

光学式ディストロメーターを用いた固体降水量算定方法の検討

長岡技術科学大学 非会員
長岡技術科学大学 正会員
防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 非会員
森林総合研究所 十日町試験地 非会員
工房雪測 非会員

○守田佳弘
熊倉俊郎
中井専人
竹内由香里, 勝島隆史
山崎正喜

1 背景と目的

全国各地に存在するアメダスなどの観測点では主に転倒ます型雨量計を用いて降水量が観測されており、これらのデータは多様な用途に活用されている。しかしながら、転倒ます型雨量計は、雪などの固体降水に対してヒーターによる融雪の遅れなどの影響により観測精度に課題がある。これにより、観測された降水量と実際の降水量に乖離が生じ、正確なデータを得ることが難しい現状がある。重量式降水量計（Geonor 社 T-200B、OTT 社 Pluvio² など）など固体降水に対応した機器も存在するが、高価で多観測点への導入には適していない。このため、多観測点にわたり高精度で固体降水量を観測可能な機器が必要とされている。

本研究では、粒子直径と落下速度から降水量を算定する方法について検討を行う。熊倉ら¹が発表した光学式反射型固体降水測定器は、安価に製造可能であり、精度を高めることができれば多観測点にわたる高精度の固体降水量観測に寄与することが期待される。また、当該測定器には、粒子直径と落下速度を推定する機能が導入される予定であり、本研究ではそれを用いた降水量算定方法を検討する。今回は、実用化されているディストロメーターである Laser Precipitation Monitor（Thies Clima 社製、以下 LPM）の粒子直径・落下速度データを用いて、当該降水量算定方法の有用性の検討を行う。

2 観測条件

2.1 観測機器

2.1.1 LPM

本研究では、LPM の観測モードにおける Telegram³ Particle Event を使用し、球形を仮定した粒子直径及び落下速度の値を用いる。

2.1.2 田村式降水強度計

田村式降水強度計（以降、田村式）は雪などの固体降水の観測に強みをもつ測定器である。田村式で j 分間に



図 1 観測器の設置場所（十日町試験地）

表 1 採用した経験式，D は粒子直径(mm)

降水粒子	D-落下速度(m/s)	D-質量(mg)
Water Droplet	$v=3.78D^{0.67}$	$m=0.52D^3$
Lump Graupel	$v=1.3D^{0.66}$	$m=0.078D^{2.8}$
Hexagonal Graupel	$v=1.1D^{0.57}$	$m=0.044D^{2.9}$
Densly Rimed Aggregates	$v=1.1D^{0.15}$	$m=0.094D^{1.9}$
Rimmed Aggregates	$v=0.96D^{0.12}$	$m=0.96D^{1.9}$
Dendrite	$v=0.96D^{0.12}$	$m=0.0038D^2$

観測された降水量を Pr_{Mj} (Precipitation Measured) とし、実測値の目安として使用する。

2.2 観測期間・観測場所

今回の発表では、2022年12月15日から2023年2月27日までに森林総合研究所十日町試験地で観測されたデータを用いる。観測器の設置状況を図1に示す。

3.石坂らの方法を用いた降水量算出

3.1 質量フラックスとは

本研究での質量フラックスは石坂ら²が定義した値で、各個の降水粒子の質量に落下速度を乗じることで求めることができる（式1）。

$$f = mv \quad (1)$$

ここに、 f ($\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) は質量フラックス、 m (mg) は質量、 v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) は落下速度である。 $\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の単位を持ち、降水粒子が雲から地上へ水を移動させる効率を表すとされている値である。

3.2 降水種別ごとの落下速度・質量の経験式

降水種別ごとの粒子直径-落下速度関係および粒子直径-質量関係を表1に示す。今回は石坂ら²が採用した式をそのまま用いる。

3.3 質量フラックス適用範囲の拡張

粒子直径-落下速度式を用いることで、図2の実線に示されるような曲線を描くことができる。質量フラックスは粒子直径と落下速度が得られれば算出可能であるため、この曲線上で質量フラックスを求められることがわかる。しかし、曲線間における質量フラックスは直接求めることができないため、以下(式2)で算出する(図3)。

$$f_p = \frac{(d_b f_a + d_a f_b)}{(d_a + d_b)} \quad (2)$$

ここに、 f_p は点Pでの質量フラックス、 f_a 、 f_b はa、b点での質量フラックス、 d_a 、 d_b はPからa、b点までの粒子直径-落下速度座標上(単位はmm、m/s)での最短距離である。このように質量フラックスの適用範囲を曲線上のみから図2の濃淡で表されるスケールのように拡張することができる。

3.4 質量フラックスから粒子の質量を算出

観測された各粒子について粒子直径と落下速度から質量フラックス($\text{mg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)を算出し、その値を落下速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)で除することで単位が(mg)となり粒子1つの質量を算出できる。この方法で算出できる粒子の質量の分布を図4に示す。これにより、LPMで測定した各粒子の粒子直径と落下速度からその粒子の質量を求めることができる。

3.5 降水量の算出

粒子の質量を時間あたりで合計し、LPMの観測領域面積(0.00456 m^2)³⁾で除することで降水量を算出することができる。j分間あたりの算出降水量を以降 Pr_{Ej} (Precipitation Estimated) とする。算出に用いた降水粒子の分布図を図5に示す。粒子の分布が8.8mm付近を境に途切れているが、中井ら³⁾によると、LPMでは大粒子の直径を8.8mm付近に丸めてしまう特性があるためである。これらの粒子については対応をするべきであるが、取り除くなどの単純な対応では降水量が過小に算出されてしまうため今回はこのまま使用する。また、降水量への影響が小さく質量フラックスの算出も困難なため、粒子直径が1.5mm以下、落下速度が1.7m/s以下の小粒子は除いて計算を行う。例として、 Pr_{E5} (算出した5分間の降水量)を横軸、 Pr_{M5} (観測された5分間の降水量)を縦軸にした散布図を図6に示す。

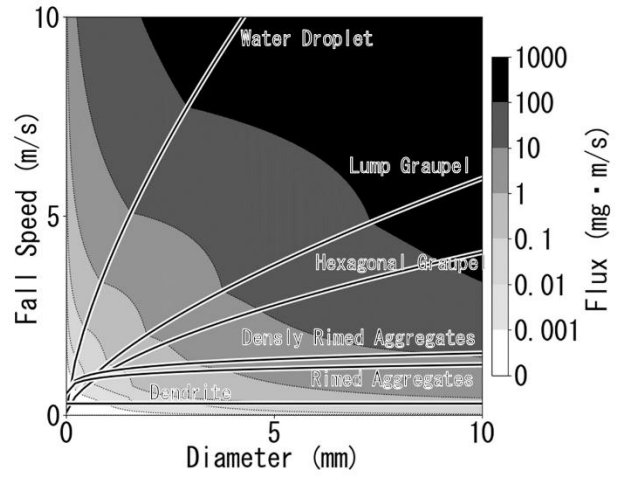


図2 質量フラックスの分布図と各降水種別の粒子直径-落下速度関係

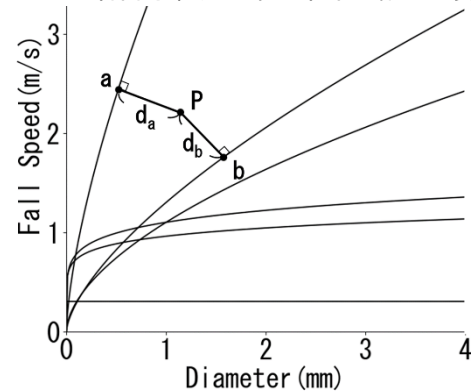


図3 曲線間の質量フラックスの求め方

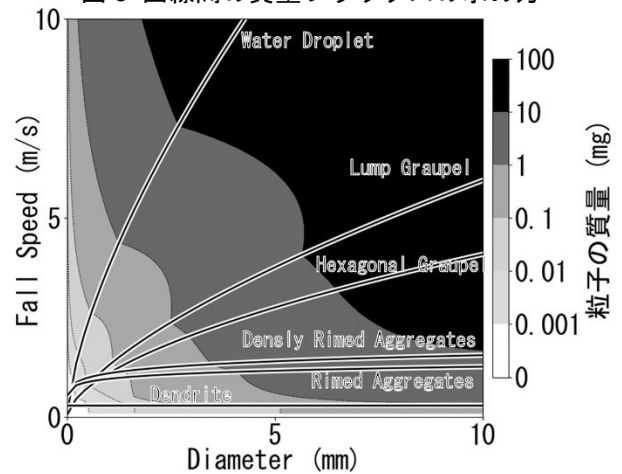


図4 質量分布図と粒子直径-落下速度関係

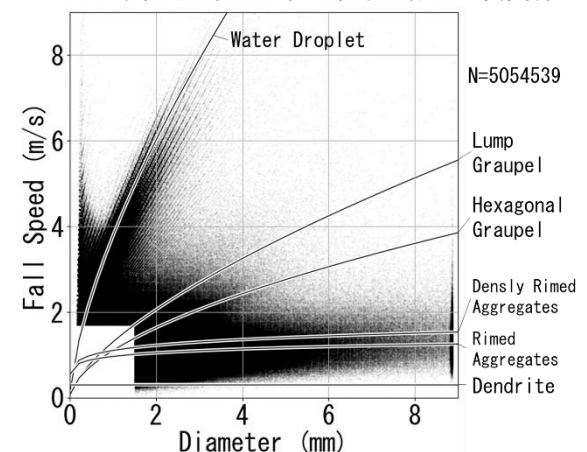


図5 降雨水量算出に用いた粒子 (2022.12.15-2023.2.27)

3.6 降水量への降水種別情報の付与

3.6.1 CMF を用いた降水種別の判別

CMF (center of mass flux) とは、石坂ら²⁾ よって定義された値で、力学における重心と同様に定義されており、質量フラックス分布の中心を示す。この指標は、粒子の分布の中心を求めるために使用される。粒子直径-落下速度座標上では、以下で表すことができる (式 3)。

$$\vec{f}_c = \frac{\sum_i f_i \vec{r}_i}{\sum_i f_i} \quad (3)$$

ここに、 \vec{f}_c が CMF の位置を示すベクトル、 \vec{r}_i は各粒子の位置を示すベクトル、 f_i はその位置での質量フラックスである。降水量の算出時間間隔ごとに CMF を算出し、粒子直径-落下速度座標上で最も近い曲線 (表 1) から降水種別を割り当てることで、算出した降水量に降水種別の情報を付与する。降水種別は短時間でも変動するため、時間ごとの質量フラックスの中心である CMF の場合、時間間隔を大きく取ると時間内に变化した降水種別の間をとる形となり、実際に降った降水種別を捉えられない可能性がある。そのために CMF を算出する時間間隔を検討する。なお、観測場所において Dendrite が降り続くことは考えにくいので、Dendrite に分類された CMF は Rimed Aggregates として取り扱った。時間間隔ごとの降水種別割合を図 7 に示す。時間間隔ごとに割合が変化していることがわかる。1 分のデータが最も正確に降水種別を捉えていると考え、これとの差が可能な限り小さいデータを使用したい。割合の変化量の絶対値の平均を求めると、1 分-3 分間が 0.88%、3 分-5 分間が 0.46%、5 分-10 分間が 0.76%、10 分-30 分間が 0.54%、30 分-60 分間が 0.52% である。可能な限りこの変化が起きる前のデータを用いることが望ましいと考えられる。

3.6.2 降水量の算出間隔

Pr_{Mj} と Pr_{Ej} の相関係数を 1、3、5、10、30、60 分ごとに算出し、降水量算出のばらつきに関する検討を行う。例えば、5 分の相関係数は図 6 に示した。時間間隔ごとの結果を図 8 に示す。図に示された曲線から、時間間隔を大きくとって算出するほど相関係数が上昇する傾向にある。また、時間間隔が小さいほど時間間隔の増加に対する相関係数の上昇が大きいことが確認できる。

4 結果・考察

4.1 降水量・CMF の算出時間間隔の決定

CMF 算出時間間隔ごとの降水種別の割合、降水量の

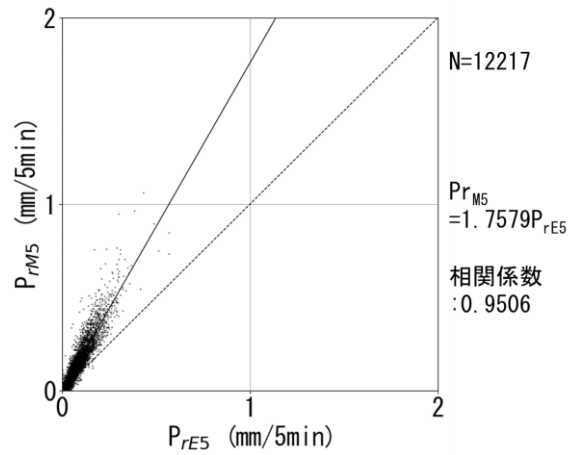


図 6 Pr_{E5} と Pr_{M5} の関係

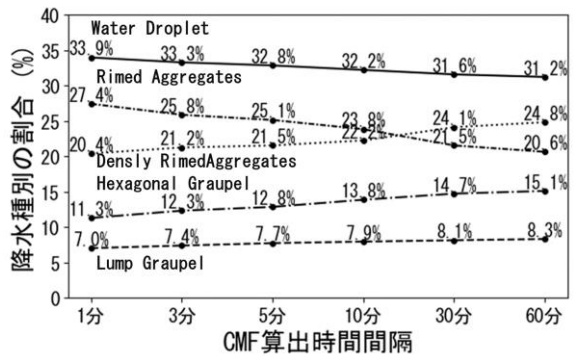


図 7 CMF 算出時間ごとの降水種別の割合

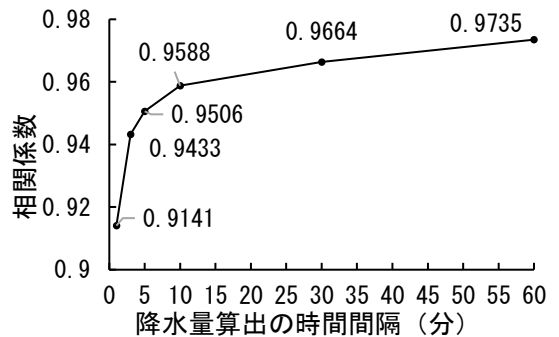


図 8 算出時間間隔での Pr_{Mj} と Pr_{Ej} の相関係数

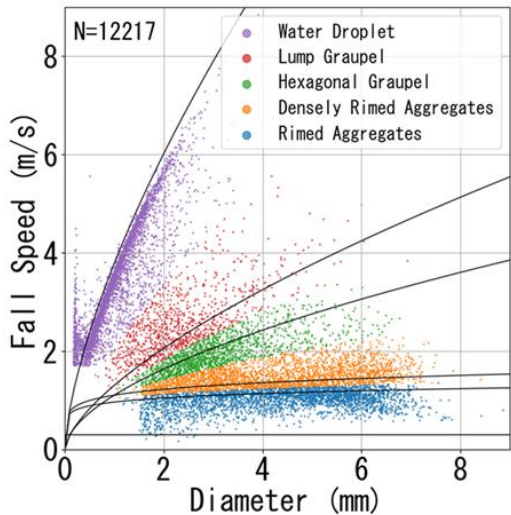


図 9 CMF の分布図

算出時間ごとの相関係数の結果から、降水粒子の情報を比較的正しく付与でき、相関係数も比較的高い 5 分で降水量・CMF を算出することとする。これにより、降水種別ごとの降水量算定の傾向を評価できる。分類後の 5 分間隔の CMF 分布を図 9 に示す。

4.2 降水種別ごとの回帰分析

Pr_{M5} を目的変数、 Pr_{E5} を説明変数とした回帰分析 (切片 0) を観測期間全体および降水種別ごとに分けて実施した。固体降水は 0°C 未満、Water Droplet は 6°C 以上のデータを使用し、みぞれの混入を避けた。結果を表 2 に示す。全体では気温に関係なく回帰分析を実施しているためサンプル数が異なっている。降水種別ごとの傾きに差異が見られたため、今回の条件・算出方法では降水種別ごとの降水量算出の傾向に差異があると考えられる。

4.3 定数を乗じた降水量の調整

石坂らは²⁾、質量フラックスを用いて算出した推定値に定数を乗じることで降水量を算出できると述べている。本節では、前節で求めた傾きを定数とし、観測期間全体で求めた定数を使用して調整する場合と、降水種別ごとにそれぞれの種別の定数を使用して調整する場合の比較を行う (表 3)。調整前の降水量は、降水種別によらない観測期間中のすべての Pr_{E5} と各降水種別の Pr_{E5} において、それぞれに期間全体の定数、対応する降水種別の定数を適用し比較を行う。前節では気温によるデータの絞り込みを行ったが、本節では実際の観測機器による降水量算出を想定し行っていない。表中の表記について、Water Droplet に分類された Pr_{E5} とは、Water Droplet に分類された期間中すべての Pr_{E5} を示しており、すべての Pr_{E5} とは、降水種別によらない期間中すべての Pr_{E5} を指す。傾き (定数) は、表 2 に示した傾きであり、これを定数として扱う。調整 Pr_{E5} 合計とは、定数を乗じた後の Pr_{E5} の合計値であり、 Pr_{M5} 合計は使用した

表 2 降水種別ごと回帰分析結果

降水種別	傾き(定数)	Adj.R ²	N
Water droplet	1.473	0.981	121
Lump Graupel	1.865	0.840	115
Hexagonal Graupel	1.772	0.903	631
Densly Rimed Aggregates	1.653	0.955	1216
Rimed Aggregates	1.626	0.947	2225
全体	1.758	0.932	12217

Pr_{E5} と同時刻における Pr_{M5} の合計値である。合計の差は、 Pr_{M5} 合計と調整 Pr_{E5} 合計の差を表し、差の割合はその差を Pr_{M5} の合計で除して百分率で示したものである。

結果について、まず、降水種別ごとの結果を見ると、ほとんどの種別において、種別ごとの定数を使用した方が総量の差の絶対値が小さくなっている。このことから、例外はあるが、基本的には降水種別ごとの定数を使用する方が良いと考えられる。また、すべての Pr_{E5} においてデータ全体での定数を適用した場合のほうが総量の差の絶対値は小さくなっているが、これは回帰分析を行ったデータそのものに、その傾きを乗じており、ばらつきが相殺されたためであると考えられる。一方、Densely Rimed Aggregates に関して、データ全体の定数を使用した場合の方が、総量の差の絶対値が小さくなるという結果となった。この原因として、0°C 未満のデータを基にした定数を 0°C 以上のデータにも適用したことで、みぞれなどの影響を受けた可能性が考えられる。今後、このような降水量算出における不利な傾向を解明するためには、他年度の観測データに今回の定数を適用するなど、さらなる検討を行う必要がある。

参考文献

- 熊倉, 他: 光学式反射型交代降水測定器による粒子の大きさと落下速度の分布推定について, 雪氷研究大会, 2024
- Ishizaka et al : A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship, JMSJ, vol. 91 pp. 747-762, 2013
- 中井, 他: 球体を用いた室内実験と全粒子ロギングによる 1 ビーム光学式ディストロメーターの特性評価, 天気 67, pp.89-108, 2020

謝辞)本研究はJSPS科研費JP22K04633、JAXA 研究公募ER3GPN101の助成を受けたものです。

表 3 定数を用いた降水量の調整

調整前の降水量	傾き (定数)	調整 Pr_{E5} 合計(mm)	Pr_{M5} 合計(mm)	合計の差(mm)	差の割合(%)
Water Dropletに分類された Pr_{E5}	全体	199.70	163.02	+36.68	+22.50
	Water Droplet	167.31	163.02	+4.29	+2.63
Lump Graupelに分類された Pr_{E5}	全体	61.16	72.21	-11.05	-15.30
	Lump Graupel	64.89	72.21	-7.32	-10.14
Hexagonal Graupelに分類された Pr_{E5}	全体	98.03	106.10	-8.07	-7.61
	Hexagonal Graupel	98.79	106.10	-7.31	-6.89
Densly Rimed Aggregatesに分類された Pr_{E5}	全体	300.40	307.12	-6.72	-2.19
	Densly Rimed Aggregates	282.44	307.12	-24.68	-8.04
Rimed Aggregatesに分類された Pr_{E5}	全体	146.70	133.94	+12.76	+9.53
	Rimed Aggregates	135.71	133.94	+1.77	+1.32
すべての Pr_{E5}	全体	806.00	782.39	+23.61	+3.02
	降水種別ごと	749.14	782.39	-33.25	-4.25