

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289162

研究課題名(和文) 衛星観測に基づく雲底高度推定とその応用による衛星データ同化手法の開発

研究課題名(英文) Estimation of cloud bottom height using satellite observation and its application to satellite data assimilation technique

研究代表者

谷口 健司 (TANIGUCHI, KENJI)

金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号：20422321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、数値気象モデルによる降水予測精度向上のため、衛星搭載マイクロ波放射計による観測データを活用したアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化手法の開発を実施し、複数周波数帯の観測輝度温度の活用および複数時刻の観測データを活用した連続データ同化によって、モデル大気場の修正効果に向上する傾向がみられることを明らかにした。また、雲微物理量の鉛直分布を与える際の雲底高度について、温度依存性が大きく、その関係を活用することにより、適時性の高い雲底高度を推定することが可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a data assimilation technique by Ensemble Kalman Filter (EnKF) was developed to improve hydrometeors (cloud water, cloud ice, snow, grauple and water vapor) in numerical weather model. Brightness temperatures (TB) observed by microwave radiometer onboard satellites were assimilated. Assimilation of TBs in multiple frequencies showed better results than the assimilation of single frequency TB. At the same time, comparing one-time assimilation experiment, sequential data assimilation using TBs at multiple observation time also showed improvement of atmospheric condition. Predicted rainfall also showed clear improvement in the maximum values in ensemble simulations. Cloud bottom height which is used to define the lower boundary of vertical distribution of hydrometeors in the assimilation process showed clear relationship to atmospheric temperature. Using this relationship, appropriate cloud bottom height can be estimated for each assimilation time.

研究分野：水文気象学

キーワード：気象学 数値シミュレーション リモートセンシング データ同化 水循環 洪水

### 1. 研究開始当初の背景

甚大な被害をもたらす気象災害の発生と、気候変動に伴う将来における大雨の頻度増加や強化が懸念されるなか、水災害におけるソフト対策の重要性は一層高まっている。

実効性のあるソフト対策の実現には、正確な雨域と精度の高い予測降水量情報を与える数値気象予測が不可欠である。数値気象予測においては、モデル自身の高度化に加え、高品質の初期値・境界条件を与えるデータ同化の重要性が増している。一方、衛星搭載マイクロ波放射計は、複数の周波数や偏波を組み合わせることで、鉛直積算水蒸気量・土壌水分量・海面温度など様々な物理量の推定に有用であるが、降水に関わる物理量に感度を有しており、データ同化によって数値気象モデル内の雲微物理量（水蒸気量、雲水量、雲氷量、雪、霰）の改善が期待される。マイクロ波放射計による観測は 1980 年代から実施されているが、数値気象予測においては依然として活用の余地があり、さらなる研究が求められる。研究代表者は、これまで簡易的な変分法に基づくマイクロ波輝度温度のデータ同化に取り組んできたが、逐次的データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) による改善を図る。

### 2. 研究の目的

本研究では、衛星観測データを活用した雲底高度推定手法の開発と EnKF を用いたデータ同化手法の開発に取り組み、両者の統合による陸域雲微物理情報の改善と降水予測精度向上を目指す。

#### (1) 衛星搭載マイクロ波放射計及び光学センサを用いた雲底高度推定手法の開発

研究代表者は、これまでの研究において雲微物理量を対象としたデータ同化における雲頂及び雲底高度の重要性を示した (谷口ら, 2010, 2013)。雲頂高度は光学センサから推定されるが、雲底高度の広域分布推定手法はなく、データ同化の高度化の観点からも衛星による雲底高度の水平分布推定手法の確立は重要である。本研究では、シーロメータ等の地上観測機器と衛星観測との比較から、その関連を明らかにするとともに、大気に関する放射伝達モデル (RTM) を用いた、衛星観測に基づく雲底高度推定手法を開発する。

#### (2) 陸域における大気 RTM 適用に向けた様々な陸面状態での陸面放射率の推定

衛星搭載マイクロ波放射計の活用においては、土壌水分や土壌温度、植生状態によって放射率が大きく変動するため陸域での大気 RTM の適用が困難である。本研究では放射率を同化対象のひとつとし、同化過程で最適な放射率を推定する。また、効率的な推定のため、高精度陸面 RTM を用いて様々な土壌状態や土地被覆での放射率を事前に推定しデータベース化する。

#### (3) EnKF による雲微物理衛星データ同化手法の開発

変分法によるデータ同化では、アジョイントモデルの作成が不可欠であるが、非線形性の強い雲微物理過程を含む気象モデルでは、その構築は極めて困難である。研究代表者は簡易的な解法による変分型データ同化に取り組んできた (谷口ら, 2010, 2011, 2013) が、簡易的であるがために変分法本来の有効性が十分発揮されていなかった。一方、統計理論に基づくアンサンブル逐次型データ同化手法は、アンサンブルに関する行列演算を逐次適用するだけで良く (樋口ら 2012, Nakamura et al. 2006), 数値気象モデルにおいても適用が容易である。特に、非線形性と連続性の観点から、今回適用するような流体系かつ空間的広がりを持つモデルでは EnKF が適切である (Nakamura et al. 2011)。本研究では、研究代表者及び分担者のこれまでの研究を融合し、EnKF を用いた精緻な解法による改善効果の高い雲微物理衛星データ同化手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 衛星データ同化のための雲底高度の推定

数値気象モデル内の雲微物理量の鉛直分布を与える上で必要となる雲底高度の推定のための基礎的知見を得るために、シーロメータ、ディストロメータ、マイクロレインレーダ等の観測機器を用いて大気中の降水及び雲微物理量の観測を実施する。

一方、数値気象シミュレーション結果における雲微物理量の鉛直分布について統計的な解析を行い、それに基づく雲底高度推定手法を構築する。

#### (2) EnKF を用いた雲微物理衛星データ同化手法の開発

EnKF では初期値に様々な変化を与えた複数のシミュレーションを実施する必要がある。本研究では、MTSAT 及びラジオゾンデ観測から得られた雲頂高度情報を活用して、雲微物理量に摂動を与えた初期値群を作成し、シミュレーションを行う。

衛星搭載マイクロ波放射計では、複数の周波数帯による観測を実施しており、雲微物理量については、積算水蒸気量に感度を有する 23.7GHz、積算雲水量に感度を持つ 36.5GHz、雲水量・陸域降水量及び水蒸気の鉛直分布に簡感度を持つ 89.0GHz などの周波数帯による輝度温度が有用である。研究代表者らのこれまでの研究では 37GHz 輝度温度を用いていたが、本研究では複数の周波数帯の輝度温度を用いた同化実験を行うことで、同化結果及び降水予測結果に与える影響を検討する。

大気は、土壌や海洋といった地表面に比べて、短時間で変化が生じる。データ同化により大気場が改善されても、その効果の継続時間は数時間~1 日程度と考えられる。本研究

では、複数時刻におけるマイクロ波輝度温度を連続的に同化する実験を行い、同化効果の継続及び降水予測結果における漸進的な改善効果について検討を行う。

なお、数値気象モデルには米国大気研究所を中心に開発されている Weather Research & Forecasting (WRF) モデルを用いる。また、同化対象とする衛星データには AMSR-E 及び AMSR2 による観測輝度温度を用いる。

### (3) 陸面放射率推定手法の開発

マイクロ波帯リモートセンシングにおいては高周波帯では大気の影響を受けるがために、衛星観測データから陸面の放射率を推定することは困難であり、陸域大気における雲微物理量の推定などを困難としている。既往研究においては、陸面データ同化や土壌水分の推定過程で得られる放射率を活用するといったことが行われており、複雑なアルゴリズムが必要であった。

本研究では低周波数帯と高周波数帯での輝度温度の比較から両者の関連を調べるとともにルックアップテーブルを作成する。また、数値気象モデル出力等を用いた低周波数帯における陸面放射率の推定を行う。これらを組み合わせることで、データ同化過程で実施する RTM に必要な高周波数帯での陸面放射率について適時性の高いデータを作成する。

## 4. 研究成果

### (1) 温度依存性を考慮した雲微物理量の鉛直配分手法の構築

従来の雲微物理衛星データ同化においては、同化前の雲微物理量の鉛直分布を与える際に、下部境界である雲底高度を 1500m とし、各雲微物理量については放物線状の鉛直分布としていた。研究代表者らは雲底高度を様々に変えた同化実験により、顕著な影響が生じる可能性を指摘した(谷口ら, 2013)。雲の形成及び降水過程には気温が重要な因子の一つであることから、夏季及び冬季に発生した降水イベントを対象とした WRF によるシミュレーション結果を用いて、個別の時刻・格子点別での各雲微物理量の鉛直分布の上端・下端が出現する高度における気温を調べたところ、各雲微物理量で分布の下端については特定の気温の周辺に発生頻度が集中することが明らかとなった(図1)。一方、上端については下端よりもばらつく傾向がみられた。これは、モデル内における雲の発達度合いに起因するものと考えられる。

雲水、雲氷、雪、霰が分布する範囲を、光学センサから推定した雲頂高度と本解析結果において下端の最頻値が発生した気温に対応する高度とすることで、適切な鉛直を与えることが可能となった。また、当初は RTM を用いた雲底推定を予定していたが、より簡易な手法での推定が可能となった。このように求めた雲頂及び雲底高度に加えて、マイクロ波放射計観測より推定された積算雲水量

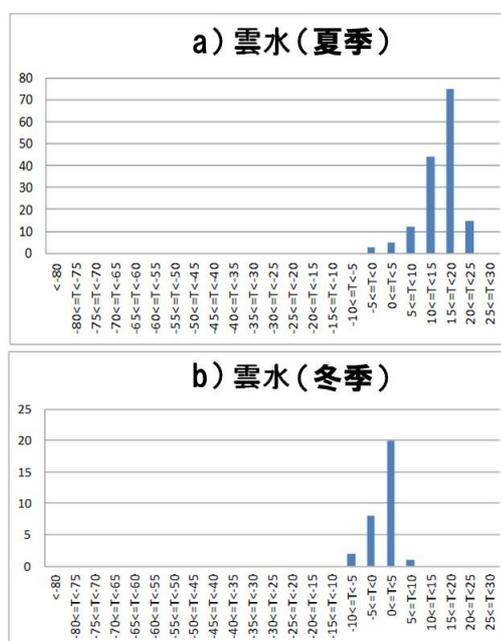


図1 雲水量分布の下端となる高度における気温とその頻度分布。縦軸は頻度、横軸は気温の範囲。

表1 実験対象領域内での各周波数帯での観測輝度温度と推定値の平均二乗誤差。実験名の数字が1つのものは単一周波数を同化したもの、数字が2つ、3つのものは2周波数又は3周波数を同化したもので、数字の順番は同化の順序を表す。

実験名	平均二乗誤差 (Kelvin)		
	37GHz	23GHz	89GHz
同化なし	14.9	7.1	42.3
A37	14.3	6.9	39.4
A23	15.1	7.3	40.5
A89	15.0	7.2	40.1
A37-23	14.3	6.9	39.4
A37-89	14.3	6.9	39.4
A23-37	15.1	7.3	40.4
A23-89	15.1	7.3	40.3
A89-37	15.0	7.2	40.1
A89-23	15.0	7.2	40.1
A37-23-89	14.3	6.9	39.4
A37-89-23	14.3	6.9	39.4
A89-37-23	15.0	7.2	40.1

プロダクトからアンサンブルメンバーを作成し、EnKFによるデータ同化プログラムを構築した。

(2) 複数周波数帯の輝度温度を用いた雲微物理衛星データ同化

マイクロ波帯では、各周波数帯で異なる物理量に感度を有することから、データ同化において異なる周波数帯の輝度温度を利用することで、同化結果に違いが生じることが予想される。また、複数周波数帯のデータを同化することにより、改善効果の向上も期待される。ここでは、従来用いていた 37GHz の輝度温度（垂直偏波）に加えて 23GHz、89GHz の輝度温度（いずれも垂直偏波）を同化した。なお、同化においては一つの周波数帯の輝度温度の同化を行ったのち、異なる周波数帯の輝度温度データを同化することとした。同化は、単一周波数、ふたつの周波数、3 つの周波数帯のデータを用いる場合にわけて実験し、複数周波数を同化する際には、同化の順序を入れ替えた実験も行った。

同化順序の違いと同化後の輝度温度と観測データとの誤差を比較すると、複数周波数を用いた場合、最初に同化した輝度温度の影響が大きく、同化対象データを追加したことによる違いは小さいが、単一周波数のみの同化に比べて誤差がやや小さくなる傾向がみられた（表 1）。単一周波数の同化に着目すると、37GHz 帯の輝度温度の同化では、評価対象とした 3 つの周波数帯の同化後の輝度温度が、同化前に比べて誤差が小さくなった。一方、23GHz、89GHz の輝度温度については改善効果が限定的である傾向が認められた。

一方、複数周波数のデータ同化は計算負荷が大きく、計算負荷の軽減を実現するために局所アンサンブル変換カルマンフィルタの実装などが必要である。

(3) 連続データ同化の同化結果及び降水予測結果への影響

大気中の雲微物理量は時間変動が大きく、同化効果の持続が期待されるのは数時間～1 日程度と考えられる。そこで、複数時刻におけるマイクロ波輝度温度を用いた連続的な同化を行い、事前の同化効果が継続するうちに再度大気場の改善を図り、データ同化及び降雨予測結果における漸進的な改善効果について検討する。ここでは、3 日半のシミュレーション期間の間に 5 回のデータ同化を実施することとした。

1 回目のデータ同化では、同化を行わなかった場合に比べて誤差の減少がみられた。そのうち、2 回目のデータ同化を行うことで、わずかではあるが誤差が減少し、連続的な同化による改善がみられた。一方、3 回目以降の同化においては影響が非常に小さく、ほとんど差はみられなかった（表 2）。今後、同化効果の蓄積の時間的限界についての解析と検討が必要である。また、同化結果を用いた降雨予測実験結果では、アンサンブル間の最大値において局地的な大雨の特徴が明瞭になり、降雨分布にも改善がみられた（図 2）。

なお、連続同化実験においては、同化前に

表 2 各同化時刻における対象領域内での平均二乗誤差のアンサンブル平均（上段）。単位はいずれも Kelvin。

実験	同化日時（時刻は UTC）				
	6/27 17 時	6/28 04 時	6/28 18 時	6/29 04 時	6/29 17 時
ORG	17.90	12.85	17.86	20.81	16.82
AS1	<b>17.76</b>	12.41	17.20	20.21	17.00
AS2		<b>12.38</b>	17.20	20.25	16.97
AS3			<b>17.21</b>	20.25	17.01
AS4				<b>20.25</b>	17.00
AS5					<b>17.00</b>

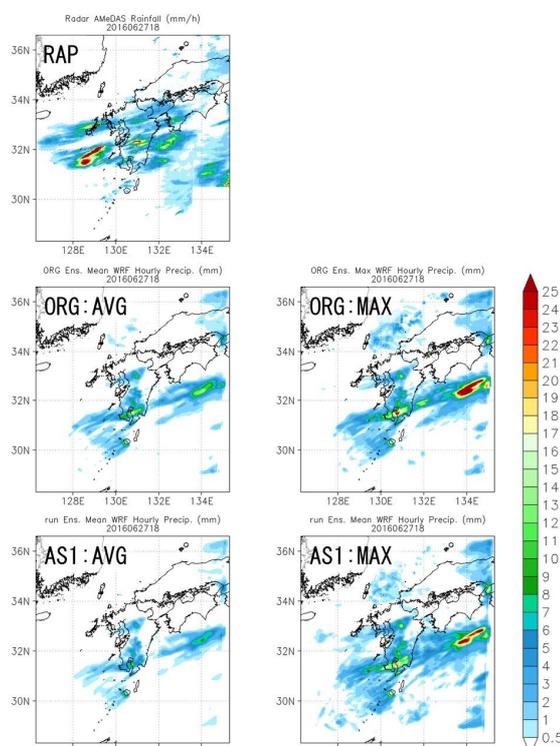


図 2 2016 年 6 月 27 日 18UTC までの前一时间降雨量分布。RAP：レーダアメダス解析雨量，ORG:AVG：データ同化を行わない場合のアンサンブル平均，ORG:MAX：データ同化を行わないアンサンブルシミュレーションの最大値の合成図，AS1:AVG：1 回目のデータ同化を行った大気場を用いた場合のアンサンブル平均，AS1:MAX：1 回目のデータ同化を行った大気場を用いた場合のアンサンブルシミュレーションの最大値の合成図。カラーバーの単位は mm/h。

再度雲微物理量の鉛直分布を推定すると、同化効果が継続されなくなる可能性があるため、ラグ平均予報法を応用したアンサンブルシミュレーション手法（Taniguchi 2018）を開発し、適用した。これによりアンサンブルシミュレーション実施の簡易化が実現され

たとともに、計算領域の境界付近における不自然な挙動の回避とシミュレーションの安定化が実現された。

本研究では様々な設定での EnKF によるデータ同化実験を実施したが、大気場の改善については限定的である。今後、改善効果の向上を図るには数値気象モデルによる第一推定値の改善が必要と考えられ、データ同化実施前の処理手法等の検討が不可欠である。

#### (4) 低周波及び高周波帯の陸域放射率の比較

データ同化過程において WRF による出力から輝度温度を推定する際に実施する RTM に必要となる陸面放射率の推定のため、低周波数帯と高周波数帯での輝度温度の比較を行い両者の関連を調べたところ、夏季においては両者の間に相関がみられるものの、冬季においては非一価的な関係がみられた。このような不明瞭な対応関係について明らかにするため、土地被覆別の両者の関係について検討を行った。広範囲にわたって比較的一様な土地被覆が期待できるモンゴル高原を対象として、草地や裸地などの土地被覆別に比較を行ったところ、一価の関係となる傾向がみられ、二つの周波数帯間の関係が土地被覆ごとに異なることが示唆された(図3)。また、夏季に比べて、秋から冬にかけて周波数帯間の関係が不明瞭となる傾向がみられ、土壤の凍結や薄い積雪層の存在が陸面放射率の関係に影響することが示唆された。今後は、土地被覆別に陸面放射率の推定を行い、周波数帯間での関係をまとめたルックアップテーブルを構築する予定である。

#### 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8件)

Taniguchi, K., A simple ensemble simulation technique for assessment of future variations in specific high-impact weather events, Journal of Geophysical Res.: Atmosphere, 査読有, Vol.123

DOI:10.1002/2017JD027928

Sviridova, N., K. Nakamura, Local noise sensitivity: Insight into the noise effect on chaotic dynamics, Chaos, 査読有, Vol.26

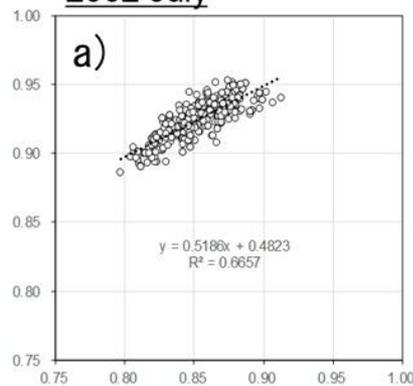
DOI:10.1063/1.4970322

Kouketsu, T., M. Kubo, 他7名(8番目), A hydrometeor classification method for X-band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environment, J. Atm. Ocean. Tech., 査読有, Vol.32, 2015, 2052-2074

DOI:10.1175/JTECH-D-14-00124.1

Kimura, A., A. Celani, H. Nagao, T.

#### 2002 July



#### 2002 Dec.

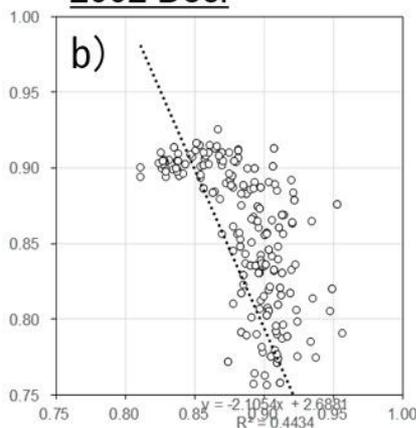


図3 モンゴル高原での荒地やまばらな植生域における6.9GHz及び89.0GHzの周波数帯での水平偏波に関する陸面放射率の比較 .a) 2002年7月, b)2002年12月の結果。

Stasevich, K., Nakamura, Estimating cellular parameters through optimization procedures: elementary principles and applications, Frontiers in Physiology, 査読有, Vol.6, 2015, 1-9  
DOI: 10.3389/fphys.2015.00060

Gavrilov, S., M. Kubo, 他7名(2番目), Feature Analysis and Classification of Particle Data from Two-Dimensional Video Disdrometer, Advances in Remote Sensing, 査読有, Vol.4, 2015, 1-14  
DOI:10.4236/ars.2015.41001

中村和幸, 統計的時系列解析2: 状態空間モデル, 応用数理, 査読無, 24巻, 2号, 2014, 26-31

中村和幸, 統計的時系列解析3: 非線形・非ガウス状態空間モデル, 応用数理, 査読無, 24巻, 3号, 2014, 33-38

中村和幸, 統計的時系列解析4: グラフィカルモデルとデータ同化, 応用数理, 査読無, 24巻, 4号, 2014, 29-35

[学会発表](計18件)

Taniguchi, K., Assimilation of high-frequency microwave brightness temperature for improving hydrometeors

in numerical weather prediction model, Asia Oceania Geoscience Society 2017 Meeting, 2017 年

中村和幸, データサイエンスにおける数理と実問題との関係ならびに応用, スーパーセンシングフォーラム, 2017 年

中村和幸, 時系列解析における非線形情報解析理論とその応用, RIMS 共同研究, 2017 年,

中村和幸, 動的システムにおける不確かさとデータサイエンス, 日本行動計量学会第 45 回大会, 2017 年

中村和幸, ベイズ型時系列・時空間解析による自然現象・社会現象の理解, 愛媛大学談話会, 2017 年

広瀬 望, 谷口健司, 開発一郎, モンゴル高原における陸面放射率と地表面水文学の関係, 日本リモートセンシング学会第 63 回学術講演会, 2017 年

Taniguchi, K., Assimilation of multi-frequency brightness temperature for improving cloud and water vapor using EnKF technique, Asia Oceania Geoscience Society 2016 Meeting, 2016 年

Taniguchi, K., Effects of initial relative humidity conditions in atmosphere of high-frequency brightness temperature observed by spaceborne microwave radiometer, American Geophysical Union Fall Meeting 2016, 2016 年

中村和幸, データ同化による不確かさを持つ現象の理解と予測ならびにモデリングへの展開, RIMS 研究集会, 2016 年

中村和幸, 河野 穰, 粒子径物理モデルのマクロパラメータ推定と統計モデリング, 統計関連学会連合大会, 2016 年

中村和幸, アンサンブル型データ同化におけるノイズ項モデリングとマクロパラメータ推定への応用, 第 6 回理研・京大合同データ同化研究会(招待講演), 2016 年

広瀬 望, 大気データ同化の境界条件となる陸面放射率推定の検討, 日本リモートセンシング学会 第 61 回学術講演会, 2016 年

Taniguchi, K., Assimilation of microwave brightness temperature using EnKF for improving cloud and water vapor in the atmosphere, Asia Oceania Geoscience Society 2015 Meeting, 2015 年

中村和幸, 静的・動的システムにおける不確かさの定量化, 第 22 回信頼性設計 WS & 第 35 回最適設計研究会(招待講演), 2015 年

Nakamura, K., Y. Kono, Fast and stable estimation of macroscopic parameters in particle systems by data assimilation, The 47th ISCIIE International Symposium

on Stochastic Systems Theory and its Application, 2015 年

中村和幸, 現象理解のためのシミュレーションと統計解析の融合およびその応用, 統計数理セミナー, 2015 年

中村和幸, 工学応用の観点からデータ同化とその特徴, 日本機械学会計算力学部門設計に活かすデータ同化研究会, 2015 年

中村和幸, 清水脩輔, 非圧縮性流体の粒子法解析におけるデータ同化と誤差モデリング, 第 63 回理論応用力学講演会, 2014 年

〔図書〕(計 2 件)

中村和幸, 他, 日科技連, 新版 信頼性ハンドブック, 2014, 915

中村和幸, 他, 明治大学出版会, 現象数理学の冒険, 2015, 220

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

「降雪仕組み 詳しく調査 高性能レーダで県立大が観測開始」, 北陸中日新聞朝刊, 2016 年 12 月 25 日

<http://eco.chunichi.co.jp/news/2016/12/003649.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 健司(TANIGUCHI, Kenji)

金沢大学・理工研究域・准教授

研究者番号: 20422321

(2) 研究分担者

中村 和幸(NAKAMURA, Kazuyuki)

明治大学・総合数理学部・准教授

研究者番号: 40462171

(3) 広瀬 望(HIROSE, Nozomu)

松江工業高等専門学校・環境・建設工学科・准教授

研究者番号: 40396768

(4) 久保 守(KUBO, Mamoru)

金沢大学・理工研究域・助教

研究者番号: 90249772