

(解説)

# 遠心圧縮機用インペラのシュラウド接合技術

西村幸弘<sup>\*1</sup>・仲山善裕<sup>\*2</sup>・石井宏明<sup>\*3</sup>

## Shroud Bonding Technology on Centrifugal Compressor Impellers

Yukihiro NISHIMURA・Yoshihiro NAKAYAMA・Hiroaki ISHII

### 要旨

遠心圧縮機用クローズドインペラには、作動流体に応じてステンレス鋼や低合金鋼などの多様な材料が用いられており、流量や圧力仕様にに応じてサイズや翼形状も様々である。シュラウドの接合には、材料およびサイズや翼形状に応じた最適な方法を選択する必要がある。最も一般的な接合方法であるすみ肉溶接の適用が困難なケースについて、液相拡散接合とスロット溶接を取り上げ、その特徴、適用事例、検査方法を解説した。液相拡散接合については主に接合原理、強度確認試験、超音波探傷検査、スロット溶接については主に熱変形を抑制する溶接方法の選定、溶接後の形状精度、非破壊検査方法を解説した。

### Abstract

Closed impellers of centrifugal compressors are made of various materials such as stainless steel and low-alloy steel due to the working fluid, and also have various combinations of size and blade shapes according to the specifications of flow rate and pressure. Therefore, the optimum shroud bonding method must correspond to the material, size, and blade shape. In this paper, the features, applications, and inspection methods of liquid-phase diffusion bonding and slot welding are explained in detail, in case the common fillet welding is not applicable. The explanation of liquid-phase diffuse bonding mainly covers bonding theory, tensile-test and ultrasonic testing results. The explanation of slot welding mainly covers the welding method used for lower thermal deformation, dimensional accuracy after welding, and non-destructive testing methods.

### 検索用キーワード

遠心圧縮機, クローズドインペラ, すみ肉溶接, 液相拡散接合, スロット溶接, 超音波探傷試験, インサート材, 真空炉, 熱処理, 熱変形, 引張試験

まえがき = 遠心圧縮機のインペラは、翼上面にシュラウドがあるクローズド型とシュラウドがないオープン型に大別される。可燃性、腐食性、毒性がある作動流体では、発火や漏れによるリスク回避のためクローズド型が適用される場合が多い。

クローズド型には、作動流体に応じてステンレス鋼や低合金鋼などの多様なインペラ材料が用いられている。また、流量や圧力仕様にに応じてインペラ形状も変わる。図1に示すように、翼が低くシュラウドが直線的な2Dインペラや翼が高く入口から出口に向かってシュラウドが湾曲する3Dインペラなどが用いられている。

クローズドインペラの製作においては、材料やインペ

ラの形状に応じて最適な翼とシュラウドの接合方法を選択する必要がある。代表的なシュラウドの接合方法を図2に示す。最も一般的な接合方法はすみ肉溶接である。しかし、この方法は流路内における溶接棒のアプローチに制約があり、インペラの形状によっては施工できないケースがある。溶接棒がアプローチできない場合、当社では、比較的小径で低翼のインペラやシュラウド曲率が大きいインペラには液相拡散接合、大径で低翼のインペラにはスロット溶接を適用している。

本稿では、液相拡散接合とスロット溶接を取り上げ、これらの特徴、適用事例、検査方法などを解説する。

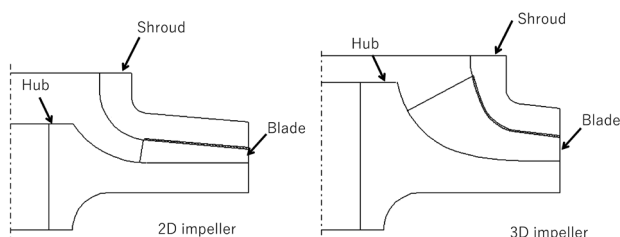


図1 2Dインペラと3Dインペラの模式図  
Fig.1 Schematic illustration of 2D impeller and 3D impeller

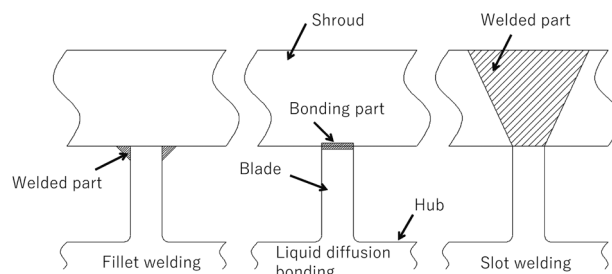


図2 シュラウド接合方法の模式図  
Fig.2 Schematic illustration of shroud bonding method

\*1 機械事業部門 生産本部 生産企画部 \*2 機械事業部門 技術本部 技術企画部 \*3 神鋼検査サービス株式会社 検査サービス本部 検査サービス部

# 1. 液相拡散接合

## 1.1 液相拡散接合の特徴

液相拡散接合は、翼上面とシュラウドの接合部に箔状のインサート材を挿入して等温加熱することにより、インサート材を溶融させて両者を接合する方法である。クローズドインペラは腐食性の作動流体を扱うケースも多く、当社では腐食抑制の観点からAuを主成分とするインサート材を採用している。また、真空炉で加熱することにより接合面やインペラ表面の酸化を防止するとともに、熱変形を抑制するためにインペラのサイズや材料に対応した炉温制御を採用している。

インサート材は融点以上の等温保持により液相となり、母材との間で成分拡散を生じる。拡散による成分濃度の変化に伴って液相の融点が上昇するため、等温保持中に接合部の凝固も進行し、母材と同等の強度を有するようになる。

液相拡散接合では、インサート材の溶融時に高温加熱が必要であり、これにより母材の強度特性が変化する場合がある。したがって、接合工程の最後は適切な速度で冷却させ、さらに母材に応じた調質熱処理を施すことによりインペラに必要な強度特性を付与する必要がある。

## 1.2 接合体試験片による強度確認

Auを主成分とするインサート材を用いて翼とシュラウドの接合部を模擬した接合体を製作し、引張試験による強度確認を行った。

引張試験片 (N=8) と各試験片の破断後の外観を図3に示す。翼を模擬した角材1 (Block 1) とシュラウドを模擬した角材2 (Block 2) の間にインサート材を挟み、真空炉で接合熱処理と調質熱処理を行った。図3は接合体を試験片形状にカットした状態を示しており、接合面は図3の段付き部である。図3に示すように試験片はすべて母材で破断し、接合面での破断は見られなかった。

試験片 (N=8) の引張強度と0.2%降伏応力の測定結果を表1に示す。各測定値はインペラの材料仕様を1とした相対値で示している。材料仕様はインペラの運転応力に対して十分な裕度を持っている。

試験の結果、全ての試験片において引張強度および0.2%降伏応力が1以上の値を示し、インペラの材料仕様を満足することがわかった。また、図3に示すように、試験片はすべて母材で破断しており、接合部は母材と同等以上の強度であることが確認された。

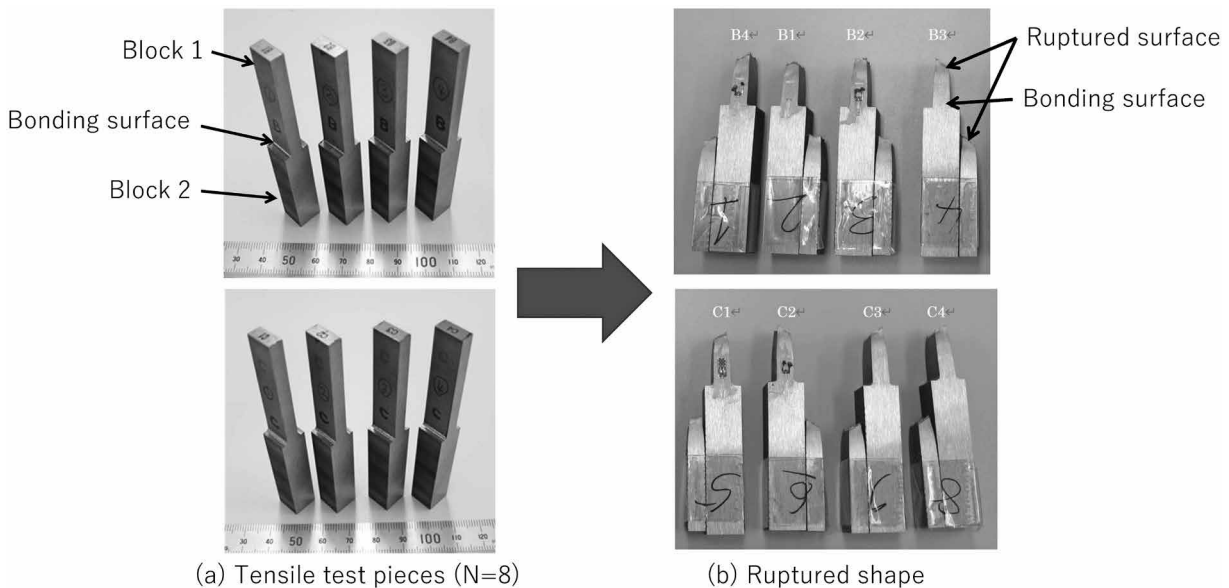


図3 接合体の引張試験片と破断外観  
Fig.3 Tensile test pieces and ruptured shapes of liquid diffusion bonding

表1 接合体試験片の引張強度と0.2%降伏応力

Table 1 Tensile strength and 0.2% offset yield strength of liquid diffusion bonding test pieces

Test pieces	Tensile strength	0.2% offset yield strength	Test pieces	Tensile strength	0.2% offset yield strength
B1	1.055	1.146	C1	1.056	1.155
B2	1.054	1.211	C2	1.052	1.208
B3	1.052	1.203	C3	1.052	1.206
B4	1.052	1.205	C4	1.055	1.184

Tensile strength and 0.2 % offset yield strength are shown as the relative values to each impeller material specifications.

B and C use different production lots of insert material.

### 1.3 液相拡散接合の適用事例

流路内に溶接棒を挿入するすみ肉溶接に比べて、液相拡散接合は翼高さやシュラウド湾曲などの形状に起因する製作面の制約が少ない。溶接棒が挿入できないような翼高さが極めて低いインペラも接合が可能である。このような翼高さが低いインペラは回転軸を含む断面においてシュラウドが直線状であり、翼のねじれもないことから、当社では2Dインペラと呼んでいる。

図4は液相拡散接合を実施した2Dインペラの一例であり、接合後に最終加工を行った状態の外観である。真空処理により、インペラの翼表面は酸化せず金属光沢を維持している。

上述した2Dインペラの入口と出口の接合部の拡大写真を図5に示す。矢印部が接合面であり、翼の全長が接合されている。液相拡散接合は適切な炉温制御により熱変形を抑制できるため、設計値に対する寸法誤差が小さく、小流量のインペラでも形状精度の高いインペラを

製作できる。

上述した2Dインペラに対して、回転軸を含む断面においてシュラウドが湾曲し、翼も3次元的なねじれを伴うインペラを当社では3Dインペラと呼んでいる。翼は比較的高いが、接合面の湾曲により流路内で溶接点にアプローチしづらく、低翼の2Dインペラと同様にすみ肉溶接が困難なインペラである。

液相拡散接合を行った3Dインペラの一例を図6に示す。3Dインペラにおいても、2Dインペラと同様に翼の全長を接合している。液相拡散接合では翼とシュラウドの面あたりが重要であり、両者の加工精度が悪いと接合面に隙間や欠陥が生じる原因になる。

一般に、インペラが大型になるほど高精度の面加工が難しくなる。したがって、大型の2Dインペラは後述するスロット溶接を用いて製作する場合もある。

### 1.4 接合面の非破壊検査とスピントスト

液相拡散接合の接合部は、翼上面とシュラウドに挟ま

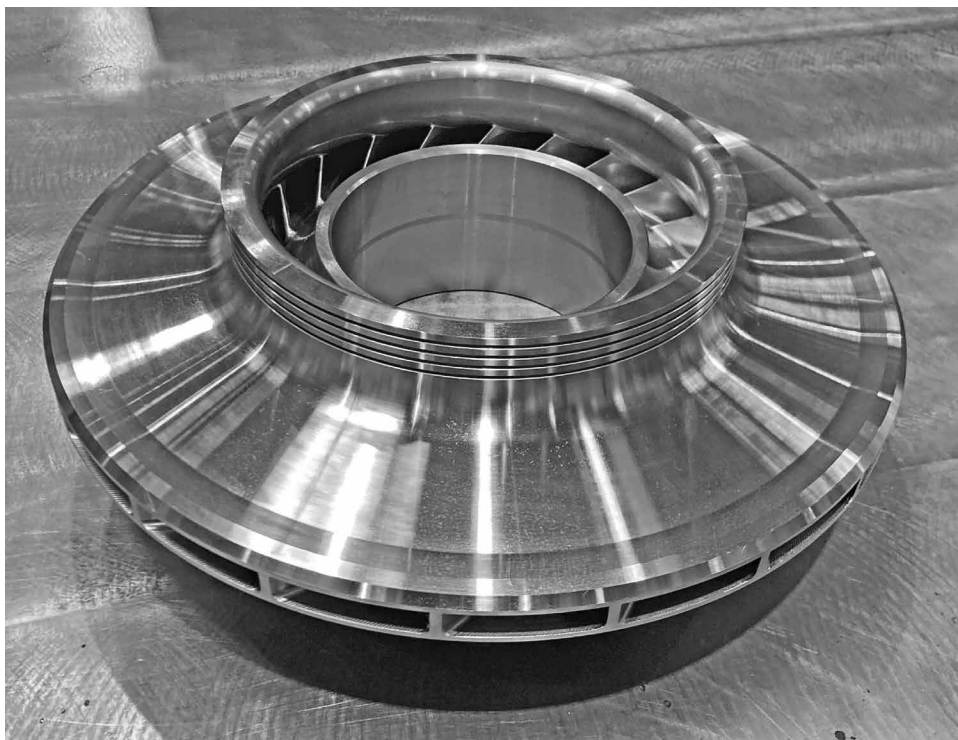


図4 液相拡散接合した2Dインペラの外観  
Fig.4 Appearance of 2D impeller with liquid diffusion bonding

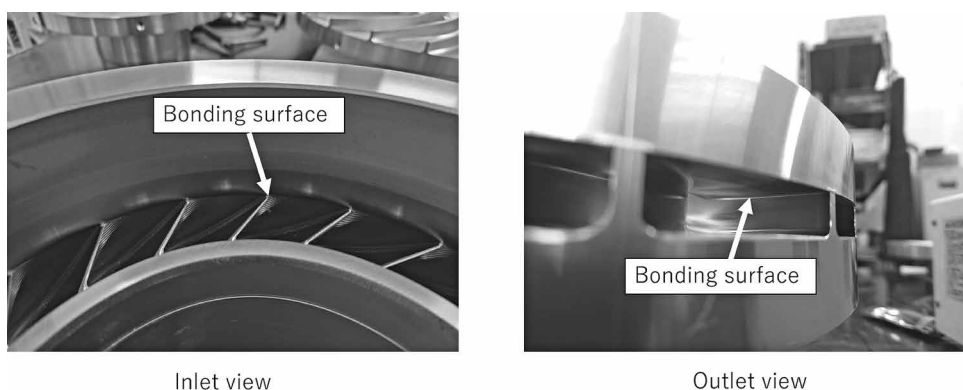


図5 2Dインペラの入口と出口の接合部の拡大  
Fig.5 Details of inlet and outlet view of bonding surface in 2D impeller





図6 液相拡散接合による3Dインペラの外観  
Fig.6 Appearance of 3D impeller with liquid diffusion bonding

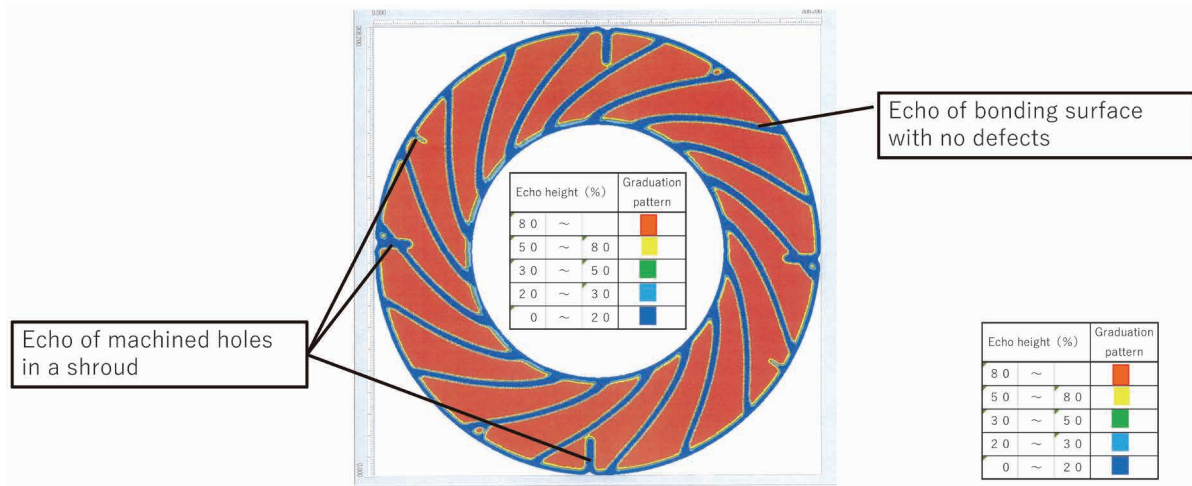


図7 2Dインペラの探傷結果  
Fig.7 UT inspection result of 2D impeller

れた内面であり外から目視できないため、超音波探傷検査（以下、UTという）により接合状況を確認している。当社では、水浸UT装置を用いて、シュラウド表面から接合面に対して法線方向に超音波を入射する垂直探傷を行っている。インペラは水浸UT装置の回転台に設置され、回転と同時に探触子を半径方向にトラバースさせて接合面全体を探傷する。

2Dインペラの探傷結果の一例を図7に示す。図7はシュラウド側から見た接合面の状況であり、探傷部は接合面の前後数mmの領域である。図7では、超音波反射の強弱を色分けして示している。正常な翼の接合面は、超音波が通過して反射強度が低いため青く表示される。翼の接合面以外の領域は、超音波の反射強度が高いため赤く表示される。接合面に欠陥が存在する場合は、翼(青色)の中に赤や黄で欠陥が表示され、欠陥の位置が確認できる。また、寸法が既知の人工欠陥を用いて欠陥の大きさを校正している。

液相拡散接合や後述するスロット溶接を適用したインペラは、UTや磁粉探傷試験（以下、MTという）などの非破壊検査に合格した後、スピテスターで定格を超える高速の回転試験を行い、割れや変形がないことを確認した上で実用に供される。

## 2. スロット溶接

### 2.1 スロット溶接の特徴

スロット溶接は、シュラウドに開先溝を設け、溝の直下にインペラの翼上面を配置し、溝を多層溶接で充填することにより両者を接合する。溝加工後と溶接直後の外観写真を図8に示す。シュラウドの上面から溶接する構造のため、すみ肉溶接とは異なり流路内における溶接棒のアプローチが不要であり、低翼のインペラにも適用可能である。また、翼とシュラウドの面あたりに対して液相拡散接合ほどの高精度は要求されない。そのため、液相拡散接合に必要な面加工精度の確保が難しい大径インペラにも適用できる。さらに、翼上面全面の接合が必須ではなく、強度が確保できる接合長さを接合すればよく、溶接量を低減して変形を最小限に抑えることができる。

### 2.2 スロット溶接の適用事例

スロット溶接を適用したインペラを図9に示す。このインペラは、大径かつ出口高さが小さく、すみ肉溶接や液相拡散接合は適用が困難であるためスロット溶接を採用した。大型サイズであり溶接入熱が大きいため、変形を抑止するための配慮が求められる。また、溶接後の溶接金属部（以下、DEPOという）や熱影響部（以下、

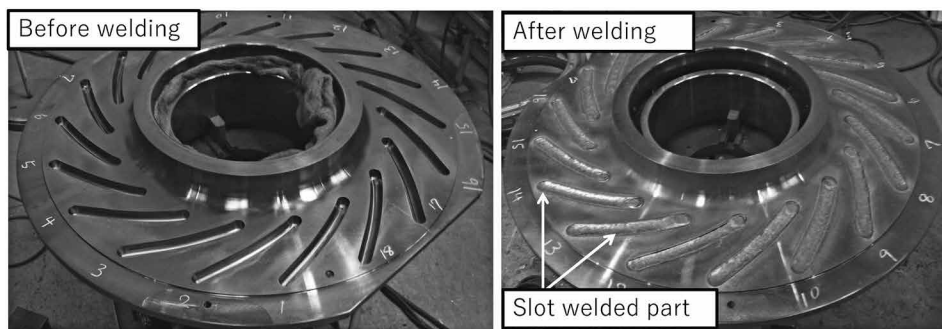


図8 スロット溶接前後のインペラの外観  
 Fig.8 Appearance of impeller before and after slot welding



図9 スロット溶接した2Dインペラの外観  
 Fig.9 Appearance of 2D impeller with slot welding

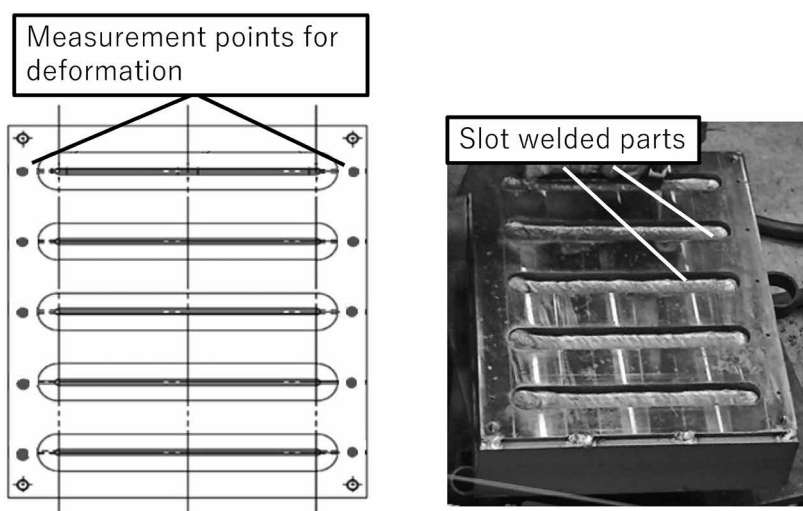


図10 変形量評価のための平板試験片  
 Fig.10 Flat test block for deformation evaluation

HAZという)の強度特性もインペラに要求される仕様を満足する必要がある。そこで、溶接方法・条件を検討し、変形の発生を抑制できる製作方法を決定した。製作方法の検討に際しては、要素試験と実機試験を行い、製品品質が確保できることを確認した。試験の一部と検査方法を次項で紹介する。

### 2.3 要素試験

スロット溶接の課題は、高入熱による変形をどのように抑制するかである。要素試験では、試験片を用いて相対的に変形量の小さい溶接方法・溶接条件を検討した。

平板試験片(10体)の一例を図10に示す。これに製品同様の開先溝(5本)を設けて接合した。試験片はそれぞれ異なる溶接方法・溶接条件とし、上面には図10

表2 スロット溶接試験片の引張強度と0.2%降伏応力

Table 2 Tensile strength and 0.2% offset yield strength of slot welding test pieces

Test pieces location	Tensile strength	0.2% offset yield strength	Elongation
DEPO	1.020	1.105	1.267
HAZ	1.144	1.099	1.195
BASE METAL	1.077	1.082	1.317

Tensile strength, 0.2 % offset yield strength and elongation are shown as the relative values to each impeller material specifications

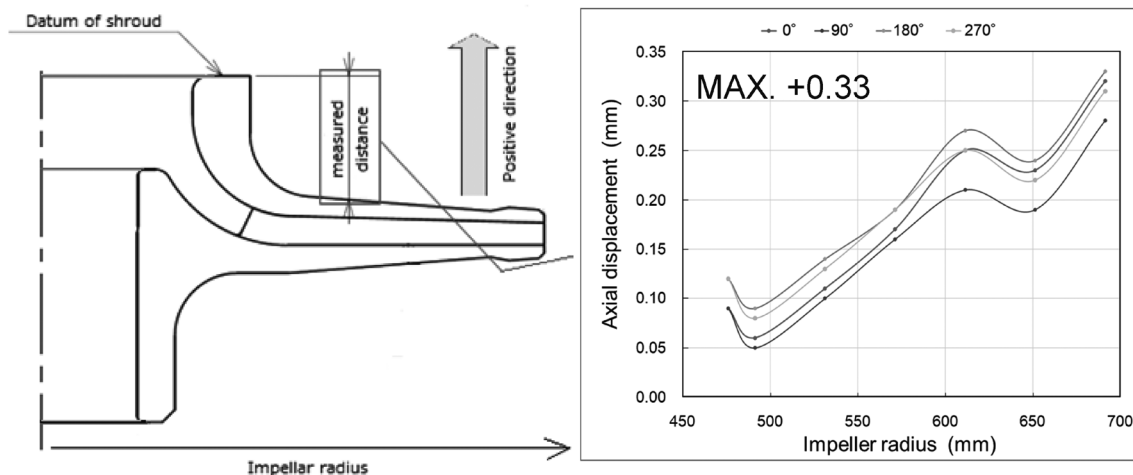


図11 スロット溶接後の軸方向変形量（実測値と設計値の差異）

Fig.11 Axial displacements after slot welding (deviation of measured and design values)

の丸で示す10箇所にて穴をあけ、溶接前後に各穴間距離を測定した。これらを比較して変形防止に有効な最適な溶接条件を求めた。穴間距離の総変形量を試験片ごとに比較すると、特定の溶接方法では総変形量が抑えられる。この溶接方法では、1パス当たりの入熱量は大きいですが、溶着量が多いため、他の溶接方法よりも積層パス数を減らすことにより結果的に変形を抑制できる。

つぎに、要素試験で決定した溶接方法で溶接継手を製作し、母材・DEPO・HAZの引張試験を行った。引張強度、0.2%降伏応力、伸びを表2に示す。表2に示す値は材料仕様を1とした場合の相対値であり、いずれもインペラに要求される材料仕様を満足している。なお、この試験とは別にASME SEC IX (Boiler and Pressure Vessel Code)にもとづいた溶接施工法確認試験を行い、引張強度についてはN数を増やして試験を行い、溶接品質に問題がないことを確認している。

## 2.4 実機試験

要素試験で決定した溶接方法・溶接条件が、拘束度や入熱量が異なる実機に適用可能か否かを確認するために、製品サイズのインペラに対して品質の検証（実機試験）を行った。

一例として、実機試験で製作したインペラ外面の形状精度について紹介する。スロット溶接の場合、機械加工後に補修溶接と応力除去焼鈍が必要になる場合がある。

そこで、補修溶接後の軸方向変形量（実測値と設計値の差異）を調査した。調査結果を図11に示す。図11では横軸にインペラ半径、縦軸に変形量を取り、シュラウド側への変形を正としている。半径方向を50mmピッチ、円周方向を90°ピッチで測定した結果、寸法差は最大0.33mmであった。この変形量は製品機能上、許容範囲内にある。

## 2.5 スロット溶接接合部の非破壊検査

拡散液相接合に対しては接合面を探傷し、スロット溶接に対しては溶接肉盛り部全体の検査を実施している。具体的には、垂直UT探傷により積層パス間の溶接欠陥など、斜角UT探傷により開先面の融合不良を検出する。また、溶接表面の健全性を確認するために、MTおよび浸透探傷試験（PT）も実施している。

むすび=遠心圧縮機に用いられるクローズドインペラのシュラウドの接合方法について、液相拡散接合とスロット溶接を取り上げ、それぞれの特徴、適用事例、検査方法を解説した。

シュラウドの形成には、接合による方法に加えてハブとシュラウドを一体加工する方法も実用化されている。当社では、製品性能と品質を考慮しながらインペラの形状や仕様に応じて、これらの方法を適切に使い分けている。