レビュー&トレンド

電子ビーム溶接*

入 江 宏 定**

Electron Beam Welding*

by Hirosada Irie**

キーワード：電子ビーム溶接，穿孔，溶接機構，キャラクタリゼーション，継手特性，変形，溶接欠陥，制御，電子ビーム，溶接機，適用例

1. 緒 言

電子ビーム溶接は J. Stohr (仏) が原子力材料の活性金属に真空中溶接を実施する目的で開発し，研究成果を公表して以来¹⁾，当初予想もしなかったと思われる「深く，幅の狭い溶融部が得られる」という意外な特徴を有することが判明し，今日精密溶接法の 1 として広く利用されるまでに至っている。

電子ビーム溶接の開発は当初アーク溶接を凌ぐのではないかと期待されたが，設備費が溶接設備の中では桁違いに高いこと，真空により生産能率に課題があること，あるいは精密溶接のためそれなりの開先準備が要求されることなどのため，限られた分野で使用されるに留まっている。しかも近年はレーザ溶接という強力な競争相手が出現し，研究開発の主力がそちらに取られてしまっており，現状の開発は活発であるとは言えない。しかしその独特の特徴はレーザ溶接では十分信頼，実現できないものであり，地味ではあるが着実に利用されている。

電子ビーム溶接の研究・開発は，他の溶接技術と同様に，生産性の向上と信頼性の向上の 2 大目的を中心に開発されてきた。本稿もその点を中心に総括していきたい。また文献は非常に多く，多様性に富みすべての研究開発結果を網羅することは困難であるため，ある程度開発の歴史において話題となったものを中心に組み立てて行きたい。ただ今日の電子ビーム溶接の適用は，ほとんどが本法の開発当初の

1960 年代にアイデアが提案されており，それ以降特に国内で行われた開発は，これらのアイデアを 1 歩 1 歩実用化するためになされた努力の積み重ねであり，すべての研究結果がこれらに結びついていることも付記したい。

2. 溶接基礎現象

2.1 溶接機構の解明

電子ビーム溶接は溶込み深さが非常に大きく，かつ溶融幅が極端に小さいのは周知の事実であるが，なぜこのような溶込みが得られるのかは極めて興味あることである。そこで電子ビームと金属との相互作用について多くの研究がなされてきた。

電子ビームが金属中に浸透する深さ，すなわち飛程は極めて小さい。電子が金属中でエネルギーを失いながら（大部分は熱に変わる）拡散する過程についての研究は古くから非常に多くなされてきた。その詳細は本稿の目的ではないが，古典的な衝突理論によると 100 keV の電子が鉄中に浸透する深さは高々 10 μm のオーダーである。にも拘わらず電子ビーム溶接では電子が金属内部を溶融する深さ，すなわち溶込み深さは，数百 mm にも達する。この疑問に最初に挑戦したのが H. Schwartz である²⁾。彼は電子ビームが金属表面を加熱するのではなく，浸透中のある程度減衰したところで最大のエネルギー損失となり，最高発熱部となる点に注目した。そして図 1 のように内部の最高温度部で蒸発による空洞が形成され，それが爆発し溶融金属を飛散させると考えた。そしてこの繰り返しにより電子ビームは金属内部に急速に進入して行くと考えた。なおこの 1

*原稿受付 平成 7 年 9 月 28 日

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

個の気泡が形成され爆発する時間は10 msecのオーダーと非常に短い。その後これを定量化した研究³⁾や一個の気泡ではなく多数の気孔の爆発(沸騰現象)によりチャンネルが形成されると推定した研究などが発表されてきた⁴⁾。ただこの過程は直接観察による実証はまだなされていない。何れにせよ電子ビームが溶融金属を吹き飛ばし内部に進入する穿孔過程はパワー密度に依存し、パワー密度が大きいほど穿孔速度は大きくなる⁴⁾。電子ビームの溶込み深さはこの穿孔深さに大きく支配されるが、溶込み

図1 電子ビーム穿孔モデル²⁾

先端部及びビーム径を大きくしたとき、すなわちパワー密度が弱まった部分では、溶込み深さはアーク溶接と同様に、溶融金属のビーム直下からの流出が大きな因子となる⁵⁾。

溶接中は電子ビーム直下に図2に示されるように、常にチャンネルが形成されており、電子ビームはビーム孔前面の固体を溶融しながら溶接が進行するが、このためには溶融金属が電子ビーム照射箇所から後方に移動する必要がある。溶融金属を駆動する力としては、後方の溶融池への溶融金属の表面張力流動による吸い込み、電子ビームの衝突圧力及び金属蒸気圧(あるいは金属蒸気の発生による反発力=ジェット推進力)が考えられる。単一の因子のみとすることはできないが、実験及び計算により金属蒸気圧またはその反発力をもっとも大きいとされている⁴⁾。

溶接過程は図2の安定したビーム孔が常に維持されている訳ではない。その挙動は徐々に明らかになってはいるが、大変複雑である。ビーム孔の挙動あるいは溶融金属の挙動すなわち動的な溶接現象の観察は、表面での溶融金属の高速度映画撮影のほか、X線によるビーム孔の挙動観察が非常に多く行われてきた。X線の観察では電子ビームと金属との衝突箇所から発生するX線のほか、図3に示すようなレントゲン写真の原理と同じ過程X線による観察

図2 電子ビーム溶接モデル

が行われてきた。公表された中では 600 kVp のパルス X 線を溶接中のアルミニウム合金に適用しビーム孔の形状を観察した結果が最初である⁷⁾。これより断片的な写真を適当に組み合わせてビーム孔が常に開閉を繰り返すことを見出し、これから溶接機構をモデル化した。またその後も多くの研究者により採用されさまざまな溶接機構が提唱されている⁶⁻¹¹⁾。またビーム孔中で電子ビーム衝突箇所から発生する X 線をピンホールカメラで撮影した結果なども多く公表されている¹²⁻¹⁶⁾。何れの結果もある深さ位置から放出される X 線量は高速で変動しており、電子ビームと金属との相互作用が数 kHz あるいはそれ以上に激しい変動を伴う現象であること、すなわち電子ビームの照射位置も激しく変動すると同時にビーム孔への溶融池からの溶融金属の流動も

変動していることを示している。さらに透過 X 線によるビーム孔の動的観察において、撮影中に X 線を透過し難い W 粉末を添加し、その動的挙動を観察したものがある。その結果では図 4 のように表面近傍での流動と内部での挙動が必ずしも連携せず、溶融金属の流動が上下でしばしば分離することも明らかになってきた¹⁷⁾。とくに溶込み深さが大きくなるほど溶接現象は複雑になる。これらの不安定な溶融金属の流動あるいは電子ビーム照射箇所的高速変動は電子ビーム溶接独特のスパイクなどの欠陥発生とも密接な関係にあることも明らかになってきている^{18,19)}。またこれらのトレース法と呼ばれる、異種材料を溶接中に添加してその分布状態を観察することによる溶込み機構の研究結果¹⁸⁻²⁰⁾によれば、電子ビーム溶接においては表面、内部あるいはルート部から添加された材料は間欠的かつ層状にしか接合されない。すなわち外部からのフィラー材による溶接金属部の特性改善は容易ではないことをも示している。

2.2 電子ビーム溶接における溶込み深さ

電子ビーム溶接における溶込み深さは、溶接施工においてもっとも重要な量である。本来電子ビーム溶接の溶込み過程の解明から溶込み深さを決定するのがもっとも望ましいが、動的な機構からの溶込み深さの提案式は存在しない。これまでに提案されている溶込み深さの関係式は、電子ビーム溶接が結果的に板厚方向に分布した線熱源として取り扱うことが可能であるため、板厚方向の分布熱源を仮定して熱伝導方程式の解を求めたものか、溶込み深さと入熱パラメータの次元式を仮定して、実験値からべき数などを求めたものである。これらの結果はさまざまな式として提唱されているが、簡略化して近似すると、

$$h_v = K \cdot V_b \cdot I_b / v_b^n \cdot d_b^m$$

$$0 < m, n < 1$$

として表されている²¹⁻²⁴⁾。ここで K は材料の熱定数、 V_b 及び I_b は電子ビームの加速電圧とビーム電流、 v_b 及び d_b は溶接速度及びビーム径である。なお m, n は 0.5 程度が提唱されているが²²⁾、0.8 程度を示す結果も報告されている²⁵⁾。

この式から電圧または電流の制御によりある程度溶込み深さを決定できるが、材料によっては運用できないこともある。たとえばアルミニウムを溶接するとき熱定数 K の材料依存性はあまり大きくない。しかし 7000 系のような Mg や Zn の蒸発性の高い

図3 X線透過法による溶接現象の観察⁸⁾

図4 X線透過法による溶融金属の流動状態¹⁷⁾

成分を含有するものと、そうでないものでは同一条件下での溶込み深さが2倍近く異なることもある²⁷⁾。これは上記のような溶込み深さが、材料の蒸発現象に大きく依存する動的な溶接機構を考慮せずに求めた式であるためと考えられる。

したがってさらに動的な溶接機構を考慮した溶込み深さの式を確立する必要がある。ただし同一溶接機、同一材料で溶込み深さを推定する場合、あるパワー範囲で上式はかなり有効である。

また溶込み深さと溶接パラメータとの関係を実験的に求めた例も非常に多い²⁸⁻³²⁾。この中で上記の加速電圧への依存性が超高压電子ビーム溶接機において $V_0^{1.2}$ になるとも報告されている³²⁾。

2.3 電子ビームのキャラクタリゼーション

電子ビーム溶接においては基本的パラメータとして、加速電圧、ビーム電流、溶接速度の他、電子ビームの径と焦点位置を自由に選択することが出来る。電子ビームの焦点位置とビーム径は、溶接形状を決定的に支配する因子であるが、測定が非常に困難な因子であり、多くの研究が実施されてきた。ビーム径の測定には基本的には次の4種類が考えられる。

1) ビーム径よりも小さい径のピンホールを用い、ビームを高速走査させてピンホールを透過させ、透過電流量からビームの電流密度分布を計測する方法^{33,34)}。本法ではピンホール径を小さくするほど高分解能のパワー密度分布計測が可能であるが、計器を溶融させない高速走査が必要である。近年高速デジタルメモリーが開発されており、かなりのパワー密度まで計測できるようになっている³⁴⁾。

2) ビームを高速走行する板や棒、あるいはスリットで切り、板により遮蔽されない部分のビーム電流量の変化と計算式から電流密度分布を測定する方法³⁵⁻³⁷⁾。この計測ではビーム径は測定できるが、アーベル変換などの計算手法を使用しないと径方向分布は測定できない。また軸対象の分布には有効であるが、通常のビームでは軸対象分布の実現は非常に困難である。

3) 一定形状の金属を溶融し、その溶融幅からビーム径を推定する方法。カーボンなど昇華性の材料の切断幅を測るなどの方法があるが、荒田らが考案した矩形断面のエッジを溶断する AB テスト法³⁸⁾が実効的かつ簡便に焦点位置を決める方法として非常に有効だと思われる。厳密にはピンホール法と比較すると若干径が大きく、焦点がレンズ側に位置するように測定される^{39,40)}。このズレはビームの

モードにも依存する。

4) 焦点位置のみを決定するのに、非常に弱いパワーのビームをワークに照射し輝度が最も大きくなるレンズ電流を見出す方法³⁷⁾。簡便であり、ビームモードがガウシアンであれば有効であるが、リボン型のフィラメントを用いるとガウシアンと top-flat 分布が混在することがあり、焦点位置を示すかどうかの実証例はない。

なお最初にパワー、焦点位置、溶接速度などは独立して選択できると述べたが、焦点位置やビーム径はさまざまな因子により加速電圧やビーム電流に依存して変化することが一般である。加速電圧に対してはレンズ電流を補正して常に焦点位置を一定位置に設定する制御法も開発されているが⁴¹⁾、これは電子銃に依存しすべてに適用できるとは限らない。

3. 溶接機器の開発

電子ビーム溶接機は、ハード及びソフト面において非常な開発努力がなされ、今日、信頼性と取り扱易さは格段の進歩をなしてきた。

電子ビーム溶接機における装置の分類に、加速電圧 80~100 kV 以下又は以上で区別し、高電圧型、低電圧型とする方法がある。一方電子ビーム溶接機では真空を原則とするため、溶接室の真空度に依拠して高真空 (DP 排気)、低真空 (RP またはメカニカルブースター排気)、大気中 (非排気) と分類されてきた。もちろんそれぞれの特徴を有するが、あまり一般的な分類としては意味を持たなくなっている。

ここでは溶接機全体の開発体系ではなく、個別の開発過程についてレビューする。このため使用目的別の開発や、個々の部品の開発も混在した説明となる。なお性格上公表された文献はあまり多くないため、かなり推論の部分もあることを予めお断りする。

3.1 電子銃の開発

市販溶接用電子銃の構造は当初からピース型とシュタイガーパルト型 (テレフォーカス的一种) の2種類が使用され、現在も両者が用いられている。当然後者の方が焦点深度が深く、絞られた電子ビームが得られるが、国内ではピース型が多く使用されている。電子銃の設計やレンズあるいは電子ビーム軌道の設計は歴史が古く、非常に多くの研究者により、とくに顕微鏡などの分析機をターゲットとして行われてきた⁴²⁾。国内での溶接機用の設計では大出力電子ビーム溶接機の開発を目指したものが多

く⁴³⁻⁴⁵⁾、小形溶接機用の電子銃の設計に関するものは見あたらない。

3.2 大量生産型小形溶接機

大量生産型溶接機の開発思想は3種類ある。いずれも、単位時間当たりの生産量を如何に拡大するかが第1段の開発目標である。

その基本概念は電子ビーム溶接が開発された直後の1960年代にほぼ提唱されている⁴⁶⁾。

電子ビーム溶接そのものの時間は高速溶接であるため、大量生産の最大のネックは真空すなわち排気及び給気時間の短縮である。

部品1個1個を溶接室に装填し溶接する方法が最初に開発され、現在も主流を占めている。さまざまな方法があるが、一般には真空室の上部から電子ビームが照射され、底部や側面からワークが装填されることが多い。たとえばできるだけ生産能率を向上させるため、最近では回転ジグなどに予めセッティングしたワークを真空室底部から供給する方法が多い。これはボトムデリバリー方式などと呼ばれている。この方式も自動化を効率よく行うため、真空ステーションだけでなく、溶接中に次の部品の装填や予備組立及び溶接後の取り外しを行うためのステーションを装備したマルチステーション方式もかなり市販されている⁴⁷⁾(図5)。

一方排気時間を極端に短くするため、差動排気システムを利用した設備も生産された。これは減圧室と溶接室を有し、ワークは大気→減圧→真空と連続的に移動する。給気取り出しのときも逆工程をたどる。図6はその一例のスライディングシール方式であるが、同一ターンテーブル上にいくつかのステーションを持ち、溶接室にワークが装填される前に、予備排気室を持ち減圧される。したがって大気中からほぼ連続的に排気されていく。この方式であると簡単なワークの溶接の場合、450個/時間の生産量の報告もある⁴⁸⁾。

排気時間を短縮する方法として、溶接室の小形化と溶接室真空度の緩和が積極的に取り入れられた。溶接室の小型化はワークに合わせた最少容量の溶接室を設計する方法であるが、当然のこととして取り入れられ、それに関する文献は皆無に近い。真空度を高真空(10^{-2} ~ 10^{-3} Pa)までの排気から、低真空(1 ~ 10^{-1} Pa)に緩和して大幅に排気設備と排気時間を節約する方法である。一般には排気容量の大きいメカニカルブースターポンプが使用され小形溶接室の場合、10秒程度が排気時間となる。このポンプ

図5 2ステーション型小形品大量生産機⁴⁷⁾

図6 スライディングシール型小形品大量生産機⁴⁸⁾

は騒音が激しいのでスクロールポンプを使用して作業環境を向上させる動きもある⁴⁹⁾。低真空電子ビーム溶接機と言っても電子銃は高真空に維持されるため、圧力差を確保するため中間に排気系を設けたり、細長い小径チャンネルで空気抵抗を増大させている。さらに溶接室との間にバルブを設け、溶接時のみチャンネルを開放する。

大気中電子ビーム溶接機は真空溶接室が不要であるため一時盛んに研究された⁵⁰⁻⁵²⁾。しかし電子銃室(高真空)との圧力差が大きく、小径のチャンネルを通して電子ビームを大気中に放出しなければならないため高度な技術を必要とする。また大気中に放出した段階で気体分子との衝突により散乱され急速にパワー密度が低下し⁵³⁾溶込み深さを確保することが困難となり、一部が実用化されたのみでほとんど利用されなかった。しかし最近ユーレカ計画の中でイギリスにおいて大出力の大気中溶接機が開発さ

れ、深溶込みが実証されており、今後が注目される⁵⁴⁾。

以上の真空雰囲気による溶接への影響についての研究もなされている。溶込み深さは 10 Pa 以下程度までは重大な影響を受けないが、これ以上になると減少する^{54,55)}。溶接部の品質への影響はほとんど報告されておらず、鋼やアルミニウム合金での雰囲気汚染の影響は少ないと思われる。しかし活性金属では TIG 溶接での不純物ガス汚染よりも敏感である⁵⁶⁾。

3.3 大形溶接機

電子ビーム溶接機の出力増大は、深溶込み高能率という本法の溶接の特徴を発揮するため、当初からの最も熱心な開発ターゲットである。現在使用されている最大容量は 150 kW で、鋼で 200 mm、アルミニウム合金で 400 mm 以上の厚さを有する材料の溶接が可能な電子銃が開発されている⁵⁷⁾。大容量溶接機のターゲットは当然大型構造物を低変形で高品質に溶接することである。問題は大型構造物を装填できる真空溶接室である。これに対し 2 種類の解決法が開発されてきた。1 つは大型構造物をそのまま包括できる巨大真空室の採用である。現在 110 及び 280 m³ の真空室が稼働している^{57,58)}。またこのとき電子銃は固定したものが一般的であるが、真空中で 3 次元溶接が可能な可動方式のものも開発されている^{59,60)}。

他の方法は局部真空方式と呼ばれるもので、溶接部近傍のみを真空にする方式である。この場合溶接箇所全体を真空にする固定真空方式⁶⁰⁻⁶³⁾と電子ビーム照射箇所近傍のみを真空にする移動真空方

式⁶⁴⁻⁶⁷⁾が提案されている。いずれの場合も原則として電子ビームが移動して溶接する。後者の方がバラエティーに富み、さまざまアイデアや特許が出されているが、現在のところ実用化報告は図 7 に示した核融合炉の製造を行った固定真空方式のみである⁶¹⁾。課題としては、真空シール(移動時の面接触とスパッタ汚染に対する確実なシール方法)と電子ビームの確実な溶接効率が挙げられる。

大形電子ビーム溶接機は、ある程度普及したと言えるが、巨大な資本投資が要求されるため、その稼働時間を十分確保できるかが設置の条件となり、原子力プラント構造物など高コストの製品の溶接等、用途が限定されている。

なおジョブジョブなどでは、多目的ニーズに対応するため、比較的大型(数 m³)の真空室を設置している例も多い。

以上は生産機の開発についてであるが、電子ビーム溶接機の極限を追求した興味ある研究が大阪大学で続けられている。最初 100 kW 級の研究からスタート⁶¹⁾して現在は 500 kV に挑戦している⁶⁸⁾。

3.4 フィラメントの開発

電子ビーム溶接機でもっとも寿命の短いのがフィラメントである。とくに大量生産機や長時間溶接で生産中にフィラメントが切断すると生産に重大な支障を来す。このためできるだけ長時間のフィラメントの開発が積極的に行われてきた。電子ビーム溶接機では比較的ビーム電流が大きいため電子放出面積の大きいフィラメントが使用される。現在ロッド型(傍熱型)とリボン型(直接通電)が利用されている。初期のフィラメント材料にはタンタル箔の深絞り成形したものが採用されたが寿命が短く、一般に生産ラインでの 1 シフト(8 時間)を保証するように設計され、シフトごとに交換されていた。近年はタングステンが採用され、リボン型でも数十時間、ロッド型で 100 時間以上が保証されている^{69,70)}。一方フィラメントが疲れて抵抗が増加すると使用温度が上昇し寿命を縮めていたが、フィラメント電流を

図 7 固定局部真空型溶接機による核融合真空チャンバーの製造⁶¹⁾

図 8 長寿命ロッド型フィラメント⁷¹⁾

フィードバックする方式も開発された⁷¹⁾。図8は傍熱型のロッドフィラメントで周囲のタングステン電極からの電子衝撃により加熱される⁷⁰⁾。またフィラメントもカートリッジ方式となり、極めて短時間で取り替え可能となっている。なおフィラメント材料として上記のほか、電子放出輝度の高いLaB₆の使用も検討されているが、大々的に使用されたという報告はない。

3.5 アーキング防止対策

電子ビーム溶接でやっかいなのが電子銃内でのアーク放電(過電流)による電子ビーム溶接の停止である。電子ビーム溶接では冷却速度が大きいので、突然の停止は溶接欠陥の発生を招来する。アーキング防止対策は2種類の方針がある。アーキングそのものの発生を防止する対策とアーキングが発生してもそれによる溶接欠陥が発生しないように短時間で溶接を再開する方式である。前者ではアーキングの最大の原因である溶接部からの金属蒸気が電子銃に

流入しないようにする方法が採られている^{72,73)}。図9は磁界により電子ビームの経路を迂回させて直進する蒸気をトラップする方法である⁷³⁾。短時間再開法ではアーキングでのサージを吸収または軽減するような電流回路定数を選択し、アーキングが連続して発生しないようにする。図10はアーキング発生時に電子ビームを停止し、消弧を早めて短時間で溶接を再開する方式である⁷⁴⁾。

3.6 制御システム

電子ビーム溶接機の制御システムも格段に進歩してきている。現在の溶接機はほとんどがCNC方式で制御されており、真空室やジグ形状にも依存するが、ある程度FMSに対応した生産機になっている。基本的な制御パラメータとしては加速電圧、ビーム電流、溶接速度、レンズ電流、ビーム偏向電流及びワーク装填システムと排気系である^{41,47,75)}。

3.7 センシングシステム

電子ビーム溶接は微細スポット径であると同時に溶融幅が狭く、ビームアライメントは非常に重要である。このため溶接位置のセンシングシステムがいろいろ提案されている。基本的には溶接前に光学的に溶接線を検出する方式、図11に示された電子ビーム溶接照射箇所から放出される微弱な2次電子や反射電子(ただし両者の区別はつかないと思われる)を検出する方法^{41,76,77)}、あるいはX線を検出する方法^{46,78,79)}が提案されている。また溶接現象を感知して、溶接条件をフィードバック制御する欠陥防止法も提案されているが^{80,81)}、実現には至っていない。溶接食い機構としては機械的なものも提案されている。

図9 2重磁気偏向型(マグネートラップ式)アーキング防止法⁷³⁾

図10 アーキング時無停止型電流回路⁷⁴⁾

図11 電子ビーム照射位置の検出法⁷⁹⁾

電子ビーム溶接が微細な位置合わせを必要とする割合には、微細機構や溶接現象のフィードバックシステムの開発は遅れている。

4. 溶接部の品質

電子ビーム溶接は、後述する適用例からも明かなように、その深溶込み特性、低変形特性など優れた特徴を有する反面、設備費及びランニングコストがかかる。このためその溶接部及び継手の品質に関する研究は、開発当初から付加価値を高めるため板厚の点では厚板及び超厚板に、材質の点では高張力材料や特殊材料についての適用を試みた結果が圧倒的に多く公表されている。

一方、適用が進んでいる分野は圧倒的に自動車・機械部品、家電部品など大量生産型の部品であるが、これらは通常のアーク溶接などで実績のある材料のためか、あるいはせん断強度など特殊な強度を要求されるためか、ほとんど品質データは公表されずに実用化されてきている。そこで電子ビーム溶接部の品質については電子ビーム溶接の溶融幅が狭いこと、すなわちアーク溶接に比べて急冷である点から派生する品質特性が研究について紹介する。

基本となる電子ビーム溶接中の熱履歴については、いくつかの研究が行われているが^{82,83)}、ほとんどが熱伝導方程式に電子ビーム溶接時の境界条件を設定して求めた解析解であり、今日の大型コンピュータを利用した差分法や有限要素法による非線形計算解は見あたらない。また電子ビーム溶接での残留応力の計算も試みられている⁸⁴⁾。

4.1 鋼の電子ビーム溶接

鋼の電子ビーム溶接継手の性能は、板厚では薄板から超厚板、強度レベルではHT130級までの高張力鋼、さらにはステンレス鋼、耐熱鋼や特殊鋼など

図12 電子ビーム溶接用の炭素量と硬さ⁸⁵⁾

多彩な研究・調査が行われている。

比較的ポピュラーな材料への適用としては急冷による溶接部の硬度上昇や低温割れの可能性の検討及び予熱対策⁸⁵⁻⁸⁷⁾、あるいは成分がブローホール形成に及ぼす影響などが調べられている⁸⁸⁻⁹¹⁾。その一例を見ると電子ビーム溶接に対する炭素当量式が提案され、溶接部のピッカース硬さ $H_v > 600$ になると割れを発生する可能性が指摘されている⁶⁵⁾。図12は提案された炭素当量と硬さの関係である。また割れ感受性と最高硬さの関係やアーク溶接での割れ感受性指数 P_{CM} 値に相当する指標値⁹⁷⁾が電子ビーム溶接でも試算されている。一方鋼でのブローホールの発生原因としては金属蒸気⁴⁸⁾、COガス^{59,60)}、 N_2 ⁹¹⁾などが指摘されており、(C×O)の臨界含有値が測定されている⁹⁷⁾。現在COガスの可能性が有力であるが、鋼の精練技術が進歩しCOガスの要因が減少している現在、あまり気孔は問題にされなくなっている。

高温割れ感受性に関する研究は比較的少ないが、電子ビーム溶接に適用できる試験方法が提案されている⁹²⁾。またオーステナイト系ステンレス鋼では割れ発生防止のためにはSUS304, 316鋼において(P+S)含有量が0.04%以下であると指摘されている^{93,94)}。また高温割れの改善についても検討されている⁹⁵⁾。

また溶融形状が不均一のため高温割れが発生することもある。厚板において溶融金属流動と凝固が厚

さ方向に一定でなく、非常に複雑な挙動を示すことが多くの研究で指摘されており^{18,96-99}、中心部やルート部近傍で溶融幅が他の部分より広くなるとともに、周囲に比べて時間的に凝固が遅くなる「遅れ凝固部」が発生し、そこではひけす状の割れなどの高温割れや気孔の発生が顕著になることが指摘されている。この現象は電子ビーム焦点位置と密接に関係がある。

低温割れのうち上記の硬化割れ以外に、水素割れ（遅れ破壊）の TRC 試験を溶接室中で実施し、その心配のないことを明らかにしている¹⁰⁰。

溶接継手強度の調査は非常に多くの材料で実施され、データを個別に示すことは困難であるが、特に厚板・超厚板材料は強度部材に運用されるため、動的強度（シャルピー衝撃値、疲労強度など）を調べた結果が豊富に示されている。継手の機械的性質は後述の実用化された構造物においても綿密に調べられている。その他特に注目されるのは衝撃試験結果である¹⁰¹⁻¹⁰⁴。HT50～80 級高張力鋼の電子ビーム溶接継手の溶接金属部のシャルピー衝撃試験はとくに遷移温度近傍でデータが非常にばらつき、遷移温度を求めることも困難になる。その原因として溶接部の幅が狭く、図 13 に示すように、亀裂伝播経路が溶接金属部のみではなく母材側に外れることが指摘されている¹⁰⁵。したがって溶接金属部のみの衝撃値を求めることがしばしば困難になる。この現象の解析も行われており¹⁰⁶、また他の試験方法も提案されている^{107,108}が解決には至っていない。また疲労試験もさまざまな材料で実施され¹⁰⁹⁻¹¹¹、解析も行われている^{112,113}。TIG アーク溶接継手との比較も行われており、良い結果を得ているケースが多い。

その他さまざまな材料での溶接研究、特に実用化例では綿密に溶接結果とともに、機械的性質が調べられており、それらの文献を参照されたい。

4.2 特殊鋼の電子ビーム溶接

特殊鋼の溶接では上記の高張力鋼の溶接継手の研究以外に、高張力鋼のじん性の調査・改善^{114,115}、

図 13 高張力鋼電子ビーム溶接金属でのシャルピー試験にみられる亀裂伝搬経路¹⁰²⁾

タービン用耐熱鋼の特性^{116,117}、原子力用耐熱鋼の特性¹¹⁸、Ni-Co 超合金の特性^{119,120}、マレージング鋼¹²¹⁻¹²⁴、高マンガン鋼¹²⁵などの特殊鋼についても性能が調べられており、電子ビーム溶接がコストはかかるが、高品質を要求される構造物に優れた溶接手段となることを示している。

4.3 アルミニウム合金の電子ビーム溶接

アルミニウム合金の電子ビーム溶接継手についてもさまざまな調査研究が行われている。その大部分は 5000 系、2000 系及び 7000 系についてである。アルミニウム合金での引張り強度は母材のそれより低く、溶接金属部での破断が一般である。

5000 系では LNG タンクなどの A5083 合金に関するものも多いが、溶接継手の特性は比較的問題が少ない^{134,135}。

2000 系及び 7000 系では、航空機を対象として、溶接割れや溶接のまま（自然時効）及び人工時効処理の継手性能に及ぼす影響について多くの研究がなされている^{37,136,137}。一般に自然時効ではアーク溶接時よりかなり回復するが、完全には戻らず、局部的に過時効された部分も発生する。また自動車部品を前提とした鋳物合金の溶接も試みられている¹²⁶⁻¹²⁹。

4.4 チタン合金等の非鉄材料の溶接

アルミニウム合金以外の非鉄金属ではチタン及びチタン合金、モリブデンなど比較的良く使用されるいくつかの材料での溶接結果の報告がある。チタン合金は航空機や潜水艇圧力殻を対象とした研究が多く、十分利用可能な溶接結果が得られている^{121,132}。とくに深海潜水艇圧力殻に使用された 6Al-4V チタン合金の超厚肉溶接部は優れた品質であることが示されている¹³³。またモリブデンの溶接は当然粒界ぜい化が激しくまた焼結材では気孔が発生しやすい^{133,134}。対策として Re 添加や侵炭処理が著しい効果があることが報告されている^{135,136}。

4.5 異種材料の電子ビーム溶接

溶融幅が狭いこと、あるいは急冷効果があることから溶融溶接が困難とされる異種材料の溶接実験がかなり報告されている。Fe 系-Cu では直接接合で良好な結果が得られている。一方、脆弱な中間化合物を形成する Fe-Al、Fe-Ti などの溶接も試みられている。これらの場合には、化合物の形成を緩和するためのインサート材料の使用が考えられるが、非常に困難で、満足される継手性能はほとんど得られていない。また鋳造品や焼結材の溶接研究も行われたが、一般には溶加材による特性の改善が必要である。

5. 電子ビーム溶接施工

電子ビーム溶接は溶融幅が狭く、深い溶込みを特徴としている。このため独特の欠陥も発生しやすいし、精密溶接なりの厳しい条件設定や開先加工が要求される。そこでここでは欠陥防止対策を含む施工上の研究開発について紹介したい。

5.1 適正溶接条件

電子ビーム溶接は原則として片面溶接である。溶融金属量が少ないため、良好な裏波ビード得るための研究が盛んに行われたが一般に表裏とも良好な結果を得る条件は狭くなる¹³⁷⁾。しかし板厚が大きくなると溶接姿勢は横向きあるいは立て向きとなることが多く、このときのビード形成現象や溶接条件の検討結果も報告されている^{138,139)}。一般には超厚板での電子ビーム溶接の裏波は機械的削除などにより整形されているものと思われる。通常薄板を除き貫通溶接時の適正条件範囲はあまり広くなく、しかも板厚が大きくなるほど溶接条件の適正範囲は狭くなる⁹²⁾。溶接条件としては焦点位置の設定(a_0 値)と溶込みの関係は複雑に変化するが、一般にはABテストでの焦点位置がワーク内部にあると最大溶込みを示す³⁰⁻³¹⁾。また高速になるとアンダーカットやハンピングを形成するが、その原因の究明やタンデムビームによる溶融金属の流動制御による防止策も検討されている¹⁴⁰⁻¹⁴²⁾。

5.2 開先精度

電子ビーム溶接施工においては、開先精度は非常に厳しく、ある意味ではこれが電子ビーム溶接の普及を妨げる要因の1つとなっている。開先は原則としてI型開先で、許容開先精度についての系統的な研究は少なく、中厚板では板厚の10%程度と言われている¹⁴³⁻¹⁴⁵⁾が、70 mmの厚さでも許容間隙は1 mm以下との報告がある¹⁴⁶⁾。しかしビームオシレーション機構を採り入れ、溶融幅(溶融金属量)を広くすると大きく異なってくるため、現実には開先許容間隙については求められておらず、ケース・バイ・ケースで工夫されている。

開先精度が非常に厳しいため、その緩和策も検討されている。上記のオシレーション法がその対策となるが、フィラー材の併用も検討されている。フィラー材の供給方法としてはインサート材の使用¹⁴⁴⁾および、ワイヤ添加の2種類が検討されている。しかしこれが実用化されているかどうかの公表はない。なお厚板でのオシレーションの採用は、ビーム

軸を表面から裏面までの開先に合致させて軸合わせを行うのが厳しいため採用するケースも多い。

5.3 溶接変形

溶接変形及び残留応力はほとんどすべての溶接に共通する課題である。電子ビーム溶接の場合とくに溶接変形の少ない精密溶接法として位置づけられ使用されてきたが、系統的に溶接変形を測定した例はほとんどない。無拘束の板継手について、横収縮と角変形が測定されているが、図14のように少入熱アーク溶接の1/2以下となっている¹⁴⁵⁾。一般に電子ビーム溶接が適用されている多くの部品は、自動車・機械のギヤ類の溶接組立である。これについてはスプラインを模擬したモデル実験での測定¹⁴⁷⁾、や軸用大形歯車での変形量測定結果¹⁴⁸⁾があるが、円周上での変形量(心円度)にかなりのばらつきがある。全体としては非常に小さい値になっている。しかし変形量は開先の精度、はめ合せの程度、仮付け溶接、終始端部でのオーバーラップの程度などさまざまな因子に大きく依存し、とくに開先準備に大きく左右されるものと思われる。

近年自動車産業では、機械加工-機械加工部材の組み合わせ溶接から、プレス成形-機械加工あるいはプレス成形-プレス成形の組み合わせが増大している。この場合一般に開先間隙を狭くすることが困難なため溶融幅は広くなり、変形が大きくなる。これに対し変形を考慮に入れてセッティングすることが試みられている。また大型構造物の溶接では、後述の適用例でも見られるように、ジグや固定方法の工夫により非常に高精度に組み立てられている。

5.4 ビームの偏向

電子ビームは電子の流れであるため、電磁界によ

図14 無拘束溶接での横収縮変形量の溶接法による比較¹⁴⁶⁾

り簡単に偏向する。この特徴はビームの照射位置の容易な制御に繋がるが、逆に磁気を帯びた材料を溶接するときは、簡単に位置ずれし健全な溶接が行われない¹⁴⁸⁾。当然電磁チャックの使用は厳禁であり、ワークやジグの残留磁界も大きな問題となる。その臨界磁界の大きさは定説はないが、2 Gauss程度と言われ、脱磁処理を施すことが重要である。脱磁処理はあまり公表されていないが、交流磁界を採用する方法が一般的と思われる。

5.5 DM (異種材料) 偏向

異種材料 (異鋼種の組合わせも含む) の電子ビーム溶接を行うと、電子ビームが継手線からずれて未溶接部が発生することがある。これをDM偏向と言う。DM偏向は図15に示すように異種材料間の熱起電力の差により、電子ビーム照射の高温部と後方の接合低温部間に大電流が誘導され、その磁界でビームが偏向すると言われている¹⁵⁰⁾。DM偏向防止には発生磁界の計測とそれへの反磁界付加あるいはNiなど強磁性体で電子ビーム進行路をDM磁界から遮蔽する方法が提案されている^{150,151)}。また一般論としては電子ビームの加速電圧が高いほど偏向は小さくなる。

5.6 遅れ凝固

遅れ凝固はすでに溶接現象の項で述べたように、厚板や超厚板で発生する現象で、熔融金属の流動が厚さ方向で不均一になるため発生する現象である。

このため予め十分な対策が必要であるが、一般的には電子ビームオシレーションが採用されている¹⁵²⁾。さらに電子ビームの形状を整形して熔融金属流動をスムーズにする方法も提案されている¹⁵³⁾。

5.7 スパイク及びリフトポロシティ

部分溶込み電子ビーム溶接においては、とくに先端部での欠陥が顕著に現れる。スパイクは先端が不

連続で非常に尖鋭な溶込みであり、気孔やコールドシャットを伴う。本質的に電子ビームの高密度パワー特性のために発生するものであり¹⁵⁴⁾、焦点位置を調節してパワー密度を低下させる方法 (同時に溶融幅も増大する) や、ビームオシレーションを使用し実効パワー密度を低下させる方法が取られる。あまり公表されていないが、開先を部分溶込みから貫通溶接にするように継手設計を行っている模様である。なお貫通ビームにより内部がダメージを受ける場合はダンパーを設ける設計が必要である。なおこのスパイクの防止のための制御方法も提案されているが実現はしていない^{90,91)}。

5.8 フィラー材の利用

上記の開先間隙の許容範囲を拡大する目的以外に溶接金属部の冶金学的あるいは機械的性質を改善する目的でフィラー材の利用が検討されてきた。すでに熔融金属挙動の基礎研究の項で述べたように、電子ビーム溶接で単純にフィラー材を適用しても溶接現象にミキシング機構がなく、偏析する。このためにはある程度開先間隙を設置し、溶接金属部をほとんどフィラー材で充填するほどの添加が必要となる^{155,156)}。このためフィラー材の添加は現実化しておらず、電子ビーム溶接ではノンフィラー溶接が一般的である。

6. 電子ビーム溶接の適用例

6.1 小形部品

電子ビーム溶接の適用は自動車、機械あるいは理化学計測部品など、小形部品の溶接組立が多い。しかしこれらに関する論文は極めて少ない。一般には、出処不明の形で装置メーカーのカatalogに掲載されているものが圧倒的である。

電子ビーム溶接が開発当初、航空機部品や自動車部品に利用され始めたときは、一般に一体機械加工で製造されていた部品、あるいは分割機械加工されたものを圧入により組み立てていたギヤ類、たとえばギヤアセンブリーなどを、分割機械加工-電子ビーム溶接組立に変更した例が圧倒的に多い^{157,158)}。図16は航空機タービンロータのダブルヘリカルギヤである。これは機械加工の製造コスト (時間を含む) の低減、材料歩留まりの向上、あるいは製造工程の一部フレキシビリティ化がメリットとして電子ビーム溶接が採用された。またその後一体製造品が鍛造-機械加工に分割製造されて、電子ビーム溶接組立に置換された例も多い¹⁵⁹⁾。図17はタービンロー

図15 異材溶接時に発生するDM偏向¹⁵⁰⁾

図 16 航空機タービンロータのダブルヘリカルギヤの電子ビーム溶接による組立¹⁵⁷⁾

図 17 自動車タービンロータの電子ビーム溶接による組立¹⁵⁹⁾

タの組立を示す。このケースでは複雑な鋳造品に欠陥が発生する傾向にあったものを鋳造を簡単な形状にして欠陥を防止するなどのメリットがあるものと思われる。

第 1 次石油ショック後、自動車の軽量化とコストダウンが絶対的となって以来、素材品質の向上と塑性加工技術の向上にバックアップされながら、上記のエンジン・駆動系回りの部品の一部をプレス成形で製造し、電子ビーム溶接で組み立てるケースが急増している¹⁶⁰⁾。とくに AT 車では著しく増大し、電子ビーム溶接の利用も飛躍的に増大した。このメリットは明らかに製造コストの低減と余分な肉厚の現象に伴う軽量化である。

6.2 大形構造物

電子ビーム溶接はそのパワーさえ十分であれば焦点深度が非常に大きいため、どこまででも溶接可能厚さを拡大できる可能性を秘めている。現実の溶接機では 150 kW クラスが実用レベルの先端にあり、その溶接可能厚さは、鋼で 150~200 mm、アルミニウム合金でその 2 倍程度が可能と推定される。これにより超厚板の 1 パス低変形溶接が可能であり、開発当初から高品質の超厚板構造物への適用が試みられてきた。しかし巨大構造物を組み立てるためには巨大真空室が必要であり、かつ稼働率も低いため、

図 18 超厚肉圧力容器の赤道部の電子ビーム溶接による組立 (上図: 模式図, 下図: 製品)¹⁶⁴⁾

現状では原子力関連、発電関連あるいは特殊な圧力容器などかなり利用が限られている。公表された実例では、原子力プラント (PWR) の internal core structure⁵³⁾、核融合炉関係ではヘリオトロン E の炉心構造物¹⁶¹⁾の組立や JT60 の強力マグネットの支柱¹⁶³⁾、発電プラント関係では水車のケーシング⁷²⁾、あるいはロケットの Y リングなどの部品¹⁶³⁾、潜水調査船しんかい 6500 の圧力殻⁷²⁾、特殊超厚肉圧力容器¹⁶⁴⁾の溶接組立など 50 mm 以上最大 150 mm までの厚さの構造物への適用など非常に多彩である。図 18 はこれら大型構造物の溶接の一例として赤道部を溶接された圧力容器 (肉厚 96 mm, SLA 鋼) を示す。いずれも高品質の溶接部が要求されている。また経済情勢の影響で実現はしなかったが LNG 船のアルミニウム合金製のタンクも実用化レベルにまで達している¹³⁴⁾。そのほか中厚板に属するアルミニウム製の真空容器の組立などにはしばしば利用されているものと思われる。

7. 電子ビームの材料プロセッシングへの展開

今後の電子ビーム溶接の展開を予測することは大変困難なことである。厚板、超厚板での精密溶接は電子ビーム溶接やナローギャップアーク溶接が主流となり、それぞれが共存する形で着実に電子ビーム溶接が使用されるものと思われるが、電子ビーム溶接の大部分を占める小型部品の製造が、現在予想されているような大出力レーザに取って変わられるかどうかである。

新しい動きは電子ビームによるマイクロ溶接・加工への展開である¹⁶⁴⁾。この分野は恐らく YAG レーザ溶接や他のマイクロ溶接と競合する分野であり、パーツの開先精度のばらつきのカバーやスルーブッ

トが問題となるものと思われる。

一方レーザによる表面改質に刺激され、焼入れ、合金化やクラディングの研究も盛んに行われてきている。合金化では自動車の軽量化を目的としたアルミニウム化の進行に伴い、エンジン回りのアルミ化が進んでいる。しかしピストン溝などの耐磨耗性を要求されるところでは、硬化が必要であり、現在ニレジストなどが埋込まれて使用されているものと思われる。ここに電子ビームの精密深溶込みを利用した合金化の開発が試みられている¹⁶⁵⁾。またクラディングにはレーザのように粉末供給が困難なため、フィラー材の供給を予めソリッドの材料の張り付けが必要である。

電子ビームを加熱源として利用し、材料創製に利用しようとする研究も行われている。このときは電子ビームの局部加熱と自己熱拡散を利用した急冷効果により材料の性能を向上させようとするもので、Al-Mn 系で非熱平衡組成の合金（過飽和合金）の製造¹⁶⁶⁾や金属間化合物型の超電導テープの製造¹⁶⁷⁾が提案され、実験室では成功を収めている。図 19 は電子ビームで製造した Nb-Al (Al, Ge) 超電導テープと加熱炉で製造したそれとの特性を比較したものである。

おわりに

電子ビーム溶接のはじめから現在までの主な歴史を総括してきた。最初に述べたように電子ビーム溶接は小型部品の製造と超大型精密構造物の組立の両極端に分れて多用されている。と同時にこれらに代わりさらに大きく展開する適用物があるかどうかの曲がり角に差し掛かっている。日本の製造産業では、一般に従来の技術に置き換わって、新しい技術が導入される際、その優れた特徴が安定して発揮されるのは当然として受けとめられ、同時にコストダウンが義務づけられる傾向にあり、高性能を発揮すればコストアップは当然と言う雰囲気にはないように思われる。それだけに電子ビーム溶接をとりまく環境は厳しいが、7 項で紹介したような電子ビーム溶接本来の特徴を活用した新しい分野が開拓できるかどうか、これらの展開を左右するものと思われる。ただこれまで利用されてきた分野では、悪戦苦闘しながらも、すでに大きな信頼性を確立してきており、簡単に今日の利用が減少することはないと思われる。

図 19 電子ビーム加熱による超電導テープの製造法 (上図) と特性 (下図)¹⁶⁷⁾

参考文献

- 1) J. A. Stohr: Fuel Elements Conference, Paris, Nov., 18-25 (1957)
- 2) H. Schwartz: J. Appl. Phys., 35 (1964) 2020
- 3) 宮崎: 精機学会誌, 40-11 (1974) 98
- 4) 入江, 橋本, 稲垣: 溶接学会誌, 48 (1979) 1005
- 5) 同上: 同上, 46 (1977) 43
- 6) 鈴木, 橋本, 松田: 同上, 32 (1973) 996
- 7) H. Tong and W. H. Giedt: Weld. J., 49 (1970) 259s
- 8) 藤沢, 安部, 山本: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-106-74 (1974)
- 9) 荒田, 安部, 藤沢: 同上, EBW-164-76 (1976)
- 10) 荒田, 阿部, 安部: 同上, EBW-280-82 (1982), EBW-326-84 (1984)
- 11) 荒田, 富江, 阿部, 安部: 同上, EBW-389-86 (1986)
- 12) M. C. Weber, E. R. Funk and R. C. McMaster: Weld. J., 51 (1972) 90s
- 13) 谷口, 宮崎, 下村, 又吉, 伊藤: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-45-72 (1972)
- 14) 荒田, 松田, 村上: 同上, EBW-83-73 (1973)
- 15) 塚本, 入江: 同上, EBW-452-89 (1989)
- 16) 浜崎: 同上, EBW-128-78 (1978)
- 17) 荒田, 富江, 阿部, 姚: 高温学会誌, 14 (1988) 5
- 18) 荒田, 松田, 田村: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-93-73 (1973)
- 19) 入江, 橋本, 稲垣: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-163-76 (1976)
- 20) 同上: 溶接学会誌, 50 (1981) 101
- 21) Y. Arata and M. Tomie: Proc. 2nd Int. Symp., JWS, No. 1-1-9 (1975) 45
- 22) Y. Arata and I. Miyamoto: Trans. JWRI, 1-1 (1972) 11
- 23) 橋本, 松田: 溶接学会誌, 33 (1964) 38
- 24) M. H. Hablanian: Proc. EB Symp. 5th Annual Meet., (1963) 262
- 25) D. E. Passoja: Brit. Weld. J., 14 (1967) 13
- 26) B. T. Lubin: Weld. J., 47 (1968) 140s
- 27) 大隈: 大阪大学学位請求論文 (1976)
- 28) A. J. Adams: Brit. Weld. J., 15 (1968) 134
- 29) 寺井, 永井: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-3, 4-70 (1970), EBW-32-71 (1971)
- 30) P. Cumonte, et G. Sayegh: IIW Doc. No. IV-131-73 (1973)
- 31) Y. Arata and M. Tomie: IIW Doc. No. IV-309-81 (1981)
- 32) Y. Arata, M. Tomie and N. Abe: Trans. JWRI 19 (1990) 11
- 33) 入江, 橋本, 稲垣: 溶接学会誌, 46 (1977) 642
- 34) U. Diltthey, M. Admadian, und J. Weiser: Schweißen u. Schneiden, 44 (1992) 191
- 35) A. Sandstrom, J. F. Buchen and G. S. Hanks: Weld. J., 49 (1970) 293s
- 36) P. Drews, D. Schumacher, and B. Spils: IIW Doc. No. IV-131-74 (1974)
- 37) 長谷, 高屋: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-23-71 (1971)
- 38) 荒田, 富江, 寺井, 永井, 服部: 同上, EBW-69-72 (1972), EBW-76-73 (1973)
- 39) U. Diltthey und J. Weiser: IIW Doc. No. IV-629-95 (1995)
- 40) Y. Arata and IIW Com. IV: IIW Doc. No. IV-340-83 (1983)
- 41) 電元社製作所: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-21-71 (1971)
- 42) たとえば, 電子・イオンビームハンドブック, 第2版, 日本学術振興会第132委員会編, 日刊工業新聞社(1986)
- 43) 中村, 小保方, 福井, 三平: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-122-75
- 44) 荒田, 富江, 伊藤: 同上, EBW-16-71 (1971)
- 45) 櫻井, 村上, 山根, 山本: 同上, EBW-46-91 (1991)
- 46) M. M. Sciaky: Soudage 21 (1967) 109
- 47) 佐々木, 安永, 村上, 原, 服部: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-289-82 (1982)
- 48) シアキー社カタログより
- 49) 佐々木, 石見, 山本, 大田, 桂田: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-90-92 (1992)
- 50) 荒田, 富江: 高温学会誌, 10 (1984) 110
- 51) 山本, 奥田, 大峯: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-138-75 (1975)
- 52) 伊藤, 池田, 山内: 同上, EBW-145-76 (1976), EBW-171-77 (1977)
- 53) L. H. Leonard, J. R. Morley and L. Dunn: AFSC INTERIM REPORT 7-926 (1962)
- 54) A. Sandstrom: IIW Doc. No. IV-635-95 (1995)
- 55) 橋本, 松田, 大橋, 入江: 溶接学会誌, 38 (1969) 1090
- 56) H. Irie and S. Sasaki: IIW Doc. No. IV-585-92 (1992)
- 57) T. Shida, H. Kita, H. Okamura and Y. Kawada: IIW Doc. No. IV-239-78 (1978)
- 58) H. Kita, S. Satoh, S. Matui, S. Yasunaga and H. Irie: Proc. Int. Conf. Electron Beam and Laser Welding of IIW, (1986) 149
- 59) 原, 桂田, 山地, 村上: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-390-86 (1986)
- 60) N. N.: Weld. Metal Fab., 37 (1969) 228
- 61) 佐藤, 下山, 高野, 南, 榎並, 浦谷: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-299-82 (1982)
- 62) 喜多, 中崎, 上原, 岡村: 溶接学会誌, 53 (1984) 74
- 63) F. Kanatani, S. Matsui, H. Nagai, S. Nakayama, K. Yasuda and Mori, E.: IIW Doc. No. IV-325-82 (1982)
- 64) 稲垣, 足立, 富士, 田中, 小菅: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-228-80 (1980)
- 65) 田中, 小菅, 足立, 富士, 河野: 同上, EBW-244-80 (1980)
- 66) 稲垣, 足立, 富士, 河野, 田中: 同上, EBW-260-81 (1981)
- 67) 村上, 藪中, 安永, 吉田: 同上, EBW-379-86 (1986)
- 68) たとえば, 富江, 阿部, 荒田: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-28-90 (1990)
- 69) 高野, 安永, 佐々木, 藪中, 原: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-232-80 (1980)
- 70) 上山, 安永, 佐々木, 奥田, 大峯: 同上, EBW-178-

- 77 (1977)
- 71) 若宮, 塚本, 金内: 同上, EBW-317-83 (1983)
- 72) 喜多, 大國, 妹島: 溶接学会誌, 49-11 (1980) 11, 喜多, 中崎, 坪, 志田: 同上, EBW-226-79 (1979)
- 73) 後藤, 山本, 山脇, 奥村: 同上, EBW-325-84 (1984)
- 74) 村上, 安永, 山本, 原: 同上, EBW-374-85 (1985)
- 75) 龍島, 塚本: 同上, EBW-152-76 (1976)
- 76) 坂本, 平本, 大峯: 同上, EBW-358-85 (1985)
- 77) D. Fritz: IHW Doc. No. 591-92 (1992)
- 78) 村上, 佐々木, 石見, 安永: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-342-84 (1984)
- 79) 山根, 森安, 平本, 大峯: 同上, EBW-342-84 (1984)
- 80) R. E. Armstrong: Weld. J., 49 (1970) 382s
- 81) 入江, 橋本, 稲垣: 溶接学会誌, 52-3 (1983) 58
- 82) 橋本, 松田, 土佐: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-33-71 (1971)
- 83) D. E. Passoja: Weld. J., 45 (1966) 379s
- 84) 上田, 金, 梅: 溶接学会誌, 55-1 (1986) 138
- 85) 荒田, 松田, 中田, 柴田, 白川: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-65-72 (1972)
- 86) 荒田, 松田, 野口, 坂東: 同上, EBW-134-75 (1975)
- 87) 坂端, 渋谷, 中島, 峰久: 溶接学会誌, 55-1 (1986) 138
- 88) 荒田, 寺井, 喜多, 松田, 中村: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-97-73 (1973)
- 89) 永尾, 小菅, 小林: 同上, EBW-97-73 (1973)
- 90) 渡辺, 志田, 鈴木, 岡村: 溶接学会誌, 43-7 (1974) 32
- 91) 大野, 宇田: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-207-78 (1978)
- 92) 松田, 中田: 同上, EBW-301-83 (1983)
- 93) 浦谷, 久利, 下山, 高野: 溶接学会論文集, 1-2 (1983) 23
- 94) 浦谷, 久利, 下山, 高野, 山内: 同上, 2-3 (1984) 59
- 95) 中尾, 勝: 同上, 3-2 (1986) 115
- 96) 田村, 佐藤: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-120-74 (1974)
- 97) 志田, 岡村, 鈴木, 喜多: 溶接学会誌, 46-12 (1977) 46, 48-7 (1979) 38 他
- 98) 田中, 小菅: 同上, 49-9 (1980) 44
- 99) 塚本, 入江: 溶接学会論文集, 6-4 (1988) 21, 8-2 (1990) 15
- 100) 須清, 松井, 沓名: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-203-78 (1978)
- 101) 荒田, 松田, 柴田, 穂積, 小野, 藤平: 溶接学会誌, 44-12 (1975) 67
- 102) 荒田, 松田, 柴田, 小野, 玉置, 藤平: 同上, 45-1 (1976) 69, 48-8 (1979) 40, 48-9 (1979) 27
- 103) 小菅, 国定, 仲田, 田中: 溶接学会論文集, 3-2 (1985) 55
- 104) 氏家, 佐藤, 下山, 高野: 同上, EBW-188-77 (1977)
- 105) 小原, 本間: 同上, EBW-417-87 (1987)
- 106) 佐藤, 豊田, 野原, 武田, 名山: 溶接学会誌, 52-8 (1982) 61
- 107) 荒田, 松田, 柴田, 小野, 玉置, 藤平: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-184-77 (1977)
- 108) 佐藤, 豊田, 南, 船戸: 溶接学会論文集, 3-1 (1985) 97
- 109) 荒川, 長田: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-17-71 (1971)
- 110) 矢田, 西田: 同上, EBW-130-75 (1975)
- 111) 飯田, 浦谷, 久利, 山内, 高野: 溶接学会論文集, 3-1 (1985) 39
- 112) 向井, 西村: 溶接学会誌, 51-11 (1982) 23
- 113) 寺崎, 横島, 堅田: 溶接学会論文集, 3-4 (1985) 177
- 114) 荒田, 松田, 柴田, 小野, 玉置, 藤平: 溶接学会誌, 48-3 (1976) 36, 48-5 (1976) 36
- 115) 木村, 矢田, 安楽: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-75-73 (1973)
- 116) 寺井, 豊岡, 永井, 黒瀬: 同上, EBW-34-71 (1971)
- 117) 岸本, 印藤, 千葉, 大友: 同上, EBW-195-78 (1978)
- 118) 荒田, 寺井, 永井, 清水, 青田: 同上, EBW-165-76 (1976), EBW-173-77 (1977), EBW-189-77 (1977), EBW-190-77 (1977)
- 119) 遠藤, 広瀬, 豊原, 森鼻, 淵上, 下山, 高野: 溶接学会誌, 50-8 (1981) 108
- 120) 中崎, 坪, 和田, 松本, 唐津: 溶接学会論文集, 8-4 (1989) 85
- 121) 荒田, 富江, 片山: 同上, EBW-376-86 (1986)
- 122) 藤田, 河辺, 入江, 塚本: 同上, EBW-255-81 (1981)
- 123) 船本, 志田, 小倉, 喜多, 中崎, 佐藤: 溶接学会論文集, 2-2 (1984) 42, 2-4 (1984) 111, 7-1 (1989) 88
- 124) 永井, 安田: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-276-82 (1982)
- 125) 杉本, 岡, 正野, 高野, 平本: 同上, EBW-346-84 (1984)
- 126) 橋本, 松田, 大橋: 同上, EBW-13-70 (1970)
- 127) 永井, 安田, 伊牟田: 同上, EBW-278-80 (1980)
- 128) 森田, 大峯, 村上, 佐々木, 安永: 同上, EBW-287-82 (1982)
- 129) 安部, 藤沢: 同上, EBW-375-86 (1986)
- 130) 安藤, 大久保, 荒: 溶接学会論文集, 1-3 (1983) 24
- 131) 寺井, 松田, 久本, 永井: 同上, EBW-58-72 (1972)
- 132) 横田, 村田, 豊原, 森鼻, 高野, 西村, 安井: 三菱重工技報, 23-1 (1986) 1
- 133) 松田, 中田: 同上, EBW-213-80 (1980)
- 134) 平岡, 入江, 岡田: 同上, EBW-305-83 (1983)
- 135) 松田, 中田, 政所: 同上, EBW-304-83 (1983)
- 136) 平岡, 入江, 岡田: 溶接学会論文集, 2-1 (1984) 154
- 137) たとえば, 荒田, 寺井, 永井, 服部: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-99-74 (1974)
- 138) 入江, 橋本, 稲垣, 西田, 矢田: 同上, EBW-96-73 (1973), EBW-163-76 (1976)
- 139) 志田, 岡村, 喜多, 坪: 同上, EBW-196-78 (1978)
- 140) 塚本, 入江, 橋本, 稲垣: 溶接学会誌, 51-3 (1982) 34
- 141) 荒田, 鍋淵, 松田, 牛尾, 岩本: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-177-77 (1977)
- 142) 荒田, 阿部, 安部: 同上, EBW-280-82 (1982), EBW-326-84 (1984), EBW-389-86 (1986) ほか
- 143) H-D. Ingenbrand: ZIS Mitteilungen, 9-12 (1967) 1634
- 144) 寺井, 永井, 黒瀬: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-116-74 (1974)
- 145) 田村, 佐藤: 同上, EBW-185-77 (1977)
- 146) 須清, 沓名, 安田, 益本: 同上, EBW-229-79 (1979)
- 147) 中村, 小保方, 福井: 同上, EBW-66-72 (1972)
- 148) 熱田, 永井, 安田: 同上, EBW-306-83 (1983)
- 149) 田中, 小菅, 古川: 同上, EBW-221-79 (1979)

- 150) 渡辺, 志田, 鈴木, 岡村, 妹島: 溶接学会誌, 44-2 (1975) 33
- 151) H. Kihara, S. Minehisa, N. Sakabata and Y. Shibuya: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-298-82 (1982)
- 152) たとえば, 荒田, 寺井, 喜多, 松田, 中村: 同上, EBW-114-74 (1974)
- 153) 塚本, 入江: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-11-90 (1990)
- 154) 入江, 橋本, 稲垣: 溶接学会誌, 50-11 (1981) 101
- 155) 塚本, 入江, 稲垣, 橋本: 溶接学会論文集, 2-4 (1984) 43
- 156) 荒田, 富江, 中川, 大寺, 黒田, 西原: 同上, EBW-347-84 (1984)
- 157) たとえば, N. F. Bratkovich, R. E. Roth and R. E. Purdy: Weld. J., 44 (1965) 631
- 158) たとえば, H. Schlutz: Weld. Metal Fab., 36 (1968) 246
- 159) たとえば, S. Nobori and Y. Uratani: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-371-85 (1985)
- 160) 門野, 乾, 柴田, 三瓶: 同上, EBW-259-81 (1981)
- 161) 喜多, 和田, 中崎, 坪, 加沢, 本島, 飯吉, 宇尾: 溶接学会誌, 50-3 (1981) 80
- 162) 喜多, 中崎, 上田, 船本, 唐津: 溶接学会論文集, 3-4 (1985) 4
- 163) 大隅: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-5-71 (1971)
- 164) 村上, 丸山, 桂田, 内海: 電子ビーム溶接研究委員会資料, EBW-411-87 (1987)
- 165) たとえば, 山中, 清水, 山田: 高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-149-94 (1994)
- 166) R. J. Schaefer, L. A. Bendersky, D. Scechtman, W. J. Boettigner and F. S. Biancaniello: Metallurgical Trans. A, 17A (1986) 2117
- 167) 熊倉, 戸叶, 塚本, 入江, 太刀川: 日本金属学会誌, 51 (1987) 456

著 者 略 歴

氏名 入江宏定

昭和 17 年 3 月 26 日生, 香川県出身

昭和 40 年 3 月 大阪大学工学部電気工学科卒業

昭和 42 年 3 月 大阪大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士課程修了

昭和 42 年 7 月 科学技術庁金属材料技術研究所溶接研究部

昭和 54 年 2 月 工学博士

昭和 58 年 8 月 同 溶接研究部第 3 研究室長

昭和 63 年 4 月 同 組織制御研究部第 5 研究室長

この間, 電子ビーム溶接及び高密度エネルギービーム材料プロセスの研究に従事

岡田記念財団奨励賞, 金属学会論文賞, 溶接学会論文賞, 科学技術庁長官業績表彰

現在 溶接学会高エネルギービーム加工研究委員会委員長

[在庫のご案内]

Mate'95

*1st Symposium on
"Microjoining
and
Assembly Technology
in Electronics"*

Sponsored by Japan Welding Society
(Committee of Microjoining)

定価 10,000 円

ご注文その他については下記にお問い合わせ下さい。

社団法人 溶接学会

〒101 千代田区神田佐久間町 1-11

☎ 03-3253-0488 ファックス 03-3253-3059