実フィールドにおける全天候型 UAV を用いた新しい気象観測手法の研究

研究代表者：富山県立大学工学部環境社会基盤工学科 講師 吉見和紘
馬渕慎也・伊與田光騎

1. はじめに

上空の降水粒子観測は，気象予測の精度向上や降水現象の解明に貢献すると期待される．上空の降水粒子観測測器として，気象レーダやビデオゾンデが知られている．しかしながら，気象レーダは平均的に高度 500 m 以上の降水を観測しており，この高度以下の観測が十分に行われていない．また，気象レーダの偏波情報を用いた降水粒子の判別が研究されており [1]，上空の降水判別は，降雪や積雪のタイミングなどを推定する上で非常に重要である．しかしながら，推進された上空の降水粒子の状態の確からしさを示すことは困難である．さらに，ビデオゾンデは粒子の直接観測が可能であるが，定点での観測が困難であることに加え，その用途は研究目的に限定されている．このように，上空の降水粒子観測は気象学・工学上で重要であるが，発展の余地が残されている．

そこで，馬渕ら(2024)は新たな降水粒子観測手法として，粒径と落下速度の同時観測が可能な Rainscope を悪天候下でも飛行可能な全天候型ドローンに搭載した観測機器(以下，MARSHALL を用いた手法を提案した [2]．本手法の適用前に飛行状態が観測に与える影響を確認するため，馬渕らは，任意の気象環境を再現可能な実験室において，地上で MARSHALL を静止させた状態(地上測定)と，地上から約 1 m の高度で飛行させた状態(空中測定)で降水粒子観測を行った．両測定で類似した観測結果が得られることを確認したが，実際の降水においては検証を行っていない．そのため，本研究では屋外における観測を実施した．本研究の目的は，実際の降水現象において，地上測定と空中測定で同程度の観測結果が得られるかを検証することとした．

2. 研究手法

地上測定と空中測定の 2 種類で降水粒子の観測を行なった．両測定でそれぞれ複数の降雨事例を対象とした．また，観測により得られる結果は粒子画像と粒子のセンサ通過時間であるため，構築した解析アルゴリズムにより，粒子の粒径と落下速度を算出した．なお，Rainscope が観測可能な粒子の粒径は 0.5 mm 以上であるため，0.5mm 以上の粒径を解析対象とした．地上測定，空中測定の解析結果に対し，雨滴粒径分布，雨滴粒径と落下速度の関係によって類似性があるかを比較した．

2.1. 雨滴粒径分布

一般的な雨滴粒径分布を再現すると言われている修正ガンマ分布は以下の式(1)のように表される [3]．

$$N(D) = N_0 D^{\mu} e^{-\Lambda D} \tag{1}$$

ここに $N(D)$[m^{-3}mm^{-1}]は粒径分布関数であり，単位体積当たりの粒子密度を表す．N_0 [m^{-3}mm^{-1}]は分布曲線の切片，D[mm]は粒径，μ は形状パラメータ，Λ[mm^{-1}]は分布曲線の傾斜である．加えて，沖ら(1993)は降雨強度によって分布のパラメータ N_0，Λ が変動し得る値を示した [4]．本研究で観測を行った全降雨事例の平均降雨強度は 7.70 mm h^{-1} であり，このときの各パラメータが取り得る最大と最小の値を抽出し，本研究において取り得ることのできる雨滴粒径分布の範囲を式(1)から算出した．この範囲内に両測定の結果が存在することで類似性があるか否かを判断した．

2.2. 雨滴粒径と落下速度の関係

Best(1950)は雨滴の粒径と落下速度の関係について以下の式(2)を提示した．

$$V(D) = A\left(1-e^{-(D/m)^n}\right) \tag{2}$$

ここに，$V(D)$[m s-1]は雨滴の落下速度，D[mm]は粒径，A，m，n は大気の状況によって決まる定数であり，標準大気では，それぞれ 9.58，1.77，1.147 である．式(2)は雨滴が落下する際の終端速度を示す．

3. 地上測定と空中測定の結果の比較

3.1. 雨滴粒径分布の結果

地上測定と空中測定の雨滴粒径分布と，前述した取り得ることのできる最大および最小の雨滴粒径分布 $N_{max}(D)$，$N_{min}(D)$を**図-1** に示す．縦軸が $N(D)$，横軸が粒径を示している．図に示すように，両測定は類似した分布であり，$N_{max}(D)$と $N_{min}(D)$の範囲内に存在

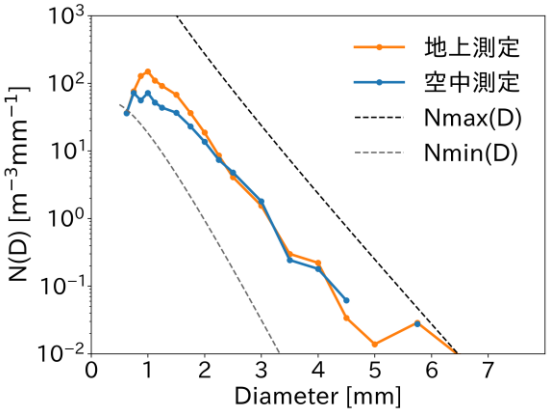

図-1　地上測定と空中測定の雨滴粒径分布

していた．雨滴粒径分布は両測定で同一時限において比較することができる．そのため，低高度においては飛行時であっても地上と同程度の観測結果が得られるといえる．

3.2. 雨滴粒径と落下速度の関係の結果

雨滴粒径と落下速度の関係を密度プロットしたものを**図-2** に示す．横軸が粒径，縦軸が落下速度である．左図が地上測定，右図が空中測定の結果であり，密度が高くなるにつれて暖色系の色へ変化する．加えて図中には式(2)を実線で示している．図に示すように，両測定で粒径が大きくなるにつれて落下速度が増加する非線形の正の相関が示された．また，式(2)の傾向と比較しても同様である．しかしながら，地上測定を基準とした場合，空中測定は全体的に分布が左上にシフトした結果となった．これは，ドローンのプロペラの気流や機体の揺動等の影響が起因していると考えられる．また両測定で分布の傾向から逸脱した外れ値が確認された．これは，解析時に粒径および落下速度の算出が正確に行われていないことが原因と考えられる．例えば，対象粒子の付近に小さな粒子が存在する場合や，粒子が画像の端で途切れている場合などに誤算出を招く．

4. まとめ

本研究は屋外で，地上測定と空中測定を行い，同程度の結果が得られるのか検証することを目的とした．結果として，雨滴粒径分布，雨滴粒径と落下速度の関係で類似した分布を示しており同程度の結果が得られた．しかしながら，課題点としてドローンのプロペラの気流や揺動の影響，解析による粒径または落下速度の誤算出などが確認された．粒子付近の小粒子や画像端での途切れが誤算出を招いている．

謝辞

全天候型ドローンの運用にあたり，株式会社フルテックからご助言をいただきました．また，スカイフィールドの橋詰様から，ドローンの改修および本研究へのご協力をいただきました．本研究は「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業，富山第一銀行の支援を受けました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 中北ら，C バンド偏波レーダー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，第 51 号 B, 2008.
2) 馬渕ら，ドローンを用いた新たな降水粒子観測手法の検討，気象学会春季大会予稿集，2024.
3) Ulbrich, C. W. , Natural variations in the analytical form of raindrop size distribution. Journal of climate and applied meteorology, 1764-1755, 1983.
4) 沖ら，雨滴粒径分布データを用いたレーダ換算定数の同定，水工学論文集, 37, 9-14, 1993.
5) Best, A. C. , Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 76, 302-311, 1950.

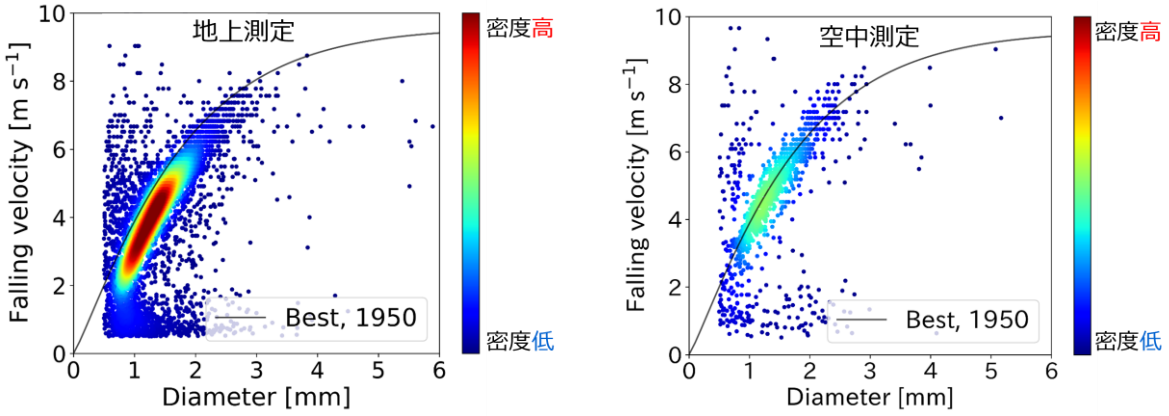

図-2　地上測定(左図)と空中測定(右図)の雨滴粒径と落下速度の関係