

全天候型ドローンを用いた 上空の降水粒子及び風速場観測

吉見 和紘

富山県立大学講師 工学部環境・社会基盤工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: kyoshimi@pu-toyama.ac.jp

本稿では、ドローンに降水粒子観測測器を搭載した機器(MARSHALL)の上高高度で降水粒子の捕捉率が低下する原因の考察と、MARSHALL と他の測器で同時に降水粒子の測定を行った。先行研究では、MARSHALL による 100 m 程度の高度で降水粒子の捕捉率が低下すると述べられた。捕捉率が低下する原因の究明のために MARSHALL に新たに風向風速計を搭載した。降水粒子の測定結果の妥当性の検証として新たに降水粒子観測測器を 1 台追加し、MARSHALL による測定結果の妥当性の検証とドローンに測器を搭載した際の新たな課題の考察を行った。結果として高度が高くなるにつれて風速が増加することで、降水粒子観測測器のセンサ部で誤検出が発生し、粒子の捕捉率が低下したと考えられる。降水粒子測定結果の妥当性の検証では、三脚に降水粒子観測測器を設置し(GND)、MARSHALL による地上(UAV-G)と空中(UAV-A)での降水粒子の測定結果を、雨滴粒径分布、雨滴粒径と落下速度の関係の 2 つの指標により比較を行った。結果として、UAV-G と GND、UAV-A と GND の比較では 2 つの指標ともに類似した傾向を示した。一方で、UAV-G と GND の雨滴粒径と落下速度の関係では密度プロットで差異が生じた部分があった。これは MARSHALL と GND の構造的な違いに起因するものと考えられるが、詳細に検証する必要がある。

Key Words: All weather drone, Raindrop size distribution, Diameter, Falling velocity, Capture rate

1. はじめに

(1) 現在の気象観測手法

現在、我が国の気象観測は様々な手法が用いられている。代表的なものとして、AMeDAS(アメダス)やレーダ雨量計(以下、気象レーダ)、静止気象衛星、ラジオゾンデ等の観測手法が挙げられる。AMeDAS は全国に約 20 km 間隔で観測所を設置し、降水量、風向・風速、気温、湿度等の地上の気象観測を行っている¹⁾。気象レーダは面的な降水観測が可能であり、XRAIN(eXtended RAdar Information Network)とよばれる高性能レーダ雨量計ネットワークによる観測網により降水観測が行われている²⁾。静止気象衛星は赤道上空約 35,800 km から気象観測を行う測器であり、地球の自転と同じ周期で上空を周回しているため、常時同じ範囲を観測することが可能である³⁾。ラジオゾンデはゴム気球に測器を吊るして飛揚し、高度 30 km までの気圧、気温、湿度、風向・風速等の高層気象観測を行っている⁴⁾。

近年では、頻発化する豪雨やそれに伴う洪水等の災害が問題となっており、降水の観測情報が注目されている。

国立研究開発法人土木研究所は、「降水量は水位、流量、地下水位、流出土砂量や水質などの関係が深いので、災害対策や水資源計画等のために欠くことの出来ない資料である。」と述べている⁵⁾。小正ら(2024)はレーダ雨量計に関して、「豪雨災害が激甚化している中で、面的な降雨情報を短時間で入手できるレーダ雨量計は防災において非常に重要であり、避難情報や水害対策における支援、洪水予測モデルへのデータ提供、適切なダム管理・河川管理への活用、地域防災と他機関連携において、リアルタイムの降雨観測が期待される。」と述べている⁶⁾。このような社会的背景もあり、本研究では降水に注目した。

(2) 現在の降水観測手法の課題

一般に上空の降水観測は、上空では気象レーダ、地上では転倒ます型雨量計等の地上雨量計が用いられている。気象レーダは特定の周波数の電波を発信し、雨や氷の粒などの物体により反射した電波を受信することで、降水強度や降水粒子の動きを推定することが可能である。気象庁管轄の 20 基⁷⁾、国土交通省管轄の 65 基⁸⁾が全国に配

備・運用されている。地上雨量計は、気象庁が設置しているものだけで約 1,300 か所に設置され、降水量の観測が行われている。これらの手法を用いた降水観測は全国各地で行われているが、いくつかの課題がある。

気象レーダは運用手法によって観測が困難な領域が存在する。気象レーダは平均すると高度 500 m 程度までの領域の降水観測を行うことは困難である。気象レーダは面的な観測が可能であるため、最大限の観測領域を設定する必要がある。レーダから発せられた電波が建物や地形に遮られると観測可能面積が減少するため、気象レーダの最低仰角は 0° 以上に設定されることが多い。例えば、富山県富山市水橋に設置された国土交通省の気象レーダ(水橋 XMP)の最低仰角は 1.7° ⁹⁾であり、30 km, 60 km, 先のビーム高度は約 250 m, 500 m である。つまり、地上雨量計が観測している地上から気象レーダが観測対象としている高度帯までは降水観測がほとんど行われていない。

また、気象レーダの観測値の活用方法として降水強度や風速場の推定、雷放電現象の観測、降水粒子の判別等が挙げられる。特に降水粒子の判別は精力的に研究されている^{10) 11) 12)}。降水粒子の判別にはレーダの偏波情報を活用し、雨、氷晶、雨と雹の混合物等の判別から混合比を導出することで、降雨予測精度の向上や冬季の詳細な降雪量の把握、降雹による被害の予防が期待される。しかしながら、推定された上空の降水粒子の状態の確かさを定量的に示すことは現在の技術でも課題が多い。

降水現象が時間的に変化するため、降水粒子判別の妥当性の確認には、降水粒子を上空の任意の定点で観測する必要がある。降水粒子の直接観測が可能な測器は代表的なものとして、ディストロメータとビデオゾンデが挙げられる。ディストロメータはレーダ光を用いて粒子の粒径と落下速度の測定が可能な測器である。一般にディストロメータは地上に設置して観測が行われる。ビデオゾンデは先述のラジオゾンデと同様にゴム気球に降水粒子観測測器を吊るして飛揚させるため、風の影響により上空の任意の定点で降水粒子を観測することが困難である。そのため、上空の任意の定点に存在する降水粒子を直接観測する新たな観測手法を確立する必要がある。

(3) ドローンを用いた気象観測

近年、ドローンを用いた気象観測が注目されており、WMO(世界気象機関)により UAS Demonstration Campaign が実施されている¹³⁾。この取り組みにより、ドローンを用いた気象観測が推進され、観測事例が報告されている。佐々木ら(2020)はドローンに風向風速計を搭載し、地上から 1000 m 上空までの風向風速の鉛直プロファイルの観測を試みた¹⁴⁾。西原ら(2020)はドローンに気温、相対湿度、気圧の測定機器を搭載し、霧の鉛直気象情報の取

得を試みた¹⁵⁾。山路ら(2023)はドローンに超音波風向風速計、PM センサ、ガスセンサを搭載し、上空の気象場および SO₂、H₂S のガス濃度を計測した¹⁶⁾。Inoue and Sato(2022)は小型ドローンに気温・湿度センサとエアロゾルカウンターを搭載し、高度約 750 m までの極地の気象観測を試みた¹⁷⁾。このようにドローンを用いた上空での気象観測が生産的に行われているが、上空の降水粒子を観測した報告例は筆者が調査した限りでは報告されていない。

(4) 本研究の立ち位置

ドローンを用いた降水粒子観測の研究例が確認されていない要因として、降雨のような悪天候下ではドローンの飛行が困難であったことが挙げられる。そこで悪天候下でも飛行可能なドローンである全天候型ドローンに着目した¹⁸⁾。馬淵ら¹⁹⁾は全天候型ドローンにビデオゾンデの一種である Rainscope^{20) 21)}を組み合わせた新たな観測手法に着目し、測器に MARSHALL(Meteorological Aircraft for Raindrop Sensing and Hydrological Analysis in all-weather)と名付け、降水粒子の観測を試みた。図-1 に MARSHALL の外観を示す。馬淵らは富山県の産業技術研究開発センターにある生活環境シミュレータ室で降水現象を再現し、粒子の測定実験を行った。この実験では、地上でドローンを静止させた状態と飛行させた状態で実験を行い、降水粒子の観測が可能であると結論付けた。伊與田らは、屋外において地上で静止させた状態と地上から 1 m 程度飛行させた状態で降水粒子の測定実験を行った²²⁾。降水中の多様な粒径の粒子の数量分布を示す雨滴粒径分布と、雨滴粒径と落下速度の関係の 2 つを用いて比較が行われた。雨滴粒径分布では、両者で概ね同様の傾向を得たうえで、指標の分布範囲内に収まった。雨滴粒径と落下速度の関係では、両者で同様の非線形の正の相関が確認され、設定した指標の標準偏差内であった。地上測定と空中測定との測定結果の比較から、MARSHALL による地上から 1 m 程度飛行させた状態での降水粒子観測の適用可能性が示された。

しかし、伊與田らによる既往研究では上空 50 m, 100 m 程度の高度で空中測定を行うと、Rainscope に搭載されたカメラのシャッターが作動しているが、降水粒子が撮



図-1 MARSHALL の外観

影されない課題(以下, 課題 1)や, Rainscope が MARSHALL に搭載された 1 台のみであったため, 測定結果の比較データが時間的に一致していないためにドローンに Rainscope を搭載したときの構造的な問題の発見が困難である課題(以下, 課題 2)が示された。課題 1 に対して伊與田らでは, 「断定的な要因は不明であるが, 主な原因として風による機体の振動が挙げられる。」と述べている。また, 「50 m および 100 m の高度で飛行させた場合には機体強い風を受けることになる。ホバリング時には機体が位置を維持しようとして風に抵抗するため, 機体の姿勢を大きく変化させる動作が繰り返される。このような動作が Rainscope の各種センサに影響を及ぼし, その結果, 降水粒子が正確に観測できなかった可能性が高い。」とも述べている。そこで本研究では, 上空での雨滴の捕捉率が低下する原因を追究するために, 実際にドローンを用いて風の測定を行い, ドローンの飛行情報と比較させて考察を行った。また, 課題 2 に対して, 地上と上空で時間的に一致した測定結果を用いて比較し, MARSHALL の適用可能性について考察を行った。

(5) 本研究の目的

本研究の目的は, 課題 1 に対しては, 地上から 100 m 程度の高高度での空中測定で雨滴の捕捉率が低下する原因を, ドローンの飛行記録と比較することにより考察することである。課題 2 に対しては, 新たに Rainscope を 1 台追加し地上と上空で時間的に一致した測定結果を取得し比較することで, MARSHALL の適用可能性を考察することである。

表-1 全天候型ドローンの主な機体仕様

項目	内容
プロペラ数	8枚
重量	8.4 kg
機体寸法	高さ467mm×軸間距離1224mm
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程度

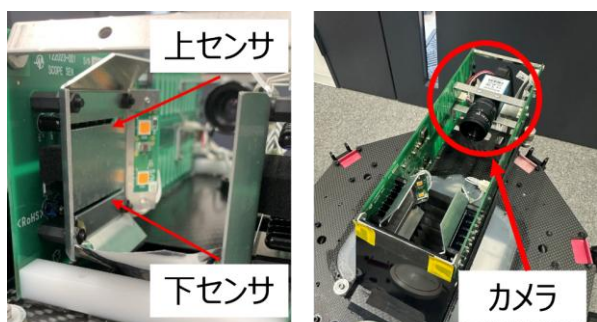


図-2 Rainscope の構造

2. 研究手法

(1) 使用機器

a) MARSHALL の概要

MARSHALL は全天候型ドローンに Rainscope を搭載したものである。表-1 は全天候型ドローンの主な機体仕様を示す。全天候型ドローンは, コントロール部とバッテリー一部に防水性能を有しており, 飛行可能風速は瞬間最大風速 18~19ms⁻¹程度であるため, 降雨時でも飛行可能である。最大飛行時間は状況によって変化するが, 20分程度の飛行が可能である。飛行可能高度は 1000 m であるが航空法の制限により, 本研究では高度 150 m 以下で実験を行った。図-2 は Rainscope の構造を示す。降水粒子の測定方法は以下の順序に従って行われる。降水粒子は上センサと下センサを通る。上センサは, 降水粒子が通過した時間の記録とカメラのシャッターを切るためのセンサを兼ねている。下センサは, 降水粒子が通過した時間のみを記録する。

b) MARSHALL の改修

風向・風速の測定のため, 超音波式風向風速計(以下, 風速計)の搭載を行った。

既往研究では高度を上昇させて降水粒子の捕捉率が低下する原因として風の影響が示唆された。そこで本研究では MARSHALL に風速計を搭載した。風速計の外観と搭載部の様子を図-3 に示す。風速計は CALYPSO の Ultrasonic Portable Solar²³⁾を使用した。これは風向と風速の測定が可能な測器である。

また, 既往研究では地上測定と空中測定で雨滴粒径と落下速度の関係で分布の傾向に差異が確認された。これは数多くの要因が考えられるが, 本研究では回転するプロペラからの気流が雨滴に与える影響を低減するために, 降水粒子の検出窓を機体中央に寄せる改修を行った。

(2) 実験方法

実験は 2025 年 9 月から 2026 年 1 月に行った。実験場所は富山県立大学グラウンドの中央付近で行った。2026

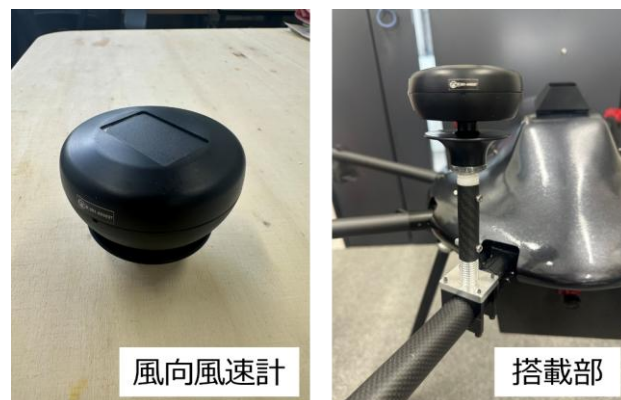


図-3 風向風速計の外観(左図)と搭載部(右図)

年1月は富山県下新川郡入善町の園家山キャンプ場付近で行った。測定実験は、風の測定実験と降水粒子の測定実験を行った。詳細は下記に示す。なお、本研究で使用した機体は総重量が100g以上であるため、無人航空機に該当する。そのため、国土交通省が定める航空法および「無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール」²⁴⁾を遵守し、周囲に対して十分な注意を払いつつ実験を行った。



図-4 UAV-G(左図)とUAV-A(右図)の様子

a) 風の測定方法

風の測定は、MARSHALLを指定高度でホバリングさせた時の風速を測定した。表-2に風の測定日と測定高度を示す。MARSHALL飛行時のフライトレコーダのデータと風の測定結果を比較し、ホバリング中のMARSHALLの姿勢と風速の関係を比較した。

b) 降水粒子の測定方法

降水粒子の測定は、地上でMARSHALLを静止させた状態(以下、UAV-G)と指定高度でホバリングさせた状態(以下、UAV-A)、地上に三脚を設置しRainscopeを載せた状態(GND)で実験を行った。UAV-GとUAV-Aの様子を図-4、GNDの様子を図-5に示す。表-3に降水粒子の測定日と測定高度を示す。



図-5 GNDの様子

(3) 結果の比較方法

a) 降水粒子の捕捉率

課題1として、伊與田らは高度50mや100m程度の高度では降水粒子が撮影されない課題が述べられたが、どのような高度で降水粒子の測定ができなくなるかについては定量的に示されていない。そこで、高度ごとの

表-2 風の測定日と測定高度

実験日	観測時間帯	高度(m)
9月12日	12:14~12:22	6
	12:28~12:35	60
	12:40~12:47	75
	12:52~12:35	80
10月16日	12:20~12:37	20
	12:41~12:59	60
	13:04~13:19	100
10月27日	11:06~11:21	20
	11:36~11:53	60
	11:56~12:14	100
11月28日	14:11~14:26	20
	14:31~14:46	20
	14:52~15:07	20
	15:19~15:29	20
12月17日	15:19~15:30	20
	15:37~15:55	20
	16:06~16:21	20
	16:31~16:45	20

表-3 降水粒子の測定日と測定高度

実験日	観測時間帯	実験条件	高度(m)
9月12日	12:14~12:22		6
	12:28~12:35	UAV-A	60
	12:40~12:47		75
	12:52~12:35		80
9月25日	10:47~11:13		UAV-G
10月14日	13:43~13:44		20
	14:00~14:09	UAV-A	40
	14:14~14:25		60
14:30~14:39	80		
10月16日	12:20~12:37		20
	12:41~12:59	UAV-A	60
	13:04~13:19		100
	13:29~13:35		140
10月27日	11:06~11:21	UAV-A	20
11月10日	14:04~14:36	UAV-G	
11月17日	14:21~14:38		3
	14:42~14:54	UAV-A	10
	15:00~15:11		20
	15:15~15:29		60
11月18日	11:30~12:08		
11月26日	12:43~13:35	UAV-G	
	14:11~14:59		
	12:17~12:29		20
11月28日	12:51~13:08	UAV-A	20
	13:54~14:08		20
	14:11~14:26		20
11月28日	14:31~14:46	UAV-A	20
	14:52~15:07		20
	15:19~15:29		20
12月3日	10:30~13:29	UAV-G	
12月5日	11:15~11:43	UAV-G	
12月17日	15:19~15:30		20
	15:37~15:55	UAV-A	20
	16:06~16:21		20
	16:31~16:45		20
12月17日	15:34~15:35		UAV-G
16:26~16:27			
1月5日	14:08~14:12	UAV-A	1
	14:15~14:28		20

降水粒子の捕捉率を算出した。捕捉率は式(1)より算出した。

$$N = (N_{det}/N_{raw}) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $N[\%]$ は降水粒子の捕捉率、 $N_{raw}[\text{個}]$ は測定データの原画像数、 $N_{det}[\text{個}]$ は解析後の粒子画像数である。これを UAV-G と UAV-A の高度 20 m 以下、21 m 以上 60 m 以下、61 m 以上 100 m 以下、101 m 以上 140 m 以下の測定で、降水粒子の捕捉率を算出した。

b) ドローンの姿勢データと風速の比較方法

ドローンの姿勢データは、フライトレコーダのデータを用いた。これは飛行中の位置座標や飛行高度、移動速度、姿勢などの各種データが記録されている。本研究では、フライトレコーダの姿勢データを用いた。ドローンの姿勢は3種類の角度により記録される。MARSHALL の姿勢軸のイメージ図を図-6 に示す。図中の緑軸がピッチ軸、赤軸がロール軸、青軸がヨー軸を示す。ドローンの正面に対して、ピッチ軸は上下の姿勢移動、ロール軸は左右の姿勢移動、ヨー軸は水平方向の回転角を表す。ピッチ角が正のとき、機首が上昇するような挙動を示す。ロール角が正のとき、機体は機種に対して右方向に傾くような挙動を示す。ヨー角は機首の方角角を示す。ドローンがホバリングしているときに機体の姿勢制御に用いられるのはピッチ角とロール角である。風速の測定はホバリング中に行ったため、ピッチ角とロール角を風速との比較を行った。ドローンの姿勢制御において、ピッチ角やロール角の正負に支配的な影響を及ぼす要件は、見かけ上風向である。そのため、ピッチ角とロール角は正と負によって記録された。そこで、ピッチ角とロール角のデータに対して絶対値をとることで、単純な角度情報に変化させて風速の測定結果と比較した。

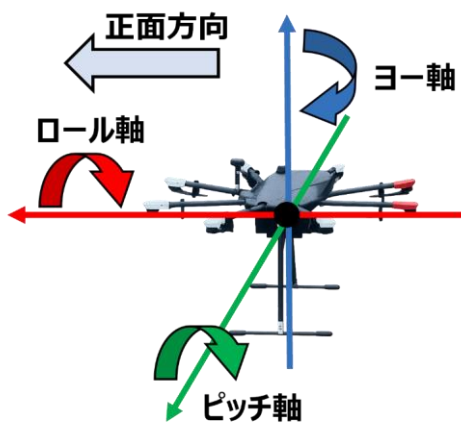


図-6 ドローンの姿勢軸のイメージ図

c) 降水粒子測定結果の比較方法

降水粒子の測定結果は、雨滴粒径分布、雨滴粒径と落下速度の関係の2つの指標から比較を行った。

雨滴粒径分とは、ある粒径における単位体積当たりの粒子密度を示すものである。これは、気象レーダからの降水量および降水強度の推定、降水システムの再現実験、数値モデルに基づく雨の形成などに広く利用されるものである。雨滴粒径分布は、測定された n 個の粒子の落下速度を用いて以下の式(2)から求めた。

$$N(D) = \sum_{i=0}^n \frac{1}{V \cdot S \cdot T \cdot dD_i} \quad (2)$$

ここに、 $N(D)[m^{-3}mm^{-1}]$ は単位体積あたりの粒子数、 V は粒子の落下速度[m s⁻¹]、 $S[m^2]$ は Rainscope の観測面積、 $T[s]$ は Rainscope の内部を粒子が通過する時間、 $dD_i[mm]$ は粒子の粒径を各クラスに分割した分割幅である。本研究では、GND, UAV-G, UAV-A の測定結果から算出した雨滴粒径分布の比較を行い、分布形状の類似性についての考察から測定値の妥当性を判断した。

雨滴粒径と落下速度の関係は、気象レーダの観測値から降水強度を算出する際に用いられる。また、ディストロメータなどの降水粒子観測器などの観測結果の提示にも用いられる。本研究では雨滴のみの測定であったが、降雨、降雪、霰などの降水形態によって粒径と落下速度の関係は異なるため、分布の特徴から降水粒子を判別することも可能である。雨滴粒径と落下速度の関係について、Gunn and Kinzer(1949)の実験値²⁹から Best(1950)は以下の式(3)²⁰を示した。

$$V(D) = 9.58(1 - e^{-(D/1.77)^{1.147}}) \quad (3)$$

ここに、 $V(D)$ は粒子の落下速度[m s⁻¹]、 D は粒径[mm]である。図-7はGunn and Kinzer の実験値と Best(1950)の式を図示したものである。これは一般に雨滴が落下する際

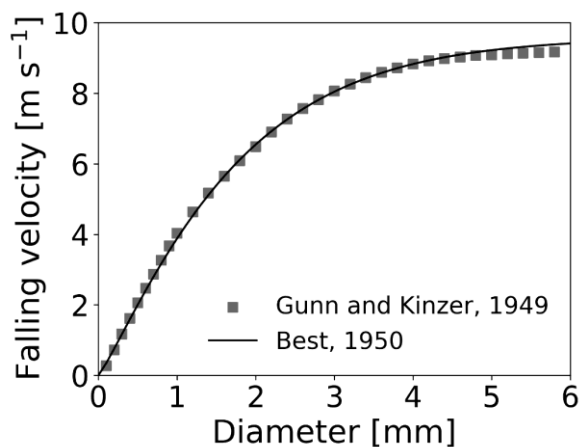


図-7 雨滴粒径と落下速度の関係

の終端速度を示すものである。本研究では、GND、UAV-G、UAV-A の測定結果から算出した雨滴粒径と落下速度の関係が Best(1950)の式と同様の分布形状や密度の傾向を示すのかについて考察を行い、測定値の妥当性を評価した。

後述するが、降水粒子の捕捉率の結果から降水粒子の測定結果の比較に使用したデータは高度 20 m 以下の測定結果である。そのため、測定値の妥当性については高度 20 m 以下の場合に限定される。

3. 結果

(1) 降水粒子の捕捉率

図-8 に高度ごとの降水粒子の平均捕捉率を示す。横軸に捕捉率、縦軸に高度を示す。また、縦軸の高度では、UAV-A の飛行高度 20 m 以下、21 m 以上 60 m 以下、61 m 以上 100 m 以下、101 m 以上 140 m 以下をそれぞれ、20 m まで、60 m まで、100 m まで、140 m まで、と表記した。UAV-G と UAV-A の 20 m までの測定では、UAV-G では約 71%、20 m までは約 59%を示し、捕捉率の変化が大きくないことがわかる。一方で、21 m 以上での降水粒子の

測定では、60 m までが 4.29%、100 m までが 0.52%、140 m までは 0.00%を示したように著しく捕捉率が低下した。また、この結果から課題 1 が本研究で行った MARSHALL の改修では根本的な解決には至っていないことを示した。そのため、GND と UAV-G、GND と UAV-A の雨滴粒径分布と、雨滴粒径と落下速度の比較には UAV-G と高度 20 m までの測定結果を使用した。しかし、GND と UAV-G では降水粒子の捕捉率の差が約 11%ある。これについては断定的ではあるが、後述する MARSHALL の内部構造が原因だと考える。

(2) ドローンの姿勢データと風速の比較結果

図-9 は表-2 で示した各フライトにおける平均風速と高度の関係を示す。一般に、地表からの高度が上昇すると風速が増加する。本研究で測定した風速と高度の関係でもこの傾向が確認できた。

図-10、図-11 はドローンのピッチ角・ロール角と風速の関係について密度を用いて表したものである。横軸に風速、縦軸にピッチ角・ロール角を示す。ピッチ角、ロール角ともに使用したデータ数は $n=13474$ である。プロット上で寒色系の色は低い密度を示し、逆に暖色系の

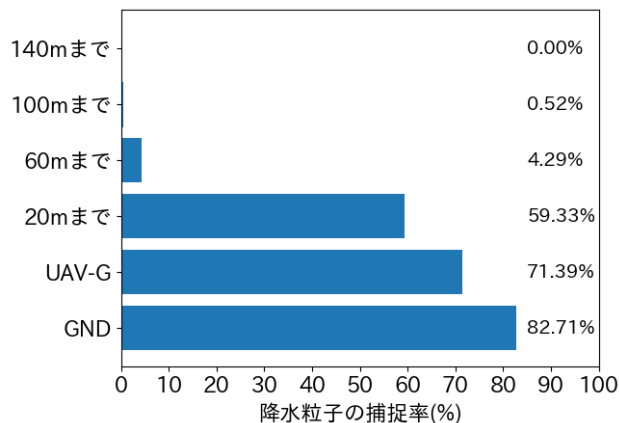


図-8 高度ごとの降水粒子の平均捕捉率

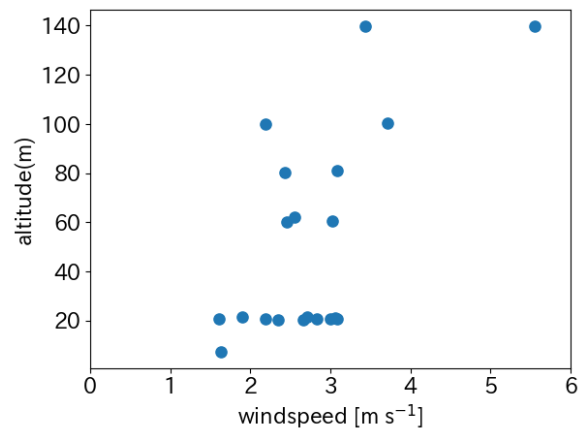


図-9 各フライトの平均風速と高度の関係

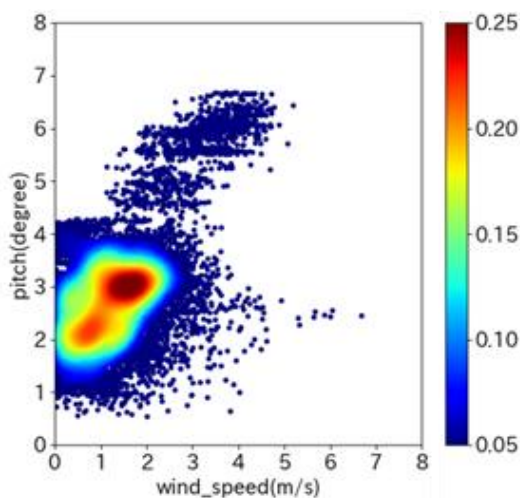


図-10 ピッチ角と風速の関係

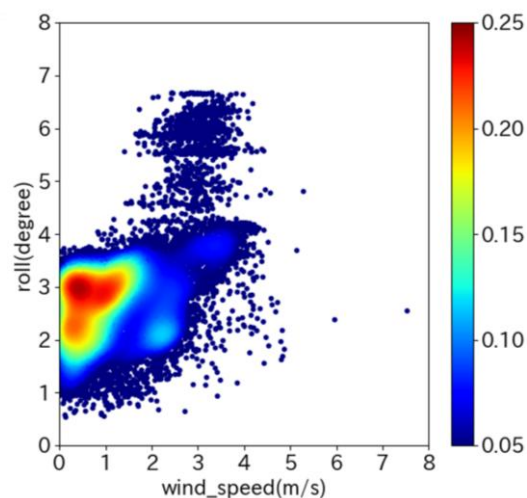


図-11 ロール角と風速の関係

色は高い密度を示す。図-10の密度分布の特徴として、風速 2 m s^{-1} でピッチ角 3° 付近の密度が卓越していることがわかる。また、風速 1 m s^{-1} でピッチ角 2° 付近にも密度が高くなっている部分が確認できる。図-11の密度分布の特徴として、風速 0.5 m s^{-1} でロール角 3° 付近の密度が卓越していた。ピッチ角の分布と比べると広範囲に高密度の部分が広がっている。ピッチ角とロール角の全体的な密度の分布形状として、正の傾きが確認できる。これは、風速の上昇に伴ったドローンの角度の増加を示した。

(3) 雨滴粒径分布の比較

はじめに、UAV-GとGNDの雨滴粒径分布の比較を行う。UAV-GとGNDの雨滴粒径分布を図-12に示す。横軸が粒径、縦軸が単位体積当たりの粒子の密度を示す。なお、縦軸は対数軸を使用している。図中の青色がUAV-G、橙色がGNDを示す。UAV-G、GNDともに、粒径が 1 mm 程度の粒子が支配的であり、粒径が増大するにつれて粒子密度が減少するような傾向を示す。これは一般に示されている雨滴粒径分布と同様の傾向であり、降雨事例などによって細部の雨滴粒径分布は異なるが、 4 mm 以下の粒径の粒子が大部分を占めることがほとんどである。また、両者の雨滴粒径分布は粒子数が少ないためにプロットされていない部分を除くと若干の差異はあるものの、類似した分布を示した。特に、粒径が 1 mm から 3 mm までの分布では非常に近い値を示してお

り、粒径ごとの粒子密度について良好な一致が見られた。

次に、UAV-A(20 m まで)とGNDの雨滴粒径分布を図-13に示す。図-12と同様に、横軸が粒径、縦軸が単位体積当たりの粒子の密度を示し、縦軸は対数軸を使用している。図中の青色はUAV-A、橙色はGNDを示す。UAV-GとGNDの雨滴粒径分布の比較と同様に、粒径が 1 mm 程度の粒径が支配的であり、粒径が増大するにつれて粒子密度が減少するような傾向を示した。

(4) 雨滴粒径と落下速度の関係

図-14にUAV-GとGNDの雨滴粒径と落下速度の関係を示す。横軸が粒径、縦軸が落下速度を示す。使用したデータ数は、UAV-Gが $n=1,535$ 、UAV-Gに対応したGNDが $n=1,319$ である。プロット上で寒色系の色は低い密度を示し、逆に暖色系の色は高い密度を示す。図中の実線は式(3)の Best(1950)の式を示す。両者を比較すると、粒径が増大するにつれて落下速度が増加する正の相関関係が確認された。また、落下速度の増加率は一定ではなく、非線形の挙動を示す。この傾向は、Best(1950)の式が示す挙動と一致しているといえる。一方で、密度分布ではUAV-GとGNDで異なる傾向を示す部分の確認された。特に、GNDでは粒径が 1 mm から 1.5 mm の領域で高い密度を示しているのに対して、UAV-Gではこの傾向を示していない。また、UAV-Gでは粒径 1 mm 程度、落下速度が 3 m s^{-1} 以下の領域の密度がGNDに

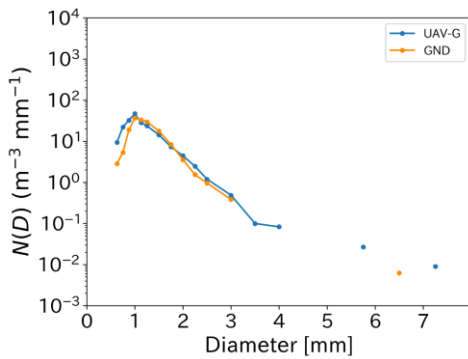


図-12 UAV-GとGNDの雨滴粒径分布

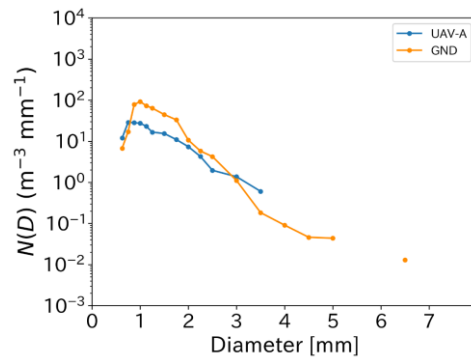


図-13 UAV-A(20mまで)とGNDの雨滴粒径分布

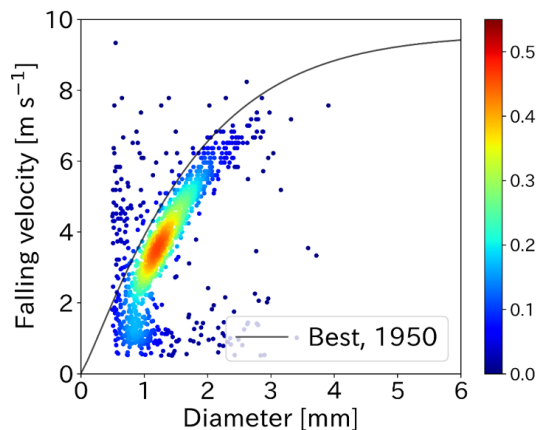
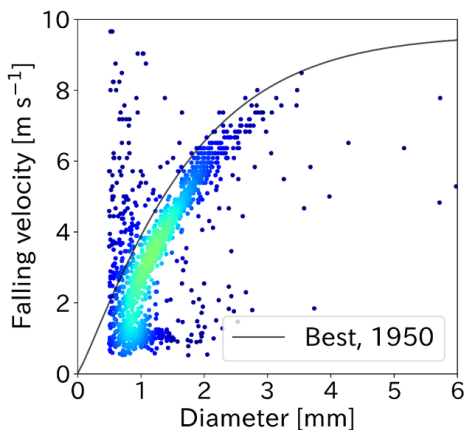


図-14 UAV-G(左図)とGND(右図)の雨滴粒径と落下速度の関係

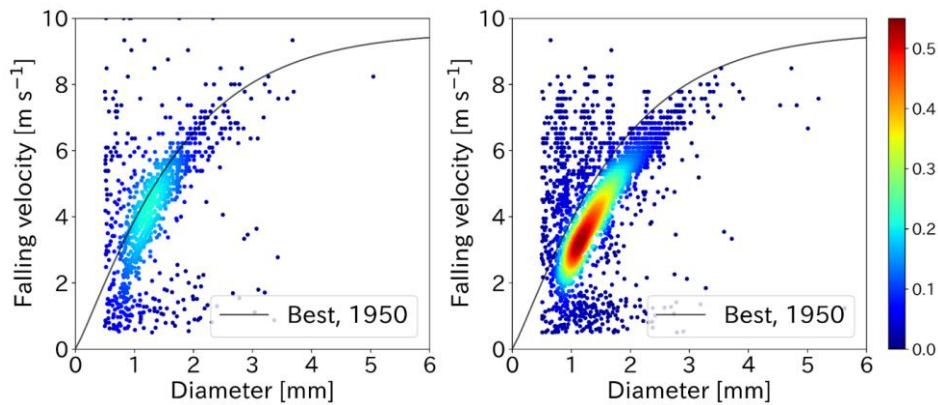


図-15 UAV-A(20mまで)(左図)とGND(右図)の雨滴粒径と落下速度の関係

対して高い密度を示した。つまり、UAV-GではGNDに対して落下速度が小さく、粒径が小さい粒子が多いことを示した。

図-15にUAV-A(20mまで)とGNDの雨滴粒径と落下速度の関係を示す。横軸が粒径、縦軸が落下速度を示す。使用したデータ数は、UAV-Aが $n = 1,111$ 、UAV-Aに対応したGNDが $n = 4,331$ である。密度の色分けはUAV-GとGNDの比較と同様である。UAV-A(20mまで)とGNDの比較では、粒径が増大するにつれて落下速度が増加する正の相関関係が確認された。落下速度の増加率は一定ではなく、非線形の挙動を示した。全体的な分布はBest(1950)の式に沿うような形状を示した。

4. 考察

(1) 飛行中のドローンの姿勢について

図-10、図-11に示すように、ピッチ角とロール角の密度分布形状から判断すると正の傾きが確認できる。これはピッチ角・ロール角ともに、風速の上昇に伴ったロール角の増加傾向を示す。この常時発生している傾きにより、Rainscopeの検出窓の面積が落下している降水粒子に対して相対的に縮小することで、高高度での降水粒子の検出率が低下していると考えられる。また、ピッチ角、ロール角ともに風速が 3ms^{-1} から 4ms^{-1} のときに 5.5° から 7° の傾きを測定した。ホバリング時はドローンのコントローラーからの入力を行っていないため、風により引き起こされたものだと考えられる。また密度分布から、 5.5° から 7° の傾きは常時発生していたものではなく、短時間に測定されたものであり、突発的に発生したといえる。この突発的な傾きにより、Rainscopeのセンサ部が誤検出を起こし、降水粒子が検出されない画像が撮影され、降水粒子の捕捉率が低下したと考えられる。

つまり、高高度では地上と比較して強い風が常時発生しドローンが常に傾くため、Rainscopeの検出窓が相対的に縮小され、降水粒子がセンサ部に到達することが困難

になっていると考えられる。また、突発的な傾きによりRainscopeのセンサ部で誤検出が発生し、降水粒子が検出されない画像が撮影されたと考えられる。

(2) 雨滴粒径分布の比較

UAV-GとGNDの雨滴粒径分布の比較では、雨滴粒径分の形状の類似性が確認できた。特に粒径 1mm から 3mm 程度で良好な一致を得た。UAV-AとGNDの雨滴粒径分布の比較でも、UAV-GとGNDの雨滴粒径分布と同様に、雨滴粒径分布の形状の類似性は確認された。

しかし、 1mm 以上の粒径の密度がGNDと比べて低くなった。これは、図-8で示したようにUAV-AではGNDと同じ時間測定を行っても降水粒子の捕捉率が異なるため粒子数が少なくなり、単位体積当たりの粒子密度である $N(D)$ が低くなったと考えられる。しかしながら、先に述べたように全体的な分布の形状は類似したものを示したため、雨滴粒径分布においては両者で同程度の観測結果が得られたと考える。

(3) 雨滴粒径と落下速度の関係

UAV-GとGNDの雨滴粒径と落下速度の比較結果において、GNDでは粒径が 1mm から 1.5mm の領域で高い密度を示しているのに対して、UAV-Gではこの傾向を示していない。また、UAV-Gでは粒径 1mm 程度、落下速度が 3ms^{-1} 以下の領域の密度がGNDに対して高い密度を示した。これはMARSHALLの内部構造に起因するものだと考えられる。Rainscopeの本来の構造として、検出窓から侵入した粒子はセンサ部を通過してそのまま(本研究では地面)に落下する。しかし、本研究で改修したMARSHALLは、Rainscopeの検出窓から侵入した粒子がセンサ部を通過したあとに、ドローン内部に着地する構造になっている。詳細には図-16を参照されたい。粒子が着地する部分は斜めにスリット構造を追加することで粒子の跳ね返りを防止している。しかしながら、小粒径で

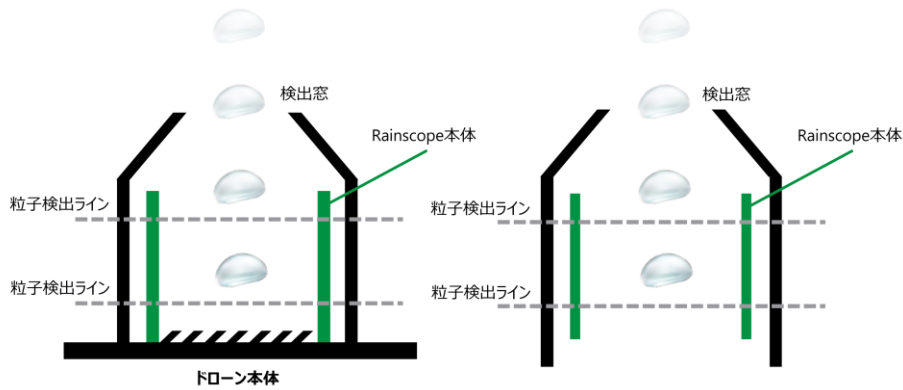


図-16 UAV-G(左図)とGND(右図)のRainscopeの構造の違い

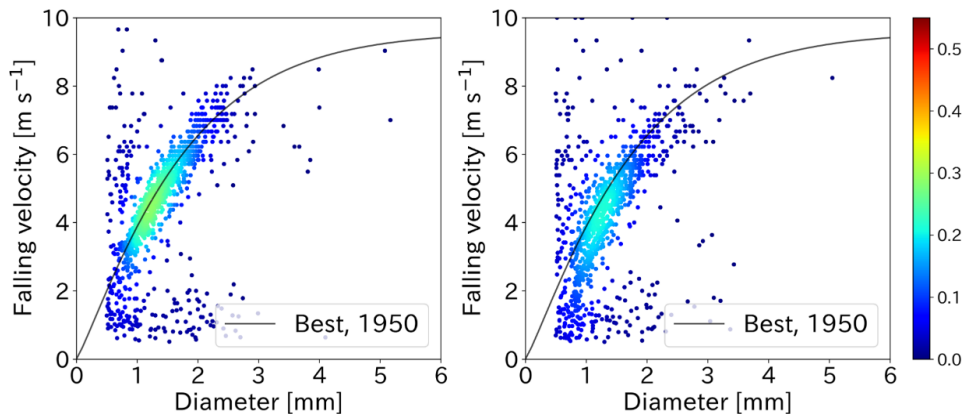


図-17 先行研究で示された空中測定の結果²⁷⁾(左図)と本研究のUAV-A(20 m まで)の測定結果(右図)

落下速度が小さい粒子が GND と比較して増加していることから、測定中のドローン内部では落下してきた粒子が Rainscope 底部のスリット構造で跳ね返り、小粒径の粒子として測定されていると考えられる。

図-15 の UAV-A と GND の雨滴粒径と落下速度の比較では、UAV-A の落下速度が GND や UAV-G と比べて増加傾向を示した。一方で、図-17 に示す先行研究と本研究の UAV-A の降水粒子の測定結果を比較すると、先行研究の空中測定に比べて UAV-A(20 m まで)の密度分布では粒子の落下速度が低くなる傾向を示した。これは本研究で行った改修による影響だと考えられる。伊與田らが用いた機体では、Rainscope の検出窓が機体胴体の外縁部に設置されていた。一般に、ドローン等のプロペラを用いた機体では、プロペラ付近の気流がより強い傾向を示す。そのため、本研究で Rainscope の検出窓を機体中央に再設置した改修は、伊與田らで述べられた落下速度が過大に算出される課題に対して、一定の効果を示したといえる。

5. まとめ

本研究の目的は、地上から 100 m 程度の高高度での空中測定で雨滴の捕捉率が低下する原因を、ドローンの飛行記録と比較することにより考察を行うことである。さらに、新たに Rainscope を 1 台追加し地上と上空で時間的に

一致した測定結果を取得し比較することで、MARSHALL の適用可能性を考察することである。

まず、降水粒子の捕捉率が低下する原因として、上空で強い風にさらされることで飛行中のドローンが不安定になり、Rainscope のセンサ部が誤検出をしていると考えた。そこで、ドローンに風速計を設置し測定した風のデータと飛行中のドローンのフライトレコーダのデータを比較することで、風と飛行中のドローンの姿勢変化について考察した。また、先行研究では UAV-G と UAV-A の比較により MARSHALL の適用可能性について評価したが、両者の測定データは時間的に一致したものではなかった。そこで新たに地上に Rainscope を設置し(GND)、UAV-G、UAV-A の測定と同時に降水粒子の測定を行うことで、MARSHALL の適用可能性について考察した。

風の測定結果として、上空での強い風によりドローンの姿勢は 2 種類の変化が発生していると考えられる。1 つ目は風速が $0 \sim 2 \text{ m s}^{-1}$ 程度で常に発生している姿勢変化である。2 つ目は突発的な姿勢変化である。これら 2 種類の姿勢変化により Rainscope のセンサ部で誤検出が発生し、降水粒子が検出されない画像が大量に撮影されることで、降水粒子が撮影できない状態になっていると考えられる。一方で、高度 20 m 程度では多少の捕捉率低下が見られたものの測定が可能であると判断し、高度 20 m 程度での降水粒子の測定結果について比較を行った。

降水粒子の比較結果として、雨滴粒径分布では、UAV-G と GND, UAV-A と GND とともに多少の差異はあったが、概ね同様の傾向を示した。UAV-G と GND の雨滴粒径分布の比較では、粒径が 1mm から 3mm 程度では良好な一致が確認された。UAV-A と GND の雨滴粒径分布の比較では、全体的な分布形状は類似した傾向を示したが、UAV-A 20 m までと GND では降水粒子の捕捉率が異なるため、UAV-A の粒子密度が低い傾向を示した。雨滴粒径と落下速度の関係については、Best(1950)の式に沿うような密度分布を確認した。

これらの結果から、上空では地上と比較して強い風が吹いていることに加えて、比較的強い風により突発的な傾きが発生することで、上空での降水粒子の測定に多大なる影響を与えているといえる。

しかしながら、高度 20 m 以下では UAV-G, UAV-A, GND で同程度の測定結果を得られ、同手法による降水粒子の測定は可能であるといえる。一方で、UAV-G と GND の雨滴粒径と落下速度の密度分布については、粒径が 1 mm 程度、落下速度が 3 m s^{-1} 以下の領域で差異が確認された。これらの差異は、ドローンへの Rainscope の搭載方法に起因する可能性が高く、今後は機体の改修が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 地域気象観測システム (アメダス), 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>, 2026年1月14日閲覧
- 2) XRAIN の概要, 国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/cmmn/001010011.pdf>, 2026年1月14日閲覧
- 3) 気象観測衛星について, 気象庁, https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/satellite.html, 2026年1月14日閲覧
- 4) ラジオゾンデによる高層気象観測, 気象庁, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/upper/kaisetsu.html>, 2026年1月14日閲覧
- 5) 第 2 章 降水量観測, 国立研究開発法人土木研究所, https://www.pwri.go.jp/team/hydro_eng/img/04.pdf, 2026年1月31日閲覧
- 6) 小正実奈, 越田智喜, 武中英好, 佐野哲也, 深見和彦: 近年のレーダ雨量観測の動向, 河川情報シンポジウム講演集, 2024年度, 4.1-4.7, 2024.
- 7) 気象レーダー, 気象庁, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>, 2026年1月15日閲覧
- 8) 技術調査: レーダ雨量計情報, 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000040.html, 2026年1月15日閲覧
- 9) 国総研資料 第 909 号, 国土交通省国土技術政策総合研究所, <https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0909.htm>, 2026年3月22日閲覧
- 10) 額額文晴: X バンド偏波レーダ用降水粒子判別手法の開発, 名古屋大学修士論文, 2010.
- 11) 中北英一, 山口弘誠, 隅田康彦, 竹畑栄伸, 鈴木賢士, 中川勝広, 大石哲, 出世ゆかり, 坪木和久: C バンド偏波レーダを用いた降水粒子識別とビデオゾンデを用いた集中同期検証観測, 京都大学防災研究所年報, B 51(B): 519-533. 2008.
- 12) 増田有俊, 板戸昌子, 谷口和哉, 境和宏, 上田博, 山下克也, 中井専人: XRAIN を用いた冬季降水量推定精度の向上, 土木学会論文集, Vol.74, I_85-I_90, 2018.
- 13) WMO Uncrewed Aircraft Systems Demonstration Campaign, World Meteorological Organization, <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/wmo-uncrewed-aircraft-systems-demonstration-campaign>, 2026年1月31日閲覧
- 14) 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, B63 (B), 282-290, 2020.
- 15) 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, 環境情報科学論文集, Vol.34, 228-233, 2020.
- 16) 山路昭彦, 吳映昕, 井上実, 佐々木寛介: ドローンを用いた上空の気象場および火山噴煙の観測, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 水文・水資源学会 日本水文科学会 2023 年度研究発表会, 94, 2023.
- 17) Jun Inoue and Kazutoshi Sato: Toward sustainable meteorological profiling in polar regions: Case studies using an inexpensive UAS on measuring lower boundary layers with quality of radiosondes, Environmental Research, Vol.205, 112468, 2022.
- 18) 【全天候型ドローン】開発機体の概要, 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/innovative_project/pdf/2.pdf, 2026年1月16日閲覧
- 19) 馬淵慎也, 吉見和紘: 全天候型ドローンを用いた新たな降水粒子観測手法の基礎研究, 土木学会全国大会, 2024.
- 20) 降水粒子撮像ゾンデ Rainscope, 明星電気株式会社, https://www.meisei.co.jp/products/meteo/meteo_high_ground/p3551, 2026年1月15日
- 21) Kenji Suzuki, Yurika Hara, Takuji Sugitachi, Kensaku Shimizu, and Masatomo Fujiwara: Development of a New Particle Imaging Radiosonde with Particle Fall Velocity Measurements in Clouds, SOLA, Vol.19, 261-268, 2023.
- 22) 伊與田光騎, 馬淵慎也, 吉見和紘: 低高度における自然環境下でのドローンを用いた降水粒子観測手法の検証, 土木学会中部支部, 2025.
- 23) ポータブル超音波風向風速計(CCP-Portable), クリ

- マテック株式会社, <https://www.weather.jp/products/wind/sat/ccp-portable/>, 2026年1月16日閲覧
- 24) 無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール, 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html, 2026年1月17日閲覧
- 25) Ross Gumm and Gilbert D. Kinzer : THE TERMINAL VELOCITY OF FALL FOR WATER DROPLETS IN STRGN ANT AIR, Vol.6, 243-248, 1949.
- 26) A.C.Best : Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol.76, 302-311, 1950.
- 27) 伊與田光騎 : 全天候型ドローンと Rainscope を用いた降水粒子の観測, 富山県立大学卒業論文, 2025.