Development of Non-contact 3D Measurement System for Parts of Accelerator Cavities

Kazuhiro Enami[1,A)], Masashi Yamanaka[A)]
[A)] 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 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.

加速管部品の非接触形状測定

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性能は，空洞内部の形状によって左右され，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，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．

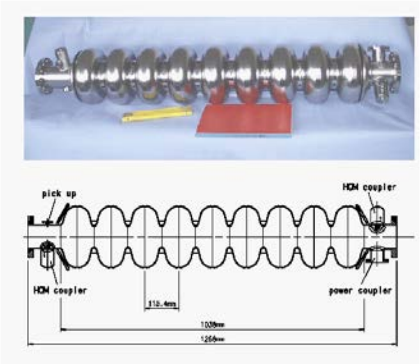

Figure 1　Accelerating Cavity

Figure 2 Halfcell and Dumbel

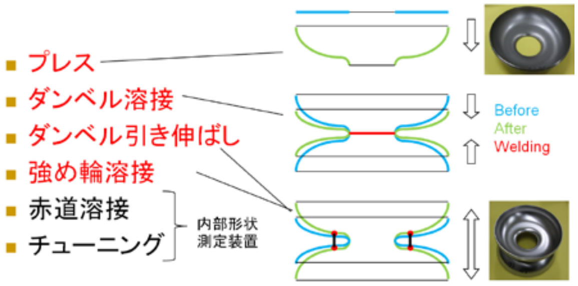

Figure 3 Deformation in process

enami@post.kek.jp

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.3 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ができるため，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．

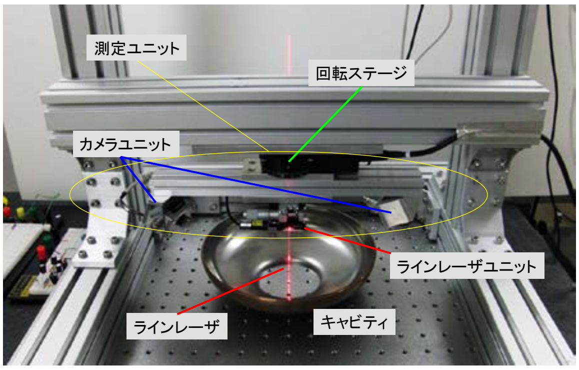

Figure 4 Measuring System

4.測定実験

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，セルをジグ等で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．

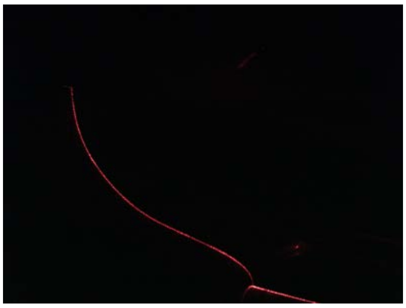

Figure 5 Line Laser Image

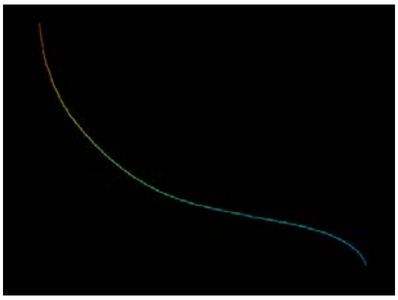

Figure 6 2D Profile

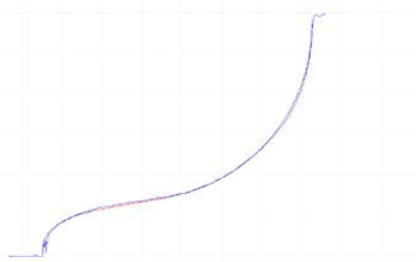

Figure 7 Comparison of Measured shape and design

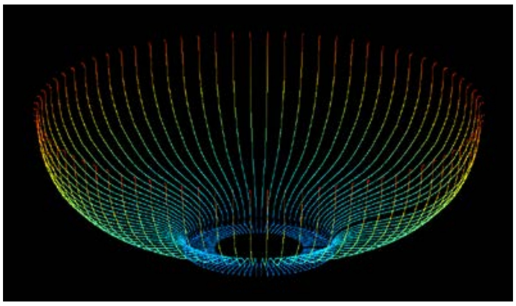

Figure 8 3D Shape of a Half Cell

5. 誤差の原因と対策

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．

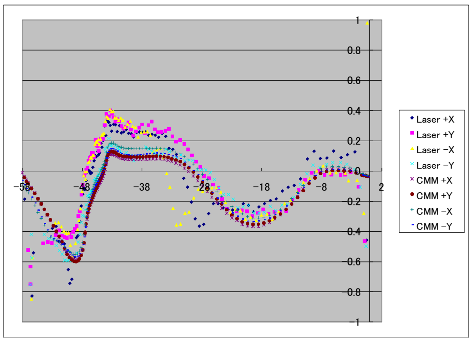

Figure 9 Measurement Result

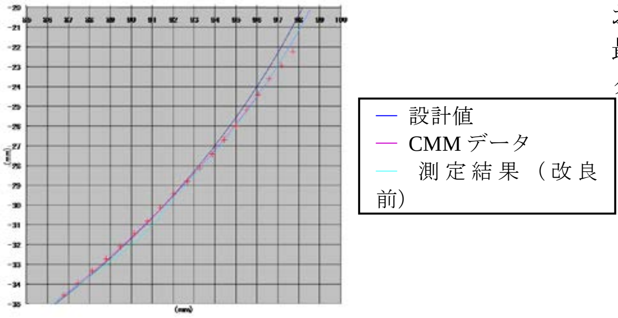

Figure 10 Improved Data

6.測定機の改良

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ックルノイズの低減，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

		旧	新
カメラ	解像度	1600x1200	2592x1944
	カラー	カラー	モノクロ
	ゲイン調整	手動	プログラム制御
	レンズ	評価用小型レンズ	C マウントレンズ (f 値 6mm)
レーザ	波長	635nm	406nm
	形状	リング	ライン

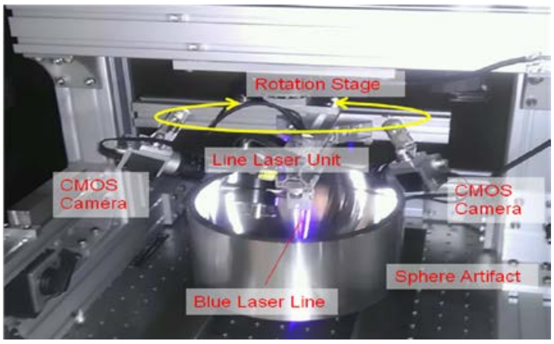

Figure 11 Measuring System (After Improvement)

7.改良された測定アルゴリズム

測定対象上のライン輝度に応じて複数の画像を取得する．ここでは，明画像と暗画像の 2 枚を例にとる．まず，明画像から領域を抽出する(Fig.12)．これは，暗画像ではラインが消える部分があるためである．次に，明画像と暗画像それぞれで中心検出をおこなう（Fig.13，Fig.14）．

最後に，両データから，正しく検出できているデータのみ抽出して貼り合わせる．

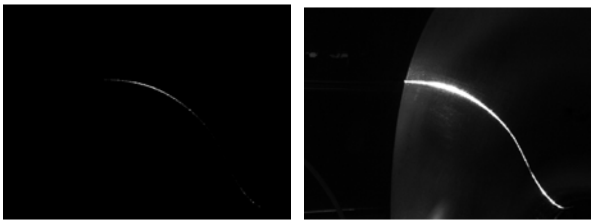

Figure A Dark Image and Bright Image

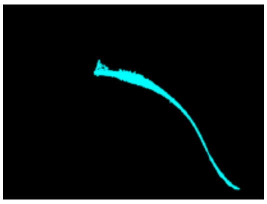

Figure 12 Region extraction from the Bright Image

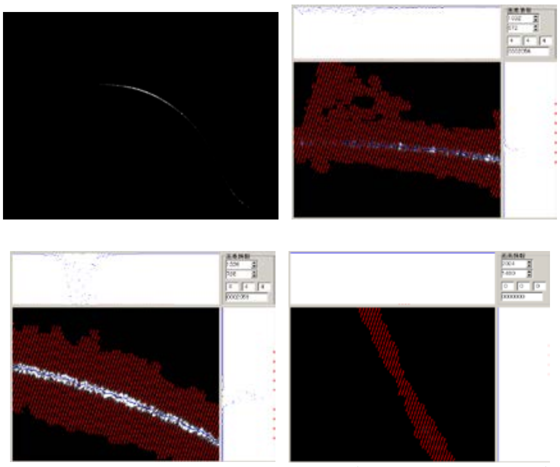

Figure 13 Extracted Center Line（from Dark Image）
Blue：Center Line　Red：Profiling Direction

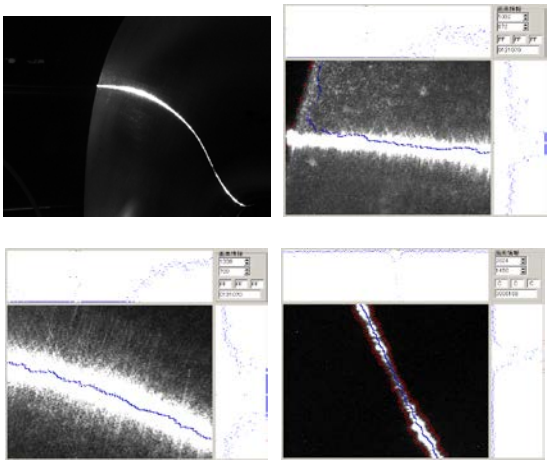

Figure 14 Extracted Center Line（from Bright Image）
Blue：Center Line　Red：Profiling Direction

8. 測定実験

制作途中であるが，新測定機の測定実験をおこなった．Fig.15 に Cu Tesla-like cavity の測定結果を示す．また，Cu-Nb clad Cavity の測定結果を Fig.16 に示す．キャビティの 3D 形状が測定できている．底面のデータの存在しない部分は，キャビティを載せた V ブロックの V 字部分である．く．

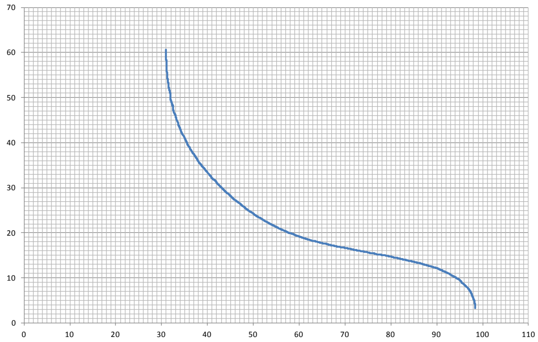

Figure 15 2D Profile

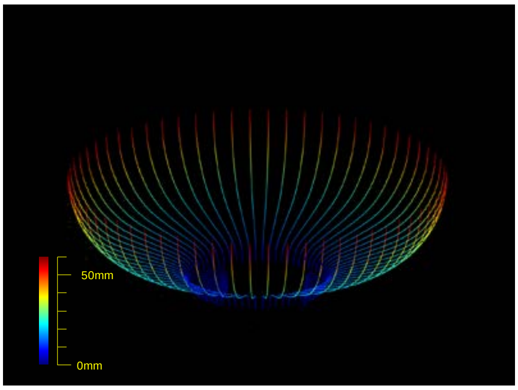

Figure 16 3D Measurement Data

9. 現状まとめ

測定精度・信頼性向上のため，測定機のハード・ソフト改良をおこなっている．改良後の測定機において三次元測定が可能である事を示したが，悪条件下での測定全面での精度保証が終了していないため，今後ダンベルでの精度の検証をおこなっていく．

10. 結言

CFF における加速空洞の開発及び製作のため，ハーフセル測定測定装置を開発をおこなっている．現在，三次元形状の取得まで可能となっている．ダンベル測定に対応するためハードウェア・ソフトウェアの改良中であり，最終的な高精度・高信頼性での測定実現を目指す．