

# MEASUREMENT OF THE INNER 3D SHAPE OF ACCELERATOR CAVITIES

Kazuhiro Enami<sup>1,A)</sup>, Tatsuya Kume<sup>A)</sup>, Yasuo Higashi<sup>A)</sup>, Kenji Ueno<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

We strive to develop a 3D coordinate measuring machine, which can measure the inner shape of an accelerator cavity with a complex shape without contact. Currently, the ILC (International Linear Collider) project is progressing through international collaboration. The major goal of ILC is to produce and investigate Higgs bosons. ILC consists of two linear accelerators facing each other, and will hurl some 10 billion electrons and positrons toward each other at nearly the speed of light<sup>[1]</sup>. The cavity is an important component to accelerate particles to near light speed. A cavity's inner 3D shape influences the accelerating performance. Therefore, it is important to measure the inner 3D shape of a cavity. However, it is difficult to measure the inner shape of cavities with complex shapes. We are developing a highly accurate, inner shape measuring machine using triangulation method.

## 加速管の内部形状の測定

### 1. はじめに

本研究の目的は、超伝導加速管の内面の三次元形状の非接触測定である。

超伝導加速管は、一般的にハーフセルを溶接することで作製されている。ハーフセルの段階ではその形状測定が可能であるが、赤道部を溶接してセルとなった状態ではその内部形状は測定できない。また、現在開発中のシームレス加速管(Fig.1)は、パイプからハイドロフォーミングで一体成型するもので、コスト削減や信頼性向上の利点があるが、最初から最後まで内部形状は測定不可能である。内部三次元形状を得るためには、三次元測定機を用いて外部形状を測定し、これに超音波厚さ測定の数値を加える手法も考えられるが、アイリス部では厚さ測定が困難であることや、三次元測定機での外部形状の測定が困難、時間がかかる。加速管の姿勢変化によるたわみ検出が困難、加速管がジャケット等でおおわれている場合には測定できない。といった問題がある。そこで、画像測定を用いた非接触測定プローブを加速管内に挿入し、内部から直接三次元形状を測定する装置を考案し、開発・測定実験をおこなう。



Fig. 1. Seamless three-cell cavities made by necking and hydroforming (test modules made of copper).

### 2. 測定機の概要

加速管の内部の三次元形状の開発の概要について述べる。目標精度は0.1mmとし、この精度で加速管内部全面を非接触で三次元形状測定する。はじめに1セルの内部形状測定機を作成し、その知見をもとに多連セルの測定装置を開発する。

開発の流れをFig.2に示す。まず、内壁までの距離測定が可能な測定ヘッドを作成し(1<sup>st</sup>)、これを回転させて断面測定(2<sup>nd</sup>)、さらに回転軸に垂直に駆動して三次元測定(3<sup>rd</sup>)という手順となる。

最終的な加速管測定装置の概要はFig.3のようになる。加速管を固定し、測定ユニットを挿入して測定する。据え付けられた状態の加速管でも測定可能、重力によるたわみも測定可能という利点がある。

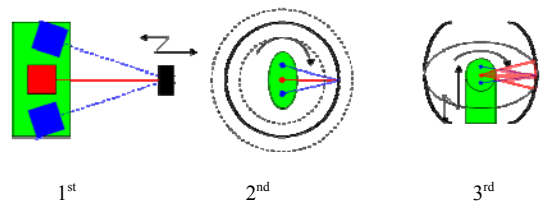


Fig. 2. Development Plan (Red: laser, Blue: camera)

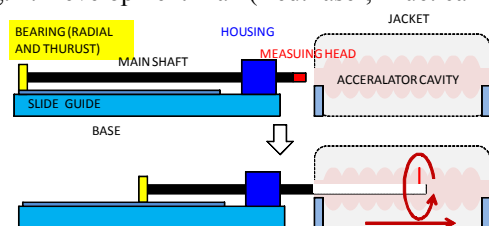


Fig. 3 9-cells measuring system

<sup>1</sup> E-mail: enami@post.kek.jp

### 3.1 セル測定機

はじめに、1セルの測定機を開発する。

測定原理として、カメラ-レーザを用いた三角測量法を採用する。本方法は、非接触測定が可能で測定範囲が広く、表面物性に左右されない利点がある。

三角測量は、原理的にカメラからレーザまでの基線長が長いほど精度が向上する。しかし、内部形状測定のためには測定システムを加速管内部に挿入する必要がある。このため基線長を大きくとり精度を上げることが困難である。そこで、短い基線長でも精度を維持するため、サブピクセル演算と誤差キャンセリングを採用した<sup>[2]</sup>。誤差キャンセリングとは、レーザをはさんで対向するカメラの測定誤差は負の相関があることを利用して、誤差をキャンセリングするものである。また、機械のパラメータを決定するため、円筒アーティファクトを用いたキャリブレーションを提案した<sup>[3]</sup>。本章では、シングルシームレス加速管の三次元形状測定をおこなう。作成したシングルセル測定装置をFig.4に示す。構造は、縦型門型構造を採用した。回転・直進が可能なボールスプラインを主軸とし、先端に設置した測定ユニットをセル内に挿入して測定する。

アイリス部から挿入可能な測定ユニットを作成した。カメラの光軸をミラーで折り曲げることでサイズに抑えながら、基線長を大きくとっている。

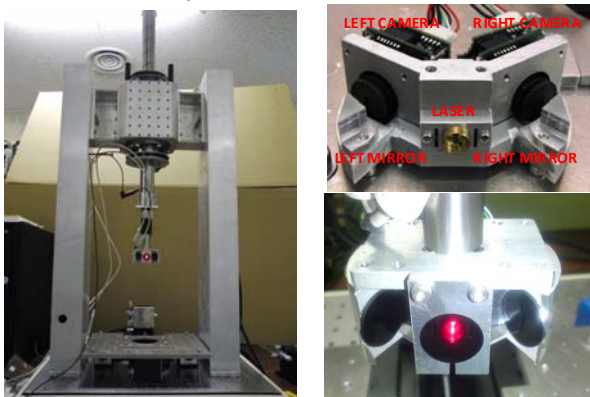


Fig. 4. Left: One-cell measuring machine (Left). Measuring Head (Top: bare, Bottom: with ND filter and light shielding cover).

測定の手順は以下ようになる

1. 測定ユニットの校正：測定ユニットの作成時に一度実行する。
2. アーティファクト校正：測定ユニットを測定機本体に取り付けた時点で実行する
3. セルの三次元測定

シングルシームレスキャビティの1セルの測定実験をおこなった(Fig.5)。Fig.6 に測定結果を示す。格子点が欠けている箇所は、測定に失敗した箇所である。これは、レーザスポット像が正しくカメラで捉えられないためにおこる現象である。取得に失敗した点はあるものの、シームレス加速管の内部形状は取得できている。

Fig.7 は、測定信頼性をマッピングしたものである。本測定は誤差キャンセリングのためカメラを2台装備しており、両カメラの距離出力の差が小さければ信頼性が高いといえる。出力差の絶対値 $d$ をとり、以下のようにマッピングした。

- 青： $0\text{mm} < d < 0.2\text{mm}$
- 緑： $0.2\text{mm} < d < 0.4\text{mm}$
- 黄： $0.4\text{mm} < d$
- 赤：片方測定不能
- 欠：両方測定不能

なお、本システムは誤差キャンセリングシステムを採用し、左右カメラの誤差がキャンセルされるようになっている。従って、両カメラの出力差が大きい事が、必ずしも最終的な出力の誤差が大きいことを意味しない。ただし、片方測定不能の赤い格子の点では、出力誤差も大きくなる。軸方向に対する半径の増加率 $\Delta R/\Delta Z$ が大きくなるほど、測定の信頼性が落ちていることがわかる。赤道部とアイリス部では信頼性が高いことがわかる。このため、同軸度等は高精度で測定できることが期待できる。



Fig. 5. Seamless cavity (Nb/Cu clad) left: inside of the cavity

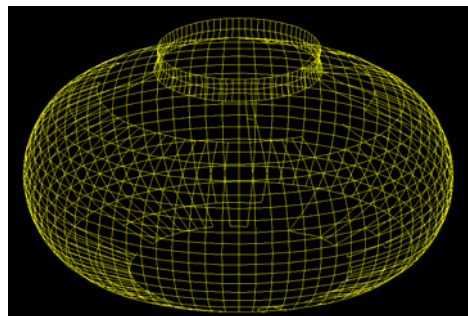


Fig. 6. Measured 3D data (Null points are failed to be measured)

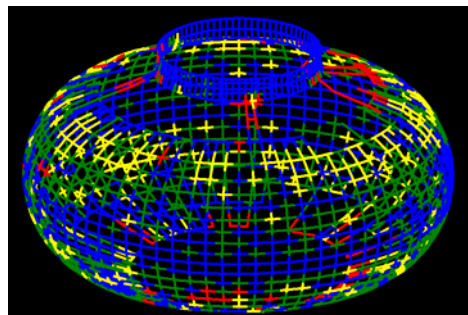


Fig. 7. Reliability map (Blue:  $d < 0.2\text{mm}$ , Green:  $0.2\text{mm} < d < 0.4\text{mm}$ , Yellow:  $0.4\text{mm} < d$ , Red: One-side Measured, Null: Failed to measure)

#### 4. 多連測定機の開発とその問題点

1セル測定機の軸をFig.3のように長くすることで、多連セルの測定が可能となる。しかし、横置き測定で生じる大きな問題として、測定の基準となる駆動回転軸と測定ヘッド間の位置姿勢が変化するため、測定誤差を生じる事が挙げられる。変位量は目標測定精度0.1mmと比較して大きいため、対策が必要となる。

測定ヘッドの変位は、静的な変位と、測定中に振動する動的変位に分けられる。また、静的変位は繰り返し性のある成分とない成分に分けられる。このうち、繰り返し成分は、事前のキャリブレーションにより補正が可能である。しかし、繰り返し性のない静的変位及び動的変位はキャリブレーションのみでは補正できない(Table 1)。このため、測定中は、位置姿勢を常にモニタし補正する必要がある。

Table 1 Classification of Displacement of the Measuring Unit

	静的変位		動的変位
	あり	なし	なし
繰り返し	あり	なし	なし
原因	重力による軸のたわみ	測定器の設置姿勢誤差	機械振動 主軸送り, 回転による重心移動
キャリブレーションによる補正	○	×	×

#### 5. 測定ヘッドの位置姿勢検出実験

測定ヘッド位置姿勢検出装置として、Fig.8に示す装置を考案した。受光ユニットを用意し、測定ヘッドからレーザを照射する。受光ユニット内部で、レーザはビームスプリッタで分割され、異なる光路長を経てPSD1、PSD2でそのスポット位置を検出される。

軸方向をZ座標にとり、測定ヘッドの座標をH( $hx, hy, hz$ )、仮想のPSD上のレーザスポット座標を $P_1(px_1, py_1, pz_1)$ 、 $P_2(px_2, py_2, pz_2)$ とする。ここで $pz_1, pz_2$ はPSDのZ座標である。主軸送り量を $hz$ とすると、既知の $pz_1, pz_2$ 及び観測値 $px_1, py_1, px_2, py_2$ から $hx, hy$ を求めることができる。また、姿勢は $(P_1 - P_2) / |P_1 - P_2|$ で求められる。測定ヘッドの位置姿勢と、測定点座標との関係は、位置姿勢を検出しながら円筒アーティファクトを用いて校正することで求めることができる。測定点を0.1mmの精度で測定するためには、測定ユニットの位置姿勢を、位置0.1mm、姿勢1mradで測定する必要がある。

Fig.9 にレーザによる位置姿勢検出実験の結果を示す。レーザユニットの位置姿勢変化を、400mm離れた検出ユニットで検出したものである。測定誤差はそれぞれ0.1mm、1mradにおさまっており、この位置姿勢変位検出システムは、要求される0.1mm、1mradの精度を持つことを示した。

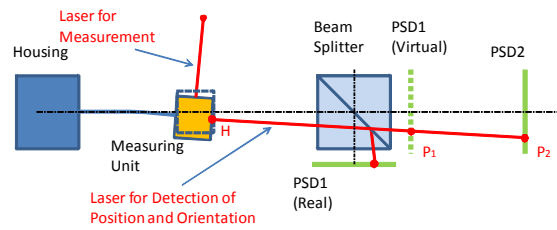


Fig. 8. Position and Orientation Detecting System

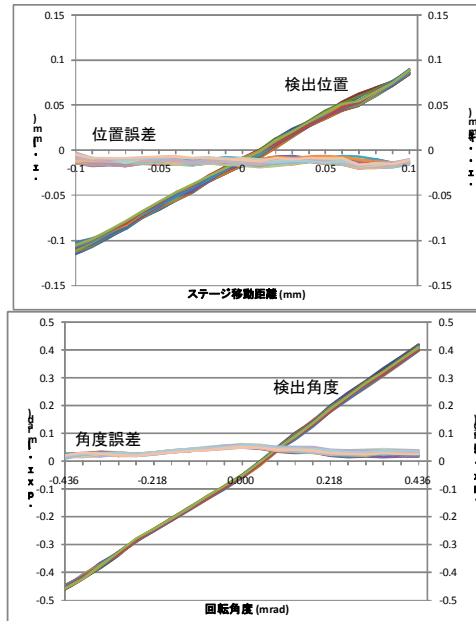


Figure 9 Experiment for Detecting Position and Orientation (Top: Position Bottom: Orientation)

#### 6. 結論・展望

加速管の内部三次元形状測定装置の考案・開発をおこなった。レーザを用いた三角測量法で加速管の内部形状測定が可能であることを示し、1セルの内部形状測定をおこなった。9セル測定のためには、測定ヘッドの位置姿勢モニタリングが必要なことを示し、これに対応するレーザ-PSD位置姿勢検出システムを考案した。また、実験により本システムが有効であることを示した。今後、測定機に組み込んで測定実験をおこなう。

#### 参考文献

- [1] International Linear Collider Communication site: <http://www.linearcollider.org/cms/>
- [2] K.ENAMI, T.KUME, Y.HIGASHI, K.UENO, "Development of inner 3D Shape non-contact measurement system for bellows pipe 3<sup>rd</sup> report", 2007 JSPE spring conference, pp. 1153-1154, Kanagawa, Japan, March. 2007.
- [2] K.ENAMI, T.KUME, Y.HIGASHI, K.UENO, "Development of inner 3D Shape non-contact measurement system for bellows pipe 5<sup>th</sup> report", 2008 JSPE autumn conference, pp. 293-294, Sendai, Japan, Nov. 2008.