

ワイヤセンサーと連通管を用いた 4m の直線基準とそのステージ

LINEAR REFERENCE STAGE OF 4m USING WIRE SENSORS AND HLS

松井佐久夫^{#,A)}, 安積則義^{B)}, 木内淳^{C)}, 甲斐 智也^{C)}
Sakuo Matsui^{#,A)}, Noriyoshi Azumi^{B)}, Jun Kiuchi^{C)}, Tomoya Kai^{C)}
A) RIKEN, B) JASRI, C) SPring-8 Service Co.,Ltd.

Abstract

The wire technique becomes important for the alignment of SPring-8 II plan. The linearity of the wire must be checked at any point. Thus the movable stage on the rail is useful. We have no coordinate measuring machine. Therefore the absolute linear reference is hard to realize. HLS sensors are thought to be reliable in the vertical direction. The CuBe 3.6m-wire sag is calculated and measured by wire sensor and hls system. These values were agreed within $5\mu\text{m}$. The movable stage levels were also measured by CuBe wire, wire sensors and HLS's. These results were agreed within $\pm 5\mu\text{m}$ through 4m. There are some methods to measure the nonlinearity, for example, alignment telescope, theodolite, level, laser tracker, auto collimator, interferometer, tilt sensor, laser and CCD camera system, and wire system, etc. The horizontal nonlinearity becomes more reliable by measuring with more methods. We will do these check using the 4m movable stage. Kevlar wire has some nonlinearities which size is a few tenth micron.

1. はじめに

加速器の測量は以前はインバールワイヤが使用されていたがその後、レーザートラッカーが登場し、通常の大さの加速器なら網平均計算で必要な精度が得られるようになった。

一方、機器のアライメントの技術で特に直線に並べる場合は昔からのアライメント望遠鏡やセオドライトなどの光学機器が使用されてきたが、要求精度が上がりレーザー光を用いるシステムが開発されてきた。現 SPring-8 の蓄積リングの直線架台上の 4、6 極電磁石のアライメント用レーザー+CCD カメラシステムもその例である。その後、レーザートラッカーの精度も少し向上したが、レーザー光に直角な方向はロータリーエンコーダーを用いるため距離とともに精度が下がるのは避けられない。

また、レーザー光は数m程度の短い距離であれば直線の基準として便利であるが、長距離では 1) 距離の 2 乗に比例して大きくなる温度勾配による屈折、2) 平行光では距離の平方根に比例して直径が大きくなり検出器の手当てが難しくなる、3) 光に影響なく測定箇所後ろに通すのが難しい、4) 揺らぐ、など難しい面も多い。真空内であれば 1)、4) は避けられるがアライメントの作業との両立は難しい。

一方ワイヤではこれらの欠点は無く、1) 重力で垂れること、2) 扱いにより nonlinearity が発生しやすい欠点はあるが以前からアライメントに用いられてきた。SACLA のシケイン部の BPM の水平方向の位置精度が厳しいので 1 次元ワイヤセンサー(wps)を用いて測定したのもその例である [1]。

もちろん水平方向の相対的な変位モニターとしても有利なので SACLA では 700m にわたり床に設置している。しかし、アライメントに用いる場合は直線が重要なのでその確認が必要になる。SACLA 光源

棟 200m の内部、約 20~30m 間隔のモニュメント 6 点上に 130m ケブラー線を張り測定した結果、レーザートラッカーによる網平均測量と比較し $50\mu\text{m}$ 以内で一致した。より短い 40m に 2 本のケブラー線をほぼ平行に張り、相互の距離を 2 個の wps で 10 箇所測定した。またこの中の区間 23mm を 0.5mm ピッチで、 $500\mu\text{m}$ を $10\mu\text{m}$ ピッチで測定したが特に構造らしきものは見当たらなかった [1]。しかし連続測定ではないので場所によるうねりがあってもこの方法では見つけることは難しい。

ケブラー線を静電容量式の wps で測定した場合の直線性からのずれについて測定された文献は筆者の知る限り見当たらない。ただ、ケブラー線を外側から 2 枚のシートで交互に対照的な形で包んでいるのでキャンセルされるのを含め中心からのずれを評価した報告がある [2]。極細の繊維を束ねるため、ねじるとか外側から別の繊維で包み形状を保っているため、この報告では不安の指摘にとどまっているが、今回移動ステージでズレを連続測定する。

さらに SPring-8 の次期計画の架台内アライメントの方法として金属ワイヤに交流電流を流し磁場中心をそろえる R & D がなされてきている [3]。この場合、4m で $10\mu\text{m}$ 以下の金属ワイヤの直線性の検証が必要になり、連続的な測定が欠かせない。また、ワイヤの垂れ分は磁場測定の後、磁石を上げなければならない。ワイヤの密度、張力、温度などの条件と垂れ量の関係を見積もるため移動ステージ上に連通管を載せ連続測定することにした。

さらに、アライメント後は磁極外でのチェックは欠かせない。この方法として、レーザー+Iris、ワイヤ、レーザートラッカーなど考えられているが、いずれにしる 4m で $10\mu\text{m}$ 以下の検証が必要になる。大型の 3 次元測定器を所有していない SPring-8 サイトでは 4m の移動ステージを基準、校正機器とし必

matsui@spring8.or.jp

要な時に簡便に使用できることを目標に整備を進めている。

2. 架台の調整

SPring-8 建設時、偏向電磁石の磁場測定用 4m のステージがあり（神津精機（株）製 RKO-2）、レーザー+CCD カメラシステムの直線性も測定した。今回、非直線性を±10 μ m 程度まで調整した。

2.1 脚部調整

直径 41cm、長さ 4m のパイプに固定された 2 本のレール上を 60cm×36cm のステージ（ベアリング間隔 50cm）が移動する。床には固定せず 10 箇所単に載せるだけの構造である。水準器をステージに載せピッチングとローリングを見ながら 10 箇所のボルトで上下の調整を行った。

2.2 ベアリング交換

20 年以上使用していなかったため移動ステージのベアリングを全数新品に交換した。移動ステージの荷重を支える直径 47mm のもの 16 個はすべて、回しても違和感はなかったが、レールを横から挟む直径 35mm のもの 8 個中の 3 個は“ゴリゴリ”とスムーズさがなくなっていた。オートコリメーターを使用しながらメーカーの方にベアリングを調整していただいた。

2.3 ベアリングの位置調整

さらに、これまでステージが安定になるように上には鉛ブロック 2 個 23kg 載せたり、ミラーの重い台が載った状態で調整されていたが、その後機器を載せるために外した。するとレールの端部でステージの片側が浮き上がったり、また往復でピッチングが異なる値をとったりした。レールの間隔を測定すると狭いところに比べ端部では約 0.1mm 広がっていた。レールの調整は簡単ではないので外側から挟んでいるベアリングの間隔を広くした。その結果ピッチングのヒステリシスもベルトのすべりもなくなり、長手方向の位置の再現性も改善された。

2.4 オートコリメーターによる調整

レールの調整などにはしばしばオートコリメーターが使用されるが、鏡を使用しているためヨーイングは測定できてもローリングによる横変位は測定できない。ローリングは水準器を用いて測定した。

パイプのねじれはローリングに反映されるが単に載せるだけの構造なので調整には限界があった。

2.5 レーザー干渉計による測定

レーザー光を角度をつけて 2 分割し扇型のミラーで反射して戻ってくる光を干渉させその距離の変化からミラーの横変位に換算する方法である。実際に使用すると水平方向の場合ヨーイングに起因する距離の変化も加わって見えるためその分をオートコリメーターによるデータを用いて差し引かねばならず、ヨーイングが変化するような場合は簡単ではない。

Figure 1、2 の例では 4m 付近でレーザー光は±50mm

に広がっており、ヨーイングで 0.005mrad (～1 秒) 回転すると横に 22 μ m もずれたように見える (50×0.005×44.4(ミラーの回転角による係数)×2=22.2)。Figure 2 の右図黄色はヨーイング分を差し引いた横方向の変位であるが大きい数値同士の引き算なので精度は良くない。上下方向の場合はピッチング分を差し引く必要がある。



Figure 1: Transverse measurement using laser interferometer.

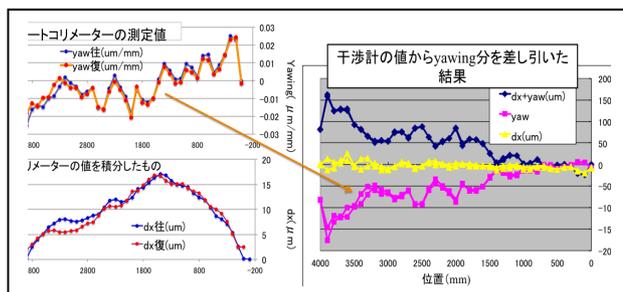


Figure 2: Separated nonlinearity displacement from yawing effect.

2.6 オートコリメーター専用機以外による測定

今回使用したオートコリメーターは自動で角度を表示できるが、他にセオドライトやレーザートラッカー(ライカ AT402)でも同様の機能を持つ機種があり、AT402 では専用機に近い精度が得られている [4]。ここでは TM5100A と専用機 ELCOMAT3000 (メーラーウェーデルオプティカル社) を比較した。

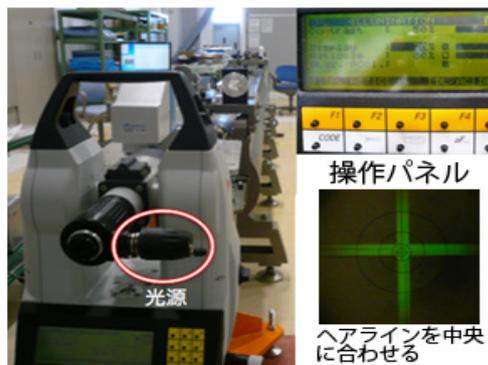


Figure 3: Auto-collimator using Leica TM5100A.

測定方法は、まずステージの初期位置でヘアラインが緑の光の中央にくるようにセオドライトを調整し水平角を 0 にセットする。鉛直角はその時の値を使う。そこからステージを移動、再びセオドライトをわずかに回転、ヘアラインを緑の帯の中央に持ってきた時の水平、鉛直角を読む。この像の焦点距離

は反射したセオドライトの位置ではなく、無限遠に合わせたもので鏡の位置が移動しても像はぼけないことで確認できる。Figure 4 に両者でのヨーングとピッチングの測定値を示す。目視でもそれなりに測定できていることがわかる。

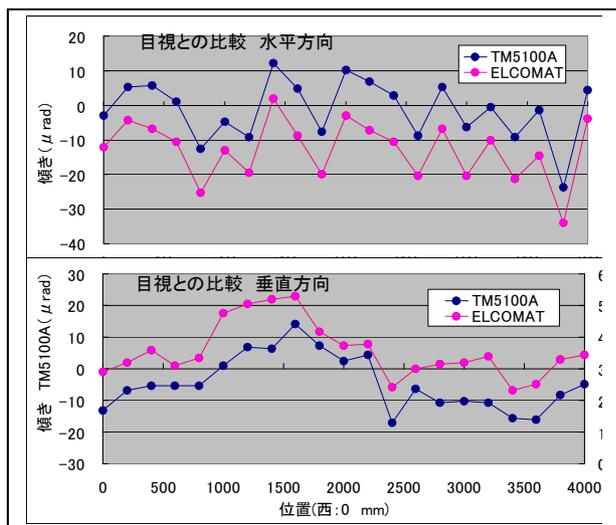


Figure 4: Measurements comparison between TM5100A and ELCOMAT3000.

3. ワイヤセンサー (wps)

3.1 1、2次元 wps (Fogale 製)

レンジは2次元の場合 10mm×10mm、大きさは 45×45×70mm、1次元のレンジは 2.5mm と狭い。

3.2 換算係数

静電容量で測定するためワイヤの太さにより電圧と距離の係数は異なってくる。この2次元の wps はアンプが外付けなため一体で校正する。

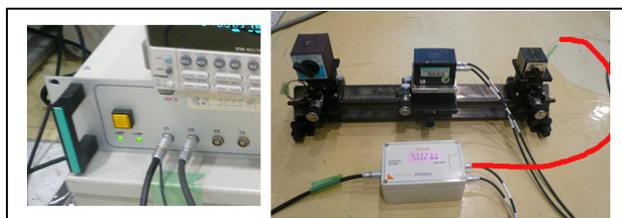


Figure 5: Measurement of V-Distance coefficient.

測定時、ワイヤがアースされずに浮いていると正確に測定できないので Figure 5 のようにケーブルコネクタまたは電源のアース端子にワイヤを接続しておく。

Figure 6 はワイヤ CuBe φ0.2mm で1軸は中央付近で固定しもうひとつの軸に沿って移動したときのグラフで、左は中央付近±2mm、右は±5mmの時の電圧で場所により係数が異なっていることがわかる。

3.3 応答

金属の CuBe 直径 0.2mm ワイヤに、V字型で長さ 3mm の同じワイヤを掛けて 50cm 離れた 2 個の 2

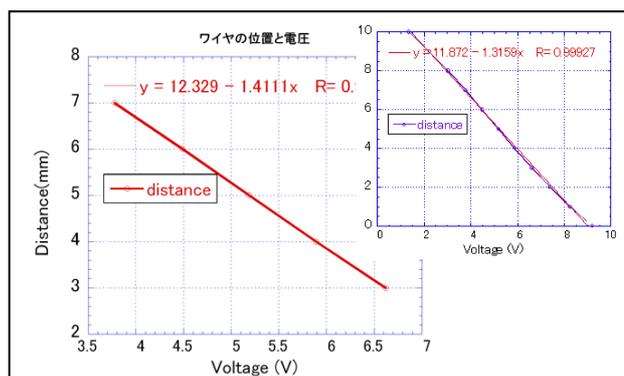


Figure 6: The voltage versus distance.

次元 wps と上下測定用 1次元の wps で応答を測定した。垂直方向の結果は Figure 7 のように 2次元 wps では半値幅は 25mm 程度、1次元 wps では 10mm と狭くまた深くなっているがワイヤの細かい変化は測定できないことがわかる。

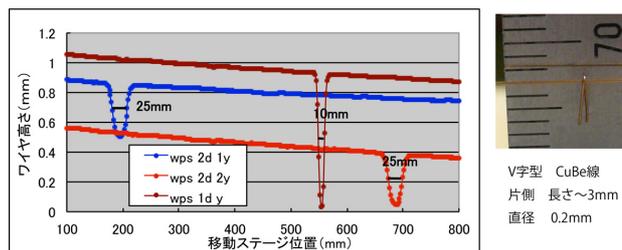


Figure 7: Response curve to vertical V-shape wire.

4. キンクのチェック

4.1 2個の wps を使う

1 個の wps のみでの測定では、測定系やステージのずれの可能性もあるので約 40cm 離して同タイプの 2次元 wps を 2 個配置し出力を比較した。

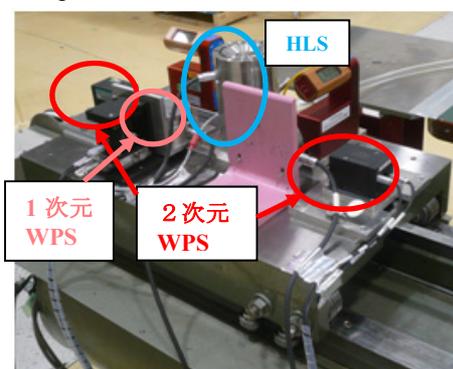


Figure 8: Sensors on the movable stage.

Figure 9 は垂直方向の垂れ分を 2次曲線で近似し差し引いた残り、レール固定用のボルト穴にベアリングが落ちるため 15cm のディップが認められる。また、2040、2950mm 付近の突起はワイヤに付いてたごみ状のものが原因で簡単にふき取った後の測定では突起は消えた。ただ、このような付着物は拡大鏡を用いないと見つけることは難しい。

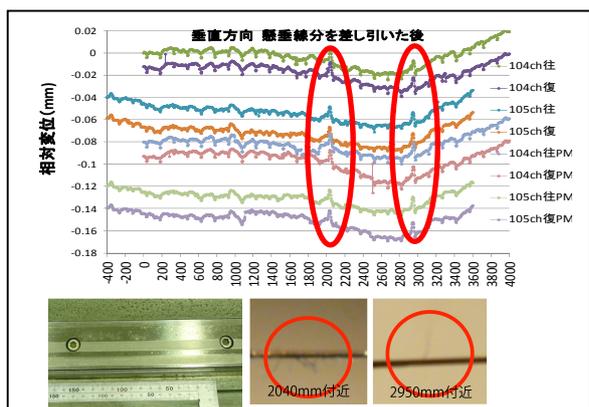


Figure 9: Wire heights from two sensors in the vertical direction. Second sensors data is plotted by shift 395mm.

水平方向は往復の再現性は悪くないが、上下方向と異なり、wps2 をずらせてプロットしてもローリングにヨーイングが加わりわかりにくい結果になっている。(Figure 10) レールの間隔に 0.1mm の変動があるのも影響しているかもしれない。ヨーイングの測定も必要である。ローリングの腕の長さとしては場所により変化するがグラフから 0.02mm/ 0.03mrad ~0.6m のオーダーが見積もられる。

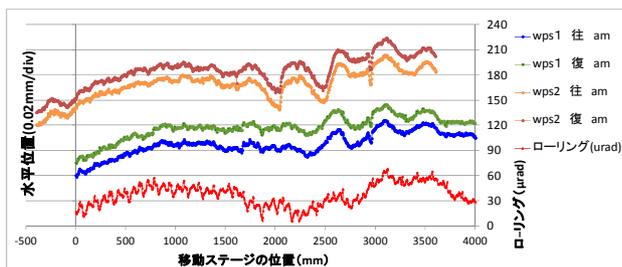


Figure 10: Wire positions by two wps sensors and rolling with tilt meter.

5. HLS と WPS による垂れ量の測定

5.1 石常磐上

石常磐上
HLS+WPS

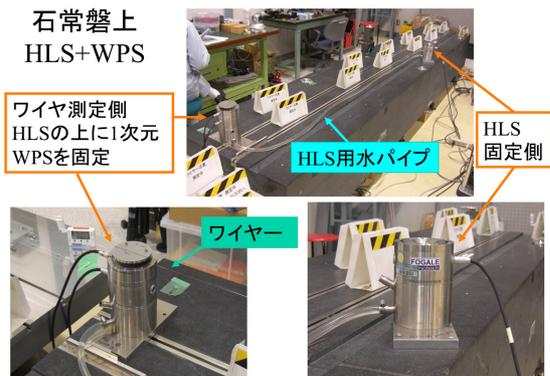


Figure 11: Wire measurement with wps on the hls.

石常磐の上方にワイヤを張り HLS と WPS を用いて垂れ量 sag を測定し、線密度、張力から計算できる値と比較した。(Figure 11)

r : ワイヤ線密度[kg/m]、g : 重力加速度 9.8[m/s²]

L : ワイヤ長さ[m]、T : 張力[N]とすると sag 最大量は $rgL^2/(8T)$ と計算される。線密度は (株) UBE 科学分析センターに依頼し 10cm10 本から 0.26412 ± 0.00015 [g/m]の結果を得、張力は分解能が 1g の荷重計 (株) 佐藤商事 フォースゲージ FG-5005) で分銅 2kg で 2000gf と表示し、さらに 1g の追加で 2001gf になることを確認した。張力による伸びで線密度が減少することも考慮した。その結果、長さ 3600mm の両端を基準にした中央、最も低いところの sag の測定値と計算値は Figure 12 の通り $5 \mu\text{m}$ のずれもなかった。

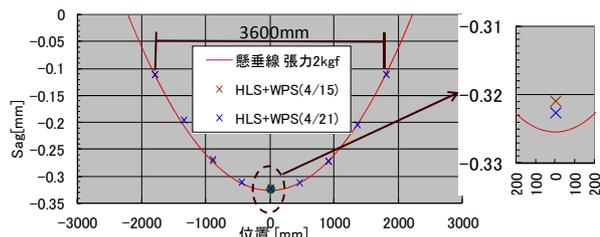


Figure12: Sag comparison between calculated value and measured one.

5.2 移動ステージによる直線性検証

ステージの上に HLS を設置し、動かない台の上のとパイプで結んだ。移動に伴いパイプがねじれやすいので広い机の上をスムーズに動くよう表面に

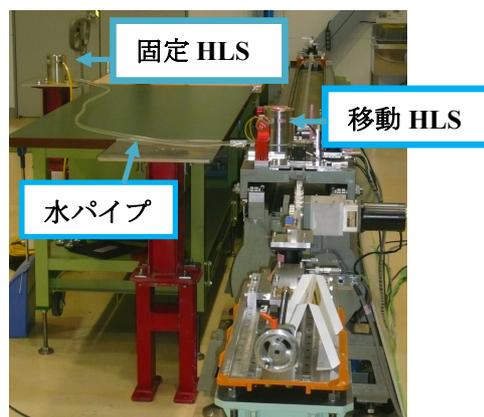


Figure 13: HLS's on the movable stage and fixed one.

出ている傷などを落とした。4mm 移動時水面は数 Hz で振動するため、1 分待ってから測定した。Figure 14 は 2次元の wps 2 個の平均 (HLS は 2 個の wps の中央に固定されている) と 1 次元 wps、HLS によるステージの高さの比較で sag 分を差し引いた値であるが $\pm 5 \mu\text{m}$ の幅に収まっているのがわかる。

6. カーボン繊維と金属ワイヤの比較

6.1 ケブラー線

Fogale 社から購入した CWG-0.5 の顕微鏡写真を Figure 15 に示す。黄色の被覆シート 2 枚で細い繊維を 5mm 周期で対称的に包んでいる。左の図は内部のかなりの繊維が切れたわんでいる状態であるが切

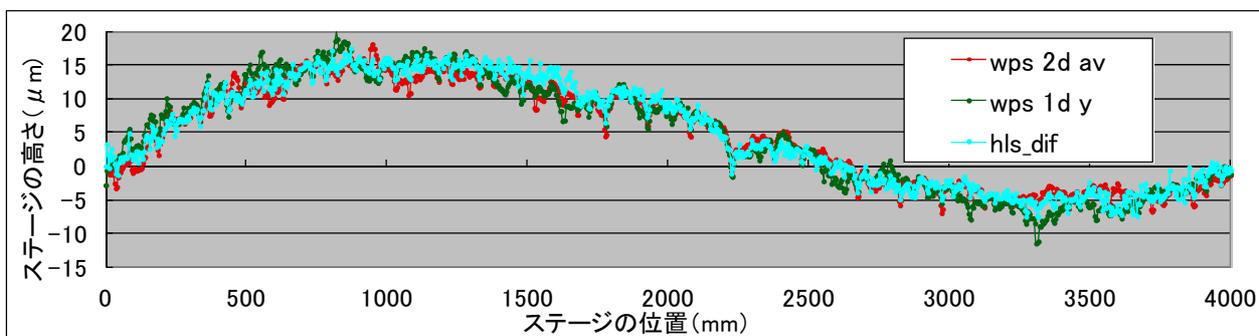


Figure 14: The measurements comparison of movable stage level between using wps with wire and HLS.

れた本数が少ない場合には含まれているためわかりにくいと思われる。

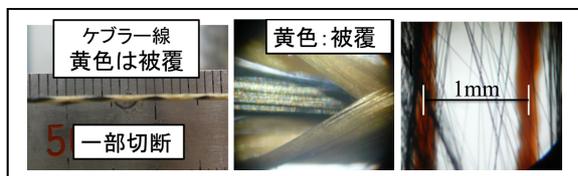


Figure 15: Kevlar wire CWG-0.5.

扱いにより不具合が発生する可能性があるので未使用の製品を 5kgf、7.5kgf、10kgf と張力を変えてで張り測定した。Figure16 のように 2 個のセンサー間の距離 395mm ずらしてプロットするとよく一致しているため測定そのものは正常と考えられる。張力が 5kgf と弱い場合、大きなもので 30~40cm 周期の ±20 μm 程度のうねりが測定されている。

6.2 金属ワイヤとの比較

ケブラー線 (2015/10/5 と 2016/6/8 測定) と CuBe φ0.2mm ワイヤ (2016/6/3 測定) の比較を Figure 17 に示す。垂直方向では、Sag 分は 2 次曲線で差し引いている。ケブラー線は張力を強めると少しは改善するが 10kgf でも大きいところは ±10 μm 程度認められるが、金属ではステージの nonlinearity は見えてもうねりはよくわからない程度である。

7. まとめ

7.1 直線基準

HLS を移動ステージ上に載せてステージの高さを測定することができ金属ワイヤとの差も 4m で ±5 μm 以内で一致した。これにより数 μm の精度で垂直方向の連続な直線基準を得ることができる。水平方向はまだ不確定な部分があり今後検討を行う。

7.2 ケブラー線と金属線

黄色の被覆がされているケブラー線で張力を増すと Nonlinearity は減少するが新品でも張力 10kgf の条件で大きいと ±10 μm 程度の変動が測定された。細い化学繊維では垂れ量が少なくできるが 1 本にするとうねりが出てしまう。束ねる難しさが残る。

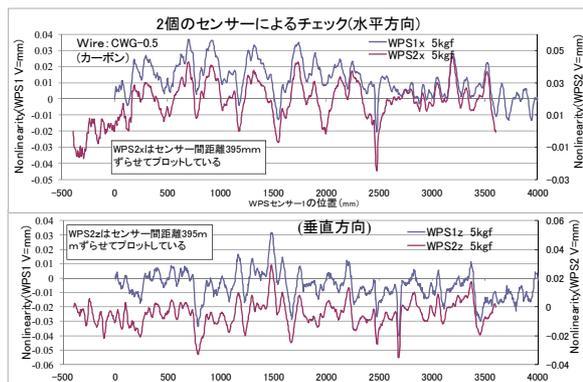


Figure 16: Two sensors plots by shifting one about 40cm.

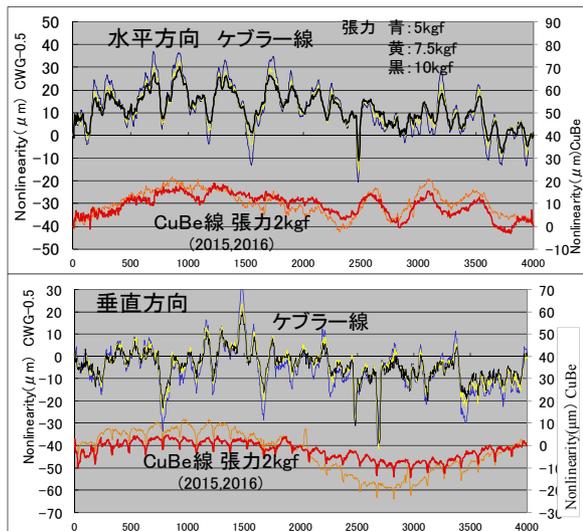


Figure 17: Comparison between Kevlar and CuBe wire.

参考文献

- [1] 松井佐久夫他, "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(WPS)", 第 8 回日本加速器学会年会, つくば, 806-810 (2011).
- [2] Kevan H, "Technical Proposal for Wire Position Sensor", <http://www.opensourceinstruments.com/WPS/WPS0/>
- [3] 深見健司他, "次世代放射光リングのための Vibrating Wire によるマイクロメーターオーダーでの磁石アライメント法の確立と課題", 第 12 回日本加速器学会年会, 敦賀, 382-385 (2015).
- [4] 木内淳他, "レーザートラッカーAT-402 近距離測定精度調査", 第 12 回日本加速器学会年会, 敦賀, 1384-1388 (2015).