

## LONG DISTANCE STRAIGHTNESS ALIGNMENT BASED ON SOFTWARE DATUM

Tatsuya Kume<sup>1A)</sup>, Masanori Satoh<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>, Kazuro Fufukawa<sup>A)</sup>, Eiki Okuyama<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

1-1 Tegata gakuen-machi, Akita, 010-8502

### Abstract

It is necessary for KEK e-/e+ Injector (Linac) to align with accuracy of better than 1mm for several 100m of distance in order to achieve higher stability in the beam injection to the storage ring located its downstream; however, it can't be achieved with any conventional methods. On the other hand, profile measurements based on Software Datum, which eliminate errors in measurement through data processing, are considered to have advantages for long distance measurement. Here, profile measurement using a level, which is most fundamental in Software Datum, is adopted for evaluating the Software Datum to long distance straightness alignment, considering the alignment as profile measurement. The slope in profile for the base plate of the Linac can be detected with reproducibility of  $14\mu\text{rad}$  ( $\sigma$ ). It shows that shape reproducibility of better than 1mm ( $2\sigma$ ) can be achieved for both distance of 500m with sampling interval of 2m and distance of 10km with sampling interval of 10cm. It follows that the measurement using the level can be applied to both the Linac and ILC for straightness alignment.

## ソフトウェアデータムに基づく長距離における高精度な真直度評価方法

### 1. 緒言

KEK電子陽電子入射器 (Linac) <sup>[1]</sup>では現在、下流の蓄積リングの高度な安定化を達成するために、電子・陽電子ビームの同時入射運転の開発が行われ、それに伴い、数100m程度の長距離における、サブmm、もしくは、それ以上の精度でのアライメント技術の確立が望まれている。

一方、高精度な形状測定分野において、データ処理などのソフトウェア的な手法により、測定時に加わる走査誤差などの影響を取り除くことで、実在する形状基準の精度に影響されることなく、より高精度な形状測定の実現を目指す、ソフトウェアデータムに基づく形状測定法が検討されている。<sup>[2]-[4]</sup>一般に、長距離の形状測定では、形状基準の持つ精度

が、達成可能な形状精度を決定するものと考えられ、形状基準の影響を受けない、当該測定法は、長距離における高精度な形状測定に適しているものと、期待される。

我々は、Linacのアライメントを、高精度な形状測定に相当するものと考え、ソフトウェアデータムに基づく形状測定法を適用することにより、求められるアライメント技術を確立することを、目指している。ここでは、最も基本的な水準器を用いた形状測定方法について、実験とシミュレーションに基づいた検討を行った。

### 2. Linacの構造

Linacは、加速用高周波電力を発生し供給する地

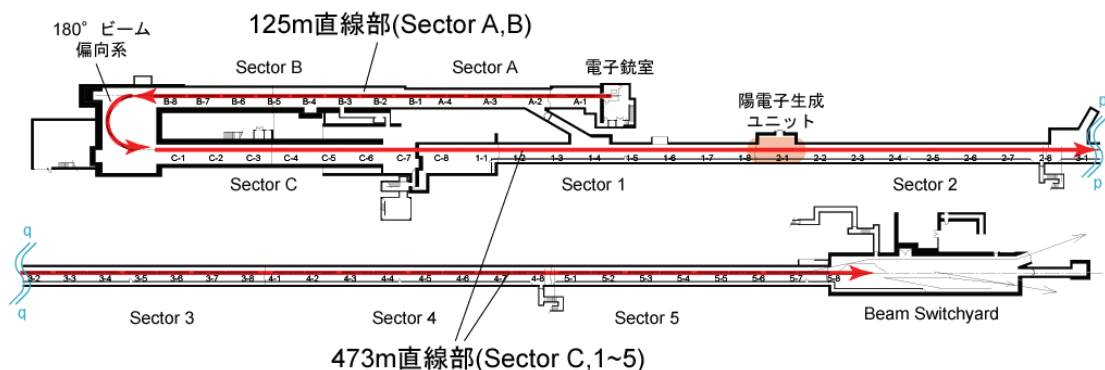


図 1: 加速器トンネルの概要(上面図)、 p-p 部と q-q 部は接続され、一直線になっている

<sup>1</sup> E-mail: tatsuya.kume@kek.jp

上部分のクライストロンギャラリーと、その直下の地下に位置する、堅牢なコンクリート製の加速器トンネルから成り立つ。ここでは、加速器トンネル内に設置され、電子、陽電子ビームの加速に直接関わる、高周波加速空洞(加速管)やビーム収束電磁石などの機器のアライメントを、検討の対象とする。

図1に、加速器トンネルの概要を示す。Linacは、前段の全長125mの直線部(セクターA,B)と、後段の全長483mの直線部(セクターC,1~5)が、180°ビーム偏向系により接続され、全体で”J”字型をしている。

Linacを構成するA~5の計8つのセクターは、長さ約10mの加速ユニットを、基本単位として構成される。各セクターは、4台の加速ユニットから構成される、最上流のセクターAを除き、8台の加速ユニットにより構成され、それらの全長は約80mとなる。

各加速ユニットでは、長さ約10mの鋼管製のパイプ型架台上に、厚さ15mm、幅460mm、長さ350~950mm程度のステンレス製基準プレートが、2m程度の間隔で、飛び飛びに配置される。基準プレート上には、ビームラインを中心に手前側と奥側に、2本の基準レールが設置される。ビームラインを構成する機器は、基準プレートの上面を、鉛直上下方向の位置基準、奥側の基準レールの外面を、水平方向の位置基準として、据え付けられる。基準プレートと基準レールは、加速ユニット間のアライメント基準として用いられる、4分割フォトダイオードの電気的中心に対して、±50μm程度の精度で、加速ユニットの組み立て時に機械的にアライメントされる。加速ユニットは、Linacの前・後段それぞれについて、専用のレーザパイプ内を飛ばされるレーザ光を基準に、アライメントされる。

### 3. 水準器を用いた形状測定

高精度な形状測定では、高分解能の変位計などを被測定形状に沿って走査しながら、得られる変位計出力から形状を求める、走査型の形状測定法が用いられている。この場合、走査基準などの実在する形状基準(ハードウェアデータム)が、測定精度を制限する。それに対して、2台一組の変位計を用いて、被測定形状の隣接する2点に対する、2台の変位計の変位出力の差分値を読み取ることで、走査誤差の影響を取り除く、2点法や、3台一組の変位計を用いて、被測定形状の隣接する3点に対する、3台の変位計の変位出力の2階差分値を読み取ることで、走査誤差と姿勢変化の影響を取り除く、3点法などが、実在する形状基準の影響を受けない、ソフトウェアデータムに基づく形状測定として、提案されている。<sup>[2]</sup> 2点法は1台、3点法は2台の角度計を用いても、同様の効果が得られる。今回検討する水準器を用いる方法は、前者に相当する。この方法は、ソフトウェアデータムに基づく、最も基本的な形状測定法であり、従来より、高精度な定盤などの真直度測定に用いられている。

図2,3に、水準器を用いた形状測定モデルと、形状導出モデルを示す。ここでは、被測定形状 $f(x)$ の

接線の傾き $a(x)$ を検出することから、測定値は、測定器の走査誤差の影響を受けない。さらに、重力方向を角度基準に用いるため、走査に伴う測定器の姿勢変化の影響も受けない。

水準器は、各測定点 $x_i$ において、被測定形状 $f(x_i)$ の差分形状に相当する、接線の傾き $a(x_i)$ を検出する。このとき、被測定物の形状 $f_m(x_i)$ は、中点公式に基づく数値積分により、 $f_m(x_m) = s \cdot \sum a(x_i)$ のように導出される。水準器の繰返し性を $\sigma_{ma}$ 、サンプリング間隔を $s$ 、測定長を $l$ とすると、導出形状の繰返し性 $\sigma_{LV}$ は、誤差伝搬則に基づき、(1)式のように示される。

$$\sigma_{LV} = \sqrt{s \cdot l} \cdot \sigma_{ma} \quad (1)$$

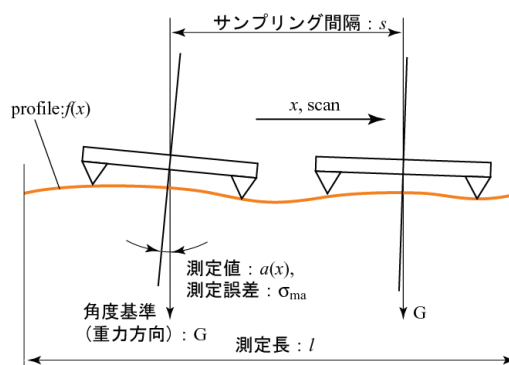


図2: 水準器を用いた形状測定

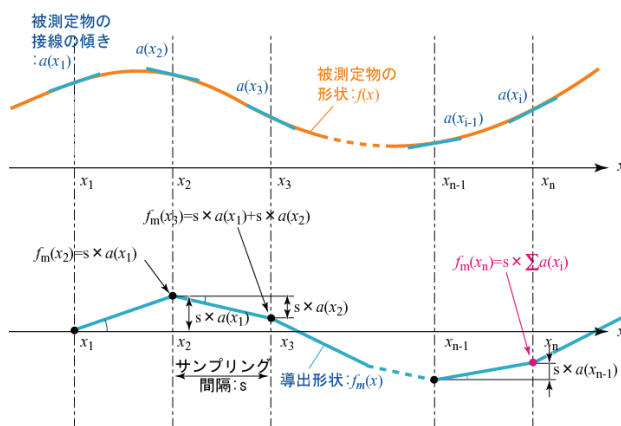


図3: 差分形状からの形状導出

### 4. Linacのアライメント

#### 4.1 基準プレートの形状測定

水準器を用いた形状測定法の、Linacのアライメントへの適用可能性を検証するため、測定範囲±600sec、分解能0.1secのTaylor Hobson社製精密水準器Talyvel4を用いて、実測定環境である加速器トンネル内において、加速ユニットの鉛直上下方向の位置基準として用いられる、基準プレート上面の形状測定を行った。

測定対象として、セクターCを構成する4番目の加速ユニットC-4の中央に位置する、長さ約950mmの基準プレートを用い、基準レールに沿った $l=629\text{mm}$

の区間について、3回の繰返し測定を行った。測定間隔は、 $s=50\text{mm}$ としたが、中央付近と終点付近の障害物を回避するために、一部で異なる測定間隔おとして、全測定点は11点となった。このとき、1回の測定に要する時間は、約3分間であった。

その結果、水準器の3回の繰返し測定値には、平均 $14\mu\text{rad}(\sigma)$ 、最大 $60\mu\text{rad}(\sigma)$ の繰返し性が得られた。これらの測定値をもとに、中点公式により数値積分して得られた導出形状を、図4に示す。3つの導出形状には、 $400\mu\text{m}$ 程度の上に凸の同様の特徴が見られ、平均 $2\mu\text{m}(\sigma)$ 、最大 $5\mu\text{m}(\sigma)$ の繰返し性が得られた。

#### 4.2 差渡し棒を用いたアライメント

各加速ユニットにおいて、基準プレートは、2m程度の間隔で飛び飛びに設置されているため、水準器により正しくアライメントするには、それらの連続性を保証する必要がある。一方、基準プレート自体についても、図4に示されるような、数 $100\mu\text{m}$ 程度のうねり形状や、1mm前後の周期を持つカッターマークが見られ、これらは、 $1\text{mm}(2\sigma)$ でのアライメントを行うにあたり、無視できない。

ここでは、基準プレート間に棒を差渡し、その棒の傾きを逐次検出することで、擬似的に基準プレートの連続性を保証すると同時に、基準プレート自体の持つ形状の影響を緩和する。

#### 4.3 繰返し性を見積もり

(1)式の関係をもとに、基準プレートの形状測定で得られた、水準器の繰返し性 $\sigma_{\text{ma}}=14\mu\text{rad}$ を用いて、サンプリング間隔 $s$ に対する、導出形状の繰返し性 $\sigma_{\text{LV}}$ を求めた。その結果を、測定長 $l$ をパラメータとして、図5に示す。

図より、測定長 $l=500\text{m}$ の場合、隣り合う基準プレート間の傾きを、サンプリング間隔 $s=2\text{m}$ で逐次測定することで、目標とする繰返し性 $1\text{mm}(2\sigma)$ 未満でのアライメントが、可能であることが示される。

図5は同時に、測定長 $l=10\text{km}$ の場合、サンプリング間隔 $s=10\text{cm}$ とすることで、繰返し性 $1\text{mm}(2\sigma)$ 未満でのアライメントが可能であることを、示している。このことは、本方式が、高エネルギー物理学における将来計画である、ILC計画<sup>2</sup>において検討されている、全長 $10\text{km}$ 程度の線形加速器のアライメントに対しても、適用可能であることを示す。

## 5. 結言

KEK電子陽電子入射器に求められている、数 $100\text{m}$ 程度の長距離における、サブ $\text{mm}$ 、もしくは、それ以上の精度でのアライメント技術を確立することを目的として、ソフトウェアデータに基づく最も基本的な形状測定法である、水準器を用いた形状測定法の適用可能性について、実験とシミュレーションに基づいた検討を行った。

その結果、実測定環境において平均 $14\mu\text{rad}(\sigma)$ 程度

の繰返し性で、被測定物の差分形状が測定可能であることが、実験的に示された。

この結果を用いて、導出形状の繰返し性を見積もったところ、測定長 $500\text{m}$ 、サンプリング間隔 $2\text{m}$ で、 $1\text{mm}(2\sigma)$ 未満の繰返し性が得られ、Linacのアライメントへ適用可能であることが示された。

さらに、本方式が、ILC計画において検討されている、全長 $10\text{km}$ 程度の線形加速器のアライメントについても、適用可能であることが示された。

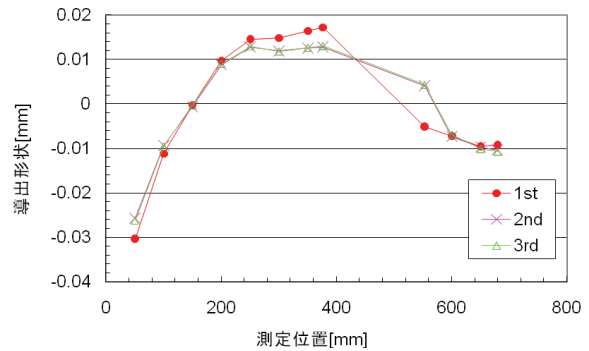


図4:基準プレートの形状測定結果

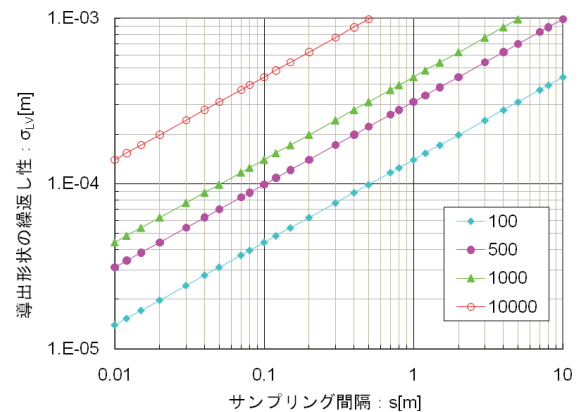


図5:導出形状の繰返し性見積もり値

## 謝辞

本検討をすすめるにあたり、精密水準器Talyvel4を貸していただいたKEK小林幸則氏、分子研加藤政博氏をはじめ、KEK加速器研究施設(元KEK物質構造研究所放射光源研究系)の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] I. Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB"; KEK Report 95-18 (1996).
- [2] 清野慧: ソフトウェアデータを用いた形状評価, 精密工学会誌, 61, 8, 1059 (1995).
- [3] 奥山栄樹,久米達哉: ソフトウェアデータによる長尺形状測定, 計測と制御, 46, 9, 726(2008).
- [4] 久米達哉,江並和宏,東保男,上野健治: 3点法を用いた真直度測定におけるゼロ点ずれの除去, 精密工学会誌, 75, 5, 657(2009).

<sup>2</sup> <http://www.linearcollider.org/cms/>