

PERFORMANCE RESEARCH OF LASER TRACKERS OF API

Yusuke Maeda^{#A)}, Tomoya Kai^{A)}, Sakuo Matsui^{B)}, Hiroaki Kimura^{B,C)}, Noriyoshi Azumi^{B)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd. / 1-20-5 Koto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 678-1205 Japan

^{B)} RIKEN / SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148 Japan

^{C)} JASRI / SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198 Japan

Abstract

XFEL(SACLA) components were aligned using two nearby reference monuments by a laser tracker T3 of API. However the vertical threshold of front back difference 0.004 degree for calibration is too large, so that some components were aligned 0.5mm upper than the correct position. The error reason was confirmed by measuring the heights by a digital level when the front back difference was large. Thus we do calibration when that value exceeds than 0.001 degree. The measured distance by OT changed largely without homing in a hour. The stability of the ADM lasts for only 1 hour. The straight monuments in the undulator tunnel (20m x 240m) was surveyed using the tracker T3. The rms values of a hundred differences between measured distances and calculated ones were 0.012mm. The rms of horizontal angles was 0.38sec. These vales are estimated as the specification of this tracker.

API 社製レーザートラッカーの性能調査

1. はじめに

X 線自由電子レーザー施設 (SACLA) では加速管やアンジュレータなどの機器を一直線上に並べるためやアライメント時に使用するモニュメントの測量をするために、2009 年に購入した API 社製のレーザートラッカー T3 (Tracker3) と OT (Omnitrac) の各 1 台を使用している。OT は絶対距離計 (Absolute Distance Meter ADM) のみを搭載し、3 次元の測定精度は 10ppm で T3 は絶対距離計とレーザー干渉計を搭載し、 $\pm 5\text{ppm}$ である。

据付作業の中盤で 30m 毎に設置している基準モニュメントの中央付近で加速管が 0.3~0.4mm 高くアライメントされている事がデジタルレベルで確認された^[1]。原因を調査するとトラッカー使用前に、校正の必要性を判断するために行う Front-Backsight check (正・反の差) の許容値がメーカー指定の値で上下方向の誤差を計算すると最大で 0.5mm になる事が判明した。そこで①校正の許容値を最大誤差が 0.1mm 以内に収まるように再設定、②トラッカーは正反の校正後、正だけで作業するのが普通であるが、正でアライメントした後に最終測定で正反の平均値を用いる、③トラッカー座標の基準モニュメント間の中央付近の壁に高さ基準点を追加、の対策を行った。その後にアライメントされた加速管は、基準モニュメントの中央付近でも誤差が 0.1mm 程度に収まっている。

また、レーザー干渉計の距離精度の良さを使い、光源棟内 (長さ 240m、幅 20m の細長い領域内) でかつ T3 の位置が基準モニュメントの水平面から 30cm 高いにもかかわらず網測量で $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の直線上に基準モニュメントを調整できた。本報告ではこれまでの SACLA 据付で使用したレーザートラッカーの問題点や性能を調査した結果を報告する。

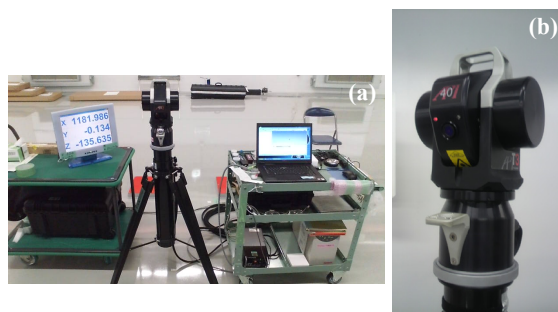


図 1 : (a):レーザートラッカー、制御用 PC と数値確認用モニター。

(b):レーザートラッカーヘッド

2. レベル問題の検証

0.3~0.4mm 高くアライメントされる際に行った 3 つの対策の効果を確認した。

2.1 問題発生時のアライメント手法

レーザートラッカーは通常 Front-Back での校正後は、Front のみで使用するものとの考えから以下の手順で Front のみでアライメントを行っていた。

- ① Front-Backsight checkで $\pm 0.004\text{deg}$ 以内を確認
- ② 上流下流の各モニュメントを測定して座標系を作成
- ③ Frontのみでリアルタイム測定をしながらアライメント
- ④ Frontのみで最終位置の精密測定
- ⑤ レーザートラッカーが動いていないことのため上流下流のモニュメントを測定

2.2 計算による推測

このレベル問題を解決するため Front-Backsight

[#] maeda_yu@spring8.or.jp

check の値により高さ方向に発生するエラーを見積った。Front-Backsight check の結果が $+0.004\text{deg}$ の時、Front のみの場合では半分の 0.002deg と考える。そして 30m 間隔のモニュメントの真ん中にトラックラーを設置すると、モニュメントまでの距離は 15m となり $35\mu\text{rad}$ では 0.5mm トラックラーが低い位置にある事になり、コンポーネントの近くにトラックラーを設置するので 0.5mm 低い位置にアライメントされてしまう事になる (図 2)。さらにトラックラーの位置と Front-Backsight check の結果ごとに計算した (図 3)。

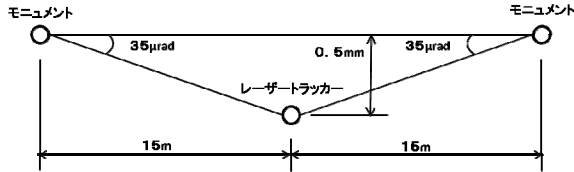


図 2 : Front-Backsight check が 0.004deg の時のレーザートラックラーとモニュメントの関係

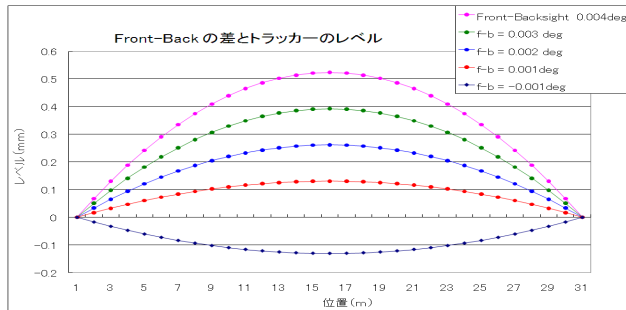


図 3 : レーザートラックラー位置とアライメントされたコンポーネントの位置関係[計算値]

2.3 現象の再現

2.1 で紹介した手法で実際にアライメントを行った後にデジタルレベルで測定した。その結果をアライメント前の Front-Backsight check の値毎にプロットし、図 3 と比較した。

T3 の結果は計算値とよく合っている (図 4) のに対し、OT でアライメントした場合は計算値の約半分ほどしかずれていないように見える (図 5)。

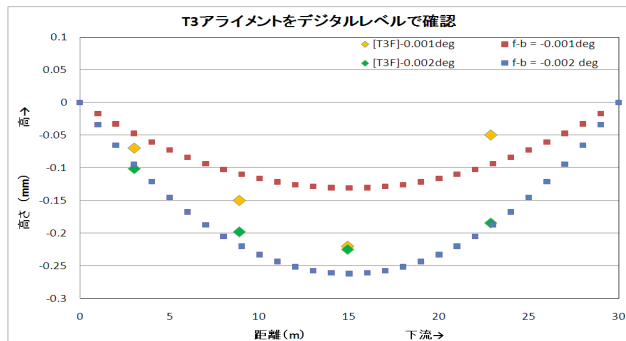


図 4 : 計算値と T3 アライメントをデジタルレベルで確認した値

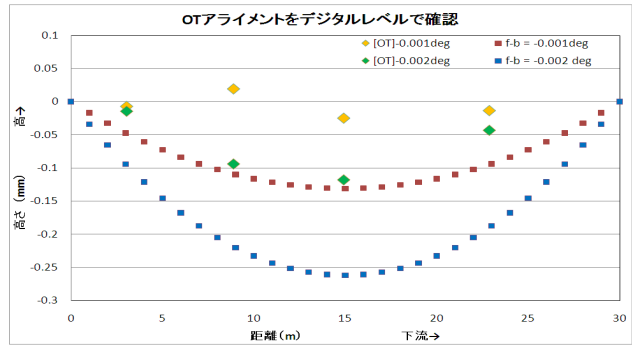


図 5 : 計算値と OT アライメントをデジタルレベルで確認した値

レベルと同様にビーム進行方向に対して左右方向のアライメントの確認も行い、Front-Backsight check の値毎にプロットしたが T3 でも OT でも 0.1mm 以内に収まる結果となった。(図 6)

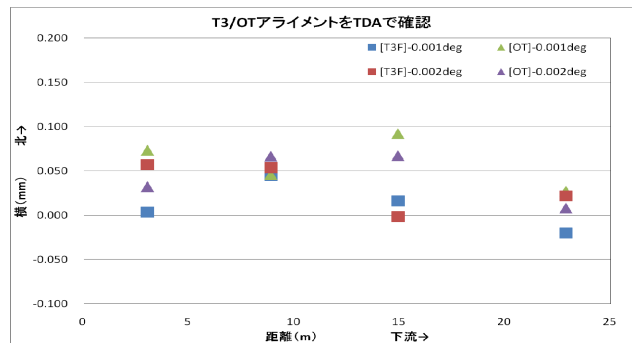


図 6 : 計算値と OT アライメントをデジタルレベルで確認した値

2.4 対策の検証

2.3 の現象が出た際に我々は 3 つの対策を施した。①Front-Backsight check の合格値を $\pm 0.001\text{deg}$ 以内にする、②Front-Back で測定し、その平均値を測定値とする、③モニュメント間 30m の中央付近の壁に高さ基準点を追加、である。①に関しては図 3 の $f-b=0.001\text{deg}$ を見るとエラーは 0.15mm に収まりそうであるので、今回は②と③について検証した。

②の検証として、まず Front-Backsight check を行い 0.001deg を超えていても校正は行わない。測定を Front-Back で行う場合には座標系を作成するためのモニュメント測定も Front-Back で行う。ただし、アライメント時のリアルタイム測定は Front でしか行えないため最終測定を Front-Back で行ってアライメントする。結果は 0.15mm 以内には収まるようになった (図 7)。しかし SACLA の主な据付精度は 0.1mm 以内であるため、まだ要求を満たしていない。

③はモニュメントの中間にモニュメントと同じ高さの基準点を設ける。そのうちレーザートラックラーから近い 2 つの高さ基準点を使用してアライメントを行う。基準点を 3 つにする事で 2 つの場合と比較すると最大測定距離がおよそ半分で済む。従って基準点測定のエラーが減るので据付精度の向上につな

がると考えた。この方法でアライメントした結果、0.1mm 以内に全てのポイントを取める事が出来た (図 8)。これにより 0.1mm 以内の精度で据付が可能となった。

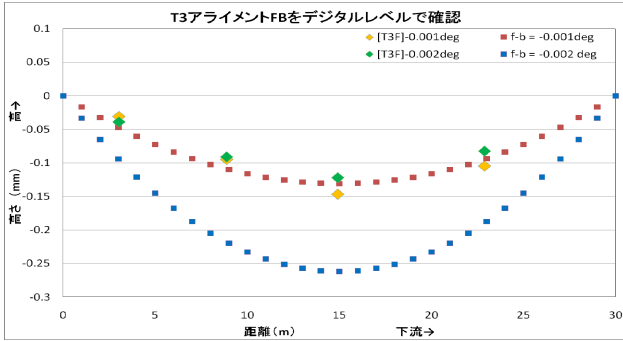


図 7 : 計算値と T3 アライメント FB をデジタルレベルで確認した値

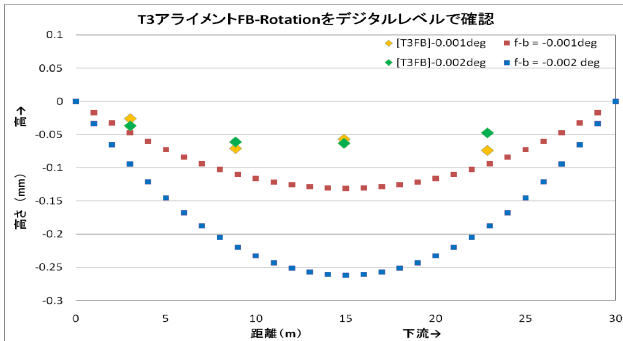


図 8 : 計算値と T3 アライメント FB+基準点 3 点をデジタルレベルで確認した値

3. ウォームアップと安定度調査

レーザートラッカーの電源 ON からのウォーミングアップについて、マニュアルでは OT は特に必要ないが、T3 は電源 ON から 1 時間 30 分以上経過してからの使用を推奨すると書かれている。さらに OT は、ADM の精度を保つために 1 時間毎に CCR (ターゲット) をホームポジションに戻す作業 (homing) が必要であるとメーカーから指示があった。これまではその指示通りに使用してきたが、確認のためにデータをとった。

T3 は設置後に電源 ON してレーザーが安定して操作可能になるまでの時間 (16 分) 待ってから Front のみの測定と Front-Back の測定を行った。T3 の結果は Front-Back の距離は終始変動が見られなかった (図 9)。Front のみの距離は電源 ON から 2 時間までに $10 \mu\text{m}$ の増加が見られたがそれ以降は $2 \mu\text{m}$ ほどの変動量であった (図 11)。どちらの測定でも方位角と鉛直角の変動量は 0.001deg であった (図 10, 12)。

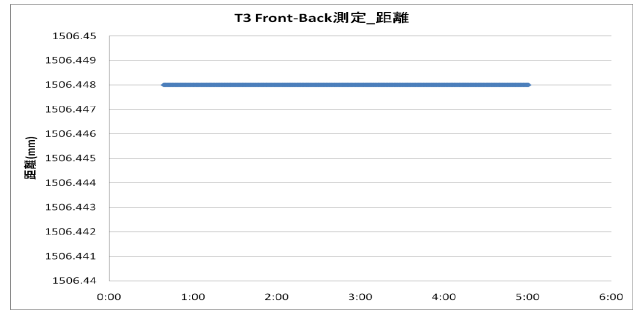


図 9 : T3 Front-Back で連続測定距離 (電源 ON から 35 分後開始)

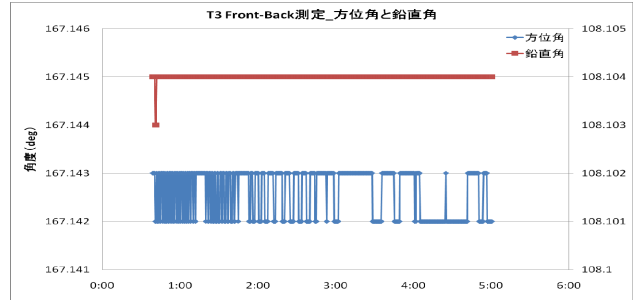


図 10 : T3 Front-Back で連続測定方位角と鉛直角 (電源 ON から 35 分後開始)

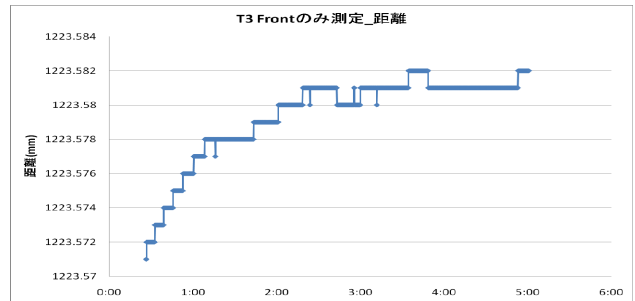


図 11 : T3 Front で連続測定距離 (電源 ON から 23 分後開始)

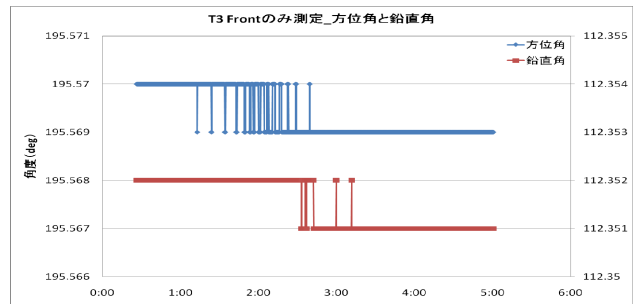


図 12 : T3 Front-Back で連続測定鉛直角 (電源 ON から 35 分後開始)

OT は Front のみの測定しか行わないため Front のみで行う。設置後に電源 ON、その後すぐに測定開始する。Front のみで測定し続けたものと 1 時間毎にホームポジションに戻す測定を行った。OT の結果は連続測定では最大で $400 \mu\text{m}$ 増加が見られた (図 13)。それに対して 1 時間毎に homing を行うと最初の 1 時間では $300 \mu\text{m}$ ほどの増加が出たものの、それ以降は $100 \mu\text{m}$ 以下の変動に収まっている

(図 15)。方位角と鉛直角はどちらの測定も 0.002 ~ 0.004deg の変動量であった (図 14, 16)。

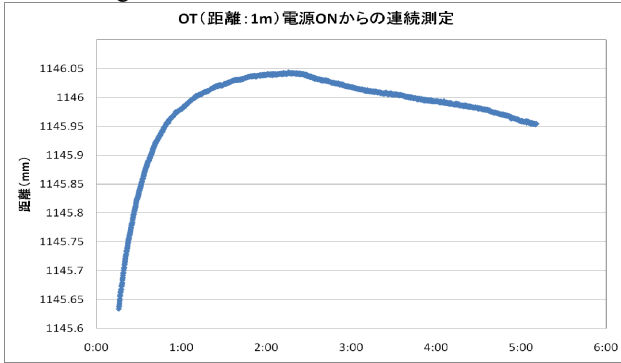


図 13 : OT Front で連続測定
距離 (電源 ON から 15 分後開始)

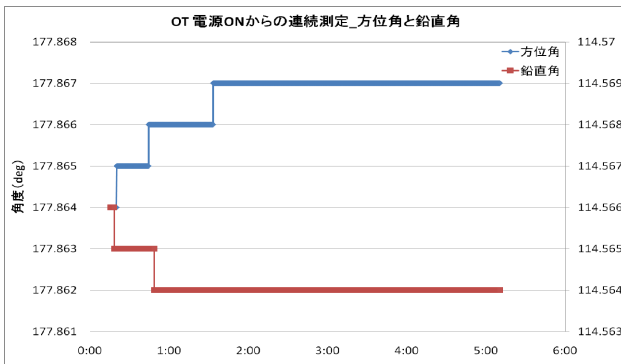


図 14 : OT Front で連続測定
方位角と鉛直角 (電源 ON から 15 分後開始)

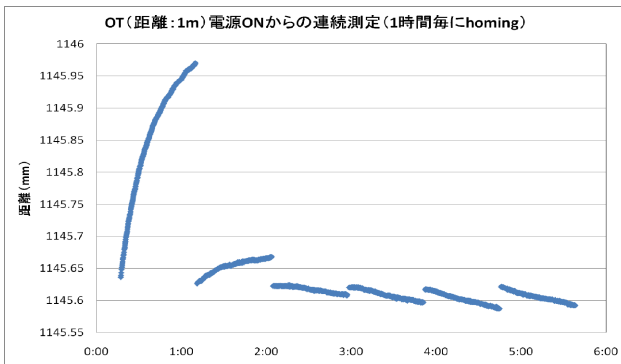


図 15 : OT Front で連続測定 1 時間毎に homing
距離 (電源 ON から 13 分後開始)

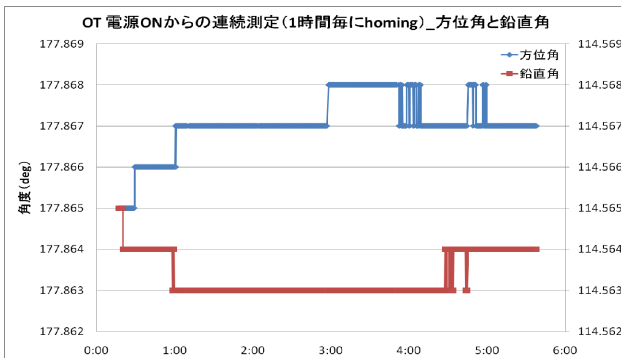


図 16 : OT Front で連続測定 1 時間毎に homing
方位角と鉛直角 (電源 ON から 13 分後開始)

T3 に関してはこれまで電源 ON してから 2 時間以上ウォーミングアップ時間をおいてから使用したためベストな状態で使用していたと考えられる。OT に関してはウォーミングアップの必要ないと言われていたが、我々は T3 同様に 2 時間以上経過してから使用していたので 300 μm の変動量の影響は受けていないと考えられる。1 時間以上 homing しない可能性があるが、2 時間以上も作業を続ける事は考えにくいので、影響があるとしても 100 μm 以内であると推測されるので問題ではない。

4. OT 問題

OT は絶対距離計のみを搭載したモデルである。SACLA では OT を加速管間の小さな架台上の Qmag や BPM などのコンポーネントのアライメントに使用してきた。以下に OT で発生したいくつかの問題を述べる。

4.1 Front-Back 測定

OT で同じターゲットを Front と Back で測定すると、距離に必ず 0.1mm の差が出た。調査の結果、原因はソフトの問題であるのでトラッカーの操作を行うインターフェースをトラッカーのみ操作バージョン (Legacy) からアクセサリを含むトラッカー操作バージョン (Device Interface) に変更する事で問題は回避された。

4.2 レベル座標が傾く

4.1 での解決策であるインターフェースをトラッカー+アクセサリ操作バージョンに変更する事で新たな問題が発生した。SACLA でアライメントを行う場合、ビーム進行方向に対して左右の水準はトラッカー内部の水準器を使用して作成する。そのレベル座標を作成すると、ほぼ同じであるはずのモニュメントの高さに 100mm ほど高低差があるように見える、つまりレベル座標が傾いて見えた。この問題に関しては Legacy を使用すれば正常なので、レベル座標のみそちらで作成する事で回避した。

4.3 気象補正が勝手に OFF になる

トラッカーには気温、湿度、気圧のセンサーが接続されており、デフォルトの設定で気象補正されるが、その設定が勝手に情報を取り込まない設定に変わってしまう。この場合は平均的な気温、湿度、気圧のデータが入力されてしまう。これはメーカーに依頼してトラッカーを送り、コントローラ内のプログラムを更新してもらい解決した。

4.4 ホームポジション誤認識

トラッカーヘッドを先にホームに向けてから CCR をホームポジションに戻す際に、レーザーをロックするのが早すぎるために、場合によって CCR をホームに置ききる前にホームポジションと誤認識してしまう。この件は根本的には解決しておらず CCR をホームポジションに置いてからトラッカーをホームに向ける手順とする事で回避している。

4.5 Front-Back でレーザーをロックしない

レーザートラッカーから CCR までの距離が 15m 以上の場所で Front-Back で測定すると Front から Back にフェースを変更して、正常なら CCR がレーザーをロックするが、ロックしない現象が発生した。調査すると 15m 以上の地点で一度レーザーを遮断し、再捕捉しようと CCR を近付けるとレーザーが逃げて行くような動きをする。つまり Front-Back の切替の問題ではなく再捕捉時に問題が発生しているように思われる。この現象はメーカーにある OT では再現できないとのこと。方針は現在検討中である。

5. T3 の測定精度

T3 は光源棟の基準モニメントの網測量でも使用している。使用する際には厳密に校正を行っている。網測量は BL3 : 9 箇所と BL1 : 9 箇所のモニメントと壁に設置した基準点 : 13 箇所の合計 31 箇所の測定点と T3 を 30m 毎に 10 箇所に置いて行う^[2] (図 17)。網計算の結果から得られる距離と方位角から測定値を差し引いた値をエラーとみなす。距離とエラーの関係を見ると距離が短くても長くても精度に大きな変化はない (図 18)。距離エラーの rms は 0.012mm であるが CCR 自体や台座の精度が数 μm である事を考慮すると良好な結果である (図 19)。方位角の場合は rms の 2 倍は 0.76sec でトラッカーのカタログ精度は 2σ で 5ppm=1sec なのでこちらも良好な結果である (図 20)。

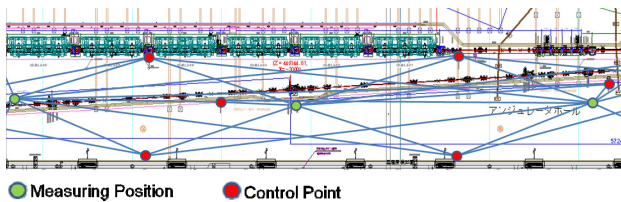


図 17 : 光源棟測量網 (一部)

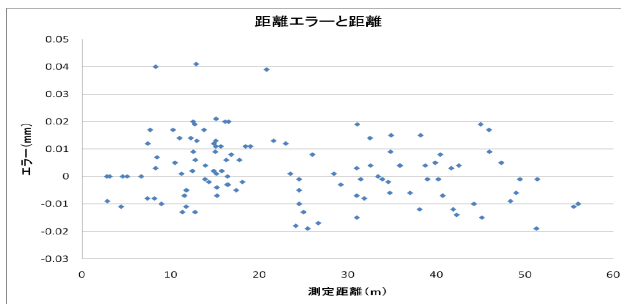


図 18 : T3 距離とエラーの関係

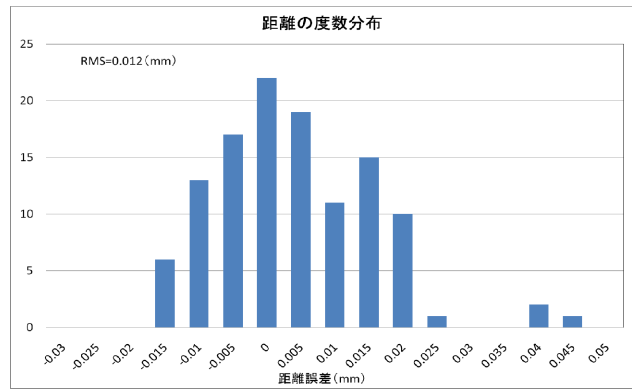


図 19 : T3 距離精度

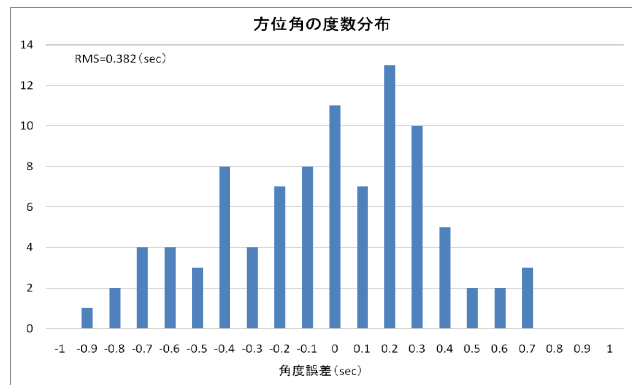


図 20 : T3 方位角精度

6. おわりに

API 社製のレーザートラッカーは他社に比べて軽量で持ち運びが容易で作業の進捗度によって作業場所を変えて行った SACLA のアライメントでは非常に便利であった。だが、初めて使用する機器に対する事前調査が甘くアライメント作業の最中にレベル問題が発覚し、使用方針を変えなければならなかった点は今後に生かしたい。

軽量なので安定度について懸念があったが今回行った調査ではそれほど大きな問題はないように感じた。メーカーからの指示の裏付けとなるデータが得られた事で今後も安心して使用できる。T3 はレベル問題を除けば、校正をきちんと行えばアライメントや基準モニメントの測量で高精度な結果を出せる事がわかった。だが、OT に関しては大小様々な問題が多かった。メーカーが国外なため対応が遅いなどの問題もあったが、SACLA の据付アライメントは無事完了出来た。最後になりましたが、代理店である TACC 株式会社様のご協力に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Yamashita, et al. “XFEL 加速管・Q 電磁石 BPM 用架台のアライメント”, 本学会 2010 年
- [2] Y. Maeda, et al., “XFEL 据付基準モニメントの測量方法と結果”, 本学会 2010 年