

高放射線環境下での回転型粒子生成標的監視手法の開発

○武藤史真[#]

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

概要

加速器を用いた素粒子実験においては統計量の多寡が実験の成功を左右するため、ビーム強度増強が世界的な競争になっている。一方で、大強度ビームで発生する放射線もますます強くなり、放射線環境下での機器のモニタリングは困難になっている。J-PARC ハドロン実験施設でも大強度ビームに対応できる回転型の粒子生成標的を開発中であるが、その監視手法が課題である。高放射線環境下での効率的な回転体の監視手法として、変位センサーを使った監視手法を考案・提案している。この手法では変位センサーを標的の近傍に設置するため、高い耐放射線性を持ち、約 30 m もの長ケーブルでの信号読み出しが可能でなくてはならない。この条件を満たす変位センサーを新たに開発し、その運用方法の検討を始めている。

1. J-PARC ハドロン実験施設における粒子生成標的の開発

1.1 J-PARC ハドロン実験施設

ハドロン実験施設は大強度陽子加速器施設 (J-PARC) に付随する素粒子・原子核実験施設である。ハドロン実験施設では、30 GeV まで加速された一次陽子ビームを二次粒子生成標的に照射し、生成した K 中間子、 π 中間子等を用いて様々な原子核・素粒子実験を行っている。実験の統計量増大のためにビームの大強度化が望まれており、それに対応した高い冷却効率を持つ標的の開発が必要である。2022 年現在で使用されているのは間接水冷方式の固定標的である。この標的は 2019 年 11 月にインストールされたもので、加速器の繰り返し周期が 5.2 秒の場合、最大 95 kW までの陽子ビームに対応可能である。2021 年 6 月時点でビーム強度は 64 kW (加速器の繰り返し周期 5.2 秒) を達成し、今後も更なるビーム増強を予定しているが、100 kW を超えるビーム強度には間接水冷方式の標的では対応できない。そこで新しく直接空冷方式の回転円板型標的の開発が進められている [1, 2]。

1.2 直接空冷式回転標的の運転に必要な測定項目

新たに開発している回転標的の概略図を図 1 に示した。回転標的は外縁部が純金、内部が無酸素銅で構成されたドーナツ型の形状をしている。陽子ビームは、外縁部の純金部分に入射され、発生する熱は内部の無酸素銅が効率的に除熱する。回転円盤標的のメリットは、ビームの衝突位置をずらしながら使用することで、熱・放射線の負荷を分散できることである。これにより冷却効率・耐久性が向上し大強度ビームに対応できる。一方で、回転標的の寿命は軸受けの寿命に依存する。通常の耐放射線ベアリングを 150 kW に対応した 200 rpm の回転速度で使用すると約 6300 時間で定格寿命となり、高い頻度での交換が必要となる [3]。そのため、現在開発中の回転標的には He 気体軸受けが使用され、ドーナツ型の穴の部分に軸

受けのシャフトが入る構造である。標的の重量約 40 kg を支えるために、シャフトと円板標的軸受けの間のクリアランスは 20 μm と極めて狭く設計されている。しかし、回転中にシャフトと軸受けが接触すると焼き付きにより即座の復旧が困難になるため、回転標的の偏心度を正確にモニタリングする必要がある。

加えて回転標的の冷却能力を確認するためにも回転速度や熱膨張のモニタリングは必要であるが回転体であることから、従来の熱電対による測定は行えず、非接触で測定できる手法でなければならない。これらの問題を解決する方法として、変位センサーを用いた標的監視手法を考案・提案している。

2. 回転標的監視のための耐放射線変位センサーの開発

2.1 静電容量式の耐放射線変位センサー

非接触型の変位センサーには渦電流式やレーザ式など種々の方式があるが、本開発では高速回転物の振れ測定によく用いられる静電容量式を採用した。図 2 に静電容量式変位センサーのプロープ構造を示した。プロープは円筒状の主電極と、その周りを取り囲むガード電極、主電極とガード電極間を切り離すセラミック絶縁体の 3 部品だけで構成される。主電極底面と標的側面の間には平行な電場が形成され、これにより主電極と標的側面間でコンデンサが形成

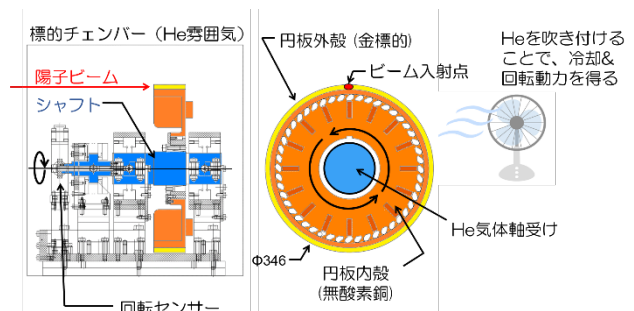


図 1. 直接空冷式回転標的の概略図

[#] fmuto@post.kek.jp

される。主電極側が固定され熱膨張がないとすれば、このコンデンサの静電容量の変化は標的側面の変位量に他ならず、標的の動きを監視することが出来るのである。主電極径をφ15 mm、主電極-標的側面間の距離(変位センサーの測定レンジと考えてよい)を0.5-2.0 mm とすれば、静電容量の変化は0.78 pF-3.13 pFに対応する。数 pF の微小な変化に対して、通常同軸ケーブルは50-100 pF/m の容量を持つため、測定への影響が大きい。加えて、信号ケーブルは直接主電極につながっているため、信号ケーブルと周囲の金属間でコンデンサを構成してしまうと、さらに計測の誤差を生みやすい。そこで、信号ケーブルは同軸ケーブルとし、芯線を主電極に、シールド線をガード電極に接続する。さらに、シールド線には、主電極に印加する電圧と全く同じ電圧を印加することが出来れば、主電極とそこにつながるケーブル全体を等電位のシールドで囲むことが出来る。等電位金属間ではコンデンサを形成しないので、主電極-標的側面間以外の静電容量はキャンセル出来る。

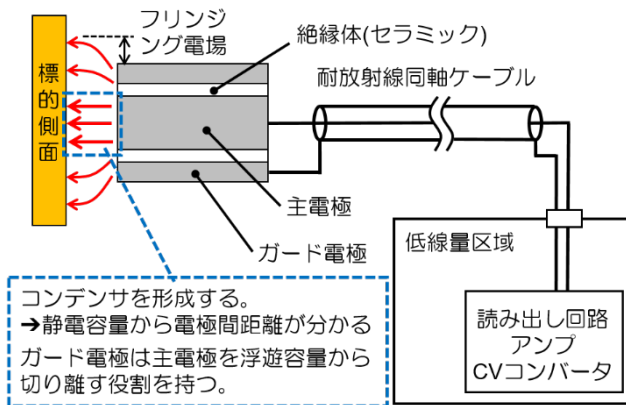


図1. 静電容量式変位センサープローブの構造

2.2 静電容量式変位センサーの読み出し回路

回路設計では、KEKB リングのビーム位置モニターの変位測定を行うために開発された変位センサーの読み出し回路を参考にした[4]。図3に読み出し回路の測定原理を示す。図3のCxが図2で説明した主電極と標的側面で構成されるコンデンサである。変位量xによって変化するCxと既知の静電容量を持つ基準コンデンサC0を直列に接続し交流電圧を印加することで、xに比例した出力Voutを測定する構成と

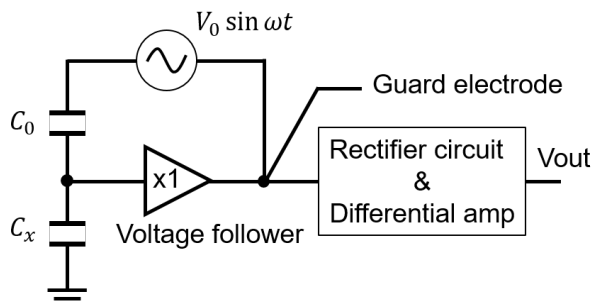


図3. 静電容量変位センサーの測定原理

なっている。交流電源から印加された $V_0 \sin \omega t$ の電圧は C_0 と C_x で分圧される。その電圧をボルテージフォロワを経由して取り出し、ガード電極に印加する。また、取り出した電圧は整流回路と、浮遊容量のオフセットを行う差動アンプを経てVoutとして出力される構成である。理想的なオペアンプを用いれば、Voutは下記のようにxに比例した出力となる。

$$V_{out} = \frac{C_0}{C_x} V_0 = \frac{C_0 V_0}{\epsilon S} x \quad \dots (1)$$

2.3 変位センサーを使った回転標的の監視手法

変位センサーを用いた回転標的の監視手法の概念図を図4に示した。回転標的の半径方向の動きが分かるように、標的の側面に変位センサーを複数取り付けることで、多種の監視パラメータを同時に測定できる監視システムとして機能する。Heガスで満たされた標的容器の中で円板標的が気体軸受で回転している。標的へのビーム照射点から回転方向に90度、270度の場所にそれぞれ変位センサーが設置され、標的側面と変位センサー間の間隔を測定している。図4の左図は、変位センサーで測定する静電容量Cxの理想的な値を計算したものである。このような静電容量の変化を捉えることができれば、標的の様々な状態を読み解くことが出来る。まず、静電容量の周期的な変動振幅から、回転標的の偏心度を測定できる。加えて、標的側面に段付きのような機械加工を施しておくことで、標的が1回転するごとに静電容量が局所的に変動し、その時間間隔から回転周期を測定できる。また、2つのセンサーの出力平均値の差は、標的が回転によって冷却した際の収縮度を意味する。標的Heガスの純度や圧力などの状態については、この状態の変化によって比誘電率が変わるため、二つのセンサーの同期した変化を測定することで評価できる。

このように、1つの測定器でマルチタスクをこなす監視システムを目指しているが、実現にはいくつかのハードルがある。(1)変位センサープローブは回転標的の直近に設置されるため、耐高放射線性が求められる。回転標的周辺では、1次陽子ビーム強度150 kWで約10000時間の運転を行った時に鉄の吸収線量として累計200 MGyの吸収線量が想定されており、変位センサーのプローブはこれに耐えうる無機材料部品のみで構成される必要がある。(2)図4で示した回転標的は厚さ数mの放射線遮蔽体の内部に設置される。それゆえ日常的な補修は難しく、読み出し回路を設置する低線量区域まで約30mもの長距離信号伝送が必要である。(3)回転標的は冷却のために200-500 rpmの回転速度が想定されている。標的1回転につき10点の測定を行うとすると、応答速度は12ms以下でなくてはならない。(4)回転標的の構造上、偏心度は20 μm以下であるため、偏心度の測定精度はその1/10の2 μm以下である必要がある。(5)複数のセンサーから出力された静電容量の情報だけから、偏心度、回転速度、標的温度の3つの情報に再構成する運用方法を考案する必要がある。

(1)-(3)までは既に解決済みであり、(4)変位セン

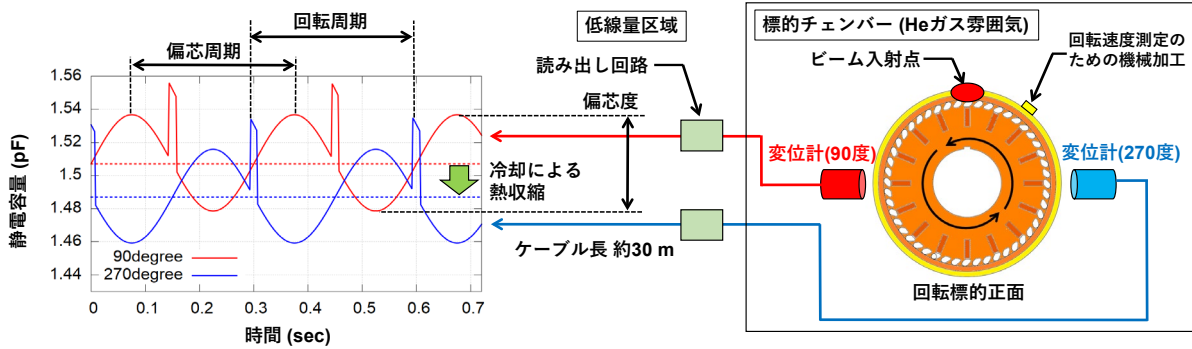


図4. 変位センサーを用いた標的監視システムの概念図とその理想的な出力結果

サー単体の分解能は同一温度かつ外乱の少ない環境であれば目標の分解能を満たしているが[5]、これはあくまで標的側面とプローブ間の間隔を測定しているにすぎず、偏心度そのものを測れている訳ではない。加えて(2)でも既述したように日常的なメンテナンスが難しい環境下に設置する測定器の環境依存性が大きいことは大きな欠陥である。3章では、(4)に関わる変位センサーの温度依存性についての結果を紹介し、4章で(5)運用方法の検討について紹介する。

3. 変位センサーの温度依存と分解能評価

2章のコンセプトで製作したプローブ、読み出し回路は既に製作されていた[5]が、出力電圧がケーブル周囲の金属の有無やケーブル形状に左右され、温度依存性も $240 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ と非常に不安定であった。原因は、ガード電圧と主電極電圧の電圧差であった。回路素子を変更し、電圧差を小さくするように回路を再設計、再評価を行った。再設計した回路では、ケーブル周囲の状況にも強くなり、多少ケーブルを振っても出力電圧に影響はなく、ラックに固定して使用すれば実用上問題ないレベルになっている。加えて回路シミュレーション上では90%応答速度が約5msを達成しており、目標の12msを上回る設計になっている。一方で、温度依存性はまだ残っており、図5に示すような出力電圧のドリフトが確認されている。温度依存性は図6に示すように約 $21 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ であり、再設計により改善したことが確認できた。温度依存性の原因は、温度によってケーブル形状が変化し浮遊容量が増減すること、基準容量 C_0 や C_x そのものが変化すること等が挙げられ、それぞれがどのような割合で回路全体の温度依存性に寄与しているか追加の調査が必要である。必要に応じて読み出し回路の温度管理を行い対処する。同一温度での V_{out} の出力幅は p-p 値で約 20 mV 、RMS で約 $\pm 5 \text{ mV}$ であり、この p-p 値の出力幅と、出力電圧を用いて、変位センサーの分解能を評価した。分解能の評価結果を図7に示す。回路基板自身に浮遊容量が約 5 pF ほど残っており、変位量が大きく (C_x が小さく) になると出力差が小さくなり、分解能が悪化する。ケーブル1mの場合に分解能が良くなるのは、その分だけ浮遊容量が小さく出力差が大きいためである。分解能は変位量 $1100 \mu\text{m}$ 以下の領域であれば目標分解能 $2 \mu\text{m}$ を達成

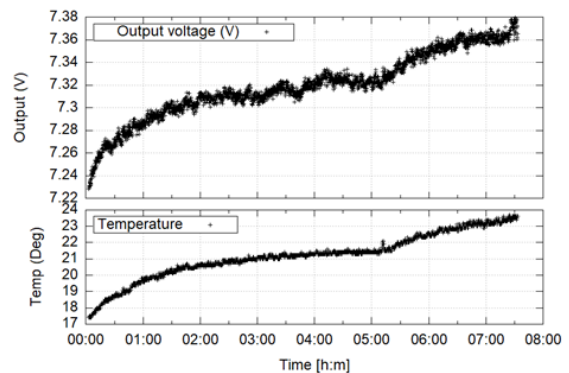


図5. 出力電圧の温度に依存したドリフト

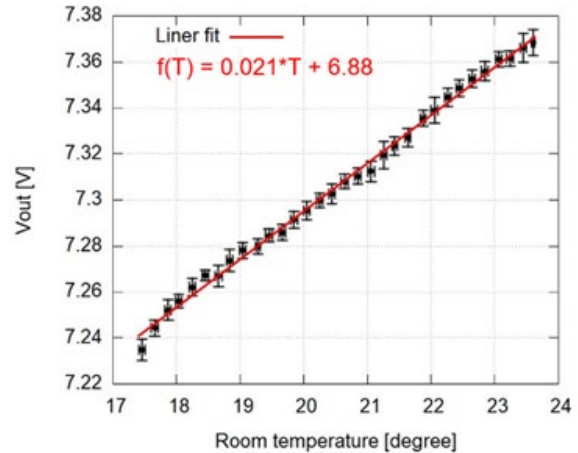


図6. 出力電圧の温度依存性

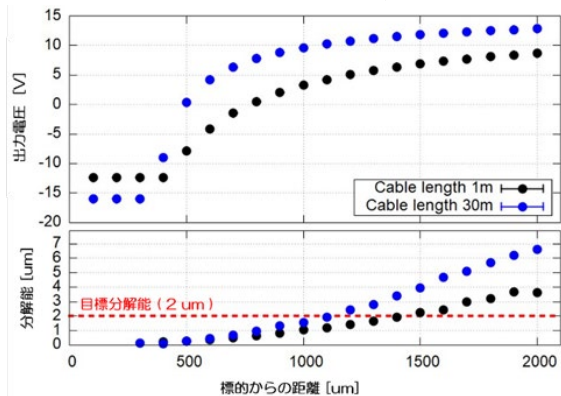


図7. 読み出し回路の出力電圧と分解能

している。この分解能は2章で説明したようにセンサー単体での分解能であり、偏芯度そのものの分解能ではない。今回評価した分解能が、偏芯度やその他の監視パラメータを測るのに十分な性能なのかを4章で説明する。

4. 変位センサーの運用手法の検討

4.1 変位センサー出力の計算条件

変位センサーの運用手法を検討するために、センサー出力 V_{out} を数値計算で再現した。 V_{out} をなるべく現実に近い条件で計算するため、(1)陽子ビーム入射による回転標的の熱膨張、(2)回転標的の偏芯と回転速度測定のための標的の表面加工、(3)3章で紹介したセンサー単体の分解能を計算に組み込んだ。図8に(1)として V_{out} の数値計算に組み込んだ回転標的の熱解析結果を示す。図8(a)はMARS[6]及びANSYS(ver 19.0)によって計算された150 kW ビーム照射から2秒後の標的の表面温度と変位センサーの配置を示している。センサーはビーム入射点から45度、135度、225度、315度に配置されている。図8(b)は標的に入射するビームサイクルを示しており、0秒-2秒は150 kW ビームが照射され、2秒-6秒は冷却のためビームは入射しない。熱伝達率は $30 \text{ W/m}^2/\text{K}$ と設定している。 V_{out} の数値計算ではこの6秒のサイクルを繰り返すとして計算を行っている。図8(c)には標的の半径方向への熱膨張が角度ごと、時間ごとにどのような分布であるかを示しており、各センサーが直面する標的側面が時間ごとどのように熱膨張するかが分かる。(2)の条件としては図9のような標的の動きを想定した。4つのセンサーの中心に対して、標的が最大 $20 \mu\text{m}$ の範囲でランダムウォークしており、標的の移動速度は測定周期である 12 ms に対して $0 \mu\text{m}-2 \mu\text{m}$ の速さでランダムに変わる。標的の表面には速度測定のため、半径方向に $150 \mu\text{m}$ 、円周方向に $130 \mu\text{m}$ の段付き加工が施されている。

ここで紹介した(1)(2)の条件で各時間ごとに C_x を計算し、その C_x を図7の関係をを用いて V_{out} に変換する。変換の際には標準偏差 10 mV のノイズを V_{out} に付与し実機のセンサー分解能を再現する。

4.2 変位センサー運用手法の検討状況

図10に前節で紹介した条件で計算したセンサー出

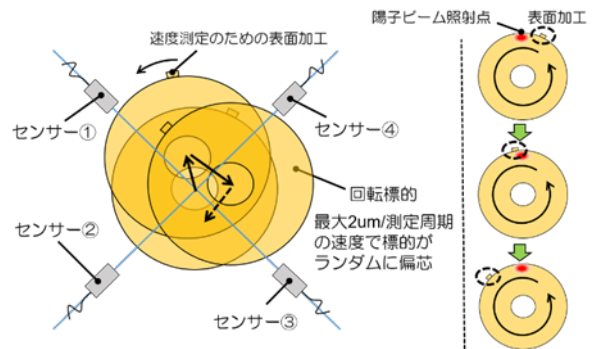


図9. 回転標的の偏芯と表面加工の条件

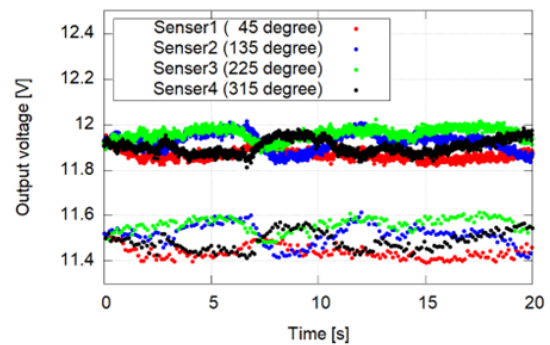


図10. 数値計算した各センサーの電圧出力 V_{out} を示す。偏芯によって出力電圧が変動するので、センサーの取付角度が 180 度異なるペア同士で出力の増減が対称になっている。図10のセンサー1についての結果を拡大したのが図11(a)である。出力電圧が 11.9 V 付近と 11.4 V 付近で分かれているのは、センサーの前に標的側面の機械加工がある/ないで C_x が変わり出力が変化しているためである。 11.4 V 付近の電圧が出力される時間間隔から回転標的の回転速度が計算できる。また、図10出力結果の時間ごとに全センサーの出力平均をとったのが図11(b)である。図11(b)では全センサーの出力平均が6秒周期で変動している様子が分かる。ビーム照射中の秒間は熱膨張によってセンサーと標的間の距離が縮まることで電圧出力が下がり、冷却中は電圧出力が上がる様子が分かる。最も難しい偏芯度の計算については、図12に概要図を示した。仮に回転標的が図12に示

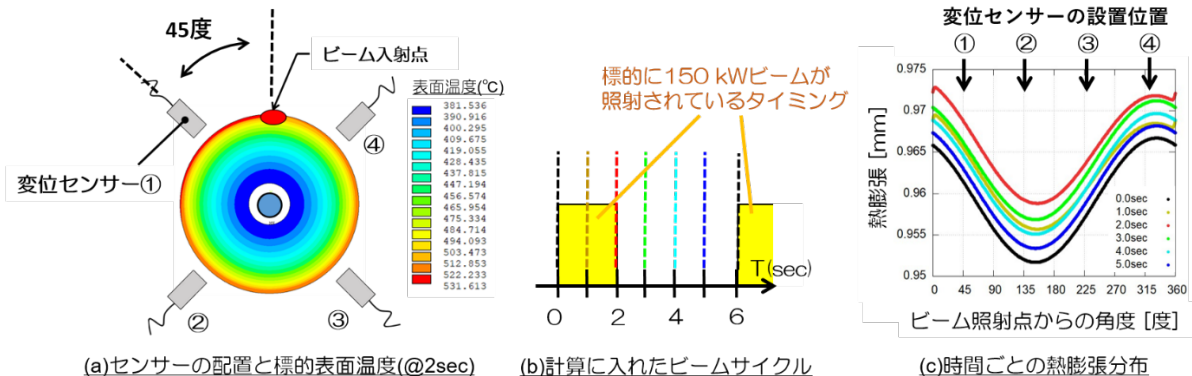


図8. ANSYSによる回転標的の熱解析

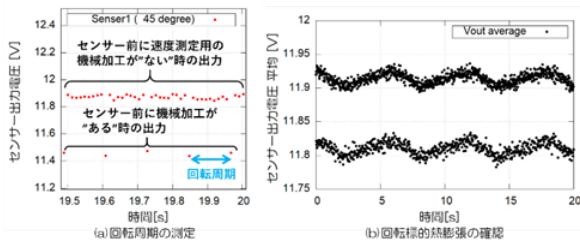


図 11. 出力電圧を使った回転周期、熱膨張の確認

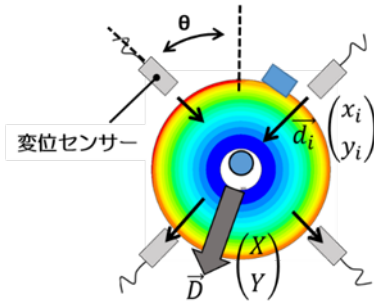


図 12. 偏芯度の計算方法

す \vec{D} の向きに偏芯したとすると、偏芯がない時と比べて各センサーには標的が \vec{d}_i の方向に移動したように見える。 \vec{d}_i を下記のように定義すると、

$$\vec{d}_i = \begin{pmatrix} -(V_i - \bar{V}) \sin \theta_i \\ (V_i - \bar{V}) \cos \theta_i \end{pmatrix} \dots (2)$$

$\vec{D} = \sum \vec{d}_i$ が標的全体の偏芯方向を示し、 $|\vec{D}|$ は偏芯度に比例する。この $|\vec{D}|$ を用いてセンサー出力から計算した偏芯度と計算機上の真の偏芯度を比較した結果を図 13 に示す。センサー出力から計算した偏芯度と真の偏芯度はほぼ 1:1 で対応しており、偏芯度測定分解能は全偏芯度にわたってほぼ同じで約 $2.0 \mu\text{m}$ と見積もられた。この時のセンサー単体分解能は図 7 の $1500 \mu\text{m}$ 付近の約 $4.0 \mu\text{m}$ であったので、この偏芯度計算手法であれば、4 つのセンサー出力を組み合わせることで、 $2.0 \mu\text{m}$ の偏芯度測定分解能を達成できることが分かった。

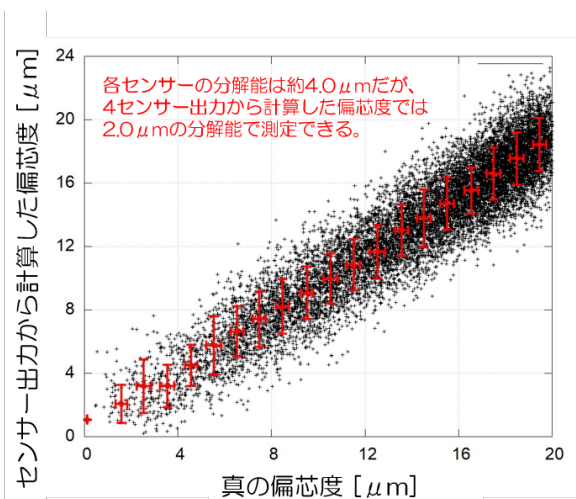


図 13. センサー出力から計算した偏芯度

5. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設では 100 kW を超えるビーム強度に対応すべく新たに回転円盤型標的を開発している。回転標的の偏芯度、回転速度、熱膨張の監視のため、高放射線環境下で動作できる変位センサーの開発を行った。変位センサー出力の環境依存性を改善するためにプローブ主電極電圧とガード電圧がなるべく同等となるように読み出し回路の改良を実施し、温度依存性が改善したことを確認できた。ただし、センサー単体の目標分解能 $2 \mu\text{m}$ を測定レンジ全体に渡って達成することは出来ておらず、これが実機に使用出来る性能なのか評価出来なかった。そこで、計算機シミュレーションにて実際の使用状況を模擬したセンサー出力を計算し、そのセンサー出力のみから、標的の回転速度、熱膨張の様子、偏芯度を計測できることが分かった。加えて 4 つのセンサー出力を組み合わせることで、センサー単体の測定分解能が $2 \mu\text{m}$ に達していなくても、偏芯度測定分解能 $2 \mu\text{m}$ を達成できることが分かった。今後は、実機と組み合わせての動作試験を行い、応答速度の実測も含めて今回検討した運用手法が妥当なものか検証していく。

参考文献

- [1] H.Takahashi et al., "Development of new production target at J-PARC Hadron Experimental Facility(2)", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp.879-882, THP038
- [2] R.Kurasaki et al., "Development of rotating-disk type target for J-PARC Hadron beamline(2)", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2020, pp.402-406, WEPP55.
- [3] R.Kurasaki et al., "Production Target of Secondary Particles for Slowly-Extracted High-Intensity Proton Beams", J.Particle Accelerator Society of Japan, Vol.18, No.4, 2021
- [4] M.Arinaga et al., "BPM displacement measurement by gap-sensors at KEKB", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2006, pp.904-906, EP55
- [5] F.Muto et al., "Development of radiation-resistant displacement sensor for monitoring rotating production target at J-PARC Hadron Facility", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2022, pp.634-638, WEP043
- [6] N. V. Mokhov and S. I. Striganov, "MARS15 overview," vol. 896, pp. 50–60. 2007.