

# 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 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 by using a precise level and obtained aligning straightness of the linac by integrating the measured angles. This method has advantage not to be affected by any straightness references. Here, we adopted pairs of contact feet under both ends of the straight bars for preventing distortions of the plates from affecting the measured angles. Moreover, we adopted reversal measurement for the angle measurement for eliminating offsets of the measurement system. It also reduces drifts of the system by adopting in each measurement.

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 straightness agreed well with that obtained by an alignment telescope, showing that they are fairly reliable.

Error estimation based on our error propagating model shows that straightness evaluation with reproducibility of better than 0.6 mm ( $2\sigma$ ) for a distance of 500 m, sufficient for upgrading the KEK linac, can be achieved. It also shows that that of better than 1 mm ( $2\sigma$ ) for a distance of 10 km, 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 間の真直度を測定し、その繰り返し性をもとに測定精度を評価した。さらに、アライメント望遠鏡との比較測定により、それぞれの測定値の信頼性を評価した。

一方、誤差伝搬モデルに基づいた誤差見積りを行い、測定値の繰り返し性と比較することにより、見積り値を検証した。さらに、この誤差伝搬モデルを用いて、KEK 入射器全体、および、ILC 計画<sup>[5]</sup>において検討される全長約 10 km の線形加速器について、それぞれ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、長さ約 9 m のパイプ架台を中心とした、図 1 のような加速ユニットから構成される。各加速ユニットでは、加速管、ビーム偏向/収束マグネット、ビームモニターなどの機器が、中心間隔 1~3 m でとびとびに設置される基準プレート上に取り付けられる。各々の基準プレート上には基準レールが取り付けられ、それぞれ、鉛直上下方向と水平面内ビーム直交方向のアライメント基準となる。架台間の相対位置は、真空パイプ中のアライメント

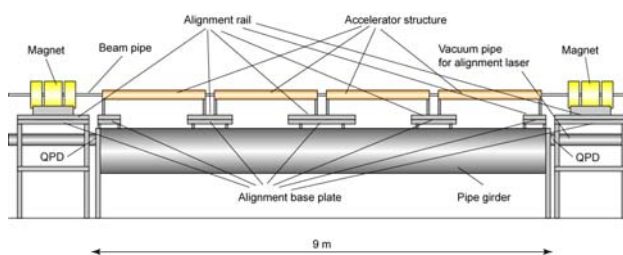


図 1: 典型的な加速ユニットの側面図

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

レーザを基準に、各架台に取り付けられた4分割フォトダイオード(QPD)を用いてアライメントされる。基準プレート、基準ルール、QPDは、加速ユニットの組立時に、アライメント望遠鏡などを用いて±0.05 mm程度の精度でアライメントされる。

### 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、基準プレートが持つ形状の影響を取り除くとともに、測定時の障害物を回避する測定系を用いた。ここではさらに、この測定系を用いるにあたり、図3のような反転測定を適用することで、測定系を構成する水準器の角度オフセット、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を取り除いた。このとき、測定系のドリフトは、測定系のオフセットの長期的な変動と考えられることから、測定点毎に反転測定を行うことで、測定系のドリフトが除去、緩和されるものと考えられる。

測定されるべき真の傾斜角を $\theta_r$ 、測定系のオフセットを $\theta_0$ とすると、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。

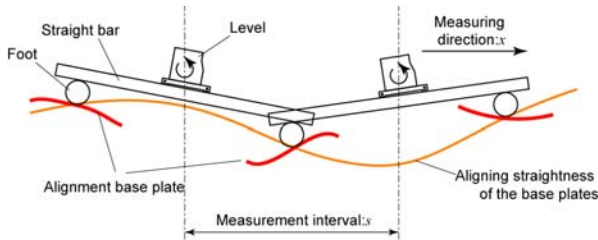


図2: 水準器、直定規、足からなる測定系を用いた基準プレート間の傾斜角測定

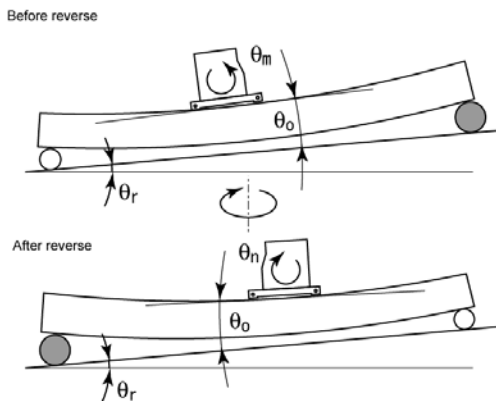


図3: 図2の測定系の反転測定

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

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

#### 3.2 真直度の導出

図4に水準器を用いた真直度測定の原理を示す。測定対象 $f(x)$ の各測定点 $x_i(i=1 \text{ to } n)$ において、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、 $\theta(x_i)$ を積分することで測定対象の真直度(形状) $f_m(x)$ が導出できる。このとき、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、測定間隔である。

ここで、検出される傾斜角 $\theta(x_i)$ は、水準器の送り真直度、もしくは、真直度基準の誤差 $e(x_i)$ 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。即ち、当該方式により得られる真直度 $f_m(x_n)$ は、送り真直度や真直度基準の誤差の影響を受けない。

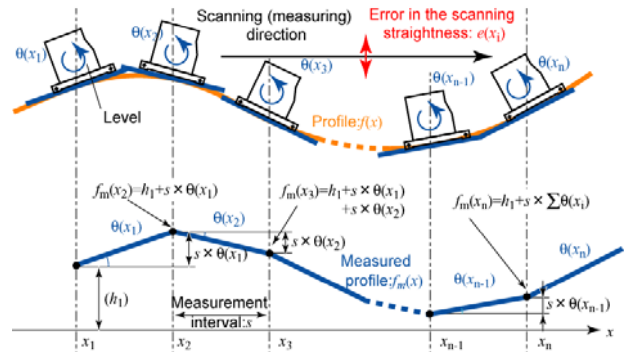


図4: 水準器を用いた真直度測定の原理

#### 3.3 測定結果

KEK 入射器の長さ 483 m の直線部の最上流部分となる、セクターCの約 71 m 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。水準器には、測定範囲±3 mrad(±600 arcsec)、分解能 0.5 μrad(0.1 arcsec)の精密電子水準器:タリベル 4 (テーラー・ホブソン社)を用いた。直定規には、幅 50 mm、厚さ 25 mm、肉厚 3 mm、長さ 1998 mm、および、2306 mmの2種類のアルミ角パイプと、幅 50 mm、厚さ 25 mm、長さ 1640 mmのアルミ中実角棒の計3種類を用いた。足には、50 mm角、厚さ 2 mm、平面度 $\lambda(=633 \text{ nm})$ のガラス製平行平面基盤と、長さ 160 mm、50 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傾斜角測定に、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傾斜角測定にそれぞれ用いた。この時の平均測定間隔は、約 1.9 m となった。

図5に、反転測定により得られた傾斜角 $\theta$ の4回の繰り返し測定結果を示す。ここで、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。これらの測定は連続した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、平均傾斜分と平均オフセット分を取り除いた形で示している。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には比較のため、アライメント望遠鏡による測定結果を示す。両者の間には良好な一致が見られ、得られた真直度には、ある程度の信頼性があることが示される。

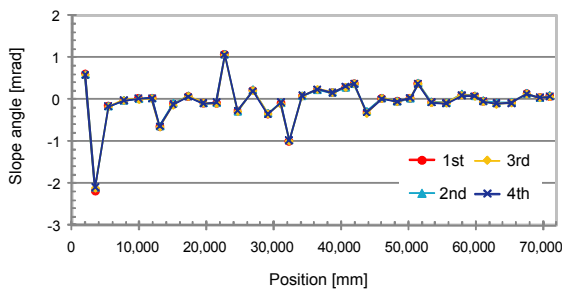


図5: 反転測定により得られた傾斜角 $\theta$ の4回の繰り返し測定結果

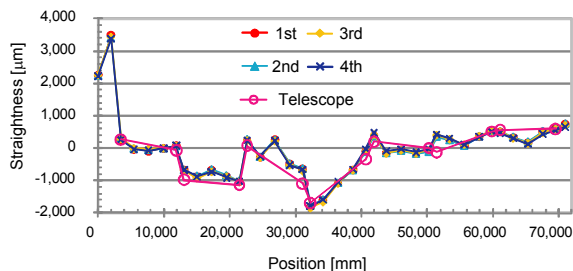


図6: 図5の傾斜角測定値から導出された真直度、比較のため、アライメント望遠鏡により得られた真直度を同時に示す

## 4. 考察

### 4.1 反転測定の効果

反転測定により除去される測定系のオフセット $\theta_0$ を図7に示す。図5と図7を比較すると、今回の測定では、導出される傾斜角 $\theta$ と比較して無視できない大きさのオフセット $\theta_0$ が存在し、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つの値が周期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測定したためである。

図8に、これらの4回の繰り返し測定時の標準偏差を示す。全測定点での平均値は、 $\theta$ 、 $\theta_0$ それぞれについて、9、25  $\mu\text{rad}$ となり、傾斜角 $\theta$ のばらつきが、より小さくなっている。このことは、測定系のオフセット $\theta_0$ の経時変化と考えられる測定系のドリフトが、反転測定により緩和されていることを示す。

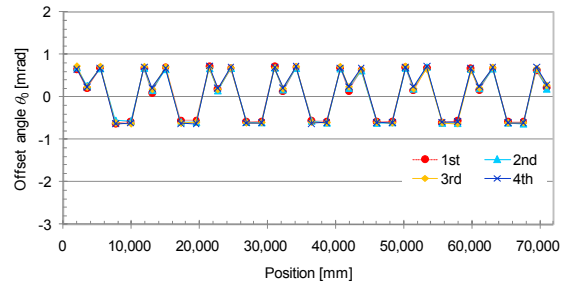


図7: 反転測定により除去される測定系のオフセット $\theta_0$ の4回の繰り返し測定結果

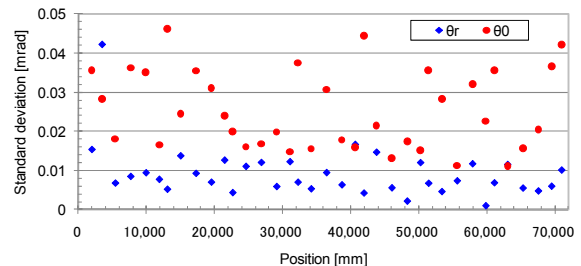


図8: 傾斜角 $\theta$ とオフセット $\theta_0$ の標準偏差

### 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 $f_m(x_n)$ に伝搬するものと仮定すると、真直度の誤差(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、真直度の誤差、測定間隔、測定長、および、角度測定誤差である。

図9に、今回の測定で得られた誤差(●)と、(4)式から得られた誤差見積り値(○)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、 $s=1.9$  m、 $\sigma_{ma}=9$   $\mu\text{rad}$ を用いた。その一方で、測定値の誤差として、平均傾斜およびオフセットを補正しない真直度間に見られる標準偏差の全測定点の平均値を用いている。そのため、測定長 $l=71$  mの場合の誤差は、平均100  $\mu\text{m}$ ( $2\sigma$ )となり、3項での値とは異なる。

図より、測定値の誤差は見積り値よりも、全体的に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、測定値の誤差が、見積り値よりも小さくなることは、実用上問題ないものと考えられる。

### 4.3 誤差見積り

図9の見積り値(○)において、測定長 $l=500$  mでの誤差は、 $\sigma_p=0.6$  mm( $2\sigma$ )未満と読みとることができる。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<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。図 9 において、△は、 $s=20$  cm、 $\sigma_{ma}=9$   $\mu$ rad とした場合の見積り値であり、測定長  $l=10$  km での誤差は、1 mm 未満になるものと見積られる。このことから、今回の測定と同様の標準偏差  $\sigma_{ma}=9$   $\mu$ 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 の線形加速器の真直度評価についても、適用可能と見込まれる。

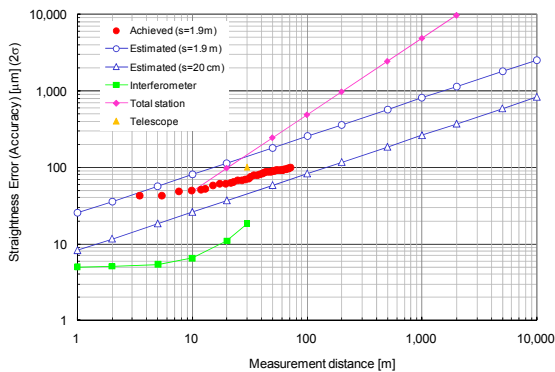


図 9: 測定長による真直度測定誤差の変化、●は測定値、○は  $s=1.9$  m の場合、△は  $s=20$  cm の場合の見積り値、比較のため、干渉計(■)、トータルステーション(◆)、アライメント望遠鏡(▲)の性能(定義値)を示す

## 5. 結言

KEK 入射器のアライメント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、それらの並びの真直度を求めた。この時、反転測定を適用することで、測定系のオフセットとドリフトの影響を除去もしくは緩和することができた。

その結果、KEK 入射器の 71 m 間の基準プレートの並びの真直度を、標準偏差 26  $\mu$ m ( $\sigma$ ) で測定することができた。さらに、得られた真直度はアライメント望遠鏡の測定値とよく一致し、これらには、ある程度の信頼性があることが示された。

誤差伝搬則に基づく誤差見積りから、当該技術は、KEK 入射器の初期アライメント、および、ILC で計画される全長約 10 km の線形加速器に求められる真直度評価に、それぞれ、適用可能と見込まれる。

## 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 研究系の皆様の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。本検討をすすめるにあたり、(株)トヤマ、および、(株)三菱電機システムサービスの皆様のサポートを受けました。併せて感謝いたします。

## 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/>