

測量から、アライメントを崩す要因探索のための変動・振動測定まで

FROM SURVEY TO FLUCTUATIONS AND VIBRATION MEASUREMENT FOR SOURCE OF BRAKE ALIGNMENT

松井佐久夫
Sakuo Matsui
RIKEN

Abstract

The two-dimensional program for the network survey using Schreiber method is improved from BASIC language to Excel VBA. This program can draw the relative error ellipses. The survey simulation is useful also for estimating the environmental conditions including laser tracker performance. The drill with a three-step countersink is convenient for making floor survey adapters. A data acquisition system such as Keithley 2701 and Pt100 sensors were used for temperature measurements with a resolution of 0.001 degrees. Spectron's electrolyte tilt sensors are small and capable of precise measurements and measuring instruments were made of these sensors with amplifiers. It is convenient because the analog output from various sensors can be measured simultaneously with a scanner-equipped DMM. Inexpensive dynamic coil geophones such as the GS-11D are sufficient for measuring mechanical vibrations, rather than expensive servo-type one. The dominant mirror was determined by looking at the coherency between the synchrotron radiation and the vibration of the several mirrors.

1. はじめに

今回の発表では加速器の測量・アライメントから始め、変動要因の探索の測定まで、個々の測定結果より測定器やセンサーに重点を置き、経験含め報告する。加速器学会で行った細かな報告は年度のみ()内に記す。

2. 測量

SPring-8 の建設で測量の担当となり経験のない中で教えてもらったり本を探したりでスタートした。大きな加速器でかつ要求精度も当時の通常の測量精度を超えていたため日本でも所有施設は少なかった距離計 ME5000 や、角度測定にセオドライト T3000 2 台と高さと比較測定する N3、測量機器を基準点の真上に設置するため真下を精度よく見る鉛直器 NL など購入し、多くのメンバーで測量した。セオドライトや N3、鉛直器はアライメントにも使用する基本的な機器であったので、自分たちで測量したことはその後のアライメントにスムーズにつながった。実際、ME5000 も XFEL の直線部での測量、リングの屋根の伸縮、GPS との比較などしばしば使用している。

2.1 単路線から網平均計算へ

伊能忠敬の頃でも測量値の修正はしていたが単路線で計算がなされていた。その後距離の精度が上がり、基本は3角測量から3辺測量に移り、距離と角度が網状に測定され最小二乗法で点の座標を計算する『網平均計算』に進歩してきた。角度の精密測定は難しいので、円形加速器では、かわりに垂線の距離専用の測長器とインバールワイヤ等を用い『星形測量』がなされてきた。[1]

2.2 網の硬さ

測量とは組まれている各点の座標を求めることである。

網の誤差をイメージでとらえるために、角度や距離の線を木の棒におきかえる。距離の誤差は棒の伸縮しやすさ、角度精度は棒と棒の角度の変わりやすさに相当する。

網の硬さはこの寄木細工の外力による変形しやすさに相当する。Figure 1(b)と(c)で、測量機器の誤差が同じなら幅の長さが網の硬さに効くことが理解できると思う。

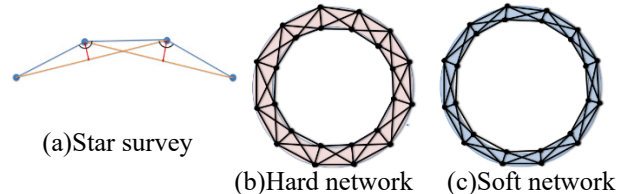


Figure 1: Control networks for survey.

2.3 網平均計算

距離と角度の測定値から座標値は計算される。回転の自由度を抑制するために例えば反対側の点の一軸のみを固定する、というように先に座標値を固定する適当な既知点を設ける。その他の点は近い値の初期値を与え、測定値からのずれの二乗和を最小にするように初期値をずらす。収束まで繰り返す。既知点を設けず、全体に初期値に近い値に収束させる方法もなされてる。

2.4 網平均計算の VBA プログラム

教科書に、2 次元の標準的な測量計算の方法が解説とともに、BASIC プログラムで書かれていた。[2] これを基に改良を進め Excel の VBA に書き換えた。加速器では滑らかにつながが基本なので誤差楕円、相対的な誤差楕円も図示できるよう追加した。(報告 2015)

2.5 シミュレーションの2つの用途

新しい加速器を作る際、基準点の必要な精度の確保

matsui@spring8.or.jp

に最適な測量網を決めるシミュレーションは欠かせない。
また、網平均計算では距離と角度の誤差の設定値により、結果も変わる。より良い測量環境の実現はもちろんだが、カタログ性能だけの設定ではなく、ターゲット含む周囲の環境を含めた測量の実力を知るためにシミュレーションでデータ作りが必要になる。

2.6 レーザートラッカー(以下 トラッカー)の問題

Figure 2(a)は最初購入したトラッカーSMART310 で、距離 d と二つの角度(方位角 h_z 、天頂角 vt)から、追尾できるターゲットの位置を計算する3次元測定器である。

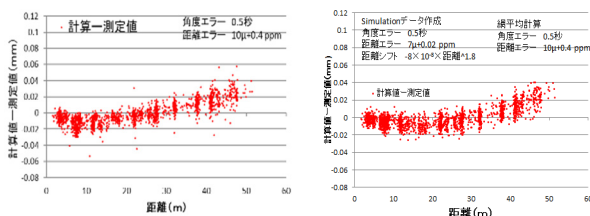
SPring8 でも Fig. 2(b)のレールで干渉計 HP5527A を用い距離測定 of the checkを行った。シリアル番号 No9 と初期の製品のためか波長の間違いが判明した。



(a)Laser Tracker (b)Laser interferometer HP5527A on the 20m-long rail

Figure 2: Laser Tracker and rail for checking of distance measurement.

2018年8月ライカの AT40xシリーズで蓄積リングを測量したデータを岡安氏からいただき、水平面のみで網平均計算した。計算結果から求まる距離と実測とのずれを横軸距離にプロットした。普通はプラスマイナス均等に分布するが(前田氏報告 2011)、Fig. 3(a)のように30m付近で逆符号に系統的にずれた。 $-8 \times 10^{-8} \times (\text{距離})^{1.8}$ を加えたシミュレーションのデータで同様の網平均計算すると Fig. 3(b)のように傾向がよく一致した。



(a) Using actual measured data (b) Using simulated data

Figure 3: Distribution distance versus differences between calculated and measured.

この AT40xシリーズの距離の測定方法は距離計 ME5000 と同じで、偏光面を高速に回転ターゲットまでの間に整数個のモジュレーションの波を作りその時の周波数から距離を計算する方式である。[3] Figure 2(b)の干渉計でチェックすると理由は少し明らかになると思う。

AT40x は設置時にヘッドの傾きを水平に調整するのに対し、API 製 T3 では $\pm 0.2^\circ$ 以内であればそのまま測定できるとされている。しかしワイヤーの水準器を載せてトラッカー内部の値と比較すると 0.23% のずれが観測され、デジタルレベルの測定値からも大きくずれていた(木内氏報告 2012)。大きな傾きの絶対値の正確な測定は難しい。T3 で傾斜を水平に近づけるには Fig. 4(c)の三

脚の床に接する部分のねじで調整する以外にない。

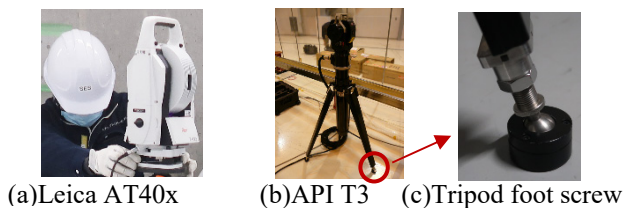


Figure 4: Levelling of laser tracker.

2.7 床の測量基準

SPring8 の床の基準は金属プレート上のシールに打ったポンチで、鉛直器で上げて使っていた。現在ではトラッカーで測量することが多いため、球ターゲットを3点で受ける座を床に埋め込むことが多い。

この場合 Fig. 5 のように蓋を球の座から離すためにはぎ繰りも3回必要となる。竹迫氏により3段の座繰りのダイヤモンドドリルで掘削する会社((株)ティ・ビーダイヤモンド)が手配できた。3段の座繰りの時間はわずか3分であった。さらに3点で受けるアダプターも既製品の Hubbs よりずっと安く製作できるメーカーも見つかった。

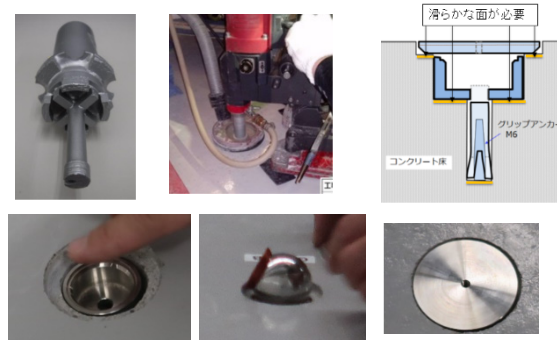


Figure 5: Making survey monument in the floor.

3. 温度測定

これまでの経験から、アライメントを崩す最大の要因は温度である。温度がわかれば多くの事象は説明できる。

3.1 測定器

最もよく使用しているのは Keithley の 2701 というマルチプレクサのモジュールが2枚入る 6.5桁デジタル(DMM)である。Excelにデータが取り込める便利なソフト ExceLINX が付属している。実験レベルでは以前から RS232C で Keithley 2700 や HP の 34970A でデータ収集していたが、データベース用にはイーサネット対応が求められたので当時は Keithley を使うほかなかった。



(a)Front panel (b)Rear panel
Figure 6: Data acquisition system Keithley 2701.

4線式温度センサー1点当たりの価格はモジュール2枚、計40点測定する場合、1.2万円(Keithley 2701、モジュール7708 2枚、2010年当時)となり、3線式温度センサーは使えないが温度専用の測定器より低価格になる。(標準温度計用 Pt100 には専用の測定器 Fluke Model 1502A 精度 0.006°C (0°C) 使用)。

100V 電源の使用が難しい場合は日置電機(株)製のデータミニを使用してきた。分解能は 0.1 度だが単4電池2本で長期間測定できる。

温度分解能が 0.01 度で Pt 4 線式でも 3 線式でも使用できる日置のロガー(例 8421)も使用している。

XFEL では制御グループで開発したイーサネットケーブルで電源も送る POE の温度計 E069 も使用されている。

3.2 温度センサー

以下のような理由で主に 4 線式 Pt100 を使用した。

- 抵抗値を測定するだけなので精度が出やすい。
- 検査成績書の 0°C、100°C での 0.001 Ω (0.0025deg 相当) までの記載から温度の絶対値校正が可能。
- 長期間(〜30年とか)の安定性 地中、壁の中、交換困難な状況でも安定と考えられる。[4]
- 磁石などへの貼付けタイプ(厚さ 0.2 mm)も可能。
- 距離 150 m でも蓄積リングでは、安価なシールドなし直径 0.18 mm 7本 4 導線ケーブルで測定できている。センサー1個約1万円で、それほど高くない。熱電対の場合、補償導線のため長くなると割高になる。

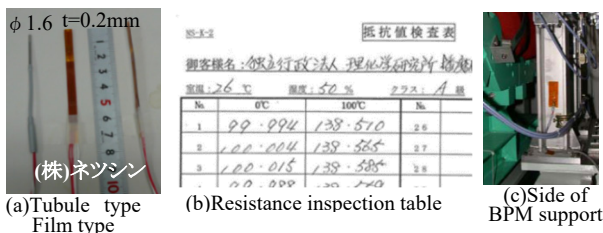


Figure 7: Pt100 sensor.

3.3 リング収納部内測定箇所

通路側の壁 高さ 1.5 m 間隔 10 m。・ファンコイル 8 系統各系統の最初と最後のファンの吹き出し口。・給気ダクト 各系統1か所。

これらの温度は常にデータベースに上げられており、いつでも過去、現在のデータを見ることができる。

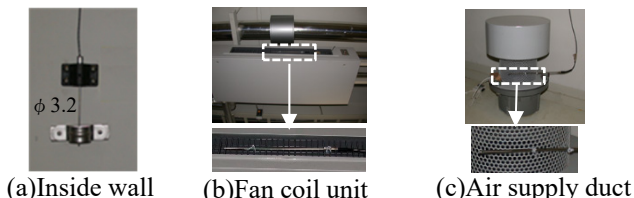


Figure 8: Pt100 sensors in the tunnel.

3.4 分解能

測定時間にもよるが 0.001 度程度が実現できている。0.01 度の分解能の例として Fig. 10(a)に、架台に固定されている BPM のサポートの通路側(緑)と逆側(紫)の温度とそれらの差(赤)、そして高分解能ステアリング磁石の電流値(青)を示している。温度差と電流パターンが似

ており、補正はエラーキックではなく BPM 自身の変動が原因か、の議論につながる。

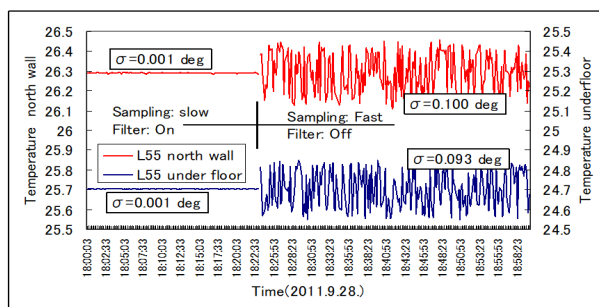


Figure 9: Temperature fluctuation depending on sampling speed using DMM and shielded 4-wire cable Pt100.

Figure 10(b)は DMM を用いた測定なら分解能は 0.01 度より小さく、さらに比較しやすいことを示している。

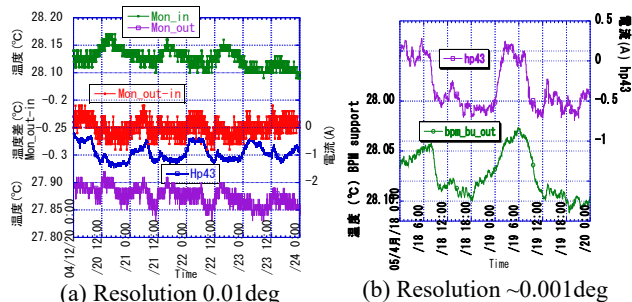


Figure 10: Comparison between BPM support temperature and current of correction magnet.

3.5 負荷と空調冷却能力のアンバランスによるドリフト

SPring8 のシンクロロンから蓄積リングまでの BT 系の後半の温度センサーによると、運転が始まると負荷は小さいのに対し、通常のリングのファンコイルと同じ水温で吹き出すため約1か月かけて温度が下がるのがわかった。

4. 環境測定

4.1 湿度

温度に比べ与える影響は少ない。しかし、光ファイバーは影響を受けることがわかり、ファイバーが通るケースの中に湿度のセンサーを入れている。リングではファイバーは保守通路上部にはってあり、たしかに RF の位相と湿度をくらべると明確な相関が確認できた。センサーは日置製の Z2000 で出力電圧から湿度に換算している。

リングの実験ホールでは日置製データミニ17か所で湿度を測定している。温度と異なりその時の外気の状態が強く反映しており場所による差はあまり見られない。

4.2 水位

リングの収納部2か所に孔を掘り、床下 1.2~1.5 m のところに浮き+磁気歪式センサーを設置している。意外に浅いところに水面がある。屋外でも建設前に作った井戸にパイプを立て圧力式のセンサーで記録している。

さらにアンダーパスの近くには深さ 10 m の井戸がありここは大きく変化する。水位により床レベルが上下し軌道の変動を引き起こすとの相関が報告されている。[5]



(a)Outside well (b)Inside well (c)Water level of (b)
Figure 11: Measuring water levels in the wells.

4.3 亀裂変位計

建設関係で使われている亀裂変位計や屋内でも使えるパイ型変位計がある。Figure 12(c)のように4つの抵抗を上面と下面に張り付けたひずみ計でブリッジの測定回路で測定する。亀裂変位計 KG-2A に定電流回路を用い、出力を直接 DMM で9年間測定したが安定していた。

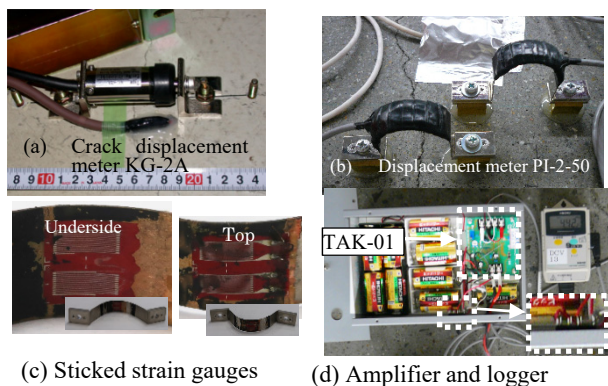


Figure 12: Crack sensors made from Tokyo Measuring Instruments Lab. and homemade logger.

4.4 亀裂変位測定ローガー

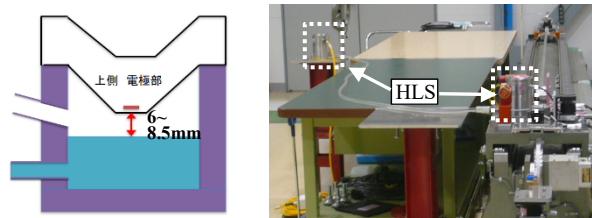
(株)東京測器研究所から安価なブリッジ測定回路 (TAK-01) が販売されている。トリガー付きの日置のデータミニシリーズ電圧ロガー3645 で一定時間ごとにリレー (OMRON G6A-274P 5vDC) を駆動しアンプに電源を供給し、ブリッジに定電圧を加え、出力を記録する。トリガー時だけの電源供給なので電池で賄える。レンジ±2 mm のパイ型変位計 (PI-2S-50) だと、1マイクロの変位に 0.2 mV の出力が得られるので、データミニ 3645 の最小電圧 0.01 mV は 0.05 ミクロンに対応する。(報告 2007)

4.5 HLS (Hydro Leveling Sensor)

昔から使われている連通管である。ESRF は砂州の上にあるため川の水位で架台のレベルが変化する。そのレベルをリアルタイムで測定しジャッキで架台調整するために開発されたのが HLS で現在は Fogale(株)が製作・販売している。上の電極と下の電極(水面)で静電容量から距離を算出している。SPring8 ではレンジが 2.5 mm(電圧出力 10V)の製品を多用しており、6.5 桁の DMM だと実質の分解能は 0.1 μm 程度まで実現できている。

主な用途はレベル変化である。蓄積リングの 3 か所は床に近い壁に、架台上には1セル分、SACLA では加速器棟側溝 400 m、光源棟床上 200 m に設置している。

ドイツでは超音波を用いるタイプも開発されている。また、地球物理では浮きで水面を測るものもある。



(a)HLS cross section (b) Moving stage using two HLS's and WPS

Figure 13: HLS and 4m movable stage.

4.6 WPS (Wire Positioning Sensor)

ワイヤの位置を静電容量で求めるセンサーで同じく Fogale 社から販売されている。1次元と2次元のタイプがある。1次元のタイプはレンジが 2.5 mm で出力 10 V あり丁寧に測ると 0.1 μm 程度の分解能が得られる。

金属ワイヤを用いる場合、例えば Nilaco から購入すると、巻き癖がついているので注意が必要である。張っても巻き癖が見られないよう処理された線は NGK から販売されている。[6] ケブラー線でもうねりは観測されている。

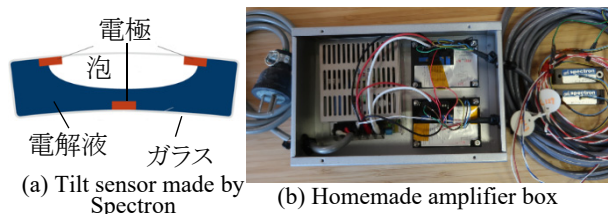
4.7 HLS と WPS を用いた 4 m レール

Figure 13(b)のように、4 m のレールの上にワイヤを張り、移動できるステージの上面にはHLSと WPS を設置し、傾きは Wyler の水準器で測定した。固定したHLSとの間は滑らかに机の上を移動できるチューブでつないだ。複数の WPS でワイヤの特性を調べ、また HLS により安定した上下の基準線を得ることができた。[6] (報告 2016)

4.8 傾斜センサー

電解液に泡を入れ、中央から両側の電極までの抵抗の変化で傾斜を測定するセンサーが Spectron 社から販売されている。小さいが高精度の製品もあり温度が安定なら地球潮汐の傾斜も測定できる。(報告 2013) Figure 14(b)のアンプ (MUPI-3) 出力を DMM で測定でき、リングでは地下の排水パイプの上のベースプレートの傾きが気圧の影響を受けているなど観測されている。

小型 (1.6×1.6×5 cm) で使いやすく、石架台がそる様子も測定できている。このセンサーを組み込みさらに高精度な傾斜計が AGI 社から販売されている。



(a) Tilt sensor made by Spectron (b) Homemade amplifier box

Figure 14: Tilt sensor and homemade amplifier box.

4.9 デジボルでアナログ電圧をまとめて測定

キックが発生すると COD が変化する。逆に COD の変化から各場所のキックを計算できる。ある一日のキックを横軸全周 144 か所、縦軸 30 秒ごと 24 時間で色グラフにすると、12 時とかで明確に変化している箇所が数多く見られた。その中の一つ SSBT 系の上付近に、ベースプレート上に傾斜計、磁石の上にワイヤセンサー (WPS) を

置き、ファンからの風速、風が当たる壁の温度 (Pt100)、100 V 電源電圧など、温度とアナログの電圧はスキャナー付きの DMM で同時に測定した。(報告 2006)個別にデジタルでデータ収集するより時刻も揃い都合が良い。

5. 振動

5.1 多チャンネル FFT

振動の測定には多チャンネル FFT が便利である。同時に測定する、ということが振動では重要で、1個1万円程度(例えば GS-11D)の動コイル型ならかなりの数をそろえることができる。現在、(株)小野測器の Gradu 24 ビットで最大 12ch で測定を行っている。

5.2 動コイル型振動センサー

長い間サーボタイプ速度出力の VSE15D を用いていた。しかしこれは高価な上に使っていると特性が揃わなくなってくるという問題がある。大きさも Fig.15(a)の GS-11D の直径 3 cm 高さ 3 cm にくらべかなり大きい。

機械的な振動では 5 Hz~200 Hz くらいでよく、必要な固有振動数 2 Hz の HS-1 を使えば十分と思われる。

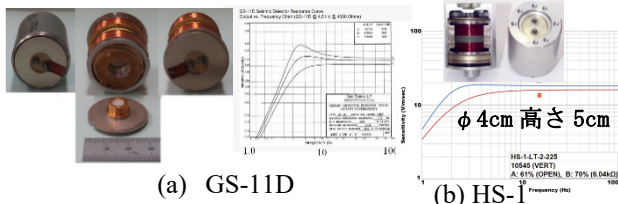


Figure 15: Geophone made by Geospace.

5.3 伝搬経路の特定と大型ポンプの位置

SPring8 の蓄積リングでは収納部への振動は調査の結果、機械室からの冷却水より床面の伝搬が支配的であると判断できた。(報告 2014) 最も大きな出力のポンプは機械室の中で収納部に最も近い位置にあり、磁石架台まで 10 m しかない。同じ機械室でも遠い方に置かれておれば収納部の振動はより小さかったと推測される。

5.4 振動源特定のためコヒーレンス測定

放射光の観測まで多くのミラーを使用している場合、Fig.16(b) のように、放射光と各ミラーの振動のコヒーレンスをみることで揺れの主な原因を特定できた。

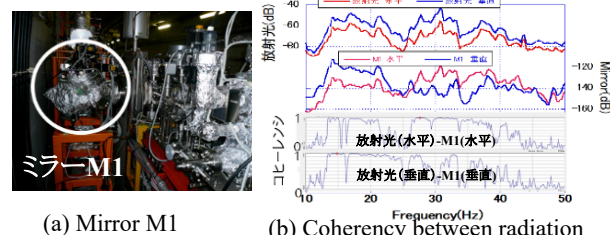


Figure 16: Coherency measurement.

6. 加速器アライメント国際会議

(International Workshop on Accelerator Alignment)

第1回が SLAC で 1989 年に開かれ、その後 ほぼ2年に一度 ヨーロッパ、アメリカ、アジアで持ち回りで開か

れてきた加速器のアライメントに特化した国際会議である。ここに行くと世界の加速器のアライメントの状況を俯瞰することができ、また比較的こじんまりしていて委員同士のつながりもできる。日本では過去 KEK で2回、Fig.17 のように SPring8 で1回(2002)開かれた。人数は 100 人ほどで今年 2022 年 CERN で 10/31~11/4 で開催される。

IWAA 2022, CERN (31 October 2022 - 4 November 2022):

[Overview](#) · [Indico](#)

過去のプロシーディングを見ることができるサイトもある。

[Past Conferences](#) | [International Workshop on Accelerator Alignment \(stanford.edu\)](#)



Figure 17: Banquet at Himeji Castle Hotel in IWAA2002.

7. まとめ

- 測定環境含むトラッカーの実力はシミュレーションで評価できる。
- 3段座繰りのダイヤモンドドリルで簡単にターゲット台の床基準を作成できることがわかった。
- スキャナー付きデジボルなら異なる物理量もアナログ電圧でまとめられ、温度も4線(Pt100)なら測定でき、距離 150 m でも直径 0.18 mm 7 本の芯線で分解能 0.001°C 程度が実現できる。時刻も揃うので便利。
- 4つの歪ゲージを用いる変位センサーをブリッジで安定に測定できた。
- トリガー付きのロガーを用いれば電池式でも亀裂など変位を長期間測定できた。
- 上下の向きには重力が使えるので HLS センサー2台で 4 m の直線をつくれた
- 振動測定で~200 Hz 程度までなら加速度センサーではなく動コイル型の速度センサーが安価で使いやすい。
- 床の振動測定の結果 大きなポンプは機械室の中でも収納部までの距離が遠い場所に設置するのが重要。

参考文献

- Endo.K: 『Precise Alignment of Magnets in the TRISTAN Electron Ring』, KEK Internal 86-12, August 1986.
- 細野武庸 他: 『測量叢書 第1巻 改訂版 基準点測量』, 日本測量協会(1992).
- https://www.swisstek.com/images/wild_leica/Leica_Absolute_Tracker_AT401_white_paper.pdf
- 松山裕: 『実用 温度測定』, (財)省エネルギーセンター(1998).
- K. Tsumaki *et al.*, “地下水位の SPring-8 蓄積リング電子軌道に与える影響”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Japan, Aug. 2-4, 2006, pp. 947-949.
- K.Fukami *et al.*, “Performance verification of a precise vibrating-wire magnet alignment technique for next-generation light sources”, Review of Scientific Instruments 90, 054703 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5086505>