

# 「航空宇宙工学実験Ⅰ」

実験番号 5

実験テーマ

コリオリ力を用いた角速度の計算

実験班 14班

2年 0073 時田怜奈

実験実施日 令和3年6月29日（オンライン）

提出日 令和3年7月5日

再提出日 令和3年7月8日

## 概要

コリオリ力は回転座標系上で移動する物体に移動方向とは垂直な方向に受ける慣性力のことをいう。航空機や人工衛星など、飛行している機械の制御に角速度は必要不可欠である。コリオリ振動型ジャイロセンサの模型を回転台の上に載せ、実験の設定値である試験質量、試験質量の振幅、試験質量の振動の角周波数を変えて 4 回実験を行った。コリオリ力を計測し、角速度の検出することで理論式の正確性を確かめた。

パラメータによる計測データの変化やロータリーエンコーダで計測できた角速度と、コリオリ力で得られた角速度では、本来であれば一致するはずであるが後者の方が大きな値になった。この差の原因について考察した。

## 1. 実験目的

本実験では、航空機の制御に必要不可欠な角速度の計測方法や実際に用いられているジャイロセンサの仕組みを理解することを目的とする。

また、日常生活ではほとんど目にすることのないコリオリ力を、コリオリ振動型ジャイロセンサ(Coriolis vibratory gyroscope : CVG)の模型を使用して実験することによって理解する。

## 2. 理論

### 2. 1. コリオリ力

まず、図 1 のような 2 次元の慣性座標系  $X_I - Y_I$ 、回転座標系  $X - Y$  を定義する。

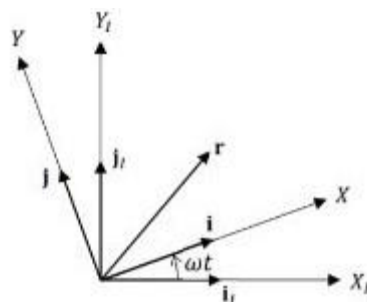


図 1 座標系の定義

回転座標系は角速度  $\omega$  で回転し、回転速度は一定とする。慣性座標系における単位ベクトルを  $i_I$ 、 $j_I$  とし、回転座標系における単位ベクトルを  $i$ 、 $j$  とすると、位置ベクトル  $r$  はそれぞれの座標系における単位ベクトルを用いて

$$r = x_I i_I + y_I j_I = x i + y j \quad (1)$$

と表すことができる．(1)式における， $x_I$ ， $y_I$ は慣性座標系における X 軸方向，Y 軸方向の成分であり， $x_I$ ， $y_I$ は回転座標系における X 軸方向，Y 軸方向の成分である．

ここで，時間  $t$  を定義すると回転座標系における単位ベクトル  $\mathbf{i}$ ， $\mathbf{j}$  と慣性座標系における単位ベクトル  $\mathbf{i}_I$ ， $\mathbf{j}_I$  には以下の関係式を導くことができる．

$$\mathbf{i} = \cos \omega t \mathbf{i}_I + \sin \omega t \mathbf{j}_I \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \sin \omega t \mathbf{i}_I - \cos \omega t \mathbf{j}_I \quad (3)$$

(2)，(3) 式を時間微分すると，

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = -\omega \sin \omega t \mathbf{i}_I + \omega \cos \omega t \mathbf{j}_I = \omega \mathbf{j} \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{j}}{dt} = \omega \cos \omega t \mathbf{i}_I - \omega \sin \omega t \mathbf{j}_I = -\omega \mathbf{i} \quad (5)$$

となる．以上のことを用いて位置ベクトル  $\mathbf{r}$  の時間微分で表すことができる．

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \omega x \mathbf{j} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} - \omega y \mathbf{i} \quad (6)$$

ここで，(6) 式をさらに微分すると，

$$\begin{aligned} \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} &= \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{dx}{dt} \omega \mathbf{j} + \frac{dx}{dt} \omega \mathbf{j} - x \omega^2 \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} - \frac{dy}{dt} \omega \mathbf{i} - \frac{dy}{dt} \omega \mathbf{i} - y \omega^2 \mathbf{j} \\ \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} &= \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} - 2\omega \left( \frac{dy}{dt} \mathbf{i} - \frac{dx}{dt} \mathbf{j} \right) - \omega^2 (x \mathbf{i} + y \mathbf{j}) \end{aligned} \quad (7)$$

と表すことができる．位置ベクトル  $\mathbf{r}$  にある質点の運動方程式は

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (8)$$

であるので，(7) 式に (8) 式を代入すると

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= m \left( \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} - 2\omega \left( \frac{dy}{dt} \mathbf{i} - \frac{dx}{dt} \mathbf{j} \right) - \omega^2 (x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \right) \\ m \left( \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} \right) &= \mathbf{F} + 2m\omega \left( \frac{dy}{dt} \mathbf{i} - \frac{dx}{dt} \mathbf{j} \right) + m\omega^2 (x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで，右辺における第 1 項の  $\mathbf{F}$  は外力である．また，第 2 項，第 3 項が回転座標系における質点に対して作用する力であり，第 2 項がコリオリ力，第 3 項が遠心力である．コリオリ力は (10) 式を見ても明らかであるが，回転座標系において質点が移動したときに，移動方向に対して垂直な方向に働く力であることが分かる．

## 2. 2. コリオリ振動型ジャイロセンサ (CVG) の計測原理

コリオリ振動型ジャイロセンサ (CVG) は名前の通りコリオリ力を計測することで角速度を計測するセンサである．CVG の構成図を図 2 に示す．試験試料  $m$  の両端にばねを介して内枠と接続され，円盤に図 2 のような CVG を搭載し，角速度  $\omega$  で一定回転させた場合について考える．

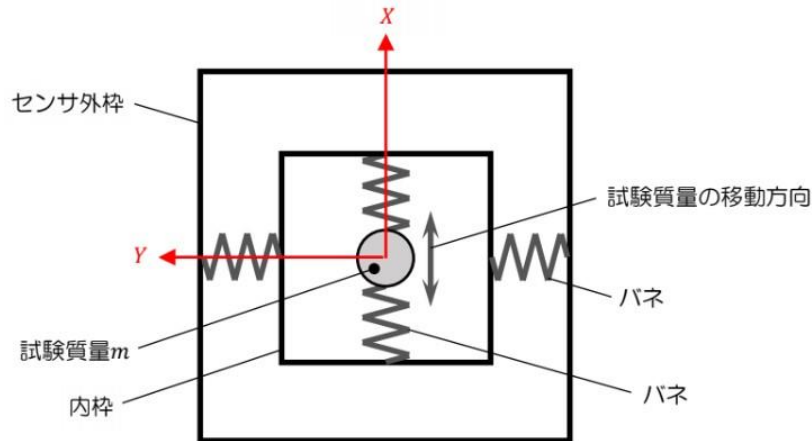


図 2 CVG の構成図

CVG は，X 軸方向にのみ外力を印加して，試験質量  $m$  を X 軸方向に振動させる．その場合において，試験質量  $m$  が受ける Y 軸方向の力  $F_Y$  は，(9) 式を用いて次の式で表すことができる．

$$F_Y = -2m\omega \frac{dx}{dt} + m\omega^2 y \quad (10)$$

(10) 式において  $y$  が微小であると仮定すると試験質量に発生する力は次の式である.

$$F_Y = -2m\omega \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

内枠とセンサ外枠に取り付けられたバネのバネ定数を  $k_Y$  と定義すると,

$$\begin{aligned} F_Y &= k_Y y \\ y &= \frac{F_Y}{k_Y} \end{aligned} \quad (12)$$

と表すことができるので, (11) 式に (12) 式を代入すると次の式になる.

$$y = -\frac{2m\omega}{k_Y} \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

ここで, 試験質量  $m$  は X 軸方向に以下のような正弦波で振動させるとする.

$$x = l \sin(\omega_m t) \quad (14)$$

は試験試料の振幅,  $l$  は試料質量  $m$  の振動の角周波数,  $t$  は時間である. (14) 式を微分すると

$$\frac{dx}{dt} = l\omega_m \cos(\omega_m t) \quad (15)$$

となるので, Y 軸方向の試験質量  $m$  の位置は

$$y = -\frac{2m\omega l\omega_m}{k_Y} \cos(\omega_m t) \quad (16)$$

となる．よって，試験試料 $m$ と内枠が Y 軸方向に拘束されていると仮定すると，図 3 に示すように試験試料 $m$ が上側に移動した場合，センサの内枠はコリオリ力によって右側に移動することが分かる．すなわち，センサ内枠の移動距離  $y$  を計測すれば，以下の式で表されるように角速度 $\omega$ を算出することができる．

$$\omega = -\frac{k_y y}{2ml\omega_m \cos(\omega_m t)} \quad (17)$$

これが一般的な CVG の計測原理である．

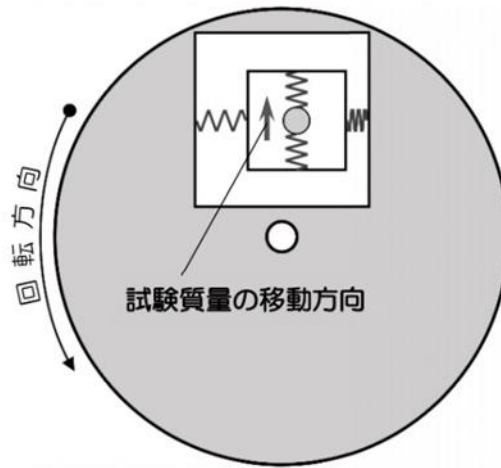


図 3 回転台における CVG（試験試料が上側に移動）

### 3. 実験装置

本実験では CVG を大型にした模型（以降，CVG 模型と呼称する）を用い，外観を図 4 に示す．図 4 に示される CVG の模型は一辺が 300mm 程度であり，一辺が 3mm 程度の一般的な CVG と比較すると大型である．図 5 は CVG 模型の内部を示しており，電源である電池ユニット，コリオリ力を計測するための計測ユニット，計測ユニットを振動させるためのモータ，駆動ベルト，モータの制御，計測データのダウンリンク（PC への送信）を行う制御ユニットが組み込まれている．

一般的な CVG は，圧電素子と呼ばれる電圧を印加するとその電圧値に応じて伸縮する特殊な素材を用いて試験質量を振動させる．しかし，圧電素子による伸縮範囲は小さいため小型の CVG には適しているが，本実験で用いる CVG 模型では振動範囲が小さく装置の挙動を視認することが困難となる．よって，本実験で用いる CVG 模型ではモータを用いて試験質量を振動させる手法を用いている．図 6 に示すようにモータの回転運動はプーリ（滑車）

と駆動ベルトによって直線運動に変換され、駆動ベルト上に取り付けられた計測ユニットを図5、6の方向から見て左右に運動（振動）させる。モータの回転方向及び回転速度の制御は、制御用マイコン基板の信号を基にモータ制御基板が行う。それらの制御基板は制御ユニットの内部に結合される。制御ユニットには、計測ユニットから得られた計測データが入力され、制御用マイコン基板上に取り付けられた無線機を経由して、PCにデータが転送される。また、無線機を介してモータの駆動速度などの実験に用いるパラメータや実験の開始・終了の信号をPC上から送信することができる。本実験では、実験に用いるパラメータを自身で決定し、装置に入力し実験を行う。以上で解説した CVG 模型を回転台上で回転させ、角速度の計測を行う。

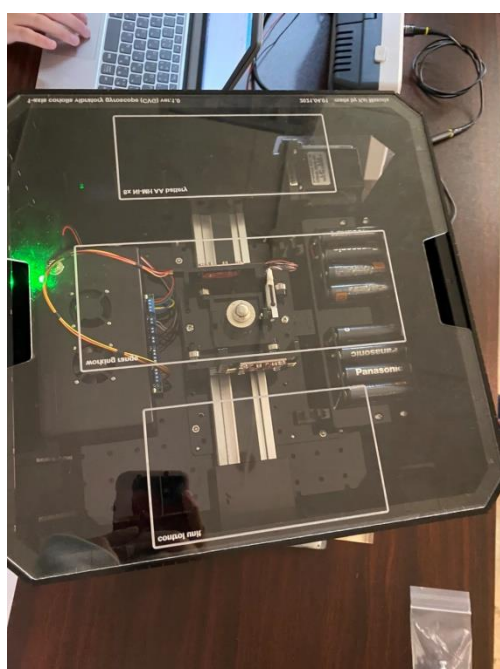


図4 CVG 模型の外観

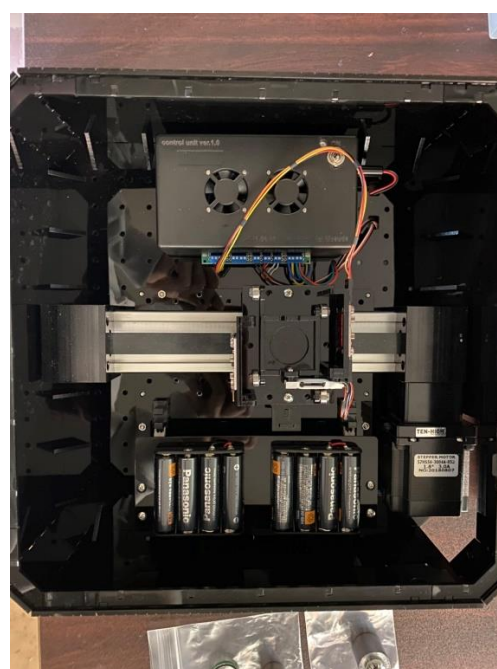


図5 CVG 模型の内容

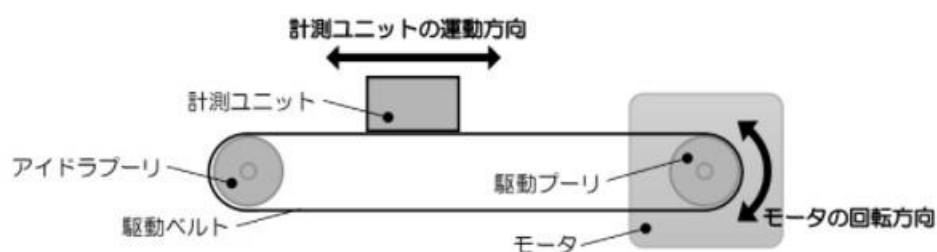


図6 計測ユニットの振動方法

### 3. 1. 計測ユニット

先ほど説明した CVG はセンサ内枠の移動量を計測することでコリオリ力を算出していた。CVG 模型は、力を計測することができるロードセルと呼ばれるセンサを用いてコリオリ力を直接計測する。このコリオリ力を計測するための装置を計測ユニットと呼称する。

計測ユニットは、試験質量 $m$ に働くコリオリ力を計測するための装置が統合されており、試験質量 $m$ 、台車、ロードセル、AD コンバータによって構成されている。台車は計測ユニットの運動（振動）方向に対して垂直の向きに自由に動けるように、摩擦（深溝玉軸受）の小さな滑車を取り付けられる。また、試験質量 $m$ が搭載された台車の中心位置から $l_0$ の位置にロードセルが搭載される。試験質量 $m$ は、2種類の分銅を用いることが可能で、50 g、100 g を選択することができる。なお、50 g の分銅を用いる場合は、分銅の移動を防止するための固定具と合わせて台車に搭載する。今説明した装置の仕様を表 1 にまとめる。

台車の質量を無視すると試験質量 $m$ が正弦波で振動した場合、試験質量 $m$ が受けるコリオリ力は (11), (15) 式を用いることで

$$F_Y = -2m\omega l\omega_m \cos(\omega_m t) \quad (18)$$

と表現することができ、ロードセルによってこの力を直接計測する。

表 1 計測ユニットの仕様

試験質量 $m$ [g]	50.0, 100.0
台車の中心位置からロードセルの距離 $l_0$ [mm]	22
台車の質量 $m_c$ [g]	17.3
50g分銅用固定具の質量 $m_a$ [g]	0.6

### 3. 1. 1. ロードセル

ロードセルとは、力を電気信号(電圧)に変換して出力する装置である。様々な作動原理を用いたロードセルがあるが、本実験ではひずみゲージを用いたひずみゲージ式ロードセルを用いる。ひずみゲージとは金属の伸び、縮みによって変化する電気抵抗に着目し、その抵抗変化からひずみ（長さの変化量/物体の初期状態における長さ）を検出する装置である。

本実験で用いるロードセルはロバーバル型であり、起歪体と呼ばれる外力によって特定の場所が大きくひずむように設計された弾性体の部品の 4 か所にひずみゲージを取り付けた構造である。実際に本実験で用いたロードセルを図 7 に示し、仕様を表 2 に示す。





図 7 使用するロードセル

表 2 ロードセルの仕様

型式番号	CZL639HD
定格容量 $m_{lr}$ [g]	100
最大容量 [g]	120
定格出力 $V_{lr}$ [ $\mu$ V/V]	600
最大誤差 [ $\mu$ V/V]	$\pm 150$
電源電圧 $V_l$ [V]	3 – 10

### 3. 1. 2. AD コンバータ

AD (analog-to-digital) コンバータとは、連続な信号を離散的な信号に置き換える装置である。ロードセルが出力する信号は連続的な電圧であるが、コンピュータ等（マイコン）は電圧の微妙な変化が読み取ることができない。なので、AD コンバータは図 8 のように、連続的な信号を階段状に分けることでコンピュータが認識することのできる 1 と 0 の数字の情報に書き換えることを目的とする装置である。

本実験では、Avia Semiconductor の HX711 という AD コンバータ IC を用いる。AD コンバータ IC の仕様は表 3 に示す。

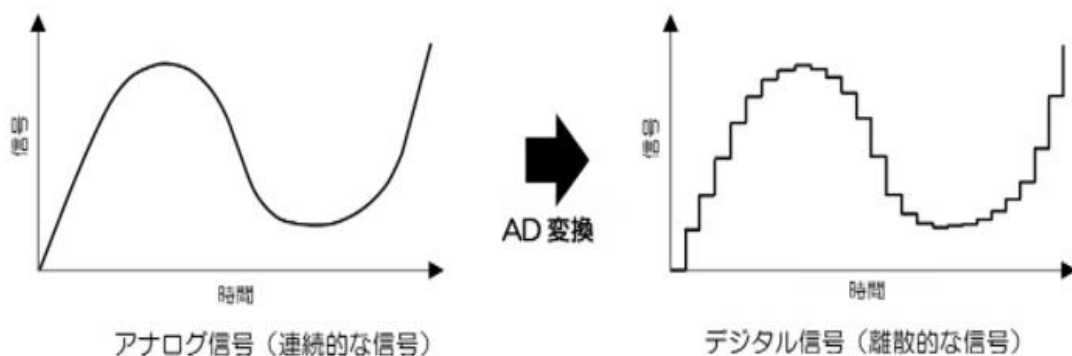


図 8 AD コンバータの概念

表 3 AD コンバータ IC の仕様

型式番号	HX711
分解能 $b_r$ [bit]	24
入力ゲイン $K_g$	128
基準電圧 $V_a$ [V]	705/164

一般の製品は AD コンバータより得られたバイナリ (AD コンバータから出力されるデジタル信号のこと) データを予めプログラムしておいた計算式によって、質量[g]や力[N]などの物理量に変換して表示している。しかし、本実験では、AD コンバータから得られたバイナリデータを直接出力される構造となっているため、自らの手によってバイナリデータを物理量に変換する必要がある。

AD コンバータが出力するバイナリデータから電圧に変換する式は次の式である。

$$V_0 = \frac{V_a}{b_r K_g} b_v \quad (19)$$

ここで、 $V_0$ はロードセルが出力した電圧、 $b_v$ は AD コンバータが出力するバイナリ、 $V_a$ は AD コンバータに印加される基準電圧、 $b_r$ は AD コンバータの分解能、 $K_g$ は入力ゲインである。

次に、ロードセルの電圧信号を力に変換する式を示す。

$$F_l = \frac{m_{lr} g}{V_{lr} V_l} V_0 \quad (20)$$

ここで、 $F_l$ はロードセルに印加された力、 $m_{lr}$ はロードセルの定格容量、 $V_{lr}$ はロードセルの定格出力、 $V_l$ はロードセルの電源電圧、 $g$ は重力加速度であり、これらのロードセルの仕様は、表 2 に示したとおりである。ロードセルに印加する電源電圧は、4V から 9V の範囲で

印加すればよいので，本実験では HX711 に印加した基準電圧と同値の 705/164V を印加する．

以上により，計測データを力に変換することができるので，CVG 模型によって計測した角速度 $\omega_G$ は，(18) 式を用いて

$$\omega_G = \frac{F_l}{-2m l \omega_m \cos(\omega_m t)} \quad (21)$$

によって算出することができる．

### 3. 2. 回転台

本実験では，CVG 模型を回転台に載せて，角速度を計測する．図 9 に回転台の外観を示す．回転台には DC モータが取り付けられ，図 10 に示す電源装置を用いて電源を供給する．電源装置は供給する電圧を任意に変更することが可能なので，実験には装置上側のボリュームを回転させて調節する．



図 9 回転台



図 10 電源装置 (AD-8723D)

#### 3. 2. 1. DC モータユニット

DC モータは，減速機，ホール素子型ロータリーエンコーダが組み込まれたユニットになっており，表 4 に詳細な仕様を示す．減速機は，モータの回転数を低下させるために用いられ，ホール素子型ロータリーエンコーダはモータの回転数を計測することに用いる．

#### 3. 2. 2. ホール素子型ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダとはモータ等の回転数を計測するために用いられるセンサである．

ロータリーエンコーダには様々な形式を用いたものがあるが、本実験では磁気を用いたホール素子型ロータリーエンコーダを用いる。その仕様は表4に示す。

ホール素子型ロータリーエンコーダは、モータの回転軸に磁石を埋め込んだ円盤を取り付け、円盤の外側にホール素子を配置する（図11）。円盤が回転すると埋め込まれた磁石が移動し、ホール素子に起電力が発生する。なので、予め磁石が埋め込まれている数が分かっているならば、何回起電したかを数えることで、回転量を計測することができる。また、ある時間内にどれくらい起電したかを数えれば回転速度を計算することができる。

本実験では、ロータリーエンコーダが出力したパルスをおシロスコープ（図12）によって確認して回転速度を計測する。DCモータを回転させるとロータリーエンコーダからパルス波が出力されることがおシロスコープでは確認できる。よって、任意の時間で何回パルスが生じたかを数えることでDCモータの回転速度 $\Omega_m$ を算出することができる。

回転台の回転数は、減速機を介して接続されており、減速比*i*によって回転台の回転数 $\Omega$ は次の式で与えられる。

$$\Omega = i\Omega_m \tag{22}$$

表4 DC モータの仕様

型式番号	Pololu #2826
定格電圧 [V]	12
最大出力 [W]	8
減速比 <i>i</i>	12/1225
エンコーダ分解能 [ppr]	64

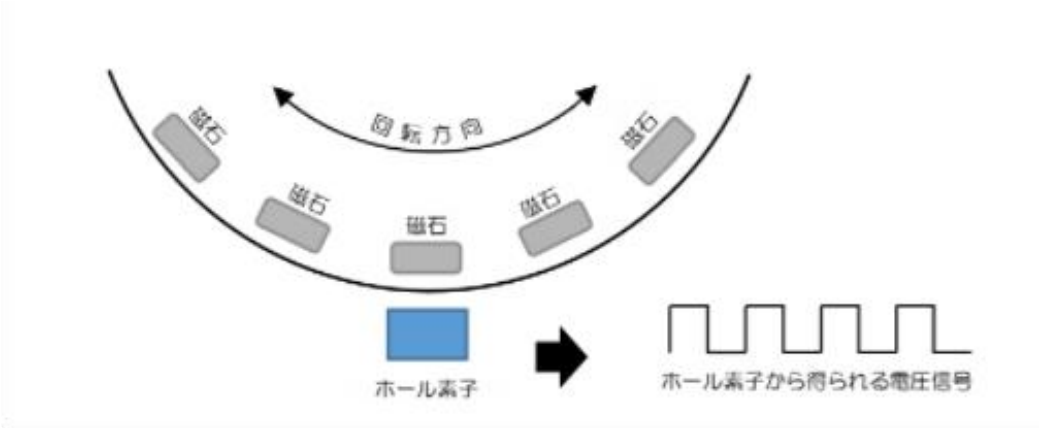


図11 ホール素子型ロータリーエンコーダの原理

また，分銅（50g, 100g）を図 13，無線受信機を図 14 に示す．



図 12 オシロスコープ

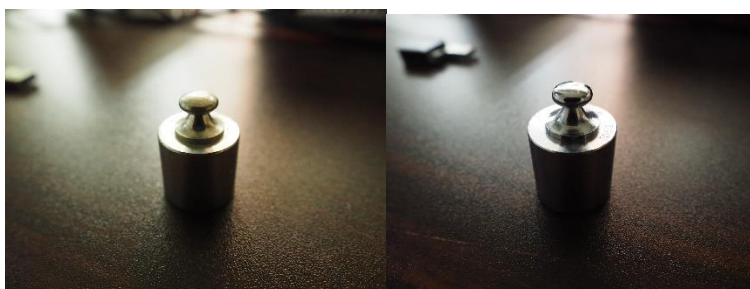


図 13 分銅（左：50 g，右：100 g）



図 14 無線受信機

#### 4. 実験方法

CVG 模型を回転台の上に載せてコリオリ力を計測する．なお，CVG 模型の設定値である試験質量 $m$ の大きさ（50.0g または 100.0g の分銅を選択する），試験質量 $m$ の振幅，試験質量 $m$ の振動の角周波数 $\omega_m$ を班員と相談して決定する．それらのパラメータは，4 パターンほどのセットを用意しておく．決定したパラメータは，PC に受信機を接続し，PC 上のソフト「Tera Term」を起動した後に，CVG 模型の電源を入れると図 15 に示す設定画面が表示される．表示の内容に沿ってパラメータの入力を行えばよいが，入力する際は単位等に特に注意する．

##### A) 回転台の動作確認

- A-0 回転台に CVG 模型が置いてある場合は，回転台から移動させる．
- A-1 オシロスコープの電源を入れる．
- A-2 実験用 PC の電源を入れる．
- A-3 オシロスコープに接続された USB ケーブルを実験用 PC に接続する．
- A-4 実験用 PC のソフト「Oscilloscope」を起動し，USB 接続が正常に行えていることを確認する．
- A-5 電源装置の電源を入れる．
- A-6 電源装置のディスプレイに表示されている電圧が 0.0 V であることを確認する．0.0V でない場合は電源装置の上側の電圧調整用のボリュームを左に回して出力電圧を 0.0V にする．
- A-7 電源装置の端子黒，端子赤を接続する．
- A-8 電源装置の上側の電圧調整用のボリュームを右側にゆっくり回転させて，4.0V ~9.0V の範囲で任意に決定する．
- A-9 回転台が回転していること，また，オシロスコープに波形が表示されていることを確認する．
- A-10 ソフト「Oscilloscope」で波形を正常に波形が保存できるか確認する．
- A-11 電圧調整用のボリュームを左に回して出力電圧を 0.0V に設定し，回転台を停止させる．
- A-12 電源装置とオシロスコープの電源落とさずにそのまま待機する．

##### B) CVG 模型の準備

- B-1 CVG 模型の蓋を開ける．
- B-2 CVG 模型の計測ユニットに分銅をセットする．  
50.0g の分銅を用いる場合は，固定具と一緒に取り付ける．
- B-3 無線受信機を USB ポートに挿入する．
- B-4 ソフト「Tera Term」を起動する．

- B-5 ソフト「Tera Term」でシリアルを選択後，設定，シリアルポートを選択し，スピードを「230400」に設定する．
- B-6 CVG 模型のスイッチを入れる．
- B-7 ソフト「Tera Term」で「\*\*\*\*\* 1 axis coriolis vibratory gyro ver.1.0 \*\*\*\*\* Please press any key ...」と表示されることを確認する．
- B-8 表示内容に従って，予め決めておいたパラメータを設定する．
- B-9 設定が完了したら BackSpace キーを押して設定画面に戻り実験を開始する．
- B-10 「Are you ready?」が表示されたら待機する．
- B-11 ソフト「Tera Term」でログを有効にして，保存ファイル名を半角英数字で任意に決め，最後に「.csv」をつける．

### C) 実験開始

- C-1 CVG 模型を回転台の上に載せる．
- C-2 電源装置の電圧調整用のボリュームを右側にゆっくり回転させて，4.0V~9.0V の範囲で任意に決定する．  
ボリュームを操作する場合は，ゆっくりと操作する．回転が急上昇すると装置が破損する場合があるので絶対に急激な操作をしないこと．
- C-3 回転台の回転が安定したら，キーボードの y キーを押して実験をスタートする．
- C-4 実験中は回転台の回転数を記録するため，ソフト「Oscilloscope」で波形を保存する．
- C-5 30 秒程度実験データを計測できたら，計測を終了（キーボード上の何かのキーを押す）する．
- C-6 パラメータを変更して同様の作業を繰り返す．

## 5. 実験結果

### 5. 1. パラメータ

本実験では，班で CVG 模型の設定値である試験質量 $m$ ，試験質量の振幅 $l$ ，試験質量の振動の角周波数 $\omega_m$ を決めた．それらのパラメータの組み合わせを実験条件 1, 2, 3, 4 とし，表 5 に示す．

表 5 CVG 模型の設定値

実験条件	1	2	3	4
試験試料 $m$ [g]	50	50	50	100
振幅 $l$ [mm]	5	5	30	30
角速度 $\omega_m$ [rad/s]	$\pi$	$5\pi$	$\pi$	$\pi$

式 (19) より

$$V_0 = \frac{705/164}{2^{24} \times 128} b_r$$

式 (20) より

$$F_l = \frac{100 \times 10^{-3} \times 9.81}{600 \times 5} V_0$$

## 5. 2. 計測データ

「 Tera Term 」 で得られたデータは、左の列からサンプル回数 $n_s$  (ラベル名 : sampling\_count[-]) , 試験質量 $m$ の $X$ 軸方向の位置 $x$ (ラベル名 : position[um]) , AD コンバータのバイナリデータ $b_v$  (ラベル名 : adc\_value(filtered)[binary]) である.

データのサンプリング周波数は 80Hz であるため、サンプル回数 $n_s$ と時間 $t$ は次の式の関係で示される.

$$t = \frac{n_s}{80} \quad (23)$$

(23) 式を用いてサンプル回数 $n_s$ を時間 $t$ , (19) 式より

$$V_0 = \frac{705/164}{2^{24} \times 128} b_r$$

となり, (20) 式より

$$F_l = \frac{100 \times 10^{-3} \times 9.81}{600 \times 5} V_0$$

となる. (19), (20) 式を用いて AD コンバータのバイナリデータ $b_v$ をコリオリ力 $F$ に変換し, 試験試料の位置 $x$ , コリオリ力 $F$ と時間 $t$ の関係を表したグラフを求めた. ただし, 縦軸を試験質量の位置 $x$ , コリオリ力 $F$ とし, 横軸は時間 $t$ とした, また, 実験条件 1, 2, 3, 4 のそれぞれのグラフを図 15, 16, 17, 18 に示す.



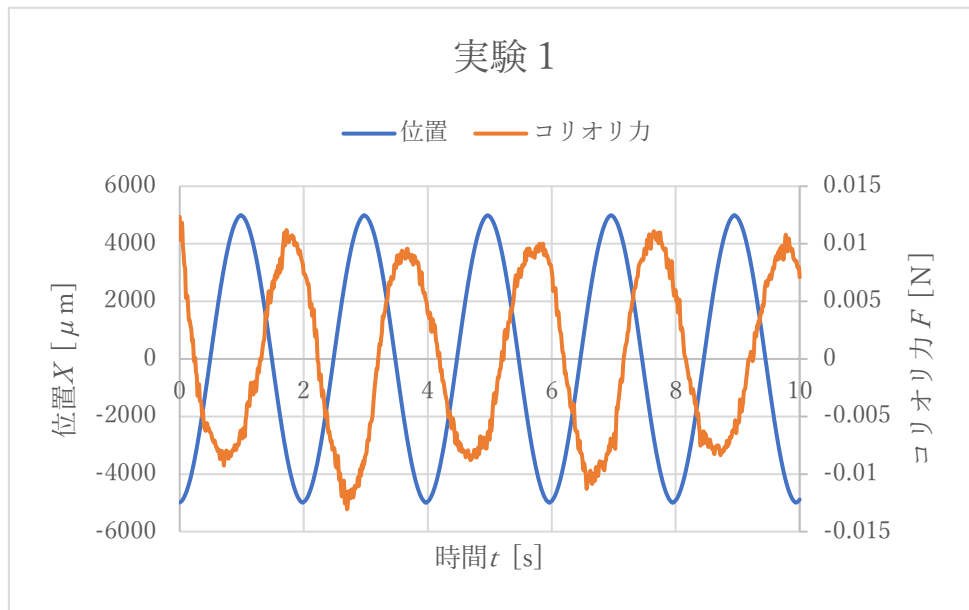


図 15 実験条件 1 の時の試験試料の位置 $x$ 、コリオリ力 $F$ と時間 $t$ の関係

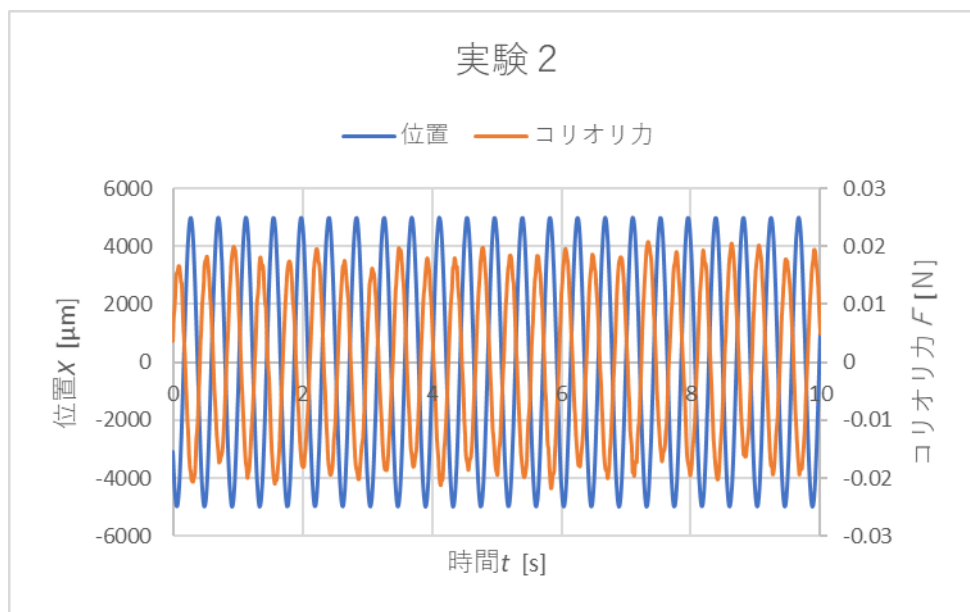


図 16 実験条件 2 の時の試験試料の位置 $x$ 、コリオリ力 $F$ と時間 $t$ の関係

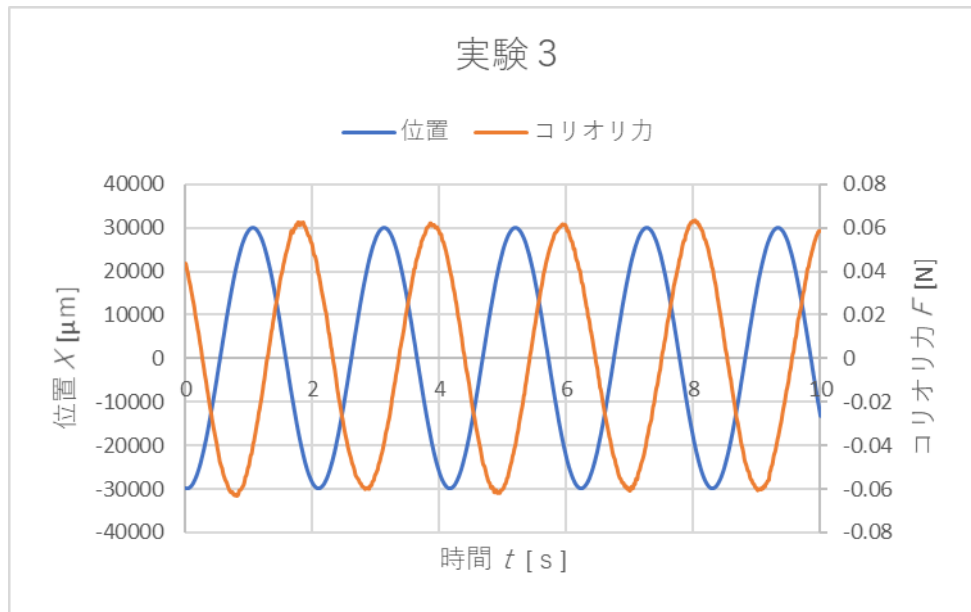


図 17 実験条件 3 の時の試験試料の位置 $x$ ，コリオリ力 $F$ と時間 $t$ の関係

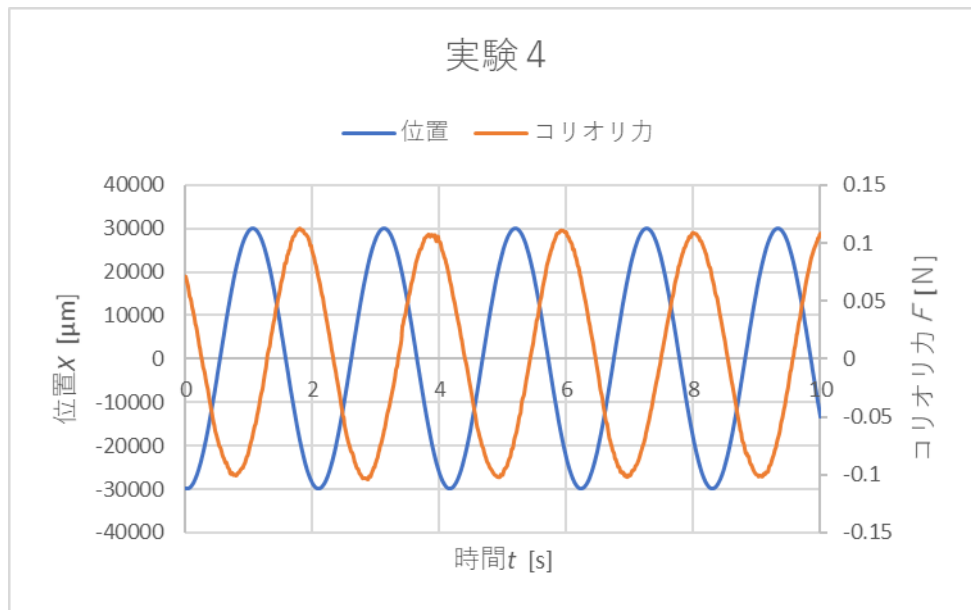


図 18 実験条件 4 の時の試験試料の位置 $x$ ，コリオリ力 $F$ と時間 $t$ の関係

### 5. 3. 結果

実験条件 1, 2, 3, 4 から回転台のロータリーエンコーダから得られた角速度 $\omega_l$ とコリオリ力から算出された角速度 $\omega_K$ を表 6 に示す。

ここで，回転数 $\Omega$ と角速度 $\omega$ の関係は次の式である。

$$\omega = 2\pi\Omega \quad (24)$$

回転台のロータリーエンコーダから得られたデータを (22) 式を用いて回転数 $\Omega$ を求め、回転数 $\Omega$ から角速度 $\omega_l$ を (24) 式を用いて求めた。

表 6 それぞれの実験条件での回転速度

ロータリーエンコーダから得た角速度 $\omega_l$ [rad/s]	4.62
実験条件 1 から得た角速度 $\omega_k$ [rad/s]	7.59
実験条件 2 から得た角速度 $\omega_k$ [rad/s]	5.26
実験条件 3 から得た角速度 $\omega_k$ [rad/s]	6.76
実験条件 4 から得た角速度 $\omega_k$ [rad/s]	7.39

## 6. 考察

実験条件 1 と 2 では角速度が異なり、実験条件 2 の方が大きい。(18) 式を考慮すると、コリオリ力は実験条件 2 の方が大きくなると考えられる。図 15 と図 16 を比較すると、図 16 の方が図 15 よりコリオリ力が大きくなっている。また、実験条件 2 は実験条件 1 の 5 倍の角速度であり、周期も約 5 倍になっていることが見てわかる。回転台のロータリーエンコーダから得た角速度 $\omega_l$ と、実験条件 1、および実験条件 2 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ では実験条件 1、および実験条件 2 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ の方が大きくなった。

実験条件 1 と 3 では試験質量の振幅が異なり、実験条件 3 の方が大きい。(18) 式を考慮すると、コリオリ力は実験条件 3 の方が大きいと考えられる。図 15 と図 17 を比較すると、図 17 の方が図 15 よりコリオリ力が大きくなっている。回転台のロータリーエンコーダから得た角速度 $\omega_l$ と実験条件 3 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ では、実験条件 3 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ の方が大きくなった。

実験条件 3 と実験条件 4 では試験質量が異なり、実験条件 4 の方が大きい。(18) 式を考慮すると、コリオリ力は実験条件 4 の方が大きいと考えられる。図 17 と図 18 を比較すると、コリオリ力は図 18 の方が図 17 より大きくなっている。回転台のロータリーエンコーダから得た角速度 $\omega_l$ と実験条件 4 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ では、実験条件 4 のコリオリ力から求めた角速度 $\omega_k$ の方が大きくなった。

以上より、(18) 式は理論と一致していることが分かった。また、今回の実験では角速度を固定しているため変化しないはずだが、回転台のロータリーエンコーダから得られた角速度 $\omega_l$ と、コリオリ力 $F$ から算出した角速度 $\omega_k$ の値は大きく異なった。この誤差の原因について、表 2 から分かるように、ロードセルの仕様上定格出力  $600\mu\text{V/V}$  に対して最大誤差が $\pm 150\mu\text{V/V}$ のため誤差が生じたのだと考察した。定格出力とは、指定された条件

の中で安全に使用できる範囲の出力である。今回使用したロードセルでは、プラスマイナス合わせると誤差の範囲は50%である。つまり、最大で1.25倍の誤差が許されている。定格出力が大きければ、誤差は小さくなるだろう。

また、本実験では50gの試験試料を止める部品や計測ユニットの質量を考えていないので、このことを考慮すると誤差は小さくなると考えられる。

## 7. 結論

コリオリ型振動型ジャイロセンサからコリオリ力を求め、角速度の計測方法やジャイロセンサの仕組みについて理解することはできたが、コリオリ力の理解はとても困難だった。コリオリ力が実際に目に見えるような実験を行うとよいだろう。

ロータリーエンコーダから得られた角速度とコリオリ力から求めた角速度にはずれが生じる。それは、ロードセルによる原因であることを考察した。実験機器の性能が高く、できるだけ誤差が小さいものを使うべきである

## 参考文献

受験のミカタ [https://juken-mikata.net/how-to/physics/colioris\\_force.html](https://juken-mikata.net/how-to/physics/colioris_force.html)

(2021.6.30 参照)

すみにくぼちぼち日記 <https://sumikuni.hatenablog.com/entry/2020/09/30/055231>

(2021.7.3 参照)