

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420404

研究課題名(和文) レーダの三角配置を用いた下層大気圏下における降雪現象測定システムの構築

研究課題名(英文) Construction of the snowfall phenomenon measuring system in the lowest atmospheric using three radars

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、下層大気圏下における降雪現象を高分解能で測定システムの研究・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1kmまでの鉛直方向降雪現象を連続的に測定した。レーダとライダーによる後方散乱を解析することにより、3次元空間内の降雪現象を測定するシステムの構築を行った。更に、地上に設置した降雪粒子画像情報と降水センサーによる降水粒子情報との関係を解析した。降雨粒子および降雪粒子の粒径と落下速度から降水強度Rを算出し、レーダ反射因子ZとのZ-R関係を降水種類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 snowfall phenomenon measuring system in the lowest atmospheric layer. The radar reflectivity factor and spectrum were measured using three small K-band Doppler radars and lidar. The image of falling snow particles were simultaneously captured to measure size and falling velocity. Furthermore, the rainfall particle information with the weather sensor was analyzed. The precipitation intensities of rainfall and snowfall were calculated. The radar reflectivity factors of radar and lidar were compared with these intensities.

研究分野：工学

キーワード：計測システム レーダ 降雪現象

1. 研究開始当初の背景

異常気象の近年、「平成 23 年豪雪」・「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測している。雪質や降雪強度等の詳細な降雪予測を行うためには、3次元空間内の降雪現象を高分解能で測定し、下層大気圏下の降雪過程を時系列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、レーダを自転して半球面を測定するには数分以上を必要とし、3次元空間内の降雪分布を同時に測定することは困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、小型垂直ドップラーレーダを一定距離間隔で3台配置し、各レーダから得られた鉛直方向降雪分布相互の時空間解析を行い、レーダで囲まれた三角地帯内の3次元空間内における降雪現象を時系列で捉える。更に、この三角地帯内を落下する降雪粒子映像を画像解析し、降雨粒子・雲との同時測定を行い、降雪雲から地上付近までの下層大気圏下における降雪過程を詳細に測定するシステムの構築を目指す。具体的な研究目標は、以下の通りである。

- (1) 降雪現象の高分解能時空間測定システムの構築
- (2) 降水粒子によるレーダ反射因子の解析

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現象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、3次元空間内の降雪現象測定システムの構築を目指した。

- (1) 降雪現象の高分解能時空間測定システムの構築

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分布の相互時空間解析を行う。レーダで囲まれた三角地帯内の3次元空間内の降雪現象を電磁界分布から明らかにする。更に、雲の測定も同時に行う。

- (2) 降水粒子によるレーダ反射因子の解析

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構築を行

う。更に、降雪粒子と降雨粒子の同時測定を行い、落下中の降水粒子によるレーダ反射因子の解析を行う。

4. 研究成果

下層大気圏下における降雪現象測定システムの構築を目指し、以下の成果が得られた。

- (1) 質量フラックスを用いた降雪現象の解析
降雪粒子の降水量への寄与を考慮するため、質量フラックスの導入を行い、降雪の時間推移と降水量の定量化を行なった。

①質量フラックス

質量フラックスは、降雪粒子の質量に落下速度を乗じた量である。粒子の密度と体積から質量フラックスを求めた。図1に粒径と落下速度に対するフラックスの関係を示す。降雪粒子の画像観測システムより得られた粒径と落下速度分布を図2に示す。図中の曲線は、雪片とあられの経験式を示す。図において粒径が大きい粒子にフラックスの大きな部分があり、降水量への寄与が大きいことがわかる。また、同じ粒径でもあられと雪片ではフラックスが異なり、粒子の種類による降水寄与の違いが確認できる。

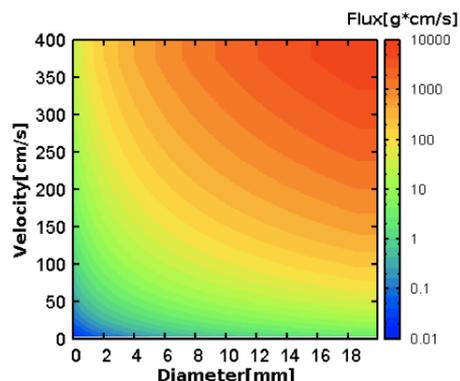


図1 フラックス分布

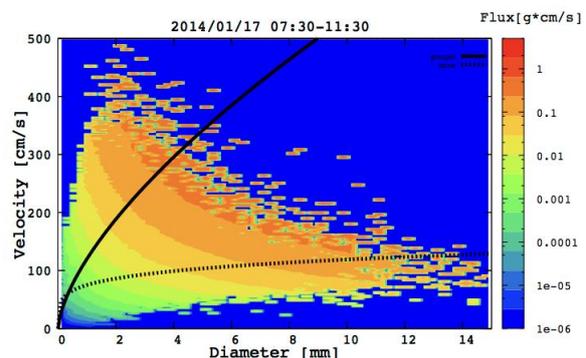


図2 粒径と落下速度分布

②質量フラックス中心の動態

質量フラックス分布を数量的に表現するためにフラックス中心 (CFD) を導入する。時刻ごとの粒径、落下速度をフラックスで重みづけしたこの位置座標は、粒子の種類を顕著に反映する。図3に CFD の推移例を示す。小さ

な雪片からあられに変化し、次第に大きな雪片に変化していることがわかる。

降雪の粒径・落下速度分布を用いた判別として、個々の粒子が降雪量に寄与する質量フラックス図を作成した。フラックスの中心を加えることで降雪の時間推移の特徴を連続的かつ定量的に把握することが可能となった。レーダによる降雪観測との対応付けにより、降雪メカニズムの解明に役立つことが期待される。

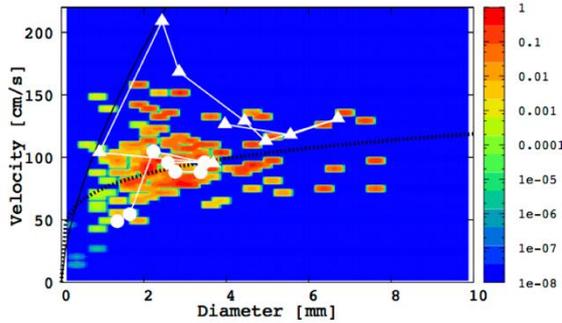


図3 フラックス中心の推移

(2) レーダとグラントゥルースの比較

小型ドップラーレーダを用いて局所での降水量を測定し、地上での実測値との比較を行った。

①レーダと降水センサー

レーダには、METEK製のMicro Rain Radar(以下MRRと略す)を用いる。MRRは、レーダ送信部から波長24.2[GHz]の電磁波を送信し、降水粒子によって反射される波の受信周波数の変化を用いて降水の移動速度や高度ごとのレーダ反射因子、ドップラースペクトルを取得し、30秒ごとに記録される。これらのデータを解析することにより降水強度を算出する。

MRRとグラントゥルースでのレーダ反射因子Zの比較を行った。地上の測定には降水センサーシステム(OTT製Parsivel)を用いた。MRRと降水センサーによるレーダ反射因子Zの関係を図4に示す。MRRの測定は高度70mのデータを使用した。また、この測定は2015年6~10月の降雨データ4133[min]を用いた。MRRの測定値が降水センサーのデータと一致していることがわかる。このことからMRRの有効性が確認された。

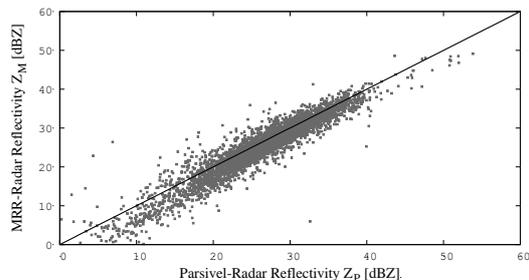


図4 レーダ反射因子の比較

次に、種々の降雪現象について解析を行った。図5に降雪時のレーダ反射因子時間変化

を示す。高度100[m]付近での降雪粒子が次第に地上に到達する様子がわかる。この時の高度ごとの落下速度分布の推移を図6に示す。

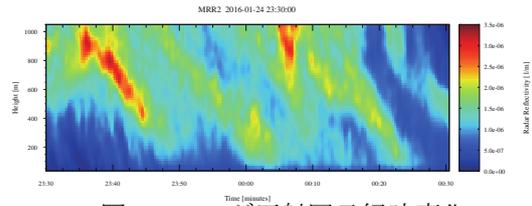


図5 レーダ反射因子経時変化

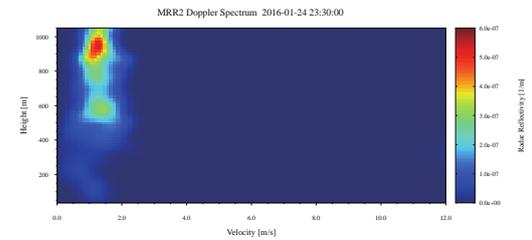


図6 高度ごとの落下速度分布

② Z-R 関係

MRRのレーダ反射因子Zと降水センサーから得られる降水強度RとのZ-R関係を解析した。降雪時の一例を図7に示す。図より、Z-R関係のパラメータB,βを算出した。降雨の場合、高度に依存せず高い相関が得られ、降雪時には高い高度では異なる現象が見られた。降雪の一例を表1に示す。以上より、レーダから降水量を算出すること可能になった。

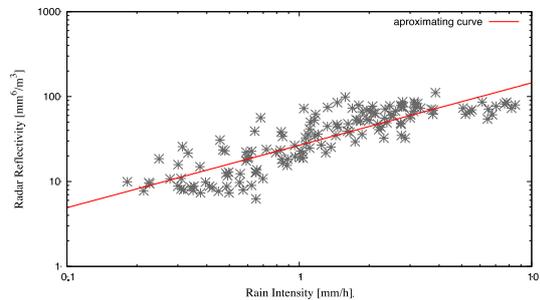


図7 Z-R 関係

表1 降雪時のB,β

	70m	105m	210m	315m	420m	525m
B	26.7	33.2	42.6	53.7	65.8	77.8
β	0.735	0.692	0.567	0.413	0.239	0.116
相関係数(r ²)	0.726	0.681	0.495	0.311	0.133	0.0414

(3) 降水センサーを用いたレーダ特性の取得
降水センサーを用いて、様々な降水種類ごとのZ-R関係を解析しB,βの算出を行う。

①光学式ディストロメータ

降水センサーとして、OTT社のParsivel2を使用する。Parsivel2は2つのセンサヘッドを持ち、送信部から幅30[mm]×長さ180[mm]の帯状レーザ光(波長780nm)を出力し、受信部で受光する機器である。レーザ光を通過する粒子を観測することで、その降水粒子の粒径、落下速度、個数および降水の種類を測定する。

粒径は、送信部からの出力電力と受信部での受信電力の差により測定する。粒子がレー

ザ光を通過したときに低下した電力の大きさにより、粒径が決定される。落下速度は、信号の持続時間により測定する。

②降雨

粒径と落下速度を測定することにより降水強度とレーダ反射因子を求める。降雨時の粒径と落下速度の関係を図8に示す。2015年8月17日18時30分～18時50分の20分間のデータを示す。また、Z-R関係は図9のようになり、 $Z=198R^{1.4}$ と降雨の一般的なパラメータに近い結果が得られた。

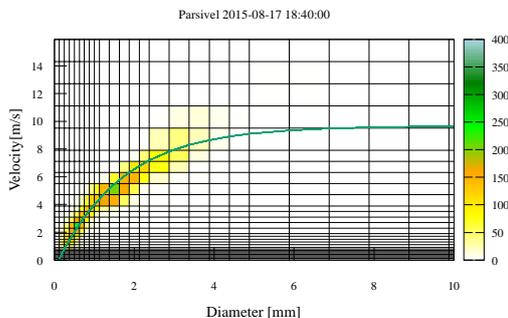


図8 粒径と落下速度分布

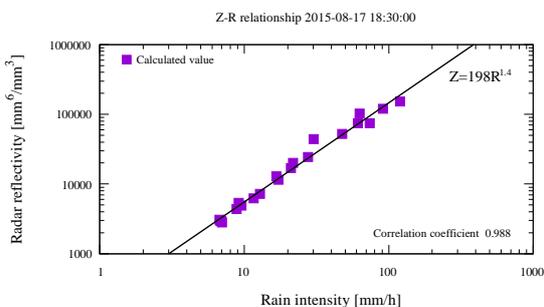


図9 Z-R関係

③降雪

降雪時のレーダ反射因子と降雪強度を解析した。降雪強度は降雪粒子の密度に依存するため、粒径と落下速度から推定する必要がある。雪片の場合のZ-R関係を図10に示す。種々の降雪粒子についてのパラメータB,βを表2,3に示す。

降水センサーから得た粒径と落下速度を用いて、ZとRの算出方法を確認した。算出した値を用いて、様々な降水種類ごとのZ-R関係の解析を行い、B,βを算出した。種々の降水粒子について解析することにより、レーダへの適用が可能である。

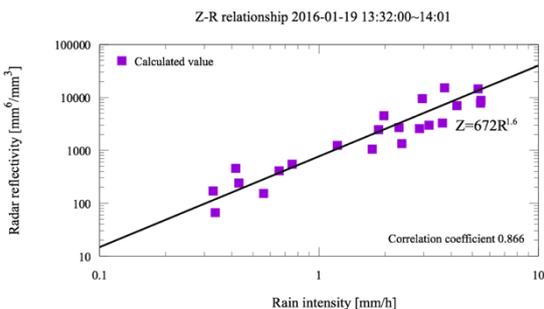


図10 Z-R関係

表2 雪片時のB,β

	Prasivel		Calculated value	
	B	β	B	β
2016/1/19	118	1.4	672	1.6
2016/1/21	98	0.9	391	1.1
2016/1/23	814	1.8	153	1.5
2016/1/24	181	1.1	453	1.2
2016/1/25	40	1.8	221	1.7
平均	250	1.4	378	1.4

表3 あられ時のB,β

	Prasivel		Calculated value	
	B	β	B	β
2016/1/19	600	0.67	537	1.1
2016/1/20	429	0.97	1051	1.5
2016/1/20	381	1.0	823	0.92
2016/1/23	124	0.68	340	0.52
2016/1/24	181	1.1	453	1.2
2016/1/25	40	1.8	221	1.7
平均	293	1.0	571	1.2

(4) ライダを用いた雲と降水情報の取得

ライダを用いて後方散乱係数の測定・解析と降水センサーによる降水種別の測定を行うことにより、雲情報と降水情報の同時取得を目指した。

①ライダと降水センサー

測定にはVaisala社シーロメータCL31を使用した。波長910[nm]のパルス状レーザ光を上空に放射し、雲や降水粒子で反射され、受信部に戻ってくる反射光強度から後方散乱係数を算出する。雲底高度は、雲底で後方散乱し受信部に戻ってくる所要時間から算出する。高度7700[m]までの後方散乱係数を10[m]間隔で30秒ごとに測定する。

一方、地上付近の降水情報と降水強度の測定には、OTT社Parsivel2を利用した。更に、天気情報として、地上付近に設置した降水検知センサーの降水種別を利用する。降水種にはSYNOP (surface synoptic observations:地上実況気象通報)に従う表記を用いる。

②ロバスト変分ベイズによる雲と

降水情報の取得

ライダの後方散乱係数は雨粒や氷の粒が浮遊する高度に強い散乱が現れる。後方散乱係数の高度分布を高度ごとの散乱回数に関するヒストグラムであると仮定し、混合t分布に対するロバスト変分ベイズによる解析を行う。高度分布を生成する各クラスにt分布を仮定し、一つのクラスが一つの降水あるいは雲に由来するとみなす。ロバスト変分ベイズにより必要なクラス数の推定が可能である。時間ごとの後方散乱係数に対して適用することで、雲の特徴を示す雲頂、雲底、雲層の算出を行う。

高度ごとの後方散乱係数にロバスト変分ベイズを適用した例を図11に示す。ロバスト変分ベイズ法により得られる雲情報および落下中の降水粒子情報との関係を解析する。

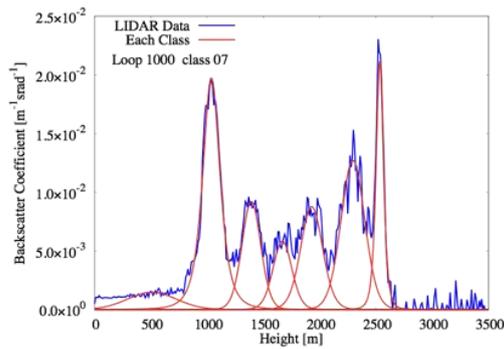


図 11 ロバスト変分ベイズの適用例

図 12 に各クラスの層厚と中心高度の関係を示す。広く分布した降水粒子群と雲群が異なる範囲に分布していることがわかる。

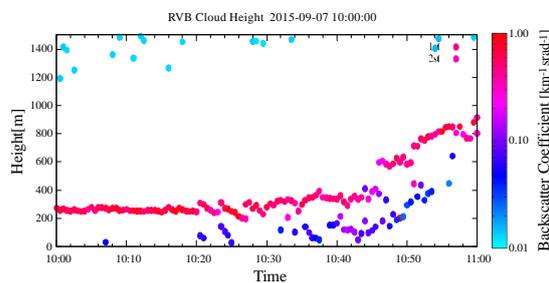


図 12 各クラスの特徴量の時間変化

降水検知センサーで降水種類を特定し、ロバスト変分ベイズ法により得られた雲と降水粒子の特徴を解析し、降水粒子群と雲を抽出することが可能となった。しかしながら、両者を分類する必要がある。

③雲と降水粒子群の分類

ロバスト変分ベイズで作られた特徴量（中心高度、層厚、後方散乱係数）を混合ガウス分布モデルとみなし、変分ベイズ法により分類する。

降雨があった2016年6月13日の一日分のライダー情報に対して変分ベイズ法を適用した。図13に後方散乱係数の時間変化を示す。また、図14に中心高度と層厚と散乱係数の関係を示す。散乱係数が大きく、中心高度と層厚に対してある一定の範囲に分布が集中しているclass0は雲、散乱係数が小さく、中心高度と層厚に対して広く分布しているclass1は降水粒子と考えられる。次に、降雪時2016年1月29日の後方散乱係数の時間変化と変分ベイズ法によるクラス分けの結果を図15、16に示す。

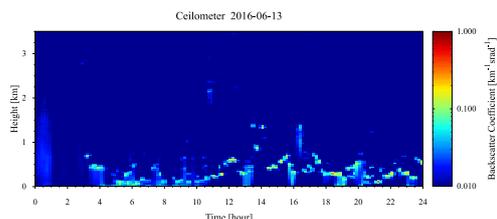


図 13 後方散乱係数の時間変化

降雪時は粒子によってレーザが反射され、雲情報を取得できないが、粒子が分類されていることがわかる。

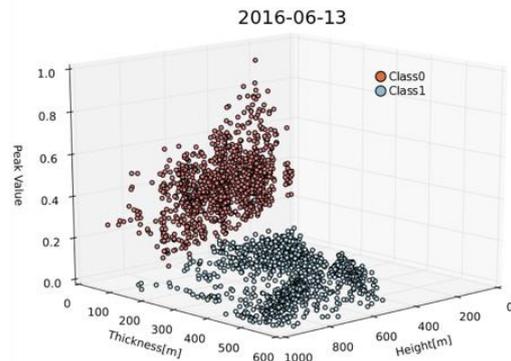


図 14 変分ベイズによる分類

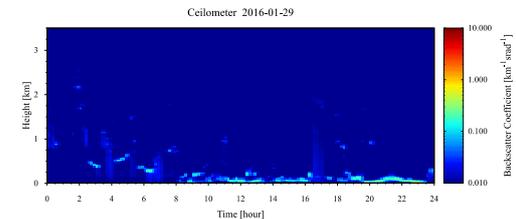


図 15 後方散乱係数の時間変化

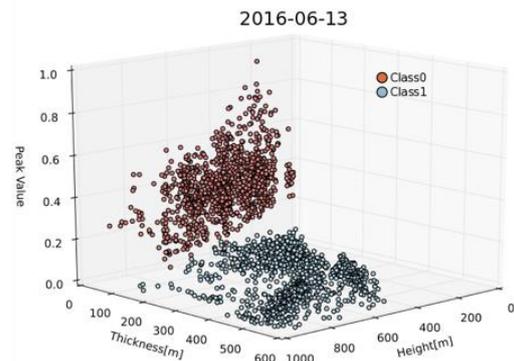


図 16 変分ベイズによる分類

ライダーにより得られた雲中心高度と雲層と散乱係数に変分ベイズ法を適用することで、雲と降水粒子の分類を行うことが可能となった。

(5) 機械学習を用いた降水種類の判別

小型垂直ドップラーレーダからのレーダ反射因子のみを用いて、降水種類の判別を試み、降水種類判別システムの実装を目標とする。

①降水種類判別モデル

降水種類の判別手法としてニューラルネットワーク (Neural Network, 以下 NN) を用いる。NN 実装用ライブラリとして Preferred Networks 社の Chainer を利用する。構築した NN は、中間層 1000 ノード、中間層の活性化関数には ReLU 関数、出力層の活性化関数としてソフトマックス関数、誤差関数に交差エントロピーを用いる。入力データには小型ドップラーレーダ MRR2 のドップラースペクトル、教師データには降水センサー Parsivel にて

測定した降水種類を用いる。時系列を考慮するため数分間分のドップラースペクトルを入力する。更に、ディープラーニングのアルゴリズムの一種である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network) を導入する。ドップラースペクトル画像を入力として、降水種類判別を行う。出力層では各降水種類の確率が最大の降水種類を選択する。NN の学習には誤差逆伝播法を用いる。

②降水種類判別システム

降水種類判別モデルを構成し、降水種類判別を行った。訓練データ全てを学習した時点をも 1 エポックとし、30 エポックの学習を行った。データの測定期間は 2016 年 1 月 1 日～12 月 31 日である。学習結果の評価の指標には、再現率と適合率の調和平均である F 値を用いる。30 エポックの学習において、誤差が最小時の強弱を含む判別結果を表 4 に示す。

表 4 各降水種類の判別

降水種類	観測数	F 値	降水種類	観測数	F 値
降水なし	900	0.945	降水なし	900	0.953
雨	900	0.976	雨 (弱)	300	0.652
			雨 (中)	300	0.660
			雨 (強)	300	0.911
雪	900	0.933	雪 (弱)	300	0.624
			雪 (中)	300	0.568
			雪 (強)	300	0.694
合計	2700	0.952	合計	2700	0.777

NN を用いた降水種類判別モデルを構成し、種類判別を行った結果、降水なし、雨、雪の 3 分類における判別では良好な F 値が得られた。強弱を含む判別では、雨の判別精度に比べ雪の判別精度が低い結果となった。時系列を考慮して降水種類判別を行うことで、さらなる判別精度の向上が期待できる。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 椎名 徹、ドップラーレーダの観測データを用いた降水種類判別システムの構築、電子情報通信学会総合大会、2017 年 3 月 23 日、名城大学 (愛知県名古屋市)。
- ② 椎名 徹、ドップラーレーダの観測データを用いたニューラルネットワークによる降水種類判別、電子情報通信学会総合大会、

2016 年 3 月 16 日、九州大学 (福岡県福岡市)。

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

- (4) 研究協力者
なし