

令和3年度
卒業研究論文

気球を用いた高空風況計測システムの
実証試験

1810950008 平岡 直樹

近畿大学工学部機械工学科
流体エネルギー研究室

目次

第1章 緒言	1
1.1 背景	1
1.2 高空風況計測の現状	1
1.3 研究の目的	2
第2章 高空風況計測システムの開発	4
2.1 ウィンチの設計および組み立て	4
2.2 スリップリングの設計および製作	12
2.3 超音波風速計の性能評価および補正方法	17
2.4 気球を用いた風況計測	23
第3章 実験結果および考察	26
第4章 結言	30
参考文献	32

第1章 緒言

1.1 背景

日本は、エネルギー消費率が高いにも関わらずエネルギー源とされる石油や天然ガスに乏しい国であり、現時点でエネルギー自給率は世界全体の34位で9.6%である。同じ先進国であるノルウェーではエネルギー自給率世界1位の792.6%と比較すると非常に低い水準にある⁽¹⁾。さらに、2010年のエネルギー自給率20.3%であることから、この10年間で半分程度エネルギー自給率が落ち込んでいることが分かる。しかし、再生可能エネルギーに関しては2010年に比べ、全体の3.2%上昇しているという現状にある。このことから、再生可能エネルギーについて注目されていることがうかがえる。その再生可能エネルギーの1つとして挙げられるのが、風力発電である。風力発電において、安定したエネルギーを生み出すために安定した風速が必要不可欠であり、そのためにあらかじめ建設地の風速を調査する必要がある。現在、主流となっている調査方法は図1.1に示すような観測タワーを用いた計測である。しかし、観測タワーは頑丈であるが、建設費用が非常に高いことが課題として挙げられる。この課題を解決するため、比較的安価で風況計測を行える方法の開発が必要である。

1.2 高空風況計測の現状

1.1で述べたように、風力発電の建設予定地となる場所の風況計測は必要不可欠であり、現在はその場所の風況計測を観測タワーで行っている。千葉県銚子沖の観測タワーと実際にその場所に建てられた風力発電設備⁽²⁾を図1.1(b)に示す。観測タワーでは、60m以上を建設することが航空法の規制など様々な課題があり、法律の観点から難しく、洋上に建設する場合で1億円以上もの非常に高価なコストを要する。また、洋上の場合を考えると建設時の部品の搬送が困難な他、設置後の発電設備のメンテナンスを行う際に長時間かかるなど様々な問題を抱えている。

また、これまでに風車を搭載した高空風力発電システムやインフレーターブル繫留航空機⁽³⁾などの研究が行われてきた。これらの研究は、観測タワーに比べ製造エネルギーからの観点などから発電効果は高まる。しかし、風がない場合は昇降できない点や強風時に抗力によって気球が遠方まで流される点、自由航空機のように空気魂が擾乱時の衝撃緩衝材として機能しない場合が多い点などが課題として挙げられている⁽³⁾。



(a) 観測タワー



(b) 観測タワーと発電設備

図 1.1 洋上での風況観測の例.



図 インフレーターブル繫留航空機の試作品

1.3 研究の目的

本研究では、比較的安価で製作することのできる高空風況システムの開発を行い、測定した風速の修正を行う方法を確立することを目的とする。

目的達成のため特に以下のことについて着目をし、研究を行う。

- (1) ウインチの設計および組み立て.
- (2) 電力供給用スリッピングの設計および製作.
- (3) 気球に取り付ける風速計の性能評価.
- (4) 気球の動揺評価をするシステムの構築および風速の修正.

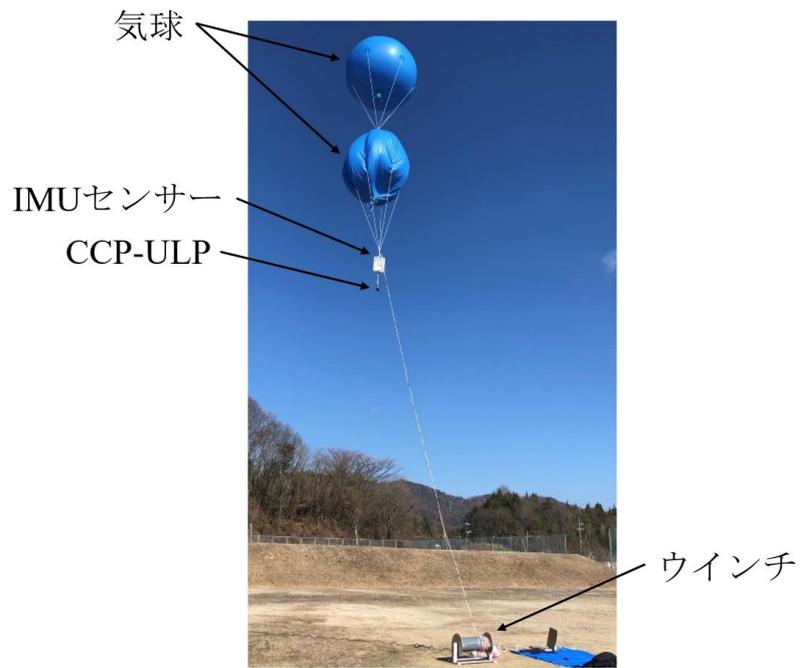


図 1.2 高空風況システム

第2章 高空風況計測システムの開発

2.1 ウインチの設計および組み立て

ウインチとは、気球を上昇・降下させるために取り付けたロープを巻き付けるための道具である。ウインチは、洋上風車のハブの高さを考慮し気球を高度 100 m 程度まで浮上させるのに必要なテザーおよび送電線を巻き付けることのできるよう設計を行った。昨年度製作したもの⁽⁴⁾から、目標高度到達時に固定するようピン留めするための機構を追加し、スタンドおよび円盤に穴をあけるよう変更した。

図 2.1 にウインチの概要図，表 2.1 にウインチに使用する備品の寸法を示す。

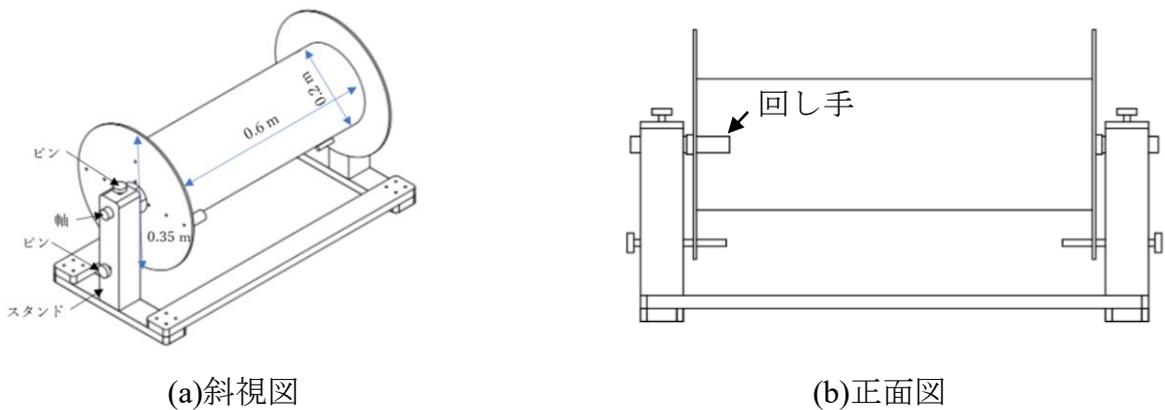


図 2.1 ウインチの概要図

表 2.1 ウインチに使用する備品の寸法.

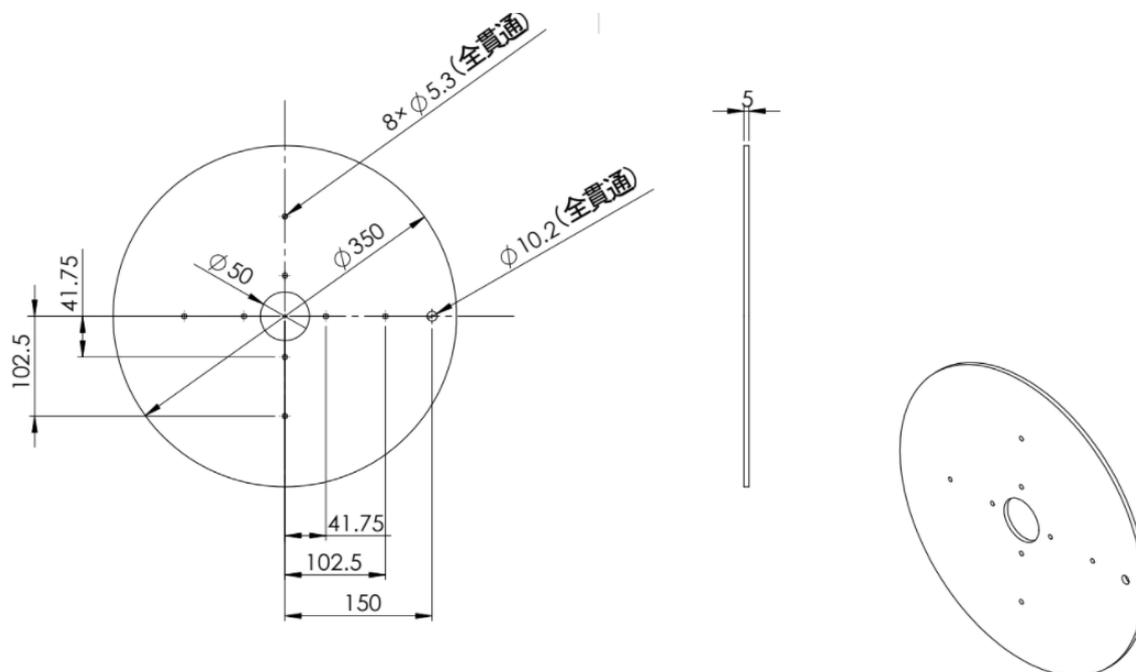
部品	寸法
テザーの直径 D_{r1}	$8.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
送電線の直径 D_{r2}	$6.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
ベアリングの直径	内径： $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
※選定方法については別途記述する	外径： $7.2 \times 10^{-2} \text{ m}$

表 2.2 ウインチの各仕様

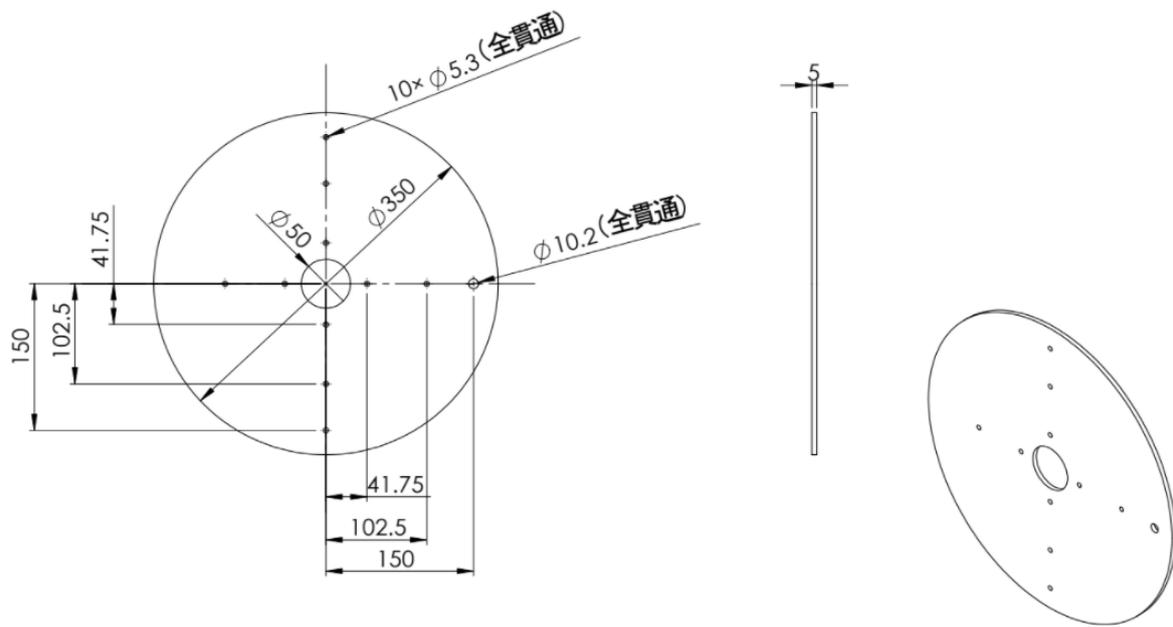
部品名称	重量 (kg)	個数	材質
円盤	1.27	2	アルミニウム
回し手	0.27	2	アルミニウム
筒 (大)	5.95	1	塩化ビニル
筒 (小)	4.85	1	アルミニウム
軸	1.50	1	アルミニウム
スタンド	2.89	2	アルミニウム
土台 (a)	1.22	2	アルミニウム
土台 (b)	2.68	2	アルミニウム
合計	28.96		

ウインチの設計図面は全て CAD を使用して作成した。表 2.2 で示した部品の各図面を以下に示す。

- ・円盤：図 2.2 に円盤の設計図を示す。図 2.1 に示した通りウインチに使用した円盤は通常のもの他に、後述する回し手の取り付け穴を施したものの 2 種類が存在する。材料は共にアルミニウムを使用し、重量は約 1.27 kg である。



(a)回し手なし



(b)回し手あり

図 2.2 円盤

- ・回し手：図 2.3 に回し手の設計図を示す。回し手は、気球を降下させる際にテザーや送電線をウインチに巻き付けやすくするための機構である。材料はアルミニウムを使用し、重量は約 0.27 kg である。



図 2.3 回し手

- ・筒（大）：図 2.4 に筒（大）の設計図を示す。ウインチに使用されている筒は大・小の 2 種類存在しており、ここでは外側の筒（ドラム）について示す。筒（大）は、テザーや送電線を巻き付ける部品である。また、片側の一部に送電線を外部に出すための穴を施した。材料は塩化ビニルパイプを使用し、重量は約 5.95 kg である。



図 2.4 筒 (大)

- 筒 (小) : 図 2.5 に筒 (小) の設計図を示す. 筒 (小) は, 筒内部にベアリングを固定するための部品である. そのため, ベアリングの規格に沿って内径を決定した. 筒 (大) と同様, 片側の一部に送電線を外部に出すための穴を施した. 材料はアルミニウムを使用し, 重量は約 4.85 kg である.

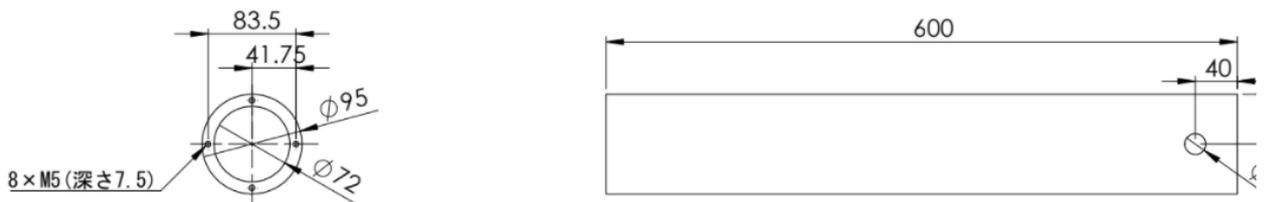


図 2.5 筒 (小)

- 軸 : 図 2.6 に軸の設計図を示す. 軸は, スリップリングとベアリングを通し, それらをウインチ内部に設置するための部品である. 筒 (小) と同様に, ベアリングの規格に沿って外径を決定した. 材料はアルミニウムを使用し, 重量は約 1.5 kg である.

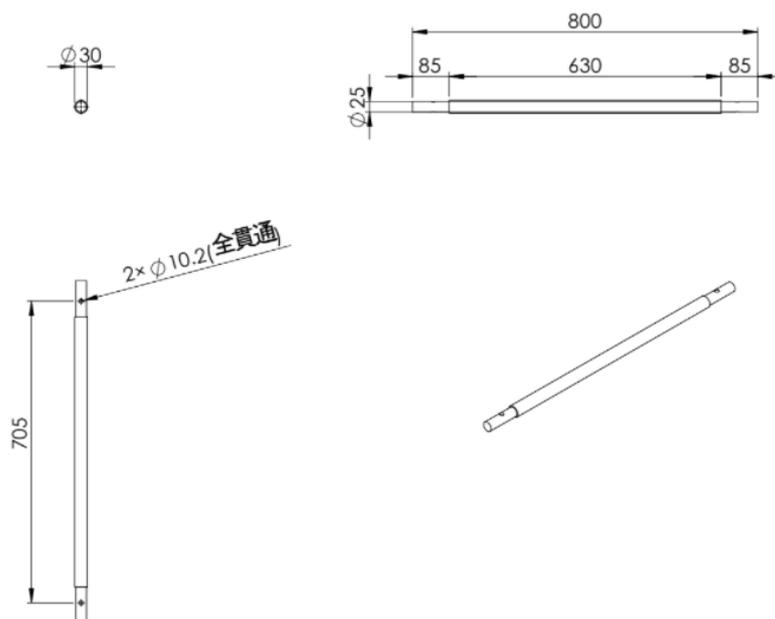


図 2.6 軸

- ・スタンド：図 2.7 にスタンドの設計図を示す。スタンドは、スタンド上部に設置した穴に軸を通し、ウインチを支えるための部品である。左右に各 1 個ずつ配置する。材料はアルミニウムを使用し、総重量は約 5.78 kg である。

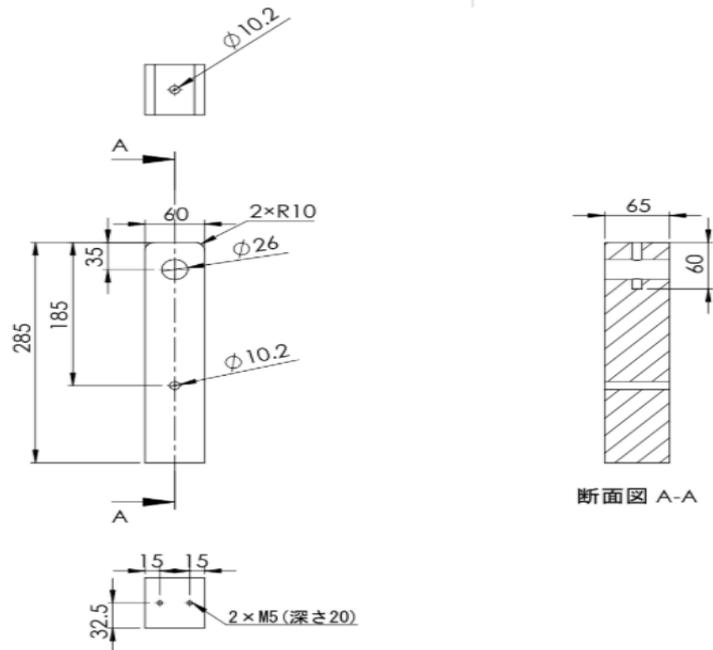
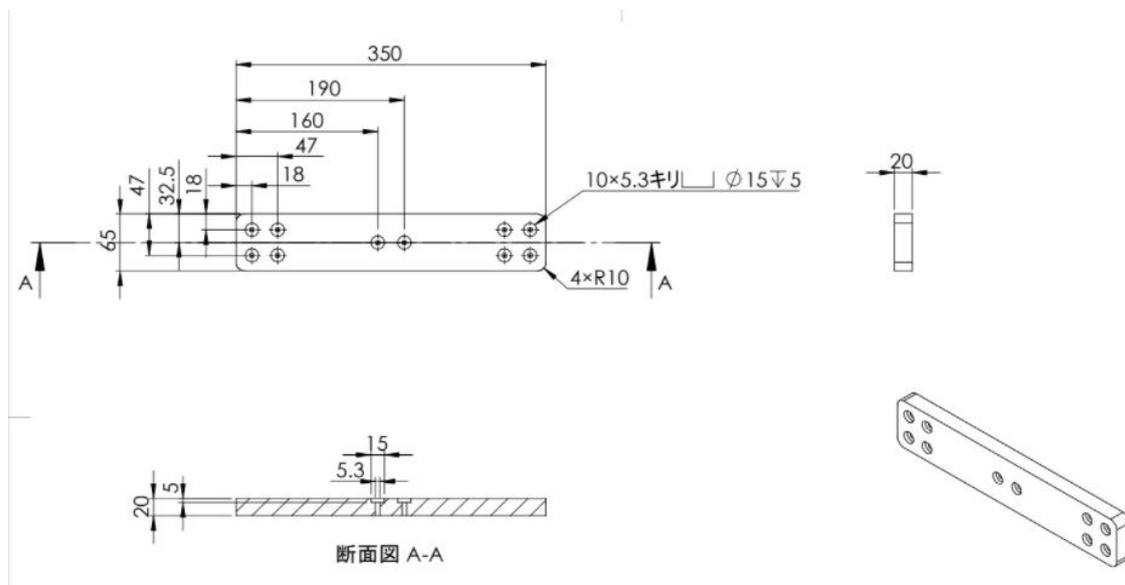
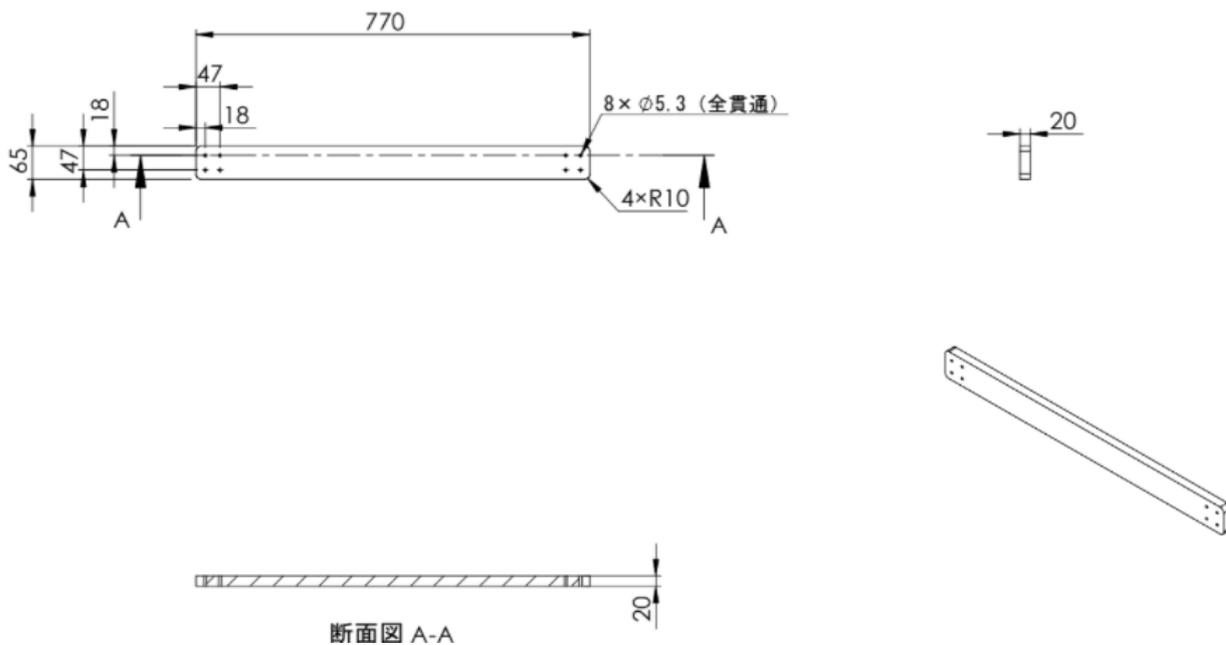


図 2.7 スタンド

- ・土台：図 2.8 に土台の設計図を示す。土台は、スタンドを固定することで地面に設置することができる部品である。また、地面にペグで固定するために穴を施している。材料はアルミニウムを使用し、総重量は約 7.8 kg である。



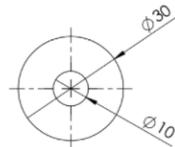
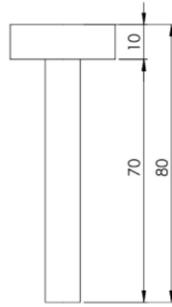
(a)土台 : a



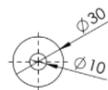
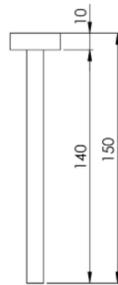
(b)土台 : b

図 2.8 土台

- ピン : 図 2.9 にピンの設計図を示す. 気球を目標の高度まで上げたあと, 高度を保つためにスタンドと円盤に穴を施し, その穴にピンを通すことで固定させる機構にした. また, 軸とスタンドにも気球の上昇・下降の際に軸が回転しないよう固定するピンを施した.



(a) スタンド-円盤



(b) スタンド-軸

図 2.9 ピン

次に、ベアリングの選定方法について以下に示す。本研究においてベアリングは、深溝玉軸受を軸部分に 2 個使用した。深溝玉軸受は、内輪・外輪とも軌道が円弧状の深い溝になっており、ラジアル荷重、両方向のアキシアル荷重、またはそれらの組合せである合成荷重を受けることができ、高速回転に適している。

昨年度製作されたウインチは、総重量 12.6 kg、軸直径 22 mm、軸全長 600 mm、ベアリングは NTN 社製(62/22LLU)⁽⁵⁾ を使用して作られており、課題点として軸のしなりが挙げられた。再度、検討を行う必要があることから昨年度のウインチの実際のたわみ量を算出し、課題点を明らかにしたのちに、今回用いる軸の直径を設定し、ベアリングを決定した。今回製作したウインチにおける軸にかかる重量は円盤、回し手、筒 (大)、筒 (小) であり、これらの総重量は約 13.9 kg である。

軸直径 $d=22$ mm、素材がステンレスの場合の断面二次モーメント I は、

$$I = \frac{\pi}{64}d^4 \quad (2.1)$$

で求めることができる。これらに代入して計算を行うと $I = 1.15 \times 10^4 \text{ mm}^4$ が求まった。次に、単純支持梁（中央集中荷重）のたわみを求める公式を用いて、たわみ量の計算を行った。たわみ量 y は、以下の式を用いて求めることができる。

ステンレスのヤング率 E は $E = 200 \text{ kN/mm}^2$ とする。

$$y = \frac{Pl^3}{48EI^3} \quad (2.2)$$

式(1)で求めた I を用いて計算を行うと、 $y = 0.242 \text{ mm}$ が求められる。

この数値が 0 に近いほど理想とされている。これらの結果から、 $d=22 \text{ mm}$ の場合たわみ量が大きいと判断したので、軸直径を 25 mm 、 30 mm にして計算を行った。ただし、本研究は全体的にウインチがサイズアップしており、軸全長を 800 mm に変更した。

$d=22 \text{ mm}$ のときと同様に計算を行った結果、 $d=25 \text{ mm}$ のとき、たわみ量 $y = 0.379 \text{ mm}$ 、 $d=30 \text{ mm}$ のとき、たわみ量 $y = 0.183 \text{ mm}$ となった。この結果から、軸直径は 30 mm に設定し、ベアリングは、静止荷重が 133 N 以上許容できる内径： 30 mm 、外径： 72 mm の NTN 社製(6306LLU) ⁽⁵⁾ に決定した。ベアリングの規格を表 2.3 に示す。

表 2.3 採用したベアリングの規格

製品番号	内径：d [mm]	外径：D [mm]	幅：B [mm]	動定格荷重:Cr [N]
6306LLU	30	72	19	23000

最後に、ウインチの組み立て手順について示す。

使用した材料および組み立て手順は以下の通りである。

1. 使用した材料

- ・スリップリング ・ベアリング×2 個・円盤（回し手あり）円盤（回し手なし）
- ・回し手・軸・筒（大）・筒（小）・スタンド×2 個・土台：a×2 個
- ・土台：b×2 個・ピン（スタンド-円盤）×2 個・ピン（スタンド-軸）×2 個
- ・ねじ×24 個

2. 組み立て手順

- ① 軸となるステンレス棒に作成したスリップリングを取り付けた。
- ② ドラム軸にベアリングを通す位置にあらかじめ印をつけ、ベアリングをハンマーで圧入した。
- ③ 円盤（回し手あり）に筒（大）、筒（小）、回し手をねじで固定し、①で組み立てた軸を通した。
- ④ ③の円盤（回し手あり）とは反対側に円盤（回し手なし）をねじで固定した。
- ⑤ スタンド（2 個）にベアリングをそれぞれ圧入した。
- ⑥ ④と土台：a（2 個）をねじで固定した。

- ⑦ 土台 : b (2 個) に⑤で組み立てた内の 1 個をねじで固定し, ③で組み立てた部品の軸部分と土台 : a にベアリングを通した.
- ⑧ ⑥に, もう 1 個の⑤に取り付けたベアリングを通した後, ねじで固定した.
- ⑨ 完成



図 2.10 完成したウインチ

2.2 スリップリングの設計および製作

スリップリングとは, 回転体に外部から電力・電気信号を伝達することができる回転コネクタのことである. 回転体に配置された金属製リングとブラシを介して電力や信号を伝達する機能を持っており, 本研究において, 送電線はテザーと一緒に上げ下げできるが, ウインチが回転するため, 外部電源と気球に取り付けたセンサーや風速計を繋ぐときにスリップリングが必要となる.

図 2.11⁽⁶⁾にスリップリングの概略図を示す. スリップリングを設計・開発するにあたり, 昨年度製作したスリップリングを図 2.12 に示し, 課題箇所に識別番号を図中に記した. また, 昨年度挙げられた課題点とその解決策を表 2.4 に示す.

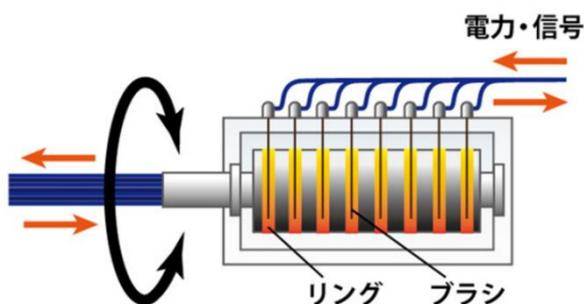


図 2.11 スリップリングの概略図⁽⁶⁾

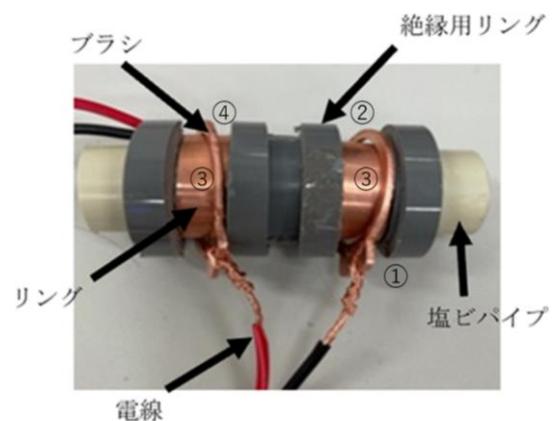


図 2.12 昨年度のスリップリング

表 2.4 課題点と解決策

	課題	解決策
①	ブラシ上部が大きく、ドラム軸と銅線と接触し、短絡する恐れがあった。	ドラム軸の外径を大きくすることでブラシ上に銅線との接点を設けたことにより、最小直径で接続可能になった。
②	リングとブラシの精度が悪く、電気が瞬断する恐れがあった。	機械工作室の機材を使用することで設計通りに製作することが可能になった。
③	ブラシの下穴の大きさが異なり、ブラシを軸穴に入れた際に同時にブラシを回すことができなかった。	
④	リングを塩化ビニルパイプに接着する際、絶縁体のアロンアルファを使用していたことから、通電が不安定であった。	銅リングを一体型にすることで接着剤を使用することなく製作することが可能になった。

表 2.4 を基に以下の手順でスリップリングの製作を行った。

・スリップリングの製作手順

(1) 塩化ビニルパイプの選定

ウインチの筒内部における軸の直径は 30 mm であることから、一番近い規格品である呼び径 30 (外径 : 38 mm, 内径 : 31mm) を採用した。
採用した塩化ビニルパイプを図 2.13 に示す。



図 2.13 塩化ビニルパイプ

(2) 銅リングおよび銅ブラシの作成

(1)で選定した塩化ビニルパイプの規格を基に銅リングの設計を行った。内径 : 38.5 mm, 外径 : 50 mm とし、内径と外径のおおよそ中間である直径 44 mm の位置に送電線と銅リングを接続する穴を設置した。また、銅リングはスリップリング全体で 4 個取り付けるため、それらに接続した送電線を通す穴を上下に設置した。

次に、銅リングの外径を基に銅ブラシの設計を行った。内径 : 51mm, 外径 : 65mm とし、内径と外径のおおよそ中間である直径 56mm の位置に送電線と銅ブラシを接続する穴を設置した。

銅リングを図 2.14, 銅ブラシを図 2.15 に示す。

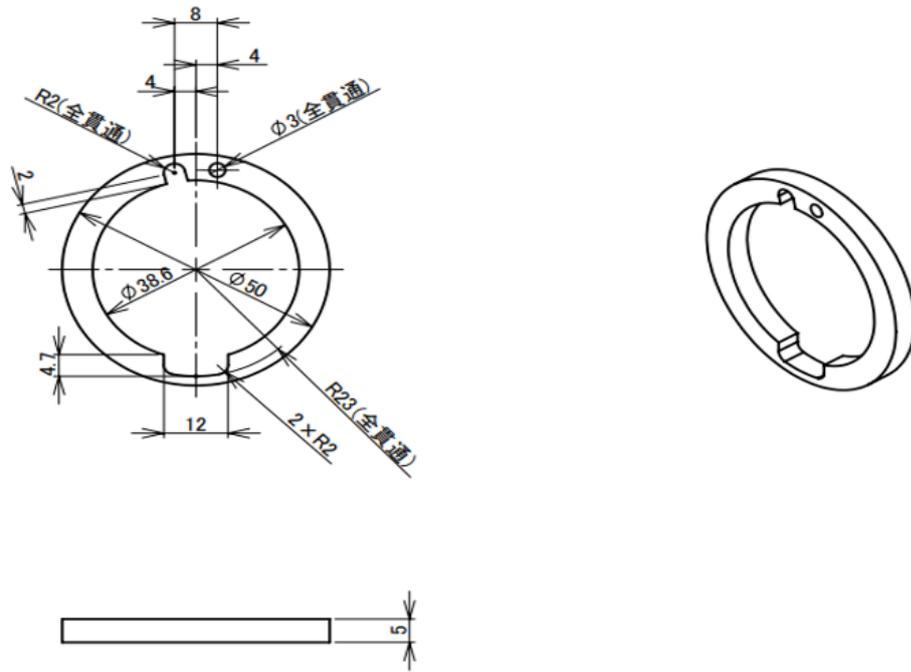


図 2.14 銅リング

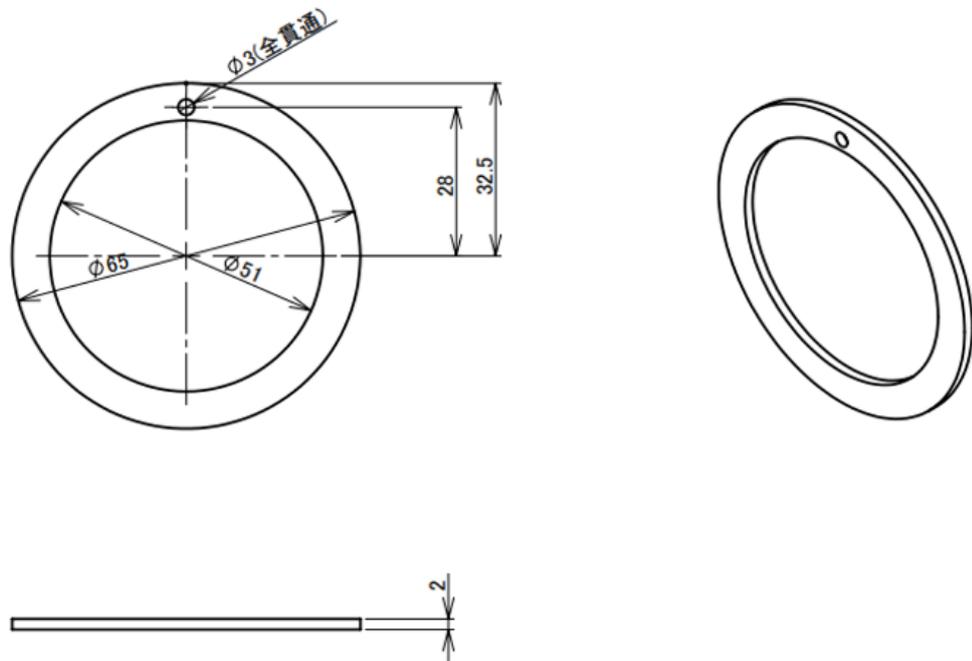


図 2.15 銅ブラシ

(3) 塩化ビニルパイプの切断

隣り合う銅リングと銅ブラシが接すると短絡する恐れがあるため、銅リングと銅リングの間に塩化ビニルパイプを挟む必要がある。銅ブラシも接してはいけないのである程度の軸直径を確保しなければならず、本研究においては 2 つの異なるサイズの塩化ビニルパイプを切断した。

切断した塩化ビニルパイプを図 2.16 に示す。



図 2.16 切断した塩化ビニルパイプ

(4) 送電線と(2)の接着

接着後の銅リングを図 2.17、銅ブラシを図 2.18 に示す。外部電源から銅リング、銅ブラシから気球へと電気を流すために銅リングと銅ブラシに送電線をはんだ付けした。ある程度の強度が必要になるため、接着箇所は送電線同士の他に、送電線とそれを通す穴も接着した。



図 2.17 銅リング



図 2.18 銅ブラシ

(5) 組み合わせ

(3), (4)を、アロンアルファを用いて組み合わせた。

完成したスリップリングを図 2.19，通電確認の様子を図 2.20 に示す.

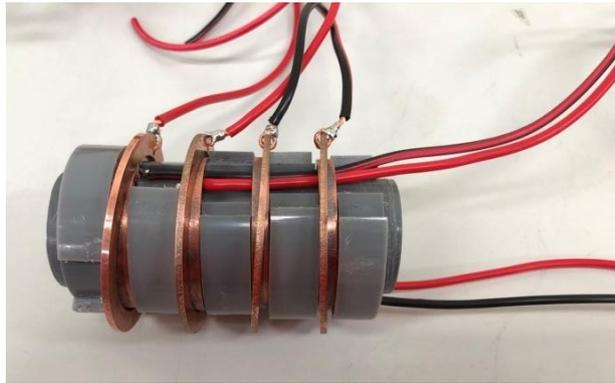


図 2.19 スリップリング



図 2.20 通電確認

2.3 超音波風速計の性能評価および補正方法

本研究では、風速計として小型超音波風速計（Calypso Instruments 社製 CCP-ULP）を使用した。CCP-ULP とノートパソコンを接続させるために、CCP-ULP をコンバータ（DSD TECH 社製 SH-U10 USB to RS485）に接続した。その様子を図 2.21 に示す。また、CCP-ULP の信号線の種類について表 2.5 に示す。

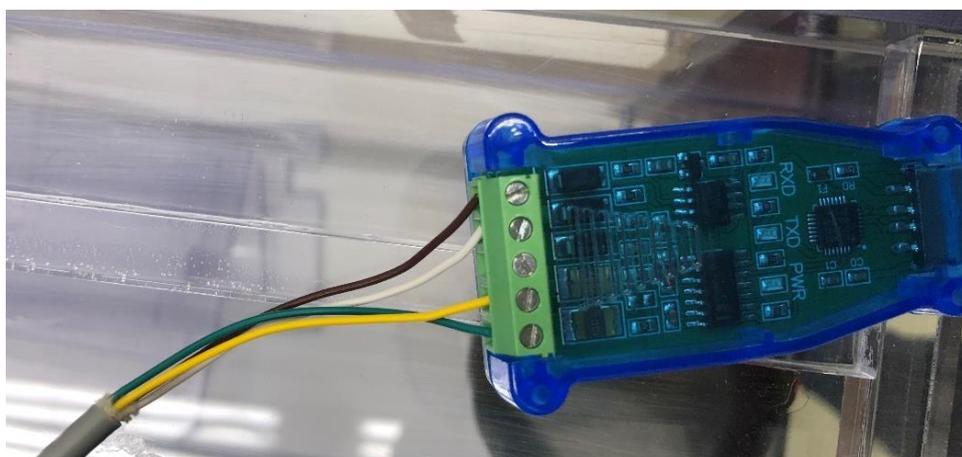


図 2.21 CCP-ULP と SH-U10 USB to RS485

また、CCP-ULP の信号線の種類について表 2.5 に示す。

表 2.5 CCP-ULP の線の種類

CCP-ULP の信号線の色	コンバータの接続端子
茶色	POWER
白色	GROUND
黄色	B
緑色	A

※電源については、3.3VDC～24VDC まで可能

CCP-ULP の計測範囲は、1.0～40 m/s、計測精度は 10 m/s 時に 1%⁽⁷⁾である。また、サンプリング周波数は 1 Hz に設定し、風速測定を行った。

風速測定については、CLoad を用いて行った。CLoad とは、CYG-81000 および CYG-86000 応用無償ソフトの、CYG-81000 および CYG-86000 などの RS232 通信出力機器のデータを保存するために開発された簡易シリアルデータ保存ソフトである。図 2.22 に CLoad を CCP-ULP に接続した際の画面を示す。また、以下に CLoad の設定の手順を示す。

・ CLoad 設定方法⁽⁷⁾

- (1) CLoad を起動する。
- (2) CLoad のウィンドウが開かれたら、“設定”をクリックする。
- (3) Setting ウィンドウが開かれたら、以下の設定を行う。
 - ① 使用する COM ポートを選択する。

- ② 対象機器に設定されている通信速度、ビット長、パリティ、ストップビットを選択する。(CCP-ULP の設定)
 - ③ 必要に応じてフロー制御を選択する。
 - ④ “参照” をクリックして、データファイルの保存先を指定する。
 - ⑤ 保存ファイルのファイル区切り時刻を選択する。
 - ⑥ 保存データファイル名のイニシャル文字を設定する。
 - ⑦ 保存データ内のタイムスタンプ形式を選択する。
 - ⑧ 保存データ内のタイムスタンプにおける秒の有効桁数を選択する。
 - ⑨ 受信データの最大長、タイムアウトを設定する。
- (4) “保存” をクリックする。
 - (5) 対象機器のデータデリミタを選択する。
 - (6) 1 データファイルあたりの保存時間を選択する。
 - (7) “接続” をクリックし、通信を開始する。
 - (8) “保存開始” をクリックし、保存を開始する。

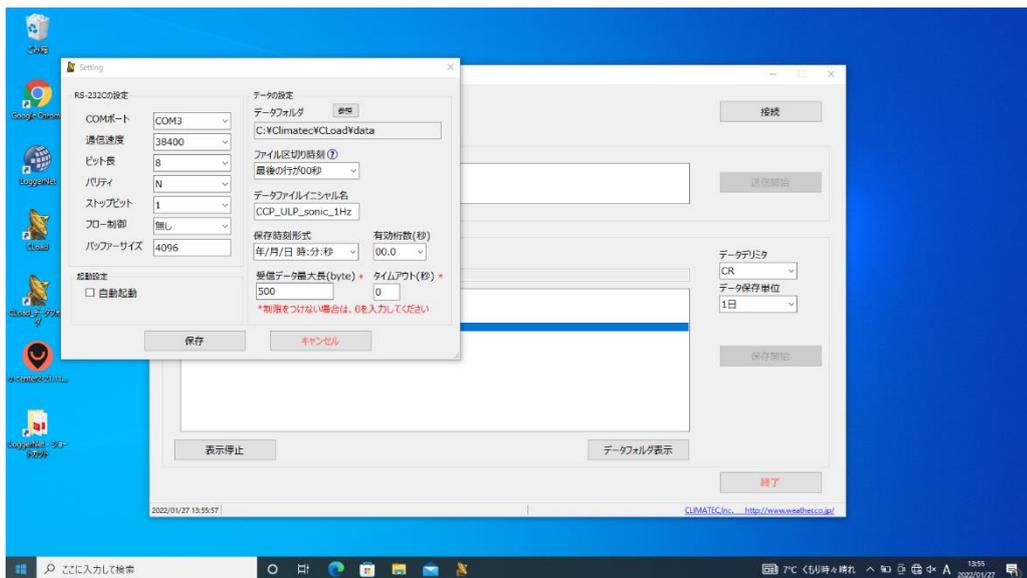
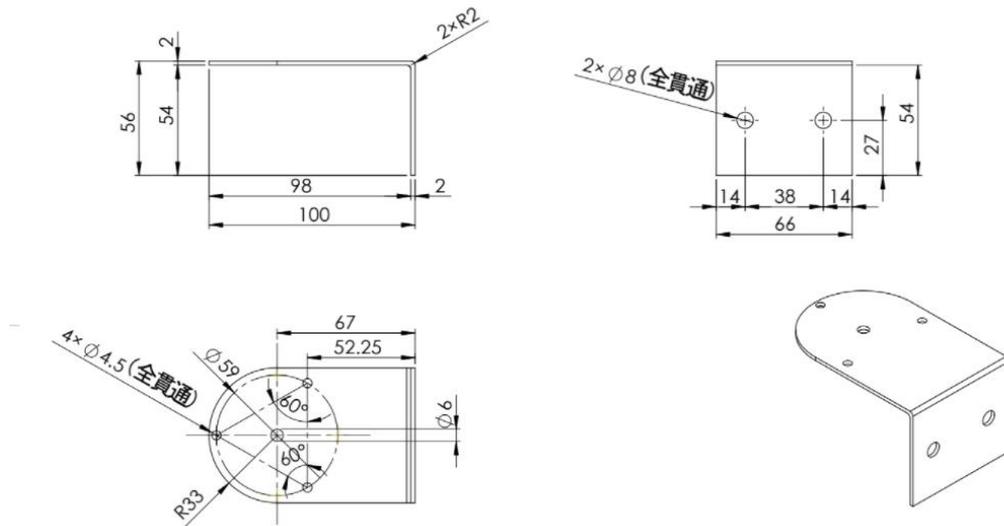


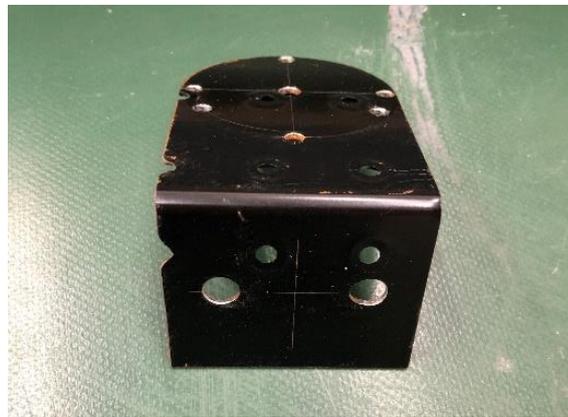
図 2.22 データ収集ソフト CLoad を CCP-ULP に接続した際の設定画面。

また、CCP-ULP は気球に取り付けるために固定棒（塩化ビニルパイプ）に固定する必要がある。そのため、固定土台の設計を行った。固定土台を図 2.23 に示す。

製作した土台と CCP-ULP は M4 の六角穴付きボルトを用いて固定し、その面に対して垂直面に、土台を塩化ビニルパイプに固定するための穴を 2 つ設置し、U ボルトで固定した。U ボルトの規格上、塩化ビニルパイプをそのまま使用することができなかつたため、U ボルトの規格に沿って塩化ビニルパイプを糸ノコで加工した。



(a)設計図



(b)完成品

図 2.23 固定土台

次に、風速計の精度を調べるために、近畿大学工学部次世代基盤研究所にある大型風洞装置、小型風洞装置を用いて風速測定を行った。大型風洞装置での実験の様子を図 2.24、小型風洞装置での実験の様子を図 2.25 に示す。風速を大型風洞装置では 2.0 m/s～10 m/s、小型風洞装置では 1.0 m/s～10 m/s まで 1.0 m/s ごとに測定を行った。その結果を図 2.26 に示す。

大型風洞装置の結果から、回帰直線を求めると傾きが 0.8775 であった。一方で小型風洞装置の結果に着目すると大型風洞装置と比較した際の誤差は小さいが、これは小型風洞装置に対して CCP-ULP の投影面積が大きいためブロック係数が大きくなり、本来計測するはずの風速より大きくなったと考えられる。これらの結果から、大型風洞装置の結果を採用し、風速計の補正係数 $c:c=1.13$ を定めた。

その後、近畿大学工学部 G 館屋上に CCP-ULP を設置し、実際の風速下で基準風速の三次元超音波風速計 (Young 社製 81000) との比較を行った。CCP-ULP は、元から設置してある三次元超音波風速計の観測タワーの一方に取り付けた。計測高さは、建物が 11 m で観測

タワーが 3 m, 合計 15 m である. また, 取り付けの際の注意点として, 取り付けた超音波風速計が地面に対して水平である必要がある. その確認作業は水平器を用いて行った. 取り付け後の様子を図 2.27, 水平器での確認作業を図 2.28 に示す.

期間は, 2021 年 12 月 7 日から 1 日間とした. 図 2.29 に 1 分間の平均風速の比較をそれぞれ補正前と補正後の散布図を示す. 補正前までは CCP-ULP の誤差は, 17 %であったが, 補正係数 c をかけると計測誤差が 6 %と小さくなったため, この方法を採用した.



図 2.24 大型風洞装置

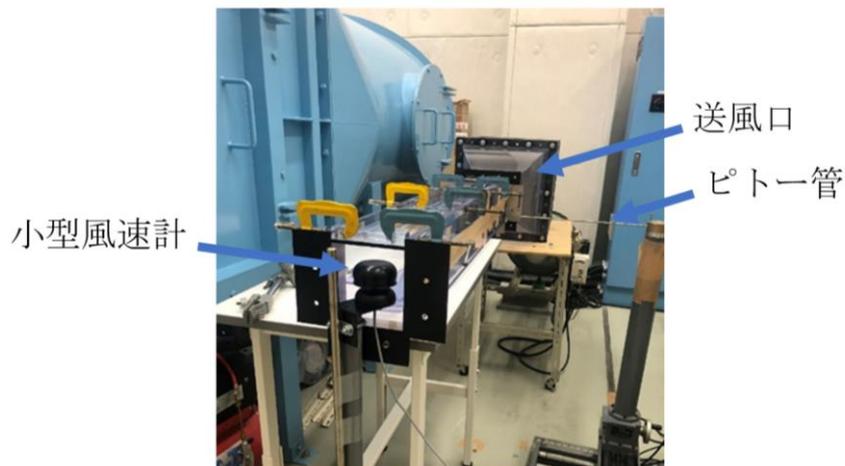
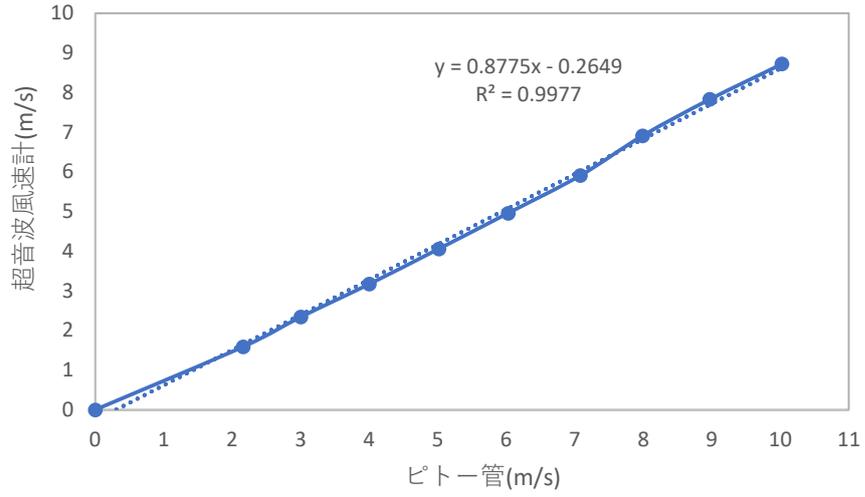
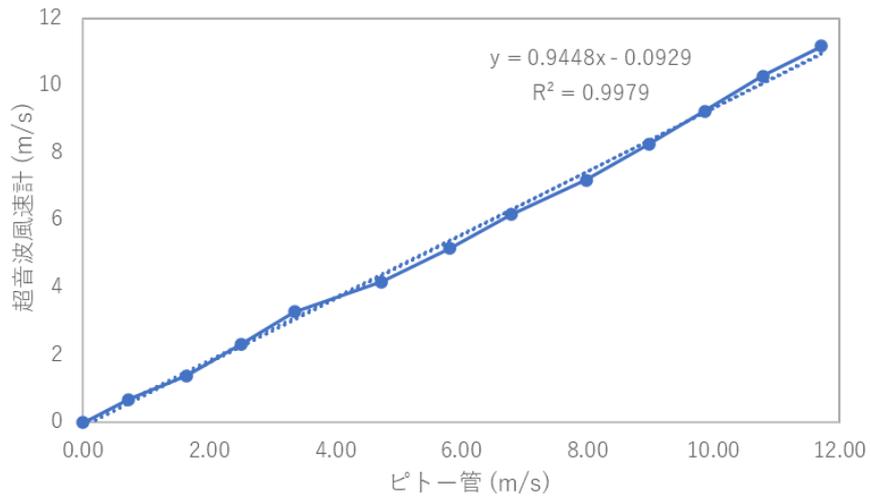


図 2.25 小型風洞装置



(a) 大型風洞装置



(b) 小型風洞装置

図 2.26 風洞装置で発生させた風速と小型風速計の計測結果の比較.

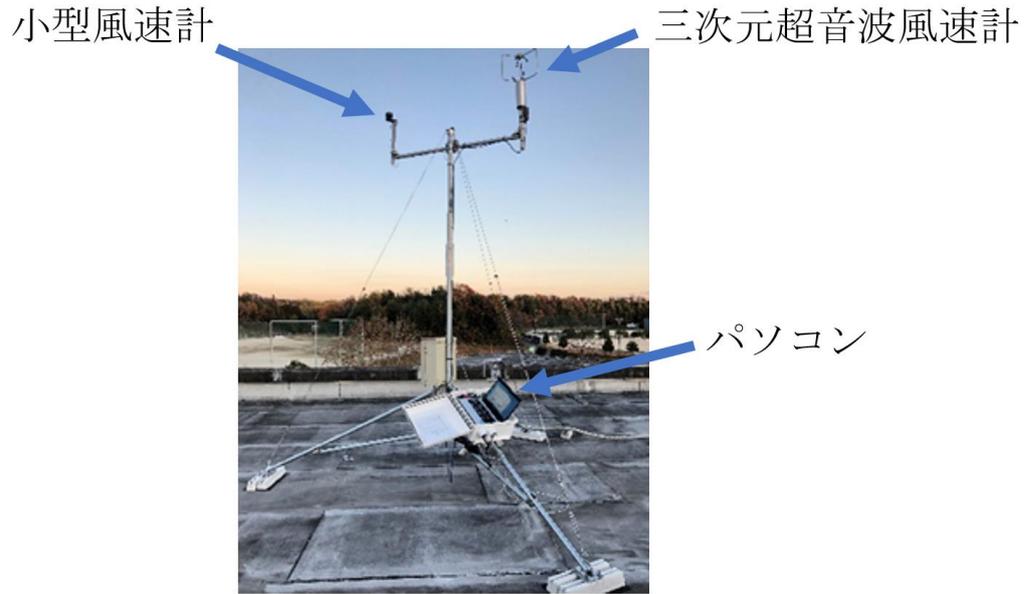


図 2.27 取り付け後の様子



図 2.28 水平器による確認作業

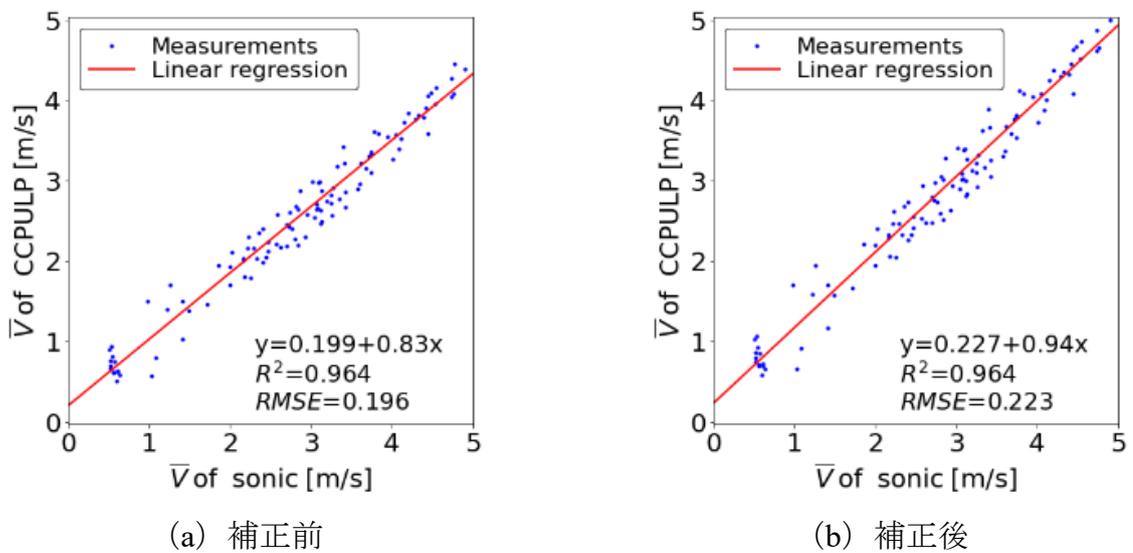


図 2.29 CCP-ULP と既存の風速計との 10 分平均の平均風速の比較.

2.4 気球を用いた風況計測

本研究では近畿大学工学部第5駐車場横の広場で計測を行った。図2.30に本研究で用いた高空風況計測システムの概要図を示す。風速計測用のソフトは、CLoadを用いた。気球にCCP-ULP, IMUセンサーを取り付け、空中に浮揚させた。IMUセンサーはノートパソコン, Raspberry Pi, 電源と共に箱に入れて取り付けた。ただし, CCP-ULP, IMUセンサーは風の影響を受けても同じ傾き, 回転となるよう同一直線上に取り付けている。

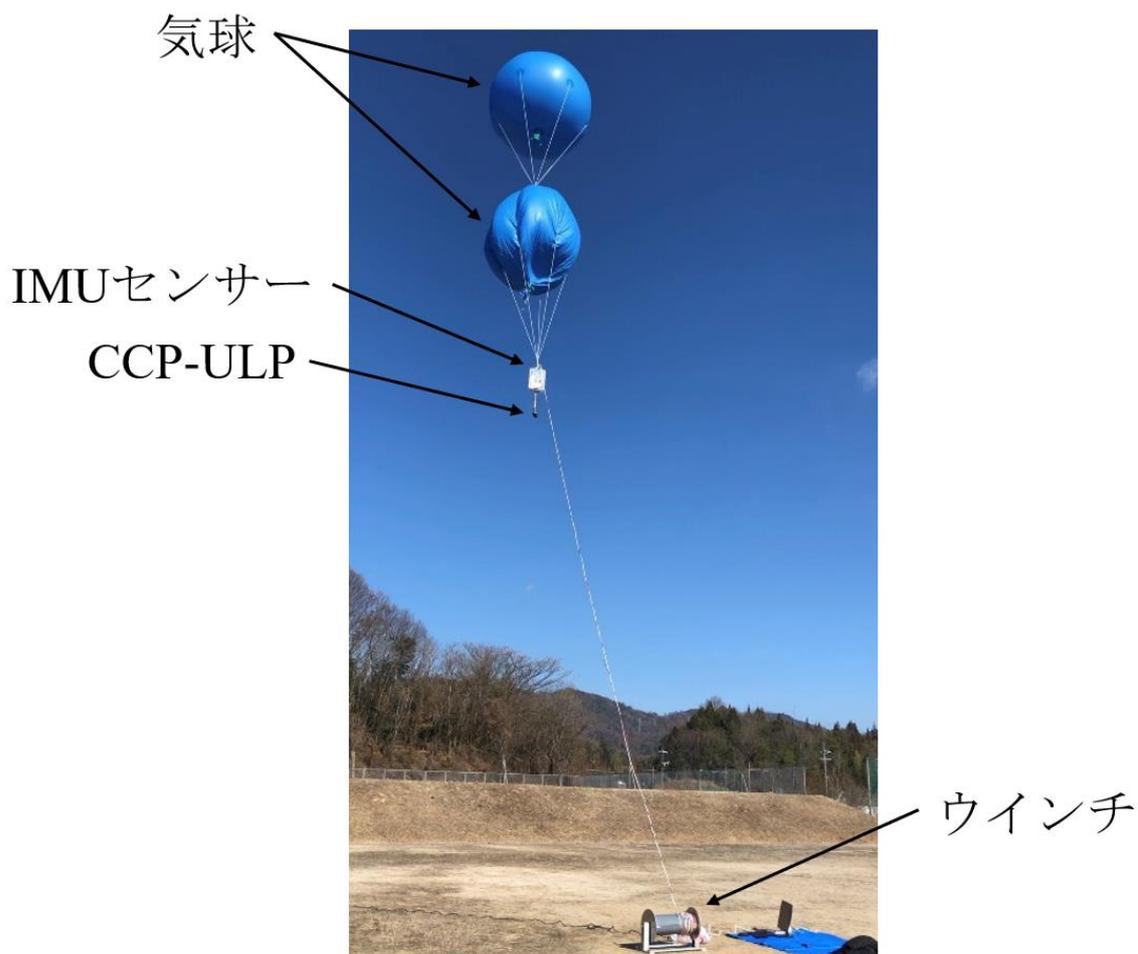


図 2.30 高空風況計測システム

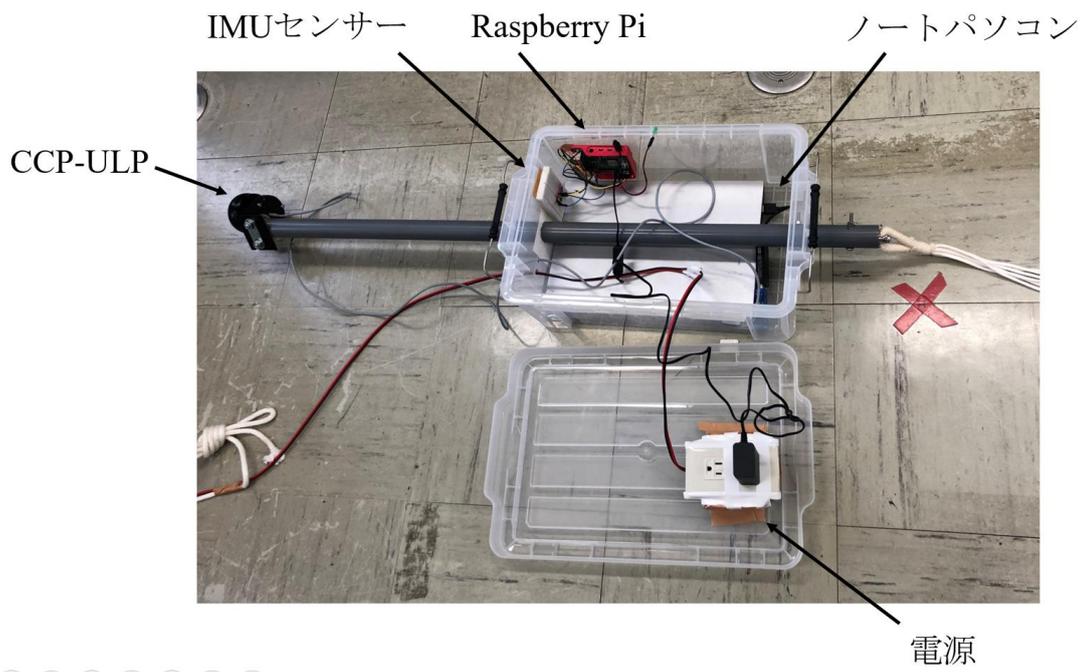


図 2.31 箱の中身



図 2.32 基準風速計

以下に高空風況計測の実験手順を示す。

・ 高空風況計測の実験手順

- ① テザーおよび送電線をウインチに巻き付ける。
- ② 気球にヘリウムガスを入れる。本研究では直径 2.3 m, ガス容量 7.3 m^3 である気球を用いた。
- ③ CLoad を起動したノートパソコン, Raspberry Pi に接続した IMU センサーを箱の中に固定して入れ, 蓋を閉じる。CCP-ULP と IMU センサーを直線的に固定するために中心に穴をあけ, 塩化ビニルパイプを通し, 挿入口付近で塩化ビニルパイプにねじを通し固定する。
- ④ ③で貫通させた塩化ビニルパイプの先端に CCP-ULP を取り付ける。また, もう片方の先端に気球のひもを取り付ける。
- ⑤ 気球を徐々に浮揚させ, 高度約 10 m 程度の位置で固定し, 計測を開始する。
- ⑥ 一定時間経過後, 気球を回収する。
- ⑦ CLoad を終了し, 結果を保存する。
- ⑧ ⑦で得られた風速を基に, 補正を行い, 基準風速との比較を行う。

第3章 実験結果および考察

本研究において、気球の浮上期間は2022年1月7日21時から2022年1月8日16時までである。図3.1に計測した結果を基準風速計と比較した瞬間風速の時系列を示す。超音波風速計はサンプリング周波数10 Hzであるため、小型風速計とデータ数を合わせるために1秒平均とした。実験の様子を図3.1に示す。



図 3.1 実験の様子

計測期間は2022年1月8日10時から2022年1月8日12時40分までである。浮上期間に比べ、計測期間が短くなった原因は7日の夜中～8日の朝方にかけて気温が低下し、テザーが凍り付いてしまったことから地上とほぼ同じ高さにあったことや8日の12:45分以降は風向が下向きに吹き、超音波風速計が地面と強く衝突したことでノートパソコンとの通信が切断されてしまったことが挙げられる。図3.3に断線した風速計の信号線を示す。図3.1より11:30から12:00までは確認のため気球を降ろしたことで計測されていない。再浮揚後、風速が高い12:00からはほとんど同じ数値の風速を計測することができた。風速の低い朝方においては同じ傾向の風速が得られたが、昼間に比べると風速の差が大きい。これは、今回使用した超音波風速計が風速0.5m/s以下は測定されないためである。

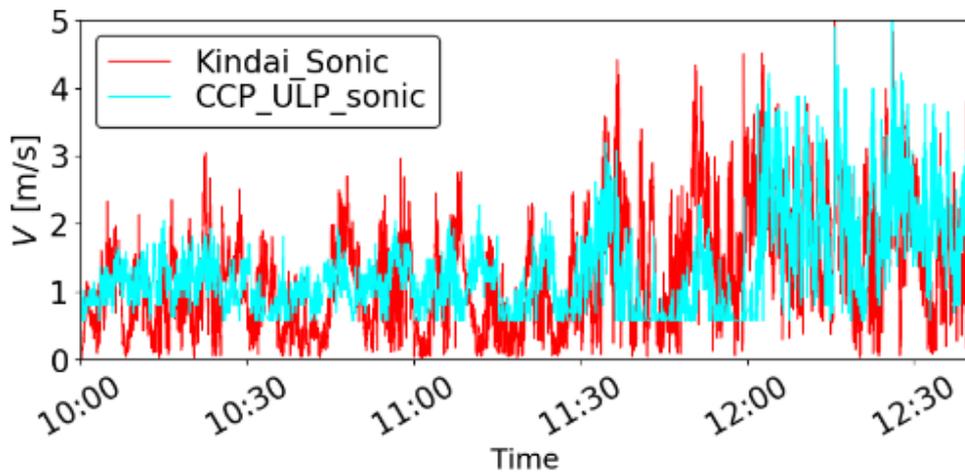


図 3.1 時系列の瞬間風速分布図

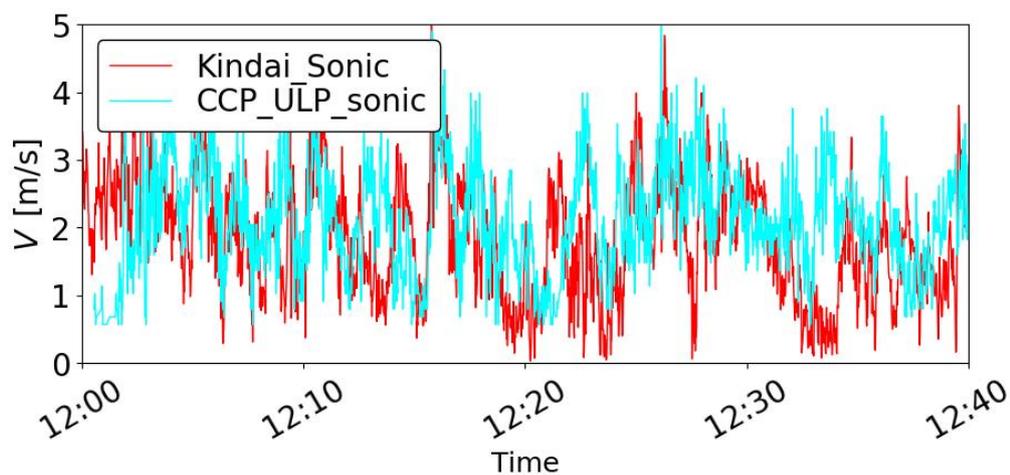


図 3.2 時系列の瞬間風速分布図 (12:00~12:40)

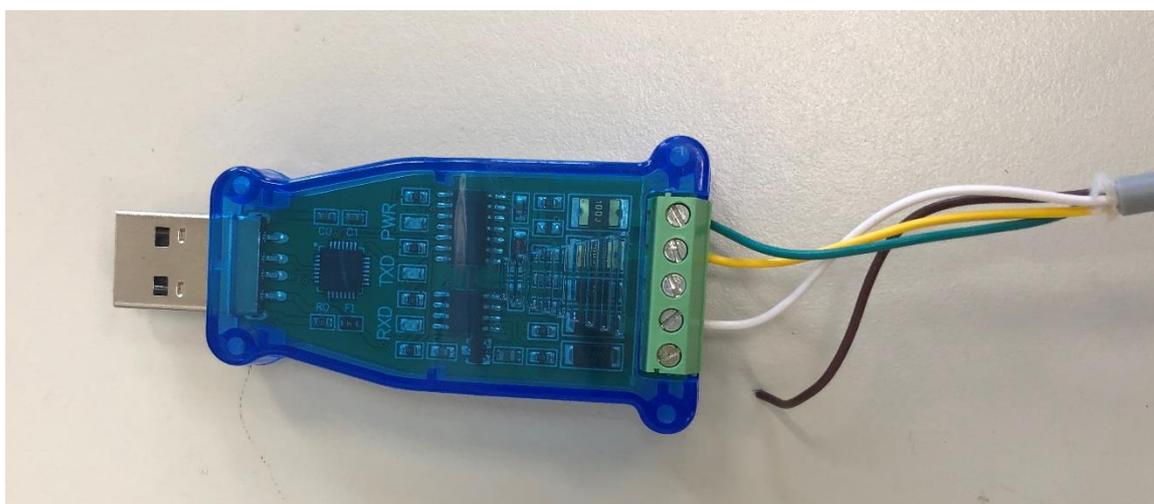


図 3.3 断線した小型風速計の信号線.

図 3.3 に小型風速計 (CCP-ULP) と超音波風速計の 10 分間の散布図を示す. x 軸に時系列, y 軸に平均風速を示している. 平均風速(\bar{V})の算出は,

$$\bar{V} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=N_T}^{N_T} V_i \quad (3.1)$$

ここで, \bar{V} は平均風速, T は平均時間であり, 10分に設定している. N_T はデータ数, V_i は小型風速計で計測された瞬間風速である. 小型風速計は, V_i を直接測定するが, 超音波風速計の場合, V_i は $V_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2}$ を使用して計算する. ここで, u_i^2 と v_i^2 はそれぞれ西から東と南と北方向の風速成分である. 図 3.3 に線形最小二乗法から得られた回帰直線を示す. 回帰直線の傾きは, 0.74 であり, CCP-ULP は風速を過小評価しており比較の不確実性を表している. 過小評価した原因は, 基準風速計に比べ, CCP-ULP の取得データ数が少ないことに加え, 風速 0.5 m/s 以下は計測されないことに起因すると考えられ, 精度評価は行うことができなかった.

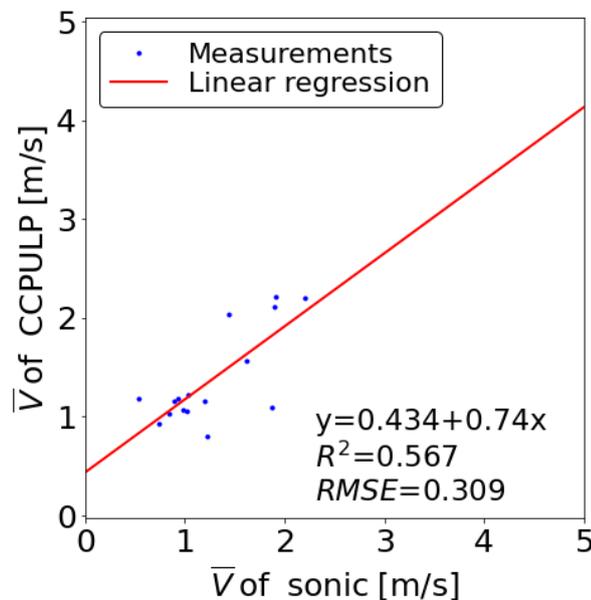


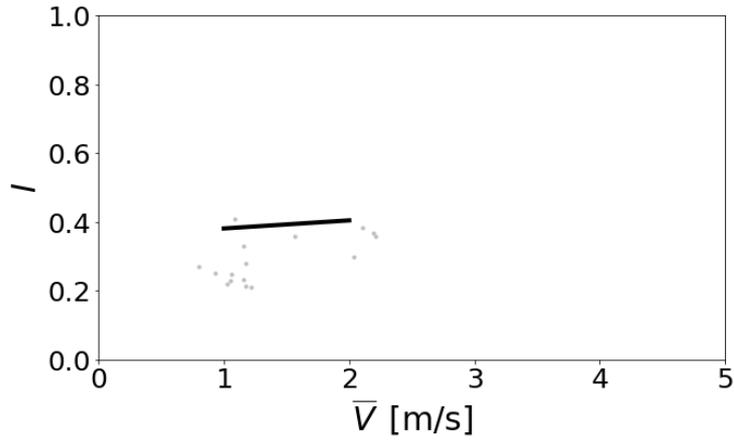
図 3.2 散布図

次に, 図に計測した 10 分間の乱流強度を示す. 乱流強度は IEC 規格 [4]と同様に平均風速ビンの標準偏差(σ) の 90 percentile の値を用いて算出した. 標準偏差(σ)と乱流強度(I)は

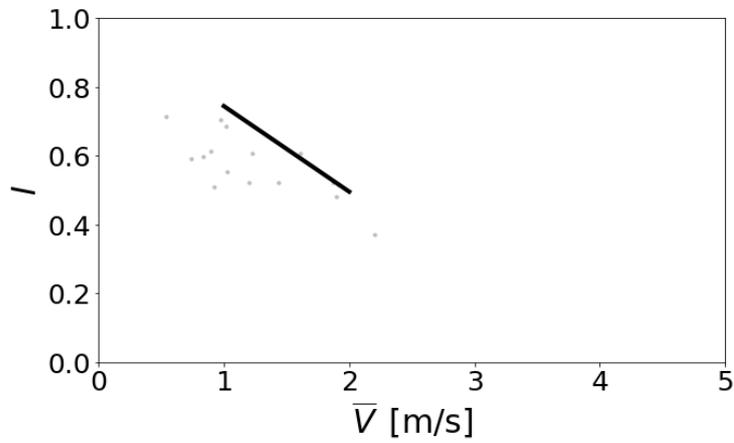
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{i=N_T}^{N_T} V_i^2 - \bar{V}^2} \quad (3.2)$$

$$I = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (3.3)$$

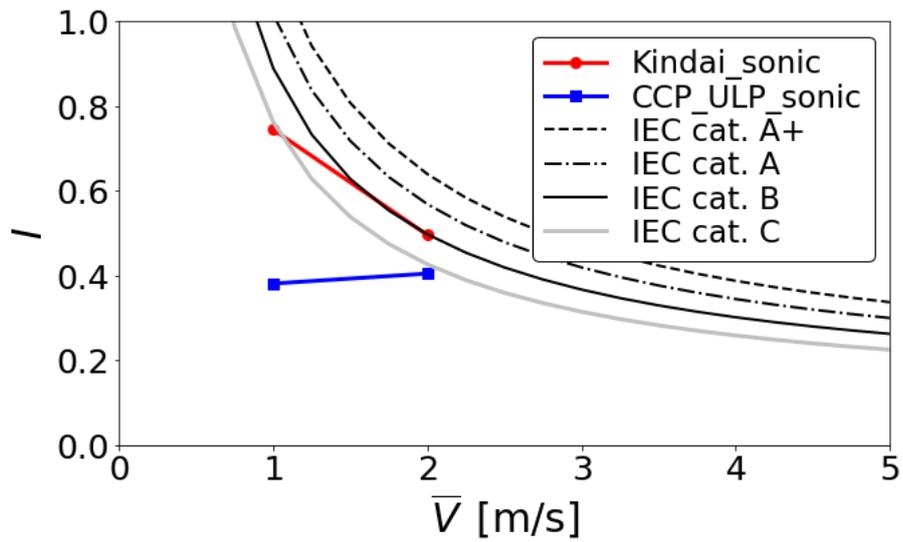
から算出した. IEC 規格とは, 国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission : IEC) の定める国際的な規格のこと⁽⁸⁾である. 三次元超音波風速計は IEC 規格と比較して乱流強度の傾向を示しているが, 小型風速計は計測できていないことが読み取れる.



(a)CCP-ULP



(b)Kindai_sonic



(c)

图 3.3 乱流強度

第4章 結言

本研究では、ウインチ製作、スリップリング製作および小型風速計の性能評価を行い、観測システムを取り付けた気球を浮揚して風況計測を行った。ウインチ製作では、“目標高度到達時に高度を保つ”および“地面に完全に固定可能にする”という課題を解決するべく、円盤・軸・スタンドにピンを差し込むための機構、土台にペグを打ち込むための機構を追加した。スリップリング製作では“ブラシおよびリングの製作精度が低く、短絡・瞬断する恐れがある”という課題を解決し、断線することなく安定した通電が可能となった。小型風速計の性能評価では、風洞装置を用いて機器の誤差傾向を把握し、補正整数を決定することで本来の風速と近似させることが可能になった。実際に気球を浮揚させて計測した結果、約16時間浮揚に成功し、約3時間風況計測することができた。その結果、高風速時には小型風速計が取得した風速と基準風速の誤差範囲が少なく、おおよその傾向が一致した。一方で、深夜などの湿気が多い時間帯や朝方などの低風速時には、湿気によりテザー部分に水分が含まれ全体の重量が重くなり気球が降下したことや0.5 m/s以下の風速は風速計の性能により計測されないことから、データの取得数が少なく精度悪化に繋がった。最後に本研究では、以下の課題が残った。

- ・気球に取り付けた計測機器の重量が大きく気球1個では支えきれない。
- ・季節、時間帯により湿度が高くなるとテザーに水分が含まれ気球システムの重量が増加した。

これらの解決には、取り付ける気球のサイズを大きくする他、計測システムの軽量化のために風速測定の実データ化をRaspberry Piを用いて行うこと。また、テザーの素材に水分を含まないものを使用する必要があると考える。

謝辞

本研究にあたり，高空風況計測システム，プログラム開発に関して，ジェイ・プラカス・ゴイト講師，田口誠景氏，使用した実験装置製作に関して，梅西浩二氏にご指導いただきました．ここに記して謝辞とさせていただきます．

参考文献

- (1) 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギーの今を知る 10 の質問” :
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2018/html/001/> (参照 : 2022-1-24)
- (2) 建設通信新聞, “銚子沖に着床式洋上風力が完成! NEDO が初公開” :
<http://kensetsunewspickup.blogspot.com/2012/10/nedo.html> (参照 : 2022-1-24)
- (3) 草谷太郎ら, “高空風力発電用の繫留型加圧膜袋構造航空機の検討”,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo/37/0/37_407/_pdf/-char/ja
- (4) 真木綾明, “高空風況計測用気球の浮揚システムの製作”, 卒業研究論文 近畿大学工学部
- (5) 転がり軸受 総合カタログ, NTN 社, pp.B-18 (参照 : 2022-1-24)
- (6) ヒカリ電子工業, “スリップリングとは” :
<http://www.hikari-slipring.co.jp/publics/index/43/> (参照 : 2022-1-24)
- (7) 超音波風速計 CCP-ULP :
http://www.weather.co.jp/catalog_html/CCP-ULP.htm (参照 : 2022-1-24)
- (8) 国立国会図書館, “IEC 規格とは” :
https://rnavi.ndl.go.jp/research_guide/entry/theme-honbun-400391.php#whats
- (9) 長久泰樹, “高空風況計測用気球の挙動評価システムの開発”, 卒業研究論文 近畿大学工学部

令和3年度 卒業研究論文

気球を用いた高空風況計測システムの実証試験

平岡 直樹