

令和3年度
卒業研究論文

風洞実験による高空風況計測用気球の
空力特性の評価

1810950043 圓明 聖也

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 風況計測の背景.....	1
1.2 航空機を用いた高空風況計測.....	2
1.3 研究目的.....	3
第 2 章 実験装置の設計・開発	4
2.1 風洞実験用装置の製作.....	4
気球模型製作.....	4
風洞実験用固定棒製作.....	6
固定台製作.....	8
2.2 実験手順.....	10
2.3 スリップリングの設計・開発.....	12
2.4 気球を用いた風況計測.....	18
第 3 章 実験結果及び考察	22
3.1 風況計測.....	22
3.2 風洞実験.....	23
第 4 章 結言	27
謝辞.....	28
参考文献.....	29

第1章 緒言

1.1 風況計測の背景

日本のエネルギー自給率は11.8%と経済協力開発機構の加盟国35か国中34位と世界各国と比較すると、エネルギー自給率が非常に低い国であることがわかる。太陽光や風力、地熱など、自然界に存在し続ける再生可能なエネルギーを活用することでエネルギーの自給率を高めることができ、海外への依存度を下げることにつながる。風力発電は再生可能エネルギーの一つとして、温室効果ガスを発生させない地球にやさしい発電方法として以前より活用されていたが、広い土地が必要という大きな課題デメリットがある。その問題を解決するために考えられたのが洋上風力発電である。洋上風力発電のメリットとして以下のことがあげられる。太陽光発電と違い、1日中電力を生み出すことができ、風力を持続的に得られることである。地上の場合、障害物が多数あり、風向き等の影響を受けてしまう。また、海の上で行われているため、設置する場所や騒音を気にしなくていい、事故が起きた際に人的被害が少ないことである。その反面、大きなデメリットも存在する。現在の主力である火力発電等と比較して、コストが掛かることである。洋上での設置となると陸上風力発電に比べて1.5倍から2.6倍程度と言われている。また、積極的に洋上風力発電を導入しているイギリスの着床式と比較すると、日本の海は深い海域が多く、設置するのに浮体式と呼ばれる場所を選ばない技術であるため、より厳しい気象条件に追加コストが生じる¹⁾。



図 1.1. 洋上風力発電²⁾

1.2 航空機を用いた高空風況計測

既存の風力発電は地上表層付近の風を電気エネルギーに変換するが、地形や植生地物の影響から風力エネルギーは高空に比べて小さい。地上表層 20 m 以上の上空の風、可能ならば上空 1 万 km のジェット気流などの風力を利用できれば発電効率が上がり、上空空間の有効利用にもつながる。そこで近年、風力発電機のハブ高さ 100 m 以上の大型の風力発電機の研究や開発が活発化している。高空の風を受けるためには、発電装置の受風部を高空に継続して置かなければならない。しかし、100 m 規模の観測タワーを建てて対応しようとするれば、観測タワーの製造コストが膨大になる。建造物以外で長期に高空へ留まるためには、航空機を用いた方法が考えられる。発電に用いる航空機は、常に上空へ定点滞在している必要があるため、テザーなどで地上に捕縛された繫留航空機を用いる。具体例として凧と繫留気球が挙げられる。繫留航空機を高空風況計測に用いる時の課題として、航空機は高速輸送を目的として発展したため、高々2週間以下の連続運用しか考慮されない。また繫留航空機はテザーによる拘束を受けるため、自由航空機のように空気塊が擾乱時の衝撃緩衝材として機能しない場合が多く、機体主構造への衝撃や、テザー取付け部が応力集中を受けやすいなどが存在する³⁾。

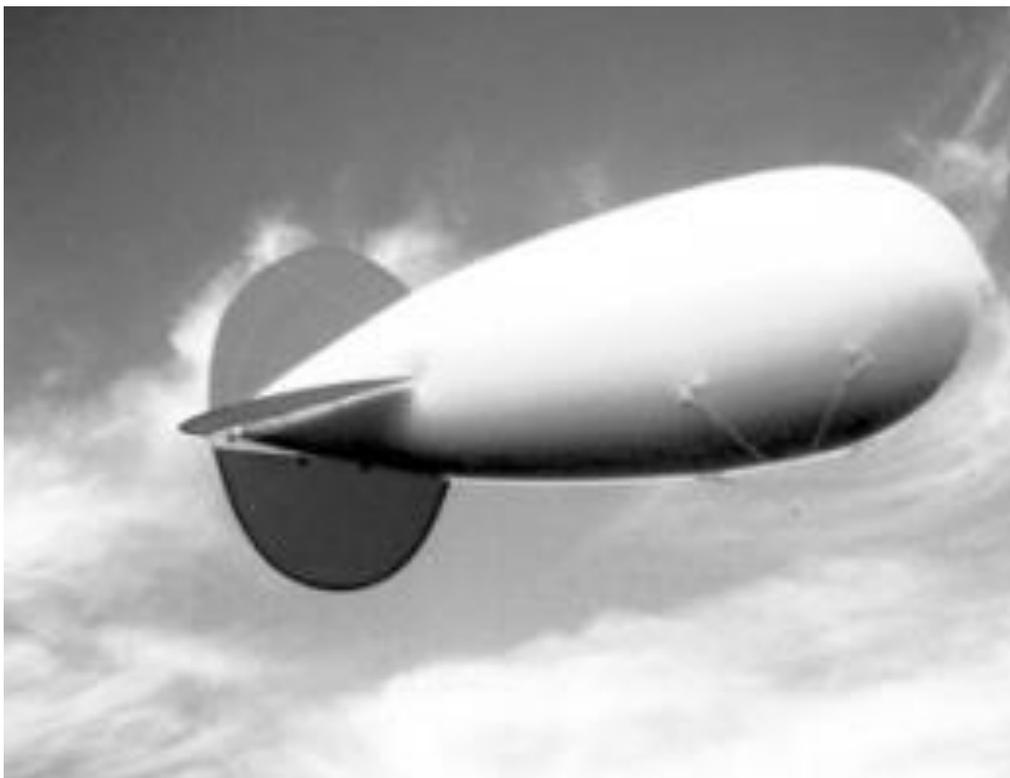


図 1.2. 気球による風況計測⁴⁾

1.3 研究目的

本研究では気球を用いた高空風況計測システムの開発を行い，計測装置の低コストでの風況計測を目的とする．昨年度の研究により風による気球の動揺，気球の形を変形させ風の抵抗を減らすなどして，気球の挙動を安定させる必要があることが課題であげられた．球形状の気球は風から受ける抗力によって風と同じ方向に移動してしまうため本研究では，球形状の他，揚力とそれによる復元力を発生する楕円形を用いて実験を行い，風の影響を最も受けにくい気球形状を提案する．



図 1.3. 高空風況計測システム

第2章 実験装置の設計・開発

2.1 風洞実験用装置の製作

昨年度、気球が風の影響を強く受け、横に大きく揺れ近くの障害物に接触し割れてしまったため気球の形を変形させ風の抵抗を減らすなどして、気球の挙動を安定させる必要があることがあった。それを解決するために風洞で揚力が得られると考えられている楕円形状についての空力特性の評価をする必要がある。そのために、実験装置の設計・製作を行った。

気球模型製作

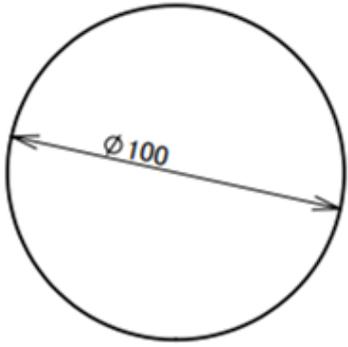
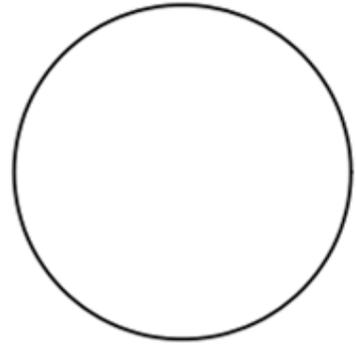
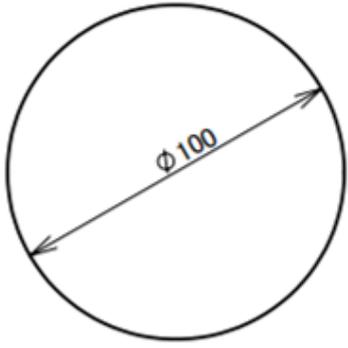
模型気球は加工の容易な発泡スチロールで設計し、サイズは風洞のテストセクションの断面積と濡れ縁長さの比によって水力直径 d を算出し、決定した。水力直径は次式から算出した⁵⁾。

$$m = 4 \frac{A}{s} \quad (1)$$

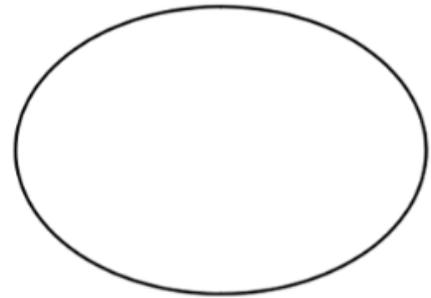
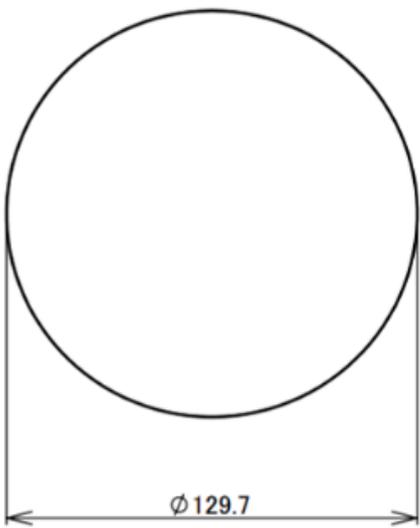
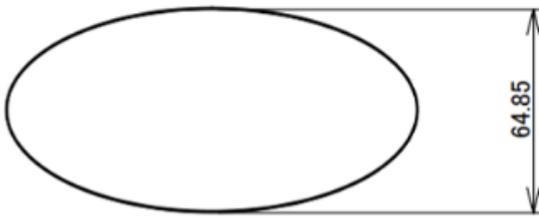
ここで、 m は水力直径、 A は表面積、 s は円周である。次に風洞内のブロッケージを算出し、水力直径を決定した。風洞内のブロッケージは次式から算出した。

$$B = \frac{(\pi d^2) / 4}{l^2} \times 100 = \frac{\pi ab}{l^2} \times 100 \quad (2)$$

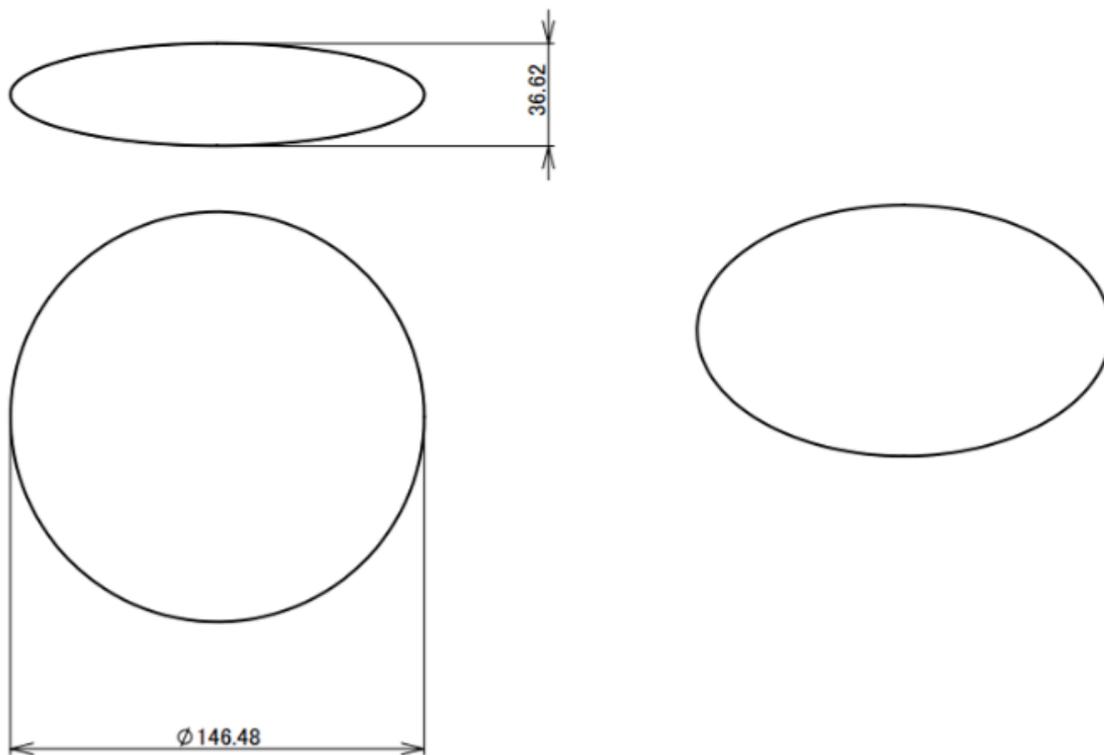
ここで、 l^2 は風洞内のテストセクションの断面積である。この時、水力直径 100mm でブロッケージを計算した際、球形(2.3%)、1対2楕円形(1.9%)、1対4楕円形(1.7%)となった。今回は、いずれの模型の場合でも速手部のブロッケージが 10%以下になるように設計を行っている。したがって水力直径 100mm を基準とし球形(100 mm × 100 mm)、1対2楕円形(64.9 mm × 129.7 mm)、1対4楕円形(36.6 mm × 146.5 mm)の3種類で比較した。図 2.1 に3種類の模型気球の図面を示した。



(a)



(b)

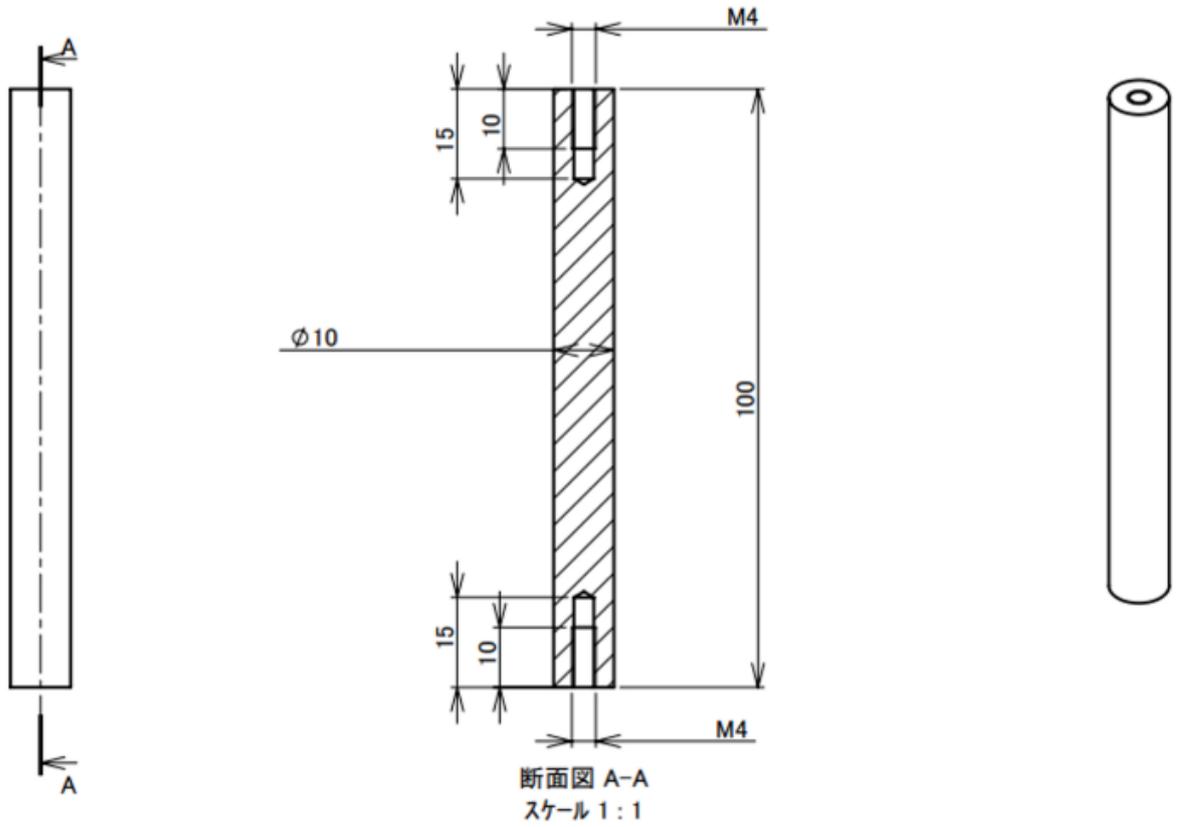


(c)

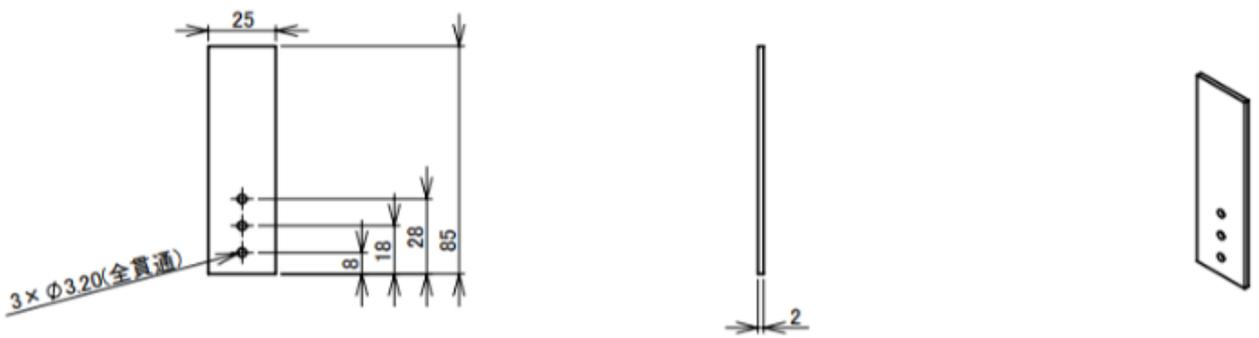
図 2.1. 模型気球 (a)球形 , (b) 1:2 楕円形 , (c) 1:4 楕円形.

風洞実験用固定棒製作

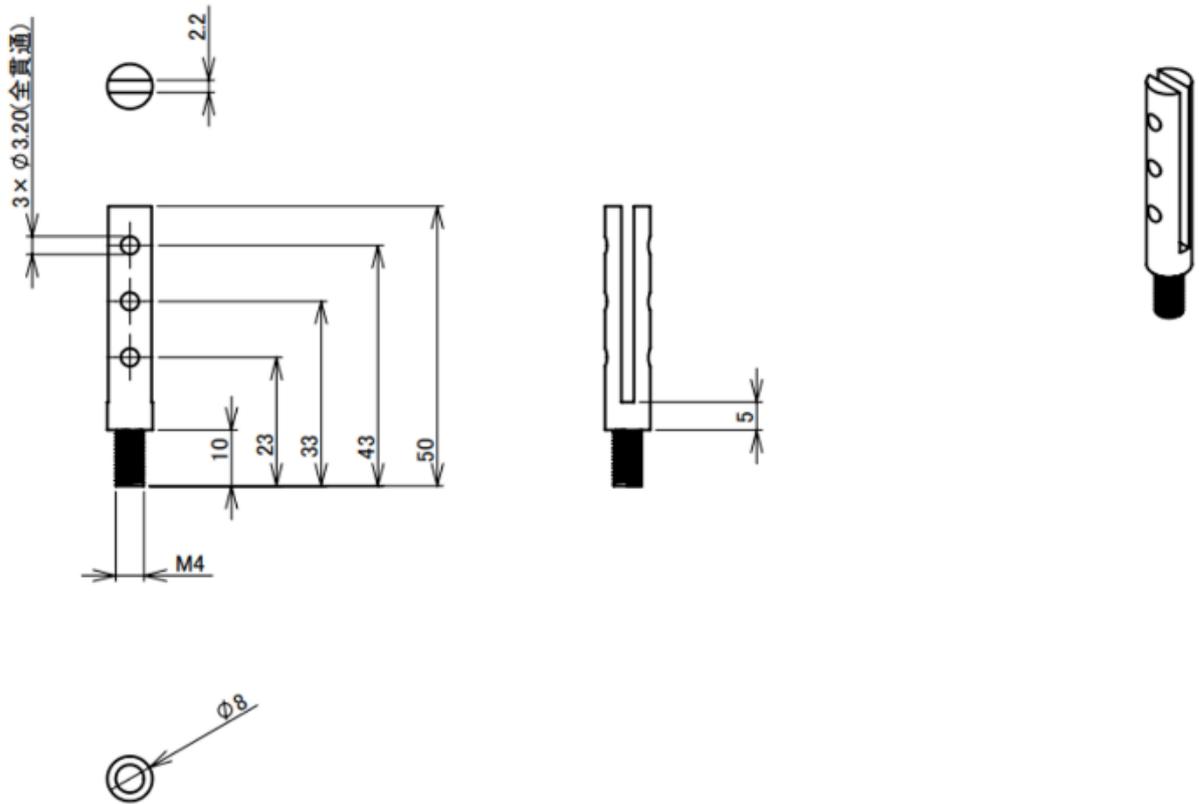
各模型気球の揚力係数,抗力係数を測定するため気球を取り付ける固定棒を製作した. 製作した図面は図 2.2 に示す. 取り付け箇所をねじ切りにし実験をする際, 模型気球の取り換えをしやすいよう設計した. また, 雌棒の素材を直径 10mm の強度の高いステンレスにし, 実験で使用する風速でもたわまないようにした. また, 中に入れる固定棒 C を長方形の板にした. 固定棒 C の断面形状が円形であると模型気球の固定が回転してしまい各角度の測定ができなくなってしまう. 長方形にすることで模型気球のみの回転をなくした.



(a)



(b)



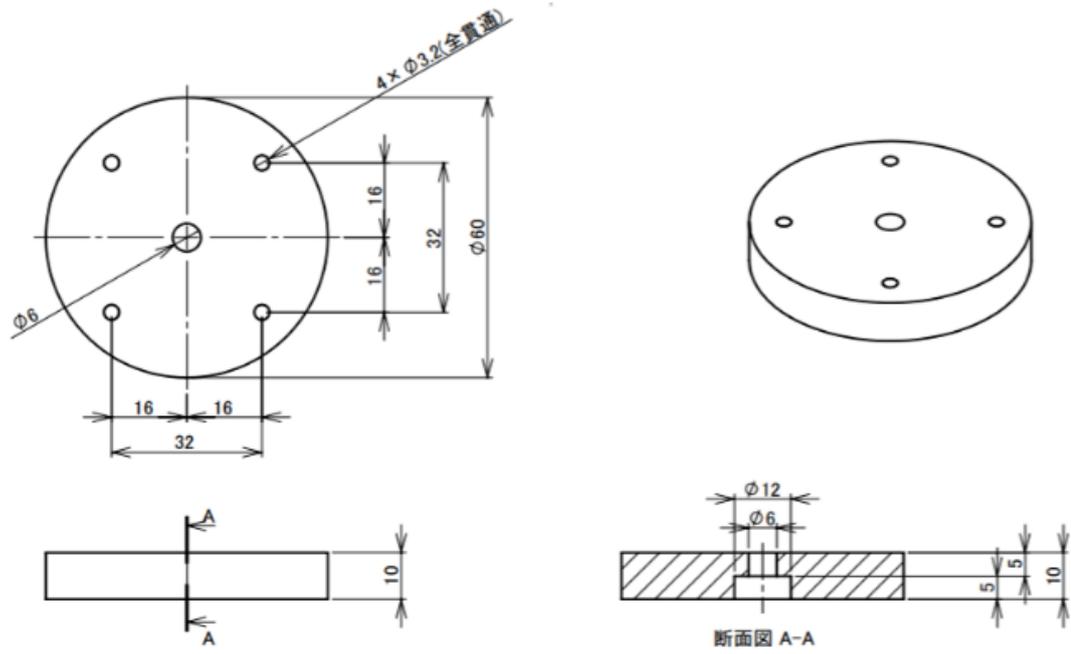
(c)

図 2.2. (a) 雌棒 , (b) 固定棒 B , (c) 固定棒 C .

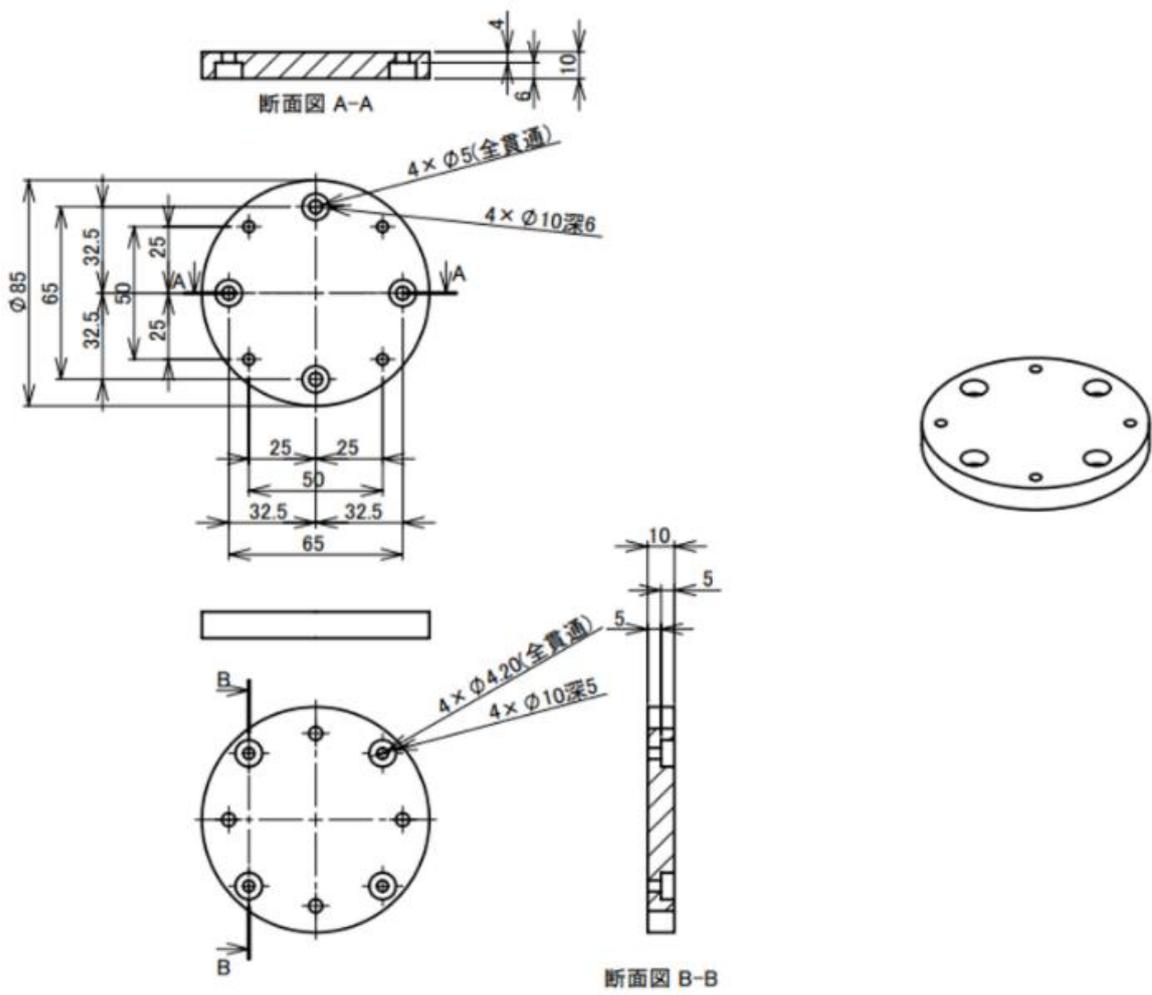
固定台製作

この固定台は風向の影響を考慮するため、気球を回転ステージ上に設置を目的とし設計を行った。従来の固定台であると、角度を正確に変えることができず、楕円の模型気球にかかる抗力、揚力の測定が不可能なため設計に至った。設計するにあたり、図 2.3 (b)の円盤の穴は全てぎぐりを採用した。既製品の回転ステージを取り付ける際、ロードセル用ねじとクランプねじが接触してしまい、取り付け、取り外しが非常に困難になった。ぎぐりにすることで、ねじの接触がなくなり、取り付け、取り外しの作業をスムーズに行えるようにした。

図 2.3 に固定台の図面を示す。



(a)



(b)

图 2.3. (a) 円盤小, (b) 円盤大

2.2 実験手順

本研究では，気球形状による風の影響を評価するために風洞装置を用いて実験を行った．図 2.4 は気球模型を設置した風洞実験の様子を示す．

実験では，近畿大学工学部の可変風速型風洞装置を用いた．風洞測定部の断面（スパン方向×垂直方向）はそれぞれ $0.59\text{ m} \times 0.59\text{ m}$ である．気球模型は，測定部上流側の三分力計（日章電機製 LMC-3502A-10N）に設置した．模型気球は加工の容易な発泡スチロールで製作した．本研究では，従来の球形状と 2 種類の楕円形の模型を対象とした．図 2.5 に 3 種類の模型気球を示す．楕円形は長軸と短軸の比を 2 と 4 のものを用いた．

また，風向影響を考慮するため，気球を回転ステージ上に設置した．回転ステージは図 2.6 に示す．実験では，気球の角度(迎角)を $0^\circ \sim 10^\circ$ までは 2° 間隔， $10^\circ \sim 90^\circ$ までは 5° 間隔で計測を行った．流れ評価は主流速度 5 m/s ， 10 m/s で行った．従って，実験のレイノルズ数はそれぞれ 33069，66137 であった．風速は熱線流速計と I 型プローブ(日本カノマックス製 0248R-T5)を用いて計測した．風洞実験で計測に用いた機材を図 2.7，2.8 に示す．

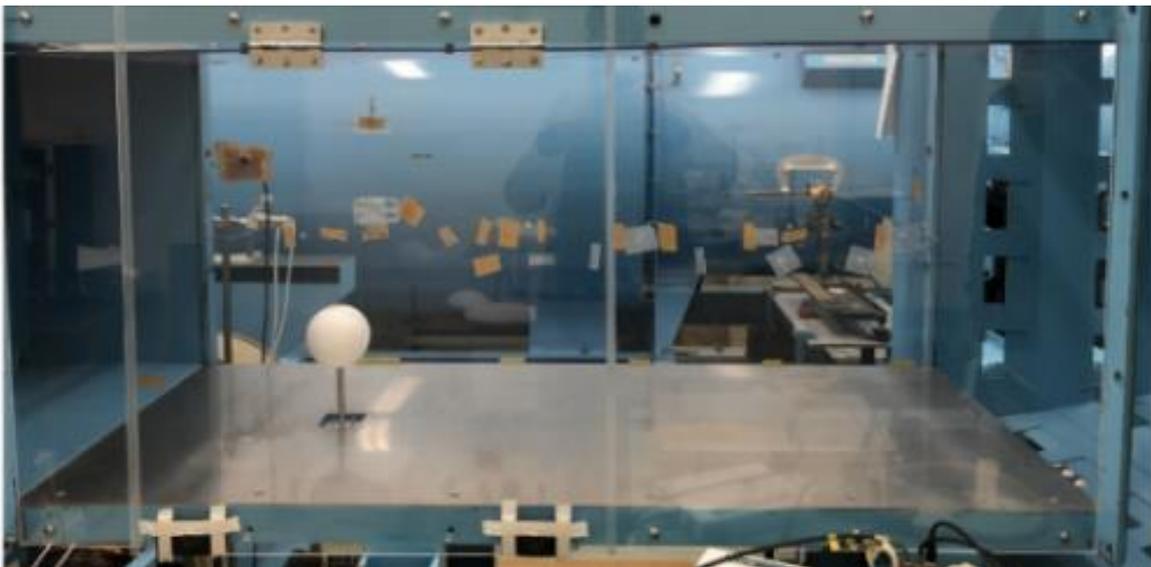


図 2.4. 気球模型を用いた風洞実験の様子

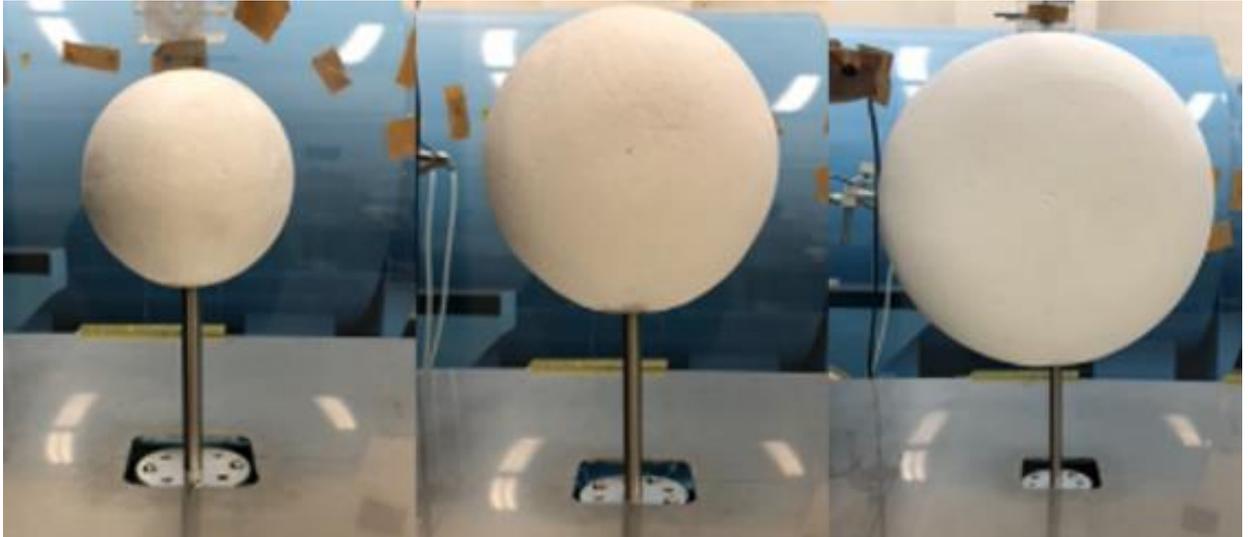


図 2.5. 模型気球 (左から球形, 1 対 2 楕円形, 1 対 4 楕円形)

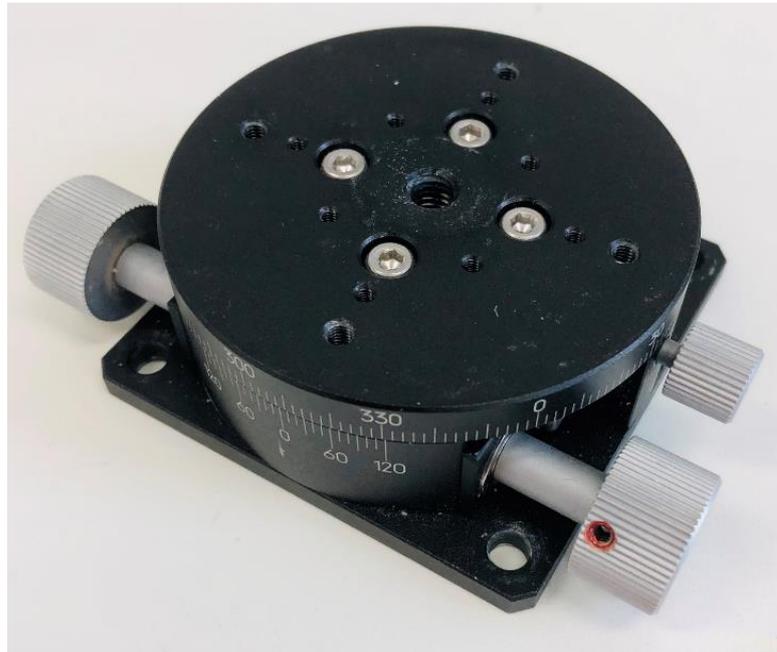


図 2.6. 回転ステージ (中央精機製 RS-627)



図 2.7. 三分力計
(日章電機製 LMC-3502A-10N)



図 2.8. I型プローブ
(日本カノマックス製 0248R-T5)

2.3 スリップリングの設計・開発

気球の空力特性を評価する本研究では使用していないが、気球を用いた風況計測で使用するウィンチに搭載するためスリップリングの製作に至った。気球を上空へ上げる際、気球と一緒に風速計と IMU センサーも上げる。長時間計測を行うため風速計と IMU センサーに電力を供給する必要がある。気球を上げ下げする際にウィンチの軸は回転する。回転する軸にテザーが絡まることなく電力を供給するためにスリップリングのブラシが回転する機構が必要不可欠である。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ことができる⁶⁾。

スリップリングの構造を図 2.9 に示す。

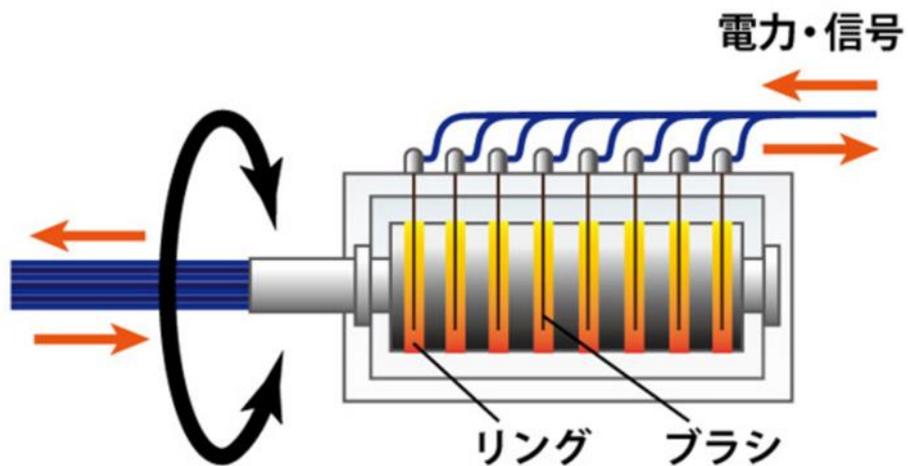


図 2.9. スリップリングの機構⁷⁾

屋外で行う実験では気球に取り付ける風速計や IMU センサーに電力供給システムが必要である。送電線はテザーと一緒に上げ下げできるが、ウィンチが回転するため、電源とつながる際、スリップリングが必要となる。昨年のウィンチの再検討により、軸が太くなったため軸の内径に合わせてスリップリングも大きくした。昨年度はリングとブラシの精度が悪く接点に隙間ができてしまい、瞬断する事が課題であった。そこで、パーツを手加工でなく、機械加工にしたことでリングとブラシの間の接点の精度を良くした。この時、製作したリングとブラシの図面を図 2.10,2.11 に示す。

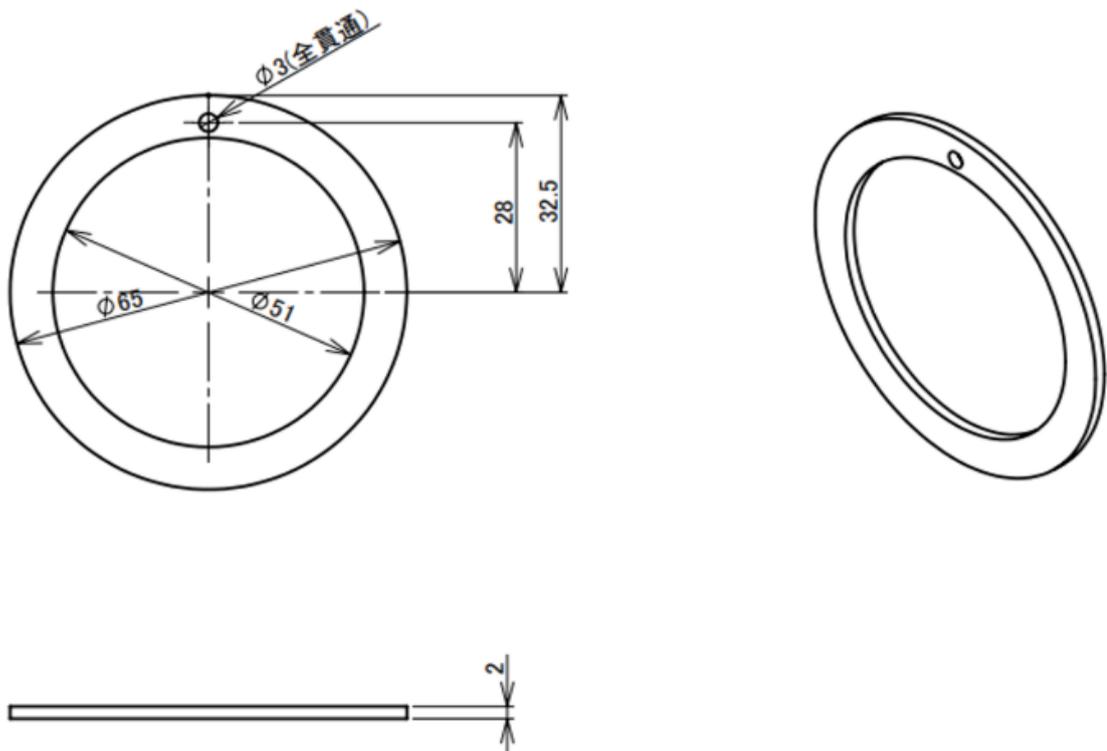


図 2.10. 銅ブラシ

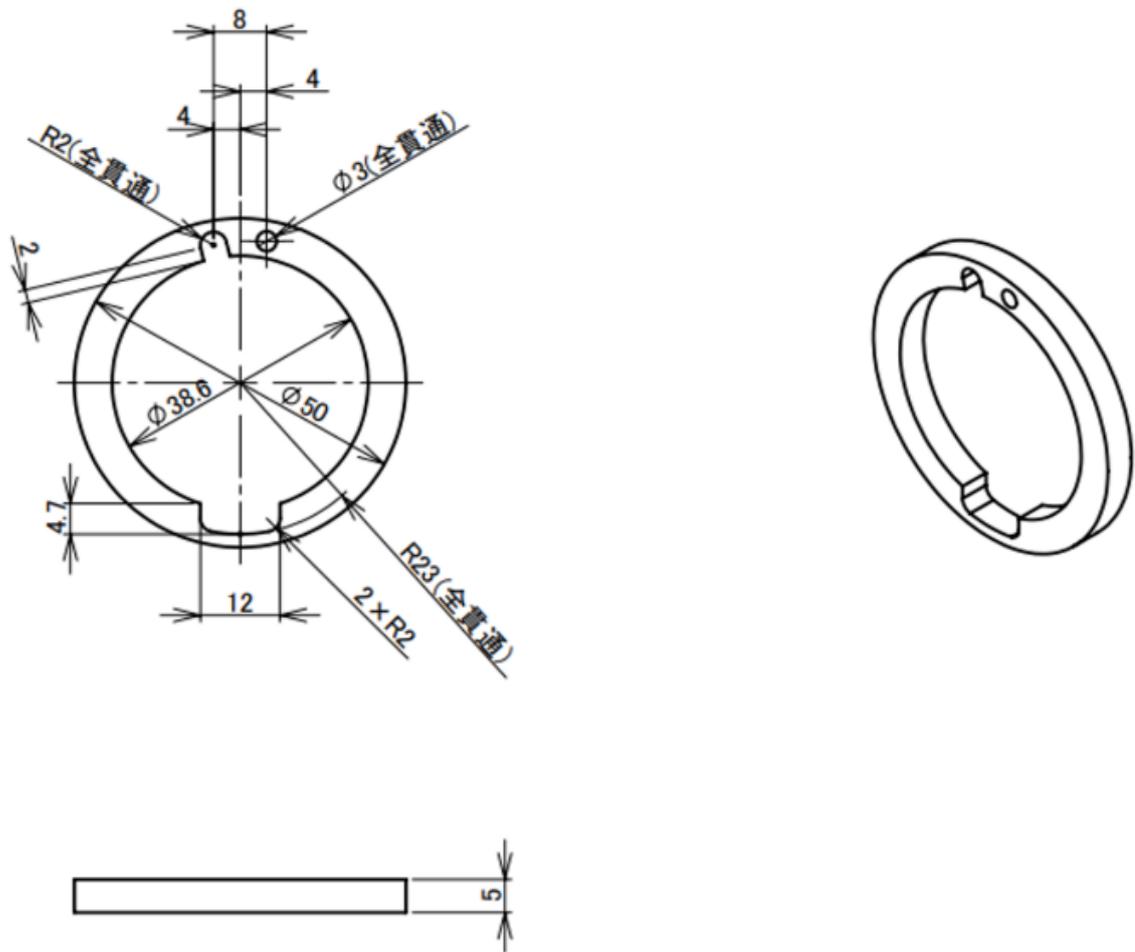


図 2.11. 銅リング

スリップリングの製作手順を以下に示す。

まず、作業の準備として①から④をあらかじめ用意しておく。

- ① 外径 48mm，内径 40mm の塩化ビニルパイプ幅 10mm を 4 等分したものを 3 セット用意する(図 2.12)。4 等分に切ったのは，銅線を通すための溝を作りやすくするため，105mm パイプに固定しやすくするためである。
- ② 外径 60mm，内径 51mm の塩化ビニルパイプ幅 10mm を 4 等分したものを 3 セット用意する(図 2.13)。理由は①と同様である。



図 2.12. 48mm 塩化ビニルパイプ



図 2.13. 60mm 塩化ビニルパイプ

- ③ 銅筒，銅リング共に放電加工がされていたため，紙やすりで削る(図 2.14).
この時，円の形を崩さないようにまんべんなく削る．削り終わったら通電を確認しておく．



図 2.14. 放電加工除去後の銅筒と銅リング

④ 図 2.15, 2.16 のように, 銅線を銅ブラシと銅リングにはんだで接続する.
この工程はスリップリングで最も重要となるため断線しないよう確実に固定する必要がある.



図 2.15. 銅ブラシ



図 2.16. 銅リング

スリップリングの組み立て手順は以下の通りである.

(1). 外径 38mm, 内径 31mm の塩化ビニルパイプを長さ 105mm に切る.



図 2.17. 105mm パイプ

(2). 端から順に①の塩化ビニルパイプを接着剤で固定する.

この時, 銅筒にはんだで固定した銅線が通るための間を 10mm あけておく.

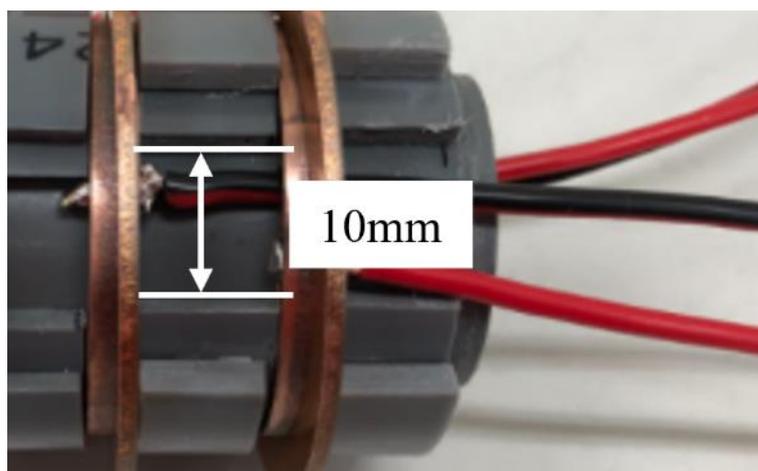


図 2.18. 銅線の経路

- (3). (2)で固定した塩化ビニルパイプの上からさらに②の塩化ビニルパイプを接着剤で固定する. これは銅リングの移動範囲を制限し, 隣にある銅ブラシとの接触による短絡を防ぐためである(図 2.19).



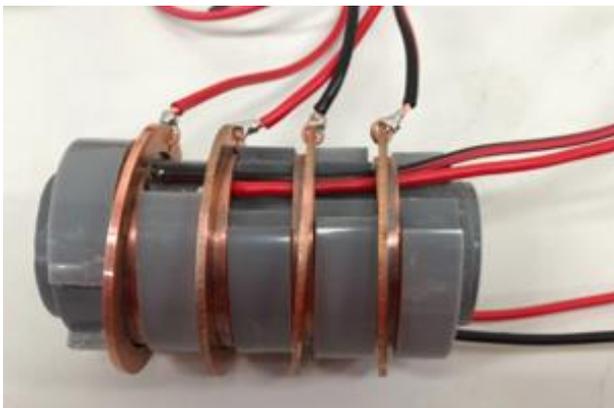
図 2.19. 組み立て 1

- (4). (2)の横に③を銅リング, 銅ブラシの順に取り付ける. この時,塩化ビニルパイプと銅筒の間を無くすようにはめる(図 2.20). 隙間が空いていると, 隙間に銅ブラシが落ち, 電気が流れなくなるのを防ぐためである.

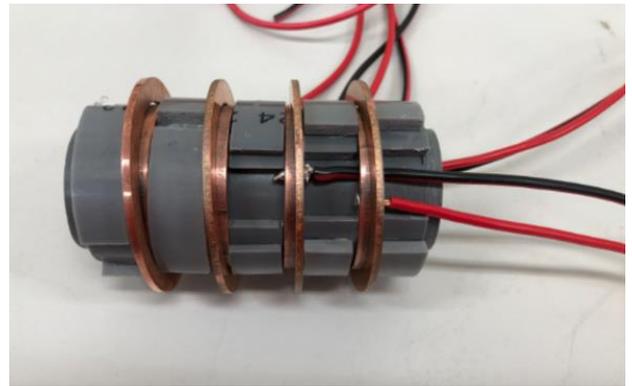


図 2.20. 組み立て 2

(5). (2)から(4)を使用する銅ブラシ，銅リングの個数分繰り返す．この時，銅線は上下 2 本ずつ出るように組み立てる完成品を図 2.21 に示す．最後にそれぞれの銅線の通電を確認し，流れたら完成である．



(a)



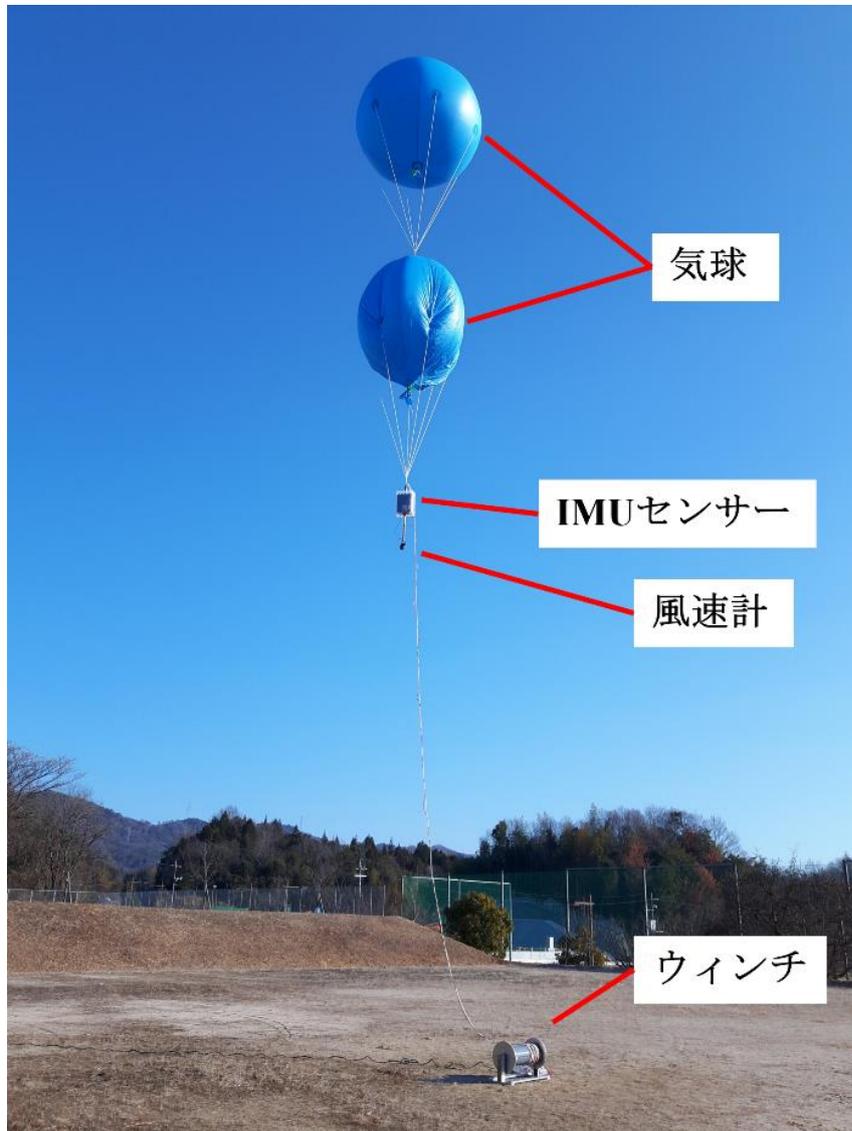
(b)

図 2.21. スリップリング(a) 上面 ， (b)下面

2.4 気球を用いた風況計測

図 2.22 (a) に本研究で用いた高空風況計測システムの概要，(b) に計測したデータの比較対象となる超音波風速計(YOUNG モデル 81000)を示す．気球の挙動は 9 軸 IMU センサー

(MPU9250)を用いて計測した。IMU センサーを Raspberry Pi に接続し、サンプリング周波数 1 Hz で計測した加速度，角速度，地磁気を抽出した。計測用のプログラムは昨年製作されたものを使用した。気球に風速計(CCPULP) ，IMU センサーを取り付け，空中に浮揚させる。ただし，IMU センサー，風速計は風の影響を受けても同じ傾き，回転となるように直線的に固定した⁸⁾。



(a)



(b)

図 2.22. (a) 高空風況計測システム, (b) 超音波風速計(G 館屋上)

以下に高空風況計測の実験手順をまとめる。

高空風況計測実験手順⁸⁾

- (1) 気球の紐を送電線と一緒にウィンチに巻き付ける。この時、紐が気球に引っ張られ、送電線が断線することを防ぐため、紐に対して送電線は少し長めにしておく。
- (2) 気球にヘリウムガスを入れる。本研究では直径 2.3m, ガス容量 7.3m^2 である気球を 2 つ用いた。
- (3) Raspberry Pi に接続した IMU センサー, 風速計に接続したパソコンを箱の中に固定して入れ, ふたを閉める。IMU センサーと風速計を直線的に固定するために箱の側面に穴をあけ, 塩化ビニル管を通して箱の上下をねじで固定する。

- (4) Raspberry Pi で測定用のプログラムを起動させる。浮揚中は Raspberry Pi のプラグを箱の中のコンセントに繋ぎ、Raspberry Pi を起動状態にしてプログラムが終了しないようにする。
- (5) 風速計と IMU センサーを気球の下に取り付ける。本研究では風速計を取り付ける専用の台に固定した。IMU センサーは箱の側面にガムテープで固定した。
- (6) 気球を徐々に浮揚させて、計測を開始する。
- (7) 一定時間経過後、気球を回収する。
- (8) 測定用のプログラムを終了し、結果を保存する。
- (9) 計測値を用いて補正值で割り、実際の風速値に修正し、超音波風速計のデータと比較する。

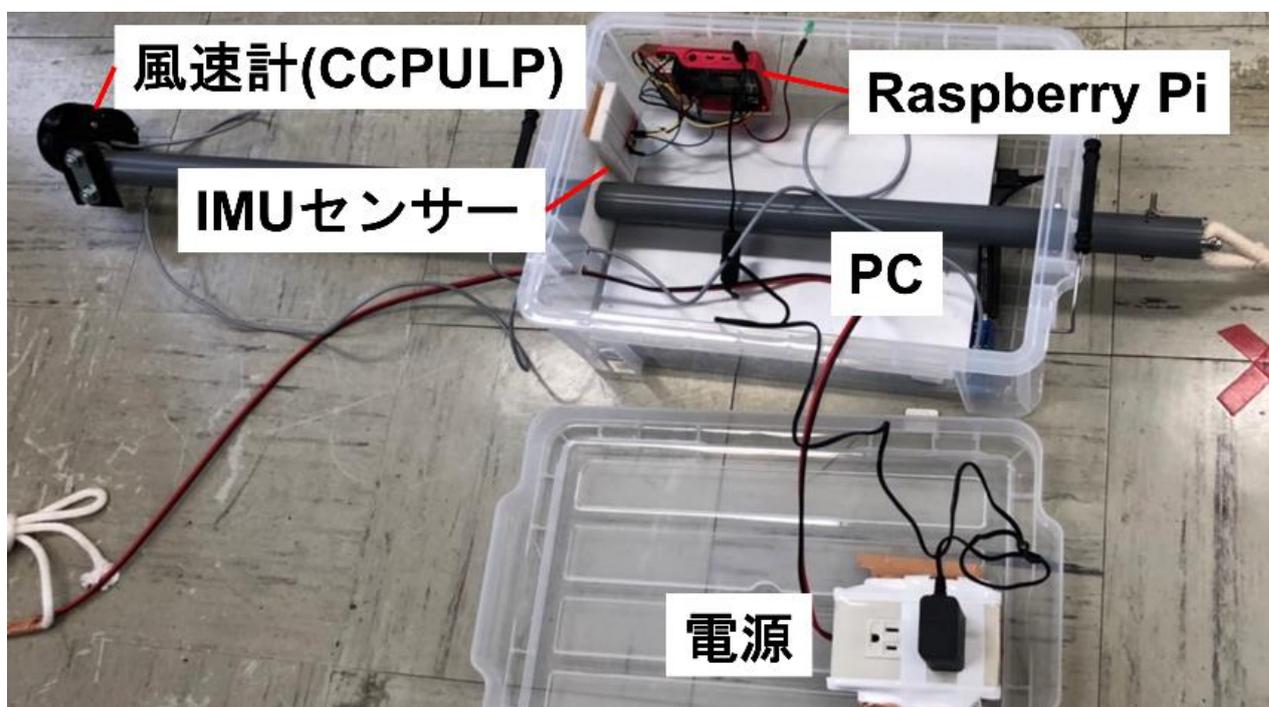


図 2.23. IMU センサー，パソコン収納箱

第3章 実験結果及び考察

3.1 風況計測

計測は2022年1月7日10時から約2.5時間行った。図3.1に気球が地面に衝突した時の様子を示す。超音波風速計と気球を用いた風況計測で測定したデータを比較した実験結果を図3.2に示す。計測結果のサンプリング周波数は1 Hzである。気球のペイロードは6 kgまでだが、計測機器の重量は3.43 kg、気球と紐、テザーの重量を含めた場合、重量オーバーであることから、気球一つでは浮上せず気球を二つ取り付けた。気球がG館屋上の超音波風速計と同様の高度に上がった12時からの約40分間は超音波風速計と似た傾向のデータが取得されたが全体的に精度が良くなかった。原因として気球は球形状であると風に流されてしまうため、安定せず高度が下がってしまったと考える。12時40分以降は風速計とPCを繋ぐコードが断線していたためデータが計測できていなかった。原因は気球が風で流されることで紐と一緒に巻き付けていたテザーに一瞬、応力がかかったことが原因だと考える。



図3.1. 気球地面に衝突 (2022/1/7)

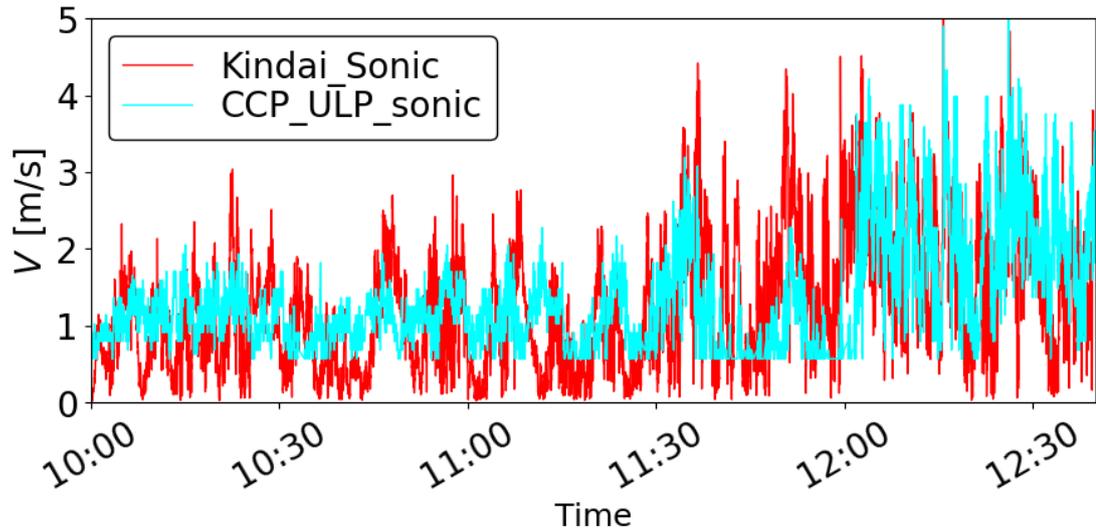


図 3.2. 風速比較 (2022/1/7)

3.2 風洞実験

計測した各迎角時の抗力，揚力から抗力係数 C_D ，揚力係数 C_L を求め，その関係をそれぞれ形状ごとに図 3.3，3.4，3.5 に示す．抗力係数 C_D ，揚力係数 C_L はそれぞれ式 3，式 4 で求めた⁵⁾．

$$C_D = D \div \frac{1}{2} \rho U A \quad (3)$$

$$C_L = L \div \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (4)$$

ここで， D ， L は実験で得られた抗力，揚力， ρ は密度， U は主流速度である．比較実験の結果から図 3.3(a)の球形の形状の場合 C_D は 0.067 ，(b)の場合 C_D は 0.026 でどちらも揚力が発生してない．図 3.4(a)の 1 対 2 の楕円形の場合，最大揚力 0.68 は迎角 35° ，(b)の場合，最大揚力 0.82 は迎角 35° で観察された．図 3.5(a)の 1 対 4 の楕円形の場合，最大揚力 4.93 は迎角 25° ，(b)の場合，最大揚力 6.49 は迎角 30° で観察された．

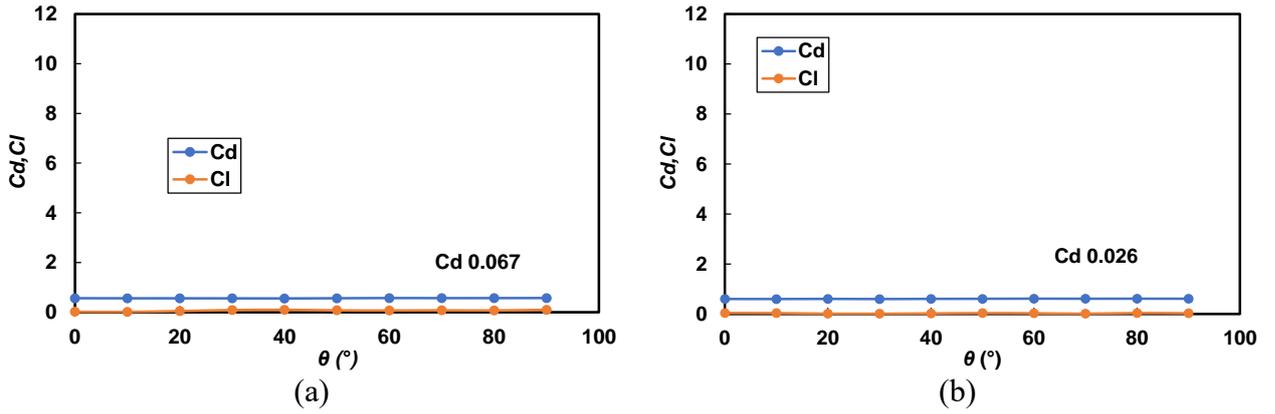


図 3.3. 測定した C_D , C_L と迎角 θ の関係(球).

(a). 風速 5 m/s , (b). 風速 10 m/s.

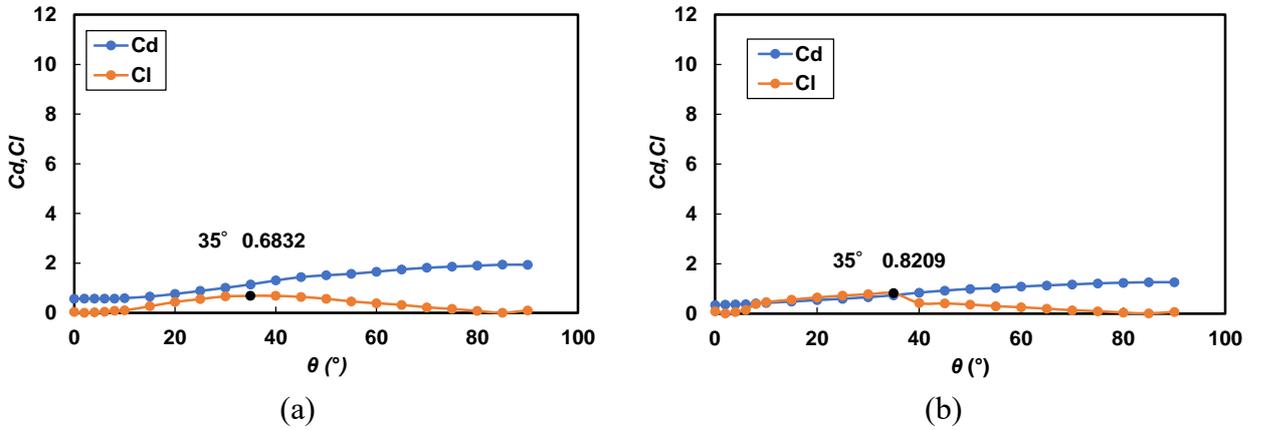


図 3.4. 測定した C_D , C_L と迎角 θ の関係(1:2 楕円).

(a) 風速 5 m/s , (b) 風速 10 m/s.

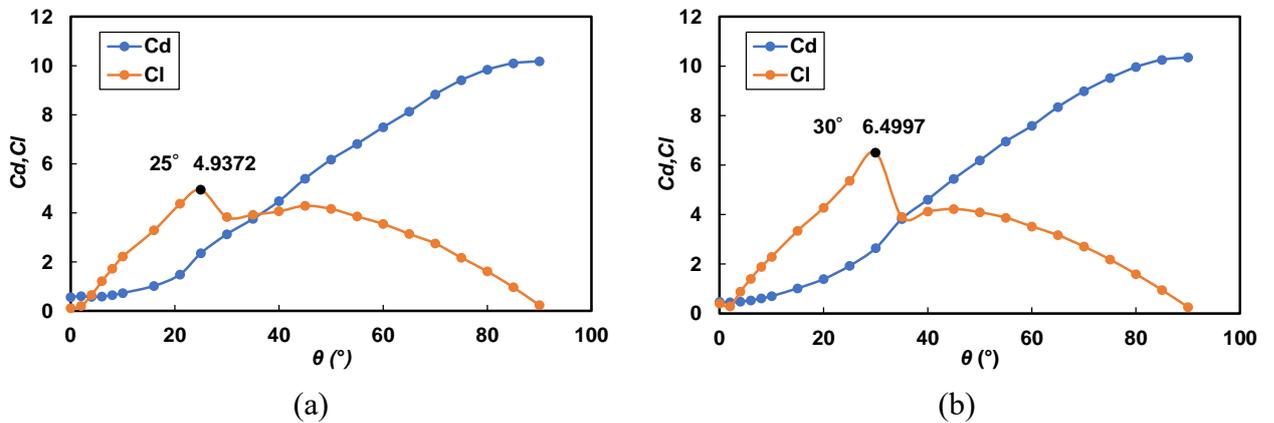


図 3.5. 測定した C_D , C_L と迎角 θ の関係(1:4 楕円).

(a) 風速 5 m/s , (b) 風速 10 m/s.

続いて、計測したデータから復元力を算出し、風による抗力を受けた際の気球の回帰力を求めた。復元力 F_R 、回帰力 F_B は次式より求めた。

$$F_R = F_L \sin \theta \quad (5)$$

$$F_B = F_R - F_D \cos \theta \quad (6)$$

図 3.6 に気球の水力直径 100mm の風向に対する復元力の変化を示す。球形の気球は風で流

された際、迎角による変化はなく、揚力が得られないため復元力は 0 で元の位置に戻ることができない。これに対して、楕円形の場合、揚力による長軸方向の復元力が発生する。1 対 2 の楕円形では最大復元力 0.3489 は迎角 35° と多少の復元力が得られる。1 対 4 の気球形状では最大復元力 1.681 は迎え角 30° と大きな復元力が得られた。

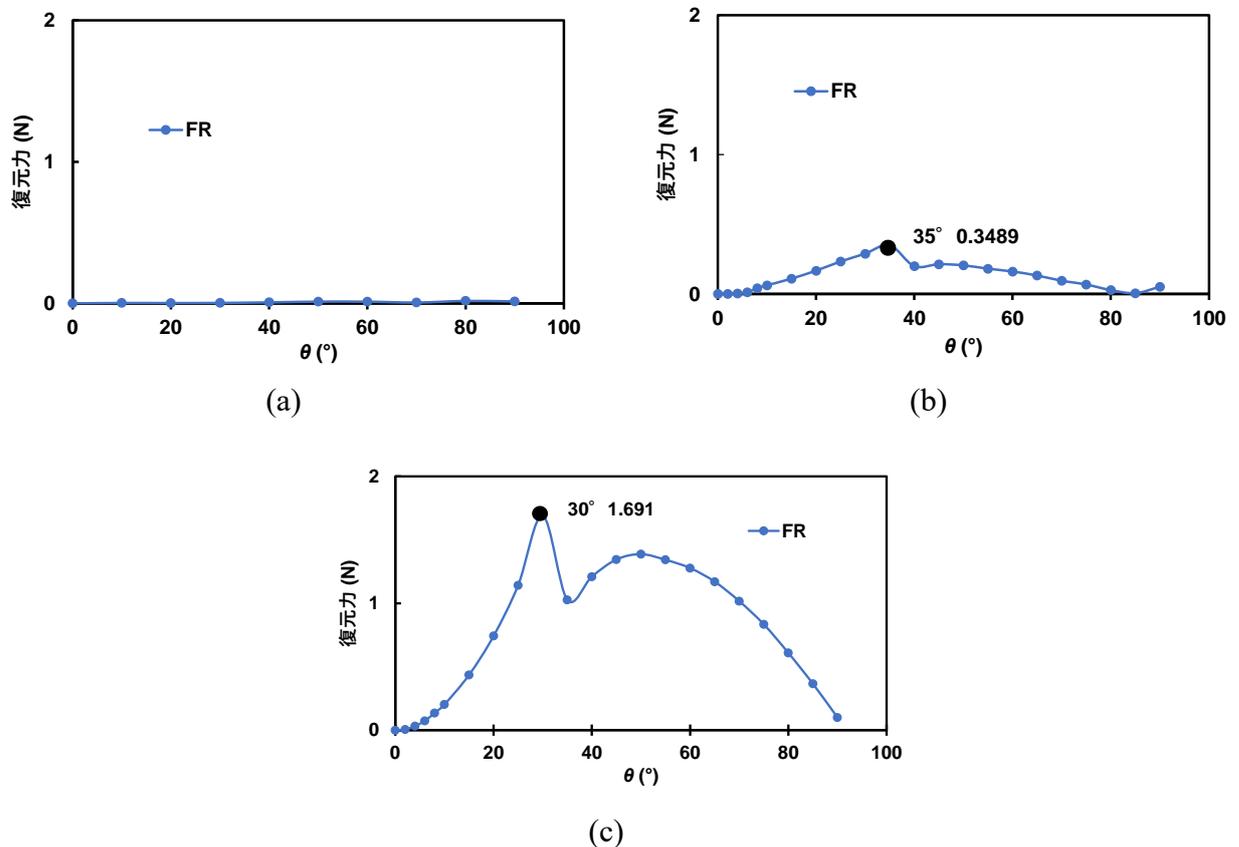
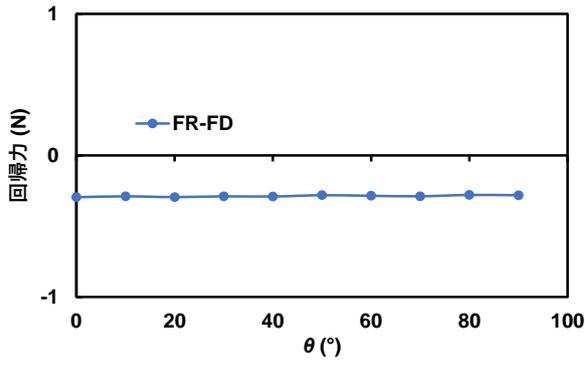
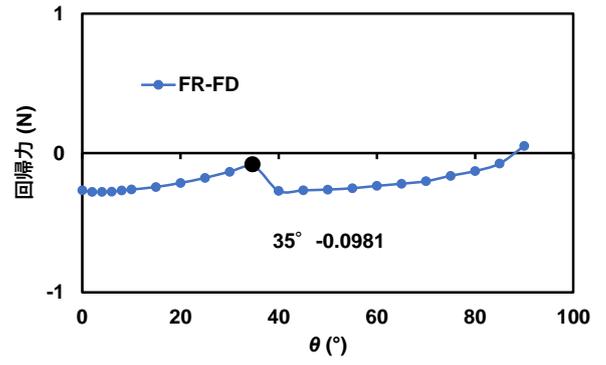


図 3.6. 風向に対する復元力の変化($d=100\text{mm}$).
(a) (球), (b) (1:2 楕円), (c) (1:4 楕円).

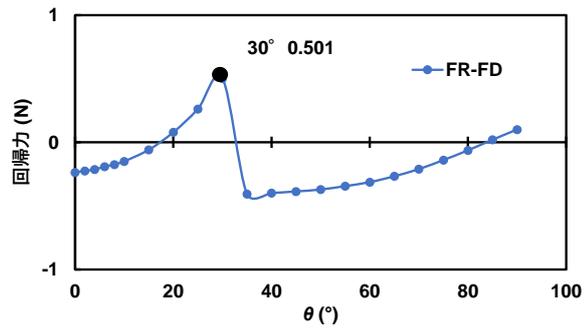
図 3.7 に気球の水力直径 100mm の風向に対する回帰力の変化を示す。球形の気球は揚力が得られないため復元力は発生しない。従って回帰力がなく、風が吹く方向へ流されてしまう。これに対して、楕円形の場合、揚力による長軸方向の復元力が発生するため、回帰力が得られる。理論上、気球は 45° 以上傾くことはないとされているため、 45° から 90° までの値は無視する。1 対 2 の楕円形では最大回帰力は迎角 35° の時、 -0.0981 と多少の回帰力が得られる。1 対 4 の気球形状では最大回帰力は迎角 30° の時、 0.601 と大きな回帰力が得られた。図 3.7 を見ると、1 対 4 の気球形状は最大回帰力が最も高く、最小回帰力は球形状、1 対 2 楕円形状とさほど変わらない。従って、1 対 4 楕円形状が最も風の影響を受けず安定することがわかる。



(a)



(b)



(c)

図 3.7. 風向に対する回帰力の変化($d=100\text{mm}$).

(a) (球), (b) (1:2 楕円), (c) (1:4 楕円).

第4章 結言

本研究では気球を用いて風況計測を低コストで実現することを目的に気球による高空風況計測システムの開発を行った。気球形状の影響評価では、気球の安定性向上のため、水力直径を等しく設計した球形状、1対2楕円形状、1対4楕円形状の3種類の気球模型を製作し可変風速型風洞装置を用いて比較実験を行った。計測として気球模型に働く抗力、揚力から空力特性の評価を行った。結果として、1対2楕円形状は多少の揚力が得られた。1対4楕円形状は高い揚力を得ることができたがその分抗力も大きくなった。気球を用いた風況計測では球形状の気球を用いたが、やはり揚力を得られないため風に大きく揺られ高度を維持できない課題がある。今回の実験においても、風に煽られた気球が高度を下げたことが原因で、風速計が地面と衝突しコードが断線したため、長時間のデータ取得ができないといった問題が発覚した。ウィンチから気球計測システムまでの給電の目的に設計したスリップリングでは、リングとブラシの精度が悪く接点に隙間ができてしまい、瞬断するという課題があったが、リングとブラシをウィンチの軸に合わせて設計し、機械加工にすることで解決することができた。

今後の課題として、本研究では球形状、1対2楕円形状、1対4楕円形状の3種類の気球模型を比較しての空力特性の評価だったが、1対4楕円形状と同等の揚力が得られ、1対2楕円形状並みの抗力しか受けない最適な気球形状を調査する必要がある。気球を用いた風況計測では使用する気球の形状を得られる回帰力が最も良い1対4楕円形状に変え、気球の安定性をより向上させ、長時間の風況計測を行えるよう改良が必要である。気球の動揺に対する安定性の向上、ペイロードを軽くすることが課題であげられる。気球の動揺に対する安定性の向上では、気球を風の影響を受けにくい形状に変えること、現在ウィンチから一本出ている紐とは別に気球に紐を結び動揺を軽減する方法が考えられる。

謝辞

本研究にあたり，浮揚システムの開発,気球を用いた風況計測に関して，ジェイ・プラカス・ゴイト氏，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) 再生可能エネルギーとは | 水素発電、洋上風力発電を詳しく解説 | クリエイト転職
- 2) NEDO：国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦—プロジェクト現場レポート—洋上作業工程
- 3) 草谷大郎、藤井裕矩、川崎天揮、富田 匠、黒田将茂、角舘李果,日本風力エネルギー学会,高空風力発電用の繫留型加圧膜袋構造航空機の検討,2015
- 4) Ben B. BALSLEY, The CIRES Tethered Lifting System:a survey of the system, past results and future capabilities, Acta Geophysica vol. 56, no. 1, pp. 21-57
- 5) 児島忠倫、清水誠二、蝶野成臣、西尾正富,エース流体の力学,朝倉書店,1999,p59,120-121
- 6) ヒカリ電子工業株式会社,<http://www.hikari-slipring.co.jp/publics/index/43/>
- 7) r02fj_shiryou1.pdf (meti.go.jp)
- 8) 長久泰樹,高空風況計測用気球挙動評価システムの開発,近畿大学工学部,2021

令和3年度 卒業研究論文

風洞実験による高空風況計測用気球の空力特性の評価

圓明 聖也