

# 令和3年度1月第1週 報告書

報告書 NO.09 - 1 2022/1/6 来代 勝胤

## 報告内容

1. 進捗状況
2. 実験装置の自動化
3. 評価実験
4. 補正処理の理論
5. 実験結果への適用
6. 次週の予定

### 1 進捗状況

自動ステージを用いた実験装置の自動化を目的として実験装置の製作を行った。また、実験結果の処理方法を検討し、結果として校正実験を行う際に、その作用力を正しい方向に加えることができれば、ひずみセンサの取付部の状況に関係なく電圧を作用力へと変換できることがわかった。

### 2 実験装置の自動化

マイクロステージの操作を人為的に行うと測定時に意図しない電圧変動が起こることや、操作回数が非常に多くなることから実験装置の自動化を図った。

#### 2.1 概要

使用している実験装置にはロードセルを移動させるための地面に対して並行移動するステージと作用力を与える角度を変化させるための回転ステージが取り付けられている。この2つのステージを自動ステージへと換装することで、実験の効率化とある程度の結果の保証が期待できる。本実験装置では以下の駿河精機の製品を使用した。

##### ■ 使用した実験装置

- 自動ステージコントローラ (DS102)
- $x$  軸マイクロモジュール (PG413-L05AG-C)
- 自動回転ステージ (KRW06360C-F)



Fig.1 Experimental device

### 3 評価実験

製作した実験装置を用いて作用力測定装置の評価実験を行った。

#### 3.1 実験条件

今回行った実験条件を以下の表1に示す。

Table 1 Experimental conditions

項目	条件数	備考
試験片	1	円筒：実験装置で使用
測定角度	24	15度ごとの測定
試行回数	3	

#### 3.2 実験方法

今回の実験では、以前行った模擬実験の方法をもとに検討し、以下のように設定した。

##### ■ 測定条件

- サンプル周期は 5[Hz] とする
- ロードセルをマイクロステージを用いて 0.03 [mm] ずつ移動させて作用力を加え電圧を測定する
- 基準を 0[mm] として、0.03[mm]、0.06[mm]、0.09[mm]、0.12[mm] の計 4 回移動させる

##### ■ 測定準備

- (1) ロードセルを測定する角度に固定
- (2) 粗動用ダイヤルでロードセルを大まかな位置に設定
- (3) マイクロステージを動かしてロードセルが供試体に接触する位置を 0.01[mm] 単位で特定
- (4) その位置を基準に測定を開始する

##### ■ 測定方法

- (1) 測定開始から 60 秒間待機する
- (2) 測定 (40 秒間)
- (3) 自動ステージ動作時間 (60 秒間)  
動作後、電圧の安定を図るため
- (4) (2)、(3) の作業を 5 回繰り返す (100 秒周期)  
5 回目はロードセル、供試体を非接触状態にする

### 3.3 実験結果

以下の Table.2 , Fig.1 に各角度における出力電圧の傾き (抗力:  $A_d$  ,揚力:  $A_l$ ) についての実験結果を示す．なお, それぞれの傾きは 3 会の実験データの平均値を使用している．

Table 2 Result summary average

Angle [deg]	$A_d$ [V/V]	$A_l$ [V/V]
0	-0.638	0.034
15	-0.630	-0.106
30	-0.576	-0.269
45	-0.478	-0.404
60	-0.371	-0.510
75	-0.226	-0.589
90	-0.031	-0.624
105	0.144	-0.619
120	0.311	-0.560
135	0.438	-0.466
150	0.538	-0.344
165	0.612	-0.189
180	0.635	-0.042
195	0.622	0.132
210	0.570	0.282
225	0.487	0.405
240	0.393	0.499
255	0.276	0.575
270	0.141	0.621
285	-0.018	0.643
300	-0.184	0.617
315	-0.347	0.546
330	-0.498	0.402
345	-0.594	0.220

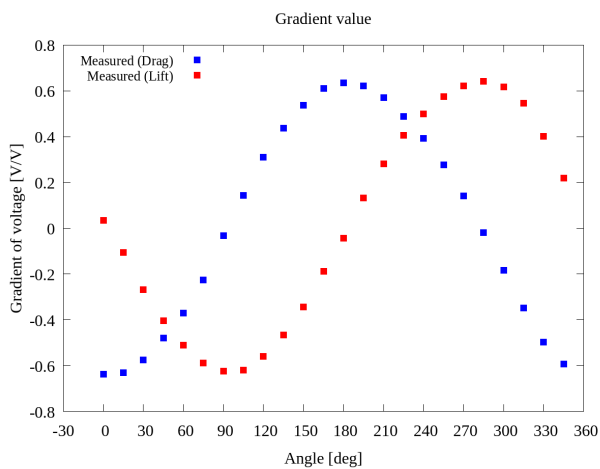


Fig.2 Result summary average

## 4 補正処理の理論

実験を行う過程で, 作用力測定装置と回流水槽等の作用力を与える装置を正しく設置することが非常に困難であることがわかった．そこで, 事前に作用力測定装置のひずみセンサー取付部について, 角度に対する出力電圧の特性を調べ, その結果を用いて, 後に行う校正実験結果に有効的な補正処理方法を検討した．

### 4.1 校正時の問題点

校正実験を行い, 出力電圧を評価するためにはそれぞれの実験装置を正しい方向 (角度) に設置する必要がある．しかし, これまでの実験過程及び結果から, 以下のような要因が校正実験の際に影響を与えていることがわかった．

- 抗力・揚力方向のひずみセンサが直角に取り付けられていない
- ひずみセンサ取付部が測定装置の正しく取り付けられていない
- 実験装置が水流に対して正しい方向に設置されていない
- 校正装置が正しく取り付けられていない

### 4.2 座標軸の回転による影響

ここで, 作用力の座標軸について抗力方向を  $x$  軸, 揚力方向を  $y$  軸, 同様にひずみセンサの座標軸について抗力・揚力方向をそれぞれ  $x'$  軸,  $y'$  軸とすると上記の校正時の問題点により, 以下の Fig.2 のようにひずみセンサの  $x'$  軸,  $y'$  軸は,  $x$  軸,  $y$  軸に対してそれぞれ角度  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  だけズレが生じていると考えられる．

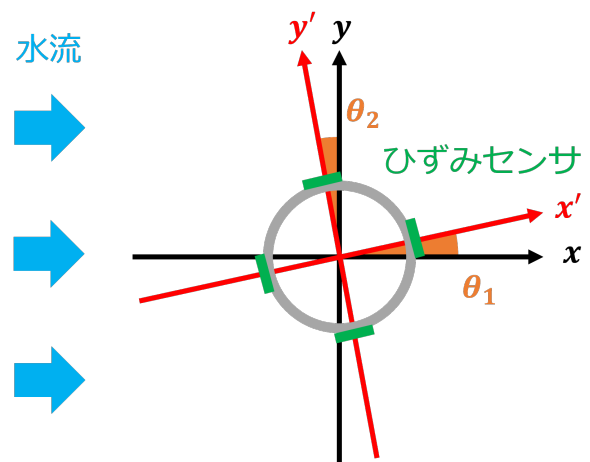


Fig.3

このとき、作用力  $F$  が加えられたとき、それぞれの方向に以下の Fig.3 のような作用力  $F_x, F_y, F_{x'}, F_{y'}$  が加わる。

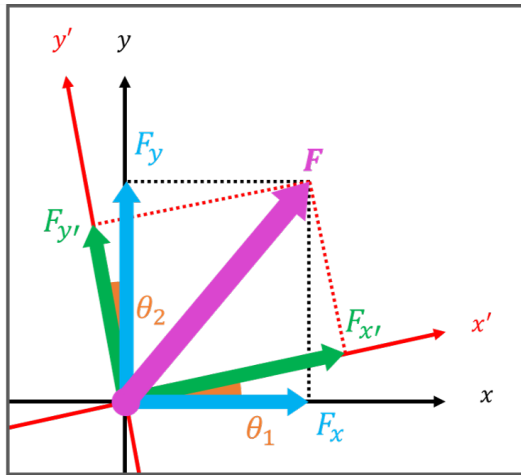


Fig.4

ここで、測定装置から得られる出力電圧は  $F_{x'}$  および、 $F_{y'}$  に起因するものであり、作用力を評価するためには、この電圧を本来の抗力・揚力方向である  $x$  軸、 $y$  軸方向（以後、正規座標系とする）の電圧に変換し、作用力へと換算する必要がある。

#### 4.3 位相角の算出

まずはじめに、座標軸においてそれぞれの角度のズレ  $\theta_1, \theta_2$  の大きさを調べる必要がある。評価実験結果から算出された、各角度に対する出力電圧の傾きの大きさの値から正弦波状の結果を得ることができた。ここで、離散フーリエ変換を適用し、波数 1 の成分について位相角を算出することで理論上の位相との位相差を求めることができる。

##### ■ 位相角 $\phi$ の算出

$$\phi [\text{deg}] = \arctan \left( \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \right) \times \frac{180}{\pi}$$

位相角  $\phi$  は、フーリエ変換の性質上、余弦波に対する位相角を示している。

また、各角度に対する出力電圧の傾きの大きさについて、抗力・揚力方向の理論式は抗力方向の出力電圧を  $V_x$ 、揚力方向の出力電圧を  $V_y$  として以下のように表される。

##### ■ 抗力・揚力における出力電圧の理論式

$$V_x = A \sin \left( \omega t + \frac{3}{2} \pi \right) = A \cos (\omega t + \pi)$$

$$V_y = A \sin (\omega t + \pi) = A \cos \left( \omega t + \frac{1}{2} \pi \right)$$

$A$  は定数

したがって、算出した位相角を抗力・揚力方向についてそれぞれ  $\phi_1, \phi_2$  とすると、理論値との位相差  $\theta_1, \theta_2$  は以下のように算出される。

##### ■ 抗力・揚力における出力電圧の位相差の算出

$$\theta_1 = \pi - \phi_1$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \pi - \phi_2$$

これより、Fig.1 における波形はそれぞれの方向について  $\theta_1, \theta_2$  だけ遅れているということがわかる。すなわち、Fig.3 について、座標軸  $x'$  軸、 $y'$  軸は左回りを正の方向として、正規座標系に対してそれぞれ  $\theta_1, \theta_2$  だけ回転していることになる。

また、抗力・揚力方向ひずみセンサの取付角  $\phi$  は、ひずみセンサにおける抗力・揚力方向の位相角  $\phi_1, \phi_2$  の差から求めることができる。

##### ■ 抗力・揚力方向のひずみセンサの取付角度 $\phi$

$$\phi = |\phi_x - \phi_y|$$

#### 4.4 出力電圧の座標変換

位相角  $\theta_1, \theta_2$  が求められたことから、それらを用いて座標変換を行う。ここで、ひずみゲージにおける抗力・揚力方向座標軸である  $x'$  軸、 $y'$  軸をそれぞれ  $f_{x1}(x), f_{y1}(x)$  として、正規座標軸の  $x$  を用いた式で表す。

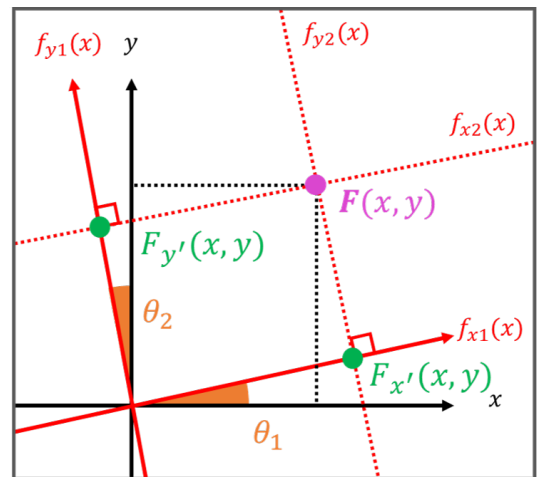


Fig.5

算出した位相角  $\theta_1, \theta_2$  より、 $f_{x1}(x), f_{y1}(x)$  は以下のように表される。

##### ■ $f_{x1}(x), f_{y1}(x)$ の算出

$$f_{x1}(x) = \tan \theta_1 x$$

$$f_{y1}(x) = -\frac{1}{\tan \theta_2} x$$

このとき、作用力  $F$  は、Fig. に示す点  $F$  の座標を表すベクトルと考えることができる。また、その座標は Fig.4 より、 $f_{x1}(x)$ 、 $f_{y1}(x)$  の法線で、点  $F_{x'}$ 、 $F_{y'}$  を通る直線、 $f_{x2}(x)$ 、 $f_{y2}(x)$  の交点であることがわかる。

ここで、ひずみゲージから得ることのできる出力電圧の傾きから、 $F_{x'}$ 、 $F_{y'}$  のベクトルの大きさ  $|F_{x'}|$ 、 $|F_{y'}|$  を得ることができる。角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  が求められていることから、点  $F'_x$ 、 $F'_y$  の座標は以下のように求めることができる。

■ 点  $F'_x$ 、 $F'_y$  の座標

$$\begin{aligned} F'_{x'}(x, y) &= (|F_{x'}| \cos \theta_1, |F_{x'}| \sin \theta_2) \\ F'_{y'}(x, y) &= (-|F_{y'}| \sin \theta_1, |F_{y'}| \cos \theta_2) \end{aligned}$$

次に、直線  $f_{x2}(x)$ 、 $f_{y2}(x)$  を求める。 $f_{x1}(x)$ 、 $f_{y1}(x)$ 、点  $F'_x$ 、 $F'_y$  の座標の座標からそれぞれ以下のように算出される。

■  $f_{x2}(x)$ 、 $f_{y2}(x)$  の算出

$$\begin{aligned} f_{x2}(x) &= -\frac{1}{\tan \theta_1} x + \frac{|F_{x'}|}{\sin \theta_1} \\ f_{y2}(x) &= \tan \theta_2 x + \frac{|F_{y'}|}{\cos \theta_2} \end{aligned}$$

以上の  $f_{x2}(x)$ 、 $f_{y2}(x)$  から、交点の座標  $F(x, y)$  を求めると以下ようになる。

■  $F(x, y)$  の算出

$$\begin{aligned} x &= \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \\ y &= -\frac{1}{\tan \theta_1} \left( \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|F_{x'}|}{\sin \theta_1} \\ &= \tan \theta_2 \left( \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|F_{y'}|}{\cos \theta_2} \end{aligned}$$

したがって、正規座標系における抗力  $F_x$  および揚力  $F_y$  は、以下のように表される。

■ 抗力  $F_x$ ・揚力  $F_y$  の大きさ

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \\ F_y &= -\frac{1}{\tan \theta_1} \left( \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|F_{x'}|}{\sin \theta_1} \\ &= \tan \theta_2 \left( \frac{F_{x'} \cos \theta_2 - F_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|F_{y'}|}{\cos \theta_2} \end{aligned}$$

以上の過程よりひずみセンサにおける座標系から正規座標系への変換が可能である。

#### 4.5 テストデータへの適用

抗力  $F_x$ ・揚力  $F_y$  を導出する補正理論についてテストデータを作成し、それに適用することでその有効性を確かめた。

■  $\theta_1 = 15$  [deg]、 $\theta_2 = 20$  [deg] のとき

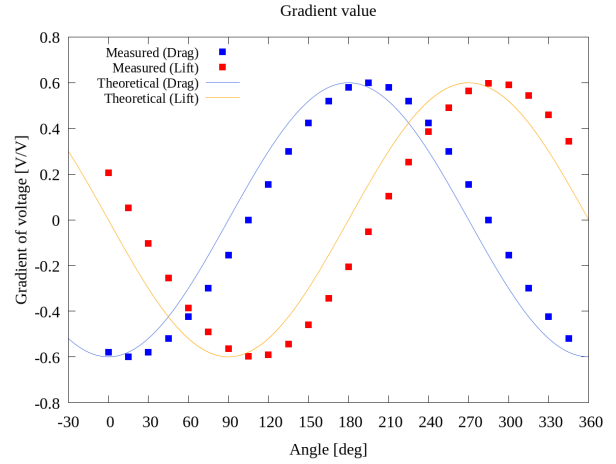


Fig.6 Test data ( $\theta_1 = 15$  [deg]、 $\theta_2 = 20$  [deg])

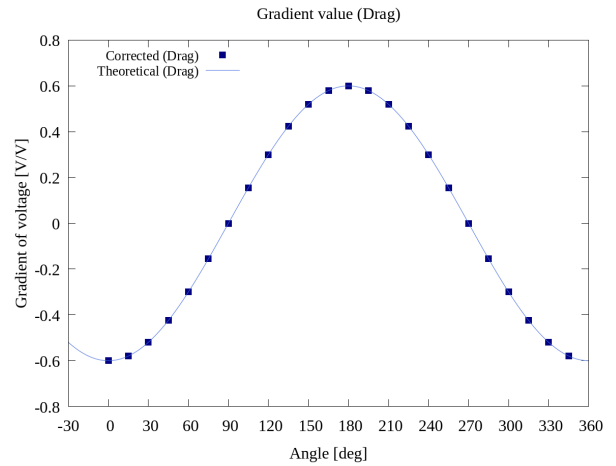


Fig.7 Corrccted data : drag ( $\theta_1 = 15$  [deg]、 $\theta_2 = 20$  [deg])

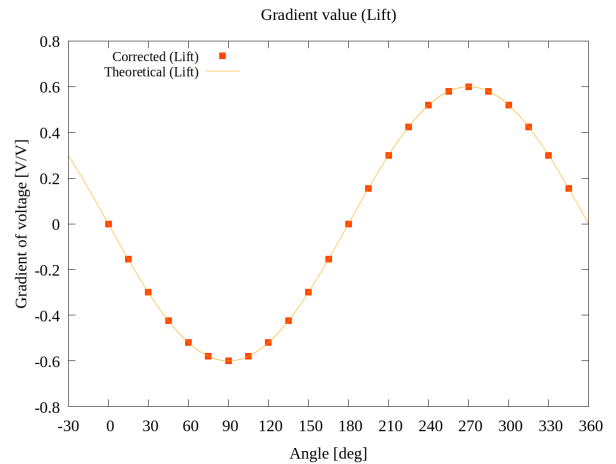


Fig.8 Corrccted data : lift ( $\theta_1 = 15$  [deg]、 $\theta_2 = 20$  [deg])

■  $\theta_1 = -15$  [deg] ,  $\theta_2 = -20$  [deg] のとき

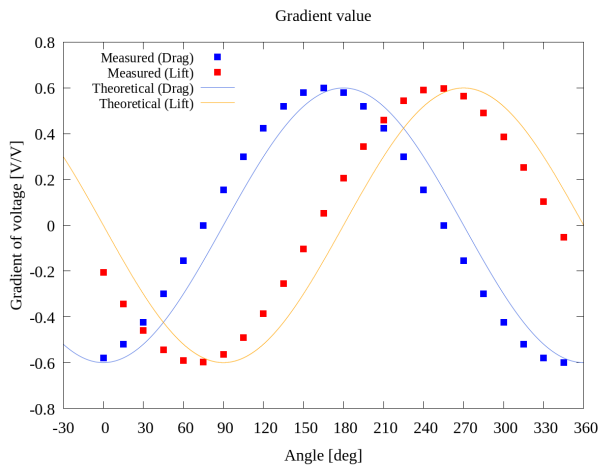


Fig.9 Test data ( $\theta_1 = -15$  [deg] ,  $\theta_2 = -20$  [deg])

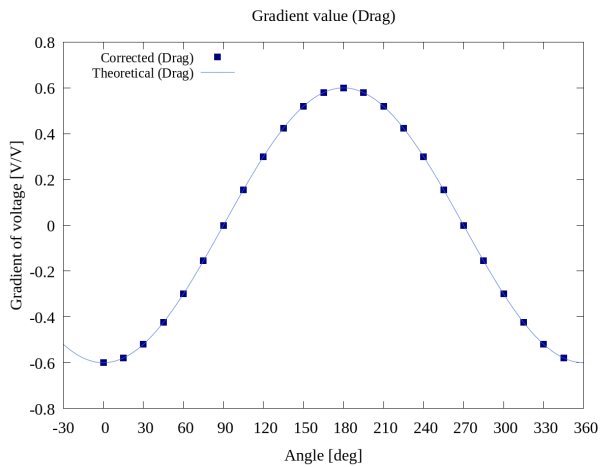


Fig.10 Corrceted data : drag ( $\theta_1 = -15$  [deg] ,  $\theta_2 = -20$  [deg])

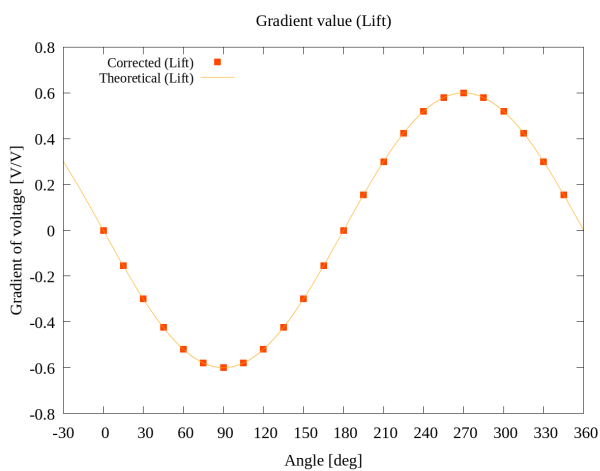


Fig.11 Corrceted data : lift ( $\theta_1 = -15$  [deg] ,  $\theta_2 = -20$  [deg])

■  $\theta_1 = 90$  [deg] ,  $\theta_2 = 90$  [deg] のとき

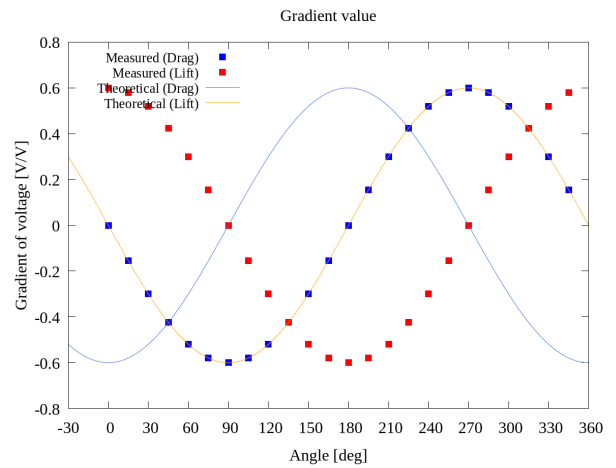


Fig.12 Test data ( $\theta_1 = 90$  [deg] ,  $\theta_2 = 90$  [deg])

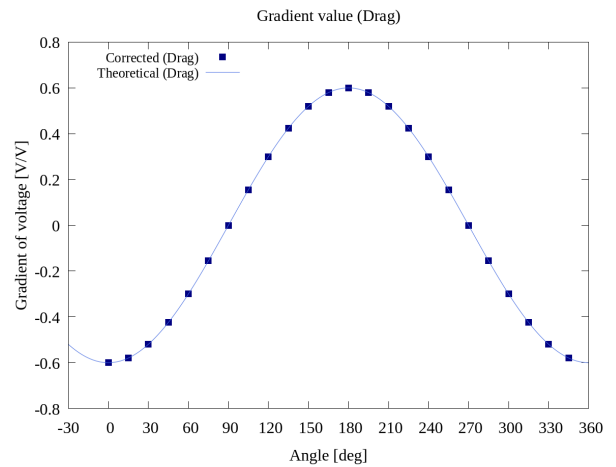


Fig.13 Corrceted data : drag ( $\theta_1 = 90$  [deg] ,  $\theta_2 = 90$  [deg])

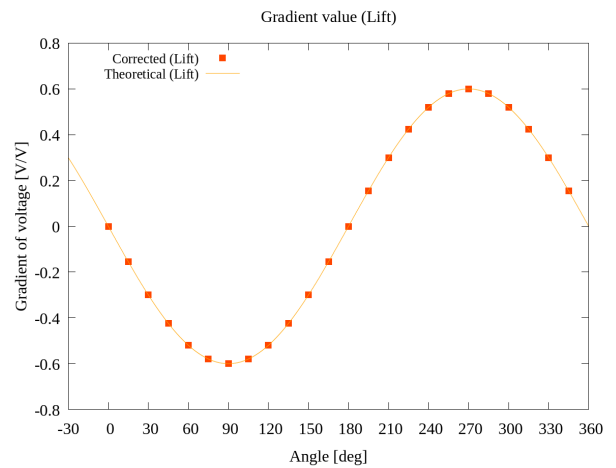


Fig.14 Corrceted data : lift ( $\theta_1 = 90$  [deg] ,  $\theta_2 = 90$  [deg])

振幅は , 実験結果をもとに 0.6 と設定している .

## 5 実験結果への適用

はじめに，Table 1 の実験結果から，抗力・揚力方向の位相角を求める．4.3 位相角の算出をもとに算出する．実験結果に離散フーリエ変換を適用した結果を Fig.14，Fig.15 に，波数 1 についての値を Table 3 に示す．

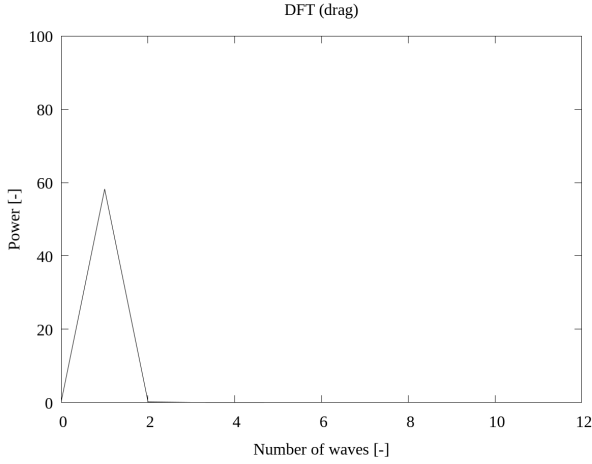


Fig.15 DFT result : drag

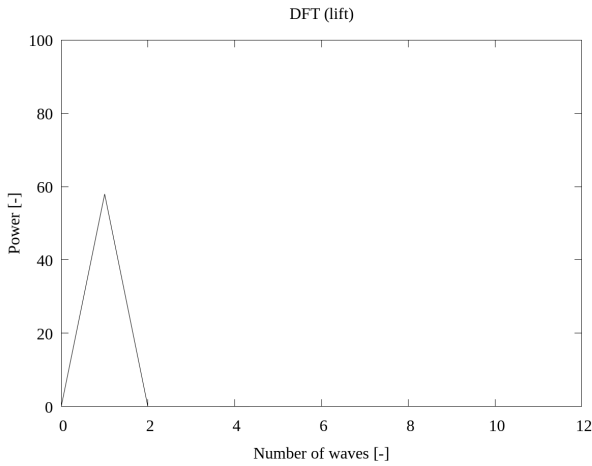


Fig.16 DFT result : lift

Table 3 FFT result (Wave number [1])

	<i>Re</i>	<i>Im</i>
Measured [Drag]	-7.576	0.930
Measured [Lift]	0.662	7.585

Fig.14，Fig.15 をみると，離散フーリエ変換を適用すると抗力・揚力方向ともに波数 1 についてピークがあることがわかる．これより，実験結果から得られる波形の特徴を捉えられていることがわかる．

したがって，位相差  $\theta_1, \theta_2$  は以下の Table 4 のように求めることができる．

Table 4 Difference of phase angle

	$\phi_1$ [deg]	$\phi_2$ [deg]
Theory	180.0	90.0
Measured	173.0	85.0
Difference [ $\theta$ ]	-7.0	-5.0

算出した位相差  $\theta_1, \theta_2$  より，補正理論を適用した結果を以下の Table 5 に示す．また，補正後のそれぞれの傾きを抗力： $A'_d$ ，揚力： $A'_l$  とし，それらから算出される正味出力電圧を  $A_{net}$  とする．

### ■ 正味出力電圧の算出

$$A_{net} = \sqrt{A_d'^2 + A_l'^2}$$

Table 5 Result summary

Angle [deg]	$A'_d$ [V/V]	$A'_l$ [V/V]	$A_{net}$ [V/V]
0	-0.640	-0.022	0.640
15	-0.615	-0.161	0.636
30	-0.541	-0.317	0.627
45	-0.428	-0.443	0.616
60	-0.307	-0.539	0.620
75	-0.154	-0.604	0.624
90	0.045	-0.623	0.624
105	0.219	-0.602	0.641
120	0.378	-0.529	0.650
135	0.493	-0.425	0.651
150	0.578	-0.295	0.649
165	0.633	-0.134	0.647
180	0.638	0.013	0.638
195	0.604	0.186	0.632
210	0.534	0.329	0.627
225	0.436	0.445	0.623
240	0.331	0.530	0.625
255	0.205	0.595	0.630
270	0.065	0.629	0.633
285	-0.096	0.637	0.644
300	-0.258	0.596	0.650
315	-0.413	0.512	0.657
330	-0.545	0.356	0.651
345	-0.619	0.166	0.641
Average	0.023	0.013	0.637

## ■ 補正適用前

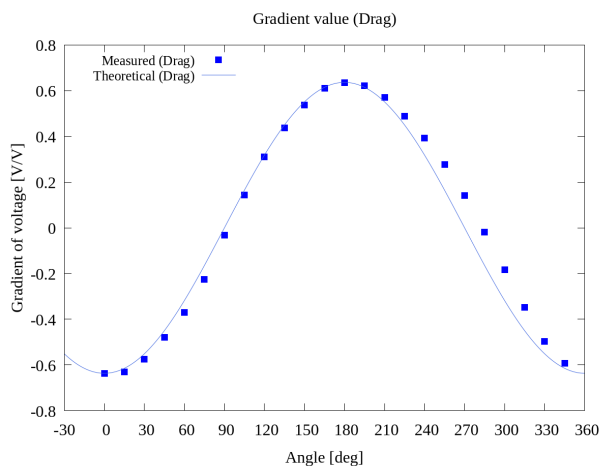


Fig.17 Raw data : drag

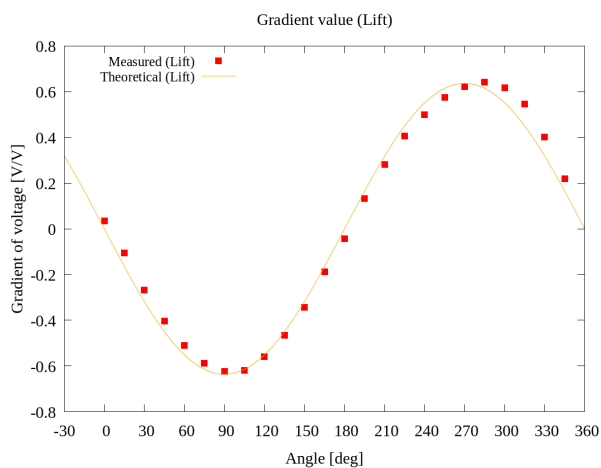


Fig.18 Raw data : lift

Fig.16 , Fig.17 は補正適用前の平均値をプロットした図である．これらを見ると，理論曲線に対して測定値は少し位相が遅れた波形を示していることがわかる．

## ■ 補正適用後

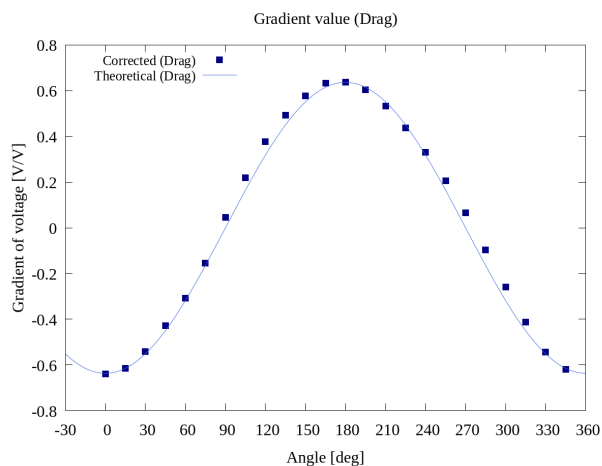


Fig.19 Corrected data : drag

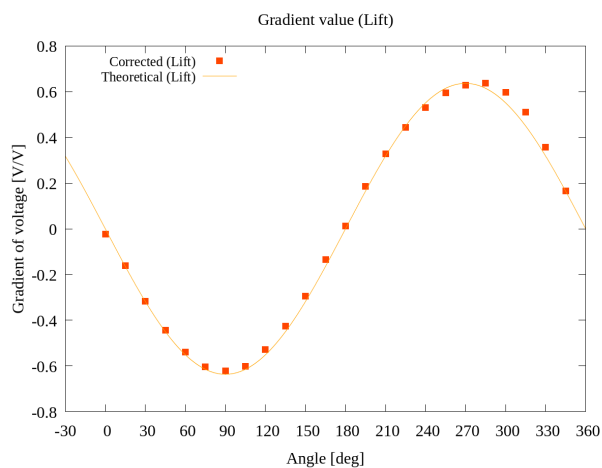


Fig.20 Corrected data : lift

補正後の結果 Fig.18 , Fig.19 をみると，テストデータと同様におおよそ理論曲線上にデータが位置していることがわかる．ただし，完全に一致していることはいえず，外れているデータについてその原因を考察する必要がある．

## ■ 正味出力電圧

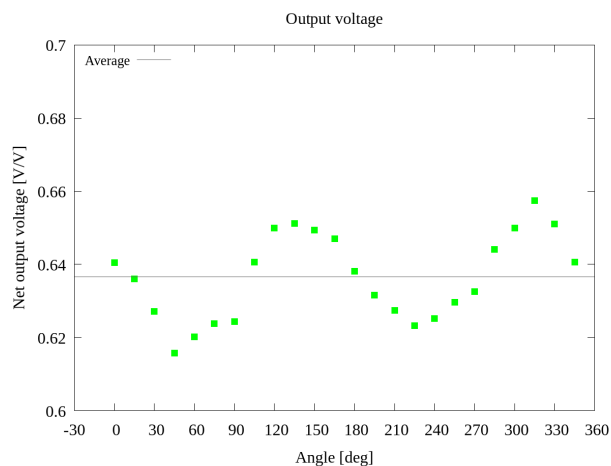


Fig.21 Summary of net voltage (Corrected)

また，正味出力電圧について算出した分散と標準偏差を以下の Table 6 に示す．

Table 6 Net voltage's variation and standard deviation

Variance	0.000133
Standard deviation	0.012

ここで，Table 5 の正味出力電圧における平均値と Table 6 の標準偏差を比較すると，標準偏差は平均値の 1.9% 程度の範囲を示していることがわかる．

## ■ 平均値に対する標準偏差の割合

$$\frac{0.012}{0.637} \times 100 \approx 1.88[\%]$$

## 6 次週の予定

- 取付角度の推定方法の検討
- 卒業論文の執筆開始