

# DETECTION FOR THE FLOOR LEVEL CHANGE USING A LEVEL

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

In the KEK injector linear accelerator (KEK linac), a new concrete wall for radiation shield had been constructed at the center of its 476-m-long straight section. The floor level of its accelerator tunnel was predicted to sink approximately 0.5 mm by the weight of the wall. As the accelerator components for the KEK linac should be aligned with the accuracy of better than sub-mm for its future upgrade, the floor level change of 0.5 mm can't be ignored. We adopted a shape measurement method using a level, which is a gravity referenced inclinometer, for evaluating the floor level change of the linac. It detects tangential slope angle of the shape and has advantages for measuring large objects, because it is hardly affected by shape references, which becomes more difficult to be defined with enough accuracy as the measuring distance becomes larger. Therefore, we consider that it is suitable to detect sub-mm of shape change for the floor having several tens meters of distance. As a result, slope angle change for the 82-m-long part of the linac floor has been detected with the standard deviations of better than 61  $\mu$ rad and the floor level change of  $\pm 0.2$  mm had been derived. The result agreed partially with that by an alignment telescope.

## 水準器を用いた床面変動測定

### 1. 緒言

KEK 電子陽電子入射器(KEK 入射器)<sup>[1]</sup>では、全長476m の直線部を2 つに分けて運転するために、加速器を収納する地下トンネルの中央部に放射線シールド用コンクリート壁が新たに設置され、その重量により壁直下のトンネル床面が0.5 mm 程度沈下するものと予想された。

その一方で、KEK 入射器では、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、それを実現するには、加速器を構成する機器の、サブ mm レベルでの高精度なアライメントが必要になるものと見込まれている。そのため、上記のコンクリート壁の設置に起因する床面変動と、それに伴い発生が予想される構成機器間の相対位置変動は、KEK 入射器の高性能化にあたり、無視できないものと考えられる。

ここでは、コンクリート壁の設置に伴い予測されたトンネル床面の壁面工事前後の変動量を実測し、評価するため、高精度な水準器を用いた形状測定法を適用した。当該手法は、直定規やレーザなどの形状基準が不要であることから、高精度な形状基準を確保することが難しい長距離の形状評価に有利と考えられる。そのため、今回目的とする数 10 m 程度、もしくは、それを超えるような大型の測定対象の、サブ mm 程度、もしくは、より小さな変動検出に適するものと考えられる。

### 2. 原理

#### 2.1 変位計を用いた形状測定

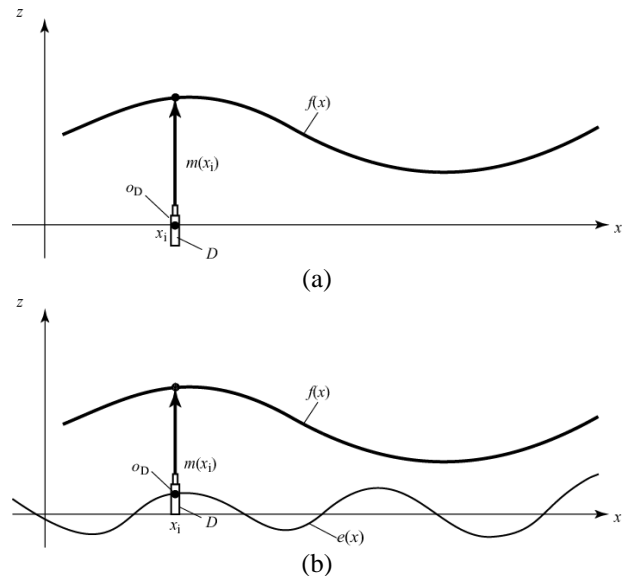


図 1: (a) 変位計を用いた形状測定  
(b) 形状基準の誤差  $e(x)$  の影響

図 1(a)に、変位計を用いた形状測定を示す。この方法は、一般的な形状測定に於いて多く用いられる方法であり、変位計  $D$  の測定原点  $O_D$  を、形状基準として定めた  $x$  軸に沿って走査しながら、それと直交する  $z$  軸方向の変位出力  $m(x)$  を得ることで、被測定形状  $f(x)$  を求める。ここで、図 1(b)に示されるよ

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

うな走査誤差  $e(x)$  が存在する場合、 $e(x)$  は形状基準の誤差となり、その影響は変位計  $D$  の変位出力  $m(x)$  に、 $m(x)=f(x)-e(x)$  なる形で現れ、 $e(x)$  はそのまま形状誤差となる。そのため、高精度な形状測定を行うには、必要な精度と比較して  $e(x)$  を十分に小さくしなければならない。しかし、測定範囲が大きくなるにつれて、 $e(x)$  を小さくすることが難しくなることから、測定対象が大型になるほど、必要な精度を得ることは難しくなる。

一方、大型の粒子加速器のアライメントでは、レーザやワイヤーなどの作る直線を基準として、それらからの偏差を検出する方法が用いられている。これらについても、基準とするレーザやワイヤーの変動が形状基準の誤差となり、評価精度に直接影響することから、変位計を走査する方法と同様の問題を持つものと見なすことができる。

## 2.2 水準器を用いた形状測定

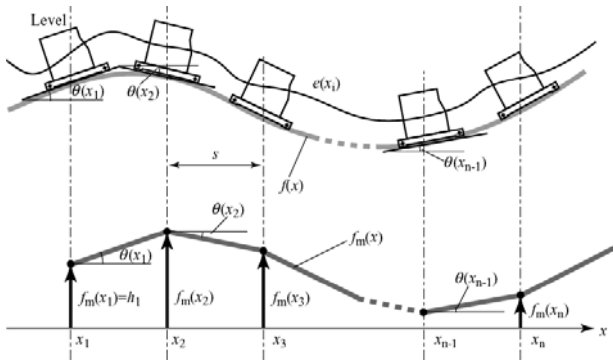


図 2: 水準器を用いた形状測定

図 2 に、本検討で用いた水準器を用いた形状測定を示す。この方法では、前記の変位計の代わりに、水準器などの角度検出器を測定方向となる  $x$  軸方向に走査しながら、被測定形状  $f(x)$  の接線の傾斜角  $\theta(x)$  を検出する。測定点  $x_i (i=1 \text{ to } n)$  において検出される接線の傾斜角を  $\theta(x_i)$  とすると、各  $\theta(x_i)$  は、水準器の走査経路  $e(x)$  の影響を受けない。ここで、 $e(x)$  は、変位計を用いた形状測定において誤差要因となる走査誤差、または、形状基準の誤差に相当する。一方、 $\theta(x_i)$  は測定点  $x_i$  における被測定形状  $f(x_i)$  の一階微分値に相当し、測定位置  $x_n$  における形状  $f_m(x_n)$  は、各測定点で得られた  $\theta(x_i)$  を積分することで、

(1)式のように導出される。ここで、 $h_1$  は任意に定めた測定開始点の形状、 $s$  は測定間隔である。

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

(1)式において形状  $f_m(x_n)$  は、 $e(x)$  の影響を受けない。即ち、水準器を用いた形状測定では、走査誤差や形状基準の誤差に影響される事無く、形状を得る事が出来る。

我々はこれまでに、KEK 入射器に用いられるアライメント基準プレート間の並びの真直度評価に当該手法を適用することで、71 m の測定範囲において、標準偏差  $49 \mu\text{m}$  以下での評価を行った。<sup>[2]</sup>

## 3. 測定

### 3.1 測定方法

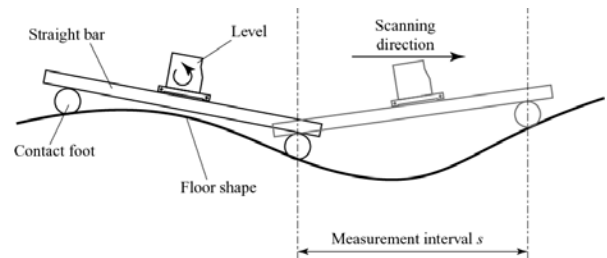


図 3: 水準器、直定規、接触足からなる測定系を用いた床面の傾斜角測定、測定は図の左側の上流側から右側の下流側に向かって行われた

コンクリート壁の設置位置となる、KEK 入射器の 476 m の直線部の中央部を中心とした 82 m の範囲において、壁工事前後の床面の傾斜角を測定し、それらの差からコンクリート壁の設置に伴う床面変動を求めた。ここでは、図 3 に示されるように、水準器を直定規上に載せ、 $s=2 \text{ m}$  の足幅毎に測定系を送る逐次法により、床面の傾斜角を得た。直定規の下面には球形の接触足を、上流側に 2 つ、下流側に 1 つ用いて、床面と 3 点接触させることで、測定時のガタを取り除いた。

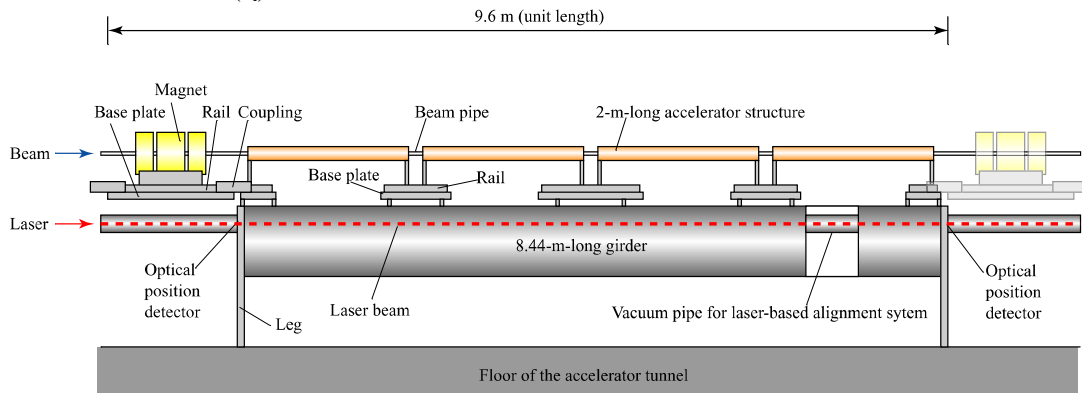


図 4: KEK 入射器を構成する加速器ユニットの構造概要

KEK 入射器を構成する加速器ユニットの構造概要を図4に、加速器トンネル床面の傾斜角測定の様子を図5に、それぞれ示す。床面には、約50 mm×50 mmのL字型断面の鋼鉄製アングル材が、全長にわたり埋め込まれており、その表面を測定対象とした。水準器は、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)、直定規は、幅50 mm、高さ25 mmの長方形断面を持つ、肉厚3 mm、長さ2160 mmのアルミ角パイプ材、接触足は、直径約12 mmのボールベアリング用焼入れ鋼球とした。上流側の2つの接触足は、図3の紙面に垂直方向に30 mmの間隔で並べられている。



図5:床面傾斜角測定の様子、測定は手前左の上流側から、右奥の下流側に向かって行われた

### 3.2 反転測定による測定系のオフセット除去

床面傾斜角の測定では、図6に示される反転測定により、水準器のオフセット、直定規のたわみ変形、接触足間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。

図6において測定されるべき真の傾斜角を $\theta$ 、測定系のオフセットを $\theta_0$ とすると、反転測定前後の測定値 $\theta_m$ 、 $\theta_n$ は、それぞれ、 $\theta_m = \theta + \theta_0$ 、 $\theta_n = -\theta + \theta_0$ となり、 $\theta$ 、 $\theta_0$ は、(2)、(3)式のように求められる。

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

$$\theta_0 = \frac{\theta_m + \theta_n}{2}. \quad (3)$$

床面変動は壁工事前後の約1ヶ月を経た2度の測定結果を比較することで導出される。この間、水準器のドリフトや、直定規の変形などにより、測定系のオフセットが変動する可能性がある。しかし、前述した反転測定により、オフセット値自体が除去されるとともに、その変動の影響も除去されるものと、考えられる。

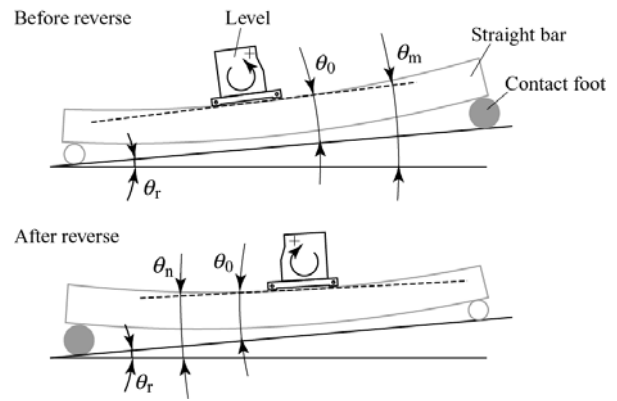


図6:反転測定による測定系のオフセット除去

### 3.3 測定結果

壁工事前後において、それぞれ連続した4~5時間に、1回あたりの測定時間約30分間で、4回の繰り返し測定を行った。

各測定に先立ち、KEK入射器のアライメント基準プレート上に置かれた、十分な平面度を持つアルミブロック面上にて、測定系の反転測定を行い、得られたオフセット値を床面傾斜角の各測定値から差し引くことで、測定系のオフセット補正を行った。これは、今回測定対象とした床面に十分な平面度が期待できないことから、接触足との接触点近傍の床面の図6の紙面と垂直方向の形状変化により、反転測定前後の接触条件が変化することで、オフセットが正しく除去されなくなると、考えたためである。

図7に、工事前後のそれぞれ4回の繰り返し測定毎に、各床面傾斜角測定に先立って行われた反転測定により得られた、測定系のオフセット $\theta_0$ と反転測定を行ったアルミブロック面間の傾斜角 $\theta_r$ を示す。工事前後に於いて、 $\theta_r$ がほとんど変化していないのに対して、 $\theta_0$ が大きく変化しているのが分かる。4回の繰り返し測定時における、 $\theta_0$ 、 $\theta_r$ の標準偏差は、工事前について、10、3 μrad、工事後について、15、5 μradであった。

図8(a)、(b)に、工事前後にそれぞれ4回行われた床面傾斜角の繰り返し測定結果の平均値と標準偏差

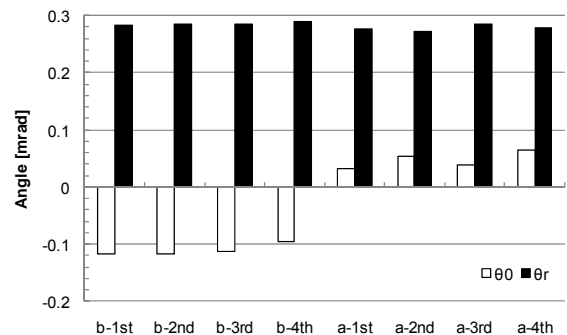


図7:測定系のオフセット $\theta_0$ と真の傾斜角 $\theta_r$ 、b-1st~4thが工事前、a-1st~4thが工事後を示す

を示す。図 8(a)より、床面傾斜角は工事前後に於いてほとんど変化していないことが分かる。一方、標準偏差で示された繰り返し性は、工事前で平均 20  $\mu\text{rad}$ 、最大 61  $\mu\text{rad}$ 、工事後で平均 24  $\mu\text{rad}$ 、最大 53  $\mu\text{rad}$  であった。これらは、KEK 入射器のアライメント基準プレート間の真直度評価時に得られた傾斜角測定値の標準偏差:平均 9  $\mu\text{rad}$ 、最大 42  $\mu\text{rad}$ <sup>[2]</sup>と比較して、2 倍程度のばらつきであり、アライメント基準プレートと比較して、平面度の劣る床面を測定対象とした場合であっても、同程度かやや劣る繰り返し性で、傾斜角が測定できたものと考えられる。工事後の測定に於いて、中央部分の 2 点の測定値が抜けているのは、設置された壁のために当該 2 点の測定ができなかったためである。

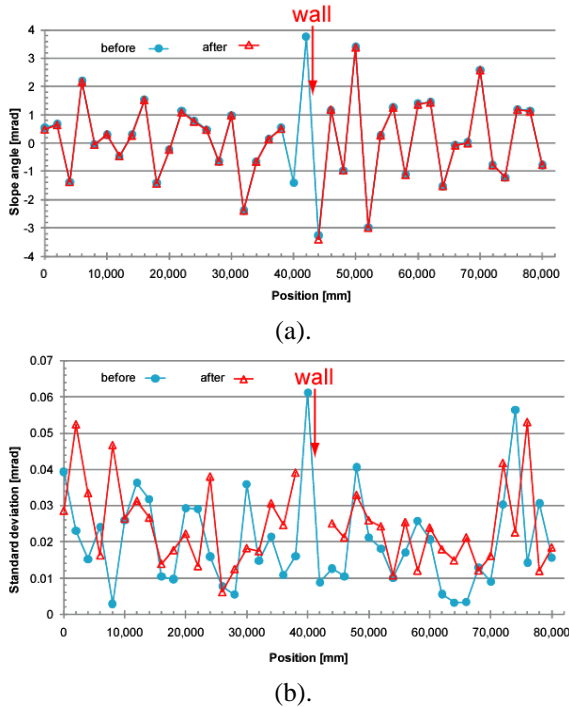


図 8: 壁工事前後にそれぞれ 4 回行われた床面傾斜角の繰り返し測定結果の平均値(a)と標準偏差(b).

## 4. 考察

### 4.1 工事前後の床面変動

工事前後の床面変動は、図 8(a)に示される工事前後の床面傾斜角を、式(1)のように積分して得られた工事前後の床面形状を差し引くことで得られる。しかし、今回の測定では、壁が設置された中央部分において、工事後の床面傾斜角が測定できなかったため、このような方法により工事前後の床面変動を求める事が出来ない。そのため、反転測定により検出された床面傾斜角が、水平面に対する絶対傾斜角と考えられることを利用して、これらの差をとることで工事前後の床面傾斜角の変化量を求め、その変化量を積分することで、床面変動を求めた。

図 9 に工事前後の床面傾斜角変動を示す。図のエ

ラーバーは、工事前後の床面傾斜角測定値の標準偏差を二乗和し、その平方根値として導出された床面傾斜角変化量の標準偏差であり、平均 33  $\mu\text{rad}$ 、最大 61  $\mu\text{rad}$  となった。

図 10 に、図 9 に示された工事前後の床面傾斜角変動量を積分して得られた、工事前後の床面変動を示す。図には、上流側から下流側に向かい 15  $\mu\text{rad}$  程度の傾斜成分が見られる。前述のように、図 6 の紙面内のオフセットは、反転測定によりキャンセルできるが、図 6 紙面に直交する方向の変動と、それに起因するオフセットとその変動は、キャンセルできないため、これらの影響のため、図 10 の傾斜成分が発生する可能性がある。今後、この原因が、測定系に起因するものであるか、実際に床面が傾斜しているのかについての切り分けには、さらなる検討が必要である。

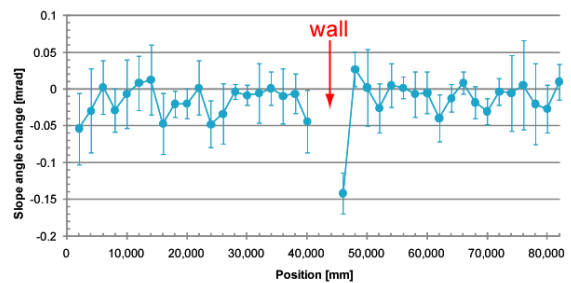


図 9: 壁工事前後での床面傾斜角の変動

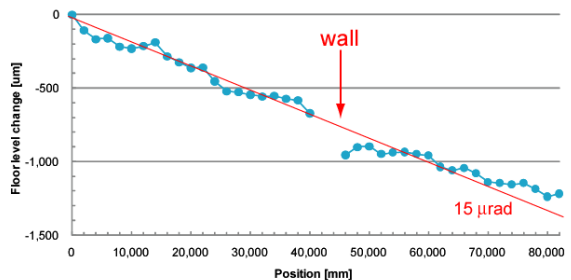


図 10: 図 9 に示された床面傾斜角変動を積分して得られた、壁工事前後での床面変動

### 4.2 床面変動の評価

KEK 入射器のような直線型の加速器では、直線からのずれである真直度のずれが、その装置性能に影響する。図 10 から傾斜成分を取り除いて得られた、床面変動の真直度を図 11 に示す。ここでは、全長 82 m 間において、 $\pm 0.2$  mm 程度のずれが見られる。図 11 では、比較のため同時に、アライメント望遠鏡による結果を示す。両者の間には、測定位置 40~50 m、および、70~80 m で、0.2 mm 程度の違いが見られるが、それらを除き一致していることがわかる。アライメント望遠鏡での測定は、KEK 入射器の架台内に設置される、アライメントレーザ用真空パイプ中心位置を検出していることから、変動量が床面の変動量とは異なる可能性がある。

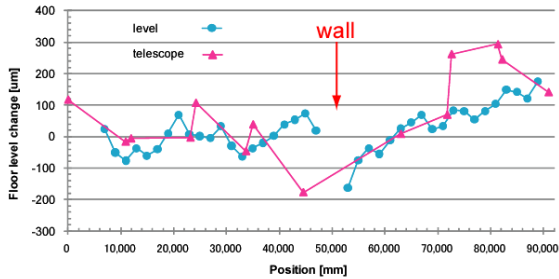


図 11: 図 10 に示された床面変動から傾斜成分を取り除き拡大した床面変動の真直度、アライメント望遠鏡による測定結果を同時に示す、横軸の測定位置はアライメント望遠鏡による測定位置を基準として示している

## 5. 結言

放射線シールド用コンクリート壁の設置に伴う KEK 入射器トンネル床面の変動量を、高精度な水準器、直定規、接触足からなる測定系を用いて測定した。この時、測定系のオフセット、および、その変動の影響を除去するために、反転測定を適用した。その結果、コンクリート壁を中心とした 82 m の範囲に於いて、床面の変動に伴う床面の傾斜角変動を、平均 33  $\mu\text{rad}$ 、最大 61  $\mu\text{rad}$  の標準偏差で検出することができた。

この傾斜角変動を積分することで導出された床面変動には、15  $\mu\text{rad}$  程度の傾斜成分が見られた。これは、工事前後に用いた測定系において除去しきれなかったオフセット差に起因する可能性がある。

この傾斜成分を差し引いた工事前後の床面変動の真直度は、 $\pm 0.2$  mm 程度となった。その大きさと変化の傾向は、アライメント望遠鏡による測定値と部分的に一致した。

## 謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構共同開発研究 2010-ARL-03 の助成を受けた。

本研究をすすめるにあたり、(株)三菱電機システムサービス水川義和氏、鈴木和彦氏らの協力を得た。

アライメント望遠鏡による測定結果は、(株)トヤマ飯野陽弼氏、酒井国彦氏、および、(株)三菱電機システムサービス牛本信二氏らによるものである。

## 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、「水準器を用いた KEK 入射器の真直度測定」、第 7 回加速器学会年会、THPS121、姫路市、(2010).