

# 光学式反射型固体降水観測器と積雪モデルを用いた積雪深推定に関する研究

地球環境工学研究室 西内勇貴  
指導教員 熊倉俊郎

## 1 はじめに

積雪深は、積雪寒冷地域における道路除雪作業車の出動基準でもあり、地域の積雪状況を把握するためには複数地点における観測が必要である。しかし、精度の良い積雪深計であるレーザ式積雪深計では人の往来が多い地点でのレーザ光の安全確保やコスト面での課題がある。そのため、レーザ式と比較して出力の弱い発光素子を用いて測定でき、設置が容易である光学式反射型固体降水観測器（以下「反射型」と称する）により積雪深を求めることができればこれらの課題に対応することができると考えられる。したがって、反射型の測定値から積雪深の推移を推定することを目的とする。

## 2 光学式反射型固体降水観測器について

### 2.1 仕様

図 1 に反射型の実物を示した。この観測器は、発光素子より光を照射し、降雪粒子の反射光を光検出器により検知することで信号を出力する。近赤外発光素子と受光素子を使用しているため、雨滴に対する感度が低い。また、それぞれの素子を水平に 4 つ並べて配置することによって疑似的に水平状の観測範囲としている。外部出力は、信号強度を AD 変換し、16 bit 整数（有効 12 bit）で 0.2 ms ごとに出力している。



図 1 光学式反射型固体降水観測器(PDS)

### 2.2 基礎測定手法

近赤外光の反射強度である出力信号が閾値を連続で超過した経過時間から粒子の疑似落下速度を、出力の大きさから疑似直径を算出した。

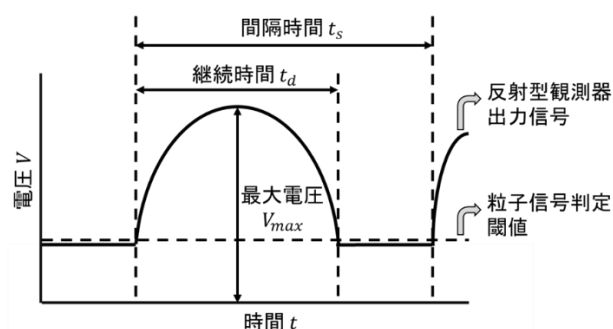


図 2 粒子測定イメージ

## 3 観測と手法

### 3.1 観測事例

長岡市内にあるスノーテック新潟露場におけるデータの 2019 年 1 月 21 日から 2 月 6 日を事例 1 ( $E_{T+}$ )、2 月 7 日から 2 月 19 日を事例 2 ( $E_{T-}$ ) とした。検証として十日町市の森林総合研究所露場の 2019 年 1 月 16 日から 3 月 28 日のデータを使用した。

### 3.2 降雪深推定

1 時間毎の積雪の深さを降雪深と称する。熊倉 (2018) による反射型による推定降水量の式に一定の密度  $\rho$  を仮定する。  $P$  を降水量、  $N$  を観測粒子数、  $\hat{D}$  を疑似平均粒径、  $\hat{W}$  を疑似平均落下速度、  $k_r$  を係数とすると推定降雪深  $H$  は

$$H = P\rho = k_r N \hat{D} \hat{W} \quad (1)$$

と表される。係数は反射型データと回転板式降雪深計データで回帰して求める。

### 3.3 圧密沈降過程

1 時間の積雪を 1 つの層の積雪として時間毎に圧密沈降を計算する熊倉 (2004) によるモデルを使用した。  $h_i$  を層厚、  $t$  を時間、  $\sigma$  を加重、

$\eta$ を圧縮粘性係数,  $h_{i0}$ を直前ステップの層厚,  $i$ を層の番号としたとき,

$$h_i = h_{i0} e^{-\frac{\sigma_i t}{\eta_i}} \quad (2)$$

となる.

このとき, 圧縮粘性係数は Shinojima(1967)により示された式を使用した. 圧縮粘性係数  $\eta$ [Pa]は, 雪の密度 $\rho$ [kg $\cdot$ m $^{-3}$ ], 雪温 $T$ [K]とし,  $\eta_0$ は $3.44 \times 10^6$ [Pa]の定数としたとき,

$$\eta = \eta_0 e^{0.0253\rho - 0.0958T} \quad (3)$$

と表される. なお雪温は $0^\circ\text{C}$ と仮定した.

新雪密度は大泉ら(2000)が示した式を使用した. 新雪密度 $\rho_{fall}$ [kg $\cdot$ m $^{-3}$ ]は, 風速 $w_s$ [m $\cdot$ s $^{-1}$ ], 気温 $T$ [ $^\circ\text{C}$ ]とすると,

$$\rho_{fall} = 3.6w_s - 0.2T + 62 \quad (4)$$

と表される.

### 3.4 融雪過程

融雪量を気温で決定するディグリーデイ法の拡張版であるディグリーアワー法を熊倉(2004)の手法に則り用いた. 積雪の開始時から積雪が消滅するまでの期間を積雪期間とし, その期間の $0^\circ\text{C}$ 以上の気温に比例して融雪量を決定する手法である. この比例係数はディグリーアワーファクター(以下DHFと称する)といい, DHF[kg $\cdot$ m $^{-2}$  $\cdot$ h $^{-1}$  $\cdot$  $^\circ\text{C}^{-1}$ ]は, 積雪期間 $N$ 時間までの $i$ 時間目( $i = 1, 2, \dots, N$ )の平均気温を $T_i$ [ $^\circ\text{C}$ ], 降雪水量を $P_i$ [kg $\cdot$ m $^{-2}$  $\cdot$ h $^{-1}$ ],  $0^\circ\text{C}$ 未満の気温を $0$ に置換する関数を $f_{0+}$ とすると,

$$DHF = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N f_{0+}(T_i)} \quad (5)$$

と表され,  $i$ 時間目における1時間融雪量 $M_i$ [kg $\cdot$ m $^{-2}$  $\cdot$ h $^{-1}$ ]は,

$$M_i = DHF \cdot f_{0+}(T_i) \quad (6)$$

となる. ただし, 融雪は積雪表面から生じるものと仮定した.

### 3.5 積雪深推定

推定した降雪深を1時間あたりの降水として圧密, 融雪モデルに入力し, その結果をその時間における推定積雪深とし, 既存の積雪深計であるレーザ式積雪深計, 超音波式積雪深計と比較する.

## 4 結果

### 4.1 降雪深推定

事例1と2における反射型と回転式降雪深計データのプロットを図1に示し, 回帰直線を求めた. この結果から定数 $k_r$ を $6.03 \times 10^{-4}$ とした. この定数を用いて降雪深を推定し, 事例1の1時間あたりの結果を図2に, 積算値の比較を図3に示し, 事例2の結果を同様に図4と図5に示した. 1時間降雪深のRMSEは事例1では $7.83 \times 10^{-3}$  m, 事例2では $7.16 \times 10^{-3}$  mとなった.

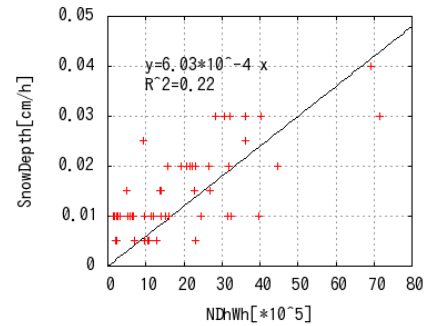


図2 反射型データと回転式降雪深計

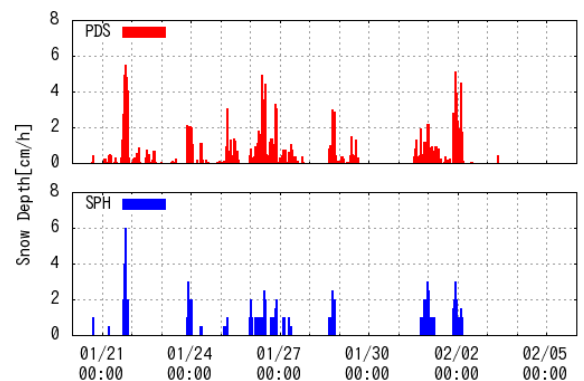


図3  $E_{T+}$  1時間降雪深比較

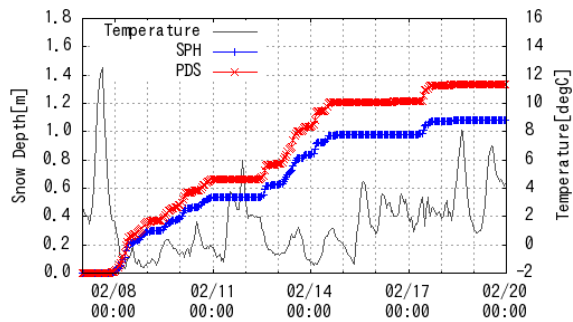


図 4 E<sub>T+</sub> 降雪深積算値比較

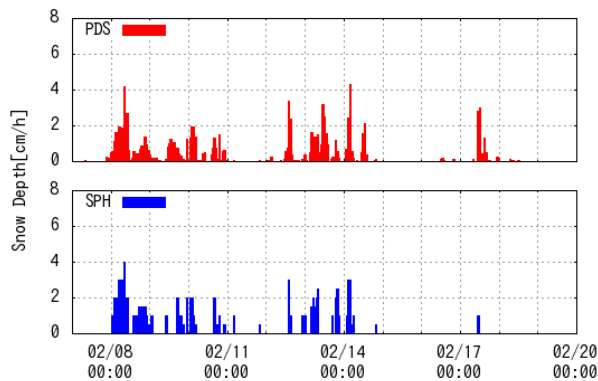


図 5 E<sub>T-</sub> 1時間降雪深比較

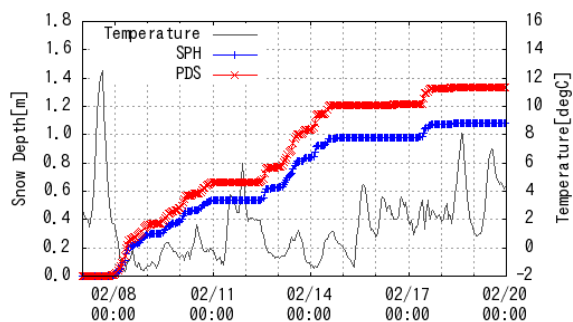


図 6 E<sub>T-</sub> 降雪深積算値比較

## 4.2 積雪深推定

圧密沈降，融雪の影響を与える積雪モデルを推定積雪深に適用した．その際，事例 1 と事例 2 から式(4)により求めた新雪密度の平均の  $62.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  を全体の新雪密度と仮定した．DHF は事例 1 で 0.118，事例 2 で 0.187 とした．レーザ式積雪深計と合わせ，事例 1 の結果を図 3 に事例 2 の結果を図 4 に示した．RMSE は事例 1 で 0.051 m，事例 2 で 0.071 m となった．この定数と新雪密度を用いて十日町市のデータで検証した．DHF は 0.075 で超

音波式積雪深計との比較を図 5 に示した．RMSE は 0.280 m となった．

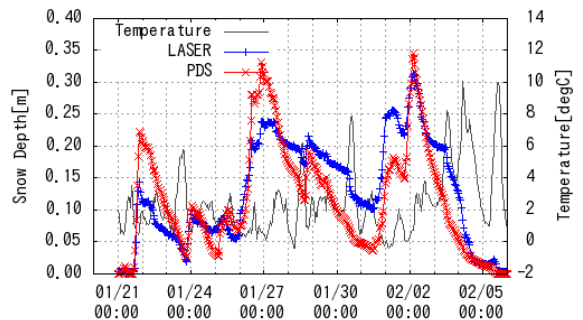


図 7 E<sub>T+</sub> 積雪深推定結果

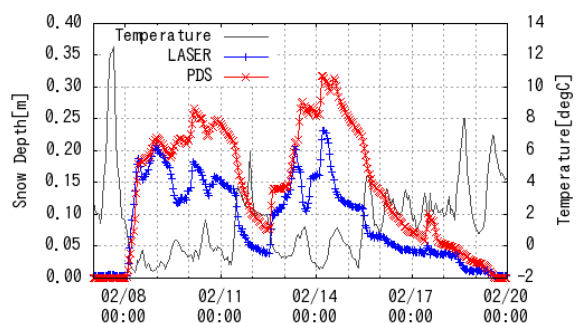


図 8 E<sub>T-</sub> 積雪深推定結果

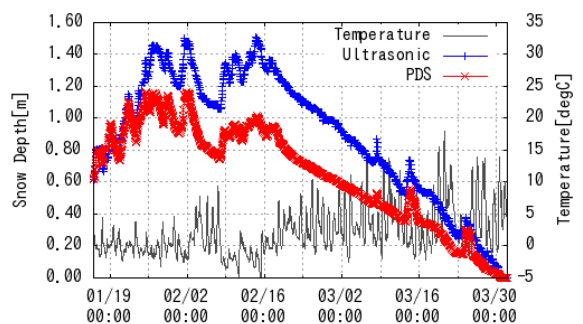


図 9 十日町市積雪深推定検証結果

## 5 検証

積雪モデルの 1 時間ステップ毎に各層の密度と層厚から推定積雪深の積雪水量を求め，積雪重量計 (MN) と比較を行った．事例 1 の結果を図 10 に，事例 2 の結果を図 11 に示した．

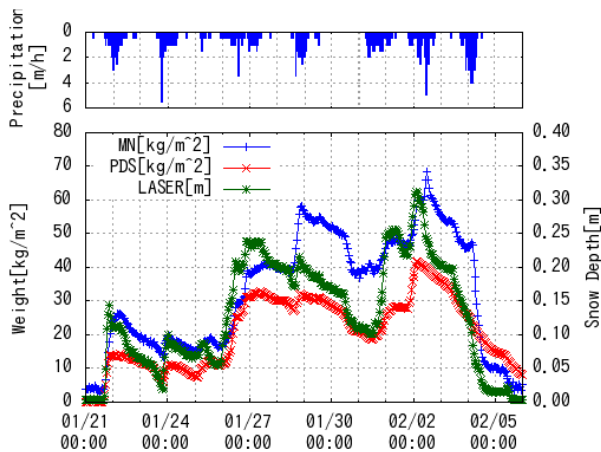


図 10  $E_{T+}$  積雪水量比較

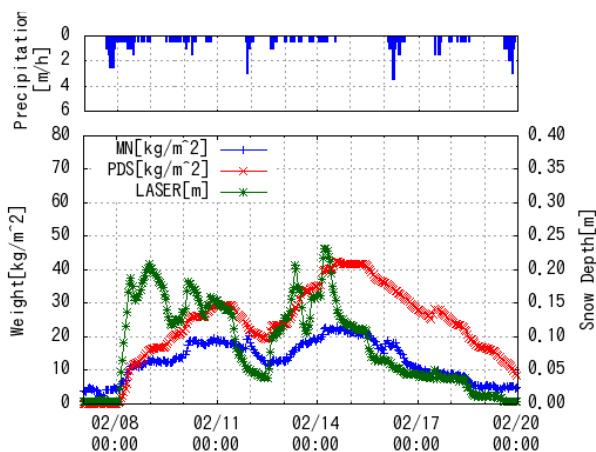


図 11  $E_{T-}$  積雪水量比較

## 6 考察

積雪ピークの時間にはよく対応しているものの、積雪深は実際より大きい結果となった。そこで、モデルによる積雪深を積雪重量に換算し、積雪重量計と比較すると、高気温時には推定積雪重量が軽く、低気温時には重いことがわかった。そのため、密度の設定が適当でなかったと考えられる。

十日町市の結果は降雪ピーク時間の対応が長岡市内の結果より良く対応していた。しかし、降雪量自体を少なく推定していることから降雪深推定の定数に問題があったと考えられる。

実積雪深が低下しているにもかかわらず反射型は降水ありとして推定積雪深が増加していることや、低気温時の急な積雪深の低下に本

モデルでは対応できていないという傾向が見られた。そのため、融雪過程において底面融雪や降雨流出など要因別に考慮することや、降雪深推定の際に気温による補正をおこなうことで精度の上昇が見込まれると考えられる。

## 7 まとめ

反射型のデータから積雪深をすることを試みた。時間経過による積雪深の推移を再現することができたが、少雪年の事例で積雪のピーク 20 cm から 25 cm に対して +5 cm から +7 cm 程度の誤差があった。降雪の強弱には対応できるため、ある程度の頻度で除雪が行われる道路の積雪状況の把握目的なら実用可能であるといえる。

## 8 参考文献

- 1) 熊倉俊郎, 山崎正喜, 西内勇貴, 上林颯, 本吉弘岐, 中井専人, 山下克也, 山口悟, 富樫数馬, 石丸民之永, 齋藤隆幸, 丸山敏介: 光
- 2) 学反射を利用した固体降水測定機器の開発と出力の物理量化について, 雪氷研究大会 (2018・札幌), 雪氷研究大会講演要旨集, P. 78, 2018.
- 3) 熊倉俊郎, 山野井克己, 早川典生: 積雪の多層圧密モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析, 雪氷, Vol. 66, No. 1, pp. 35-50, 2004.
- 4) Shinojima, K.: Study on the visco-elastic deformation of deposited snow., In Physics of Snow and Ice, Inst. Low. Temp. Sci., Hokkaido Univ., pp. 875-907, 1967
- 5) 大泉三津夫, 保坂征宏: 第4章陸面過程, 全球モデル開発の現状と展望, 数値予報課報告・別冊第46号, 気象予報部, P. 87, 2000