヤ送給抵抗が大

ワイヤによる 200~300 A 程度のアークでも 1 層 1 パス溶接が可能となった。そして後掲図 11 の波状ワイヤを用いた溶接装置の開発などに繋がった。

表 1 (b) の装置²⁴⁾は、開先中央に電極を置いて 1 層 1 パス溶接するもので、開先両隅を同時に熔融するために、450 A など大電流アークを採用している。

大電流アークでは溶融池も大きくなるので下向き溶接に限定されるが、この技術はやがて狭開先 SAW や図 2 に示す TWIST アーク法^{1,25-27)}に発展、さらには第 3 章で述べる高速回転アークに繋がった技術とも言える。

表 1 (c) は曲がった通電チップを使って片側の開先隅にアークを向け 1 層 2 パス溶接する考え方である²⁸⁾。ワイヤを通電チップ先端部で曲げるので、送給抵抗が問題になり、細径ワイヤに限定される。その後、後掲の表 2 (b) のようなトーチを軸方向に捻転してワイヤ先端を揺動する技術に繋がったとも言える。

表 1 でワイヤを案内するトーチ先端部分について見ると、①太径ワイヤを用い開先外に配置、②開先内に挿入③先端を曲げたものなどのタイプがある。

シールドについては、①母材表面に通常のシールドノズルを置く ②大きめのシールドボックスを置く ③開先内にトーチ挿入しその先端付近にシールドガスを流すなどのタイプがある。なお、表 1 (a) の装置では、トーチの前後で開先内にガス仕切を入れている。

表 1 から見て、その後現在までに追加された主な技術は次のようなものであろうか。

- 1) 開先内に挿入した一次シールドと母材表面側に配置した二次シールドを併用する 2 重シールド方法
- 2) ワイヤを開先内でオシレートして 1 層 1 パス溶接。それに付随したアーク電圧による開先倣い

3) SAW, GTAW の適用

4) 画像処理などの非接触倣い及び遠隔制御技術

2.3 狭開先アーク溶接の一般的な特徴

狭開先アーク溶接の特徴や問題点を図 3 に纏めた。狭開先溶接の根本的な問題は、開先隅や開先側壁を確実に溶融することにある。

狭開先溶接では、次パスの溶接で欠陥が入らないように、開先側壁にアンダーカットを残さないよう、またビード表面形状をできるだけ凹状にすることが重要である。アンダーカット防止には、側壁を溶融したところまでかつかつ溶融金属で埋めることがポイントになる。

GMAW や SAW など消耗電極アーク溶接では、母材を溶融するためにアーク電流値を大きくすると、溶着速度が増し、あるいは開先底方向の溶込みが増す。そしてビードの形状係数 D/W (ここでは 1 ビードの溶接金属の高さ D / ビード幅 W で定義する) が大きくなって、梨形ビードによる縦割れが発生し易くなる問題がある^{29,30)}。図 4 では、 $D/W > 0.8$ で割れが発生することを示している²⁷⁾。

凹形ビード表面形成及びビード縦割れ防止の面からは、1 ビードの溶接金属の高さは低い方が、そしてビード幅と直結する開先幅は広い方が良いなど、作業能率面と相反する点がある。開先底方向の溶込みは余り深くなく、開先隅は十分に溶融させ、かつ積層高さはなるべく高

図 3 狭開先アーク溶接の特徴と問題点

く、そのような技術を目指し、各種の開発が進められた。

狭開先溶接の作業能率は、従来法との開先断面積比較が直感的になされる。他に溶着速度も勘案してその板厚での単位時間あたりに溶接できる長さの比較 (Joint Finishing Rate) もある⁷⁾。しかし溶接手法の比較としては、単位時間に突合わせ溶接できる板の断面積、即ち (溶接速度) × (1パス当たりの積層高さ) で表す方法が単純で分かりやすい。

実際には、狭開先溶接が開先精度を相当高く要求するために、ことにトータルでの経済性が問題にされる。

アーク発生時間だけでなく、スタートまでの準備やスラグ除去などの関連作業、精度良く溶接速度を保つ周辺機器、開先加工や開先合わせなどの付帯作業の占める比率は非常に大きい。開先加工一つにしても、各企業の保有設備と関連する。大型の開先加工機が無いためにガス切断開先でも溶接可能な狭開先 SAW を選ぶなどは、よく聞く話である。

結局は、溶接対象製品のみならず各企業の事情に合わせて経済性が決まり、色々な狭開先アーク溶接法が採用されているのが実態である。

3. 日本における技術開発の経過

3.1 溶接学会研究発表と特許出願の傾向

1963 年以前の日本での狭開先化の動きは良く分からないが、表 1 で紹介した装置などの動きに触発されて、日本でも開発が活発になったと思われる。

図 5 に、溶接学会全国大会での研究発表について狭開先溶接関係の発表件数と、国内の特許出願件数についての推移を示す。両者はかなり一致した傾向を示しているので、開発動向をかなり反映したデータと言えよう。

特許は「特許情報検索システム PATORIS の F ターム 4E001 (アーク溶接・切断) 中の DF06 (狭開先)」に収録されている特許について出願年別件数を調べたものである。狭開先アーク溶接と言う範疇にふさわしくない特許も多少含まれてはいるが、動向は反映されている。

学会発表についてみると、1966 年から始まり、1973 年

図 5 狭開先アーク溶接関連の特許出願と学会発表件数

から 1985 年にかけて盛んであったが、次第に実用技術として安定化したためか、1986 年頃に一段落している。

1996 年頃から発表件数復活の兆しが見えるが、内訳を見ると GMAW 関係があっても開先倣い中心の報告が多く、溶接手法では GTAW の発表が徐々に増えてきている。

特許も発表とかなり似た傾向を辿っているが、1990 年以降も、隆盛期の半分程度とは言え、出願がさほど衰えていない点は注目される。

図 6 に、学会発表について、溶接方法別の傾向を示す。1 件で GMAW も SAW も含まれているものはダブルカウントした。狭開先を直接の対象とした倣いについても傾向を調べてみた。また、同図中の棒グラフはアルミニウム溶接の発表件数 (方法とダブルカウント) である。

要約すると、狭開先アーク溶接は当初 GMAW 中心で開発が進み、遅れて SAW も開発され、開発は一段落した。最近では、倣いなど制御技術の改善に重点が移っているが、手法としては GTAW の開発が進み始めている。

3.2 学会発表から見た開発経過

溶接学会全国大会の講演概要から見た国内での技術開発の経過、トピックスなどを年代順に溶接手法に重点を置いて簡単に紹介する。細かく見ると、技術開発時期や適用時期など多少違いもあり、発表されていない重要な適用事例があるにしても、技術の流れは把握できよう。

1966 年に中島らが $\phi 3.2$ mm ワイヤによる DCEN の GMAW で板厚 50 mm、開先幅 13 mm の狭開先溶接を発表した³¹⁻³³⁾。本発表が狭開先溶接の最初の学会発表と思われる。

1967 年に関口らは図 7 のように被覆棒を開先底に置いてその上から $\text{CO}_2\text{-O}_2$ 溶接する NOW 法を発表した^{34,35)}。バックリングフラックスも用い、板厚 35 mm 鋼

図 6 学会発表の内容別傾向

図7 NOW法³⁴⁾ 図8 PAW-HB法³⁾ 図9 蛇腹式2重ガスシールドノズル¹⁾ 図10 回転アークナローギャップ溶接法¹⁾

板を8mmI形開先のままで、きれいな裏波が形成される。この技術は1973年には中山らがNOW-H法として鉄骨の横向き現場溶接に適用する^{1,36-38)}などの発展に繋がった。このころまでの狭開先溶接関連の発表は、NOW法関係と太径ワイヤのGMAWが主流であった。

1974年に森垣らが横方向PAW法を発表した^{1,39)}。図8のように横向き9mm幅のI形開先に対し、溶接電流を高低2電流でローパルス的に変化と同時にアーク長も増減させ、低電流期間に熔融金属の凝固を促進するものである。

伊藤らは開先内に真っ直ぐなトーチを挿入し、ワイヤが開先両隅に向くように開先内に見かけの支点を置いて揺動する方式を発表した⁴⁰⁾。

有川らはLNGタンク用材として厚さ100mmなどのアルミニウム合金を両側から溶接するNHA法を発表した⁴¹⁾。直径2.4mmのワイヤを前進角を付けて開先内に挿入し、電極を開先内で幅方向にオシシレートさせると同時に電流を同期的に変化させるものである。本発表はアルミニウムの狭開先溶接の最初の発表である。なお、アルミニウムに関する発表はLNGタンク用材を対象に1977年まで延べ7件あったが、それ以後はない。

1975年から、細径ワイヤを曲げて開先内でオシシレートする手法が発表されるようになってきた。

伊藤らは図1に示したループアップ法を発表した⁴²⁾。ワイヤの曲がりを利用して開先内でアークをオシシレートする考え方の最初の発表である。またこれまではシールドノズルは全て開先外に置かれていたが、母材表面の2次シールドボックスの他に、開先内にワイヤを案内す

るトーチと1次シールドノズルを一体にして、開先内でシールドガスを流出する構造にした。これで深さ100mmの狭開先内でも良好にシールドできるようになった。

中山らは、図9に示すような母材表面からのシールドでノズルを2重構造にして、板厚70mm逆シールド可能なことを発表した⁴³⁾。

乾らは、曲がった通電チップを開先内に入れてトーチ軸を捻転してワイピングする装置と、図10のようにスパイラルに整形しながらワイヤ送給して開先内の通電チップ先端からスパイラル状にワイヤが出て回転アークを形成する装置を発表した^{1,44,45)}。

1976年に叶野らは、溶接進行方向にトーチをワイピングして、トーチが前方に位置したときにはアーク長を長くして熔融池を広げて溶け込み幅の増加を図るGMAW法を発表した⁴⁶⁾。

有田らは板厚96mmのA387Gr22に、開先幅15mmで外径470mmのノズルの円周はめ込み溶接試験を行った。装置は通電チップ先端でφ1.6mmのワイヤを曲げて揺動する方式で400AのGMAWである⁴⁷⁾。これまでの発表は殆どが建築、橋梁など鉄骨関係が主対象であったが、この頃から压力容器関係への動きが活発になり、板厚も100~200mmなどを扱った発表が増えてきた。

下山らは6000m深海潜水調査船製作技術確立のために板厚100mmの10%Ni超高張力鋼を1層2パスでGTAWする技術を確立した^{48,49)}。材質及び要求される継手性能からGTAWとなった。本格的な狭開先GTAWの最初の報告である。

叶野らは、DCEN の GTAW によるアルミニウム合金厚板横向溶接で、アークを開先幅方向に磁気オシレートさせて溶接した⁵⁰⁾。狭開先内磁気オシレートとしては最初の発表と思われる。

また叶野らは、図 2 に示した、2 本のソリッドワイヤを寄り合わせたワイヤを用いて下向き狭開先 GMAW を行う「TWIST ARC 溶接法」を発表した^{1,51)}。ワイヤ溶融につれアークが回転し、開先壁の溶込みが増す。

1978 年に、荒田らは横向狭開先溶接を対象に画像処理制御技術を用いたワイヤ位置決め、開先幅自動測定とそれに基づく適正溶接条件自動選択のアルゴリズムについて発表した⁵²⁾。画像処理関係の最初の発表である。

高尾らは図 11 のように、曲げガイドを利用してワイヤを波状に変形しながら直線状のトーチに挿入し、通電チップを出たところで再びワイヤが波状に復元することを利用して、幅 9 mm の開先内でアークをオシレートする「BHK 式ナローギャップアーク溶接法」を発表した^{1,53)}。後に後掲の表 2 (a) の装置に発展した。

河原らは、図 11 の装置を用いてアンモニアコンバータ用の压力容器 (SA-516 Gr.70) やボイラドラム (SA-299) に適用したことを発表した⁵⁴⁾。压力容器類への本格採用を始めた最初の報告である。

吉永らは、水力発電所の埋設水圧鉄管据付現場での傾斜管の全姿勢溶接を対象にした実物大モデルを「AAW-ST 法」で GTAW したことを発表した^{1,55)}。添加ワイヤに直流低電流を流し、この磁場でアークを溶接進行方向

に傾け、高溶着速度化と高溶接速度化を図ったものである。ホットワイヤ GTAW 法による最初の発表である。

森垣らはスラグ剥離性の良いフラックスを用いて板厚 100 mm の A 516 鋼に 1 層 1 パス SAW できることを示した⁵⁶⁾。狭開先 SAW 最初の発表である。また森垣らは、狭開先用のフラックスを開発し、AC-AC 2 電極法で 1 層 1 パスで SAW できることを発表した⁵⁷⁾。

1980 年に河原らは、図 12 に示す 1100 MW 原子炉圧力容器の主継手及び胴体とノズルの円周はめ込み溶接に波状ワイヤ方式の狭開先 GMAW を全面適用したことを発表した^{58,59)}。信頼性を高度に要求される原子炉压力容器への適用としては世界最初のものである。

浮辺らは、1 層 1 パス方式の狭開先 SAW 用に剥離性の良い高塩基性の焼成型フラックスを開発した⁶⁰⁾。

野村らは狭開先 GMAW でオシレートに伴うアーク電流変化をセンサとした自動開先決めを発表した⁶¹⁾。

1981 年に小菅らは、複合ワイヤを使用した交流 GMAW で低合金鋼を溶接することを発表した^{1,62)}。

広瀬らは、2.25 Cr-1 Mo 鋼の熱交換器に狭開先 SAW を適用したことを発表した⁶³⁾。SAW 実用の最初の発表で、厚さ 123 mm の円周継手を 1 層 1 パスの多層溶接を行った。

佐藤らは、後掲の表 2 (c) に示す一対の歯車によりワイヤをくの字状に塑性変形させながら送給する屈曲ワイヤ方式の GMAW を発表した^{1,64)}。

1982 年に野村らは、狭開先内に挿入した電極ノズルを 80 Hz など回転しながら GMAW する表 2 (d) の高速回転アーク法を発表した^{1,65)}。そしてアーク電圧波形を利用した開先決めを検討した。

1983 年に浅野らは、後掲の図 17 に示す管径比が 1 に近い厚肉大径分岐管の鞍形継手の狭開先 GMAW 溶接を発表した^{66,67)}。

今永らは、薄型のプラズマトーチを開発し、幅 14 mm や 20 mm の開先の初層をキーホール溶接可能とした^{68,69)}。

小野は狭開先内で開先底部への熱集中性が弱い DCEN の GMA を用いて大電流で裏波溶接することを検討した⁷⁰⁻⁷³⁾。

1984 年に有田らは、板厚 300 mm 迄の高級鋼材を対象にして 2 電極タンデム横向 GMAW する「NHT 法」を発表した^{1,74)}。

1987 年に永井らは、添加ワイヤ及びワイヤガイドノズルを磁極として強磁性体の狭開先内で TIG アークを磁気オシレートする方法を発表した⁷⁵⁾。

1995 年に堀らは、タングステン電極をトーチ軸に斜めに付けトーチを軸方向に捻転する「揺動式ホットワイヤ GTAW 法」を発表した⁷⁶⁾。後述する図 40 の装置に発展した。

1996 年に松浦らは、水力発電所水圧鉄管 (HT 80 鋼, 50

図 11 BHK 式ナローギャップアーク溶接法¹⁾

図 12 原子炉压力容器への適用⁵⁸⁾

mm, $\phi 5$ mm) をオペレータ 1 人が 2 台遠隔操作して計 4 台の溶接ヘッドで管内部から全周 GTAW を発表した⁷⁷⁾。

鴨らは GTAW でレーザスリット光と CCD カメラを用い、GTAW 溶接の画像処理の有効性を検証した⁷⁸⁾。

また、藤田は上記画像処理技術にファジイ推論を加え、GMAW の適応制御技術を開発した⁷⁹⁾。

1997 年に多紀らは、二重シールドと 2 ワイヤを用いた後述する図 38 の GTAW 装置による全姿勢溶接を発表した⁸⁰⁾。

1998 年に中村らは、板厚 20 mm の鋼板に幅 5 mm の I 形開先を取り、2 層で仕上げる超狭開先 GMAW 技術の有効性を確認した。パルス電流波形によりワイヤ溶融端を板厚方向に上下させる考え方を採っている⁸¹⁾。5 mm 幅狭開先 GMAW の最初の発表である。

八木らは、ガス切断による狭開先 GMAW 用の開先加工法を検討した⁸²⁾。

齋藤らは揺動 GTAW による全姿勢狭開先溶接を発表した⁸³⁾。アーク電圧を利用してアーク長、溶接線、開先幅の制御を行い、ホットワイヤ法で高溶着速度を得ている。

山田らは、板厚 180 mm、開先幅 12 mm の横向溶接に開先内で 2 本の長い板状のタングステン電極を上下に配置して開先内に挿入し、アーク電流を個別に制御する GTAW を発表した⁸⁴⁾。

3.3 全般的な技術開発の流れのまとめ

本項では、前項の学会発表、その他国内技術報告及び日本企業による国外発表も含めて、狭開先アーク溶接技術の大きな流れを要約した。

日本の狭開先アーク溶接技術の開発は、1966 年にボイラ部門から始まったようだが⁸¹⁾、定着しなかった。

1975 年頃迄の技術開発は建築鉄骨関係を対象にした板厚 50 mm 程度迄で、そして横向溶接に関するものが多く、建築関係での適用が進んでいた。この板厚までは、太径ワイヤで長エクステンションとし、開先外にシールドノズルを置く技術の活躍の場であったと言える。

1975 年頃から、次第に板厚 100 mm 以上の压力容器類に目が向けられるようになった。これは開先内にトーチやシールドノズルを挿入する技術の開発を意味した。また、適用対象が厳しい継手靱性も要求したので、小入熱量化も配慮することになった。これに応える手段として、細径ワイヤを曲げて開先内でオッシレートする手法が、ループナップ法を先駆けとして幾つか開発された。

このような国内各社各様の技術開発が行われ、それぞれの実用化が進み始めた 1984 年に、溶接学会溶接法研究委員会で狭開先溶接のガイドブック¹⁾が発刊された。そこには計 34 件の各種手法による報告が纏められているほか、日本における狭開先溶接の現状について

も、各種産業分野に亘って詳しく述べられ、ここに日本の狭開先溶接技術が一旦総括された感がある。1985 年には、その英語版⁶⁵⁾が up-to-date の改訂を加えて発行され、日本の狭開先溶接技術が世界に紹介された。なお、本ガイドブック以後に開発された溶接手法は少ない。

1987 年に Malin が WRC Bulletin で狭開先溶接技術の詳細な調査報告²⁾を纏めているが、このような背景をもとに日本の技術の紹介に大半が割かれており、日本が当時の先端を走っている様子が裏付けられている。

以後、溶接手法に関しては技術が安定化したためか発表は少なくなったが、最近では狭開先 GTAW の開発が進み始めてきたようである。

なお、1996 年頃から TV モニタを用いた遠隔操作、あるいはアーク電圧・電流信号や画像処理を利用した無監視化技術などに関する開発が増え、技術が実用化レベルに入りつつある。これは狭開先アーク溶接装置が大規模な溶接システム化に進み始めたことを示している。

4. 溶接装置とその適用の現状

4.1 狭開先 GMAW

4.1.1 狭開先 GMAW の概要

現在は、表 2 に示すような細径ワイヤをオッシレートする 1 層 1 パスの多層溶接が多用されている。いずれも DCEP で、シールドガスは 20%CO₂-Ar が標準になっている。安定したワイヤ先端位置のオッシレート制御により、スプレー移行させながらワインカップ状の溶込みや梨形ビード形成を避けた結果であろう。

狭開先 GMAW は SAW より小入熱量の溶接が可能で、GTAW より能率良く、立向き上進、横向き、上向きなどの各種姿勢溶接もできることが大きな特徴である。

パルスアーク電源を用いたスプレー移行を基本としているが、スパッタやヒュームがトーチ、シールドノズルや開先壁に付着すると、長時間の連続作業を妨げる。

全姿勢溶接可能ではあるが、溶融金属の垂れを防止するために、スプレー移行状態を保ったままできるだけ低いアーク電流にすることが要求される。立向上進溶接などでは、逆に開先幅を広目にして、ゆっくりウイピングして凝固を進行させながら溶接する方が作業し易い。

開先内でのアークスタートは開先幅が狭いほどスタートビードが盛り上がり易く、また融合不良も発生しやすい。円周溶接でスタート部に次層ビードを乗り上げる際には、しばしば溶け込み不良発生の原因となる。

GMA での初層裏波溶接は可能だが高度な技術を要するので、通常は初層溶接のために狭開先用の GTAW トーチを用いて GTAW する。すると GMAW と GTAW の 2 種類の設備が必要となる。

以上のように問題点も多いが、それらを克服しあるいは回避しながら実用化している。

4.1.2 波状ワイヤ式狭開先溶接装置^{1,59,86-89)}

当初は図 11 の構造であったが、ワイヤ送給性改善と小型化のため、現在は表 2 (a) のように、送給ローラに入る直前に置いた曲げ付加ローラを往復動させてワイヤを波状に変形している。

図 13 に、曲げ後の波状ワイヤとトーチと 2 次シールドボックスを示す。波状ワイヤはその振幅より細い内径のトーチ部ワイヤガイドノズルを通過し、通電チップから出ると元の波形に復元するので、ガイドノズル径以上にワイヤ先端を振らして、トーチ横方向の両開先隅に向けてアークを発生できる。

曲げローラの振幅調整などでオシレート幅調整可能で、オシレートの周波数は 0.5~1.5 Hz 程度である。

図 14 にビードオンプレートでのビード断面を示す。

図 15 は、原子炉压力容器へ適用時の写真である。(a) は胴体長手継手の溶接状況、(b) はノズルの円周はめ込み溶接の試験片断面である。

図 16 は、タンデム配置の 2 電極溶接装置で板曲げ管製作のための長手継手の溶接状況である。1 枚の板を曲げて内面となる側の角を先に削り落とし板曲げして Y 形状に突合わせ、内面を SAW で 1 パス溶接し、次に表側を長尺のプレーナで狭開先加工して本法で溶接している。

図 17 は管径比が 1 に近いボイラ用の大径分岐管の鞍形溶接への適用状況を示す。ガス切りトーチを鞍形軌跡に沿って 45 度の角度を保ったまま 1 周して母管、枝管とも切断した後、グラインダで整形して開先を製作する。次に狭開先溶接トーチに置き換え同じ軌跡で溶接する。

図 13 波状ワイヤ、トーチと 2 次シールドボックス

図 14 波状ワイヤによるオシレート効果

図 15 原子炉压力容器溶接への適用^{67,86)}

表 2 狭開先 GMA 溶接装置の例^{1,59,90,96)}

方式	(a) 波状ワイヤ	(b) 曲がりチップ	(c) 屈曲ワイヤ	(d) 高速回転アーク
装置の原理				
開先幅	開先幅: 9mm(8~14) トーチ: 6mmt-35mmw	16(15~20)mm ノズル: φ 8 mm	11~13mm トーチ: 8mmt-65mmw	12~18mm ノズル: φ 8mm
標準溶接条件	ワイヤ径: 1.2mm アーク電流: 240A, Pulsed 溶接速度: 210mm/min ガス: 20%CO ₂ -Ar	1.2mm 110~180A, Pulsed 150~180mm/min 20%CO ₂ -Ar	1.2mm 260~270A, Pulsed 210mm/min 20%CO ₂ -Ar	1.2mm 300~350A 220~300mm/min 20%CO ₂ -Ar
アーク周波数	0.5~1.5Hz 振幅調整容易	0.2~0.8Hz 振幅調整容易	4~15Hz ワイヤ屈曲幅: 2~4mm	最大 150Hz 回転直径: 7.6mm
特徴	・真横方向に低速でオシレイト	・細密な制御で熟練作業者の動作再現。前進角が後退角	・シンプルかつ再現性の高いオシレイト機構	・アーク電圧を利用した開先微いが容易

開先加工機をそのまま溶接装置とし、3次元的な曲面を狭開先溶接するものである^{66,67)}。

図18(a)はボイラ用鉄骨の角柱の横向き溶接装置である。曲げローラを揺動させず片側に寄せて止めたままにしてワイヤを上隅側あるいは下隅側に向け1層2パス溶接する。

図18(b)は、開先幅を18mm程度とやや広幅にして立向き上進溶接の状況を示す。加圧流動層ボイラの格納容器の溶接で、ガス切断開先に対して適用した。波状ワイヤの曲がりだけでは隅までアークが届かないため、トーチ自体も左右にオシシレートしながら、ワイヤも各隅に向くように同期して曲げローラを揺動し溶接している。

表3に各種姿勢における標準溶接条件を示す。なお、大径固定管の全姿勢溶接にも多用されてきたが⁸⁹⁾、現在は後述の揺動式GTAWに置き換えている。

図16 2電極溶接装置

図17 厚肉大径分岐管の鞍型継手の溶接⁶⁷⁾

(a) 角柱の横向き溶接 (b) 格納容器の立向き溶接

図18 各種姿勢溶接への適用

4.1.3 回転電極型狭開先溶接装置⁹⁰⁻⁹²⁾

表2(b)に示すように、孔がトーチ軸に対して16度傾いた通電チップをトーチ先端に取り付け、エクステンション15mmでワイヤ先端が開先隅部を直接狙える構造とし、トーチ軸をステッピングモータを用いて捻転(往復回転)、ワイヤ先端を開先内でオシシレートする。

狭開先内で熟練工の溶接運棒法と同等の動きを実現する考え方で開発されたもので、ステッピングモータの動きを高速できめ細かに制御し、狭開先内でアークを自在に動かしている。

図19に、立向き、上向き及び全姿勢溶接の場合のオシシレート制御パターンを示す。オシシレート角速度150度/secで両端停止時間を置いている。全姿勢溶接は上進振り分けとし、姿勢変化と共にオシシレート角速度パターンを少しずつ変化させる。溶接進行方向と逆方向に半月状にオシシレートする後退法にすると、隅部の溶込みが特に深い狭開先溶接には理想的なお多福状の溶込み形状となる。なお、溶接進行方向と同じ方向に半月状にオシシレートする逆の前進法にすると、隅部の溶込みは浅くなる。

表3 各種姿勢での標準溶接条件と下向き溶接時の開先形状⁸⁶⁾

溶接姿勢	下向き	横向き	立向き 上進	上向き
1層のパス数	1	2	1	2
溶接電流(A)	周 180~220 長手 220~270	180~220	140~180	130~180
溶接電圧(V)	周 27~29 長手 29~33	27~29	20~24	19~24
溶接速度(mm・min)	180~220	150~240	60~100	60~100
開先底幅(mm)	9(8~12)	12(10~14)	18(16~21)	12(11~15)

図19 立向き、上向き及び全姿勢溶接用の制御⁹²⁾

図 20 に、横向き溶接の場合のオシレートと電流制御パターンの 1 例を示す。後退法で、かつオシレートの弦は水平方向に対して約 70 度傾けている。横向き溶接では、開先内でワイヤが下側から上側に進むときには溶融金属はアークの後方に溜まる状態になる。ところが、上から下側に進むときには、重力の影響で溶融金属がアーク前方に先行し、下側開先面をアークで直接溶融することを妨げる。このような状態を避けるために、上から下側開先へのアーク移動を高速化する。上進で約 200 度/sec、下進は約 700 度/sec から最高 1500 度/sec のオシレートパターンとし、溶接電流もこのパターンに対応して変化させている。

本技術は 1993 年頃笠口らによって発表⁹¹⁾され、現在、ボイラ大径厚肉管の水平配管の全姿勢溶接、垂直配管の横向き溶接、及びボイラ大型压力容器の長尺立向き、長尺横向き溶接など、板厚 40～125 mm の各種鋼の突き合わせ溶接に適用している。その他に、LNG 船球形タンクの Al 合金厚板の立向き溶接にも適用している。

国外では Gröger らが同種の方法を検討⁹³⁾している。

また、溝らは⁹⁴⁾図 21 のように、板厚 460 mm の低合金鋼を開先幅 20 mm の I 形開先にして平置きし、厚さ 16 mm のトーチを板厚方向に上昇させて 1 層 1 パスの立向き上進 GMAW 溶接法を開発した。溶接開始部と

図 22 屈曲ワイヤによる溶込み形状⁹⁵⁾

図 23 開先幅と側壁への溶込み量の関係⁹⁵⁾

なる溶接線の中央部に水冷銅板を挿入し、そこに 1 パス目の溶接を行う。この後、板中央から両側に 180 A で溶接していく。CCD カメラで観察しながら、先端が曲がったトーチの軸を揺動回転してオシレートする。通常の狭開先溶接では板厚方向の開先幅収縮が問題になるが、本手法によると角変形が極めて少なく、変形を見込んで余分な開先面積を取らなくて良いので、板厚が増すほど有利になる。

4.1.4 屈曲ワイヤ式狭開先溶接装置^{1,95)}

表 2 (c) の屈曲ワイヤ方式の装置は、表 2 (a) の曲げローラとワイヤ送給ローラに相当する部分を一對の特殊形状の歯車に置き換えたものである。歯車はワイヤを一定の形状とピッチで開先幅方向に屈曲状に塑性変形を与えながら、溶接トーチに向け連続的に送給する。

屈曲ワイヤの溶融に伴ってアークは開先壁方向に自動的に高速度でオシレートされ、開先両側壁の溶融を確保し、1 層 1 パスの多層溶接をより安定化する。溶接トーチの高さが変わっても、オシレート幅は変化しない特徴がある。オシレート周波数はワイヤ速度によって多少変化するが、4～15 Hz で検討しており、高めである。

図 22 に、溶込み形状を示す。オシレート無しのワインカップ状から平底状に変わっている。

歯車の軸芯間距離を変えて屈曲幅を調整できるが、図 23 に示すように屈曲幅 2.6 mm で、開先幅の変動に十分対応している。

この方法は、主として原子力プラントの压力容器、火

カプラントのボイラドラムの溶接など、下向き溶接に使用されている。

この屈曲ワイヤ方式の狭開先溶接は国外での実施例が報告²¹⁾されている。図 24 (a) に示すように、屈曲させる歯車を非対称にして $\phi 1.2$ mm ワイヤを通過させて片側に傾きやすくし、潜水艦の船殻 (HY 130 相当, 101 mm) を開先幅 10 mm, 12%CO₂-Ar, 入熱量 8.5 kJ/cm の 1 層 2 パスの多層溶接をしている。高速オシレートを生かし、高溶接速度、小入熱量での溶接を実現している。

なお、この溶接は図 24 (b) に示すように、①裏側に先ず V 形開先を切り、②被覆アーク溶接した後、③表側を特別に設計した加工機を用いて開先加工し、精度の良い開先を得て、④狭開先 GMAW 溶接している。

(a) 1 層 2 パス溶接 (b) 開先加工と溶接の順序

図 24 傾けた屈曲ワイヤと施工順序²¹⁾

図 25 溶滴に作用する力の関係⁹⁶⁾

図 26 回転速度の効果⁹⁷⁾

4.1.5 高速回転アーク式狭開先溶接^{1,96,97)}

表 2 (d) は電極ノズル軸芯に対して通電チップ孔を偏心させておき、電極ノズルを高速回転させるもので、ワイヤ先端の振幅は通電チップの外径より小さい。

しかし、図 25 に示すように、高速回転によりワイヤ先端の溶滴には遠心力が働き横方向に飛ぶと共に、アークもそれに引きずられる形で横に広がり、結果として開先壁の溶込み形成能力を増している。

図 26 にビード形状に及ぼす回転速度の効果を示す。平らな溶込み形状になるので、350 A など高アーク電流にしても、形状係数 D/W を低くでき、梨型ビードによる割れの問題がなくなる利点がある。

通電チップを回転するために、開先幅が多少広めになるが、高アーク電流にしているので、溶接速度 250 mm/min で 1 パスあたり 4~5 mm の積層厚さが得られている。

図 27 に溶接ヘッドを示す。ワイヤが通過するノズルと別に、前後にサイドシールド方式のノズルを置き、母材表面側に 2 次シールドボックスを置いている。

本方式は高速回転アークのアーク電圧信号を利用して、開先中心線做いが容易にできる大きな特徴がある。図 27

図 27 高速回転アーク式の溶接ヘッドと継手断面^{96,98)}

図 28 大型油圧シリンダーの周溶接⁹⁶⁾

に、板厚 235 mm のビード断面形状を併せ示した。アークの高速回転とアーク電圧を利用した溶接線自動微い機能により、均一で安定した側壁の溶込みが得られている。

図 28 に、大型油圧シリンダー(外径 2,350 mm, 肉厚 275 mm)の溶接状況を示す。下向き溶接とし、ターニングローラによりシリンダーを回転しながら連続溶接している。

他に、この方式で橋梁部材の溶接⁹⁹⁾、レールの溶接¹⁰⁰⁾などへの適用も検討されている。

4.1.6 その他の装置と開発中の技術

其他方式の狭開先 GMAW 装置で、近年適用あるいは手法開発が報告された技術を紹介する。

(1) 大型水圧鉄管の溶接¹⁰¹⁾

1 層 2 パス溶接で、多少開先隅を狙う形にトーチを傾け、シールドガス成分に He-Ar-CO₂三元系シールドガスを用いて溶込みとアーク特性の改善を図り、また低周波パルス溶接法により、開先隅部で高電流・高電圧条件にして溶込みを確保する。このようにして、板厚最大 75 mm、管直径 5~6 m の傾斜した水圧鉄管の周溶接が 2 台の GMAW 装置を用いて振り分け上進で行われた。

図 29 は、この鉄管の組立作業を自動化するために用いられた油圧シリンダによる目違い修正装置(外径 4.4 m)である。溶接が完了した既設鉄管(下流管)に新設鉄管(上流管)を搭載し、鉄管の全周 4ヶ所に取り付けた開先合わせ治具で両管のルートギャップを確保する。その後、開先形状計測装置で得られた目違い量の情報を元に油圧ジャッキを制御して目違い量を±2 mm 以内に修正する。この開先合わせを完了すると、仮付けなしに、内面から初層裏波狭開先 GTAW 溶接に入る。

開先合わせがきちんとできていることが狭開先溶接適用の前提であり、大変な努力が要求されている。またそのコストが回収できるだけの作業量があって初めて採用できることになる。

(2) 鉄骨の横向きロボット溶接¹⁰²⁾

鉄骨現場継手など厚板の横向き溶接は、当初恰好の狭開先溶接の適用対象に考えられていたが、現在は 35 度レ形開先での溶接が行われている。この継手を幅 14 mm±2

mm の I 形開先にして $\phi 1.6$ mm ワイヤを用いて板厚 50 mm を 1 層 2 パスでロボット溶接することが検討されている¹⁰²⁾。現場での開先精度、シールドなどの問題もあり、鉄骨の溶接は、まだ開発すべき課題となっている。

(3) その他

コアードワイヤも、狭開先溶接に使用されることがある¹⁰³⁾。フラックスコアードワイヤを用いて、厚肉ステンレス鋼製タンクの狭開先溶接が行われた¹⁰⁴⁾。

4.2 狭開先 SAW

4.2.1 狭開先 SAW の概要^{14,105,106)}

SAW では開先裕度が大きく、ガス切断開先が適用できることが、大きな利点になっている。フラックスを散布することと溶融池が大きいことから、適用は下向き溶接に限定される。

SAW 法では直径 3.2 mm などの太径ワイヤを使うので、GMAW でなされたようなワイヤ曲げによるオッシレートにはかなり無理がでる。従って溶接装置は、トーチ部分は薄形化して狭開先内に挿入できるようにしなければならないが、基本的には通常の SAW 装置がそのまま利用できる利点がある。但し、扁平なフラックス用ノズルを狭開先内に差し込んでフラックスを供給し、その後でフラックス回収とスラグ除去が必要となる。

図 30 に、複雑だが良く考えられたトーチの一例¹⁰⁷⁾を示す。接触式の底面微いと片側の壁微いセンサ、扁平なフラックス供給ノズル、スプリングで通電部を押さえた扁平トーチなどから構成されている。この装置で 1 層 2 パスの多層溶接することが推奨されている。

4.2.2 フラックス

狭開先 SAW 技術の開発は装置ではなく、もっぱら剥離性が良くビードが常に凹型となってアンダーカットを形成し難いフラックスの開発に掛かっている。

開先壁面がほぼ垂直になるため、小さなアンダーカットと言えどもスラグ剥離性を極端に劣化させる。また表

図 29 大型水圧鉄管溶接用の目違い修正装置¹⁰¹⁾

図 30 狭開先 SAW 用トーチ¹⁰⁷⁾
(Elsevier Science 転載許可)

面が凹入度の小さい平らなあるいは凸型ビードでは、開先壁面と溶接金属の接触角が小さくなって、スラグ剥離性が劣化する。スラグが残留すると、次層を重ねた場合に融合不良やスラグ巻き込みを発生しやすくなる。

1層1パスで多層盛りする狭開先溶接用のフラックスは、国内数社から市販されている。

4.2.3 施工と適用

1層1パスでの標準的な溶接条件は、アーク電流 AC 600 A、溶接速度 250 mm/min 程度である。フラックスのためにワイヤ先端位置が見えないので、大入熱にして開先部溶融に対して広い裕度を得ようとしている。図 31 に、SAW における開先裕度の検討例を示す¹⁰⁸⁾。溶込み幅が両側の合計値で 4 mm 以上あり、GMAW での 2 mm 程度と比較してかなり大きい。

図 32 にワイヤ位置がずれた場合の溶込みの状態を示す。3 mm ずれの場合、近寄った側の側壁は多少アンダカット気味だが、それでも離れた側の開先隅部での溶込みは確保されている。1.5 mm のずれは問題ない¹⁰⁹⁾。

図 33 に開先幅変化したときのビード形状を示す¹⁰⁹⁾。

1層2パス溶接には、1パス毎に溶接位置をずらす操

図 31 開先底幅 (g) を変えたときのビード形状¹⁰⁸⁾

図 32 ワイヤ設定位置ずれによるビード形状変化¹⁰⁹⁾

図 33 開先幅が変化したときのビード形状¹⁰⁹⁾

作が煩雑で、極厚鋼管の連続多層盛り溶接は左右にパスが変わるごとにビード交差部ができるので難しいなどの問題がある。しかし、開先幅の変動をビード重ね部で吸収できること、スラグ剥離性が、1層1パスの場合ほどには問題にならないなど施工面、フラックス性能面での裕度が増すと言う大きな利点がある。

ただし、1層2パス溶接にしても、一方の開先側壁からの距離を一定に保つことは必要であり、狙い位置ずれの裕度が増す訳でもない。作業者が調整しながら溶接する場合には、1層1パスとしてノズルを開先中心に置くことに意を用いる方が扱い易い面もある。

SAW で2電極タンデム配置で溶接する技術も開発されている。電極間隔を 15 mm 以下に近づけると凹型の良好なビード形状が得られ、1電極と較べると1層1パス溶接が可能な開先幅が 2~6 mm 広がる^{1,57)}。

国内では 1.25 Cr-0.5 Mo 鋼、2.25 Cr-1 Mo 鋼など高温高压用石油精製プラント压力容器、ボイラ¹¹⁰⁾・原子炉压力容器などに適用されている。

国外の狭開先溶接は GMAW より SAW の方が盛んに用いられているらしく、それも1層1パスの報告は少なく、1層2パスや3パスの報告が多いようである。適用対象には、原子炉の压力容器や蒸気発生器¹¹¹⁾、水添脱硫装置などの化学プラント用機器、海洋構造物¹¹²⁾、他¹¹³⁾がある。

狭開先 SAW にはスラグ反応の是非、大入熱量の多重熱サイクルの活用などの検討事項があり筆者らには判然としないが、高能率性と靱性等の継手品質とのほざまの中で、今後適用箇所の限定化が進むように思う。

4.3 狭開先 GTAW

4.3.1 概要

図 34¹¹⁴⁾から窺われるように、GTAW はもともと狭開先好みの溶接法である。能率が悪いとして厚板溶接には通常は使われなかった。不活性ガス中の溶接なので材質を問わないし、姿勢溶接も問題なく、高品質の溶接ができる。したがって、他のアーク溶接法では継手品質的に問題があるとき、能率が悪くても GTAW となり、作業時間短縮のために狭開先化が図られてきた^{49,115)}。

最近、発電用ボイラでは高温高压化が進み、9%Cr、12%Cr など高 Cr 鋼の使用量が増ってきている¹¹⁶⁾。GMAW では Cr 酸化物がスラグとなってビード表面に付着し、次パスの溶接を難しくする問題がある。また、原子力発電設備ではステンレス鋼、インコネルなど高合金の厚板や厚肉管

図 34 ボイラ用鋼管の開先の例¹¹⁴⁾

表4 狭開先溶接関連の GTAW 法¹²¹⁾

方式	(a) コールドワイヤ	(b) ホットワイヤ	(c) スイッチング	(d) 2重シールド	(e) 揺動	(f) 超狭開先
機構						
原理	ティグ溶接アーク中にフィラワイヤをモータで自動送給する	溶着量を増加させるために、フィラワイヤに直流又は交流電流を通電する	アーク電流とワイヤ電流を高速スイッチングで切り替えて溶接する	内側シールドノズルから Ar+He を流出させてソフトプラズマを発生し、外側ノズルで Ar シールドする	開先内で傾けた電極を揺動させて開先壁を溶融する。アーク電圧検出式微制御も可能である	タングステン電極を細くして、より狭い開先内に入れて溶接する
特徴	高品質であるが能率が低い	磁気吹きの影響を受け、ワイヤ電流値が制限される	磁気吹きが減少し、ワイヤに十分な通電ができ、能率が向上する	He による溶融エネルギーの増加で、溶着量が増すが、開先幅も広がる	溶接継手の信頼性と能率が向上するが、装置は複雑になる	電極形状・絶縁、開先変形に対する厳しい管理が必要となる

が多量に使用されている。これらの背景から、ことにボイラ及び原子力など発電設備の製作¹¹⁷⁾と保全^{118,119)}の分野で、狭開先 GTAW は必須の技術になった。

狭開先 GTAW は自在に溶接条件を変えられるので、GMAW や SAW と違って、欠陥発生無しに能率を上げるにはどうしたら良いかが最大のポイントになる。

最近では添加ワイヤを通電加熱して溶着速度を増すホットワイヤ法の活用が盛んになってきている。ホットワイヤ GTAW は、母材溶融と溶着速度が独立して制御できるので全姿勢溶接も容易で狭開先溶接に適している。

しかし、GTAW は溶接速度が通常は 50~150 mm/min 程度と遅く、ホットワイヤにしても溶接速度に見合った溶着速度しか要求されないために、全体としての能率向上が阻まれている。すなわち、GTAW の高溶接速度化が基本的な課題として残っている。

なお、開先間隙が狭くて高周波スタートが使えない場合には、タングステン電極を開先底部に接触後通電して引き戻すリトラクトスタートが用いられる¹²⁰⁾。

表4に、狭開先溶接に関連した GTAW 手法の例を示す。

以下、現在実用されている狭開先 GTAW 技術の幾つかの例を紹介する。

4.3.2 狭開先用トーチ

板厚 50 mm 程度までなら電極を伸ばせる。板表面からのシールドも通常のノズルで不十分なら、その外側に更にシールドノズルをつけ広範囲からシールドガスを流して対処でき¹¹⁷⁾、通常の GTAW と同様な作業となる。

板表面からのシールドが難しいような厚板には、例えば、図35のような狭開先用トーチ¹²⁰⁾が使用されてきた。深開先内でトーチ側面からもガスを流出している。

図36は二重シールドトーチの例である。He 混合ガ

図35 深開先用トーチの例¹²⁰⁾ 図36 厚板用2重シールドトーチ¹²³⁾

ス中ではアークの発熱量が大きくなり、母材溶融と溶着速度増加が図れる。図36のように電極に沿った狭い領域から通常 50%He 入りの Ar ガス (センターガス, 4 l/min) を流し、その外側から通常のように Ar ガス (アウターガス, 64 l/min) を流すと、開先深さ 40~50 mm 程度まではアークを絞って溶込みを深くする効果が見られる^{122,123)}ので、しばしば使用される。

図36のトーチは、950 N/mm²級高張力鋼を用いた傾

図 37 二重シールド方式の狭開先用トーチ¹²⁴⁾

斜した水圧鉄管の周溶接をワイヤ送給同期の低周波パルス GTAW することの検討に用いられた¹²³⁾。

図 37 は、同様な考え方で開先内にトーチを挿入するタイプである。少数主げた橋梁の厚さ 80 mm のフランジ溶接に検討されたもので、 $\phi 1.6$ mm のストランドワイヤを用い、下向き、上向き溶接が行われている¹²⁴⁾。トーチ厚さは 6 mm、開先底幅は 8 mm で開先角度 10° にしている。

4.3.3 SAT 工法¹⁾

ワイヤ+に接続し、アーク後方から挿入するホットワイヤ法(MC-TIL 法¹⁾)で、ワイヤ通電はアークを溶接進行方向に傾ける、すなわちアークの制御に使うことに意識を置いた使い方をしている。遠隔操作で1周の溶接に4ヘッドを用いており、大規模水力発電所の水圧鉄管現場円周溶接に採用されている¹²⁵⁾。

4.3.4 2重シールドホットワイヤ(ツインワイヤ)法

4.3.2 項と同じ2重シールド法で、図 38 に示すように溶接前方からホットワイヤを挿入して高溶着量を可能とし、トーチ後方からチルワイヤ(冷却ワイヤ)を挿入している。チルワイヤは熔融池の熱でワイヤを融かすことで熔融金属の冷却を促進し、熔融金属の垂れ落ち防止と、ビード外観形状改善を図ろうとするものである¹²²⁾。すなわちチルワイヤによって、より高溶着量の溶接時でも全姿勢で安定した施工を可能にしている。

大規模な国際熱核融合実験炉(ITER)計画が進められているが、その実規模真空容器の1/40のリング状セクタモデル(高さ14 m、奥行き9 m)を2個製作し、それらを接合する試験に適用された。完全な遠隔制御によること、GTAWで溶着速度30 g/min以上であることなどの要求に対して、図 38 の装置で対応可能であることを実証した¹²⁶⁾。

図 39 はその試験の一例で、厚さ 40 mm の SUS 316 L ステンレス鋼を各種姿勢で溶着量の限界近くで溶接した結果である。なお、この実証試験は、次項の揺動式 GTAW を用いても同様に行われた¹²⁷⁾。

4.3.5 揺動式 GTAW

図 40 に溶接ヘッドの原理と外観を⁸³⁾、図 41 に開先内のアークの状態を示す。タングステン電極を斜めに取り

図 38 ツインワイヤ方式2重シールド溶接装置¹²⁶⁾

図 39 ツインワイヤ方式による各種姿勢溶接¹²⁶⁾

図 40 揺動式 GTA 溶接装置の原理と溶接ヘッド⁸³⁾

付けたトーチ軸をモータで往復回転(捻転)させ、開先隅部の溶込みを確実にしている。アークを揺動しているため、高電流アークに伴って発生しやすい掘り込みによる空孔形成を防ぐことができる。開先隅部の熔融能力が著しく改善されて溶接速度も速くなるので、ホットワイヤ法で高溶着速度化しても良好なビードが得られる。

図 41 狭開先内でのアークオシレート

図 44 FineLine™ Welding 装置¹³²⁾

図 42 ボイラ管寄せ 2ヶ所無監視溶接

図 45 FLW による継手断面¹³³⁾

(a)工場内全姿勢溶接 (主蒸気管: 9Cr鋼, ϕ 410mm)
 (b)現地横向き溶接 (主給水管: 炭素鋼, ϕ 450mm)

図 43 ボイラ配管の溶接

図 46 管内表面と 0.5mm 入った面での残留応力¹³³⁾

図 42 はボイラ管寄せのエンドプレート溶接中の写真である。下向きの管回転溶接であるが、揺動アークのアーク電圧を利用して、アーク長制御と開先中心線倣い⁸³⁾を行っており、初層と最終層を除いて倣いができるので、その間は 2 台の装置を無監視運転している。

全姿勢溶接は上進振り分けで、図 43 のようにボイラ大径配管の工場内溶接及び現地溶接に適用している¹²⁷⁾。

なお、米国でも揺動 GTAW 方式の装置がコールドワイヤではあるが販売されている¹²⁹⁾。

4.4 超狭開先アーク溶接

厚板溶接を対象にして、下記の目的で、5 mm 以下など開先幅を極めて狭くしてアーク溶接することが最近検討され、一部実用されていることから節を起てて記す。

- ① 小入熱量の溶接で HAZ 組織を改善 (低合金鋼では粗粒化低減, ステンレス鋼では鋭敏化低減な

ど)。

- ② 溶接による収縮量と歪みの減少。
- ③ 管内表面の残留応力を圧縮 (あるいは低い引張り) 応力にして、応力腐食割れ防止に役立てる。
- ④ 溶接作業能率の向上

GMAW 法では中村^{130,131)}らにより検討されている手法があるが、まだ開発初期の段階である。

GTAW では FLW (FineLine™ Welding) と名付けられた手法が、既に実用に入っている^{132,133)}。図 44 に装置を示す。見かけは、タングステン電極を長くしただけである。

FLW 法は、図 36 のような He (あるいは $+H_2$) 入り Ar ガスをインナーガスに用いた二重シールド法をベースにしている。タングステン電極を深く狭い開先に挿入し、かつ電極での抵抗発熱を少なくするために、アークを発生する先端部をくさび状に尖らせた板状の電極を使

用したりしている。

溶接条件は詳らかではないが、中間層での入熱量は $2\sim 5\text{ kJ/cm}$ 、溶接速度は $300\sim 500\text{ mm/min}$ など GTAW としては高速化している。狭い I 形開先なので角変形が少ないことや、小入熱溶接なので内面側を水冷¹³⁴⁾しているのと似た状態が形成され、残留応力が圧縮側へと向うとの見方がある。

図 45 にビード断面の例と、図 46 に残留応力測定結果を示す。

森重ら¹³⁶⁾は、外径 708 mm、肉厚 40 mm の SUS 316 ステンレス鋼管に開先角度 2 度で開先幅 6 mm の狭開先を GTA 溶接した。その結果、管内面溶接部近傍の残留応力は従来開先の残留応力より低減する傾向が認められたが、圧縮側には移行しなかったと報告している。

残留応力が引張りか圧縮かは、応力腐食割れ対策として重要問題であり、応力解析結果など種々報告¹³⁷⁾されているが、安定して圧縮残留応力とする施工方法ができるかどうか、今後詳しい検討が必要と思われる。

なお、BWR の炉内構造物であるシュラウドでの SCC (応力腐食割れ) 発生が世界の 14 プラントで起きている¹³⁸⁾。対策として日本ではシュラウドを新品の SUS 316 L ステンレス鋼に取り替えることが進行中で、その交換には GTAW で極力狭開先にする努力が払われている¹³⁹⁾。

また、PWR では蒸気発生器の取り替え工事が国外で盛んに行われていて、それには厚さ 70~100 mm、外径 900 mm 程度のステンレス鋼管に開先幅 7~10.5 mm を取り狭開先 GTAW が行われている¹¹⁸⁾が、国内でも 5 mm 狭開先 GTAW で検討されている¹³⁹⁾。

4.5 センサ及び制御技術

4.5.1 概 論

狭開先アーク溶接においても他の開先形状の溶接と同様に、溶接線の追従 (倣い) が制御の主目的であるが、開先幅の減少により、倣い精度及び応答性にはより高性能化が要求される。

また、狭開先アーク溶接では初層、仕上げ層を除いて多層積層時に溶接している部分での開先形状 (溶融部の幅) がほとんど同一であることから、基本的な溶接条件を変える必要がないので、溶接条件の設定管理が容易となる特徴がある。

狭開先アーク溶接特有の制御項目としては、開先壁の確実な溶融を確保するために、開先幅変動に対応した溶接条件制御、積層高さの制御等があり、溶融池の状態を検出して溶接条件の適応制御をすることで発展した。

これには、基本となるセンサの性能向上、小形化とともに、画像処理、信号処理技術、さらにはファジィ制御等のコンピュータ関連のハード及びソフトウェアに関する著しい進歩が寄与している。また、溶接ヘッド等の駆

図 47 視覚センサ (狭開先 GTAW の画像処理) の例¹⁴⁸⁾

動系に関しても配管の全姿勢溶接等を対象として高性能化が達成されている。

通常の開先に適用されているセンサ及び制御方法は、狭開先アーク溶接へも応用展開が可能と考えられる。センシング技術及び制御技術については溶接法研究委員会で纏められたガイドブックが参考となる^{140,141)}。

4.5.2 溶接電流、アーク電圧信号を利用した制御

狭開先アーク溶接では深溝にトーチ、シールドノズル等が設置されることから、アークを適正な位置から観察することが難しい。このような点からもトーチ周りにセンサを必要としないアークセンサが活用されている。GMAW では高速回転アークの倣い制御⁹⁷⁾が、GTAW では電極揺動による電圧変化をもとに倣い制御^{83,142)}がされる。また、開先幅の変動に対応して溶着量の制御をすることも行われている¹⁴³⁾。

4.5.3 画像処理技術を利用した制御

狭開先アーク溶接では遠隔操作のために以前からカメラ (ITV, CCD) が使用されている。そこに画像処理技術が導入され、視覚センサとして活用されている。このセンサの特徴は画像処理結果の情報量が多いことである。

視覚センサには二つの方式がある。一つはレーザスリット光センサに代表される形状検出である。開先形状検出によるならい制御に適用されるとともに、近年は溶接直後のビード形状を検出することで、溶接条件の適応制御あるいは仕上り品質確認に用いられる。これは狭開先アーク溶接における多層積層時の溶接欠陥発生を防止するためには有効な手段である。

他の方式は CCD カメラ等の画像から、アーク発生点近傍や溶融池の状況を直接的に検出処理する方法であり、フィルタ等の光学的手法及び制御手法に工夫がなされている^{101,144~148)}。図 47 に一例を示す。

近年、視覚センサの開発が各所で盛んに行われており、画像処理技術、機器の進歩とともに大きな展開が期待される。

4.5.4 その他のセンサによる制御

古くはシールドガスを兼用した流体センサ¹⁴⁹⁾、狭開先内での振動片を利用したセンサ¹⁴⁰⁾などが開発されたが、現在はアークセンサ、視覚センサが主流となっている。フラックスのある SAW においては接触式のセンサが用いられているが¹⁰⁷⁾、アークセンサ、溶接前開先形状

検出用の視覚センサ¹⁵⁰⁾等の利用も考えられている。

5. 周辺基盤技術の課題と開発の方向

(1) 開先加工，補修装置の開発

通常は開先加工してから開先合わせする。開先は溶接中の収縮を見越して、やや大きめの開先角度を設ける。また、狭く深い開先の中での不具合発生を恐れて、開先幅は手入れし易い限界に止められていた。

対策として、下記項目を能率良く実現する装置ができると、狭開先溶接は飛躍的に進歩する。

- ① 継手部を近接させワーク固定（裏側溶接など）してから開先加工
- ② 溶接中に開先幅が狭くなると、開先面を削って適正開先幅に戻す
- ③ 狭開先内のビード表面や開先側面を手入れする

図 24 の例は裏側溶接後に大型専用工作機で開先加工したが、アルミニウムのように柔らかい場合には現地組立後にポータブルな装置で加工した例¹⁵¹⁾もある。

精度良く描かれた罫書き線に沿って開先加工装置自体が動きながら開先を形成していく，そのような装置の開発が望まれる。仮組後に開先加工するなら，開先幅の精度だけが問題となろう。

ハンドグラインダが届かない深い開先内での補修には，図 48 のロータリカッタなどが使用され，大層時間を掛けているのが実情である。能率的な開先加工装置や研削装置を開発すること^{82,152)}，これが狭開先溶接化を推進するための現段階での最大の課題と考える。

(2) 製品固定化溶接；6 mm 狭開先 GTAW の実用化

狭開先 GTAW は各種姿勢の溶接ができることから，製品を動かさずに溶接できる。図 49 はその特徴を生かしたもので，高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の薄肉大径の原子炉容器（材質 SUS 304，板厚：約 50 mm，直径：約 8 m）を立置きして組立てたままホットワイヤ GTAW して，自重による変形を防止するための補助治具や合わせ治具の低減を図っている。これから推察されるように，狭開先 GTAW の採用は製作工法に改革をもたらすものである¹¹⁷⁾。

大きな压力容器胴体の周溶接でも，固定したまま溶接できるようにしたい。各種姿勢の溶接が出来なければならないが，それには開先幅 6 mm 以下の狭開先 GTAW すると良いであろう。開先幅 6 mm 以下では表面張力の作用が大きく作用して重力の制約を受けることが少なくなるし，電極を中央に置いて両側が容易に溶融できるからである。開先幅 5 mm 以下の超狭開先も好ましいが，6 mm だとアーク安定性や開先倣いの難しさが随分緩和される。但し，ここでの問題点は溶接中に開先幅が狭くなることである。この 6 mm 狭開先の実用化を最も促進す

図 48 補修工具

図 49 狭開先 GTAW を用いた製作方法の改革¹¹⁷⁾

図 50 胴体長手溶接用の予熱状況

るのは，やはり開先加工と補修装置の開発に掛かっている。

(3) 歪み予測制御の開発

図 50 は，厚肉の胴体長手継手溶接の予熱状況である。現在は経験的に予熱バーナーの位置を決めている。精度よく開先合せしたものが，予熱によって開先が鼓状に変形したり，開先角度や幅が変わることがある。また溶接進行と共に開先幅が縮むことは良く知られている。

溶接前あるいは溶接中に開先の変化量を予測¹⁵³⁾し，対策を講じるべきである。この技術開発は，6 mm 幅狭開先の実用化をより容易にする。

(4) 多層盛りによる組織改善

狭開先アーク溶接では，積層が規則的に行われるのでその熱影響も規則的である。多層盛りによる後続パスの熱影響で先行パスによる組織を改善し得る^{154,155)}。これはハーフビード法のように後熱処理の省略にも繋がる可能性がある。

その効果を大きくするには，積層厚さは 3 mm 以下など薄くしなければならず，かつ能率を上げようとすると溶接速度を速くすることが必要になってくる。そのように

しても融合不良など溶接欠陥が発生しないアーク溶接の実現が望まれる。これらのことを一番自在にできるのは、ホットワイヤ GTAW であろう。

なお、狭開先溶接継手の特徴でもある軟質継手の概念の活用も期待されるが、今回は調査していない。

(5) センサ技術

深い開先底のアーク発生部を監視するには、管の場合には横から見えるが、厚板の場合にはトーチ先端の一次シールドノズルが妨げになる。トーチ軸に沿って監視できるようなトーチおよび光学系の工夫が必要である。GTAW の場合はワイヤもトーチ軸に沿って挿入⁷⁰⁾しなければならないが、トーチとアーク監視が一体化されてコンパクトに纏められると、表 1(a) のようなガス仕切の採用などもでき、シールドガスの節約につながる。

次に、狭開先アーク溶接では厚板を多層盛溶接する点から殊に積層中に欠陥検出する技術が要求される。狭開先アーク溶接の場合、融合不良、溶込み不良などの溶接欠陥は不良パスとして連続して発生し易く、結局全長にわたり補修することが起き兼ねないからである。

溶接中に異常の発生を検知する或いは UT (超音波探傷) や AE (Acoustic Emission) により溶接中に欠陥検出¹⁵⁶⁾する、このような技術を開発することによって、溶接が完了してから欠陥部を掘り返す大変な後戻り作業を無くすることができる。

なお、センサがトーチ周辺に取り付けられ溶接ヘッドが満艦飾になり勝ちである。パワーケーブル、ガスホース、ワイヤ、冷却水用ホースと信号ケーブルなどの重量軽減対策も問題だが、センサの小形、軽量、低価格化も望まれている。

6. お わ り に

狭開先アーク溶接について、開発の歴史を振り返り、現状を述べ、そして今後の開発の方向について述べた。

狭開先アーク溶接技術の開発は、今、アーク溶接手法の開発よりも、開先做いを初めとするアーク電極の位置制御の進展と開先加工・補修など加工技術の開発が、今後の発展の鍵を握っている段階に入ったと考える。

狭開先アーク溶接は、厚板のアーク溶接における極限の姿となるべきものであり、それはまた、電子ビームやレーザなど高密度熱源による厚板溶接を実用化、汎用化するために必要な製缶技術の基礎となるものでもある。

本技術が今後ますます進展し、経済性のみならず、作業環境の改善、省エネルギー、省力化などの面でも寄与することを願っている。

最後に、筆者らは現在狭開先ホットワイヤ GTA による狭開先溶接の開発を進めていることもあって、我田引水の論を張った嫌いが多分にあるが、あえて思うがまま

に記した。割り引いて読んで戴ければ幸甚である。

また執筆期限と企業間の制約もあり、充分確認できないままに誤って解釈した記載、重要な技術開発の見落としなど多々あることと思う。もし本報告の内容を引用されるなら、なるべく引用文献などで再確認戴きたい。

7. 謝 辞

本報告を執筆するにあたり、下記の方々からご意見を拝聴させて戴き、あるいはデータ提供戴いた。金属材料技術研究所：平岡和雄氏、川崎重工業(株)：中山繁氏、元川崎製鉄(株)：赤秀公造氏、NKK：杉谷祐司氏、(株)東芝：多紀圭史氏、三菱重工業(株)：笠口泰宏氏、鴨和彦氏、他及びバブ日立工業(株)、バブコック日立(株)の方々などである。また文献からの図表転載にあたり、各発行元から快く許諾戴いた。終わりに臨み、これらの方々に感謝の意を表します。

8. 参 考 文 献

- 1) 溶接学会溶接法研究委員会編：ナローギャップ溶接（狭開先溶接）—日本における現状—：溶接法ガイドブック 1 (1984)
- 2) V. Malin: Monograph on Narrow-Gap Welding Technology, WRC Bulletin 323 (1987)
- 3) 妹島, 五代, 河原, 野村: 我が国におけるナローギャップ溶接の現状, 本学会誌, 50-11 (1981), 1074-1080
- 4) 牛尾, 松田, 益本: ナローギャップ溶接技術—現状の概観 (I) —, 本学会誌, 54-6, (1985), 358-365
- 5) 牛尾, 松田, 益本: ナローギャップ溶接技術—現状の概観 (II) —, 本学会誌, 54-8, (1985), 451-455
- 6) G. A. Hutt: A REVIEW OF RECENT DEVELOPMENTS IN MECHANISED HIGH EFFICIENCY GAS SHIELDED ARC WELDING PROCESSES FOR STEEL, The Welding Institute, 235/1984 (1984)
- 7) C. A. Butler, R. P. Meister, M. D. Randall: Narrow-Gap Welding - A Process for All Positions, Welding J., 48-2 (1969) 102-108
- 8) V. Y. Malin: The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding Part I, Welding J., 62-4 (1983) 22-30
- 9) 8) 翻訳 1 氏家: 狭開先溶接法の技術的現状(1), 溶接技術, 33-2, (1985) 85-89
- 10) 8) 翻訳 2 氏家: 狭開先溶接法の技術的現状(2), 溶接技術, 33-3, (1985) 82-85
- 11) V. Y. Malin: The State-of-the-Art of Narrow Gap Welding Part II, Welding J., 62-6 (1983) 37-46
- 12) 11) 翻訳 1 氏家: 続・狭開先溶接法の技術的現状(1), 溶接技術, 33-4, (1985) 54-59
- 13) 11) 翻訳 2 氏家: 続・狭開先溶接法の技術的現状(2), 溶接技術, 33-5, (1985) 74-79
- 14) V. Malin: Submerged Arc Narrow-Groove Welding, Welding J., 68-6 (1989), 34-46
- 15) 志賀, 平岡: STX-21 プロジェクトにおける高張力鋼の開発とその溶接の課題, 溶接技術, 46-7 (1998), 81-87
- 16) 和田, 難波, 田中: 建築・土木用溶接材料の最近の動向, 59-7 溶接学会誌 (1990) 514-521
- 17) R. P. Meister, D. C. Martin: Narrow-gap welding process: British Welding J., 13-5 (1966) 252-257
- 18) J. W. Nelson, W. J. Lewis: PROCESS FOR NARROW GAP WELDING, USP3, 328, 556 (1967), (特公昭51-23461)

- 19) バッセル細隙溶接法について：八幡溶接棒 K.K 資料 (1968)
- 20) 矢吹，齋藤：狭開先アーク溶接法，配管技術 (1977-12) 51-59
- 21) V. Baujat, C. Charles: Submarine Hull Construction Using Narrow-Groove GMAW, Welding J., 69-8 (1990) 31-35
- 22) 今井：揺動アーク狭開先溶接法に関する研究—ルーブナツプ法の実用化検討—，溶接法研究委員会資料，SW-937-77 (1977)
- 23) 水島，渡，猿渡，川上，村上：最近のリグ用レグの製作技術について，No. 314，製鉄研究 (1984) 44-54
- 24) J. E. Jackson, H. B. Sargent: Straight-Polarity Groove Welding of Thick Steel Plate, Welding J., 46-11 (1967) 905-914
- 25) S. Kimura, I. Ichihara, Y. Nagai: NARROW-GAP, GAS METAL ARC WELDING PROCESS IN FLAT POSITION, Welding J., 58-7 (1979) 44-52
- 26) 藤城，松村，中山，伊豆原，斉藤，山本，山口，宮部，黒瀬：極厚高張力鋼の突合わせ溶接施工法確立に関する研究，川崎重工技報，86 号 (1984) 72-84
- 27) D. H. Mortvedt: EVALUATION OF THE USABILITY AND BENEFITS OF TWIST WIRE GMAW & FCAW NARROW GAP WELDING, Ship Production Symposium of National Shipbuilding Research Program, Vol. 2 (1985), 557-589
- 28) ケイデル，メトロア—ロス：深溝溶接方法，特公昭 39-15262
- 29) 森，益本：梨形溶込みビード形成の研究，本会会誌，48-12 (1979), 1041-1047
- 30) 森，益本：梨形溶込みビード割れの研究，本会会誌，49-1 (1980), 19-23
- 31) 中島，石川，浦山，井出，島本：厚肉鋼板の狭開先自動溶接に関する研究，本会会誌，35-2 (1966), 129
- 32) 中島，浦山，石川：厚肉鋼板の狭開先自動 MIG 溶接，溶接技術，14-9 (1966), 13-18
- 33) 中島，上田，井手：大電流パルス MIG 溶接法の研究，三菱重工技報，9-3 (1972) 60-68
- 34) 関口，中山，鶴見，加藤：細隙片面自動アーク溶接法について (第 1 報)，本会会誌，36-3 (1967), 335
- 35) 関口，中山，松本：細隙片面アーク溶接法の開発および建築鉄骨への応用 (第 1 報)，本学会誌，43-10 (1974), 1013-1023
- 36) 中山，鎌田，松本，二村，中村，松井，稲垣：横向細隙片面アーク溶接法 (NOW-H 法) の研究 (第 3 報)，本会講概，13 (1973), 242-243
- 37) 中山，松本，鎌田，家沢，稲垣：細隙片面アーク溶接法の開発および建築鉄骨への応用 (第 2 報)，本学会誌，44-8 (1975), 673-678
- 38) 中山，松本，二村，中村，稲垣：細隙片面アーク溶接法の開発および建築鉄骨への応用 (第 3 報)，本学会誌，44-10 (1975), 807-814
- 39) 森垣，多喜乃，神戸，石井，馬田：横向 I 形狭開先溶接法について—横向 PAW 法，本会講概，14 (1974), 330-331
- 40) 伊藤，矢吹，萩原，山田，小野：揺動式狭開先溶接法の開発 (第 1 報)，本会講概，15 (1974), 290-291
- 41) 有川，大石，奥田，富田，樫村，古賀：アルミニウム合金の MIG 狭開先オッシレート溶接法「NHA 法」について，本会講概，15 (1974), 324-325
- 42) 伊藤，矢吹，齋藤，岩見：揺動アークによる狭開先溶接法 (第一報)，本会講概，16 (1975), 94-95
- 43) 中山，惣福，松井，松本，二村，家沢，稲垣：細隙片面 CO₂ アーク全自動溶接法 (NOW-B 法) の建築鉄骨への適用 (第 2 報)，本会講概，16 (1975), 354-355
- 44) 乾，飯銅：狭開先溶接機の試作，本会講概，16 (1975), 98-99
- 45) 峰久，永井，中島，大塚，前原，藤井，乾，飯銅：厚板突合せ継手に対する狭開先溶接法の適用，日立造船技法，38-4 (1977) 203-211
- 46) 叶野，平社，笠原，永井，堀内：狭開先溶接に関する研究 第 1 報，本会講概，18 (1976), 204-205
- 47) 有田，村井，三沢：厚板鋼板の狭開先 GMA 溶接に関する研究，本会講概，18 (1976), 212-213
- 48) 下山，佐藤，坂元，高野，森鼻，山崎，佐藤：10%Ni 超高張力鋼の溶接性と溶接工作法の研究 (第 1 報)，本会講概，19 (1976), 102-103
- 49) 佐藤，坂元，森鼻，佐藤：深海潜水調査船耐圧殻用 10 Ni-8 Co 鋼の狭開先 TIG 溶接継手性能の評価，三菱重工技報，11-1 (1974), 60-68
- 50) 叶野，富田，横田，上田：DCSP-TIG を用いるアルミニウム合金厚板横向溶接のギャップに対する検討，本会講概，19 (1976), 320-321
- 51) 叶野，永井，樫村：TWIST WIRE によるガスシールドアーク溶接の研究 (第 1 報)，本会講概，19 (1976), 400-401
- 52) 荒田，丸尾，井上，柴田，明石：横向きナローギャップ溶接の自動制御 (第 1 報)，本会講概，22 (1978), 240-241
- 53) 高尾，浅野，田桑：狭開先 MIG 溶接法の開発，本会講概，23 (1978), 230-231
- 54) 河原，森，山崎，宮本：狭開先 MIG 溶接法の圧力容器への適用，本会講概，23 (1978), 232-233
- 55) 吉永，松浦，坂井：HT 80 鋼を用いた水圧鉄管現場円周継手の自動溶接工法，本会講概，24 (1979), 114-115
- 56) 森垣，熊谷，杉岡，西村，本杉，溝上：1 層 1 パス多層盛狭開先サブマージアーク溶接法，本会講概，24 (1979), 152-153
- 57) 森垣，熊谷，杉岡，西村，本杉，溝上：狭開先サブマージアーク溶接法における 2 電極法の適用，本会講概，25 (1979), 282-283
- 58) 河原，宮本，山崎，草野：狭開先溶接法の原子炉圧力容器への適用，本会講概，26 (1980) 98-99
- 59) S. Sawada, M. Ohta, A. Nishioka, K. Hori, M. Kawahara, H. Yamasaki: Application of Narrow-Gap GMA Welding Process to Nuclear Reactor Pressure Vessels, 4th International Conference of Pressure Vessel Technology, (1980), 113-118
- 60) 浮辺，赤秀，坪井：狭開先サブマージアーク溶接におけるスラグ剥離性の改善，本会講概，26 (1980), 100-101
- 61) 野村，杉谷，小林，鈴木：アークをセンサとした自動ならい方法 (第一報)，本会講概，26 (1980), 110-111
- 62) 小菅，津村，榎山，波多野，中西，勝本：21/4 Cr-1 Mo 鋼の交流 MIG 狭開先溶接法について (第 1 報)，本会講概，28 (1981), 166-167
- 63) 広瀬，平位，鈴木，片貝，徳久，平井：21/4%Cr-1%Mo 鋼熱交換器の狭開先サブマージアーク溶接，本会講概，28 (1981), 176-177
- 64) 佐藤，下山，松本，亀井，浜田，浦谷：屈曲ワイヤ式狭開先 GMA 溶接法の研究 (第 1 報)，本会講概，29 (1981), 286-287
- 65) 野村，杉谷，小林：高速回転アークによる狭開先溶接法，本会講概，30 (1982), 148-149
- 66) 浅野，田桑，高尾，河原，松宮：厚肉大径分岐管の鞍型継手自動溶接法，本会講概，32 (1983), 202-203
- 67) 浅野，野村：厚肉大径分岐管の鞍形継手自動溶接法，溶接法研究委員会資料 SW-1369-82 (1982)
- 68) 今永，羽田，金丸，田口：薄型トーチの開発及び狭開先内溶接への適用，本会講概，32 (1983), 244-245
- 69) 羽田，今永，田口：プラズマトーチの冷却性能および薄型トーチによる狭開先溶接の検討，本会論文集，2-2 (1984) 234-240
- 70) 小野：DCEN 片面狭開先 MAG 溶接法の研究 (1)，本会講概，33 (1983), 62-63
- 71) 小野：片面狭開先 MAG 溶接法の研究 (第 1 報)，本会会誌，3-2 (1985), 261-269
- 72) 小野：片面狭開先 MAG 溶接法の研究 (第 2 報)，本会会誌，4-2 (1986), 289-295
- 73) 小野：片面狭開先 MAG 溶接法の研究 (第 3 報)，本会会誌，4-2 (1986), 295-300
- 74) 有田，村井，井土，鷲崎：横向狭開先 GMA 溶接法 (NHT 法) の開発，本会講概，34 (1984), 34-35
- 75) 永井，中野：磁気オシレートによる強磁性材料の狭開先 TIG 溶接法の開発，本会講概，40 (1987), 274-275
- 76) 堀，中澤，田桑，永島：揺動式狭開先ホットワイヤ TIG 溶接装置の開発，本会講概，57 (1995), 80-81

- 77) 松浦, 坂井, 堀尾, 高橋: 大型水圧鉄管の高効率現場自動 TIG 溶接システムの開発, 本会講概, 58 (1996), 142-143
- 78) 鴨, 石出, 池田, 藤田, 中島: 全姿勢狭開先 GTA 溶接における溶接条件制御手法の開発(その1), 本会講概, 58 (1996), 144-145
- 79) 藤田: 狭開先 GMA 溶接の無監視適応制御システムの開発(1), 本会講概, 59 (1996), 274-275
- 80) 多紀, 大森, 浅井, 山口: 全姿勢狭開先 TIG 溶接の高効率化に関する研究(第1報), 本会講概, 60 (1997), 54-55
- 81) 中村, 平岡: 超狭開先 GMA 溶接のアーカ入熱分布制御, 本会講概, 62 (1998), 82-83
- 82) 八木, 北側, 大塚, 大澤, 丸岡, 村上: 厚肉压力容器用ガス切断開先加工法の検討, 本会講概, 63 (1998), 306-307
- 83) 斎藤, 今永, 羽田, 荒谷, 蛭田, 梶浦, 永島: 揺動 TIG 溶接法による全姿勢狭開先溶接の開発, 本会講概, 63 (1998), 30-31
- 84) 山田, 田上, 小林, 石川: 高効率 TIG 溶接法の開発(第2報), 本会講概, 63 (1998), 26-27
- 85) Technical Commission on Welding Processes: NARROW GAP WELDING (NGW)-The State-of-the-Art in Japan-, The Japan Welding Society (1986)
- 86) Sawada, K. Hori, M. Kawahara, M. Takao, I. Asano: Application of NARROW-GAP Process, Welding J., 58-9 (1979), 17-25
- 87) 堀, 浅野, 森: 狭開先溶接法の開発と高温高压機器製作への適用: 溶接技術, 26-8 (1978) 77-82
- 88) 沢田, 河原, 浅野: ナローギャップ GMA 溶接, 溶接技術, 28-11 (1980) 57-61
- 89) 松宮, 河原, 高尾, 田村, 田桑, 浅野: 全姿勢狭開先 GMA 溶接装置の開発とボイラ主配管への実機適用, 溶接法研究委員会資料, SW-1645-85 (1985)
- 90) 波多野, 飯島, 馬淵, 笠口, 河野: 全姿勢対応狭開先 MAG 溶接法の開発, 三菱重工技報, 32-6, (1995), 379-382
- 91) 笠口, 飯島, 馬淵, 河野: 全姿勢対応狭開先 MAG 溶接法の開発, 溶接法研究委員会資料, SW-2251-93, (1993)
- 92) 河野, 飯島, 馬淵: 回動電極型狭開先 GMA 溶接技術の開発, KITEK INFORMATION, No. 138 (1997), 12-16
- 93) P. Groger, G. Groten, D. Pyrasch, H. Wietrzniok: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet des Schutzgas-Engspalt-schweissens, DVS (Dtsch Verlag Schweisstech) 127 (1989), 112-119
- 94) 溝, 加藤, 川嶋, 甘中, 有田: 極厚鉄鋼材料の狭開先 MAG 溶接法, 本会講概, 63 (1998), 36-37
- 95) 佐藤, 下山, 松本, 亀井, 浜田, 浦谷: 新しい狭開先溶接法の開発と実用化, 三菱重工技報, 18-6 (1981) 79-88
- 96) 杉谷: 高速回転アーカ自動溶接技術, 金属, 65-10 (1995), 879-890
- 97) 杉谷, 小林, 村山: 高速回転アーカ自動溶接法の開発と適用, 溶接技術, 38-2 (1990), 92-98
- 98) HSRA-NGW 狭開先自動溶接装置: ㈱ジャパントクノメイト, カタログ
- 99) 毛利, 江端: 高速回転アーカ溶接法による片面 I 型突合せ溶接施工法の開発, 日本橋梁技報 (1996), 21-26
- 100) 杉谷, 西, 上田, 小島: ポータブルレール溶接ロボットの開発, NKK 技報, No. 138 (1992), 56-62
- 101) 河原, 中山, 金丸, 上原, 岩見, 岩嶋: 大型水圧鉄管の現地自動組立溶接システムの開発(狭開先 MAG 溶接部監視装置の開発), 溶接法研究委員会資料, SW-2558-98, (1998)
- 102) 前原, 安部, 大澤, 中島, 黒田: 厚板継手の横姿勢ロボット溶接施工法の開発, 日立造船技報, 55-3 (1994), 142-146
- 103) 相原, 大谷, 中村, 栢田, 竹田: フラックス入りワイヤによる SUS 304 厚鋼板の狭開先溶接, 溶接法研究委員会資料 SW-1671-86 (1986)
- 104) 岩本, 荒木, 浅澤, 矢野, 阿部: 原子力発電用一次系厚肉ステンレス鋼製タンクの製作, 千代田技報, 14-3 (1993), 58-62
- 105) N. A. Kennedy: Narrow gap submerged-arc welding of steel, Part 1 Applications, Met. Const. 18-11 (1986) 687-691
- 106) N. A. Kennedy: Narrow gap submerged-arc welding of steel, Part 2 Equipment, consumables and metallurgy, Met. Const. 18-12 (1986) 765-769
- 107) M. Persson: Fully Automatic Welding of Thick-walled Pressure Vessels by the Narrow Gap Subarc Process, Materials & Design, 6-5 (1985), 244-247
- 108) 赤秀, 徳久, 浮辺, 坪井: 溶接条件の選定と継手の健全性について, 本会講概, 27 (1980), 90-91
- 109) Y. Hirai, M. Tokuhisa, I. Yamasita, K. Nishihiro, K. Akahide, T. Ukebe: Development of the Narrow Gap Submerged Arc Welding Process-NSA Process, KWSA-KI STEEL TECHNICAL REPORT, NO. 5 (1982), 81-93
- 110) 馬木, 山本: ボイラおよび压力容器用 SBV 62 鋼板の開発と実用化, 石川島播磨技報, 38-3 (1998) 166-171
- 111) H. Clausmeyer, H. Hantsch: Manufacture of thick-walled pressure vessels in particular consideration of advanced welding process and measures for quality assurance, Pressure Vessel Technology, Vol. 2 (1989), 1321-1335
- 112) G. Almqvist, L. Wittung, A. Ruegenberg, J. Strijbos: Narrow joint/narrow gap submerged-arc welding of structural members for drilling platforms, Weld. Rev., 5-2 (1986), s8-s12
- 113) R. Daemen, R. Shockley: Narrow-Gap Subarc Builds Thick-Walled Tank, Weld Des Fabr, 65-5 (1992) 30-33
- 114) 松宮, 田桑, 鶴飼, 鉄, 稲垣, 岡田: ボイラチューブ溶接の自動化, 溶接技術, 25-9 (1977), 25-32
- 115) 重, 福永, 近藤, 馬越, 城: 蒸気タービンロータの溶接, 溶接法研究委員会資料, SW-2533-97 (1997)
- 116) 村松: 超々臨界圧発電プラントの技術開発, 配管技術, 増刊号 (1998) 86-97
- 117) 伊藤, 岡, 名倉, 川口, 今田: 大形ステンレス鋼製原子力容器への狭開先ホットワイヤ GTA 溶接法の適用, 三菱重工技報, 19-4 (1982), 404-409
- 118) R. Lambs, J-P. Guigon: Orbital narrow groove TIG welding on heavy stainless steel pipe in nuclear plants, Welding Review International, 17-2 (1998), 13-15
- 119) M. C. Knapp, J. A. Cogar: HIGH-LEVEL RADIO-ACTIVE WASTE CONTAINER FABRICATION AND CLOSURE WELDS, Waste Manage 1998 (1998), 778-780
- 120) 松井, 中山: 厚板高性能材に対する狭開先 TIG 溶接法の適用, 実務展望, No. 119 (1987) 3-9
- 121) 荒谷: 著者への私信
- 122) 三宅, 大北: 9%Ni 鋼 TIG 溶接の高効率化, 圧力技術, 35-2 (1997), 79-89
- 123) 伊原, 砂山, 小山, 宮脇, 大澤, 中本, 荒木, 奥出: 水圧鉄管用 950 N/mm² 級高張力鋼の溶接施工法の開発, 日立造船技報, Vol. 58 No. 4, (1998), 244-249
- 124) 平野, 山内, 村田, 品田: 少数主げた橋梁の溶接施工技術開発, 石川島播磨技報, 37-1 (1997) 18-26
- 125) 松浦, 酒井, 堀尾: 4ヘッド自動 GTA 溶接施工法(SAT 工法), 溶接学会溶接法研究委員会編 アーク溶接の自動化技術 (1995) II155-II159
- 126) 多紀, 大森, 浅井, 柳, 浜井, 稲山, 中平, 小泉, 多田: ITER 実規模真空容器現地溶接への高効率狭開先 TIG 溶接法の適用, 溶接法研究委員会資料, SW-2595-98 (1998)
- 127) 荒谷, 蛭田, 梶浦, 斎藤, 永島, 高橋, 中平, 小泉: ITER 実規模真空容器の溶接(内壁用溶接機器の開発), 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集 (1998) 2BV2-7
- 128) 田桑, 近藤, 光畑: 全姿勢狭開先 HSTig 溶接装置の開発とボイラ主配管への適用, 溶接法研究委員会資料, SW-2333-94 (1994)
- 129) <http://www. arcmachines. com/prodMed/m15hd/m15ng. html>
- 130) 中村, 平岡: 超狭開先 GMA 溶接におけるアーカ入熱分布制御について, 溶接アーカ物理研究委員会資料, ア物-97-1003 (1997)
- 131) 中村, 平岡: 入熱分布型超狭開先 GMA 溶接, 溶接法研究委員会資料, SW-2596-98 (1998)

- 132) GE Welding & Machining: FineLine™ Welding Technology, Catalog
- 133) H. P. Offer: FineLine™ Welding Process: 溶接法研究委員会資料 SW-2477-96 (1)(1996)
- 134) 上田, 中長, 清水, 笠井: オーステナイト系ステンレス鋼管の多層円周突き合わせ溶接への水冷法の適用とその残留応力, 本学会誌, 49-1 (1980), 61-66
- 135) T. Chapman, H. Offer, W. Sanders, G. Rusack: Reduced Stress Welding Process for Nuclear Plant Piping, 溶接法研究委員会資料 SW-2477-96 (2)(1996)
- 136) 森重, 長谷川, 前田, 延与: 狭開先溶接技術の原子力プラントへの適用: 石川島播磨技報, 38-4 (1998), 242-247
- 137) B. Brickstad, B. L. Josefson: A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75 (1998), 11-25
- 138) 松田: 原子力発電プラントにおける保守・補修溶接技術について, 溶接技術, 47-1 (1999), 108-112
- 139) 青木, 名倉: 原子力プラントの高品質・高効率溶接技術, 原子力工業, 42-8 (1996), 8-14
- 140) 溶接学会溶接法研究委員会編: アーク溶接におけるセンシングと制御, 溶接法ガイドブック 2 (1990)
- 141) 溶接学会溶接法研究委員会編: アーク溶接の自動化技術, 溶接法ガイドブック 3 (1995)
- 142) F. Eichhorn, J. Borowka: Adaptive through-the-arc seam tracking system for the narrow gap welding process, International Conference on Developments in Automated and Robot Welding (2nd), (1987), 125-132
- 143) 杉谷, 玉置, 小林, 村山: アークセンサーによる開先ならいと溶着量制御, 本会講概, 44 (1989), 39-41
- 144) 名倉, 藤田, 藤谷, 鴨, 高岸: 無監視化 GTA 溶接法の開発, 溶接法委員会資料, SW-2424-95 (1996)
- 145) 名倉, 藤田, 藤谷, 高岸: 無監視化 TIG 溶接の大型構造物への適用, 三菱重工技報, 32-6 (1995), 383-386
- 146) 藤田, 名倉, 森井: 自動 MAG 溶接の無監視化技術とその実用化, 溶接法研究委員会資料, SW-2520-97 (1997)
- 147) 藤田, 名倉, 泉並, 森井: 狭開先自動 MAG 溶接の無監視化技術と実用化, 三菱重工技報, 34-6 (1997) 430-433
- 148) 鴨, 石出, 藤田, 池田: 狭開先 GTAW 全自動溶接システム, 本会平成 10 年度秋季全国大会技術セッション資料「溶接の自動化における最新技術」(1998), 19-28
- 149) 辻, 石川, 岸上: フルイディスクによる狭開先溶接機のトーチ位置の検出と制御, 日立造船技報, 35-2 (1974) 70-75
- 150) D. Dirksen, B. Ekelof: Konzept und Entwicklung eines Systems zum automatischen Mehrlagen-Unterpulverschweissen ohne Programmierung des Lagenaufbaus, Dtsch Verlag Schweisstsch, Vol. 176 (1996) 75-80
- 151) S. Susei, S. Ymamoto, Y. Ohkuma, Y. Ohtsuka, S. Nakayama, A. Sakaguchi: Welding Procedure for Heavy Thickness Aluminum Plates: "Fundamental and Practical approaches to the reliability of welded structures (I)" The Forth International Symposium of the Japan Welding Society (1982), 79-84
- 152) 辻, 宮脇, 久安, 谷口, 森, 北川, 鈴木: 溶接開先内面の自動研削装置の試作, 日立造船技報, 42-3 (1981) 181-185
- 153) 安藤, 原沢, 塚本, 豊田, 佐藤: 極厚板円筒長手継手の狭開先 MIG 溶接による溶接変形, 本会論文集, 2-3 (1984), 502-508
- 154) H. Hantsch, K. Million, H. Zimmerman: Submerged Arc Narrow-Gap Welding of Thick-walled Components, Welding J., 61-7 (1982), 27-34
- 155) K. Kussmaul, W. Stoppler, R. Sinz: MATERIALS AND WELDING PROCESS DEVELOPMENT FOR NUCLEAR APPLICATION IN THE FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY, International Conference on Welding Technology for Energy Applications 1982, (1982), 17-69
- 156) D. M. Romrell: Acoustic Emission Weld Monitoring of Nuclear Components, Welding J., 52-2 (1973), 81s-87s

著者略歴

氏名 堀 勝義 (ほり かつよし)

昭和13年11月28日生 山口県出身

昭和36年3月 大阪大学工学部 溶接工学科 卒業

昭和36年4月 ㈱日立製作所 日立研究所 入社

昭和40年2月 バブコック日立㈱ 呉研究所 転属

平成2年2月 呉研究所 主管研究員

平成10年12月 呉研究所嘱託 (担当部長)

・入社以来一貫してアーク溶接プロセス関連の研究開発に従事。

主な研究開発として、被覆棒のアーク現象、帯状電極肉盛溶接法、狭開先 GMA 溶接法、ホットワイヤ GTAW とその狭開先溶接法の開発を担当。

その間、狭開先溶接に関連しては昭和 55 年に「新狭開先 GMA 溶接装置の開発と厚板構造物への適用」で澤田, 浅野, 河原らと共に日本溶接協会技術賞, また平成元年に小園, 田桑, 近藤, 明賀らと共に「バルス通電加熱ホットワイヤ TIG 溶接法の開発」で日本溶接協会技術賞などを受賞。

氏名 羽田 光明 (はねだ みつあき)

昭和23年1月2日生 大阪府出身

昭和46年3月 大阪大学工学部溶接工学科卒業

昭和46年4月 ㈱日立製作所 機械研究所 入社

昭和62年2月 加工技術開発センタ主任研究員

昭和63年3月 工学博士 (慶応義塾大学 理工学部)

「プラズマアーク溶接の高性能化と適用拡大に関する研究」

・入社以来一貫して溶接プロセス関連の研究開発に従事。

アーク溶接, 切断からレーザ接合まで幅広く経験。

主な製品開発として、ホットワイヤ及び全姿勢プラズマアーク溶接の装置開発を担当。

現在の研究分野はセンサ, 自動化技術を応用した全自動溶接システム, 狭開先溶接の研究開発を継続。