

# STRAIGHTNESS MEASUREMENT OF THE KEK INJECTOR LINAC USING A LEVEL

Tatsuya Kume<sup>#A)</sup>, Eiki Okuyama<sup>B)</sup>, Masanori Satoh<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>, Kazuro Fufukawa<sup>A)</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 the 600-m-long KEK electron/positron injector linac, consisted of the 125-m-long and the 473-m-long straight sections, to be aligned with an accuracy of sub-mm or better in its primary alignment for coming upgrade.

We sequentially measured slope angles of the straight bars put on between each center of the neighboring aligning base plates for the linac and obtains aligning straightness of the linac by integrating the measured angles. This method has advantage not to be affected by any straightness references which causes straightness error. We adopted pairs of contact feet under both ends of the straight bars. They avoid obstacles in measurements and prevent distortions of the plates from affecting the measurements. We also adopted reversal measurement for the angle measurement. It eliminates systematic errors caused by offset of the level, distortions of the bars and height differences between the pairs of feet. It also reduces long term fluctuations of these errors (drift).

As a result, straightness with the average reproducibility of 26  $\mu\text{m}$  ( $\sigma$ ) for the 71-m-long part of the linac could be obtained, which can hardly be achieved by any conventional methods. The results show good agreement with that by a conventional alignment telescope. Error estimation based on our error propagating model shows that straightness evaluation with reproducibility of better than 0.6 mm ( $2\sigma$ ) for a 500-m-long measurement sufficient for upgrading the KEK electron/positron linac and that of better than 1 mm ( $2\sigma$ ) for a 10-km-long measurement expected for the ILC project can be achieved.

## 水準器を用いた KEK 入射器の真直度測定

### 1. 緒言

KEK 電子陽電子入射器(KEK 入射器)<sup>[1]</sup>では、その性能向上のため、サブ mm もしくはそれ以上の精度での初期アライメント技術が必要とされている。

我々は、KEK 入射器のアライメント基準として 1~3 m 程度の間隔でとびとびに設置される、基準プレート間に直定規を差し渡し、その傾斜角を高精度な水準器で逐次測定し、得られた傾斜角を積分することで、基準プレートの並びの真直度を求める方法について検討を行っている。<sup>[2]-[4]</sup>この方法は、真直度基準の影響を受けないことから、高精度な真直度基準を用意することが困難な長距離の測定に適するものと考えられる。

ここでは、実際に KEK 入射器の 71 m 間の真直度を繰り返し測定して、その標準偏差をもとに、測定精度を評価した。また、アライメント望遠鏡による同一箇所での測定値と比較することで、測定値の信頼性を確認した。

一方、誤差伝搬モデルに基づく誤差見積り値と測定値の繰り返し性を比較することで、誤差見積り値を検証した。

さらに、この誤差見積りモデルを用いて、KEK 入射器全体のアライメントに必要な、測定長 500 m の真直度測定で得られる精度を見積り、次世代の衝

突型線形加速器の建設計画である ILC 計画<sup>[5]</sup>において検討されている、全長約 10 km の線形加速器のアライメントへの、当該測定方法の適用可能性を見積もった。

### 2. KEK 電子陽電子入射器

KEK 入射器は、A,B の 2 つのセクターからなる上流側の 125 m の直線部と、C,1~5 の 6 つのセクターからなる下流側の 483 m の直線部が、180° 偏向アーク部で接続された、全長約 600 m の”J”字型のビームラインを持つ。各セクターは、加速ユニットと呼ばれる基本構成単位により形成され、全長約 40 m のセクター A が 4 つの加速ユニットから成り立っているのを除き、8 つの加速ユニットから成り立ち、それらの全長は、約 80 m となる。

図 1 に、KEK 入射器の基本構成単位となる加速ユニットの典型的な例を示す。加速ユニットは、長さ約 9 m のパイプ架台を基本構成単位とする。各架台上には基準プレートが、各基準プレート上には基準ルールが設置され、それぞれ、鉛直上下方向、および、水平面内ビーム直交方向のアライメント基準として用いられる。加速器を構成する、2 m 長の S バンド加速管、ビーム偏向/収束マグネット、各種ビームモニターなどの機器は、基準プレート上に設置される。基準プレートは、各機器の設置間隔に合わせて、中心間隔 1~3 m 程度で設置される。

<sup>#</sup> tatsuya.kume@kek.jp

基準プレートと基準レール、さらに、架台間のアライメント基準として取り付けられる4分割フォトダイオード(QPD)の中心位置は、加速ユニット組立時に、アライメント望遠鏡などを用いて、±0.05 mm程度の精度で位置決めされている。各架台の相対位置は、真空パイプ中のアライメントレーザを基準として、QPDの信号を基にアライメントされる。

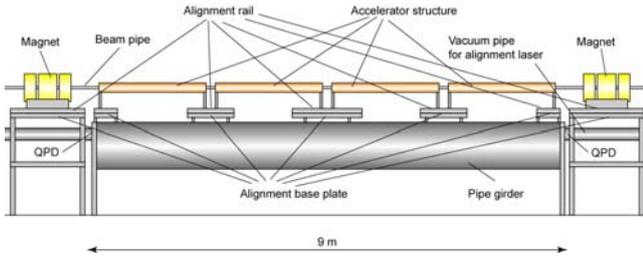


図1: 典型的な加速ユニットの側面図

### 3. 真直度測定

#### 3.1 傾斜角の測定

測定では、図2のように、基準プレートと直定規の間に足を入れることで、測定時の障害物を回避するとともに、基準プレート自体が持つ形状の影響を取り除いた。

その一方で、図3のように、水準器、直定規、足からなる測定系について、反転測定を適用することで、系統誤差となる水準器のオフセット、直定規のたわみ、足の形状差などに起因する測定系のオフセットの影響を取り除いた。ここではさらに、測定点毎に反転測定を行うことで、系統誤差の長期的な変動である測定系のドリフトについても、その影響が緩和されるものと期待される。

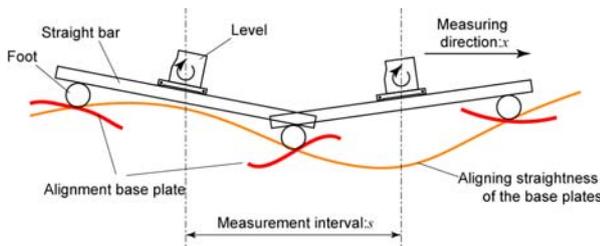


図2: 直定規と足を用いた基準プレート間の傾斜角測定

ここで、真の傾斜角を $\theta_r$ 、測定系の系統誤差を $\theta_0$ とする。反転測定前後の角度測定値はそれぞれ、 $\theta_m = \theta_r + \theta_0$ 、 $\theta_n = -\theta_r + \theta_0$ と示されことから、 $\theta_r$ 、 $\theta_0$ は、 $\theta_m$ 、 $\theta_n$ により、(1)、(2)式のように求められる。

$$\theta_r = \frac{\theta_m - \theta_n}{2}, \quad (1)$$

$$\theta_0 = \frac{\theta_m + \theta_n}{2}, \quad (2)$$

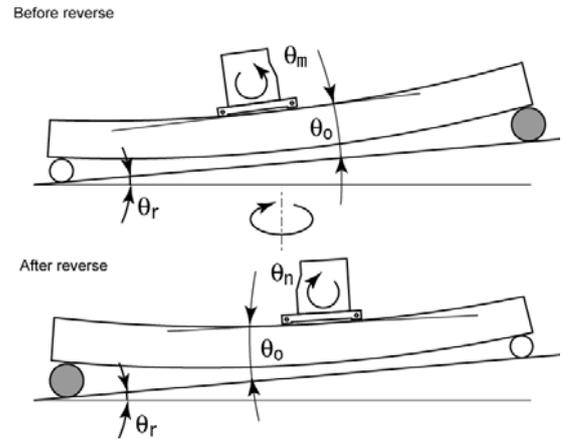


図3: 水準器、直定規、足からなる測定系の反転測定

#### 3.2 真直度の導出

図4に測定原理を示す。水準器を走査しながら、測定対象の各測定点 $x_i(i=1 \text{ to } n)$ において、真直度(形状) $f(x)$ の接線の傾斜角 $\theta(x_i)$ を検出する。 $\theta(x_i)$ は $f(x)$ の一階微分に相当し、 $\theta(x_i)$ を積分することで、目的の $f(x)$ が導出できる。即ち、測定位置 $x_n$ における真直度 $f_m(x_n)$ は、(3)式のように示される。

$$f_m(x_n) = h_1 + s \times \sum_{i=1}^{n-1} \theta(x_i), \quad (3)$$

(3)式において、 $h_1$ 、 $s$ は、任意に定めた測定開始点の真直度と、角度測定の間隔である。

このとき測定時に検出される傾斜角 $\theta(x_i)$ は、水準器の送り真直度 $e(x_i)$ に影響されないことから、(3)式により導出される $f_m(x_n)$ も、その影響を受けない。一方、直定規やレーザなどの真直度基準を用いた測定は、走査誤差 $e(x_i)$ を、真直度基準の誤差に置き換えた測定と考えられる。よって、当該方式により得られる真直度 $f_m(x_n)$ は、走査誤差や真直度基準の誤差に影響されない。

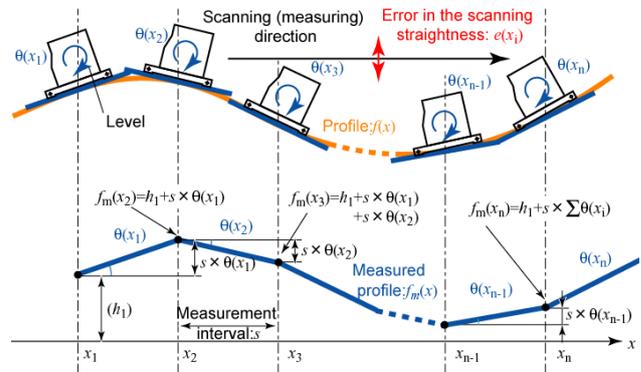


図4: 水準器を用いた真直度測定

#### 3.3 測定結果

KEK 入射器下流側に位置する長さ 483 m の直線部の先頭部分となる、セクターC の約 71 m の区間において、38 の基準プレートの並びの真直度を測

定した。角度測定には、測定範囲 $\pm 3 \text{ mrad}(\pm 600 \text{ arcsec})$ 、分解能 $0.5 \mu\text{rad}(0.1 \text{ arcsec})$ のテーラーホブソン社製精密電子水準器、タリベル4を用いた。直定規には、幅 $50 \text{ mm}$ 、厚さ $25 \text{ mm}$ 、肉厚 $3 \text{ mm}$ 、長さ $1998 \text{ mm}$ および $2306 \text{ mm}$ の2本のアルミ角パイプと、幅 $50 \text{ mm}$ 、厚さ $25 \text{ mm}$ 、長さ $1640 \text{ mm}$ の1本アルミ中実角棒の計3本を用いた。足には、各測定区間における障害物を回避するため、 $50 \text{ mm}$ 角、厚さ $2 \text{ mm}$ 、平面度 $\lambda(=633 \text{ nm})$ のガラス製平行平面基盤と、長さ $160 \text{ mm}$ 、 $50 \text{ mm}$ 角のアルミ合金製ブロックの2種類を用いた。前者は2種類の角パイプと組み合わせて、パイプ架台上の基準プレート間の測定に、後者は中実角棒と組み合わせて、パイプ架台間の基準プレート間の測定に、それぞれ用いた。この時の平均測定間隔は約 $1.9 \text{ m}$ となった。

図5に、(1)式の関係を用いて反転測定により得られた傾斜角 $\theta_i$ の、4回の繰り返し測定結果を示す。測定値の標準偏差は、全測定点の平均値で $9 \mu\text{rad}$ 、最大値で $42 \mu\text{rad}$ となった。4回の測定は連続した3日間で行われ、一回の測定には2~4時間を要した。

図6に、図5の傾斜角を積分して得られた真直度を示す。これらは、平均傾斜と平均オフセット分を取り除いた形で示している。得られた真直度の標準偏差は、全測定点の平均値で $26 \mu\text{m}$ 、最大値で $50 \mu\text{m}$ となった。図6には同時に、アライメント望遠鏡を用いて得られた、同一箇所の真直度測定結果を示す。水準器による4回の測定結果と同様の真直度が得られていることが分かる。

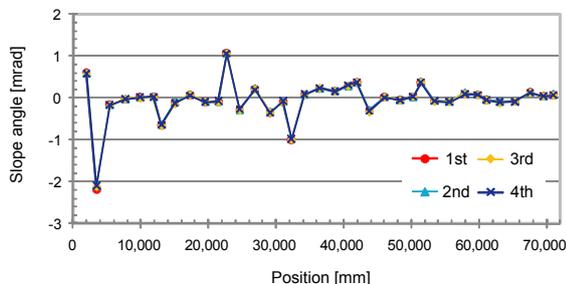


図5: 反転測定により得られた傾斜角 $\theta_i$ の4回の繰り返し測定結果

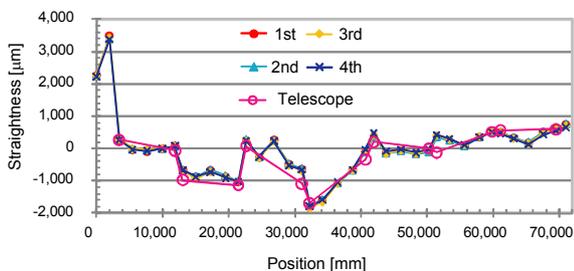


図6: 図5の傾斜角測定値から導出された真直度

## 4. 考察

### 4.1 反転測定の効果

(2)式の関係を用いて得られた系統誤差 $\theta_0$ の変化の様子を図7に示す。図5、7を比較すると、今回の測定では、反転測定で得られる傾斜角 $\theta_i$ と比較して、無視することのできない大きさの系統誤差 $\theta_0$ が発生し、その値は、測定位置により変化していることが分かる。図7において、3つの系統誤差 $\theta_0$ が規則的に現れているのは、規則的に並べられた基準プレートに合わせて、3種類の測定系を取り換えながら用いたためである。

図8に、傾斜角 $\theta_i$ と系統誤差 $\theta_0$ の、4回の繰り返し測定時の標準偏差の変化を示す。全測定点での平均値は、 $\theta_i$ 、 $\theta_0$ それぞれについて、 $9$ 、 $25 \mu\text{rad}$ となり、系統誤差のばらつきが、より大きくなっている。このことは、測定系の系統誤差が変動しているにも関わらず、反転測定で得られる傾斜角への影響は緩和されていることを示す。

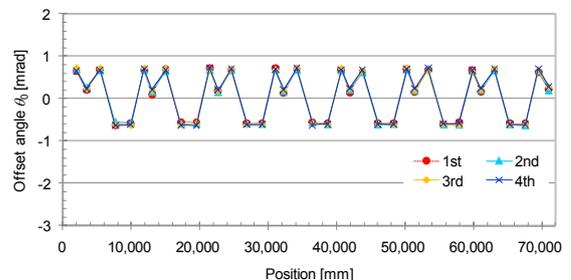


図7: 反転測定により除去される系統誤差 $\theta_0$ の4回の繰り返し測定結果

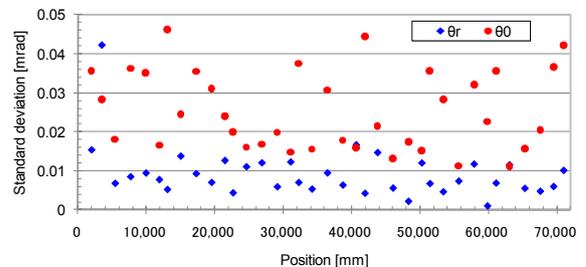


図8: 傾斜角 $\theta_i$ と系統誤差 $\theta_0$ の標準偏差

### 4.2 誤差見積り値の検証

(3)式において、各角度測定値 $\theta(x_i)$ の誤差がランダム、かつ、独立に発生し、それらが誤差伝搬則に従って導出される真直度(形状) $f_m(x_n)$ に伝搬するものと仮定すると、導出形状の誤差(精度)は、(4)式のように示される。

$$\sigma_p = \sqrt{s \cdot l} \cdot \sigma_{ma}, \quad (4)$$

(4)式において、 $\sigma_p$ 、 $s$ 、 $l$ 、 $\sigma_{ma}$ は、それぞれ、標準偏差で示された導出形状の誤差、測定間隔、測定長、および、標準偏差で示された角度測定値の誤差である。

図9に、今回の測定値から得られた真直度測定誤差(●)と、(4)式の関係により得られた真直度測定誤差見積り値(○)の、測定長 $l$ に対する変化の様子を示す。見積り値の導出にあたり、 $s$ は、測定におい

て用いた平均測定間隔 1.9 m を、 $\sigma_{ma}$  として、今回得られた全測定点における角度測定値の標準偏差の平均値 9  $\mu\text{rad}$  を用いた。その一方で、平均傾斜分とオフセット分の補正を行わない場合の標準偏差の全測定点における平均値を、測定値として用いている。また、ここでは、 $2\sigma$ (ただし、 $\sigma$ は標準偏差)の値を用いて、誤差(精度)を評価している。

図より、全体的に測定値の誤差が、見積り値よりも小さくなっていることがわかる。現状において、その理由は未解明であるが、実際に得られる誤差が、見積り値よりも小さくなっていることは、実用的には問題ないものとする。

### 4.3 誤差見積り

図 9 の見積り値(○)において、測定長  $l=500$  m での真直度測定誤差は、 $\sigma_p=0.6$  mm( $2\sigma$ )未満と読みとれる。このことから、今回と同様の測定条件である、 $s=1.9$  m、 $\sigma_{ma}=9$   $\mu\text{rad}$  を用いた場合、KEK 入射器最長の  $l=483$  m の直線部において、サブ mm レベルでの真直度評価が可能、即ち、当該技術は、KEK 入射器の初期アライメントに必要な、サブ mm レベルでの真直度評価に適用可能と見込まれる。

一方、次世代の衝突型線形加速器の建設計画である ILC 計画において検討されている、全長約 10 km の線形加速器では、1 mm 未満での初期アライメントの実現が望まれている。<sup>[5]</sup>図 9 において、△は、 $s=20$  cm、 $\sigma_{ma}=9$   $\mu\text{rad}$  とした場合の見積り値であり、測定長  $l=10$  km での真直度測定誤差は、1 mm 未満になるものと見積もられる。このことから、今回の測定と同様の標準偏差  $\sigma_{ma}=9$   $\mu\text{rad}$  の角度測定が実現される場合、測定間隔を  $s=20$  cm とすることで、測定長  $l=10$  km において、 $\sigma_p=1$  mm( $2\sigma$ )未満での真直度評価が可能、即ち、当該技術は、ILC で計画される全長約 10 km の線形加速器に求められる、1 mm 未満での真直度評価に適用可能と見込まれる。

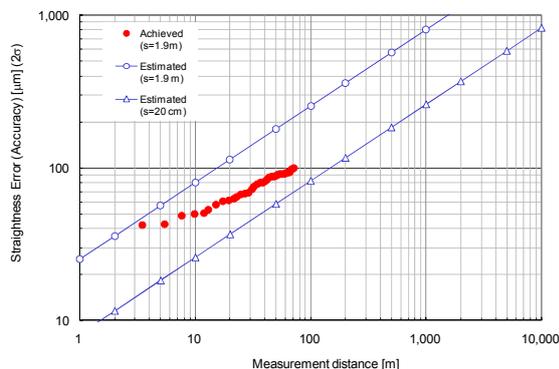


図 9: 測定長による真直度測定誤差の変化

## 5. 結言

全長 125 m および 483 m の 2 本の線形加速器からなる KEK 入射器のアライメント用基準プレート間の傾斜角を、高精度な水準器、直定規、足からなる測定系を用いて逐次測定し、それらを積分すること

で、真直度を求めた。

この時、反転測定を適用することで、測定系の系統誤差の影響を除去し、さらに、そのドリフトの影響を緩和することができた。

その結果、71 m 間の基準プレートの並びの真直度を、標準偏差 26  $\mu\text{m}$ ( $\sigma$ )で測定することができた。

誤差伝搬則に基づく誤差見積りから、この技術を適用することで、KEK 入射器の初期アライメントに必要な、サブ mm レベルでの真直度評価、さらに、ILC で計画される全長約 10 km の線形加速器に求められる、1 mm 未満での真直度評価が、それぞれ、実現可能であることが示された。

## 謝辞

タリベル 4 は KEK 加速器研究施設第 7 研究系小林幸則氏に貸していただきました。当該機器を貸していただくにあたり、分子研加藤政博氏をはじめ、KEK 加速器研究施設第 7 研究系の皆様にお世話になりました、あわせて感謝いたします。

アライメント望遠鏡による真直度測定結果は、飯野陽弼氏、酒井国彦氏をはじめ、(株)トヤマ、および、(株)三菱電機システムサービスの皆様により得られました。

## 参考文献

- [1] I. Abe, et al., "The KEKB injector linac", Nucl. Instr. and Meth. A **499**, (2003) 167.
- [2] 久米ら、「ソフトウェアデータに基づく長距離における高精度な真直度測定方法」、第 6 回加速器学会年会、WPCEA13、東海村、(2009).
- [3] 久米ら、「水準器を用いた長距離の真直度測定」、2010 年度精密工学会春季大会学術講演会、E13、(2010).
- [4] T. Kume, et al., "Straightness Alignment of Linac by Detecting Slope Angle," Proceedings of IPAC'10, WEPEB055, Kyoto,(2010), <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/wepeb055.pdf>.
- [5] <http://www.linearcollider.org/>