

Alignment Reference and Subsidence of Floor at XFEL

Hiroaki Kimura^{1,A,C)}, Yusuke Maeda^{B)}, Masafumi Yamashita^{B)}, Yoshifumi Tsukamoto^{B)}, Noriyoshi Azumi^{A)}, Sakuo Matsui^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)}

^{A)} XFEL/RIKEN 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)} SPring-8 Service Co., Ltd. 2-23-1 Kouto, Kamigouri, Hyogo 678-1205

^{C)} XFEL/JASRI 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

The RIKEN-JASRI Joint XFEL Project Team is constructing XFEL facility at SPring-8 site. The building with a total length of 640m was completed in March, 2009. Install of the accelerator components was started from August 2009. Now, the accelerator section is almost finished and the undulator section is 70% finished. Its operation will be started from February 2011. We will present a strategy of alignment, a subsidence of the floor concrete in this year.

XFEL の据付基準と床面沈下計測

1. はじめに

(独)理化学研究所では 2010 年度の完成を目指して、(財)高輝度光科学研究センターと協力して、X線自由電子レーザー(XFEL)施設¹⁾の建設を行っている。長さ 640m の建物は 2009 年 3 月に竣工し、現在コンポーネントの据え付けを行っている。

XFEL 施設の概略を図 1 に示す。加速器の全体の構成としては、電子銃等の入射部(Z=0~10m、Z はビーム軸方向位置)、第 1 バンチコンプレッサー部(BC1)(同 10~20m)、S バンド加速管部(20~47m)、BC2(同 47~60m)、C バンド加速管部セクション 1-3(CB01-03)(60~117m)、BC3(117~135m)、CB04-18(135~381m)、振分マグネット(Z=389m)を含むマッチングセクション(MS)(381~390m)、シケインを含むビーム輸送系(BT3)(390~434m)、アンジュ

レータ部(ID、18 台)(434~545m)、ID 下流及びダンプレ部(545~611m)、フロントエンド部(611m~623m)である(BL3 の場合)。

座標系は、ビーム軸を Z 軸、高さ方向を Y 方向、電子を背負って右方向が X の正方向とし、電子銃下流の 238MHz プリバンチャー空洞中心を Z 座標原点とした。

XFEL の建屋は既存の SPring-8 の 1km ビームライン BL29XUL の 50m 北側に平行に設置された。この建屋の基礎構造と地盤の断面を図 1(b)に示す²⁾。右側の加速器棟エリアは谷を埋めた盛土部で、深度 20m 以上にある中硬岩層を支持層とする杭基礎構造とし、直径 1.6m 程度のコンクリート杭(長さ最大 52m、平均 35m、合計 136 本)を 7.5m 間隔で 2.5 本ずつ打設した。光源棟エリアで、中硬岩層が露頭する切土部では直接基礎で支持し、露頭していない部分は薄層転圧した高充填碎石に置換した改良土層に

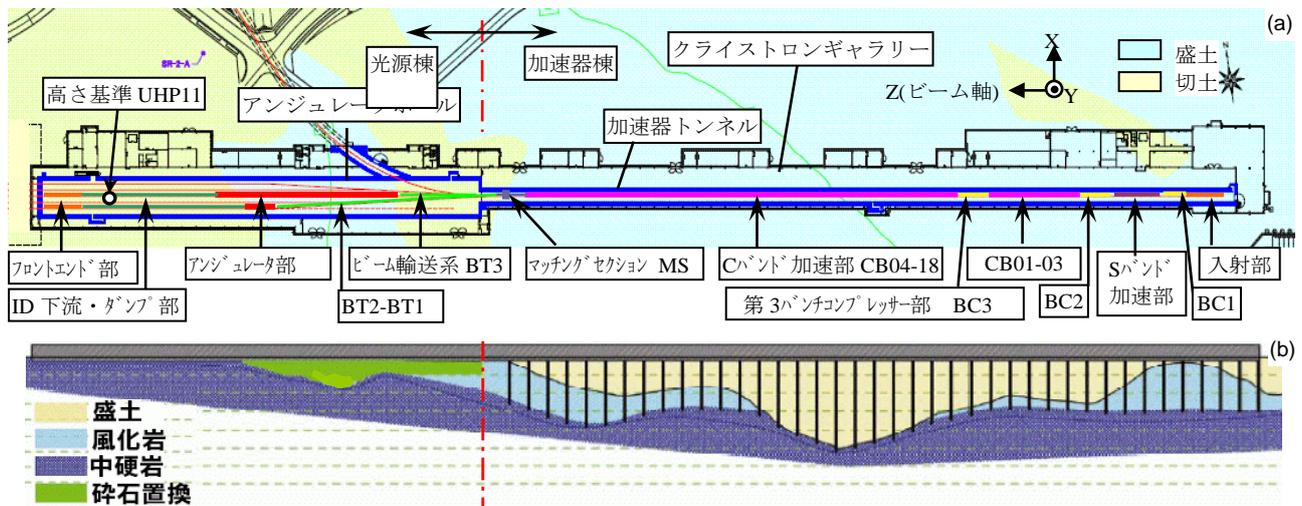


図 1 : XFEL 施設の概略図。(a):平面概略図。光源棟内の 5 本のビームラインの中で中央の BL3(XFEL)と一番下の BL1(SXFEL)の建設を行っている。(b):建屋基礎構造の断面概略図

¹⁾ E-Mail:kimura@spring8.or.jp

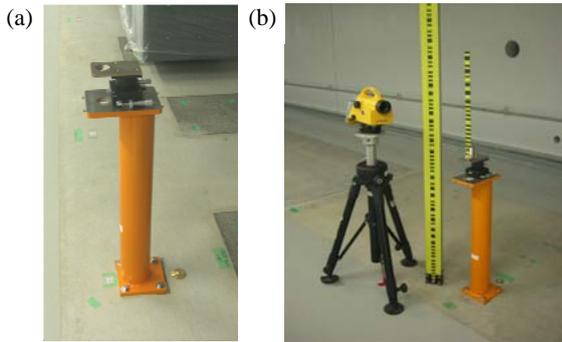


図 2: (a) 据付基準用モニュメント、(b)デジタルレベル DiNi0.3 と標尺(インバー製)

直接基礎にて支持させた。

このエリアは造成後 20 年を経過しているが、盛土部の収縮は現在も続いていることがわかっており^[3]、竣工後の 4 ヶ月の計測では Z=200m 付近の盛土最深部において 0.3mm/月の床沈下が観測された^[4]。

本発表では、この建屋での据付の基本方針とこの 1 年の床面沈下の状況について述べる。

2. 据付の基本方針

XFEL の据付について考える時に考慮に入れる点として、1: 据付開始からビーム試験までの期間は 18 ヶ月、2: 建屋の床変位は小さくなく特に加速器棟で予想される不等沈下は年に 2mm 程度、3: 全体測量を 3 日程度で容易に行える基準点数と測量手法、4: 必要な精度で必要な場所に据付、があげられた。

2.1 据付要求精度

個々の加速器コンポーネントのうち、据付精度が特に要求されるものは、電子ビーム位置モニター (BPM)、四極電磁石 (Q-Mag) で X 方向・Y 方向に ±0.1mm である。しかし XFEL の中で最初の 400m の線形加速器部分に関しては、全体として滑らかにつながっていればよい。一方、レーザー発振を実現するためには、110m のアンジュレータ部を 30 μm、隣り合った 2 台のアンジュレータに関して 5 μm の精度で電子ビーム軸と X 線を一致させる必要がある。しかし、機器の実際の据付精度としては、0.1mm が

限界であり、そこから先の超精密アライメントは、振分マグネット上流に設置されたアライメント用アンジュレータから出る X 線や、実際の電子ビームを使用して行うこととした。その為アンジュレータの架台は上下に、Q-Mag・BPM の架台は上下左右に遠隔調整できるようになっている。

2.2 据付基準

電子ビーム位置から X 方向に -700mm オフセットした据付基準線上に、高さ位置を調整した据付基準モニュメントを約 30m ごとに設置する。隣り合った 2 つのモニュメントを使用してレーザートラッカーの座標系を作成し、個々のコンポーネントのアライメントを行う^[5]。

多数のコンポーネントが載る石定盤に関しては、まず石定盤をモニュメント基準でアライメントを行い、コンポーネントは石定盤の基準面で座標系を作ってアライメントを行う。

モニュメントの数は、加速器トンネルが 14 カ所、アンジュレータホールが BL3 用 9 カ所、BL1 用 9 カ所である。

据付基準モニュメントを図 2(a)に示す。ターゲット台座上の 1.5 インチ径の球の中心が基準となる。XYZ ステージで位置を調整でき、床面に水平位置を写す事ができる。このような調節したモニュメントの常設は、測量精度向上と、任意の場所ですぐにアライメント作業が始められる利点がある。

モニュメントの位置の計測・調整はトータルステーション(ライカ TDA5005)によるネットワーク測量で行う^[6]。加速器棟内は殆ど直線に並んだモニュメントだけで行い、光源棟内はさらにレーザートラッカーを用い BL3 と BL1 のライン及び収納壁に設けた台座を使用し網を強化して行った。高さに関しては全てデジタルレベルを使用して計測・調整する。

2.3 据付基準レベル

線形加速器部の約 400m は据付時の簡便さを考え、電子ビームレベルはジオイド(Geoid)水平 (地球の丸みに沿った水平) とすることにした(図 3 参照)。据付基準モニュメントは約 30m 間隔なので、実際の据付は 30m ごとの多角形になり、モニュメントが

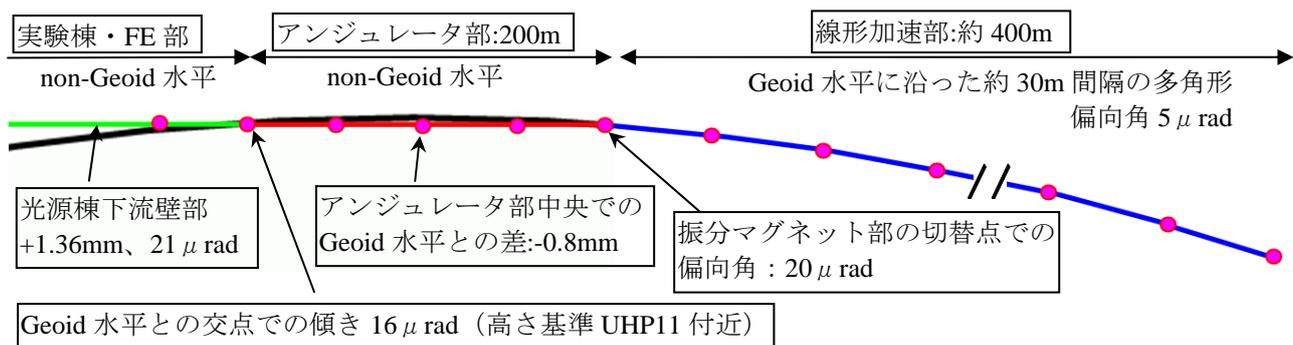


図 3: XFEL の据付基準レベルの概略図。赤丸や据付基準、黒線は Geoid 水平ラインを示す。

切り替わる時の偏向角は約 $5 \mu\text{rad}$ である。

加速器トンネル最下流部振分マグネットから下流のアンジュレータ部は、X線と電子ビーム軌道を一致させるために非ジオイド水平とし、アンジュレータ部の中央を水平とする直線とした。振分マグネット直上流でのキック角は $20 \mu\text{rad}$ であるが、それによるディスページョンの影響は無視できる。アンジュレータ部中央でのジオイド水平基準との差は -0.81mm で、非ジオイド水平ラインとジオイド水平ラインが交差する点での傾きは $16 \mu\text{rad}$ である。非ジオイド部の高さは、計算値を使用しデジタルレベルでジオイド水平からの差を計測して調節している。

2.4 沈下への対応

据付は床面の安定している部分から開始し、不等沈下の大きなエリアに関しては、沈下を予測してあらかじめ基準レベルを上げて据え付けを行う。最終的にはビーム試験直前の 2011 年 2 月に再アライメントを行う。

3. 床面沈下計測

据付基準モニュメントを使用した床面変位の測定は、水平方向(X 軸方向と Z 軸方向)^[6]と垂直方向(Y 軸方向)を行っているが、ここでは後者について述べる。

3.1 測量機器

測定に使用したオートレベルはニコン・トリンプル社製のデジタルレベル DiNi0.3 である(図 2(b)参照)。1km 往復標準偏差は 0.3mm (カタログ値)である。バーコード模様の標尺を使い、観測者が望遠鏡を視準し合焦すると後は機械がレベルを 0.01mm の分解能で読み取る。複数回測定の平均や分散も表示し、結果を PC に Bluetooth ですぐに転送しエクセルの表中に取り込めるので読み取りミスがなく、比高差等

の計算結果もすぐにわかる。

3.2 コンクリート床面レベル測量

高さの基準はアンジュレータホール下流の切土が露出した部分の基礎にある $Z=600\text{m}$ 付近のホールの床下 40cm のコンクリート底盤に設置した鋺(UHP11)とした。この鋺のレベルは、建屋の外に設置したレベル基準点を基準に計測しているが変化は 2009 年 3 月以降 0.1mm 程度であった。

デジタルレベルを使用しての測量は、加速器トンネルとアンジュレータホールの両方を 8 時間程度で行うことができる。モニュメントのステージ上の基準位置と、設置した床面の水準鋺のそれぞれに関して比高差を計測していき、両端で繋いだときの閉合差は、現在 0.15mm 以下である。

2008 年 7 月を基準とした収納部床面の沈下の様子と建屋の基礎構造を図 4 に示す。加速器棟全体の沈下の傾向は、盛土部層厚さの形状とよく似ていることがわかる。また光源棟の碎石置換部も中硬岩切土部との境目から加速器棟につられて沈下しているように見える。盛土厚さが最も深い 200m 付近では最近の 2 ヶ月間でも 0.3mm 程度の沈下が計測されている。

3.3 コンクリート杭天端測量

加速器棟床面の沈下と、嵩上げコンクリートとコンクリート底盤(合計厚さ 2.5m)の収縮を切り分けるために、コンクリート杭完成時に天端に鋺を打設しその高さの変化を測量している。杭の上部構造建設時にも鉄管を埋めてコンクリートをよけることで、竣工後の現在でも測量可能になっている。

図 5 は $Z=100\text{m}$ 付近と 200m 付近(盛土最深部)の杭天端の沈下量と経過日数である。途中でデータがない期間は収納部上部構造を建設時で支保工があり

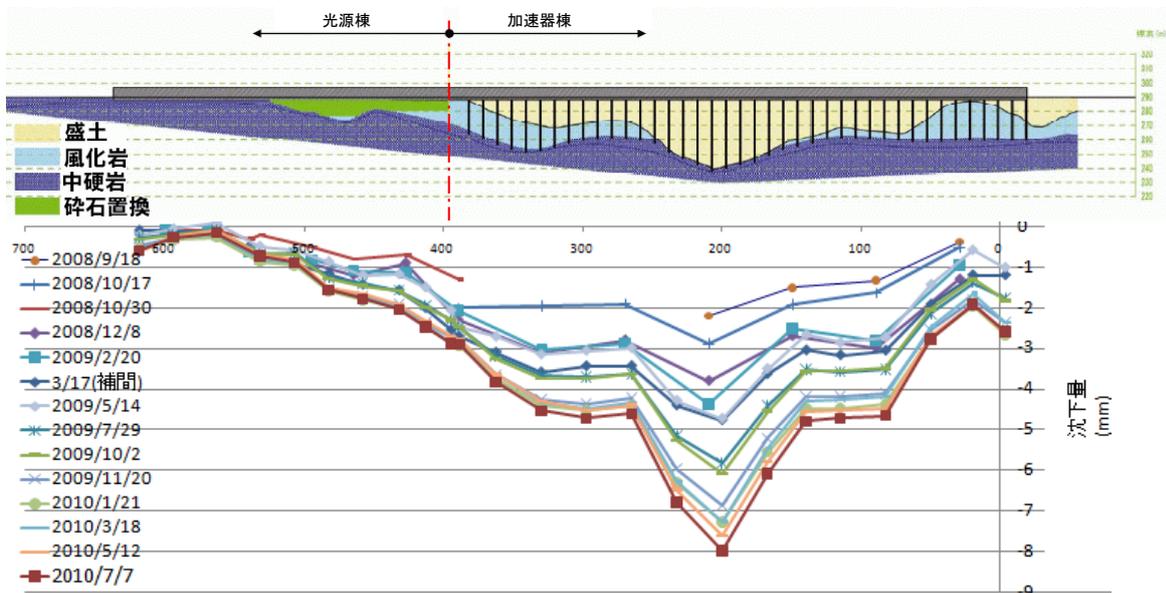


図 4：2008 年 7 月を基準とした収納部床面の沈下の履歴。

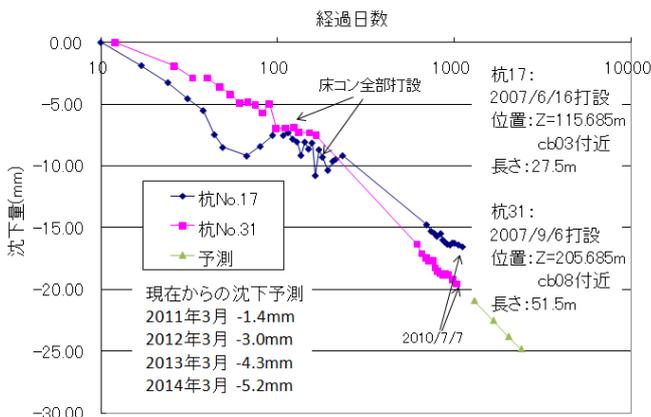


図 5：加速器棟建屋基礎部のコンクリート杭天端部の沈下

測定できなかった時期である。杭天端の沈下量と床面の沈下量はほぼ一致しているので、沈下の主因は杭部の収縮であることがわかる。

経過日数を対数にしてプロットすると、ここ1年の沈下は概ね直線になっており、今後もしばらくはこのまま沈下が続くと思われる。盛土部の沈下によるコンクリート杭側面からの圧縮力と、杭の弾性応

力が同じ程度になれば、沈下は収まると考えているがその時期に関しては予想できていない。

4. 床面沈下の現状

据付基準はその区間の据付直前まで調整を行ない、据付終了後は調整を行っていない。2009年8月からCバンド加速部の据付・アライメントを開始するにあたり、それまでの沈下計測結果から変位の少ないCB13から下流方向に並べ始めた。

図6に2010年2月以降の据付基準モニユメントの変位を示す。この据付高さ基準は、全体の高さ基準であるUHP11に一番近いBL3_id26を電子ビーム高さ基準とし、非ジオイド部は補正值を考慮した理想値とのずれをプロットしている。CB05-CB09の3つのモニユメントは、大きな沈下を予測してあらかじめ据付基準を1~2mm上げた地点である。現状、全体で約1.2mmの幅の中に収まっている。

線型加速部に関しては、このモニユメントのデータを元にすべての加速管と石定盤の変位の測定を行っている^[5]。

据付精度が厳しいアンジュレータ部には水管傾斜計(HLS: Hydrostatic Leveling System)が設置されてお

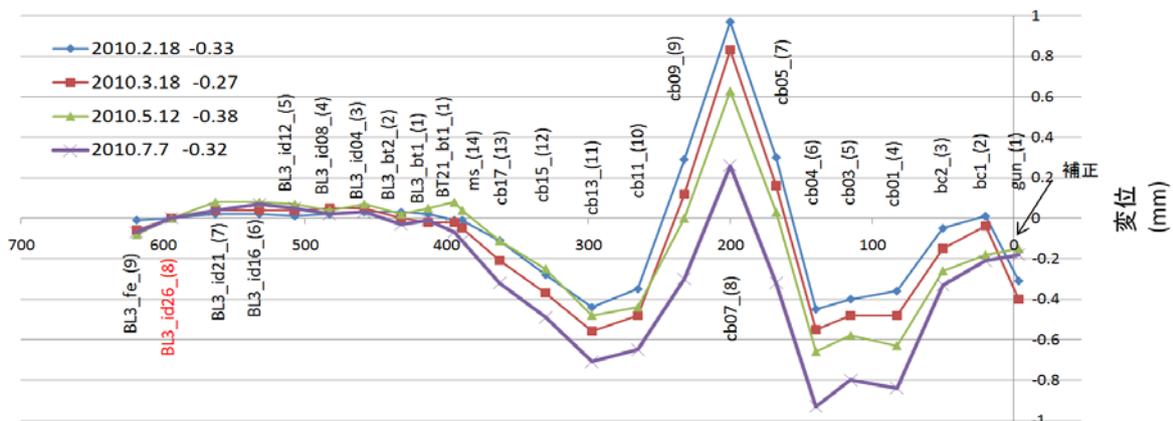


図 6：2010年2月以降の据付基準モニユメントの変位(理想値からのずれ)。光源棟下流BL3_id26_(8)が基準。凡例の日付の後の値はUHP11基準との差。

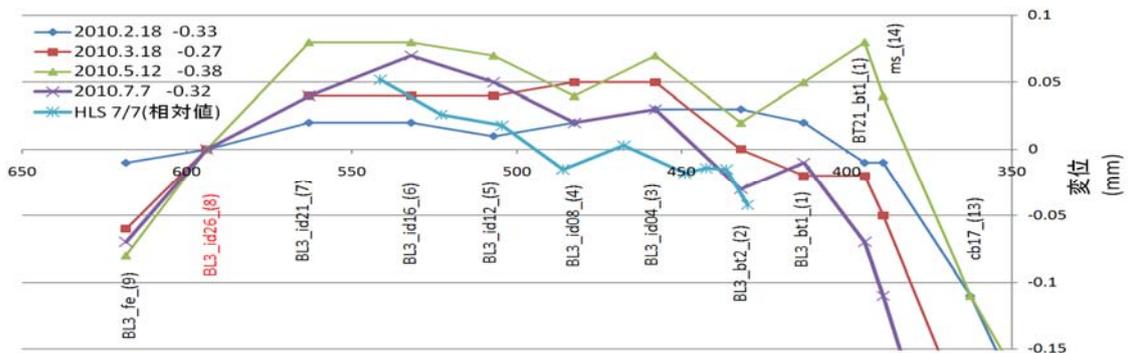


図 7：2010年2月以降の光源棟部の据付基準モニユメントの変位。図6の下流部の拡大図。HLSは水管傾斜計によるデータ(相対値)

り、リアルタイムで床変位を $0.1\mu\text{m}$ 分解能で観測することができる。図 6 の光源棟部を拡大したものに HLS のデータを加えたものを図 7 に示す。まず、据付基準モニユメントを非ジオイド水平に調整しアンジュレータ部の据付を開始した 2 月から 5 ヶ月間での変位は $\pm 0.1\text{mm}$ 内であり、加速器棟と比べて安定な床面である事がわかる。次に 7 月 7 日のデジタルレベルのデータと HLS のデータの形がほとんど一致している事から、デジタルレベルのデータは 0.1mm 以下の領域でも十分有効であり相対値で 0.01mm の分解能が出ている事、モニユメント間隔より細かく測定すれば更に細かい構造がある事がわかった。

6. おわりに

2010 年 7 月末現在、加速器棟部の 90%、光源棟の 70%の据付が終了している。2011 年 2 月からのビームコミッショニング前に、最終アライメントを行う予定である。線型加速部に関しては大きなキック部の修正を、アンジュレータ部に関しては、当初の目標である 0.1mm 以内に修正する予定である。

- [1] T. Shintake, et al., “X線自由電子レーザー計画の進展”, in this proceeding.
- [2] H. Kimura, et al., “X線自由電子レーザー施設の設計と建設”, 本学会2008年報告集, p580.
- [3] H. Kimura, et al., “SPring-8の1kmビームラインBL29XULでの地盤変位”, 本学会2007年報告集, p859.
- [4] H. Kimura, et al., “XFEL建屋の変位計測”, 本学会2009年報告集, p204.
- [5] M. Yamashita, et al. “XFEL加速管・Q電磁石BPM用架台のアライメント”, in this proceeding.
- [6] Y. Maeda, et al., “XFEL据付基準モニユメントの測量方法と結果”, in this proceeding.