

EVALUATION OF THE ALIGNMENT FOR LONG LINEAR ACCELERATORS USING A LEVEL

Tatsuya Kume^{#A)}, Eiki Okuyama^{B)}, Masanori Satoh^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{B)} Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

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

Abstract

We have studied to adopt a level, which is a gravity referenced precise inclinometer, for evaluating alignment of large linear accelerators, which is several hundred meters or larger. It has advantages for evaluating large objects because it is hardly affected by shape references, which becomes difficult to be defined enough accurate as the objects becomes large. We had already evaluated the vertical aligning straightness of the reference plates for the 70-m-long part of the KEK injector linear accelerator (KEK linac) with the standard deviations of less than 49 μm by using a level on a straight bar. The results are fairly reliable having good agreement within sub-mm range with those by the other methods; however, the evaluation distances were limited by obstacles which block the measurement path.

Here, we devised new method which adopts two offset bars for avoiding the obstacles. Their one ends are placed on the measurement points with their axis directed perpendicular to the measurement path. One can avoid the obstacles by measuring the slope angles between the far ends of each offset bars instead of measuring directly those between the measurement points. Error arises from the offset bars can be eliminated by reversal measurement, which considers slope angles of the offset bars.

As a result, straightness for the 206-m-long part of the linac, which corresponds to the three successive accelerator sectors of the linac, could be evaluated with our new method. The reproducibility expressed by the standard deviation of the slope angles for the arbitrarily sampled measurement point was 15 μrad , which is comparable with the average of our former measurements of 10 μrad . Moreover, the result agrees with those by the alignment telescope and our laser-based alignment system partially within sub-mm range. They indicate that our new method can be applicable for evaluating alignment of large accelerators in spite of its complexity caused by the offset bars.

水準器を用いた大型線形加速器のアライメント評価

1. 緒言

高エネルギー物理実験や放射光源などに用いられる数 100 m から数 10 km に及ぶ大型の加速器を運転するには、それらを構成する機器を高精度にアライメントする必要がある。加速器の最終的なアライメントは、自身を運転することで得られる粒子ビームを基準に行われる。この作業はビーム基準アライメントと呼ばれるが、その基準とし得る高品質のビームを得るには、加速器の構成機器間の相対位置をある程度の精度で合わせ込む必要がある。この作業を加速器の機械的アライメントと呼ぶ。

我々は、加速器の機械的アライメントにおけるアライメント評価を形状測定と考え、長距離の形状測定において問題となる測定基準の誤差の影響を受けにくい、水準器（傾斜計）を用いた形状測定法に基づく評価方法について検討を行っている。この方法を KEK 入射器^[1]のアライメント評価に適用したところ、プレート間に差し渡された直定規の傾斜角を検出することで、71 m の直線部分におけるアライ

メント基準プレート間の並び形状を、標準偏差 49 μm 以下の繰返し性で評価することができた。さらに、誤差伝播則に基づく誤差見積り値は実験値とよく一致し、KEK 入射器最長の約 500 m の直線部を標準偏差 0.3 mm 程度の繰返し性で評価可能と見積られた。^[2]

従来法では、測定経路上の障害物により直定規を差し渡すことができなくなることで、評価可能範囲が制限されていた。ここでは新たに、測定経路に対して直交方向に張り出すオフセットバーと呼ばれる梁を測定対象上に置き、それらの先端間に直定規を差し渡すことで障害物を回避した。この場合、検出される傾斜角に、オフセットバーの形状、姿勢、変形などが、新たな誤差要因として加わる可能性がある。これらの影響は、新たに考案したオフセットバーの傾斜を考慮した反転測定法を適用することで、除去することができる。

本論ではまず、オフセットバーの傾斜角を考慮した反転測定について述べ、続いてこの手法を用いた形状測定法の KEK 入射器の 206 m の直線部分のアライメント評価への適用結果、さらに、より長距離のアライメント評価への適用可能性について述べる。

[#] tatsuya.kume@kek.jp

2. 原理

2.1 水準器を用いた形状測定法

水準器を用いた形状測定法の原理を図 1 に示す。図において形状検出器として用いられる水準器は、測定方向の x 軸方向に順に送られながら、形状 $f(x)$ 上の各測定点における接線の傾斜角 $\theta(x)$ を次々と検出する。このとき各測定点 $x_i (i=1 \text{ to } n)$ における傾斜角の測定値を $\theta(x_i)$ とすると、 $\theta(x_i)$ は水準器の経路 $e(x)$ の影響を受けない。一方、 $\theta(x_i)$ は各測定点 x_i における形状 $f(x_i)$ の微分値に相当することから、(1)式のように $\theta(x_i)$ を積分することで形状 $f_m(x_n)$ が導出される。(1)式において、 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。

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

形状検出器に変位計などを用いる一般的な形状測定では、形状検出器の経路 $e(x)$ を基準に形状導出が行われるため、 $e(x)$ の影響を受ける。それに対して水準器を用いた形状測定法による導出形状 $f_m(x_n)$ は、(1)式より $e(x)$ の影響を受けないことがわかる。即ち、水準器を用いた形状測定法では、形状基準やその誤差に影響される事無く形状が導出される。

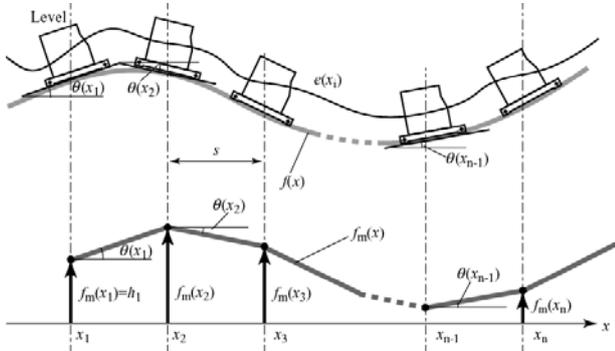


図 1: 水準器を用いた形状測定法

2.2 オフセットバーによる障害物の回避

KEK 入射器の基準プレートのアライメント評価では、2 m 程度の間隔で飛び飛びに設置される基準プレート間に直定規を差し渡し、その傾斜角を検出している。図 2(a)に、直定規と水準器を用いた形状測定を示す。ここでは、基準プレートと直定規の間に接触子(足)を入れることで、基準プレート上のカッターマークやうねりなどの微細形状の影響を取り除くとともに、測定経路上の取り付け金具や水冷管などの小型の障害物を回避している。しかし、このような測定系では、測定経路上に張り出すような大型のマグネットなど、図 3(b)に示されるような大型の障害物を回避することができない。このため、図 3(c)に示されるように、測定経路に対して直交方向にオフセットバーと呼ばれる梁を突き出し、それ

らの両端に直定規を差し渡すことで、障害物を回避する。

この場合、オフセットバーの形状、姿勢、変形などが誤差要因となる恐れがあるが、それらの影響は、後述するオフセットバーの傾斜を考慮した反転測定を適用することで除去可能と考えられる。

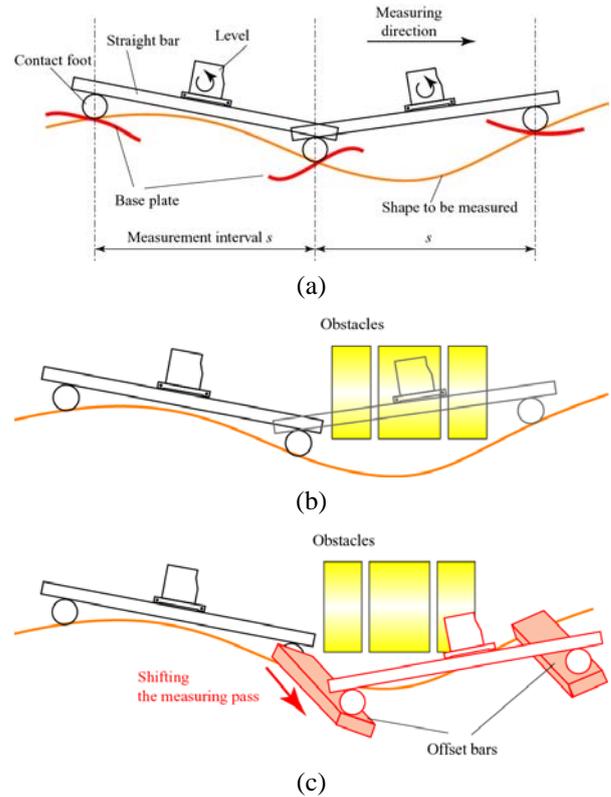


図 2 (a): 直定規と水準器を用いた形状測定、(b): 測定経路上の障害物の影響、(c): オフセットバーを用いた障害物の回避

2.3 オフセットバーの傾斜を考慮した反転測定

図 3(a), (b)に、オフセットバーの傾斜角を考慮した反転測定を示す。ここでは、測定系を反転させることで、測定系の持つ系統誤差を除去するが、図 3(a)が基準測定時の様子、図 3(b)が反転測定時の様子をそれぞれ示す。簡単のため、これらの図ではオフセットバー a, b と直定規 c があたかも同一平面上にあるかのように描かれているが、実際には、図 2(c)に示されるように、2 つのオフセットバーと直定規とは互いに直交するような面内に配置される。

ここでは、3 台の水準器 A, B, C を用いて、オフセットバー a, b、および、直定規 c の反転測定前後の傾斜角 $\theta_{ma}, \theta_{mb}, \theta_{mc}, \theta_{na}, \theta_{nb}, \theta_{nc}$ を検出し、これらをもとに測定対象 P, Q 上の測定点 p, q を結ぶ直線の傾斜角 θ を導出する。反転測定時には、基準測定時において p 点上に設置したオフセットバー a と水準器 A からなる測定系と、q 点上に設置したオフセットバー

b と水準器 B からなる測定系を、それぞれ q,p 点上に設置し、それらの上に設置した直定規 c と水準器 C からなる測定系の両端点 c_1, c_2 が、そのまま a_2, b_2 点上になるように入れ替える。このとき水準器 A,B,C と、それらを載せるオフセットバー a,b、および、直定規 c との相対位置と相対方位はそれぞれ不変とする。

図 3(a)において、3 台の水準器 A,B,C の測定値を、 $\theta_{ma}, \theta_{mb}, \theta_{mc}$ 、水準器のオフセット誤差を、 $\theta_{0a}, \theta_{0b}, \theta_{0c}$ とする。一方、2 本のオフセットバー a,b の両端点を a_1, a_2, b_1, b_2 として、測定点 p,q から遠い側の端点 a_2, b_2 の測定点 p,q に対する高さを、 h_{ma2}, h_{mb2} 、2 点 a_2, b_2 間の傾斜角を、 θ_u とする。また、2 本のオフセットバー a,b の形状誤差（真の直線からのずれ）に起因する水準器測定位置における傾斜角誤差を、 θ_{sa}, θ_{sb} とし、直定規を載せる先端部 a_2, b_2 点への荷重に起因するオフセットバーのたわみによる水準器測定位置における傾斜角誤差を、 θ_{wa}, θ_{wb} とする。さらに、直定規 c の形状誤差に起因する傾斜角測定位置における傾斜角誤差を、 θ_{ca} 、直定規両端点 c_1, c_2 の高さを、 h_{c1}, h_{c2} とする。最後に、測定点 p,q における測定対象 P,Q 上に引いた接線の傾斜角を、 θ_1, θ_2 、2 点 p,q 間の水平距離を s 、オフセットバー a,b の水平方向長さを d とする。

図 3(b)において、3 台の水準器 A,B,C の測定値を、 $\theta_{na}, \theta_{nb}, \theta_{nc}$ とする。2 本のオフセットバー a,b の測定点 p,q から遠い側の端点 a_2, b_2 の測定点 p,q に対する高さを、 h_{na2}, h_{nb2} 、 a_2, b_2 点間の傾斜角を、 θ_v とする。一方、3 台の水準器 A,B,C のオフセット誤差 $\theta_{0a}, \theta_{0b}, \theta_{0c}$ 、オフセットバー a,b の形状誤差に起因する傾斜角誤差 θ_{sa}, θ_{sb} 、直定規 c の形状誤差に起因する傾斜角誤差 θ_{ca} 、両端点 c_1, c_2 の高さ h_{c1}, h_{c2} については、基準測定時と等しい。さらに、 a_2, b_2 点への荷重に起因するたわみによる傾斜角測定位置における傾斜角誤差についても、基準測定時と反転測定時の間の荷重変化がないものと考えて、基準測定時と等しいとする。また、測定対象 P,Q 上の測定点 p,q における接線の傾斜角、 θ_1, θ_2 、2 点 p-q 間の距離 s 、オフセットバー a,b の長さ d も基準測定時からの変化は無いものとする。

このとき 2 本のオフセットバー a,b の端点 a_2, b_2 の基準測定時、反転測定時の高さ $h_{ma2}, h_{mb2}, h_{na2}, h_{nb2}$ は、それぞれ(2)~(5)式のように示される。

$$h_{ma2} = d \cdot \theta_1 + h_{sa} + h_{wa} \quad (2)$$

$$h_{mb2} = d \cdot \theta_2 + h_{sb} + h_{wb} \quad (3)$$

$$h_{nb2} = d \cdot \theta_1 + h_{sb} + h_{wb} \quad (4)$$

$$h_{na2} = d \cdot \theta_2 + h_{sa} + h_{wa} \quad (5)$$

ただし、 h_{sa}, h_{sb} は、オフセットバー a,b の形状誤差による端点 a_2, b_2 の変位、 h_{wa}, h_{wb} は、オフセット

バー a,b への荷重による端点 a_2, b_2 の変位を示す。ここで、 h_{sa}, h_{sb} には、オフセットバー a,b の両端部分の厚さの差や、自身および水準器 A,B の質量による端点 a_2, b_2 の変位も含まれる。一方、 h_{wa}, h_{wb} については、基準測定時と反転測定時の間において端点 a_2, b_2 への荷重は変化しないものと考えられることから、基準測定時と反転測定時で等しいものとする。

一方、基準測定時の 2 点 a_2, b_2 間の傾斜角 θ_u と、反転測定時の 2 点 b_2, a_2 間の傾斜角 θ_v は、それぞれ(6),(7)式のように示される。

$$\theta_u = \theta_t + \frac{h_{mb2} - h_{ma2}}{s} \quad (6)$$

$$\theta_v = \theta_t + \frac{h_{na2} - h_{nb2}}{s} \quad (7)$$

ここで、 θ_t は、最終的に導出することを目的とする、二点 p,q を結ぶ直線の傾斜角である。

また、水準器 C の基準測定時、および、反転測定時の検出角 θ_{mc}, θ_{nc} は、それぞれ(8),(9)式のように示される。

$$\theta_{mc} = \theta_u + \theta_{0c} + \theta_{sc} + \frac{h_{c2} - h_{c1}}{s} \quad (8)$$

$$\theta_{nc} = -\theta_v + \theta_{0c} + \theta_{sc} + \frac{h_{c2} - h_{c1}}{s} \quad (9)$$

さらに、2 本のオフセットバー a,b 上の水準器 A,B の基準測定時、反転測定時の測定値 $\theta_{ma}, \theta_{mb}, \theta_{na}, \theta_{nb}$ は、それぞれ(10)~(13)式のように示される。

$$\theta_{ma} = \theta_1 + \theta_{0a} + \theta_{sa} + \theta_{wa} \quad (10)$$

$$\theta_{mb} = \theta_2 + \theta_{0b} + \theta_{sb} + \theta_{wb} \quad (11)$$

$$\theta_{na} = \theta_2 + \theta_{0a} + \theta_{sa} + \theta_{wa} \quad (12)$$

$$\theta_{nb} = \theta_1 + \theta_{0b} + \theta_{sb} + \theta_{wb} \quad (13)$$

ただし、 θ_{0a}, θ_{0b} は、水準器 A,B のオフセット誤差、 θ_{sa}, θ_{sb} は、オフセットバー a,b の形状誤差による水準器測定位置でのオフセットバーの傾斜角誤差、 θ_{wa}, θ_{wb} は、オフセットバー a,b への荷重による水準器測定位置でのオフセットバーの傾斜角誤差をそれぞれ示す。ここで、 θ_{sa}, θ_{sb} には、オフセットバー a,b および水準器 A,B の質量による変形に起因する傾きも含まれる。一方、 θ_{wa}, θ_{wb} については、基準測定時と反転測定時の間において端点 a_2, b_2 のへの荷重は変化しないものと考えられることから、基準測定時と反転測定時の間において等しいものとする。

すると、(2)~(13)式から、(14)式が導出される。

$$\theta_t = \frac{1}{2}(\theta_{mc} - \theta_{nc}) + \frac{d}{2s}(\theta_{na} - \theta_{mb} + \theta_{nb} - \theta_{na}) \quad (14)$$

(14)式は、二点 p, q 間の傾斜角 θ が、2 つのオフセットバー a, b と直定規 c 上の 3 台の水準器の基準測定時、および、反転測定時の検出角 $\theta_{ma}, \theta_{mb}, \theta_{na}, \theta_{nb}, \theta_{nc}, \theta_{oc}$ により示されること、即ち、目的とする二点間の傾斜角 θ が、3 台の水準器のオフセット $\theta_{0a}, \theta_{0b}, \theta_{0c}$ 、オフセットバー a, b の形状誤差 h_{sa}, h_{sb} 、および、オフセットバー a, b の形状誤差に起因する傾斜角誤差 θ_{sa}, θ_{sb} 、直定規の形状誤差 h_{c1}, h_{c2} と直定規の形状誤差に起因する傾斜角誤差 θ_{sc} 、さらに、オフセットバー a, b の端点 a_2, b_2 への荷重に起因するオフセットバーの変形 h_{wa}, h_{wb} に影響されずに導出可能であることを示す。

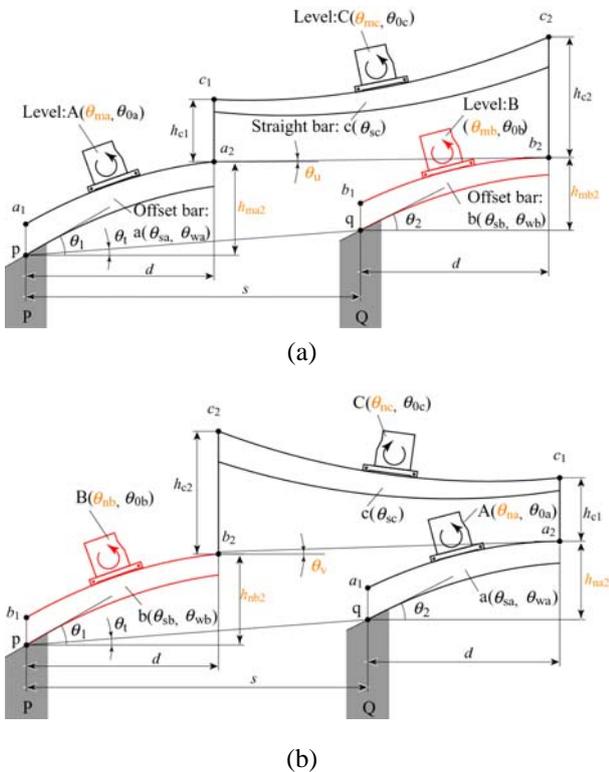


図 3: オフセットバーの傾斜角を考慮した反転測定、(a):基準測定時、(b):反転測定時

3. 測定

3.1 概要

KEK 入射器は、125 m、および、476 m の 2 つの直線部が 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っている。現在、その下流に位置する蓄積リングの改造と将来のアップグレードに備えた検討のため、476 m の直線部が、加速器を収納する地下トンネル内の中央部に設置されたシールド壁により分割されている。ここでは、現状において最も長い測定長を取ることのできる、最下流の直線部約 206 m を測定対象とした。

水準器には、従来と同様に測定範囲 ± 3 mrad (\pm

600 arcsec)、分解能 $0.5 \mu\text{rad}$ (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、オフセットバーには、幅 50 mm、厚さ 25 mm、肉厚 2 mm の角型パイプ断面をもつ長さ 400 mm のアルミ押出材を用いた。直定規には、幅 50 mm、厚さ 25 mm、肉厚 2、もしくは、3 mm の角型パイプ断面をもつアルミ押出材を、長さ 640, 1344, 2304 mm の 3 種類について用意し、これらを測定区間長に合わせて用いた。

オフセットバーの傾斜角を考慮した反転測定では、基準測定時と反転測定時にそれぞれ 3 つの傾斜角を検出する必要がある。ここでは、1 台のタリベル 4 に備わる 2 チャンネル分の角度検出器を入れ替えることで、3 つ分の測定を行った。この場合、角度検出器が置かれない測定位置に、角度検出器と等しい質量とフットプリントを持つダミーウェイトを置くことで、たわみの影響が一定になるように配慮した。角度検出器の質量は、ケーブルを含めて約 0.82 kg である。

オフセットバーの先端部に載せる角度検出器と直定規の質量は、最大で約 3.3 kg となる。2 本のオフセットバーとそれらの上に乗せる角度検出器の質量を併せて、全体の角度検出系をバランスさせるため、2 つのオフセットバーの根元上にそれぞれ約 14 kg のバランスウェイトを置いた。これらのウェイトは、基準測定時と反転測定時における、測定系の支持条件を揃えるために、オフセットバー a, b それぞれについて専用とした。図 4 に測定の様子を示す。

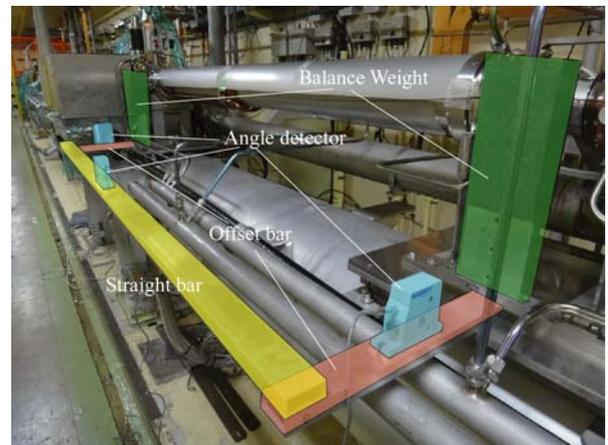


図 4: オフセットバーと直定規を用いた傾斜角測定の様子

3.2 測定結果

図 5 に測定結果を示す。ここでは比較のため KEK 入射器に組み込まれているレーザアライメントシステム、^[1]および、アライメント望遠鏡による同一部分の測定結果を示す。

本測定では重力方向を基準とするため、100 m を超えるような長距離において、mm レベルの形状差を問題とするような高精度な測定では、地球表面の曲率が問題となる。ここでは、地球を平均半径

$R=6371$ km の球体と考え、この形状分を差し引くことで導出形状を補正している。図 5 に、測定原点からの距離に対する補正量を *geoid curve* にて示す。この値は、地球表面の平均形状に相当する。

4. 考察

図 5 は、4~8 ヶ月程度の間隔で行われた、一回ずつの測定結果であるため、それらの間の差異が、測定によるものか、測定対象自体の変形等によるものかの切り分けはできない。しかし、互いに独立した異なる方式により得られた 3 つの評価結果において、部分的ではあるがサブ mm レベルでの一致が見られることから、これらはそれぞれある程度の信頼性を持つものと考えられる。

一方、本方式により任意の測定点にて 4 度の繰返し測定を行った場合、得られる傾斜角の繰返し性は、標準偏差で約 $15 \mu\text{rad}$ となった。オフセットバーを用いない従来法での傾斜角測定値の繰返し性が、全測定点での平均値で約 $10 \mu\text{rad}$ であったことから、オフセットバーを用いることで測定系が複雑になったにも関わらず、従来法と同程度の繰返し性での評価の実現が期待できる。

これらのことから、今回考案したアライメント評価法は、従来法と同様に KEK 入射器を含む大型の加速器に適用可能であると考えられる。

5. 結言

水準器を用いた形状測定法に基づく加速器のアライメント評価方法を検討するにあたり、測定方向に対して直交方向に張り出すオフセットバーと呼ばれる梁を用いることで、測定経路上の障害物を回避して、より長距離での評価を可能とした。

このとき問題となる、直定規やオフセットバーの形状、姿勢、変形などによる誤差の影響を取り除くために、オフセットバーの傾斜を考慮した反転測定を考案し適用した。

その結果、KEK 入射器の 206 m の直線部分のア

ライメント評価が可能となった。さらにその評価結果は、KEK 入射器に組み込まれたレーザアライメントシステム、および、アライメント望遠鏡によるものと、部分的ではあるがサブ mm レベルで一致した。このことから、これら 3 つの測定結果には、ある程度の信頼性があるものと考えられる。

一方、検出された傾斜角の繰返し性は、標準偏差で約 $15 \mu\text{rad}$ と、従来法での繰返し性の平均値約 $10 \mu\text{rad}$ と同程度となった。このことから、オフセットバーを用いることで測定系がより複雑になった本方式であっても、従来法と同程度の繰返し性での評価の実現が期待できる。

これらのことから、今回考案したアライメント評価法は、従来法と同様に KEK 入射器を含む大型の加速器に適用可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)共同開発研究 2010-ARL-03、および、2011-ARL-03 の助成を受けた。本研究を遂行するにあたり、KEK 機械工学センター江並和宏氏、東保男氏（現 KEK 加速器研究施設）、山中将氏、上野健治氏らの支援を受けた。測定において、(株)三菱電機システムサービス水川義和氏、(株)トヤマ飯野陽弼氏らの協力を得た。機器の製作において、KEK 機械工学センターの支援を受けた。

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、「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).
- [3] T. Suwada, et al., "Experimental study of new laser-based alignment system at the KEK B-factory injector linear accelerator", Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 123301 1-12.

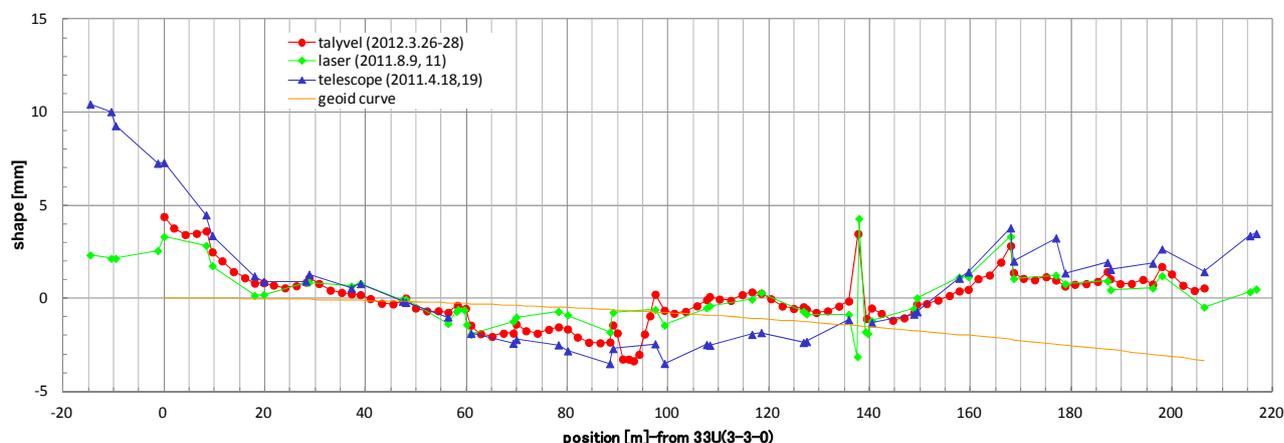


図 5: KEK 入射器 206 m 直線部分のアライメント評価結果、talyvel が本測定、laser がレーザアライメントシステム、telescope がアライメント望遠鏡によるものである、カッコ内は測定年月日を示す