溶接工学
産報出版株式会社
2020年8月4（火）発行

技術レポート

はやぶさ2の電子ビーム溶接

銅・ステンレス溶接で「弾丸」製作
人工クレータ形成に貢献

指田次長

太陽系の起源・進化と生命の原材料物質を解明するため、C型小惑星「リュウグウ」で鉱物などのサンプルを採取するプロジェクトを見事に果たし、12月6日に帰還が予定されている「はやぶさ2」。プロジェクトが順調に進捗していることから、採取した鉱物などを入れたカプセルを地球に射出した後は、10年かけて別の惑星の探査に向かう検討も行われている。

このはやぶさ2における最大の目的の一つは、小惑星表面にクレータを作り、それによって地中の鉱物を採取することにあるが、クレータを作るための装置には、高度な電子ビーム溶接技術が用いられている。東成エレクトロビームJOB事業部の指田達也次長にインパクタの製作に使われた電子ビームによる銅とステンレスの異種材料溶接について聞いた。

◇　◇

はやぶさ2はC型小惑星リュウグウの探査において、インパクタと呼ばれる装置によって銅の弾丸を打ち込み、直径数㍍の人工的なクレータを作り、その表面からサンプルを採取することで、地下物質の調査ができると期待されている。

銅・ステンレス製インパクタ

インパクタはステンレス鋼（＝筐体、SUS304）の円盤の内側に銅（＝弾丸、C1020）の円盤をはめ込んだような構造を持つ。インパクタに仕掛けられた爆薬が起爆すると、板厚4㍉の銅板が外れて弾丸となり（爆圧などによって変形）、リュウグウにクレータを作る仕組みだ。

起爆前の弾丸（銅板）は外側のステンレス筐体に溶接されている。銅とステンレスの溶接部は7㍉の板厚で、5―7㍉の範囲の溶込み深さが品質要求だ。起爆によって溶接箇所が一度に均一に外れないと、打ち出された弾丸の軌道にずれが生じるためだ。

インパクタの軽量化を図るため、アルミによる筐体も検討した。しかし、弾丸と筐体のシール材による機械締結では気密性に不足があり、また要求品質を満たすような銅との溶接は難しいため、ステンレス鋼を採用。異種材料の接合で高い実績を持つ、電子ビーム溶接でインパクタを製作した。

高い気密性が求められるため、ヘリウムによる漏れ検出基準は1×10のマイナス10乗パスカル・立方㍍毎秒以下とした。

ステンレスと銅の溶接ではマイクロクラックの発生が課題となるが、10―20㌔メートルのマイクロクラックよりも、未溶接によって設計上存在する最大0・5㍉の亀裂の伸展リスクと比較すると、溶接で発生するマイクロクラックの影響は低いと判断した。

電子ビーム溶接は、電子が高速で対象物に当たることで熱が発生し、その熱で金属を溶かして接合する技術である。質量が非常に軽い電子は、大気中で気体分子に弾かれてしまうため、ポンプで気体分子を除去し、真空状態にしたチャンバー内で溶接することが特徴の一つ。

気体物質がないので酸化、窒化しない半面、約1・2立方㍍のチャンバーを真空にするのに10分程度の時間を必要とするため、タクトタイムが課題となる。そこで、インパクタの溶接においては、全周が金太郎あめのように一定の深さで溶込んでいることが求められる。

ステンレス、銅、両素材による異材接合部では、それぞれ引張強度が異なるが、インパクタは銅の母材強度をベースに設計した。

溶接のポイントは、融点と熱伝導。熱伝導の悪い方が先に溶けて熱がたまるため、単純に銅とステンレスの真ん中を溶接するとステンレスが先に溶けてしまう。そのため溶接条件となる狙い位置の開発に時間を割いてテストピースで加工実験を繰り返した。

角棒を溶接しては破壊試験で評価し、中がどのように溶合っているか観察し、トライアンドエラーでパラメータを調整する。溶込み深さをコントロールするビーム電流、ビード形状をコントロールするビームフォーカス、溶融比率をコントロールするオフセットが重要なパラメータだが、これらのうち一つでもパラメータを変更すると、他のパラメータが適正値を外してしまうなど、適正条件の調整に苦労した。

例えば、銅が溶けにくいため、銅の側に寄せて溶接すると、今度は先に溶けてしまうなどの難しさがあった。

また、角棒で実証できても、実機のような円状では溶け方が大きく異なる。そこで、1㍉単位の細かい調整を行うのだが、ビームの先端が細くなると、内部は鋸刃状で溶込み深さの変動が激しいが、熱の影響の規格に収まるようにビード外観上の凹みを持ったビーム形状にすると、溶融幅が広くひずみも大きくなるが、溶込みのバラツキを最小限に抑えることができる。

角棒条件をそのまま適用すると、銅溶融過多となるため、狙い位置をステンレス側にシフトし、ビーム出力を調整、ビーム形状と熱容量を考慮しながら適正条件の調整を図った。

直線から円軌道へと徐々に実機の条件に近づけていくような評価を繰り返した。さらに、過去の溶接事例も参照しながら宇宙という未経験の性能要求に対して溶接試験片を割らなくても、外観である程度の判断がつくようになってくると、ビード表面が左右非対称の外観が適正で、色見は銅色とステンレス色が均等となる。また、穴が開いても0・5㍉以内の規格に収まるようにビード外観上の凹みは、補修用に準備した溶接条件を用いて平滑化することで改善できる――などがわかった。

このように条件設定と段取りに多くの時間と実験回数を費やすことで、適正な品質を持った11個のインパクタを製作、納入することができた。そして、この中から選ばれた1機がはやぶさ2に搭載され、2014年12月3日にリュウグウに向けて打ち上げられた。

昨年4月の人工クレータ形成ミッションでは、当初の役目を果たし、ミッションの成功に貢献することができた。ただ、無事に帰還を果たしてこそプロジェクトの成功と言える。帰還予定の12月6日が待ち遠しい。