

# 測量シミュレーションとデータの比較 A Comparison Between The Simulation & Data In The Accelerator Control Survey

岡安 雄一 @ KEK

## 1. 概要

- 2020 年より全長約 650 m の KEK 電子陽電子入射器に全系測量を導入 [1].
- 網解析で得られる測量誤差分布は、周期性のあるリング型加速器と異なり、特異な分布を示し、再現性がある。器械点と共通基準点の配置に改善の余地あり。

(↑ : 3 器械点以上により重複測量される基準点の意)

### 目的 :

- 全ての機器が同一平面上を基準に配置 (測地線の影響なし)、**空調等の外乱なし**で実測量を可能な限り再現した測量シミュレーションを Hexagon 社 Spatial Analyzer Ultimate (SA) で構築 [2].
- 器械点と共通基準点を最適化し、測量誤差の低減を図る。
- 一連のシミュレーションに必要な情報を開示し、**誰もが簡単に測量シミュレーションが可能になることを目指す。**

## 2. 測量実データの解析

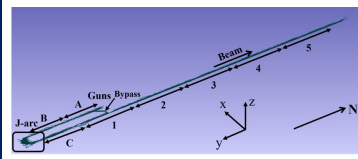


図 1: KEK 電子陽電子入射器における全系測量。方角・セクター・座標系の定義も追記した。

表 1: セクター毎の長さ, ユニット数, 磁石数, 参照基準点数

Sector name	A	B	J-arc	C
Length [m]	48.0	76.8	36.1	81.6
# of units	4	8	1	8
# of magnets	65	14	35	18
# of monuments	15	19	10	21

Sector name	1	2	3	4	5
Length [m]	83.3	92.9	69.9	79.5	76.8
# of units	7	7	8	8	8
# of magnets	74	90	20	16	34
# of monuments	32	32	17	19	20

### 使用する測量機器 :

- Leica AT401 レーザートラッカー
- 絶対距離精度 : ±10 μm, 絶対角度精度 : ±15 μm + 6 μm/m**
- Trimble DiNI 0.3 デジタルレベル
- 0.3 mm/km (往復)**

### 測量 & 解析方法 :

- 各ユニット 1 器械点で基準点をレーザートラッカーで測量。
- A ~ 5 セクターまで移動しながら計 63 器械点で共通基準点を繋ぎながら網測量。
- A ~ 5 セクター間を片道 9 器械点, 往復 18 器械点で 10 点の基準点水準をデジタルレベルで測量。
- デジタルレベルのデータセットを固定点として重み係数を設定し, レーザートラッカーのデータと併せて重み付き網解析。
- 空調は他の作業者の安全を考慮して常時作動。

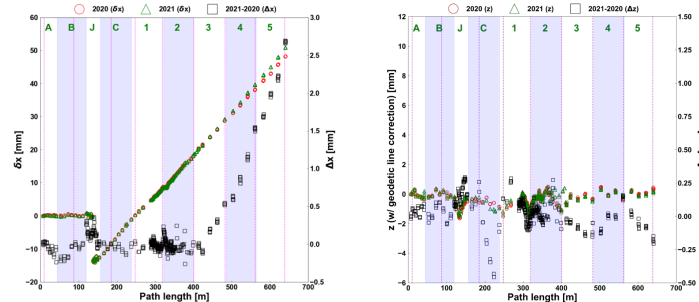
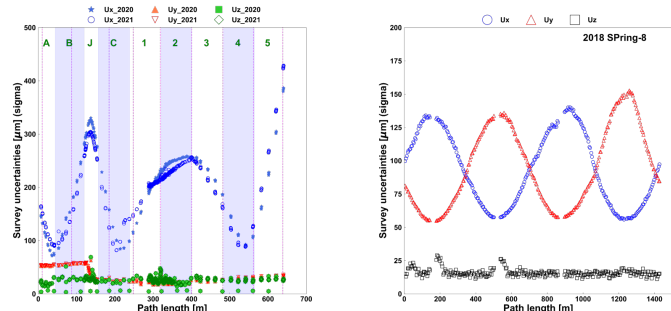


図 2: 設計座標を基準とした基準点の x (δx) 分布 (左) と測地線補正を適用した基準点の水準 (z) 分布。○ と △ はそれぞれ 2020 年, 2021 年のデータで □ は 2021 年と 2020 年の差分。

- x (東西方向) は J-arc 出口から 5 セクター終端にかけて **0.12 - 0.13 μrad の勾配**。
- 2021 年と 2020 年の x 方向の差分は 2 セクター終端 (400 m) 回りから一意増加**。建屋境界と重なることから, 経年変化を監視する。
- 水準は -1.6 mm ~ 0.5 mm の間に収束。



- 図 3: 測量誤差 Ux, Uy, Uz の比較。左は KEK 電子陽電子入射器 (2020, 2021 年), リング型加速器の測量誤差雲 (2D では誤差傾向 [3]) はリング中心から動径方向へ分布。
- ファンパスの入射器では測量誤差はほぼ東西方向に分布。且つ特徴的な分布。**
- 2021 年にバイパス通路に器械点を設置したため, Ux (C ~ 3) で傾向が異なる。

## 3. 測量シミュレーション

### 境界条件 :

- Case 1: ユニット当たりの器械点 1, 参照基準点 2 (実測量と同じ条件)
- Case 2: ユニット当たりの器械点 2, 参照基準点 6 の 2 ケースについて仮想的に網測量・網計算を実施。

### 本報告での検証 :

- Case1 VS. Case 2 で測量誤差は果たして改善されるか?
- Case 1 と実測量の測量誤差比較

### 計算に必要な情報 :

- 全器械点の座標 (レーザートラッカーのみ):  
器械点名, x, y, z  
をリスト化して instrument.txt などの ASCII 形式で用意。
- 各レーザートラッカー器械点で測量する基準点の座標:  
器械点名, 基準点名, x, y, z  
をリスト化して meas.txt などの ASCII 形式で用意。  
レーザートラッカー測量データに相当。  
器械点から基準点までの距離に応じて絶対距離精度・絶対角度精度をモンテカルロで加算。
- デジタルレベル水準データ:  
dini, 基準点名, z  
をリスト化, dini.csv などのカンマ区切り csv 形式で用意。測量データに相当。  
器械点から基準点までの距離に応じて水準測量精度をモンテカルロで加算。
- Measurement Plan (MP) スクリプトファイル  
測量データを読み込み, 網解析を実行。詳細はプロシーディングスを参照。

### 計算で使ったソフト :

Hexagon 社 Spatial Analyzer Ultimate  
※ 廉価版の Spatial Analyzer Professional では MP が使用できないので注意。  
※ その他, 二次元の制限はあるが測量誤差構円を Microsoft Excel Visual Basic for Applications (VBA) で計算するコードは松井氏より無償で公開されている [4].

### 計算結果 :

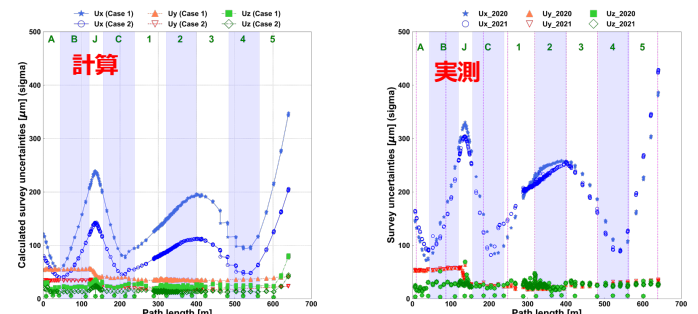


図 4: 計算で得られた測量誤差分布 (左) と実測 (右) の比較。

- Case 2 は Case 1 に比べ, 各ユニット当たりの器械点数 2 倍, 参照基準点数 3 倍。測量誤差 Ux, Uy, Uz いずれも **Case 2 は Case 1 に比べて半減**。
- リング型並みに低減される。**
- 実測 Ux の極大値・極小値分布, Uy の J-arc 近傍のステップ構造, Uz の平坦度までもが **計算で再現**された。
- 一方実測は計算の Case 1 (実測相当) に比べ Ux, Uy, Uz いずれも **~10% 程度大きい**。これは S-pring-8 での実績から **空調の外乱の影響**と判断して概ね差し支えない。

## 4. まとめ

- 網測量・網解析を仮想的に行うシミュレーションを開発, 必要なツールを全て公開し, 誰もが容易に測量シミュレーションが可能となることを目指した。
- 実測の境界条件を可能な限り反映した計算で得られる測量誤差分布は, 実測のそれを良く再現したが, 誤差の大きさについては空調の外乱と考えられる。
- 現状に比べ, 器械点数を 2 倍, 参照基準点数を 3 倍とすれば, 測量誤差は半減することが見込まれる。

[1] Y. Okayasu, "Survey Report For KEK Injector Linac in Tsukuba Campus", Proc. 18th Annual Meeting of PASJ, Aug. 9 - 12 (2021), Online, pp. 618 - 624.  
 [2] Y. Okayasu et al., "Control survey and analysis for the KEK e+/e- injector linac", Rev. Sci. Instrum. 94 (2023) 075107. doi : 10.1063/5.0155651  
 [3] S. Matsui et al., "From Survey to Fluctuations and Vibration Measurement for Causes of Misalignment", 加速器 Vol. 20, No. 1 (2023) pp. 20 - 34.  
 [4] S. Matsui et al., "Adjustment Program of the Horizontal Survey Network with Relative Error Ellipse", Proc. 12th Annual Meeting of PASJ, Aug.5-7 (2015), Tsuruga, Japan, pp.140 - 145.