

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560435

研究課題名（和文） 下層大気圏下の 3 次元降雪プロファイル測定システムの開発

研究課題名（英文） The development of the measurement system for snowfall profiles in the lowest atmospheric layer

研究代表者

椎名 徹 (SHIINA TORU)

富山高等専門学校・電子情報工学科・教授

研究者番号：80196344

研究成果の概要（和文）：

本研究では、下層大気圏下における 3 次元降雪プロファイルを高分解能で測定するシステムの研究・開発を行った。小型ドップラーレーダ 3 台にて、地上付近から高度約千 m までの鉛直方向降雪プロファイルを連続的に測定した。3 台のレーダエコーを時空間解析することにより、3 次元降雪プロファイルの構築を行った。更に、降雪粒子画像情報と地上付近のレーダ強度との関係を解析した。降雪粒子の粒径と落下速度から降雪強度 R を算出し、レーダ反射因子 Z との Z - R 関係を雪質ごとに求めることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

We developed the new measurement system for snowfall profiles in the lowest atmospheric layer. The radar reflectivity factor and spectrum were measured using three small K-band Doppler radars. The image of falling snow particles were simultaneously captured to measure size and falling velocity. The radar reflectivity factor of radar was compared with the sum of backscattering cross section using snow particle images.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム, 降雪現象, レーダ

1. 研究開始当初の背景

異常気象の近年、「平成 18 年豪雪」の記録的な豪雪や低温現象による雪氷災害が国内各地で発生している。降雨に比べて降雪に関する気象予報の研究開発は遅れており、現在は数時間後の積雪量を予報している。雪質や降雪強度等のより高度な降雪予測を行うためには、3 次元降雪プロファイルを高分解能で測定し、下層大気圏下の降雪過程を解析することが必要不可欠である。

レーダによる降雪量の測定として、レーダ反射強度と地上の積雪との関係について、これまで研究が行われてきた。気象条件によって降雪雲は異なり、降雪粒子も種々変化するため、レーダ反射強度と降雪強度との相関関係は降雨と比較して複雑であり、詳細な降雪測定を行うことは不可能であった。気象レーダの測定範囲は数十 km と広範囲であり、距離分解能は数 km 程度と粗い。また、全方向を測定するために自転に数分以上を必要

とし、同一時刻における3次元降雪プロファイルは得られなかった。

2. 研究の目的

本研究では、下層大気圏下における3次元降雪プロファイルを高分解能で測定する新システムの開発を行う。具体的な研究目標は、以下の通りである。

- (1) 高分解能3次元降雪プロファイル測定システムの開発
- (2) 降雪粒子の雪質および形状解析システムの開発

3. 研究の方法

本研究で使用する小型ドップラーレーダ(METEK製, MRR-2)は軽量で可搬性に優れ、地上付近から高度数千m(最小35m間隔)までの鉛直方向降雪プロファイルを連続的に測定することが可能である。レーダ3台を配置することにより、高分解能3次元降雪プロファイル測定システムの構築を目指した。

- (1) 高分解能3次元降雪プロファイル測定システムの開発

小型垂直ドップラーレーダを数十m以上の間隔で3台配置し、各レーダから得られた鉛直方向降雪プロファイル相互の時間空間解析により、レーダで囲まれた三角地帯内の3次元降雪プロファイルの解析を行う。

- (2) 降雪粒子の雪質および形状解析システムの開発

高解像度 CCD カメラを使用し、三角地帯内を落下する降雪粒子の雪質および形状を測定する画像処理システムの開発を行う。

4. 研究成果

3次元降雪プロファイル測定システムの構築を目指し、以下の成果が得られた。

- (1) 3次元降雪プロファイルの測定

複数レーダ間での反射強度の時間相関解析を行うことにより、降雪プロファイルの面分布測定を試みた。降雪の一例として、あられと雪片の混合が降っている時間帯の2012年1月26日の7~8時における高度ごとのレーダ反射因子の時間変化を図1に示す。

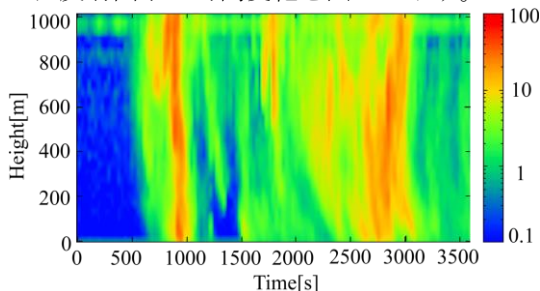


図1 高度ごとのレーダ反射因子の時間変化

パターン認識は多次元データからより低次元でデータを表すための基底を学習することである。非負値であるドップラースペクトルの特徴を表す基底は、同じ非負値が望ましい。そこで、今回の解析には、最適な手法と考えられる非負値行列因子分解を用いた。各基底の寄与を調べ、レーダ反射因子の再構成を行った。

あられの降った時間帯2012年1月26日7時15分における高度ごとのレーダ反射因子のドップラースペクトル分布について、再構成を行った例を図2に示す。H行列と基底の積がドップラースペクトル分布となる。図中の上段と下段は、2台のレーダの再構成分布である。1台目のレーダと2台目のレーダのH行列を線形補間したものと基底との積を求めたのが中段の図である。基底数8で解析を行うことにより、ノイズが除去され、ピークの落下がきれいに表されていることがわかる。この手法により、2台のレーダ間の面分布を解析した例を図3に示す。同様に3台のレーダ間の面分布を解析することにより、レーダ反射因子の3次元空間分布を求めた。

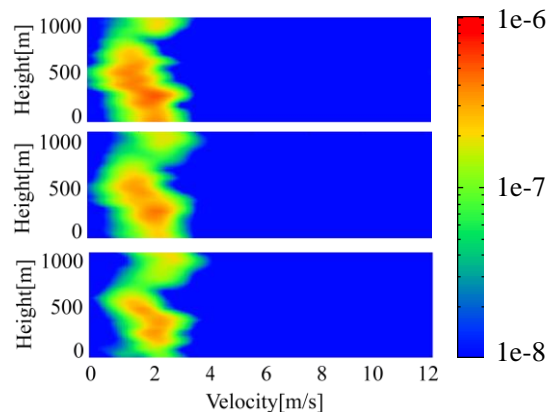


図2 高度ごとの反射因子スペクトル分布

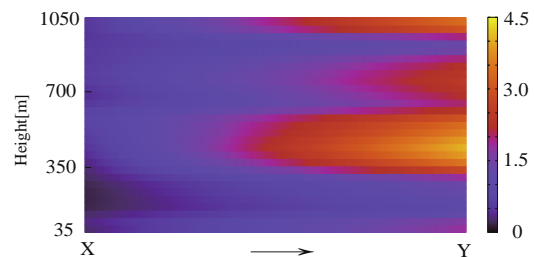


図3 高度ごとの反射因子の面分布

- (2) Mie 散乱とレーダ反射因子

電磁波が降水粒子に入射するとその一部は吸収され、残りは散乱する。平面波の球形粒子による散乱には、Mie 散乱が用いられている。粒子の直径が電磁波の波長に対して十分小さい場合には、Rayleigh 近似による後方散乱断面積が利用されている。実際の雨滴の粒径は0.1mmから5,6mmの範囲に分布して

おり、降雪粒子の場合には雪片では3cm程度にも達する。気象レーダ等にはマイクロ波が用いられていることから、必ずしも粒子直径が電磁波の波長に対して十分小さいとは限らない。

一方、Mie理論による後方散乱断面積の計算には複素数を引数とする球ベッセル関数が無限項含まれており、数値解析を必要とする。そこで、降雪粒子画像による粒子形状情報を散乱解析に利用するため、後方散乱断面積 σ の近似式

$$\sigma = \frac{\pi D^2}{4\alpha^4} \left| (m^2 - 1) \sum_{n=1}^{\infty} s_n \frac{(-1)^n (2n+1)}{(m - y_n)(m - y_n^{-1})} \right|^2$$

を提案した。ここで、粒子の直径 D 、波長 λ 、および $\alpha = \pi D/\lambda$ であり、 s_n, y_n は引数が α および粒子の複素屈折率 m の球ベッセル関数であり、各項を個別に求めた。

本研究で使用するレーダの波長における散乱特性の解析例として、氷粒子(粒径5mm)の散乱強度の角度依存性を図4に示す。波長の約半分の粒径では、Rayleigh近似が十分でないことがわかる。氷粒子の粒径と後方散乱断面積の関係を図5に示す。図中には、式の $n=1, 2, 3$ の各項を定式化し、その寄与を追加した曲線も示す。

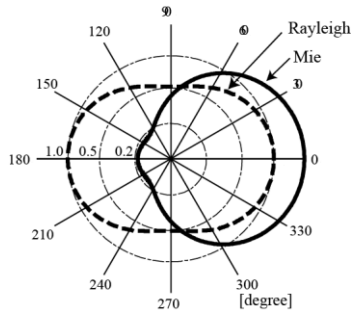


図4 氷粒子の散乱特性(粒径5mm)

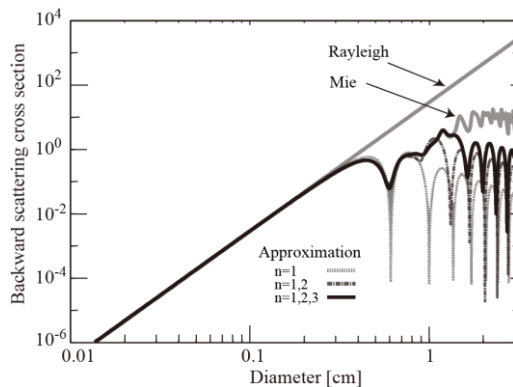


図5 後方散乱断面積

本研究では、降雪粒子密度 ρ を求めるために D のみを用いる方法と D と v を用いる方法を適用した。図6に、あられと雪片での散乱断面積の差異を示す。また、レーダと降雪粒

子の画像から得られたレーダ反射因子を図7に示す。図は2011年1月17日の観測結果であり、両者がよく一致していることがわかる。

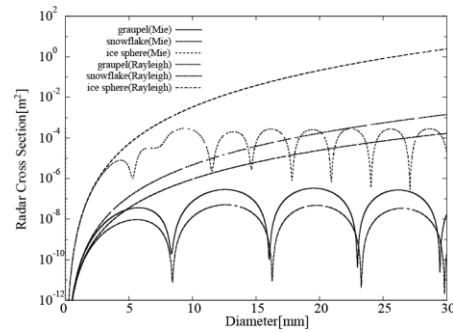


図6 降雪粒子の散乱断面積

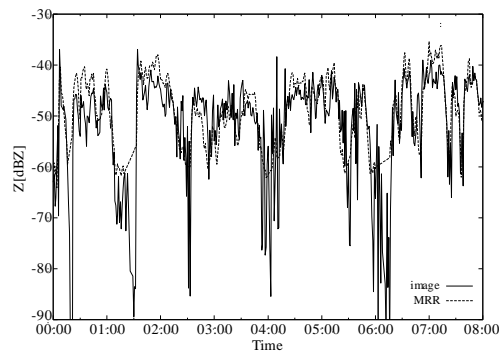


図7 レーダ反射因子の比較

(3) レーダ反射因子の解析

① ドップラー周波数の主成分分析

ドップラー周波数スペクトルの特徴を統計的に解析するため、主成分分析を用いた。2011年1月および2月における降雪時の観測データを全て利用して、MRRの高度別ドップラー周波数スペクトルの主成分分析を行った。分析より求めた各主成分のスペクトル分布を図8に示す。第1~6主成分で全体の約90%を占めている。

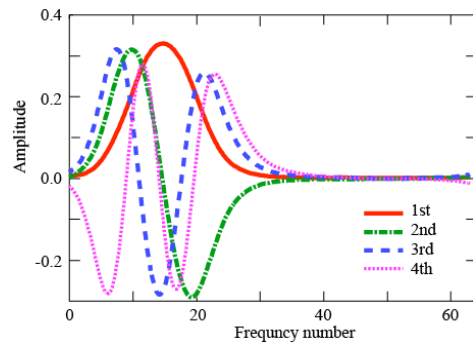
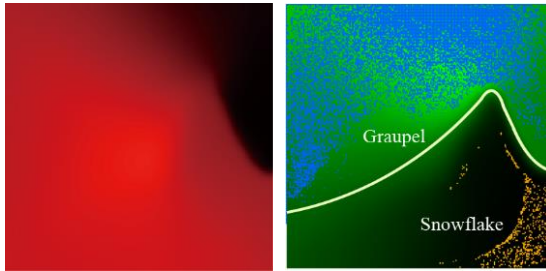


図8 ドップラー周波数の主成分分析

② 自己組織化マップによる分類

MRRから得られた降雪粒子の落下速度分布を第1~3主成分で表現し、これら特徴量を用いて自己組織化マップ(SOM)による自動分類を試みた。ここでは、Online-Learning

による SOM 学習を行い、2次元マッピングした例を図9に示す。図9(a), 9(b)はそれぞれ第1,2主成分を表し、規格化した正負の成分を256階調で表している。図9(b)上の曲線は第2主成分が0の値である境界線を示す。また、地上付近に設置された降雪粒子画像解析装置により1分ごとに得られた降雪粒子の分類結果を図9(b)上にマッピングして示す。小型鉛直レーダを用いて降雪粒子の落下速度分布を高度別に測定し、その分布特徴量から降雪種類の分類が可能となった。



(a) 第1主成分 (b) 第2主成分
図9 自己組織化マップ

(4) 降水粒子情報の解析

ここでは、電波の散乱特性に深く関わりのある物理量として降水粒子の粒径と落下速度の分布について変分ベイズ法を用いた解析を行った。これにより、複数の降水粒子が同時に含まれる混合分布に対しても降水粒子の種類数と各降水粒子の特性を同時に推定することが可能となる。推定されたパラメータを用いることで、降雪種ごとのドップラースペクトルの事後予測分布の計算を行った。

①降雪粒子の粒径と落下速度

高解像度カメラを用いた降雪粒子画像装置にて測定した、粒径と落下速度分布を図10に示す。

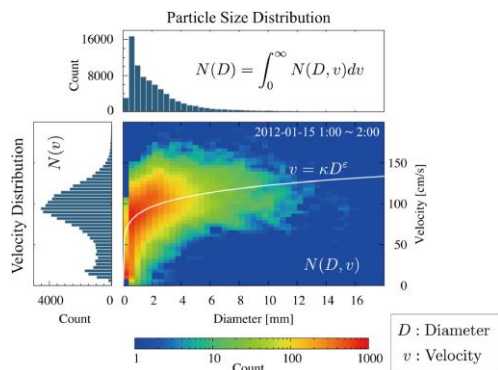


図10 降雪粒子の粒径と落下速度

②変分ベイズ法による降雪種類解析

雪片とあられが同時に降っている期間について、変分ベイズ法による推定結果を行った。2012年1月23日14時から24日9時までの期間における各クラスターの平均粒径の

時系列変化を図11に示す。

あられが降っていた23日14時には、1つのクラスターであると学習され、雪片が混じってきた18時になると2つのクラスターと学習されている。また、翌日4時30分では平均粒径が大きくなり、平均粒径の大きいクラスターでは、大きな雪片が、小さい平均粒径のクラスターでは、あられと小さな降雪粒子が含まれていることが見てとれる。

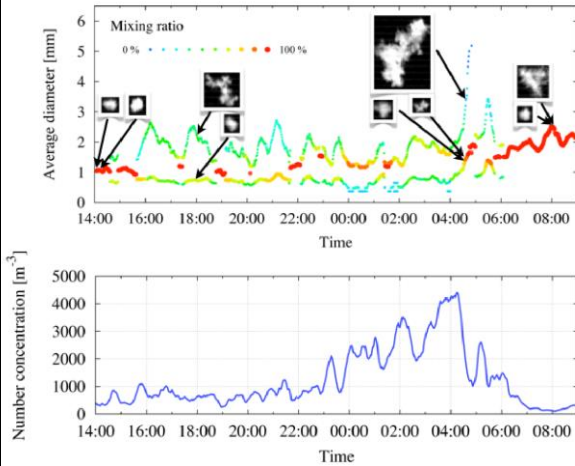


図11 平均粒径の時間変化

③ドップラースペクトルの事後予測分布

降雪粒子を球体粒子と仮定すると、電磁波散乱はMie散乱となる。②での解析期間において3つの降水粒子に分類できることを利用して、降水粒子ごとのドップラースペクトルの事後予測分布が計算可能となる。図12に各降水粒子のドップラースペクトルの事後予測分布を計算したものを示す。

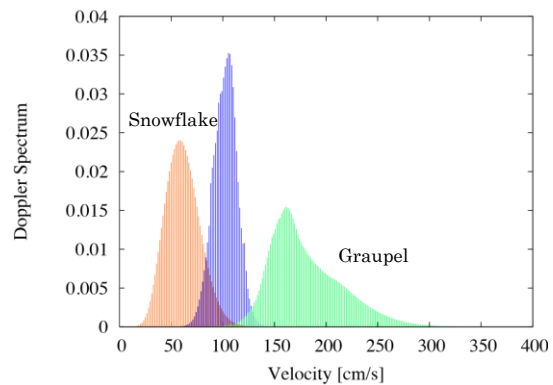


図12 ドップラースペクトルの事後予測

(5) レーダ反射因子と降雪強度の関係

降雪粒子画像情報と地上付近のレーダ強度との関係を解析した。図13に降雪粒子情報より得られた降雪強度 R とレーダ反射因子 Z の関係を示す。図14に Z - R 関係のパラメータ B, β 分布を示す。2012年1月の1ヶ月間のデータを30秒ごとに10分間隔で区切り、

それぞれのデータについて B と β を求めた結果を図に示す。

以上より、降雪粒子の粒径と落下速度から降雪強度を算出し、レーダ反射因子との Z-R 関係を雪質ごとに求めることが可能となった。更に、(3)、(4)より、レーダから降雪粒子の分類が可能であり、雪質と降雪強度の同時測定の可能性が示唆された。

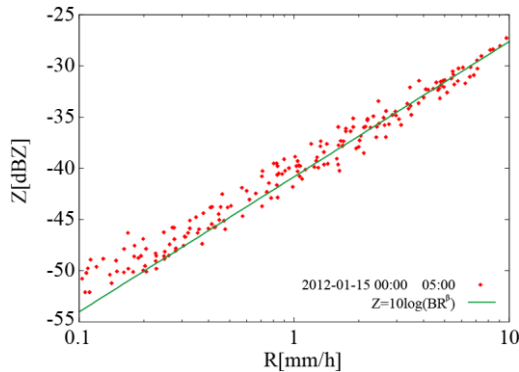


図 13 レーダ反射因子と降雪強度の関係

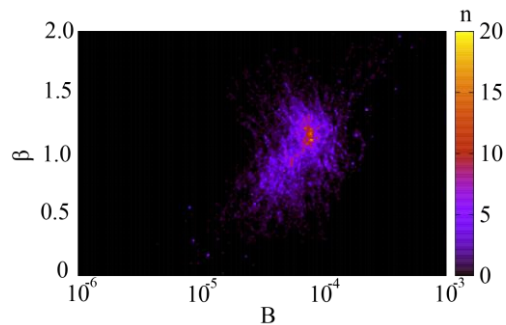


図 14 レーダ反射因子と降雪強度の関係

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)

- ① M. Ota, T. Shiina, M.Kubo and K. Muramoto, The backscattering cross sections of snow particles and the radar reflectivity factor, Proc. SICE Annual Conference 2011, 査読有, 2011, pp. 1823-1828.
<http://www.sice.jp>
- ② T.Shiina, M.Kubo and K. Muramoto, Z-R relation for snowfall using two small Doppler radars and snow particle images, Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp., 査読有, 2010, pp. 4122-4125.
<http://www.igarss2010.org>

[学会発表] (計 6 件)

- ① 椎名 徹, 降雪粒子画像を用いた降雪種類の取得, 電子情報通信学会総合大会,

- 2013 年 3 月 22 日, 岐阜大学 (岐阜県) .
- ② 椎名 徹, 降水粒子の粒径-落下速度分布の解析, 電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月 21 日, 岐阜大学 (岐阜県) .
- ③ 椎名 徹, ロバスト変分ベイズによるライダーデータの解析, 電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月 21 日, 岐阜大学 (岐阜県) .
- ④ 椎名 徹, レーダを用いた降雪粒子散乱特性の解析, 電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 20 日, 岡山大学 (岡山県) .
- ⑤ 椎名 徹, K バンド小型レーダを用いた降雪情報の取得, 日本気象学会 2011 年度秋季大会, 2011 年 11 月 18 日, 名古屋大学 (愛知県) .
- ⑥ 椎名 徹, K バンド帯における降水粒子散乱特性の解析, 電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 15 日, 東京都市大学 (東京都) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

椎名 徹 (SHIINA TORU)

富山高等専門学校・電子情報工学科・教授
研究者番号: 80196344

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし