

# J-PARC 施設における振動計測法の開発

米田研究室 小野田 元喜

## 1. はじめに

大強度の陽子ビームを標的に照射し生成した二次粒子(中性子やニュートリノ、ミュー粒子など)を用いた最先端研究のため、世界中で MW 級の大強度陽子加速器が稼働、もしくは建設中である。我が国では唯一の大強度陽子加速器施設である J-PARC(大強度陽子加速器施設)はさらなる大強度化を目標に掲げており、目標達成に向けた各種研究が多く進められている。その中で我々はレーザーを用いた完全マテリアルフリーな電子剥離法である、レーザー荷電変換法を提唱し、その原理実証実験ならびにレーザー開発を行ってきた<sup>[1][2]</sup>。2022 年 12 月からは加速器実機への実装も進んでおり、着々と本実装に向けた準備が進められている。しかし、レーザー実機を標的であるイオンビームの近くは放射線の影響が大きく、設置が困難であったため結果として地下 2F の加速器内ではなく 建屋 2F に設置することとなった。

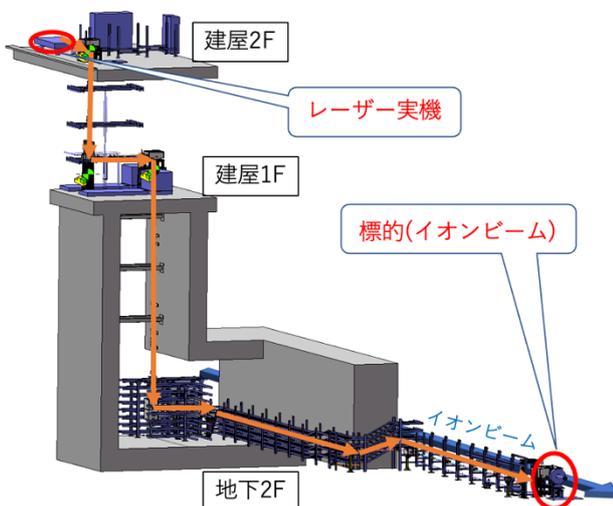


図 1. J-PARC におけるレーザー光路想定図

(橙色矢印は想定されるレーザー光路)

図 1 は J-PARC における実際に想定されているレーザー光路を示しており、レーザー実機から標的(イオンビーム)まで 70m 超の長距離輸送が求められる。また、標的には 1mm×3mm の矩形レーザービームを正確に当てる必要があり、実装においてこの正確性をどこまで追求できるかが焦点となる。特にレーザー実機を

設置予定である建屋 2F は振動が大きい可能性があるという報告が上がっており、恒常的などの程度振動しているのか、その振動はアクチュエータを用いるようなステアリング機能を実装することで抑えることができるのか、を調べる必要がある。そこで、本レポートでは建屋 2F における床振動の測定を可能にする振動計測法の開発を報告する。

## 2. 計測系の開発

### 2.1. 計測法に求められる条件

本開発に求められる条件は以下の通りである。

- J-PARC 建屋に持ち運び可能
- 複数箇所における同時計測が可能
- 複数箇所における特定周波数における振動位相の解析が可能

最終的な目標は、レーザー出射台とレーザー打ち下ろし点の振動位相関係を特定することである。一般的に、床の形や柱の位置等によって複数の固有振動モードが共存していることが知られている<sup>[3]</sup>。したがって、振動周波数の特定、特定された振動周波数における部屋中の位相が解明可能となれば、今後の振動補正に向けた大きな一歩となる。例として、レーザー出射台とレーザー打ち下ろし点の 2 点間の振動位相が同位相になっているか、位相がどの程度ずれているかでどのように振動を補正するかが変わる。また、振動の影響が全くない位置を特定できれば、その位置にレーザー出射台の足を置くことで補正に考慮すべき要因を減らすことができる。以上の理由より、求められる条件を満たす計測法の開発が必須であると考えられる。

### 2.2. 計測系の開発

本レポートで開発した計測系を図 2 に示す。中心には振り子系に組み込んだレーザー墨出し器(LasGoo 製)を設置しており、そこから出射したレーザー光をカメラで撮影するようになっている。レーザー墨出し器は、自身を中心として水平方向に平面状のレーザー光を出射し、水準器として使用されるものである。

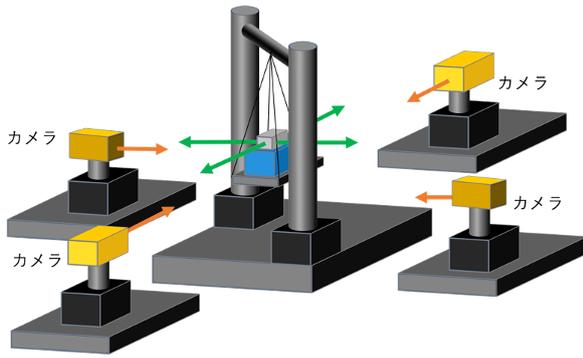


図 2. 開発した計測系の概略図

振り子系はその振り子の長さ  $l$  によって決定される固有周期  $T$  で強制振動する。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

強制振動とは外力によって強制的に引き起こされる振動であり、これによって振り子系に組み込まれたレーザー墨出し器は、地面振動の影響を持たない平面を作ることとなる。この原理図を次に示す。

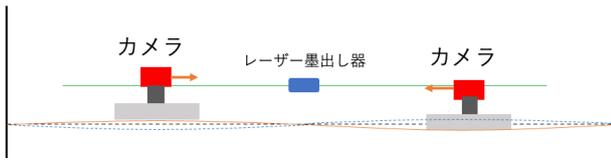


図 3. 計測系の原理図

レーザー墨出し器からの光をカメラで撮影することで、その映像にはレーザー墨出し器が組み込まれた振り子の固有振動と、カメラ設置位置における地面振動が含まれることとなる。実際にプログラムを動かして測定している様子を次に示す。

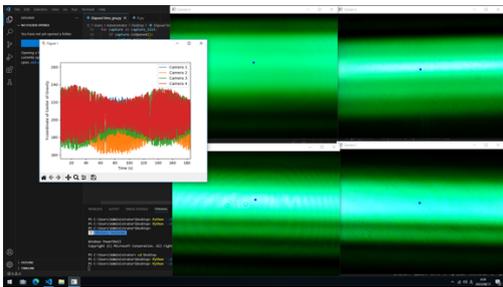


図 4. 測定中の様子

縦方向に振動するレーザー光の重心情報を時間経過とともに記録している。このようにして得られたデータをフーリエ変換処理することで、カメラ設置位置における振動周波数の特定を行う。また、特定された振動周波数を逆フーリエ変換することで、その振動周波数における位相の特定まで可能となる。位相情

報は前述の通り非常に重要なため、位相情報が損なわれないようなデータ処理方法(窓関数の選定等)を行なった。

### 2.3. 計測系の改良

卒業論文提出時(2023年9月)から行なった改良について本節で記述する。1点目として、振り子系の拡張を行なった。部屋に存在する固有周波数振動は低周波数に多く存在すると思われるため、振り子系を拡張することで振り子の固有周波数を小さくし、より低周波数の振動について解析しやすくした。実際に作成した振り子系を図5に示す。

振り子の長さは約 1.3m となり、振り子の周波数は約 0.439Hz まで小さくすることに成功した。この大きさであれば J-PARC に持ち運ぶことも可能であり、低周波数の振動まで解析が可能となった。また、振り子の支柱を4本にすることで余計なノイズ周波数を低減することに成功した。

また、カメラの fps が 30Hz であったことから、サンプリング定理より 15Hz までの周波数解析が限界だった。そのため、4分割フォトディテクタを用いた縦方向バランス回路を作成してより高周波成分まで解析できるようにした。作成した4分割PDを用いた光量バランス検知回路の動作図を次に示す。



図 5. 実際に作成した振り子系

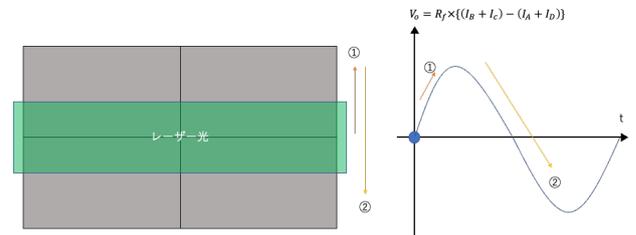


図 6. 光量バランス検知回路の動作図

墨出し器からのレーザー光が上下する際に、上2つのPDで得た電圧と下2つのPDで得た電圧の差を出力するように設計している。ただし、同時に8つのバランス検知回路からの電圧を測定する必要があり、現在は16bitのAD変換モジュールを用いて測定している。したがって、ノイズが非常に乗りやすく、できる

だけ回路自体を小さくするなど、ノイズ軽減を図りながらの作成となった。以上の改良を経て、J-PARCでの実地測定を行なった。(4分割PDを導入してからは十分な測定はできていないため、本黄表紙ではカメラによる測定の結果が主となる。)

次に実際に計測を行っている様子を示す。



図 7. 実際の測定の様子

(@J-PARC L3BT 棟 2F L3BT 電源室)

振り子系に組み込まれたレーザー墨出し器からの光をカメラで撮影している様子を示している。実際にレーザーを動かす時を想定し、人がいない状況で測定を行なっている。また、ノイズ軽減のために部屋は暗くしている。

### 3. 計測結果及びその解析結果

2023年11月に行なった、第一回J-PARC振動計測における結果を示す。次に示す図8は、その際にカメラを設置した位置と振り子系の位置を表したものである。

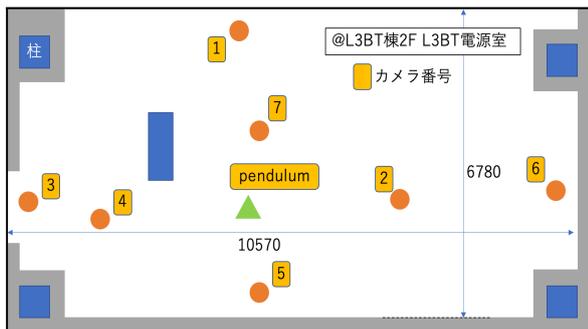


図 8. J-PARC 建屋 2F における計測点

J-PARC 建屋 2F L3BT 電源室(レーザー実機を設置予定の部屋)内において、図に示される1~7の位置にカメラを設置し、測定を行なった。それぞれのデータをフーリエ変換処理したところ、いくつかの振動周波数が微小ながら観測された。一つの例として、1番に設置したカメラによるデータのFFT結果を図9に示す。

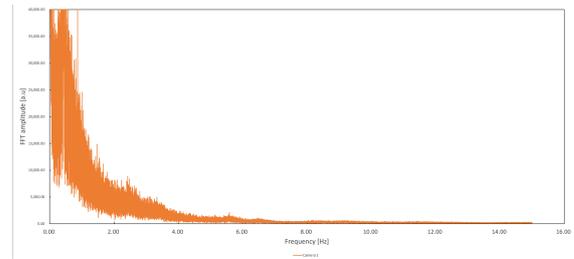


図 9. カメラ 1 における測定データの FFT 結果

複数の周波数帯において盛り上がり確認できる。その中で振り子の固有周波数及びその高周波成分ではないものとして、2.45Hzの振動を今回は取り上げる。他のカメラによるデータのFFT結果を確認すると、2.45Hzの周波数振動はカメラ3,5,6でのみ強く現れていることがわかった。カメラ1,3,5,6は図7によると丁度壁沿いに配置されていたものであることがわかる。

続いて、窓関数を用いて2.45Hzを中心とした周波数成分を抽出して逆フーリエ変換を行なった。その結果を図10に示す。

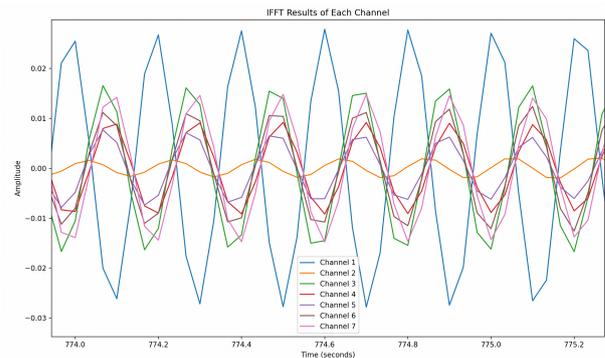


図 10. 2.45Hz を中心に抽出した周波数情報の逆フーリエ変換結果

この結果から、2.45Hzの固有振動においてカメラ1設置位置のみが他のカメラ設置位置と大きくズレた位相を持っていることが判明した。また、30fpsでの測定ということで詳細な位相は確認できないが、カメラ3,5,6に関してはほとんど同位相で振動していることが判明した。カメラ設置位置を変えずに数回測定したところ、同様の結果が得られたため固有振動モードの一つを特定成功したと思われる。

図9の縦軸を拡大し、より微小な振動周波数を探したところ、5.59Hzで全ての位置において振動が存在することが確認された。そこで、同様にして5.59Hzを中心逆フーリエ変換したところ、図11で表される結果が得られた。

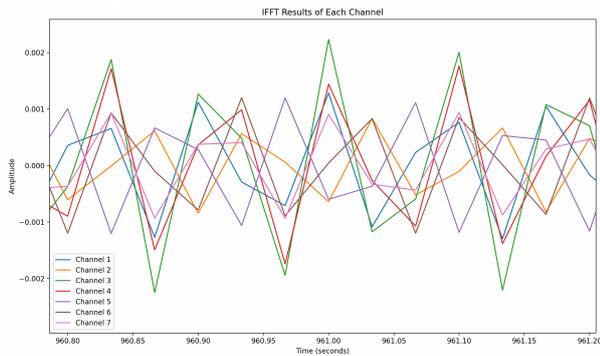


図 11. 5.59Hz を中心に抽出した周波数情報の逆フーリエ変換結果

この結果に関しても、30fps で得られたデータが元になっていることに由来して詳細な位相情報が見えていないものの、複雑な振動モードが存在していることが読み取れる。以上のように、計測点を自在に変えて測定できるという本計測法の有用性がよく表れた測定結果が得られた。

続いて、2024 年 1 月の測定から導入した 4 分割 PD を用いた測定による測定・解析結果を示す。PD を用いることで、最大 1000Hz での測定が可能となり、解析の限界は 500Hz となった。

図 12 にフーリエ変換処理後の結果を示す。なお測定の都合上、示す結果には 3 つのデータのみを表示している。

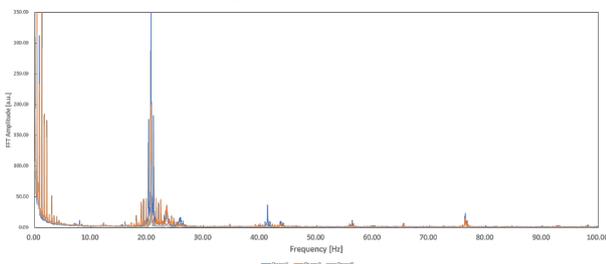


図 12. PD を使った測定データの FFT 結果

結果からは、振り子系の固有周波数およびその高調波が 5.0Hz 周辺まで続いていること。また、20.6Hz に非常に強いピークがあり、またその高調波が 41.2Hz に見られていること。またそれ以降にもピークがいくつか見られていることが判明した。15Hz 以上の周波数帯での振動の可能性が見られ、またそれが非常に大きいピークを持つことから、PD による測定の有用性及び更なる解析が求められることが確認された。次回の測定では 8 つの同時計測を十分に行い、20.6Hz の振動がどのような振動なのか(建物全体の揺れなのか、部屋固有の振動モードなのか)を解明したい。

## 4. まとめ・今後の展望

本論文では J-PARC 施設における振動測定法の開発と、その現状についてまとめた。振り子が自身の持つ長さによる固有周波数で強制振動する、という性質を用いた測定系の構築を行い、次の条件をクリアする測定システムを完成させた。

- J-PARC 建屋に持ち運び可能
- 複数箇所における同時計測が可能
- 複数箇所における特定周波数における振動位相の解析が可能

また、計測方法やデータ処理方法の改良等を重ね、結果として大きな振動成分の特定可能性にまで至った。任意の複数位置における同時振動測定法として、実用性のあるものの開発となったと思われる。

今後は、最終的に判明した 20.6Hz の大きな振動周波数について測定・解析を進めるとともに、計測系の更なる改良を進めていく。ノイズ軽減のために、PD 前に干渉フィルターを貼り付ける等、微小振動測定 of 邪魔になるような外部情報を消去できるようにしていきたい。また、振動に補正が必要だと判断できた場合、各所ミラーに設置されているアクチュエータを用いたステアリングシステムの構築を進めていきたい。2024 年 1 月には、建屋 2F の打ち下ろしミラーの光学台にレーザーを設置し、地下の標的チャンバーまでの長距離光路の実装を行なっている。その際、地下に降りてくるレーザー光は安定していたものの、その後の光路中に振動が見られたのか、標的チャンバー近くでは大きくレーザー光がぶれているのが確認された。その補正まで含めなくて、今後は進めていきたい。また、J-PARC 荷電変換法開発の流れとして、要求されるレーザーの開発およびその改良も進めていく必要がある。

## 参考文献

- [1] H. Harada et al., PASJ2018 THP017
- [2] 湊葵, “大強度イオンビーム加速器でのレーザー荷電変換システムの開発”, レーザー新世代研究センター黄表紙 2021
- [3] 風間了, “実在建物の振動性状”, 日本地震工学会, [https://www.jaee.gr.jp/wp-content/uploads/2015/04/vibration\\_characteristics.pdf](https://www.jaee.gr.jp/wp-content/uploads/2015/04/vibration_characteristics.pdf)