

令和3年度

# 卒業論文

題目

ひずみセンサを用いた

揚抗力同時測定法の性能に関する一考察

学籍番号

18123026

提出者

来代 勝胤

指導教員

村田 滋 教授

指導教員

田中 洋介 准教授

京都工芸繊維大学 工芸科学部

機械システム工学課程

## 概要

# 目次

1.	序論 . . . . .	4
2.	実験装置 . . . . .	5
2.1	作用力測定装置 . . . . .	5
2.2	校正実験装置 . . . . .	5
2.3	測定理論 . . . . .	5
2.4	抗力・揚力における出力電圧勾配の理論式 . . . . .	5
3.	校正理論 . . . . .	6
3.1	作用力測定装置と校正実験装置の関係 . . . . .	6
3.2	出力電圧勾配 . . . . .	7
3.3	座標系の回転における補正理論 . . . . .	7
3.4	回転角 $\theta_{x1}$ , $\theta_{y1}$ の算出 . . . . .	7
3.5	出力電圧勾配の座標変換 . . . . .	8
3.6	補正理論のテストデータへの適用 (1) . . . . .	10
3.6.1	テストデータ : Case 1 . . . . .	10
3.6.2	テストデータ : Case 2 . . . . .	11
3.6.3	テストデータ : Case 3 . . . . .	12
3.6.4	テストデータ : Case 2 . . . . .	12
3.7	座標系のオフセットにおける補正理論 . . . . .	13
3.8	複合状態における補正理論 . . . . .	13
3.9	推定理論 . . . . .	13
4.	基礎実験 (1) . . . . .	14
4.1	実験方法 . . . . .	14
4.2	実験結果 . . . . .	14
5.	基礎実験 (2) (特性評価実験) . . . . .	15
5.1	実験方法 . . . . .	15
5.2	実験結果 . . . . .	15
5.3	補正適用結果 . . . . .	15
5.4	テストデータの作成 . . . . .	15
6.	応用実験 (推定実験) . . . . .	16
6.1	実験方法 . . . . .	16
6.2	実験結果 . . . . .	16
	謝辞 . . . . .	17
	付録 . . . . .	17

## 記号表

$(x, y)$	: 水流に対する座標系，正規座標系
$(x', y')$	: 作用力測定装置の座標系，座標系 [1]
$(x'', y'')$	: 校正実験装置の座標系，座標系 [2]
$V_d$	: 作用力測定実験から得た抗力方向における出力電圧 [V]
$V_l$	: 作用力測定実験から得た揚力方向における出力電圧 [V]
$F_x$	: 正規座標系 $(x, y)$ について抗力方向における荷重 [N]
$F_y$	: 正規座標系 $(x, y)$ について揚力方向における荷重 [N]
$\theta_x$	: 正規座標系 $x$ 軸と座標系 [1] $x'$ 軸の角度 [deg]
$\theta_y$	: 正規座標系 $y$ 軸と座標系 [1] $y'$ 軸の角度 [deg]
$\Delta x$	: 正規座標系 $x$ 軸と座標系 [2] $x''$ 軸の $y$ 方向の距離 [mm]
$\Delta y$	: 正規座標系 $y$ 軸と座標系 [2] $y''$ 軸の $x$ 方向の距離 [mm]
$v_d$	: 基礎実験結果から得た抗力方向における出力電圧勾配 [V/V]
$v_l$	: 基礎実験結果から得た揚力方向における出力電圧勾配 [V/V]
$v_{d'}$	: 軸のオフセットについて補正を適用した抗力方向における出力電圧勾配 [V/V]
$v_{l'}$	: 軸のオフセットについて補正を適用した揚力方向における出力電圧勾配 [V/V]
$v_x$	: 正規座標系 $(x, y)$ について抗力方向における出力電圧勾配 [V/V]
$v_y$	: 正規座標系 $(x, y)$ について揚力方向における出力電圧勾配 [V/V]

### 3.x 抗力・揚力における出力電圧勾配の理論式

$v_{x \text{ Theory}}$	: 理論上の抗力方向における出力電圧勾配
$v_{y \text{ Theory}}$	: 理論上の揚力方向における出力電圧勾配
$\omega$	: 角度

### 3.2 座標系の回転における補正理論

$F_1$	: 作用力
$\theta_{x1}$	: 正規座標系 $x$ 軸と座標系 [1] $x'$ 軸の角度
$\theta_{y1}$	: 正規座標系 $y$ 軸と座標系 [1] $y'$ 軸の角度
$F_{1x}$	: $x$ 軸方向作用力
$F_{1y}$	: $y$ 軸方向作用力
$F_{1x'}$	: $x'$ 軸方向作用力
$F_{1y'}$	: $y'$ 軸方向作用力

## 1. 序論

## 2. 実験装置

### 2.1 作用力測定装置

作用力測定装置について説明する．

### 2.2 校正実験装置

校正実験装置について説明する．

### 2.3 測定理論

### 2.4 抗力・揚力における出力電圧勾配の理論式

$$v_{x \text{ Theory}} = A \sin \left( \omega + \frac{3}{2} \pi \right) = A \cos (\omega + \pi) \quad (1)$$

$$v_{y \text{ Theory}} = A \sin (\omega + \pi) = A \cos \left( \omega + \frac{1}{2} \pi \right) \quad (2)$$

### 3. 校正理論

作用力測定装置から得た抗力方向および揚力方向における出力電圧  $V_D, V_L$  を正規座標系の  $x$  軸方向および  $y$  軸方向の荷重  $v_x, v_y$  に換算する際に, 出力電圧  $V_D, V_L$  と  $v_x, v_y$  の関係性を明らかにするための校正実験を行う必要がある. 校正実験によって得られた結果を用いて関係性を明らかにするための校正理論について述べる.

#### 3.1 作用力測定装置と校正実験装置の関係

はじめに, 作用力測定装置と校正実験装置の関係について説明する.

作用力測定装置と校正実験装置の設置位置によって校正実験結果は大きく変動するため, その影響を考慮し, 補正処理を行う必要がある. このとき以下のような要因が, 校正実験結果への影響を与えていると考えられる.

- (1) 作用力測定装置にひずみセンサが正確に取り付けることが難しい
- (2) 作用力測定装置が回流水槽に正確に設置することが難しい
- (3) 作用力測定装置と校正装置の回転軸を一致させることが難しい

ここで, 水流に対する座標系を正規座標系  $(x, y)$ , 作用力測定装置の座標系を座標系 (1)  $(x', y')$ , 校正装置の座標系を座標系 (2)  $(x'', y'')$  とする.

このとき, (1) 作用力測定装置にひずみセンサを正確に取り付けることが難しいこと, (2) 作用力測定装置が回流水槽に正確に設置することが難しいことから, 座標系 [1] は正規座標系に対して  $x'$  軸は  $x$  軸から  $\theta_x1$ ,  $y'$  軸は  $y$  軸から  $\theta_y1$  だけ回転している. また, 座標系 [2] は正規座標系に対して  $x''$  軸は  $x$  軸から  $y$  方向に  $\Delta x$ ,  $y''$  軸は  $y$  軸から  $x$  方向に  $\Delta y$  だけオフセットを持つ状態となる.

### 3.2 出力電圧勾配

作用力測定装置を評価にあたり，作用力測定装置に取り付けられた 2 組のひずみセンサおよび校正実験の際に作用力を与えるロードセルの出力電圧の対応関係を調べることで評価を行う．ここで，作用力測定装置において抗力方向のひずみセンサの出力電圧を  $V_d$ ，揚力方向を  $V_l$ ，ロードセルの出力電圧を  $V$  とするとき，抗力方向の出力電圧勾配を  $v_d$ ，揚力方向の出力電圧勾配を  $v_l$  とすると以下のように表すことができる．

$$v_d = V_d/V \quad (3)$$

$$v_l = V_l/V \quad (4)$$

### 3.3 座標系の回転における補正理論

正規座標系と座標系 [1] の回転における補正理論を説明する．ここでは，座標系のオフセットはない ( $\Delta x = 0, \Delta y = 0$ ) として考える．上述の通り正規座標系と座標系 [1] について，以下の Fig. のように回転角  $\theta_{x1}, \theta_{y1}$  を持つ．ここで，作用力  $F_1$  を与えるとそれぞれの方向に作用力  $F_{x1}, F_{y1}, F_{x'1}, F_{y'1}$  が加わる．このとき，作用力測定装置から得られる電圧  $V_{d1}, V_{l1}$  は作用力  $F_{x'1}, F_{y'1}$  に起因するものである．また，得られた出力電圧  $V_{d1}, V_{l1}$  および  $V_{x'1}, V_{y'1}$  から，ロードセルの出力電圧  $V_1$  を用いて出力電圧勾配  $v_{d1}, v_{l1}$  および  $v_{x'1}, v_{y'1}$  を求めることができる．したがって，正規座標系と座標系 [1] の関係について， $v_{x1}$  と  $v_{x'1}$  および  $v_{y1}$  と  $v_{y'1}$  の関係を明らかにすれば良い，

### 3.4 回転角 $\theta_{x1}, \theta_{y1}$ の算出

はじめに，回転角  $\theta_{x1}, \theta_{y1}$  を算出する．理論式における  $v_{x \text{ Theory}}$  及び  $v_{y \text{ Theory}}$  は正弦波とその位相差で表すことができる．したがって，校正実験結果の各角度の出力電圧勾配においても同様の正弦波とその位相差で表すことが可能であると予想することができる．このとき，離散フーリエ変換を適用し，波数 1 の成分について，実部を  $Re$ ，虚部を  $Im$  として位相角  $\phi$  を求めることができる．

$$\phi = \arctan\left(\frac{Im}{Re}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

抗力方向の結果から得られた位相角を  $\phi_1$ ，揚力方向から得られた位相角を  $\phi_2$  とするとき，抗力方向の出力電圧勾配  $v_d$  と正規座標系における  $x$  軸方向の出力電圧勾配の理論値  $v_{x \text{ Theory}}$  との位相差  $\theta_1$ ，揚力方向の出力電圧勾配  $v_l$  と正規座標系における  $y$  軸方向の出力電圧勾配の理論値  $v_{y \text{ Theory}}$  との位相差  $\theta_2$  は以下のように表される．



$$\theta_1 = \pi - \phi_1 \quad (6)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \phi_2 \quad (7)$$

したがって、 $x'$  軸、 $y'$  軸は左回りを正方向として、それぞれ  $\theta_1, \theta_2$  だけ回転していることとなる。また、作用力測定装置に取り付けられた抗力・揚力方向のひずみセンサの取付角  $\phi_s$  は位相角  $\phi_1, \phi_2$  より求めることができる。

$$\phi_s = |\phi_1 - \phi_2| \quad (8)$$

### 3.5 出力電圧勾配の座標変換

位相角  $\theta_1, \theta_2$  が求められたことから、それらを用いて出力電圧勾配の座標変換を行う。ここで、座標系 [1] の  $x'$  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。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。

$$f_{x1}(x) = \tan \theta_1 x \quad (9)$$

$$f_{y1}(x) = -\frac{1}{\tan \theta_2} x \quad (10)$$

このとき、作用力  $F_1$  は、Fig. に示す点  $F_1$  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. より、 $f_{x1}(x), f_{y1}(x)$  の法線で、点  $v_{x'1}, v_{y'1}$  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、 $v_{x'1}, v_{y'1}$  のベクトルの大きさ  $|v_{x'1}|, |v_{y'1}|$  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  $v_{x'1}, v_{y'1}$  の座標は以下のように求めることができる。

$$v_{x'1}(x, y) = (|v_{x'1}| \cos \theta_1, |v_{x'1}| \sin \theta_2) \quad (11)$$

$$v_{y'1}(x, y) = (-|v_{y'1}| \sin \theta_1, |v_{y'1}| \cos \theta_2) \quad (12)$$

次に、直線  $f_{x2}(x), f_{y2}(x)$  を求める。 $f_{x1}(x), f_{y1}(x)$ 、点  $v_{x'1}, v_{y'1}$  の座標からそれぞれ以下のように算出される。

$$f_{x2}(x) = -\frac{1}{\tan \theta_1} x + \frac{|v_{x'}|}{\sin \theta_1} \quad (13)$$

$$f_{y2}(x) = \tan \theta_2 x + \frac{|v_{y'}|}{\cos \theta_2} \quad (14)$$

以上の  $f_{x2}(x)$  ,  $f_{y2}(x)$  から , 交点の座標  $F_1(x, y)$  を求めると以下ようになる .

$$x = \frac{v_{x'1} \cos \theta_2 - v_{y'1} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \quad (15)$$

$$y = -\frac{1}{\tan \theta_1} \left( \frac{v_{x'1} \cos \theta_2 - v_{y'1} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|v_{x'}|}{\sin \theta_1} \quad (16)$$

$$= \tan \theta_2 \left( \frac{v_{x'1} \cos \theta_2 - v_{y'1} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|v_{y'}|}{\cos \theta_2} \quad (17)$$

したがって , 正規座標系における  $x$  軸方向の出力電圧勾配  $v_x$  および揚力方向の  $v_y$  は , 以下の  
ように表される .

$$v_x = \frac{v_{x'} \cos \theta_2 - v_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \quad (18)$$

$$v_y = -\frac{1}{\tan \theta_1} \left( \frac{v_{x'} \cos \theta_2 - v_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|v_{x'}|}{\sin \theta_1} \quad (19)$$

$$= \tan \theta_2 \left( \frac{v_{x'} \cos \theta_2 - v_{y'} \sin \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2} \right) + \frac{|v_{y'}|}{\cos \theta_2} \quad (20)$$

以上の過程より , 座標系 [1] から正規座標系への変換が可能である .

### 3.6 補正理論のテストデータへの適用 (1)

上記の座標系の回転における補正理論の有用性を確かめるために、以下の式から、任意の回転角  $\theta_{1\text{ test}}, \theta_{2\text{ test}}$  を与えて出力電圧勾配について抗力方向を  $v_{x\text{ test}}$ 、揚力方向を  $v_{y\text{ test}}$  として、テストデータを作成した。

$$v_{x\text{ test}}(i) = \cos\left(\frac{\pi}{24}i + \pi - \theta_{1\text{ test}}\right) \quad (21)$$

$$v_{y\text{ test}}(i) = \cos\left(\frac{\pi}{24}i + \frac{1}{2}\pi - \theta_{2\text{ test}}\right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (22)$$

また、今回は以下の Table のようなパラメータを用いた。

Table 1 Test data conditions

	$\theta_{1\text{ test}}$ [deg]	$\theta_{2\text{ test}}$ [deg]
Case 1	15	20
Case 2	-15	-20
Case 3	15	-20
Case 4	90	-90

このとき、作成されたテストデータの図および補正適用後の図は以下の Fig. ~ Fig. のようになる。

#### 3.6.1 テストデータ：Case 1

$$\theta_{1\text{ test}} = 15 [\text{deg}], \theta_{2\text{ test}} = 20 [\text{deg}]$$

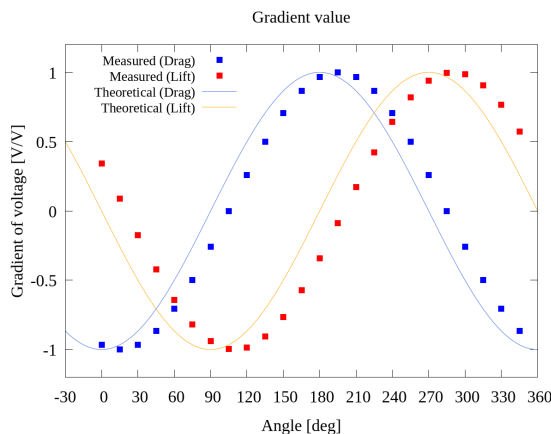


Fig. 1 Simulated data [Case 1]

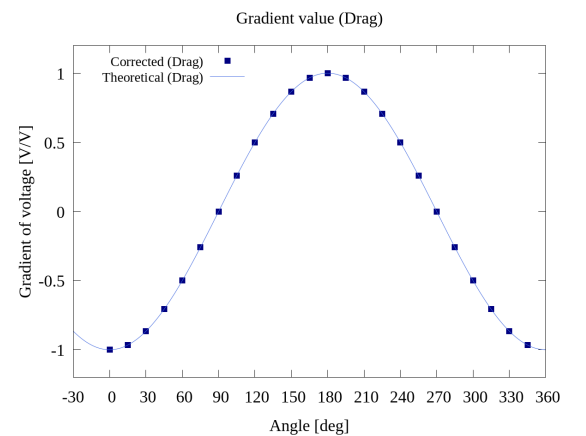


Fig. 2 Corrected data (Drag) [Case 1]

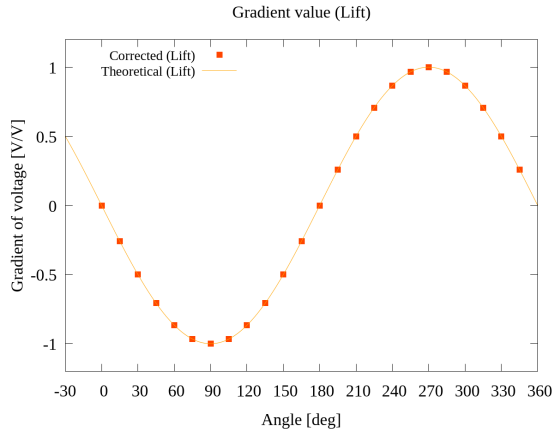


Fig. 3 Corrected data (Lift) [Case 1]

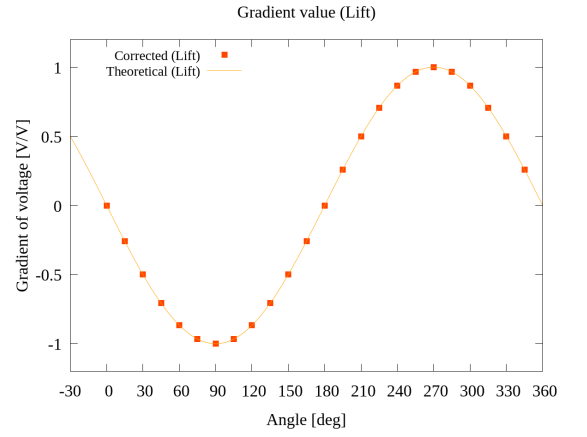


Fig. 6 Corrected data (Lift) [Case 2]

### 3.6.2 テストデータ : Case 2

$$\theta_{1\text{test}} = -15 [\text{deg}], \theta_{2\text{test}} = -20 [\text{deg}]$$

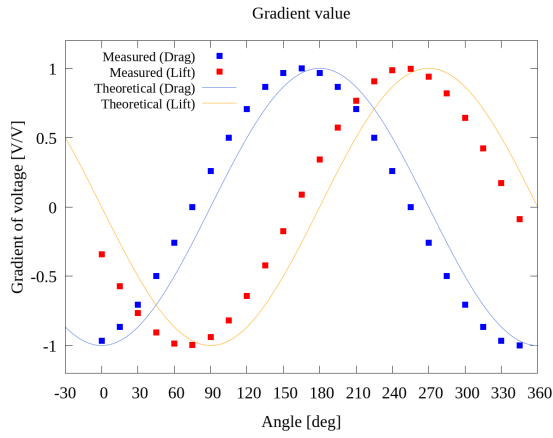


Fig. 4 Simulated data [Case 2]

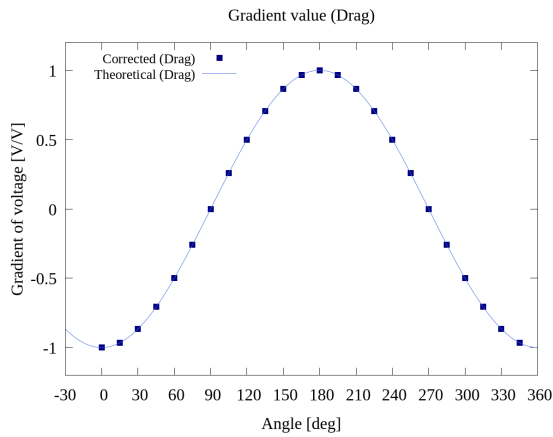


Fig. 5 Corrected data (Drag) [Case 2]

### 3.6.3 テストデータ：Case 3

$$\theta_{1\text{test}} = 15 [\text{deg}], \theta_{2\text{test}} = -20 [\text{deg}]$$

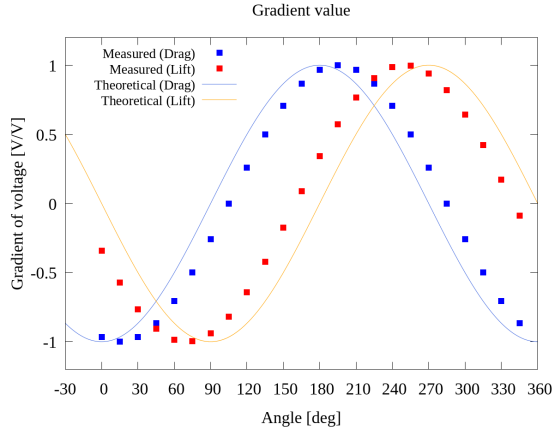


Fig. 7 Simulated data [Case 2]

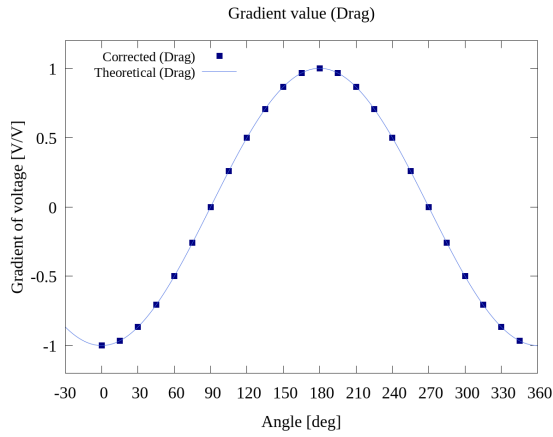


Fig. 8 Corrected data (Drag) [Case 2]

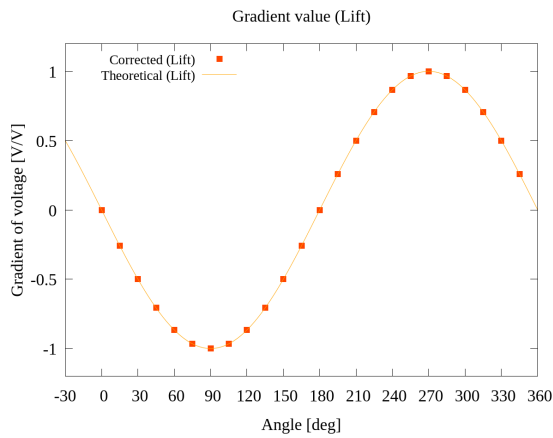


Fig. 9 Corrected data (Lift) [Case 2]

### 3.6.4 テストデータ：Case 2

$$\theta_{1\text{test}} = 90 [\text{deg}], \theta_{2\text{test}} = -90 [\text{deg}]$$

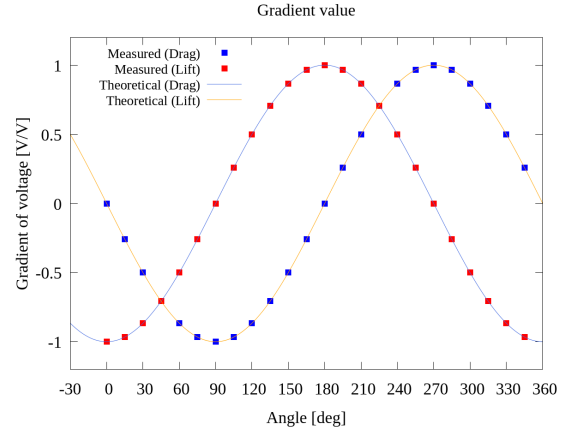


Fig. 10 Simulated data [Case 2]

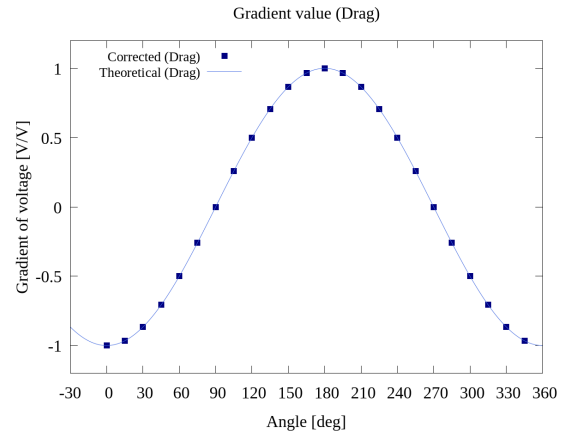


Fig. 11 Corrected data (Drag) [Case 2]

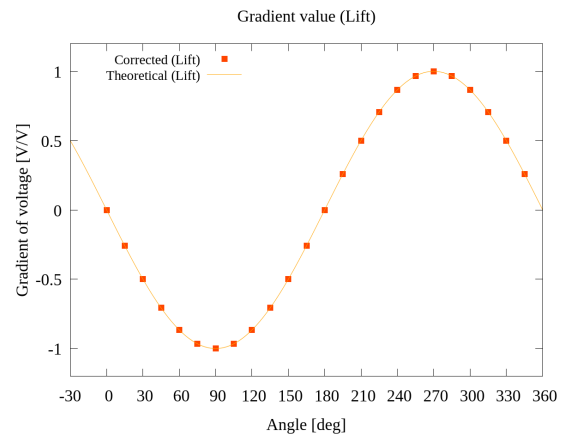


Fig. 12 Corrected data (Lift) [Case 2]

### 3.7 座標系のオフセットにおける補正理論

正規座標系と座標系 [2] のオフセットの補正理論を説明する .

### 3.8 複合状態における補正理論

### 3.9 推定理論

## 4. 基礎実験 (1)

電圧と荷重の関係性の取得

### 4.1 実験方法

### 4.2 実験結果

## 5. 基礎実験 (2) (特性評価実験)

### 5.1 実験方法

### 5.2 実験結果

### 5.3 補正適用結果

### 5.4 テストデータの作成



## 6. 応用実験 (推定実験)

### 6.1 実験方法

### 6.2 実験結果

## 謝辞

謝辞を述べる

## 付録