

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350485

研究課題名(和文) 災害対策に必要な捕捉損失のない固体降水量計測機器の実用化に関する研究

研究課題名(英文) Practical study on lossless measurement of solid precipitation for heavy snow disaster

研究代表者

熊倉 俊郎 (KUMAKURA, Toshiro)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00272865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：原理的に捕捉損失がない光学式固体降水測定機器を作製した。災害を起こす降雪は比較的狭い領域で起きることも少なくないため、この機器は多数の観測点地点に設置するためにメンテナンス性が良いことも考慮した。研究で一般的に用いられている光学式の機器は、受光と発光が向かい合った透過型が多いがここでは同方に向いた反射型としメンテナンス性を高め、その代わりに測定の不定要素を統計とバックエンド処理で解決した。短期間の観測結果ではあるが、雪片とあられの判別は十分可能であった。また、降水量推定についても、相関係数0.5～0.7とそれほど高くないが可能であり、さらに積分時間が長いほど適合性も良くなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Optical reflectivity-based precipitation gauges were made, which had benefits of less maintenance and convenience. These benefits would lead to be able to place at a lot of ground stations to observe heavy snowfall which frequently occurred in small areas. Our newly developed gauges were based on the reflectivity of near infrared source of light to solve problems of measuring situation using statistics and back-end procedures though other optical gauges for sale were based on measuring the transmitted light to result in more frequent maintenance and large size. We carried out the field observation in Nagaoka and could discriminate between the snowflakes and graupels. Simultaneously we could estimate the precipitation rate in the condition having a correlation coefficient of about 0.6.

研究分野：雪氷学、気象学、気候学

キーワード：snowfall observation snowfall amount hydrometeor measurement discrimination

1. 研究開始当初の背景

降水量計測には測定方法に起因する捕捉損失などの問題点が従来から知られている。主なものは、空力学的な捕捉損失、濡れ損失、蒸発損失、跳ね返り損失などであり長期にわたって問題点として議論されている。これらを守るための試行も重ねられており、新しい原理に基づく2次元ディストロメーターなども作製されている。一方で、正確な測定がさらに難しいとされる固体降水については、雪片やあられなど形状や密度の明らかに異なる種別に分かれており、その種別判別も課題の最重要項目の一つに位置付けられるようになってきた。種別判別についても光学的な測定機器が近年いくつか作製されている。

2. 研究の目的

新しいタイプの降水量計が日々作られていく中で、捕捉損失が少なく、降水量の平均値が測定可能な機器で、安価かつメンテナンスがほとんどいらぬ機器が作製されていない。このような機器の重要性は次の様である。まず、捕捉損失が少ないことは測定の観点で大きな利点である。また、豪雨や豪雪の水平スケールが数 km しかない例は数多く、かつ、災害を起こすような現象は頻度が少ないため、長期にわたって計測することを考慮すれば、1km 以下のスケールで高密度に多数の降水量計を展開する必要がある。よって、多くの測器をメンテナンスなしで運用できることが重要である。なお、水平に高密度な計測が可能なりモートセンシング分野では現状では検証の段階であり、このような降水量計ネットワークの存在価値は高いと考えられる。このような理由で、本研究では構造が簡単であり、メンテナンス性に優れた降水測定機器の設計と作製、及び検証を行うことを目的とする。なお、この機器では、降水種別と降水量を同時に計測できるものとする。

3. 研究の方法

さて、定常的に用いられている円筒形の剛体を基本とした降水量計では捕捉損失をなくすることは原理的にできないことから、ここでは光学式の機器を想定した。現在使われている多くの光学式の降水測定機器は発した光の透過や前方散乱を用いたものがほとんどである。この原理は個々の降水粒子との対応が比較的簡単で考えやすく、かつ、バックエンドの処理もしやすいために採用されたものと考えられる。しかし、これらの機器は光軸合わせの問題や、機器が大型化しやすく着雪の問題などに直面し、メンテナンス性が良くない。よってここでは原理的に難しいが小型化しやすくメンテナンス性に優れた反射型の機器を設計することにした。反射型とは、発光部と受光部が同じ向きに付いている機器を指す。この方式は、同じ大きさの粒子でも機器との距離の違いで同じように評価されないという大きな欠点がある

実際には以前に同タイプの測定機器を作製した経緯があり、その時の問題点をフィックスし、降水測定機器として独立して運用可能にする。その時の問題点は3つあり、1つ目は、反射強度とその継続時間を正しく測るために簡単な回路で試行してみたが、明るい環境での測定に難があり、夜間の測定しか使うことができなかったことである。2つ目は雪片とあられの分離を目的として作製しており、積雪に寄与するような降水量の多い時には80%程度で判別可能ではあったが、降水量は別途測定していた。3つ目は機器ごとに発光受光の調整を行っており、ノイズレベルがバラバラで一定ではなかった。これらの問題を解決しつつ、反射型で降水量の推定を行うアルゴリズムの開発を行う。なお、以下には最終年度に完成した機器について示す。

(1) 反射型機器

降水量と降雪種別を同時計測するにあたり、受光強度や受光時間を正しく測れる必要がある。具体的な方法は後に述べる。検波やデジタル変調を用いると外乱光には強くなるものの、どうしても受光時間の計測に問題が残るため、近赤



図1 反射型機器

外線のパルス状発光に対し、受光したアナログ電圧信号をダイレクトにAD変換する方法を取り、その問題を解決した。そして、同時に明るい環境での使用も可能とした。ただし、AD変換の対象となるアナログ信号に乗るノイズがなかなか解消されず、RCのノイズフィルタをつけ、その上で理想的な正弦波を仮定した振幅補正によりバックエンドで補正を行った。作成した機器を図1に示す。2つのうち下のものであり、参考として、上のは消雪のための融雪水を操作するセンサー(降雪センサー)である。また、発光・受光領域は風対策として半無限に水平のシート状であるのが理想なので、今回は水平にいくつか並べて作製した。試作機なので、出力にはAD変換の生データ(5 kHz)を取り出せるようにし、かつ、将来に向けて、内部演算できる組み込みコンピュータとその出力インターフェースを備えた。

(2) 透過型機器

目標とする反射型機器の解析プログラムを考えるうえで、粒子ごとの情報取



図2 透過型機器

得が明瞭な透過光を測定する機器を参考として用いた。基は微小粒子計測機器として開発されていたものであるが、既販の透過型機器と原理が同じであるため、流用した。これを用いる利点は、既販の同タイプの機器は測定したままのデータを出力する手立てがなく、処理プログラムもブラックボックスであるが、この機器はその出力が可能なことである。ここでは、粒子の検知範囲（観測空間領域）が上から見て1cm幅×10cm長さのものを利用した。

(3) 測定

[人工降雪装置]

夏場は降雪がないため、研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センターが運用している人工降雪装置を用いて、機器が十分に機能するかどうかの実験を行った。その実験の様子を図3に示した。研究期間中、毎年8月に実施し、目的通りに動作するかどうかの検査を行った。



図3 人工降雪実験

[雪氷防災研究センター]

当初、WMOが主催する固体降水相互比較実験の標準機器と比較検討する予定だったが、他の計測機器との比較などが条件的に困難なため、降雪粒子観測施設(FSO)内に他の機器と同じ条件で設置して観測を行った。機器の設置状況を図4に示した。右から、本研究の機器、パーシベル(透過型既販測器)、Geonor降水量計で、本研究の機器は反射型3台、写真では見づらいが、直下に透過型1台が設置してある。観測期間は冬季のみで、おおよそ12月から3月まで、毎年、観測を行った。研究実施期間中、反射型の最終成果物は最終年度に設置し、測定することができた。それ以前の観測は問題点の洗い出しに利用された。

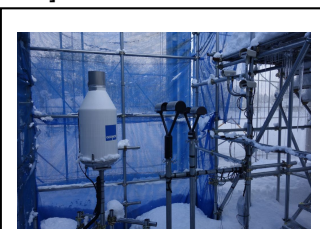


図4 FSO内観測

[他の観測地]

目標としては、他に、十日町市、上越市、北海道を観測地として挙げていたが、機器の完成に予想外の時間を使ってしまったため、最終年に十日町市、長岡技術科学大学構内での計測を行ったのみである。

(4) 確率的な方法

反射型は個々の粒子の属性を知ることは

できないが、水平にランダムに粒子が落ちてくると仮定すれば時間方向で積分した統計量を求めて粒子の性質を論ずることができる。そこでまず、粒子の大きさを反映する統計量 \hat{D} と落下速度を反映する量 \hat{W} を考えた。 \hat{D} については、一定距離にある粒子に対する受光強度(反射強度)は受光素子から見た見かけの大きさ(立体角に相当)に比例すると考えれば、受光強度の最大電圧 V_{\max} は粒子半径の2乗に比例すると考えられるため、 $\hat{D} = \sqrt{V_{\max}}$ と考えてよい。 \hat{W} については、粒子の観測空間の高さ方向の厚みが一定と仮定すれば、受光継続時間を T_d とすると、 $\hat{W} = T_d^{-1}$ と考えてよい。実際には粒子の形は様々だし、必ずしも観測空間領域が水平に平たくななど問題は多いが、第一近似的に考えることとする。なお、前述のように、実際に機能する量はそれぞれの時間平均値である。すると、ある一定時間内に十分な数の粒子が観測されれば、 \hat{D} 、 \hat{W} の平均値がおおよその粒子サイズと落下速度の代表値と考えられる。この考え方は、既販の透過型降水測定機器において、個々の落下粒子の粒子直径と落下速度の分布図から粒子種別を判別することと情報量的に対等な考え方であり、妥当なものと言える。ただし、次の2点に注意すべきである。一つは、粒子の大きさによって観測できる空間のサイズが変化することである。大きな粒子は遠くの粒子でも観測でき、小さな粒子は近くでないと感じ度の上で観測できなくなる。もう一つは複数の粒子を同時に測定してしまう場合である。

前者については、観測空間領域の不規則性のため、まだ完全な形では解決できていないが、より分かりやすい例として透過型の観測領域を掠っていく(全体が観測空間領域内に入らない)粒子の確率を計算することにより実際の補正手法として現実的かどうかを検討した。

後者についてはそもそも観測結果からはわからないことなので、観測場と機器のシミュレーションを実施し、解決することにした。

(5) 透過型の粒子直径頻度分布の補正

透過型は、水平に平たい発光部から出た光を真向かいで受光し、その光強度の減衰により粒子の属性を調べる装置のことである。使われる光のシートが水平に無限であれば理想的な測定となることから、上から見た観測領域(光シートの照射範囲)はできるだけ広い方が良い。しかし限度があるため、幅(発光部の長さ)も限られる。すると、粒子がその幅より大きければ当然正しく測定されないことから粒子が観測領域を掠っていく確率を考慮して粒子直径ごとの頻度分布を補正する必要があることがわかる。既販の機器で個々の粒子の生データが得られないことから、本課題ではそれに相当する機器を用意して計測したことは前述した通りである。用意した透過型機器は既販の機器よりも幅が

半分以下の長さであり、粒子の掠りの程度も大きい機器と言える。

実際には粒子を球と仮定し、光シートの軸中心（幅の真中）からの距離ごとに、計測されるべき光強度を求め、それを細かくクラス分けした実際の粒子直径（実直径）ごとに求めて、光強度（これは実際の計測時には実効直径に相当する）ごとに観測される確率を集計することにしよう。各実直径のクラスごとに「ある実効直径」であると計測される見かけ上の確率がわかるため、横に実際の直径のクラス、縦に実効直径のクラスとし、それぞれの配列要素に当てはまる確率を並べた配列 C 作ると、実直径のベクトルを D_R 、実効直径のベクトルを D_E とすれば $D_E = CD_R$ であり、 D_E が実際に計測される量であるから、 C の逆行列を用いれば、 $D_R = C^{-1}D_E$ により補正することが可能である。

(6) 複数粒子の同時計測

複数粒子が測定される様子は出力が2山になるなど推定可能なものもあるが、一般的に測定の出力結果から明らかにすることはできない。よって、実機を模擬する数値シミュレーションモデルを開発し、その様子を推定する方法を取った。モデルは、降雪モデルと測定モデルに分けて開発した。降雪モデルは、粒子を球形と仮定し、任意の粒径分布に従って時間軸に沿って空間にランダムに粒子を落下させるモデルである。粒子直径ごとの落下速度は既報の研究から経験的に求められた式を利用した。設定した粒径分布を再現するためには、落下速度に比例する厚さの発生区で粒子を発生させることで対応した。測定モデルは降雪モデルで粒子が降っている模擬空間に設置した機器をシミュレートするものである。発光素子から縦横等角度で広がる各光線をレイトレーシングし、ランペルト反射を仮定して受光素子で検知したとし、光強度を算出した。

(7) 粒子種別判別法

確率的な方法のセクションで述べた、粒子直径に比例する量と落下速度に比例する量のそれぞれの第一近似値と考えられる量を利用する。既販の透過型粒子判別機器で用いられる、個々の粒子の大きさと落下速度の分布図を想定すると、それぞれの軸の算術平均を取ることに相当する。ただし、本来の粒子種別判別には、個々の粒子の質量落下フラックスでの重み付けが必要であると報告されているため、現状わかる範囲で完全に近い方法というわけではないことに注意すべきである。

(8) 降水量の導出

降水量を求めるにあたっては、単位時間内に測定される粒子の個数と粒子直径の頻度分布に加えて、粒子の密度がわからないと算定できない。加えて、反射型では直径の絶対値

を求めるのは困難である。一方で、粒子種別ごとの密度は経験的に測定されており、揺れは大きいものの粒子直径と一定の関係性を持つことはわかっている。よって、前述の粒子種別判別と合わせ、直径も推定できれば、アルゴリズム的には算定可能となる。ただし、詳細な測定に基づいてこの手法で降水量を推定しても粒子の形状の違いなどの未定要因により、絶対値として雨の様には正しく求まらないことがわかっている。ここでは種別の違いを前述の方法で求め、それぞれの密度を未知数とし、直径に相当する量を説明変数として経験的に算定式を求めることにした。

4. 研究成果

(1) 透過型の粒子直径頻度分布の補正

2016年度に雪氷防災研究センターで観測されたデータに基づき、補正を試行した結果を図5に示す。上は粒子直径ごとの頻度分布で、下が補正結果である。補正の効果を考慮すれば、頻度分布は上に凸で、補正後が片logグラフで直線になるべきであるが、観測サンプル数が十分ではなく生データを補正することは困難だったため、補正前を直線で近似し、それを補正してみた。正確な結果を得るには、前述したように補正後に直線となるようにすべきである。

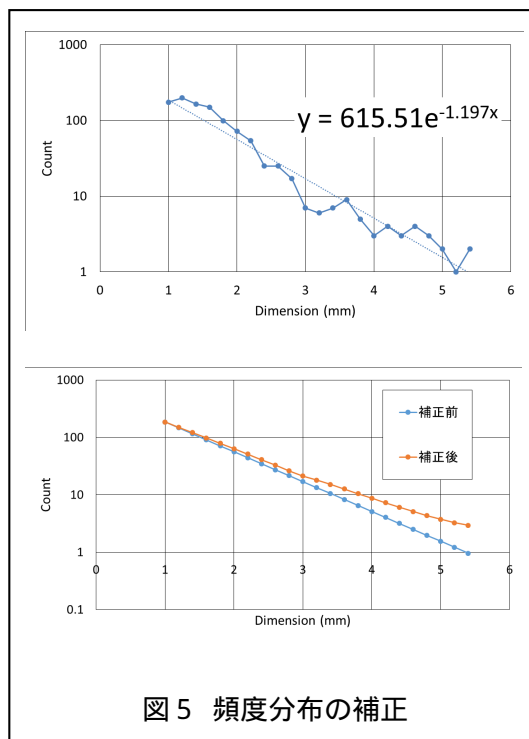


図5 頻度分布の補正

(2) 反射型の種別判別

反射型の前に、透過型で同じような手法を使って試行してみた。ただし、透過型は個々の粒子の大きさを推定することができるため、様々なサイズの鋼球を用いて校正した直径値を用いた。既販の透過型機器とほぼ同じ性能ではあるが、細かなチューニングは行っていない状態の結果である。既販の機器の結果を図6に、本研究の機器の結果を図7に示

した。いずれも横軸に粒子の大きさ、縦軸に落下速度、色が頻度である。双方とも左の図は明らかに雪片が降っている場合、右は明らかにあられが降っている場合である。これら左右の図の着色部が分離していると雪片とあられの判別が可能と言える。ここでは、別のデータがないので解析に使ったデータで出した結果ではあるが、雪片とあられについてスレットスコアを計算してみると、見かけ上の的中率が 82%、係数が 0.66 と実質的に判別可能であることがわかった。

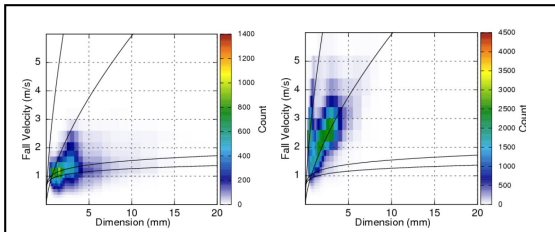


図 6 既販の透過型測定機器の結果

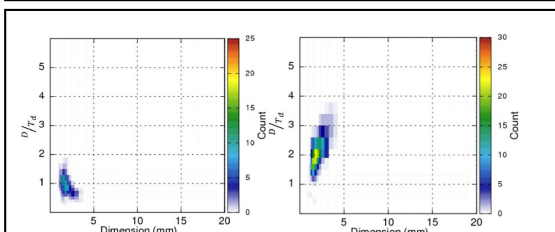


図 7 本研究の透過型測定機器の結果

さて、反射型については、横軸縦軸共に統計量となるが、考え方は同じである。横軸に粒子直径に相当する量、縦軸に落下速度に相当する量を取った。前述の透過型の結果を求めた時期に完成型の反射型が稼働していなかったため、別の時期の結果ではあるが、同様の結果を図 8 に示す。観測時期は 2017 年 1 月 22 日から 3 月 11 日で、10 分間に 50 個以上の粒子が計測され、降水量が 0.1mm/10min 以上、同種の降水粒子（ここでは雪片とあられの事例のみ使用）が続いたことを既販の機器で確認されたものを事例として使用した。結果として分布がほぼ分かれることが確認された。しかし、既販の機器の結果が絶対でないことを考慮することや、本来の降水種別はもっと多岐にわたるため、それらを区別する方法も確立する必要があることに注意すべきである。

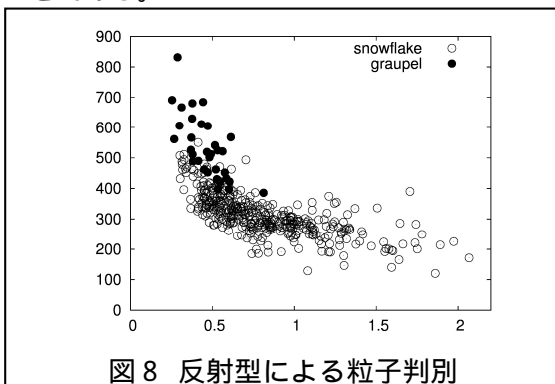


図 8 反射型による粒子判別

(3) 降水量の推定

方法で述べた推定方法については、具体的なアルゴリズムを考えると様々な方法が考えられる。ここでは、粒子数が少ないと統計量として意味を為さなくなることから、1 分間に 50 個以上計測され、さらに 0.01mm/1min 以上の降水量が計測されたデータのみ使用する。なお、1 分という時間間隔は、一定の降水種別が続きやすい時間間隔ではあるが、測器（本測器、比較測器共）に粒子が入るときの偏りが統計的に解消されていない可能性が高い。その点で降水量の推定値と実測値の RMSE は大きくならざるを得ないため、解析手法にともなう実質的な誤差を考察するのが難しいかもしれない。ここでは簡単に \hat{D} , \hat{W} の平均値とカウントされた粒子数を説明変数として降水量を回帰的に求めてみた。粒子種別が異なると密度が異なるためにこの手法では明確に分ける必要がある。雪片に対しては \hat{W} の平均値はステップワイズ法で棄却され、残りの 2 変数で、あられに対しては 3 変数で棄却なく回帰した結果、双方とも式自体に意味はあるものの、結果の相関係数が 0.5 程度と適合性はそれほど良くなく、残差の標準誤差は 0.04 ~ 0.05mm/1min 程度と大きめであった。粒子の個数に対する寄与としては、あられの方が 10% 程度大きくなり、粒子の大きさに相当する量の寄与はほぼ 2 倍となった。これらは一般的にあられの方が球に近いこと、密度が高いことと符合する。なお、前セクションの 10 分集計と同じ条件で同様のことをすると、双方とも \hat{D} の平均値が棄却され、回帰結果は、式は有意であり、残差の標準誤差は 0.3mm/10min、相関係数が雪片では 0.6、あられでは 0.7 程度となり、ランダム性が低くなると残差が小さくなり、かつ、適合性が上がる結果となった。ただし、以上の結果では、降水量の値や反射型の測定結果に異常と言えるような外れ値がいくつかあるが、すぐに異常とわからないために今回はそのまま用いた。今後、粒子判別をさらに細かく、正確にし、そのそれぞれに対して同様の手法を取らなければならない。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 18 件)

中島育海、熊倉俊郎、中井専人、本吉弘岐、望月重人、石丸民之永：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、土木学会関東支部新潟会、第 32 回研究調査発表会論文集、II-320 2014.5.17、富山市

廣川貴大、中村守孝、熊倉俊郎、山崎正喜：固体降水計測を目的とした反射型光学式測定機器の作製、雪氷研究大会(2014・八戸)、講演要旨集、P2-21、2014.9.22、八戸市

中島育海、熊倉俊郎、中井専人、本吉弘岐、石丸民之永：光学式透過型降水量計を用いた固体降水量の推定、雪氷研究大会(2014・八戸)、講演要旨集、P2-20、2014.9.22、八戸市

石丸民之永、山崎正喜、熊倉俊郎：各種降雪センサーによる時間降雪深の比較 III-新型降雪センサーとの比較-、2015年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.11、2015.6.6、松本市

広川貴大、熊倉俊郎、本吉弘岐、中井専人、山崎正喜：固体降水計測を目的とした反射型光学式測定器について、2015年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.13、2015、松本市

石丸民之永、山崎正喜、熊倉俊郎：各種降雪強度センサーによる時間降雪深の比較 III-新型降雪センサーとの比較-、雪氷研究大会(2015・松本)、講演要旨集、P2-51、2015、松本市

広川貴大、熊倉俊郎、本吉弘岐、中井専人、山崎正喜：反射型光学式測定器を用いた降雪種判別について、雪氷研究大会(2015・松本)、講演要旨集、P2-52、2015、松本市

横田佑多、熊倉俊郎、石丸民之永：光シート上における固体降水粒子の粒径評価に関する考察、雪氷研究大会(2015・松本)、講演要旨集、P2-20、2015、松本市

須貝祐介、熊倉俊郎、本吉弘岐、石坂雅昭：雪片の粒径分布と降水強度との関係、雪氷研究大会(2015・松本)、講演要旨集、P2-19、2015、松本市

齊藤航、熊倉俊郎、石坂雅昭、本吉弘岐：長岡市における画像を用いた固体降水粒子の種類分けについての研究、雪氷研究大会(2015・松本)、講演要旨集、P2-21、2015、松本市

横田佑多、熊倉俊郎、石丸民之永：光学式ディストロメーターにおける固体降水粒子の粒径評価に関する考察、2016年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.29、2016、上越市

須貝祐介、熊倉俊郎、本吉弘岐、中井専人、石坂雅昭：固体降水種別の粒径分布に関する研究、2016年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.30、2016、上越市

中井専人、熊倉俊郎、広川貴大：ヒーター付き漏斗を持つ降水量計の濡れ損失：人工降雪を用いた実験室測定、2016年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.33、2016、上越市

石丸民之永、山崎正喜、羽賀秀樹、熊倉俊郎：降雪深強度計の開発 -2015-2016積雪板式時間降雪深計との比較-、2016年度日本雪氷学会北信越支部大会、No.28、2016、上越市

須貝祐介、熊倉俊郎、本吉弘岐、中井専人、石坂雅昭：固体降水の粒径分布に関する研究、雪氷研究大会(2016・名古屋)、講

演要旨集、P1-54、2016、名古屋市

横田佑多、熊倉俊郎、石丸民之永：光学式ディストロメーターにおける固体降水粒子の粒径評価に関する考察、雪氷研究大会(2016・名古屋)、講演要旨集、P1-55、2016、名古屋市

大島正揮、熊倉俊郎、山崎正喜：反射型光学式降雪センサーを用いた降水量の測定及び降雪種別判別に関する研究、雪氷研究大会(2016・名古屋)、講演要旨集、P1-56、2016、名古屋市

石丸民之永、山崎正喜、羽賀秀樹、熊倉俊郎：降雪深増率計の開発 II -2015-2016積雪板式時間降雪深計との比較-、雪氷研究大会(2016・名古屋)、講演要旨集、P2-7、2016、名古屋市

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊倉 俊郎 (KUMAKURA, Toshiro)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00272865

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

石丸 民之永 (ISHIMARU, Taminoe)

山崎 正喜 (YAMAZAKI, Masaki)

丸山 敏介 (MARUYAMA, Toshisuke)

中井 専人 (NAKAI, Sento)

石坂 雅昭 (ISHIZAKA, Masaaki)

本吉 弘岐 (MOTOYOSHI, Hiroki)

山下 克也 (YAMASHITA, Katsuya)

平沢 尚彦 (HIRASAWA, Naohiko)