

# 小型・軽量・安価なディストロメーターの開発と それを用いた観測的研究

—2021年度山本賞受賞記念講演—

勝 山 祐 太\*

## 1. はじめに

この度は、山本賞という大変名誉ある賞をいただきまして、誠にありがとうございます。選考委員の方々や研究にご協力いただいた多くの方々に深く感謝いたします。今回受賞対象となった2編の論文 (Katsuyama and Inatsu 2020, 2021) は、北海道大学大学院理学研究院・海洋気候物理学研究室 (修士課程)、同大学院・気象学研究室 (博士課程)、および、現在の所属である森林総合研究所十日町試験地に在籍中に行われたものです。気象測器 (ディストロメーター) の開発という研究テーマに着手することになったきっかけは、雲粒付着の少ない降雪結晶を原因とする雪崩災害が全国的に頻発していたことによります。当時まだ修士課程に進学して間もなかった私は、雪崩による被害を予防・軽減することに繋がる研究をしたいという思いから、まずはいつ雪崩の原因となる降雪があるのかを把握する必要があると思い、ディストロメーターの開発に着手しました。当時の指導教員だった稲津 将先生のご専門は気候力学だったということもあり、大変な苦労をおかけすることになってしまいましたが、こうして山本賞をいただけるだけの成果にまで研究を発展させることができ、大変感慨深い思いであります。本稿では、2021年度秋季大会で講演した内容を中心に、受賞対象となった研究について当時の心情も含めつつ解説していきます。

## 2. ディストロメーター

ディストロメーターとは、降水粒子の粒径と落下速度を計測する地上設置型の気象測器のことを指します。この気象測器から得られるデータは、空間粒子濃度や粒径分布、落下速度分布、降水量といった雲物理学では特に基本的かつ重要なものです。得られたデータを基にして、雨滴・霰・雪片といった降水粒子の種別判定も可能です (Ishizaka *et al.* 2013 ; Bernauer *et al.* 2016)。また、降雪粒子への雲粒付着量に応じて粒子の終端落下速度が変化することを利用し、落下速度と粒径の関係から雲粒付着の度合いを推定する取り組みもなされており (Bernauer *et al.* 2016 ; Bukovčić *et al.* 2018)、雲粒付着の少ない降雪結晶に伴う雪崩の予測に繋がると期待されています (Ishizaka *et al.* 2016 ; Yamaguchi *et al.* 2019)。このことは、第1節でも触れた通り本研究のモチベーションにもなっています。ディストロメーターによる自動観測が始まる以前は、粒径分布を得るためには、水に反応して色が変わるろ紙を水平に置き、降水粒子によって変色した箇所の大きさを一つ一つ計測するという大変労力のかかるものでした (例えば Marshall and Palmer 1948)。雪の場合は、融解させた降雪粒子によって変色した箇所の大きさを計測していました (例えば Gunn and Marshall 1958)。しかし、ディストロメーターの登場により、降水粒子に関する種々の情報を容易に得ることができるようになったことから、各地でディストロメーターを使った観測が行われるようになりました。

### 2.1 フラックススキャン型ディストロメーター

現在、世の中に広く普及しているディストロメーターには、Lasar Precipitation Monitor (LPM ; Angulo-Martínez *et al.* 2018) や PARSIVEL (Löffler-Mang and Joss 2000)、Two-Dimensional Video Dis-

\* 森林総合研究所十日町試験地。  
ykatsuyama2020@affrc.go.jp

—2022年1月26日受領—  
—2022年4月8日受理—

drometer (2DVD; Kruger and Krajewski 2002) などがあります。これらディストロメーターは、シート状のレーザー光を射出し、落下中の降水粒子がこのレーザー光を遮ることによる光強度の変化を検出することで、降水粒子の粒径と落下速度を測定しています。この測定方式は、液体・固体を問わず降水粒子を検出することができる利点があり、広く普及しました。一方で、いくつかの困難な点もあります。特に、LPM や PARSIVEL の場合は、降水粒子の一部のみがレーザーシートを通過した場合に、粒径を過小に、落下速度を過大に測定してしまう問題があり、“端の効果”として知られています (Löffler-Mang and Joss 2000; Minda *et al.* 2016)。また、落下速度を求める際には、降水粒子の形状として球形や回転楕円体を仮定する必要があります。形状が複雑な雪の場合は落下速度の計算結果に誤差を与えます。同様に、計測される粒径は、降水粒子により遮蔽されるレーザーシートの幅であり、複雑な形状を成す降雪粒子のどこの大きさを計測しているのか不明です。一方で、2DVD は2つのレーザーシートを上下2層に設置し、各センサーで測定される粒径のうち最大の方を採用するため、測定される粒径は凡そ粒子の最大粒径となります。また、2つのセンサーで粒子が検出される時間差から落下速度を計算するため、端の効果や粒子形状の仮定による測定エラーは起こりません。しかし、この落下速度の計算では、2つのセンサーで検出された2つの粒子の対応関係を推定する必要があります。結局のところ、この推定誤差に起因して落下速度の計算結果に大きな誤差が混入することがあります。このことは“マッチングの問題”として知られています (Kruger and Krajewski 2002; Huang *et al.* 2010; Bernauer *et al.* 2015)。これ以降では、シート状の領域を通過する降水粒子を検出する方式のディストロメーターをフラックススキャン型と分類することとします。

## 2.2 ボリュームスキャン型ディストロメーター

フラックススキャン型とは異なる測定原理によるディストロメーターもあります。村本・椎名 (1989) は、やや長めのシャッター速度 (1/60s) に設定したビデオカメラを用いて一定の空間内を落下する降雪粒子の残像から粒子の粒径と落下速度を計測する手法を採用していました。この測定方法では、残像を用いるため、回転運動を伴い落下する降雪粒子については、凡そ最大粒径を観測することになります。また、原理的に端の効果やマッチングの問題による落下速度の測定

誤差は生じません。特殊なセンサー等を用いない簡便な手法のため、比較的自作が容易であるという特徴もあります。一方で、降雪粒子で散乱・反射する光を検出するため雨滴はほとんど観測されないといった欠点があるほか、落下速度の計算には球形や回転楕円体といった粒子形状を仮定する必要があります。この粒子形状を仮定せずに落下速度を計算するために、椎名ほか (2004) では、ビデオカメラを高速なシャッター速度と高フレームレートに設定し、得られる大量の画像から同一粒子同士をマッチング処理することで落下速度を計算することも行われました。しかし、長さ約 6 m、横幅 1.5 m と非常に大きな筐体だったため、設置場所に限られるなどの制約もあり、あまり普及しませんでした。この測定方式では、一定空間内の粒子を検出することから、これ以降ではボリュームスキャン型と分類することとします。

## 2.3 測定方式による粒径分布の違い

フラックススキャン型とボリュームスキャン型のディストロメーターでは、測定方式は異なりますが、個々の粒子の粒径を測定しているという点においては基本的に同じものです。しかし、それら計測された粒子の粒径データから粒径分布にしたとき、この測定方式の違いによる影響が現れます (Katsuyama and Inatsu 2021)。

まず、フラックススキャン型ディストロメーターの場合は、ある有限の面積をもつレーザーシートを通過する粒子を検出するため、各粒径における粒子個数密度は次の式で表される単位面積当たりの粒径分布  $\rho_F(d)$  ( $\text{m}^{-2}\text{mm}^{-1}$ ) となります。

$$\rho_F(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d + \Delta d]} \frac{z_i}{S} \quad (1)$$

ここで、 $d$ 、 $z_i$ 、 $S$  は、それぞれ、粒径 (mm)、 $i$  番目の粒子の個数、レーザーシートの面積 ( $\text{m}^2$ ) を表します。気象学では一般的に、単位体積当たりの粒子の粒径毎の数濃度を表したものを粒径分布と定義することから、ディストロメーターで同時に観測される粒子の落下速度  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) と観測インターバル  $\Delta t$  (s) を使い単位変換を行うことで単位体積当たりの粒径分布  $n_F(d)$  ( $\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ ) を得ます。

$$n_F(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d + \Delta d]} \frac{z_i}{Sv_i \Delta t} \quad (2)$$

なお、ろ紙を使った計測方法は、一定の大きさのろ紙を通過しようとした降水粒子を計測するものであり、直接観測しているものはフラックススキャン型ディストロメーターと同様となります。

次に、ポリウムスキャン型ディストロメーターの場合は、ある有限の体積をもつ領域に存在する粒子を検出するため、各粒径における粒子個数の密度は次の式で表される単位体積当たりの粒径分布  $n_V(d)$  ( $\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ ) となります。

$$n_V(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d+\Delta d]} \frac{z_i}{V} \quad (3)$$

ここで、 $V$ はディストロメーターによりサンプリングされた合計の体積 ( $\text{m}^3$ ) を表します。この  $n_V$ は、同時に観測される落下速度を用いることで、フラックススキャン型ディストロメーターで計測されたものと同等な  $\rho_V(d)$  ( $\text{m}^{-2}\text{mm}^{-1}$ ) に変換することが可能です。

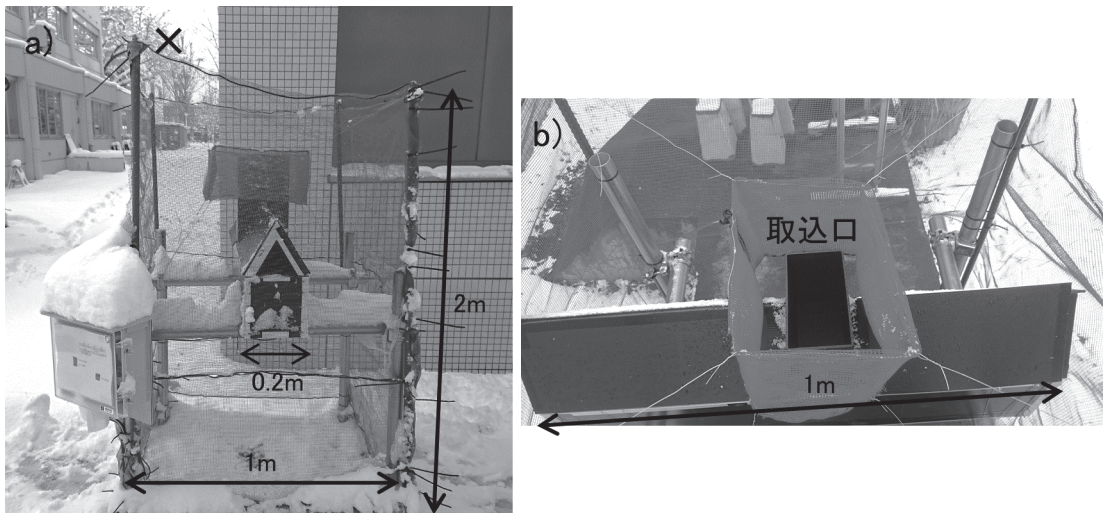
$$\rho_V(d) = \frac{1}{\Delta d} \sum_{d_i \in [d, d+\Delta d]} \frac{z_i v_i \Delta t}{V} \quad (4)$$

ここで、式 (2) と (3) から明らかではありますが、気象学で一般的な単位体積当たりの粒径分布を知ろうとするとき、フラックススキャン型ディストロメー

ターによる観測の場合は、粒径と落下速度の双方の測定精度が求められるのに対して、ポリウムスキャン型ディストロメーターの場合は、粒径の観測精度のみ依存していることが分かります。多くのディストロメーターは、粒径を比較的精度よく観測することが可能ですが、落下速度の観測にはいくつかの困難な点が残されており、精度よく安定した観測を行うことは難しいです (第2.1節)。そのため、フラックススキャン型ディストロメーターでは落下速度の測定精度に依存して粒径分布の測定精度が悪くなってしまいます。この問題について、降水粒子が全て雨滴の場合は、一度粒径分布をガンマ分布で近似し、そのうえで既知である雨滴の落下速度を用いた補正を行うことでこの問題を回避する方法もあります (Adirosi *et al.* 2016)。一方で、降雪粒子の場合は、その落下速度を一意に定めることができないため (Locatelli and Hobbs 1974)、粒径分布の補正はできません。したがって、降雪粒子を対象とする場合は、ポリウムスキャン型の方が測定原理上は有利であると言えます。

### 3. 新しいディストロメーター (VSVD)

ここまでで降雪粒子を対象とする場合は、ポリウムスキャン型ディストロメーターが有利であることが分かりました。また、ポリウムスキャン型の場合は、基本的にはビデオカメラとそれを収める筐体を用意す



第1図 北海道大学低温科学研究所(札幌市)に設置したVSVD。(a) VSVDを正面から見た写真。写真中央部に置かれているものがVSVD本体。測器の周囲には、縦1m×横1m×高さ2mの防風ネットを設置した。(b) 写真aの×印から写真右下方向にVSVD本体を見下ろした写真。写真中央部の穴が降雪粒子の取込口となっており、この穴から測器内部を通過する降雪粒子の粒径と落下速度を計測する。

るだけで自作することが可能なため、必要となる工学的な技術や予算も少なく、当時大学院生だった私でも挑戦することができます。そこで、本研究ではボリュームスキャン方式でディストロメーターを開発することとしました。

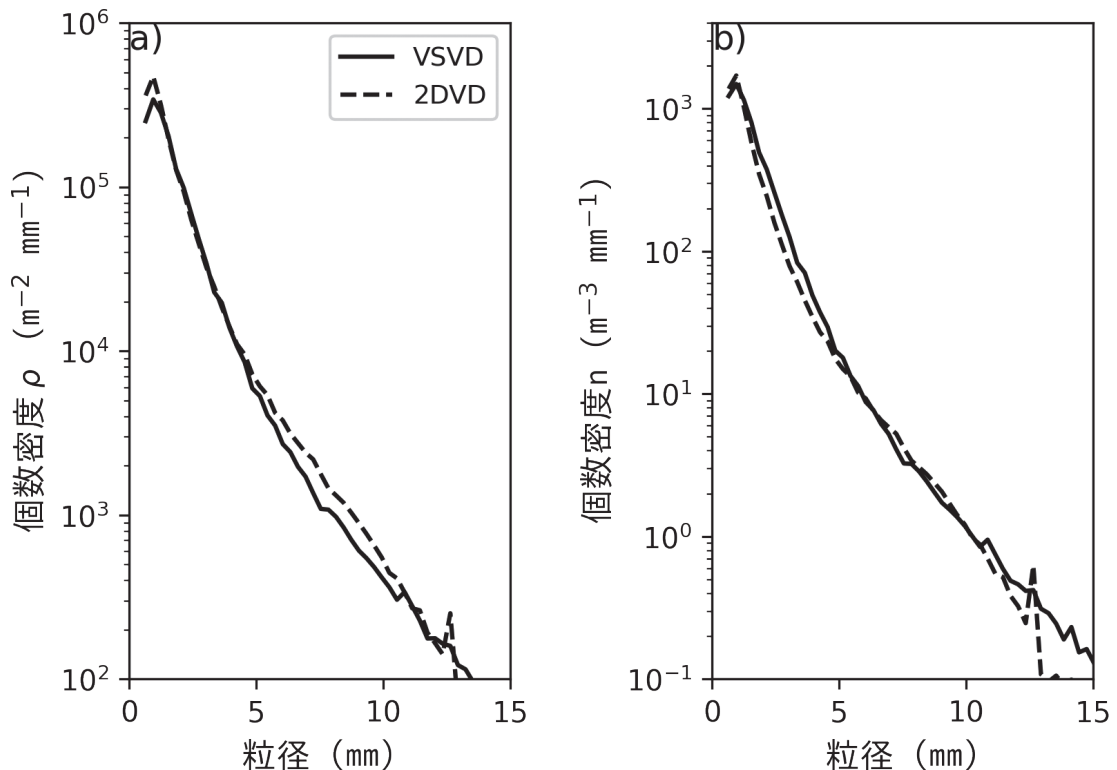
しかし、村本・椎名(1989)のディストロメーターをそのまま模倣したのでは、新規性に乏しく、研究としての面白さありません。そこで、彼らのディストロメーターの大きな弱点であった筐体が大きすぎるという問題を解決するために、カメラやレンズ、筐体の設計を慎重に行いました。その結果、長さ1m、横幅0.2m、高さ0.5mと大幅に小型化し、さらに1台あたり約5万円の材料費で製作可能なディストロメーターとすることができました(第1図)。また、画像処理に係る部分についてもシングルボードコンピュータで処理できる程度に最適化したものをスクラッチから開発し、ソーラーパネルでも稼働可能な程度に消費電力を抑えることもできました。開発のディストロメーターは、Volume Scanning Video Disdrometer (VSVD) と

名付け、小型(軽量)、安価、そして低消費電力という利点を生かして北海道全5か所の広域観測網を整備しました。

こうして開発したVSVDは、後述の観測精度の実証により、粒径1mmから13mmの降雪粒子を計測することができるかと確かめることができました。また、定量的な実証はできていませんが、測定原理上は約40mmの粒径まで計測することが可能です。例えば、LPMの観測可能範囲が粒径0.16mmから8mmであることを考えると、VSVDは、大きい粒径となりやすい降雪を対象とすることにより特化したものと言えます。

### 3.1 観測精度の実証

VSVDの測定精度は、北海道大学低温科学研究所(札幌市)に設置されている2DVDとの同時観測によって検証しました。この精度検証では、2DVDとVSVDが観測する粒径・落下速度の双方が同等であるならば、 $\rho_F$ と $\rho_V$ 、および $n_F$ と $n_V$ がそれぞれ互いに同等な分布になることを利用します(第2.3節)。例えば、



第2図 2016/17年冬季に低温科学研究所で観測された (a) 単位面積当たりの粒子個数密度と (b) 単位体積当たりの粒子個数密度。実線と破線はそれぞれVSVDと2DVDによる観測を表す。

VSVD の計測する落下速度に負の誤差がある場合は、式 (1) (4) より  $\rho_V < \rho_F$  となるはずですが、同様にして、2DVD の計測する落下速度に正の誤差がある場合は、式 (2) (3) より、 $n_V > n_F$  となるはずですが、さらに、 $\rho_V = \rho_F$  または  $n_V = n_F$  となっていれば、少なくとも粒径の計測は 2 つの測器で整合的に行われていると言えます。

第 2 図は、2016/17 年冬季における単位面積当たりの粒径分布 ( $\rho_F$  と  $\rho_V$ ) と単位体積当たりの粒径分布 ( $n_F$  と  $n_V$ ) をそれぞれ示します。この図から、粒径 1 mm から 4 mm では、 $\rho_F = \rho_V$  および  $n_F > n_V$  となっていることがわかります。つまり、VSVD が計測する落下速度は正しく、一方で、2DVD が計測する落下速度には正の誤差が含まれていることを表します。この 2DVD の誤差は、第 2.1 節で触れたマッチングの問題によるものです。一方で、粒径 4 mm から 13 mm では、 $\rho_F < \rho_V$  および  $n_F = n_V$  となっています。つまり、VSVD が計測する落下速度には負の誤差が含まれ、2DVD が計測する落下速度は正しいということを表します。この VSVD の誤差は、落下速度の計算を行う際に、粒子形状を扁平率 0.5 の回転楕円体と仮定しており、大きい粒径の降雪粒子の多くは様々な形状をもつ雪片で構成されるため、仮定が成り立たなくなってしまうためと考えられます。落下速度の計測においては、2DVD と VSVD の双方で誤差が認められましたが、いずれの粒径の範囲においても  $n_F = n_V$ 、または、 $\rho_F = \rho_V$  が成立しており、粒径分布は 2 つのディストロメーター間で整合的に観測されていることを確認できました。通常であれば、ディストロメーターの精度検証には、大変な労力を要しますが (中井ほか 2020)、今回はフラックススキャン型とボリュームスキャン型のディストロメーターを同時観測することにより、比較的容易に精度検証を行うことができました。

#### 4. 観測データの解析手法開発

VSVD の開発に成功し、北海道の広域観測網を展開したことで、多くの観測データが集まりつつあります。これらデータを解析することで、降雪粒子の種類や粒径分布の地域的な特性を明らかにすることができると期待されます。大学院生だった当時の私は、早速、観測データの解析を行おうとしますが、既往の解析手法では対応できない事例に頻繁に遭遇することになります。なかでも、複数種の降雪粒子が同時に観測されることに起因して解析が困難になることが頻繁にあ

り、当初の思惑通りには解析を進めることができませんでした。そこで、まずは複数種の降水粒子が混在している場合であっても汎用的に利用可能な解析手法の開発から着手することにしました。以降では、既往の解析手法を紹介したうえで、開発した手法について解説していきます。

##### 4.1 既往の解析手法

降水粒子の粒径分布は、伝統的に次のガンマ分布に近似されてきました (例えば Marshall and Palmer 1948)。

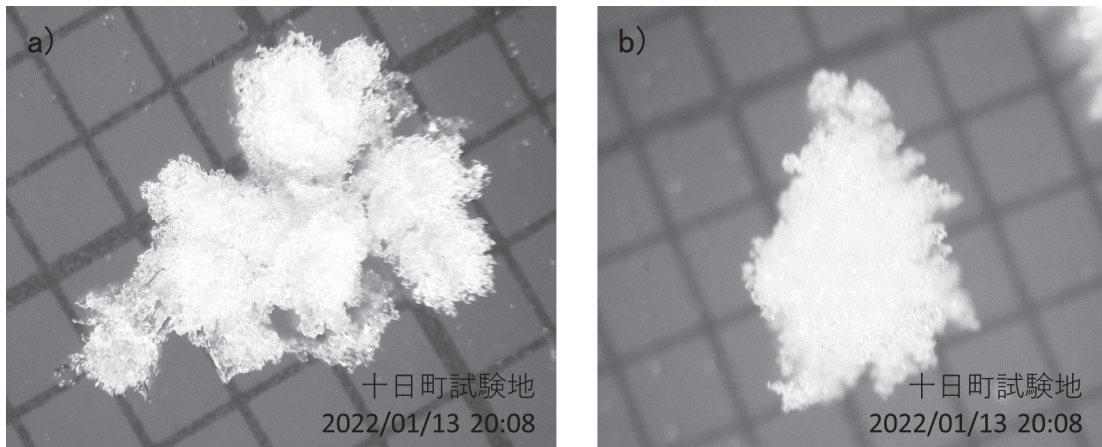
$$n(d) = n_0 d^\mu \exp(-\lambda d) \quad (5)$$

ここで、 $n_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  は、それぞれ、切片パラメータ ( $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ )、形状パラメータ、傾きパラメータ ( $\text{mm}^{-1}$ ) です。気象レーダーの基礎理論や気象モデルにおいても、同様の仮定を置くことが一般的であり、観測データに合うガンマ分布を求めることは基本的な解析の 1 つです。モーメント法は、観測に合う最適なガンマ分布を推定する方法として最もよく使われています (例えば Vivekanandan *et al.* 2004)。このモーメント法では、3 種類の異なるモーメントを観測データから計算することで、ガンマ分布におけるパラメータの組 ( $n_0$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$ ) を推定することができ、非常に簡便であるという利点があります。一方で、観測データに含まれる粒子数が少ないときに誤った推定結果を与えることがあるなど問題点も指摘されています (Smith and Kliche 2005)。また、モーメント法では複数種の降水粒子からなる観測データを与えた場合については考慮されておらず、そのまま適用可能かどうかについての詳細はわかりません。

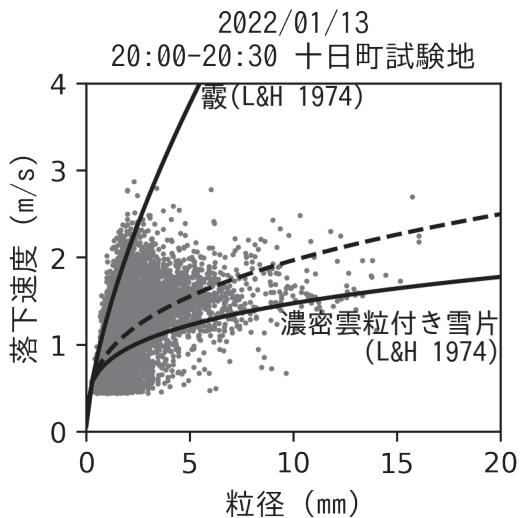
降水粒子の種類については、係数  $a$ 、 $b$  を用いた次のべき乗則で表される粒径-落下速度の関係式が粒子種によって異なることを利用して推定されます (Atlas *et al.* 1973 ; Locatelli and Hobbs 1974)。

$$v(d) = a d^b \quad (6)$$

一般的に行われる粒子種の推定では、まず、最小二乗法により式 (6) を観測データにフィッティングします。そして、この結果と降水粒子の種類毎に既に推定されている最適なべき乗則 (以降、最適曲線と呼ぶ) との比較により、粒子種の推定が行われます。また、この方法の発展形として、降水粒子の質量フラックス



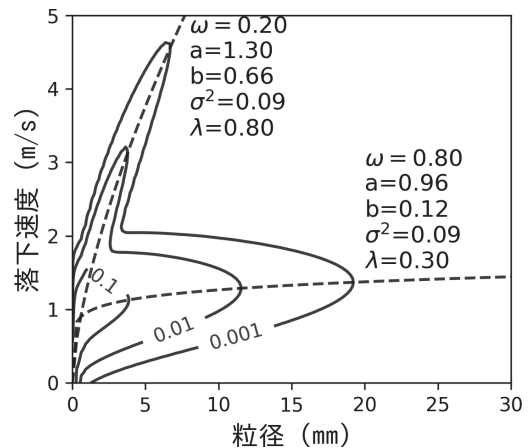
第3図 2022年1月13日20時8分（日本時間）に森林総合研究所十日町試験地（新潟県十日町市）で観察された (a) 濃密雲粒付き雪片と (b) 霰. 背景は1 mm 方眼. 20時における気温と湿度は、それぞれ、 $-0.3^{\circ}\text{C}$ と97.7%だった.



第4図 2022年1月13日20時から20時30分の間に十日町試験地でVSVDによって観測された降雪粒子の粒径と落下速度の散布図. 破線は最小二乗法によりフィッティングされた最適曲線. 2本の実線は、Locatelli and Hobbs (1974) による霰と濃密雲粒付き雪片の最適曲線.

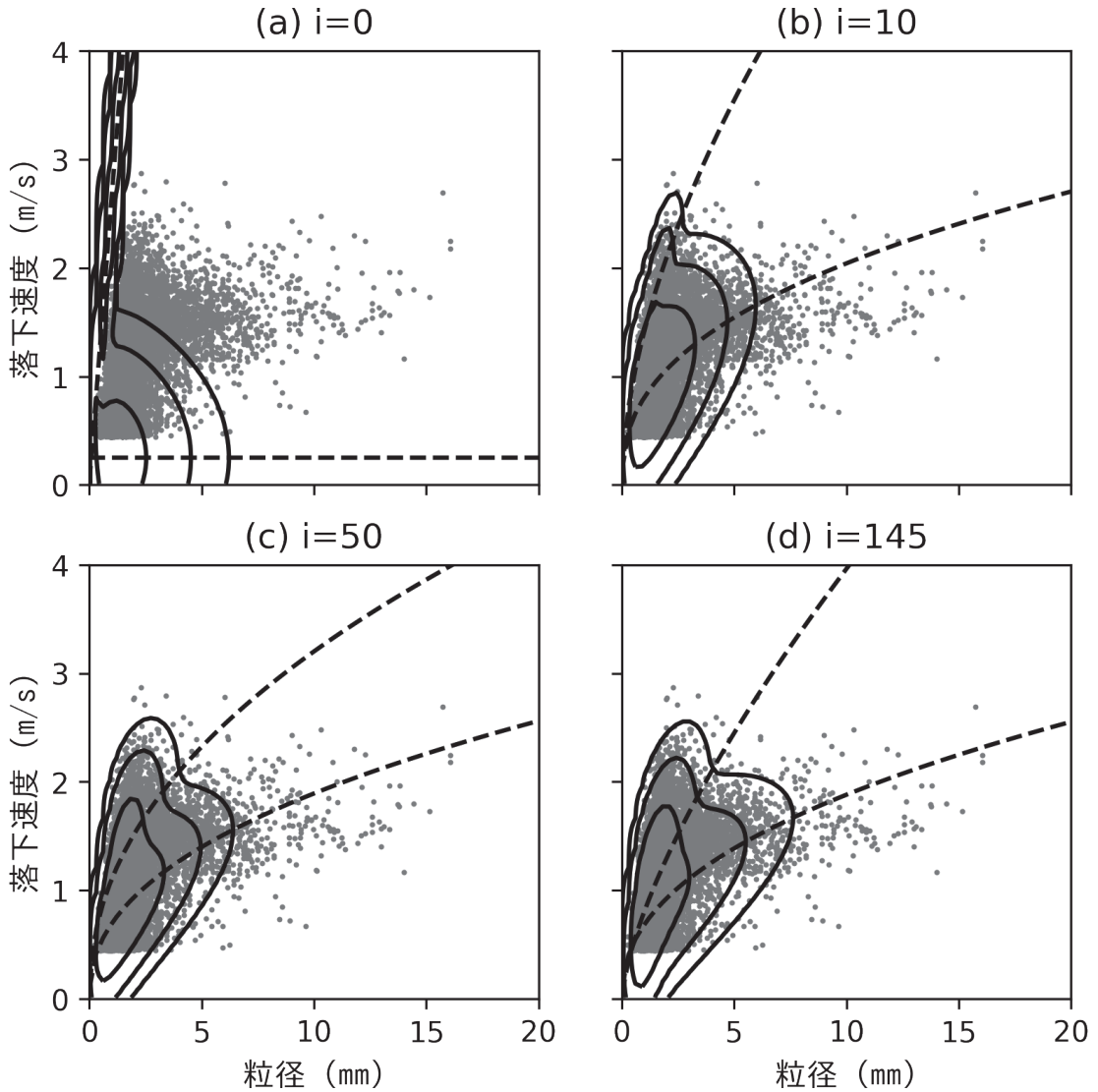
で重みづけをした上で、粒径-落下速度平面上における重心点から降水粒子の種類を推定する方法もあります (Ishizaka *et al.* 2013). しかし、いずれの方法であっても、降水粒子が複数種混在している場合には適用することができません.

複数種の降水粒子が混在しているときに既往の方法



第5図 霰と雲粒付き雪片を模した混合確率分布. 実線は、0.1, 0.01, 0.001の等確率密度を、破線は、各混合要素の最適曲線を表す. 最適曲線の近くに、各混合要素のパラメータの組を表示した.

で最適曲線を求めようとするときのようなことが起こるのか. このことについて、森林総合研究所十日町試験地（新潟県十日町市）における2022年1月13日の観測結果を例にとり説明します. この観測事例では、濃密雲粒付きの雪片や霰が同時に降っていたことを目視で確認している事例です (第3図). この時の降水粒子の粒径-落下速度は、Locatelli and Hobbs (1974) による霰や濃密雲粒付き雪片の最適曲線に沿ったような分布を示しており、VSVDの観測結果は既往の研究とも整合的でした (第4図). この観測データに対して最



第6図 EMアルゴリズムによって第4図の観測データを近似する混合確率分布を推定する様子. 実線と破線は第5図と同様. (a)–(d)は、それぞれ、初期状態、10回目、50回目、145回目のパラメータ更新時における混合確率分布を表す. 灰色の点は、第4図と同じ観測データを表す.

小二乗法により推定した最適曲線(第4図の破線)は、濃密雲粒付き雪片の最適曲線に近いものとなっています。しかし、既往の方法では、推定される最適曲線は1本のみなので、霰に対応した最適曲線は得ることができません。

#### 4.2 混合確率分布

新しい手法開発に先立ち、まずは、複数種の降水粒子が混在している場合であっても汎用的に粒径-落下速度のデータを近似できる確率密度関数を考えます。

初めに、粒径-落下速度の観測結果は、粒径はガンマ分布に、落下速度は正規分布にそれぞれ従うと仮定することで、次の粒径と落下速度に関する同時確率分布を得ます。

$$P(d,v | a,b,\sigma^2,\mu,\lambda) = \frac{\lambda^{\mu+1} d^{\mu}}{\sqrt{2\pi\sigma^2} \Gamma(\mu+1)} \exp\left[-\frac{(v-ad^b)^2}{2\sigma^2} - \lambda d\right] \quad (7)$$

ここで、 $\sigma^2$ は落下速度の分散を、 $\Gamma$ はガンマ関数を、 $P(d,v|a,b,\sigma^2,\mu,\lambda)$ はパラメータの組 $(a,b,\sigma^2,\mu,\lambda)$ のもとにおける $(d,v)$ の条件付き確率分布を表します。この確率分布は、1種類の降水粒子からなる粒径・落下速度の分布を近似するものです。

次に、複数種の降水粒子を同時に表現するために、式(7)で表される同時確率分布を混合要素にとり、それらを混合係数 $\omega$ で重みづけをして $K$ 個だけ足し合わせた混合確率分布を得ます。

$$P(d,v|\theta) = \sum_{k=1}^K \omega_k P(d,v|a_k, b_k, \sigma_k^2, \mu_k, \lambda_k) \quad (8)$$

ここで、混合係数は、 $\sum_{k=1}^K \omega_k = 1$ を満たします。また、 $\theta$ は全てのパラメータの組を表します。

$$\theta = (a_1, \dots, a_K, b_1, \dots, b_K, \sigma_1^2, \dots, \sigma_K^2, \mu_1, \dots, \mu_K, \lambda_1, \dots, \lambda_K, \omega_1, \dots, \omega_K) \quad (9)$$

第5図は、霰と雪片がそれぞれ異なる粒径・落下速度分布を持つ場合における混合確率分布を例示したものです。この図から、式(8)の混合確率分布は、第4図にあるような複数種の降水粒子による二峰性の分布をよく表していることが分かります。あとは、式(8)を粒径・落下速度の観測データにフィッティングすることさえできれば、複数種の降水粒子が同時に観測されたとしてもそれぞれの最適曲線と粒径分布を推定することが可能となります。

#### 4.3 EM アルゴリズム

確率分布をデータにフィッティングするアルゴリズムは機械学習分野を中心にいくつか提案されていますが、本研究では、Expectation-Maximization (EM) アルゴリズム (Dempster *et al.* 1977) を利用しました。このアルゴリズムでは、データと適当な初期値を与えたときに、尤度が増加するようにパラメータの組 $\theta$ を繰り返し更新することで局所最尤となるパラメータの組を探します。探索される解は大域的な最適解であるという保証はありませんが、比較的高速に局所最尤解に到達することが可能ということからこのアルゴリズムを選定しました。

第6図は、第4図の観測データを例にとり、EM アルゴリズムが最適な混合確率分布を推定する様子を示します。初めに適当な初期値と混合要素数2を与え

す(第6図a)。そして、パラメータの更新を繰り返すことで、混合確率分布は次第に観測データを適切に近似するように変化していきます(第6図b, c)。最終的には、パラメータの更新を145回繰り返したところで尤度の増加がほとんどなくなり、局所最尤となるパラメータの組を得ることができました(第6図d)。こうして得られた解のうち、最適曲線は、霰と雪片付き雪片のそれと近いものとなり、目視観測の結果とも整合的です。

#### 5. まとめと今後の展望

本稿で紹介した一連の研究によって、小型、安価、低消費電力ながらも既往のディストロメーターと同等以上の精度で観測可能なVSVDが開発されました。また、小型、安価、低消費電力という利点を生かして、北海道に全5か所の広域観測網を整備し、現在でも観測を継続しています。VSVDによる観測データを汎用的に解析するための新しい解析手法も開発しました。これにより、これまでは解析困難だった複数種の降雪粒子を同時に観測した場合であっても、適切に粒径分布や粒径・落下速度の最適曲線を推定することが可能となります。これら、広域観測と汎用的な解析手法は、降雪粒子の地域特性や気象モデルの検証、雪崩発生予測モデルの開発、気象レーダー観測の検証など様々な研究テーマに応用されることが期待されます。既に、気象モデルの検証については成果が出始めており (Kondo *et al.* 2021)、今後さらに検証作業は進められる予定です。私自身も、VSVDによる観測データを用いて、上述の気象学における様々な課題に取り組み、気象学の更なる発展に貢献していきたい所存です。

#### 謝辞

本稿で紹介した一連の研究は、私が北海道大学大学院理学研究院・海洋気候物理学研究室(修士課程)、同大学院・気象学研究室(博士課程)、および、現在の所属である森林総合研究所十日町試験地に在籍中に行われ、合計6年間もの歳月をかけて実施されました。この長い研究期間中には、大変多くの方々の協力がありました。

私の修士・博士課程時代の指導教員だった北海道大学大学院理学研究院・気象学研究室の稲津 将先生は、ご自身の専門分野と大きく異なるにもかかわらず、この研究テーマについて様々な視点からご指導いただきました。特に、高精度化という方向性になりが



ちな観測機器の開発において、安価・低消費電力という視点を与えてくださった点は、稲津先生のご助言があったことです。また、元々は野外観測をするような方ではなかったにもかかわらず、VSVDの設置場所の選定や設置許可の交渉、設置作業など何から何までご協力いただきました。時には、天候のすぐれないなか設置作業を実施せざるを得ないこともあり、大変な苦勞を掛けさせてしまったこともありました。

同じく、北海道大学理学研究院・気象学研究室の佐藤陽祐先生には、雲物理学の専門家の視点から観測データを今後有効に活用していくために必要な点をはじめ様々なご助言をいただきました。特に、佐藤先生は気象モデルに精通していることもあり、観測を行っているだけでは全く想像することもできないような気象モデルにおける大胆な仮定などをご教授くださいました。このことは、気象モデルの検証は今後進めていくべき課題だと認識するきっかけになり、一連の研究のモチベーションにも繋がりました。

現在の所属である森林総合研究所十日町試験地では、試験地長の竹内由香里さんや勝島隆史さんのご理解・ご協力があり、着任後も研究を継続することができました。また、見延庄士郎先生や佐々木克徳先生をはじめとする北海道大学大学院理学研究院・海洋気候物理学研究室の皆さんや同大学・気象学研究室の皆さんには、研究室ゼミを通して一連の研究について多くの議論をしていただきました。防災科学技術研究所の石坂雅昭さん・中井専人さん・山口 悟さん・山下克也さん・本吉弘岐さん、北海道大学の藤吉康志先生、明治大学の中野直人先生、国立極地研究所の平沢尚彦先生、新潟大学の本田明治先生からは、学会発表などを通して、多くのご助言をいただきました。白川龍生先生(北見工業大学)、木村賢人先生(帯広畜産大学)、越石健太先生(旭川西高等学校)、谷口陽子先生(苫小牧工業高等専門学校)、和田恵治先生・関口朋彦先生(北海道教育大学)は、VSVDの設置場所をご提供くださいました。

#### 参 考 文 献

- Adirosi, E., E. Volpi, F. Lombardo and L. Baldini, 2016: Raindrop size distribution: Fitting performance of common theoretical models. *Adv. Water Resour.*, **96**, 290-305.
- Angulo-Martínez, M., S. Beguería, B. Latorre and M. Fernández-Raga, 2018: Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel2 and Thies LPM optical disdrometers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **22**, 2811-2837.
- Atlas, D., R. C. Srivastava and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys.*, **11**, 1-35.
- Bernauer, F., K. Hürkamp, W. Rühm and J. Tschiersch, 2015: On the consistency of 2-D video disdrometers in measuring microphysical parameters of solid precipitation. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 3251-3261.
- Bernauer, F., K. Hürkamp, W. Rühm and J. Tschiersch, 2016: Snow event classification with a 2D video disdrometer—A decision tree approach. *Atmos. Res.*, **172-173**, 186-195.
- Bukovčić, P., A. Ryzhkov, D. Zrnić and G. Zhang, 2018: Polarimetric Radar Relations for Quantification of Snow Based on Disdrometer Data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57**, 103-120.
- Dempster, A. P., N. M. Laird and D. B. Rubin, 1977: Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *J. Roy. Stat. Soc.*, **39B**, 1-22.
- Gunn, K. L. S. and J. S. Marshall, 1958: The distribution with size of aggregate snowflakes. *J. Meteor.*, **15**, 452-461.
- Huang, G. J., V. N. Bringi, R. Cifelli, D. Hudak and W. A. Petersen, 2010: A methodology to derive radar reflectivity-liquid equivalent snow rate relations using C-band radar and a 2D video disdrometer. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **27**, 637-651.
- Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shiina, T. Kumakura and K. Muramoto, 2013: A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 747-762.
- Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Yamaguchi, S. Nakai, T. Shiina and K. I. Muramoto, 2016: Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications. *The Cryosphere*, **10**, 2831-2845.
- Katsuyama, Y. and M. Inatsu, 2020: Fitting precipitation particle size-velocity data to mixed joint probability density function with an expectation maximization algorithm. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **37**, 911-925.
- Katsuyama, Y. and M. Inatsu, 2021: Advantage of volume scanning video disdrometer in solid-precipitation observation. *SOLA*, **17**, 35-40.
- Kondo, M., Y. Sato, M. Inatsu and Y. Katsuyama, 2021: Evaluation of cloud microphysical schemes for winter snowfall events in Hokkaido: A case study of snowfall

- by winter monsoon, SOLA, 17, 74-80.
- Kruger, A. and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 19, 602-617.
- Locatelli, J. D. and P. V. Hobbs, 1974: Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *J. Geophys. Res.*, 79, 2185-2197.
- Löffler-Mang, M. and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17, 130-139.
- Marshall, J. S. and W. McK. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, 165-166.
- Minda, H., T. Makino, N. Tsuda and Y. Kaneko, 2016: Performance of a laser disdrometer with hydrometeor imaging capabilities and fall velocity estimates for snowfall. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, 11, 624-632.
- 村本健一郎, 椎名 徹, 1989: 画像処理による降雪粒子の大きさと落下速度の自動測定. 電子情報通信学会誌 D-II, J72-D-II, 1382-1387.
- 中井専入, 山下克也, 本吉弘岐, 熊倉俊郎, 村上茂樹, 勝島隆史, 2020: 球体を用いた室内試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, 89-108.
- 椎名 徹, 石坂雅昭, 村本健一郎, 中井専入, 佐藤篤司, 岩本勉之, 2004: 画像処理手法を用いた自動観測による降雪粒子の同定について. *雪氷*, 66, 637-646.
- Smith, P. L. and D. V. Kliche, 2005: The bias in moment estimators for parameters of drop size distribution functions: Sampling from exponential distributions. *J. Appl. Meteor.*, 44, 1195-1205.
- Vivekanandan, J., G. Zhang and E. Brandes, 2004: Polarimetric radar estimators based on a constrained gamma drop size distribution model. *J. Appl. Meteor.*, 43, 217-230.
- Yamaguchi, S., M. Ishizaka, H. Motoyoshi, S. Nakai, V. Vionnet, T. Aoki, K. Yamashita, A. Hashimoto and A. Hachikubo, 2019: Measurement of specific surface area of fresh solid precipitation particles in heavy snowfall regions of Japan. *The Cryosphere*, 13, 2713-2732.

---

## Development of a Compact, Lightweight, and Low-cost Disdrometer and Observations using it

Yuta KATSUYAMA \*

\* *Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute, Tokamachi, 948-0013, Japan*  
*ykatsuyama2020@affrc.go.jp*

(Received 26 January 2022; Accepted 8 April 2022)

---