

# 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

中井 専 人<sup>\*1</sup>・山下 克 也<sup>\*2</sup>・本吉 弘 岐<sup>\*2</sup>  
熊倉 俊 郎<sup>\*3</sup>・村上 茂 樹<sup>\*4\*5</sup>・勝島 隆 史<sup>\*4</sup>

## 要 旨

レーザー 1 ビーム方式の光学式ディストロメーター (optical disdrometer; 以下 OD) のうち, 全粒子ロギングが可能な Thies 製 Laser Precipitation Monitor (LPM) の特性について, 直径が既知の球体を用いた詳細な計測実験, 及び観測データ解析により調査した. LPM において通常の粒径-落下速度分布として出力される値は粒子の横幅と球形を仮定した落下速度であった. 粒子の横幅について大粒径側には値の丸めがあり, 小粒径側は約0.3mm以下で検知数が過小になると推定された. 粒径測定値の真値に対する比率はレーザービーム内の測定位置によって大きく異なるため, 測定値として得られる“粒径分布”は, もとの粒径分布に対してこの変化量を重みとする重み付き平均 (畳み込み積分) を行ったものと考えられる. 粒径測定値の経年変化については, ビーム内分布パターンが定性的に維持されたまま値がやや小さくなっていた. OD の使用にあたっては継続的な校正が望ましいと考えられる.

## 1. はじめに

レーザー 1 ビーム方式の光学式ディストロメーター (optical disdrometer; 以下, レーザー 1 ビーム方式のものを本論文では OD と呼ぶ) は, 検知領域を通過する粒子の粒径-落下速度分布 (particle size-velocity distribution, PSVD) を予め決められたクラス (ビンとも言われる) 区分を用いた 2 次元ヒストグラムの形で出力可能な気象測器である (以後, この方式の測定を PSVD 測定と記載する). 現在国内では OTT 製 PAR-SIVEL (Löffler-Mang and Joss 2000; Löffler-Mang and Blahak 2001; Battaglia *et al.* 2010) と Thies 製

Laser Precipitation Monitor (LPM; Bloemink and Lanzinger 2005; Lanzinger *et al.* 2006; Brawn and Upton 2008; Adolf Thies GmbH & Co. KG 2011 (以下 LPM 取扱説明書); de Moraes Frasson *et al.* 2011) の 2 種類の OD が主に使用されている. 類似の機器として吹雪観測に用いられる新潟電機製 Snow Particle Counter (SPC; 西村 2009) もあるが, 粒径レンジが小さい粒子を対象としているため降水観測には用いられていない.

OD ではレーザー平行光をシート状に発し (ビーム), それが検知領域となる. 降水粒子がビームを通過するとレーザー光を遮蔽し, OD はその遮蔽によるレーザー光の放射束減少量の最大値を単一のフォトダイオードで検知して (Löffler-Mang and Joss 2000; Battaglia *et al.* 2010; LPM 取扱説明書) “粒径”に換算して出力する. 2 次元ビデオディストロメーター (2DVD; Kruger and Krajewski 2002; Schönhuber *et al.* 2007) とは異なり, 受信したレーザー光の総量の変化のみを検知し形状は測定しない. 落下速度に関しては 1 ビームのため, 粒子がビームを通過する時間の長さを測定し (Löffler-Mang and Joss 2000; LPM 取扱

\*1 (連絡責任著者) 防災科学技術研究所雪氷防災研究部門.

saint@bosai.go.jp

\*2 防災科学技術研究所雪氷防災研究部門

\*3 長岡技術科学大学環境社会基盤工学専攻

\*4 森林総合研究所十日町試験地

\*5 (現: 森林総合研究所九州支所)

—2019年5月21日受領—

—2019年10月1日受理—

説明書), それをもとにした推定が行われている. 推定にあたっては粒子形状が仮定されている.

近年, PSVD 測定 of データを用いた降水粒子の解析が行われるようになった. その内容は, 粒径分布からのレーダー反射因子の推定 (Löfller-Mang and Blahak 2001), レーダー偏波パラメーターとの比較 (Kalina *et al.* 2014), 湿雪の特性 (Yuter *et al.* 2006), 氷霧 (ice fog) の観測 (Gultepe *et al.* 2014), 雲粒付き降雪時のモデルの検証 (Molthan *et al.* 2016), 洪水時の粒径分布からの Z-R 評価 (Friedrich *et al.* 2016), GPM DPR (Global Precipitation Measurement mission Dual-Frequency Precipitation Radar) 降水量推定手法の評価 (Liao *et al.* 2014) など多岐にわたる. 特に, Ishizaka *et al.* (2013) の開発した Center of Mass Flux distribution (CMF) 法は, OD やカメラによる降雪粒子の連続高速度撮影から得られる粒径-落下速度分布を用いた雪片, 霰, 雨など降水粒子の種類の自動判別を可能にした. CMF 法を用いた降雪粒子の解析はレーダー降雪粒子判別の検証としてよく行われている (Kouketsu *et al.* 2015; Minda *et al.* 2016; 板戸ほか 2017; 増田ほか 2018).

しかし, OD については測定粒径の精度やセンサー個体差, 校正方法, 測定レンジより大きい粒子やビーム端にかかった粒子の扱いなど, 測器の特性に関する情報が乏しい. これは特に, 観測で複数測器を用いる場合, あるいは測器更新で機種が変わる場合に解析に影響する. 本研究の目的は, このような OD の測定値の特性を明らかにし, 降水粒子の解析のための正確な処理を行えるようにすることである. なお, OD は天気判別にも用いられているが, 本研究の対象は検知された粒子の粒径と落下速度とし, OD が出力する降水強度や天気分類などは対象としない. 理由は, これらが OD で 2 次的に算出されるものだからである.

以下, 2 節で研究手法, 3 節, 4 節ではその手法を用いた結果と解析を述べ, 5 節では本論文の調査で明らかになった課題について考察し, 6 節でまとめを行う.

## 2. 研究手法

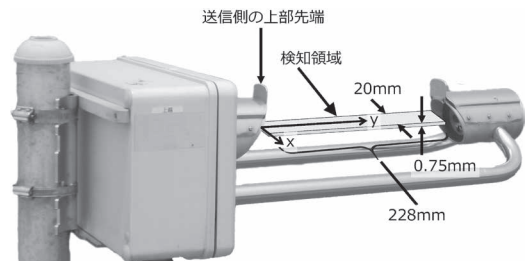
### 2.1 全粒子ロギングができる OD

OD として Thies 製 Laser Precipitation Monitor (LPM; 第 1 図) を用いた. LPM の送信側ではレーザーダイオードと光学系が赤外 785nm のレーザー平行光 (ビーム) を作り, 受信側ではフォトダイオードと 1 枚のレンズが光の強度を電気信号に変換する

(LPM 取扱説明書). ビーム幅は 20mm, 厚さは 0.75mm である. 受信側にはビームの断面より大きい球面と思われるレンズがあり, アームは頑丈で, 平行光の位置ずれやフォトダイオードからの外れは起こりにくい構造に思われる. センサーは送信側, 受信側ともに円筒状覆いの中に取り付けられている. 鉛直に落下する粒子に対して, 水平を取って設置された LPM の検知領域 (第 1 図) は, レーザー光のビームのうち送受信両側の円筒状覆い上部先端の間の部分となり, その長さは 228mm である. 以後簡単のため, この検知領域をビームと呼ぶことにする. このビームについて, 本論文では送信側の円筒状覆いの上部先端を基準として第 1 図のように座標系を取る.  $x, y$  はともに水平面上にあり, これらに垂直な方向 (ビーム厚み方向) が鉛直方向である.

LPM の粒径は粒子によるレーザー光の遮蔽に伴う光量低下の大きさから, 落下速度は光量低下の継続時間から計算される (LPM 取扱説明書). この処理方式は PARSIVEL と同様である. PARSIVEL においては観測された粒子は雨滴を想定した扁平率を持つ回転楕円体とみなされ, その回転楕円体と体積の等しい球の直径  $D_{eq}$  が PSVD 測定の粒径として出力される (Battaglia *et al.* 2010). 一方, LPM においては PSVD 測定の粒径の正確な意味は LPM 取扱説明書から明確に読み取れなかった. PSVD 測定は専用の Windows 用ソフトウェアを用いて行った.

PSVD 測定とは別に, LPM には測定した全粒子について約 50 バイト 1 行のデータを自動送信する設定 (Telegram 3, Particle Event, 以後 PE と略す.) がある. 本論文では PE 設定による測定を PE 測定と記載



第 1 図 LPM の写真と検知領域.  $x$  (mm) はレーザー光の進行方向に直交する水平方向の距離で, 検知領域の中央が  $x = 0$  である.  $y$  (mm) はレーザー光の進行方向に平行な水平方向の距離で, 検知領域送信側の端, 筒状部分の先端が  $y = 0$  である.

する。PE測定で出力される変数を第1表に示す。粒径は“D (sphere)”と“D (Hamburger)”の2種類、落下速度もそれらに対応した2種類が出力される。D (sphere) が粒子を球形とみなして測定された横幅をそのまま粒径とした  $D$ 、D (Hamburger) が  $D_{eq}$  であれば理解しやすいが、実際にそうであるか、またPSVD測定で出力されているのはどちらか、について本研究で調査した。また、粒径のもととなる“Maximal value of A/D-converter (デジタル値)”  $P_{max}$  と落下速度の計算に用いられる“Duration of event”  $T_e$  も出力されており、これらと粒径及び落下速度との関係も調査した。

PE測定による調査ではLPMを通信速度最大の115200bpsに設定し、PCのターミナルからRS422通信制御してデータ受信、保存した。この制御のため、PE測定データ行を受信するごとに日時を付加して記録するPython3 (Anaconda) とpyserial2.7を用いたスクリプトを作成した。データは粒子1個分受信毎に時刻付きで作業ファイルに記録され、正10分毎に保存時刻のファイル名で保存するようにした。

## 2.2 防風ネット内観測

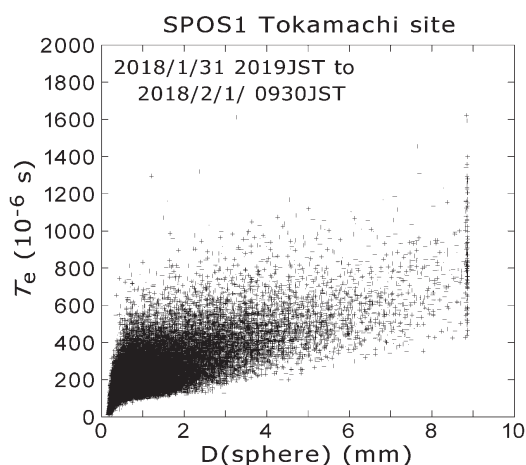
2017/2018冬季にPE測定による降雪観測を森林総

第1表 LPMのPE測定で出力される変数。和訳は筆者による。

出力順	出力値名	本論文の変数名	単位	和訳
1	Maximal value of A/D-converter	$P_{max}$	0 ... 16383	A/Dコンバータ最大値
2	Duration of event	$T_e$	$10^{-6}$ s	イベント継続時間
3	Time stamp		$10^{-3}$ s	タイムスタンプ
4	Diameter sphere	D (sphere)	mm	球仮定の粒径
5	Speed sphere	V (sphere)	$m s^{-1}$	球仮定の速度
6	Diameter “Hamburger” (rain)	D (Hamburger)	mm	“ハンバーガー”(雨滴)仮定の粒径
7	Speed “Hamburger” (rain)		$m s^{-1}$	“ハンバーガー”(雨滴)仮定の速度
8	Internal Temperature		°C	内部温度

合研究所十日町試験地露場設置の防風ネット内において試験的に実施した。観測サイトの仕様は中井ほか(2011)と同様である。LPM取扱説明書によるとPE測定において粒子数が非常に多い時に取りこぼしのないことは保証されていないが、本論文で用いた観測データの1秒あたり粒子数は通信速度と送信データサイズから求められる最大粒子数より少なく、余裕のある状態であった。本論文では2018年1月31日20時19分から2月1日9時30分にかけての約13時間分のデータを使用した。この期間は十日町試験地露場観測において気温がほぼ0°C以下かつ相対湿度が100%に近い状態が継続し、Matsuo *et al.* (1981) に基づく降水相判別によると雪とみぞれの両方が含まれ得る環境であった。風速は最大0.9  $m s^{-1}$ と弱かった。防風ネット内でもあり、鉛直流は0  $m s^{-1}$ として解析した。

LPMの観測例を第2図に示す。縦軸は粒子がビームを通過している時間の長さ  $T_e$  である。観測値は測定された全領域で滑らかに分布し、量子化誤差などを思わせる不自然な不連続は見られない。大粒径側は明確な値の丸めがみられ、8.87mm以上の大きさの粒子は全てこの値付近の粒子として出力されている。一方、小粒径側には継続時間が非常に短い粒子がある。第2図に対応して縦軸に球仮定の速度値 V (sphere) を取ると(第3図)、落下速度が水滴の終端落下速度(Gunn



第2図 球仮定の粒径 D (sphere) と粒子の検知継続時間  $T_e$  の散布図。LPMのPE測定を用いた2018年1月31日20時19分から2月1日9時30分にかけての森林総合研究所十日町試験地露場設置のSPOS1十日町サイトにおける観測による。

and Kinzer 1949；以下 GK；第3図の灰色破線）より大きい粒子が見られる。これは  $D(\text{sphere})$  に対して非常に短い  $T_d$  を持つ粒子、すなわちビームの端で一部だけがビームを通過した粒子と考えられる。

### 2.3 球体試験

粒径のわかった球体を使用し、ビームに対する位置を変えて静かに落下させる試験を実験室内にて行った。この実験にはレーザー光の進行方向（ビームの長辺）に対して直交する横方向（第1図の  $x$  方向）の速度成分を持たないように球体を落下させる必要があり、そのための校正器を作成した（第4図）。校正器は台座と落下台で構成され、落下台には落下口につながる溝が掘ってある。その溝に球体を転がしてレーザー光と平行な方向に落下させることが可能であり、台座のものさしで落下台の位置を決めることにより、レーザー光に垂直な方向に位置を変えながら測定ができるようになっている。校正器の構造上レーザー光の進行方向に球体が速度を持ち得るのでこの方向の落下位置は厳密には特定できないが、実験中の目視では粒子はほぼ垂直に落下していた。そこで、実験の  $y$  方向の位置については、校正器落下台から垂直に落下したと仮定する。

この校正器を使用し、実験室において

- ・直径3mmの鋼球（SUJ-2、等級20）
- ・直径4mm、6mm、8mmの鋼球（SUJ-2、等級

28）

- ・直径15mm、20mm、25mmの木球（ミズキ、ノギスを用いたサンプル測定で $\pm 0.5\text{mm}$ の誤差、かつ薄い切り落としあり）

を落下させた（第5図a）。ただし、25mm木球は落下台の穴径が小さく使えなかったため台座のへりから落下させた。LPMは波長785nm、安全基準はJIS C 6802（IEC 60825-1）Class 1Mのレーザー機器であり裸眼では安全と分類されるが、球体落下試験実施時には安全のためレーザー波長に適合した防護眼鏡を使用した（第5図b）。連続落下時の検知については、ビームの端から十分内側の位置に3mm鋼球30個全てを4秒以内に落下させたところ、LPMは個数を正しく計測した。その後の試験を含めて検知そのものに問題は見られなかった。

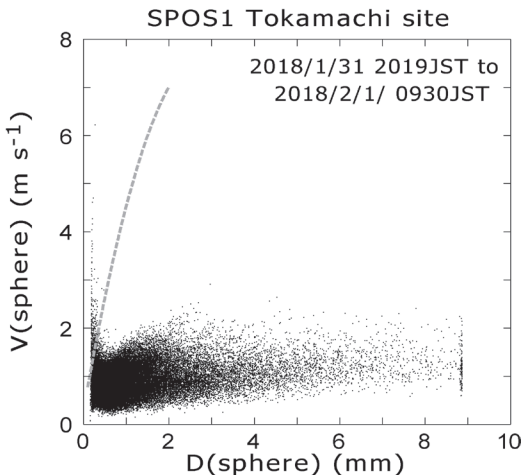
試験は次の5種類を行った。測定位置は球体の中心の位置とする。

試験1：直径3mmの鋼球30個をビームの  $x$  方向ほぼ中央に落下させ、PE測定

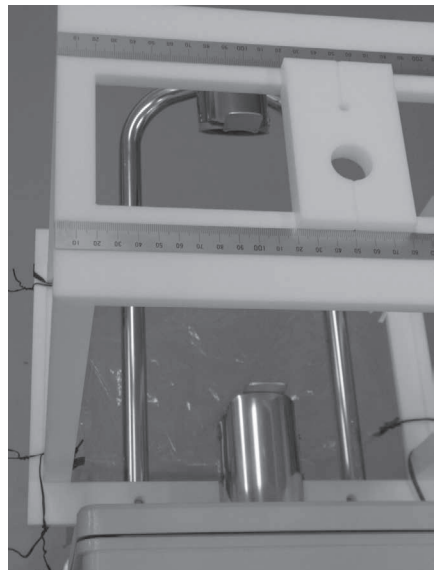
試験2：直径15mm、20mm、25mm各5個の木球をビームの  $x$  方向ほぼ中央に落下させ、PE測定

試験3：直径3mmの鋼球30個を  $x$  方向にビームを横切る1mm毎の全ての位置において落下させ、PE測定

試験4：直径3mm、4mm、6mm、8mmの鋼球各



第3図 第2図に同じ、ただし、球仮定の粒径  $D(\text{sphere})$  と球仮定の粒子速度  $V(\text{sphere})$ 。灰色破線は、GKによる水滴の粒径と終端落下速度の測定値を近似した線（付録A）である。



第4図 球体試験に使用した校正器。



30個をビームの  $x=2.9\text{mm}$  の位置に落下させ、PE測定

試験5：直径4 mm, 6 mm, 8 mm の鋼球各30個をビームの  $x=2.9\text{mm}$  の位置に落下させ、PSVD測定

試験1および2は一連の測定として行われた。  $x$  方向の測定位置は、校正器とのさしを用いてほぼ中央に位置を合わせた1箇所のみである。校正器はレーザー平行光に対して斜めにならないよう設置できるが、中央位置を精度良く決めるしくみを持たないため、これらの試験で位置合わせの精度は良くないと考えられる。これらの試験のデータはLPM内部での処理の調査など、落下位置に左右されない解析に使用した。  $y$  方向の測定位置は  $y=(68.7\text{mm}-\text{球半径})$  である。校正器では  $y$  方向には球の端の位置が決められるので、球体中心で定義した位置は球半径によって異なる。

試験3、4及び5は一連の測定として行われた。試験3でビームの両側に十分外れた位置まで測定をしたところ、ビームの端で検出数が減少したため、校正器に付けた1 mm ほどの測定位置目盛りについて検出数の重み付き平均値を求め、その値の位置をビームの中

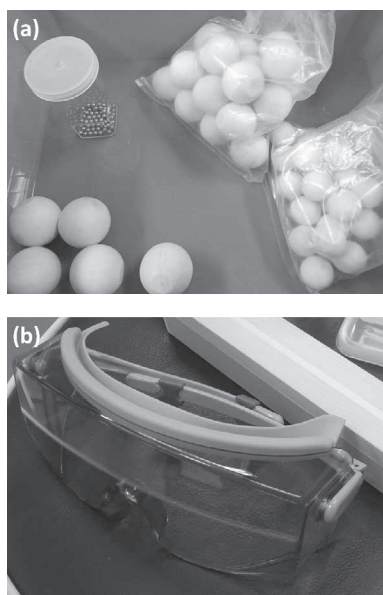
央位置 ( $x=0$ ) とした。試験3、4及び5の結果はこの  $x$  (mm) に基づいて記述する。試験3は  $y$  方向位置3箇所について実施した。試験4、5の  $y$  方向の測定位置は  $y=(16.7\text{mm}-\text{球半径})$  である。試験設定を第2表にまとめた。

### 3. 試験結果及び解析

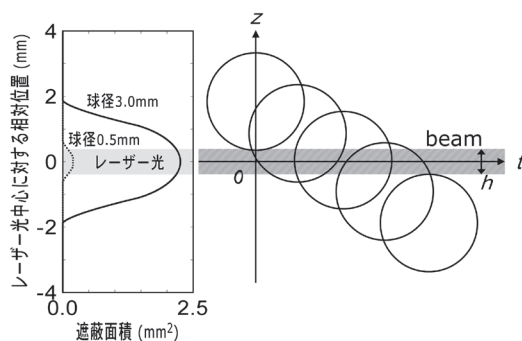
#### 3.1 “粒径”と“落下速度”の正確な意味

ODのビーム(検知領域)内を粒子が落下すると粒子がレーザー光と重なった部分が遮蔽される。第6図右は、厚さ  $h$  のビームを直径3 mmの球体粒子が通過するときの模式図である。そのときの遮蔽面積は、第6図左の実線のような変化をする。直径が  $h$  と等しいかそれより大きい場合はピークの値は粒子の中心がビームの鉛直方向中央にあるときになるが、直径が  $h$  より小さい時には粒子全体がビームの中にある間、最大遮蔽面積が継続する(第6図左の点線)。このビーム遮蔽を想定した最大遮蔽面積と直径の関係を計算し、観測による  $P_{\max}$  及び  $D$  (sphere) と比較したものが第7図である。

LPMのPE測定で得られる値のうち、 $P_{\max}$ は第6図左の最大遮蔽面積を反映する値で、この値をもとに  $D$  (sphere) と  $D$  (Hamburger) が算出されている。観測による  $P_{\max}$  と  $D$  (sphere) の関係は球体によるビー



第5図 (a) 球体試験に使用した球体。歪んで写っているのはカメラのレンズ特性のためである。精度については本文参照。(b) LPMの波長に対応したレーザー防護眼鏡



第6図 厚さ  $h=0.75$  (mm) のビームを球体粒子が通過するときの遮蔽。(右) 直径3 mmの球体粒子とビームの位置関係の模式図。  $t$  は時間、  $z$  はビーム鉛直方向の中央に対する相対位置。  $t=0$  にビーム上端に接した粒子が等速で落下する様子を表す。(左)  $z$  に対応する遮蔽面積の変化。球径3 mm (実線) と0.5 mm (点線) について示す。Löffler-Mang and Joss (2000) の Fig. 1 と Battaglia *et al.* (2010) の Fig. 2 を参考に作図。

ム遮蔽を計算した結果とほぼ同一の形状をしており、D (sphere) は球体による遮蔽の形を考慮して算出されているといえる(第7図)。ただし粒径が大きくなると、ビーム遮蔽計算結果は直線的である一方、観測によるD(sphere)は $P_{max}$ に対して増加が鈍る曲線となっている。この理由は明らかではないが、例えば、計測におけるハードウェア的な要因(例えば、 $P_{max}$ が最大遮蔽面積と線形関係にない。)が反映されている可能性がある。しかし、観測を行う者にとっては、D (sphere) が球体による遮蔽を仮定した上で、最大遮蔽面積から求められた値だと言えることが重要であり、

この点が確かであれば、上記のハードウェア的な要因などの情報は必要ないと筆者は考えている。

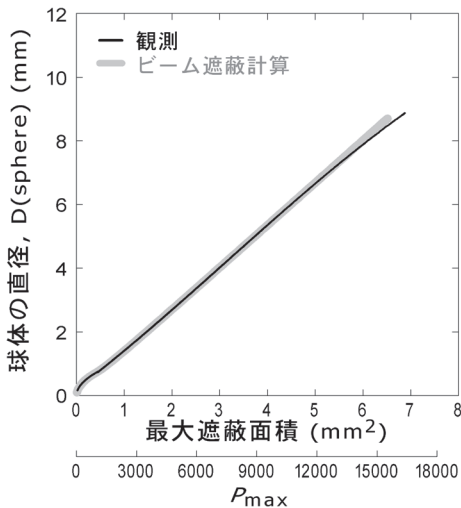
落下速度については、粒子検知の継続時間である $T_e$ が落下速度を最も直接的に反映する値である。第6図右のような粒子のビーム通過を考えると $T_e$ と落下速度 $V$ の関係は

$$V = (H + h) / T_e \tag{1}$$

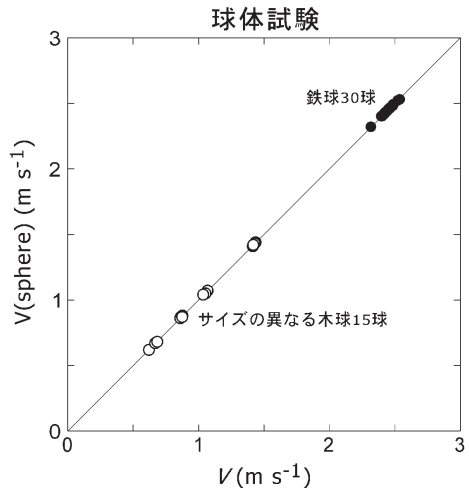
である。ここで $H$ は粒子の鉛直方向の大きさであるが、これは粒子形状を仮定しないと得られない。粒子を球体とすれば

第2表 球体試験設定. 用語の定義については本文を参照のこと.

試験名	球体試験1	球体試験2	球体試験3C	球体試験3D	球体試験3E	球体試験4	球体試験5
目的	内部処理特性	粒径による差異	$x, y$ 方向の変化	$x, y$ 方向の変化	$x, y$ 方向の変化	PEとPSVDの比較	PEとPSVDの比較
テレグラム	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PSVD
$x$ 位置 (mm)	$x \sim 0$	$x \sim 0$	1 mm 間隔	1 mm 間隔	1 mm 間隔	$x = 2.9$	$x = 2.9$
$y$ 位置 (mm)	$y_2 = 68.7 -$ 球半径	$y_2 = 68.7 -$ 球半径	$y_4 = 107.5 +$ 球半径	$y_5 = 159.5 -$ 球半径	$y_1 = 16.7 +$ 球半径	$y_1 = 16.7 +$ 球半径	$y_1 = 16.7 +$ 球半径
球体材質	SUJ-2	ミズキ	SUJ-2	SUJ-2	SUJ-2	SUJ-2	SUJ-2
球体径 (mm)	3	15, 20, 25	3	3	3	4, 6, 8	4, 6, 8
球体のべ個数	30個	各径5個	各位置30個	各位置30個	各位置30個	各径30個	各径30個



第7図 粒径と最大遮蔽面積の関係。(灰色太実線)第6図の概念に基づいて厚さ $h=0.75$  (mm)のビームを球体粒子が通過したときの最大遮蔽面積と球径。(黒実線)第2, 3図に示したデータを用いた $P_{max}$ 及びD (sphere) 観測値。



第8図 球体試験1及び2による、D(sphere)と $T_e$ を用いて(1)式で計算した粒子の落下速度 $V$  ( $m s^{-1}$ )と $V$  (sphere) ( $m s^{-1}$ )の散布図。図中の直線は1 : 1を表す。

$$V=(D+h)/T_e \quad (1')$$

であるから測定された  $D$  と  $T_e$  とから  $V$  を求めることができる。ここで、直径3mmの鋼球と直径15mm～20mmの木球を用いたPE測定による試験(球体試験1, 2)結果から、 $D=D(\text{sphere})$ として(1')式で計算した  $V$  とLPMの出力した  $V(\text{sphere})$  とを比較した。結果は粒径や落下速度によらず1:1の直線上に乗り、その平均誤差は0.02%以下であった(第8図)。よって、球仮定の落下速度  $V(\text{sphere})$  は、最大遮蔽面積から球体仮定で得られた粒径  $D=D(\text{sphere})$ 、粒子の通過時間  $T_e$ 、仕様上のビーム厚さ  $h$  から計算された落下速度  $V$  である。PE測定では常に  $T_e$  が得られるので、粒子の縦横比(落下姿勢のままにおける縦サイズと横サイズの比)を別途推定もしくは仮定できれば、その値を用いた落下速度を算出することも可能である。

D(Hamburger)については、LPM取扱説明書には雨滴相当ということのみが書かれている。一方、実際の雨滴の形状については、Wang(2013)に2つの定式化が載っているほか、PARSIVELはそれらとは別の式を用いている。そこで、これら3つの式とD(Hamburger)とを比較した。

一つ目の定式化はBeard and Chuang(1987;以下、BC87)に基づくものである。BC87は平衡状態の雨滴を粒径毎に正確に表現しており、これに対応する扁平回転楕円体の式がAndsager *et al.*(1999;以下Andsager)によって得られている。その扁平率  $a_N$  は  $D_{eq}$  に対して

$$a_N = 1.0048 + 0.0057D_{eq} - 2.628D_{eq}^2 + 3.682D_{eq}^3 - 1.677D_{eq}^4 \quad \text{where } D_{eq} \text{ in cm} \quad (2)$$

のように表される。この式は雨滴の偏波パラメーターに関する定式化にも用いられている(Bringi and Chandrasekar 2001; Wang 2013)。Andsagerによれば、(2)式は  $D_{eq}$  が0mmから7mmの範囲で0.003以下のずれで既存の扁平率の値を再現する。回転楕円体なので  $D$  と  $D_{eq}$  の関係は  $a_N$  を用いて

$$D = D_{eq} a_N^{-1/3} \quad (3)$$

と表せる。

もうひとつの定式化は、雨滴が大粒径で“Hamburger shape”になることも表現したもので、Wang(1982)が提案してThurai *et al.*(2007, 2009;以下Thu-

rai)が改良した、粒子の形そのものを表した式である。なおThurai *et al.*(2009)は式に誤植がある。本論文では誤植を修正してWang(2013)に掲載された式で表される粒子形状と  $D_{eq}$  から  $D$  を求めた。一部のパラメーターが  $D_{eq} \geq 1.5\text{mm}$  でしか定義されていなかったため、それ以下は球として扱った。大粒径の粒子については、Thurai *et al.*(2007)ではBC87を参照して、また2DVD観測も行い  $D_{eq}$  が9mmまで解析をしている。Thurai *et al.*(2009)では  $D_{eq}$  が7mmまで実験や観測と良く合い8mmを越えると合わなくなってくる」と述べている。

3つ目はPARSIVELの  $D_{eq}$  算出に用いられている扁平率の式

$$a_N = \begin{cases} 1 & D_{eq} \leq 1 \text{ mm} \\ 1.075 - 0.075D_{eq} & 1 \text{ mm} < D_{eq} < 5 \text{ mm} \\ 0.7 & 5 \text{ mm} \leq D_{eq} \end{cases} \quad (4)$$

である(Battaglia *et al.* 2010;以下Battaglia)。この  $a_N$  を用いれば、Andsager同様  $D$  と  $D_{eq}$  の関係を(3)式で表せる。ただしこれは初期のPARSIVEL(可視光)についてのもので、その後モデルチェンジされたPARSIVEL<sup>2</sup>(近赤外光)、現在のPARSIVEL<sup>2</sup>(可視光)の  $a_N$  の式がBattagliaと同じかどうかはわからない。

以上Andsager, Thurai, Battaglia3種類の雨滴形状モデル式について、 $D$  と  $D_{eq}$  の関係を第9図に示した。AndsagerとThuraiは  $D$  で約9mm、 $D_{eq}$  で約7.5mmまでほとんど差が無い。一方、Battagliaでは扁平率が固定される  $D_{eq} > 5\text{mm}$  以上で同一の  $D$  に対して他の2式より  $D_{eq}$  が大きい。計測値から直接的に得られるのは  $D$  であり  $D_{eq}$  は  $D$  から推定されるので、雨滴の観測において大粒径で  $D_{eq}$  は0.5mm近く過大評価される。Battagliaに記述された  $a_N$  が実装されたPARSIVELでは、大粒径の雨滴を含む解析に  $D_{eq}$  をそのまま等価球径として用いると誤差を生じる。

LPMについてはPE測定でD(sphere)とD(Hamburger)の両方が記録されるので、2.2節の観測データからこれらの値を第9図に重ねて作図した。2変数の関係はLPMに実装された計算式であり、観測値がきれいな曲線上に乗ることはそれらの値が一義的な関係で処理されていることを示す。その曲線はThuraiの線に非常に近く、大粒径における差は0.1mm～0.2mmであった。よって、第7図と考え合わせると、LPMのD(Hamburger)は“Hamburger”形を仮定した等価球の直径  $D_{eq}$  であり、D(sphere)は測定され

た横幅をそのまま球の直径とみなした  $D$  である. LPM の  $D$  (すなわち  $D$  (sphere)) から  $D_{eq}$  (すなわち  $D$  (Hamburger)) を算出する式を多項式近似で求めたところ,

$$D_{eq} = -0.007555 + 1.0320846D - 0.027233D^2 + 0.0013579D^3 - 7.690 \times 10^{-5}D^4 \quad (5)$$

$D_{eq}$  から  $D$  を算出する式は

$$D = 0.0090762 + 0.9630786D_{eq} + 0.0307926D_{eq}^2 - 0.002024D_{eq}^3 + 2.5056 \times 10^{-4}D_{eq}^4 \quad (6)$$

であった.

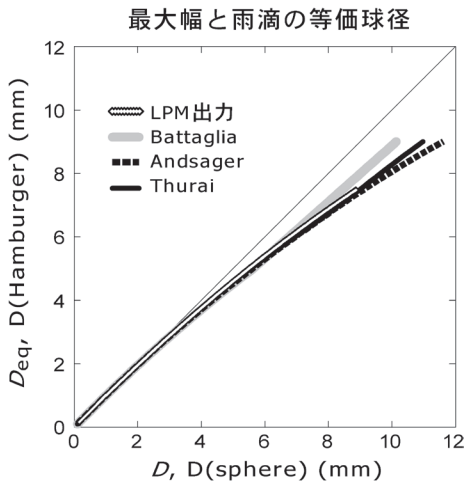
では, LPM の PSVD 測定で出力されている“粒径”は  $D_{eq}$ ,  $D$  のどちらであろうか.

これを確かめるため, 直径 4 mm, 6 mm, 8 mm の球体をそれぞれのべ30球落下させて, PSVD 測定を

行った(球体試験5). これらのサイズは雨滴であれば扁平となる大粒径に相当する. 第3表はこの測定の結果で, PSVD 測定 of 粒径区分(クラス)の上端, 下端の数値と, それぞれのクラスで検出された球体粒子の数をまとめて示す. 用いた球体の直径, 4 mm, 6 mm, 8 mm は全てクラスの区切りの粒径値と等しい. 第3表では, これらのいずれについても球体は実際の直径に対応する主として大きい側のクラスにカウントされたことがわかる. さらに, 同じ落下位置と粒径における PE 測定も行った(球体試験4). その結果が第4表である. 直径 4 mm, 6 mm, 8 mm の球体について, 実際の直径に比べて  $D$  (sphere) の平均値は大きく,  $D$  (Hamburger) の平均値は小さかった. また, 両者の差は測定 of 標準偏差より大きく, 分布としても明瞭に異なる値を示した. これらのことから, LPM で通常観測に用いられる PSVD 測定 of “粒径”は  $D$  すなわち  $D$  (sphere), 言い換えれば“横幅”であるといえる.

(5), (6) 式は LPM の PE 測定で出力される  $D$  と  $D_{eq}$  の関係式であり, LPM の PSVD 測定 of 出力は  $D$  である. 従って, LPM の PSVD 測定による粒径は  $D$  としてそのまま使用できるが,  $D_{eq}$  を必要とするときにはよく知られている Andsager や Thurai の式による変換を行うべきである. 一方, PARSIVEL においては, 初期のものから変更されていないければ Battaglia による  $D_{eq}$  が PSVD 測定 of 粒径として出力されている(2.1節). 従って,  $D$  を必要とするときには(4)式による変換, 大粒径で正確な  $D_{eq}$  を必要とするときには(4)式による  $D$  への変換の後に Andsager や Thurai の式による  $D_{eq}$  を求める必要がある.

球体試験5において, 落下速度は全ての粒子が  $2.2\text{m s}^{-1}$  から  $2.6\text{m s}^{-1}$  のクラスに入っていた. 同じ球体と測定手法でこれに対応する PE 測定を行ったところ(球体試験4),  $V$  (sphere) は  $2.1\text{m s}^{-1}$  から  $2.52\text{m s}^{-1}$  の範囲に,  $V$  (Hamburger) は  $1.96\text{m s}^{-1}$  から  $2.5\text{m s}^{-1}$  の範囲に分布した. PSVD 測定では  $2.2\text{m s}^{-1}$  より小さい粒子は測定されなかったことと, 異なる仮定の変数



第9図 Andsager, Thurai, Battaglia 3種類の雨滴形状モデル式についての  $D$  と  $D_{eq}$  の関係, 及び, 防風ネット内の PE 測定を用いた観測で LPM の出力した  $D$  (sphere) と  $D$  (Hamburger) の散布図. 単位は全て mm. 図中の細線は 1 : 1 を表す.

第3表 球径 4 mm, 6 mm, 8 mm の鋼球を用いた PSVD 測定 (球体試験5) の結果. LPM の PSVD 測定における粒径区分(クラス)ごとに粒径の下端, 上端, そのクラスにおける球体検出数を示す.

クラス番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
クラス下端粒径 (mm)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
クラス上端粒径 (mm)	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	
検出数 (個)	0	0	0	30	0	0	11	19	0	0	2	28



をひとつの頻度分布として出力するとは考えにくいことから、PSVD測定の“速度”は $V$  (sphere) であると考えられる。よって、LPMのPSVD測定の出力は $D$ と $h$ から(1')式で求められた $V$ であり、降雪の解析においてそのまま粒径として扱える。PARSIVELはこれと異なり $D_{eq}$ を粒径として出力するので、LPMとPARSIVELの観測値を比較する場合は、 $D$ もしくは $D_{eq}$ のいずれかに統一して解析する必要がある。

### 3.2 大粒径の丸め

第2図で降雪粒子の $D$  (sphere) (すなわち $D$ )の値は約8.87mmに丸められていた。これについて、直径15mm, 20mm, 25mmの木球を用いて確認した(球体試験2)。校正器の落下口がやや小さく、20mm, 25mmではビームから一部外れて小さく計測された木球がいくつかあったが、それらを除く全て(15球中12球)の $D$ の測定値は8.67mmであった(第10図)。第2図, 第10図より、LPMではビーム幅の20mmではなく、PSVD測定の粒径最大クラス下端の8mmよりやや大きいところで丸められた $D$ の値を出力する。これは $D \geq 8$  mmが全て同じクラスに入るPSVD測定の出力ではわからないが、PE測定の出力には明確に表れた。降雨観測においては粒径8mm以上の雨滴も報告されている(e.g. Fujiyoshi *et al.* 2008; Gatlin *et al.* 2015)ものの、その数は観測された雨滴全体に対して非常に少ない。従って、この丸めは降雨観測では大きな問題にはならないと考えられる。しかし、冬季日本のように粒径1cmを超える雪片が日常的に降る環境では、PE測定を行ったとしても粒径分布に対して何らかの補正が必要と考えられる。なお、8.67mmという値は球体試験を行った個体での値であり、観測に用いた個体で見られた約8.87mmという値との差異は個体差である。丸められた結果出力される値には個体差

第4表 球径4mm, 6mm, 8mmの鋼球を用いたPE測定(球体試験4)で得られた、 $D$  (sphere)と $D$  (Hamburger)の平均値と標準偏差。

球径 (mm)	変数	$D$ (sphere) (mm)	$D$ (Hamburger) (mm)
8	平均値	8.07	6.93
	標準偏差	0.06	0.05
6	平均値	6.06	5.44
	標準偏差	0.14	0.11
4	平均値	4.24	3.96
	標準偏差	0.07	0.06

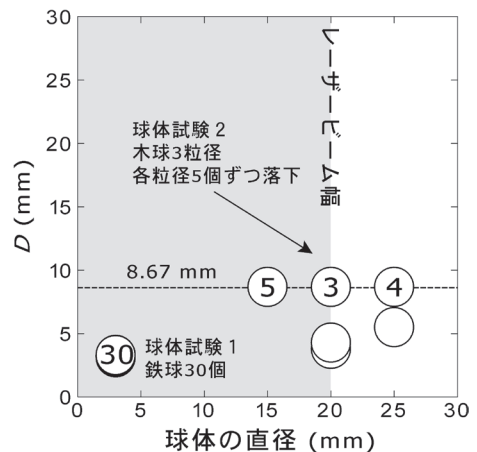
がある(3.3節)。

### 3.3 小粒径における異常な測定値とその除去

第2図に見られた $D$ が小さく $T_e$ が非常に短く測定された粒子は、 $V$ が(1')式で算出されることから落下速度の非常に大きい粒子となる(第3図)。その一部の落下速度は雨滴の値(第3図の破線)よりも大きかった。このような粒子は、例えば、ある程度の落下速度を持つ大きい粒子の一部がビームの端を通過した場合に現れ得る。小粒径で水滴より落下の速い降水粒子はないので明らかに値として異常であり、除去する必要がある。

$D$ の粒径分布を作成すると、0.3mmより小さい粒子は急激に数が少なくなっていた(第11図の灰色棒グラフ)。最小分解能の0.01mm区切りの粒子カウントをそのままプロットすると(第11図の黒点)細かい変動があり、0.31mmまではやや小さく0.32mmからピークに近い値になった。しかし例えば0.1mm幅のクラスで測定値を扱う場合、その影響は小さいと考えられる。

$T_e$ と $V$ (すなわち $V$  (sphere))の散布図を作ると、両者は(1')式で $D$ (すなわち $D$  (sphere))をパラメーターとして関係づけられる形になっているので、 $D$ が一定の線は双曲線になる(第12図)。第12図では記号□を結ぶ線が計算で $D=0.3$ mmとなる値であり、そこに観測値分布の不連続が存在していた。 $D=0.3$ mm以下の粒径(□を結ぶ双曲線の左下側)では $D=0.3$ mm以上の粒径(同右上側)に比べて、 $V$ が約 $1.5 \text{ m s}^{-1}$



第10図 球体試験1及び2による、試験球体の直径(mm)と測定された $D$ (mm)との散布図。LPMのビーム幅(20m)を灰色で、 $D=8.67$ mmを破線で示す。

以下で粒子数が少なく、 $V$ がそれより大きいところでは粒子数が多かった。ただしその境界は $D=0.3\text{mm}$ の双曲線に完全に沿っているわけではなく、 $V<0.5\text{m s}^{-1}$ ではやや大粒径側にずれていた。 $P_{\max}$ と $T_e$ の散布図では、ばらつきが大きいものの $D\approx 0.3\text{mm}$ に相当するところを境に小粒径側で $T_e$ 分布が不連続に短くなっていた(図略)。

第11図からだけでも約 $0.3\text{mm}$ に検知の限界があることは示唆されるが、第12図の方が分布の不連続が明瞭であり、また $D<0.3\text{mm}$ にその粒径では異常といえる $V$ のほとんどが分布したこともわかる。なお、大粒径側では球体試験(第10図)で見いだされたものと同様の丸めが見られ、その値はこの個体では $8.87\text{mm}$ であった。第12図で明らかになったように、このLPMにおいて約 $0.3\text{mm}$ より小さい粒径は検出の限界にかかっていると考えられ、この領域のデータは解析に使わない方が良いと判断される。閾値が $0.3\text{mm}$ かどうかは検出限界であればハード的な要素の可能性があり、個体差、また経年変化があり得る。従って、多少の過少評価があり得ると理解した上で $D=0.3\text{mm}$ 以上のデータを使用するのが現実的に思われる。LPMの使用にあたっては年に一度はPE測定を行い、第12図のような確認をすることが望ましいと考えられる。

以上の検討を踏まえ、LPMの異常値除去フィルタとしては1) GKの終端落下速度に観測値のばらつき

を考慮したマージン( $V_M$ )を加えた速度値より大きい粒子の除去、及び2)検知下限設定値( $D_B$ )より小さい粒子の除去、を重ねた処理が良いと考えられる。すなわち、

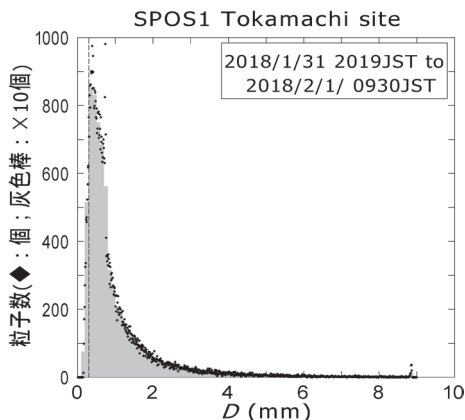
$$V \geq 0.270190 + 5.1315530 D - 0.881707 D^2 + V_M \quad (D \leq 2.00\text{mm}) \text{ or} \\ D \leq D_B \quad (7)$$

を満たす粒子の除去である。 $V_M=1.0 (\text{m s}^{-1})$ 、 $D_B=0.30 (\text{mm})$ としたフィルタを第3図のデータに適用した結果を第13図に示す。小粒径域の異常値は除去され(第13図の灰色領域)、その除去範囲を除いた観測データの多くが品質管理済みとして使用できる(第13図の灰色以外の領域)。小粒径域のみを除去するのでこの処理で落下速度の大きい雹を誤ってフィルタすることはない。

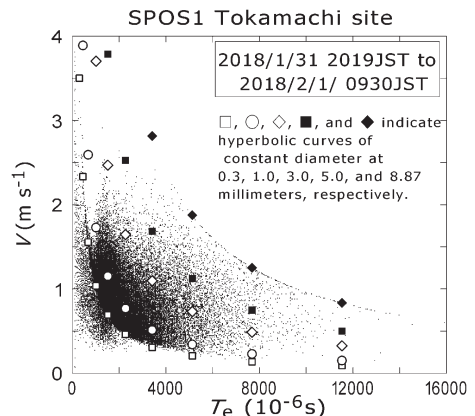
### 3.4 ビーム内不均一と部分検知時の特性

球体試験3では、レーザー光により検知される粒径が均一かどうか、及び、ビームに一部掛かった粒子はどのような測定値になるのか調査するため、 $y$ 方向3箇所について、直径 $3\text{mm}$ の鋼球30個を $x$ 方向に $1\text{mm}$ ずつずらして落下させたPE測定を行った。第14図に $x$ 位置 $1\text{mm}$ ごとの $D$ の測定値(30球平均)を示す。

送信側に近い場所(第14図a)においては、各位置



第11図 第2図のデータによる $D (\text{mm})$ の頻度分布。◆は $D$ の分解能である $0.01\text{mm}$ 毎の粒子数、灰色の棒グラフは $0.1\text{mm}$ 毎の粒子数。破線は $D=0.3\text{mm}$ を示す。

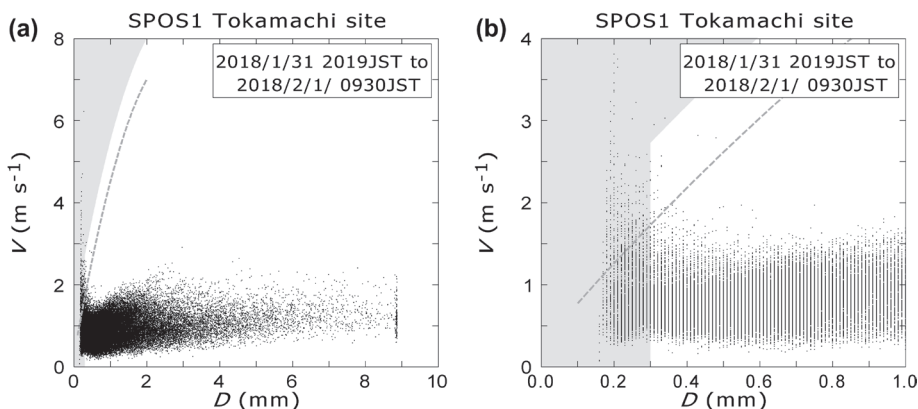


第12図 第2図と同じ、ただし、粒子の検知継続時間 $T_e$ と球仮定の粒子速度 $V$ (すなわち $V(\text{sphere})$ )の散布図。 $D=0.3\text{mm}$ 、 $D=1.0\text{mm}$ 、 $D=3.0\text{mm}$ 、 $D=5.0\text{mm}$ 、 $D=8.87\text{mm}$ の双曲線の位置をそれぞれ□、○、◇、■、及び◆印で示す。

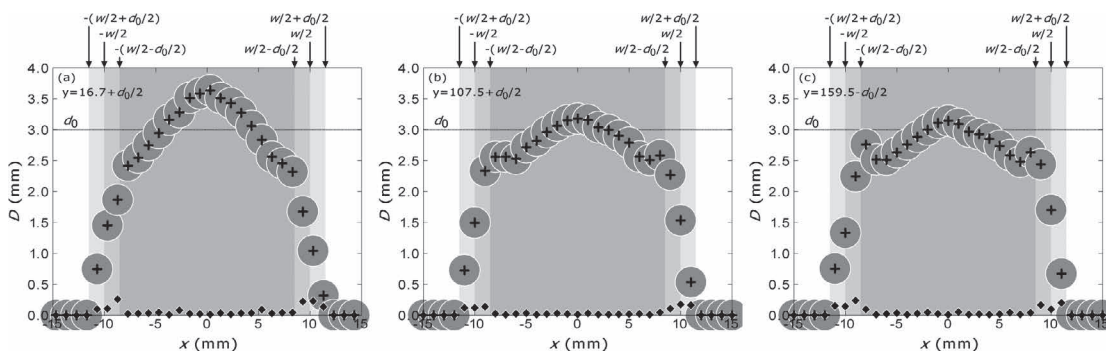
30球の平均値はビームの  $x$  方向中央 ( $x=0$ ) 付近で大きく、端 ( $x=w/2, -w/2$ ) に行くにつれて小さくなっていった。また、ビームの端にかかる部分 ( $-(w/2+d_0/2) < x < -(w/2-d_0/2)$ , 及び  $w/2-d_0/2 < x < w/2+d_0/2$ ) では、球体がビームから外れるにつれて  $D$  は急激に小さくなり、完全に外れた場所で0になった。測定値の標準偏差は0.2mm以下と平均値に比べて十分小さかった。第14図aに比べて落下位置を受信側に近くしていった第14図b, cの測定値は、受信側に近いほど、中央部で小さくビームの端付近で大きくなり、球体がビーム内に完全にに入る範囲 ( $-(w/2-d_0/2) \leq x \leq w/2-d_0/2$ ) で平坦になった。加えて、この範

囲の両端付近で値が跳ね上がるように増加する傾向が見られた。この跳ね上がりに対応する値の変化はわずかではあるが第14図aにも見られた。第14図に示した  $y$  方向3箇所の直径測定値のうち、球体がビーム内に完全にに入る範囲の全ての30球平均値について、最小は2.32mm, 最大は3.64mmであり、実際の球直径に対して±20%を少し超える変化があった。

球体の一部分だけがビームに掛かる範囲 ( $-(w/2+d_0/2) \leq x \leq -(w/2-d_0/2)$ ,  $w/2-d_0/2 \leq x \leq w/2+d_0/2$ ) ではビームの外側に向けて直線的に測定粒径  $D$  が減少し、 $x < -(w/2+d_0/2)$  及び  $x > w/2+d_0/2$  で0になった。この範囲を通過した粒子は、ビームに掛かっ



第13図 (a) 第3図と同じ、ただし軸変数名は3.1節を踏まえて  $D$  (sphere) は  $D$ ,  $V$  (sphere) は  $V$  としてある。灰色領域は  $V_M=1.0$  ( $m\ s^{-1}$ ),  $D_B=0.30$  (mm) として (7) 式により除去される範囲。(b) (a) の小粒径域を拡大したもの。



第14図 球体試験3の結果。横軸は第1図の  $x$  (mm) で、ビームの  $x$  方向中央を0 mm, 幅を  $w$  (mm) とする。縦軸は  $D$  (mm)。  $d_0=3.0$  mm は測定に用いた球体の直径。灰色階調は濃い方から、球体全部がビーム幅内に入る範囲、ビーム幅  $w$ , 球体がビームの端にかかる範囲、を示す。+は各位置における  $D$  の30球平均値で、◆は測定値の標準偏差、平均値は+に加えて  $x$  に合わせた球径を示す。(a) 球体試験3 E, (b) 球体試験3 C, (c) 球体試験3 D。

た分の粒径が計測され、その外側は検知されないといえる (第14図)。

球仮定の落下速度  $V$  (sphere) は  $D$  (sphere) と  $T_e$  とから計算されるので (3.1節), 粒径測定値の不均一は落下速度出力値にも影響を与える。第15図は直径  $d_0=3.0\text{mm}$  の鋼球を用いた試験 3 E の粒径と落下速度の散布図である。測定値 (第15図の+印) は落下速度が粒径に比例しており, これは LPM で分布のある粒径測定値に (1') 式を適用して落下速度を得ているためである。落下速度測定値の分布は  $D$  (sphere) の分布を反映して  $\pm 15\%$  を越える範囲にまたがる。一方, 試験に用いた球体の実際の粒径  $d_0$  と  $T_e$  から計算した落下速度は  $\pm 5\%$  以下の範囲に収まる。わずかに負相関があるのは, 粒径が小さく測られたビーム  $x$  方向の端に行くほど球体の上下端で検知される範囲が狭くなり  $T_e$  が小さくなったものと考えられる。どの粒径においても  $\sim 0.2(\text{m s}^{-1})$  の一様なばらつきがあるのは,  $T_e$  の値にこれに相当するノイズ成分が含まれていることを示唆する。

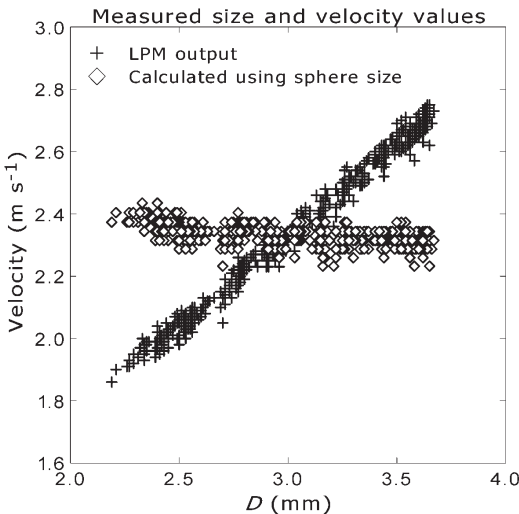
4. 球体試験と工場校正値との比較

4.1 工場校正値についての調査

LPM には, 1 台ごとに必ず “Specific Report” という

名前前の校正シートが添付されており, 工場校正値が書かれている。そこで, 今回の球体試験 3 C, D, E (それぞれ2018/12/07, 2019/03/04, 2019/03/07付) の結果と Specific Report (2014/07/30付) とを比較し, 工場校正時から球体試験までの約4.5年における経年変化を調査した。球体試験と Specific Report では測定した位置が異なるため, 比較のためにビーム全体の測定粒径分布を推定する方法も開発した。なお, Specific Report の水平座標系  $(x, y)$  は本論文とは逆に, 受信側を  $y=0$  に取っている (メーカー確認済み)。これはレーザー光の進行方向と逆で間違えやすいので, 本論文では Specific Report の座標値について送信側を  $y=0$  に取った座標系 (第1図) で記述する。

今回の試験に用いた個体の Specific Report の校正値は第5表 (a) のようになっており, 単位の ml (ミリリットル) は水滴を落下させた体積である (メーカー確認済み)。値は1つの水滴にしては大きすぎるので, 複数の水滴の合計と考えられる。15箇所の測定値の平均は第5表 a の “Average” の欄に書かれている値と少し異なり, これは記載されている測定値が既に丸められているためと思われる。“Nominal volume” が落下させた水滴の実際の体積 (校正に対しては基準として扱われる) であり, そこからのずれが平均として  $\pm$



第15図 球体試験 3 E による, 測定された粒径  $D$  (mm) に対する落下速度 ( $\text{m s}^{-1}$ ) の散布図。測定された  $V$  (+), 及び使用した球径  $d_0$  と測定された  $T_e$  から (1') 式により計算した落下速度 ( $\diamond$ ) を示す。なお, 球体全体がビームを横切った粒子のデータのみを用いて作図した。

第5表 (a) 球体試験を行った LPM 添付の校正シート (Specific Report) 記載の数値 (変数名, 桁数も記載のまま)。 (b) (a) の値から求めた粒径ファクター  $f_d$ 。軸の値は球体試験の位置精度に対応して  $0.1\text{mm}$  までの表記とし, 測定値と平均値は計算をしてから小数点以下2桁に丸めた。なお, (a) の Average は Nominal volume より大きい (b) の Average は  $1.0$  より小さい。この差異は三乗根を取ったことによる。

(a)				(b)			
Measured amount [ml]				$f_d$			
y \ x	-5.00	0.00	5.00	y \ x	-5.0	0.0	5.0
28.00	0.42	0.86	0.41	28.0	1.00	1.27	1.00
78.00	0.38	0.70	0.37	78.0	0.97	1.19	0.96
128.00	0.34	0.57	0.33	128.0	0.94	1.11	0.93
178.00	0.28	0.47	0.29	178.0	0.88	1.04	0.89
228.00	0.25	0.39	0.25	228.0	0.84	0.98	0.84
Average [ml]			0.422	Average			0.99
Nominal volume [ml]			0.415				
Allowed variation: $\pm 5\%$			0.395				
			0.436				



5%以内であれば合格として出荷されている。すなわち、この平均値が校正に合格していれば良く、ビーム内の不均一については、必要であれば Specific Report を参照してユーザーが考慮しなければならないということである。筆者としては、全個体に Specific Report が添付されていることは利用者にとって重要だと考えている。

第5表(a)の測定値は体積であり、本研究の試験は球体の粒径で行っているから、これらに対応させるためには第5表(a)の値を粒径測定値に変換する必要がある。このため、まず第5表(a)の値を Specific Report の Nominal volume に対する比率にして、その三乗根を取った。この値は測定される粒径の実粒径に対する比率であるから、粒径ファクター ( $f_d$ ) と呼ぶことにする(第5表(b))。第5表(b)では、全ての  $y$  位置において  $f_d(0.0)$  が  $f_d(-5.0)$  及び  $f_d(5.0)$  より大きく、この点は第14図の特徴と同様である。しかし、ビーム  $x$  方向の端付近で値が跳ね上がるように増加する傾向は  $x = \pm 5$  mm よりも外側の特徴であり、Specific Report では表現されていない。この形状まで表現しようとする中央付近のものに合わせて3ピークの大きさ、位置、ピーク間の極小値や形状といった未知数が多くなり、3点の校正値からそれら全てを求める事は不可能である。

#### 4.2 ガウス関数を用いた近似による $f_d$ 分布

de Moraes Frasson *et al.*(2011) は、LPM の粒径測定値がビームの  $x$  方向中央から端にかけて小さくなることを指摘し、ガウス関数の一部を切り取った関数形を用いた粒径測定値分布の近似を試みている。これに倣い、 $f_d$  の  $x$  方向の全体的な変化をガウス関数、定数、及び原点を通る直線の和

$$f_d(x) = a \exp(-x^2/C) + B + px \quad (8)$$

として表現することにした。この方法では、ガウス関数の形状を決めれば3測定点から  $f_d$  を  $x$  の関数として解析的に得ることができる。ただし、測定点間にあるかもしれない極小極大は表現されず、球体試験で見られた両側の粒径の跳ね上がりは、その内側の極小も含めて均されたパターンが得られることになる。

(8) 式の係数については、球体試験測定値に最小二乗法を適用して、 $f_d(-5.0)$ 、 $f_d(0.0)$ 、及び  $f_d(5.0)$  のみから記述できるようにした(付録B)。その係数を用いれば  $x = -5.0, 0.0, 5.0$  において与えた任意の  $f_d$  に対して、その3点において与えた値を取り、かつそ

れらの間と両側は(8)式による推定で滑らかに変化する  $f_d(x)$  を得ることができる。

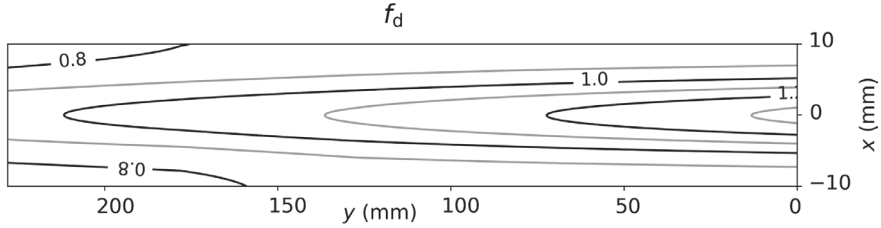
Specific Report で値の得られている  $y = 28.0, 78.0, 128.0, 178.0, 228.0$  の5箇所について(8)式を用いて  $f_d(x)$  を求め、それらの間を  $y$  方向に線形内挿し、 $y < 28.0$  については  $y = 28.0$  と  $y = 78.0$  の傾きを使用して線形外挿した。この処理によって、LPM のビーム内の  $f_d$  分布を面的に得ることができた(第16図)。分布の形状はビームの  $x$  方向両端で実際の分布より均されていると考えられるが、校正値の測定点においては与えられた値となっており、ビーム内の  $x, y$  方向とも任意の位置において、粒径測定値との比較や補正が行えるようになった。Specific Report の  $f_d$  の値はこの個体では0.84から1.27である(第5表(b))が、第16図では値の分布が0.77から1.32までに広がり、直径と同一の測定値を表す  $f_d = 1.0$  からの差は  $\pm 20\%$  を少し超えていた。 $f_d$  の平均値は第5表bの0.99に対して第16図では0.96であった。これらには外挿の影響が表れている。

#### 4.3 比較結果

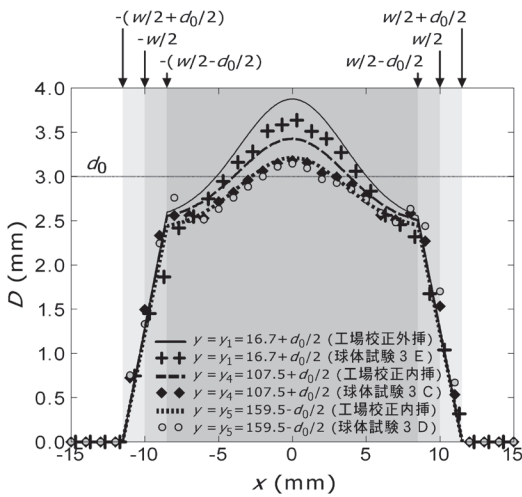
4.2節の結果を用いることにより、Specific Report 記載の工場校正値と任意の位置で行った球体試験測定値を比較することができる。球体試験を行った  $y$  位置と工場校正値の  $y$  位置は異なるので、第16図に示した工場校正値の  $f_d$  分布から球体試験を行った  $y$  位置3箇所の値を抜き出して、球体試験測定値と比較した。比較は粒径  $D$  で行い、工場校正による  $f_d$  には使用した球体の直径3.00mm を乗じた値、球体試験測定値はそのまま使用した(第17図)。

その結果、3箇所の測定のいずれにおいても工場校正値よりも球体試験の値がやや小さくなっており、その比は  $y$  位置によって異なり平均では0.96であった(前節の0.96と同じ値だが別のものである)。すなわち、工場における校正から約4.5年を経て、粒径の測定値は、定性的には分布パターンが維持されたまま、やや小さく出力されるようになったといえる。第17図の工場校正値は本研究の測定値とは異なる位置の校正値を  $y$  方向に線形内外挿したものである(4.2節)。  $y$  位置によって減少幅が異なるのは、この処理に起因する可能性がある。

球体の一部がビームに掛かる範囲  $-(w/2 + d_0/2) \leq x \leq -(w/2 - d_0/2)$ 、 $w/2 - d_0/2 \leq x \leq w/2 + d_0/2$  については、その掛かった幅に応じた比率を  $f_d(x, x = \pm(w/2 - d_0/2))$  の値に乗じた値を工場校正値としてプロットした。この部分では工場校正値と球体測定値



第16図 “Specific Report” 記載の測定値を“Nominal volume”で規格化して1/3乗, 内外挿して求めた, 粒径ファクター $f_d$ のビーム内の分布.  $x$ はレーザー光進行方向に直交する,  $y$ は平行な方向の距離で,  $x=0.0$ が $x$ 方向のビーム中央, 図右端 $y=0.0$ が送信側である. 等値線は0.1毎に黒及び灰色実線で示す.



第17図 レーザー光を横切る方向 $x$  (mm, ビームの中央が $x=0$ ) に対する, 粒径 $D$  (mm) の球体試験測定値と工場校正値. 球体試験の番号は第2表を参照のこと. 工場校正値は試験測定 $y$ 位置場所に内外挿した値で, 粒子がビームに一部のみかかる範囲  $-(w/2 + d_0/2) \leq x \leq -(w/2 - d_0/2)$ ,  $w/2 - d_0/2 \leq x \leq w/2 + d_0/2$  はその比率に応じて直線内挿した. 工場校正値の実線, 破線, 点線がそれぞれ測定値の+, ◆, ○に対応する.  $d_0$ は試験に用いた球体の球径 (=3.00mm) である.

にほとんど差が無い. しかし, 実際にはビームの端で跳ね上がるように増加した値からビームより外れるに従って直線的に減少している (3.4節) 一方で, 工場校正値にはこの端の跳ね上がりを反映する位置に測定がない. 第17図の工場校正値はガウス関数を用いて平滑化した推定である (4.2節). 従って, この部分については, 工場校正値分布推定が過小になっている.

なお, 試験に用いた鋼球は水滴と異なり透過光がないため, その点で差異が出るかどうか, 透明な球体を用いた調査が必要である. しかし, LPM取扱説明書は鋼球を用いた試験にしか言及しておらず, de Moraes Frasson *et al.* (2011) は透明球を使っているが結果の具体的な記述がない. 現状, 遮蔽により粒径を測定するODは鋼球での校正が標準的であり, 他の測器で透明球を用いた実験を筆者は知らない.

そこで, 鋼球とアクリル球の比較試験を2.3節の方法で簡易的に行った. 落下位置は $y=y_1=16.7+d_0/2$  mm,  $x$ 方向はビームの内部に落下する1箇所のみである. その結果, 鋼球はアクリル球に比べて平均0.4%大きく計測された. この差は透過光の影響であることが示唆される. 水とアクリルで球体の透過光の測定値への影響が同程度であるとすれば, 透過光の影響は工場出荷時に許容される平均誤差±5% (4.1節), 及び, この個体における4.5年経過後の経年変化よりも小さい. また, 形状が複雑な雪片, さらに霰では透過光の影響はさらに小さい. 鋼球を用いた試験によるOD特性評価にあたっては, 透過光の影響よりもビーム内の $f_d$ 分布と経年変化とに注意を払うべきと考えられる.

### 5. 今後に向けた課題

#### 5.1 PSVD測定による観測データをどう扱うべきか

本研究では, PE測定が行えるODについて調査を行った. しかし, そうでないODも含めて, 一般にOD観測で得られる粒径と落下速度の分布には, このような測器起因の“ずれの分布”が含まれると思われる. だとすると, 観測される粒径-落下速度分布は, この“ずれの分布”による“測定される粒子の真の値の分

布”の重み付き平均（畳み込み積分）と考えるべきである。

さらに通常用いられているPSVD測定では、この“ずれの分布”でばらついた値がさらに量子化されて記録されている。従って、ODを用いたPSVD測定値から降水特性を議論する場合、分布から近似した粒径—落下速度関係を議論するのであれば、LPMのように平均値が校正されているODであれば適切と考えられる。しかし、分布のばらつきに関する特性については、測器特性にも依存するため、解析に注意を要する。また、大粒径側、小粒径側のそれぞれに測定限界や丸めなどがあり得るため、どこまでが正確に測定できているか確定した上で解析を行う必要がある。

試験に用いた個体の場合、測定される粒径分布は、もとの粒径分布に対して、落下位置によって±20%を超える $f_a$ が重みとして掛かっていた（4節）。PSVD測定ではクラスの幅が分解能となるため、それより細かい値はわからない。LPMのPSVDは0.125mm以上を記録し、クラス境界は0.250mm, 0.375mm, 0.5mm, 0.5mmから2.0mmまでが0.25mm間隔、2.0mmから8.0mmまでが0.5mm間隔である（LPM取扱説明書）。ただし、3.3節の結果によれば0.375mm以下のクラスは過小評価を含む。また、8.0mm以上とされたクラスにはこれ以上の粒径が全て含まれる。従って、0.375mm以下、及び8.0mm以上の粒子については粒径分布モデルを仮定して推定する必要がある。降水量の見積もりはこの推定の後に行うか、もしくは過小となる量を別途評価するべきである。また、例えば粒径が比較的揃った降水の場合など、その値によっては粒径の値にバイアスを生じるかもしれない、注意が必要である。

落下速度は $0.2\text{m s}^{-1}$ 幅のクラスとなっているが、 $f_a$ の掛かった粒径を用いて計算されているため、同一粒径、同一落下速度の粒子であっても、真の落下速度を中心に4～5クラス（粒径3.0mmの場合）にまたがってばらついた値が記録される（第15図）。ただし、実際の粒径より小さく（大きく）測定された粒子は落下速度が小さく（大きく）推定されるので、 $f_a$ の影響の程度は真の粒径—落下速度分布によって異なると考えられる。一方、ビームに一部だけ掛かった粒子は粒径は小さく落下速度は逆に大きく出力される（第3図）。これらは解析から除く必要があり、その方法の一つが3.3節で提案したフィルタである（第13図）。

本研究では、OD1機種についてであるが、 $f_a$ 分布、

ビームの端に掛かる粒子や大粒径、小粒径粒子の計測特性を記述することができた。これらが組み合わせられたものが粒径、落下速度測定値に影響する“ずれの分布”である。測定原理の同じODであれば、しかるべき球体試験を行えば、本研究で述べた方法を用いて同様な“ずれの分布”が得られると考えられる。この“ずれの分布”を用いて元の粒径分布を得るためには、観測値から数値的に逆畳み込みを行うか、もしくは粒径分布モデルを仮定して推定する必要がある。しかし、前者の方法は必ずしも適切な解が得られるかどうかかわからない。2DVDなどリファレンスとの同時観測を行い“ずれの分布”を用いてOD粒径分布を推定し、その解析を蓄積、データベース化することで、観測値から適切な粒径分布や降水量を求めることを可能にできるかもしれない。これが今後の課題である。

## 5.2 観測における経年変化の把握

LPMのPE測定では、粒子の情報が詳細に出力される。一方、測器状態に関する値（レーザー発光のon/off、素子の温度や電流、ヒーターの状態、入力電圧など）はPE測定では出力されずPSVD測定において出力される。従って、仮に実際の観測に主としてPE測定を用いる場合であっても、PSVD測定を一定間隔で実施した方が良いと思われる。しかし、PE測定とPSVD測定は動作状態の切り換えになり排他的なので、PSVD測定を行う間はPE測定が中断する。現在、筆者の所ではこれらを自動で切り換える観測は行っていないが、1日1回程度、決まった時刻にPSVD測定を挟んだ観測スケジュールを組むのがひとつの方法だと考えている。このようにすると、降水粒子についてOD特性の補正処理を可能とする詳細な情報と、測器動作状況に関する情報を継続的に記録できる。

本研究ではLPM1個体でのみ調査したが、LPMには個体差があると報告されている（de Moraes Frasson *et al.* 2011）。工場校正時の差異についてはSpecific Reportに書かれているが、筆者の他機種を用いた観測経験ではODの経年変化には個体差がある。しかし、実際には観測点に設置済みの個体も多く、屋外でレーザー防護眼鏡不要で使用可能な校正器の開発が必要である。そのような校正器があれば、ODの定期的な校正が可能になる。

## 6. まとめ

OD1機種を対象に、全粒子ロギングによる調査を実施し、測器計測特性について降水粒子の解析に必要な

と考えられる情報をほぼ得ることができた。このために必要なOD球体試験器と試験方法を開発し、試験結果に基づくレーザービームパターンの推定方法を記述した。

調査したODについて次のことを明らかにできた。

- ・センサーの1次的な出力である“粒径”，及び“落下速度”の意味を明確にした。
- ・大粒径側，小粒径側両方について，粒径測定値の限界とその現れ方を明らかにした。
- ・ビームに一部だけかかる粒子について，測定値の現れ方を明らかにした。
- ・ビーム内の $f_d$ 分布特性を推定した。

特に $f_d$ 分布については，15点において得られている工場校正値から面的に推定する方法を提案し，それを用いた経年変化の評価も可能にした。その結果，本研究の試験に用いた個体は，4.5年経過して粒径測定値がやや小さくなっていったと推定された。

観測者が測器の詳細を知って運用，解析することは，解析やモニタリングの信頼度を上げる要因になる。LPMのPE測定のような生に近い値が得られると，雲物理学的解析に有用であるだけでなく，測器出力値の高度な補正やそれによる測器ニーズの拡大にもつながると筆者は考えている。今後，このようなデータを出力するような比較的安価な測器が多くなれば，降雪の研究からモニタリングまで，例えばCMFのような粒子解析情報をさらに活用できることが期待される。一方，データ処理については，低価格のPCでも近年性能が上がっているため，本論文のような全粒子のデータを受けるのに特殊な機器は必要としなくなってきた。

PSVD測定による値の評価は，ODから出力される二次的な値，降水強度，レーダー反射因子などの評価に反映され，これらの値が異なる機種を用いても補正無しで使用できるかの判断にもつながる。市場にある複数のODについて，相当に整合的な値が得られるとして観測に用いている例(e.g. Bendix *et al.* 2017)もある。しかし，筆者は，OD出力値の特性や誤差について現時点で得られる情報は十分ではなく，全ての機種，個体で本論文で述べたような特性が明確であるべきと考える。

観測者に必要なのは，物理量としての値である。データ処理上できるだけ下位レベルの値が得られた方が，後から誤差要因がわかっても補正できるなど精度の良い解析ができる。その値は，例えば素子のアナロ

グ電圧出力のノイズレベルやしきい値などハード的な要因で変わりうるもので，その要因はメーカーの技術(知的財産)に属して非公開のことも多い。しかし，観測者にとってハードに関する情報そのものは必要ではない。測器としては，できるだけ正確な物理量とその精度及び校正方法が明確であれば，気象観測に信頼して用いることができる。ODについてはそのような知見の蓄積を今後行っていく必要がある。

測器比較試験や校正は，理想的には同一機種を4～5台用いて測器個体差も含めて評価すべきであるが，費用，設備，人手の面から容易ではない。本論文でも測器の個体差については簡単に言及するに止まっている。既に観測サイトにある測器は取り外して試験することが困難なものもある。LPMの仕様の特性は本論文で明確にできたと考えており，今後はオンサイト校正方法の確立，他機種での試験などを行っていきたい。

現状，ODについて校正の基準的なものは確立されておらず，校正に必要な機器の情報も少ない。ODを用いた降水粒子や降水量の観測が効果的に行われ，広く普及するためには，本研究のような調査が全機種のODに対して行われ，そのために必要な情報はメーカーから観測者に提供されることが必要である。それらに基づいて，ODの経年変化を考慮したユーザー校正の標準的な間隔，方法を確立すべきである。このような校正を行うことにより本研究のような調査の定期的な実施が可能となり，測器動作状況に関する毎日の情報と照らし合わせることで測器状態変化の起日を特定できるなど，OD観測値の信頼性と可用性を大きく向上させられると考えている。

## 謝 辞

観測点の測器設置，撤収には長岡技術科学大学の大学院生などの皆様，LPM導入には宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センターの金子有紀様，センサー仕様に関してはクリマテック株式会社にお世話になりました。本研究は防災科学技術研究所「多様化する雪氷災害軽減のための危険度把握と面的予測の融合に関する研究」，宇宙航空研究開発機構EO-RA2ER2GPN104「偏波レーダー・ディストロメーター観測とGPM降水強度との降雪系特性を考慮した比較」，森林総合研究所一防災科学技術研究所共同研究「降雪粒子の粒径分布と落下速度の連続観測に関する研究」によります。



## 付録 A：小粒径水滴の終端落下速度

水滴の落下速度は Gunn and Kinzer (1949; 以下 GK) が 1013hPa, 20°C, 相対湿度 50% において測定しており, 粒径 2.0mm 以下では第 A1 表の値が得られている. これを含む広範囲の粒径に対して Beard (1976) の定式化が知られているが, これは非常に汎用的な一方, 空気の粘性や密度が用いられているので, 気圧, 気温, 相対湿度の観測値を必要とする. ここでは OD によって小粒径域で計測される落下速度異常値を除去することを目的に,  $0.1\text{mm} \leq D \leq 2.0\text{mm}$  ( $D$  は球径水滴の粒径) の小粒径水滴について, GK の測定値をそのまま近似した終端落下速度  $V_t$  の簡単な式を作成した. 第 A1 表の値を 2 次関数で近似すると

$$V_t = 0.270190 + 5.1315530 D - 0.881707 D^2 \quad (\text{A1})$$

となり, GK の測定値に対して  $0.1\text{mm} \leq D \leq 2.0\text{mm}$  において良い近似として扱える (第 A1 図). なお, GK の近似としてよく使われる Atlas *et al.* (1973) の式は  $0.6\text{mm} \leq D \leq 5.8\text{mm}$  を対象としており, 実際に作図すると  $0.6\text{mm}$  以下で GK の値からずれてくる. 本研究では  $0.6\text{mm}$  以下まで議論するので, そのための式を GK から作成したものである.

付録 B：ガウス関数近似と線形内挿による LPM 検知領域内の粒径ファクター ( $f_d$ ) 分布B.1 粒径ファクター ( $f_d$ ) 近似関数

測定値として  $x = -5.0\text{mm}$ ,  $0.0\text{mm}$ ,  $5.0\text{mm}$  の値  $f_d(-5.0)$ ,  $f_d(0.0)$ ,  $f_d(5.0)$  が得られているとする. これをもとに,  $x$  方向について連続的な近似式を得る方法を述べる.  $x(\text{mm})$  に対する粒径を  $d(x)(\text{mm})$  とし,  $d_0$  を粒径の真値とする. 上述の  $f_d$  はこれらの値を用いて

$$f_d(x) = d(x) / d_0$$

で表される. この関数  $f_d(x)$  を偶関数と奇関数に分けて考え, 奇関数は直線, 偶関数はガウス関数を用いて

$$f_d(x) = a \exp(-x^2/C) + B + px \quad (\text{B1})$$

の形の近似式を考える. (B1) 式のうち第 1, 2 項が

偶関数部分, 第 3 項の  $px$  が奇関数部分である. ガウス関数は形を使うだけで統計的意味はない. 偶関数部分に定数  $B$  を加えたのは, 無限遠で 0.0 とすると  $f_d(-5.0)$ ,  $f_d(5.0)$  が小さくなりすぎてしまい, 適切に表現できなかったからである. また,  $B$  があることにより,  $a$  を負の値として, ビーム  $x$  方向中央の  $f_d(0.0)$  より両横側の  $f_d(-5.0)$ ,  $f_d(5.0)$  が大きいパターンも表現できるようになる.

3 点の測定値に対して (B1) 式には係数と定数が 4 個ある. そのうち奇関数部分の係数  $p$  は測定値からすぐ確定できる.

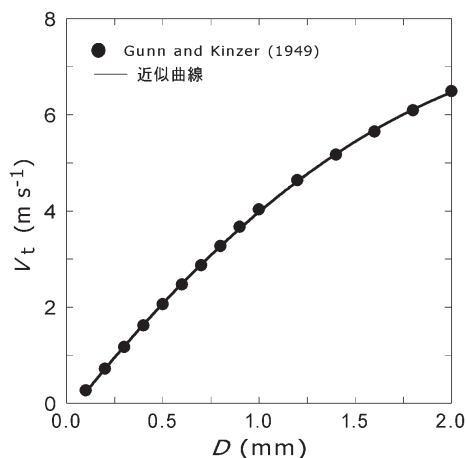
$$p = (f_d(5.0) - f_d(-5.0)) / 10.0 \quad (\text{B2})$$

偶関数部分について, (B1) 式で  $x = 0.0, 5.0$  とすると, それぞれ

$$a = f_d(0.0) - B \quad (\text{B3})$$

$$C = -25.0 / \ln((f_d(5.0) - 5.0p - B) / a) \\ \equiv -25.0 / \ln(s) \quad (\text{B4})$$

が得られる. ここで,



第 A1 図 小粒径水滴の落下速度. ●は GK の測定値, 実線は (A1) 式による近似. 横軸は球径水滴の粒径  $D$  (mm), 縦軸は終端落下速度  $V_t$  ( $\text{m s}^{-1}$ )

第 A1 表 GK による小粒径水滴の落下速度の測定値

粒径 (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
落下速度 ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.27	0.72	1.17	1.62	2.06	2.47	2.87	3.27	3.67	4.03	4.64	5.17	5.65	6.09	6.49

$$\begin{aligned}
 s &\equiv (f_d(5.0) - 5.0p - B) / a \\
 &= ((f_d(5.0) + f_d(-5.0)) / 2 - B) / (f_d(0.0) - B) \\
 &= (f_d(\pm 5.0 \text{の平均}) - B) / (f_d(0.0) - B)
 \end{aligned}
 \tag{B5}$$

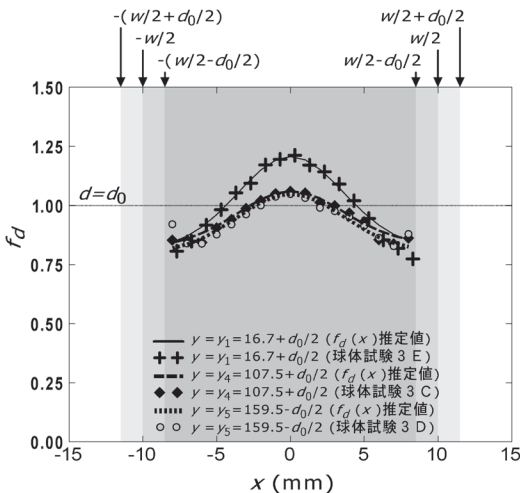
である。\$s\$の意味は、奇関数(\$px\$)と定数(\$B\$)を取り去った純粋なガウス関数の\$x = \pm 5.0\$における値と\$x = 0.0\$における値との比である。(B4)式の定義から\$C\$は測定値によらず\$s\$と1対1対応し、どちらもガウス関数の形状を決める値である。(B5)式を変形していくと

$$\begin{aligned}
 f_d(\pm 5.0 \text{の平均}) - B &= s f_d(0.0) - sB \\
 B &= (f_d(\pm 5.0 \text{の平均}) - s f_d(0.0)) / (1 - s)
 \end{aligned}
 \tag{B6}$$

となり、(B3)、(B6)式より、\$a\$、\$B\$は\$s\$と測定値の\$f\_d(-5.0)\$、\$f\_d(0.0)\$、\$f\_d(5.0)\$から求まる、上述の(B2)より\$p\$は測定値のみから求める事ができる。よって、\$s\$を定数のパラメーターとして決める事により、任意の\$y\$位置における測定値を反映した(B1)式を決める事ができる。

## B.2 最小二乗法を用いた\$f\_d\$の係数\$s\$の決定

次に、最適なパラメーター\$s\$を求めるため、試験測定値に対して最小二乗法を適用した。



第B1図 \$f\_d(x)\$ の値。\$x\$はレーザー光を横切る方向の距離(mm)で、幅\$w\$のビームの中央を0とする。\$d\$は粒径である。3箇所の球体試験の測定値(+、◆、○;第2表の3E、3C、3D)、及び、\$s=0.382\$を用いて推定した\$f\_d(x)\$ (実線、破線、点線)を示す。\$d\_0\$は試験に用いた球体の粒径(\$=3.00\text{mm}\$)である。

球体試験測定値は1mm間隔で得られているので、\$x=-8\$から\$+8\$まで0以外の絶対値の等しい8組の数値による勾配を計算し、その平均を奇関数分の最適な勾配を表す\$p\$として採用した。この\$p\$を用いた\$px\$を(B1)式から除いた偶関数部分について、最小二乗法による近似を行った。具体的には、\$C\$は\$s\$のみによって決まるので、\$a\$、\$B\$、\$s\$を独立に変化させて(B1)式の偶関数部分を計算し、得られた推定関数値に\$px\$を加えて\$f\_d(x)\$としたもののうち、球体試験測定値に対して平均二乗誤差が最小となる\$a\$、\$B\$、\$s\$の組み合わせを求めた。結果、\$a=0.300\$、\$B=0.803\$、\$s=0.382\$が得られた。

\$s=0.382\$をパラメーターとして、\$y\$方向3箇所における球体試験測定値の\$f\_d(-5.0)\$、\$f\_d(0.0)\$、\$f\_d(5.0)\$から(B1) — (B4)、(B6)式を用いて\$a\$、\$B\$、\$C\$を算出し、それらを用いた\$f\_d(x)\$をもとの測定値に重ねて描いた(第B1図)。ただし\$p\$については上で算出した8組の数値による勾配を用いた。第B1図からは、3箇所の\$y\$位置の全てにおいて、\$s\$、\$f\_d(-5.0)\$、\$f\_d(0.0)\$、\$f\_d(5.0)\$のみを用いて適切な変化をする近似曲線を得られたことがわかる。ビーム両端付近の小ピークが表現されず均されているのは、4.2節でそのような方針の下にガウス関数を採用したからである。よって、この\$s\$とSpecific Reportの校正值を用いて\$x\$方向になめらかに変化をする近似曲線を得ることが可能になった。

## 参考文献

- Adolf Thies GmbH & Co. KG, 2011: Laser Precipitation Monitor 5.4110.xx.x00 V2.5x STD: Instruction for use. 66pp.
- Andsager, K., K. V. Beard and N. F. Laird, 1999: Laboratory measurements of axis ratios for large raindrops. J. Atmos. Sci., 56, 2673-2683.
- Atlas, D., R. C. Srivastava and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. Rev. Geophys. Space Phys., 11, 1-35.
- Battaglia, A., E. Rustemeier, A. Tokay, U. Blahak and C. Simmer, 2010: PARSIVEL snow observations: A critical assessment. J. Atmos. Ocean. Technol., 27, 333-344.
- Beard, K. V., 1976: Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. J. Atmos. Sci., 33, 851-864.
- Beard, K. V. and C. Chuang, 1987: A new model for the equilibrium shape of raindrops. J. Atmos. Sci., 44, 1509-1524.
- Bendix, J., A. Fries, J. Zarate, K. Trachte, R. Rollenbeck, F. Pucha-Cofrep, R. Paladines, I. Palacios, J. Orellana, F. Onate-Valdivieso, C. Naranjo, L. Mendoza, D. Mejia, M.

- Gualpa, F. Gordillo, V. Gonzalez-Jaramillo, M. Dobbermann, R. Celleri, C. Carrillo, A. Araque and S. Achilles, 2017: RadarNet-Sur first weather radar network in tropical high mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1235-1254.
- Bloemink, H. I. and E. Lanzinger, 2005: Precipitation type from the Thies disdrometer. Instrument and Observing Methods Report No. 82, WMO, [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO\\_2005/Programme\\_index.html](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-TECO_2005/Programme_index.html) (2019.9.6閲覧).
- Brawn, D. and G. Upton, 2008: Estimation of an atmospheric gamma drop size distribution using disdrometer data. *Atmos. Res.*, **87**, 66-79.
- Bringi, V. N. and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 636pp.
- de Moraes Frasson, R. P., L. K. da Cunha and W. F. Krajewski, 2011: Assessment of the Thies optical disdrometer performance. *Atmos. Res.*, **101**, 237-255.
- Friedrich, K., E. A. Kalina, J. Aikins, M. Steiner, D. Gochis, P. A. Kucera, K. Ikeda and J. Sun, 2016: Raindrop size distribution and rain characteristics during the 2013 Great Colorado Flood. *J. Hydrometeor.*, **17**, 53-72.
- Fujiyoshi, Y., I. Yamamura, N. Nagumo, K. Nakagawa, K. Muramoto and T. Shimomai, 2008: The maximum size of raindrops-Can it be a proxy of precipitation climatology? Extended Abstracts, 15th Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Cancun, Mexico, P1.31, [http://cabernet.atmosfcu.unam.mx/ICCP-2008/abstracts/Program\\_on\\_line/Poster\\_01/Fujiyoshi\\_extended.pdf](http://cabernet.atmosfcu.unam.mx/ICCP-2008/abstracts/Program_on_line/Poster_01/Fujiyoshi_extended.pdf) (2019.9.6閲覧).
- Gatlin, P. N., M. Thurai, V. N. Bringi, W. Petersen, D. Wolff, A. Tokay, L. Carey and M. Wingo, 2015: Searching for large raindrops: A global summary of two-dimensional video disdrometer observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **54**, 1069-1089.
- Gultepe, I., T. Kuhn, M. Pavolonis, C. Calvert, J. Gurka, A. J. Heymsfield, P. S. Liu, B. Zhou, R. Ware, B. Ferrier, J. Milbrandt and B. Bernstein, 2014: Ice fog in Arctic during FRAM-Ice Fog Project: Aviation and nowcasting applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 211-226.
- Gunn, R. and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteor.*, **6**, 243-248.
- 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.
- 板戸昌子, 増田有俊, 谷口和哉, 境 和宏, 上田 博, 額 綱丈晴, 中井専人, 石坂雅昭, 本吉弘岐, 山下克也, 2017: XRAINを用いた冬期降水量推定精度向上に向けた取り組み. 日本気象学会2017年度春季大会講演予稿集, D452.
- Kalina, E. A., K. Friedrich, S. M. Ellis and D. W. Burgess, 2014: Comparison of disdrometer and X-band mobile radar observations in convective precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2414-2435.
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-Band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **32**, 2052-2074.
- Kruger, A. and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer: A description. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **19**, 602-617.
- Lanzinger, E., M. Theel and H. Windolph, 2006: Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. Instrument and Observing Methods Report No. 94, WMO, <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-94-TECO2006/PROGRAMME.HTML> (2019.9.6閲覧).
- Liao, L., R. Meneghini and A. Tokay, 2014: Uncertainties of GPM DPR Rain Estimates Caused by DSD Parameterizations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 2524-2537.
- Löffler-Mang, M. and U. Blahak, 2001: Estimation of the equivalent radar reflectivity factor from measured snow size spectra. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 843-849.
- Löffler-Mang, M. and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **17**, 130-139.
- 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, 2018: XRAINを用いた冬期降水量推定精度の向上. 土木学会論文集 B1 (水工学), **74**, 185-190.
- Matsuo, T., Y. Sasyo and Y. Sato, 1981: Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements. *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 462-476.
- 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.
- Molthan, A. L., B. A. Colle, S. E. Yuter and D. Stark, 2016: Comparisons of modeled and observed reflectivities and fall speeds for snowfall of varied riming degrees during winter storms on Long Island, New York. *Mon.*

- Wea. Rev., 144, 4327-4347.
- 中井専人, 藤田学斗, 勝島隆史, 本吉弘岐, 熊倉俊郎, 石坂雅昭, Gyuwon Lee, 2011: 降水量検証のための地上降雪粒子観測. ワークショップ「降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 (第9回)」, 18-19.
- 西村浩一, 2009: 吹雪の計測. *ながれ*, 28, 455-460.
- Schönhuber, M., G. Lammer and W. L. Randeu, 2007: One decade of imaging precipitation measurement by 2D-video-disdrometer. *Adv. Geosci.*, 10, 85-90.
- Thurai, M., G.-J. Huang, V. N. Bringi, W. L. Randeu and M. Schonhuber, 2007: Drop shapes, model comparisons, and calculations of polarimetric radar parameters in rain. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 24, 1019-1032.
- Thurai, M., M. Szakall, V. N. Bringi, K. V. Beard, S. K. Mitra and S. Borrmann, 2009. Drop shapes and axis ratio distributions: Comparison between 2D video disdrometer and wind-tunnel measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 26, 1427-1432.
- Wang, P. K., 1982: Mathematical description of the shape of conical hydrometeors. *J. Atmos. Sci.*, 39, 2615-2622.
- Wang, P. K., 2013: *Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation*. Cambridge Univ. Press, 452pp.
- Yuter, S. E., D. E. Kingsmill, L. B. Nance and M. Löffler-Mang, 2006: Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45, 1450-1464.

---

## Assessment of an Optical Disdrometer by Laboratory Tests Using Spherical Bodies and All-particle Logging

Sento NAKAI<sup>\*1</sup>, Katsuya YAMASHITA<sup>\*2</sup>,  
 Hiroki MOTOYOSHI<sup>\*2</sup>, Toshiro KUMAKURA<sup>\*3</sup>,  
 Shigeki MURAKAMI<sup>\*4\*5</sup> and Takafumi KATSUSHIMA<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> (Corresponding Author) *Snow and Ice Research Center, NIED, Suyoshi, Nagaoka, Niigata, 940-0821 Japan.*

<sup>\*2</sup> *Snow and Ice Research Center, NIED.*

<sup>\*3</sup> *Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology.*

<sup>\*4</sup> *Tohkamachi Experimental Station, FFPRI.*

<sup>\*5</sup> (Present affiliation) *Kyushu Research Center, FFPRI.*

(Received 21 May 2019; Accepted 1 October 2019)

### Abstract

The characteristics of an optical disdrometer (OD), the Thies Laser Precipitation Monitor (LPM), were examined by switching the telegram to all-particle logging. Intensive tests were carried out using spherical bodies of known diameter, and field observations were used for further analysis. The LPM emits a parallel laser light beam over a single horizontal sheet-like detection area. The size (velocity) derived by typical operation of the LPM is the horizontal width (sphere-assumed velocity). Large sizes were truncated. The number of small particles less than ~ 0.3mm in size was underestimated. The ratio of measured size to real size varied significantly, depending on the location of particles' fall within the detection area when using the tested sensor. The measured size distribution should be considered a convolution of the ratio and the natural size distribution of the particles. Over time, the particle size measured by the tested sensor decreased slightly, but the change in the overall ratio distribution pattern was not significant. Appropriate user calibration should be performed continuously for observations of precipitation.