

# 光弾性を用いた溶接加工品の状態分析

## 1. はじめに

国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下:産総研)は、株式会社バルカーとともに2019年の6月より「バルカー・産総研 先端機能材料開発連携研究ラボ」(以下:研究ラボ)を発足させ、バルカー社のコア技術と産総研の保有技術を組み合わせたオープンイノベーションによる技術開発を行っている。研究ラボは、産総研のつくばセンター、中国センター、九州センターに研究拠点を設置し、様々な研究領域からなる「エコシステム」な研究開発を実行出来る体制を取っている。

具体的な技術テーマとして、バルカー社の素材・加工・サービス支援技術と産総研の化学分析・評価・診断技術の融合により研究開発を推進している<sup>1)</sup>。それらの活動の中で、ふっ素樹脂の溶接加工品溶接部の状態分析に関する技術相談がバルカー社から提案され、研究ラボ内の技術テーマの一つとして研究開発を開始した。

## 2. ふっ素樹脂の溶接加工技術

### 2-1) PTFE 樹脂の溶接接合

ふっ素樹脂容器は耐薬品性などの機能があり、幅広い用途で使用されているが、代表されるふっ素樹脂の一つであるPTFE樹脂は、皆様もご存じのように融点を超えても流動性を示さないため、一般的な加熱処理では溶融一体化を行うことが出来ない。また、PTFE樹脂は粘着性が著しく低いために、バルフロン溶接加工品の様な製品を製造するためには、PTFE樹脂との親和性が高い樹脂を選んで一体化させることが必要とされており、特別な条件の中でしか溶接接合が出来ないことが知られている(Figure1)。



Figure1 バルフロン溶接加工品と溶接部の例

### 2-2) 溶接技術とその課題

PTFE樹脂の溶接接合では介材として化学構造が似ており、溶融流動性があるPFA樹脂が良く使われている。しかし容易に溶融するPFA樹脂をPTFE樹脂の溶接面に溶融接着をさせるだけでは、高い接着力を発揮出来ない。製品として適切な強度の接合品を得るためには、溶接の3条件(温度 荷重 時間)を適切に加える必要があるが、製品の多くは手作業で溶接を行うため、強度基準は超えているものの少しずつ状態の違いが発生してしまう。

また、溶接手作業での微小な違いであっても接合状態に差異が生まれてしまうため、安定的な作業を行えるようになるには長い時間と経験が必要である。特に人の作業を完全に同一化することが出来ないため、個々人の作業を画一化しようとしても効果が得られ難いことも分かっており、溶接加工品の品質を保持していく上では、技能習得と作業員の高い熟練性が必須となる。

また、接合状態を判断する評価技術が、引張試験などの機械強度試験での破壊強度値のみに限定されていたため、接合の良し悪しの大枠は類推出来る一方、溶接作業のどの条件に課題があったかを具体的に確認出来ない状況であった。そのため個々人での最適化を進めてゆくには、溶接条件の模索と強度試験評価結果を何度も摺り合わせる作業が必要であったことにより、新しい溶接加工品の状態分析技術が求められていた。

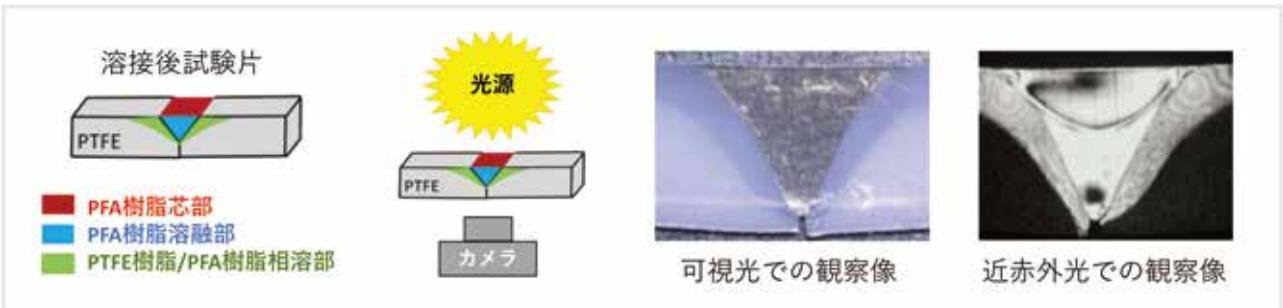


Figure2 光弾性測定の簡略図と溶接試験片の画像

### 3. 接合状態の判断指標と測定手法

はじめに、接合状態と溶接条件の結びつけを行うため、溶接作業に関するコツをバルカー社の熟練作業員に確認を行ったが、技能と強度結果の組み合わせであるためか、統一した内容に纏めることが出来なかった。そのため評価技術を確認する前に、まずは接合状態の可視化とそれに対する正確な判断項目と基準を設けることとし、またその状態分析結果より、溶接作業の条件へとフィードバック出来る様な評価分析方法を確立することとした。

材料内部の応力分布を画像観察する手法として、光弾性(photoelasticity)が知られている。

これは、応力によって誘起された複屈折を偏光位相差で測定する実験法で、応力の大きさと方向が特徴的な縞模様(干渉パターン画像)としてイメージング観察される。また、試料に荷重を加えながら応力分布状態変化を連続測定する動的な光弾性によって、溶接部位の接合状態や破断現象を詳細に追跡出来る方法である。今回、観察光源に近赤外光を使用すれば可視光観察時よりも樹脂微結晶成分に由来する光散乱を抑制出来るので、より明瞭な光弾性像が得られると考えた。

以上のことにより、光弾性像の評価技術が先述の内容に適切であるとの考えに至り、バルカー社から派遣されている研究ラボのメンバーらとともに新規評価技術構築の取組みを進めた(Figure2)。

実際の作業員が作製したサンプルや条件を模擬した試験片などの分析結果を取り纏め、破壊強度と接合状態を結びつけた。次に、破壊内容とそれに付随する応力伝播を系統的に確認することで、適正な溶接状態の指標化を行うことに成功した<sup>2)</sup>。

特に適切な溶接条件で接合が行われた場合では、破断試験時では溶融樹脂内での伸びが確認されており、より破壊され難くなること(Figure3)、並びに、光弾性像を用い

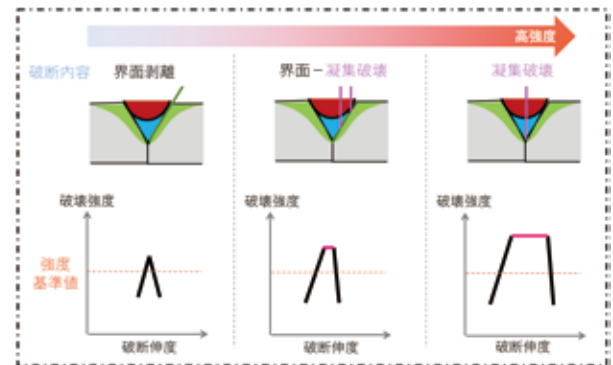


Figure3 破断内容と破壊強度

た内部応力の起点や伝播の内容を詳細に解析すること(Figure4)で分かってきた。



Figure4 破壊ルートと応力伝播の観察像

また、熟練作業員の異なるコツで作製された溶接品をそれぞれ解析した所、実は接合状態が良い状態である凝集破壊に集約されていることが分かり、熟練作業員は言葉や表現は違えども同じ良品状態の溶接製品を作り上げていることが改めて確認された。

## 4. 溶接条件への落とし込みと分析技術の活用

先ほど構築した判断指標と実際の作業条件との結びつけの整合性を確認する目的で、バルカー社が保有する自動溶接機を用いて確認試験を実施した。特に全ての条件を最適設定にした試験では作業員の標準的な数値を大きく上回る破壊強度を確認する結果を得ることが出来た。この結果より接合状態の判断指標、及び作業条件への落とし込みが適切であると確認した(Figure5)。

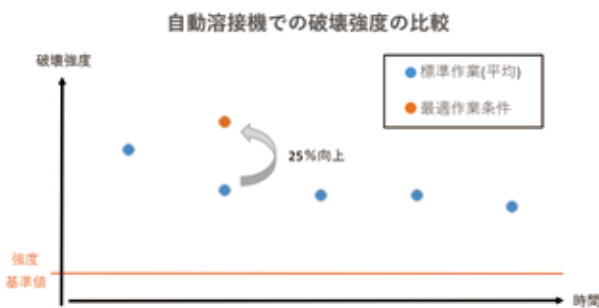


Figure5 標準作業と最適作業条件との比較

また、習熟度が低い作業員に対して、光弾性像を用いた解析内容を活用し、実際に作業条件へと落とし込みながら習熟を重ねたところ、早期に安定かつ高強度な溶接作業技術を獲得出来た(Figure6)。

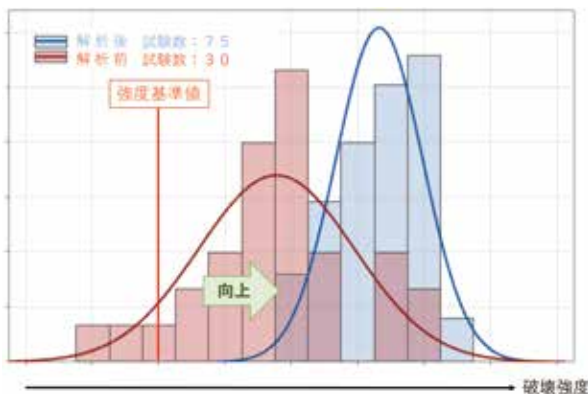


Figure6 光弾性像の活用による破壊強度の変化

上記の結果より、光弾性像による溶接状態の可視化により、作業員の短期間での技能向上にも効果があることが明確になった。

## 5. おわりに

まず、本評価手法とその活用結果の発表機会をくださったバルカー社、並びに各関係者の皆様に厚くお礼を申し上げます。また、接合状態の判断指標を作るためのデータベース作成では、200では納まらない数多くの分析情報とモデルサンプル作製が必要となったが、特にバルカー社の喬叶涵氏と吉山友章氏に研究ラボ員として尽力をいただくことで、無事に作り上げることが出来た。改めてこの場にて感謝申し上げます。

私は、今回初めてふっ素樹脂の溶接接合技術にかかわることになったが、評価・分析を進めていくにつれて、その作業の奥深さや難しさ、そして実際に現場作業をされている方々の技術力の高さに敬服した。特に光弾性像の評価・分析が進むにつれて、熟練作業員の方々が表現される言葉は違えども品質が高い状態のモノを同じように製造されていることが分かり、職人の妙技やその方々が製造されるバルカー社のバルフロン溶接加工品の品質の高さを改めて伺い知ることが出来た。

最後に今回確立した光弾性像を用いた評価分析技術が、バルカー社の人材育成や生産開発で少しでも貢献していくことが出来れば誠に幸甚である。

## 6. 参考文献

- 1) 戸田清華, 高橋聡美, 寺崎正, 坂田義太郎, バルカー技術誌, No.45, 2-5, (2023).
- 2) 樹脂の内部応力確認方法とその測定装置PCT/JP2022/032704.



### 新納 弘之

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
材料・化学領域  
バルカー-産総研先端機能材料開発連携研究ラボ  
領域長補佐