

全天候型 UAV を用いた 高層気象観測手法の基礎的研究

一般社団法人北陸地域づくり協会

第 28 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業

(報告書)

令和 6 年 (2024 年) 3 月

富山県立大学

大日本ダイヤコンサルタント株式会社

株式会社フルテック

研究代表者 吉見和紘

目次

1. 背景	1
2. 目的	3
3. 研究フロー	3
4. 予備実験	4
4.1. 使用した実験室	4
4.2. 予備実験の概要	5
4.3. 予備実験手順	7
4.4. 予備実験結果	8
4.4.1. 10分間における実験室内の雨量分布	8
4.4.2. 風速測定結果	9
4.4.3. 風速を変化させた際の設定雨量, 場所ごとの結果	11
4.4.4. 全天候型ドローンの飛行条件	12
5. 室内実験	13
5.1. 室内実験の概要	13
5.2. 室内実験手順	15
5.2.1. 画像解析	16
5.2.2. 落下速度の解析	22
5.3. 室内実験結果	24
5.3.1. 地上測定と空中測定の比較	24
5.3.2. 観測可能条件及び課題点	27
6. まとめ	27
7. 今後について	27
7.1. 実験での課題	27
7.2. 解析での課題	28
7.3. 今後の展望	28
謝辞	29
参考文献	29

1. 背景

現在、様々な観測機器を用いて気象観測が行われている。図-1は様々な気象観測手法について示したものである。気象観測機器における水平分解能、時間分解能、観測高度の3軸をとり、それに対する気象観測機器をプロットしている図である。この図で示されているように気象観測では、気象レーダ、静止気象衛星、アメダス(AMeDS)、ウインドプロファイラなどを用いた観測が行われている。地上の気象観測においては、全国にアメダスが設置されており、空間的に密な観測が行われている¹⁾。上空の気象観測においてはゾンデ、ウインドプロファイラ、気象レーダ等による観測が行われている¹⁾。

上空の気象情報は、天気予報や航空機の運航のためや大気現象の把握に使われるだけでなく、降雨、降雪等の気象予測や気象レーダで用いられる降水強度推定式の補正に使われるなど、防災面において重要な役目を担っている²⁾。

上空の降水粒子観測手法に注目すると、ゾンデや気象レーダ等を用いて観測が行われている。

しかしながら、現在の上空の気象観測手法はいくつか課題が挙げられる。ゾンデにおいては多くの気象要素を観測することができるが、ゴム気球に観測機器を吊るして飛ばすため、風等の天候状況に左右されやすく、任意の緯度経度高度において観測が行えないこと、1日2回程度しか観測を行わないため、任意の時間の気象データを取得するのが難しいことなどが挙げられる。

加えて、空間分解能の低さが課題として挙げられる。AMeDASの観測地点(左図)及びゾンデの観測地点(右図)を図-2に示す。図-2左図はAMeDASの観測地点が青の点でプロットされており、図-2右図はラジオゾンデの観測地点をオレンジの点でプロットしている。これをみると、AMeDASの観測地点(図-2左図)は密に観測地点が設置されているのに対し、ゾンデの観測地点(図-2右図)は非常に少なく、空間分解能がAMeDASと比べて低いことが分かる。

気象レーダにおいては、観測網は十分であるが観測データは推定式によって算出された降雨強度であり、気象データの扱いにくさやデータ品質の課題、降水粒子を直接観測できないことなどが課題として挙げられる。また、気象レーダの観測は河川管理という観点から地上の観測が主として行われており、上空の気象情報の活用がなかなか進まない現状が挙げられる。

これらの課題より、現在の上空の降水粒子観測手法では上空の降水粒子を定量的に評価することが難しい課題が挙げられる。そのため、上空の気象における新たな観測手法を確立することが必要である。

また、近年、ドローンを用いた気象観測が注目されている。WMO(世界気象機関)により、UAS Demonstration Campaignが実施されている。ここでUASはUnmanned Aircraft Systemの略であり、無人航空機システムのことを指す。この取り組みにより、ドローン等を用いた研究が推進されている。また、先行研究において、霧、風、温度などドローンを用いた様々な気象観測手法が提案されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

そこで、ドローンを用いた観測手法に着目した。ドローンは技術開発において著しい発展を見せており、悪天候下の中でも安定した飛行が可能な全天候型ドローンが開発されている⁸⁾。加えて、ゾンデにおいてはビデオゾンデの一種であり、上空の粒子画像と落下速度を測定できる測器として「Rainscope」が開発されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

そこで新たな降水粒子の観測手法として全天候型ドローンにRainscopeを搭載した観測手法に着目した。

ドローンに観測機器を搭載して気象観測を行っている研究はいくつかあるが⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾、ドローンを用いて任意の定点で降水粒子を観測した例は報告されていないため、これが実現することで降水強度推定精度向上、上空の粒子判別等への寄与が期待される。

しかしながら全天候型ドローンに Rainscope を搭載した降水粒子観測手法の課題として、ドローンを用いて降水粒子を観測した例はなく、ドローンを用いて降水粒子の観測が行えるかが不明である。そのため、任意の雨量、風速を設定できるような場所で同じ風雨環境下での地上観測、空中観測を行い、観測が可能であるかを確認する必要がある。

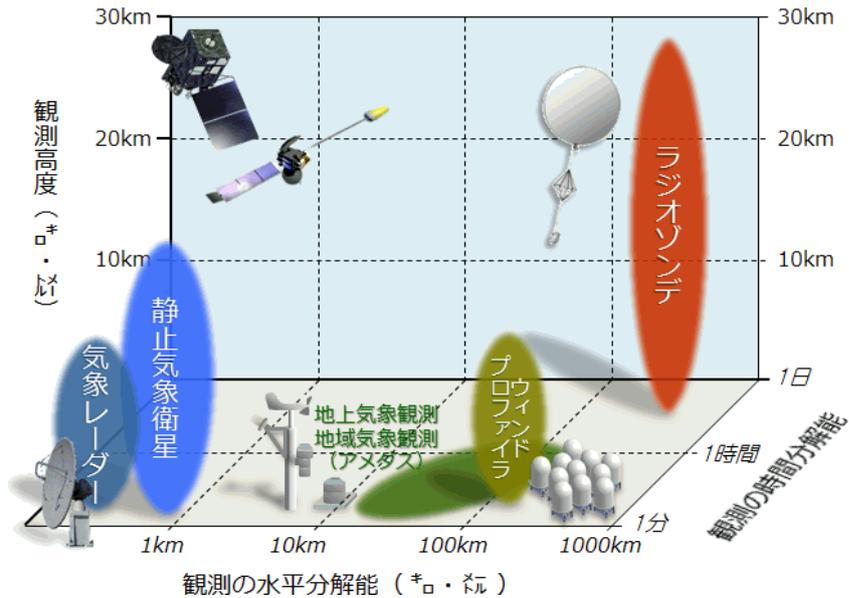


図-1 様々な気象観測の概要¹⁾

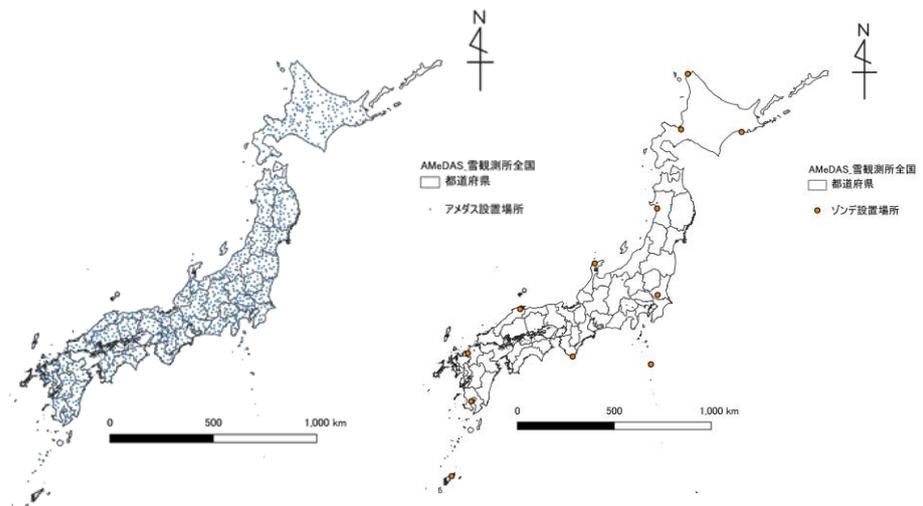


図-2 AMeDAS の観測地点(左図)及びラジオゾンデ³⁾の観測地点(右図)



図-3 UAS Demonstration Campaign

2. 目的

現在の上空の降水粒子観測手法では、ゾンデにおいては定点での観測が困難な点、気象レーダにおいては降水粒子を直接捕捉できない点などが挙げられ、上空の降水粒子を定量的に評価することができない課題が挙げられる。この課題を解決するには、新たな降水粒子観測手法を開発することが必要である。

そこで、新たな降水粒子観測手法として全天候型ドローンと Rainscope を用いた降水粒子観測手法に着目し、課題解決を図ろうと考えた。富山県の産業技術研究開発センターには任意の環境(日射、風雨、豪雨等)を再現できる生活環境シミュレータ室が設置されており、この実験室を用いて任意の環境下で室内実験を行おうと考えた。

本研究では Rainscope を搭載した全天候型ドローンを用いて、室内実験を行い、新たな降水粒子観測手法について検討した。地上測定と空中測定の結果を比較することで、全天候型ドローンを用いた降水粒子観測手法の観測可能な条件及び課題点を整理することを目的とした。

3. 研究フロー

研究のフローを図-4 に示す。全天候型ドローンを用いて室内実験を行うためには使用する実験室の環境場を知ることと全天候型ドローンの飛行場所を決定した上で観測を行う必要がある。そこで予備実験を行い、使用する実験室の環境の把握と全天候型ドローンの飛行条件を決定する。

その後、予備実験の結果より決定した飛行条件で室内実験を行う。実験結果に対しては解析を行う必要があるため、解析アルゴリズムを用いて解析を行い、結果を比較する。その後、全天候型ドローンを用いた降水粒子観測手法の観測可能な条件及び課題点を整理する。

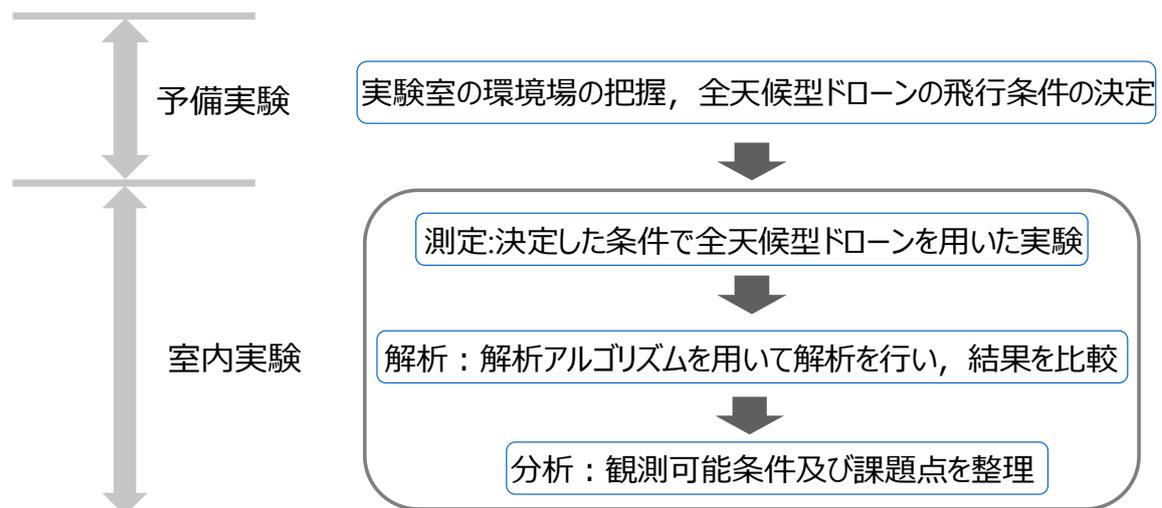


図-4 研究のフロー

4. 予備実験

4.1. 使用した実験室

予備実験を実施した実験室は、富山県の産業技術研究開発センター(以下、産技研)にある生活環境シミュレータ室を用いた(写真-1)。生活環境シミュレータ室は、人間が遭遇すると想定される屋外・屋内の温湿度環境や極限環境(日射, 風雨, 豪雨等)を再現できる装置を備えた実験室である¹³⁾。実験室の概要を表-1に示す。実験室の寸法は、幅約6m×5m, 高さ約3mである。降雨面積は実験室の中央の場所となっており、水色の○で示されている降雨装置より生成された雨が3m×3mの範囲内で降る。降雨強度は10~100mm/hまで10mm/hごとに変化させることが可能である。仕様値では降雨装置から生成される雨滴の粒径は0.5~1.5mmの範囲の大きさであるとされている。

また、オレンジ色の○で示されている気流装置により風が生成され、0.5m/s~11m/sまで変化させることが可能である。



写真-1 生活環境シミュレータ室

表-1 実験室の仕様

項目	仕様	
試験室寸法	5800 × 4900 × 3150 mm($W \times D \times H$)	
降雨装置	降雨面積	3000 × 3000 mm($W \times D$)
	降雨量	10~100 mm/h
	雨滴平均粒径	0.5~1.5 mm
気流装置	気流範囲	0.5 ~ 11 m/s

4.2. 予備実験の概要

実験室の環境場と全天候型ドローンの飛行条件を決定するため、予備実験を行った。予備実験では雨量計5台と風速計1台を用いた(写真-2)。

雨量計は、雨量を1分ごとに分解能1mmで観測可能な転倒ます型雨量計を用いた。風速計は、風速を10分ごとに分解能0.1m/sで観測可能な風速計を用いた。観測されたデータは雨量計、風速計に接続されたロガーに保存される。

出力されるデータは、どちらもcsv形式のファイルとして出力される。雨量計のロガーから出力されたcsvファイルの一例を表-2に示す。雨量計のロガーから出力されるcsvファイルは、1列目に日付、2列目に時刻、3列目に雨量値(mm)が出力される。雨量値は転倒ますが傾き、電子信号が送られた回数が記録

されている。転倒しますが一度傾くと 1 mm の雨量であるため、出力された回数をそのまま換算し、これを雨量値とした。風速計のロガーから出力される csv ファイルの一例を表-3 に示す。1~5 列目に観測時間、6 列目に風向、7 列目に風速(m/s)、8 列目に最大風速(m/s)、9 列目に測定を開始してからの時間、10 列目に開始位置からの風向、11 列目に雨量値が出力される。なお、今回の実験では風速のみを観測できる風速計を用いているため、6 列目の風向、10 列目の風向、11 列目の雨量値は今回の実験では出力されない項目である。そのため、実際に観測結果として得られるデータは、観測日時、風速(m/s)、最大風速(m/s)、測定開始からの時間である。



写真-2 使用した雨量計(左)及び風速計(右)

表-2 雨量計のロガーから出力される csv ファイル

日付	時刻	雨量
		mm
2023/7/27	9:40:00	4
2023/7/27	9:41:00	1
2023/7/27	9:42:00	0
2023/7/27	10:12:00	2
2023/7/27	10:13:00	5

表-3 風速計のロガーから出力される csv ファイル

年	月	日	時	分	風向	風速	最大	起時	風向	雨量
2023	8	1	0	10	360	0	0.9	0:0	360	0
2023	8	1	0	20	360	0	0.9	0:10	360	0
2023	8	1	0	30	360	0	0.9	0:20	360	0
2023	8	1	0	40	360	0	0.9	0:30	360	0
2023	8	1	0	50	360	0	0.9	0:40	360	0
2023	8	1	1	0	360	0	0.9	0:50	360	0
2023	8	1	1	10	360	0	0.9	1:0	360	0
2023	8	1	1	20	360	0	0.9	1:10	360	0

4.3. 予備実験手順

予備実験の手順を示す。

図-5は予備実験のイメージ図である。地上雨量計5台をそれぞれの番号の位置に設置し、風速計は気流装置から2.35mの黒丸で示された場所に設置した。雨量計と風速計の設置後、雨量と風速を変化させながら実験を行った。

なお、雨量と風速の組み合わせについては全パターンを行うのが望ましいが時間の都合上、表-4で示す観測パターンで実施した。風速は0 m/s, 3 m/s, 7 m/sの4パターン、設定雨量は10 mm/h, 20 mm/h, 30 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/hの5パターンの中から○が付けられている雨量と風速の組み合わせで実施した。

青色で示された観測パターンにおいては設定雨量の違いに対する比較を行うため、風速無しの実態で実施した。

また、設定風速と実測値との差を確認するために、降雨無しの実態で風速を変化させ、実施した。風速計のロガーから出力される風のデータは「風速(m/s)」と「最大風速(m/s)」が出力されるが予備実験では10分間の平均風速である「風速(m/s)」の値を使用するものとし、「最大風速(m/s)」は使用しないこととした。

赤色で示された観測パターンにおいては雨量は60 mm/hで固定し、風速の変化に対する比較を行った。

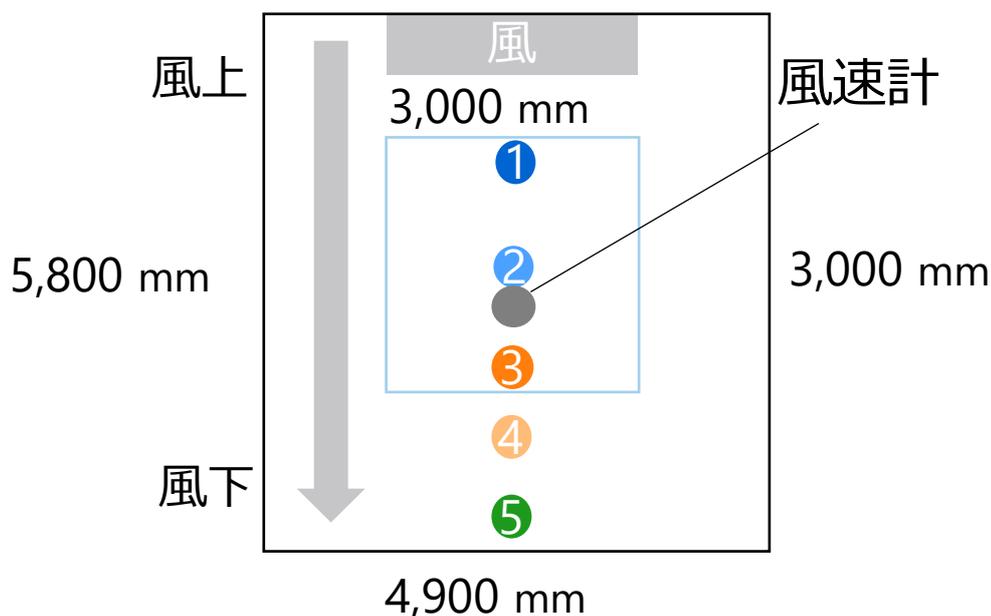


図-5 予備実験のイメージ図

表-4 予備実験の観測パターン

風速(m/s) 雨量強度(mm/h)	0	3	5	7
10	○			
20	○			
30	○			
40	○			
60	○	○	○	○

4.4. 予備実験結果

4.4.1. 10分間における実験室内の雨量分布

どの設定雨量に対しても降雨が観測される場所を探すため、設定雨量を変化させ、実験を実施した。雨量計5台の設置場所が各番号の場所に置かれており、風速計が黒丸で示した場所に設置されている。

また、風速0 m/sにおける10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mmにおける設定雨量、場所ごとの雨量強度を図-6に示す。横軸に設定雨量、縦軸に雨量強度をとり、設定雨量で10分間観測した時の雨量値を基準値として赤の枠線で示しており、雨量計1~5における結果をそれぞれ棒グラフで示している。図-5で示されている雨量計の設置番号と図-6で示している雨量計の棒グラフの色合いと対応するようにプロットしている。ただし、ここでの雨量強度はmm/hではなく、mm/10minである。

雨量計1をみると、降雨強度の弱い10mm/hや20mm/hの設定雨量に対しては0を示しており、降雨が観測されなかったが30mm/h、40mm/hに対しては降雨が観測されていた。

雨量計2をみると、どの設定雨量に対しても降雨が観測されていた。

雨量計3をみると、降雨強度の弱い10mm/hや20mm/hの設定雨量に対しては0を示しており、降雨が観測されなかったが30mm/h、40mm/hに対しては降雨が観測されていた。

雨量計4をみると、設定雨量10mm/h、20mm/h、30mm/hでは0を示していたが、40mm/hの場合においては降雨が観測されていた。また、雨量計5の結果はどの設定雨量に対しても0を示していた。雨量計4、5は降雨面積と定義される範囲外に対して設置している。そのため、この実験結果より、設定雨量が強くなることによって降雨面積外にも雨が降ることが分かった。

これらの結果より、雨量強度が弱い10mm/hや20mm/hにおいては雨量計の値が0を示している箇所も見られたが雨量強度が変化した場合も雨量計2では降雨が観測されていた。

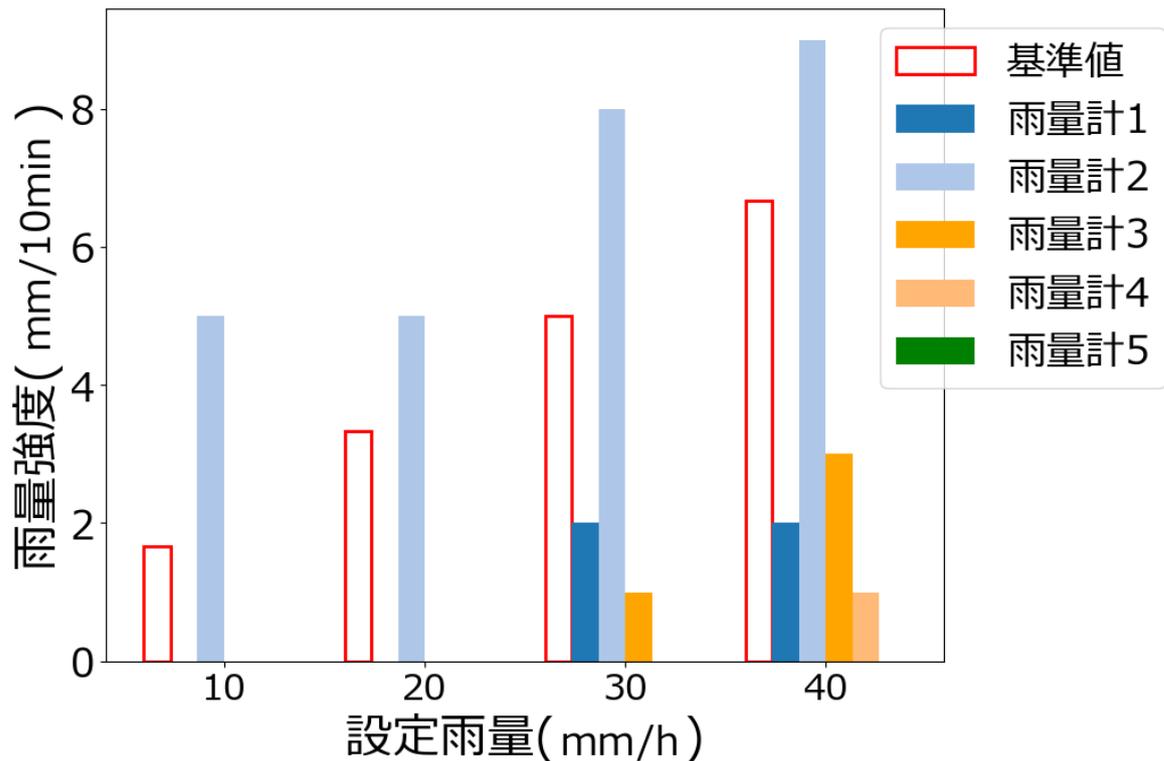


図-6 10分間における設定値，場所ごとの雨量強度

4.4.2. 風速測定結果

実験室の設定風速と実測値の差を確認するために風速計を用いた実験を実施した。

図-8 に産技研により測定された結果と今回測定した実験結果を示す。横軸に風速に対する設定値の割合、縦軸に風速の値をとり、産技研による測定結果を赤の点で、測定結果から求めた近似直線を赤の直線で示す。今回測定された値を青の点、測定結果から求めた近似直線を青の直線で示す。設定値を%としているのは実験室の仕様である。100%の場合最大風速 11 m/s となる。

産技研の測定結果及び近似直線と今回の実験結果及び近似直線について比較すると、産技研で測定された風速の値よりも実験で測定された風速の値が小さいことがわかり、産技研の測定結果と今回の実験の測定結果が異なっていた。

また、風速計の設置場所について図-7 に示す。図-7 の左図に示すのが、産技研による測定の際の風速計の設置場所であり、気流装置から 1m の場所に設置していた。図-7 の右図に示すのが、今回の風速計の設置場所であり気流装置から 2.35 m の場所に設置していた。産技研による設置場所と異なる設置場所で実験を行ったのは、産技研の風速計の設置場所は降雨面積外で測定された値であり、今回の実験では降雨面積内における風速の値を確認するためである。図-7 をみると、産技研で測定された風速の設置場所は気流装置から 1m 離れた位置であるのに対し、今回の実験を行った設置場所は 2.35 m 離れた場所で観測を行っているため、気流装置からの距離が異なる。よって、この距離の違いにより風速が弱くなり、測定結果に違

いが生じたと考える。

また、風速計を用いた測定を行った設置場所は先ほど 4.4.1 で示した雨量計 2 付近の場所とほとんど同じ場所であったため、以後に示す実験結果の風速の値は今回行った実験結果の値を使用することとした。

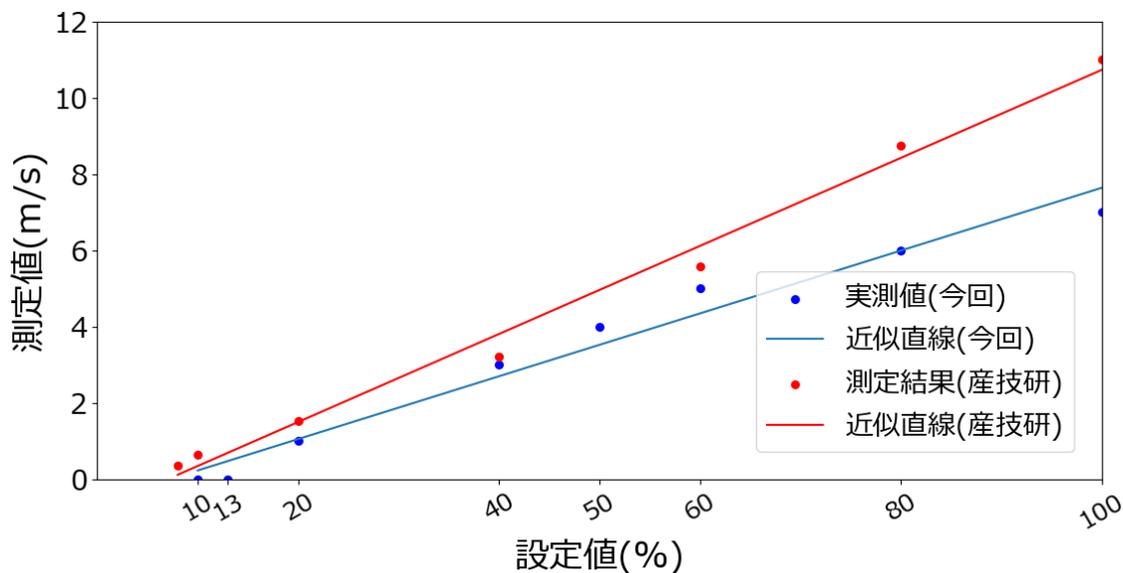
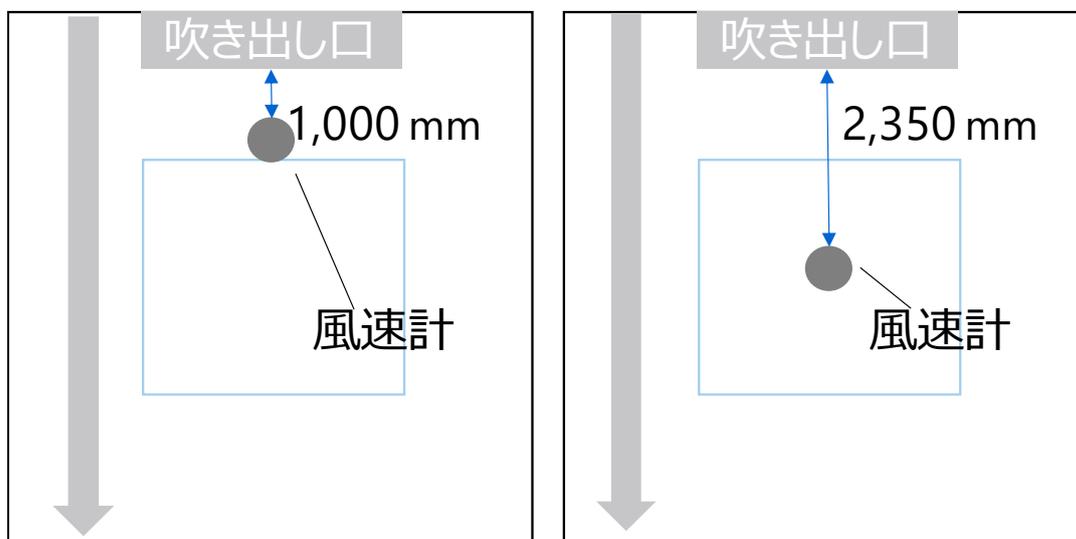


図-8 風速測定結果



産技研による測定での風速計の設置場所(左), 今回の測定での設置場所(右)

図-7 産技研による測定での設置場所(左)と今回の測定での設置場所(右)

4.4.3. 風速を変化させた際の場所ごとの結果

風速を変化させた際の場所ごとの雨量について確認するため、雨量を 60 mm/h で固定し、風速を 0m/s,3m/s,5m/s,8m/s に変化させた際の実験結果を図-9 に示す。横軸に設定風速(m/s), 縦軸に雨量強度(mm/10 min)をとり、設定雨量で 10 分間観測を行った場合における雨量値を基準値として赤の枠線で示しており、雨量計 1~5 における結果をそれぞれ棒グラフで示している。ここでの雨量強度は mm/h ではなく、mm/10 min である。また、予備実験のイメージ図を再掲する(図-5)。

雨量計 1 では、設定風速によって雨量の値にばらつきがみられた。

雨量計 2 では、設定風速が大きくなるほど雨量が減少している傾向がみられ、どの設定風速でも降雨が観測されていた。

雨量計 3 では、雨量計 2 と同様に設定風速が大きくなるほど雨量が減少している傾向がみられ、どの設定風速でも降雨が観測されていた。雨量計 2 と比較すると、観測された雨量値は低かった。

雨量計 4 では、設定風速が大きくなるほど雨量が増加している傾向がみられた。

雨量計 5 では、風速 0 m/s の場合は 0 であったが、設定風速が大きくなるほど雨量が増加している傾向がみられた。

これらより、風速が増加するほど、雨量計 2, 3 の雨量は減少し、それに対して雨量計 4, 5 の雨量が増加していることが分かる。これは風速が増加するのに伴い、雨が風上から風下に向かっていった影響によるものと考えられる。風速を変化させた場合でも雨量計 2, 3 では降雨が観測されていた。

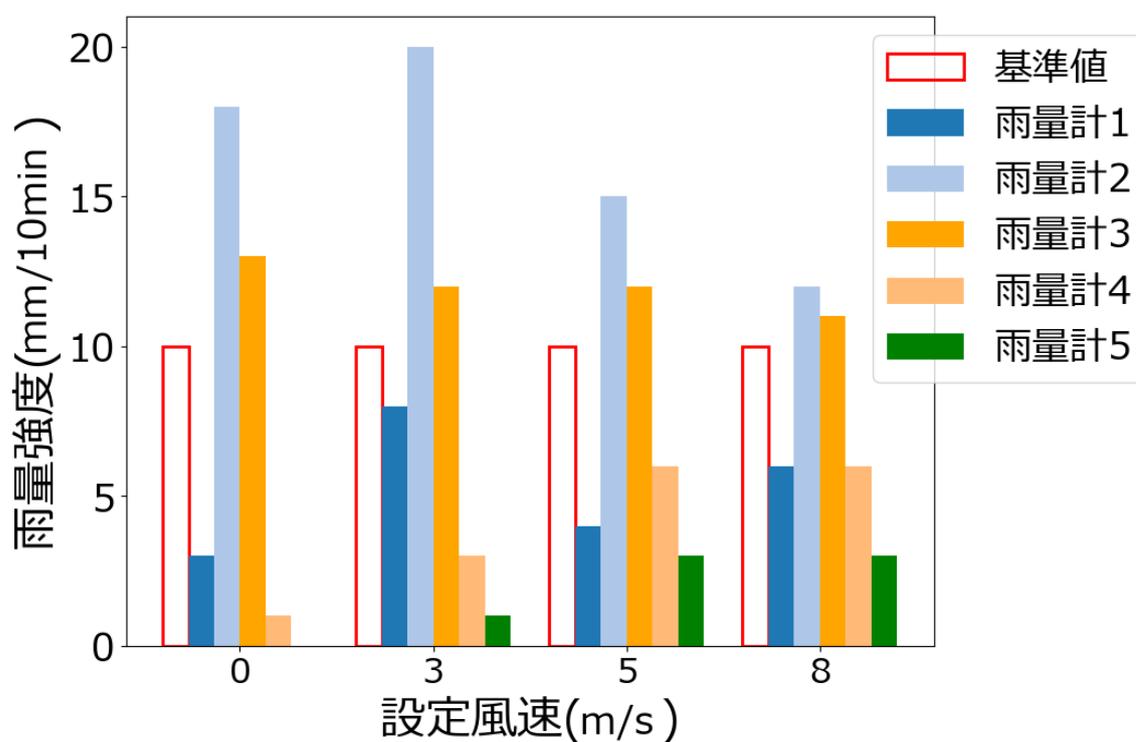


図-9 風速を変化させた際の雨量分布

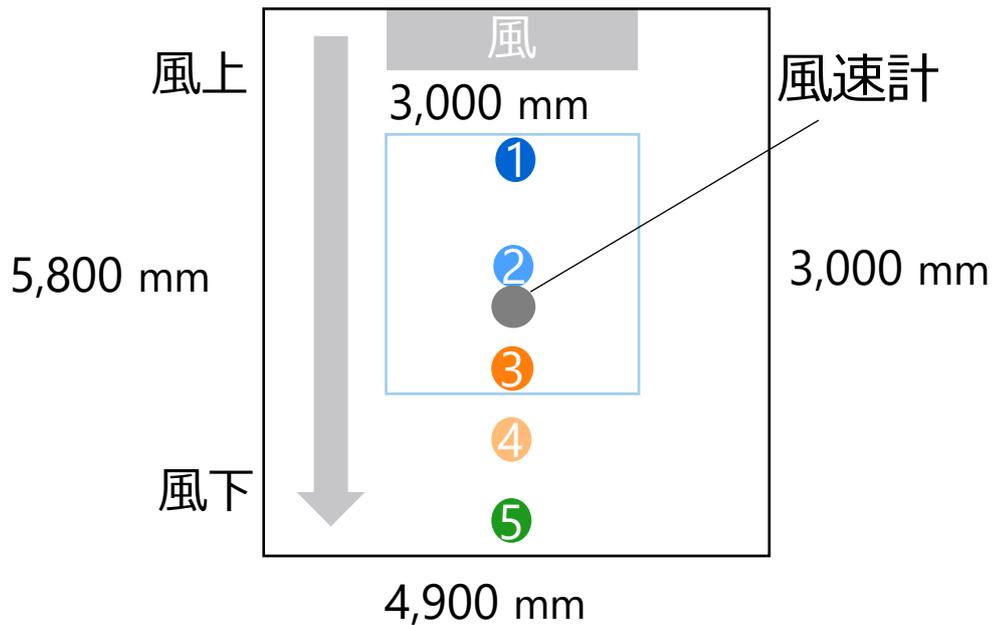


図-5 予備実験のイメージ図

4.4.4. 全天候型ドローンの飛行条件

図-6 と図-9 の結果より、全天候型ドローンの飛行場所は雨量計 2 付近とした。また、全天候型ドローンが壁に当たらない範囲であることも条件として必要であるため、壁から 1 m 離れた範囲とした。

以上より決定した全天候型ドローンの飛行条件のイメージ図を図-10 に示す。青色で囲われた範囲が降雨面積でありこの範囲内で雨が降る。ただし、全天候型ドローンが壁に当たらない範囲は実験室の壁から 1 m 離れた位置とした。図-10 に示されている②は予備実験で行った際の雨量計 2 の位置を示しており、赤枠が予備実験より決定した飛行範囲を示す。

よって、室内実験で全天候型ドローンを飛行させ、雨量を観測する位置は図-10 のオレンジ色の枠で示すように全天候型ドローンが壁に当たらない範囲かつどの設定雨量、設定風速においても降雨が観測された雨量計 2 付近とした。室内実験ではこの飛行条件で実験を行うこととした。

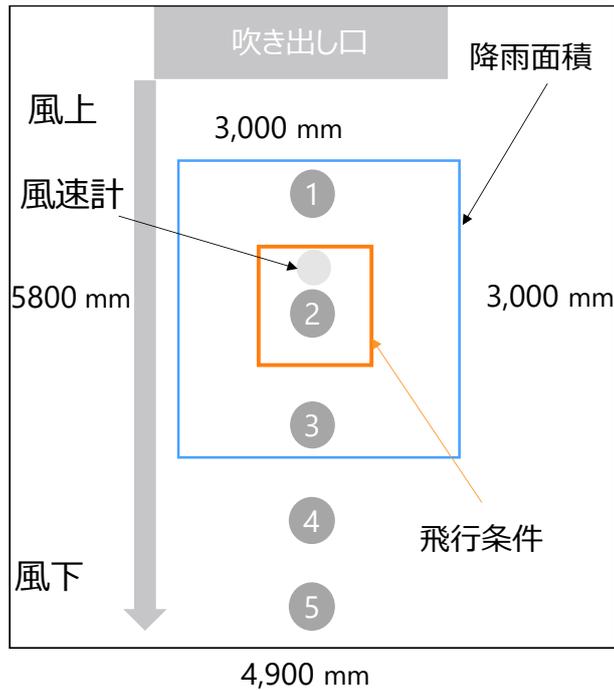


図-10 全天候型ドローンの飛行条件のイメージ図

5. 室内実験

5.1. 室内実験の概要

室内実験を実施した実験室は予備実験と同様に生活環境シミュレータ室を用いた。また、室内実験では Rainscope を搭載した全天候型ドローンを用いた。Rainscope の内部構造、外観については写真-3、写真-4 に、仕様については表-5 に示す。写真-3 左図の○で囲まれているのが Rainscope の検出領域であり、写真-4 に示すのが雨滴が通過した際に反応するシャッターセンサ、上センサ及び下センサである。写真-3 の赤枠で囲われた Rainscope の黒い部分に入った雨滴がセンターを通過した場合に写真-4 左図のカメラのシャッターが切られ、その時の粒子画像とそれに対応するフラグ情報、上下センサの通過時間が観測データとして出力される。また、画像サイズは 32 mm×24 mm であり、色調はモノクロ、解像度は 640×480 pix であり、撮影間隔は 0.5 秒間隔である。この時の撮影間隔は雨滴が検出可能な間隔を示す。また、Rainscope の内部にロガーが埋め込まれており、観測された情報はロガーに記録される。無線送信機を備えているため、無線によって PC 等に接続し、観測開始の設定や観測データの受信が可能である。ドローンは全天候型ドローンを用いた。全天候型ドローンの主な仕様について表-6 に示す。全天候型ドローンはプロペラが 8 枚のオクトコプターである。重量は 8kg 程度で、風速 15m/s 以上の風に対しても安定飛行が可能であり、防水性能を有しているため、降雨時においても観測が可能である。搭載重量は 3.4 kg までである。最大飛行速度は、10 km/h で、最大飛行時間は搭載重量にもよるが最大で 20 分程度飛行が可能である。

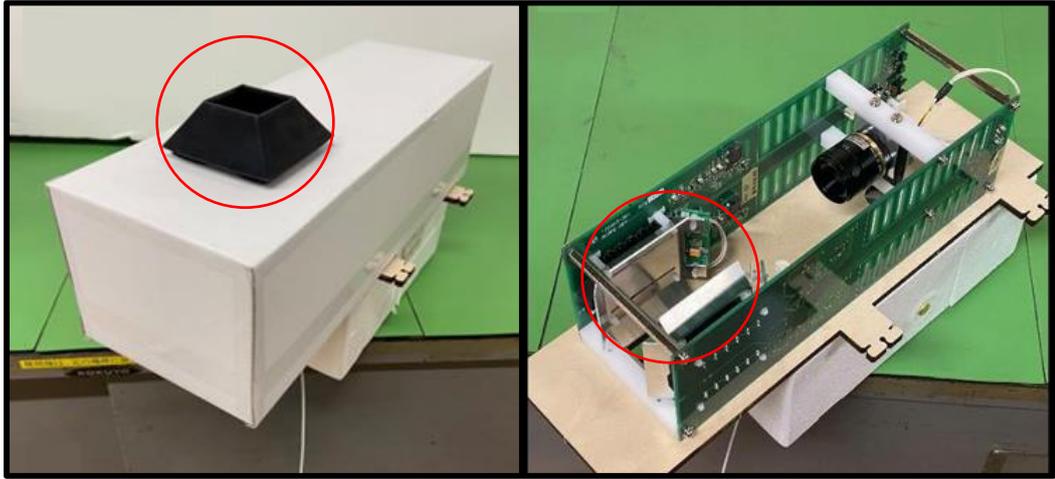


写真-3 Rainscope の外観, 内部構造

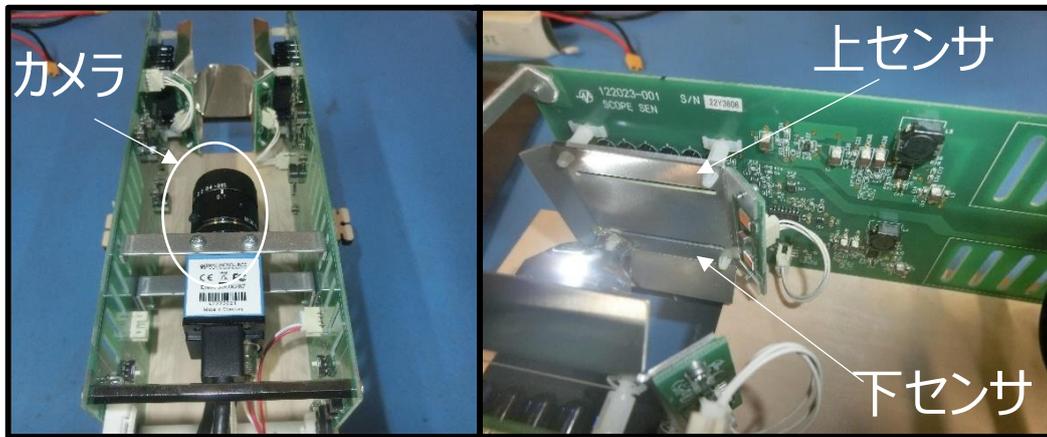


写真-4 Rainscope の内部構造

表-5 Rainscope の概要

項目	内容
画像視野	32 × 24 mm
色調	モノクロ
解像度	640 × 480 pix
撮影間隔	0.5 秒



写真-5 全天候型ドローン

表-6 全天候型ドローンの仕様

項目	内容
プロペラ数	8 枚
重量	8.4 kg
機体寸法	高さ 467 mm×軸間距離 1224 mm
搭載重量	3.4 kg
最大飛行速度	10 km/h程度
最大飛行時間	20 分程度
飛行可能風速	18~19 m/s

5.2. 室内実験手順

4.4.4 で決定した飛行条件で室内実験を行った。室内実験では、地上測定、空中測定を行った。

地上測定では、全天候型ドローンを予備実験より決定した雨量計 2 付近の位置の床面に置き、静止した状態で、降雨実験を行った(写真-6(a))。なお、この状態では全天候型ドローンは停止状態であり、プロペラは回っていない状態である。

空中測定では、全天候型ドローンを予備実験より決定した雨量計 2 付近の位置で、1 m 程度の高度で飛行させ、風速無し状態で降雨実験を行った(写真-6 (b))。

今回使用した実験室の規模では、気流装置から風を発生させた状態では全天候型ドローンを飛行させることが困難であった。そのため、機体を 10 度程度傾けた状態で傾斜台に固定し、飛行を模擬した状態で風

速有りの降雨実験を行った(写真-5(c)).

また、室内実験で行った実験パターンを表-7に示す。縦軸に雨量強度をとり、横軸に実験条件をとっており、実施した観測パターンに○を付けている。各実験条件に対して3分ずつ地上測定、空中測定を行った。なお、地上測定結果の合算値と空中測定結果の合算値に対し、比較を行った。また、以降の比較結果は地上測定では青色で空中測定ではオレンジ色で示している。

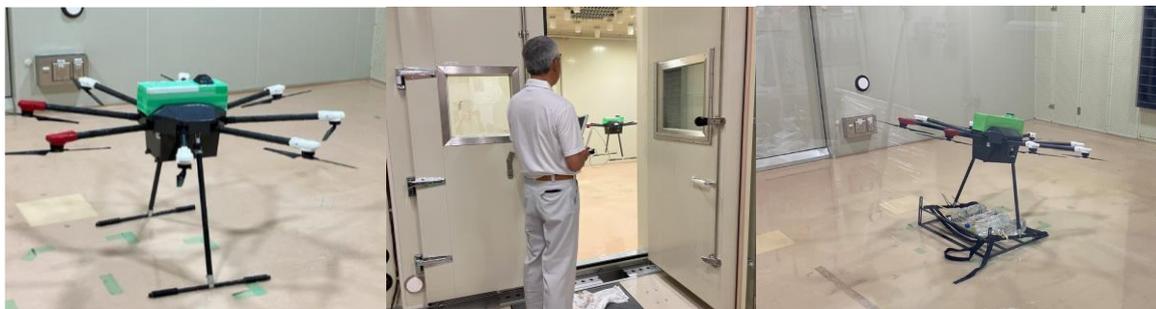


写真-6 (a)地上測定, (b)空中測定, (c)飛行を模擬した場合における実験の様子

表-7 室内実験の観測パターン

降雨強度 (mm/h)	地上測定	空中測定
10	○	○
20	○	○
30	○	○
40	○	○
50	○	○
60	○	○
70	○	○
80	○	○
90	○	○
100	○	○

5.2.1. 画像解析

図-11にRainscopeの上下センサのイメージ図を示す。上部センサと下部センサの距離の差は28mmであり、シャッターが切られるセンサは上部と下部の真ん中程度の場所にある。Rainscopeではシャッターセンサを通過した雨滴に対してシャッターが切れ、画像として出力される。Rainscopeから得られる観測データは観測された粒子の画像(図-12)が画像ファイル(png)として、それに対応するフラグ情報と上下のセンサの通過時間のデータがcsvファイル(表-8)として出力される。画像の背景は黒色になっており、矢印で示すように雨滴が通過している様子が撮影される(図-12)。出力されるcsvファイルは1行目にRainscopeのシリアル番号やカメラ設定等が出力され、2行目以降の1列目に出力日時、2列目にフレームカウント、3

列目, 4 列目に 2 秒間で撮影したカウント値, 5 列目に 2 秒間の撮影回数, 6 列目に fpga カウント値, 7 列目に 2 秒間の粒子検出数が出力される. Rainscope は一度に 10 個まで粒子検出が可能なので, 8 列目以降は粒子を P1~P10 としたとき, 粒子ごとの上センサの通過時間 Pup, 下センサの通過時間 Pdown が出力される. そのため, 8 列目に P1 up, 9 列目に P1 down, 10 列目に P2 up, 11 列目に P2 down . . . というように粒子情報が出力される.

また, 観測されたデータからは粒子画像と粒子の通過時間が出力され, これらの情報はフラグ情報によって紐づけられているが, 粒子の粒径と落下速度を算出するためには撮影された画像と通過時間の観測データに対し, 解析を行う必要がある. そのため, 解析アルゴリズムを Python で構築し, 雨滴粒径および落下速度を算出した. 作成した解析アルゴリズムのフローを図-13 に示す.

まず, 観測された粒子画像に対してエッジ検出を行った. エッジ検出は 5×5 のカーネルでガウシアンフィルタと平均化フィルタを適用し, 二値化画像を作成した. カーネルとは画像処理の際の数学的な行列または配列のことであり, 二値化画像とは画像を白と黒の 2 色のみに変換する画像処理である.

ガウシアンフィルタはガウス分布を用いて周囲のピクセルの重みづけを行うフィルタである. ガウシアンフィルタで用いられるガウス分布の関数は以下の式(1)で表される.

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここで x と y は入力変数であり, 今回の場合は x が画像の横方向の位置, y が画像の縦方向の位置に対応している. σ は x と y の標準偏差である.

5×5 のカーネルにおけるガウシアンフィルタのイメージ図を図-14 に示す. ガウシアンフィルタは真ん中の重みが最も大きくなり, 外側ほど重みが小さくなる.

また, 画像に対するフィルタを適用した際のイメージ図を図-15 に示す. 赤枠線, 赤の点線の枠線で示しているのがフィルタである. 図-15 に示すように 5×5 のフィルタを適用し, 1 ピクセルずつずらしながらフィルタを適用する.

また, 平均化フィルタはあるカーネルに対して周囲の値を平均化するフィルタである. 平均化フィルタのイメージ図を図-16 に示す. 5×5 の範囲で均等な重み付けを行っている. フィルタの適用の仕方は図-15 に示したイメージ図と同様である.

この 2 つのフィルタを用いて作成された二値化画像から雨滴のエッジ検出を行った(雨滴検出 1). なお, このアルゴリズムを適用した解析結果の画像を確認すると雨滴が写っているものの雨滴がぼやけているため, エッジ検出できなかった画像が一部みられた(図-17).

そこで, このアルゴリズムを適用した中で解析できなかったと判断された画像に対してプレヴィットフィルタを用いたアルゴリズムを適用し, 二値化画像を作成, 解析した(雨滴検出 2). プレヴィットフィルタは画像に対して境界や輪郭を強調するフィルタである. 今回用いたプレヴィットフィルタでは, 3×3 のカーネルで水平方向のフィルタと垂直方向のフィルタの 2 種類を用いた. 水平方向のフィルタ, 垂直方向のフィルタのイメージ図を図-18 に示す. 左図が水平方向に適用したフィルタであり, 下の行に 1, 真ん中の行に 0, 上の行に 1 の係数を乗じ, 画像に対し水平方向にフィルタを適用している. 右図は, 垂直方向に適用したフィルタであり, 左の列に-1, 真ん中の列に 0, 右の列に 1 の係数を乗じている. 画像に対し垂直

方向にフィルタを適用したイメージ図を図-19 に示す。左図が画像に対し水平方向にフィルタを適用した際のイメージ図、右図に画像に対し垂直方向にフィルタを適用した際のイメージ図を示している。

このように水平方向にフィルタを適用した画像と垂直方向にフィルタを適用した画像を合成し、エッジ検出を行った。

ガウシアンフィルタ、平均化フィルタを適用したアルゴリズム(雨滴検出 1)で解析できた画像、このアルゴリズムでは解析できなかったがプレヴィットフィルタのアルゴリズム(雨滴検出 2)を用いて解析できた画像の2種類を解析できた画像とした。この2つのアルゴリズムを用いても解析が行えなかった画像、誤検出により雨滴サイズが極端に大きくなってしまいう画像は解析できなかった画像として処理した。

また、降水粒子の大きさの変化による形状の変化を図-20 に示す。図-20 で示すように、雨滴は1mm程度と小さな雨滴に対しては丸の形状を保った形であるが、粒径が大きくなるほど扁平し、4mm程度では楕円形に近い形となっていくことが分かる。そのため、観測された雨滴に対しては楕円形近似を行い、雨滴の粒径を求めることとした。

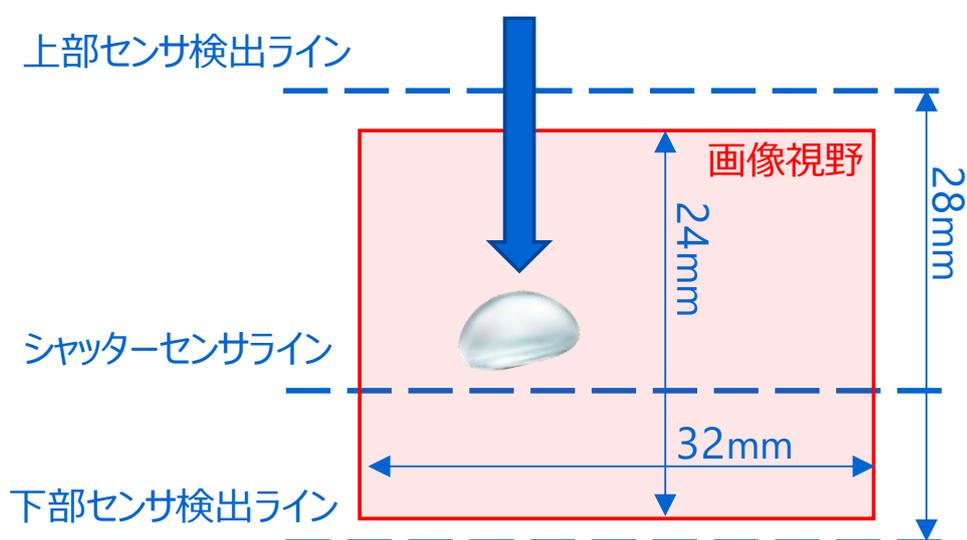


図-11 Rainscope の上下のセンサ

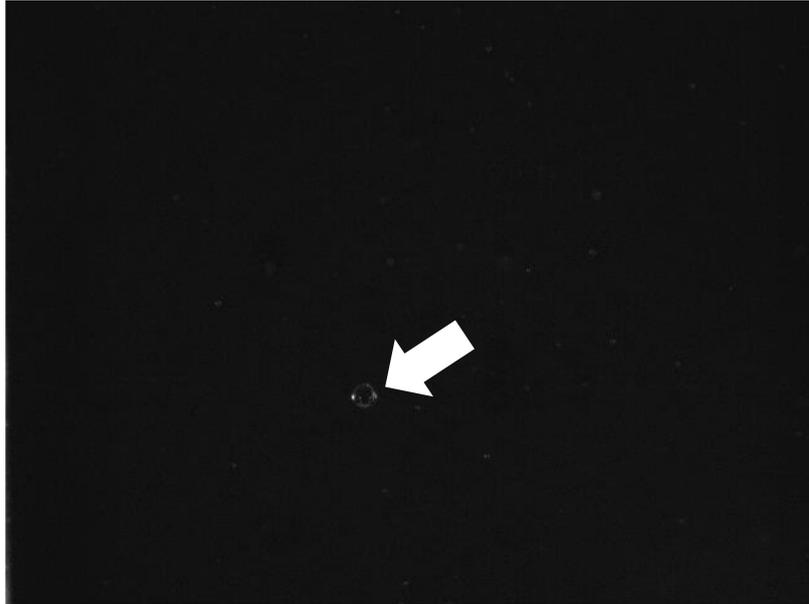


図-12 Rainscope より得られる粒子画像

表-8 Rainscope より出力される csv ファイル

RainscopeGround	SN22003	Gain=200	Brightness	Exposure=19				
PCTime(UTC)	FrameCnt	PhotoCou	PhotoCou	NumOfPh	fpga_cour	ParticleCo	P1flg	P1up
2023/12/25 1:37	0	32382	32507	126	32382	126	0	2210.1
2023/12/25 1:37	10	0	0	0	185	10	0	2.5
2023/12/25 1:37	20	0	0	0	186	10	1	17.5
2023/12/25 1:37	30	0	0	0	187	10	0	0.4

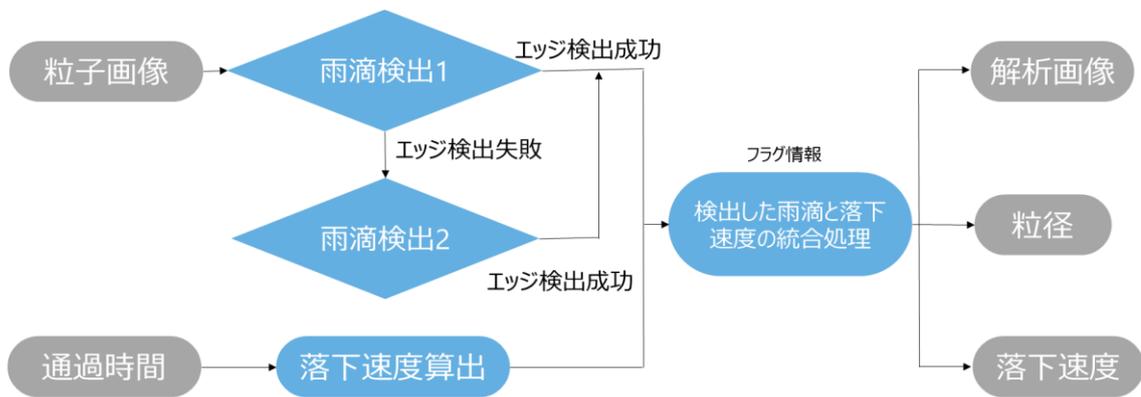


図-13 作成した解析プログラムのフロー

1/25	4/25	6/25	4/25	1/25
4/25	16/25	24/25	16/25	4/25
6/25	24/25	36/25	24/25	6/25
4/25	16/25	24/25	16/25	4/25
1/25	4/25	6/25	4/25	1/25

図-14 5×5のカーネルにおけるガウシアンフィルタのイメージ図

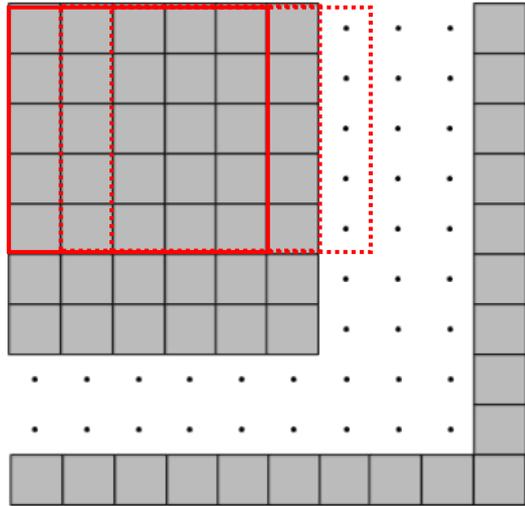


図-15 画像にフィルタを適用した際のイメージ図

1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25

図-16 5×5の平均化フィルタのイメージ図

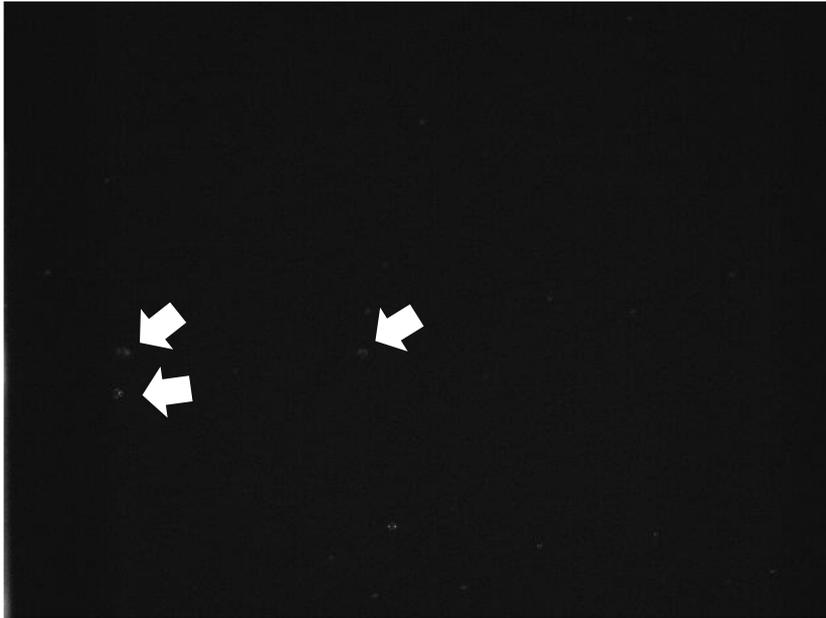


図-17 エッジ検出できなかった画像の例

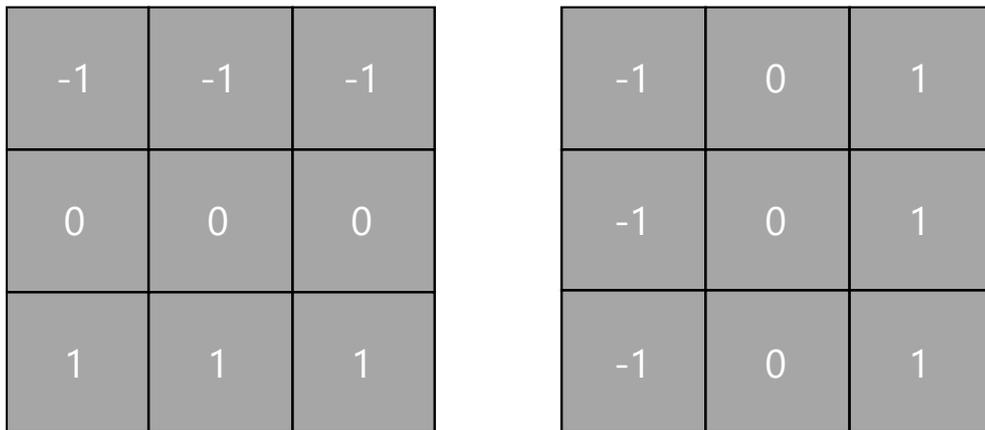


図-18 3×3 の水平方向のフィルタ(左図), 垂直方向のフィルタ(右図)のイメージ図

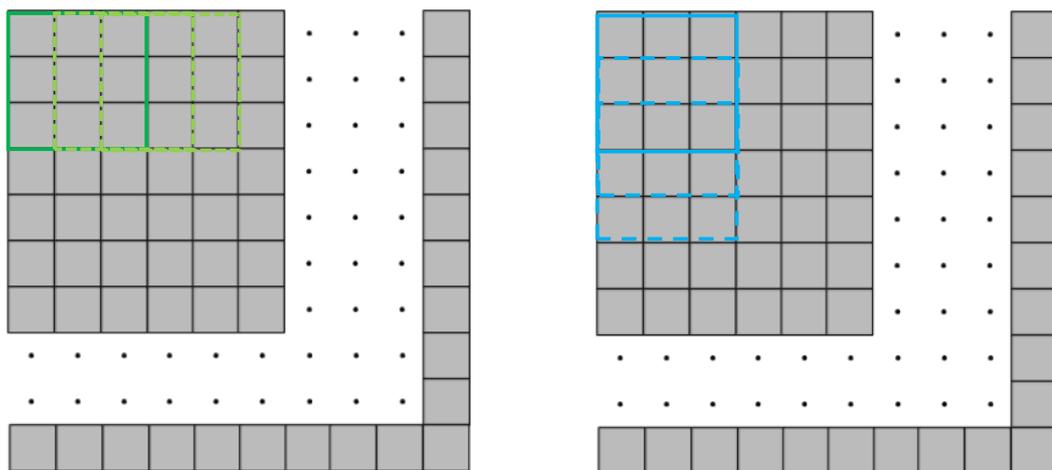


図-19 画像に水平方向のフィルタ(左), 垂直方向のフィルタ(右)を適用した際のイメージ図



図-20 降水粒子の大きさの変化による形状の変化

5.2.2. 落下速度の解析

フラグ情報を用いて、粒子画像と通過時間の紐づけを行い、粒子画像に対応する粒子の落下速度を算出した。

落下速度においては、上下のセンサの通過時間の差と上下センサ間の長さ 28 mm と雨滴の粒径サイズを用いて、算出することができる。落下速度の算出は以下の式(2)で表すことができる。

$$w_i = \frac{28/1000}{P_{i,down} - P_{i,up}} \quad (2)$$

ここで、28[mm]は上下センサ間の長さであり、mm を m に変換するために 1000 を割っている。i はある粒子、 w_i はある粒子に対する落下速度(m/s)、 $P_{i,down}$ はある粒子が下のセンサを通過した時間(s)、 $P_{i,up}$ はある粒子が上のセンサを通過した時間(s)である。

上下のセンサの間で別の雨滴を検出してしまい、落下速度がマイナスとなった場合、落下速度が極端に大きくまたは小さくなってしまった場合は、雨滴の落下速度は算出できなかったものとして処理した。

フラグ情報があり、画像解析できたかつ落下速度の算出が行えたデータを最終的に解析できた値とした。

画像解析が成功した一例を図-21 に示す。左図に元の画像、中央図にエッジ検出を行った画像、右図にエッジ検出より雨滴の縦横サイズ、落下速度を算出したものを示す。解析できてほしい雨滴に対してエッジ検出が行えており、検出された雨滴の縦横サイズが算出できていることが分かる。なお、この右図のようにエッジ検出はできたが、落下速度の算出が行えなかったものは解析できなかった値として-999 とした。

また、解析結果の一例を図-22 に示す。横軸に各指標、縦軸に数をとっており、Image を 100%として各指標における解析結果の割合を棒グラフの上に乗せている。ここで、Image : Rainscope がシャッターセンサに反応して撮影した画像の数、An. Img:撮影された画像に対して画像解析を行えた数、Linked I&V: 上下のセンサに反応し、雨滴を撮影できていた数、つまりフラグ情報が得られた数である。An. Linked I : フラグ情報が得られている粒子画像を画像解析できた画像数、An. Liked I&V : フラグ情報が得られている画像解析に加えて、落下速度も算出できた数を示している。Image, Linked I&V は実際の観測結果であり、An. Img, An. Linked I, An. Linked I&V は観測結果から解析できた結果を示す。解析できた画像、落下速

度の情報を用いて実験結果の比較を行った。室内実験の観測パターンの観測パターンを再掲する(表-7)。なお、比較した観測パターンは表-7に示されている観測パターンにおいて、地上測定の場合と空中測定の場合の合算値に対して比較した。

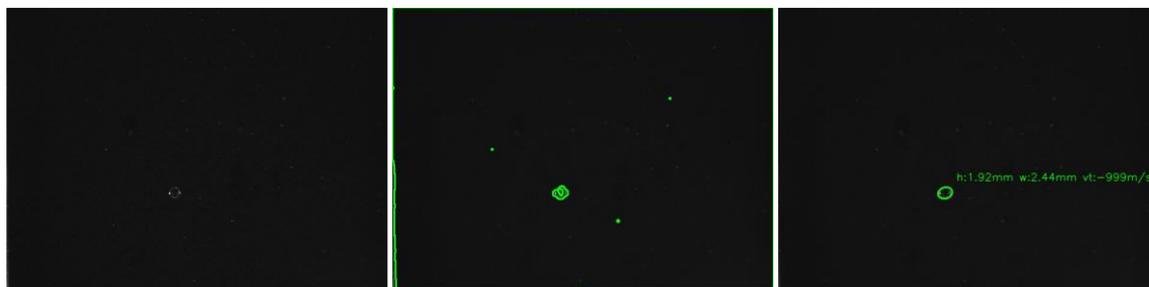


図-21 撮影画像(左), エッジ検出を行った画像(中央), 粒径, 落下速度の算出を行った画像(右)

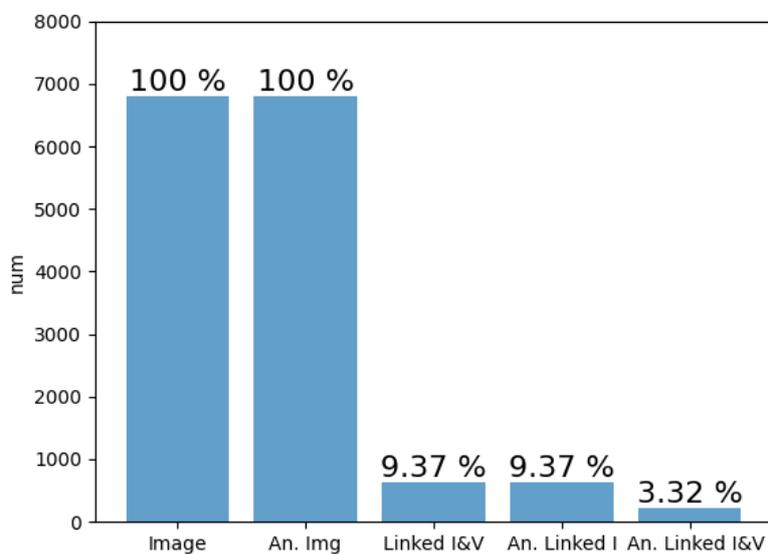


図-22 解析結果の一例

表-7 室内実験の観測パターン(再掲)

降雨強度 (mm/h)	地上測定	空中測定
10	○	○
20	○	○
30	○	○
40	○	○
50	○	○
60	○	○
70	○	○
80	○	○
90	○	○
100	○	○

5.3. 室内実験結果

5.3.1. 地上測定と空中測定の比較

地上測定および空中測定の解析結果を図-23 に示す。なお、この解析結果は地上雨量の観測パターンの合算値と空中測定の観測パターンの合算値に対する結果である。横軸に各指標、縦軸に数をとっており、Image を 100 % として各指標における解析結果の割合を棒グラフの上に載せている。この割合は Image を 100 % とした時の各指標の割合である。ここで、Image : Rainscope がシャッターセンサに反応して撮影した画像の数、An. Img:撮影された画像に対して画像解析を行えた数、Linked I&V: 上下のセンサに反応し、雨滴を撮影できていた数、つまりフラグ情報が得られた数である。An. Linked I : フラグ情報が得られている粒子画像を画像解析できた画像数、An. Liked I&V : フラグ情報が得られている画像解析に加えて、落下速度も算出できた数を示している。Image, Linked I&V は実際の観測結果であり、An. Img, An. Linked I, An. Linked I&V は観測結果から解析できた結果を示す。

地上測定と空中測定の Image の数をみると、どちらも 7000 程度であり、撮影された画像数はほぼ同様であった。

An. Img についてみると、元画像に対して地上測定は 100%、空中測定は 99.7% とほぼすべての画像を解析することができていた。そのため、画像解析できた割合は地上測定、空中測定どちらも同程度の割合であった。

Linked I&V についてみると、地上測定は 9.37%、空中測定は 5.84% と空中測定は地上測定と比べて低い割合を示していた。そのため、空中測定の方が減少率が上がっていたことがわかる。Linked I&V はフラグ情報がある画像に対して画像解析を行った数を示しているが、空中測定においてはドローン自体が飛行中に動いている影響で上下センサの通過時間が観測できない場合があったと考えられる。上下センサの通過時間が測定できない場合、撮影された画像との紐づけを行うことができず、フラグ情報が無しとなり、フラグ情報が無い画像は画像解析が行われなため、Linked I&V の割合が減少してしまったと考えられる。

Linked I&V に対する An. Linked I についてみると、画像解析においては地上測定ではすべて解析でき、空中測定では減少がみられたがほぼ同様の値であった。なお、Linked I&V はフラグ情報が得られた数であり、An. Linked I はそのフラグ情報が得られた画像を解析して解析できた数であるため、画像解析ができなかったものがある場合は必ず減少する。

さらに、An. Linked I に対する An. Linked I&V についてみると、落下速度算出率においては地上測定は 9.37% から 3.32% と 3 分の 1 程度まで減少しているのに対し、空中測定は 5.79% から 1.25% と 5 分の 1 程度まで減少が見られ、空中測定の方が減少率が高いことが分かる。An. Linked I&V は解析できた画像に対して、さらに落下速度を算出できた数であり、空中測定では落下速度を算出できなかった画像が多かったことが分かる。

また、地上測定と空中測定における雨滴粒径分布特性について確認するために、修正ガンマ分布との比較を行った。修正ガンマ分布は一般的な粒径分布を再現するといわれている分布であり、以下の式(1)により表される。

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\Lambda D} \quad (3)$$

ここに $N(D)$ [$\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$]は修正ガンマ分布の粒径分布関数、 D は粒径[mm]、 N_0 [$\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1-\mu}$]は分布曲線の切片、 μ はガンマ分布の修正パラメータ、 Λ [mm^{-1}]は分布曲線の傾斜である。ここで、修正ガンマ分布の一例を 図-24 に示す。なお、 $N_0 = 8.0 \times 10^5$ 、 Λ については先行研究¹⁵⁾より $\Lambda = 2 \text{ mm}^{-1}$ とした。横軸に粒径、縦軸に短体積当たりの粒子数 $N(D)$ をとっている。この修正ガンマ分布において $\mu \leq 0$ の場合は・の点線で示した単調減少するような分布形状となる。 $\mu = 0$ の場合は、破線で示されるように直線となり、一般的な雨滴粒径分布を表す Marshall Palmer 分布(以下、MP 分布)¹⁶⁾と言われる分布を再現する分布形状となる。 $\mu \geq 0$ の場合は点線で示すような最小粒径でない特定の粒径が支配的な分布形状となる。

雨滴粒径分布と式(3)で示した修正ガンマ分布の式とを重ね合わせたものが 図-25 である。粒径を階級別に分け、横軸に粒径、縦軸に $N(D)$ を取ったものであり、左図が地上測定結果、右図が空中測定結果である。なお、 Λ については先行研究¹⁵⁾より $\Lambda = 2 \text{ mm}^{-1}$ とした。

重ね合わせている修正ガンマ分布は実験結果より得られた雨滴粒径に合うようにパラメータを最適化し、重ね合わせた結果である。横軸に粒径、縦軸に単位体積あたりの粒子数を表す $N(D)$ としており、左図が地上測定結果、右図が空中測定結果である。 N_0 についてみると、地上測定では $N_0 = 9.05 \times 10^5$ であるのに対し、空中測定では $N_0 = 2.48 \times 10^5$ であり、値が異なっていた。この N_0 は粒子数に起因しているため、地上測定と空中測定で粒子数が異なっていたことが分かった。 μ についてみると、地上測定では1.16、空中測定では1.12となっており、どちらも μ が正であり、最小粒径でない特定の粒径が支配的な分布形状となっていた。そのため、地上測定と空中測定において N_0 は異なっていたが μ はほぼ同様の値を示しており、類似した分布形状となった。地上測定と空中測定における違いはプロペラの回転、飛行による気流や機体揺動の影響が考えられる。

地上測定と空中測定における落下速度の密度分布を 図-26 に示す。これをみると、地上測定では、2~3 m/s 程度の割合が多かった。一方で、空中測定の方をみると 3~4 m/s 程度の落下速度の占める割合が多かった。また、中央値をみても、地上測定が 4.5 m/s、空中測定が 5.5 m/s であり、落下速度分布が異なっていた。これはプロペラの回転、飛行による気流や機体揺動の影響が考えられる。

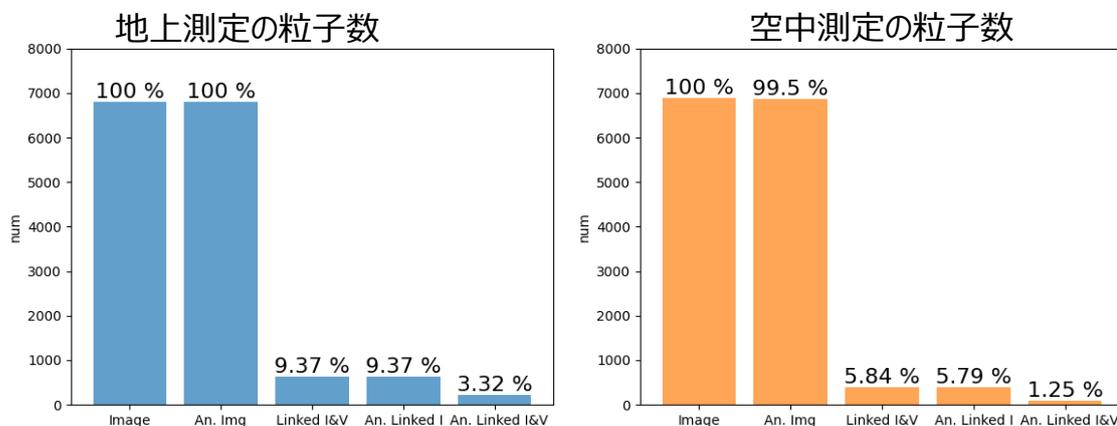


図-23 地上測定(左図)及び空中測定(右図)における解析結果

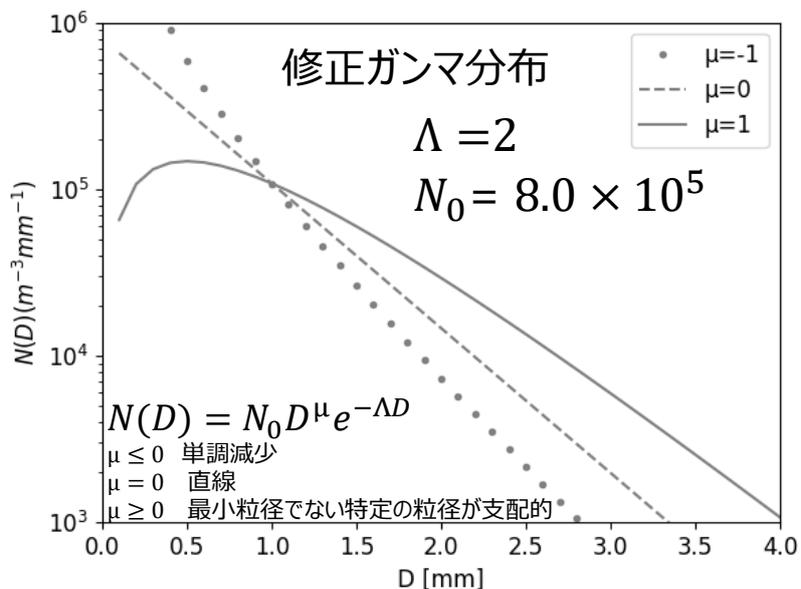


図-24 修正ガンマ分布⁶⁾

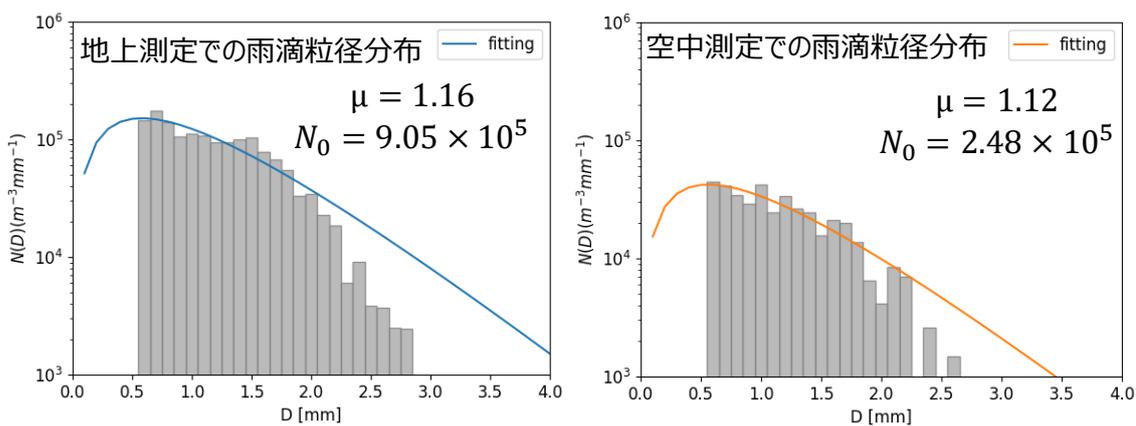


図-25 地上測定(左図)及び空中測定(右図)の修正ガンマ分布と雨滴粒径分布を重ねた結果

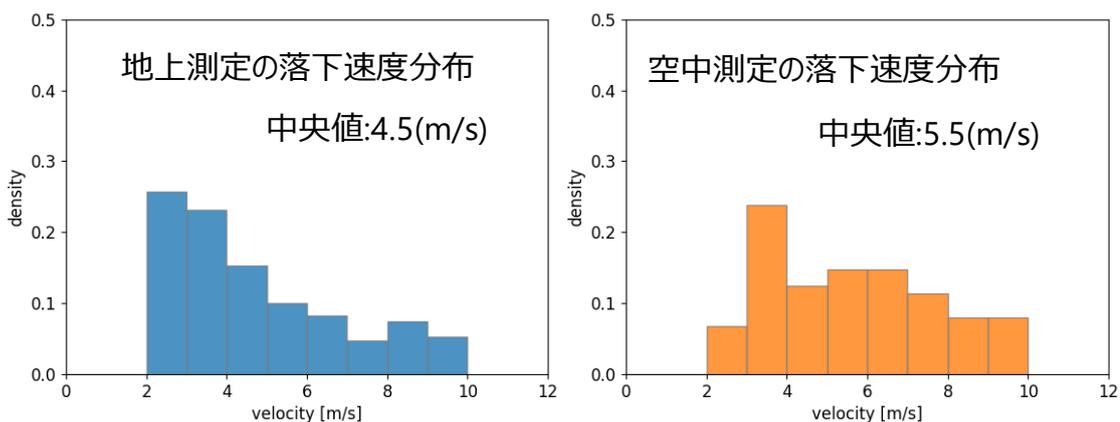


図-26 地上測定(左図)及び空中測定(右図)の落下速度分布

5.3.2. 観測可能条件及び課題点

以上で述べた結果より、地上測定と空中測定において、粒子数に起因する N_0 に差はみられたが雨滴粒径分布の分布形状は類似していたため、実験室での空中測定でのドローンを用いた降水粒子観測が可能であることが示されたと考える。

しかしながら、課題点として粒子数や落下速度分布の差がみられた。これはプロペラの回転、飛行による気流や機体揺動の影響が考えられる。加えて、観測機器の耐久性の低さにより、長時間観測が困難であったことや解析アルゴリズムによる誤検出といった課題が挙げられた。

6. まとめ

本研究では Rainscope を搭載した全天候型ドローンを用いて、室内実験を行い、地上測定と空中測定の結果を比較することで全天候型ドローンを用いた降水粒子観測手法の観測可能条件及び課題点を示すことを目的とした。

粒子数に起因する N_0 に差はみられたが雨滴粒径分布の分布形状は類似していたため、実験室での空中測定でのドローンを用いた降水粒子観測が可能であることが示されたと考える。

しかしながら、課題点として粒子数や落下速度分布の差がみられた。これはプロペラの回転、飛行による気流や機体揺動の影響が考えられる。加えて、観測機器の耐久性の低さにより、長時間観測が困難であったことや解析アルゴリズムによる誤検出といった課題が挙げられた。

7. 今後について

7.1. 実験での課題

室内実験を行った結果として、観測機器である Rainscope の容器の耐久性が低く、長時間観測が困難であることが分かった。これは Rainscope が元々ゴム気球を使って飛ばされ、最終的に落ちてきたときに土に還りやすい素材を使っていることやできるだけ軽い素材で作られていることが考えられる。

また、Rainscope の撮影は通常は雨滴が通過した際にセンサが反応してシャッターが切られる。しかし、今回実験を行った際には、雨滴が写っていないにも関わらず撮影されている画像がみられた。これは全天候型ドローンによるモーターの振動等によるノイズの影響でセンサが誤作動を起こし、誤撮影が起こっている可能性が考えられる。そのため、Rainscope の容器は、耐久性が高く、ドローンによるノイズの影響を軽減するような容器に変更する必要がある。

また、今回の実験では空中測定を地上から 1 m 程度の場所で飛行させたが、実験室の高さは 3 m 程度であり、降雨装置から雨が落ちて Rainscope に観測されるまでの距離は 2 m 程度である。この距離では雨滴の落下速度が終端速度に達さずに観測されているため、落下速度の分布が自然現象と異なっている可能性も挙げられる。よって、今後は室外実験を行い、観測特性を把握する必要があると考える。

7.2. 解析での課題

今回用いたアルゴリズムでは、雨滴サイズの誤解析や誤検出がいくつかみられた。今回の実験の解析結果で誤検出された例を図-27 に示す。左図が元の画像であり、中央図がエッジ検出をした結果、右図がエッジ検出した結果から、シャッターセンサに最も近い雨滴を検出し、算出したものである。白い矢印で示した雨滴が実際に解析できてほしい雨滴であるが、エッジ検出の際に雨滴以外のものもエッジ検出しており、最終的に解析したものは解析できてほしい雨滴とは別の雨滴であった。他にも解析ができた場合でも雨滴より小さなエッジ検出を行い、過小評価される場合もあった。そのため、解析アルゴリズムについて見直し、より解析精度の高いアルゴリズムを構築する必要がある。

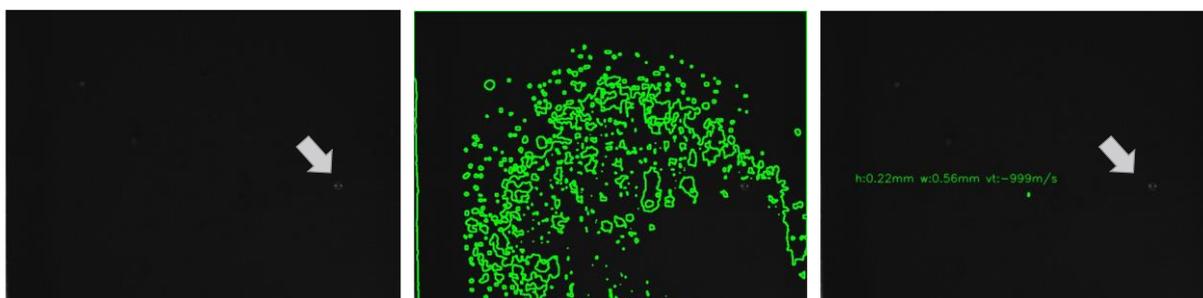


図-27 誤検出の例

(左:元画像, 中央:エッジ検出を行った画像, 右:雨滴粒径, 落下速度の算出を行った画像)

7.3. 今後の展望

今回の実験で、室内実験において室外実験で空中測定という特定の条件で Rainscope を搭載した全天候型ドローンを用いて観測を行える可能性があることが示されたと考える。しかしながら、課題点がみられたため、課題点の改善を行い、室外実験にて再度検討する必要がある。室外実験を行うことで実際の降雨や降雪といった降水粒子に対して、観測が可能であるか検討していく予定である。また、高度を気象レーダと同等程度まで飛ばし、他の観測手法との比較も行う予定である。

謝辞

本研究は、「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業（代表：吉見和紘）の支援を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象観測について, 気象庁 https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku/weather_obs.html
- 2) 阿部豊雄, 気象庁における高層気象観測の変遷と観測値の特性 第1部 高層気象観測の変遷, 日本気象学会, 天気, 62, p161-185, 2015.
- 3) ラジオゾンデによる高層気象観測の概要, 気象庁
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/upper/kaisetsu.html>
- 4) 西原大貴; 大橋唯太; 重田祥範. ドローン技術を活用した霧の鉛直気象情報の観測. In: 環境情報科学論文集 Vol. 34 (2020 年度 環境情報科学研究発表大会). 一般社団法人 環境情報科学センター, p. 228-233, 2020.
- 5) 吉崎正憲, 坂田啓朗 : ドップラーライダーと温度センサーを付けたドローンによる同時観測, *地球環境研究*, Vol.21,p125-132,2019.
- 6) 佐々木寛介, 志村智也, 井口正人, 井上実 : ドローンによる上空の風観測手法の検討, 京都大学防災研究所年報, 63(B), p282-290, 2020.
- 7) 岸田岳士, 小野浩之, 小林謙仁, 佐藤歩:気象観測 UAV, ラジオゾンデによる高層気象の同時観測, 日本風工学会, 2022 年日本工学会年次研究発表会, p85, 2022.
- 8) 国交省, 【全天候型ドローン】開発機体の概要 https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/innovative_project/pdf/2.pdf
- 9) 降水粒子撮像ゾンデ Rainscope https://www.meisei.co.jp/products/meteo/meteo_high_ground/p3551
- 10) 根間綾香, 鈴木賢士, 清水健作, 杉立卓治 : 新しい降水粒子撮像ゾンデ Rainscope の性能評価, 日本気象学会大会講演予稿集, 120 号, p. 231, 2021.
- 11) Shimizu Kensaku , Nagahama Norio , Sugidachi Takuji, Suzuki Kenji, Fujiwara Masatomo : Development of a New Cloud/Precipitation Particle Imaging Radiosonde Using the 400-MHz Meteorological Band, TECO, 2022.
- 12) Kenji Suzuki, Yurika Hara, Takuji Sugidachi, Kensaku Shimizu, and Masamoto Fujiwara : Development of a New Particle Imaging Radiosonde with Particle Fall Velocity Measurements in Clouds, *SOLA*, 2023, Vol.19, 261-268.
- 13) 富山県産業技術研究開発センター, 生活環境シミュレータ室の概要
http://www.itc.pref.toyama.jp/equipment/e_data/1333_R01_seikatsu.html
- 14) Carlton W. Ulbrich : Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution , *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983.
- 15) 山田正, 日比野忠史, 鈴木敦, 蓑島弥成, 中津川誠 : 新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴粒径分布の観測, *土木学会論文集*, (539), 15-30, 1996
- 16) J. S. Marshall, W. Mc K. Palmer : The distribution of raindrops with size, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume5, Issue 4, 1948.
- 17) ウインドプロファイラの概要, 気象庁 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/windpro/kaisetsu.html>
- 18) 気象庁, 気象レーダー観測の概要 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>

付録

ゾンデ³⁾

ラジオゾンデは上空の気圧、気温、湿度、風向、風速等の気象要素を観測する気象観測器である。観測機器をゴム気球に吊るして、地上から 30km 程度までの大気の状態を観測している。付図-1 はラジオゾンデの放球の様子である。ラジオゾンデによる観測は、1 日 2 回行われており、気象庁では 16 カ所で観測されている。台風接近時などは 1 日 4 回飛ばす場合もある。気象庁の他にも、海洋気象観測船なども観測が行われている。観測されたデータは、数値予報モデルや、気候変動・地球環境の監視、航空機の運航管理などに利用されている。

ラジオゾンデは、気象要素を観測するセンサと、測定した情報を送るための無線送信機で構成されている。気象庁で使用しているラジオゾンデは GPS ゾンデと呼ばれ、受信した GPS 信号から計算し、気圧、風向・風速等を求めている。



付図-1 ラジオゾンデの放球の様子

ウインドプロファイラ¹⁾

ウインドプロファイラは地上から上空に向けて電波を発射し、戻ってくる電波から上空の風向・風速を測定している。戻ってきた電波は、散乱した大気の流れに応じて周波数が変化しているため、発射した電波と返ってきた電波の周波数の違いから大気の動きを観測できる。

ウインドプロファイラの観測では、上空の 5 方向に電波を発射し、風の 3 次元観測を行っている。気象庁では 33 カ所で観測を行っており、観測されたデータは数値予報などに活用されている。

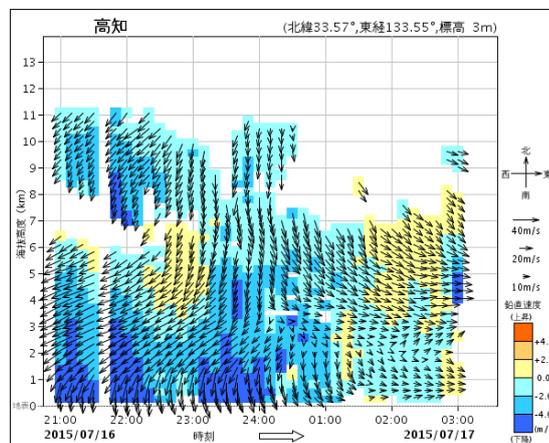
ウインドプロファイラは、上空の風を 300m 毎に、10 分毎に観測しており、最大で高度 12km 程度まで

の上空の風向・風速を観測することができる。

大気が乾燥している場合は、大気の風向・風速を観測することができるが、降雨時には観測されるデータは雨粒の動きである。これは大気による電波の散乱より雨粒による散乱の方が強いためであり、雨粒が風に流されるため、この雨粒の動きから風向・風速を知ることができる。大気が乾燥しているときよりも降雨時の方が高い高度まで観測することができる。

ウインドプロファイラのデータを用いると、温暖前線、寒冷前線、台風等の通過を把握することができる。

付図-2 にウインドプロファイラの観測データの一例を示す。これは台風が観測所付近を通過した時の観測データである。横軸に時刻、縦軸に高度をとっており、矢印の方向が風向である。これを見ると、時刻が進むにつれて、風向が南西向きから東向きに変化していることが分かる。台風は回転しながら進むため、この風向の変化によって台風の通過を捉えることが可能である。



付図-2 ウインドプロファイラの観測データの一例 17)

気象レーダ¹⁸⁾

気象レーダは、アンテナを回転させながら電波を発射し、存在する雨や雪を観測するものである。

なお、気象庁は「気象レーダー」と呼ばれ、国交省は「気象レーダ」と呼ばれる。

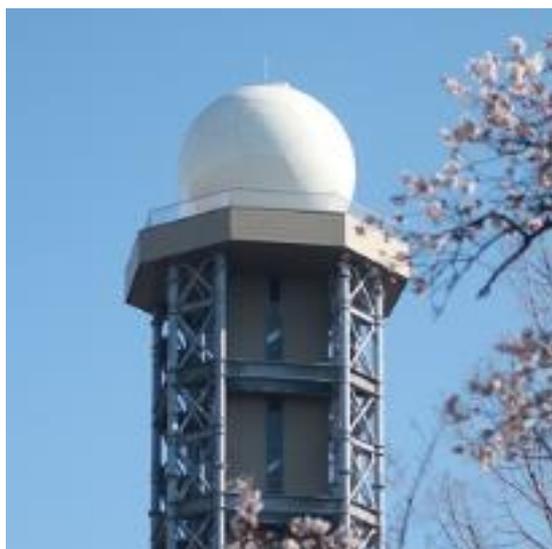
以下は気象庁の気象レーダーに関する説明である。

発射した電波が戻ってくるまでの時間から物体に対する距離を測り、戻ってきた電波の強さから降雨強度を求める。

また、ドップラーレーダーの場合はドップラー効果を利用して、降水域の風を観測することができる。気象庁では、二重偏波ドップラーレーダーを導入している。この二重偏波気象ドップラーレーダーは、水平方向と垂直方向の2本の電波を用いることで、降雨強度の推定や粒子判別を行うことができる。気象庁では現在20カ所に気象レーダーが設置されており、全国を網羅するように設置されている。

気象レーダーより得られた観測データは、ある時間に観測された降雨強度分布に用いられるだけでなく、降水短時間予報や降水ナウキャスト等の予報の作成にも利用されている。

付図-3 は気象庁が設置している気象レーダーの一例である。



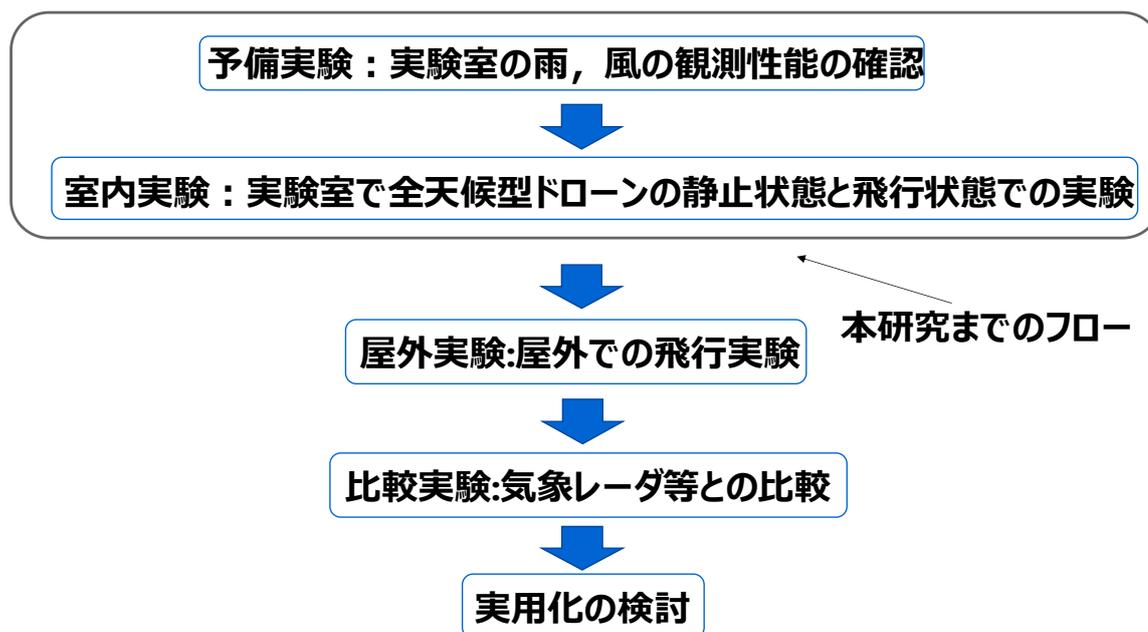
付図-3 気象レーダー(気象庁, 東京)¹⁸⁾

研究の全体フロー

研究の全体フローを付図-4 に示す。

予備実験を行い，室内実験での全天候型ドローンの飛行条件を決定した。

その後，予備実験より決定した飛行条件で室内実験を行い，全天候型ドローンでの観測が可能かを確認



付図-4 研究の全体フロー

し、課題点を明らかにする。

室内実験より得られた結果より課題点を明確にし、観測機器、観測手法等の見直しを行った上で、屋外での飛行実験を行い、降雨や降雪といった実現象に対しても全天候型ドローンを用いた観測手法で観測可能かを確認する。また、屋外実験では、気象レーダが観測している高度と同程度の高度で観測を行い、観測結果を気象レーダ等のデータと比較することで全天候型ドローンを用いた観測手法とその他の気象観測手法との比較を行い、観測特性を把握する。これらの結果を踏まえ、全天候型ドローンを用いた観測手法における観測特性を明らかにし、実用化に向けた検討を行う。

Rainscope を用いた全天候型ドローンの降水粒子観測手法の開発プロセス

今回、新たな降水粒子観測手法として、ビデオゾンデの一種である Rainscope と悪天候下でも飛行可能な全天候型ドローンを組み合わせた手法を開発した。

そのため、Rainscope を全天候型ドローンに組み込めるように改良し、搭載した。Rainscope を全天候型ドローンにそのまま搭載できるわけではないため、Rainscope に合わせた型を作成し(付図-5 左図)、Rainscope に搭載した。また、Rainscope の観測を行う際には電源供給が必要であるため、全天候型ドローンで用いられているバッテリーから電源供給を行えるように改良を行っている(付図-5 右図)。



付図-5 Rainscope を搭載した全天候型ドローンの開発過程

空中測定(アイドリングあり)における温度の違いの比較

現在、富山県における室外実験を考えており、降雨だけでなく降雪に対しても観測を行うことを考えている。そのため、冬環境下のような温度の低い環境に対して、全天候型ドローンの観測への影響を評価するため、温度の違いによる実験を行った。

温度の違いによる全天候型ドローンの飛行時間の違いについて比較したのが付表-1である。室温5°Cの際の全天候型ドローンのアイドリング時間は6分22秒であり、室温25°Cにおけるアイドリング時間は13分18秒であった。このことから、室温が低いほど、バッテリーの稼働時間が短くなることが分かった。

付表-1 温度の変化によるバッテリー稼働時間の違い

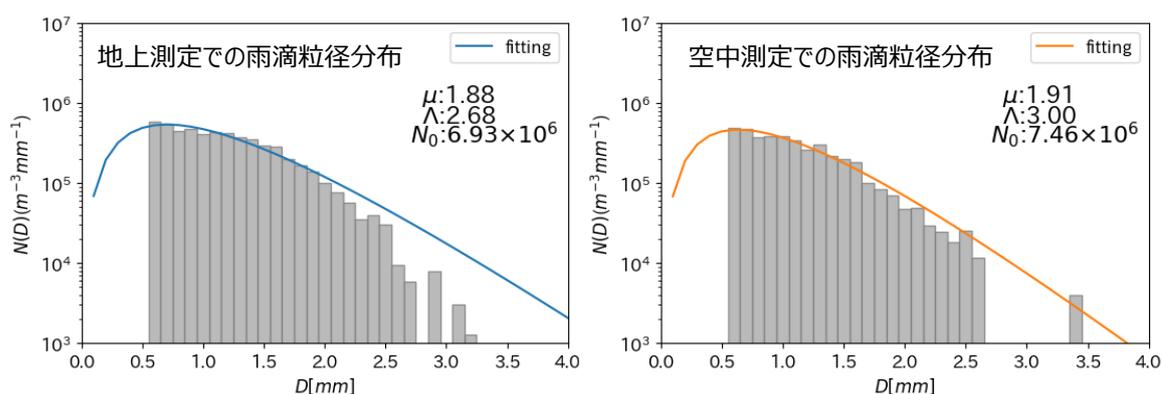
温度	バッテリー稼働時間
5°C	6分22秒
25°C	13分18秒

撮影された画像すべてに対し、画像解析を行った場合

今回の実験では、撮影された画像に対して粒子画像と通過時間が紐づいている画像数が少なくサンプル数が少なかった。そのため、撮影された画像すべてに対して画像解析を行い、雨滴粒径分布について検討した。なお、撮影された画像には粒子画像と通過時間が紐づけるフラグ情報が有り、無しの画像が混在しているため、画像解析を行い、雨滴粒径分布の形状を把握することはできるが落下速度の算出は行えない。

また、この解析においてはサンプル数は各観測7000程度ずつあるため、サンプル数が十分にあるものと判断し、 μ 、 Λ 、 N_0 の3つのパラメータに対して最適化させるようにフィッティングした。地上測定(左図)及び空中測定(右図)における撮影された画像すべてに対しての雨滴粒径分布の結果を付図-6に示す。

この結果をみると、 μ においては地上測定では1.88、空中測定では1.91となっており、ほぼ同様の値であり、 μ が正の時の最小粒径でない粒径が支配的な分布形状を再現していることが分かる。また、 Λ 、 N_0 についてもほぼ同様の値を示していた。そのため、アルゴリズムの誤検出等の誤差は含まれるものの地上測



付図-6 地上測定(左図)及び空中測定における撮影された画像すべてに対しての雨滴粒径分布

定と空中測定においては類似した分布形状をしていることが分かった。

以上