

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

京都工芸纖維大学 工芸科学部

機械工学課程

概要

本研究では、ひずみセンサを使用した揚抗力の同時測定を行う際に発生する現象の理解とその補正方法の確立を目的とし、揚抗力測定装置を複数の角度から

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	6
3.	校正理論	9
3.1	作用力測定装置と校正実験装置の関係	9
3.2	出力電圧勾配	11
3.3	補正理論 [1]：座標系の回転における補正理論	11
3.4	補正理論 [2]：座標系のオフセットにおける補正理論	20
3.5	補正理論 [3]：複合状態における補正理論	26
3.6	正味出力電圧による評価	31
4.	作用力測定装置の評価実験とその考察	32
4.1	実験方法	32
4.2	実験結果	33
4.3	データ処理手法	34
4.4	校正理論の適用とその結果	41
4.5	RMS 誤差による補正值の評価	48
5.	結言	50
	謝辞	51
	付録	51

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]
θ_x	: 正規座標系 x 軸と座標系 [1] x' 軸の角度 [deg]
θ_y	: 正規座標系 y 軸と座標系 [1] y' 軸の角度 [deg]
Δx	: 正規座標系 x 軸と座標系 [2] x'' 軸の y 方向の距離 [mm]
Δy	: 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
ω	: 角度

3.2 座標系の回転における補正理論

F_1	: 作用力
θ_{x1}	: 正規座標系 x 軸と座標系 [1] x' 軸の角度
θ_{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

本研究において使用した作用力装置の写真を以下の Fig ~ Fig. に示す .

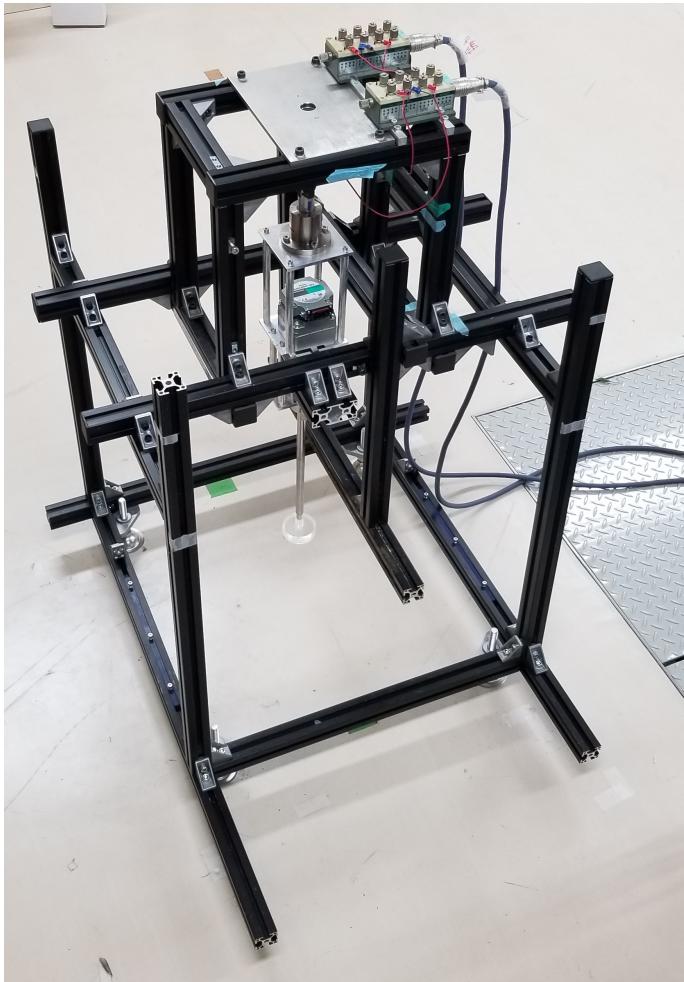


Fig. 1 Acting force measuring device (Photo)

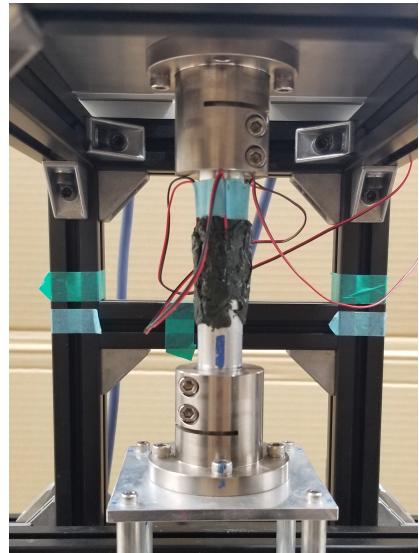


Fig. 2 Mounting part of strain sensors



Fig. 3 Mounting part of tire model

回流水槽を用いた作用力測定実験の際に使用する作用力測定装置を性能評価実験を行うため，製作したフレームに組み付けた . また，本研究において評価対象となるひずみセンサの取付部を Fig. に，作用力を与えるタイヤモデルの取付部を Fig. に示している .

2.1.1 測定原理

Fig. の作用力測定装置のひずみ計測方法には、2 ゲージ法を採用している。また、ひずみセンサは KYOWA 製の短軸半導体ひずみセンサ (KSPB-2-120) を使用しており、一般的のひずみセンサのゲージ率が 2 [Ω] 程度であることに比べて使用した半導体ひずみセンサはゲージ率が 120 [Ω] 程度と非常に大きいという特徴がある。これは、回流水槽を用いた作用力測定実験において、実際に加わる作用力によって生じるひずみを曲げひずみとして測定し、そのひずみ量は非常に小さいことから、これを測定するためにゲージ率の大きい高感度の半導体ひずみセンサを使用し、2 ゲージ法によってひずみセンサ単体の場合に比べて、2 倍の出力電圧を得ることができるためである。したがって、作用力測定装置に加わる微小なひずみを測定することを目的としており、作用力測定実験に適した測定方法であるといえる。

2.2 校正実験装置

本研究において製作・使用した実験装置の概略図および写真を以下の Fig. , Fig. に示す。

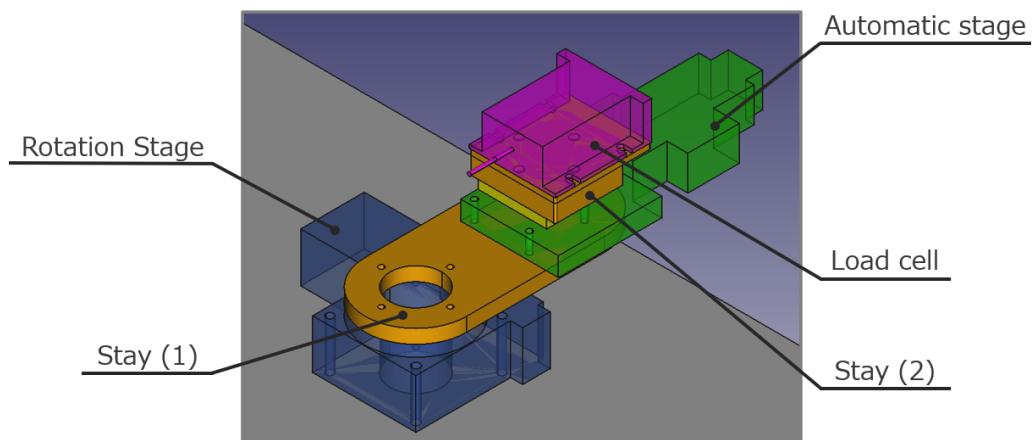


Fig. 4 Calibration device (3D CAD)



Fig. 5 Calibration device (Photo)

校正装置は、作用力測定装置に取り付けられた2組のひずみセンサについて、作用力の角度による出力電圧の関係性を調べる目的がある。また、自動ステージを用いて人為的な操作を可能な限り減らし自動化することで、不本意なノイズの削減や複数回の実験を効率的に行うことができた。作用力を与える校正装置(Fig.)は、自動一軸ステージ、自動回転ステージ、ロードセル、それらを接続するステーから構成される。

また、作用力測定装置のフレームに校正実験装置を取り付けることで、作用力測定と校正実験装置の位置関係を保持することができる。(Fig.) 校正実験装置はアルミ板を介してフレームに取り付ける。設置の際には、作用力測定装置をフレーム上に設置し、作用力測定装置の回転軸と自動回転ステージの回転軸をできるだけ一致させるように調整をしながら行うことが好ましい。

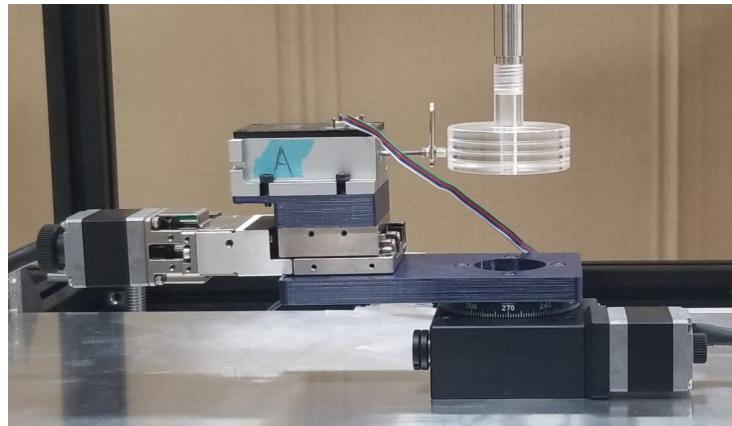


Fig. 6 Assembled calibaration device

なお、本研究では、ロードセルはミネベアミツミ製 微小荷重引張圧縮型 UTA (UTA-100GR)、自動一軸ステージは駿河精機製 リニアボールガイドステージ (PG530)、自動回転ステージは駿河精機製 回転ステージ ウォームギア (KRW06360)、自動ステージコントローラは駿河精機製 ステッピングモータコントローラ (DS102MS) を使用している。また、2つのステーについては、自動回転ステージ上に取り付けることになり、軽量である必要があるため3Dプリンタを用いて製作し、使用している。



Fig. 7 Stage Controller

また，作用力測定装置のひずみセンサ，校正実験装置に取り付けられたロードセルからの出力電圧は Fig. に示すロードセルおよびひずみセンサに対応したそれぞれのストレインアンプを通して，データロガーへと送られ，データロガーに接続された PC へと保存される。ロードセルの接続されるストレインアンプ(灰，2 個)は，ミネベアミツミ製 動ひずみ測定器(DSA-631)，ひずみセンサの接続されるストレインアンプ(黒，1 個)は，ミネベアミツミ製 動ひずみ測定器(DSA-605C)，データロガーには，GRAPHTEC 製 高電圧高速 4 チャンネルロガー(GL2000)を使用している。



Fig. 8 Strain Amplifiers and data logger

以下の Fig. に本研究で使用した実験装置について，概略図を示す。

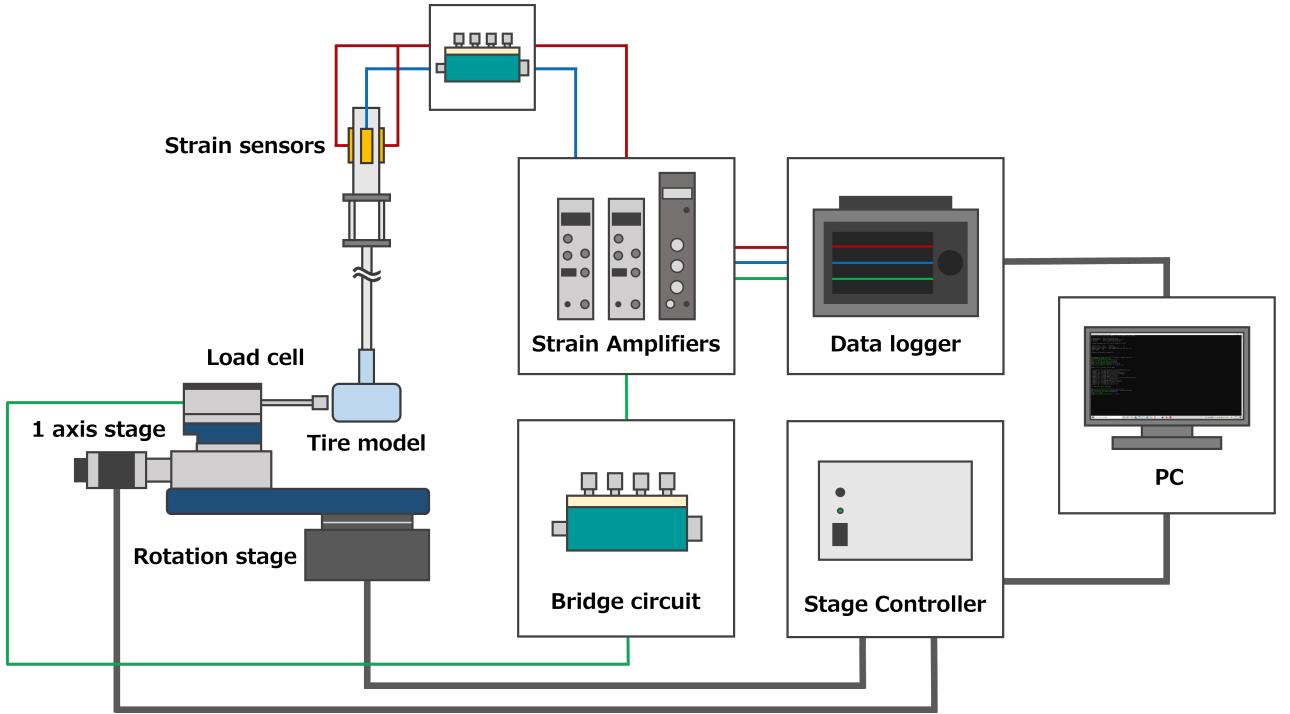


Fig. 9 Schematic of experimental system

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 を水槽座標系の x 軸方向および y 軸方向の荷重 F_x, F_y に換算する際に、出力電圧 V_D, V_L と F_x, F_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

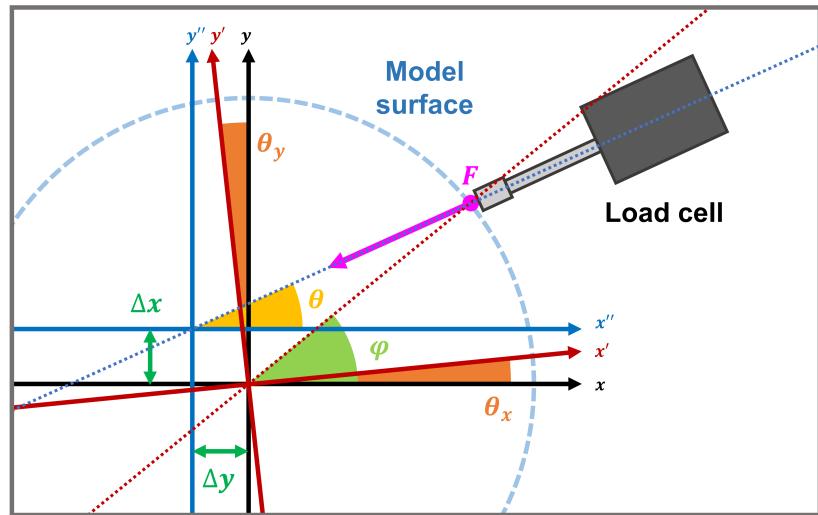
はじめに、作用力測定装置と校正実験装置の関係について説明する。作用力測定装置と校正実験装置の設置位置によって校正実験結果は大きく変動するため、その影響を考慮し、補正処理を行う必要がある。このとき以下の要因が、校正実験結果への影響を与えていていると考えられる。

- (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水槽座標系 ($x - y$)、作用力測定装置の座標系を座標系 A ($x' - y'$)、校正装置の座標系を座標系 B ($x'' - y''$) 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 A は水槽座標系に対して

x' 軸は x 軸から θ_x , y' 軸は y 軸から θ_y だけ回転している。また、座標系 B は水槽座標系に対して x'' 軸は x 軸から y 方向に Δx , y'' 軸は y 軸から x 方向に Δy だけオフセットを持つ状態となる。



(a) Coordinate systems relationship

3.2 出力電圧勾配

作用力測定装置の評価にあたり，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 として以下のように表す．

$$v_d = V_d/V \quad (1)$$

$$v_l = V_l/V \quad (2)$$

また，Fig. のように座標系を定めるとき，出力電圧勾配の理論値は，抗力方向を $v_{x \text{ theory}}$ ，揚力方向を $v_{y \text{ theory}}$ として，以下のように与えられる．

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

$$v_{y \text{ theory}} = A \sin (\omega t + \pi) = A \cos \left(\omega t + \frac{1}{2}\pi \right) \quad (4)$$

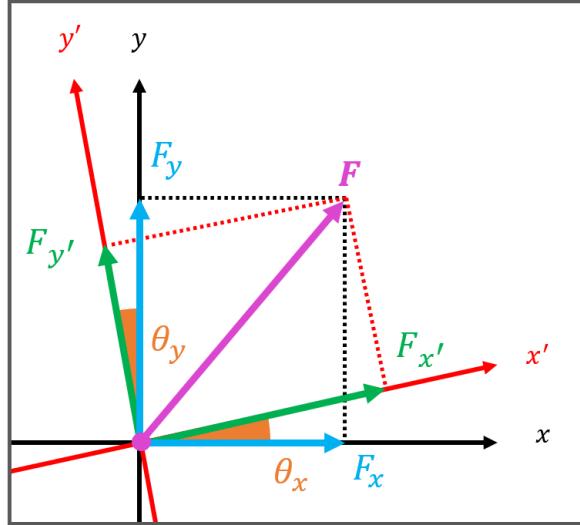
$$A = \text{const}$$

3.3 補正理論 [1]：座標系の回転における補正理論

水槽座標系と座標系 A 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．上述の通り水槽座標系と座標系 A について，以下の Fig. のように回転角 θ_x , θ_y を持つ．ここで，作用力 F を与えるとそれぞれの方向に作用力 F_x , F_y , $F_{x'}$, $F_{y'}$ が加わる．このとき，作用力測定装置から得られる電圧 $V_{x'}$, $V_{y'}$ は作用力 $F_{x'}$, $F_{y'}$ に起因するものである．また，得られた出力電圧 $V_{x'}$, $V_{y'}$ から，ロードセルの出力電圧 V_1 を用いて出力電圧勾配 $v_{x'}$, $v_{y'}$ を求めることができる．したがって，水槽座標系と座標系 A の関係について， v_x と $v_{x'}$ および v_y と $v_{y'}$ の関係を明らかにすれば良い，

3.3.1 回転角 θ_x , θ_y の算出

はじめに，回転角 θ_x , θ_y 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 ϕ を求めることができる．



(a) Relationship between $(x - y)$ and $(x' - y')$

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

抗力方向の結果から得られた位相角を ϕ_1 , 揚力方向から得られた位相角を ϕ_2 とするとき , 抗力方向の出力電圧勾配 v_d と水槽座標系における x 軸方向の出力電圧勾配の理論値 $v_{x \text{ theory}}$ との位相差 θ_x , 揚力方向の出力電圧勾配 v_l と水槽座標系における y 軸方向の出力電圧勾配の理論値 $v_{y \text{ theory}}$ との位相差 θ_y を以下のように表される .

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

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

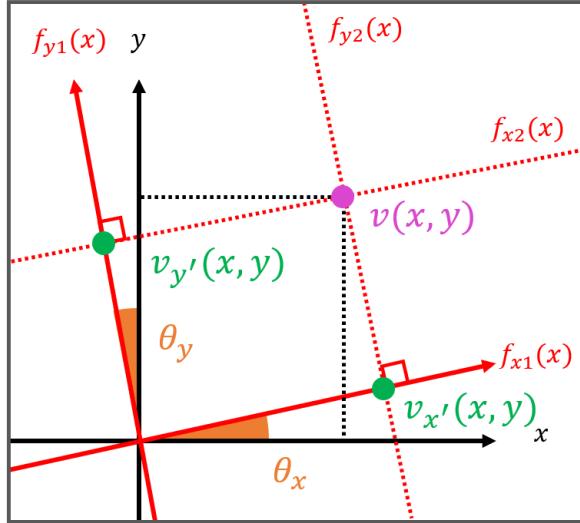
したがって , x' 軸 , y' 軸は左回りを正方向として , それぞれ θ_x , θ_y だけ回転していることとなる . また , 作用力測定装置に取り付けられた抗力・揚力方向のひずみセンサの取付角 ϕ_s は位相角 ϕ_1 , ϕ_2 より求めることができる .

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

3.3.2 出力電圧勾配の座標変換

位相角 θ_x , θ_y 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 A の x' 軸 , y' 軸をそれぞれ $f_x(x)$, $f_y(x)$ 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 θ_x , θ_y より , $f_x(x)$, $f_y(x)$ は以下のように表される .



(a)

$$f_x(x) = \tan \theta_x x \quad (9)$$

$$f_y(x) = -\frac{1}{\tan \theta_y} x \quad (10)$$

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を考えることができる。また，その座標は Fig. より， $f_x(x)$ ， $f_y(x)$ の法線で，点 $v_{x'}$ ， $v_{y'}$ 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， $v_{x'}$ ， $v_{y'}$ のベクトルの大きさ $|v_{x'}|$ ， $|v_{y'}|$ を得ることができる。角度 θ_x ， θ_y が求められていることから，点 $v_{x'}$ ， $v_{y'}$ の座標を以下のように求めることができる。

$$v_{x'}(x, y) = (|v_{x'}| \cos \theta_x, |v_{x'}| \sin \theta_y) \quad (11)$$

$$v_{y'}(x, y) = (-|v_{y'}| \sin \theta_x, |v_{y'}| \cos \theta_y) \quad (12)$$

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

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

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

以上の $f_{x2}(x)$ ， $f_{y2}(x)$ から，交点の座標 $F(x, y)$ を求めると以下に示す。

$$x = \frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{\tan \theta_x} \left(\frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \right) + \frac{|v_{x'}|}{\sin \theta_x} \\ &= \tan \theta_y \left(\frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \right) + \frac{|v_{y'}|}{\cos \theta_y} \end{aligned} \quad (16)$$

したがって、水槽座標系における 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。

$$v_x = \frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_y &= -\frac{1}{\tan \theta_x} \left(\frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \right) + \frac{|v_{x'}|}{\sin \theta_x} \\ &= \tan \theta_y \left(\frac{v_{x'} \cos \theta_y - v_{y'} \sin \theta_x}{\sin \theta_x \sin \theta_y + \cos \theta_x \cos \theta_y} \right) + \frac{|v_{y'}|}{\cos \theta_y} \end{aligned} \quad (18)$$

以上の過程より、座標系 A から水槽座標系への変換が可能である。

3.3.3 補正理論のテストデータへの適用 (1)

上記の補正理論 [1] の有用性を確かめるために、以下の式から、任意の回転角 $\theta_{x \text{ test}}, \theta_{y \text{ test}}$ を与えて座標系 A の出力電圧勾配について、 x' 軸方向を $v_{x' \text{ test}}$, y' 軸方向を $v_{y' \text{ test}}$ としてテストデータを作成した。

$$v_{x' \text{ test}}(i) = \cos\left(\frac{\pi}{24}i + \pi - \theta_{x \text{ test}}\right) \quad (19)$$

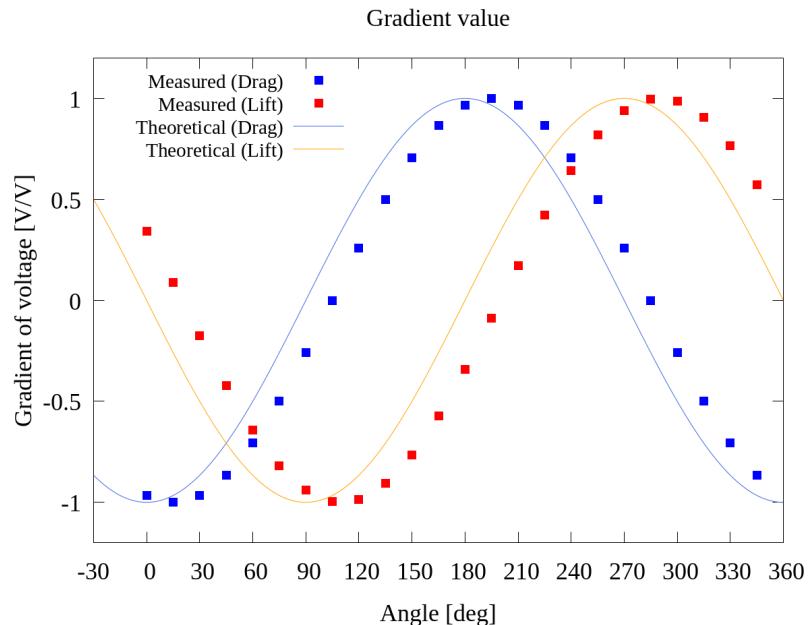
$$v_{y' \text{ test}}(i) = \cos\left(\frac{\pi}{24}i + \frac{1}{2}\pi - \theta_{y \text{ test}}\right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (20)$$

また、今回は以下の Table のようなパラメータを用いた。

(a) Test data conditions

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

ここで、Case 1 に対する座標系の回転における補正理論の適用過程について説明する。はじめに、作成したテストデータを以下の Fig. に示す。



(a) Simulated data [Case 1]

Fig. をみると、理論値の曲線とプロットされたテストデータに位相差があることがわかる。このとき、テストデータに離散フーリエ変換を適用すると波数 1 の成分について以下の Table のような値を得ることができる。また、そのときのスペクトルを以下の Fig. に示す。

(a) DFT result value [Case 1]

	Re	Im
Drag	-11.591	3.106
Lift	4.104	11.276

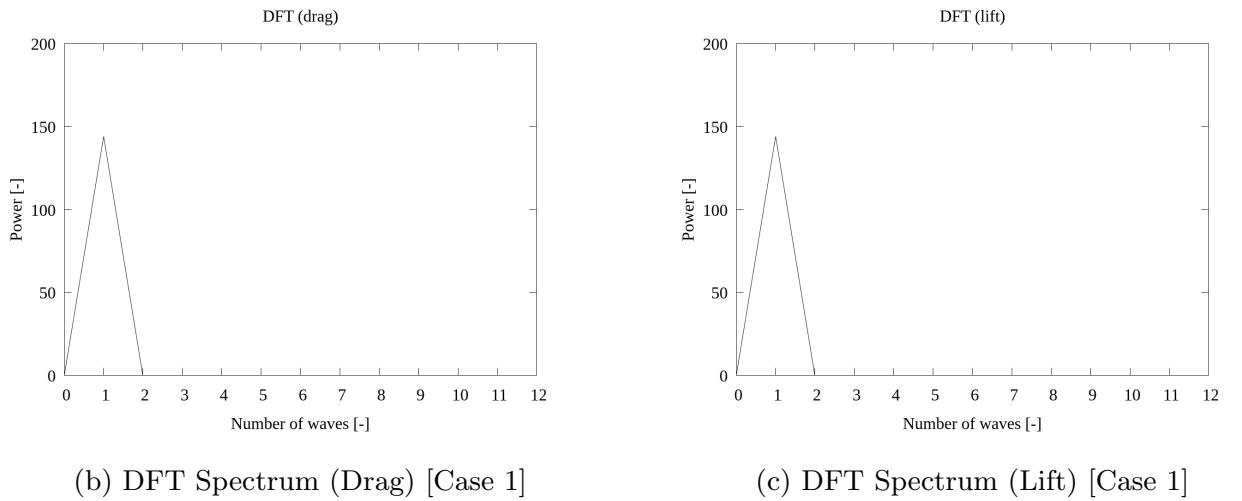


Fig. , Fig. より、波数 1 についてピークがあることがわかり、データの特徴を正しく捉えられているといえる。ここで、Table について、式 () より位相角 $\phi_{1 \text{ test}}$, $\phi_{2 \text{ test}}$ をそれぞれ算出する。

$$\phi_{1 \text{ test}} = \arctan \left(\frac{3.106}{-11.591} \right) \cdot \frac{180}{\pi} = 165.000 \text{ [deg]} \quad (21)$$

$$\phi_{2 \text{ test}} = \arctan \left(\frac{11.276}{4.101} \right) \cdot \frac{180}{\pi} = 70.000 \text{ [deg]} \quad (22)$$

式 () , 式 () より算出した位相角を用いて位相差 $\theta_{x \text{ test}}$, $\theta_{y \text{ test}}$ を求める。

$$\theta_{x \text{ test}} = \pi \cdot \frac{180}{\pi} - 165.000 = 15.000 \text{ [deg]} \quad (23)$$

$$\theta_{y \text{ test}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{180}{\pi} - 70.000 = 20.000 \text{ [deg]} \quad (24)$$

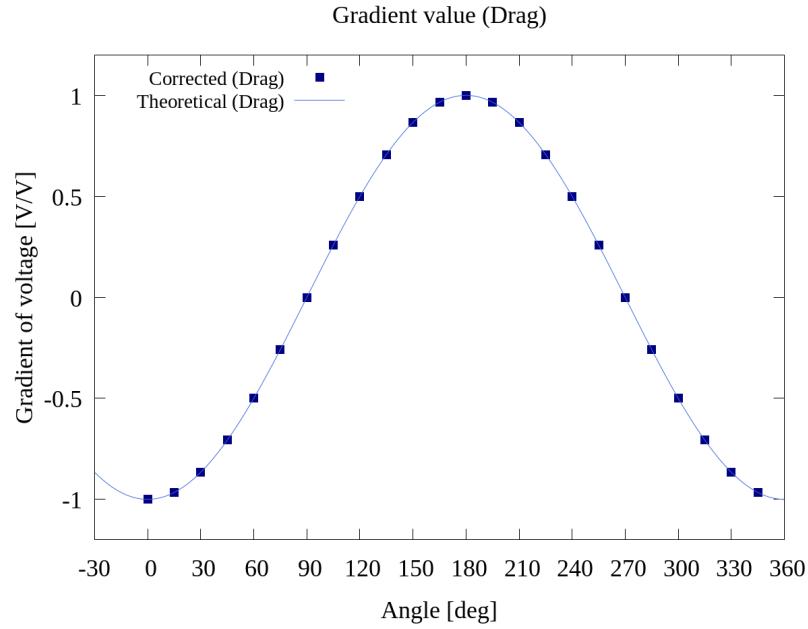
また，位相差 $\theta_{x \text{ test}}, \theta_{y \text{ test}}$ より，ひずみセンサの取付角 $\phi_{s \text{ test}}$ が式 () よりわかる．

$$\phi_{s \text{ test}} = |15.000 - 20.000| = 5 [\text{deg}] \quad (25)$$

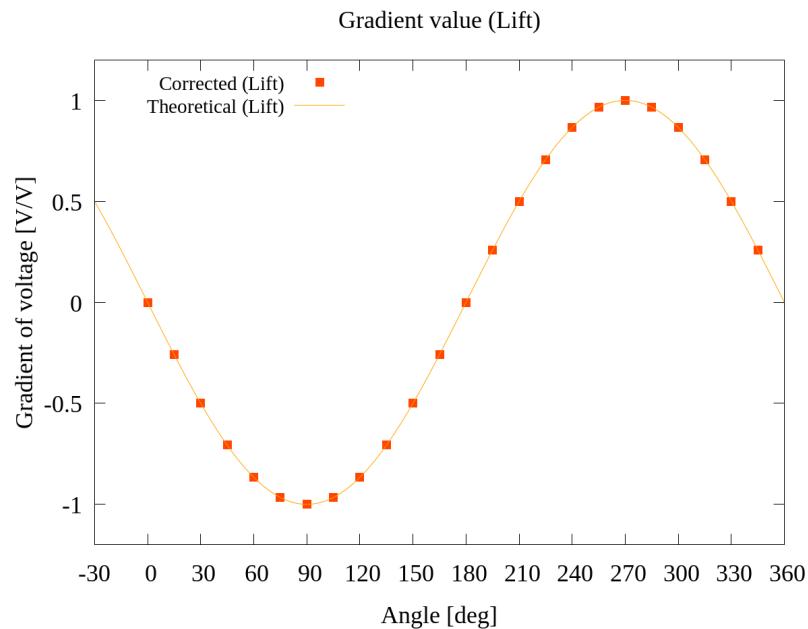
次に，位相差位相差 $\theta_{x \text{ test}}, \theta_{y \text{ test}}$ ，テストデータから得られる $v_{x' \text{ test}}, v_{xy \text{ test}}$ より，水槽座標系における出力電圧勾配 v_x, v_y を式 () を用いて算出する．それぞれの角度についての算出結果を以下の Table , Fig. , Fig. に示す．

(a) Corected result of test data [Case 1]

Angle [deg]	$v_{x' \text{ test}}$ [V/V]	$v_{xy \text{ test}}$ [V/V]	v_x [V/V]	v_y [V/V]
0	-0.966	0.342	-1.000	0.000
15	-1.000	0.087	-0.966	-0.259
30	-0.966	-0.174	-0.866	-0.500
45	-0.866	-0.423	-0.707	-0.707
60	-0.707	-0.643	-0.500	-0.866
75	-0.500	-0.819	-0.259	-0.966
90	-0.259	-0.940	0.000	-1.000
105	0.000	-0.996	0.259	-0.966
120	0.259	-0.985	0.500	-0.866
135	0.500	-0.906	0.707	-0.707
150	0.707	-0.766	0.866	-0.500
165	0.866	-0.574	0.966	-0.259
180	0.966	-0.342	1.000	-0.000
195	1.000	-0.087	0.966	0.259
210	0.966	0.174	0.866	0.500
225	0.866	0.423	0.707	0.707
240	0.707	0.643	0.500	0.866
255	0.500	0.819	0.259	0.966
270	0.259	0.940	-0.000	1.000
285	-0.000	0.996	-0.259	0.966
300	-0.259	0.985	-0.500	0.866
315	-0.500	0.906	-0.707	0.707
330	-0.707	0.766	-0.866	0.500
345	-0.866	0.574	-0.966	0.259



(a) Corrected data (Drag) [Case 1]

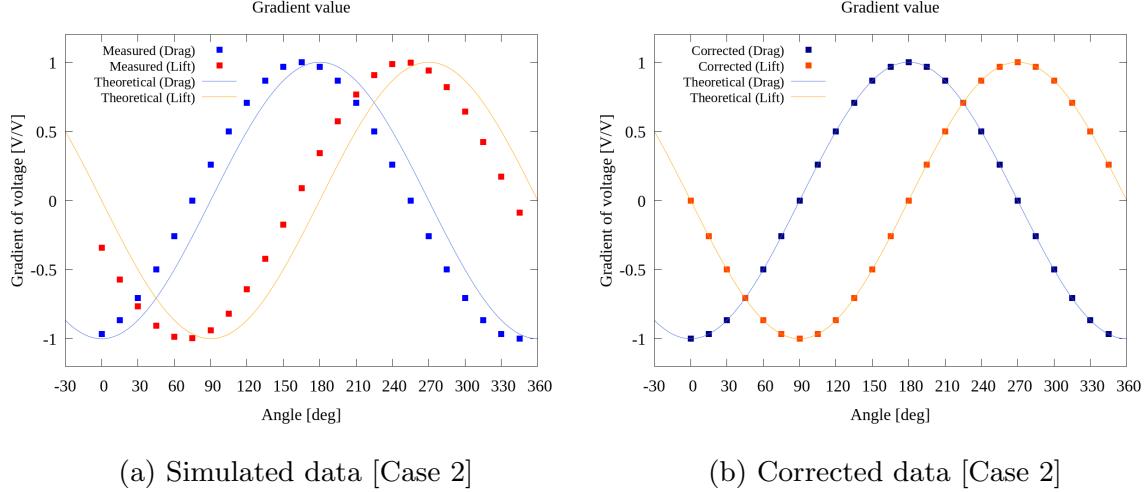


(b) Corrected data (Lift) [Case 1]

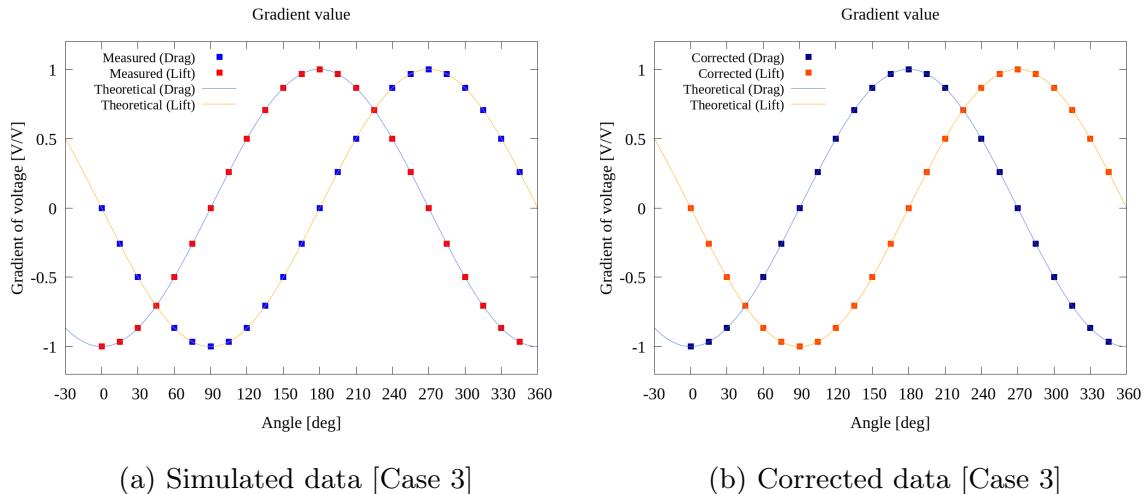
Fig. , Fig. をみると算出された補正值すなわち水槽座標系における出力電圧勾配は，理論曲線状に位置していることが確認でき，正しく算出されていることがわかる．

また，以下の Fig. ~ Fig. に，Case2 および Case3 におけるテストデータとその補正結果について示す．

3.3.4 テストデータ：Case 2 ($\theta_{x\text{test}} = -15$ [deg], $\theta_{y\text{test}} = -20$ [deg])



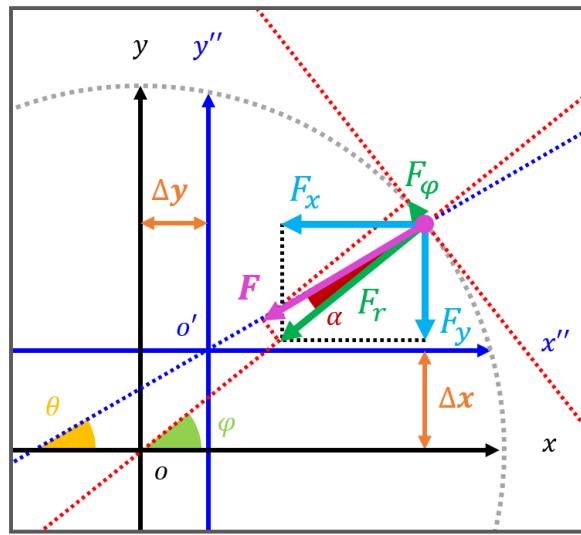
3.3.5 テストデータ：Case 3 ($\theta_{x\text{test}} = 90$ [deg], $\theta_{y\text{test}} = -90$ [deg])



ここで，Fig. ~ Fig. をみると回転角度が負の値の場合，その値が非常に大きい場合であっても問題なく補正処理が可能であることがわかる．したがって，補正理論 [1] はテストデータについて正しく機能しており水槽座標系と座標系 A の回転角および作用力測定装置のひずみセンサの取付角，水槽座標系における出力電圧勾配を調べることができる．

3.4 補正理論 [2] : 座標系のオフセットにおける補正理論

次に、水槽座標系と座標系 B のオフセットの補正理論を説明する。ここでは、回転角はない ($\theta_x = 0, \theta_2 = 0$) として考える。水槽座標系と座標系 B の中心との位置関係にオフセット $\Delta x, \Delta y$ を持つ。ここで、作用力 F を与えるとき、その作用線はオフセット $\Delta x, \Delta y$ によって水槽座標系の中心 o を通ることはなく、座標系 B の中心 o'' を通る。このとき、作用点と点 o'' を通る直線(青点線)と x'' 軸の角度を θ 、作用点と点 o を通る直線(赤点線)と x 軸の角度を φ とする。また、作用点と点 o' を通る直線(青点線)と作用点と点 o を通る直線(赤点線)の角度を α とする。角度 θ は校正実験時に記録される角度となる。



(a) Relationship between $(x - y)$ and $(x'' - y'')$

3.4.1 角度 α の算出

供試体の半径を r とするとき、作用点 $F(x, y)$ の座標は角度 φ を用いて以下のように表すことができる。

$$x = r \cos \varphi \quad (26)$$

$$y = r \sin \varphi \quad (27)$$

また，座標系 Bにおいて，作用点 $F(x'', y'')$ の座標はオフセット Δx , Δy を用いて以下のように表される．

$$x'' = r \cos \varphi - \Delta x \quad (28)$$

$$y'' = r \sin \varphi - \Delta y \quad (29)$$

以上より，角度 θ を用いて角度 φ を求めることができる．

$$\tan \theta = \frac{y''}{x''} = \frac{r \sin \varphi - \Delta y}{r \cos \varphi - \Delta x} \quad (30)$$

$$\varphi = \theta - \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x \sin \theta - \Delta y \cos \theta}{r} \right) \quad (31)$$

したがって，角度 α を以下のように求めることができる．

$$\alpha = \theta - \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x \sin \theta - \Delta y \cos \theta}{r} \right) \quad (32)$$

3.4.2 作用力 F の分解

供試体に加わる作用力 F は供試体表面の接線方向の力 F_φ ，またその法線方向の力 F_r に分けて考えることができる．ロードセルから与える作用力の角度 θ ，算出した φ を用いると，それぞれ以下のように求められる．

$$F_\varphi = F \sin \alpha \quad (33)$$

$$F_r = F \cos \alpha \quad (34)$$

供試体への作用力について抗力方向を F_x ，揚力方向を F_y とすると角度 φ を用いて以下のように求められる．

$$F_x = -F_r \cos \varphi \quad (35)$$

$$F_y = -F_r \sin \varphi \quad (36)$$

また，接線方向成分 F_φ について，供試体に対してトルク T として作用することとなる．

$$T = F_\varphi \cdot r = F \sin \alpha \cdot r \quad (37)$$

ここで，このトルク T について，作用力測定装置に対する影響は十分に小さいと考えられることから無視できる．

3.4.3 出力電圧勾配の座標系変換 (2)

水槽座標系に対して，オフセットを持つ座標系 B を基準にロードセルから与えられる作用力 F はすべて供試体に伝わることはなく，接線方向の力 F_r ，その法線方向の力 F_θ に分解される．すなわち，測定時にはロードセルから作用力 F を与えた際の出力電圧，ひずみセンサから作用力 F_r を与えた際の出力電圧を得ているということになる．したがって，ひずみセンサの出力電圧の傾きを一様に評価することは不可能であり，実際の作用力 F_r の角度 α を算出し補正を加える必要がある．

ここで，ひずみセンサの出力電圧 $V_{x''2}$ ， $V_{y''2}$ はそれぞれ F_r/F 倍されていると考えられることから，水槽座標系における出力電圧勾配 v_x ， v_y と座標系 B における出力電圧勾配 $v_{x''2}$ ， $v_{y''2}$ は角度 α を用いて以下のような関係が成立する．

$$v_x = \frac{F}{F_r} v_{x''2} = \frac{1}{\cos \alpha} v_{x''2} \quad (38)$$

$$v_y = \frac{F}{F_r} v_{y''2} = \frac{1}{\cos \alpha} v_{y''2} \quad (39)$$

3.4.4 補正理論のテストデータへの適用 (2)

以上の補正理論より，オフセットを考慮したテストデータを作成する．任意のオフセット Δx_{test} ， Δy_{test} を与えて座標系 B の出力電圧勾配について， x'' 軸方向を $v_{x'' \text{ test}}$ ， y'' 軸方向を $v_{y'' \text{ test}}$ とするとき，以下のように表される．

$$\theta = \frac{\pi}{180} i \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (40)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_{\text{test}} \sin \theta - \Delta y_{\text{test}} \cos \theta}{r} \right) \quad (41)$$

$$\varphi = \theta - \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_{\text{test}} \sin \theta - \Delta y_{\text{test}} \cos \theta}{r} \right) \quad (42)$$

$$v_{x'' \text{ test}} = -\cos \alpha \cos \varphi \quad (43)$$

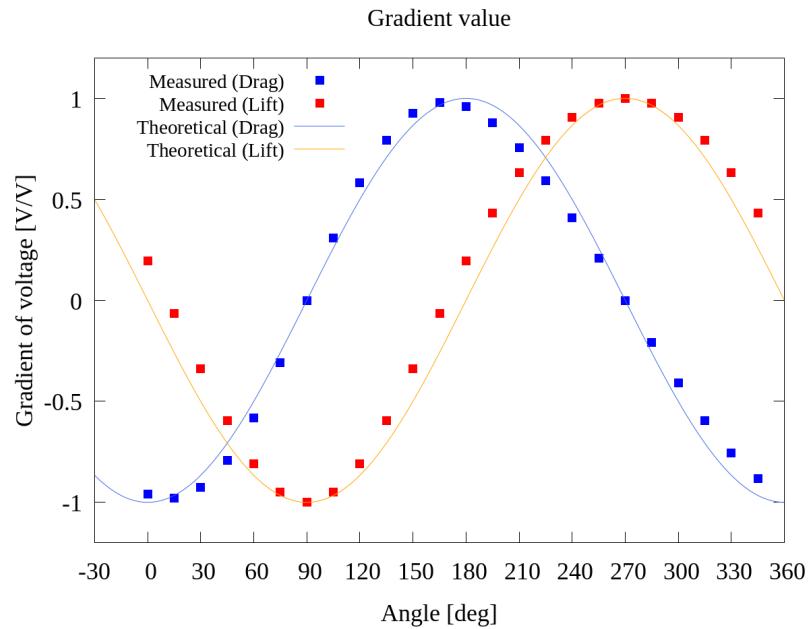
$$v_{y'' \text{ test}} = -\cos \alpha \sin \varphi \quad (44)$$

また，今回を以下の Table のようなパラメータを用いた．

(a) Test data conditions (2)

	Δx_{test} [mm]	Δy_{test} [mm]
Case 4	5.0	0.0
Case 5	5.0	-5.0
Case 6	10.0	-5.0

ここで，Case 4 に対する座標系の回転における補正理論の適用過程について説明する．はじめに，作成したテストデータを以下に示す．



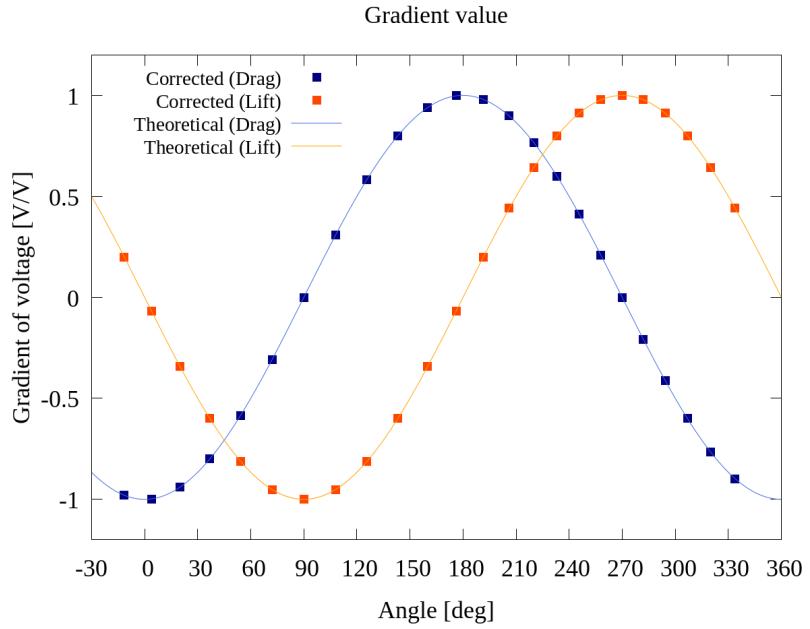
(a) Simulated data [Case 4]

Fig. をみると，プロットされたテストデータは理論値の曲線とは異なる値を示している．また，波形は少し不規則な形状となっていることがわかる．

ここで、 θ 、 Δx_{test} 、 Δy_{test} は既知の変数であるため式 () より、 α および φ を求めることができる。したがって、式 () を適用した結果を以下の Table に示す。ここで、 φ は水槽座標系において供試体へ作用力が加えられている角度を示していることになる。

(a) Corected result of test data [Case 4]

Angle [deg]	$v_{x'' \text{ test}}$ [V/V]	$v_{y'' \text{ test}}$ [V/V]	v_x [V/V]	v_y [V/V]	φ [deg]
0	-0.960	0.196	-0.980	0.200	-11.5
15	-0.979	-0.066	-0.998	-0.067	3.9
30	-0.925	-0.337	-0.940	-0.342	20.0
45	-0.792	-0.594	-0.800	-0.600	36.9
60	-0.581	-0.808	-0.584	-0.812	54.3
75	-0.308	-0.950	-0.308	-0.951	72.0
90	-0.000	-1.000	-0.000	-1.000	90.0
105	0.308	-0.950	0.308	-0.951	108.0
120	0.581	-0.808	0.584	-0.812	125.7
135	0.792	-0.594	0.800	-0.600	143.1
150	0.925	-0.337	0.940	-0.342	160.0
165	0.979	-0.066	0.998	-0.067	176.1
180	0.960	0.196	0.980	0.200	191.5
195	0.881	0.432	0.898	0.441	206.1
210	0.755	0.632	0.766	0.642	220.0
225	0.594	0.792	0.600	0.800	233.1
240	0.409	0.907	0.411	0.912	245.7
255	0.208	0.977	0.208	0.978	258.0
270	0.000	1.000	0.000	1.000	270.0
285	-0.208	0.977	-0.208	0.978	282.0
300	-0.409	0.907	-0.411	0.912	294.3
315	-0.594	0.792	-0.600	0.800	306.9
330	-0.755	0.633	-0.766	0.642	320.0
345	-0.881	0.432	-0.898	0.441	333.9

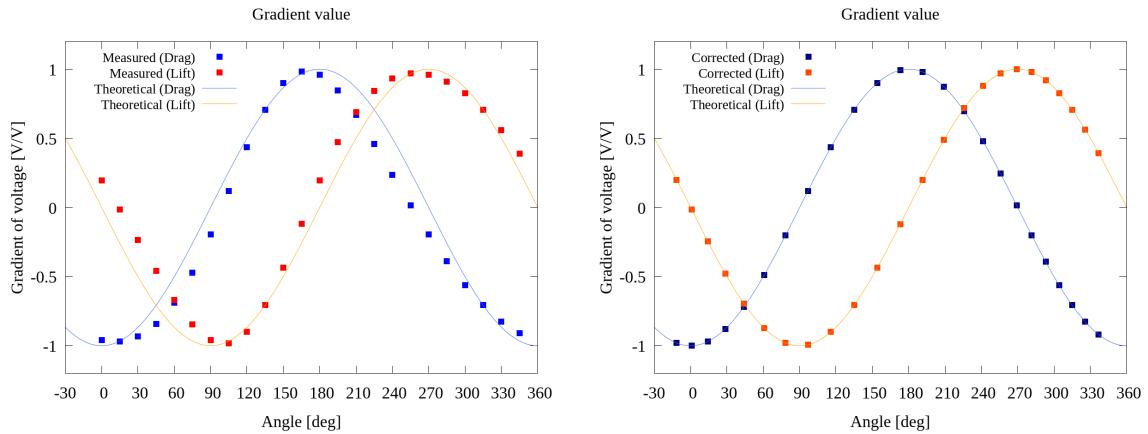


(a) Corrected data [Case 4]

Fig. をみると算出された補正值は理論曲線上に位置していることがわかる。しかし、プロットされているデータの角度は φ となるため、不等間隔となってしまうことがわかる。

また、以下の Fig. ~ Fig. に、Case 5 および Case 6 におけるテストデータとその補正結果について示す。

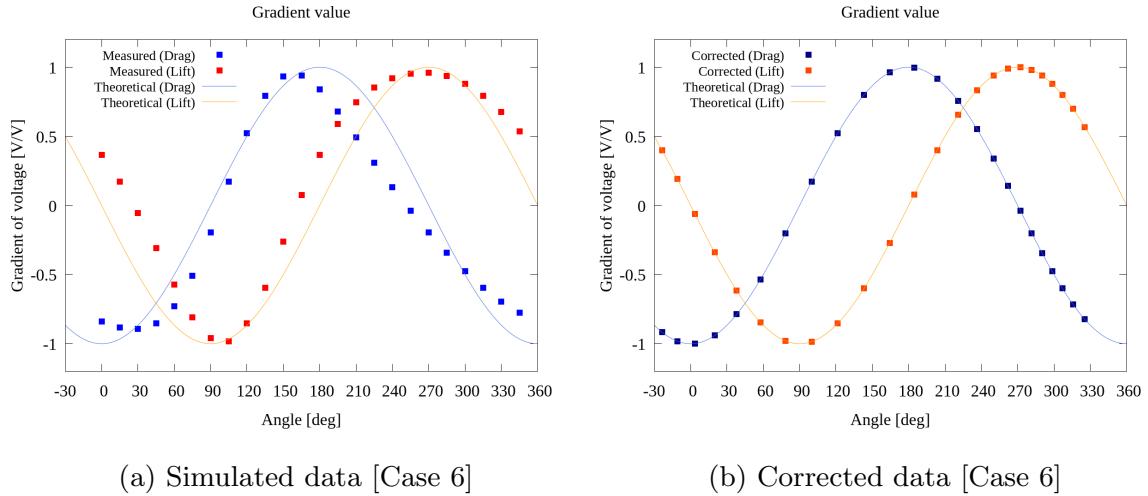
3.4.5 テストデータ : Case 5 ($\Delta x_{\text{test}} = 5.0$ [mm], $\Delta x_{\text{test}} = -5.0$ [mm])



(a) Simulated data [Case 5]

(b) Corrected data [Case 5]

3.4.6 テストデータ : Case 6 $\Delta x_{\text{test}} = 10.0 \text{ [mm]}$, $\Delta x_{\text{test}} = -5.0 \text{ [mm]}$



3.5 補正理論 [3] : 複合状態における補正理論

実際に校正実験を行う際には、座標系の回転、オフセットは同時に発生する。したがって、上記の2つの補正理論を組み合わせて補正処理を行う必要がある。

3.5.1 補正理論の適用順序

作成した補正理論について、座標系の回転角 θ_x, θ_2 の特定の際に離散フーリエ変換を適用することから、補正理論 [2] を先に適用する必要がある。また、上述のようにオフセットを考慮した場合、データ間隔が不等間隔となるため回転角を特定するための離散フーリエ変換が適用できない。したがって、ラグランジュ補間を用いて二次近似を行い、等間隔のデータを補完することとした。

3.5.2 ラグランジュ補間

一般にラグランジュ補間公式とは、 $(x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), (x_3, f(x_3)), \dots$ の点を通る関数 $P(x)$ を以下のように表す。

$$P(x) = \sum_{i=1}^{n+1} y_i \frac{f_i(x)}{f_i(x_i)} \quad (45)$$

$$f_i(x) = \prod_{k \neq i} (x - x_k) \quad (46)$$

ここで、2次補間を行う場合、使用する3点を適切に選択する必要があるがアルゴリズムを用いて処理を行いたい。そこで、以下のような手順でデータを選択し、ラグランジュ補間を行った。

3.5.3 使用するデータの選択

校正実験では、15度ずつ測定しているため、計24点のデータを得ることができる。補正理論[2]を用いた補正処理では、水槽座標系における作用力とその角度が算出される。しかし、離散フーリエ変換を適用するとき、等間隔のデータが必要となるため15度ごとの補間値を算出しなければならない。ここで、必要な補間値の角度を θ とするとき、実際の作用力の角度 φ との差 $\delta\theta$ を絶対値で評価することで、その値 $|\delta\theta|$ が最も小さくなる角度 φ とその前後のデータを使用することで、 θ に最も近い3点を選択することができる。

$$\delta\theta = |\theta - \varphi| \quad (47)$$

3.5.4 テストデータへの適用(3)

上述の補正理論より座標系の回転・オフセットを考慮したテストデータを作成する。任意の回転角 $\theta_{x\text{ test}}$, $\theta_{y\text{ test}}$, 任意のオフセット Δx_{test} , Δy_{test} を与え、複合状態における出力電圧勾配について、 x'' 軸方向を $v_{x''\text{ test}}$, y'' 軸方向を $v_{y''\text{ test}}$ とするとき、以下のように表される。

$$\theta = \frac{\pi}{180} i \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (48)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_{\text{test}} \sin \theta - \Delta y_{\text{test}} \cos \theta}{r} \right) \quad (49)$$

$$\varphi = \theta - \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x_{\text{test}} \sin \theta - \Delta y_{\text{test}} \cos \theta}{r} \right) \quad (50)$$

$$v_{x''\text{ test}} = -\cos \alpha \cos (\varphi - \theta_{x\text{ test}}) \quad (51)$$

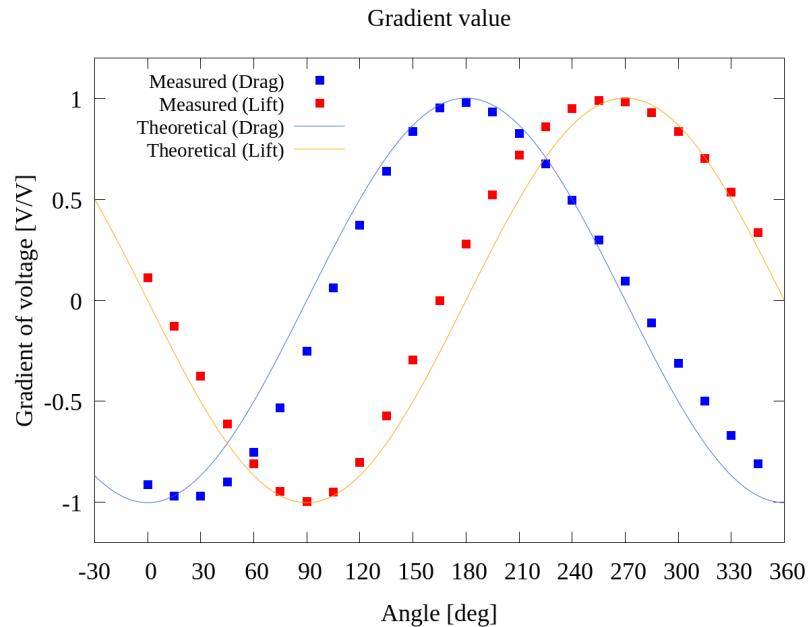
$$v_{y''\text{ test}} = -\cos \alpha \sin (\varphi - \theta_{y\text{ test}}) \quad (52)$$

また、今回を以下のTableのようなパラメータを用いた。

(a) Test data conditions (3)

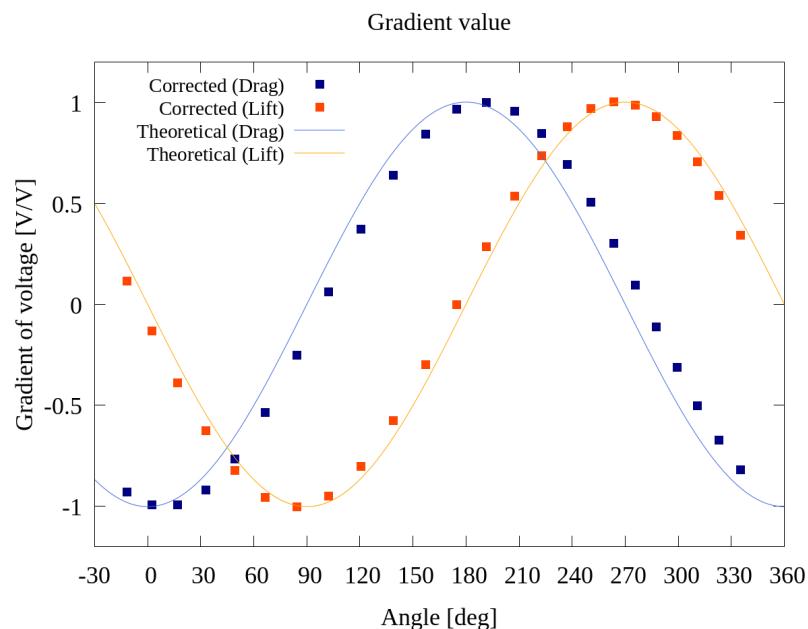
	$\theta_{x\text{ test}}$ [deg]	$\theta_{y\text{ test}}$ [deg]	Δx_{test} [mm]	Δy_{test} [mm]
Case 7	10.0	-5.0	5.00	-2.50

Case 7 に対する座標系の回転における補正理論の適用過程について説明する。はじめに、作成したテストデータを以下の Fig. に示す。



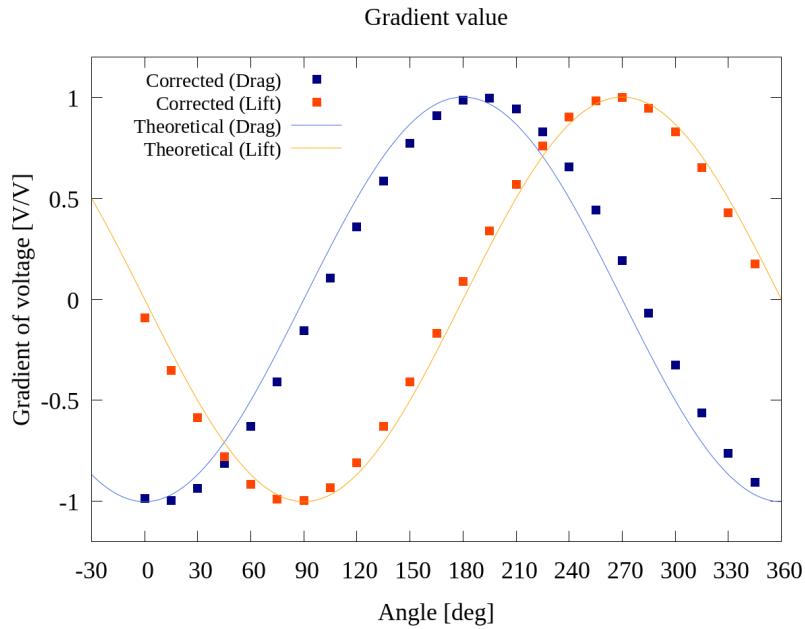
(a) Simulated data [Case 7]

ここで、補正理論 [2] を適用した結果を以下の Fig. に示す。



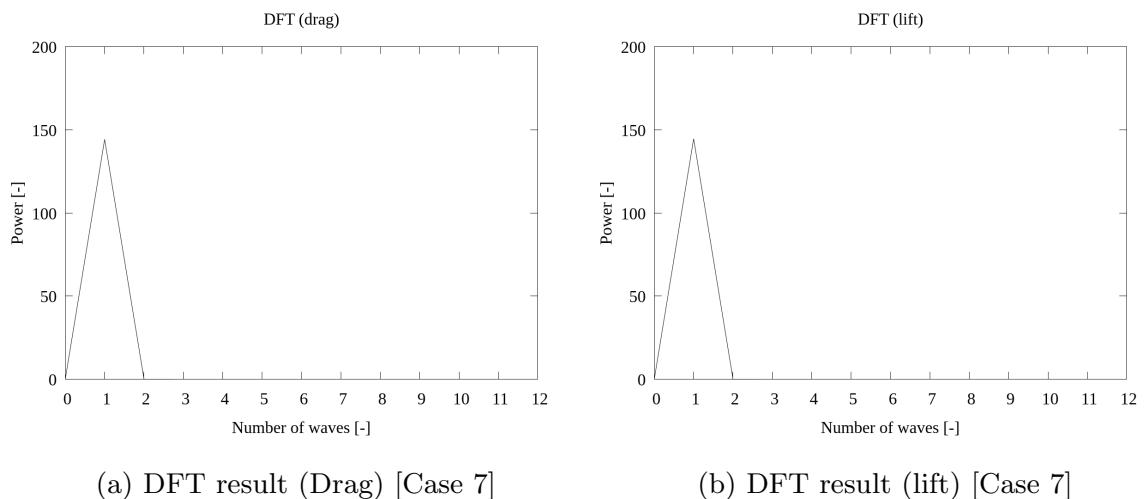
(a) Offset corrected [Case 7]

理論曲線と比較して、波形の再現はされているが、位相差があるように見える。また、プロットされたデータ間隔は異なることもわかる。このとき、ラグランジュ補間を用いて、等間隔のデータを得るために処理を行う。なお、データの採用点については上述の処理によって行うこととする。ラグランジュ補間を行った結果を以下の Fig. , Fig. に示す。



(a) interpolated [Case 7]

上記の Fig. , Fig. と比較すると等間隔のデータを得られていることがわかる。次に、フーリエ変換を適用する。このときの結果を以下の Fig. , Fig. に示す。また、波数 1 の成分についての算出値を以下の Table に示す。

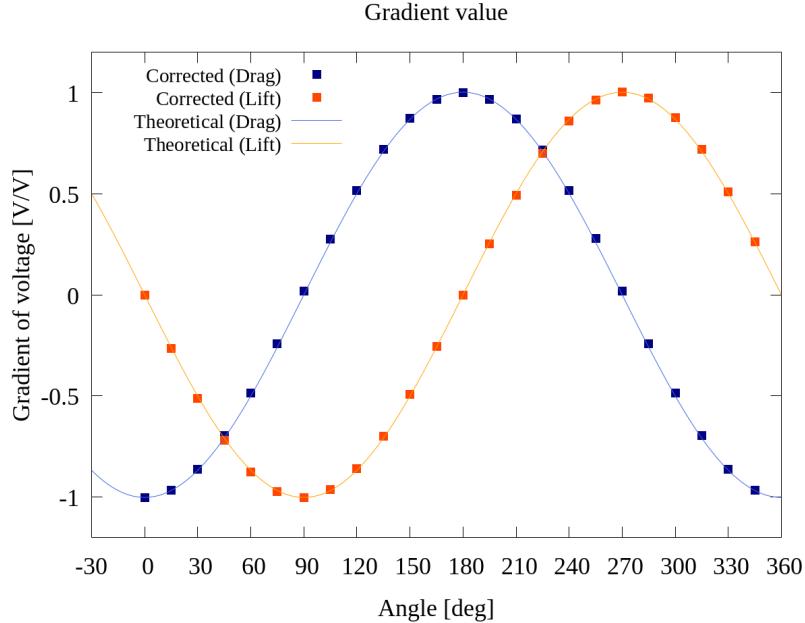


(a) DFT result (Drag) [Case 7]

(b) DFT result (lift) [Case 7]

(a) DFT result value [Case 7]

	Re	Im
Drag	-11.835	2.083
Lift	-1.081	11.978



(a) Corrected data [Case 7]

Fig. , Fig. より、波数 1 についてピークがあることがわかり、座標軸の回転における補正理論の適用結果と同様にデータの特徴を正しく捉えられているといえる。ここで、Table について、式 ()、式 ()、式 () より回転角 θ_x 、 θ_y をそれぞれ算出する。

(a) Specified rotation angle [Case 7]

	θ_x [deg]	θ_y [deg]
Case 7	10.018	-5.158

結果より、算出された回転角 $\theta_{x \text{ test}}$ 、 $\theta_{y \text{ test}}$ は Table の Case 7 で設定したパラメータと比較すると、異なっていることがわかる。これは、ラグランジュ補間公式を用いた 2 次近似による誤差が生じているためと考えられる。

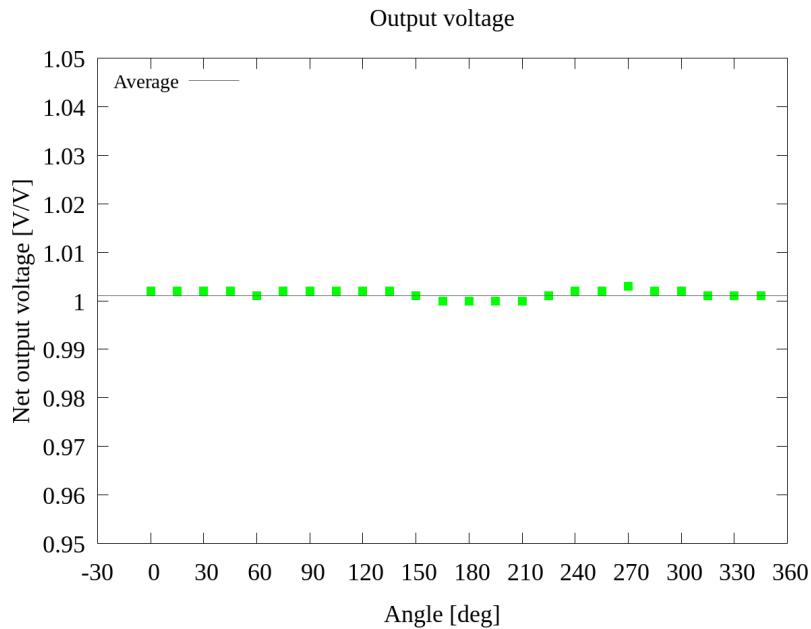
また、算出した回転角 $\theta_{x \text{ test}}$ 、 $\theta_{y \text{ test}}$ を用いて補正理論 [1] を適用した結果を以下の Fig. に示す。

Fig. をみると、理論曲線と補正值がおおよそ一致していることが考えられる。

3.6 正味出力電圧による評価

また，補正適用後に得られる水槽座標系の出力電圧 v_x, v_y から，以下の式によって正味出力電圧勾配 v_{net} と定義し，

$$v_{\text{net}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (53)$$



(a) Net output voltage [Case 7]

Fig. をみるとテストデータ [Case 7] における，正味出力電圧はおおよそ一定になることがわかる．同時に，細かな変動もみられるが，これはラグランジュ補間による誤差の影響であると考えられる．

以上より，作成した補正理論は正しく機能しているといえ，座標系の回転，座標系のオフセット距離が存在する場合であっても，オフセット距離が既知である場合，処理を行う過程の中で座標系の回転角 θ_x, θ_y を推定し，水槽座標系における出力電圧を推定することができるといえる．

4. 作用力測定装置の評価実験とその考察

製作した校正実験装置を用いて行った作用力測定装置の性能評価実験について説明する。

4.1 実験方法

作用力測定装置の性能を調べるために、複数の角度からのデータを使用し結果を得る必要があり、結果の再現性、一般性を確保するためには評価実験を複数回繰り返さなければならない。大量のデータをプログラムで一度に処理できるようにするために、測定手順を以下のように定めた。

4.1.1 試行回数と測定角度

本研究で行った実験についての測定角度および試行回数を以下の Table に示す。

Table 9 Experiment conditions

	Condition number	remarks
Measurement angle	24	Mesurement every 15 [deg]
Number of trials	7	

4.1.2 測定条件

- (1) サンプリング周期は 5[Hz] とする
- (2) 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、ひずみセンサ、ロードセルの出力電圧を測定する
- (3) 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

4.1.3 測定準備

- (1) 自動回転ステージを用いてロードセルを測定する角度に固定する
- (2) 自動一軸ステージを用いてロードセルが供試体に接触する位置を 0.01[mm] 単位で特定する
- (3) 接触する前の位置を基準に測定を開始する

4.1.4 測定手順

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

4.2 実験結果

上述の手順にしたがって、各角度ごとに行った測定結果を以下の Fig. ~ Fig. に示す。なお、以下に示す結果は 1 回目の測定結果における 0, 30, 45, 60, 90, 180 [deg] である。

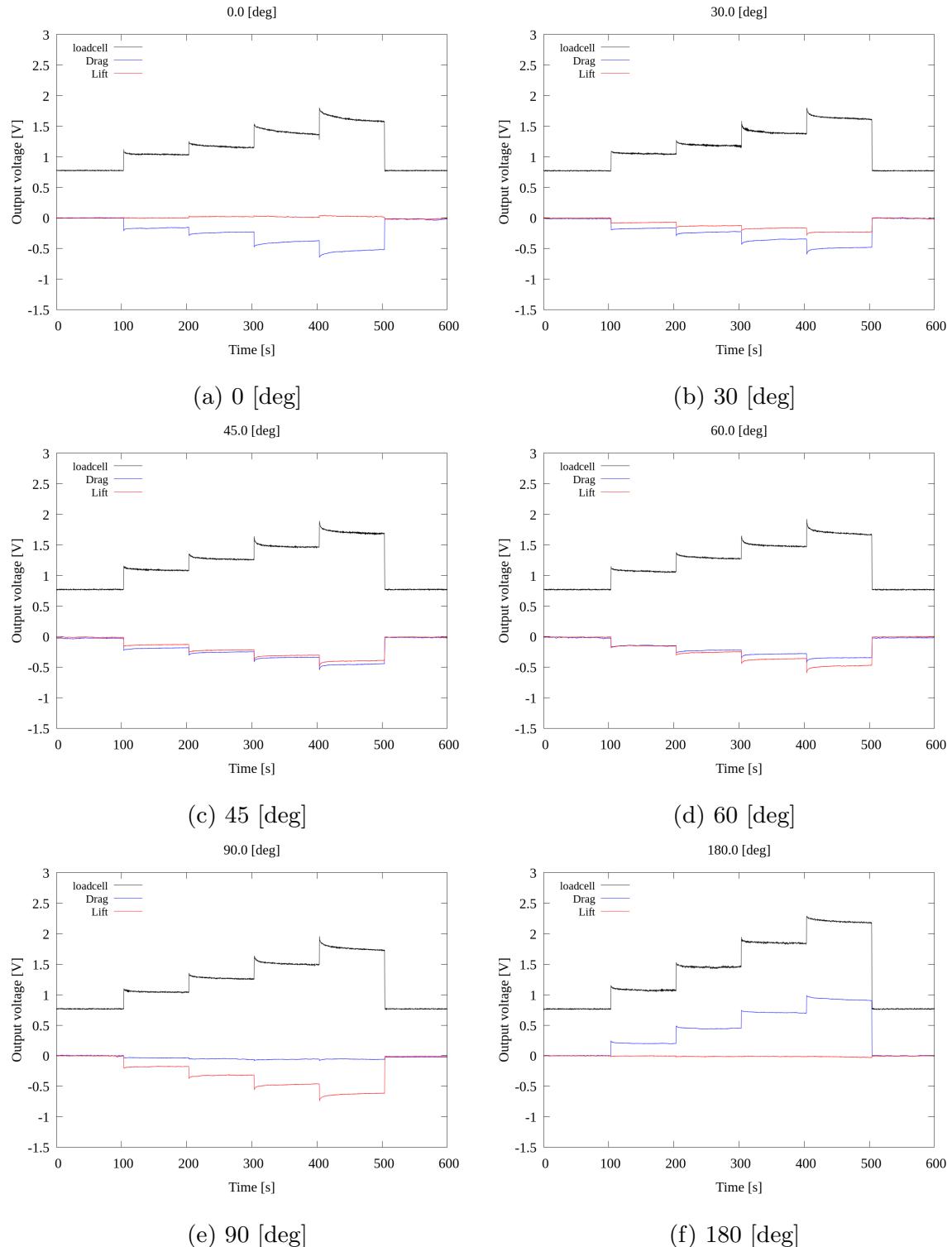


Fig. 28 Output voltage

以上の結果から自動一軸ステージが移動した直後から出力電圧の減衰がみられる場合があるが、同様の変化がロードセルおよびひずみセンサにみられることから大きな問題はないと考える。

4.3 データ処理手法

実験結果から、式(1)の出力電圧勾配を算出する。そのために以下の手順でデータ処理を行った。

- (1) ドリフト補正
- (2) 各距離における平均値の算出
- (3) 出力電圧勾配の算出

ここで、例として1回目の性能評価実験、0 [deg]におけるロードセルの出力電圧の図(Fig.)を用いて説明する。

ロードセルの出力電圧は使用しているストレインアンプの影響によりオフセット値を持つ。

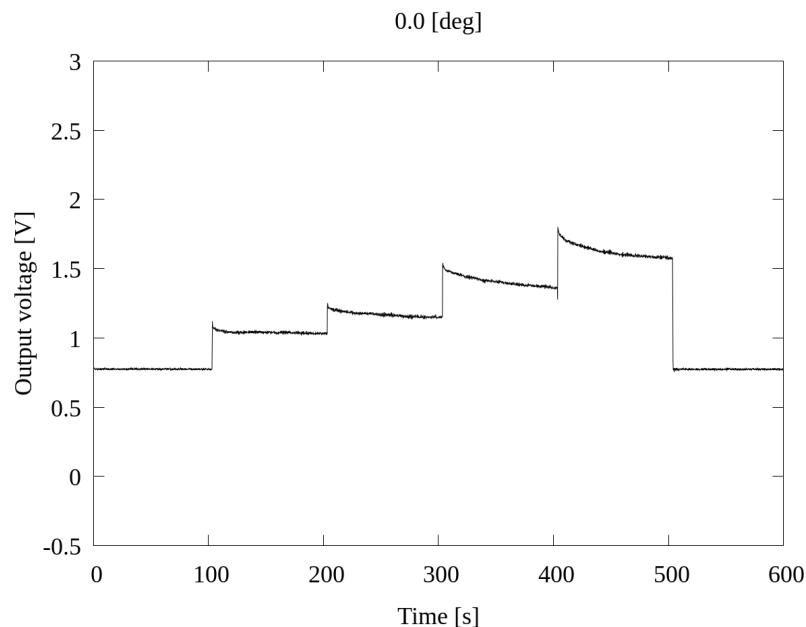


Fig. 29 Loadcell output voltage : 0 [deg]

また、このとき実験結果をロードセルの押込距離および時間経過によってそれぞれのデータ範囲についてその呼称を以下のTableのように定義することとする。

Table 10 Definition of data name

Data name	Pushing length [mm]	Time [s]
Range : 1	0.00	0 ~ 100
Range : 2	0.03	100 ~ 200
Range : 3	0.06	200 ~ 300
Range : 4	0.09	300 ~ 400
Range : 5	0.12	400 ~ 500
Range : 6	0.00	500 ~ 600

4.3.1 ドリフト補正

性能評価実験は各角度に対して約 10 分間の測定を行うが，ストレインアンプは時間経過に対して基準の電圧が変動する場合がある。この現象をドリフトと呼ぶ。そのため，実験結果を出力電圧勾配の算出に用いる前処理として，ドリフトを考慮したデータへと変換する必要がある。

このとき，以下の手順でドリフト補正を行うこととする。

- (1) 測定開始直後 (Range : 1) 及び終了直前 (Range : 6) のデータ (30 秒/150 点) における平均値を算出
- (2) 算出した 2 つの平均値を結び，直線を作成
- (3) 元データと直線の差をとり，補正值として採用する

以下の Fig. にドリフト補正を適用した結果を示す。

Fig. から補正前のデータから算出された補正直線 (赤線) の差を取ると補正後のデータはオフセット値の分だけ移動しており，タイヤモデルと接触していないとき ($t = 0 \sim 100$ [s]， $t = 500 \sim 600$ [s]) の出力電圧の値は 0 付近を推移していることがわかる。したがって，ドリフト補正処理は正しく動作していると考えられる。

また，以下の Fig. に抗力及び揚力方向のひずみセンサの出力電圧について同様のプログラムを用いてドリフト補正処理を行った結果を示す。

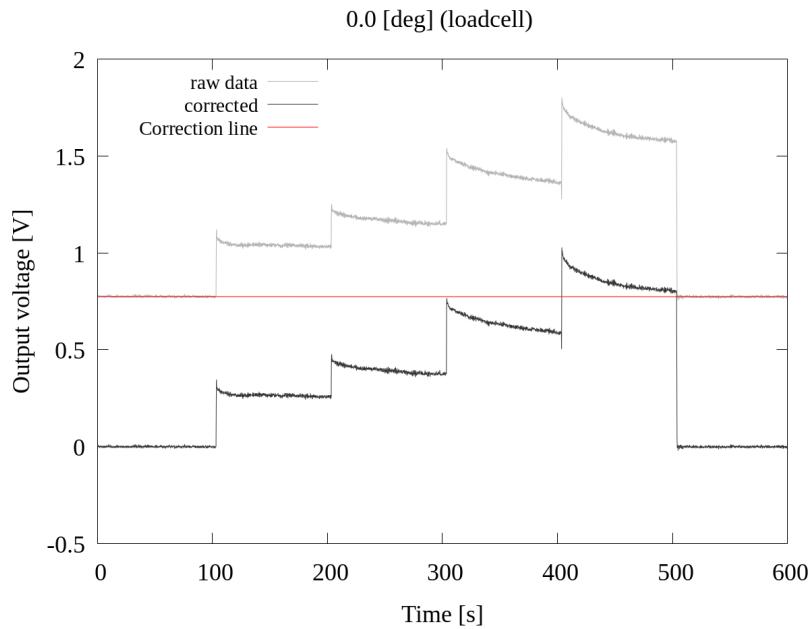


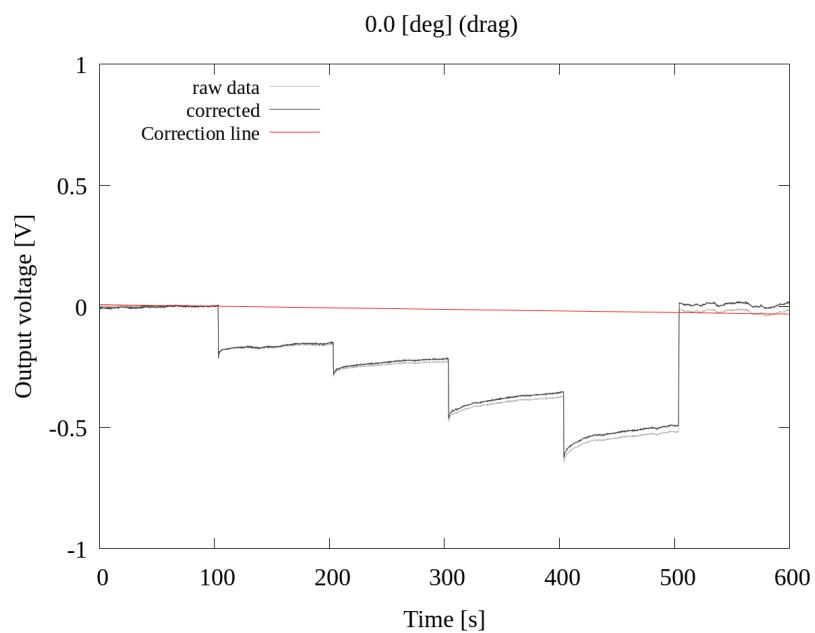
Fig. 30 Drift corrected voltage (load cell) : 0 [deg]

4.3.2 各距離における平均値の算出

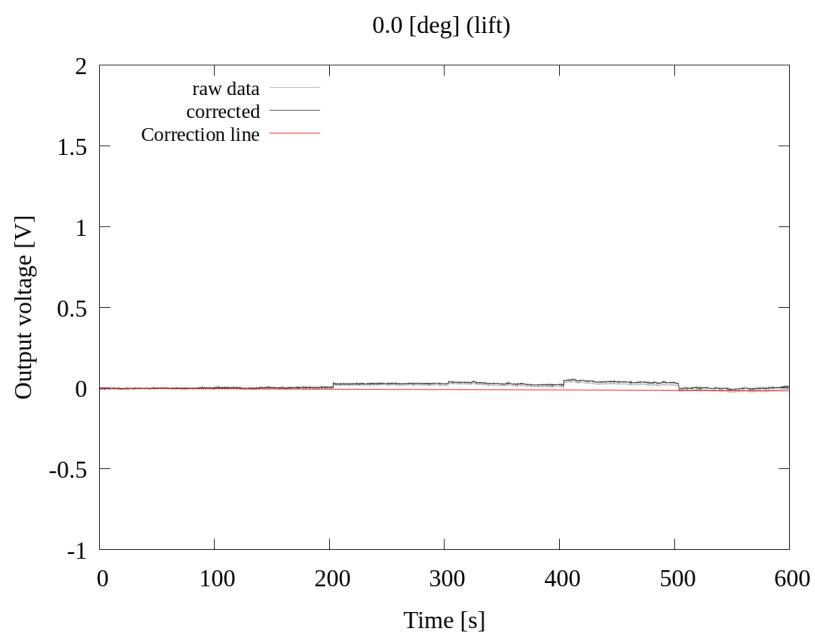
測定データの時間経過に沿って、プログラムの適用範囲を定め、以下の手順からそれぞれのデータ範囲における出力電圧について平均値を算出した。

- (1) 各押込距離において測定した 40 秒間（計 200 点）のデータを使用
- (2) 前後 5 秒（各 25 点）のデータを除いた 30 秒間（計 150 点）のデータの平均値を算出する

以下の Fig. にロードセルの出力電圧について平均値を算出した結果を示す。
また、以下の Fig. に抗力及び揚力方向のひずみセンサの出力電圧について同様のプログラムを用いて平均値の算出を行った結果を示す。



(a) Drag



(b) Lift

(c) Drift corrected voltage (strain sensors) : 0 [deg]

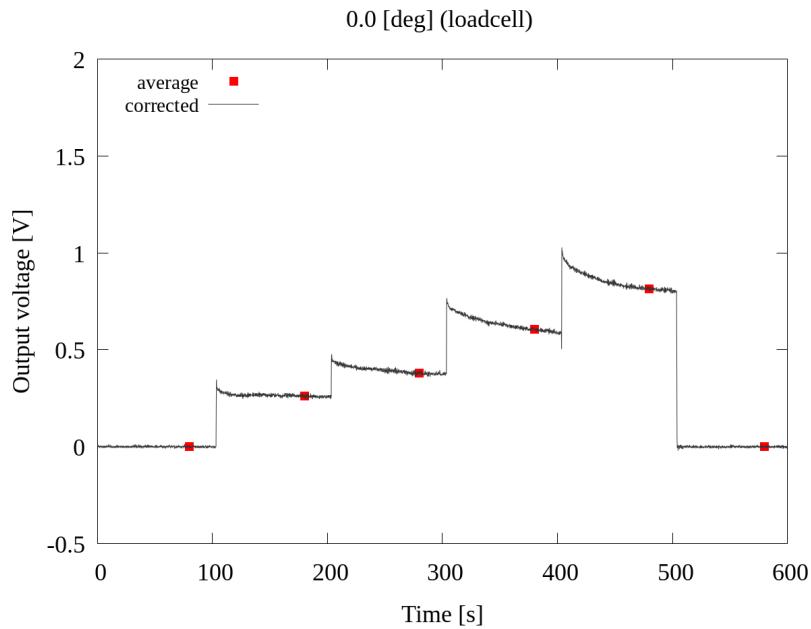


Fig. 32 Each distance average voltage (load cell) : 0 [deg]

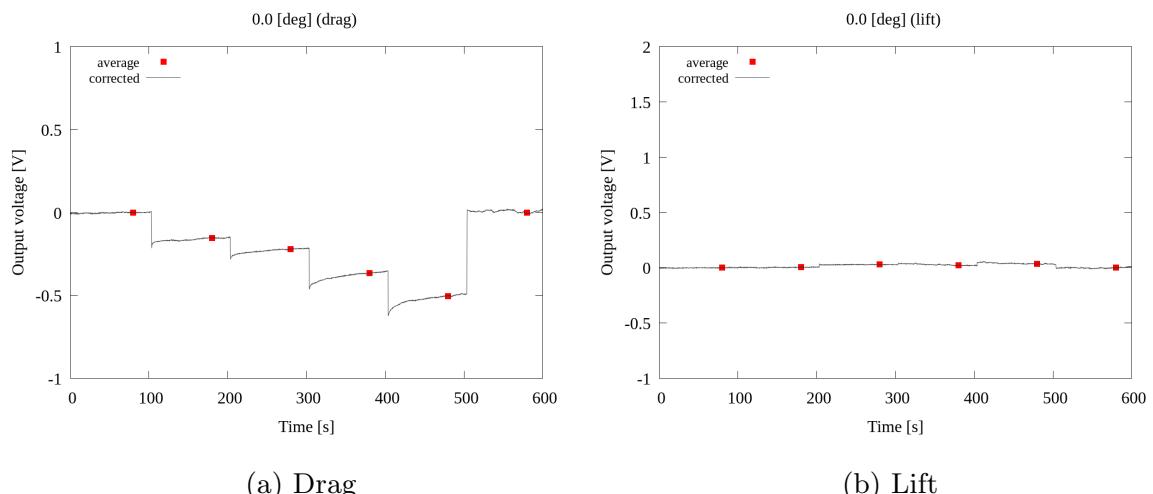


Fig. 33 Each distance average voltage (strain sensors) : 0 [deg]

4.3.3 出力電圧勾配の算出

以下の Fig. に、以上の過程から算出された実験結果の出力電圧勾配を示す。ここで、出力電圧勾配は、平均値を用いて最小二乗法から算出した傾きの値を採用している。なお、以下に示す結果は 1 回目の測定結果における 0, 30, 45, 60, 90, 180 [deg] である。

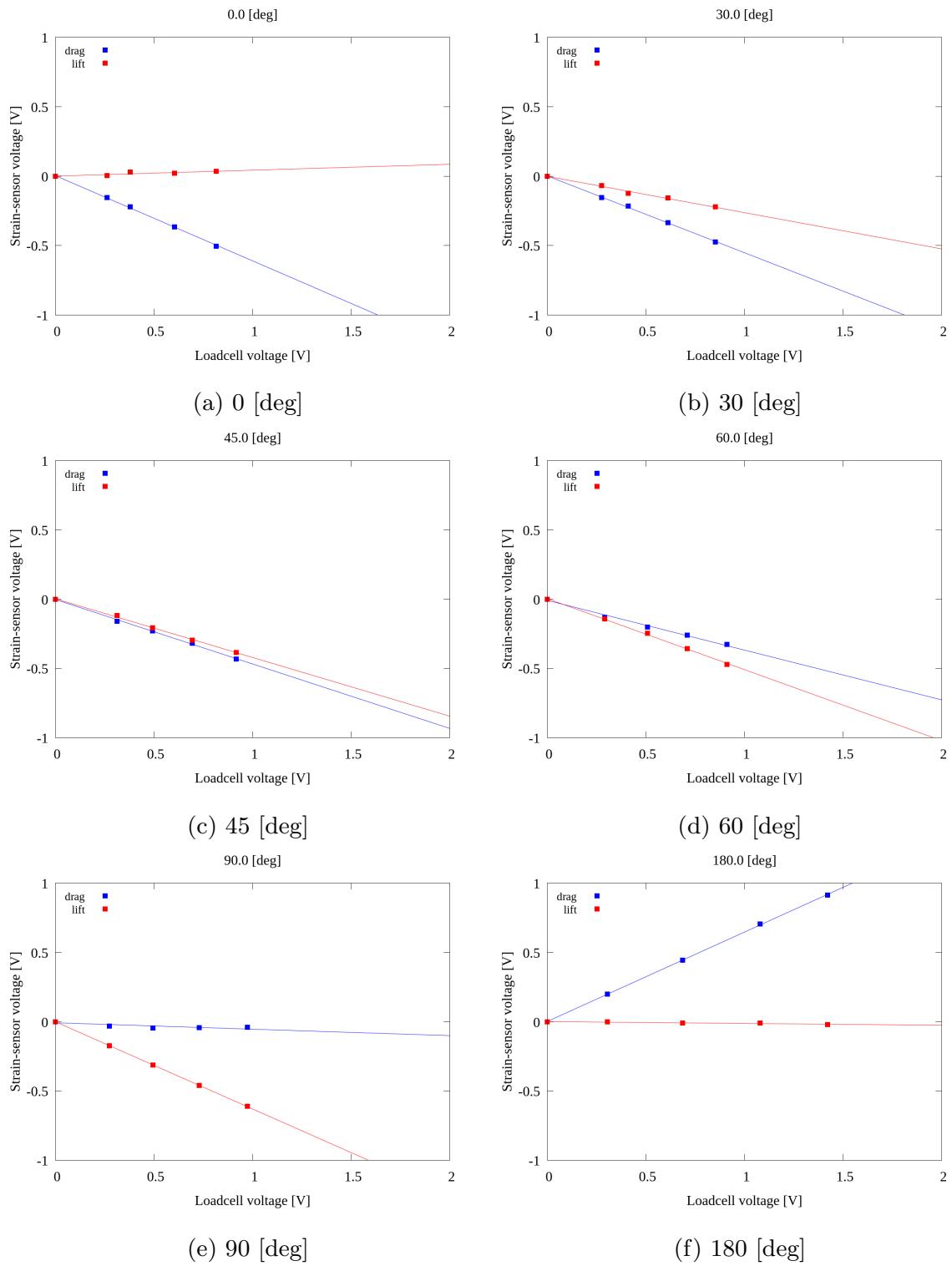
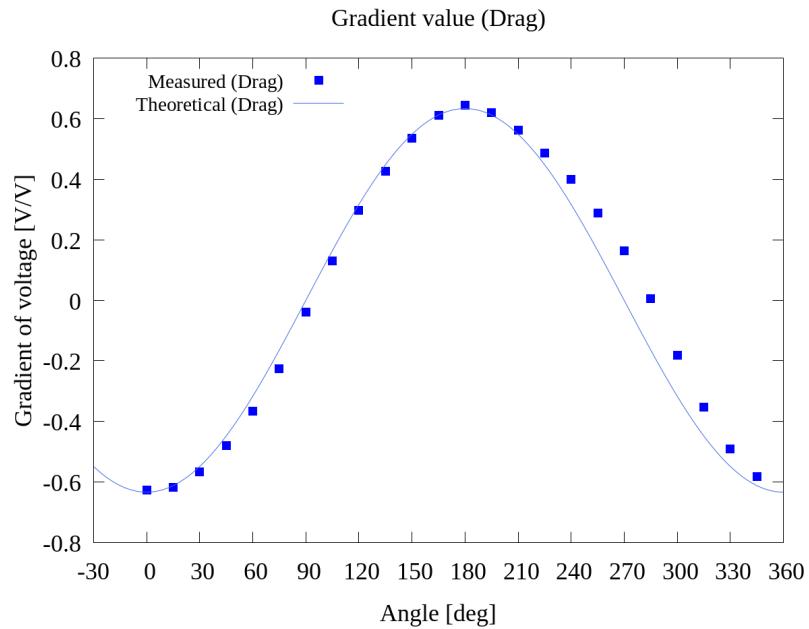
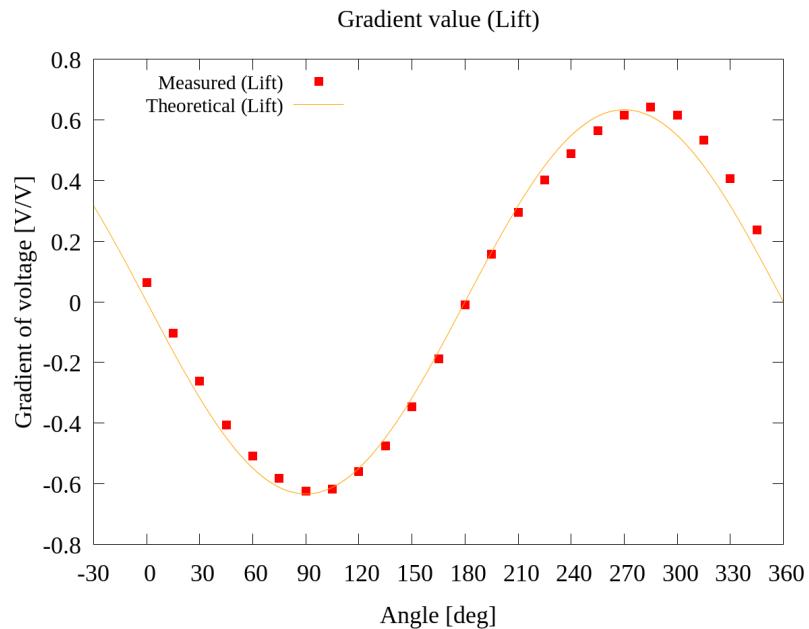


Fig. 34 Output voltage gradient

また，出力電圧勾配について各角度における算出値をプロットしたものを以下の Fig. , Fig. に示す．なお，ここで示す出力電圧勾配の値は5回実施した実験結果の平均値である．



(a) Drag



(b) Lift

(c) 5 times average of voltage gradient

4.4 校正理論の適用とその結果

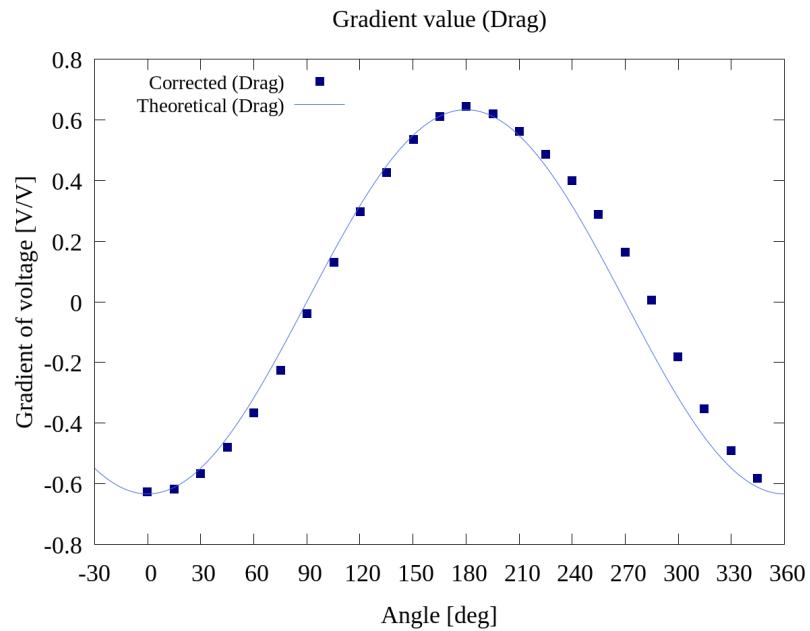
実験結果について作成した補正理論を適用し，水槽座標系における出力電圧勾配への変換を行う。

4.4.1 補正理論 [2] の適用

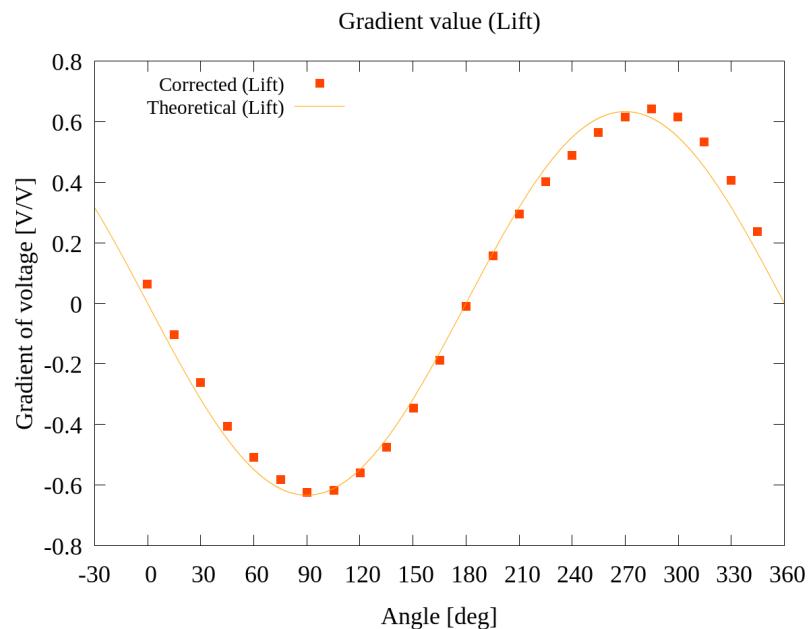
Fig. , Fig. について，座標系のオフセットにおける補正理論である式 () の適用後の出力電圧勾配 $v_{x'1}$, $v_{y'1}$ を以下の Fig. , Fig. に示す。なお，補正の際に用いたオフセット距離 Δx , Δy は実験の際に測定した以下の Table の数値を用いて行った。

Table 11 Offset length

Δx [mm]	Δy [mm]
0.09	0.06



(a) Drag



(b) Lift

(c) Offset corrected voltage gradient

4.4.2 補正理論 [3] の適用

Fig. , Fig. について、式 () のラグランジュ補間公式によって二次補間の適用後の出力電圧勾配 $v_{x'2}$, $v_{y'2}$ を以下の Fig. , Fig. に示す。

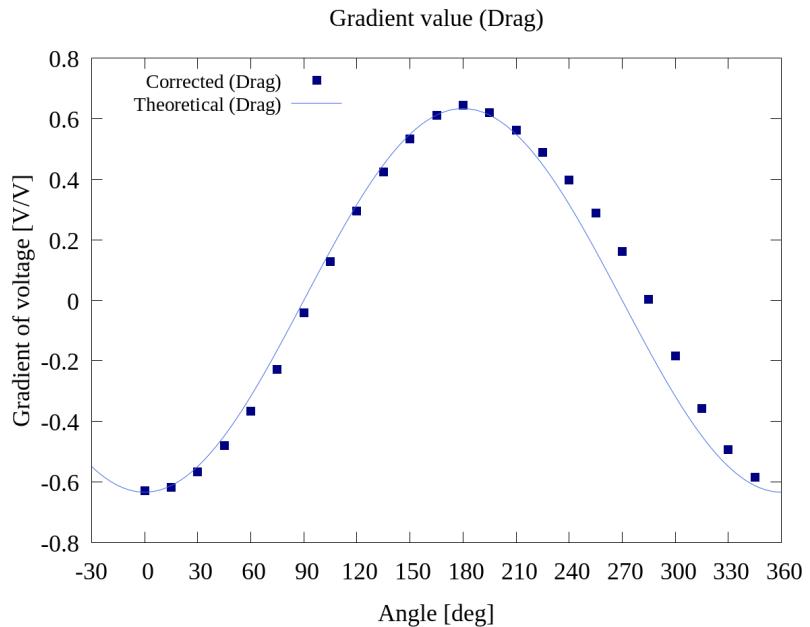


Fig. 37 Interpolated : drag (Average)

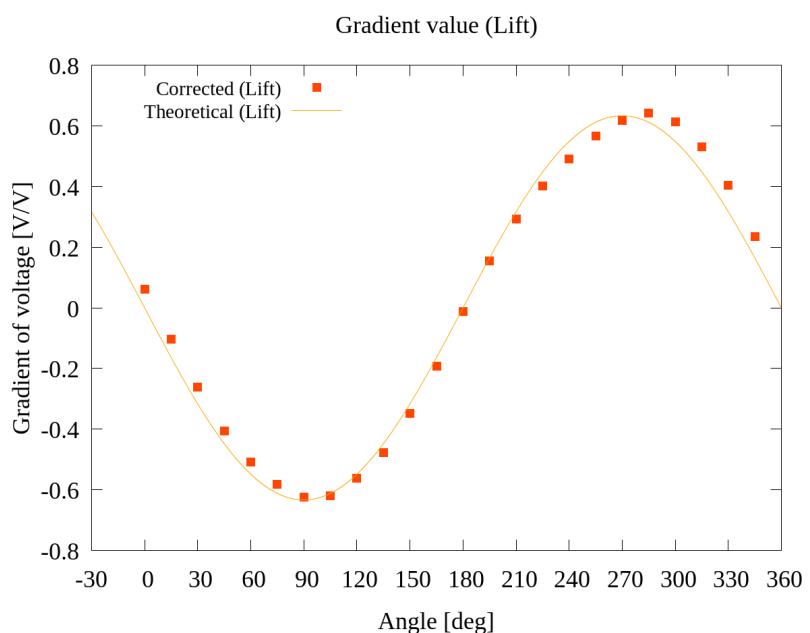


Fig. 38 Interpolated : lift (Average)

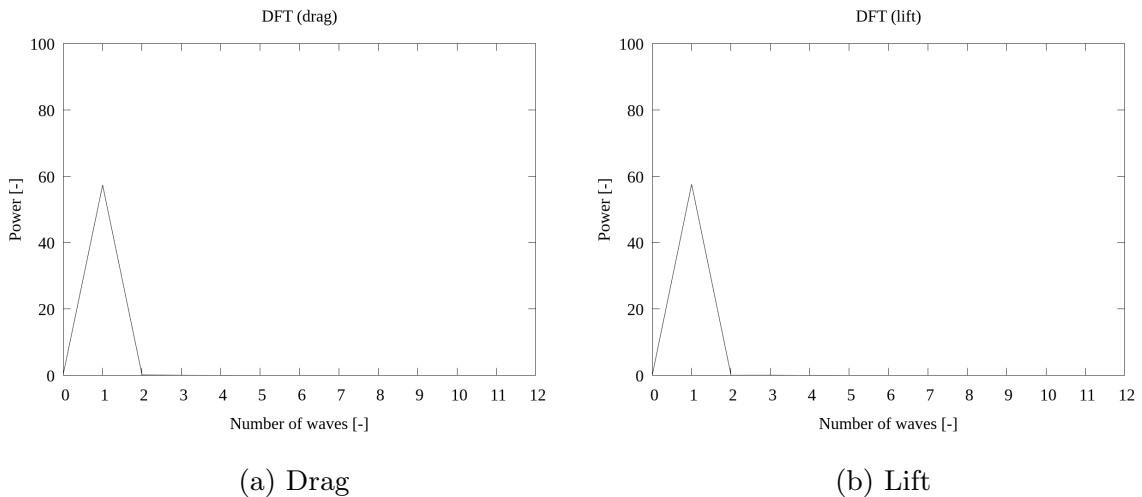


Fig. 39 DFT spectrum

4.4.3 補正理論 [1] の適用

はじめに、水槽座標系からの回転角 θ_x , θ_y を推定するため、Fig. , Fig. の結果に離散フーリエ変換を適用し、波数 1 の成分から θ_x , θ_y を算出する。ここで、その結果を以下の Fig. , Fig. に示す。

Fig., Fig. をみると、どちらもピークは波数 1 のときにある、波の特徴を正しく捉えられていることがわかる。また、このとき算出された波数 1 の値について、以下の Table に示す。

Table 12 DFT result value : wave 1

	Re	Im
Drag	-7.503	1.022
Lift	0.664	7.559

ここで、式(1), 式(2)を用いてそれぞれの回転角 θ_x , θ_y を算出する。余弦波からの位相角をそれぞれ ϕ_x , ϕ_y とすると、以下のように算出される。

$$\phi_x = \arctan\left(\frac{1.022}{-7.503}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 172.243 \text{ [deg]} \quad (54)$$

$$\phi_y = \arctan\left(\frac{7.559}{0.664}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 84.979 \text{ [deg]} \quad (55)$$

したがって、回転角 θ_x , θ_y は、以下のように表される。

$$\theta_x = 180 - \phi_x = 7.757 \text{ [deg]} \quad (56)$$

$$\theta_y = 90 - \phi_y = 5.019 \text{ [deg]} \quad (57)$$

また，その算出結果を以下の Table に示す．

Table 13 Specified rotation angle

θ_x [deg]	θ_y [deg]
7.757	5.019

推定した回転角 θ_x , θ_y を用いて Fig., Fig. について, 座標系の回転における補正理論である式() の適用後の出力電圧勾配 v_x , v_y を以下の Fig., Fig. に示す .

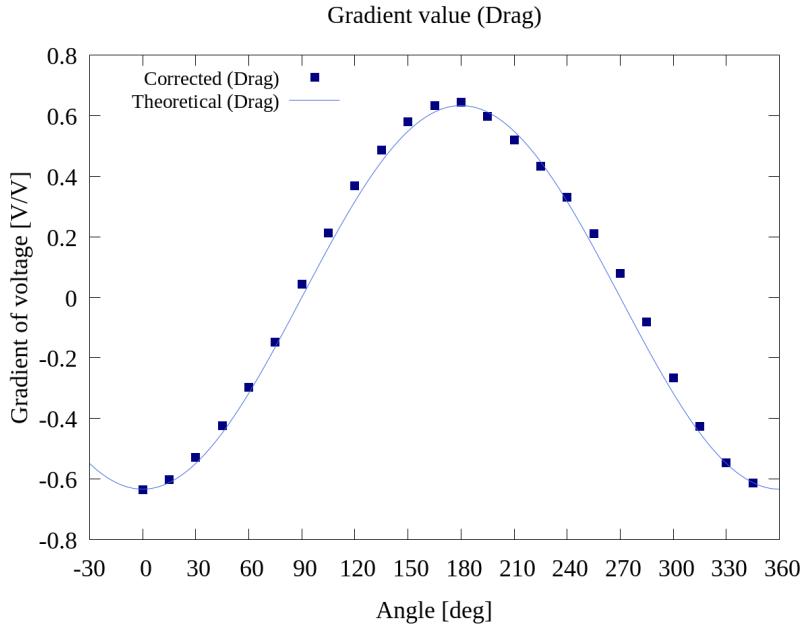


Fig. 40 Rotation corrected : drag (Average)

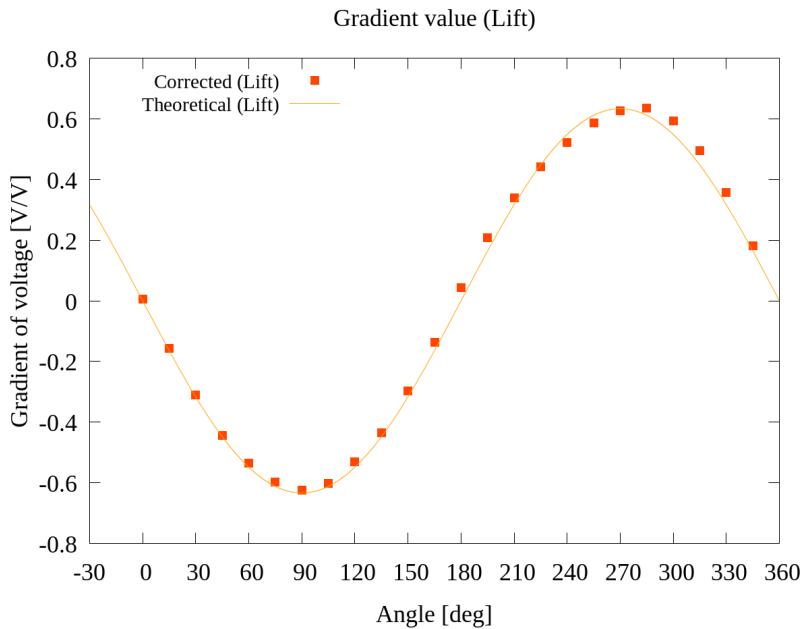


Fig. 41 Rotation corrected : lift (Average)

4.4.4 実験結果における正味出力電圧

Fig. , Fig. の値を用いて、式 () から算出される正味出力電圧勾配 v_{net} の値について以下の Fig. に示す。

Fig. をみると正味出力電圧勾配 v_{net} は周期的な変動を示していることがわかる。

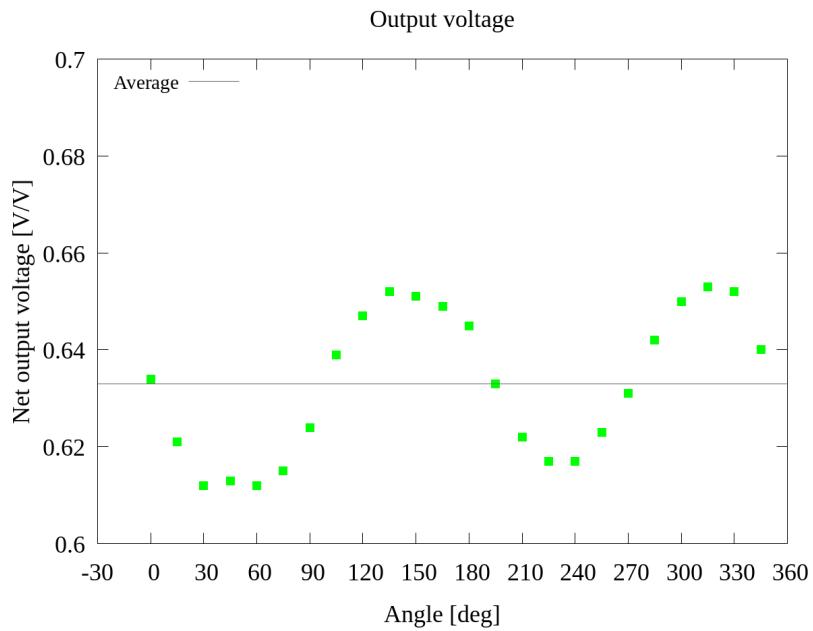


Fig. 42 Interpolated : drag (Average)

また，以下の Table に補正前の出力電圧勾配 v_d , v_l と補正後の v_x , v_y , 算出された正味出力電圧勾配 v_{net} の値について示す .

Table 14 Result summary

θ [deg]	v_d [V/V]	v_l [V/V]	v_x [V/V]	v_y [V/V]	v_{net} [V/V]
0	-0.627	0.063	-0.634	0.005	0.634
15	-0.617	-0.103	-0.601	-0.157	0.621
30	-0.566	-0.261	-0.528	-0.310	0.612
45	-0.479	-0.405	-0.423	-0.444	0.613
60	-0.365	-0.508	-0.296	-0.536	0.612
75	-0.226	-0.582	-0.148	-0.597	0.615
90	-0.038	-0.624	0.044	-0.623	0.624
105	0.131	-0.618	0.212	-0.602	0.639
120	0.296	-0.560	0.369	-0.531	0.647
135	0.425	-0.474	0.486	-0.435	0.652
150	0.536	-0.345	0.580	-0.297	0.651
165	0.611	-0.189	0.634	-0.137	0.649
180	0.643	-0.011	0.643	0.043	0.645
195	0.620	0.156	0.597	0.208	0.633
210	0.561	0.294	0.520	0.340	0.622
225	0.487	0.402	0.432	0.441	0.617
240	0.399	0.489	0.331	0.521	0.617
255	0.289	0.565	0.211	0.586	0.623
270	0.163	0.616	0.078	0.626	0.631
285	0.006	0.641	-0.082	0.636	0.642
300	-0.181	0.615	-0.266	0.593	0.650
315	-0.353	0.532	-0.426	0.495	0.653
330	-0.490	0.406	-0.545	0.357	0.652
345	-0.582	0.237	-0.613	0.181	0.640

4.5 RMS 誤差による補正值の評価

ここで、RMS 誤差を用いて補正前および補正後の結果について評価する。補正前の結果である座標系 A の抗力方向における RMS 誤差を E_{vd} 、その揚力方向を E_{vl} 、補正後の結果である水槽座標系の抗力方向における RMS 誤差を E_{vx} 、その揚力方向を E_{vy} として、算出結果を以下の Table に示す。

Table をみると、補正前における誤差 E_{vd} , E_{vl} と比較して、補正後における誤差 E_{vx} , E_{vy} は抗力方向、揚力方向ともに小さくなっている。補正理論の適用によって実験結果を理論値に近づ

Table 15 RMS error

E_{vd} [V/V]	E_{vd} [V/V]	E_{vx} [V/V]	E_{vy} [V/V]
0.071	0.046	0.036	0.025

けることができたことがわかる。

5. 結言

本研究では、回流水槽を用いたタイヤモデルに加わる作用力測定実験について、使用する作用力測定装置の揚抗力の同時測定における性能評価および作用力へと換算する際の補正理論の作成とその有効性を示すことを目的とした。

作用力測定実験では、2 ゲージ法を採用した 2 組のひずみセンサからそれぞれ抗力方向と揚力方向の 2 方向の作用力の同時測定を行うこととなり、そのときに得られるひずみセンサからの出力電圧は回流水槽への実験装置の取付、ひずみセンサ貼付け時の不正確性といった人為的操業により引き起こされる座標系の不一致によって大きな影響を及ぼされたことがわかった。

そこで、作用力測定装置に複数の角度からロードセルによる作用力を与え、ロードセルの出力電圧と作用力測定装置に取り付けられたひずみセンサの出力電圧の関係から出力電圧勾配を定義し、作用力方向による出力電圧勾配の変化について評価を行うことを試みた。

作用力測定実験を行う際には、特に作用力測定装置のひずみセンサを基準とした座標系 A と回流水槽の水流を基準とした水槽座標系に対する座標軸の回転角が大きく影響すると考えられる。また、校正実験装置を用いて作用力測定装置の性能評価を行う際には、校正装置を基準とした座標系 B と水槽座標系のオフセット距離が大きな影響を及ぼす事が考えられる。

ここで、上述の座標系の回転角とオフセット距離に注目し、それらの関係から補正理論を作成した。また、テストデータへの適用による補正理論の評価を行った。

最後に、性能評価実験の結果に作成した補正理論を適用し、適用前と適用後について理論値との差を RMS 誤差によって評価を行った。

本研究を通して得られた知見は以下の通りである。

- (a) 水槽座標系と座標系 B のオフセット距離 Δx , Δy が既知であるとき、実験結果から水槽座標系と座標系 A の回転角 θ_x , θ_y 、及び作用力測定装置に取り付けられたひずみセンサの取付角 ϕ_s を推定することができる事がわかった。
- (b) 補正前の実験値と補正後の補正值について、理論値との RMS 誤差を評価すると、補正後の RMS 誤差の値が抗力方向・揚力方向について小さいことがわかった。したがって、作成した補正理論は有効である事がわかった。
- (c) 補正值の正味出力電圧による評価について、周期的な変動がみられた。これは、作用力測定装置のひずみセンサが 2 ゲージ法を用いて取り付けられているためだと考えられ、その影響を考慮した補正理論の検討が必要であると考えられる。

今後の展望として、正味出力電圧の変動の原因を突き止め、その影響を考慮した補正理論を追加しすることで、実験結果からより精度の高い補正結果を得ることのできる理論の構築を目指して研究に取り組んでいきたい。

謝辞

謝辞を述べる

付録