

SACLA 加速器の床変形と環境因子の相関

CORRELATION BETWEEN FLOOR DEFORMATION AND ENVIRONMENTAL FACTORS IN SACLA ACCELERATOR BUILDING

松井佐久夫
Sakuo Matsui
RIKEN

Abstract

The floor of SACLA accelerator and undulator building were monitored by many HLS(Hydrostatic Leveling System), WPS(Wire Positioning System), electrolytic tilt sensor, crack sensor, extension sensor, and Pt100 sensor. The floor level does not affected by the atmospheric pressure in the area where undulators are located. However in the upper-stream the floor level sinks, which maximum rate $0.3 \mu\text{ m/hPa}$. The linearity in the north-south horizontal direction shifts seasonally $50 \mu\text{ m}$ between 110 m length. There is also $20 \mu\text{ m/year}$ drift. The elevation change is large at the boundary area between accelerator tunnel and undulator hall. The amplitude is 0.7mm in a year. The extension is also large at this area. The largest coefficient of level vs atmospheric pressure is $1.5 \mu\text{ m/hPa}$ in the accelerator area where the filled depth is largest. These sinking rate is similar to the elasticity coefficient and useful for the estimation and comparison of the improved ground.

1. はじめに

蓄積リングの経験から SACLA では建物建設時に床下 1 m や壁の中に 4 線式 Pt 温度センサーを計 63 本埋め込んだ。建設後には室温用に収納部内外に数十本設置した。温度の測定には 4 線式の Pt100 を用いた。室温用には棒状のもの、表面温度用にはカプトンフィルムで保護され貼れるもの、コンクリート埋込用は保護管のしっかりしたものを使用した。測定器にスキャナー付マルチメーターを用いることが多いため工業用によく用いられる 3 線式は使えず 4 線式を用いている。

建設終了後加速器棟や光源棟の床にはレベルの測定に HLS (Hydrostatic Leveling System) 計 34 個、水平方向の変位に WPS(Wire Positioning System)、傾斜変化に電解液式のセンサー 47 箇所、また、変動が大きいたことが判明した境界部には亀裂変位計、スーパーインバールワイヤを用いた伸縮計を設置した。

建設から 4 年、床変形のモニターから季節的な変動も見えてきた。今後の安定化にむけ床の変形と環境因子である気温や空調による温度、降雨、気圧、沈下などとの相関を考察する。これらは、多額の費用を要する地盤改良など含む建設工事の評価にもつながると考える。

2. 傾斜センサー

2.1 傾斜センサー

加速器のアライメントで傾斜測定には泡式やデジタル式の水準器が通常用いられる。しかし、Leica 社の Nivel、TaylorHobson 社の Talyvel、Wyler 社の製品でも分解能は $1 \mu\text{ rad}$ 程度である。しかし、床

や架台の傾斜変化は数 $\mu\text{ rad}$ 以下の場合も多くさらに分解能の小さな傾斜センサーが必要である。地球物理では例えば Hi-net 高感度地震観測網に使われている地下に埋め込むボアホール型があるが、高さは 20 センチ程度ある。spectron 社のセンサーとアンプは小型で比較的安価である。泡水準器の水の代わりに電解液を入れ泡の位置により中央と両側の電極の抵抗値が変わることを使っている。このセンサーを用いた傾斜計も他社から販売されているが、ここではセンサー (RG-33A $1.6 \times 1.6 \times 5\text{ cm}$ レンジ $\pm 0.25^\circ$) とアンプ (MUPI-3 1.45 mrad/V 出力) を購入し温度係数を測定した。我々の場合は数度の変化の環境下でも測定しなければならないからである。

2.2 温度係数測定

オプティカルフラットの上に 2 個センサーをならべ、プログラム式の恒温槽に入れ温度サイクル $26^\circ\text{C} \rightarrow 31^\circ\text{C} \rightarrow 36^\circ\text{C} \rightarrow 31^\circ\text{C} \rightarrow 26^\circ\text{C} \rightarrow 21^\circ\text{C} \rightarrow 16^\circ\text{C} \rightarrow 21^\circ\text{C} \rightarrow 26^\circ\text{C}$ の後扉を開けて一つだけセンサーを 180 度回転する (Fig.1)。さらに同様の温度サイクルを行なっ



Figure 1: Tilt sensors in the regulated temperature box.

matsui@spring8.or.jp

た。反転し戻してもセンサー長が 5cm と小さく $1 \mu \text{rad}$ 以下の再現性は得られなかったためこの方法を使った。各所につけた Pt 温度センサーとアンプからスキャナー付のマルチメーター（ケースレー2701 6.5 桁）に接続し毎分測定、PC に取り込んだ。

2.3 結果

温度サイクルを数回繰り返したが反転しないセンサーのデータから、傾斜はほとんど同じパターンで変化していた。結果は Fig.2.のように $1.3 \mu \text{rad}/^\circ\text{C}$ で 2 個めも仕様の $1.5 \mu \text{rad}/^\circ\text{C}$ と同程度であった。

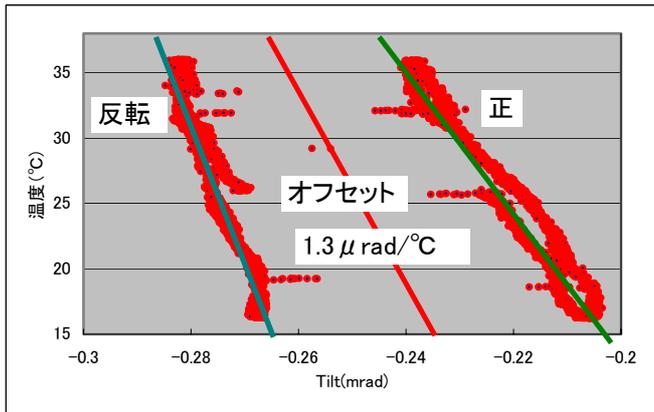


Figure 2: Normal and reverse direction tilts during heat cycle.

2.4 アンプの温度係数

アンプの温度係数は、4 個のアンプのうち 2 個だけを恒温槽に入れオプティカルフラット上のセンサーは外に出し同様の温度サイクルで測定した。結果は $\sim 1 \mu \text{rad}/^\circ\text{C}$ とセンサーと同程度であった。

光源棟収納部は年間で $2 - 3^\circ\text{C}$ の変化なので温度を測定しておけばエラーを見積もることができる。

2.5 測定例 潮汐による傾斜

光源棟収納部内で床に固定したセンサーの傾斜と SPring8 サイト内の 160 m 地下に埋めている傾斜計を比較した。Fig.3 のように潮汐による傾斜変化を捉えている。潮汐による振幅は $0.1 \mu \text{rad}$ 程度なのでこのセンサーとアンプの組み合わせで実質的な分解能 10nrad 程度は確保されている。

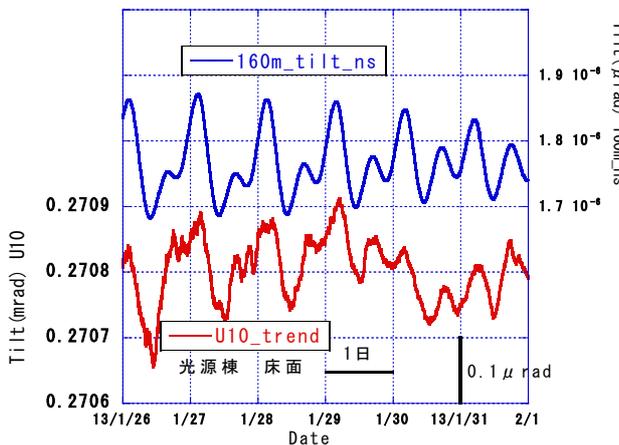


Figure 3: Sensor measured the tilt change of earth tide.

3. 光源棟

3.1 地盤改良

Fig.4 上段に HLS、WPS、傾斜センサーの位置を示す。下段に断面図を示す。U1 付近が境界部で U6 から挿入光源が設置されている。

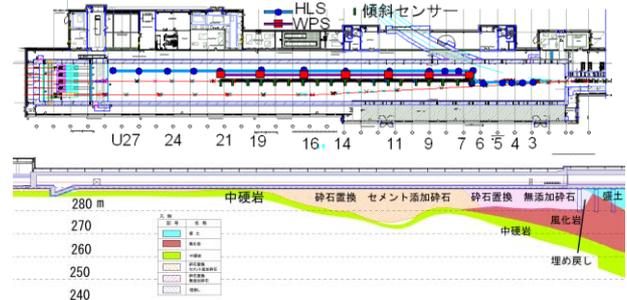


Figure 4: Plain and cross sectional view of undulator hall.

3.2 床レベルと気圧

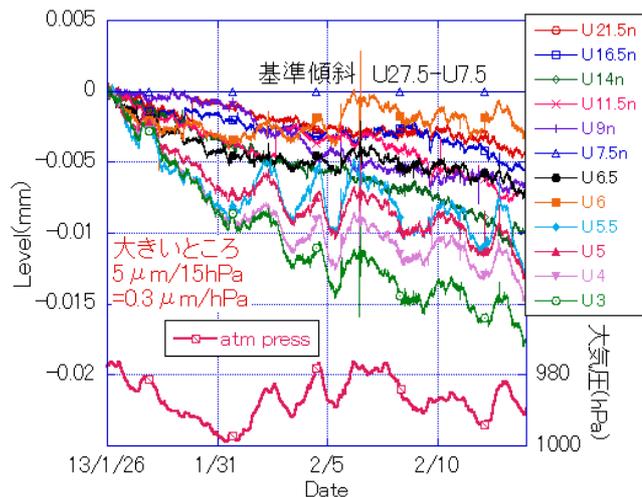


Figure 5: HLS levels and atmospheric pressure.

あまりレベルが変化していないと考えられる U27.5HLS と U7.5HLS を基準にした直線からの各 HLS のずれを Fig.5 に示した。U3~U6 では気圧（軸反転）依存が見られるが、挿入光源の設置領域 (U6.5-U21) では影響が見られない。Fig.4 の地盤による差と考えられる。

3.3 電子ビームとの相関

光源棟ではレーザー発振のため電子ビームを直線にガイドする必要があるが、そのため挿入光源ごと 6.15 m 間隔で上下左右に調整できる架台上に Q 電磁石が設置してある。この架台は 1-2 ヶ月に一度、放射光を見ながら直線上に調整される。Fig.6 上段は 2012/11/12 の位置を基準にその前後のレベル調整をプロットしたものである。

下段は HLS の結果から同様に 2 週間ごとにずらして床レベルを描いたものである。横位置、縦軸の大きさは合わせてあり、比較的似たパターンで推移していることがわかる。

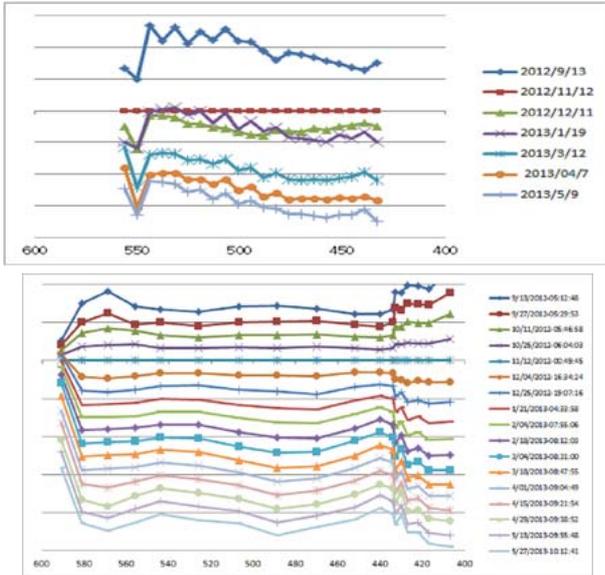


Figure 6: Level adjustment of Q-stages and the floor level. One division is $100 \mu\text{m}$.

3.4 水平面南北方向の変化

光源棟には挿入光源の北 3 m の床に 110 m 直径 0.5mm 程度のケブラーのより線が張り、18.5 m ごとにセンサーで南北方向の床の変位を測定している。Fig.7 に上流からずらせプロットした 3 年間の結果を示す。U6.5n と U21.5n はワイヤの固定点なので変化はない。上流の方では季節変化と南へのドリフトが見られるが実際には上流側固定点付近の北へのドリフトかもしれない。季節変化とドリフトの向きが同じだと場所により $8 \mu\text{m}/\text{月}$ 程度で直線性が変化している。

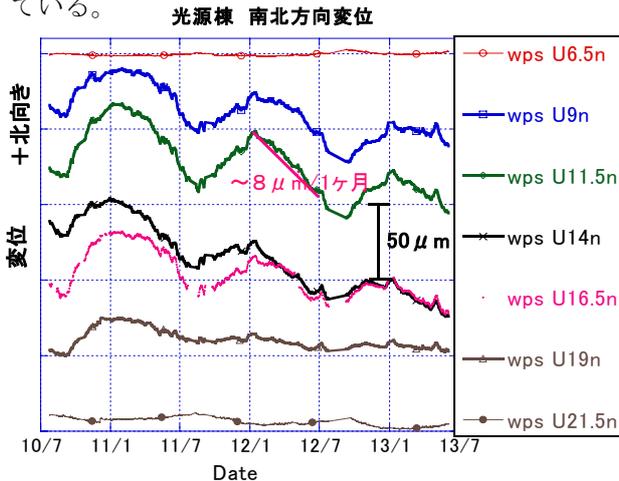


Figure 7: Wire sensors in the undulator hall

3.5 傾斜と降雨

傾斜センサーを各 Q 架台下の研削面上に 20 個接着剤で固定した。Fig.8 は U7.5 付近の傾斜センサーの値と気圧、降雨のグラフである。気圧ではなく降雨に強く影響を受けているように見える。

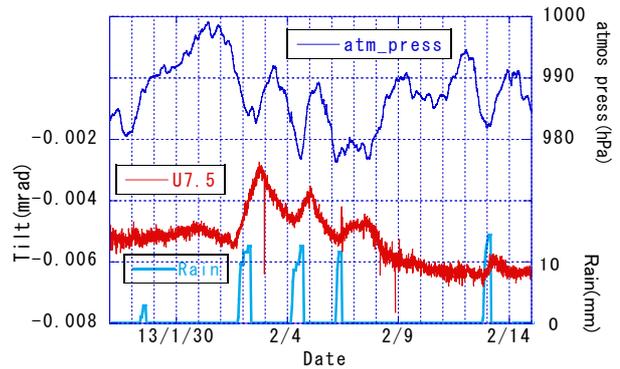


Figure 8: Tilt is compared with pressure and rain.

7 個のセンサーと収納部内の温度、降雨の 4 ヶ月の変化を Fig.9 に示す。雨量が大きくても傾斜変化は $5 \mu\text{rad}$ 程度でとどまっている。水位はあるところまで上がるが流れ出すのでそれ以上上がらない、と推測される。急な温度変動とほぼ同時期の傾斜の変化は温度係数から見積もれるよりやや大きいように見える。また 6 m 離れた床で降雨により逆方向に傾斜する場所も見られる。さらに、20 個の中には不自然な変化も見られ、センサーの長さが 5cm でコンクリートの研削面に直接固定しているため狭い範囲のみの傾斜を測定しているためとも考えられる。

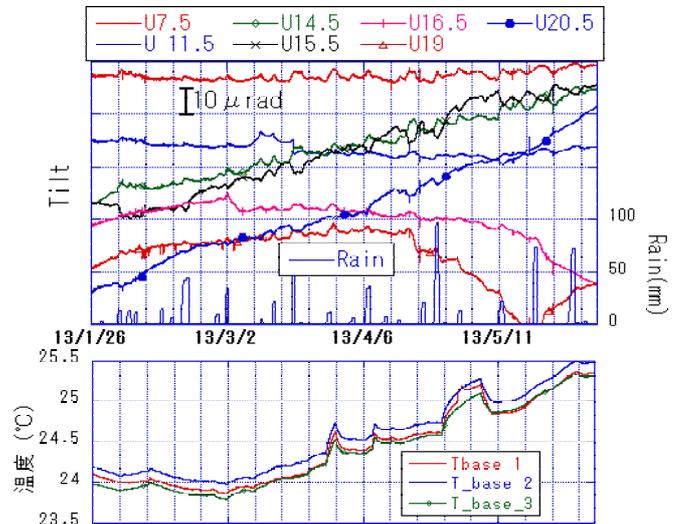


Figure 9: Tilts, rain and temperature.

4. 光源棟—加速器棟 境界部

4.1 センサーの位置

加速器棟と光源棟の構造から接続部に大きなストレスがかかる。ここには亀裂変位計、HLS、傾斜計、WPS、伸縮計を設置している。(Fig.10)

4.2 伸縮

2 箇所の亀裂変位計によると夏には狭くなり冬には拡がり年間 $100 \mu\text{m}$ 程度 (Fig.11)、11m のスーパーインバール線を用いた伸縮計では年間 0.6-0.7mm 程度の伸縮 (Fig.12) を繰り返している。

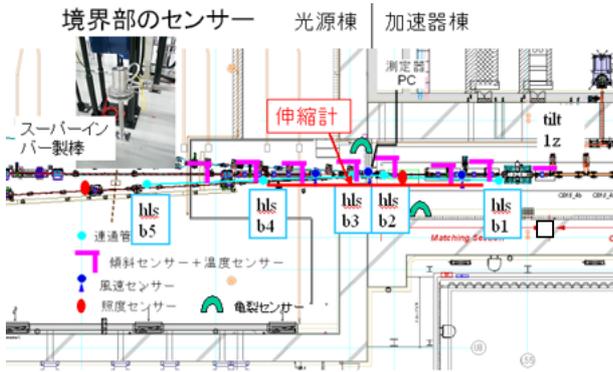


Figure 10: Sensors in the boundary area.

変曲の時期が2月下旬なので深い所より表面に近い所の伸縮が影響していると考えられる。

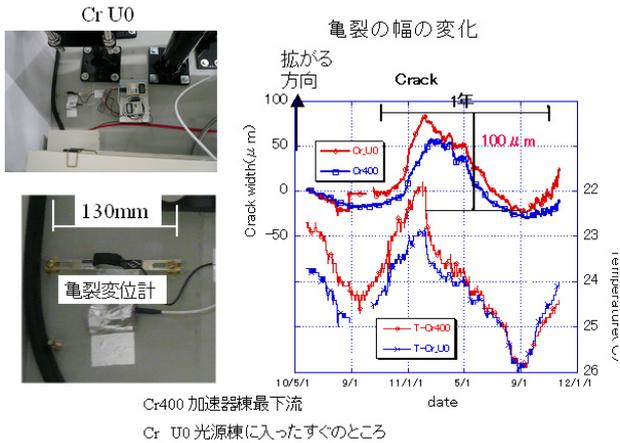


Figure 11: Displacement measured by crack sensors.

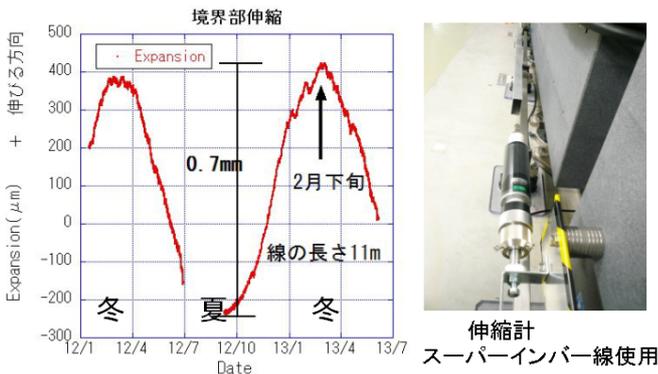


Figure 12: Extension by creep meter.

4.3 沈下

Fig.13 に一番上流側の HLS を基準にした他の4つの床レベルと付近の温度を示す。hls_b3 が最も大きく年間 0.6-0.7 mm沈下し両側では 0.1-0.2 mmと小さい。傾斜計の結果も HLS とよく一致していた。

4.4 伸縮と沈下

伸縮も沈下も2月下旬が変曲時期になっている。冬なら光源棟、加速器棟それぞれ表面に近いと

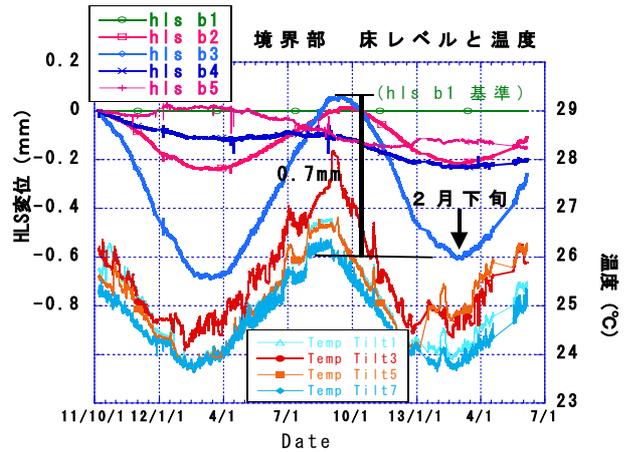


Figure 13: Floor levels at the boundary area.

ころの温度で縮む、そのため境界部は引き離され亀裂は広がり、床は沈下する。暖くなれば逆になる。境界部は段差の発生を抑えるため鉄筋はつながっている。しかし加速器棟と光源棟は建設会社も異なりまた接続までの期間もあった。

蓄積リングでも工期の境界4箇所でも同様のレベルの季節変動が観測されている。また最近はややゆるやかになりつつあるが16年の間に少しずつ沈下している。1 m程度の鉄筋を出しておく通常の接続ではなく強度のある方法の検討が必要である。

5. 加速器棟

5.1 気圧と沈下

盛土の最も深いところはスピードはやや鈍っているが年間 0.8mm 沈下している。気圧ではあまり沈下していないと考えられる L5 と L56 を基準にした線からの L31 と L33 の HLS の結果と気圧を Fig.14 に示す。よく一致していることがわかる。

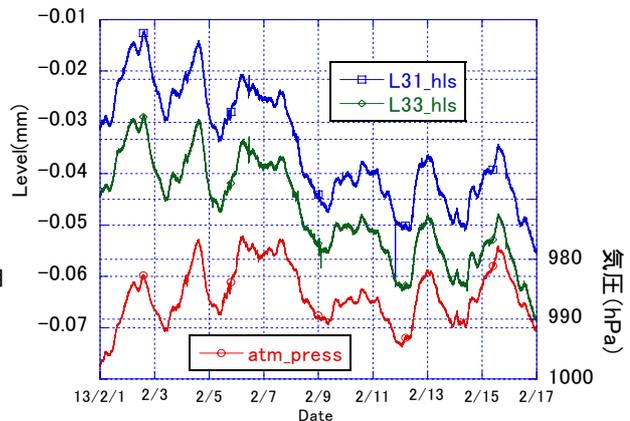


Figure 14: HLS sensors where filled depth is largest.

5.2 WPS の設置

収納部内の側溝の HLS のパイプの向かいに WPS を設置した。側溝の深さと垂れ量の制限から 1 本 120 m で 60 m ずつ水平には 5mm 離れて 2 本通し、

計 5 本設置した。20kg 重で張ると垂れは約 30mm であった。これまでセオドライトで測量してきた結果の図にワイヤの位置を重ねたものを Fig.15 に示す。この図から L23 付近は大きく変化すると予測される。

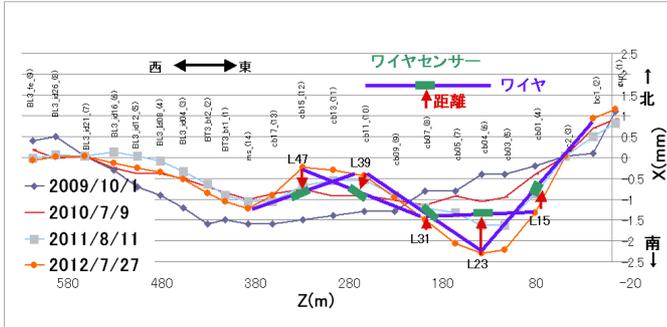


Figure 15: Wire sensors position.

5.3 南北方向の変位

結果を Fig.16 に示す。L7 と L55 はワイヤの固定点で変位はない。L23_wps(右軸)だけは動きが大きい。4/13 の地震では 0.3mm ジャンプした。また、気圧が高くなると北に 3 $\mu\text{m}/\text{hPa}$ 程度変位する。Fig.17 に 2 日間の変化を示すように収納部内部の測定であるが、外気温の変化から 3-4 時間ほど遅れ L47 と L15 では向きが逆で 1 $\mu\text{m}/\text{C}$ ほど変位している。ほぼ両端固定で温度が上がると膨張するが、この伸びを凹凸により吸収していると考えられる。

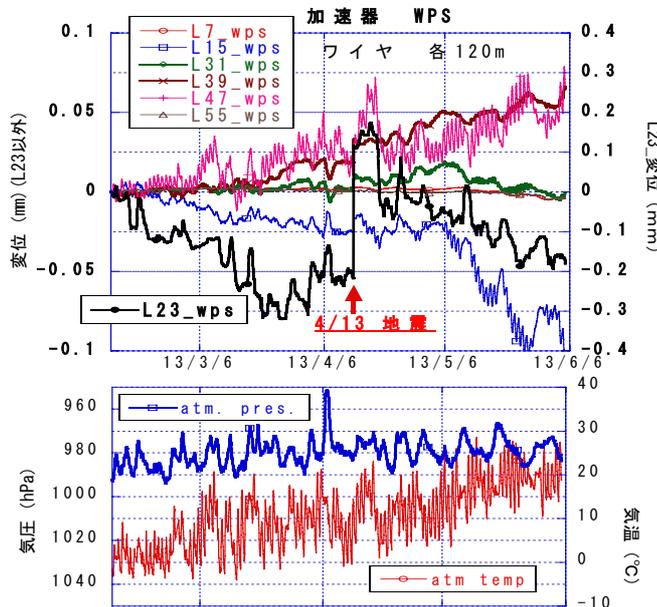


Figure 16: Linearity shift in the accelerator tunnel.

6. 床レベルの弾性定数

気圧により床レベルが変化するので係数を見積もるため Fig.18 (左: 光源棟, 右: 加速器棟) を示す。長期的には変化も考えられるが現状では光源棟上流部で 0.3 $\mu\text{m}/\text{hPa}$ 、その下流 ID 設置領域ではもっと小さく、加速器棟 L31、L38 では 1.5 $\mu\text{m}/\text{hPa}$ であった。いずれも沈下の速いところで係数も大きい。

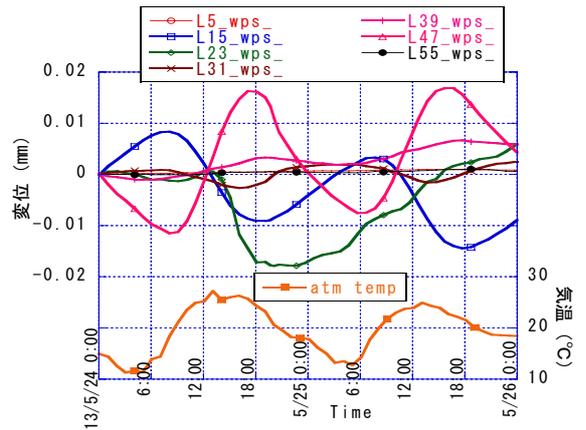


Figure 17: The linearity changes due to atmospheric temperature.

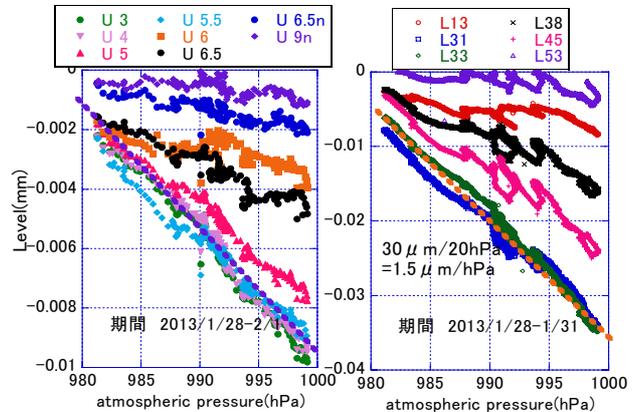


Figure 18: Level is plotted against atmospheric pressure. Left :Undulator hall Right :accelerator building

7. まとめ

700 m の加速器全体にわたり床のレベルと横方向の動きをかなりモニターできるようになった。安定度が上がれば、床と相関が見えてくる可能性がある。

構造的、時間的な不連続の所は伸縮、沈下の季節変動がおきやすく、より強固な構造が必要である

台風の時とか床が変形し加速器の周長が変化したりする。気圧による変形を定量的に把握することで、長期の沈下とは別に、やや広い領域での弾性定数として考えることができ、地盤や建物の評価、比較の指標になると期待できる。

横方向の変位は力のかかり方がわかりにくいですが種々の原因でおきている。

参考文献

- [1] H. Kimura, et al., “X線自由電子レーザー施設の設計と建設”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator of Japan, Higashihiroshima, Aug. 6-8, 2008.
- [2] S. Matsui, et al., “XFEL床の横方向変位とアライメントに用いたワイヤによる測定方法”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.