

超伝導加速空洞ダンベルの非接触形状測定

DEVELOPMENT OF NON-CONTACT 3D MEASUREMENT SYSTEM FOR DUMBBELL OF ACCELERATOR CAVITIES

江並 和宏 #^{A)}, 山中 将^{A)}

Kazuhiro Enami #^{A)}, Yamanaka Masashi^{A)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We strive to develop a 3D coordinate measuring machine, which can measure the shape of parts of accelerator cavity with without contact and rapidly. 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. 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 shape of the parts of a cavity. We are developing a highly accurate and non-contact shape measuring machine using triangulation method.

1. 緒言

現在, KEK の CFF (Cavity Fabrication Facility, 空洞製造技術開発施設) では, ILC 用超伝導加速空洞の開発をおこなっている。

電子・陽電子を加速するためには Fig.1 に示す形状の加速空洞を使用する。加速管の加速勾配などの性能は, 空洞内部の形状によって左右される。全体形状の変化や, クラック・突起部の発生は加速勾配の悪化を招く。

現在開発中の加速空洞の作製方法を以下に示す。まず, 底の抜けたお椀状のハーフセルをニオブ板からプレス成形する(Fig.2)。ついで, アイリス部(お椀の底)同士を電子ビーム溶接してダンベル形状を作成する(Fig.3), 最後にダンベルの赤道部同士を溶接し, 両端のエンドグループ等を溶接して加速空洞とする。基本部品となるハーフセルを設計値通りの形状を均一にプレス成形することは困難である。これは, 材料コストのためプレス時の”みみ”を大きく取ることは困難なことや, その物性や異方性に起因する。また, ダンベル等の溶接によりセルには歪みが発生する。こうした状況から, 大量生産においてはプレス時等の品質管理が重要になる。この時, CMM で全数測定することは以下の点で現実的ではない。

- ・接触による傷がつく
- ・測定用セッティングの手間がかかる
- ・測定時間がかかる
- ・ジグによる変形が考えられる。

そこで, 本研究では, ハーフセル・ダンベルといった加速管部品の非接触三次元形状測定装置の開発を目指す。

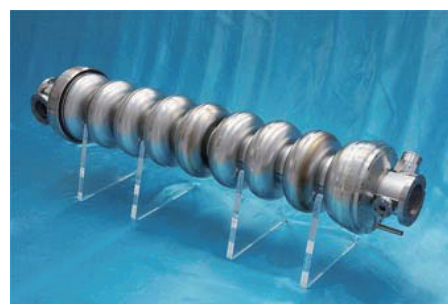


Figure 1 Accelerating cavity

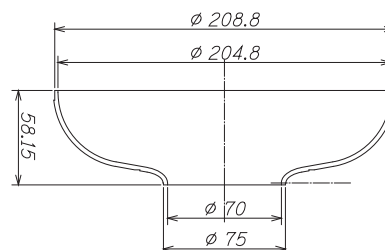


Figure 2 Halfcell and dumbbell

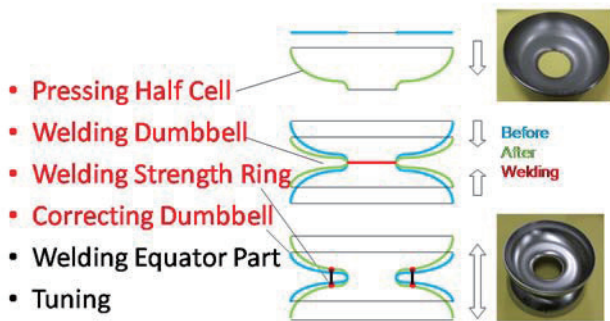


Figure 3 Deformation in process

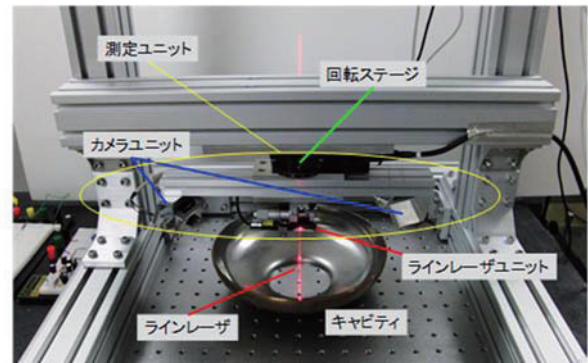


Figure 4 Measuring system

2. 測定機の仕様と測定原理の決定

目標とする測定機に求める条件を以下に示す

- 非接触で測定する.
- 測定が容易であり, 専門の人間を必要としない.
- 測定時間が短い.
- 測定用セッティングが容易である.
- ジグによる固定の必要がない.

そこで, ラインレーザを用いた三角法による形状測定を採用し, 現在別途開発中の内面形状測定装置の知見を応用することとした.

3. 測定機の構成

Fig.4 に開発した測定装置を示す. 測定ヘッドはレーザユニットとカメラからなり, ラインレーザにそった 2 次元形状測定が可能である. ラインレーザとして, 360° 方向に照射可能なリングレーザを採用した. これは円錐ミラーを用いてリング状にレーザを照射するものである. これにより, 回転楕円体に近い測定面への均一な光量での照射が可能になる. また, 測定ヘッド回転軸上にレーザを当てることのできるため, レーザのアライメントがしやすい利点もある.

形状測定には乱反射成分を利用してすることとする. 測定される表面は, 加速空洞製造の工程として, 化学研磨を行うため, 粗面から準鏡面と幅がある. 化学研磨後も, 弱くはなるが乱反射成分は帰ってくるため, これを用いることとした.

この測定ヘッドを回転させることで 3 次元測定をおこなう. 現状ではラインレーザの片側だけの測定のため, 1 回の測定にほぼ 1 回転が必要になるが, 最終的にはカメラを増設して両側を同時測定出来るようにする. これにより半回転で 1 ハーフセル測定出来るようになる. 測定ヘッド下部はセルの上端と干渉しない構成になっているため, 横から滑らせてセット可能である. これにより, プレスしたハーフセルをその場で容易に検査することが可能となる.

4. 測定手順

本測定機の実験手順を以下に示す. まず, ハーフセルを設置し, 測定ヘッドを回転させながら単位角度毎に画像を取得する. このとき, セルをジグ等がっちり固定する必要はない.

カメラで取得した原画像から, 中心線検出をおこない, 次いでレーザ切断面上の 2 次元座標に変換する. これを各角度においておこなうことで 3 次元形状を測定する. 本装置でハーフセルの測定実験を行った. 測定時の取得映像を Fig.5, 構成した 2 次元断面を Fig.6 に示す. 2 次元断面データの色は Z 座標 (高さ) を示している. また, Fig.7 に 1 断面の測定結果とその設計形状からの誤差を示す. X 方向, Z 方向及び法線方向の誤差を求めることで, プレスの改良や品質管理, 溶接ひずみの監視を行うことが可能である. Fig.8 に 3 次元形状データを示す. これらから, 本装置を用いてハーフセル形状が測定できていることを示した.

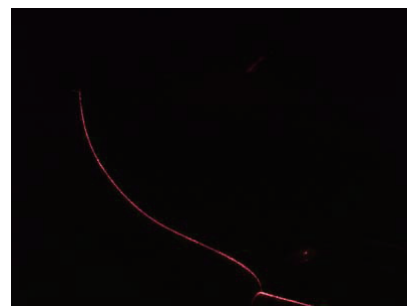


Figure 5 Line laser image

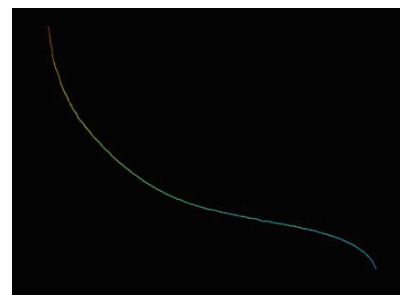


Figure 6 2D profile

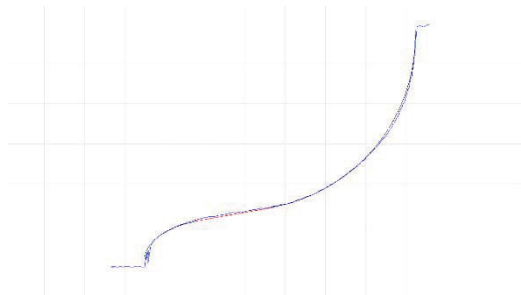


Figure 7 Comparison of measured shape and design

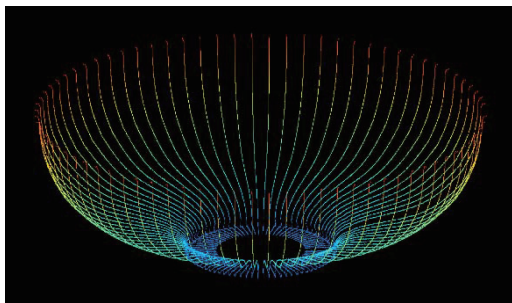


Figure 8 3D shape of a half cell

5. 測定実験

測定精度の評価のため、CMM での測定結果との比較をおこなった。Fig.9 は設計値からの法線方向のずれの測定結果を CMM 測定と比較したものである。各々90° 毎に4プロファイル測定している。

測定結果は、ほとんどの領域で CMM 測定結果との誤差は 0.1mm に収まっている。しかし、X 面の測定では、一部のデータに 0.4mm 程度の誤差が生じている。これは、レーザと測定面、カメラの位置関係の変化のため、測定画像のレーザ輝度変化が大きく変わってしまい、カメラ上のレーザラインの輝度が強すぎてしまうためサチュレーションをおこし、中心検出がうまく行っていないことに起因する。そこで、サチュレーションに対応した中心検出アルゴリズムを開発し、形状算出をやり直した。結果を Fig.10 に示す。CMM 測定（紫線）とレーザ測定（水色線）で結果がずれている箇所があるが、改善後のレーザ測定データ（赤の十字）では、CMM の測定結果と一致しており、CMM との誤差は 0.1mm 以下に抑えることができた。

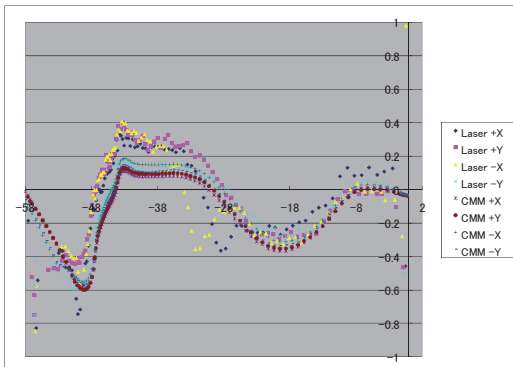


Figure 9 Measurement Result

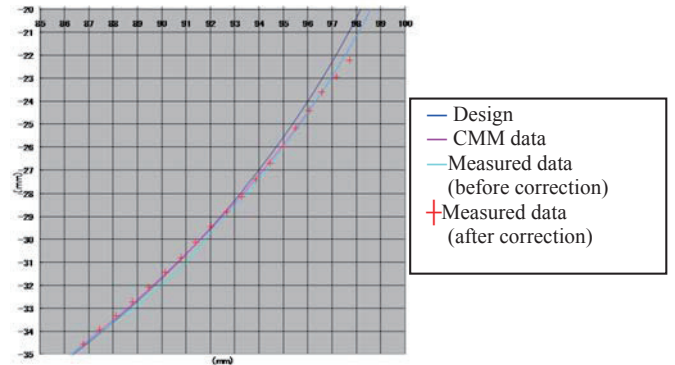


Figure 10 data comparison

6. 測定装置の改良

もともとハーフセル測定を目的として本研究は発生しているが、現在はダンベル測定までも目的としている。ダンベルは、溶接時に CP 処理をするためにより鏡面に近くなり、測定条件が悪化している。このため、上記のようなソフトウェアによる対策ではマージンがないため測定の困難さが増していくことになる。そこで、装置のハードウェア改良を行うこととした。カメラは画素数を向上させ、測定プログラムから動的にゲイン・露出を変更させることのできる機種に変更し、レーザも青色レーザに変更してスペckルノイズの低減、輝度の向上を果たした (Table 1)。Fig.11 に改良型測定装置の概要を示す。

Table 1 Improvement of components

		Old version	Improved version
Camera	Resolution	1600x1200	2592x1944
	Color	Color	Monochrome
	Gain adjustment	manual	Control by software
	Lens	Small lens for evaluation	C-mount lens (F-number 6)
Laser	Wave length	635nm	406nm
	Laser shape	Ring	Line

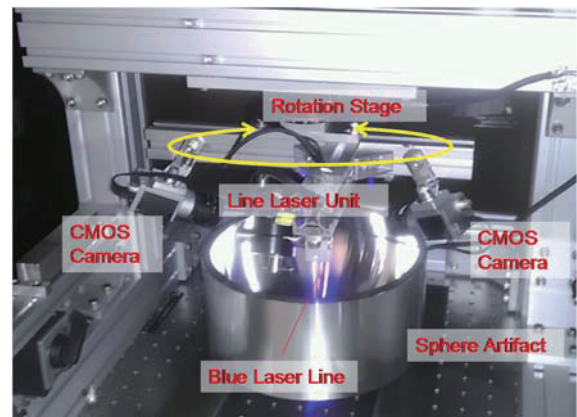


Figure 11 Measuring System (After Improvement)

7. 測定実験

装置改善の効果を確かめるため、改良した装置を用いてダンベル測定実験をおこなった。ダンベルは溶接時に化学研磨をおこなう。このため、Fig.2に示したようにプレスされた段階のハーフセルよりも鏡面に近くなっており、測定難度が増している。このため、測定対象として選択した。カメラ上のレーザ輝度が場所により大きく変化するため、1枚の画像のみから測定する場合には輝度不足による測定不能点もしくはサチュレーションによる測定精度悪化点が生じる。そこで、ゲインを変化させた2枚の画像を取得し、測定箇所ごとに最適な画像を選択した。測定結果を Fig.12 に示す。縦軸は設計値からの法線方向誤差である。CMM の測定結果との誤差を Fig.13 に示す。グラフ左側のアイリス部まで含めて全測定点にわたって測定誤差が 0.1mm 以下に収まっていることが確認でき、ダンベル形状が正しく測定できていることが示されている。

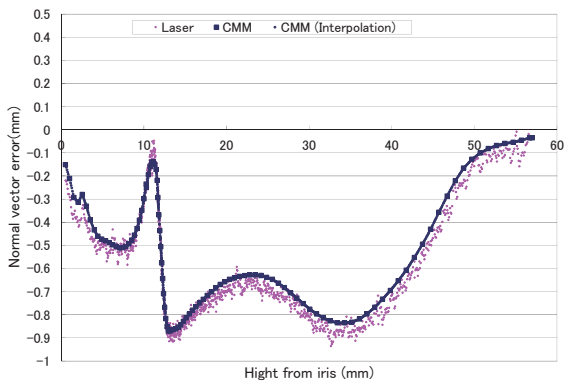


Figure 12 Measured error from design shape

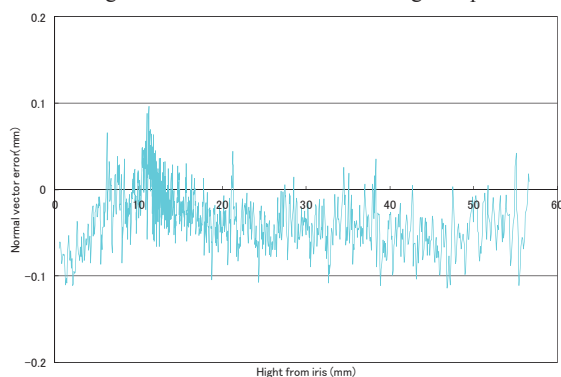


Figure 13 Difference from CMM data

8. 結言

CFF における加速空洞の開発及び製作のため、加速空洞の開発及び製作工程におけるハーフセル・ダンベル測定の意義について説明し、その要求について述べた。この要求に従い、ハーフセル形状測定装置を考案・開発した。準鏡面や測定困難部の測定に対応するため、装置の改良をおこなった。これにより準鏡面ダンベルを、アイリス部まで含めた全面にわたって 0.1mm 以下の精度で測定する事に成功した。この結果、本装置がハーフセル及びダンベル測定に有効であることが示された。

参考文献

- [1] K.ENAMI, T.KUME, Y.HIGASHI, K.UENO, "Development of Non-contact 3D Measurement System for Parts of Accelerator Cavities", euspen 11th International Conference, pp. 68-71, Como, Italy, May. 2011.