



真空中に電子ビームを飛ばして より精密で高品質な溶接を実現する 電子ビーム加工機

三菱電機株式会社／多田電機株式会社

このコーナーは真空技術が不可欠な分野、真空技術が使われる可能性のあるフィールドに足を運び、研究開発のポイント、そこで活躍する技術、将来の発展性などを分かりやすくお伝えしています。さて101回目は三菱電機株式会社と多田電機株式会社を訪ねました。



電子ビーム加工機「モジュールタイプEBMコンセプトモデル」

鉄やステンレスなどの一般工業材料だけでなく、銅やアルミなどの高反射材、タングステンやモリブデンなどの高融点材の加工にも威力を発揮する電子ビーム加工機。自動車部品製造では、高速で精密な溶接を実現し、数多く使われている。ところが、そんな電子ビーム加工機の特徴や良さが製造業界一般では、あまり広く知られておらず、現状の自動車のEV化も逆風となり、今伸び悩みの状況にある。そこで、三菱電機と多田電機は「とにかくこの加工機の良さを広く知って欲しい」と、半導体製造装置、エネルギー関連、異種材配管溶接などなど新たな用途拡大への挑戦に踏み出した。



三菱電機本社



多田電機本社



左から山本氏、湯瀬氏、吉川氏

三菱電機株式会社 メカトロ事業推進部
産業装置ビジネス統括 専任
湯瀬 一廣

多田電機株式会社 応用機工場
営業部 部長
山本 拓也

技術部ビーム計画課 課長
吉川 利幸

三菱電機株式会社

本社所在地：〒100-8310
東京都千代田区丸の内2-7-3 東京ビル
代表者：漆間 啓
設立：1921年(大正10年)
資本金：1,758億円
売上高：4兆4767億円(2022年度)
従業員数：14万5,600名
事業概要：重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器、その他

多田電機株式会社

本社所在地：〒661-0001
兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1
三菱電機株式会社 伊丹製作所内
代表者：越智 与志夫
設立：1963年(昭和38年)
資本金：3億円
売上高：79.6億円(2021年度)
従業員数：316名
事業概要：各種熱交換器及び同部品の製造並びに販売、オゾン発生装置及び同部品の製造並びに販売、鉄鋼用溶接機、電子ビーム加工機及び同部品の製造並びに販売



◆転機は自動車部品加工への採用

Q 今回は、三菱電機さん、多田電機さんと2社の方々に来ていただいているのですが、まずは、両社のご関係を教えてください。

山本 最初に、多田電機の話をしていただきますが、当社は1963年11月に三菱電機の100%資本の会社として、それまで三菱電機で行っていた熱交換器事業の移管を受けて設立されました。その後、1982年にオゾナイザの製作を開始し、1985年には三菱電機から半導体試験事業を移管されるなどして発展してきました。2001年には、三菱電機の応用機製造部の事業を引き継ぎ、当社内に応用機工場を発足させ、今回テーマとなっている電子ビーム加工機を含む溶接機事業を始めました。

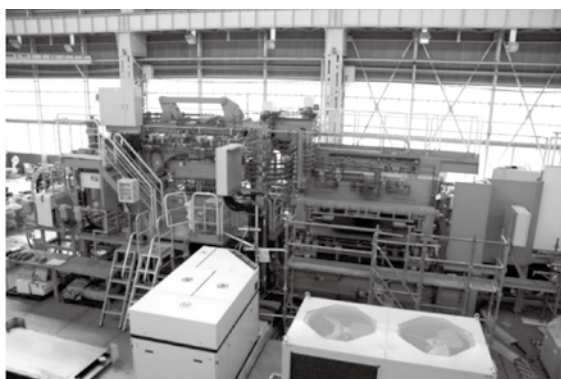
湯瀬 元々は、三菱電機の伊丹製作所の中に“応用機製造部”という部署があり、電子ビーム加工機はそこで作っておりました。2001年にその応用機製造部をそのまますべて、100%出資会社の多田電機に移管したのです。組織、人なども、そのまま移しましたので現在、電子ビーム加工機の開発、設計、製造は多田電機で行い、販売を三菱電機で行うという形になっています。

Q 多田電機さんの現状の売上の比率は？

山本 当社の事業全体でみると、2021年の売上高は79.6億円で、設立当初から行っている熱交換器事業が5割強、2001年に移管された応用機事業が5割弱となっています。応用機事業は電子ビーム加工機と鉄鋼用ラインの溶接機の2つのビジネスユニットで構成されています。

Q ということは、「1974年に最初の電子ビーム応用製品を作った」と聞いていますが、これは三菱電機さんで作られたということですね？

湯瀬 はい。最初の電子ビーム応用製品は1974年に三菱電機で誕生しました。以来、ロケットから電子デバイスまで、産業界の



鉄鋼プロセスライン用溶接機

様々なニーズにマッチする多種多様な電子ビーム加工機を世に送り出してきました。

吉川 最初は確か四国の研究所に納めたものから始まったと記憶しています。用途は恐らくは重工関係、大きなものを溶接するためでその後、同じような重工関係にポツポツと出ていきました。電子ビーム加工機は元々、ドイツで軍需産業用途に開発された溶接機なのですが、それを三菱電機でも製品化し、以降、少しずつという感じではありましたが売れていきました。大きな転機になったのは、1980年代に、自動車の心臓部の部品を製造されている、ある企業から「電子ビーム加工機について相談したい」とお声掛けをいただいたことです。

Q どんな相談だったのですか？

吉川 それまで使っていた、海外メーカー製の電子ビーム加工機は「チョコ停が多く、ラインで使うのがなかなか厳しい」という相談でした。特に電子ビームが出る電子銃の寿命が短く、交換が大変なのでまずはその電子銃の部分を三菱電機製に改造してみないかというお話をいただきました。これをきっかけに、自動車産業に参入し、その後、この業界でたくさんの電子ビーム加工機を採用していただきました。

湯瀬 それ以降、自動車用トランスミッションのギア関連の溶接などを当社の電子ビーム加工機でたくさん対応させていただき、国内の自動車メーカー各社に広がりました。使われる製品分野も、1990年代になると、トランスミッションのキャリア、ターボチャージャーなどにも広がっていきました。ところが、90年代後半、アジア通貨危機が起り、急激な景気の減速により、電子ビーム加工機も売り上げが落ちてしまいました。この時期、三菱電機社内でも進められていた構造改革により、電子ビーム加工機事業を多田電機に移管したのです。

Q 話は変わりますが、ここまで“電子ビーム加工機”と呼んでいますが、実質は“溶接機”ですよね？

吉川 基本的には溶接機です。加工機と呼ぶ理由ですが、ある時期に電子ビームを溶接に限定せずにロウ付け、焼き入れ、合金化など、金属を真空中で局所的に加熱するための熱源としても使っていただこうと考え、そこで、電子ビーム加工機と呼び方を変えたのです。世間一般では電子ビーム加工機と言えば、電子ビーム溶接機を指すことが多く、電子ビーム溶接機(EBW)と呼ばれる客先も多いです。

(*この原稿では「電子ビーム加工機」という呼び方で統一します)

◆電子ビームとレーザービームの違い

Q そもそも電子ビーム加工機とはどんな仕組みなのでしょう？

吉川 まず、簡単に原理を説明しますと(図1)、陰極と呼ばれる部品で電子を取り出して電子ビームを出します。電圧を掛けてその電子ビームを加速し、さらに、集束レンズで集束して、エネルギー密度を高くし、それを加工対象物にぶつけて熱に変換するという仕組みです。この電子ビームとよく比較されるのがレーザービーム(図2)です。レーザービームは光を発生させ集光し、加工対象物に照射し、それにより発生する熱エネルギーを利用するという仕組みです。大きく違うのは、電子ビームは質量をもった電子の粒なので、光であるレーザーとは反射率が違うということです。レーザーの場合、反射率が高く、熱として吸収される割合が低い。逆に電子ビームの場合、反射率が低く、8割以上が加工対象物に吸収されるので、低いエネルギーでも対象物を溶かすことができるのです。

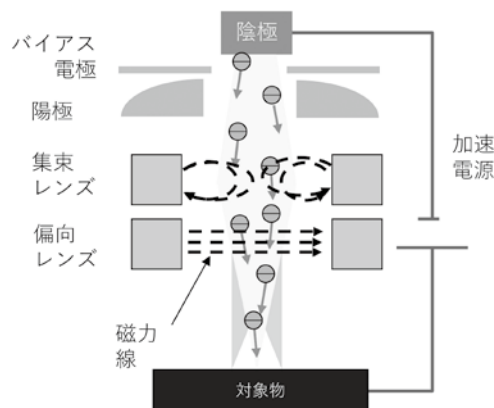


図1 電子ビーム加工機の原理

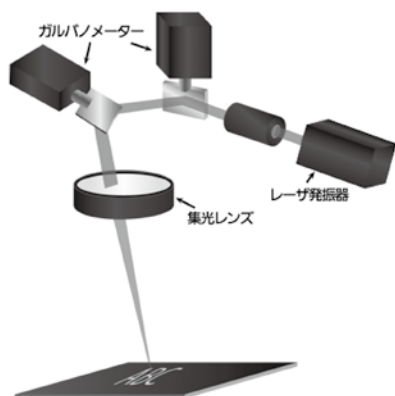


図2 レーザー加工機の原理

Q 他に特徴は？

吉川 大きな特徴は、ひずみが少ない精度の高い溶接ができることです。電子ビームはレーザーに比べ、高速で細く深くモノを溶かすことができることがその理由です。トランスミッションのキャリアやターボチャージャー、エアコン用のアルミピストン(図3)など、精密さを求められる溶接部分で多く使われています。

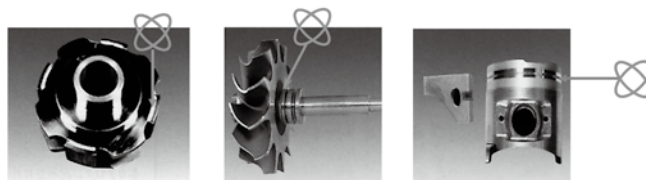


図3 自動車部品への適用例

湯瀬 かなり精密な溶接ができるという話として、はやぶさ2のインパクター(SCI:図4、図5)の溶接に電子ビーム加工機が使われました。インパクターとは、爆薬を入れた円錐状のステンレス製容器に銅製の蓋を溶接したもので、爆発の衝撃で容器から外れた蓋が弾丸となり、秒速2kmの猛スピードで小惑星に衝突することで人工クレーターを作ることを目的としています。この銅の蓋がきれいに、均一に溶接されていないと、爆発した時に狙った真下ではなく、あらぬ方向に飛んで行ってしまう。そのため、均一できれいに深さを保った溶接が求められるのです。こんな精密さを実現できるということで電子ビーム加工機が選ばれました。

吉川 さらに、電子ビームは、真空中でしか使えませんが、真空中で加工するメリットとして、常に同じ雰囲気の中で加工することができるので、非常に安定した溶接品質が得られることが挙げられます。自動車関連などで選んでいただいている大きな要因の一つは、この溶接品質が非常に安定しているということがあります。

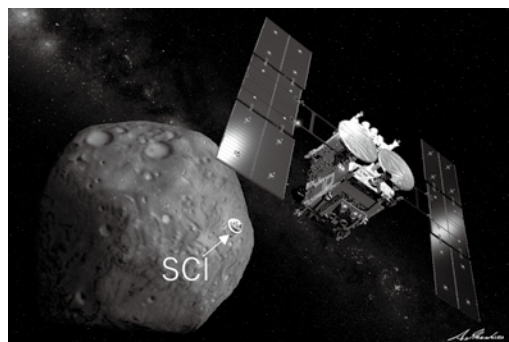


図4 Hayabusa2-小型衝突装置(Small Carry-on Impactor,SCI)
(イラスト 池下章裕氏)



図5 インパクター(SCI)の外観

Q 真空にするのはなぜですか？

吉川 先ほど話したように、電子ビームの正体は電子の粒なので、これを飛ばす空間にガスがあると、ガスの分子にぶつかることでエネルギーが散乱し、ロスしてしまいます。

Q 真空度はどのくらいですか？

吉川 電子ビームが出る陰極を含む電子銃と呼ばれる部分に関しては、 1×10^{-4} Paを切るくらいの真空度が必要です。加工対象物(ワーク)が入る加工室は、いろいろな真空レベルのラインアップを持っています。通常、自動車部品に使用するものについては6~7 Paくらいを確保しています。電子銃と加工室との間には、仕切りのようなものをつけており、ここだけ通路を細く絞ることで、加工室側の圧力が多少上がっても電子銃側は高真空を維持できるような仕組みを作っています。

Q 電子銃はどうしてそんなに高真空が必要なのですか？

吉川 電子を取り出すために陰極をだいたい2,800℃くらいまで加熱しますが、真空度が低いと陰極が燃えてしまいます。しかし加工室は、真空排気時間を抑えるために大気圧に近づけたいということもあり、バランスの良い真空度で加工する様に設計しております。

タクトタイムより溶接品質を重視するようなお客様の 경우ですと、加工室の真空度を上げるといこともしています。

Q 真空度が上がると品質も良くなる？

吉川 高真空になればなるほど排気時間が掛かりますが、ワークの表面に汚れなどがつかないなど高品質を維持できるようになります。具体的には溶接する際に金属蒸気が発生しますが、真空度が低いとワークに付着して大気に出した時に酸化して焼けたような色が付く場合があります。真空度が高ければそういことがなくなります。

◆独自の工夫でタクトタイム短縮、電子銃の長寿命化、低電圧稼働を実現

Q ラインでのタクトタイムを考えると排気時間はネックになってきませんか？

吉川 真空中で加工する場合、どうしても真空排気が必要になります。この排気時間の分だけタクトタイムが伸びることでライン全体のボトルネックになるのかというと、そこまで真空排気時間は長くありません。例えば、自動車部品を電子ビーム加工機で溶接する場合、約5秒で真空排気して、溶接して、払い出すという工程であれば、だいたい1個作るのに30秒タクトでできます。この時間なら自動車部品の製造ラインで十分に実用に耐え得る性能だと思っていて、実際ボトルネックになることはありません。

Q 少し小さい部品になってくると、それよりタクトタイムが短くなってくるといこともあるのではないですか？

吉川 例えばターボチャージャーやアルミピストンなどちょっと小さい部品になってくると、「もう少しタクトタイムを上げてくれ」という話が出てきます。そのために、私どもはカセットタイプの電子ビーム加工機も用意しています。これは、予備排気室を用意し、加工室に入れる前にカセット内で真空排気を済ませておくことで、真空排気時間が見かけ上ゼロになります。装置的な工夫をして、真空排気時間がデメリットにならないようにしています。

Q 他に御社の電子ビーム加工機の強みはどんなところですか？

吉川 陰極の寿命が非常に長いという特徴があります。世界を探しても当社しか作っていない独自の構造である棒状陰極を採用しています。棒状陰極の寿命は、400~800時間くらいになります。一般的な陰極の寿命は100時間前後と言われているので、かなりの長寿命です。生産ラインで使う場合は陰極の交換など、ダウンタイムの低減が強く求められますので、ダウンタイムを減らせるという理由で選ばれることもあります。

山本 また、航空宇宙部品のような大型ワークも5軸制御ができるようになっているので、高品質の溶接が可能です。

吉川 さらに、電圧が40kV、60kVの加工機をラインアップしています。一般的な電子ビーム加工機の電圧が150kVくらいですから、これはかなり低い電圧です。電子ビームは、電圧が高い方が細く深く入りますが、電圧が高ければ高いほど放電現象が発生するデメリットが出ます。我々はこれをアーキングと呼んでいますが、アーキングが発生すると、装置は停止しますし、溶接中に発生するとワークを傷つけてしまいます。この現象は、電圧が低いほど、起こりにくいのですが、電圧を低くしても溶接の品質を

維持できるよう、レンズ系統を工夫して品質を改善しています。電圧値を最適にすることにより現在ニーズが高まっている省エネ(カーボンニュートラル)も実現しています。

◆真空中で加工することの利点・特徴

Q 真空ポンプはどんなものを使っているのですか？

吉川 真空度が低い加工室は、通常は油回転ポンプにメカニカルブースターポンプを組み合わせ使っています。電子銃はターボ分子ポンプをつけて高真空を実現しています。これらの真空ポンプは他社から調達しています(図6)。

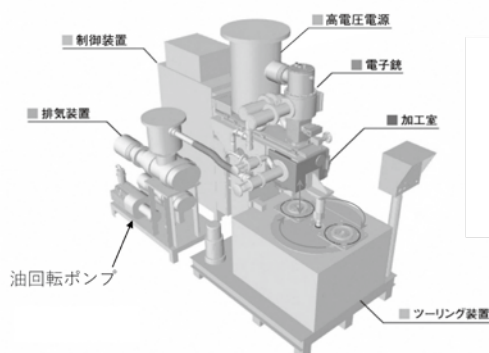


図6 電子ビーム加工機の基本構成

Q となると、真空ポンプメーカーに対するご要望などもあるのでは？

吉川 やはり一番お願いしたいのは、値段が高いので、もう少し安くならないかということですかね(笑)。技術的なことを言いますと、この電子ビーム加工機では、大気圧から真空にしたり、真空から大気圧に戻したりということを短い時間で繰り返します。負荷がかかりやすい使い方ですので、寿命が短くなりがちです。耐久性の高い長寿命のポンプを作っていただけたら嬉しいですね。

Q 耐久性ですか？

吉川 例えば、今の電子ビーム加工機の加工室はだいたい30秒で大気圧と真空を繰り返すわけですが、加工室を大気圧に戻すときは、排気バルブを閉めて真空ポンプは動いたままにしています。本当は、省エネの観点からもポンプは一度止めたいのですが、真空排気のたびに再起動するような使い方をすると軸がもちません。以前実験した際には、1ヶ月くらいで軸が破損してし

まいしました。こういう短時間で吸排気を繰り返すような使い方に耐えられるポンプがあれば嬉しいですね。

Q 真空中での加工というと、品質が良いというだけでなく、何か特別なこともできそうですね。

吉川 真空中で加工するということを利用している例としてダイアフラム(図7)があります。直径が約50mmのシンバルのような形状の部品を2枚重ねた構造で、その周りを溶接しますが合わせた2枚のシンバルの中を真空にしたまま溶接します。そうすることで、真空中から取り出したときに、大気に押されてペコンとへこみます。この特徴を上手く利用すると、大気圧を測定するためのセンサになります。気圧の変化によってこのダイアフラムが膨らんだりへこんだりすることで圧力を数値に変えるセンサとして使われます。



図7 ダイアフラムの溶接(銅合金)

吉川 同様に真空中で加工するということを利用しているものに、水晶振動子(図8)があります。小さなセラミックスの箱に水晶振動子と呼ばれる素子を入れ、上から金属の蓋をして、電子ビームでロウ付けのようにしてこれを封じ込めます。箱の中は真空になっているので、電圧を掛けた時に中の水晶振動子が正確に振動します。ご存じのように、この水晶振動子は時計だけでなく、パソコンやスマートフォンなどにも使われている、精度が要求される部品です。かつては、窒素を充填していましたが、真空の方がより精度が良いということがわかり、試みに電子ビームで溶接した結果、大変良い結果が出て、採用されました。最初は5mm×3.2mmくらいのサイズだったのですが、今では、ものすごく小さくなっていて1mm×1mmくらいのサイズになっています。それをたくさん並べて電子ビームで一気に溶接しています。

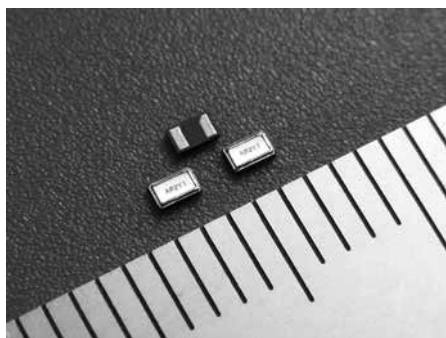


図8 水晶振動子の封止(写真提供:リバーエレテック株)

◆電子ビーム応用製品として期待される3Dプリンタ

Q 電子ビームの応用ということで、金属3Dプリンタにも今、力を入れているということですが。

吉川 はい。材料は基本、64チタン(Ti-6Al-4V)を使っていますので、航空・宇宙関係がメインになるのではないかと考えていますが、医療関係などにも使えたらいいと考えています。それから、最近ではレシビ開発と言いつつ、他の金属への適合も進めているところです。できつつあるのが、純銅の造形。純銅については、やはり他の工法では難しいと言われているので、電子ビームを使うことが強みになると考えています。さらにアルミ合金にも力を入れていきたいと思っています。

山本 構造は溶接機と同じで、基本的には真空中で加工しますので、チタン合金など酸化しやすい素材には強みを発揮すると思っています。

Q 医療関係は面白いですね。

吉川 人工関節などをその人に合わせてオーダーメイド的に作るなどを将来的にできたらいいと思っています。ただ、やはり体内に入れるものですので、今よりもっと表面粗さを改善して、製品の精度を上げていかなければと思っています。

Q 造形方式は?

吉川 当社の場合はパウダーベッド方式です。粉を敷き、固めたいところだけに電子ビームを当て溶融と再凝固を経て、それを一層下げてまた粉を敷いて固めていくということを繰り返し、完成品を作ります。今はまだ、そこででき上がったものをそのまま製品として使える精度ではありません。後加工が必要でこの辺が課題です。

Q もう発売しているのですよね?

吉川 2019年から販売しています。売上はまだまだ言えるほどではないです。やはりイニシャルコストが高いため、どうしても必要で、大量生産で使うわけではない研究機関や大学などから徐々に入れていただくというのが順当かなと思っています。

Q さらに改良が必要ですね。

吉川 使い勝手を改善していかなければならないと考えています。パラメータがたくさんあって使うのがなかなか難しく、大変。そこはまず改善しなければと思っています。また、造形の精度をもっともっと改善していって、でき上がったものをすぐに製品に使えるようなところまで仕上げていかなければいけないですね。

◆新たな応用分野への挑戦

Q 今の課題はなんですか?

湯瀬 製品の技術的な問題より、自動車がガソリンエンジン車からEV車に移り変わりつつあるという時流に直面していることが課題です。今、私どもの電子ビーム加工機の売上の約半分は自動車部品の加工に採用されていますが、これは、ガソリンエンジン車の部品の加工で使われているため、この比率が減る中で、電子ビーム加工機に対する投資も徐々に減ってきています。そのため、自動車部品に限らず、もっと新たな用途を開拓、拡大していかなければならないと考えています。

Q どんな用途ですか?

山本 今も航空宇宙関係でご使用いただいておりますが、この分野を拡大していきたいです。また、近年、半導体製造装置の部品製作にも採用が拡大されていてさらに電子ビーム技術の浸透を図るため、積極的に活動しています。半導体製造装置は、溶接を使う部分が非常に多く、ある程度現在も使っているのですが、もっと広く、いろいろな場面で使えると思いますので、最新技術をアピールしていきたいです。

Q 他にはどうですか?

吉川 ガソリン車に代わって伸びてきているEV関係も、モータの中のロータ部の溶接などにはすでに採用されているのですが、ステータコイルの溶接についても採用していただけないかとサンプルをつくり積極的に働きかけています。また、先ほど、少しお話をしましたが、電子ビームは吸収率が高いので、銅やアルミの溶接に強みを発揮します。レーザービームは反射しやすく、難しいですが、電子ビームなら比較的簡単に溶接ができるということで、この分野にもPRしています。

山本 また、これからの分野として、カーボンニュートラルに期待しています。例えばエネルギー関係ですと、風力発電の風車関係。また、非常に注目しているのは水素関係で、超高気密性とコストダウンの両立が実現できる電子ビーム溶接が水素タンクの溶接などで適用できるものと考えております(図9)。

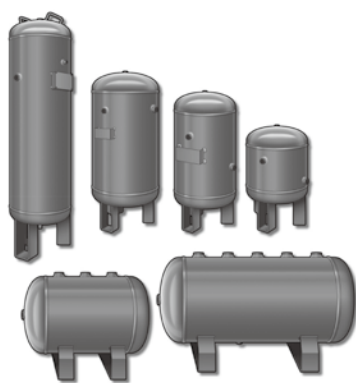


図9 水素タンク製品イメージ

吉川 電池で言えば、電子ビーム加工機は、初代ハイブリット車のニッケル水素電池に採用されました。以降、ニッケル水素電池の製造に寄与し続けていますが、残念ながら最近の主流であるリチウムイオン電池の製造には採用されていません。しかし、EV化を促進するには電池のコストダウンは必須なので、工法変更を検討される可能性は十分にあり、まだまだチャンスはあるのではないかと考えています。特に、銅の溶接を得意にしていますので、電池を作ることもさることながら、電池を繋ぐためにも溶接が必要になりますから、そういったところにも採用されればと思っています。

湯瀬 これまで、車のギアなど、破断してはならない部品にその精密さや信頼性、さらにコストダウンも実現できるということで使っていただいています。精密と信頼性とコストダウンには多くの潜在ニーズがあると思いますので、まずはお試しでお使いいただいて、我々のこの電子ビームの良さをご認識いただければ嬉しいです。

Q いろいろなところにチャンスがありそうですね。

吉川 異種材配管の溶接にも力を発揮します。融点差が大きな異種材でも高融点側にオフセットすることで溶接が可能になりますし、出力のスロープ制御によって、終端部のへこみを低減できます。一般的に難しく熟練が必要な異種材溶接ですが、熟練した技術者でなくても、安定した品質を保つことができます。

吉川 電子ビームというどうしても敷居が高いというイメージがあるかと思います。私たちとしては、“お試しで加工”は無償で対応させていただきますので、例えば、「試しにこれとこれくっつきませんか?」ということがあればぜひお声掛け願います。また、上手くいけば製品化できるかもしれないので、数を揃えたいというようなときは、受託加工も対応していますので、ご相談いただければと思います。いろいろな溶接方法を試したけれど上手くいかなくて、試しに電子ビームでやってみたら上手くいった、というようなことがよくあります。何かお困りのことがあればぜひご相談ください。一度お試しいただければと思います。

湯瀬 ガソリン車がEV車に変わっていくことによって、少し投資が抑えられていますが、この大変化の時期こそチャンスと思っています。新たな局面を迎え、その中で我々としては新規開拓に力を入れています。皆様のご要望、リクエストがありましたら、何なりと対応いたしますので、宜しくお願いします。

～長時間にわたり、興味深いお話をいただきましてありがとうございました～