

可搬型フーコー振子の開発

人間・環境学研究科 高橋 輝雄

1. はじめに

著者は2012年頃から全学共通科目である物理学実験のテーマの一つとして、新テーマ「フーコー振子」の開発に携わってきた。新テーマの開発に関連して、可搬型のフーコー振子を製作する必要が生じた。装置を異なる緯度の場所で測定し、その測定場所の緯度に対応した精密な測定が可能な装置かを検証した。可搬型フーコー振子の装置、測定結果、これまでの改良点について紹介する。

2. フーコー振子

フーコー振子とは地球の自転を証明した装置である。振子を振動させると地球の自転から生じるコリオリの力により、振動面が回転する。京都市の場合は、1時間で約8.6度回転し、一回転する周期は約42時間になる。このフーコーの回転速度は測定場所の緯度によって変化し、緯度が低いと遅く、緯度が高いと速くなる。

国内でも博物館や学校などに多数設置されているが、振子の長さが数十メートル、おもりの重さが数十キロの大型の装置である。そのため、学生実験で使用するには、振子の長さが1m程度の実験室規模のフーコー振子を開発する必要があった。

3. 可搬型フーコー振子

振子の長さを1m程度にした場合、振子の長さが数十メートルの振子に比べて装置の非対称性と楕円運動による影響が相対的に大きくなり、精密な測定が困難であった。そのため、振子を制御する事によって精密な測定結果が得られるようになった。しかし、この制御方法がコリオリの力以外を打ち消している事を確認する必要がある。そのため、緯度の異なる場所で測定し、その測定場所の緯度に応じたフーコーの回転角速度が得られているかを検証するため、容易に持ち運びできるフーコー振子を開発した。

4. 装置の概要

装置の写真を図1に示す。装置のフレームは30mm角のアルミフレームを用い、幅、奥行きが300mm、高さ1500mmの格子型とした。振子の支持台はダブルナイフエッジ方式、振子の長さは1m、錘は2.4kgである。また、装置の質量は約15kgで自立型となっているため、そのまま振子を振ると不安定である。そのため装置の下部に約30kgの鉛ブロックを置いて安定性を高めた。



図1 装置の写真

5. 振子の制御

振子の制御は電磁駆動と渦電流による制動、一対の永久磁石による斥力を用いた。回転角速度の制御部の模式図を図2に示す。錘の下端に取り付けた永久磁石は、センサーコイルとの電磁誘導で錘の位置を把握し、駆動コイルとの電磁誘導で駆動力を与える。また、制動用銅板との渦電流により制動させる。実際の回転角速度の制御は、下の磁石を上下させ、磁石間距離を変化させる。

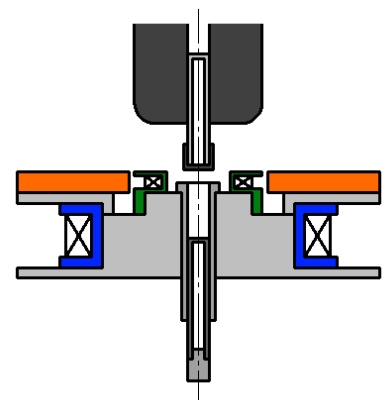


図2 回転角速度の制御部の模式図

6. 測定方法・測定場所

測定は USB カメラで錘を上部から約一往復分を撮影しながら、リアルタイムで錘の重心を解析し、PC に記録する。5 分毎に自動測定し、一定時間測定した後、磁石間距離を変更する。磁石間距離は 2mm ずつ変更し、約 10 箇所測定した。遠隔地での測定の場合は、測定データをクラウドにアップロードして解析を行った。測定場所は最初に京大の吉田南キャンパス内で測定した後、福井で測定を行い、問題点が多数生じた。京都で試行錯誤を行った後、山形と宮崎で測定を行った。

7. 測定結果

図 3 に振子の重心軌道の上面図を示す。図は振子の一往復分の錘の重心を重ねて描いてある。直線は錘の重心を主成分分析した結果で、振動面の長軸方向を示す。当初は最小二乗法を用いて長軸方向を求めていたが、垂直方向に近くなると明らかに間違った解析結果になっていた。

図 4 に磁石間距離と角速度の関係を示す。横軸は磁石間距離、縦軸は測定場所のフーコーの角速度との差を示す。磁石間距離が 58mm 付近で 0 になっており、京都でも山形でも宮崎でも測定場所のフーコーの角速度になっている事がわかる。また、58mm 付近以外では角速度が遅くなり、フーコーの角速度より大きくなる事はなかった。

8. これまでの改良点

＜測定環境の改善＞

コリオリ力はとても小さいため、わずかな風でも測定に影響を及ぼした。そのため装置に気泡緩衝材を 2 重に巻いて風の影響をなくした。さらに、USB カメラを用いて画像処理しながら測定するため、太陽の光や部屋の照明によってホワイトバランスが変化し、錘の重心位置が誤って解析された。そのため装置を暗幕で覆い、錘を装置内の LED ライトで照らした。

＜支点の中心とコイルの中心の位置出し - その 1 -＞

振子の駆動や制動を行うため、振子の支点の中心とコイルの中心を合わせる必要がある。当初は、支点の下に XY ステージを取り付け、錘の磁石ホルダーとコイルの穴を目視で合わせていた。測定データを解析してみると、振動面の長軸方向が揺らぐ事があった。これを改良するため、高感度の水準器を用いて支点と制動用銅板を水平に調整し、コイルの穴に位置出し用の治具（図 5）をはめて調整を容易にした。その結果、長軸方向の揺らぎがなくなった。

＜支点の中心とコイルの中心の位置出し - その 2 -＞

支点の下に XY ステージを取り付けていたため、調整するたびに錘が動いてしまい調整に時間がかかっていた。そのため、コイルを微調整するように XY ステージを取り付けた。また、目視では誤差が大きいため、望遠の USB カメラを用いて位置出しを行った。

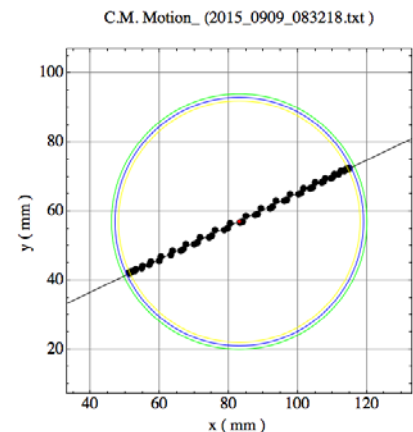


図 3 振子の重心軌道の上面図

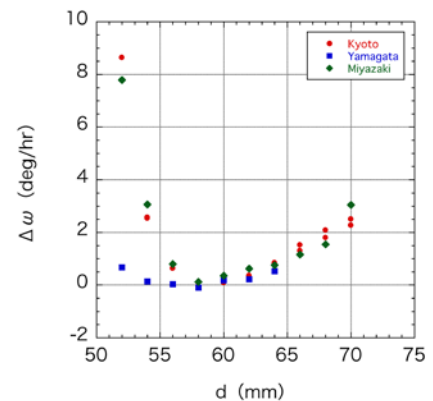


図 4 磁石間距離と角速度の関係

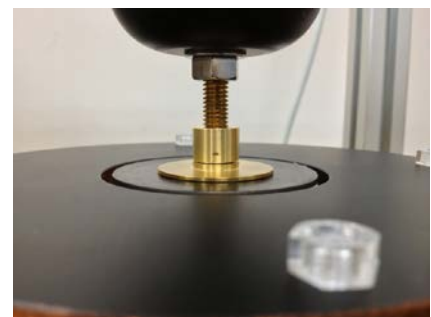


図 5 位置出し治具

＜磁石間距離制御の追加と改良＞

開発当初は、大学内で測定していたため手で磁石を上下して磁石間の距離をスケールで測定していた。遠隔地で測定するにはタイマー駆動する必要がある。そこで安価なラジコンサーボモーターとデジタルデプスゲージを用いてクランク機構の装置を製作した。制御回路はプログラムが容易なアルディーノを用いた。しかし、アルディーノのタイマーは時間の誤差が大きいためリアルタイムクロックを用いた。クランク機構を使用して測定を行っていく間に、2つの問題が出てきた。1つ目は、クランク機構を分解した場合、角度と上下の位置が変わってしまい、その都度プログラムを変更する必要があった。2つ目は、軸のたわみが角度によって変わるため磁石間距離の再現が難しかった。そのため、リニアアクチュエータを用いたスライド機構の装置を製作した。制御回路は前回と同じくアルディーノを使用した。図6にスライド機構の磁石間距離制御部、図7に磁石間距離制御回路を示す。この結果、分解後の再プログラムの必要がなくなり、繰り返し精度が $\pm 0.01\text{mm}$ 以下になった。

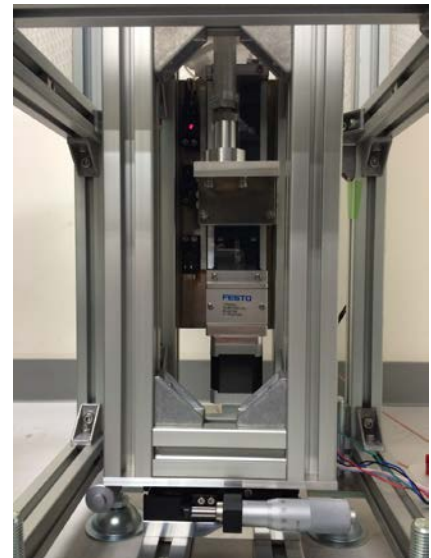


図6 スライド機構の磁石間距離制御部

＜測定用ソフトの改良 - その1 -＞

長時間の測定を行うと測定用ソフトが強制終了する場合があった。そのため、まず別メーカーのPCで長時間測定してみたが症状は変わらなかった。そこで測定用ソフトウェアの高機能化も含めて測定用ソフトを作り直した。C++で作成したDOS画面のコンソールアプリケーションからC#を使ったボタンでプログラムを操作できるフォームアプリケーションにした。さらに他のプログラムを操作していても問題のないようにマルチスレッド化を行った。しかし、長時間測定したところ、同じように強制終了する結果となった。



図7 磁石間距離制御回路

＜測定用ソフトの改良 - その2 -＞

測定ソフトの強制終了はWindows固有の問題と考え、Windows以外のOSを検討した。そこで、Linux系のシステムを構築できて費用が安価で色々な情報が豊富なラズベリーパイ3を用いる事にした。プログラムはC++で再構築した。図8にカメラ画像とマスク画像を示す。長時間の測定が可能なソフトを優先するためにデータのアップロード機能は考えなかった。長時間測定したところ、途中で強制終了する事なく測定終了する事ができた。

9. まとめ

緯度の異なる場所で測定した結果から振子を制御する事によってコリオリ力以外を打ち消している事が検証できた。また、可搬型フーコー振子の改良点は物理学実験のフーコー振子の改良に役立った。

さらに改良すべき点は、振子の駆動回路がアナログ回路をデジタル化して安定稼働させる事である。

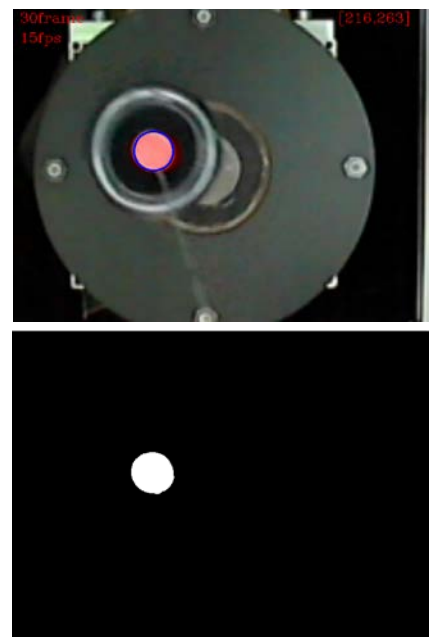


図8 カメラ画像(上)とマスク画像(下)