

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400464

研究課題名(和文)降雪粒子マイクロ波散乱問題解決に向けた3次元粒子構造モデルの開発

研究課題名(英文)Three-dimensional modeling of physical properties of solid hydrometeors

研究代表者

民田 晴也(MINDA, Haruya)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・技術専門員

研究者番号：80422765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：固体降水粒子(特に湿雪)のマイクロ波散乱特性の計算技術と検証手法の確立、固体降水粒子が生成するレーダシグナルの特徴の理論的・観測的な理解深化につなげる粒子物性(形状・密度・落下速度・粒径分布)とレーダ反射因子の観測データベース開発が目標である。データベース開発のため、実在粒子の立体形状と存在向き、落下速度、粒径分布を観測する機器を開発した。粒子密度は電子天秤の観測粒子重量を開発機器の観測体積で除算して得た。冬季に北海道大学と金沢大学において、電子天秤型降雪強度計や降水レーダとの同期観測を実施、多種多様な降雪現象の解析・散乱計算に対応できる観測データベースの初期プロダクトが完成した。

研究成果の概要(英文)：Quantitative radar snow-rate sensing requires a breakthrough improvement on the understandings of microwave scattering properties of solid hydrometeors. We have developed a new instrument, which is named as the Multi-angle Snowflake Imager (MSI), to capture physical properties of solid hydrometeors, such as a three-dimensional shape, snow density, fall velocity and their size distribution. To estimate the snow density, the hydrometeor's mass measured by an electrical-balance-type snow-gauge is divided by the volume captured by the MSI. The MSI is validated by simultaneous observations with a 2D video disdrometer. To theoretically and observationally infer the scattering properties and radar signals, the snowflake physical properties and radar reflectivity factors were collected by using the MSI, multi-frequency precipitation radars and other sensors at Hokkaido and Kanazawa Universities in winter seasons. Finally, the preliminary observational data-set was developed.

研究分野：レーダ気象学

キーワード：降水レーダ 降雪観測 レーダ降雪強度 マイクロ波散乱特性 粒子形状計測

1. 研究開始当初の背景

レーダ気象学の革新的技術開発として、降水粒子の種別とその粒径分布のリモートセンシングがあり、雪や霰など粒子種別毎の存在分布が観測できればレーダ降雪強度の観測精度が格段に向上し、雲内の降水粒子の生成・成長過程を観測的に調べることも可能となる。近年、二重偏波レーダが開発され、偏波シグナルを利用した粒子識別や降雨減衰補正技術などが提案されている。しかし、多種多様な形状と密度で特徴づけられる固体降水粒子のマイクロ波散乱特性は理論・観測の両面で知見が乏しく、観測レーダシグナルから固体降水の粒子物性や降水強度を推測するのは困難であり、高精度なレーダ降雪観測技術の実現には、固体降水粒子の散乱特性の理解深化が長年の課題となっている。

国外では近似散乱計算法を適応し易い誘電率の小さな(減衰の小さな)氷晶や乾雪の散乱特性から理解深化を進めている。周囲を海で囲まれる日本では湿雪が多く、難易度は高いが、計算精度が低く計算手法が確立していない誘電率の大きな湿雪の散乱特性の理解が重要であり、散乱特性の理解と共に近似計算手法の開発も期待されている。特に、融解層高度では多種多様な固体降水粒子が混在し、偏波レーダは多様な偏波シグナルを受信する。融解層の雲物理過程解釈は難しく、観測的な理解深化につながる粒子物性センシングへの偏波シグナル応用技術の実用化がレーダ気象学でのブレークスルー達成の一つの道筋として期待されている。

2. 研究の目的

固体降水粒子物性とレーダシグナルの観測データベースの開発は、固体降水粒子が生成するレーダシグナルの特徴の理論的・観測的な理解深化に必要である。粒子集合体の散乱特性であるレーダシグナルの評価は、個々の固体粒子散乱特性を得ることが困難であることに加え、対象の降雪現象を適切に表す粒子種別(物性)と形状、存在向きを組込んだ粒径分布の取得が必要となり、評価・検証を困難にしている。本研究では、固体降水粒子の立体形状を観測する機器を開発、冬季に降水レーダとの同期観測を実施、固体降水粒子物性の立体構造モデルを開発、観測データベースを完成することが目的である。定量的な降雪量、粒子物性を含むデータベースは、レーダシグナル検証のみならず、雲物理過程の解明にも有用である。

3. 研究の方法

粒子立体形状と落下速度を計測する Multi-angle Snowflake Imager (MSI)を開発した(発表論文)。粒子密度推定およびレーダ反射因子検証が可能なデータベース開発のため、MSIには定量的な降雪観測性能が要求される。MSI性能は2次元ビデオ雨滴粒径分布計(2DVD)と比較検証を行い、MSI

が立体形状計測機能を保持しながら統計的に有意な短時間粒径分布を表現できる粒子捕捉性能を備えるように機器開発を進めた。

観測実験は、降雪期間が長い厳冬地域、長年、降雪観測を継続してきた北海道大学低温科学研究所(低温研)において、電子天秤型降雪強度計および降水レーダとの同期観測実験を4シーズンに渡り実施(最初の2シーズンはMSI開発試験が目的)粒子立体形状、誘電率、粒径分布、およびレーダ反射因子の観測データベースを開発した。

4. 研究成果

(1) MSI 開発

MSIの概要と粒子立体形状の再現例を図1に示す。独自開発レーザラインスキャナ(発表論文)を4台、水平面上に45度間隔に配置、落下粒子の側面影画を4方向から撮影して立体形状を合成する。4方向から撮影することにより、板状雪片の最薄部を捉える確率が改善し、雪片の形状再現性、体積代表性を高めることができる。スキャナ配置には高さオフセットを設け、粒子が計測シート光を通過する時間差から落下速度を算出する。MSIは最大3mmのシート光間隔に4つの計測シート光を配置、落下粒子を常に1台以上のスキャナで検出することで、スキャナ間の粒子同定を容易にする仕組みとなっている。側面影画による立体形状は、窪み形状が再現できないため、斜め上方(天頂角55度)からスキャナと同期撮影したカメラ画像を合成することで、立体形状の再現性を向上している。スキャナは水に対して吸収波長である780nmの近赤外半導体レーザを用い、最大計測幅42mm、水平分解能0.1mm、スライスレート20kHzで粒子影画を取得する。カメラ撮影は、スキャナレーザ光源と近赤外LED照明を光源に、近赤外域に感度があるカメラで1/4000秒のシャッター速度で撮影した。

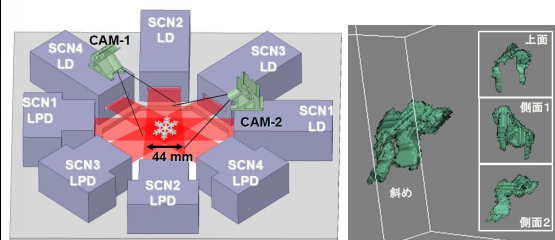


図1 MSI概要(左)と立体形状再現例(右)

(2) MSI 性能評価

MSI計測性能のため2DVDとの比較を行った。2DVDはMSI同様、高さオフセットのある直交ラインスキャンカメラ画像から楕円体近似の粒子形状(体積)、落下速度と粒径分布を計測する。2DVDは雨滴観測用に設計されており、上下2つのカメラの設置間隔が6mmと広く、落下速度の遅い小さな降雪粒子に対してカメラ間で粒子同定を誤り、

顕著な速度誤差を生じる問題が指摘されているが、国内外で降雪観測に利用されている。MSI 性能検証では、粒子影画幅(D_w)が 1 mm を超える粒子を対象に行った。

立体形状計測の粒子体積へのインパクト
粒子立体形状から算出した等価体積球径(D_e)の比較(2 影画法と 4 影画法の比較およびカメラ画像合成の有無)を図 2 に示す。左図は、MSI の 4 影画合成が 2DVD 方式の直交 2 影画合成に比べ、 D_e が 13% (体積で 44%) 小さくなる傾向を示唆している。ここで、 D_e が 3 mm 以下の粒子には板状の雪結晶や楕円体近似ができる霰粒子が含まれており、霰粒子は 2 影画と 4 影画方式で差は少なく、雪結晶では 2 影画方式では D_e が 50%大きくなる傾向を示唆している。右図は、斜め上方からのカメラ画像を合成すると、 D_e が更に 8% (体積で 25%) 小さくなる傾向を示している。この結果は、MSI のカメラ画像を組込んだ雪片粒子体積が 2DVD の半分以下となることを示唆し、これまで、降雪強度、レーダ反射因子、粒子密度推定で 2DVD を利用して解析してきた結果に大きなインパクトを与える結果である。このように、MSI は 2DVD に比べ粒子体積の代表性が改善している。

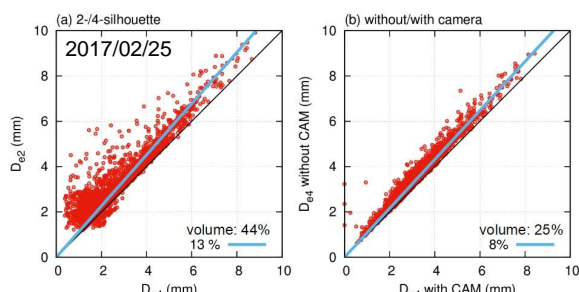


図 2 等価体積球径の比較例。左：2 影画(D_{e2}) vs. 4 影画(D_{e4})。右：カメラ画像の有無。

粒子落下速度計測

MSI の落下速度検証を図 3 に示す。真値として 2DVD の落下速度を用いた。図は、2DVD の速度分散が少ない落下速度 3 m/s の事例と分散が多い 1 m/s の事例を示す。MSI と 2DVD の平均値は同等の値を示す。特に、2DVD の高速落下粒子 (6 m/s 以上) を排除した平均値は MSI とよく一致する。この結果から、MSI の落下速度は 2DVD と同等以上であることが確認できる。更に、MSI は 2DVD に現れる D_w が 3mm 以下の大きな速度分散がなく、2DVD の粒子ミスマッチ問題が解決できていることが確認できる。

粒子捕捉率

MSI と 2DVD の時間当りの検出粒子数の時系列を図 4 に示す。粒径分布積算である降雪量およびレーダ反射因子の定量的な評価のためには、MSI は降雪現象の粒径分布を適確に表現できる粒子検出数を備える必要がある。図から、2DVD の検出粒子数 (黒線) と

MSI で落下速度が算出できた粒子数 (2 スキャナ以上で粒子検出; 緑線) は一致しており、粒子検出総数としては MSI と 2DVD は同等であることが確認できる。但し、MSI と 2DVD のサンプリング面積の差から、実際の MSI 検出数 (緑線) は 2DVD の約半分である。この結果は、粒子数濃度が高い降雪現象で MSI と 2DVD は同等であると言えるが、数濃度が低い場合は MSI は正しい粒径分布を表現できるとは限らないことに注意が必要である。また、MSI が立体形状再現に成功した粒子数は、スキャナ画像合成のみの立体形状粒子は 2DVD の約 1/5 (青線)、カメラ画像合成粒子は約 1/50 と少ない (赤線)。粒子検出数が少なくても、個々の粒子の散乱計算には適応できるが、降雪量やレーダ反射因子検証のためには、立体形状を再現できない MSI 観測粒子 (緑線) に適切な立体形状を定義する手法開発、つまり、立体形状含む 1 分積算粒径分布を求めるアルゴリズム開発が今後の課題である。

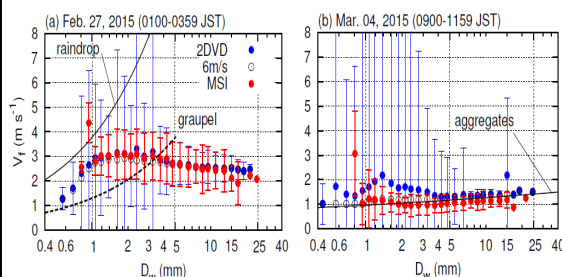


図 3 MSI と 2DVD の観測落下速度の比較例

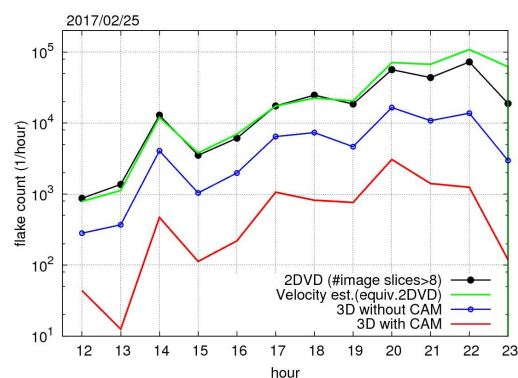


図 4 MSI と 2DVD の検出粒子数の時系列

(3) 降雪観測実験

研究期間中の冬季 4 シーズン、シーズン毎に機器および立体形状再現アルゴリズムを改良しながら、低温研の電子天秤型降雪強度計、2DVD、地上気象観測、含水率計との同期観測を行った。また、観測レーダ反射因子を得るため、名古屋大学の 24 GHz マイクロレーンレーダおよび低温研の 9 GHz 帯の高速スキャン RHI レーダとの同期観測を行った。また、国土交通省 9 GHz 帯偏波降水レーダ X-RAIN のデータも利用可能であり、粒子種別識別に利用でき得る偏波シグナルの検

証解析が可能である。但し、X-RAIN は観測点の 100 m 上空を見るため、落下速度の遅い降雪現象では地上観測との比較手法の検討が必要である。最終年度には、金沢大学でも 2DVD、Parsivel、LPM disdrometer、および名古屋大学 35GHz 偏波雲レーダとの同期観測を実施した。低温研では降雪シーズンの始まりと終わりを除けば乾雪が中心であり、金沢観測で湿雪を対象とした観測実験が実施できた。記録的な大雪で機器が埋雪する時間帯もあったが、湿雪と雨滴が混在する曇、霰粒子に対して多くの事例でデータ取得に成功、データベースを充実することができた。金沢サイトには降雪強度計が無いため、MSI に電子天秤型降雪強度計機能を増設して観測を実施した。長時間の無人観測を考慮して天秤(秤量 3 kg)を選定したため、計測重量分解能が 0.1 g と個々の粒子の重さを計測するには不十分であるが、観測期間中の降雨データを利用して 1 分間平均降水強度で parsivel や LPM と良い相関を示すことを確認した。降雪粒子は重量が軽いため、一定時間平均(数十 g の重量が積算する時間)であれば降雪強度の代表性があると考えられる。

(4) 粒子密度・誘電率推定

粒子誘電率は粒子温度と密度()で近似できる。水滴と乾雪(氷)粒子の誘電率から粒子密度の比例配分から求め、水滴と氷の誘電率は粒子温度から近似できる。降雪粒子は落下速度が遅いため、粒子温度は気温で与える。本研究では、個々の粒子密度の計測は困難であり、5 分間または 20 分間の電子天秤型降雪強度計の積算重量を MSI の積算体積で除算することで平均粒子密度を推定した。MSI 粒子体積を求めるためには、定量的に校正された粒径分布が必要である。図 3 で示したように MSI の落下速度計測粒子数(立体形状再現不可)は 2DVD と同等であり、立体形状再現できた粒子(カメラ合成無)の粒径分布での積算体積を数濃度比(MSI 落下速度計測粒子 / 立体形状再現粒子)で補正して算出した。MSI (カメラ合成無の立体形状)および 2DVD の積算体積と降雪強度計重量から算出した 20 分間平均の粒子密度の時系列を図 5 に例示する。2DVD の粒子体積は図 2 の結果を踏まえ、等価球径を 13% 小さくして積算した。図から、MSI は 20 分間平均で 2DVD と同等の平均密度を示すことが確認できる。この結果は 2DVD を利用した MSI の粒径分布や降雪強度計測の校正結果でもある。

実際の粒子密度は粒子サイズ依存性があり、小粒子ほど密度が大きくなる。粒子数濃度の高い降雪現象に対しては、2DVD の 1 分間積算体積と 1 分間平均等価球径の関係を収集することで $\rho \propto D_e^{-3}$ 関係の近似式を求めサイズ依存性を組み込むことを検討しているが、現時点では 20 分間平均密度でデータベース開発を行っている。

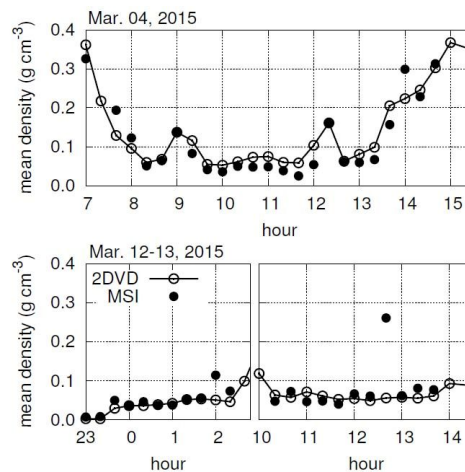


図 5 MSI と 2DVD による推定粒子密度

(5) まとめ

近年、国外でも粒子立体形状を計測し、固体降水粒子の散乱特性とレーダシグナルの理論的評価が始まっている。MSI の強みは粒子立体形状と同時に、粒子落下速度および粒径分布を取得できることにあり、粒子集合体の散乱特性で決まるレーダ反射因子の検証や降雪の絶対量観測で利用価値の高い機器の開発ができた。今後の課題として、粒子立体形状再現の改善がある。研究期間後半の 2 シーズンで粒子形状再現性を大きく改善できたが、雪片は未だ実在形状からは程遠い(厚ぼったい)形状再現である。板状粒子の衝突・併合効果を組み込み、板状粒子の複合体としての形状再現アルゴリズム開発により、形状再現性(体積代表性)を高めることを考えている。誘電率に大きな影響を与える粒子密度は粒子サイズ依存性、および粒子形状と落下速度のエアロダイナミクスを組み込み、推定精度を高める。また、取得画像から粒子濡れ度を組み込むことで、一様な誘電率分布から、より実在粒子に近い比一様性の誘電率分布で特徴付けられる構造モデルへと改善を進めることを考えている。

研究期間中、長期間の観測実験を行うことができ、様々な降雪現象事例に対応できる粒子物性(形状、密度、落下速度) 粒径分布とレーダ反射因子の観測データが取得でき、実在粒子に近い固体降水粒子構造モデルを用いた散乱計算に挑戦できるデータセットの初期プロダクトが完成した。今後、データベースの品質確認、散乱計算の実現を急ぎ、他の研究者にデータ公開を行うことで、開発機器・データベースの有効利用に努める。散乱計算技術の向上を目指し、散乱計算における粒子形状や誘電率分布の非一様性の感度、既存の近似計算手法の湿雪での適応範囲調査、湿雪の近似計算手法の実用化など、MSI の優位性がある間に、固体降水粒子の散乱問題解決に結び付く成果を挙げるのが今後の重要な課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Minda, H., N. Tsuda, and Y. Fujiyoshi, 2017: Three-dimensional shape and fall velocity measurements of snowflakes using a multi-angle snowflake imager, J. Atmos. Oceanic Tech., 34, 1763-1781, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0221.1 (査読有)

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 TEEE, 11, 624-632, DOI:10.1002/tee22280. (査読有)

[学会発表](計18件)

齋藤佑紀, 津田紀生, 山田 諄, 民田晴也, 2018: 降雪粒子の立体形状計測機器の開発, 電気学会全国大会

Saito, Y., N. Tsuda, J. Yamada, and H. Minda, 2017: Three-dimensional shape measurement of snowflakes using by a multi-angle line-image scanner and cameras, Optics and Photonics International Congress (OPIC)/The 6th Advanced Lasers and Photon Sources.

民田晴也, 久島萌人, 川島正行, 藤吉康志, 2017: 降雪粒子の立体形状と落下速度計測, 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 in 長岡(16回) ~ 雪崩につながる不安定積雪を作る降雪~, 防災科学研究所

民田晴也, 津田紀生, 藤吉康志, 川島正行, 2016: 降雪粒子の立体形状と等価体積直径, 日本気象学会秋季大会

民田晴也, 津田紀生, 西川将典, 藤吉康志, 2015: 降雪粒子の立体形状と落下速度計測, 日本気象学会秋季大会

ほか

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

民田晴也 (MINDA, Haruya)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・技術専門員

研究者番号: 80422765

(2) 研究分担者

津田紀生 (TSUDA, Norio)

愛知工業大学・工学部電気学科・教授

研究者番号: 20278229