

光学式透過型降水粒子計測器による降水量算定に関する研究

環境システム工学専攻 水文気象研究室 11334290 中島育海
指導教員 熊倉俊郎

1. はじめに

雪害対策や気象予測、更には積雪による水資源の供給量予測には正確な雪の降水量の測定が必要である。しかし、固体降水はあられや雪などの種別や、同じ種別でも個々で形状や密度が大きく異なることから、その正確な計測が困難である。現在固体降水を測定する方法として、光学式透過型降水粒子計測器を用いる方法があり、例として Thies CLIMA 社 Laser Precipitation Monitor(LPM)や OTT 社 Parsivel などが挙げられる。これは降雪が光の帯を通過し、その減衰量から粒径や落下速度を求め、降水種別、降水量を推定するものであるが、その固体降水量の精度は良いとは言えず、また粒径の小さな粒子の測定が困難であるとの問題もある。Parsivel の固体降水量の正確性に欠けるのは既存の器械が雪粒子を球体として想定し、理論値で求めているためであることがわかっている¹⁾。理論値での降水量算出には限界があるが、既存の測器では観測した信号を内部処理した結果のみが出力されるため、粒子の信号一つ一つに対し、直接のアプローチが出来ない。そのため、実際の計測した信号から降水量を推定するため、他の測器を用い、降水量の算出方法を考える。

2. 目的

既存の計測器より粒径の小さな粒子の測定も可能な光学式吹雪計測器を降水粒子計測器として流用し、より正確な固体降水量が求める方法を検討する。

3. 実験

用いる計測器は新潟電機株式会社製の吹雪計 SPC-96 の version0.3 である。計測器の原理は、光学式透過型降水粒子計測器と同じである。光の帯の面積は 10mm×102mm で厚さは 3mm である。また波長 640nm である。図-1 が吹雪計の写真である。通常は横から吹く吹雪を計測するものであるが、今回は上から降る固体降水の測定を行う。

観測は 2014 年 08 月 18 日～22 日に、新庄にある防災科学技術研究所雪氷環境実験室にて①、③、⑤の 3 段



図-1 吹雪計測器

階の降雪強度による降雪実験を行った。計測機器は、SPC-96、電子重量計などを用いた。

4. 解析方法

同じ降水種別の場合、数が同じ時、粒径が大きい方が降水量は大きくなる。即ち、

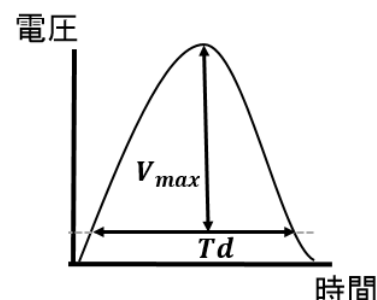


図-2 出力結果の例

図-2 の V が閾値を超

えている継続時間 Td と最大電圧 V_{max} が大きいほど、降水量は大きくなる。一方、雪とあられのような別の降水種別の場合、雪よりもあられの方が密度が高く、降水量は大きくなるが、あられの方が落下速度が速く、 Td が小さい方が降水量が大きくなるという違いがある。しかし、今回は雪のみ観測するため、 Td と V_{max} が大きくなると、降水量が大きいと考えられる。

そこで、降水量の算定には、粒子が閾値を超えた面積 S を求め、電子天秤から得られる降水量との比較を行い、その関係式を求めることとした。

電子天秤はその計測領域と重量の変化量から降水量が求まる。降水量を P_{re} 、密度を ρ とすると、

$$P_{re} = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$$

一方 S は光シートを遮った値であるため、粒子の断面積の関数となり、定数 a とすると

$$S = a \pi r^2$$

となる。これをまとめ、 S と降水量の関係式は A を定数とおくと

$$P_{re} = A S^{\frac{3}{2}}$$

となる。

また出力される V は、波形によって 3 つに分けて考える。

- (1) 光のシートに雪粒子が入り、出力された電圧が一つの山型になっている波形。
- (2) 光のシートに大きな雪粒子が入り、光シートの断面が全て粒子で覆われてしまい、電圧がある一定値から横ばいになっている波形。
- (3) 光のシートに雪粒子が入り、通過し終わる前に他の雪粒子が入り、出力された電圧に複数の山が見られる波形。

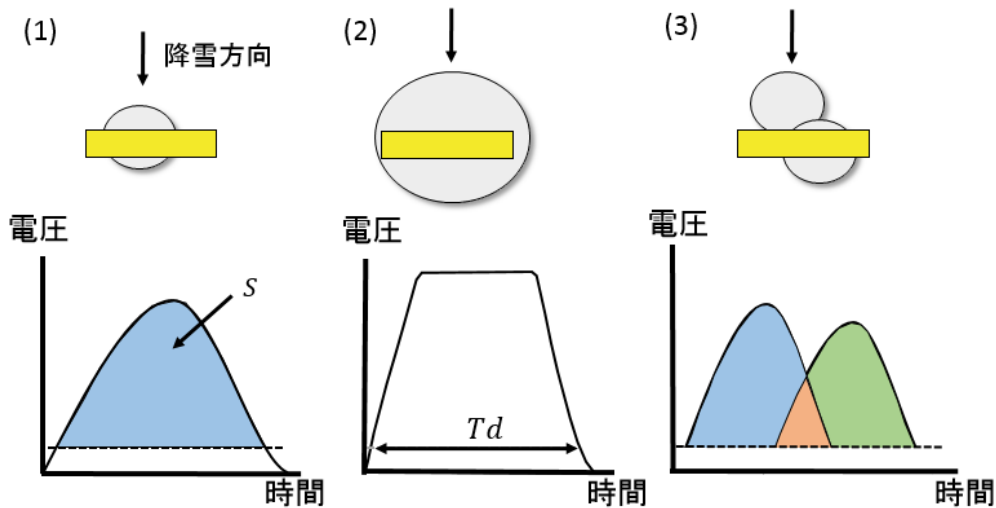


図-3 Sの求め方

このそれぞれに対し、以下のような方法でSを求める。

- (1) 一つの粒子のVが山型に出力された標準的な波形の場合、観測値と観測時間の台形の数値積分でSを合計する。(図-3(1))
- (2) 光シートが全て粒子で覆われ、Vmaxが計測できておらず、一定値から横ばいになる場合にはTdから、Sの推定を行う。(図-3(2))
- (3) Td内に複数のVの山が発生している場合は、複数の山に分離し、山が重なっているオレンジ部分は重複してSを求める。(図-3(3))

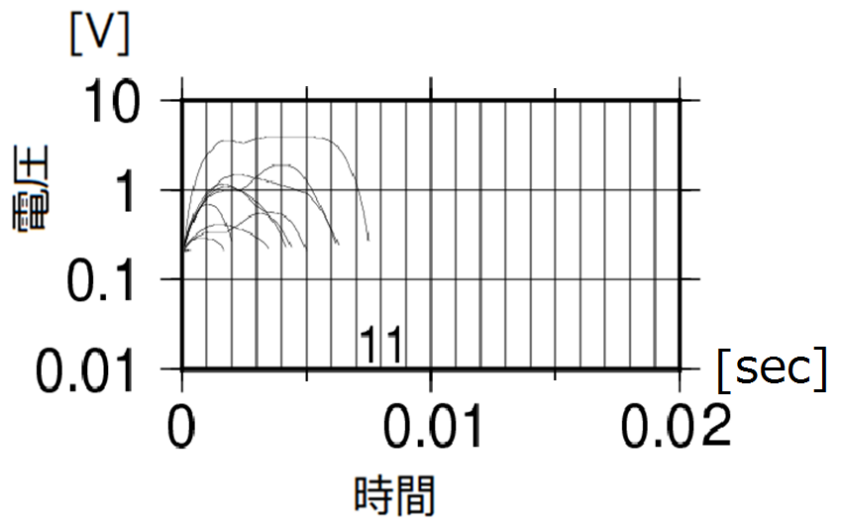


図-4 観測結果

5. 結果

観測データの1例を、図-4に示す。これは2014年8月19日15時22分00秒~30秒に観測されたデータであり、図中の11という数字は観測個数を表している。計測を開始する閾値は0.2V、降雪強度は⑤である。

Vが一定値から横ばいになる場合の正しいと思われるSを求めるため、観測データからTdとSの関係性を求める。ここでSは図-3(1)にある一つの粒子が山型に出力された標準的な波形のデータのみ用いて、算出を行った。

図-5がその関係を示したグラフである。赤い点が観測値から得られたデータである。また粒子の形状が横長な楕円体であると、Tdに対しSが大きく評価されるため、求める式をデータの下端に近似した(青い線)。この近似曲線の式を用いて、TdからSの値の算出を行った。

5分毎の粒子のSの合計を求め、同様に電子天

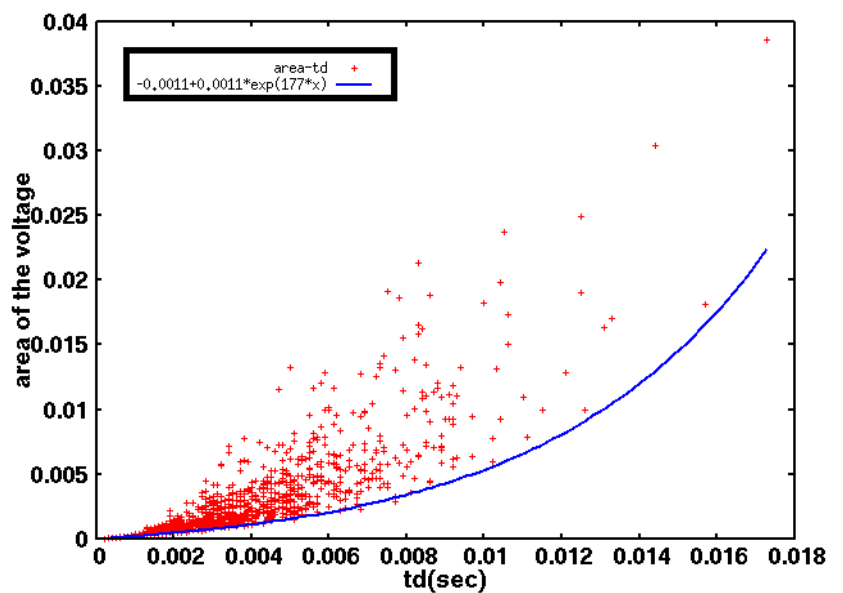


図-5 TdとSの関係

秤で計測した5分毎の重さの変化量及び電子天秤の計測面積から降水量を算出し、グラフにしたものが図-6である。各降雪強度は、紫の△が⑤、緑の×が③、青い○が①となっている。また図中の赤い線が、 $P_{re} = AS^{\frac{3}{2}}$ 及び解析結果の最小二乗法から求めた式であり、 $P_{re} = 9.80S^{\frac{3}{2}}$ の線である。

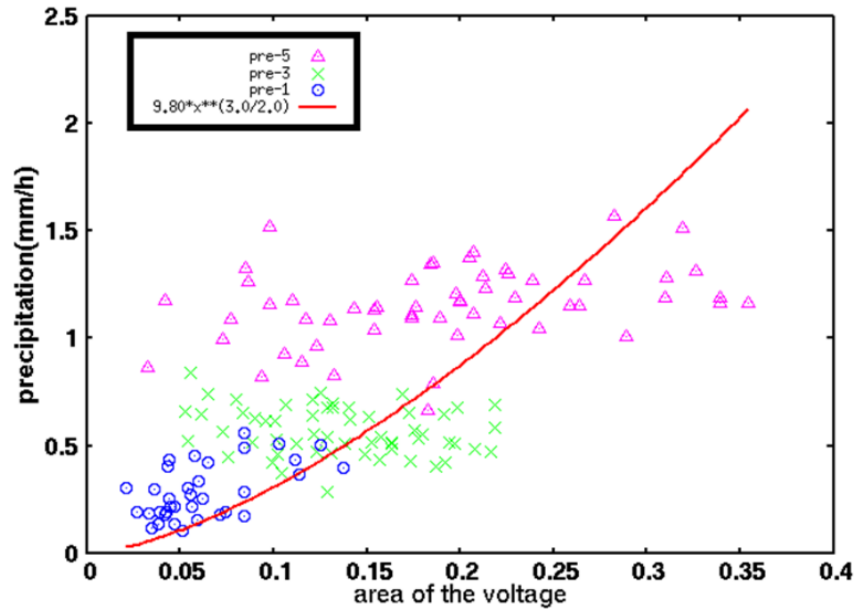


図-6 Sと降水量 P_{re} の関係

6. 光シートの端に落ちる粒子の問題

光学式透過型降水粒子計測器には、光シートの端に粒子が落ちてきた際、粒子が丸々光を遮らないため、電圧の減衰が少なく、粒径や落下速度が正確に計られない問題がある。ここでは、その問題について考える。

6.1 正確に計られない粒子の割合

粒子が光シートの端に落ち、計測領域に入るのは、粒子を直径 d mmの球体とし、その中心を基準に考えると、光シートの両端、 $\frac{d}{2}$ mm外側までであり、図-7の緑の範囲である。一方、粒子が正確に計られない範囲は、光シートの両端、 $\frac{d}{2}$ mm外側と、 $\frac{d}{2}$ mm内側である。ここで、光シートの横の長さが10mmであるので、計測領域内の正確に計られない割合 e は、

$$e = \frac{4 \cdot \frac{d}{2}}{10 + 2 \cdot \frac{d}{2}} = \frac{2d}{10 + d}$$

となる。この式において $d = 10$ mmの場合、 $e = 1$ となるため、直径が10mm以上ある粒子については、正確に計られないと言える。

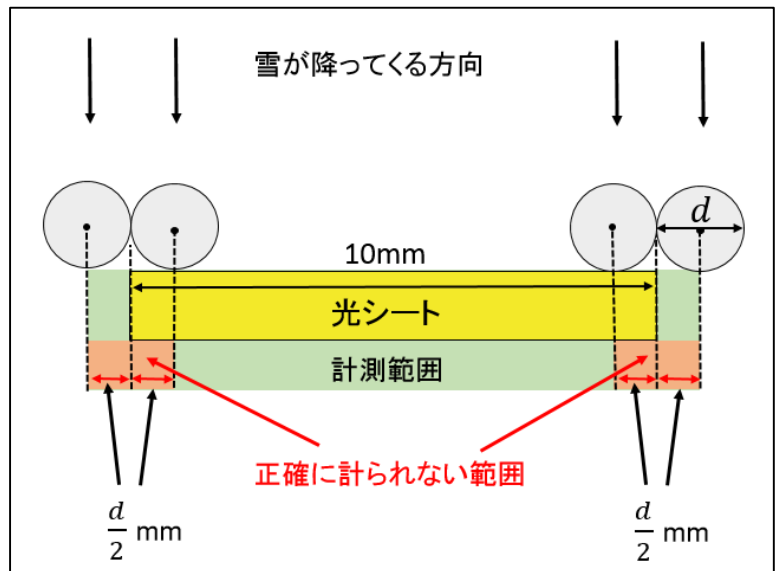


図-7 計測範囲と正確に計られない範囲

6.2 粒径分布

先ほどの点を踏まえ、実際に解析に用いたデータの粒径分布を調べた。今回は、粒子直径がそれぞれ4.05mm、2.82mm、2.40mm、1.32mmと粒径のわかっているガラス玉を計測器の光シートの中心に落とし、その際出力された最大電圧 V_{max} から、粒径と V_{max} の関係を調べることにした。

粒子直径と最大電圧をグラフにしたのが図-8である。図-8より粒子直径 d と最大電圧 V_{max} の関係は $d = 1.66V_{max}$ と求められた。

この式を用いて、降水量と S の関係のグラフに用いたデータの電圧の V_{max} を求め、どの程度の粒径の粒子がどのくらい観測されたかを調べた。尚、電圧がある一定値から横ばいになる波形に関しては、粒径が

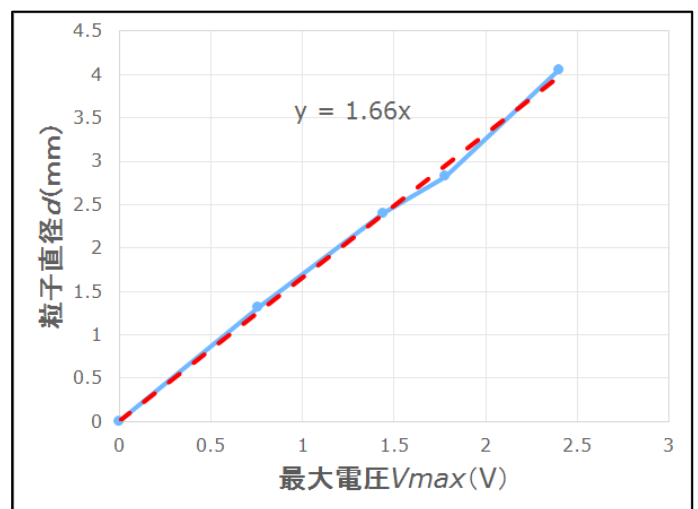


図-8 粒径と電圧の関係

測定不能とし、結果には含めないこととした。

その結果が図-9である。横軸が粒子直径、縦軸が粒子のカウント数である。今回、粒径は0mmから0.2mm刻みでカウントした。全粒子数は29972個であった。

この図を見てわかる通り、観測された粒子が最も多いのは0.5mmから1mmであった。また4mm以下の粒子で全体の96%を占め、粒径の大きい粒子はあまり見られなかったことがわかる。

更に6.1で問題となっていた10mm以上の粒子は、今回一定値から横ばいになったものであると推定されるが、これは93個カウントされた。これは全体の0.3%であり、今回粒径が大きく、全く正確に計られなかった粒子はほとんどなかったと言える。

光シートの端に粒子が落ちると、光が遮られる面積が減るため、Vmaxが同じ粒径の粒子より小さく出る。そのため、実際よりも小さい粒子が多く、大きい粒子が少ない粒径分布になっていることになる。

そこでこの粒径分布と、光シートの補正を内部で処理されたParsivelの粒径分布を比較した。尚、両者は光シートの面積が異なるため、観測個数をシートの面積でそれぞれ割り、更に観測時間(分)で割って条件が同じになるようにした。その結果が、図-10である。図を見てわかる通り、赤いParsivelに比べ、青いSPC96はグラフの傾きが大きく、粒径が小さいものも多く、大きいものが少ないことがわかる。そのため、光シートの補正が今回の結果に効果があると言えるであろう。

7. 結論

降水量 P_{re} と S の関係は $P_{re} = 9.80S^{\frac{3}{2}}$ と求まった。

降水量が少ない時には、降水量が増えれば S も増える傾向にあるが、降水量が多くなってくると、 S が増えても、降水量が変わらない傾向にある。また降水量に対し、 S が小さく出ているデータが多いことがわかる。更にRMSEは0.41mm/hであったため、この測定器により降水量の推定は、正確とは言えないが、およその近い値を求めることができると考えられる。

今回計測された粒子は、粒子直径4mm以下の粒子が多く、一切正確に観測されないと思われる粒子直径10mm以上の粒子は、あまりなかったと思われる。

しかし、光シートによって正確な測定がされないのは、10mm以下の粒子でも起こることである。これは、実際に粒子に対し、光シートが遮られる面積が少なく出るため、降水量と S の関係において、 S が小さく出ているデータが多いことに影響があると言える。これは

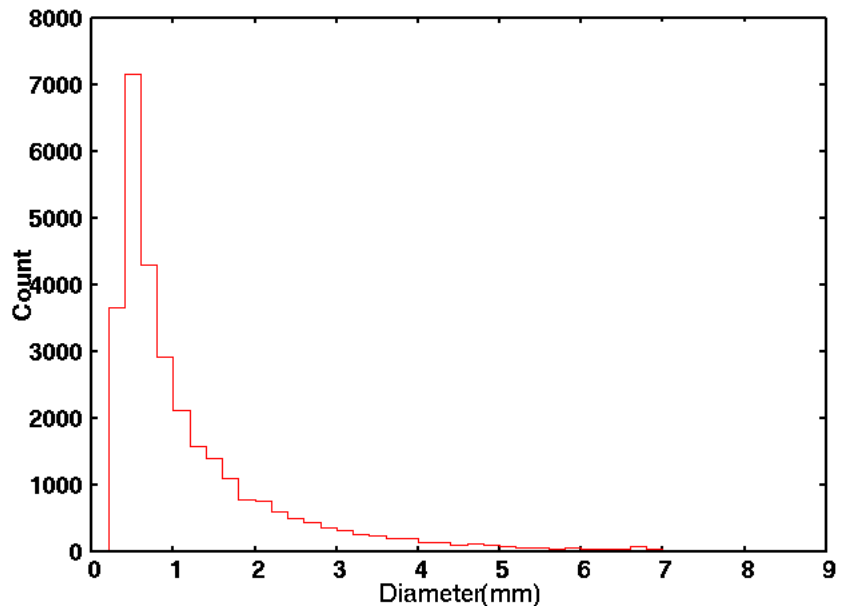


図-9 Vmaxから求めたSPC96の粒径分布

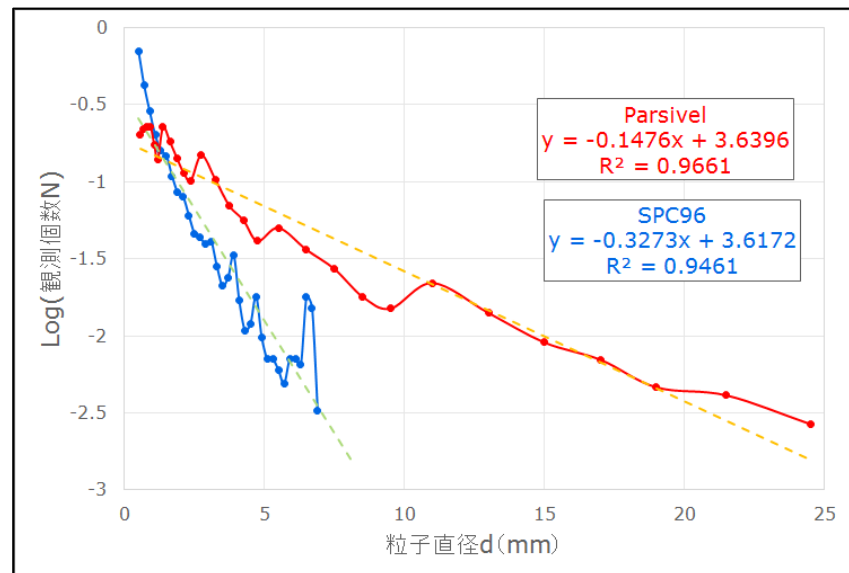


図-10 SPC96とParsivelの粒径分布の比較

Parsivelの粒径分布と比較した結果からも、光シートの補正の効果があることがわかる。

今回は粒子直径10mm以上の粒子のみを考えたが、今後、他の粒径に対しての、光シートの誤差の程度について、調査する必要がある。

参考文献

- 1) Ali Tokey and Ulrich Blahak and Clemens Simmer (2010) : PARSIVEL Snow observations:A Critical Assessment, American Meteorological Society, February 2010, 333