

レーザーアライメント導入による工期短縮事例

(Instances of Shortening of Maintenance Period by Using the Laser Alignment Technology)

横野 智明*

(T. Yokono)

近年、ユニット稼働率向上に向けて定期検査・メンテナンス工期短縮が課題となっている。その解決策の一つとして、回転機のシャフトアライメント・センタリング（ワイヤリング）作業の時間短縮・精度向上がテーマとしてあがっている。今回、レーザーアライメントを実際の作業に導入し、稼働率向上につながる大幅な整備時間短縮を達成した事例を技術紹介と共に3例紹介する。

Recently, the shortening of the maintenance period is one of the big challenges for Japanese power plant to increase the unit availability. As one of the solutions, we reviewed the alignment method for rotating equipment to shorten the maintenance period and increase the accuracy. Here we report three instances which greatly shorten the maintenance period by using laser alignment system.

1. はじめに

2011年の東日本大震災以降、原子力発電所の停止などにより電力供給のバランスが大きく変化し、電力不足が深刻な問題となっている。その対策の一つとして、稼働できる発電所は、稼働率を上げることが命題となっている。そのため、停止していた火力発電所を再稼働させたり、定期検査の期間を大幅に短縮させるなど、稼働率向上のための大きなチャレンジに迫られている。

今回、回転機整備時に実施される芯出し作業にレーザーシステムを導入し、大幅な時間短縮を達成し、稼働率向上をはかられた事例を北海道電力(株)苫東厚真発電所の微粉炭機での事例により紹介する。また、レーザーアライメントに対する西日本プラント工業(株)の取組みを、九州電力(株)松浦発電所での事例により紹介する。

さらにタービン据付時あるいはダイヤフラム・パッキンなどタービン内部パーツの更新・改造などの際に実施されるセンタリング業務に、ピアノ線に替わりレーザーシステムを国内の発電所として初めて導入し、時間短縮や精度向上などの効果が確認された事例を、日本原子力発電(株)東海第二発電所での事例により紹介する。

2. レーザーシャフトアライメント(軸芯出し)

2.1 従来のアライメント法：ダイヤルゲージ

回転機の芯出し作業を実施する際は、一般的にダイヤルゲージが使用されている。通常使用されるダイヤル

ゲージは1/100mmまで測定可能であり、正しく使用すれば高精度の芯出しが可能である。しかしながら、活用には注意すべきポイントがいくつかあり、そのポイントをおさえて作業しないと測定ミスが発生したり、測定データが安定しないため芯出し作業時間が長くなったりする。ダイヤルゲージを使用する際の注意すべきポイントとして、

- ①取り付け治具の撓み：マグネットベースが一般的に活用されるが、重力によりアームの部分が撓み、測定結果に影響する。
- ②取り付け治具の遊び：長期間使用していると、アーム固定ねじなどに遊びが生じて、測定結果に影響を与える場合がある。
- ③ダイヤルゲージの取り付け方：測定時にダイヤルゲージの測定可能範囲を超えるような取り付け（測定途中で先端が浮いたり、最大まで縮んだ状態になる）や、斜めに取り付けるなどした場合、正しい測定結果は、期待できない。
- ④ダイヤルゲージの読み間違い：プラスマイナスを読み違える例が多い。特に、狭所では、手鏡を使用して数値を読むため間違いやすい。
- ⑤芯出し対象設備によるもの：軸のスラスト方向の動きがあるものやカップリング表面が荒れているものについては、その点を考慮した測定が必要である。またダイヤルゲージはあくまで計測器であり、測定し得られた結果から、作業者が芯出しを目標値の許容範囲

*有限会社ティティエス
(TTS Ltd.)

内にいれるための修正方法・修正量を決定しなければならず、作業者によって作業時間が大きく異なる、熟練を要する作業である。

2.2 レーザーアライメント法

作業者の熟練度に依存することなく、より簡便に短時間で、そして精度の良い芯出しを実施することを目的として、ドイツのブルーテック社により、レーザーアライメントシステムROTALIGN® ULTRA iSが開発された。

システムは、レーザー発射器・レシーバー・取付ブラケット・専用コンピュータ等で構成されている。レーザーはクラス2の可視レーザーを採用しており、最大で10mの距離まで測定が可能である。レーザー光線の活用により、中間軸を有する設備のように、カップリング間の距離が長い場合でも撓みがないため精度の高い計測が可能となる。また、測定品質についても、測定中の振動や軸の回転のスムーズさなどがモニタリングされており、精度の良い測定ができたかどうかを確認できる。

2.2.1 レーザーアライメントシステム ROTALIGN® ULTRA iSの計測原理と要領

レーザー発射器を基準機側、レシーバーを修正機側のカップリングまたは軸に取り付け (図1)、軸を回転させる。回転軸にミスアライメントが生じている場合、軸を回転させるにしたがって、レーザーに対してレシーバーの受光する位置が変わっていくため、その数値を検出する (図2)。

レシーバー内部には、2つの検出面 (検出面1, 2) と軸の回転角度を検出する傾斜計が内蔵されており、下記原理に基づいて、1度の計測で垂直・水平方向のオフセット量 (周) ならびにギャップ量 (面開き) が同時に測定・算出される。

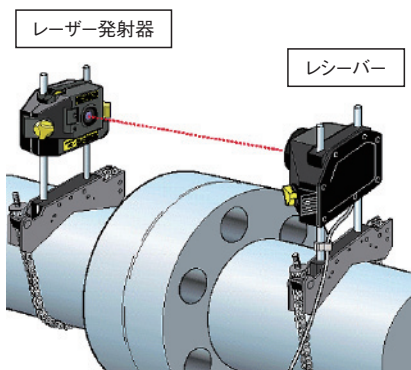


図1 システム取り付け

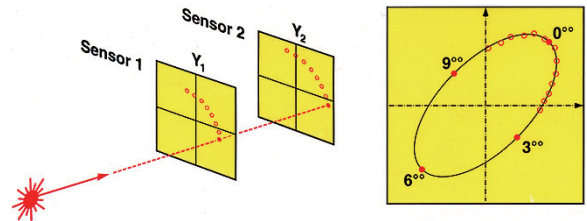


図2 レーザーによるデータ測定 (2面検出)

①オフセット量 (周) の計測

レーザーの光軸調整をした後に、レーザー発射器ならびにレシーバーを取り付けた軸を回転させる。カップリングにミスアライメントが存在していると、検出面1上のレーザー検出座標 (Y座標) が変化する (図3)。この変化量からオフセット量 (周) を求めることができる。実際の上下の芯ずれ量がaの時、真上から真下へシャフトを回転させると、検出面1のY座標でaの2倍の変化量が検出される。

②ギャップ (面開き) の計測

軸を回転させた際、互いの軸に角度ズレ (面開き) があると、そのズレ角度に応じて2枚の検出面をレーザーが通過する角度 (2つのY座標値の差) が変化する。その角度の変化量から軸のズレ角度を算出する (図4)。ギャップ (面開き) は、算出されたズレ角度にカップリングの大きさをかけあわせることで計算される。

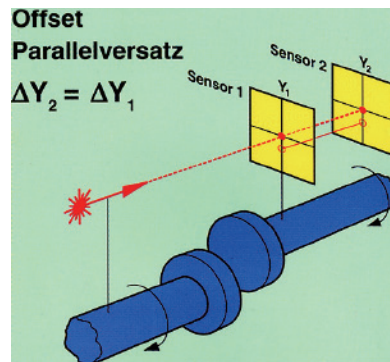


図3 オフセット計測

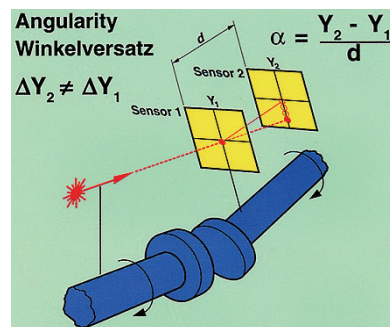


図4 ギャップ計測

この測定方法では、軸の傾き（角度）そのものを測定しているため、測定中に軸方向（スラスト）の移動が発生し実際のカップリングの面間距離が変化しても、算出される測定結果は影響を受けない。

計測が完了すると、即座にPC画面に現在のアライメント量ならびに、目標値に芯出しするための修正量（シム・ライナー量、横移動量）とその方向が表示される（図5）。

シム・ライナー修正については、シミュレーション機能により、手持ちのシム・ライナーでの最適な修正量の組み合わせを確認することもできる。また、横移動については、レーザーでリアルタイムに設備の移動量を確認できる（ムーブ機能）ため、画面を確認しながら横方向の修正量を確認・修正することができる。

2.3 実機への適用事例

2.3.1 北海道電力(株) 苫東厚真発電所

(1) 吸収塔循環ポンプによる実機検証

レーザーアライメントシステム導入の効果を検証すべく、吸収塔循環ポンプ（モータ容量650kW、中間軸500mm、写真1）において、レーザーアライメントシ



図5 測定結果表示



写真1 吸収塔循環ポンプ

テムを用いて芯出し作業を行った。従来のダイヤルゲージを使用した芯出し作業では、作業時間として半日から1日を要していた。

レーザーアライメントシステム導入時の所要時間は表1のとおり約40分と、大幅な時間短縮が可能ことが確認された。

さらに、レーザーアライメントシステムの測定精度を確認するため、ダイヤルゲージにより精度確認が実施された。結果、周の上下方向の数値に差異が見られた（図6）。ダイヤルゲージ計測用治具の撓み発生が予想されたため、レーザーで治具の撓み量計測を実施した。実際のダイヤルゲージ取り付け位置とは異なるが、レーザー検出器取り付け位置で0.16mmの撓み量が確認された（図7）。ダイヤルゲージ取り付け位置を考慮すると、ほぼ、上記ダイヤルゲージとレーザーシステムの測定値の差分と一致し、差異がダイヤルゲージ取り付け治具の撓みに

表1 吸収塔循環ポンプにおける作業時間

作業内容	所要時間
レーザーシステム取り付け	3分
設備寸法入力	3分
初期アライメントデータ計測	2分
上下方向修正ライナー量決定	2分
ライナー修正作業	10分
上下方向アライメントデータ測定確認	2分
横方向修正（ムーブ機能活用）	9分
最終アライメントデータ測定確認	2分
レーザーシステム取り外し	1分

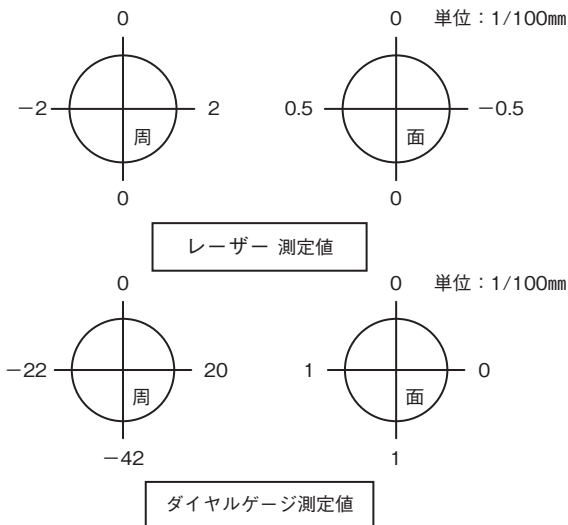


図6 レーザーとダイヤルゲージの比較

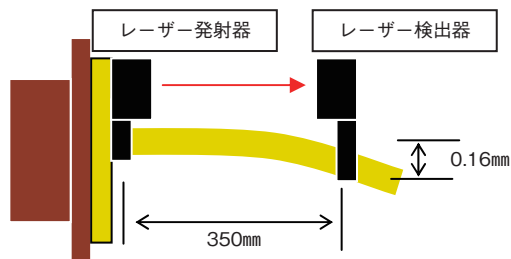


図7 ダイヤルゲージ取付治具の組み

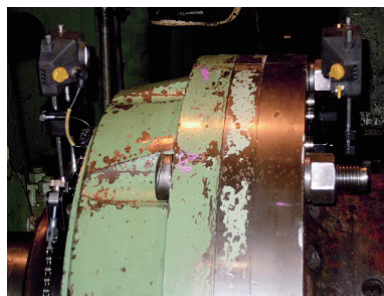


写真2 低速軸カップリング



写真3 高速軸カップリング

よるものであることが確認された。

(2) 微粉炭機への適用事例

吸収塔循環ポンプでの検証結果により大幅な時間短縮と精度向上が確認されたため、微粉炭機（横型・チューブミル、**図8**）の整備時に、芯出し作業にレーザーアライメントSV（スーパーバイザーサービス）が導入された。

定期検査時の整備ではなく、微粉炭機単独の整備であったため、微粉炭機1機ずつ順に整備されるが、微粉炭機の整備を実施している間、約7万kW発電量を下げた状態でユニットを運転することになるため、できる限り早急な復旧が必要であった。整備の最終工程に芯出し作業があり、従来のダイヤルゲージによる実績から、工程上24時間が芯出し作業に見込まれていたが、その作業時間を短縮するために、レーザーシステムが採用された。

アライメントは、低速軸（ピニオン/減速機間、**写真2**）と高速軸（減速機/モータ側、**写真3**）の2箇所であり、ピニオン軸を基準に減速機を調整し、低速軸の芯出しを完了した後、その減速機を基準にモータを調整し、高速軸の芯出しを行う。

実際の導入結果として、1機目の微粉炭機においては、レーザーアライメント導入の最初の設備となったため、計測方法の確定や段取り・工具準備などに時間を要したが、芯出しに要した時間は、実質、約6.5時間（休憩や段取りを含めると約10.5時間）であった。十分な効果

が確認されたため、他の微粉炭機整備にも順次適用された。微粉炭機におけるレーザーアライメント手順が確定した2機目以降の微粉炭機においては、休憩や段取り時間を含めても、6～8時間と従来の約1/3～1/4の時間でアライメント作業が完了し、従来ダイヤルゲージ使用時では、24時間程度見込まれていたアライメントの工程を、大幅に短縮することができた。芯出し作業時間の大幅短縮により、設備の早急な立ち上げが実現し、結果として、短時間で発電量を通常状態に戻すことができた。（7万kW出力を下げた状態を、16時間短縮できたこととなる。）

さらに、レーザーシステムによる計測は、カップリングの取り外しなど不要で、すばやく実施できることから、今回、振動改善のため、運転停止直後の芯出し値と冷間時の芯出し値の双方を計測し、芯出し目標値の見直しを行うことができ、設備の信頼性向上につなげることができた。

2.3.2 西日本プラント工業

九州電力(株) 松浦発電所における取り組み

西日本プラント工業(株)（以下NPC）では作業効率化など付加価値創出の観点から新技術の動向を幅広く情報収集し、有効性が認められる技術については積極的に導入検討されている。その取組みの一環として、レーザーアライメントについても、九州電力(株)松浦発電所において、定期修繕工事において対象補機を選定し検証が行わ

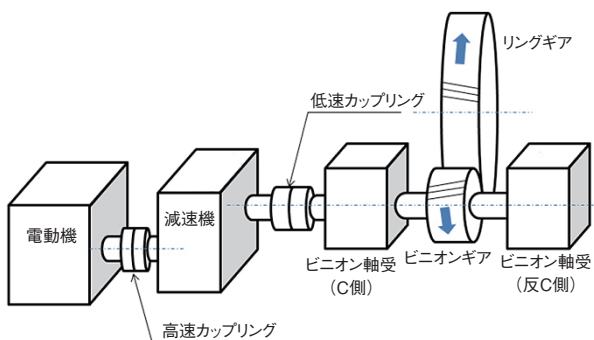


図8 微粉炭機（横型チューブミル）機器構成

れた。同型機器を複数整備する場合、一方をダイヤルゲージ、もう一方をレーザーシステムで芯出しを行うなど、作業時間・作業性・技術習得等が評価された。

今回、NPCが主体となりレーザーシステムの操作・計測から調整量指示を一貫して実施されたが、システム導入直後であったため取扱要領に慣れな面もあり、本結果で当該システムの可能性全てを評価するのは尚早であるとなったものの、以下傾向が認められ、評価がまとめられた。

- ①ダイヤルゲージで時間を要す機器については、レーザーシステムの使用により大きな短縮効果が期待できる。
例：大型補機（給水ポンプ、ガス再循環ファン等）や中間軸を有する機器（吸収塔循環ポンプ、微粉炭機等）は作業時間1/2以下。
小型補機（小型ポンプなど）では、大きな差異はなかった。
- ②レーザーシステムにおける作業効率化は、計測作業における時間短縮と調整作業における支援機能により可能となっている。（計測は、芯と面の両方を1回の操作で同時に計測可。調整は、事前に修正結果をシミュレーションでき、また、リアルタイムで移動量を把握できる容易性あり。）
- ③作業員がレーザーシステムの取扱要領を確認しながら慎重に作業を進めたこともあり、慣れによって更なる短縮効果が期待できる。基本的な操作は、3～4台の芯出し作業で習得可能と判断。ただし、システム各種機能を最大限活用するには、更なる習熟度向上が必要。今後レーザーシステムの習熟度向上に向けた取組みを検討される。

3. レーザーボアアライメント(センタリング)

3.1 従来のセンタリング法:ピアノ線、ダミーシャフト

タービン据付時やパーツ更新時には、運転時のトラブル防止（回転翼の接触など）やタービン効率向上のため、タービンロータポジションに対し、ダイヤフラムやパッキンなどのタービン内部フローパーツを精密にセットするセンタリング作業が実施される。センタリング作業には、従来、ピアノ線やダミーシャフトが多く使用されてきた（図9）。

ピアノ線による作業は、ツールがシンプルである（ピアノ線、ピアノ線設置ベース、錘、インサイドマイクロ

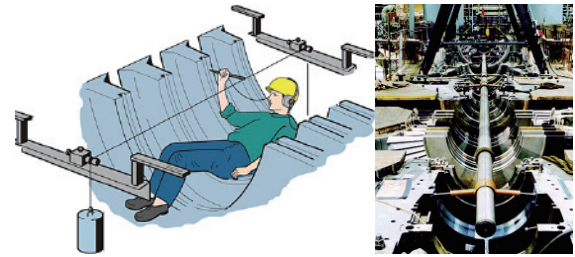


図9 ピアノ線・ダミーシャフト⁽¹⁾

メータ）といったメリットがあるが、その一方で、次のようなことが課題としてあげられる。

- ①ピアノ線をロータポジションに精密にセットしなければならないため、初期のセットアップに経験と時間を要する。
- ②測定には経験を要する。経験を積んだ技術者でないと、信頼性の高い測定結果を得ることが難しく、状況によっては確認のため2人で同じ箇所を重複して測定することがある。
- ③ピアノ線が重さで撓むため、ピアノ線の撓み補正が必要になる。
- ④測定結果（生データ）はまず手書きで記録され、計算によってポジションが求められるため、記入ミスや計算ミスなどのヒューマンエラーが発生する可能性がある。
- ⑤一度セットすると基準となるピアノ線に触れる事ができないため、センタリング中は、他の作業を同時平行で実施することができない。また測定の結果、修正が必要となった場合でも、全ての測定が終了し、ピアノ線を撤去した後でなければ修正作業に入れず、また修正が完了しても、ピアノ線を再設置するまでは、修正が正しく行えたのかの確認ができない。修正が上手くいかなかった場合は、その作業を繰り返す必要がある。

こういった問題点を改善するため、海外では、レーザーアライメント計測が過去より導入されている。

3.2 レーザーアライメント法

ピアノ線の問題点を改善するため、ドイツのプルーフテック社により、タービンレーザーアライメントシステムCENTRALIGN[®]が開発された。

3.2.1 レーザーアライメントシステムの構成

システムは、レーザー発射器、測定センサ、コントロールセンサ、測定ブラケット、レーザー/コントロールセンサブラケット、コンピュータで構成される（図10）。

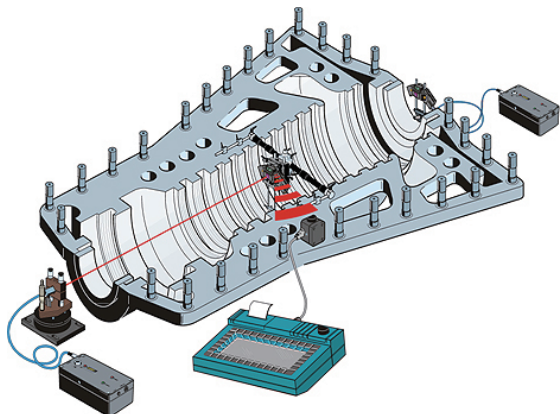


図10 レーザーボアアライメントシステム構成⁽¹⁾

レーザーはクラス2の可視レーザーを採用しており、最大で40mの距離まで測定が可能である。測定センサは、5軸センサを採用しており、2面の検出面と角度センサにより、各測定点において、X、Y座標、水平角度、垂直角度、回転角度の5データを得ることができる。センサの分解能は1μmであり、精度のよい測定が可能である。測定ブラケットは、内径150~7,000mmまで対応の大口径ブラケットが用意されている。コントロールセンサは、最も遠い箇所を設置され、測定中のレーザードリフトや、その他物理的要因によるレーザーの移動を監視し、必要に応じて測定値を補正したり警報を出したりする。また、測定はピアノ線の3点（左・右・下）に対し、7点以上（約30°毎）測定し、その測定データよりボアの中心が算出されるため、測定物の表面状況などの影響も除去することができ、かつ測定品質に対する統計データ（標準偏差）なども示されるため、測定箇所の異常や測定ミスについても測定中に把握し、エラーを防止することができる。

3.2.2 測定手順

- ①システムセット：レーザー発射器およびコントロールセンサをブラケットでタービンケーシングまたは軸受け台の外側に固定する（写真4）。また各測定対象箇所の軸方向の距離をコンピュータに入力する。必要に応じてロータの撓み量や油膜を考慮したオフセット値なども入力する。
- ②レーザー調整：基準面2箇所（油切りなど）において、レーザーの調整を行う。調整はスケール/メジャーを用いて行うが、ピアノ線計測のように厳密にレーザーの位置をロータポジションにセットする必要はなく、その精度は基準面中心位置に対して±1mm程度におさまればよい。



写真4 レーザー取付状況

- ③基準面での測定：基準面2箇所において、まず測定を実施する。それにより、レーザー光線と基準面中心の位置関係を正確に掴むことができるため、コンピュータ内でロータポジションを計算することができる。そのデータを基に、各測定点において、レーザー光線と測定ボア中心の位置関係から、ロータポジションとボア中心の位置関係を知ることができる。
- ④各測定点の測定：計測が必要なポイントを順次測定していく。結果は垂直（上下）および水平（左右）方向別々にグラフならびに表形式で表示される（図11）。
- ⑤内部パーツ修正：測定の結果、修正が必要な場合は修正を行う。修正量は、調整方式に応じてシステムで自動計算される。レーザーは、ピアノ線やダミーシャフトのようにタービン内部の物理的障害とならないため、測定しながら修正作業を実施することができる（写真5）。また、その修正結果も即座に計測確認し、修正結果を評価検討することができる。

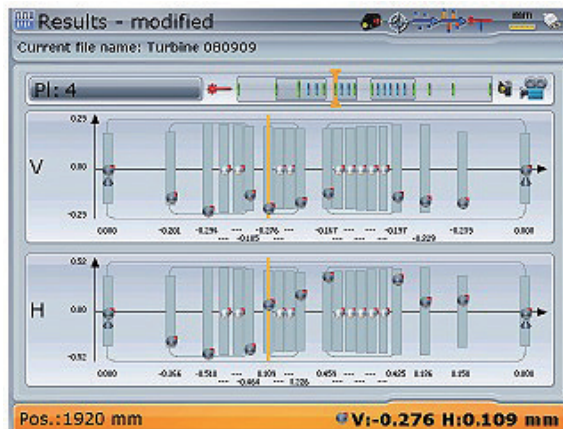


図11 計測結果表示画面



写真5 修正作業風景

3.3 実機への適用事例

3.3.1 日本原子力発電(株) 東海第二発電所

精度向上と作業時間短縮を目的とし、海外では広く活用されているレーザーアライメントを、国内で初めて日本原子力発電(株) 東海第二発電所の1,100MW蒸気タービン(GE製) 高圧車室のダイヤフラム更新工事におけるTops-on, Tops-off計測に適用した。今回は、その測定精度と測定時間差を確認するため、従来のピアノ線による計測作業も平行して実施された。(作業風景、写真6)



写真6 計測作業風景
(東海第二発電所 左Tops-off, 右Tops-on)

(1) 測定時間比較

図12にレーザーシステムならびにピアノ線による測定時間の比較を示す。先述のように、ピアノ線計測では、ロータポジションにピアノ線を精密にセットしなければならず、そのセットアップに約2時間を要した。それに対し、レーザーシステムでは、今回、ピアノ線用のブラケットを取り外すことができなかつたため、通常の設定位置に取り付けができず、取り付け場所の設定に若干時間を要したが、実質約20分で取り付けならびにレーザーの調整が完了した。

次にピアノ線の測定では、ダイヤフラムなど7箇所 の測定に90分、レーザーシステムでは、基準面の計測ならびにダイヤフラムなど17箇所 の計測に120分を要した。測定箇所数が異なるため、仮にピアノ線において、7箇所 の計測と同じスピードで残りの8箇所を測定したとすると、トータル約310分(レーザーでは140分)となり、レーザーシステムでは、ピアノ線計測の約半分の時間で計測できることが確認された。また、パッキンなどが挿入され、インサイドマイクロメータでは先端の設置箇所が狭くて測定ができなかつた箇所においても、測定治具の形状の違いにより、レーザーシステムでは測定でき、レーザーシステムの適応範囲が広いことも確認された。また今回、ダイヤフラムの位置調整はされなかつたが、調整およびその確認までとなれば、海外の適用事例をみても、さらにその時間短縮効果が大きくなることが想定される。

(2) 測定精度比較

Tops-offとTops-onそれぞれで、ピアノ線とレーザーシステムの測定結果が比較された(図13, 14)。

Tops-offの測定では、垂直方向で最大7/100mm(平

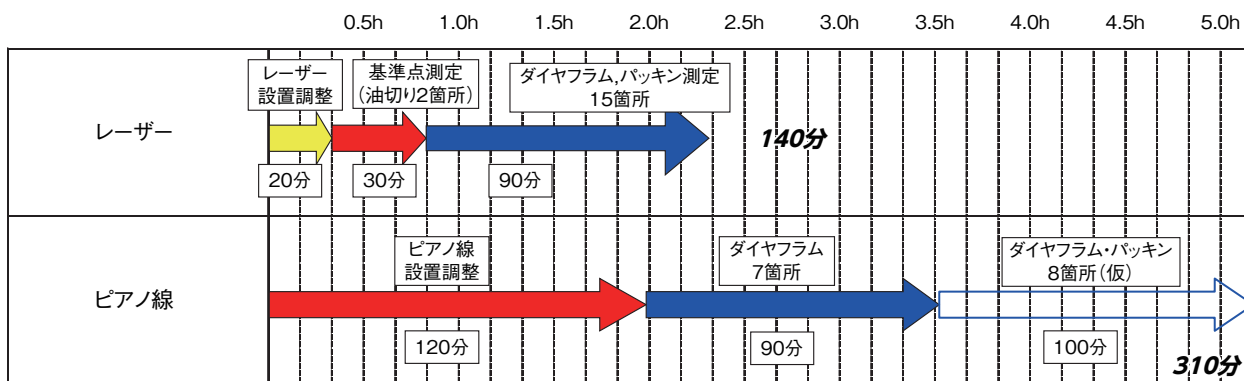


図12 レーザー方式とピアノ線計測の計測時間比較

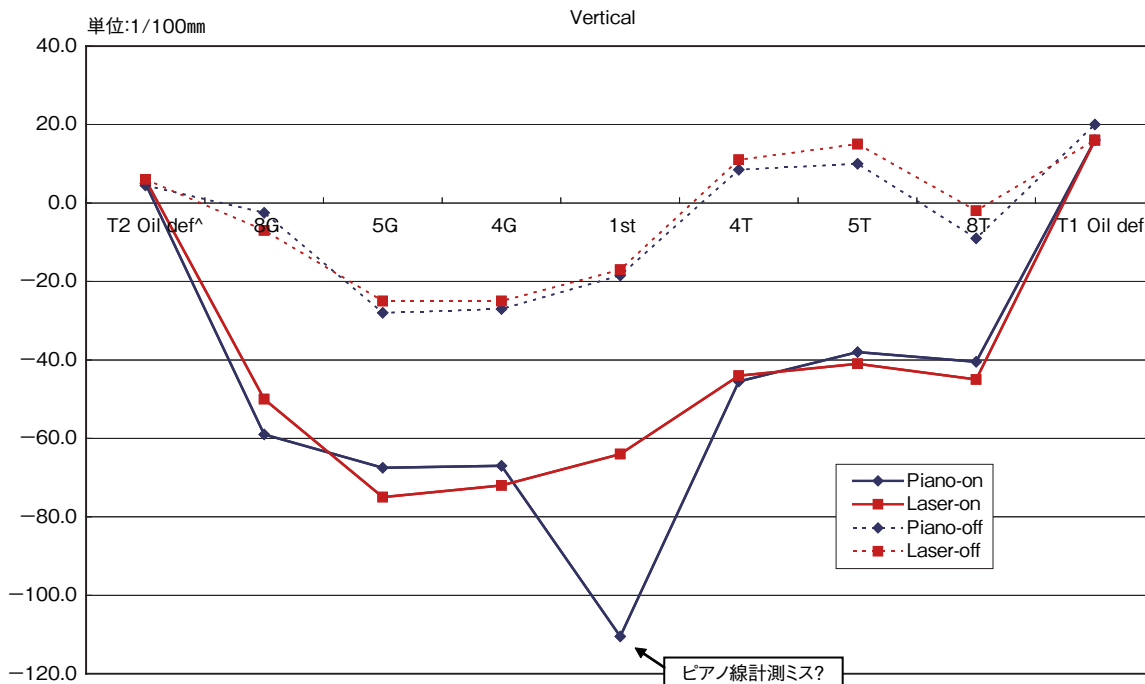


図13 レーザー方式とピアノ線計測の測定値比較 (垂直方向)

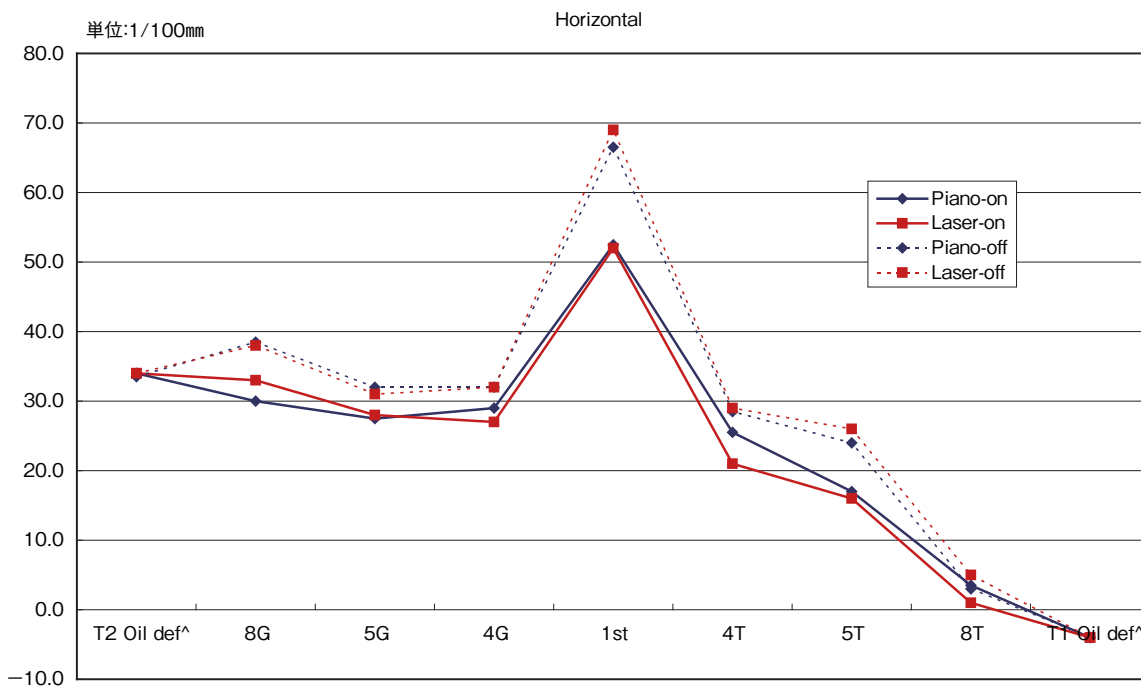


図14 レーザー方式とピアノ線計測の測定値比較 (水平方向)

均3.8/100mm), 水平方向は最大で2.5/100mm (平均1.1/100mm) の測定値の差が見られた。Tops-onの計測においては、垂直方向のピアノ線の計測において、Tops-off/onの変化量から考えるとエラーと思われるデータが存在した。その点を除外すると、垂直方向は最大で9/100mm (平均4.5/100mm), 水平方向では、最大

で4.5/100mm (平均2/100mm) の差異が見られた。

第三者的な計測を実施していないため、精度の客観的な判断は困難であるが、差異は垂直方向に対して大きく見られるため、ピアノ線の撓み補正とレーザーの直進性によるものや、レーザーシステムでは、7点(約30°毎)のデータから算出されているのに対して、ピアノ線は左・

右・下の3点のみから位置が算出されているため、ダイヤフラムの形状（円/楕円）や表面状況の影響を受けやすい点などが差異の生じた原因として考えられる。

またレーザーシステムでは、測定生データと算出される統計データより、測定箇所の形状異常（円/楕円）や表面異常も把握できるので、より信頼性の高いデータを取得することができる。

4. 終わりに

本事例では、レーザーアライメントシステムを実プラントに適用することで、シャフトアライメントやセンタリング作業の大幅な作業時間短縮が期待できることが確認できた。また、レーザーの直進性やコンピュータ化さ

れた計測により、計測間距離が離れている場合でも精度よく計測ができる上にヒューマンエラーも防止でき、かつ測定データの品質を客観的に確認できるため、より信頼性の高いデータが取得できることも確認された。

さらに、今回作業時間短縮のさらなる効果として、作業員の方々の安全性向上（深夜残業や不休作業がなくなる）といったメリットも見られた。

近年の定期検査期間短縮や稼働時間の延長・性能向上といった課題に対し、本事例が皆様の課題解決の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) ドイツ ブルーフテック社技術資料