

加速器における電磁石アライメント

菅原 龍平*

Alignment of Magnets in Accelerators

Ryuhei SUGAHARA*

Abstract

Alignment of accelerators, especially about magnet alignment, is overviewed. Firstly the traditional alignment techniques are reviewed. Then modern techniques in accelerator alignment such as laser trackers, total stations, hydraulic leveling systems, stretched wire systems and beam based alignment are reviewed.

1. はじめに

加速器における電磁石アライメントの仕事の中には、加速器トンネル建設期における全体座標基準の設計およびその設置から始まり、地上の基準点のトンネルへの移設、更にビームラインの罫書き、などの作業も含まれる。

初期アライメントの精度は、測量器を使ったアライメント作業の精度の他に、電磁石の磁場中心の測定精度、さらにその磁場中心位置と電磁石に設けられたアライメント基準座との位置関係を求めるときの精度が合わさったものになる。このため、初期アライメントの精度は 0.1 mm 程度が限界と思われる。

衝突型加速器でビームの衝突頻度(ルミノシティ)を上げるためには、ビームをできるだけ小さく絞り、衝突させねばならない。ビームエネルギーが上がってくるに従って、ビームも小さく絞ることができ、例えば現在運転されている KEK の B ファクトリー加速器 KEKB¹⁾ (3.5 GeV の陽電子ビームと 8 GeV 電子ビームの衝突型加速器) では、衝突するときのビームの縦方向の大きさは 3~4 ミクロンであり、現在国際協力で検討されている ILC²⁾ (International Linear Collider, 第一期計画では 250 GeV の電子ビームと陽電子ビームの衝突、第二期計画ではビームエネルギーを倍の 500 GeV に上げる) では、衝突するときのビームの縦方向の大きさは数“ナノメートル”である。これは、衝突させる寸前の収束四極電磁石で強力にビームを絞り込んで、このように小さなビームを作るわけ

であるが、この最終収束四極電磁石が変位すると、この変位量と同程度の変位が衝突点でのビーム位置に発生してしまう。このため衝突を安定に保つために、最終収束四極電磁石の位置はビーム寸法の数分の 1 の安定性が要求される。近年では BBA という手法が使われ、より高精度の電磁石アライメントが可能になってきた。つまり、初期アライメントでは、リング加速器の場合ビームが周回するためだけの精度を、線形加速器の場合は衝突点までビームが走るためだけの精度を要求しておき、電磁石のずれ、および BPM (Beam Position Monitor, ビーム位置モニター) の狂いは、ビームを通したときの BPM からの情報を使って解析して求め、これをいろいろな手法で補正する。このときの精度はほぼ BPM の分解能に依っており、1 ミクロン程度の精度を得ることができる。

本稿では、まず従来のアライメント方法について解説し、次に近年急速に発達してきたレーザートラッカーなどの近代機器について述べる。地表での基準点設置は、近年では GPS (Global Positioning System) を使って行われるが、この方法については筆者は経験がないため、ここでは参考文献を挙げるに留める^{3,4)}。

2. アライメント一般について

リング加速器ないしは線形加速器をアライメントするときに注意すべきことがある。それは地球の丸みをどう取り扱うか、ということである。地球の平均海面を地球の形状と仮定すると、東西に 6,378 km、南北に 6,357 km の半径を持った、南北にやや扁平な形

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
(E-mail: sugahara@post.kek.jp)

をしている。この平均化された地表の形をジオイド (geoid) と呼んでいる。東京近辺の北緯 35 度では地球半径は 6,371 km である。以下この地球半径 $R = 6,371$ km を使っていくつかの計算を試みる。

加速リングはジオイドに円を置いたものである。垂直方向のアライメントは各部所で水平に行なうてゆけばよい。ただ、リングに直線部を設ける場合、左右のビームライン端点を直線で結ばねばならず、水平にアライメントするわけにはいかない。直線部の全長を L 、地球半径を R 、直線部端点からの距離を X とすると、距離 X での直線ビームラインと左右の両端点を通るジオイドに平行な弧の間の距離 Y は

$$Y = X(L - X) / (2R)$$

となる。 $X = L/2$ を代入すると、中心点での Y が求まり、これを Y_c と記すと

$$Y_c = L^2 / (8R)$$

$R = 6,371$ km を代入して、いろいろな L に対する Y_c を求めてみると

| L (m) | Y_c (mm) |
|---------|------------|
| 50 | 0.05 |
| 100 | 0.20 |
| 200 | 0.78 |
| 1000 | 20 |

従って 0.1 mm 程度のアライメント精度を求めるときには、直線部の距離が 50 m 以下であればジオイドの形を気にする必要はない。逆に直線部の距離が 50 m 以上であれば、垂直方向のアライメントではジオイドの形を補整する必要がある。線形加速器についても、垂直方向のアライメントでは同様のことが言える。

また、ジオイドに置いたリングでの水平度については、対向した位置での水平は互いにある角度をもって交差する。この角度 θ は

$$\theta = 2r/R$$

と表される。ここで r はリング半径を表す。これをいろいろな r について計算してみると以下の表のようになる。

| r (km) | θ (mrad) |
|----------|-----------------|
| 0.5 | 0.16 |
| 1 | 0.31 |
| 2 | 0.63 |
| 5 | 1.57 |
| 10 | 3.14 |

従って 0.1 mrad 程度のアライメント精度で、電磁石を水平にアライメントするのであれば、直径 1 km 以上のリングではジオイドの形状を補正する必要がある。

3. 従来のアライメント法

電磁石をアライメントするには、その水平位置、垂直位置および水平度を予定された値に合わせる必要がある。電磁石の磁場中心軸を予定された水平・垂直位置に合わせ、磁場のメディアン面⁵⁾ (median plane) を決められた水平度に合わせるわけであるが、磁極中心にはビームパイプが挿入されるため、治具を挿入してその磁極中心を直接観測するということができない。そこで普通、電磁石の上面のビーム軸に沿った 2 点に基準標的座を設け、この座にアライメント用標的を置いたときの、その磁極中心からのオフセット値を予め求めておいて、このオフセット値を勘案しながらアライメントする。ただし、工場アライメント基準座を取り付けるときの基準は、磁場中心軸およびメディアン面ではなく、磁極中心軸および磁極の境目であるため、アライメント基準座のオフセット値が設計値どおりになっているかは、磁場測定の際に確認しておかなければならない。ここでは磁場測定については省かせて頂くので、興味のある方は、磁場測定に関する論文ないしは解説を参考にさせていただきたい⁶⁾。

さて、電磁石の水平位置、垂直位置および水平度を合わせるための機器であるが、標準的には従来、水平位置を合わせるためにはセオドライト(トランシット)および測距儀、垂直位置を合わせるためにはレベル望遠鏡、水平度を合わせるためには水準器が用いられてきた。以下、これらの機器について解説を試みる。

3.1 セオドライト (トランシット)

加速器のアライメントの世界では、セオドライト (theodolite) もトランシット (transit) もあまり区別せず、ほぼ同義語のように使われていると思われる。かく言う私も、この 2 つの機器の区別は判然としていなかった。辞書を引くとセオドライトは経緯儀と訳されており、水平または垂直の角度を測量するための望遠鏡を意味するようである。一方トランシットは転鏡儀と訳されており、正式には transit theodolite という。つまりトランシットは鏡を使った特別な角度測量器であり、セオドライトは垂直・水平の角度測量器の総称であるらしい。従ってセオドライトと呼ぶのが無難なようである。

さて、セオドライトは望遠鏡から 2 つの標的を見込む角を測る機器であるが、我々は主に電磁石を直線

上にアライメントするのに使用する。セオドライトは、真下を見て、望遠鏡を基準点上に置くことができるが、精度が落ちる。そこで我々は、2つの標的を視準しながら2点を結ぶ線上にセオドライトを設置し、この線上に電磁石をアライメントする方法を採用している。このセオドライトの設置法は、慣れてくると2~3回の繰り返しで収束し、思ったほど時間はかからない。また、セオドライトは鏡筒を垂直面で回転させて反対方向を視準することができるが、我々にはできるだけ片方向のみで行なうようにしている。これは反転した場合、望遠鏡の鉛直軸の真の鉛直軸からの狂いが効いてくるためである。望遠鏡は備えられた気泡式水準器を使って水平にする。普通オートレベルになっているが、オートレベルといっても真の水平からの狂いがあるため、望遠鏡の鉛直軸が狂う。0.1 mm程度の精度を求める場合の視準距離はだいたい20 m程度である。これ以上の距離を視準すると、空気の揺らぎのために標的像が揺れたり、ゆっくりドリフトしたりして、精度が0.1 mmを出せなくなる。従って片側だけの視準であれば、アライメント距離は20 m程度が適当である。鏡筒を反転して両側を視準すれば、40 m程度のアライメントができる。そこで、どうしても鏡筒を反転して使いたければ、先に書いた望遠鏡の鉛直軸の狂いを補正する必要がある。この方法は、まず鏡筒を反転しながら、両側にある2点を繋ぐ線上にセオドライトを設置する。そしてこの線上に視準点を記す。次に望遠鏡を180度回して、同じことを行なう。線上に記した視準点はかならず食い違うはずであるから、この中間点をとる。これは望遠鏡を180度回したことによって、鉛直軸の狂いが反転するため、視準点の狂いが反対方向にでるためである。このような補正をされたことがなければ、一度試みられるとよい。思いの外大きなズレが見られてビックリすることがよくある。

いろいろなセオドライトが販売されているが、世界中で信頼度が高く、よく使われているものに、旧Kern社のE2もしくはE2-Iがある。Kern社は1988年頃にWild社に吸収合併され、Wild社は本社のライカを名乗るようになり、実質的にライカ社の販売となっていたが、近年製造が中止され、もはや入手できない。この中でもE2-Iは焦点距離が短く、最短で60 cmを視準することができる。またパンフォーカルなので、近くを見るときの13倍から遠くを見るときの42倍まで拡大率が切り替わり、遠くも大変見易いため、我々の愛用の機器の一つになっている。もう入手できないとなると、大変残念な気がする。

3.2 レベル望遠鏡

これは水平を視準するための望遠鏡であり、正式にはレベル (level) と呼ばれる。しかし日本語でレベルと言っただけでは何のことか分かりにくいし、英語でlevelと言うと水準器も指すため、私はレベル望遠鏡と呼ぶことにしている。

これも先のセオドライトと同じく、望遠鏡の光軸が水平面から狂っていることからくる誤差を持っている。ただし視準距離が同じであればこの誤差は同じなので、2つの標的を視準するときには、望遠鏡を2つの標的の真ん中に設置することによって、この誤差の影響を受けなくすることができる。この性質を利用して、レベル望遠鏡の較正をすることができる。まず壁の前に望遠鏡を水平に設置し、左右等距離(5 m程度が適当)の所にアライメント用標的のシールを同じ高さに貼る。左右のシールの高さを視準し、その差(右-左)を Δh とする。望遠鏡を左のシールの前に移動し、左右のシールの高さを視準する。この差(右-左)を ΔH とする。左右のシール間の距離を L とすると、このレベル望遠鏡の狂い m は

$$m = (\Delta H - \Delta h) / L$$

である。光軸の傾きまたは望遠鏡の鏡筒の傾きを調節する機構があれば、調節機構を使って m が十分小さくなるまで調節する。

一度、あるビームラインを測量している現場に行き合わせた。リング側から測ると外の電磁石が数ミリ上がって見えるのに、実験ホール側から測るとリング側の電磁石が数ミリ上がって見える、不思議だ、と担当者が言うのである。まさにレベル望遠鏡の光軸の狂いのせいで、このような結果になっていたのである。この場合、両方の測定結果の平均をとれば、真のアライメント誤差を得ることができる。この人のように、片側からレベルを視準しているケースをときどき見かけるが、その場合はレベル望遠鏡の光軸の狂いがもろに入ってくるので、注意する必要がある。

さて、レベル望遠鏡もいろいろなものが販売されているが、世界中で信頼度が高く、よく使われているものに、旧Wild社のN3という名機がある。この望遠鏡もパンフォーカルの機能を持っており、近距離で21倍、遠距離で46倍の倍率になる。また、最短45 cmまで視準することができ、大変便利である。先端に装着された楔型カバーガラスを回転することにより、光軸の角度を変えることができ、望遠鏡の較正をすることができる。残念ながらこの望遠鏡も製造が中止されてしまった。

近年は電気式デジタルレベルが、こういった機械式レベルにとって代わろうとしている。これはバーコード標尺を望遠鏡の中の CCD で読み取って、高さを解析して、結果をディスプレイに表示するものである。仕様によれば、ライカ社の DNA03 の性能は、インバール尺を使った場合の測定精度が 0.3 mm、測定レンジは 1.8~110 m となっている。近距離では精度的には機械式よりも数段劣るが、20 m を越す距離ではこちらの方が有利と思われる。しかし実際に使う身になってみると、測定には約 3 秒かかるため、目標位置が目で見える機械式レベル望遠鏡に比べると、デジタルレベル望遠鏡はアライメント作業には不便である。

3.3 水準器

水準器には旧来の気泡を使ったものと、近年発達してきた電気式のものがある。両方ともいろいろな製品があるが、気泡式では Carl Zeiss 社のものが便利である (図 1)。これは片側の高さをつまみを回しながら変えてゆき、プリズムで分割された 2 つの気泡のイメージが合致するところを捜す。合致したところが水平位置であり、ここまで回したつまみの回転角によって水平度が分かるようになっている。レンジは ± 10 mrad、一目盛が $10 \mu\text{rad}$ であるので、高分解能のわりにはレンジが広く、アライメントにはとても重宝である。残念ながらこの機器も近年生産中止になってしまい、今では購入できない。

水準器もその零点に誤差をもっているため、一度測ったら必ず反転してもう一度測り、両者の平均をとらねばならない。これは電気式でも同じである。

電気式には良いものが多くあるが、ここではライカ社の NIVEL20 を紹介しておく (図 2)。これも古くは KERN 社の製品であった。中には光学系が組み立てられており、斜め上方に発射された光は上面を覆う液の上面で反射される。この反射光の位置を光ダイオードで測定することにより、水平 2 方向の水平度を測定する。出力はアナログとデジタルの 2 方式があり、アナログの場合は電圧出力なのでデジタルポルトメーターやデータロガーでそのまま記録できる。分解能は $1 \mu\text{rad}$ 、レンジは ± 1.5 mrad である。

3.4 測距儀

直線部では、ビーム軸に沿った距離を測り、ビーム軸と直角方向は伸張ワイヤーでアライメントする方法が精度が良く、簡便である。距離のアライメントには、古くはインバール線を使っていた。インバール線は温度による線膨張係数が鉄の 1/100 と小さく、これは 100 m の長さが 1°C の温度変化でわずか $1 \mu\text{m}$ し

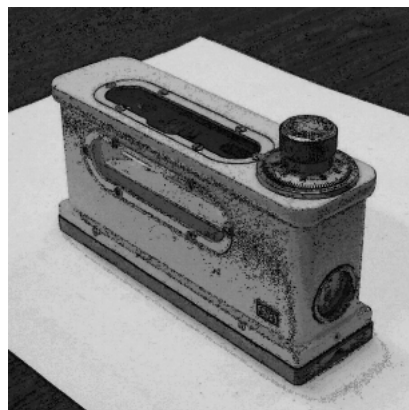


図 1 Carl Zeiss の水準器

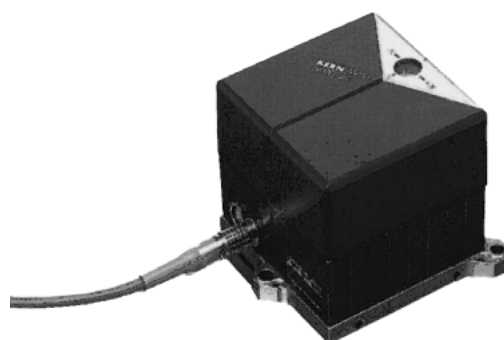


図 2 Leica の NIVEL20

か伸びないことを意味する。このように、熱膨張による狂いは無視できるが、長い距離をコンクリートの床に均一に張るには微妙なテンションのコントロールが必要で、空中に張ることもできないこともあり、実際には取り扱いにくい。ここで登場したのがレーザー測距儀である。

レーザー干渉を利用して距離を測るわけであるが、普通の干渉計と違い、レーザー光をミラーターゲットに入れて、測定ボタンを押すだけで、測距儀とターゲットの間の距離を測ってくれる。ライカ社のメコメーターは広く世界で使われている機種で、正式の型番は ME5000 という (図 3)。その測定原理を図 4 に示す。直線偏向したレーザー光はある特殊な結晶を通される。この結晶はかけられる電圧により、レーザー光を直線偏向から楕円偏向、更に円偏向に変える。そこで結晶に交番電圧をかけると、出て行くレーザー光はかけられた電圧に応じて、直線偏向→楕円偏向→円偏向と変化しながら出てゆく。ここで、かける交番電圧の周波数に変調をかけると、ミラー標的で反射して帰ってきた光の飛距離/光速が丁度変調された周波数の逆数の整数倍 n/f に合えば、丁度同じ偏向状態で行きと

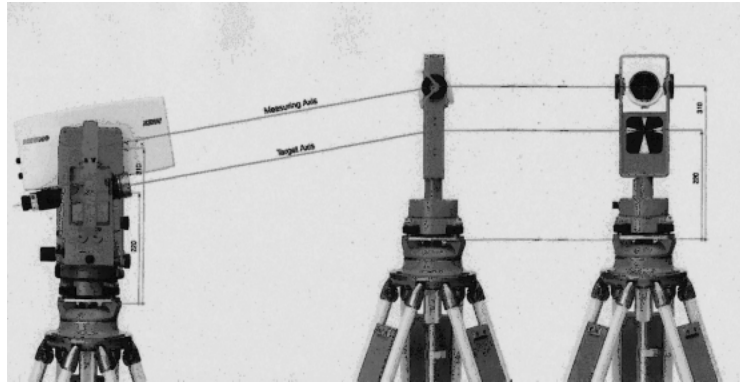


図3 ライカの本メーター ME5000

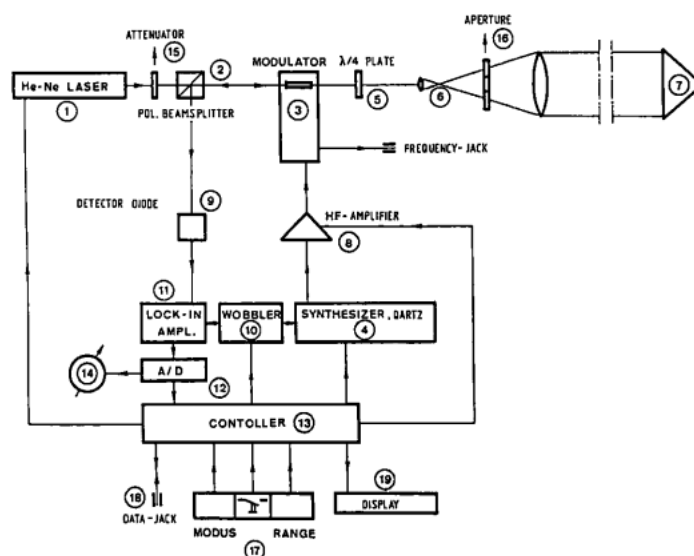


図4 ME5000 原理図

帰りのレーザー光が重なるために、光量の最小値が観測される。このようにして、行きと帰りのレーザー光の重なりが最小になる周波数 f を求めれば、

$$\text{距離} = \text{光速} \times n / 2f \quad (\text{但し光の飛距離} = 2 \times \text{距離})$$

で、距離が求まる。実際には周波数を変調してゆき、最小値を示す初めの周波数 f_1 と近傍の最小値を示す周波数 f_2 との差から距離を求める。

$$\text{距離} = [(n_2 - n_1) \times f_1 / (f_2 - f_1)] \times (c / 2f_1)$$

精度 σ_L は

$$\sigma_L = 0.2 \text{ mm} + 0.2 \mu\text{m/m}$$

と表されるので、200 m 程度の距離測定ではその誤差は 0.2 mm 程度である。ちなみにメコメーターの測定可能距離は 20 m ~ 8 km とうたわれている。

残念ながらこの測距儀も製造が中止され、今は入手できない。

3.5 その他のアライメント機器、光学錘

他にアライメントをするものにとって必要な機器に錘がある。これは、例えば壁に開けられた穴を通して、壁の向こう側の床に印された基準点を視準したいとき、錘を垂らして、その先端が床の基準点を指すように合わせておいて、錘の糸を視準することをする。しかし錘を実際に使ってみると、市販の錘では 0.1 mm の精度は出せないことが分かる。理由は錘の糸を通す穴が大き過ぎること、錘の重心が結構高いことにより、錘の先端が鉛直下を向かないためである。このため我々は、糸を通す穴は使用する糸の太さギリギリにし、細長い錘を自分で製作して使っている。

このような苦勞をする必要がないのが光学錘である。我々はライカ社の光学錘 NL (図5) を使ってい

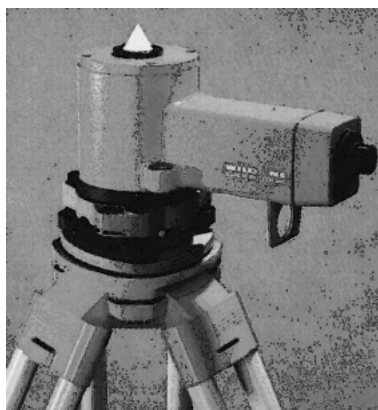


図5 ライカの光学錘 NL

る。中空の定心桿(三脚の機器を止めるためのネジ部)を使えば、真下が望遠鏡で覗けるので、NLを付属の気泡レベルを見ながら水平に合わせた後、望遠鏡のカーソルのクロスを下の基準点に合わせる。そうすると、合わせた基準点の鉛直真上がNLの頭頂に設けられた三角錐の頂点で表されるので、この三角錐の頂点を視準すればよい。この場合もNLの光軸の鉛直軸からの狂いが誤差となる。仕様によれば精度は0.5 mm/100 mであるが、我々は90度ずつ回して視準し、この4つの測定の平均をとっている。

4. 近年のアライメント機器とBBA

4.1 レーザートラッカー

ここ10年ほどの間に急速に普及してきたのが、このレーザートラッカーである。これはレーザーを使った、ミラーターゲット自動追尾型の3次元座標測量器である。KEKBの設計が開始された1984年ころはライカ以外にも米国のチェサピークという会社が製作していたが、チェサピークはアメリカ国内でしか販売しておらず、ライカからしか購入することができなかった。このためもあって非常に高価な価格が設定されていた。当時この値段で2,000 ccクラスの乗用車が十数台買える、という値段であった。それでもKEKB建設のため、ということで購入することに決めた。その後KEKB建設中に、この虎の子のレーザートラッカーが不調になり、建設作業を止めるわけにはいかないので、急遽2台目を購入することにした。ところが入荷にしばらくかかる、という通知を受け取った。理由を聞いてみると、アメリカの大手航空機メーカーB社が100台の発注をしたため、ということであった。その規模の大きさにど肝を抜かれたものであった。チェサピーク社はその後SMXに名前を

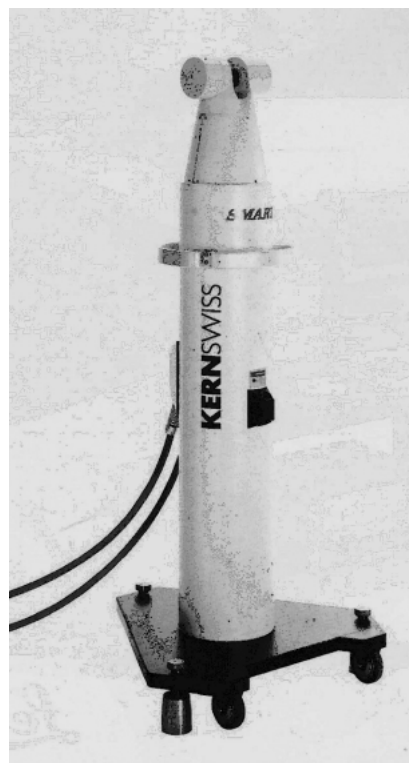


図6 レーザートラッカー LT500

変え、現在ではファロ (Faro) 社が吸収し、日本でも販売するようになった。このためと、その後の技術革新とで、現在は価格が我々が購入した額の2/3程度になっているようである。

さて、レーザートラッカーの原理について解説する。図7をみていただきたい。トラッカーに内蔵されたレーザー発信機から出てきたレーザー光は垂直・水平2枚の回転ミラーに反射されて、トラッカーの基準座に置かれたミラーターゲットに導かれる。ミラーターゲットで反射した光は、入射したときと正反対方向に反射して行き、トラッカーに戻って行く。ミラーターゲットは4枚の鏡を四角錐状に張り合わせものであり、コーナーキューブと呼ばれる。ミラーの四角錐の頂点からレーザー光が外れると、このオフセットの2倍入射光から離れて、反射光は戻って行く。この離れた距離をトラッカーの中の光ダイオードで検出し、トラッカーの垂直・水平ミラーを回転させて、ミラーターゲットの中心をレーザー光が常にヒットするように調整する。このようにして、レーザー光は常にミラーターゲットの中心を追尾する。追尾するために回転させた垂直・水平ミラーの回転角はエンコーダーで測り、トラッカーの基準座からミラーターゲットまでの距離は干渉計で測っている。このようにしてミ

原理

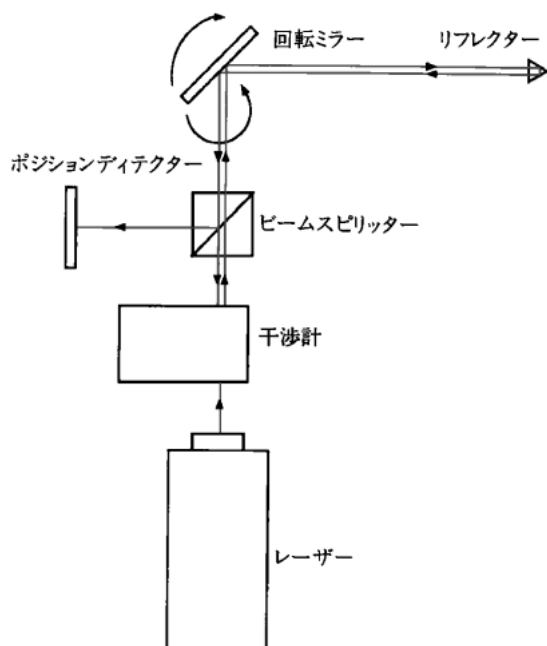


図7 レーザートラッカーの原理図

レーザーターゲットの垂直・水平角および距離を測ることにより、ミラーターゲットの3次元座標を測ることができる。ミラーターゲットは、他にプリズムを使ったキャッツアイと呼ばれる標的もある。こちらの方がコーナーキューブよりも受光のアクセプタンスが大きいが、精度はやや落ちる。以下に仕様書に書いてある性能を挙げる。

| 項目 | ライカ LT/LTD500 | Faro Xi V2 |
|-------|---------------------------------------|--|
| 角度分解能 | 0.7 μrad | 0.3 μrad |
| 距離分解能 | 1.26 μm (1 μm) | 0.16 μm (0.5 μm) |
| 角度精度 | 5 μrad | *2 |
| 距離精度 | *3 (25 μm) | 5 μm + 0.2 $\mu\text{m}/\text{m}$ |
| 測定レンジ | | |
| 距離 | 0-35 m | 0-35 m |
| 水平角 | ± 235 度 | ± 270 度 |
| 垂直角 | ± 45 度 | +75/-50 度 |

*1 精度は標準偏差の値である。

*2 Faroの角度精度は9 μm + 1.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ と記述されていて理解できない。問い合わせたが納得できる答えは得られていない。

*3 記述がないが、角度精度からくる座標精度に比べると、距離の精度の寄与は小さいと聞いているので10 μm 程度と思われる。

距離測定には、ミラーターゲットにレーザー光を導いてやると、ターゲット中心に自動ロックし、メコ

メーターと同じ原理で距離を測るモードがある。これを絶対距離測定 (ADM, Absolute Distance Measurement) と呼んでいるが、精度は干渉計にくらべると落ちる。距離分解能および距離精度の括弧の中の数字はこのADMでの精度である。ライカのLT500にはこの機能がなく、LTD500はADM機能を付けたものである。仕様を見ると、Faroのトラッカーの方がライカのものに比べてかなり良いように見えるが、実際に使ってみて性能を比較したが、それほど差があるようには見えなかった。

レーザートラッカーは3次元の座標を教えてくれるが、垂直方向の座標はトラッカーの水平度の狂いに比例した誤差を持つため注意する必要がある。0.1 mm/10 m 程度の精度を目指すのであれば、トラッカーは10 μrad の精度で水平に設置せねばならないが、これは容易ではない。ないしは基準点を使って水平度の狂いを較正してもよい。我々は水平面での座標のみトラッカーで測り、高さはレベル望遠鏡を使ってアライメントしている。

精度的には機械式セオドライトおよびレベルに較べて、特別優れているわけではない。そもそもレーザートラッカーの1回測定の精度は上に書いた精度の10倍ほど悪い。トラッカーの精度は数百回の測定の平均をとることによって、統計的な誤差を減らして、上記の精度を出している。我々は500回の測定の平均をとっている。この場合1回の測定に数秒かかる。レーザートラッカーの優れている点は、測定結果が自動的に記録されるため、手で筆記する際の人為的な誤りが少ない。更に測定結果の再現性が非常に良いことである。機械式の測量器を使う場合、記録のし間違い、目盛りの読み取りの誤り、定心桿の締め忘れ等々、いろいろな人為的な誤りがあるものである。トラッカーではこういった人為的な誤りが入りにくい。これは重要なポイントである。人為的な誤りが一回でも起こると、それがどこで起きたのか普通分からないので、測量がやりなおしになってしまう場合がある。また、例えばある設計値にアライメントする際に、LT500の場合、予定した座標値とその許容値を基準点として入力しておき、Build-in-pointという機能を使うと、ターゲットの座標値と目標値の差を時々刻々表示してくれる。許容値の2倍以上外れていると赤色で、2倍以内に入ると黄色、許容値以内に入ると緑色で表示してくれるので、大変便利である。

4.2 トータルステーション

やはりレーザーを使った3次元座標測量器であるが、まず価格がトラッカーに比べて非常に安い。

2,000 cc の乗用車のほぼ 2 台分の値段で購入することができる。何故このようにレーザートラッカーとの間に大きな価格差があるのか分からないが、おそらく特許の関係であろうと思う。トータルステーションはセオドライトを電動化し、レーザーを組み込んだものと思えば良い。距離は ADM 方式で測り、水平角は測量器の回転角から、垂直角は鏡筒の回転角から求める。レーザートラッカーに較べて、距離の精度は ADM 方式のため落ちるが、角度の精度はレーザートラッカーよりも良い。以下にライカの TDA5005 および Carl Zeiss 社の Elta S10 の性能を示す。

| 項目 | ライカ TDA5005 | C. Zeiss Elta S10 |
|-------|---------------|--------------------|
| 角度分解能 | — | 2 μ rad |
| 距離分解能 | — | 0.1 mm |
| 角度精度 | 2.5 μ rad | 5 μ rad |
| 距離精度 | 0.2 mm | 1 mm + 2 μ m/m |
| 測定レンジ | | |
| 距離 | 0-120 m | 0-300 m |

レーザートラッカーがよいか、トータルステーションがよいか、IWAA⁷⁾ (International Workshop on Accelerator Alignment) でも議論になったが、0.2 mm より良いアライメント精度を要求するのであればレーザートラッカー、それより悪い精度でよければ安価でもあるし、距離もかせげるので、トータルステーションか、というのが個人的な意見である。

4.3 水管レベルシステム (HLS)

要するに水を使った連通管で、水面の位置を測ることによって、その場所の相対的な高さを測ろうというものである。技術的には古く、初期の SLAC では水銀を使った連通管で高さのアライメントをしていたと聞いている。この技術が普及し始めたのは、フランスの Fogale Nanotech 社が精度の良い、コンパクトな製品を供給し始めたことに依るところが大きい (図 8)。これは HLS (Hydraulic Leveling System) と呼ばれる。以降本稿でもこの HLS という名称をつかうことにする。フランスの放射光施設 ESRF が他に先駆けてリング全周のガーダーに HLS を設置し、全ガーダーを遠隔操作のムーバーの上に載せ、HLS からの情報を基に、ガーダーの高さを遠隔操作で調整しようという、野心的な試みを行なっている⁸⁾。水面の位置を読み取る方法にいろいろあるが、Fogale Nanotech 社は水容器の底と蓋を対向電極にして、この間にある水の面の高さの変化を電極間の静電容量の変化で読み取っている。DESY では近年超音波を使った水位の読み取りを開発中で、良い結果を得ているようであ

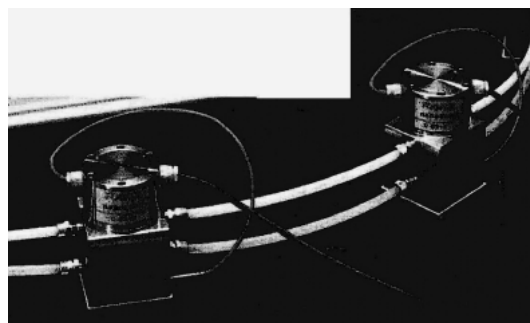


図 8 HLS システム

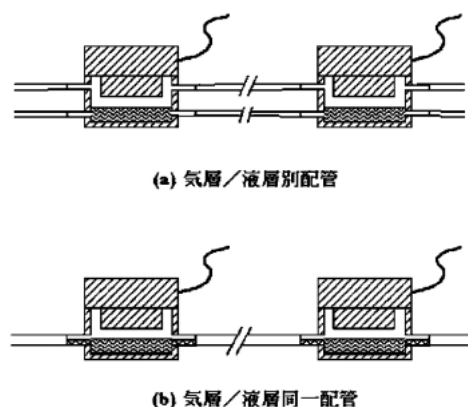


図 9 HLS 原理図

る⁹⁾。

さて、各水容器は金属ないしはプラスチックのパイプで接続するが、この方法に 2 通りの方法があり、どちらを使うかで好みが分かれている。図 9 を見て頂きたい。第 1 の方法では空気層と水の層を別々のパイプで繋ぐ。Fogale Nanotech 社の初期はこの方法であった。第 2 の方法は水面が大きめの連絡パイプの中心付近にくるようにしたものである。連絡パイプの中も水と空気の層が存在するようにする。第 1 の方法では水の接続パイプ中の気泡を抜くのに、水をポンプで循環させながら抜くのであるが、なかなか抜けなくて苦勞する。また、説明書によると、水の接続パイプの高低差は 5 cm 以下にせねばならない。これが大きいと水の膨張係数が大きいので、縦方向配管部のローカルな温度変化でその水位が変わってしまうためである。ただしこの許容値は、全系の温度分布、温度の変動幅、要求する精度から決めるべきである。この縦配管を長くにとって失敗している例がときどきある。第 2 の方法は必然的に配管を水平にする必要がある。この方法であれば配管中の気泡の心配をする必要がない。HLS の分解能は 1 μ m 程度である。

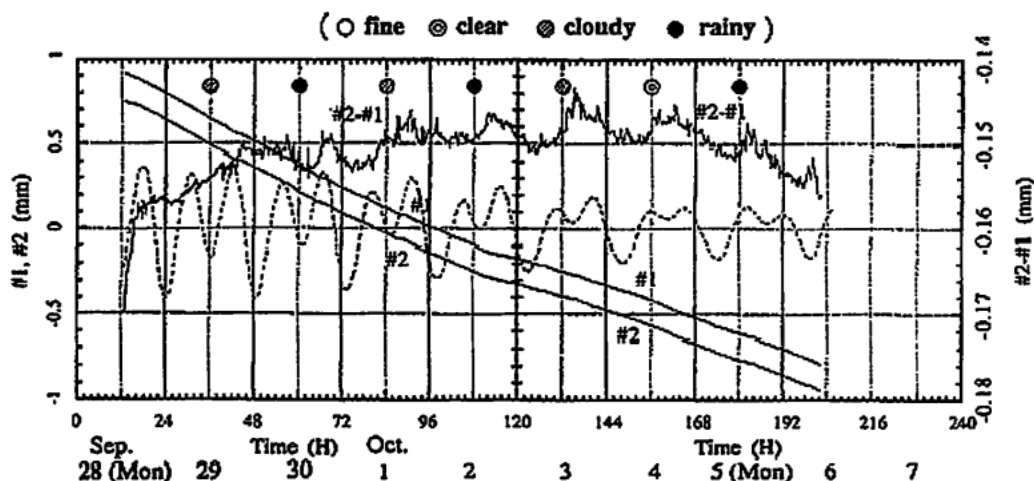
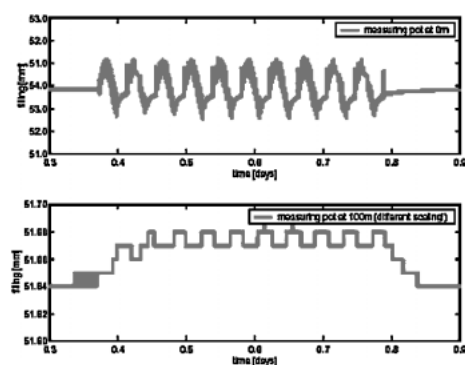


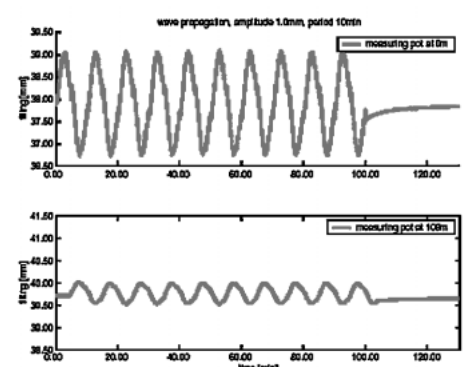
図10 HLS で調べたトリスタン筑波直線部の床のレベル変動

筆者らが昔、トリスタン実験時代に筑波の直線部でその床レベルの変化を測定した例を図10に示す¹⁰⁾。これはTRISTAN運転のときに、筑波直線部に2台のHLSを10m離して設置し、床の変動を調べたものである。1992年9月28日から8日間測定した結果である。当時まだ技術的に未熟であったため、中の水が少しずつ減っているが、2つのセンサー間の差を取ると、床の相対的な変動を見ることが出来る。左上から右下に走る2本線が2つのセンサーからの出力である(左の縦軸, 単位はmm)。ギザギザしている線が2つのセンサーの出力の差(右の縦軸, 単位はmm)、点線は潮汐の線である。右の縦軸の最少目盛りは $2\mu\text{m}$ なので、これから見ると $1\mu\text{m}$ 程度の分解能があることが分かる。床の変動が地球潮汐に因るという報告があったが、残念ながら我々に見えたのは、夜と昼の温度差からくる日較差のようである。

局所的に起きた水位の変化が全系に伝わる時間 T と、配管の長さ L および配管の直径 D との関係は、いろいろ実験されている。図11はDESYグループの結果⁹⁾で、一本配管方式のもので、配管径(A)20mmと(B)50mmの結果である。(A)の20mm径配管では1時間の繰り返しの $\pm 1\text{mm}$ の変位が100m先でほとんど見えていない。一方(B)の50mm径配管では10分の繰り返しの $\pm 1\text{mm}$ の変位が100m先できちんと見えている。1km長、20mm径の配管のときは、初めに水を加えたときの変動が落ち着くのに約3週間かかるかと報告している。これに較べて、50mm径配管の場合は約30分で落ち着くと報告している。HLSシステムを構築するときには、全系の応答時間と配管径および配管の長さの関係を把握しておく必要がある。



(A) surface wave propagation, tube diameter 20mm, amplitude 0.5mm, period 60min



(B) surface wave propagation, tube diameter 50mm, amplitude 1.0mm, period 10min

図11 HLSの配管径の応答時間への影響(DESYグループの結果)

4.4 伸張ワイヤシステム (Stretched Wire Method)

この技術も古くから知られていたが、世界中に普及し始めたのは、これもHLSと同じく、フランスの

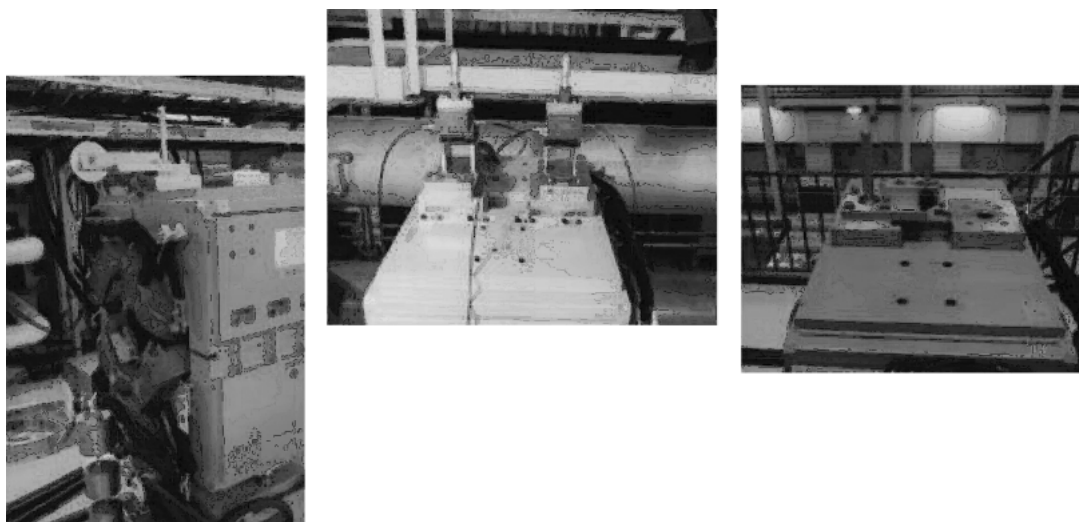


図12 KEKBで直線部のアライメントに使われた伸張ワイヤーシステム。
中央の2台が電磁石基準座に取り付けられたワイヤー位置センサー。

Fogale Nanotech 社の高精度でコンパクトな製品の供給開始に依るところが大きい (図 12)。これは金属、半導体または非金属のワイヤーを決められたテンションで張っておき、このワイヤーを基準にして電磁石をアライメントする方法である。要はいかにしてワイヤーの位置を検出するかであり、いろいろな方法がある。例えば簡単な顕微鏡でワイヤーを視準し、レンズに付けられたスケールでその位置を読み取る光学的な方法、マイクロメーターでワイヤーに接触するまでの距離をはかる機械的な方法、それから電気的な方法がある。電気的な方法には金属ワイヤーに高周波を流し、電子ビームの位置を検出する BPM と同じ原理で、4つの電極に誘起された信号からワイヤー位置を検出する方法と、半導体のワイヤーを張って、これを4つの電極で挟み、電極間の静電容量の変化からワイヤー位置を検出する方法がある。金属ワイヤーの場合は $1\ \mu\text{m}$ を越える高精度が得られるが、高周波を伝搬させるため、心線を金属のパイプで囲い、同軸構造にする必要がある。このため簡単に持ち運ぶことができず、初期アライメントには不向きである。また、ワイヤーが重たいためサグが大きく、 $10\ \text{m}$ を越える長い距離には向いていない。それでも SLAC の FFTB では、ワイヤーのサグに沿って短いパイプをベローズを介して繋いで同軸構造を作り、レベルの変動をモニターした例がある¹¹⁾。我々はこの方法で $10\ \text{nm}$ の分解能の ILC 用の位置モニターを開発した¹²⁾。一方、半導体ワイヤーを使った静電容量型は Fogale Nanotech 社が採用した方法であり、設置が容易で、初期アライメントに向いている。精度はワイヤーの均

一性のために、 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度である。ワイヤーのサグ量は以下の式で表される。

$$S = (g\mu L^2) / (8T)$$

ここで g は重力加速度、 μ はワイヤーの線密度、 L はワイヤー長、 T はテンション (単位は N) 半導体ワイヤーの場合で、ワイヤー径 $0.6\ \text{mm}$ 、密度 $\rho = 2\ (\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $T = 10\ \text{kg}$ 重とした計算結果を以下に示す。

| $L(\text{m})$ | $S(\text{mm})$ |
|---------------|----------------|
| 10 | 0.35 |
| 20 | 1.4 |
| 50 | 8.8 |
| 100 | 35 |
| 200 | 141 |

KEKB の $200\ \text{m}$ の直線部では、Fogale Nanotech 社の伸張ワイヤーシステムと $100\ \text{m}$ のワイヤーを使って、 $50\ \text{m}$ ずつオーバーラップさせながら3回張ってアライメントをした (図 12)。アライメント精度は $30\ \mu\text{m}$ 程度であった。

4.5 レーザー光を使った直線のアライメントシステム

この技術も新しいものではないが、近年 ILC 関連で見直されている技術である。SLAC の 2 マイル ($3.2\ \text{km}$) のリニアックは、この方法を使っていることで有名である^{13,14)}。一般にレーザー光は回折のために飛距離に従って拡がる性質がある。回折理論からビームの拡がり角を θ とすると

$$\theta \sim \lambda / (\pi r)$$

という式で表せる．ここで λ はレーザー光の波長， r はレーザービームの半径を表す．レーザー光の飛距離を L ，レーザー光の L 飛んだ後の半径を x とすると

$$x = r + \theta L \sim r + \lambda L / (\pi r)$$

He-Ne レーザー ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$) の例を取り，初めのレーザー光の半径を $r = 2 \text{ mm}$ として x を計算すると

| $L(\text{m})$ | $x(\text{mm})$ |
|---------------|----------------|
| 10 | 3.0 |
| 100 | 12.0 |
| 1,000 | 102.3 |
| 10,000 | 1004.7 |

ビームの拡がり角はレーザー波長に比例し，ビーム径に反比例するので，ビームの拡がりを抑えるためには波長を小さくするか，ビーム径を大きくすればよい．

SLACではビーム径を300 mmに拡げているため，1 km先でのビーム半径の増大はわずか1 mmである．このレーザー光を大きな真空パイプの中を通し，要所所に出し入れできるフレネルレンズを置いておき，フレネルレンズで絞られた像を末端のCCD撮像管で観測している．フレネルレンズの中心位置がレーザービームの光軸からずれば，CCDでの像もずれるので，CCDでの像が常に中心にくるように各フレネルレンズの位置を調整すれば，各フレネルレンズはレーザー光の光軸に沿ってアライメントされることになる．このフレネルレンズの位置を基準にして，各領域の機器のアライメントは行われる．精度は $10 \mu\text{m}$ 程度である．

一方，ビームの波長を小さくする方法が近年提案されている．アンジュレーターからでたX線を使おうという提案である¹⁵⁾．この場合波長は $\lambda \sim 0.02\text{--}2 \text{ nm}$ であるので，2 nmとしてもHe-Neの赤い光の1/300なので，2 mm半径のビームの半径増大は10 km先でも3 mmである．

今ILCでは，このレーザー(X線)を使ったアライメントシステムと，先に書いたHLSシステムと伸張ワイヤシステムを組み合わせたアライメント法が検討されている．

4.6 BBA (Beam Based Alignment)

近年普及してきたビームを使ったアライメント法，BBA (Beam Based Alignment) 法について説明する．これは四極電磁石や六極電磁石の場合，ビームが中心から外れると，ビームが磁場からキックを受け

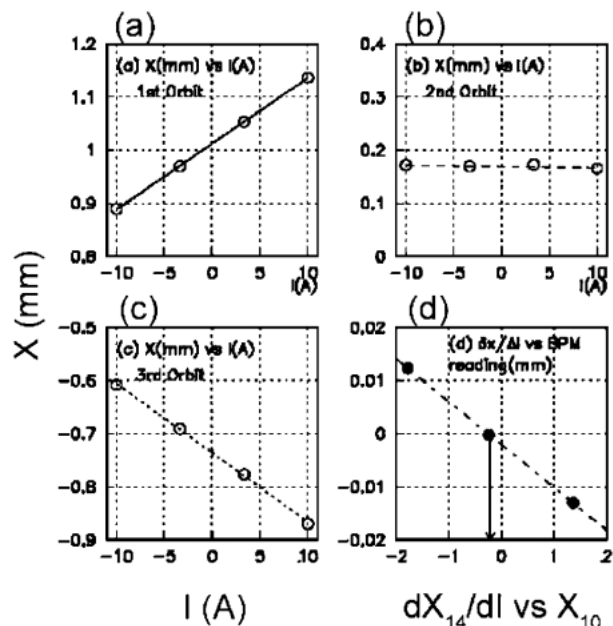


図13 KEKBでのBBAの例

て，曲げられる性質を利用したものである．ビームが電磁石の中心を通過していればキックを受けないので，電磁石の強さを変えてもビーム軌道は変化を受けない．ビームが磁場の中心から x だけ外れた所を通過していれば，四極電磁石では x に比例した大きさのキックを，六極電磁石の場合は x の二乗に比例した大きさのキックを受ける．従って電磁石の励磁の強さを変えると，ビームが中心を通過していなければ軌道が変化する．実際にKEKBで行なった例を図13に示す¹⁶⁾．図(a)，(b)および(c)は直前のステアリング電磁石でビームを振り，ビームが四極電磁石QA4LEを通過する位置を変えたときの，四極電磁石に流す電流値 I (横軸，単位はA)と下流のBPM#14で測ったビーム位置 X_{14} (縦軸，単位はmm)の関係を示したものである．図(b)のときに四極電磁石の励磁を変えてもビーム軌道はあまり変化せず，このときにビームがほぼ中心付近を通過していることが分かる．図(d)は縦軸に $\Delta X_{14} / \Delta I$ を，横軸に四極電磁石の入射側に設置したBPM#10の読み X_{10} をプロットしたものである．このプロットから $X_{10} = -0.25 \text{ mm}$ にビームが入射したときに，ビーム軌道は四極電磁石の励磁の影響を受けないことが分かる．つまり $X_{10} = -0.25 \text{ mm}$ が四極電磁石の磁場中心位置であることが分かる．このようにしてビームを磁場の中心を通すと同時に，BPMの較正をすることもできる．

5. 最後 に

こうして加速器のアライメントについて書いてみると、今まで我々が信頼して使ってきた名機とも呼ばれる機械式の測量器のほとんどが、製造中止になっていることに改めて気付かされた。メーカーに聞くと、もうこのような繊細な機器を作ることができる技術者がいない、とのことであった。そう言ったわけで、本稿は回顧録のようなものになってしまったのかもしれない、これから新しくこの方面の仕事を始める人には、あまり参考にならないかもしれない。どなたか新しい機器を使って加速器アライメントをやった方に、本稿の改訂版をお願いするべきかもしれない。

ここに紹介した我々の仕事は、多くの人々の協力の下、特に KEKB 電磁石グループのメンバーの協力の下に行われた。ご協力頂いた方々にここで感謝したい。

参考文献および注釈

- 1) National Laboratory for High Energy Physics, "KEKB B-factory design report", KEK Report 95-7, August 1995.
- 2) ILC Global Design Effort Team, "Baseline Configuration Document for International Linear Collider", Dec. 3, 2005.
- 3) 日本測地学会「新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム—」, 1989 年 11 月 15 日出版
- 4) K. Mishima, N. Tani and M. Sirakata, "Survey and Alignment of J-PARC", Proceedings of the 9th International Workshop on Accelerator Alignment, Sep 25-29, 2006, SLAC, California, USA. (GPS を実際に使って地表の基準点を構築した例)
- 5) 磁場中心軸周りの磁場変化は磁極数の半分の繰り返し対称を持つが、その磁場変化の対称面のことを言う。
- 6) E. Egawa, K. Endo, H. Fukuma, T. Kubo, M. Masuzawa, Y. Ohsawa, N. Ohuchi, T. Ozaki, K. Tsuchiya, M. Yoshida and R. Sugahara, "Magnet System for the KEKB Main Ring", KEK-PREPRINT-2001-157B, Dec 2001; Nucl. Instrum. Meth A499 pp. 24-44, 2003.
- 7) 2年に一度、アメリカ/アジア/ヨーロッパで持ち回りで開かれている加速器アライメント国際研究会
- 8) D. Roux, "Alignment & Geodesy for the ESRF Project", Proceedings of the 1st International Workshop on Accelerator Alignment, P37-72, July 31-Aug. 2, 1989, SLAC, California, USA; David Martin, "The European Synchrotron Radiation Facility Hydrostatic Leveling System—Twelve Years Experience With A Large Hydrostatic Leveling System", Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment, Nov. 11-14, 2002, SPring-8, Hyogo, Japan.
- 9) Markus Schlosser and Andreas Herty, "High Precision Survey and Alignment of Large Linear Colliders—Vertical Alignment—", Proceedings of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment, P343-355, Nov. 11-14, 2002, SPring-8, Japan.
- 10) Ryuhei Sugahara, Kuninori Endo and Yasunobu Ohsawa, "Measurement of seismic motion and displacement of the floor at the TRISTAN ring", KEK-PREPRINT-93-59; Proceedings of the 3rd International Workshop on Accelerator Alignment, P217-223, Sep 28th-Oct 1st, 1993, Annecy, France.
- 11) R. E. Ruland, V. E. Bressler, G. Fisher and D. Plouffe, "A Dynamic Alignment System for The Final Focus Test Beam", SLAC-PUB-6194, May 1993; Proceedings of the 3rd International Workshop on Accelerator Alignment, P241-252, Sep 28th-Oct 1st, 1993, Annecy, France.
- 12) T. Mimashi, S. Kuroda, H. Nakayama, K. Oide, R. Sugahara and N. Yamamoto, "The position monitor using stretched wire technique", Proceedings of the 3rd International Workshop on Accelerator Alignment, P175-180, Sep 28th-Oct 1st, 1993, Annecy, France.
- 13) W. B. Herrmannsfeldt, M. J. Lee, J. J. Spranza and K. R. Trigger, "Precision Alignment Using a System of Large Rectangular Fresnel Lenses", Applied Optics Vol. 7, No. 6, June 1968, pp. 995-1005.
- 14) V. E. Bressler, G. E. Fischer, R. E. Ruland and T. Wang, "High Resolution Fresnel Zone Plate", SLAC-PUB-5765, March 1992.
- 15) Bingxin Yang and Horst Friedrichs, "High-resolution accelerator alignment using X-ray optics", Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 030701 (2006).
- 16) M. Masuzawa, N. Akasaka, S. Hiramatsu, H. Koiso, K. Satoh and M. Tejima, "Beam-based calibration of beam position monitors and measurements of the sextupole magnet offsets at KEKB", Proc. EPAC 2000, Vienna, Austria, 26-30 Jun 2000, pp. 1780-1782.