

令和3年度1月第2週 報告書 (追記)

報告書 NO.09 - 2 2022/1/13 来代 勝胤

報告内容

1. 進捗状況
2. 校正装置と供試体のオフセット
3. テストデータの作成
4. 実験結果とテストデータの比較
5. 次週の予定

1 進捗状況

評価実験の結果に軸の回転を考慮した補正値を用いて、正味出力電圧を算出したところそのプロットした図 (Fig.1) に周期的な振動が見られた。今週は、その原因と考えられる校正装置と供試体の軸のオフセットを考慮したテストデータを作成し補正プログラムを適用した出力結果と実験結果の比較を行った。

2 校正装置と実験装置の軸のオフセット

以前の補正理論では、実験装置と校正装置の軸の回転によるズレに着目し補正を行った。しかし、そこから算出された正味出力電圧は一定値を示すことはなく、周期的な振動を示すような結果 (Fig.4) を示した。

ここで、校正装置と実験装置の軸にオフセット (Fig.5) があることがその要因の一つと考えられる。このオフセットについては、人為的な装置の設置過程では無視することが不可能な誤差である。したがって、オフセットを考慮したテストデータを作成しその結果を見ることで正味出力電圧における周期的な振動の原因・影響の大きさを調べる。

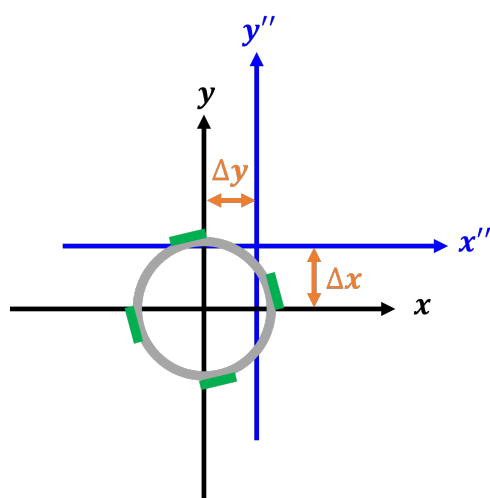


Fig.1

2.1 オフセットによる出力電圧への影響

はじめに、正規座標系 $x-y$ より、 $\Delta x, \Delta y$ だけ移動した座標系 $x''-y''$ を校正装置における座標系とする。ここで、供試体表面に任意の角度 θ から作用力 F を加える。このとき、作用力 F は、 $\Delta x, \Delta y$ のオフセットを持つため、座標系 $x''-y''$ の中心 o' を通る。すなわち、正規座標系における中心 o を通ることはない。

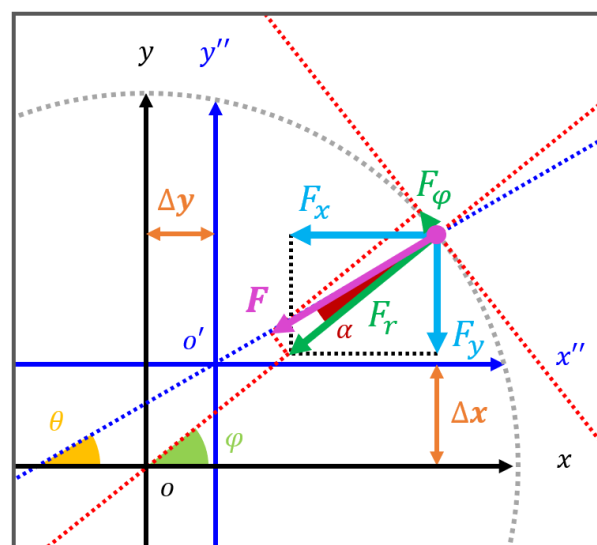


Fig.2

2.2 角度 α の算出

はじめに、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。

ここで、供試体の半径を r として、正規座標系における作用点 $F(x, y)$ の座標は角度 φ を用いて以下のように表される。

■ 正規座標系における作用点 $F(x, y)$ の座標

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \\ y &= r \sin \varphi \end{aligned}$$

このとき、 $x''-y''$ 座標系において、作用点 $F(x, y)$ は $\Delta x, \Delta y$ を用いて以下のように表される。

■ 校正装置の座標系における作用点 $F(x'', y'')$ の座標

$$\begin{aligned} x'' &= r \cos \varphi - \Delta x \\ y'' &= r \sin \varphi - \Delta y \end{aligned}$$

これより，角度 θ を用いて，供試体に加わる力 F_r の角度 φ は以下のように求められる．

■ 作用点と点 o を通る直線（赤点線）と x 軸の角度 φ

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{y''}{x''} \\ &= \frac{r \sin \varphi - \Delta y}{r \cos \varphi - \Delta x} \\ \varphi &= \theta - \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x \sin \theta - \Delta y \cos \theta}{r} \right)\end{aligned}$$

したがって，角度 α は以下のように求められる．

■ 作用点と点 o' を通る直線及び点 o を通る直線の角度 α

$$\begin{aligned}\alpha &= \theta - \varphi \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{\Delta x \sin \theta - \Delta y \cos \theta}{r} \right)\end{aligned}$$

2.3 作用力 F の F_r , F_φ への分解

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．

■ 接線方向の力 F_φ , 接戦と法線方向の力 F_r の算出

$$\begin{aligned}F_\varphi &= F \sin \alpha \\ F_r &= F \cos \alpha\end{aligned}$$

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．

■ 供試体への作用力 $F_x \cdot F_y$

$$\begin{aligned}F_x &= -F_r \cos \varphi \\ F_y &= -F_r \sin \varphi\end{aligned}$$

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．

■ 供試体へ作用するトルク T

$$\begin{aligned}T &= F_\varphi \cdot r \\ &= F \sin \alpha \cdot r\end{aligned}$$

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．

2.4 出力電圧の傾きへの補正

正規座標系 $x - y$ 座標系に対して，オフセットを持つ $x'' - y''$ 座標系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は抗力・揚力方向のそれぞれが F_r/F 倍されていると考えられることから，出力電圧の傾きについて抗力方向を V_d , 揚力方向を V_l , その補正値をそれぞれ V_x , V_y とするとき角度 α を用いて以下のような関係が成立する．

■ 出力電圧の傾きの補正值 $V'_x \cdot V'_y$

$$\begin{aligned}V'_x &= \frac{F}{F_r} V_x = \frac{1}{\cos \alpha} V_x \\ V'_y &= \frac{F}{F_r} V_y = \frac{1}{\cos \alpha} V_y\end{aligned}$$

3 テストデータの作成

以上の理論より，オフセットを考慮したテストデータを作成する．抗力方向の出力電圧の傾きを f_x , 揚力方向を f_y とすると，以下のように表される．

■ オフセットを考慮したテストデータの理論式 $f_x \cdot f_y$

$$\begin{aligned}f_x(\alpha, \varphi) &= -A \cos \alpha \cos \varphi \\ f_y(\alpha, \varphi) &= -A \cos \alpha \sin \varphi\end{aligned}$$

A は定数（実験結果より， $A = 0.64$ と設定）

今回は，以下の Table 1 についてテストデータを作成し，補正理論が有効か確かめた．その結果を以下の Fig.3 ~ fig.11 に示す．

Table 1 Simulation conditions

	Δx [mm]	Δy [mm]
case(1)	5	0
case(2)	5	5
case(3)	10	5

■ $\Delta x = 5[\text{mm}]$, $\Delta y = 0[\text{mm}]$ のとき

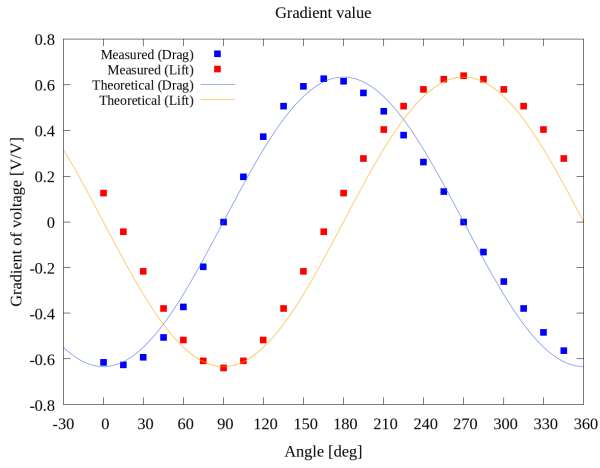


Fig.3 Summary of gradient voltage

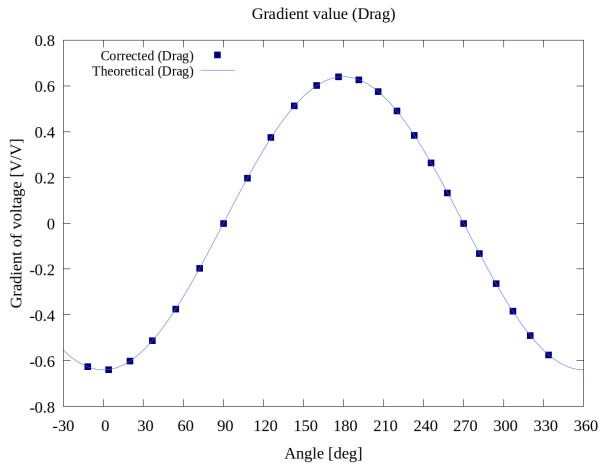


Fig.4 Corrected voltage (drag)

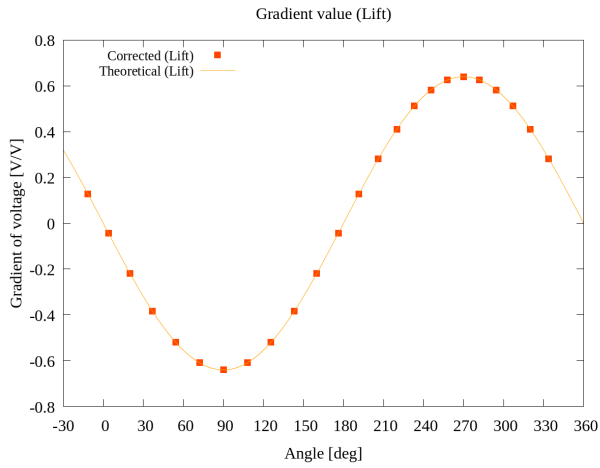


Fig.5 Corrected voltage (lift)

■ $\Delta x = 5[\text{mm}]$, $\Delta y = 5[\text{mm}]$ のとき

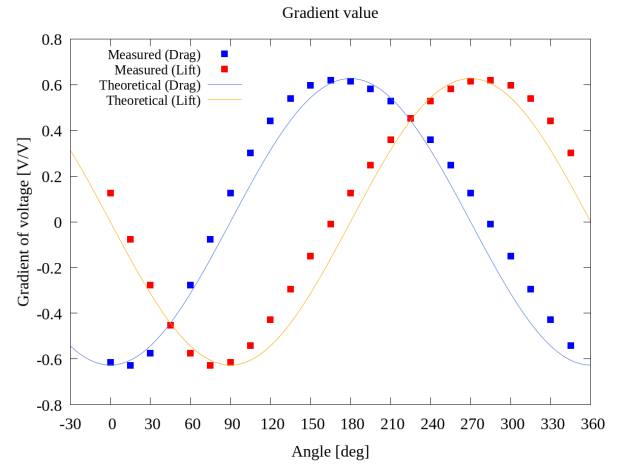


Fig.6 Summary of gradient voltage

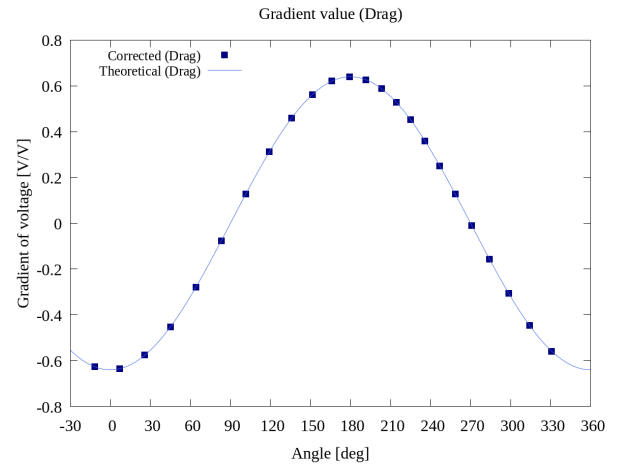


Fig.7 Corrected voltage (drag)

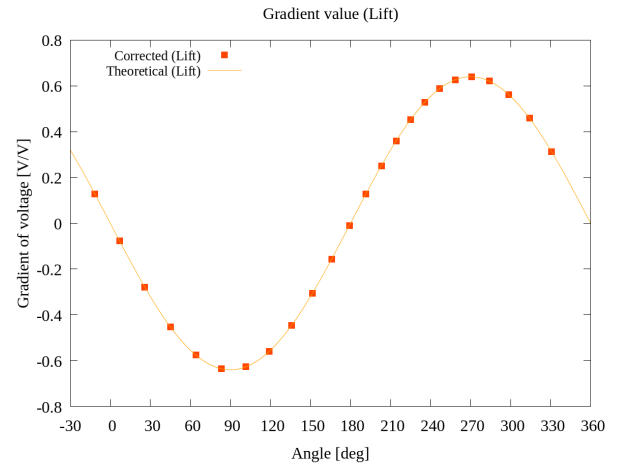


Fig.8 Corrected voltage (lift)

■ $\Delta x = 10[\text{mm}]$, $\Delta y = 5[\text{mm}]$ のとき

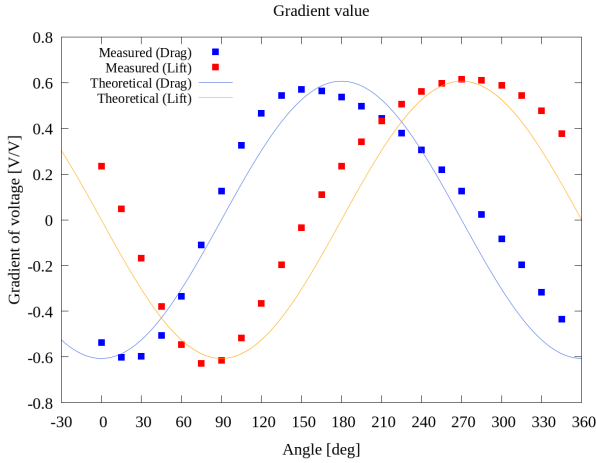


Fig.9 Summary of gradient voltage

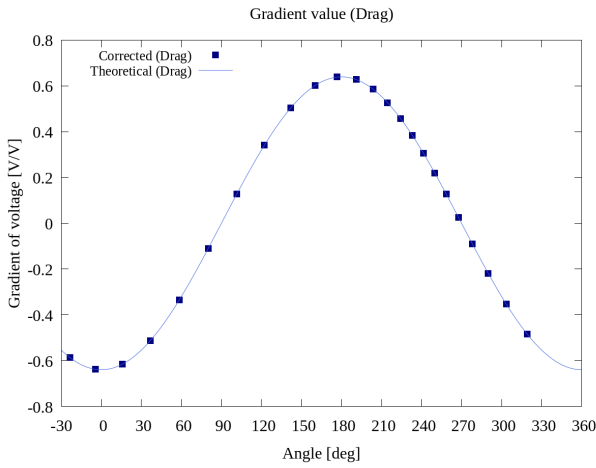


Fig.10 Corrected voltage (drag)

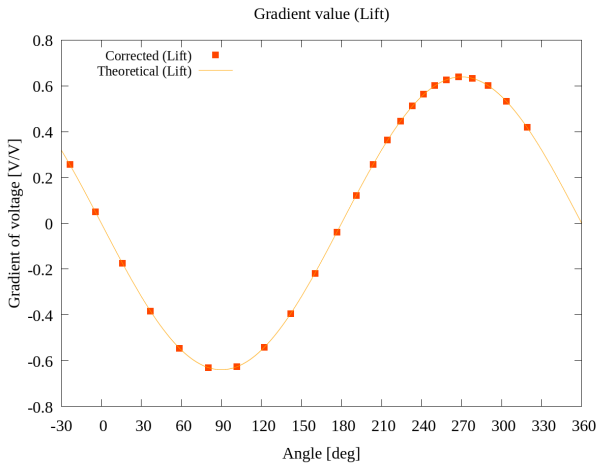


Fig.11 Corrected voltage (lift)

補正適応結果から，理論曲線に重なるように補正することはできるが，それぞれのデータの間隔が変化していることがわかる．したがって，離散フーリエ変換を適用し軸の回転角を算出することは不可能となることがわかった．

4 実験データとテストデータの比較

以前の回転を考慮した補正理論及び，今回のオフセットを考慮した補正理論から軸の回転とオフセットの複合状態にある場合のテストデータを作成した．抗力方向の出力電圧の傾きを g_x ，揚力方向を g_y ，正規座標系 $x-y$ について x 軸の回転角を θ_1 ， y 軸を θ_2 とすると以下のように表される．

■ 複合状態にある場合のテストデータの理論式 $g_x \cdot g_y$

$$g_x(\alpha, \varphi, \theta_1) = -B \cos \alpha \cos(\varphi - \theta_1)$$

$$g_y(\alpha, \varphi, \theta_2) = -B \cos \alpha \sin(\varphi - \theta_2)$$

B は定数 (実験結果より， $B = 0.64$ と設定)

その結果を以下の Fig.12～Fig.14 に示す．なお，テストデータ作成時にパラメータを以下の Table 2 のように設定した．

Table 2 Simulation conditions (2)

x 軸の回転角	θ_1	7.0 [deg]
y 軸の回転角	θ_2	5.0 [deg]
x 軸のオフセット	Δx	-1.0 [mm]
y 軸のオフセット	Δy	1.3 [mm]

ここで，それぞれの軸の回転角は，以前のプログラムからおおよその値を参照しており，オフセット値については，以前の実験結果から概算したものである．また，オフセットを考慮した際に算出される校正実験装置の押角 ϕ と実際の作用力の角度 ψ の関係性は以下になっている．

Table 3 True angle of acting force

ϕ [deg]	ψ [deg]	ϕ [deg]	ψ [deg]
0	2.3	180	177.7
15	18.0	195	192.0
30	33.5	210	206.5
45	48.7	225	221.3
60	63.7	240	236.3
75	78.5	255	251.5
90	93.0	270	267.0
105	107.3	285	282.7
120	121.4	300	298.6
135	135.5	315	314.5
150	149.5	330	330.5
165	163.6	345	346.4

4.1 テストデータ

■ 出力電圧の傾き (補正前)

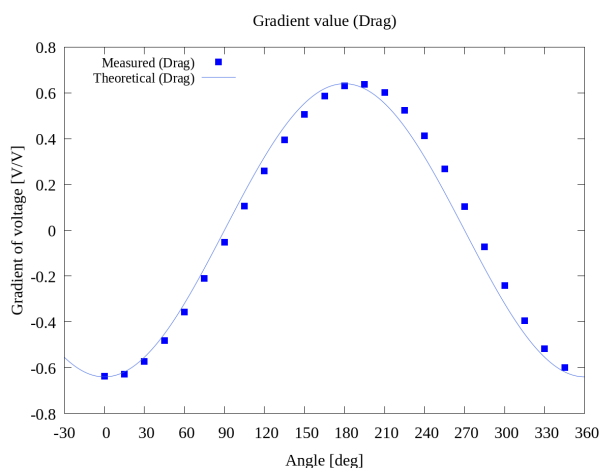


Fig.12 Summary of gradient voltage (drag)

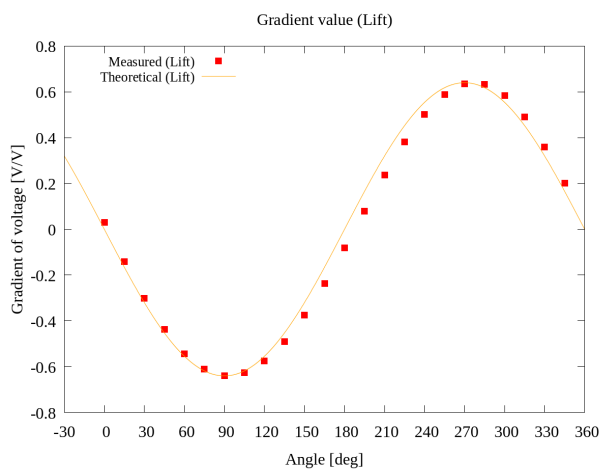


Fig.13 Summary of gradient voltage (lift)

■ 正味出力電圧 (仮)

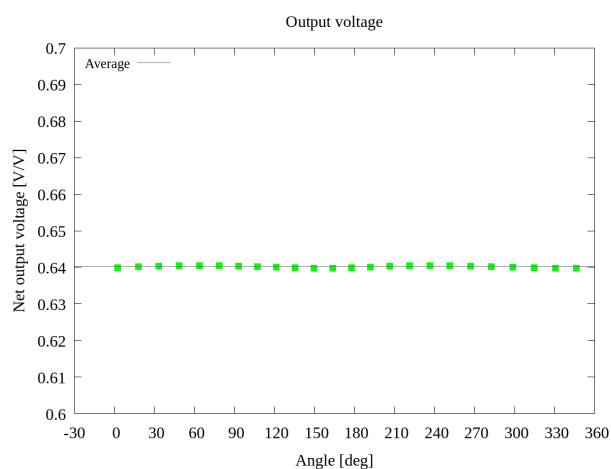


Fig.14 Summary of net voltage (Corrected)

4.2 実験結果

■ 出力電圧の傾き (補正前)

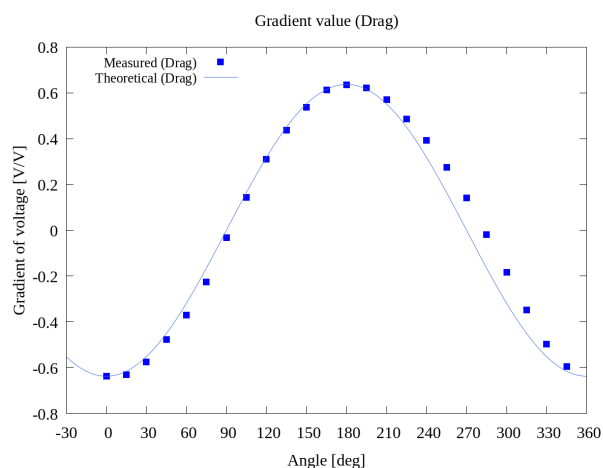


Fig.15 Summary of gradient voltage (drag)

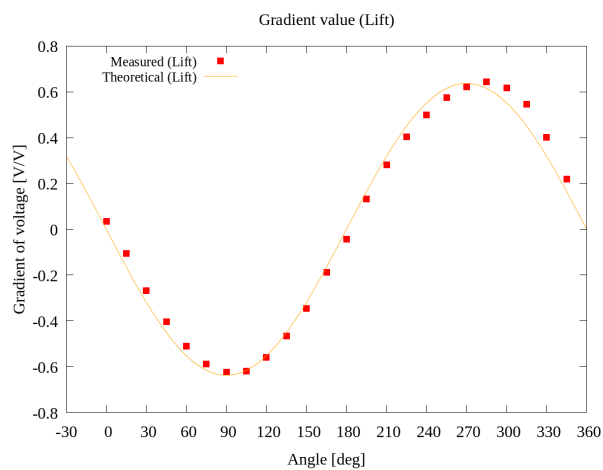


Fig.16 Summary of gradient voltage (lift)

■ 正味出力電圧 (仮)

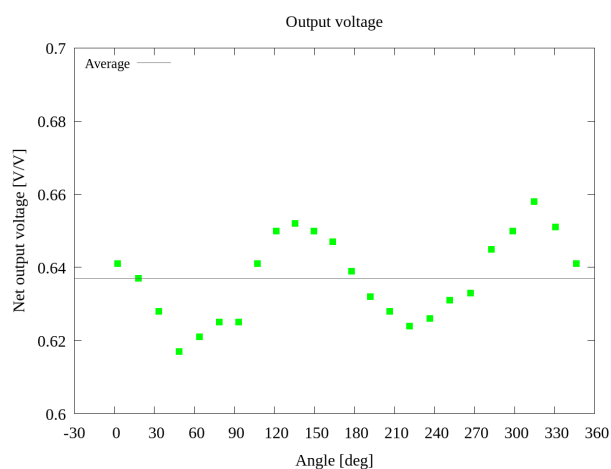


Fig.17 Summary of net voltage (Corrected)

Fig.17 をみると、補正後の正味出力電圧は周期的な変化を示しているような印象を受ける。ここで、以下の Fig.18 をみると対応関係のある Fig.14 と比較して補正前の波を打ち消す方向に補正が行われていることがわかる。すなわち、逆位相の波を足し合わせていると捉えることができる。したがって、同様の補正処理を Fig.19 に対して行った結果 Fig.17 のように変化したと考えると、妥当な結果であるといえる。

■ 正味出力電圧 (仮) (補正前)

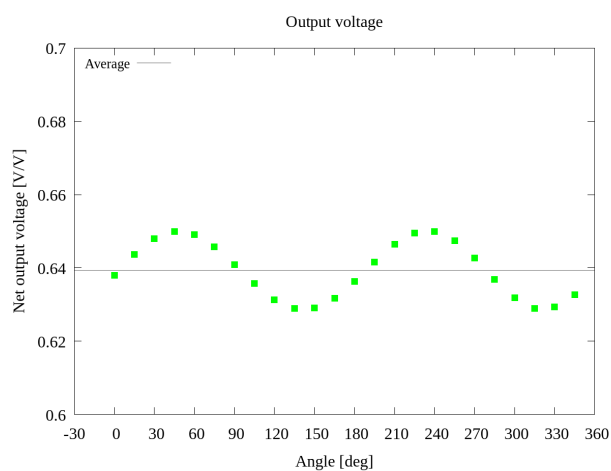


Fig.18 Test data

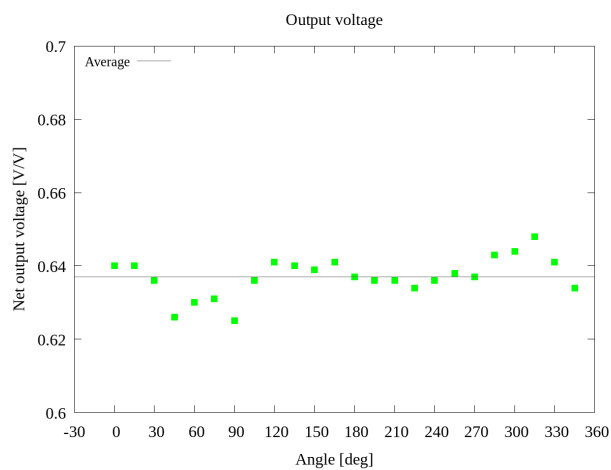


Fig.19 Experimental data