

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、揚抗力測定装置に複数の角度から作用力を与えることによる出力電圧の変化を測定するとともに、作用力測定装置の性能評価および補正理論の構成を行った。実験結果から作用力測定装置の設置や、ひずみセンサの取付時の人為的操作によって発生する誤差の影響を検討し、補正理論を構成・適用した結果、測定結果を理論値へと近づけることができた。したがって、作用力測定装置を使用する上での人為的操作による誤差は構成した補正理論を用いることで、それぞれの誤差を推定することができ、実験結果を任意の座標系における出力結果へと変換することができる可能性を示すことができた。

# 目次

1.	序論	3
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.	補正理論	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	10
3.3	補正理論 [1]：座標系の回転における補正理論	10
3.4	補正理論 [2]：座標系のオフセットにおける補正理論	19
3.5	補正理論 [3]：複合状態における補正理論	25
3.6	正味出力電圧勾配による評価	30
4.	評価実験とその考察	31
4.1	実験方法	31
4.2	実験結果	32
4.3	データ処理手法	33
4.4	校正理論の適用とその結果	39
4.5	RMS 誤差による補正值の評価	47
5.	結論	48
	謝辞	49
	参考文献	50

## 1. 序論

深刻な地球温暖化を発端にエネルギー問題が叫ばれる昨今では、再生可能エネルギーの活用や脱炭素社会に向けた取り組み<sup>(1)</sup>が行われている。特に自動車への関心は非常に大きく、欧州では2030年代にはガソリン、ディーゼル車の新車販売の禁止を掲げている。それに伴い、日本でも2035年以降には乗用車の新車販売の10割を電動自動車にすることを目標に掲げている。ここで、例に挙げた自動車や航空機、船舶等の輸送機械の設計および開発を行う際に重要視されるのが流体による作用力である。特に進行を妨げる方向にはたらく力である抗力の低減は、輸送機械の燃費向上を考える上では非常に重要な要素の1つであるといえる。また、その法線方向にはたらく揚力は、航空機の性能を定める最重要項目であるといつても過言ではない。したがって、エネルギー問題に対応するために、今後の輸送機械の設計、開発の過程において、機体周りの流場とともに機体に加わる揚抗力の理解が必要不可欠であるといえる。

ここで、流場の理解においては、風洞内の内流場を線状の白煙によって可視するスモークワイヤ法<sup>(2)</sup>や、対象物の表面にタフトを貼付け、その挙動から流れの方向や剥離点を調べる表面タフト法<sup>(3)</sup>、トレーサ粒子を流体中に混合させ、その粒子群の撮影画像を解析することで流場を可視化するPIV(Particle Image Velocimetry)<sup>(4)</sup>等の手法が挙げられる。また、自動車や航空機といった流体機械の設計、開発の現場においては、長らく上述の手段を用いて評価が行われてきた。<sup>(5)</sup>現在では、計算流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を用いたコンピュータによる流体解析手法が著しい発展を遂げている。風洞等を用いた大規模な実験を行う必要がなく、設計ソフトウェアを使用して作成した3Dモデルのみで流場の解析を擬似的に行うことができるといった利点がある。そのことから設計、開発の期間の短縮やコスト削減を期待することができ、流体機械の設計、開発<sup>(6)(7)</sup>においては必要不可欠なツールとなった。また、流場における解析結果の整合性を示すため、簡易モデルを用いた実験結果との比較、評価を行う研究<sup>(8)</sup>も行われている。

一方で、上述の流場を理解するための手法では対象物に加わる揚抗力を測定することは困難であり、CFDシミュレーションによる、マクロな流れの解析や揚抗力についての推定結果は信頼性を検討しなければならない。<sup>(9)</sup>そのため、実際に実験を行うことで得られる知見は非常に大きく、特に、実際の流場により発生する作用力の測定方法について研究を行うことには大きな価値があるといえる。

本研究の背景として、田中ら<sup>(10)</sup>の行った回流水槽を用いたタイヤモデル(供試体)の作用力測定実験にならって、供試体にはたらく作用力を実験的手法を用いて計測を行うことが目標である。本研究で用いる作用力測定装置はひずみセンサを用いて揚抗力を曲げひずみによって変動する電圧として測定しており、タイヤモデルとホイールハウスモデルの関係性を調べることから、供試体が大きく変位することは避けるべきである。したがって、供試体を支える部材は剛性が高く、発生するひずみ量が小さくなる。そこで、作用力測定装置には高感度の半導体ひずみセンサを使用し、2アクティブゲージ法<sup>(11)</sup>を用いているため、2倍の出力電圧を得ることができるといった特

徴を持つ。ここで、2組のひずみセンサを直角に取り付けることで、揚抗力の測定を同時に行うこととなるが、その手法や問題点について検討する必要がある。

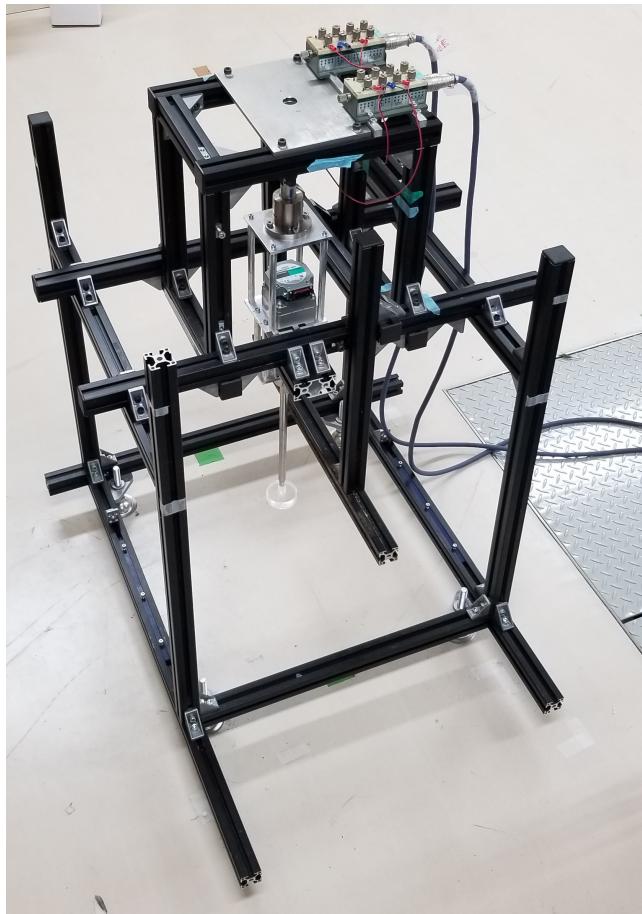
以上のことから、本研究ではひずみセンサを用いた揚抗力の測定手法の開発やその問題点について検討し、作用力測定装置の性能評価および実験結果に対する補正理論の構成を目的とした。

本論文中では、第2章で本実験で使用した作用力測定装置および新たに製作した校正実験装置の詳細について述べる。第3章では、作用力実験装置と回流水槽および校正実験装置の位置関係から構成される補正理論について述べている。第4章では、実施した作用力測定装置の性能評価実験の詳細とその結果を示す。また、その結果を用いた評価を行う。最後に第5章で本研究の総括を述べる。

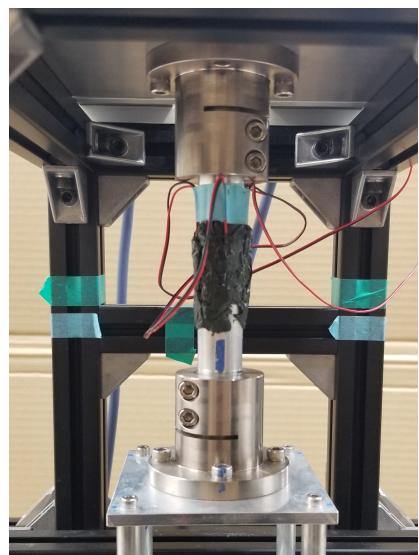
## 2. 実験装置

### 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 Fig.1 に示す。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 (b) に、作用力を与えるタイヤモデルの取付部を (c) に示している。



(a) Overall photograph



(b) Mounting part of strain sensors



(c) Mounting part of tire model

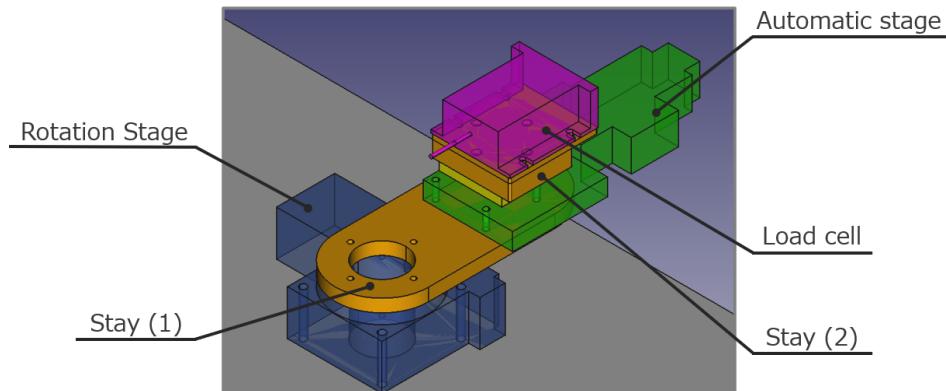
Fig. 1 Acting force measuring device

### 2.1.1 測定原理

Fig.1 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、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 Fig.2 に示す。



(a) 3D CAD



(b) Photograph

Fig. 2 Calibration device

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。Fig.2に示す作用力を与える校正装置は、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、Fig.3に示すように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。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。

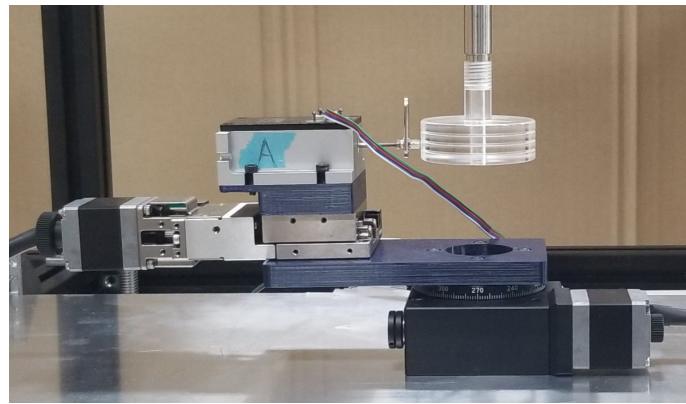


Fig. 3 Assembled calibaration device

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 Fig.4 に示す駿河精機製 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. 4 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.5 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。また、Fig.6 に本研究で使用した実験装置について、概略図を示す。



Fig. 5 Strain Amplifiers and data logger

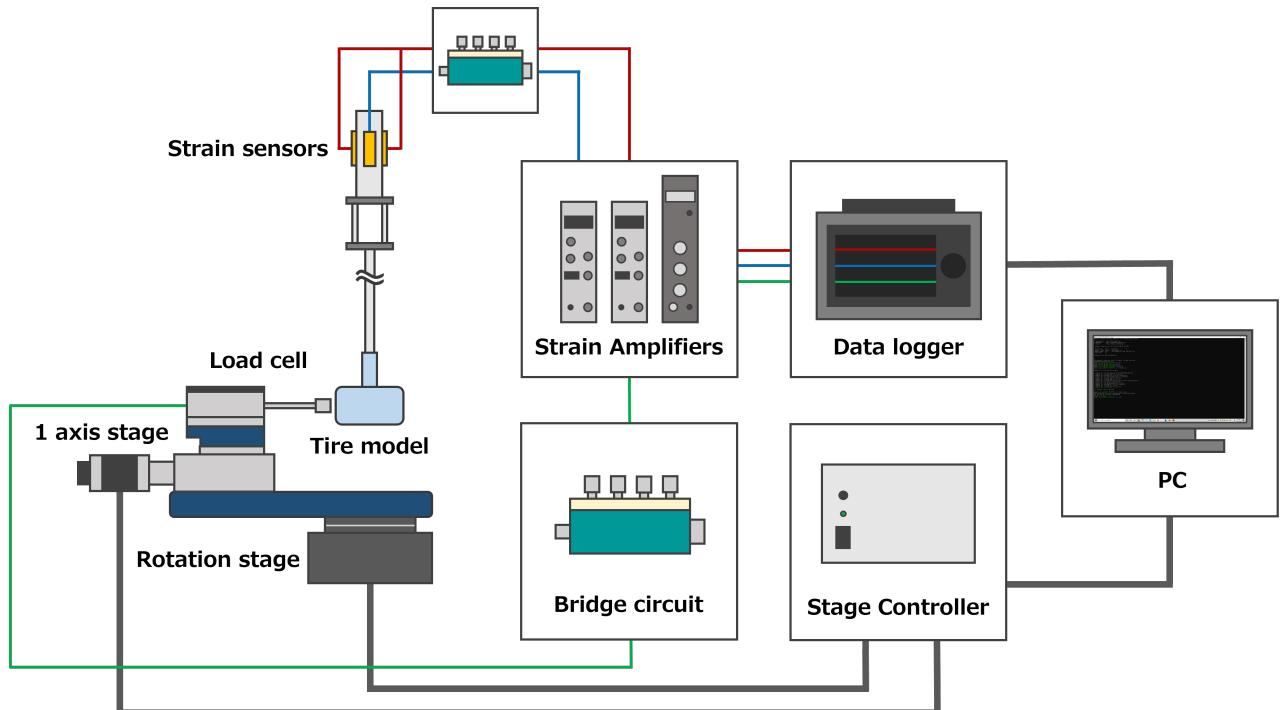


Fig. 6 Schematic of experimental system

### 3. 補正理論

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。このとき以下のような要因が、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  $\theta_x$ ,  $y'$  軸は  $y$  軸から  $\theta_y$  だけ回転している。このとき、座標系 A において、 $x'$  と  $y'$  は直行しない。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  $\Delta x$ ,  $y''$  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。その位置関係の概略図を Fig.7 に示す。

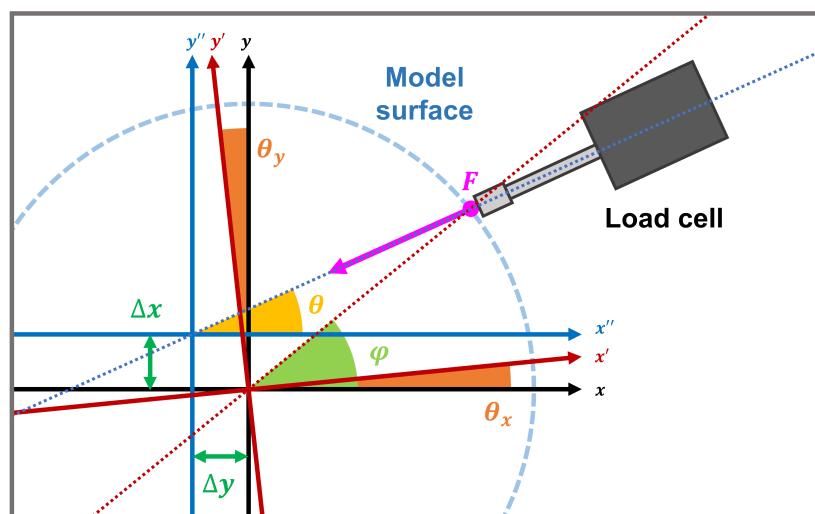


Fig. 7 Coordinate systems relationship

### 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.7 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．

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

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

$$C = \text{const}$$

### 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，Fig.8 のように回転角  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  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 $\theta_x$ , $\theta_y$ の算出

はじめに，回転角  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  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  $\phi$  を求めることができる．

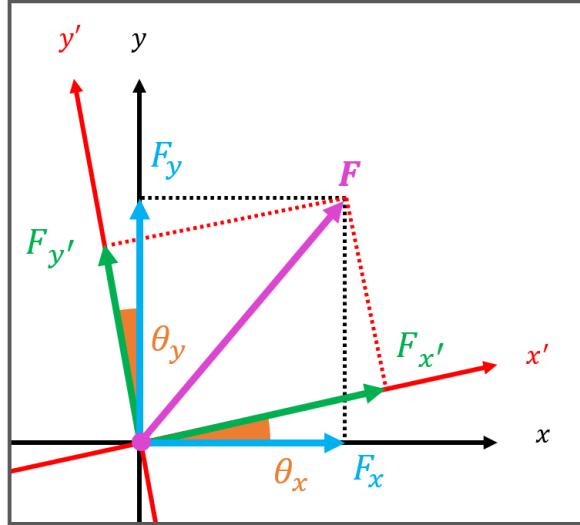


Fig. 8 Relationship between  $(x - y)$  and  $(x' - y')$

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

抗力方向の結果から得られた位相角を  $\phi_1$  , 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  $\theta_x$  , 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  $\theta_y$  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  $\theta_x$  ,  $\theta_y$  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を  $\phi_s$  とする位相角  $\phi_1$  ,  $\phi_2$  より求めることができる .

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

### 3.3.2 出力電圧勾配の座標変換

ここで、水槽座標系と座標系 A について、Fig.9 のように考える。位相角  $\theta_x, \theta_y$  が求められることから、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、水槽座標系の  $x$  を用いた式で表す。

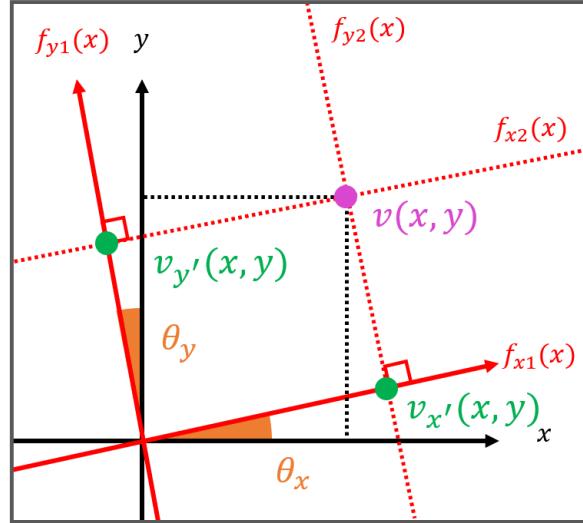


Fig. 9 Coordinate calculation

算出した位相角  $\theta_x, \theta_y$  より、 $f_x(x), f_y(x)$  は以下のように表される。

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

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

このとき、作用力  $F$  は、Fig.9 に示す点  $v$  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  $f_x(x), f_y(x)$  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  $\theta_x, \theta_y$  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  $v(x, y)$  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構成した。

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

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

また、今回は Table 1 のようなパラメータを用いた。

Table 1 Test data conditions [1]

	$\theta_{x \text{ test}}$ [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、構成したテストデータを Fig.10 に示す。

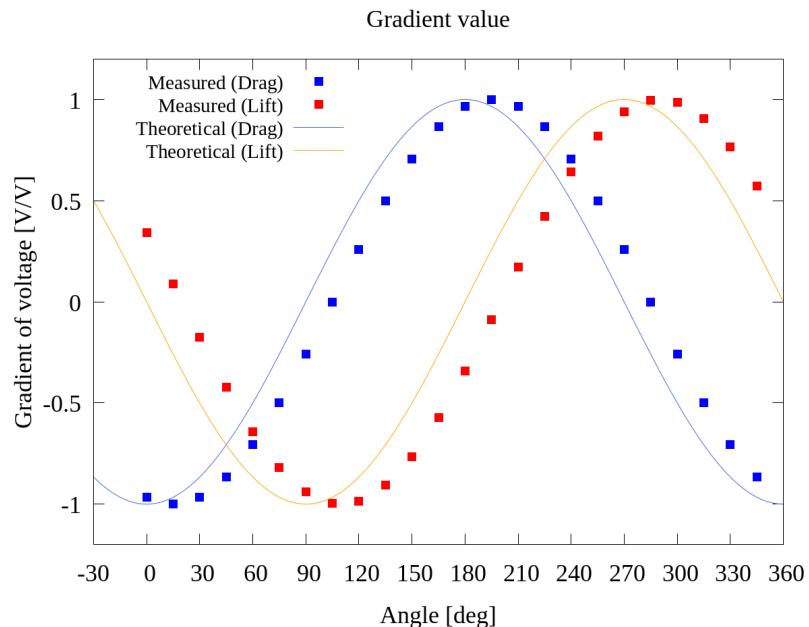


Fig. 10 Simulated gradient [Case 1]

Fig.10 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 Table 2 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 Fig.11 に示す。

Table 2 DFT spectrum [Case 1]

	Re	Im
Drag	-11.591	3.106
Lift	4.104	11.276

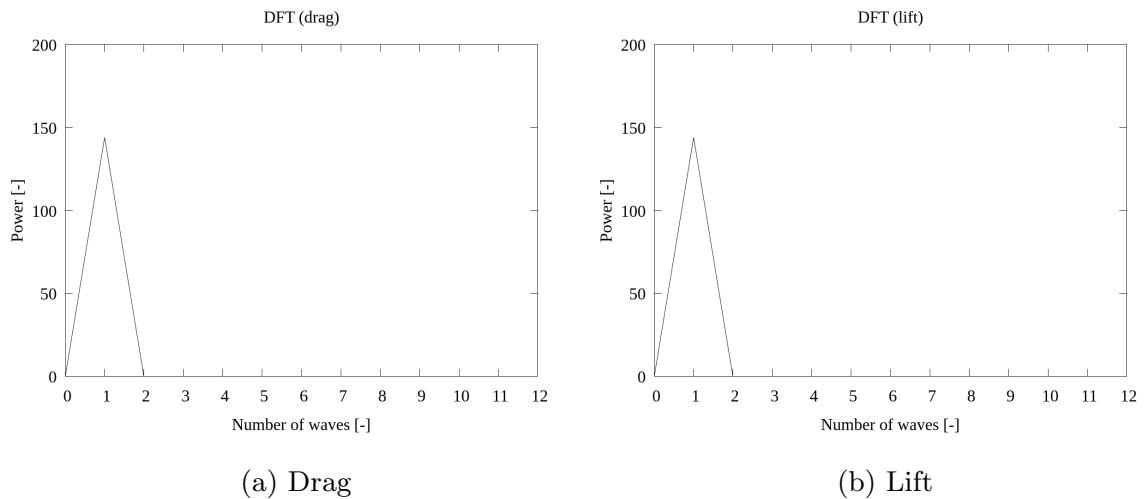


Fig. 11 DFT spectrum [Case 1]

Fig.11 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 2 について、式(5)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(6), 式(7)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。

$$\theta_{x,\text{test}} = \pi \cdot \frac{180}{\pi} - 165 = 15 \text{ [deg]} \quad (23)$$

$$\theta_{y,\text{test}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{180}{\pi} - 70 = 20 \text{ [deg]} \quad (24)$$

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(8)よりわかる．

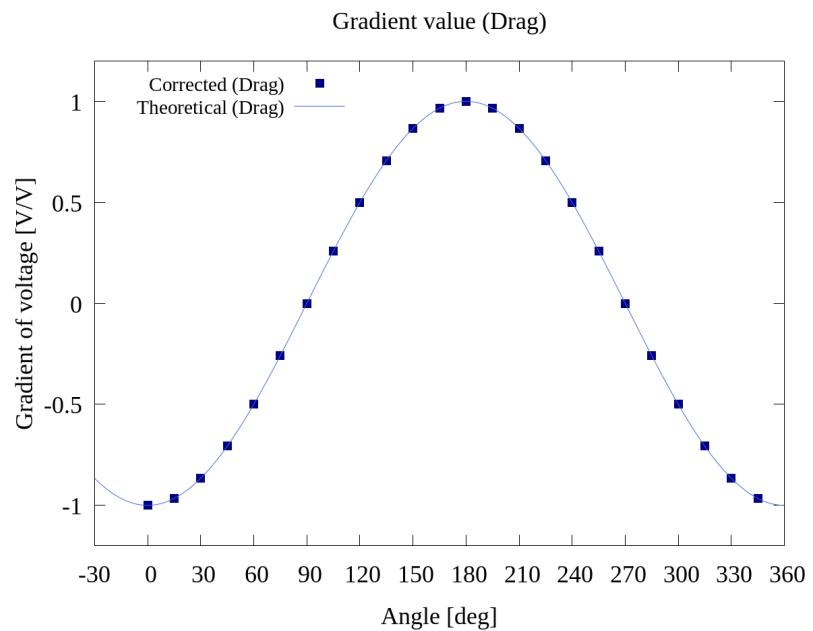
$$\phi_{s \text{ test}} = |15 - 20| = 5 [\text{deg}] \quad (25)$$

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(1)，式(2)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 Table 3, Fig.12 に示す．

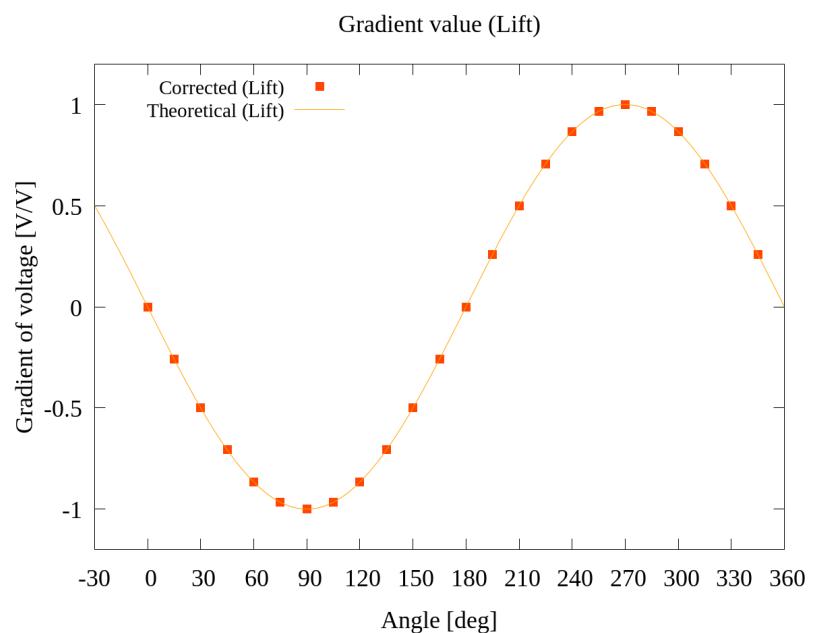
Table 3 Correction test [Case 1]

$\varphi$ [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

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．



(a) Drag



(b) Lift

Fig. 12 Corrected gradient [Case 1]

また, Fig.13, Fig.14 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])

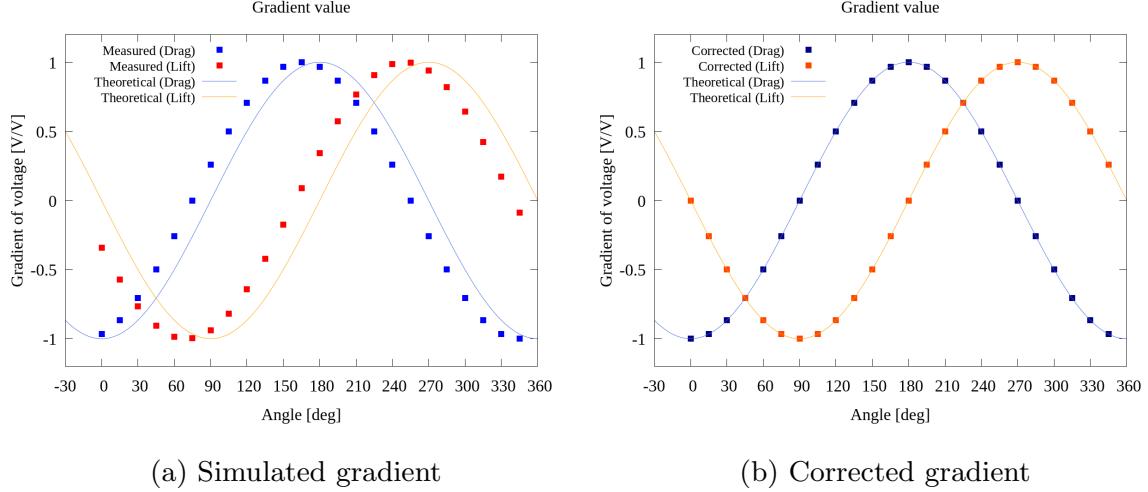


Fig. 13 Test data [Case 2]

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

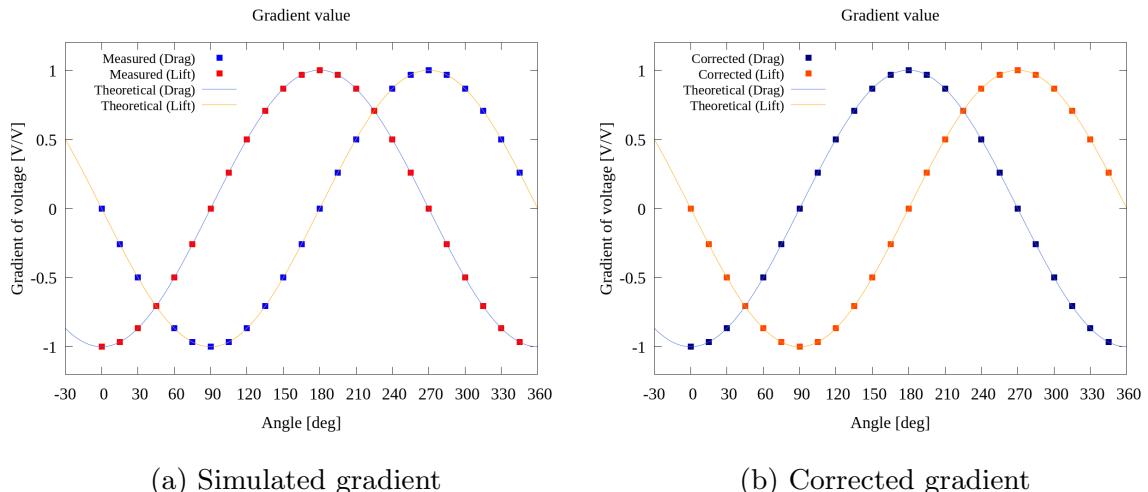


Fig. 14 Test data [Case 3]

ここで, Fig.13, Fig.14 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、Fig.15 に示すように回転角はなく、水槽座標系の中心  $o$  と座標系 B の中心  $o''$  はオフセット  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  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  $f$  と点  $o''$  を通る直線（青点線）と  $x''$  軸の角度を  $\theta$ 、作用点  $f$  と点  $o$  を通る直線（赤点線）と  $x$  軸の角度を  $\varphi$  とする。また、作用点  $f$  と点  $o''$  を通る直線（青点線）と作用点  $f$  と点  $o$  を通る直線（赤点線）の角度を  $\alpha$  とする。角度  $\theta$  は校正実験時に記録される角度となる。

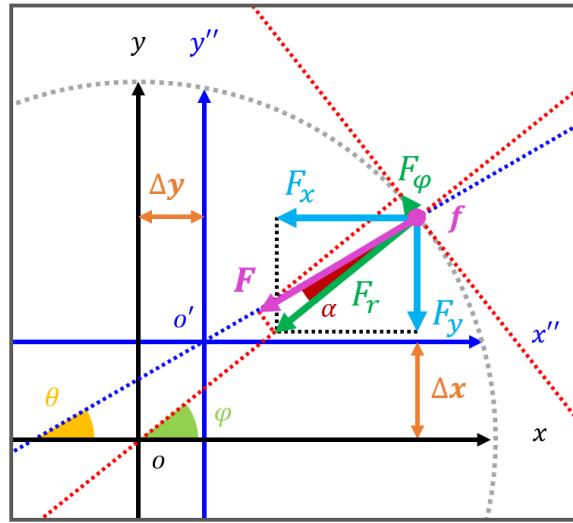


Fig. 15 Relationship between  $(x - y)$  and  $(x'' - y'')$

#### 3.4.1 角度 $\alpha$ の算出

供試体の半径を  $r$  とするとき、水槽座標系について作用点  $f$  の  $(x, y)$  座標は角度  $\varphi$  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 について考える，このとき作用点  $f$  の  $(x'', y'')$  の座標はオフセット  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  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  $\theta$  を用いて角度  $\varphi$  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  $\alpha$  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  $F_\varphi$ ，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  $\theta$ ，算出した  $\varphi$  を用いると，それぞれ以下のように求められる．

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

$$F_r = F \cos \alpha = F \cos (\theta - \varphi) \quad (34)$$

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  $\varphi$  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  $F_\varphi$  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．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する．

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

### 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  $F$  はすべて作用力測定装置の中心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  $F_\theta$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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 [2] のテストデータへの適用

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構成する．任意のオフセット  $\Delta x_{\text{test}}$ ， $\Delta y_{\text{test}}$  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．また，今回は Table 4 のようなパラメータを用いてテストデータを構成した．

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

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

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

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

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

Table 4 Test data conditions [2]

	$\Delta x_{\text{test}}$ [mm]	$\Delta y_{\text{test}}$ [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、構成したテストデータを以下に示す。

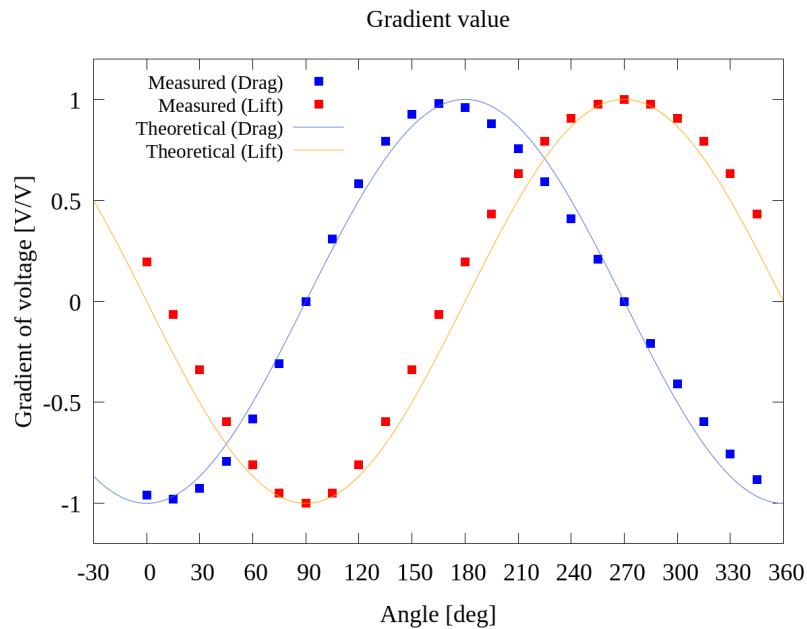


Fig. 16 Simulated gradient [Case 4]

Fig.16 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、 $\theta$ 、 $\Delta x_{\text{test}}$ 、 $\Delta y_{\text{test}}$ は既知の変数であるため式(31)、式(32)より、 $\alpha$ および $\varphi$ を求めることができる。したがって、式(38)、式(39)を適用した結果を5に示す。ここで、 $\varphi$ 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。

Table 5 Correction test [Case 4]

Angle [deg]	$v_{x'' \text{ test}} [\text{V/V}]$	$v_{y'' \text{ test}} [\text{V/V}]$	$v_x [\text{V/V}]$	$v_y [\text{V/V}]$	$\varphi [\text{deg}]$
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

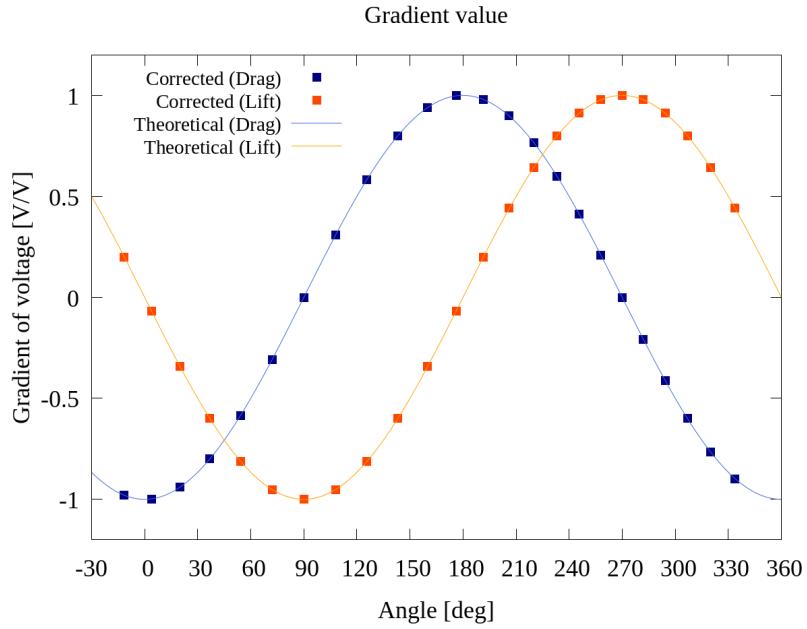


Fig. 17 Corrected gradient [Case 4]

Fig.17 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  $\varphi$  となるため、不等間隔となってしまうことがわかる。

また、Fig.18, Fig.19 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 ( $\Delta x_{\text{test}} = 5.0 \text{ [mm]}$ , $\Delta x_{\text{test}} = -5.0 \text{ [mm]}$ )

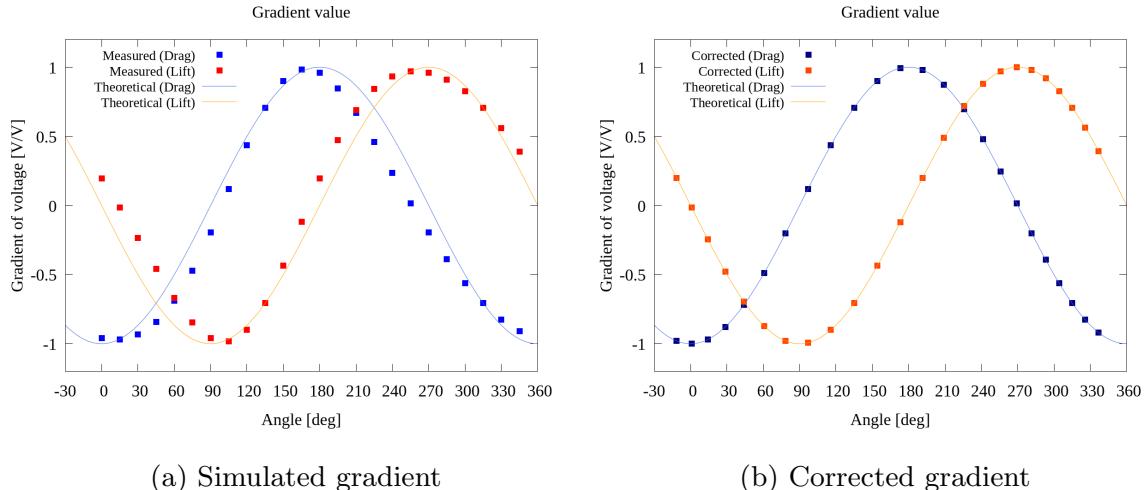


Fig. 18 Teat data [Case 5]

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

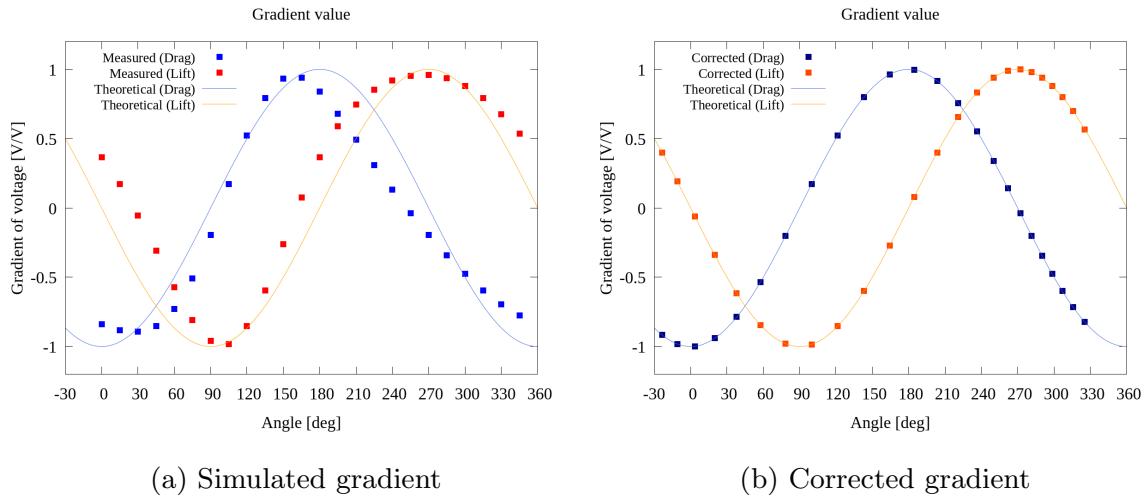


Fig. 19 Teat data [Case 6]

## 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

構成した補正理論について、座標系の回転角  $\theta_x, \theta_2$  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 $\theta$ とするとき、実際の作用力の角度 $\varphi$ 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 $\varphi$ とその前後のデータを使用することで、 $\theta$ 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 補正理論[3]のテストデータへの適用

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構成する。任意の回転角 $\theta_{x\text{ test}}$ ,  $\theta_{y\text{ test}}$ , 任意のオフセット $\Delta x_{\text{test}}$ ,  $\Delta y_{\text{test}}$ 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。また、今回をTable 6のようなパラメータを用いてテストデータを構成した。

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

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

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

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

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

Table 6 Test data conditions (3)

	$\theta_{x\text{ test}}$ [deg]	$\theta_{y\text{ test}}$ [deg]	$\Delta x_{\text{test}}$ [mm]	$\Delta y_{\text{test}}$ [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、構成したテストデータを Fig.20 に示す。また、補正理論 [2] を適用した結果を Fig.21 に示す。

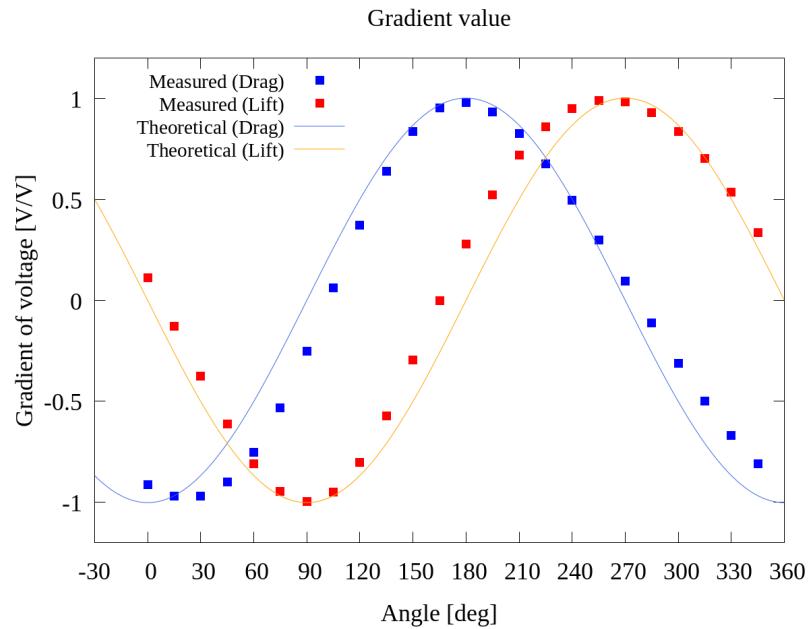


Fig. 20 Simulated gradient [Case 7]

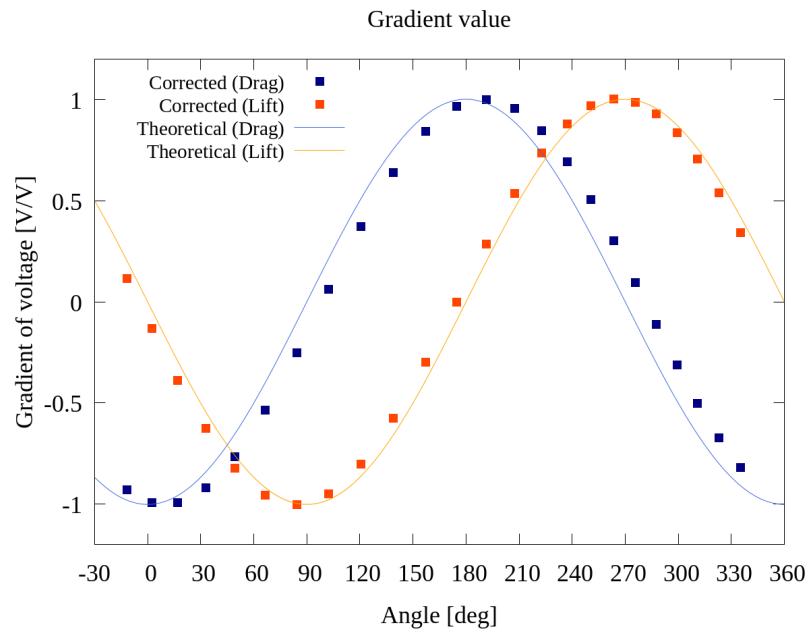


Fig. 21 Offset Corrected gradient [Case 7]

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 Fig.22 に示す。

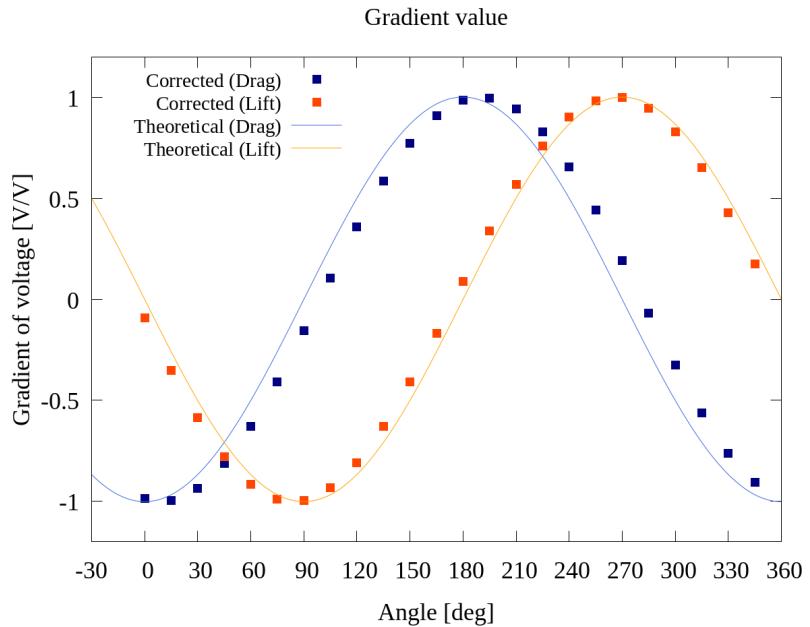


Fig. 22 Interpolated data [Case 7]

上記の Fig.20, Fig.21 と比較すると Fig.22 は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 Fig.23 に示す。また、波数 1 の成分についての算出値を Table 7 に示す。

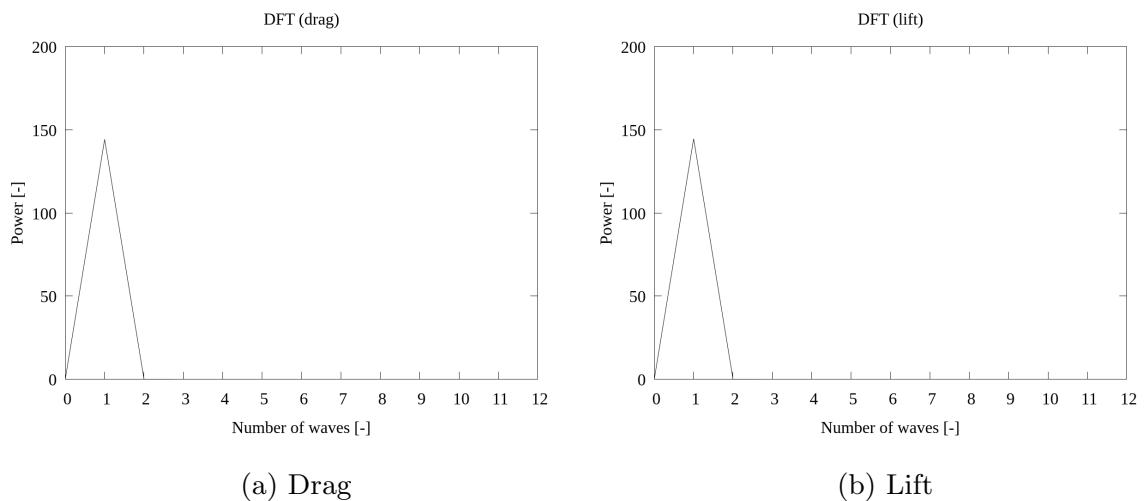


Fig. 23 DFT spectrum [Case 7]

Table 7 Component of wave number 1 [Case 7]

	Re	Im
Drag	-11.835	2.083
Lift	-1.081	11.978

Fig.23 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 7 について、式(5)、式(6)、式(7)より回転角  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  をそれぞれ算出し、その値を Table 8 に示す。

Table 8 Specified rotation angle [Case 7]

	$\theta_x$ [deg]	$\theta_y$ [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 8 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 Fig.24 に示す。

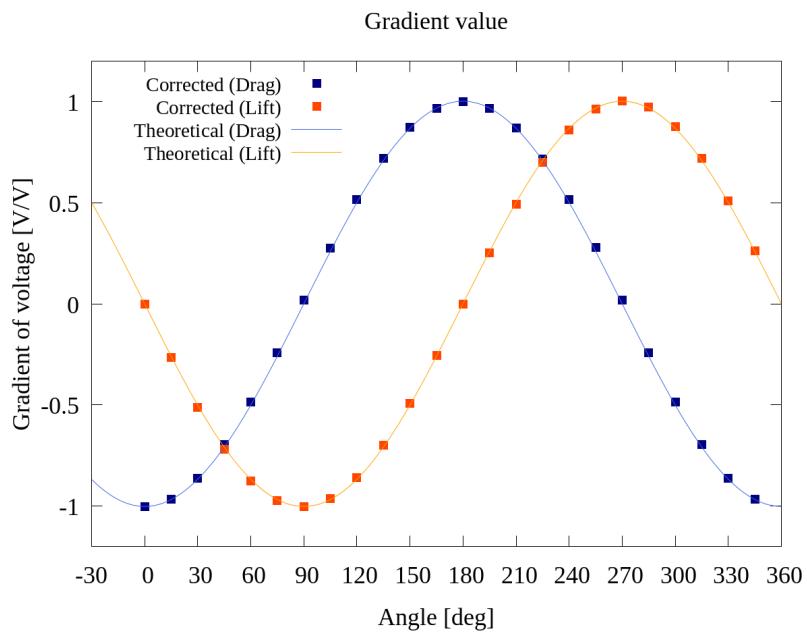


Fig. 24 Corrected gradient [Case 7]

Fig.24 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 正味出力電圧勾配による評価

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  $v_{\text{net}}$  と定義し，その結果を Fig.25 に示す．

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

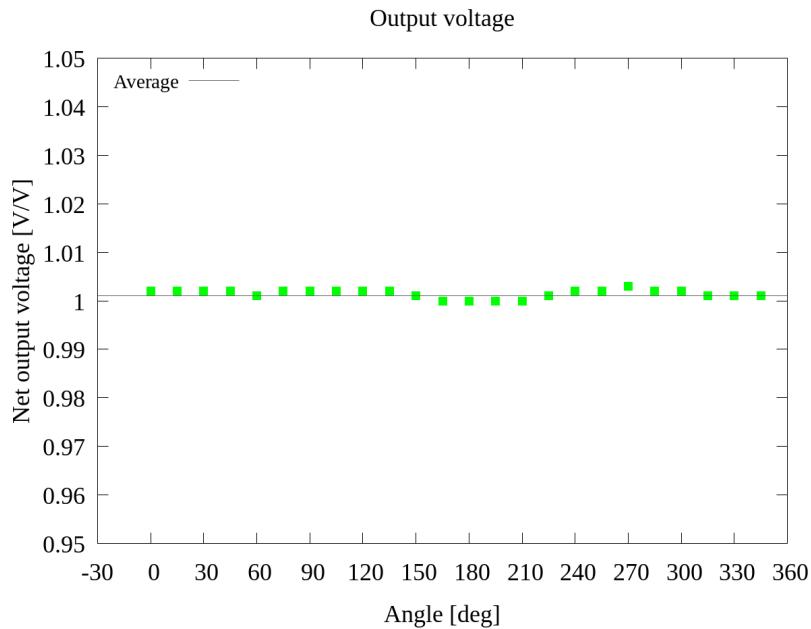


Fig. 25 Net voltage gradient [Case 7]

Fig.25 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，構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  $\theta_x, \theta_y$  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. 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 Table 9 に示す。

Table 9 Experimental 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を行う。
- (3) 自動ステージ動作後、電圧の安定を図るため、60 秒間の自動ステージ動作時間を設ける。
- (4) (2), (3) の作業を 5 回繰り返す。ただし、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

4.1 節に示した手順にしたがって、角度ごとに行つた測定結果を Fig.26 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  $0, 30, 45, 60, 90, 180 [deg] である。$

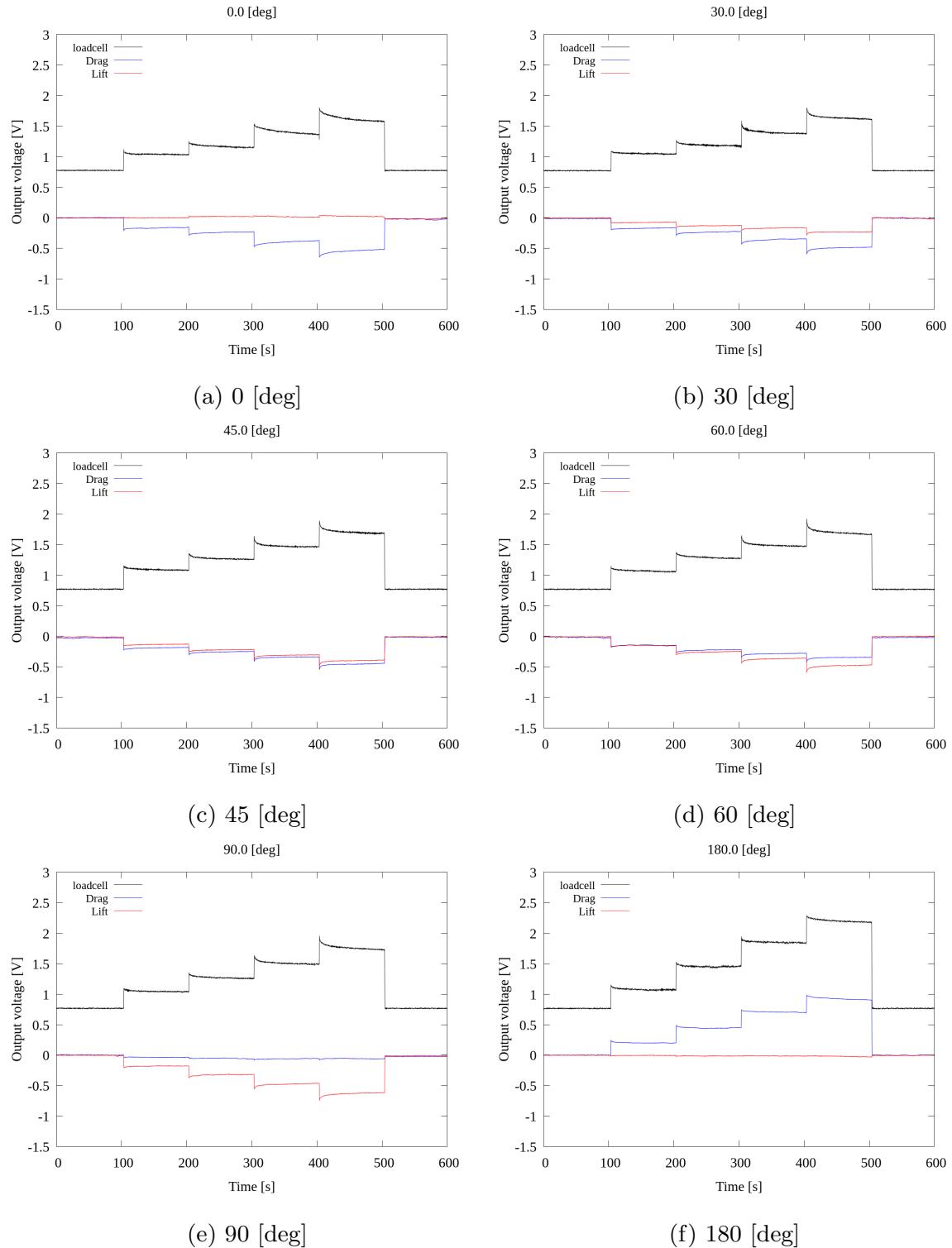


Fig. 26 Voltage for various angles

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)、式(2)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、Fig.27に示す0 [deg]におけるロードセルの出力電圧の図を用いて説明する。

なお、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。

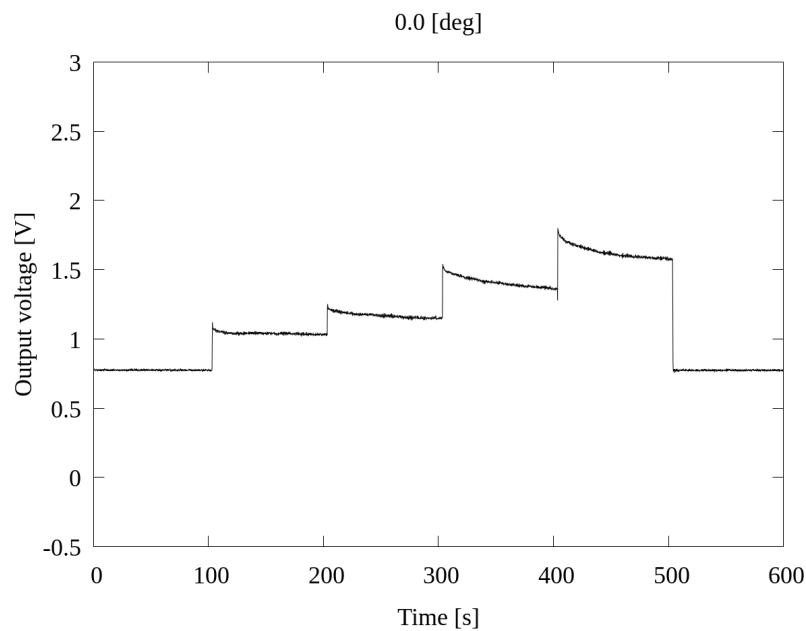


Fig. 27 Loadcell voltage : 0 [deg]

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をTable 10のように定義することとする。

Table 10 Definition of data set

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) Range : 1 及び 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、直線を構成
- (3) 元データと直線の差をとり、補正值として採用する

Fig.28 にドリフト補正を適用した結果を示す。

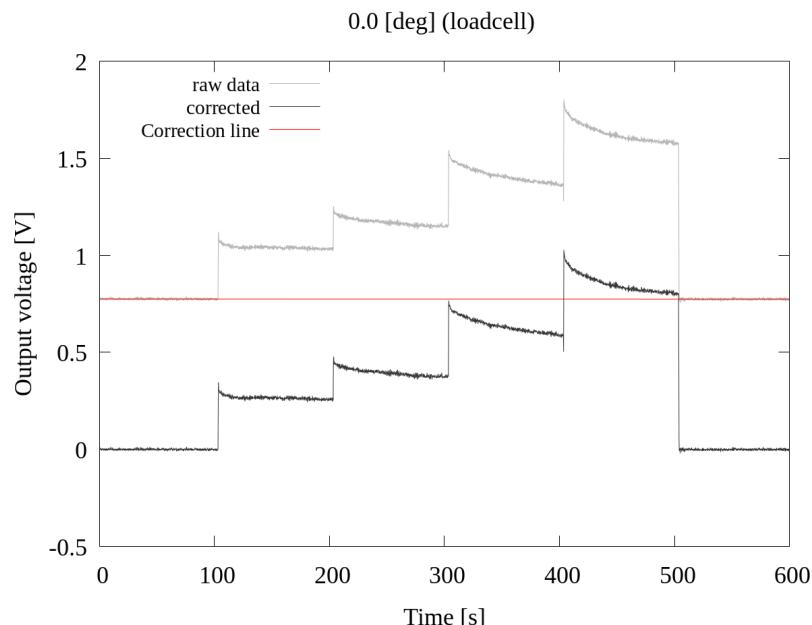


Fig. 28 Drift corrected voltage (load cell) : 0 [deg]

Fig.28 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、Fig.29 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。

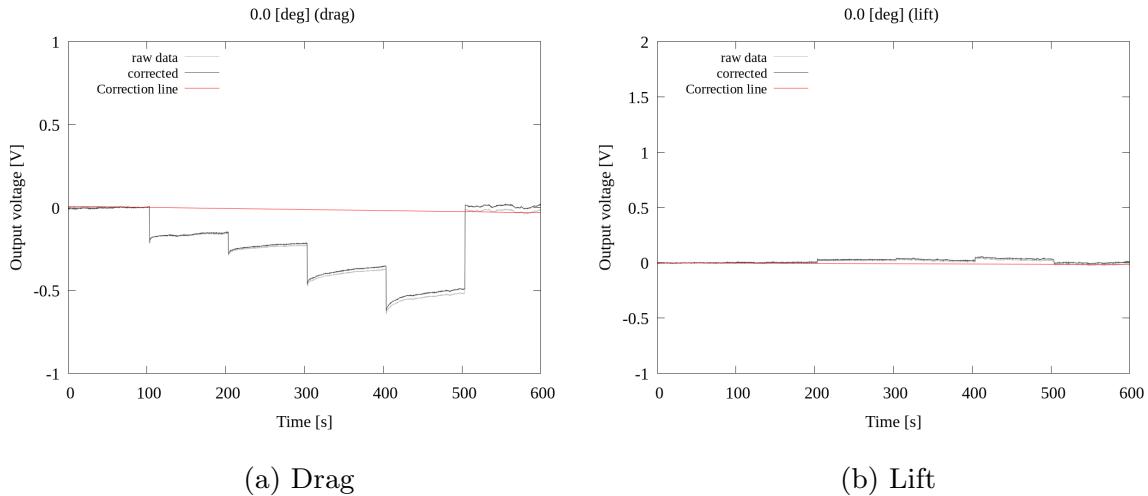


Fig. 29 Drift corrected voltage (strain sensors) : 0 [deg]

#### 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

Fig.30 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、Fig.31 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。

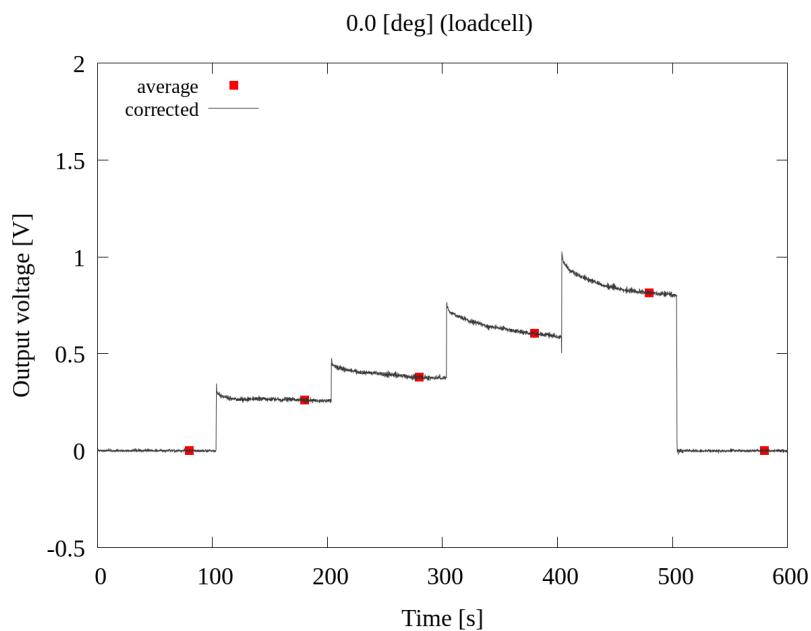


Fig. 30 Determination of average voltage (load cell) : 0 [deg]

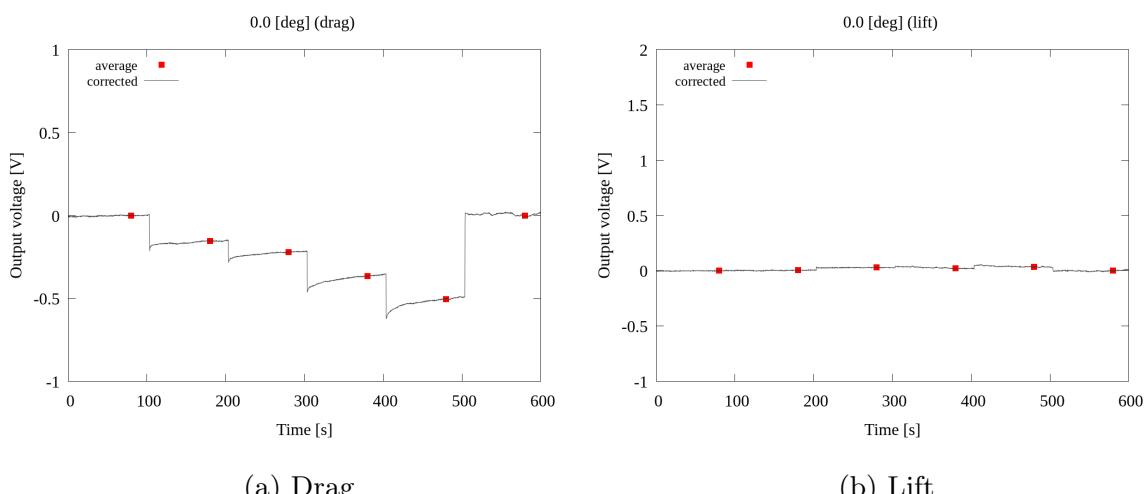


Fig. 31 Determination of average voltage (strain sensors) : 0 [deg]

### 4.3.3 出力電圧勾配の算出

Fig.32 に、4.3.1 節及び 4.3.2 節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。

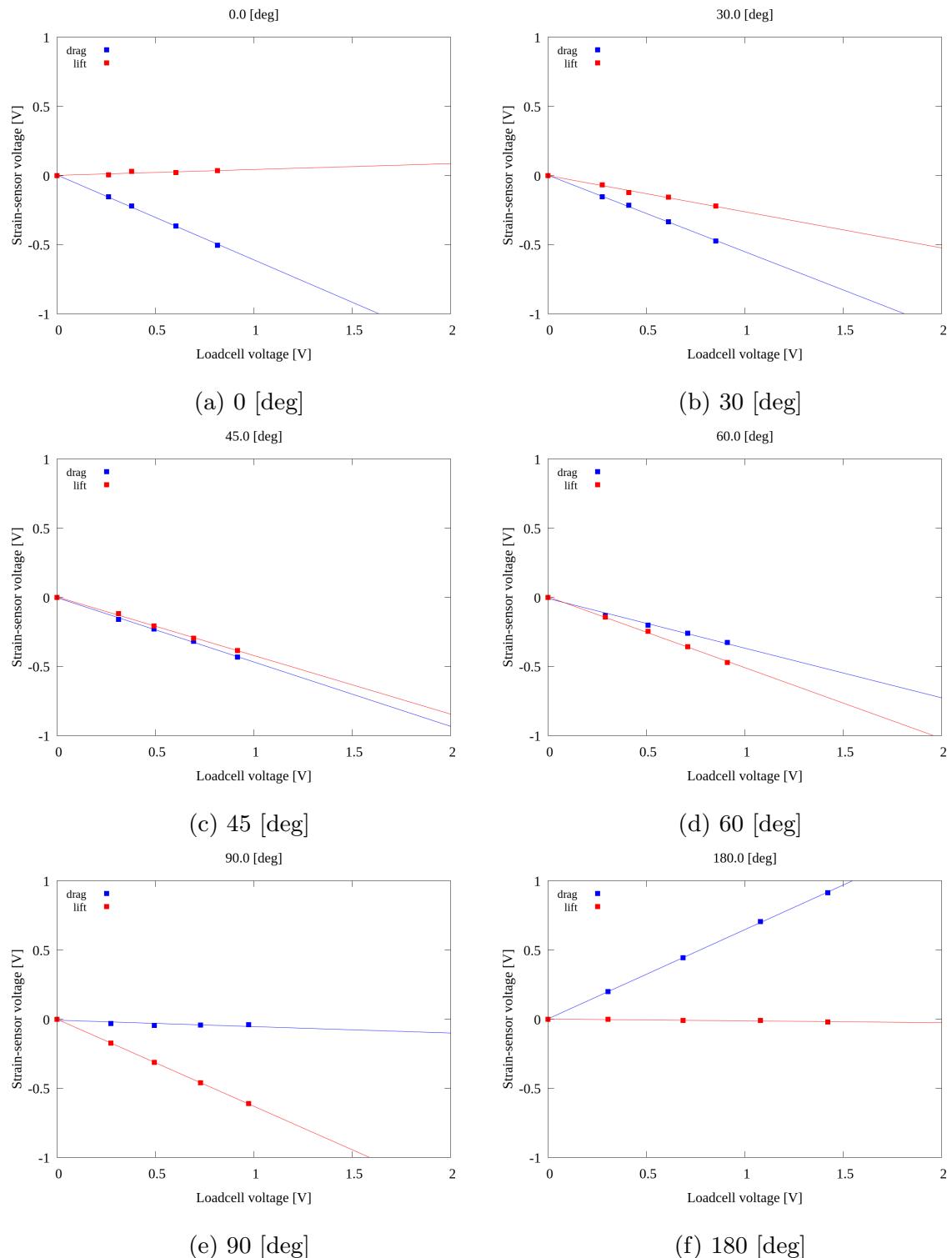
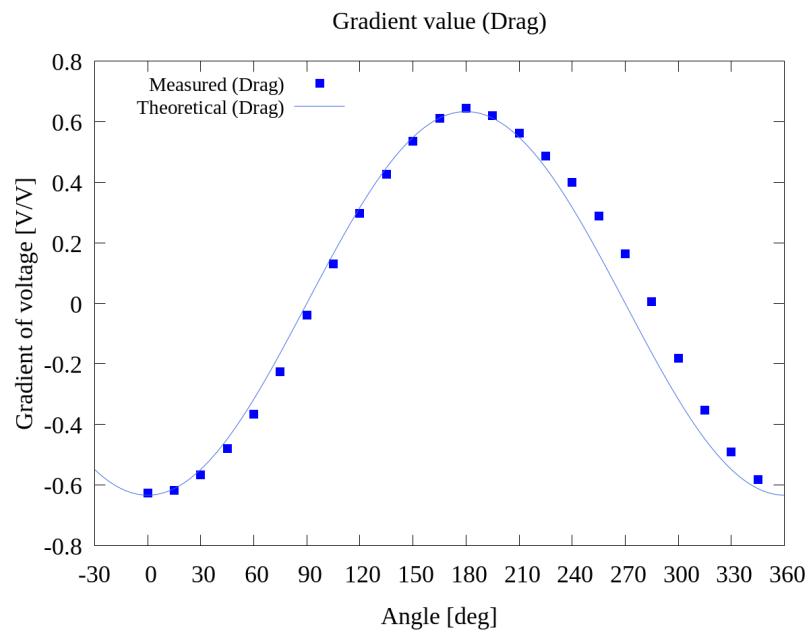
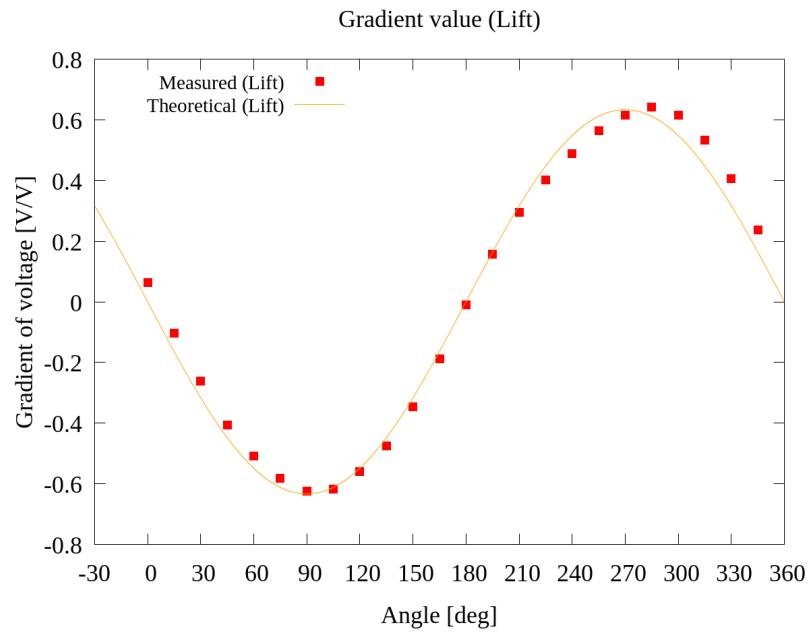


Fig. 32 Voltage gradient

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図を Fig.33 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

Fig. 33 5 Times average of voltage gradient

## 4.4 校正理論の適用とその結果

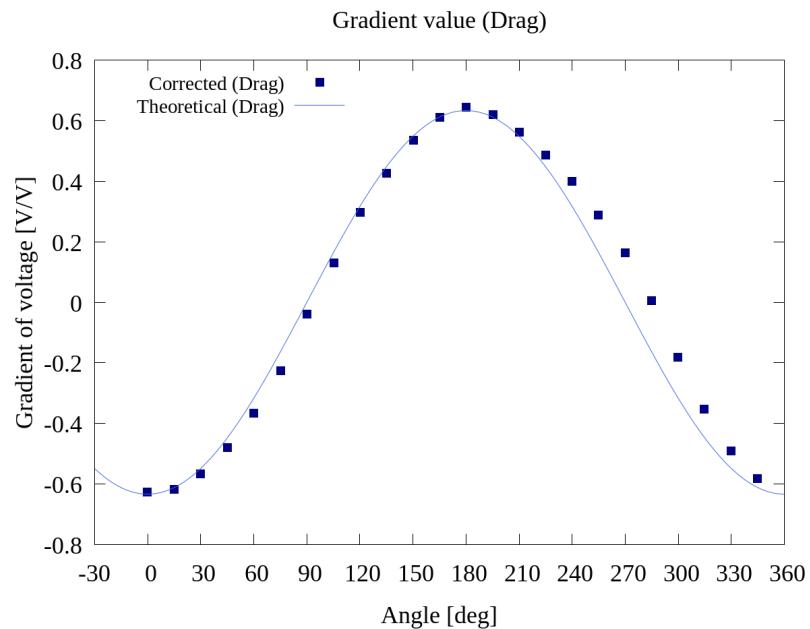
実験結果に対する補正理論を適用し、水槽座標系における出力電圧勾配への変換を行う。

### 4.4.1 補正理論 [2] の適用

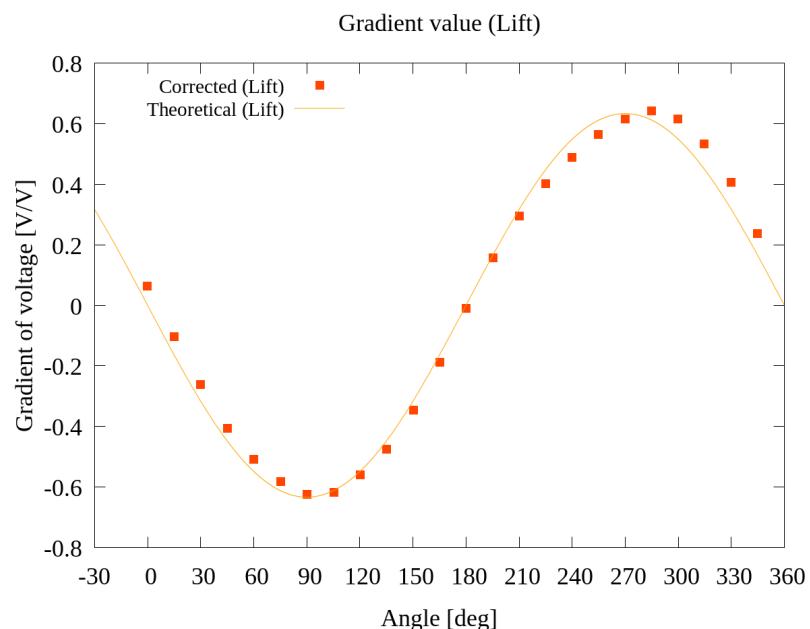
Fig.33 について、座標系のオフセットにおける補正理論式 (38), 式 (39) の適用する。その出力電圧勾配  $v_{x'1}$ ,  $v_{y'1}$  を Fig.34 に示す。なお、補正の際に用いたオフセット距離  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  は実験の際に測定した Table の数値を用いて行った。

Table 11 Offset shift amount

$\Delta x$ [mm]	$\Delta y$ [mm]
0.09	0.06



(a) Drag



(b) Lift

Fig. 34 Offset correction for Experimental result

#### 4.4.2 補正理論 [3] の適用

Fig.34について、式(45)、式(46)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 Fig.35 に示す。

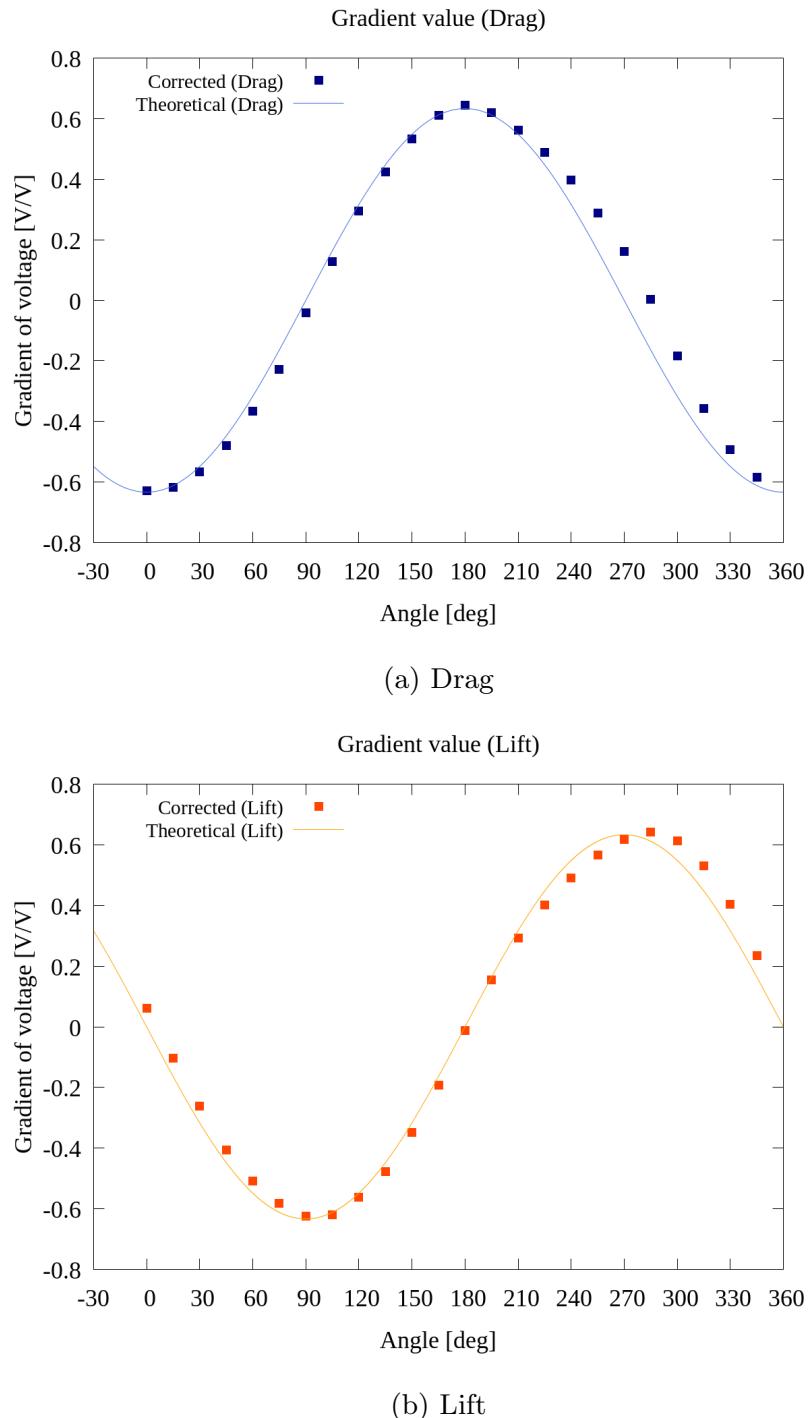


Fig. 35 Interpolation for Experimental result

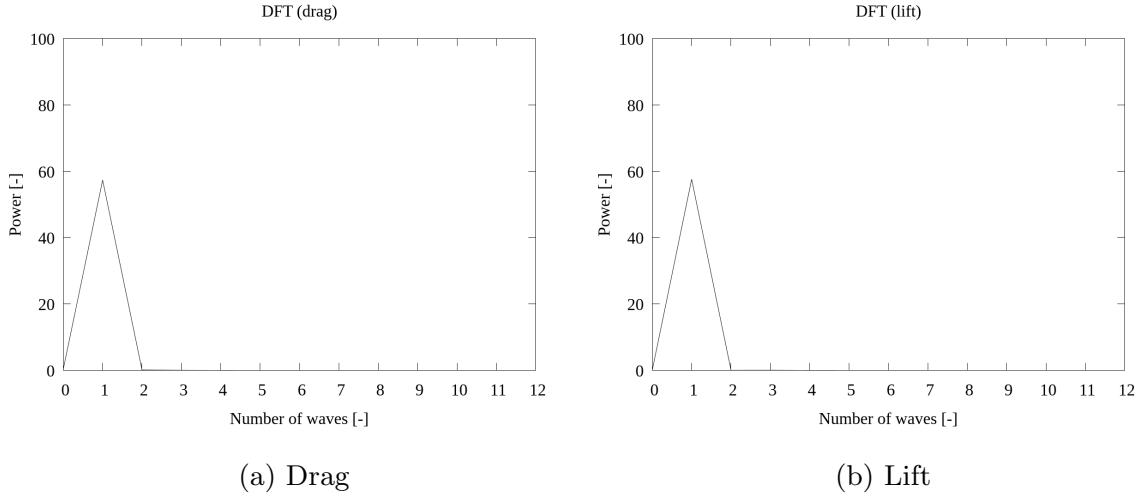


Fig. 36 DFT spectrum for Experimental result

#### 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  $\theta_x, \theta_y$  を推定するため、Fig.35 の結果に離散フーリエ変換を適用し、波数 1 の成分から  $\theta_x, \theta_y$  を算出する。ここで、その結果を Fig.36 に示す。

Fig.36 をみると、どちらもピークは波数 1 のときにあり、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、Table 12 に示す。

Table 12 Component of wave number 1

	Re	Im
Drag	-7.503	1.022
Lift	0.664	7.559

ここで、式 (5), 式 (6), 式 (7) を用いてそれぞれの回転角  $\theta_x, \theta_y$  を算出する。余弦波からの位相角をそれぞれ  $\phi_x, \phi_y$  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  $\theta_x, \theta_y$  は、以下のように表される。

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

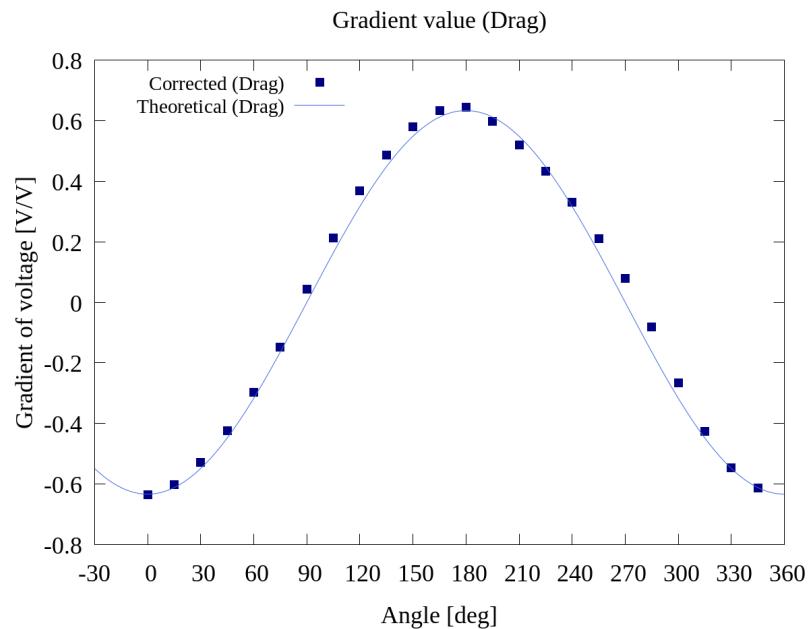
$$\theta_y = 90 - \phi_y = 5.019 \text{ [deg]} \quad (57)$$

回転角  $\theta_x, \theta_y$  の算出結果を Table 13 に示す。推定した回転角  $\theta_x, \theta_y$  を用いて Fig.35 につい

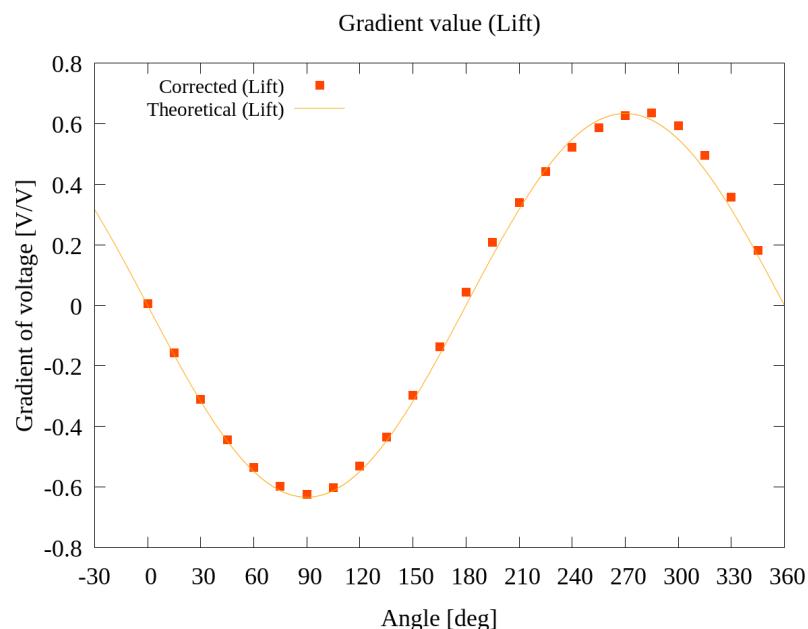
て，座標系の回転における補正理論である式 (17) , 式 (18) の適用後の出力電圧勾配  $v_x$  ,  $v_y$  を Fig.37 に示す .

Table 13 Specified rotation angle

$\theta_x$ [deg]	$\theta_y$ [deg]
7.757	5.019



(a) Drag



(b) Lift

Fig. 37 Ratation corrected gradient for Experimental result

#### 4.4.4 実験結果における正味出力電圧

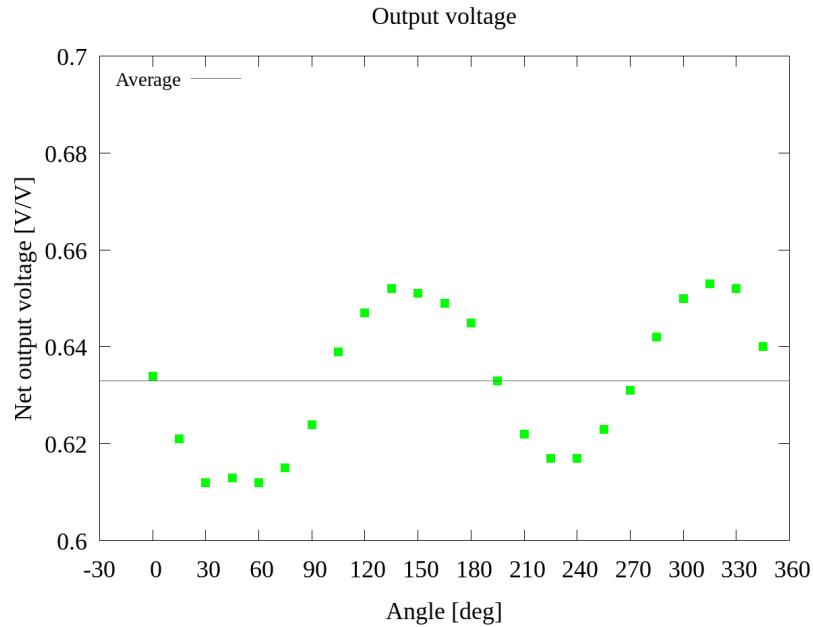


Fig. 38 Net voltage gradient for Experimental result

Fig.37 の値を用いて，式 (53) から算出される正味出力電圧勾配  $v_{net}$  の値について Fig.38 に示す。

Fig.38 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。これは、2 ゲージ法による影響であると考えられるため、今後検討を行う必要がある。また、Table 14 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

$\theta$ [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 Table 15 に示す。

Table 15 RMS error

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

Table 15 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けることができたことがわかる。

## 5. 結論

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構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なうことを試みた。

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構成した。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構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  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  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  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 、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  $\phi_s$  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、構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ことによる影響と考えられ、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

本研究を行うにあたり、大変お忙しい中、懇切丁寧に御指導くださいました指導教員の村田滋教授に深く感謝申し上げます。共同研究先である TOYO TIRES 株式会社様には、研究費用のご支援並びに担当である片岡 雄治 様、小林 諒太 様には毎月の打ち合わせの際に多くの御指導御鞭撻を賜りましたこと厚く御礼申し上げます。また、田中洋介先生には、本研究を進めるにあたり多くの助言をいただき、研究生活へ配慮していただきましたこと感謝いたします。本研究における実験装置の製作の際に、設計相談や部品加工を行っていただきました工場職員の方々に御礼申し上げます。末筆ではございますが、計測システム工学研究室の皆様には多大なご助言、ご協力いただきましたことを改めて感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 国・地方脱炭素実現会議, 地域脱炭素ロードマップ ~地方から始まる 次の時代への移行戦略~, 2021.
- [2] 福富純一郎, 中瀬敬之, スモークワイヤ法による空気流の流速測定, ターボ機械, Vol. 22, No. 10, pp. 588–595, 1994.
- [3] 朴倉斗, 松田皎, 東海正, タフト法による平板の周りの流れの可視化, 日本水産学会誌, Vol. 60, No. 2, pp. 193–199, 1994.
- [4] 利光和彦, 小川哲明, 山崎伸彦, 難波昌伸, 円弧翼および円柱周り流れ場の piv 測定, 九州大学工学集報, Vol. 72, No. 4, pp. 377–383, 1999.
- [5] 織田紀彦, 自動車の風洞試験, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 22, No. 245, pp. 283–287, 1974.
- [6] 今村太郎, 航空機の機体開発における cfd の活用, マシンエンジニアリング, Vol. 48, No. 5, pp. 618–622, 2013.
- [7] 野澤和男, 児玉良明, Cfd による船体流場の推定と設計への応用, 日本造船学会誌, Vol. 806, pp. 542–551, 1996.
- [8] 古川 裕之能村 旭浩, ティラー渦流れにおける piv 測定および cfd の比較, 可視化情報学会誌, Vol. 27, No. 2, pp. 23–24, 2007.
- [9] 満田正彦, 細川佳之, 織田剛, 解説 数値流体力学 (cfd) が設計者に開く新しい世界 (特集 21 世紀を拓くシミュレーション), R&D 神戸製鋼技報, Vol. 51, No. 3, pp. 69–73, 2001.
- [10] 田中真央, 京都工芸繊維大学大学院修士論文, 2019.
- [11] 熊谷常雄, ひずみゲージとブリッジ回路, 計測と制御, Vol. 45, No. 4, pp. 323–328, 2006.