

# アライメント

## 1. はじめに

SACLA という長尺の加速器のアライメントという事で、設置後の変位に密接に関係する建屋の基礎構造にふれ、その後、計測機器、全体アライメント計画、床面の変位測定、実際のアライメント方法とアライメント結果、最後にモニタリングシステムについて解説する。

### 1.1. 地球の曲率について

オートレベル等の重力方向を基準とした道具で高さ基準点をつないで水平基準線を作ると、地球の曲率に沿った多角形の基準線になる。大型の加速器をアライメントする場合、この地球の曲率を考慮する必要がある。

重力方向と直交する面（具体的には静止した水面等）を水平面（専門的には重力の等ポテンシャル面）と言ひ、このうち平均海面高さに一致するものを特に「ジオイド」と呼ぶ。よって地球の丸みに沿った線を、「ジオイドに沿った線」と呼ぶのが正しいが、単に「ジオイド」と呼ぶ事もある。

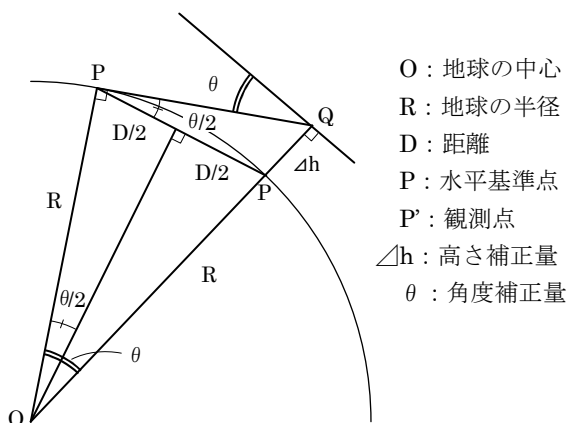


Fig. 1-1 ジオイド補正

ジオイドに沿った線から、真に水平の線を得るための補正量はどの位になるか計算してみる。(Fig. 1-1 参照)。地球の半径を R、P 点を水平基準点とし、そこから距離 D の観測点 P' でのジオイド補正に関する角度  $\theta$  は

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left( \frac{D}{2R} \right) \quad (1-1)$$

で表され、高さの補正  $\Delta h$  は

$$\Delta h = R \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (1-2)$$

となる。

さて地球の半径は幾らかというと、これは地球の形をどう定義するのかという事になる。日本では 2002 年から測量法で正式に採用されている地球形状に合った準拋楕円体は、GRS80 (Geodetic Reference System 1980) である。GRS80 は赤道半径と扁平率を次のように定義している。

$$\text{赤道半径} = 6,378,137 \text{ m (約 } 6,378 \text{ km)}$$

$$\text{扁平率} = 1 / 298.257 \ 222 \ 101$$

この定義より

$$\text{極半径} = 6,356,752.314 \dots \text{ m (約 } 6,357 \text{ km)}$$

となる。日本付近の地球半径は 6,371 km である。

この値(この計算に上記のような精度の数字を使う必要はないが)を使って計算した結果を Table 1 に示す。角度は距離に比例、高さは距離の自乗に比例する。

Table 1 ジオイド補正量

距離(m)	高さ(mm)	角度( $\mu\text{rad}$ )
0	0	0
36	0.10	6
50	0.20	8
100	0.78	16
128	1.28	20
200	3.14	31.4
500	19.60	78.4
1000	78.39	156.8

距離:水平基準からの距離

ジオイドに沿ったアライメントは、補正せずにオートレベルや水準器を使用する事ができるので労力も少なく精度も良いと言える。線型加速器の場合は基準線を真の直線にするか、ジオイドに沿った線にするかはよく加速器設計者と事前に相談すべきである。ジオイドに沿った線といっても結局は多角形になるので、その角度の補正量が加速器のいろいろな誤差の範囲内なのかどう

かの検討が必要である。もちろん XFEL のアンジュレータ部は電子ビームと X 線と同じ軌道にする必要があるので、真の直線でアライメントする必要がある。

円形のリング加速器は、球に円を置いた事になるので、垂直方向のアライメントは各部で水平に行えば良い。但し長い直線部があると補正が必要になる。又、リング半径が大きくなってくると、コンポーネントのローリング角を円の内側に倒す補正が必要になる場合もある。

### 1.2. 空気の屈折率の違いの影響について

大気中で光を使って計測する場合は、当然空気の屈折率の影響を受ける。数 m 角ぐらいのエリアサイズならば、囲いを作って理想的な環境を構築できるが、加速器収納部のような広いところはそのような事はできない。その為、光計測に対する気温や気圧の影響を知る必要がある。

空気の屈折率は、気温が高くなると密度が小さくなるので小さくなる。同じく気圧が高くなると密度が大きくなり、屈折率は大きくなる。その変化量は使用している光の波長によって異なるが、光波測距儀でよく用いられる赤色レーザーの波長 633 nm では気温 1℃、気圧 3.3 hPa で 1 ppm の補正になる。

距離計の場合、気温が高くなると、観測距離はより短く観測され、気圧が高くなるとより長く観測される。高精度の測距機能を持つ機器は、室温計や気圧計が内蔵されて自動的に補正する機種が増えてきたが、温度が異なるエリアをまたがって測定する場合は、補正が必要になる。

上下方向に気温差がある場合、視準線光路は上下に曲がる事になる。上の方の温度が高いと光路は下がって行く事になるが、その曲がりの量を計算してみる。

高低差 1 m で屈折率が 1 ppm(温度差で 1℃) 違う時に、ある距離 R θ 進んだ時の光の等位相面を考え、1 ppm の光路差による等位相面の傾きから、曲率半径 R を計算すると Fig. 1-2 の様になる。

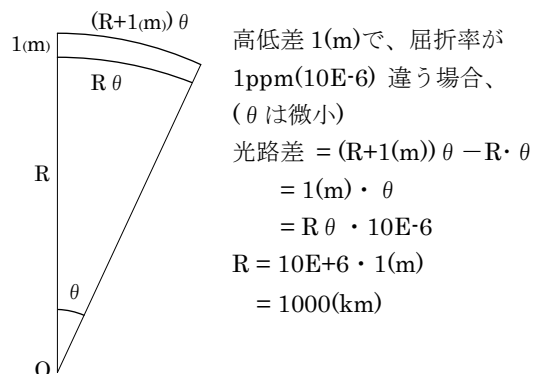


Fig. 1-2 屈折率の違いによる光の曲がり

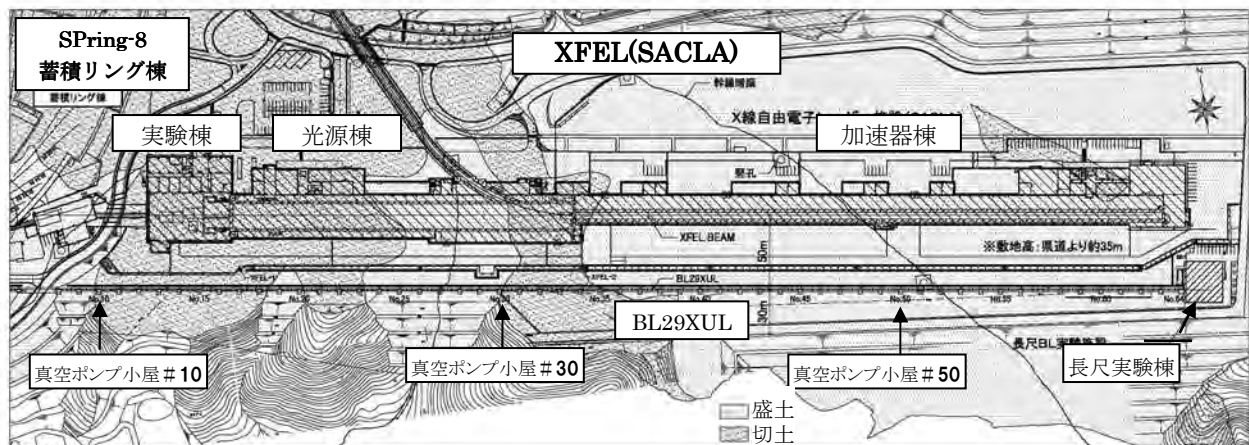
よって、高さ 1 m の温度差 1℃は、曲率で 1000 km に相当するので、前章の地球の丸みの影響の約 6 倍という事になる。一般的に、上下の温度差は床面に近い程変化が大きいので、視準高さは 50 cm 以上を選び、特にスロープの高低差を測る場合は視準高さが 2 つの標尺で異なるのでその影響を覚えておかなければならない。尚、屋外で気温を測定する場合は放射があるので、必ず通風温度計を用いる。

高低差は気圧も変化させ、視準線の光路は下方に若干曲がる。低高度では、1 m につき 0.1 hPa 変化するので、先ほどの波長 633nm での値を使って屈折率に換算すると、1 ppm/3.3(hPa) × 0.1 = 0.03 ppm となり、曲率にすると約 33000 km である。

## 2. SACLA 建屋の基礎構造

加速器建屋のコンクリート床面の安定性は、一度調整したアライメントを長期に維持し続けるという意味で、加速器の性能の一部と言える。加速器完成後、アライメントの長期的変位を計測するという事は、建屋床面の変位を計測するのと同様事である。

大型の加速器建屋の場合には、その仕様書に、「長期間に渡って安定な床面にすること」と一言書くだけで、堅牢で経年変化のない安定なコンクリート床面を作ってもらえるわけではない。結局、建設予定地の地盤調査結果を元に、予算と相



**Fig. 2-1** SACLA 建屋付近の盛土部と切土部を表した図。真空ポンプ小屋#50 付近を横切る斜めの曲線は旧谷筋を表し、設置された暗渠管の位置を示す。

談しながら最も良い基礎構造を選択する事になる。SACLA の場合は、アライメントの許容値が厳しいアンジュレータ部がある光源棟と、そうでない線型加速器部がある加速器棟では、それぞれ相応の基礎構造が採用される事が当初から想定された。

今回は、基礎構造を決定する前にいろいろ行われた地盤調査の中から、特にボーリング調査と載荷試験、それから SACLA の隣に設置されていた BL29XUL の変位測定について述べ、最後に採用された基礎構造と予想変位について述べる。

尚、基礎構造を含む建屋の設計は、建屋の基本設計を受注にした設計会社によって行われ、設計に必要な地盤調査もその発注の中で行われた。

## 2.1. SACLA 建設場所の地盤条件

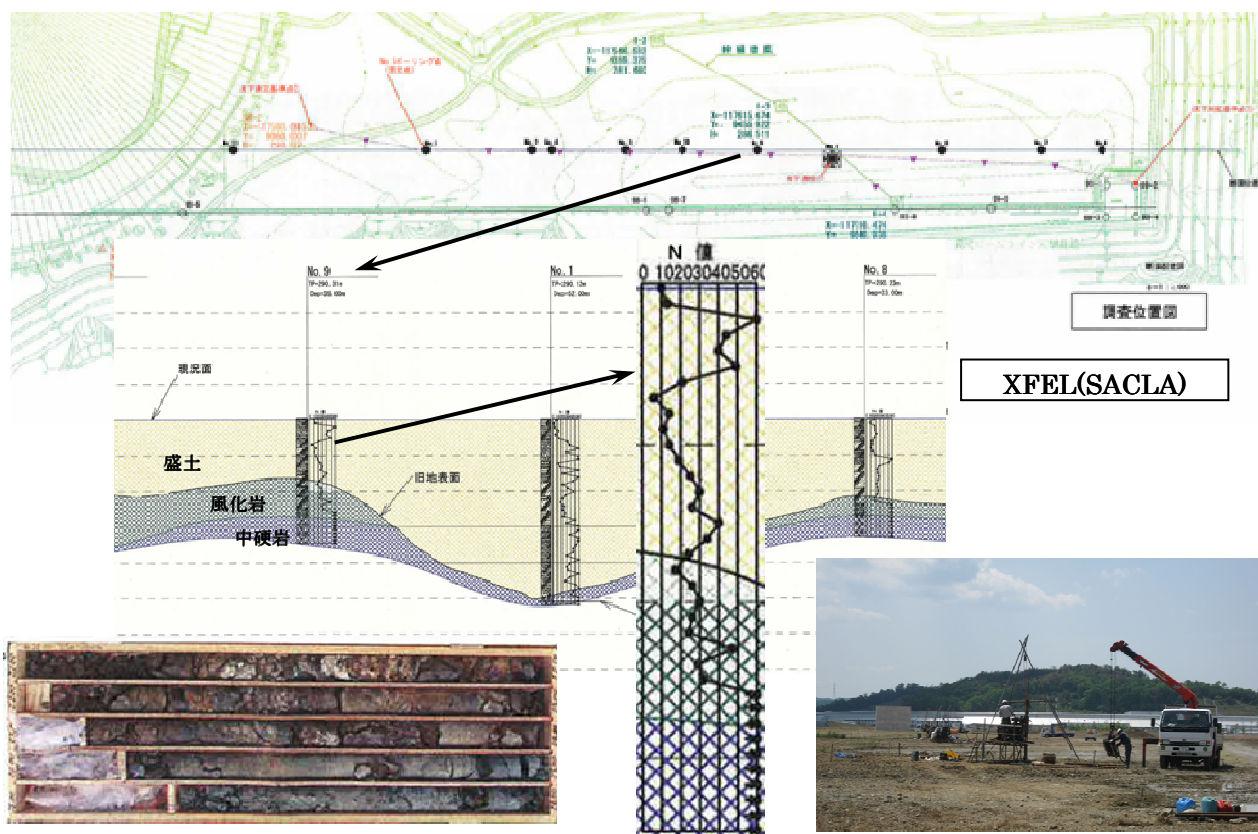
SACLA 建設場所付近の Fig. 2-1 に示す。一般に地盤が堅固で大変良いとされる SPring-8 地区であるが、残念ながら SACLA を建設したエリアの 8 割が谷を埋めた盛土部であった。土地の造成は 1990 年に行われ、蓄積リング部の切土部で出た岩石や土で盛土を行い、その最大厚さは約 50 m であった。図中の加速器棟を横切る斜めの曲線は、旧谷筋で小さな沢があったので透水性の暗渠管が埋めてある。

## 2.2. ボーリング調査

地盤調査のメインはボーリング調査である。この調査の一番の目的は、設置場所の地下の地層構造を調べ、建屋を支える支持基盤層の深さを決定する事である。調査は、SACLA のビーム軸に沿って 11 箇所で行った(Fig. 2-2 参照)。

ボーリング調査では、いろいろなデータが出てくるが、地層推定断面図と各調査場所の土質柱状図の N 値の深さ分布が重要である。N 値とはその部分の硬さを表す量で、標準貫入試験によって計測される。標準貫入試験は、質量 63.5 kg のハンマーを高さ 75 cm から自由落下させ、ロッド先端の  $\phi 51$  mm のサンプラーを地盤に 30 cm 貫入させるために必要な打撃回数である N 値を測定し、同時にサンプラーで試料採取をする。今回は最大打撃数が 60 を超えたものは 60 以上としている。この N 値が 50 以上の硬さの層が支持基盤層となる。

調査の結果、まず盛土層の硬さは十分でない事、造成前の旧地表面層であったが中硬岩層でない風化岩層は硬さが一定でない事、支持基盤層にする中硬岩層は最大 52 m の深さにあり、光源棟部でも 18 m の深さである事がわかった。



**Fig. 2-2** ボーリング調査の図。上：調査位置図。中：地質推定断面図と調査点 No.9 の深さ方向の N 値のグラフ。左下：採取したサンプル。右下：調査風景。

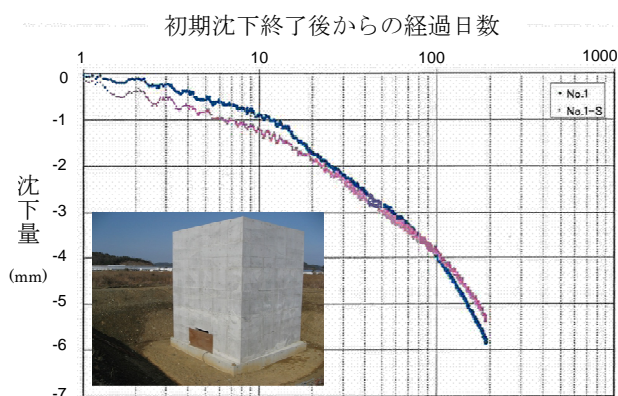
また地下水位の情報も重要で、盆地の場合は定常的に地下水位がある場合があり、この水位が降雨や季節変動で上がってくると建屋変形の原因となる。SACLA 設置場所は尾根にまたがっており、谷部の旧沢筋にも暗渠管が埋設してあって、排水がきちんとされているので、今回の調査では、降雨直後以外の地下水位は観測されなかった。

### 2.3. 載荷試験

盛土層の堅さを調べるために、盛土が一番厚い場所に、SACLA 建屋の基礎部とほぼ同じ面圧になるようなコンクリートのブロック(5×5×6 m<sup>3</sup>、約 140 kN/m<sup>2</sup>)を設置し、沈下の様子を 3.5 ヶ月にわたって測定した。

設置初期の沈下後の測定結果を Fig. 2-3 に示す。3 ヶ月間で約 4 mm 程度沈下し、その後も沈下し続け、横軸対数のグラフでも直線にならない

事から、沈下は暫減せずには止まらないと予想された。尚、測定期間中に何回か降雨があったがその影響はなかった。



**Fig. 2-3** 載荷試験のコンクリートブロック(5×5×6 m<sup>3</sup>、約 140 kN/m<sup>2</sup>相当)の写真と沈下のグラフ。

## 2.4. BL29XUL の変位計測

建屋の設計に先立ち、SACLA とほぼ平行で南側 50 m に設置された SPring-8 蓄積リングの 1 km ビームライン BL29XUL(Fig. 2-1 参照)のビームパイプの変位を計測した。このビームラインは、SPring-8 サイトの土地造成後 9 年経った 1999 年に建設された。蓄積リング棟と実験ハッチのある最下流の長尺実験棟の間の長さ約 900 m の屋外部は、放射光を導くビームパイプ(外径 114 mm)と真空ポンプ小屋(64 箇所)から構成される。この部分には光学素子等を設置しないので位置変位に対する許容量が大きく、重量としても軽量なので、厚さ 0.5 m・幅 2 m(真空ポンプ小屋部は 4 m)の簡単なコンクリートの基礎の上に設置された。真空ポンプ小屋の設置間隔は 13.6 m で、小屋の間は 4 本のサポート架台でビームパイプを支えて

いる。設置時に、正確に直線に設置された事を前提に、2006 年 10 月～4 月に変位計測を行った [1,2]。これにより、7 年間の地盤表面の動きを計測した事になる。

いろいろな測量器を使って計測した変位の結果を Fig. 2-4 に示す。上はレベル(高さ)変位、下は横方向の変位、中はこのビームラインに沿った造成前の高さである。

レベルに関しては、計測された沈下量は造成前の地形を非常に良く反映していた。沈下量と盛土厚はほぼ比例している事から、沈下は盛土の浅い部分だけでなく全ての部分で起きている事が推察される。又、造成後 9 年が経過した場所に建設し、その後の 7 年間分の変位である事から今後も同様な沈下があると考えられる。その量は最深部(盛土厚 50 m)で 53 mm 程度であるので、約 7 mm/年となる。

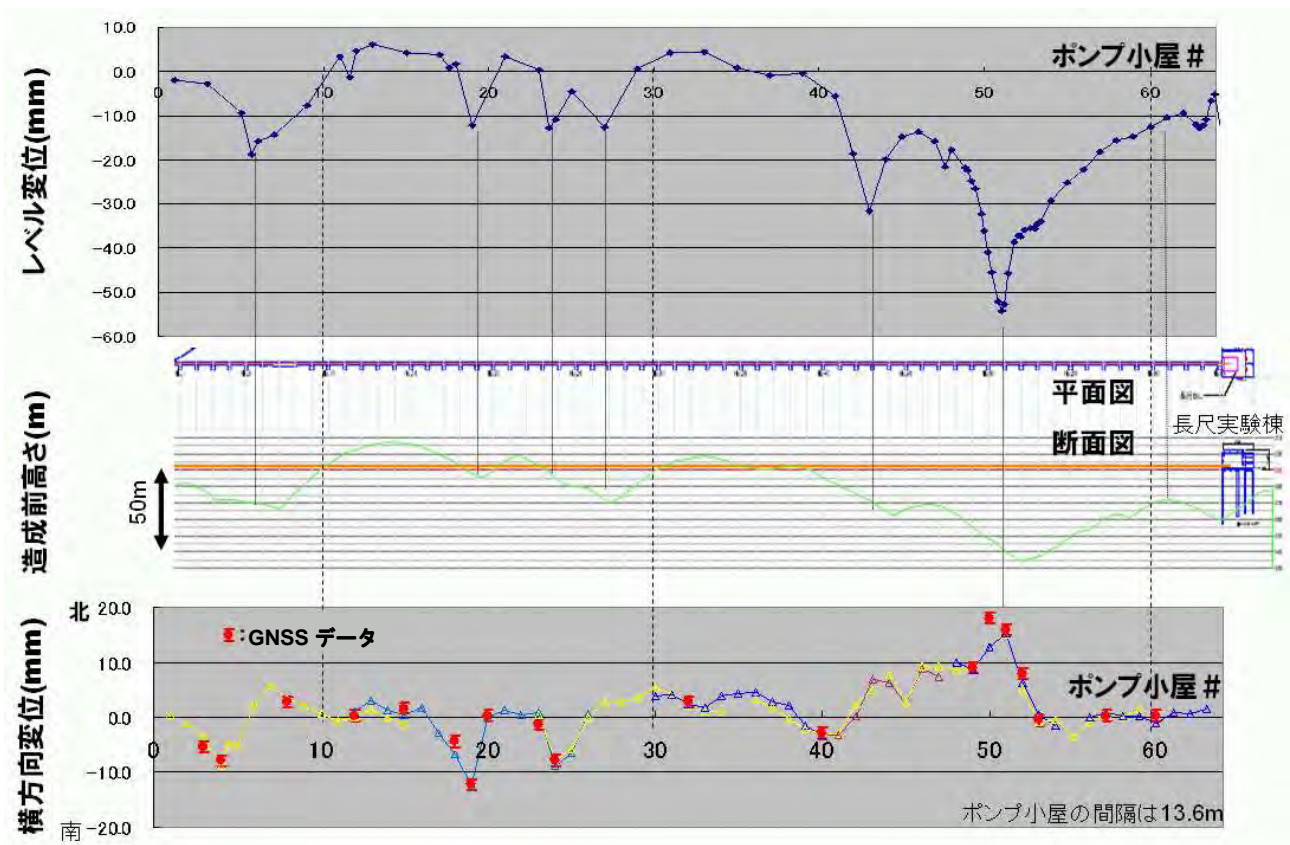
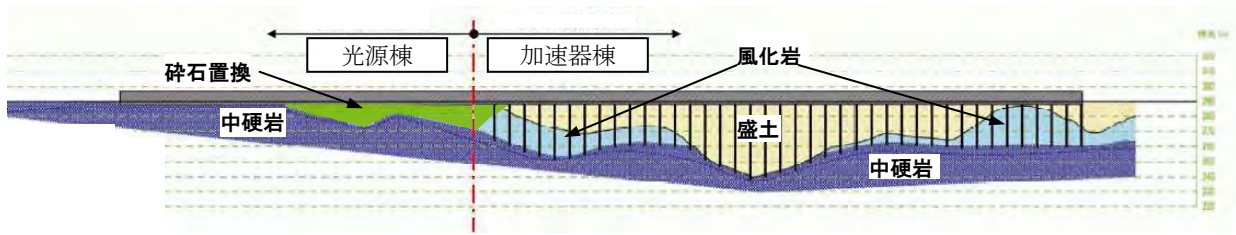


Fig. 2-4 建設後 7 年経過後の BL29XUL の変位。上：レベル(縦方向)変位量。下：横方向変位量。中：造成前の高さ(盛土厚)。横軸は 13.6 m 間隔で設置されているポンプ小屋の番号



**Fig. 2-5-1 SACLA 建屋の地盤と基礎部の構造**：赤線(縦一点鎖線)より右の加速器棟は杭構造、左側の光源棟は直接基礎構造と高充填砕石置換構造。縦軸の目盛(横破線間隔)は 10m。

横方向の変位に関しては、小屋#12 と#60 のデータを基準線とし、その直線からの変位を示した。盛土部では横方向にも変位している事がわかり、最大で 15 mm 程度であった。

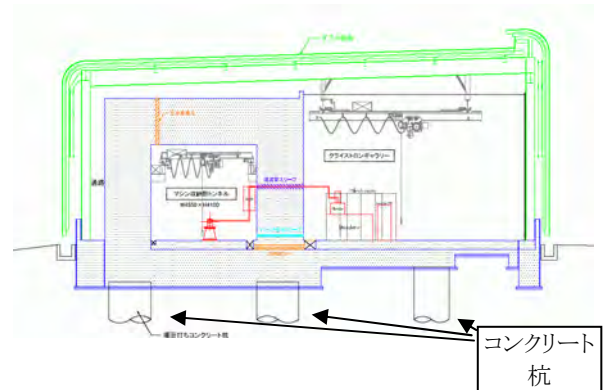
## 2.5. SACLA 建屋基礎構造と変位予測

SACLA 建屋に採用された基礎構造の断面図を Figs. 2-5-1、2-5-2 に示す。

線型加速器部がある加速器棟は、厚い盛土部に建設される事から基礎は杭構造とし、深さ 30~52 m にある中硬岩層まで直径約 1.5 m のコンクリート杭を打設した。ビーム方向の杭の間隔は 7.5 m、で、ビームと直交方向には各々 2.5 本の杭(クライストロンギャラリー側の杭は 15 m に 1 本)を打ち、総数 136 本の杭でマシン収納部とクライストロンギャラリーを支えている。一方、屋根を含む外皮や建屋の北側の付室部は盛土部直接基礎の上に建設された (Fig. 2-5-2 参照)。

通常の杭構造というのは、建屋の重量を全て杭の底面で支えるのではなく、杭の側面でも周りの地盤との摩擦力によって建屋の重量を支える。しかし SACLA の場合は、杭を側面から支える盛土部は沈下し続けている事から、逆に杭を押し下げる方向に働き、通常のコンクリート杭の乾燥収縮による沈下よりも、大きな沈下が予想された。

一方、アンジュレータが置かれる光源棟は高いアライメント精度が要求される事から、中硬岩が表面に露出している部分は直接基礎、盛土部は高充填砕石置換による基礎が採用された。砕石置換部は、盛土と風化岩を中硬岩部が出てくるまで(最大 18 m)掘削し、その後砕石を敷いて、その密度が理論値の 95%になるまで厚さ 2 m ごとに重機で転圧する作業を繰り返した。最後に建屋基礎コ



**Fig. 2-5-2 加速器棟の断面図。マシン収納部内の収納部内横幅は 4.5m**

ンクリート底面と同じ高さになったところで、建屋底面の圧力と同じになるように高さ 3 m の余盛りをして 2 週間以上プレロードを行い、人工岩盤を形成した。

加速器棟と光源棟の境界部は、基礎構造の違いによる沈下の違いを小さくするため、砕石置換部を杭の部分にまで広げている。2 つの建屋の沈下の違いによるオフセット段差を避けるために、エクspansionジョイントを設けておらず、縁切りをしていない。むしろ折れ曲がりになるように、厚さ 40 cm の床コンクリート部をつないだ。

さて、最終的に設計会社によって予想されたこれらの基礎構造での最大沈下量は、加速器棟は 20 mm/10 年、光源棟は 2 mm/10 年であった。加速器棟は盛土厚さに依存して中央部が一番沈下し、光源棟は上流部の砕石置換部が厚いところが沈下する。光源棟の 10 年で 2 mm という数字は、1 年あたりで 200 μm になり、これは後述のアンジュレータ部の精度からすると、随分大きな数字に感じるかもしれない。しかし建屋全体で、上流部が 200 μm 沈むように傾くのであれば、アンジュレ

ータ部のアライメントは保たれたこと(実験ハッチではビームが上がるのでそれは問題だが)になり、むしろ問題になるのは局所的な不等沈下という事になる。

### 3. 計測機器

今回はアライメントに使用する各種計測機器の中から、オートレベル、光波測距儀、トータルステーション、レーザートラッカー、そしてGNSS測量器を紹介する。

#### 3.1. オートレベル

水準測量では、測定する2点に立てた標尺をその中間点に設置したレベル(水準儀)を使って、水平な視準線により標尺の目盛りを読み、2点の高低差を計算する。本体をある程度水平(～15')にすれば、振り子の機構で視準線が常に水平になるものをオートレベルと呼ぶ。

使用時の注意点として、

- (1) なるべく、機械点(測量器を設置した点)から等距離の2点を測る。望遠鏡のフォーカスも変えずにすむ。
- (2) なるべく高倍率のアイピースを使用する。
- (3) 目盛りを読むのではなく、オプティカルマイクロメータを使用して、目標の線に合致させて測定する。
- (4) 一連の測定の間は、同じ測定者が読み取りを行う。
- (5) 十字線フォーカス調整用の視度調整リングは動かさない。
- (6) 視準線上の空気をなるべく揺らさないように配慮する。特に加速器トンネル内は空調を停止して計測する方が多い。

水準測量は本来等距離の2点を測るもので、これにより、オートレベルの視準軸誤差(視準線が水平でない誤差、固定値を想定)と、空気の屈折率が上下方向に変化して(温度と気圧の違い)視準線が上下に曲がる効果(高さ方向の分布は場所に寄らず一定を想定)をキャンセルする事ができる。

(3)のオプティカルマイクロメータとは、レベルの対物レンズ部に取り付けて、視準線を上下に平



Fig. 3-1 オートレベル。左：AS-2(オプティカルマイクロメータ付き)。右：デジタルレベル DiNi0.3 と標尺

行シフトさせるものである。レンズ直前に平行平板のガラスを垂直にセットし、このガラスを光軸に対してピッチング方向に回転させる事で、視準線をシフトさせる。レンズ部に取り付ける時の方位でシフト方向が決まるので注意する。通常±5 mmでシフトができ、つまみには0.1 mm刻みの目盛りがついている。

距離違いで測定する場合は、測定前に使用する機器の視準軸誤差の校正を行うべきで、校正には一番条件が厳しい日本式(30 m離れた標尺の中間点と11:1に外分する点で校正する「杭打調整法」)を推薦する。この校正を繰り返す事でレベルの精度(視準軸誤差のうちの固定値でない部分と測定者の視準誤差)を見積もる事ができる。又、整準時に気泡の位置を、わざと中心から望遠鏡の前後方向にずらして外分点位置での観測を行い、同じ結果になるかどうかで視準線の自動補正範囲を確認する事ができる。実際の不等距離測定時には、必ず機械点を動かして観測点との相対距離を逆転させて測定し、観測値の変化をチェックする。値が明らかに異なった場合は、視準軸誤差がある為なので、校正して再測定するか、測定時の機械点と観測点の距離を全て計測し、計算で補正する。視準軸誤差は2点の視準時の距離の差に比例する。

一般にオートレベルの精度は1 km往復標準偏差で表される。最も良いオートレベルで0.2 mmである。精度は目視の場合、観測者の技量や疲労

に依存する。我々が使用している光学式のオートレベルは Nikon 社の AS-2 で、オプティカルマイクローメータ使用時の標準偏差は 0.4 mm である。実際の測定では、目視の場合距離 30 m で 0.15 mm が限界と考えている。

実際の測定では、バーコードのような標尺を機械が画像解析して、分解能 0.01 mm で高さを読み取る、デジタルレベルを多用している。高さの他に、計測距離(精度 5 cm 程度)や複数回の測定値の平均・ばらつき(分散)も表示するので測定環境の良し悪しがわかりやすい。又、距離も同時に測定するので、測定だけ行えば、視準軸誤差の校正を自動的にする事ができる。ニコン・トリンプル社(旧ツアイス)の DiNi0.3、ライカ社の DNA03 の往復標準偏差は 0.3 mm で、SOKKIA 社の SDL1X が 0.2 mm である。計測環境を整えれば、ほぼ熟練測定者に近い精度が短時間で得られる。ただ、視準線上の空気の揺らぎを極力抑える、焦点ノブを変えずに 2 点を測定する等の目視のオートレベルと同じ注意が必要である。

尚、3 社の機械間で標尺の互換性がないのがユーザーとしては不満である。しかし、加速器建屋内の測定では室温が大きく変化せず距離も短いため、安価な 40 cm 程度の金属製標尺で使用する事ができる。

デジタルレベルのもう一つの利点は、測定データを PC に直接転送できる事である。DiNi0.3 は Bluetooth で Excel のセルに直接データを送る事ができる。これにより、測定時の読み取りミス、聞き取り書き取りミス、入力ミスがなくなり測定の信頼性が大幅に向上した。

我々が DiNi0.3 を使用し、XFEL 棟内の約 640 m を 23 点に関して、モニュメント(後述)高さとその場所の床面水準点鉾の高さを別々に二路でつないで計測し、両端で高低差を計測してループにした場合の環閉合差は 0.15 mm 以下である。

高さの測定データに関して、我々はこのデジタルレベルのデータを一番信頼している。又、0.01 mm という分解能に関しても、後述の分解能 0.1  $\mu\text{m}$  の HLS のデータと良く一致する。

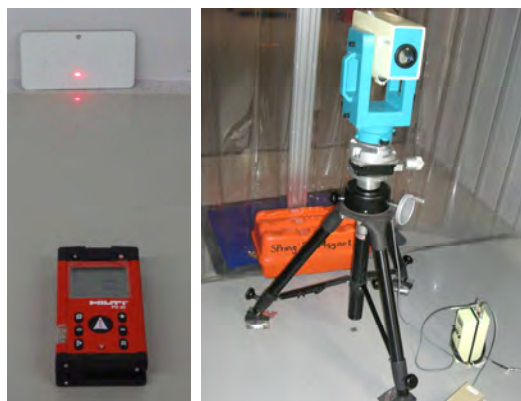


図 3-2. 距離測定器。左 : HILTI 社 PD32。右 : MEKOMETOR ME5000

### 3.2. 光波測距儀

直尺が使えない 3 m を越える長さを簡便に測る計測器としては、精度  $\pm 1$  mm のライカ社やヒルティ社のレーザー距離計を使用している。

長距離測定には後述の LT より長距離が測定でき、後述の TS より 1 桁高精度の  $\pm 0.2$  mm + 距離  $\times 0.2$  ppm 測定可能距離 8 km 程度の Kern 社 MEKOMETOR ME5000 を用いている。この測定器は、500 MHz(波長 60 cm)付近でレーザー光の偏光面を回転させ、その回転周波数を掃引シターゲットまでの往復距離が掃引波長の整数倍の時に戻りの光が検光子を通ることを使い、この条件の周波数を複数見つけて距離を計算している。その精度から、過去には国土地理院で TS の距離計の検定に使われていた。また、ダムの貯水位による静水圧荷重が影響した外部変形調査などの大型の構造物の精密変動調査などで実績があったが、既に製造中止で持ち運び容易な後継機種はない。

### 3.3. トータルステーション (TS)

ある観測点から視準する 2 点の水平角と仰角を計測する測量機をトランシット又はセオドライトと呼び、さらに測距機能も付いたものをトータルステーション (TS) と言う。現場では 30 m 以上の長い直線部を計測したり、直線に並べたり、直線のポイントを床にマークする時に使用する。





図 3-4. トータルステーション。左：**TEA5005**。右上：ターゲット(SMR)。右下：木製三脚と鋼製架台

測距方式は、レーザーの振幅変調を使用しており、その周波数がだいたい 50MHz 程度なので前述の ME5000 より精度が 1 桁落ちる。市販の TS の最高の精度は、測角 0.5 秒、測距 0.5 mm+1 ppm 程度で、自動視準精度は 1 秒程度である。これらの条件をほぼ満たすものとして、ライカ社の TDA5005・TS30、ニコン・トリンプル社の S8、SOKKIA 社の NET05 があげられる。我々は TDA5005 を主に使用している。風速を 0.01 m/s 以下に抑えた環境で 40 m 先のターゲットを自動視準で測定した場合、標準偏差で 0.2 秒程度の再現性がある。ちなみに我々の経験では、普通の観測者の視準精度は 1 秒程度、熟練観測者が最適なターゲットを使用した場合は 0.5 秒程度である。但し、自動視準は短距離が不得意で、5 m 以下(機種による)になると、明らかに目視の方が正確にターゲット中心に合わせられる。TDA5005 には求心望遠鏡がついていないので、機械点を床マークに合わせる時は、ライカの鉛直器 NL を使って整準台を合わせてから TS に載せ替えて使用している。

測定するターゲットには、後述の LT と共用できる、直径 38.1 mm (1.5 インチ) の金属球である SMR(Spheroidal Mounted Reflector) (コーナーキューブリフレクター内蔵で精度は 0.01 mm 以下) を使用し、自動視準で測定している。

精度の必要な測定を行う時の注意点は機種によって異なるが基本的な事として、

- (1) あらかじめ校正をしておく。
- (2) 整準盤の整準作業をきちんと行う。
- (3) できれば三脚は重量のある堅牢で安定な物を使用する。
- (4) 正・反の両方で(一度視準して計測後、方位角と仰角を 180°ひっくり返してもう一度計測する) 計測して平均値をとる。このような測定方式を「対回観測」と言い、幾つかのエラーをキャンセルできる。
- (5) 長い直線のポイントを床にマークする時は、時間と共にずれる事を考慮に入れて、遠い所からマークしていき、最後に方向基準点をもう一度計測する。

があげられる。

### 3.4. レーザートラッカー (LT)

TS の距離計の分解能を 1 μm 程度まであげて(そのかわり長距離はできない)、自動視準精度をあげ(目視視準はできない)、ターゲットのトラッキング機能をつけたのがレーザートラッカー (LT) で、3 次元座標をリアルタイムで表示するので、アライメント作業では大変便利である。又、例えばフランジの周りを 10 点ぐらいターゲットでなぞって計測し、データを円柱にフィッティングすることで、フランジ中心軸を計測するような事もできる。



図 3-5. レーザートラッカー。左：T3。右：**AT401**

最初のころの測距方法はレーザー干渉計を使った相対距離測定(IFM)であったので、ターゲットをホームポジションから測定点に移動する間にレーザー光が途切れないように滑らかに移動させる必要があった。近年は高精度絶対距離計(ADM)を搭載する機種が出てきており、ターゲット移動も楽で精度も相対距離計方式と遜色がない。価格も20年前の頃の1/3程度になり、高精度のTSの1.5倍程度で購入できるようになった。

メーカーとしては現在、ライカ社、API社、FARO社の三社があり、一長一短がある。我々は、API社のT3(IFM+ADM)とOT(ADM)とライカ社のAT401(ADM)を使用している。

3次元位置精度は、それぞれカタログでは5ppmぐらいの数値があるが、これはかなりいい状態での測定値であるので、始業前の校正作業時の計測値の許容量などをきちんと検証して使用する必要がある。分解能1 $\mu\text{m}$ 以上で計測値が表示されるが、絶対位置は5 $\mu\text{m}/1\text{m}$ 程度なので、計測値を鵜呑みにしてはいけない。

LTは校正時に正と反の測定をしてエラーの補正パラメータを記憶させて、実際のアライメント時には正の面でしか使わないのが普通であるが、アライメントの最終記録の測定には正反両方の対回観測をして平均値を求めている。

LTは使用する測定器の中で、水平位置に関しては一番精度が高いので検証が難しい。機械同士で測定値が系統的に異なる時でもどちらが真値

に近い判断は難しい。上下位置はデジタルレベルで検証できる。LTには電子レベルが内蔵されており、原点と方向基準を与えて後は内蔵レベル基準で水平な座標系を設定する事ができるが、検証するとカタログスペックを満たしていない事があった。

LTのコントロールソフトも重要である。加速器のアライメントには、New River Kinematics社のSpatial Analyzer[3]が向いていると考えている。座標変換のマクロを処理したり、左手系の座標も取り扱えたり、網測量後のデータ解析の平均計算も充実している。このソフトはどのLTにも対応しているので、使用する機種が変わっても、同じ操作で各種座標変換や測定を行う事できる。又、各種TSにも対応しており、LTを使用している時のように、座標変換処理後の3次元座標を見ながら測定ができるので、大変重宝している。

### 3.5. GNSS 測量器

屋外での地盤の変位の履歴を計測し、建屋間の相対位置の変位や、建屋の基礎部にかかっている力を推測したりすることは重要である。その際GNSS(Global Navigation Satellite Systems)測量は、天空が開けた場所であれば、陽炎・風の影響を受けず、直接見通せない2点間でも測量でき大変便利である。

最も高精度の測量方法はスタティック法といい、相対測位の一種である。2台以上のGNSSアンテナと受信機で、5個以上のGNSS衛星からの信号を受信して搬送波の位相を解析することで、地心3次元座標系(地球の重心を原点とした座標系)上でアンテナの位相中心間の座標差を求めることができる。またU.S.A運営のGPSにロシア運営のGLONASSも加え、国産の測位衛星QZSS(準天頂衛星)によって、常時6個以上の衛星によって測位する環境が整備され、衛星が少なくて測量ができなくなる状況が減少した。我々の所有するTOPCON社のNeT-G3のスペックは、水平3mm+距離 $\times$ 0.5ppm、垂直5mm+距離 $\times$ 0.5ppmである。



図 3-5. GNSS 測量器、NeT-G3。左上：アンテナ。左下：受信機。右：計測風景。

実際の再現性は 15 分の測定で、水平方向±1 mm、垂直方向は cm 程度であった。さらに、24 時間の測定で前述の ME5000 と 200 m～1 km の距離の比較では、差は大気補正後 0.0～0.3 mm に収まった。

また、直径 500 m 蓄積リングの外側に 17 年前に設置し、今は見通せなくなった基準点 10 点を測量した結果、その内の 3 点が 15、4.5、5 mm 移動していることがわかり、地盤との関係が理解できた[4]。

## 4. 全体アライメント計画

### 4.1. 据付要求精度

加速器設計者と相談して決めた据付要求精度は以下の通りであった。

- (1) 線型加速器部の、加速管・四極電磁石 (Q-Mag)・電子ビーム位置モニター (BPM) の設置許容値は±0.3 mm/30m、但し全体的には滑らかにつながっていれば良い。
- (2) 光源棟部の、アンジュレータ・Q-Mag・BPM の設置許容値は±0.2 mm/120m で、直線に並べる。

(1)に関しては、これまでの普通の線型加速器と同程度と思われる。許容値の分母の 30 m は使用した LT(API 社 T3)の推奨距離から決めた。

レーザー発振を得るには、電子ビームと X線を相互作用させるアンジュレータ部全体の 120 m にわたり 30 μm、任意の 10 m(アンジュレータ 2 台分)では 5 μm の精度で電子ビームをまっすぐにとばす必要がある。もちろん、この精度は機器設置時のアライメントでは不可能なので、実際の電子ビームやアンジュレータからの自発光を使い最終的に調整する事とした。そのため、この部分のコンポーネントである、アンジュレータ・BPM・Q-Mag は遠隔位置調整機構をつける。このような条件で、(2)のように光源棟部は加速器棟の 2/3 程度の設置許容値になった。

その他考慮すべき条件として、

- (1) 据付期間は 18 ヶ月間と長期である。
- (2) 建屋の沈下は最も大きいところで 2 mm/年と予測された。



Fig. 4-2-1 測量用モニュメント(オレンジのポール)。約 30m 間隔で一直線に並んでいる。

- (3) 建屋の床の変位がわからないので、2 ヶ月に 1 回の全体計測が必要である。

があった。その結果、一週間以内で全体測量ができるような測量計画が必要になった。

### 4.2. ストラテジー

アライメントするビームラインの長さは、BL1 も含めて延べ 900 m 程度である。測量に必要な時間を考慮して、約 30 m おきの 30 か所程度の測量用モニュメントを置くことにした(Fig. 4-2-1 参照)。

モニュメントを並べるライン(リファレンスライン)はビーム軸から水平・南側に 700 mm オフセットしたラインとし、全ての加速器コンポーネントはリファレンスラインの視準を妨げないように、モニュメント側についてはビーム軸から 650 mm 以内で設計する事とした。

モニュメントの数は、加速器棟が 14、光源棟の BL3 と BL1 でそれぞれ 9 の合計 32 個である。モニュメントの位置は等間隔ではなく、加速器のセクションごとの切れ目のステアリングマグネットの近くに置き、境目に関してはどこまでをどちらのモニュメントのペアでアライメントするか計画を立てた。

加速管と石定盤は近くの 2 つのモニュメントと、その中間の南側壁面に設置したレベル基準点の 3 点で座標を作ってアライメントを行う。これは、LT の内蔵レベルの確認を兼ねている。

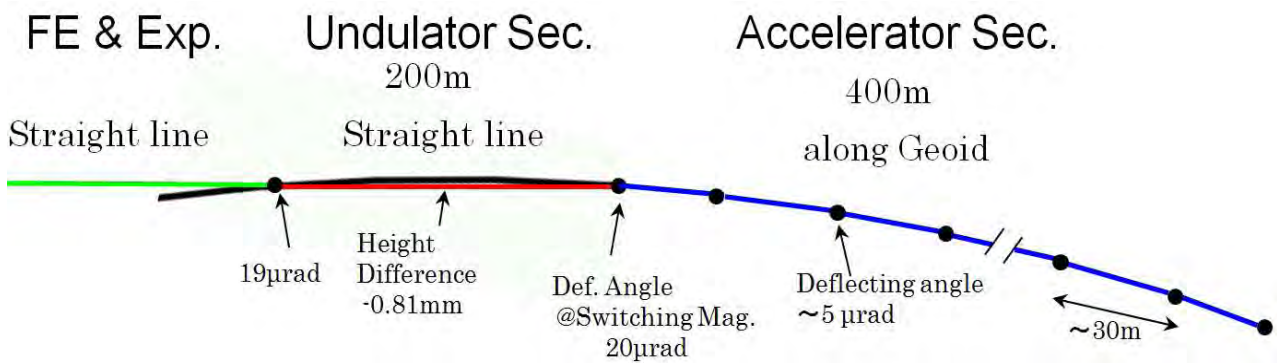


Fig.4-2-2 電子ビームのベースレベル

石定盤上の機器は、石定盤の基準を使ってアライメントする事とした。こうする事で石定盤を設置する時期とその上の機器を設置する時期が離れていて、その間に石定盤が沈下した場合でも、石定盤を再アライメントする事で対応する事ができる。

このモニュメントを最初から設置する事により、誰でも簡単に水平位置と高さの両方が精確な基準点がひろえるのでアライメントの精度が向上し、任意の場所でアライメント作業を行う事ができる。又、モニュメント位置はその付近の加速器機器の位置を表す事になるので、その変位を測る事は、加速器本体の変位を測る事になる。

ビームのベースレベルに関しては、線型加速部は床面の沈下が避けられない事を考慮してジオイド、光源棟から後ろは直線にする事とした。計画図を Fig. 4-2-2 に示す。線型加速部は約 30 m

置き、のモニュメントに沿った多角形になり、偏向角は約 5 μrad である。加速部終端の振分マグネット部で、アンジュレータ部の中央を水平基準にした直線に切り替え、そこでの偏向角は 20 μrad である。水平基準位置での高さの補正は -0.81 mm と計算された。モニュメント調整時には、ジオイド基準のデジタルレベルで計測した後に、計算値分をステージで補正した。

加速器棟電子ビームの G.L. (標高) は蓄積リングとほぼ同じで 292.397 m と計画した。尚、加速器棟の電子ビームの床からの高さが 80 cm と低いのは、低い方が機器の振動対策に有利だからという事で決められた。光源棟は、挿入光源に関して狭ギャップ時の強い吸着力でも変形しない高剛性の架台には高さが必要ということで通常の 120 cm となった。

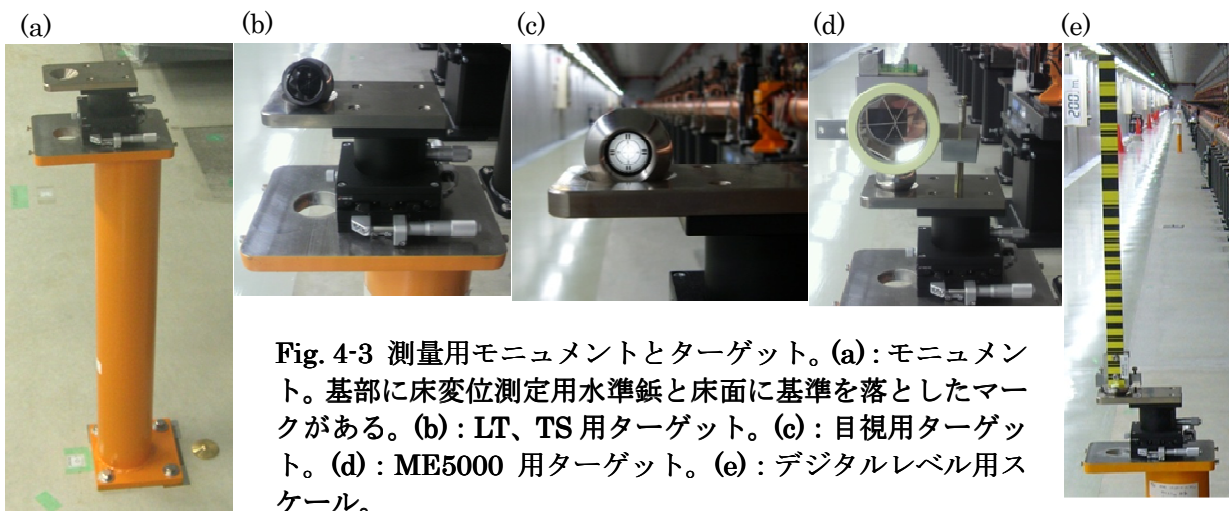


Fig. 4-3 測量用モニュメントとターゲット。(a):モニュメント。基部に床変位測定用水準紙と床面に基準を落としたマークがある。(b): LT、TS 用ターゲット。(c): 目視用ターゲット。(d): ME5000 用ターゲット。(e): デジタルレベル用スケール。

### 4.3. 測量用モニュメント

Fig. 4-3 に測量用モニュメントと各種ターゲットを示す。ポール上の XYZ ステージによって、基準となる 1.5 インチ球( $\phi 38.1 \text{ mm}$ )ターゲットの中心位置を調整して固定する。ターゲットは XYZ ステージに取り付けたターゲットプレートにある  $30^\circ$  のすり鉢状の窪みにセットする。この窪みの底は貫通穴になっており、又ポール中心はオフセットしてあるので、上から鉛直器を使用して床面に水平位置を移す事ができる。これにより、基準線が床面上に途切れる事なく引け、又モニュメントを一時的に外す時の復旧に有用である。

モニュメントが表す基準位置(水平位置と高さ)を、いろいろな計測で拾えるように 1.5 インチ半球を底面を持ついろいろなターゲットを製作した(Fig. 4-3 参照)。特に目視用ターゲットは、レーザー墨出し器と組み合わせると、誰でも精度  $\pm 1 \text{ mm}$  でいろいろな作業ができる。

モニュメント基部の床面には水準点鉤を打設し、水準測量時にターゲット位置と床面鉤とを別々に二路で計測している。

XYZ ステージは勝手につまみをまわされないように普段はカバーしており、ステージのマイク

ロメータの値も記録を取っている。モニュメントポールの傾きは横方向変位にきくので、位置計測時にはモニュメントプレートの傾きも計測している。

### 4.4. 測量計画

建屋の床変位が大きい事が予想されたので、水平方向の測量は 2 日程度の量と考え、全体測量を 1 日、光源棟測量を 1 日で終わられるように計画した。

通常多数の計測点の水平方向位置を高精度に測量する場合は、機械点の位置を変えて、同じポイントを多方向から計測し多くの観測方程式を設け、それらを最小二乗法で処理する厳密測量網平均計算が使われる。これら計測点、機械点と測辺で構成される幾何学的な三角形群あるいは多角形群を測量網あるいは測量ネットワークと呼ぶ。

全体測量に関しては、加速器棟部と BL3 のモニュメント 23 点だけとし、測定距離の長い TS を使って、前後 125 m にあるモニュメントを 4 箇所の機械点で計測する事とした。125m は TDA5005 が精度良く測れる距離から決めた。この測量ネッ

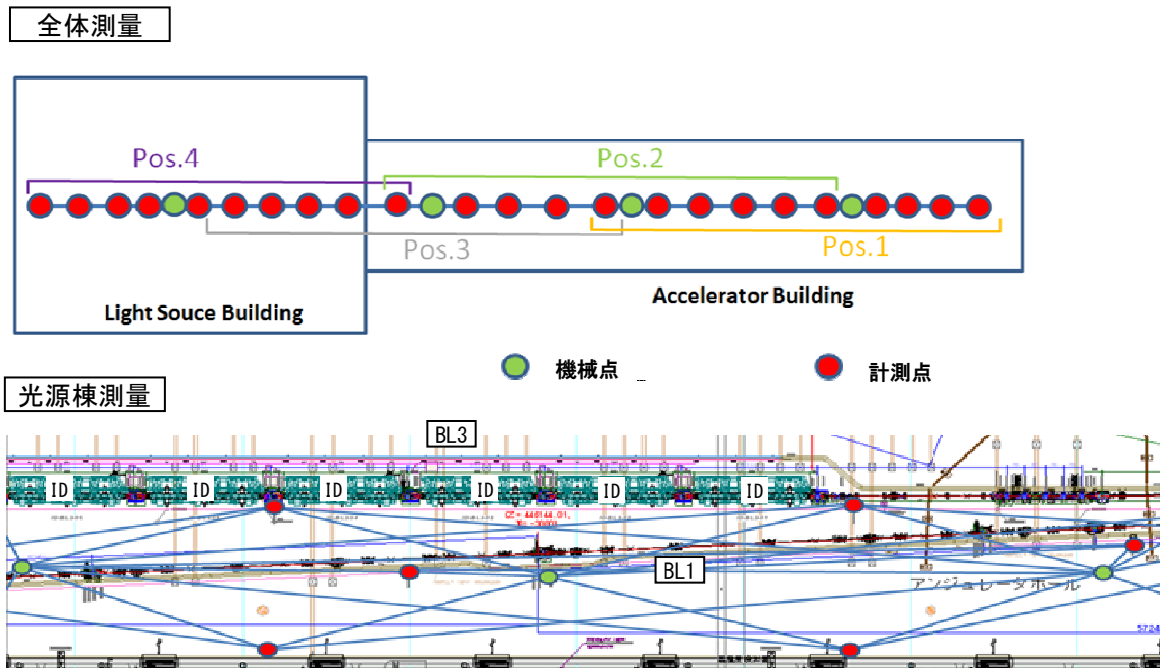


Fig. 4-4 測量ネットワーク。上：全体測量。一直線に並んだ計測点 23 点を 4 箇所の機械点で TS を使って測量する。下：光源棟測量。230 × 8 m<sup>2</sup> のエリアの計測点 28 点を 9 箇所の機械点で LT を使って測定する。

トワークは一直線でもほとんど三角形ではないので測定精度はあまりよくない。事前に計測エラーを考慮したモンテカルロシミュレーションで誤差を見積もった結果は 0.5 mm であった。

光源棟に関しては、BL1 と BL3 のモニュメントの他に BL1 の南側壁に 10 点を追加し 28 点とし、ネットワークのサイズとして 240×8 m<sup>2</sup> を 9 箇所の機械点で LT を使い測定する事とした。三角形が細長い網平均には不利なネットワークだが、それを測距精度の良い LT で補うためである。同じく計測エラーを考慮した誤差の評価は 0.2 mm であった。

上下方向のレベル測量はモニュメント数の 32 点を 1 日で計測、同じく距離方向の測定に 1 日、

合計 4 日で行える測量計画を立てた。

#### 4.5. 高さ基準と方向基準

建屋建設に先立ち、SACLA 光源棟南側の切土部分の 2 箇所に 1 級基準点が測量会社によって設置され、この 2 点を基準に建屋の建設が行われた。

収納部内全体の高さの最初の基準は、光源棟の直接基礎部で床表面から 40 cm 下の基礎コンクリート面上に打設した水準点鉤とした。場所は、Fig. 4-2-2 で、アンジュレータ部下流のジオイドラインと交差する点の近くである。この鉤を不動点としてモニュメントの高さを決め、その後の変位測量ではこの鉤を高さ基準点として計算を行っている。この場所は遮蔽扉にも近いので、毎年夏か

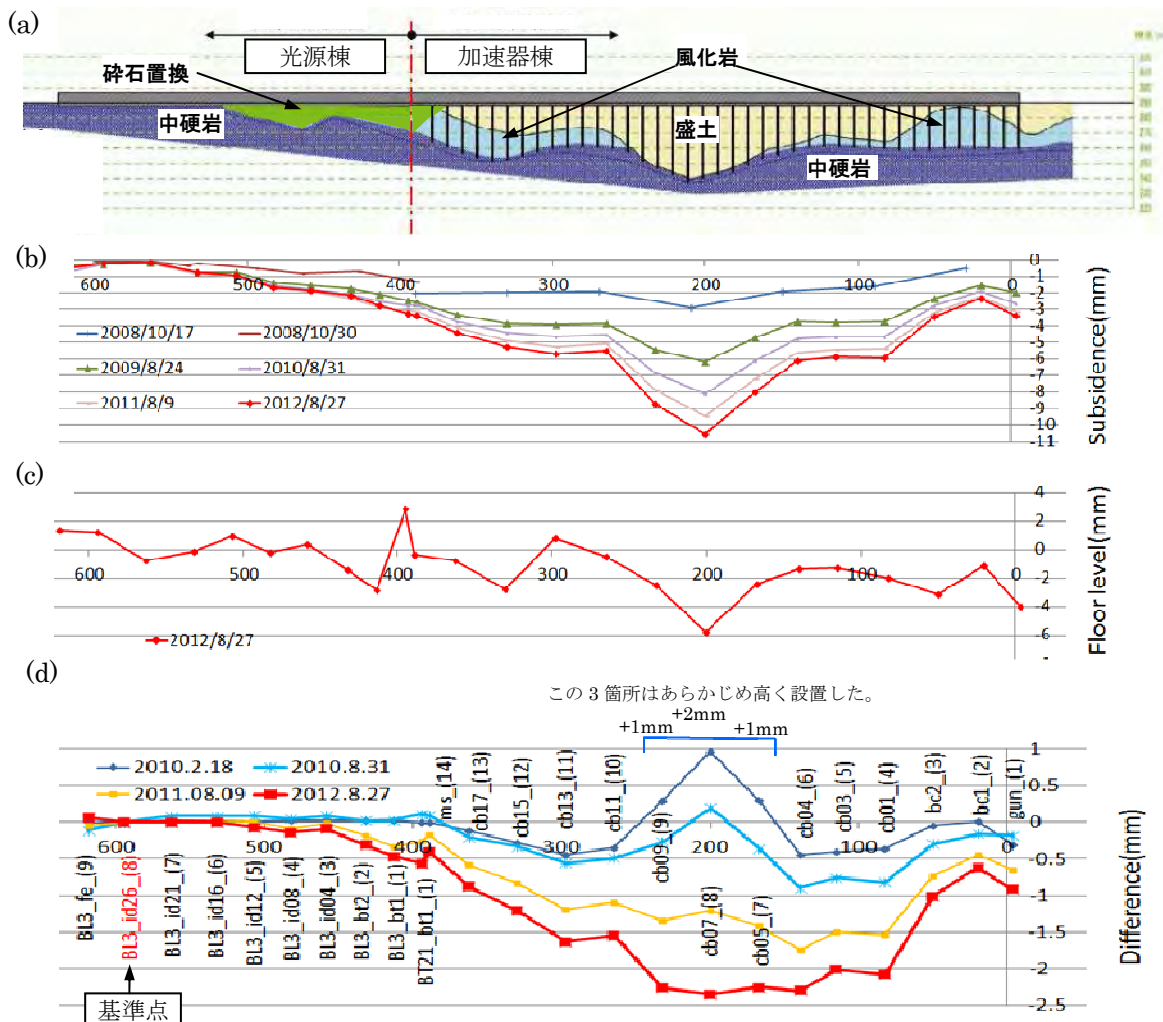


Fig. 5-1 収納部内床面の高さの変化。(a) : 建屋の基礎構造の断面図。(b) : 2008年8月からの床面の沈下の履歴。(c) : 2012年8月でのコンクリート床面の実際の高さ。(d) : モニュメントのリファレンスラインの変化。測定はデジタルレベルで行った。

ら秋にかけての測量で、設置した1級基準点と比較しているが、2010年4月からの3年間の変位は最大0.3mmであった。

収納部内の方向基準は建築用に使われた点を踏襲してモニュメントを並べた。モニュメント位置の精密調整後、基準線を床面に2m間隔でマークした(精度0.2mm程度)。マークにはビーム軸方向座標も記し、床・壁の罫書き基準や粗アライメント用に使用した。

## 5. モニュメント測量

### 5.1. レベル測量

モニュメントの、レベル測量の結果をFig. 5-1に示す。測定はデジタルレベルで行った。

Fig. 5-1(b)は建設開始時の2008年8月からの床面の沈下の履歴を表す。最大で11mm近くの沈下があるが、直近の最大沈下量は加速器棟では1.1mm/年、光源棟では0.2mm/年である。光源棟の沈下量は建屋設計会社の予想とだいたい一致している。注目すべきは、加速器棟の沈下グラフの形状で、Fig. 5-1(a)と比較してわかるように杭の長さではなく、盛土部の地層の形状と一致し

ている。これは沈下に関してコンクリート杭自体の収縮ではなく、予想通り周囲の盛土の沈下による杭の収縮が支配的である事がわかる。

Fig. 5-1(c)は実際のコンクリート床面の高さである。床コンクリート打設時に、既にどの部分が沈下するかわかっていたので、その部分は厚く打設した。おかげで2012年8月の時点での床面の低いところは沈下の半分の6mm程度に収まっている。400m付近で3mm高くなっているのは別理由で、5.4で説明する。

Fig. 5-1(d)は実際に加速器をアライメントする為の基準となるモニュメントのリファレンスラインの変化である。200m付近が一番沈下する事がわかっていたので、コミッションの2011年6月ごろに水平になるように、その部分のアライメント基準を1~2mmあらかじめあげておいた。

### 5.2. コンクリート杭天端沈下測定

加速器棟部の一番長いコンクリート杭(51.5m)に関して打設直後に、その天端に水準点鉾を設置し沈下計測を行った。その水準点鉾はFig. 5-2の左の写真にあるように、収納部完成後の今でも穴を

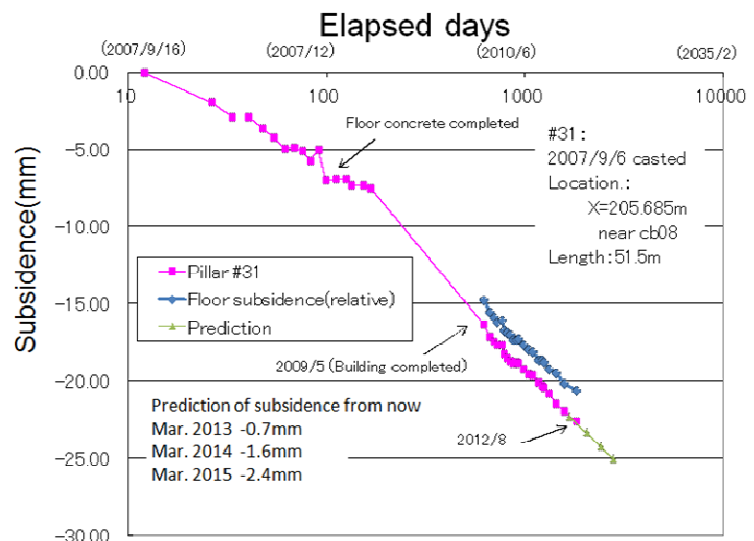


Fig. 5-2 加速器棟部の最も長いコンクリート杭天端の沈下。左上：杭完成直後に水準点鉾を設置した写真。左中：床コンクリート打設時の沈下計測の写真。左下：建屋完成後に収納部トンネルピット部にある水準点鉾の計測用穴の写真。右：四角は杭天端の沈下、菱形は杭付近の沈下(相対値)、三角は今後の沈下予測。

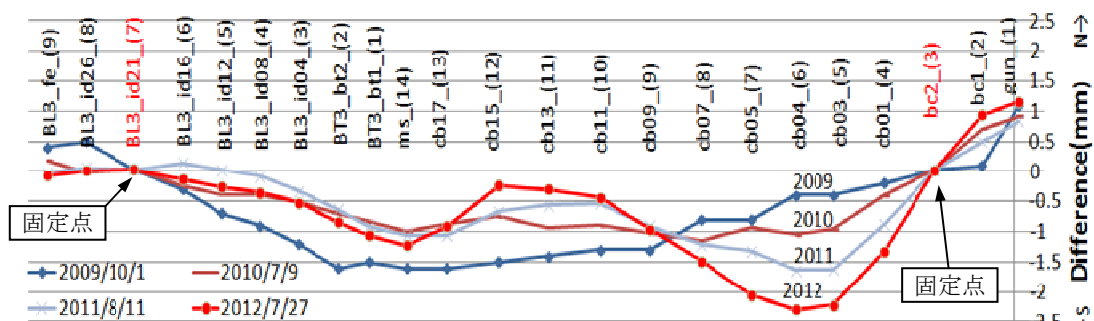


Fig. 5-3 収納部床面の水平方向の変位。上下流に解析の為の固定点を仮定しているが、実際はどこが固定されているかはわからない。

通して計測する事ができる。途中計測ができていない期間は、収納部天井コンクリート打設時期である。

この計測により、杭天端の沈下と床・基礎コンクリートの収縮による沈下とを分離する事ができる。Fig. 5-2 右のグラフで、四角が杭天端の沈下、菱形が杭付近の床面の沈下（相対値）である。二つのグラフはほぼシフトしているだけなので、床・基礎コンクリートの収縮は小さく、床の沈下は杭天端部の沈下が支配的である事がわかる。

このグラフの横軸が経過日数で対数にしてあり、沈下の様子はほぼ直線になっているので暫減している事がわかる。10年で20mmという建屋設計会社の予想は、開始日をどう考えるかであるが、建屋引き渡し時の2009年5月からとすると、概ね予想値の通りと考えている。

### 5.3. 水平変位測量

2009年から2012年間のモニユメントの変位結果を Fig. 5-3 に示す。TS で単路線の結合多角測量網で計測した。測定を始めてから最初の2年間は、測定時期を考慮せずにグラフを重ねていたので変化の傾向がわからず測定精度の問題かと思っていた。しかし昨年、夏の測定のデータだけを取り出してみたらはっきり年ごとの変化の傾向がわかった。同じ季節にデータを取る事は季節変化の影響を隠すので、経年変化を測りたい場合に重要である事を痛感した。cb03のあたりのデータは4年分がほぼ均等に並んでいる事から、測定精度は事前評価の0.5mmよりは良いと考えている。

データの解析上、両側に固定点（一応、レベル測量では変化が小さい所）を仮定してプロットしてあるが、実際にはどこが固定となって変位しているかはわからない。建屋のどこが動かない部分なのかを調べる為に、両端のポイントを建屋外まで出して、GNSS測量のデータと合わせる事で、絶対位置が決めるような測定ができるよう準備している。又、変位量がBL29XULの横変位量に比べて小さいが、これは厚さ2mの収納部基礎コンクリートで杭上部が拘束されているので違う変位になっているのではないかと考え、BL29XUL ビームパイプと建屋の距離を測定する準備もしている。

より精度の高い測量ネットワークで行った光源棟のモニユメント水平変位測量結果に関しては、モニユメント上にワイヤーを張り(120m)、後述のWPSを使って検証したところ、差は0.05mm以内であった。

### 5.4. ビーム軸方向の変位

モニユメントのビーム軸方向の変位の測定結果を Fig. 5-4 に示す。測定はME5000で行った。

モニユメントは2009年3月に設置され、その時の変位は全ての場所において0で水平な線のグラフである。変位が正はモニユメントが下流に移動した事を、負は上流に移動した事を示し、Z（ビーム軸方向の位置）=430m付近の点を固定点としてプロットしてある。グラフが水平のところはモニユメント間の相対距離が変わっていない事を表し、右下がり相対距離が広がっている事を示す。Z=80m付近で変位が0になっていると



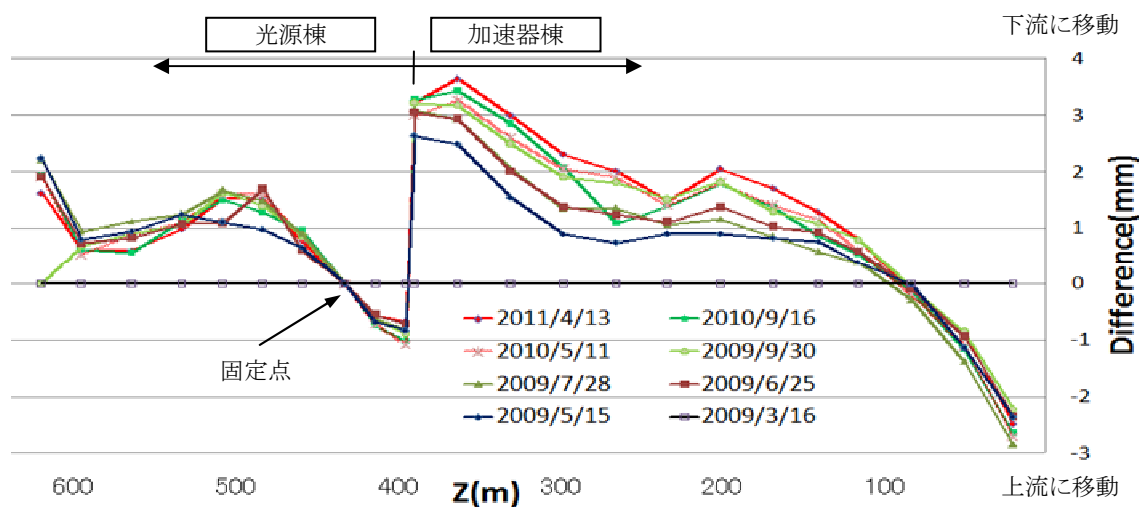


Fig. 5-4 モニュメントのビーム軸方向の変位。モニュメントは2009年3月に設置されたので、その時のグラフは0 mmの水平な線。変位が正はモニュメントが下流に移動した事を示し、Z=430 m 付近の点を固定点としてプロットしてある。測定はME5000で行った。

ころがあるが、ここは固定点との相対距離が変わっていない事を示す。

グラフからモニュメント設置後2ヶ月の2009年5月には大きく変位している事がわかる。加速器棟は2011年4月までに全体で6 mm程度膨張し、特に上下流のおよそ1/3の部分で伸びている。光源棟は同じく全体で3 mm程度伸びている。

2009年3月にモニュメント設置後、4月に建屋の空調を入れたが、その時点で床表面温度は10°Cであった。定常状態の25°Cになったのは10月ごろで、それ以降の変化は小さい。コンクリートの熱膨張係数は $12E-6$ 程度で、観測された伸びはそこから計算される値の1/10程度であるが、コンクリートの熱膨張がこの変位の理由と考えている。

加速器棟と光源棟の境界部は左下がりの大きな段差のグラフになっている。これはモニュメント間が5 mm程度縮んだ事を示し、基礎構造の異なる加速器棟と光源棟の両側から圧縮されている事がわかる。前述のFig. 5-1(c)で、400 m付近が3 mm高くなっているのはこれが理由と考えている。

このビーム軸方向のモニュメントの位置基準に関しては、2009年の8月にリセットし、その後の変位に関しては、補正を行わず直上流モニュメントの位置を基準に機器のアライメントを行

っている。このように長尺の建屋の場合は建設当初の時期の伸縮が大きいので、できる範囲でそれを予測することが大切である。

## 6. アライメント

### 6.1. 加速管のアライメント

加速管のアライメントは、個々の加速管を近くの2個のモニュメントを座標基準にして、既にアライメント済みの隣の加速管も測定しながら滑らかにつながるように、レーザートラッカーで行った。加速管は全部で136本で、床の沈下の少ない加速器棟下流から並べた。

加速管の設置許容値は0.3 mmという事であったが、実際の加速管はそれ自体で0.2 mm以上の曲がりを持つ物があった。このような加速管は、なるべくビームエネルギーの高い下流に設置するが、アライメントとしては、端部を合わせるのではなく、曲がった加速管の平均位置で並べる事とした。2箇所加速管を保持する場合、自重によるたわみ量が少ないベッセル点付近でサポートする(サポート間距離 $\approx 0.56 L$ )ので、その2つの位置基準でアライメントを行った。

円柱の加速管の上に乗せて水準を調整すると、加速管中心の真上で中心から決まった距離に

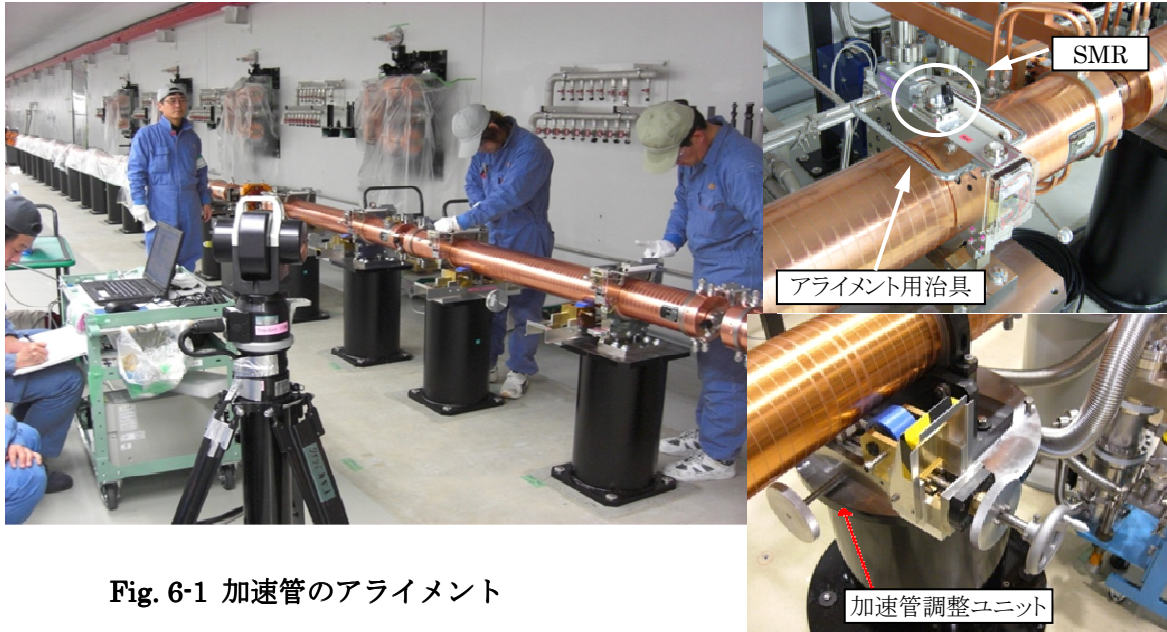


Fig. 6-1 加速管のアライメント

SMR が置く事ができる治具を製作し、目標 0.1 mm で上下左右をアライメントした。

加速管の方位角は導波管フランジ面が基準である。フランジ側面に取り付けられる治具を作り、0.5 mm/m の水準器で合わせた。又、同じクライストロンでドライブする 2 本の加速管はビー

ム軸方向の相対距離を  $\pm 0.2$  mm で合わせた。

## 6.2. 石定盤のアライメント

石定盤のアライメントも、近くの 2 個のモニュメントを基準にして、レーザートラッカーで行った。(Fig. 6-2 参照)

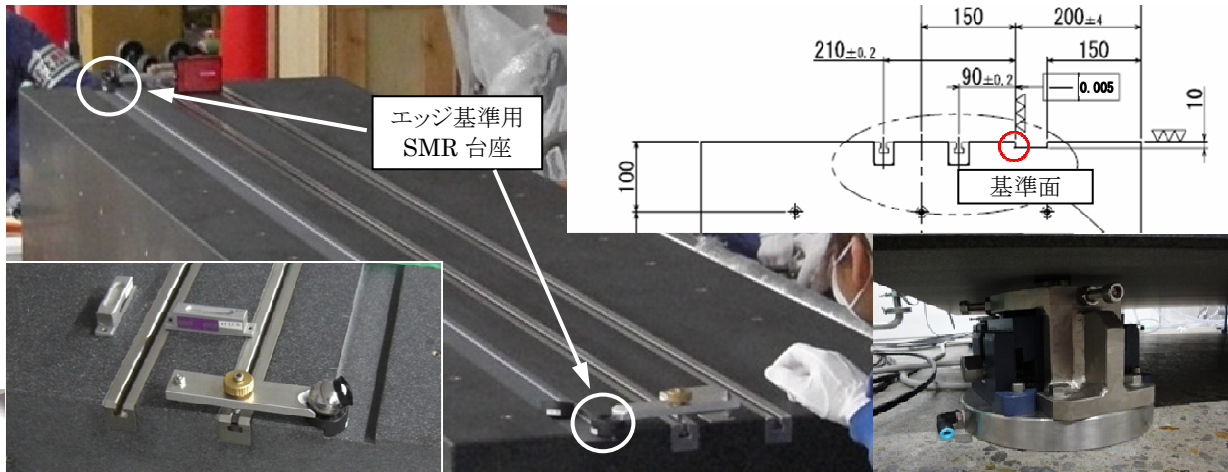


Fig. 6-2 石定盤のアライメント。左上・左中：方向基準面にエッジ基準用 SMR 台座を固定しているところ。右上：表面断面図。右下：脚部のレベリングジャッキ付きエアパッド。

電子銃と加速管以外の殆どのコンポーネントは精密石定盤上に設置される。石定盤の上面の高さはビーム軸の 200 mm(入射部の一部は 300 mm)下で、定盤の長さは 0.7~3 m である。定盤上面の平面精度は JIS1 級( $\mu\text{m}$ ) $=0.006 \times (\text{対角線の長さ}(\text{mm})) + 5$ で、コンポーネント固定用の M6 用 T 溝レールの間隔は 120 mm である。アライメント用の方向用基準面(10 mm の段差の側面)の真直度は 0.02 mm、上面との直角度は 0.005 mm である。

設置基準は、ビーム軸方向 $\pm 0.3$  mm、横方向 $\pm 0.1$  mm、高さ $\pm 0.1$  mm、ピッチング角 $\pm 0.05$  mm/m、ローリング角 $\pm 0.05$  mm/m とした。

石定盤の基準面はあらかじめアライメントしてあるので、機器据付時には定盤上流端から直尺で位置を測りながら基準面に治具で合わせる事で、設計位置に光学器械を使わずに機器を設置する事ができる。

石定盤の脚部には 4 つのレベリングジャッキ付きエアパッド[5]が取り付けられており、高さと横方向の位置を調整する事ができる。エアパッド部のコンクリート床面は、圧搾空気でパッドが浮上して(浮上量約 0.02 mm)スムーズに動くように床面研削機[6]で平坦面にしてある。

アライメント後に、エアパッド部をブラケットで床面に固定して耐震対策をした。コンポーネント設置全般に関する耐震基準は静的荷重で横

0.4 G、上方向 1.4 G とした。

### 6.3. Qmag のアライメント

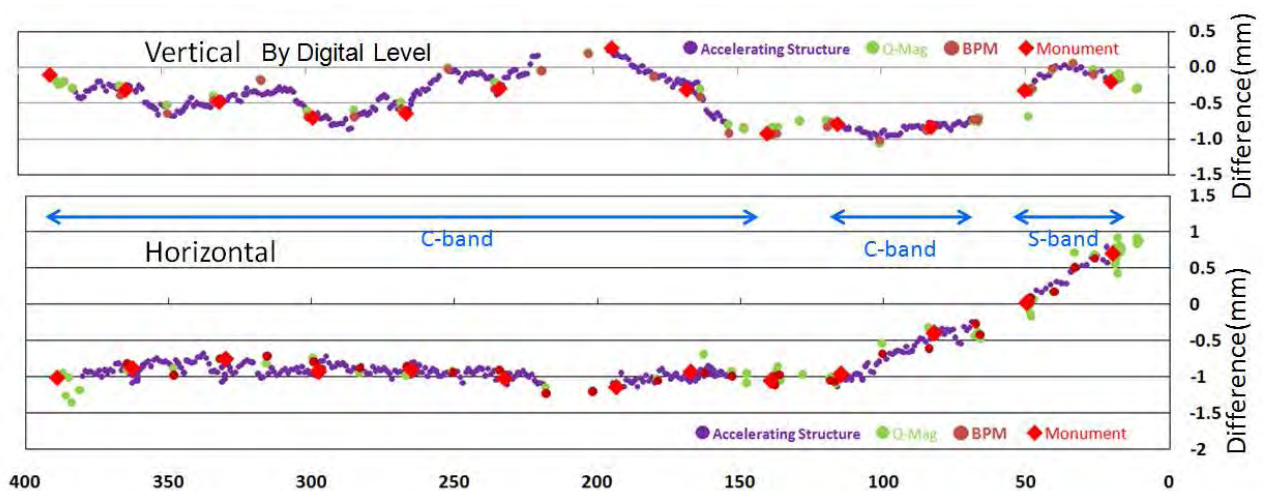
Q-Mag は、基本的には本体底面と底板側面を基準面として石定盤上にアライメントする。Q-Mag 設置後、ビームパイプを接続する前に、近くの BPM を使って振動ワイヤー法により磁場中心の測定を行い、石定盤上で調整可能な横方向の修正を行った。

Q-Mag の製作時の機械中心高さの公差は $\pm 0.05$  mm であったが、石定盤上に設置する場合は下げる調整ができない。更に高精度でアライメントを行うために、現在では指定をマイナス公差の 0.1 mm に変えて必要時にはアルミフォイルをシムにして高さの調整を行う事とした。また、機器の本体の位置計測基準もヨーク部等の端面や SMR 用の治具の為のピン穴を使っていたが、現在は 1.5 インチ SMR 用のステンレスの台座を圧入でヨーク部に直接取り付ける事にし、完成検査時に 3 次元計測器で台座の SMR 中心位置を計測するようにした。

### 6.4. 全体のアライメント結果

加速器のコミッショニングが始まる前にアライメントエラーが大きいものがないか LT 以外の測定器で確認を行った。

加速器棟の測定結果を Fig. 6-4-1 に示す。上下



2010/July

Fig. 6-4-1 加速器棟のアライメント結果。上：上下方向をデジタルレベルで計測(ジオイド基準)。下：横方向を TS で計測。

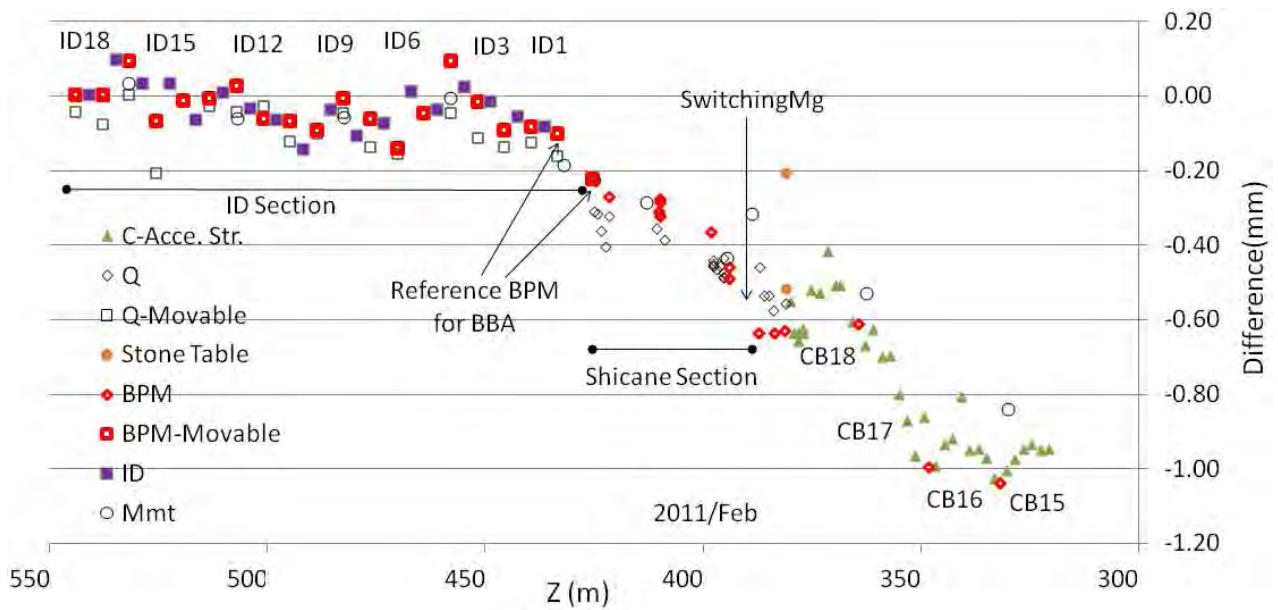


Fig. 6-4-2 光源棟の上下方向のアライメント結果。デジタルレベル(真の直線基準)で測定。

に関してはデジタルレベルでの測定でジオイド基準、左右に関しては TS の測定である。加速器棟に関しては、上下・左右ともマクロに見ると床の沈下や変位の影響を受けてあまり真っ直ぐではないが、個々には滑らかに $\pm 0.3 \text{ mm}$ でアライメントされている。尚、これらの測定後に幾つかの機器は修正を行った。

光源棟の上下方向の測定結果を Fig. 6-4-2 に示す。測定はデジタルレベルで行い、真の直線基準である。光源棟も床変位の影響があったが、問題のアンジュレータ部に関しては、 $\pm 0.2 \text{ mm}$ の中に収まっている。ここから先は電子ビーム・光ビームを使ったアライメントで調整する事とした。



Fig. 7-1-1 収納部の床面に設置された HLS。手前の円筒がセンサー部、後ろの角パイプが水配管。

## 7. モニタリングシステム

収納部内の計測は、加速器停止期間中に限られるので、測定時期が限定される。床面の変位には、季節変動や日変動もあるので、それらを計測する為には、常時計測し続けるモニタリングシステムが必要である。今回は高さを計測する HLS と横方向の動きを計測する WPS を紹介する。

### 7.1. HLS (水管傾斜計)

水面高さを計測するセンサーを、水を入れたパイプでつなぎ、センサー位置での床面の上下の相対変位を水面の変位としてリアルタイムで計測す

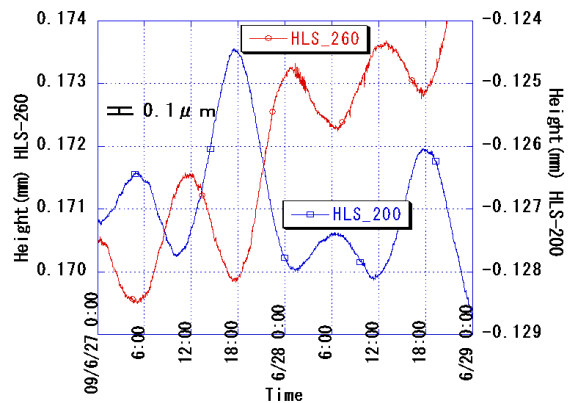


Fig. 7-1-2 長さ 60 m の HLS システムの両端のセンサーの出力例。

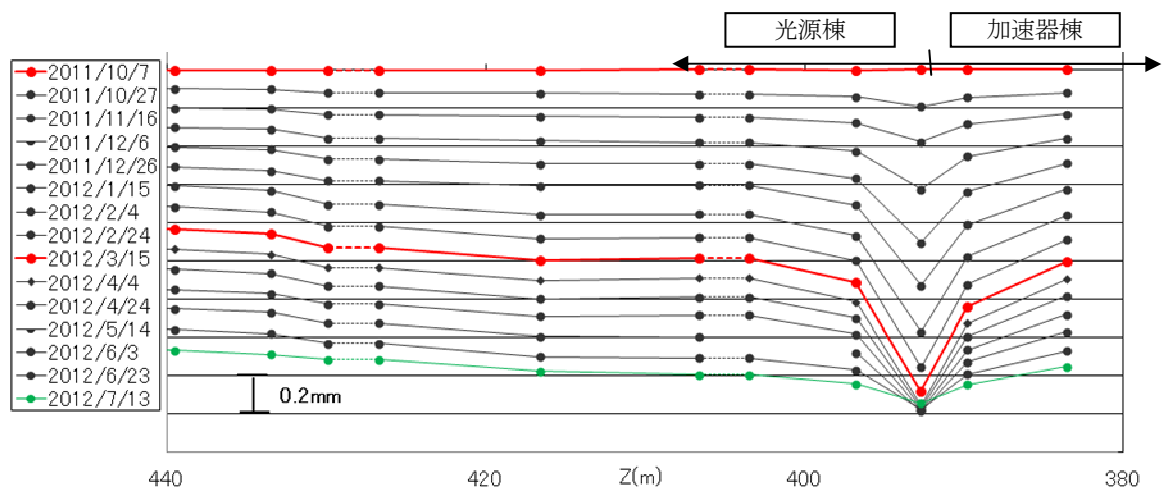


Fig. 7-1-3 加速器棟と光源棟の境界部に設置された HLS のデータ。Z = 393 m 付近の計測点は、季節による変動がある事を示している。

るシステムを HLS (Hydrostatic Leveling Systems) と呼んでいる(Fig. 7-1-1 参照)。Fig. 7-1-2 は XFEL 加速器棟に設置した長さ 60 m の両端の水面高さを Fogale 社製 HLS で測定した例である。分解能は 0.1  $\mu\text{m}$  以下で、潮汐による傾斜の変化が逆相になって捉えられている。この床面の傾きの変化は建屋全体で起こるので、SACLA のアライメントに影響はない。実際の床面の変位のデータとしては、24 時間の平均値を使用している。

通水管は、太い 1 本のパイプ (5 cm くらい) に半分ぐらいの高さの液面で水を入れてつなぐハーフフィルタイプと、2 本のパイプを使って片方を水で満たしもう片方を空気だけでつなぐフルフィルタイプがあるが、前者の方が水の温度差に

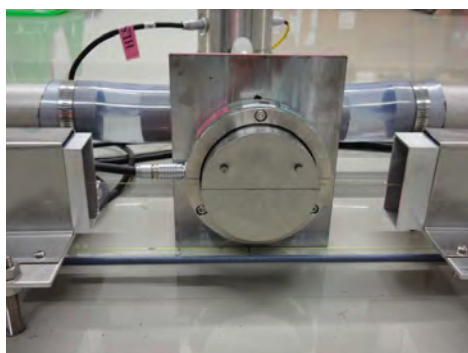


Fig. 7-2-1 手前：WPS センサー。両側の角ダクトでワイヤーを保護している。奥：HLS センサーと水配管。

よる密度の違いでおこる液面高さの変動がないのでこちらを使用している。

加速器棟と光源棟の境界部に 2011 年 10 月に設置した HLS のデータを Fig. 7-1-3 に示す。境界部の Z = 393 m のところのデータは、冬に下がり夏に戻る季節変動がある事がわかる。これは 5.4 のデータと合わせて、夏は両棟のコンクリート床が膨張して境界部がせり上がり、冬は収縮して下がるという理由で説明がつく。

## 7.2. WPS (ワイヤー位置モニター)

床の横方向の変位を測るモニターとして、WPS(Wire Positioning System)がある。基準となる長いワイヤーを張って両端を固定し、その途中のワイヤーの位置をセンサーで計測して床の変位を計測する。我々は Fogale 社の 1 次元タイプを主に使用している(Fig 7-2-1 参照)。分解能は 0.1  $\mu\text{m}$  以下である。ワイヤーには直径 0.5 mm のケブラー製の縀り線を使用し、120 m 敷設する時は張力 20 kgf でサグは 30 mm 程度である。ワイヤー直径により変位と出力の比が変わるので注意が必要である。

光源棟アンジュレータ部の約 110m の区間に設置された WPS のデータを Fig. 7-2-2 に示す。2011 年 7 月からの 10 ヶ月間の変位は 0.02 mm 程度と小さかった。ビーム位置での横方向に変位する要

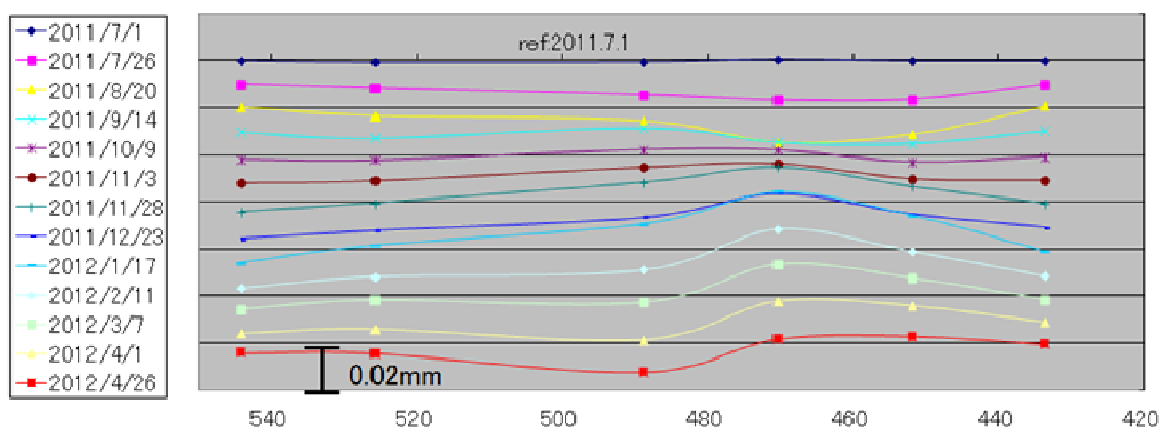


Fig. 7-2-2 長さ約 110m のアンジュレータ部に設置された WPS のデータ

因としては、床の傾きもあるので現在傾斜計の設置も進めている。

#### 参考文献

- [1] H. Kimura, et al., “SPring-8 の 1km ビームライン BL29XUL での地盤変位”, 加速器学会 2007 年報告集, p859.
- [2] T. Kai, et al., “SPring-8 の BL29XUL と XFEL 建屋の変位計測”, 加速器学会 2011 年報告集, p758.
- [3] <http://www.kinematics.com/spatialanalyzer/index.php>
- [4] S. Matsui, H. Kimura, “Survey comparison using GNSS and ME5000 for one kilometer range”, Proceedings of the 10th international workshop on accelerator alignment, KEK, Tsukuba, Japan, 2008.
- [5] K. Togawa, et al., “重量物の精密位置決め用エアパッド開発”, 加速器学会 2005 年報告集, p406.
- [6] T. Shintake, et al., “床面研削装置の開発”, 加速器 2005 年報告集, p202.