

電子ビーム溶接したスポークの形状測定

SHAPE MEASUREMENT OF ELECTRON BEAM WELDED SPOKE

沢村 勝^{#,A)}, 羽島良一^{A)}, 佐伯学行^{B)}, 岩下芳久^{C)}, 頓宮 拓^{C)}, 中村哲朗^{D)}, 渡邊直久^{D)}
Masaru Sawamura^{#,A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Takayuki Saeki^{B)}, Yoshihisa Iwashita^{C)}, Hiromu Tongu^{C)},
Tetsuro Nakamura^{D)}, Naohisa Watanabe^{D)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization/SOKENDAI

^{C)} Kyoto University

^{D)} Mirapro Co., Ltd

Abstract

We are fabricating the superconducting spoke cavity for electron beam drivers to realize a wide use of LCS X-ray and γ -ray sources in academic and industrial applications. After press forming, trimming to fabricate the half spokes and the electron beam welding (EBW) was performed to fabricate the full spoke shape. The shapes of the EBW full-spokes were measured with a simple 3D shape measurement device with a laser distance meter and optical stages.

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック(ERL)とレーザーコンプトン散乱(LCS)を用いた LCS- γ /X 線源を産業・学術分野で利用するためには、ERL の小型化および冷凍機設備の維持管理が課題となる。スポーク空洞は、周波数が同じなら楕円空洞よりコンパクトにできることや、カップラーなどをタンク側面に設置できるためパッキングファクターに優れ実効加速電界の減少を抑えられる。これらの長所を生かせば、スポーク空洞を用いた超伝導加速器の小型化が期待できる。

325 MHz のスポーク空洞であれば4KのGM冷凍機を使った運転も可能となり、冷凍機設備の利便性が向上する。そのため我々は 325 MHz のスポーク空洞を提案しているが、限られた資産の中で空洞製作技術を獲得するためハーフスケールである 650 MHz のスポーク空洞モデルの製作を進めている。これまでにハーフスポークの金型の設計[1]、製作、プレス成型試験[2]、トリミング加工を行い、さらにフルスポークにするための電子ビーム溶接(EBW)試験を行った[3, 4]。今回 EBW したフルスポークについて形状測定を行ったので、その現状について報告する。

2. 簡易型3次元形状測定装置

2.1 測定装置セットアップ

EBW による形状変化を評価するために、複雑な形状のスポークに対応する簡易型3次元形状測定装置を製作した。この測定装置は、レーザー距離計と光学ステージを組み合わせることで(Fig. 1)、概要は、

- (1) レーザー距離計を鉛直回転ステージに取り付け、この鉛直回転ステージをセットした直交3軸の直線ステージで、スポークに対して前後、左右、上下に移動させる。
- (2) スポーク表面の測定ポイントにレーザー距離計の

レーザーを当ててレーザー距離計から測定スポットまでの距離を計測する。

- (3) 測定ポイントとレーザー距離計との間隔は、レーザー距離計の測定可能範囲であれば、どの位置でも構わないが、未知の測定位置を連続で測定するためには、常にレーザー距離計の測定中心位置にした方が、有利である。そこで前後と上下の直線ステージを調節して常にレーザー距離計の測定値が測定中心になるようにする。
- (4) レーザー距離計の3次元位置と傾きを光学ステージの位置から求め、測定スポットの位置に変換する。
- (5) 水平回転ステージにスポークを乗せることにより、スポークの全面をレーザー距離計の正面に移動させることができるので、スポーク表面を横方向にスキャンさせる。また上下方向の移動と鉛直回転を組み合わせることにより縦方向にもスキャンすることができるので、スポーク全面を測定することができる。

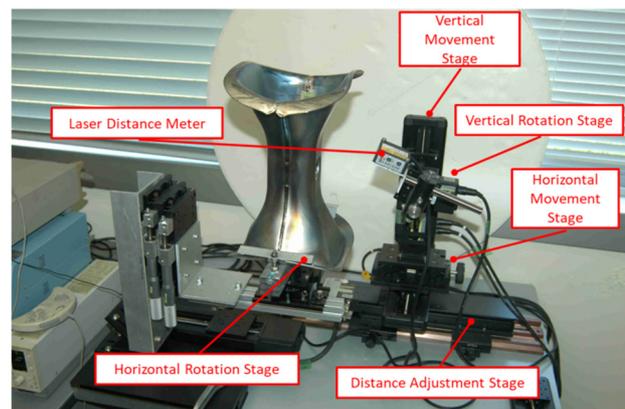


Figure 1: Setup of a simple 3D shape measurement device.

2.2 測定装置校正

レーザー距離計の原点と垂直回転の中心位置は設置するときにずれが生じる(Fig. 2)。そのためレーザー距離計の測定値と光学ステージの位置から測定ポイントの3

[#] sawamura.masaru@qst.go.jp

次元位置に変換するためには、レーザー距離計の高さずれ、長さずれ、さらに回転ずれを求める必要がある。そこでスポークの代わりに既知形状の円筒を使って校正を行った。垂直回転と上下、左右位置を変えながら測定を行っていく。このとき円筒の回転を追加することにより、円筒中心と水平回転中心のずれも校正することができる。

測定結果と円筒とのずれが最小になるようにパラメータを最適化し、高さずれ、長さずれ、さらに回転ずれを求める。

円筒への入射の場合、左右位置、鉛直回転位置によってはレーザーが法線入射にならず、角度を持って入射するようになる。入射角度と測定誤差との関係を Fig. 3 に示す。概ね±0.2 mm に収まっているが、入射角度が小さくなるほど、誤差が小さくなる傾向がある。そこでレーザー距離計からのレーザーを測定ポイントにできるだけ垂直に入射するようにする。

そのため測定ポイントと既知の近傍2点から測定ポイント平面の法線を求め、法線方向からレーザーが入射するように光学ステージを動かすようにした。

ただし、光学ステージの移動可能範囲の関係で測定が困難な場所(特にスポークの端部およびボア付近)があり、測定結果には入射角度が大きい、測定できた点も含まれている。

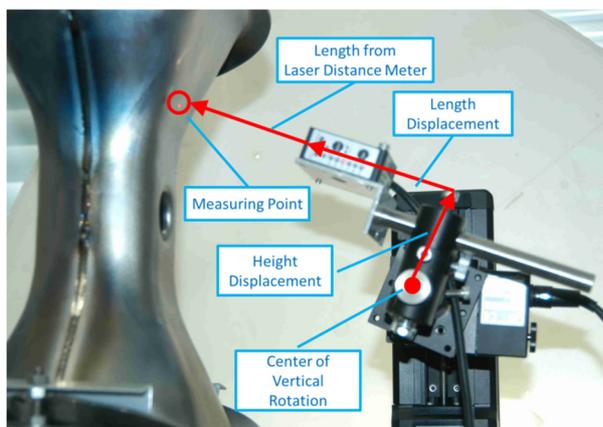


Figure 2: Calibration of the position of the laser distance meter from the center of vertical rotation.

3. 形状測定結果

測定データについて設計値との比較を行った。設計値に関しては CAD データとして STL 形式を用いた。STL データは3次元形状を三角形の集合体として表現したもので、各頂点の座標とともに法線ベクトルの情報も含まれている。この法線ベクトルを用いて、測定点から各三角形への垂線を求め、垂線が三角形内で交わる三角形を探し、その時の垂線長さが設計値からの差となる。各測定点を直線移動3軸、回転移動3軸で変換して、垂線長さの2乗和が最小になるように最適化する。これらの計算には EXCEL を使い、最適化も EXCEL のソルバーを用いた。数ミリ間隔で測定すると、数万点の測定点となるため、計算時間短縮のため、形状の代表点を抽出して変換、最適化を行った。

これまでに EBW を行ったフルスポークは2種類ある。1つはビームパイプ部分のみを溶接し、側面部を溶接し

ていないビームパイプありスポーク(BP ありスポーク)、もう1つはビームパイプがなく、スポークの側面のみを溶接したビームパイプなしスポーク(BP なしスポーク)である。

BP ありスポーク形状の測定結果を Fig. 4 に示す。赤い部分は設計形状より外側に、青い部分は内側にある点である。スポークの側面部分と端部が広がっているのが分かる。

BP なしスポーク形状の測定結果を Fig. 5 に示す。BP ありスポーク形状と同様に側面が広がっているが、ビーム軸方向は全体として縮まっているのが分かる。これは溶接縮みの影響である。

ビーム軸に沿ってスポークの長さ方向に切ったボア付近の断面について、BP ありスポークの測定値を Fig. 6 に、BP なしスポークの測定値を Fig.7 に示す。中央部分のビーム軸方向の厚さは BP ありスポークで 77.09mm であり、設計値の 76.7 mm より 0.39 mm 厚くなっている。溶接縮み分として 0.5 mm 厚くしていたので、ほぼ同じである。

BP なしスポークの厚さは 75.64 mm と設計値より 1.06 mm 薄く薄くなっている。溶接縮みの想定値 0.5mm を含めると溶接縮みは 1.56 mm と、想定より大きな縮みがあったと考えられる。ただし、ビームパイプがある場合はビームパイプ部分が固定されるため、側面溶接での縮みの量も変わることも考えられる。

また、スポークの正面と背面に少し傾きがあり、角度は BP ありスポークで 0.31 deg (5.4 mrad)、BP なしスポークで 0.41 deg (7.1 mrad) であった。

スポークのビームパイプ部分の断面図を Fig. 8(BP ありスポーク)と Fig. 9(BP なしスポーク)に示す。設計値に比べて、BP なしスポークでは 0.70 mm 広く、BP ありスポークでは 1.45 mm 広がっている。BP ありスポークでは側面の溶接を行っていないため、プレス加工のスプリングバックの影響で広がっている。

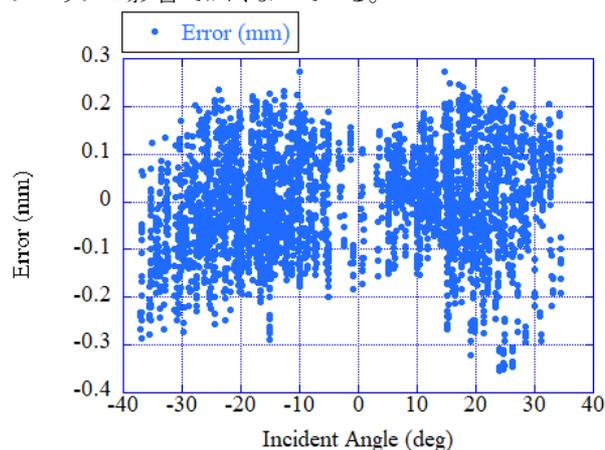


Figure 3: Measurement error as a function of incident angle of the laser distance meter to the cylindrical pipe.

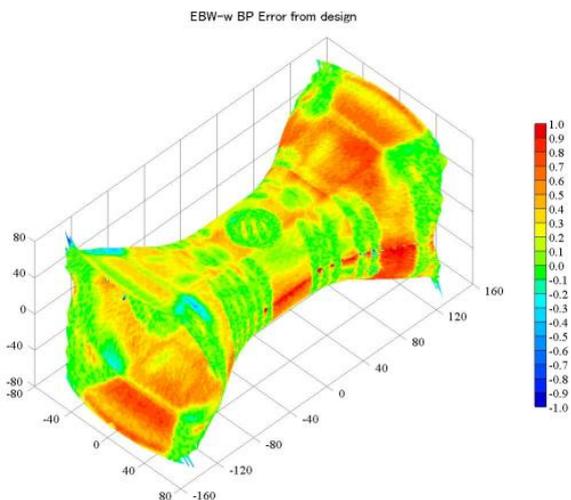


Figure 4: Measured position displacement of full-spoke shape with the beam pipe compared to the design shape.

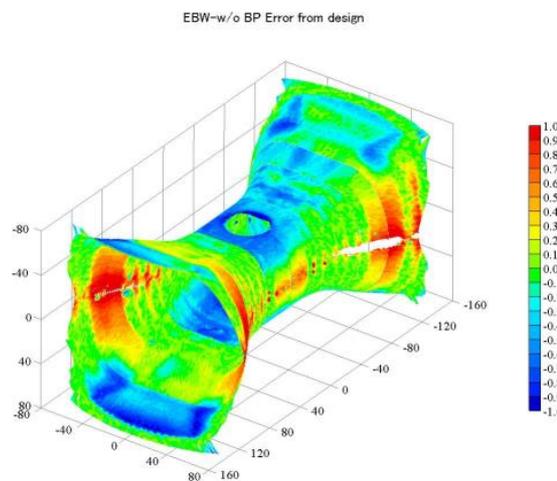


Figure 5: Measured position displacement of full-spoke shape without the beam pipe compared to the design shape.

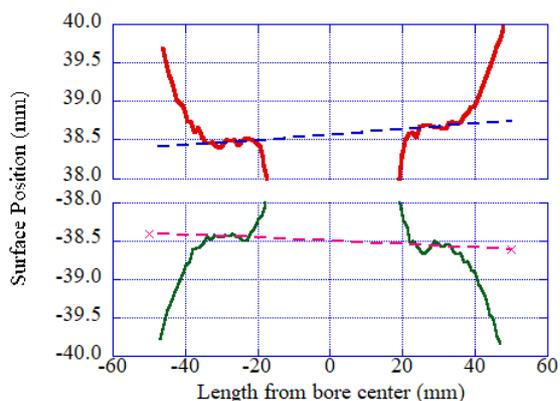


Figure 6: Measured spoke shape around the bore in a cross-section along the longitudinal direction for the spoke with beam pipe.

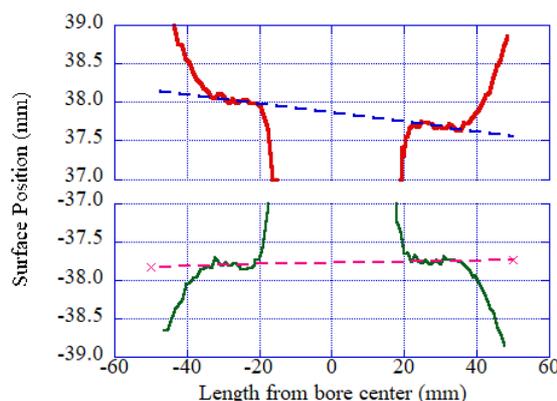


Figure 7: Measured spoke shape around the bore in a cross-section along the longitudinal direction for the spoke without beam pipe.

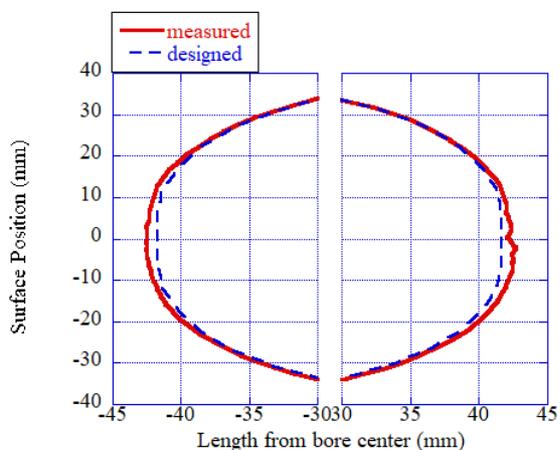


Figure 8: Measured (solid line) and designed (broken line) shapes of spoke sides around the bore center for the spoke with beam pipe.

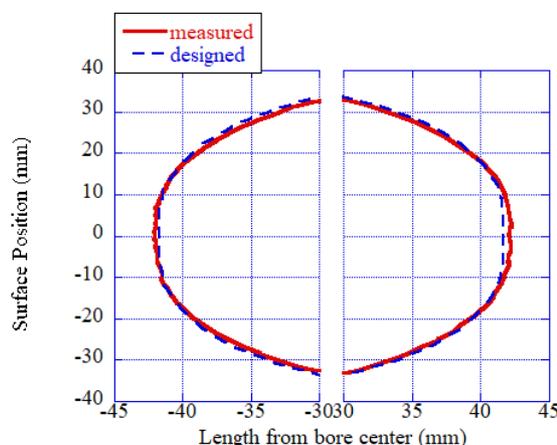


Figure 9: Measured (solid line) and designed (broken line) shapes of spoke sides around the bore center for the spoke without beam pipe.

4. まとめ

EBWしたフルスポークの3次元形状測定を行った。

側面部分と両端部分の広がり大きいことが分かった。

これらの原因として考えられるのは、スポット溶接する際に治具による形状補正が不十分で広がったままスポット溶接を行い、その影響が本溶接に引き継がれたことが考えられる。

また溶接縮みはBPなしスポークで1.56 mmと想定より大きな縮み量となったが、ビームパイプがあると縮み条件も変わってくることが考えられるので、BPありスポークでの側面溶接との結果を比較する必要がある。

参考文献

- [1] M. Sawamura *et al.*, “ERL超伝導スポーク空洞製作の現状”, Proc. of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, 2015, pp. 583-586.
- [2] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞開発の現状”, Proc. of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, 2017, pp. 949-952.
- [3] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞の電子ビーム溶接試験”, Proc. of 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, 2019, pp. 709-711.
- [4] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞製作のための電子ビーム溶接試験”, Proc. of 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2020, pp. 317-319.