

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22540448

研究課題名（和文）

小型降水粒子観測プローブの開発

研究課題名（英文）

Development of low-cost and light-weight hydrometeor imaging probe

研究代表者

民田 晴也 (MINDA HARUYA)

名古屋大学・地球水循環研究センター・技術専門職員

研究者番号：80422765

研究成果の概要（和文）：

気球観測を目標に、使い捨て運用を実現する廉価（1万円強）で軽量の降水粒子の形状とその粒径分布(DSD)を計測するプローブ（センサ部）を開発した。但し、気球観測は将来目標であり、研究期間中は軽量で廉価な有線データ転送方式の地上観測機器として完成度を高めた。プローブは高速ラインスキャナ方式で、計測幅 16 mm、分解能 125 μm、スライスレート 33 kHz で降水粒子形状を計測し、計測粒子画像から粒径を求め DSD を導く。プローブ観測 DSD を評価するため、Distromet 社 RD80 雨滴粒径分布計との比較観測を実施した。その結果、プローブは RD80 と似た DSD 形状を示し、地上観測では統計的に有意な DSD を表現できる粒子捕捉率を実現できた。降雪観測でプローブは-25～0℃の気温で安定動作し、雪の単結晶、過冷却水滴、霰などの形状計測ができた。使い捨て設計で数ヶ月間の長期連続観測が達成でき、廉価な地上観測機器として利用できる性能を確認できた。

研究成果の概要（英文）：

Toward ballooning precipitation observation, we developed a new low-cost hydrometeor imaging probe, whose cost is nearly 10,000 Japanese yen. The probe is a sort of high-speed line-scanner, and it captures hydrometeor monochrome image with 128 horizontal pixels of 125 μm resolution and the slice-rate of 33 kHz currently. On the ground-base observation, the probe performs good as a disdrometer measuring raindrop-size distributions (DSD). For the DSD validation, we employed a commercially available disdrometer of Distromet RD80, then the validation demonstrates that the probe captures similar DSD shapes as in RD80. The results ensure a capture rate for raindrops to express reasonable DSD shape. In winter seasons, the probe well performed in low-temperature environment of -25 — 0 deg C and it successfully captured solid-state hydrometeors image such as snowflakes and graupels. In addition, the probe stably performed in a long period observation for several months, even if the probe is designed as disposal operation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象

キーワード：気象学・自然現象観測・計測工学

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロ波降水リモートセンシングは、降水粒子の含水量と粒径分布 (DSD) の遠隔計測技術開発で完成する。雪などの固体降水粒子の含水量リモートセンシングは不可能であるが、近年、多周波解析による DSD 推定技術、偏波降水レーダによる DSD 推定と降水粒子種別判別 (雨、雪、霰など) の技術開発が行われ、その検証実験として上空の降水粒子の直接観測の必要性が高まっている。既に、ビデオゾンデと偏波降水レーダの同期観測実験から、偏波シグナルを利用した粒子種別判別アルゴリズムの検証実験が行われている。ビデオゾンデの観測降水粒子画像は上空に存在する降水粒子の種別判別には強力なツールであるが、その粒子捕捉率は低く、統計的に有意な DSD を表現するに十分なサンプル数が取得できない欠点があり、レーダシグナルの定量的な評価 (レーダ降水強度の高精度化) には課題が残っている。特に、気球観測では上昇するプラットフォームから密な高度分解能で DSD 観測を行うためには短時間で DSD を代表できる粒子捕捉率が要求される。

(2) 融解層は雨、雪、霰、霰など様々な降水粒子が混在するユニークな層であり、降水メカニズム解明にも重要な層である。偏波降水レーダは融解層に多様なレーダシグナルを観測する。小型降水粒子観測プローブの開発モチベーションは融解層に存在する降水粒子を直接観測し融解層構造の知見の深化と融解層リモートセンシング技術の向上への貢献である。マイクロ波降水リモートセンシング技術で重大な未解決問題は、雪や霰など固体降水粒子のマイクロ波散乱について理論的・観測的に知見が乏しいことにある。散乱の理論計算では、固体降水粒子の3次元構造モデル化が未解決であり、更に、固体降水粒子は様々な含水量、形状と向きで存在し得るため、個々の粒子のマイクロ波散乱問題を空間平均のレーダシグナルを用いて検証することを困難にしている。融解層観測技術向上と固体降水粒子のマイクロ波散乱問題の解決に向けて、レーダビーム内に実在する降水粒子とレーダシグナルの観測データベース構築が有効な手段である。

(3) 時空間変動の激しい降水現象の正確なサンプリング、降水メカニズムの解明には密な観測ネットワークが好ましく、廉価な地上観測機器としての開発意義は大きい。地上観測雨量からレーダ降水強度を補正するレーダアメダスにとっても、密な観測ネットワークは補正精度の向上につながる。空間平均値のレーダシグナルを、一点の点雨量計で補正することは、空間変動の激しい降雨に対するサンプリング誤差の影響を受けやすい。レーダビーム内に複数の地上観測点が存在すれば、

地上と上空の差はあるが、サンプリング誤差が緩和されレーダ降水強度推定技術の高精度化に貢献ができる。更に、レーダ反射因子を算出可能な雨滴粒径分布計の密なネットワークの構築は、レーダ受信電力校正とレーダ降水強度推定の高精度化にもたらすインパクトは大きい。

2. 研究の目的

気球観測で上空レーダビーム内に存在する降水粒子の形状と粒径分布の計測を実現する、使い捨て運用が可能な1万円強の廉価で軽量の粒子観測プローブ (半導体レーザを利用した降水粒子形状計測ラインスキャナ) の開発を行う。本プローブは、計測粒子画像から粒径を求め DSD を得る仕組みであり、ビデオゾンデの粒子画像取得能力を備え、ビデオゾンデの弱点である粒子捕捉率を改善を目標としている。気球観測自体は研究期間後の課題であり、研究期間中はプローブ開発に注力し、地上観測用の光学式雨滴粒径分布計として完成度を高めることに専念した。冬季には、降雪粒子の試験観測を行い、固体降水粒子のマイクロ波散乱問題解決に向けた降雪粒子の形状計測能力の評価と取得粒子画像の解析手法の初期検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 降水粒子の形状計測

野外観測プローブの開発に先駆け、高速落下する降水粒子の形状計測を実現する廉価な構成部品の調査と計測アルゴリズム (マイコンプログラム) の効率化を図り、プローブの基本設計を行った。雨滴粒子は小粒径で、透明度が高く、落下速度が速い。粒径 1 mm (2 mm) の粒子で地上終端速度が 4 m s^{-1} (6 m s^{-1}) と速く、雨滴の形状計測には高感度、高分解能、高スライスレートが要求される。廉価で軽量のプローブ開発のため、光源には半導体レーザと樹脂製の非球面レンズを用いシート光を生成した。受光部は直接シート光を受光素子 (Line Photo Diode) で受けるため、計測幅と分解能は受光素子の仕様に依存する。高スライスレートの実現では、廉価なマイコンには 2 MHz を超える A/D 変換モジュールは搭載されていないため、コンパレータ入力 (DI: Digital Input) を利用したモノクロ画像取得で対応した。

プローブの基本設計後、野外観測で計測安定性の評価と向上に努めた。プローブは降水中に光学部 (レンズや受光素子) に付着した降水粒子や水滴の影によりデータ更新が継続状態となり計測不能に陥ることがある。降水粒子捕捉率を下げず、光学系への水滴付着を防ぐハウジング構造の試行錯誤を行い、計測アルゴリズムを改良し計測安定性の向上

と降水観測ノウハウの蓄積を行った。

(2) DSD 観測能力の評価

気球観測ではプラットフォームが上昇するため、プローブには短時間で統計的に有意な DSD を代表できる粒子捕捉能力が求められる。気球の上昇速度を 5 m s^{-1} と仮定すると 1 分間に 300 m 上昇する。この 1 分間に DSD を代表するに最低限の粒子サンプル数 (≥ 100) を捕捉できることが理想である。降雨現象により単位体積中の粒子数は異なるが、プローブ小型化と DSD 代表性を考慮し、まずは、 1 mm h^{-1} 以上の降雨に対し 2 分間に 100 サンプル以上の計測能力を目標とした。現在、雨滴を対象とした DSD の地上観測機器が幾つか市販されている。降雪粒子の DSD 観測は未だ研究段階である。本研究では、プローブの DSD 観測能力の評価のため、降雨を対象に、30 年以上の観測実績がある信頼性の高い Distromet 社 RD69/80 雨滴粒径分布計との比較検証観測を実施した。この検証実験からプローブの弱点を整理し、RD69/80 の観測 DSD に近い形状の DSD が取得できるように改善を加えた。粒子補足率は検出面積 (計測幅×計測光路長) に比例し、小さな検出面積では DSD を表現するのに必要なサンプル数が取得できない。計測幅の拡張は技術的に難易度が高く、結果、高コストとなるため、光路長の延伸が容易な検出面積の拡大方法である。プローブの小型化を考えると、安易に光路長を延伸できず、短時間で有意な DSD を代表できる最短光路長を調べた。また、DSD 検証実験は、プローブ観測データとレーダシグナルの比較解析が行えるように、偏波降水レーダの観測レンジ内で実施した。

降雨観測では、プローブは雨滴と同時にハウジングで弾け生じる非雨滴を観測するため、観測 DSD から非雨滴の排除が必要となる。雨滴に対して非雨滴の落下速度は遅く、 0.5 mm 径以上の雨滴であれば、落下速度が明確に異なり分離が可能である。計測粒子画像のスライス数は暗に雨滴落下速度を示すため、雨滴粒径とスライス数の関係を利用した非雨滴の分離を行った。ここで、雨滴粒子の落下速度は比較的分散が少なく、無風状態の屋内実験との乖離が少ない特徴がある。

4. 研究成果

(1) 降水粒子の形状計測

小粒径の雨滴形状計測のため高分解能で計測誤差の小さなレーザシート光源が必要であり、落下速度の速い雨滴粒子に対し十分なスライス数で画像取得が可能な高スライスレートの実現が必要である。最終的に、分解能 $125 \mu\text{m}$ 、計測幅 16 mm 、スライスレート 33 kHz で雨滴に対して 7 スライス以上のスライス数で粒子形状計測が可能な高速ライン

スキャナを 1~2 万円を実現した。図 1 に 2012 年 6 月 22 日 0230 JST にプローブが計測した粒径 2 mm を超える雨滴粒子画像の例を示す。風の影響で斜めに落下する雨滴を計測している。

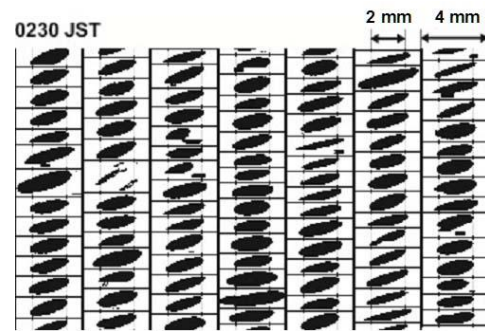


図 1 プローブ計測雨滴画像 (粒径 2 mm 以上) 2012/06/22 0230 JST に愛知工業大学観測サイトで観測した雨滴粒子の例

表 1 プローブ主要諸元

光源	半導体レーザ (780 nm, 10 mW)
レンズ	25 mm 径 非球面樹脂レンズ
シート光幅	16 mm
受光素子	Line Photo Diode array (LPD) 125 μm 分解能、128 素子
SliceRate	33 kHz
プローブ形状	450 mm×150 mm×60 mm

(2) DSD 計測能力評価

プローブが観測した DSD の定量的な評価を行うため、RD69 および RD80 雨滴粒径分布計との比較検証実験を行った。名古屋大学では RD80 と、愛知工業大学では RD69 との比較観測を実施した。図 2 にプローブと RD80 の計測雨滴数の時系列を示す。プローブの雨滴検出数は非雨滴や計測シート光エッジで検出した水滴は排除してある。この降水事例では、0030 JST 以降にプローブは毎分 50 sample 以上の雨滴を検出、降水強度で 1 mm h^{-1} 以上を記録している。図 3 に 2012 年 6 月 22 日の 5 分間平均降水強度の時系列を示す。降水強度はプローブが過小、過大評価する時間帯があるがトレンドはよく一致している。図 4 に、プローブと RD80 がほぼ等しい降水強度を観測した時刻 0150 JST (10 mm h^{-1}) と 0220 JST (20 mm h^{-1}) の 5 分間積算観測 DSD とその指数分布近似 DSD :

$$n(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$$

を示す。ここで、 $n(D)$ は number density、 D は Diameter、 N_0 は切片、 λ は傾きであり、 λ は DSD 形状を代表し、プローブと RD80 の DSD 形状の相似性を表す指数である。図 4 から、

プローブと RD80 の観測 DSD は良い一致を示し、プローブは RD80 と同等の DSD 形状を観測できることが確認できる。0220 JST の λ の差は約 0.5 である。図 3 に降水強度に加え、指数分布近似 DSD のパラメータ N_0 と λ の時系列比較を示す。 N_0 と λ の時系列は良い一致を示し、特に DSD 形状の相似性を示す λ は、降雨時間全体で ± 0.5 以内の差に収まり、プローブは一連の降雨の中で RD80 と同様の DSD 形状を観測していることが確認できる。

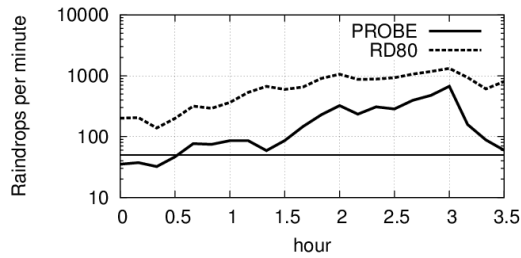


図 2 2012 年 6 月 22 日にプローブと RD80 が計測した雨滴数の時系列。直線はサンプル数 50 のマーカ。

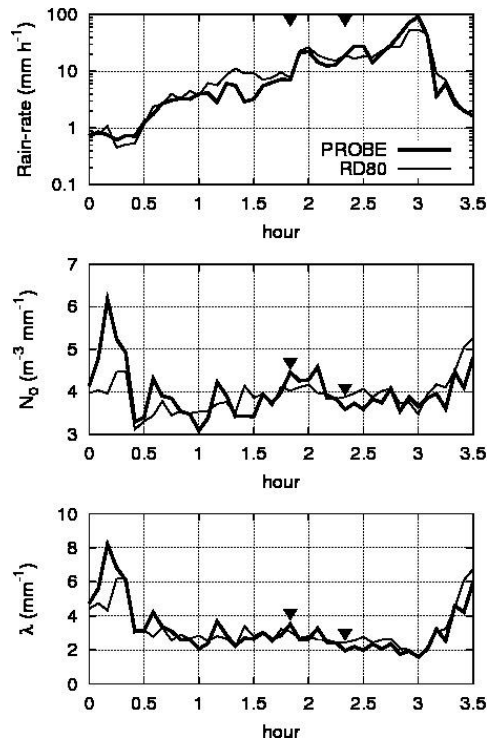


図 3 2012 年 6 月 22 日のプローブと RD80 の観測降水強度、指数分布近似 DSD パラメータ (N_0 , λ) の時系列。▼は図 4 に示す DSD 観測時間。

図 5 に、検証期間全体 (2012/06/21-08/31) のプローブと RD80 の観測 DSD の比較を示す。図は 10 分間積算 DSD から算出した降水強度、 λ 、 N_0 の比較を示す。降水強度比較は 20% 程度の過少評価を示唆するが、 λ 、 N_0 は分散はあ

るが 1 対 1 の関係を示し、DSD 形状は良い一致を示している。結論として、プローブは RD80 と同様の DSD 形状を観測できることが確認できた。数濃度 (降水強度) に 1.25 の補正係数を与えることで、地上観測機器として統計的に有意な DSD 計測ができる廉価な観測機器が完成した。この補正係数は設計雨滴検出面積 (計測幅 \times 計測光路長) と実効面積の差に起因すると考える。計測エッジ部に現れる粒子は全体形状が得られず粒径が求まらない。プローブハウジング形状と風の影響で計測光路長で粒子不通過部分の存在が原因と考える。

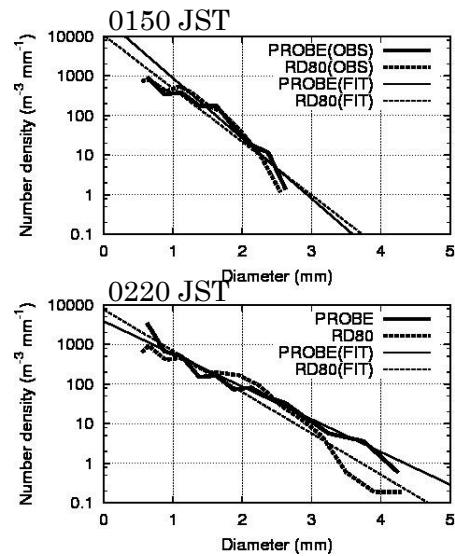


図 4 2012 年 6 月 22 日のプローブと RD80 観測 DSD (5 分積算) と指数分布近似

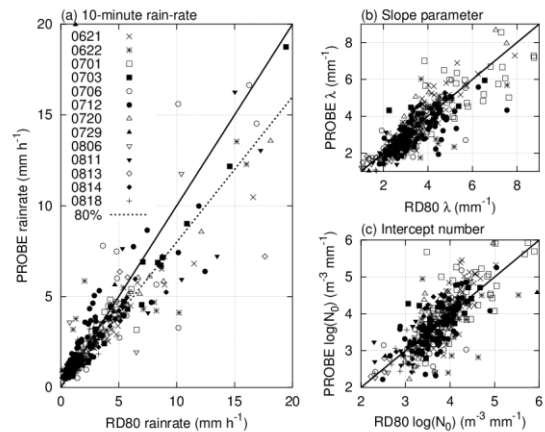


図 5 プローブと RD80 が 2012 年夏季に観測した (a) 10 分間平均降水強度、(b) DSD 傾き、(c) DSD 切片の比較。

(3) 降雪粒子観測

プローブ開発のモチベーションは、雨、雪、霰などが混在する融解層 (0°C 高度) に存在す

る降水粒子観測の実現であり、氷点下の低温環境下での安定動作が必要である。低圧環境試験はできないが、2010年2月上旬に厳冬期の北海道陸別町で自然環境を利用した低温環境試験を兼ねた降雪粒子計測試験を行った。その結果、プローブは0～-25℃の気温で雪の単結晶や過冷却水滴の安定計測が確認できた。2012年2月上旬には新潟県長岡市で着雪しやすい湿雪の計測試験を行った。氷点下の気温では霰を中心に観測し、気温が0℃以上で大粒径の雪片を観測した。湿雪は落下中に衝突・併合して10mmを超える粒径に成長することがあり、計測幅16mmのプローブでは大粒子雪片はエッジ部で捉える確率が高くなり、粒子全体画像計測には計測幅が不足するが、粒子種別判定には有効である。2013年の1月上旬から3月上旬まで、石川県白山市で連続降雪観測を実施した。石川県は降雪は多いが、積雪は少なく、融雪機能を有しないプローブでも安定した連続観測を達成した。また、2013年2月上旬には計測幅を拡幅(48mm; 384素子)した降雪粒子専用のプローブを急造し試験観測を行った。その結果、計測幅拡幅により大粒子の捕捉率の改善が確認できた。図6に計測幅を拡幅したプローブによる雪片の形状計測結果の例を示す。図のコラム幅は25mm(200素子)分の画像を表示している。10mm径に近い粒子も計測エッジから余裕を持って形状計測できている。計測素子数の増大は搭載マイコンに高処理能力を要求し、スライスレートを低下させるため、降雪粒子観測は200素子(25mm幅)で十分であることを示唆している。

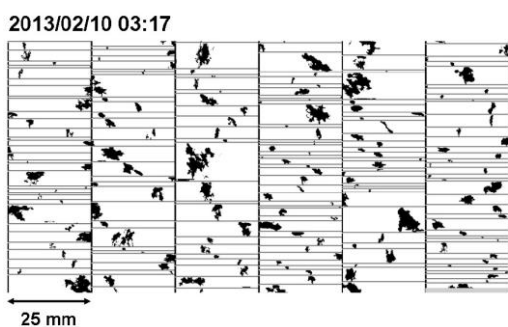


図6 降雪粒子専用観測プローブによる雪片の計測画像の例。図は、受光素子の右から200素子(25mm)分を図化。

(4) 総括と課題

気球観測の実現を視野に、使い捨て運用が可能な廉価(1万円強)な降水粒子形状とそのDSDを計測できるプローブを開発した。開発プローブは、ビデオゾンデの粒子画像計測機能を保持し、粒子捕捉率の大幅な改善を目的とした。無線データ送信など、気球観測に向けては解決が必要な課題は残っているが、

廉価な地上雨滴粒子観測機器としては完成レベルに達することができた。今後は、名古屋大学が所有するビデオゾンデ受信システムを利用した気球観測に向けて、プローブの計測粒子画像をビデオゾンデ方式のアナログビデオ信号に変換するモジュール開発、また、高層気象観測ラジオゾンデを利用した上空のDSD観測の検討を行い、気球観測実現に向けた継続開発を行う予定である。ラジオゾンデの拡張データ入力ポートは、画像伝送には通信容量が不足するが、プローブ計測粒子画像から得た粒径、DSDデータの送信は可能である。

完成したプローブは廉価な地上観測機器として、密な観測ネットワーク構築への道を開き、高空間分解能の観測データセットの取得を可能とし、時空間変動の激しい降水現象のメカニズム解明への貢献が期待できる。また、地上雨量計ネットワークを利用したレーダ降水強度補正技術でも、比較・補正点が増大することで精度向上が期待できる。特に、開発プローブはレーダ反射因子に換算ができる密なDSD観測ネットワークの構築を可能とし、レーダ降水強度の高精度化への大きな貢献が期待できる。

降雪粒子観測では解決すべき課題が多く残っている。開発プローブはラインスキャナ方式の2次元画像取得であり、計測鉛直分解能は粒子の通過速度に依存する。雨滴粒子は粒径と落下速度の関係に分散が少なく、1ビームのラインスキャナでもある程度の精度で鉛直分解能は担保ができる。しかし、降雪粒子は含水量や粒子形状、風の影響で落下速度は大きく分散し、絶対鉛直分解能計測の達成には、上下オフセットした2ビーム方式で粒子通過速度を計測して補正を加えるか、側面からのカメラ撮影が必要である。将来は、大粒子のみを撮影するカメラ機能を搭載したプローブ開発を行いたい。現在の1ビームのプローブでも降水粒子種別判定は可能であり、偏波レーダによる降水粒子種別判定アルゴリズム検証に有効である。粒子形状の絶対スケール計測は、粒子画像から降雪粒子の3次元構造モデルを開発、マイクロ波散乱計算を行い、レーダ観測値と比較することで、固体降水粒子のマイクロ波散乱問題を理論的・観測的に解決する糸口となり得る。

研究期間中はプローブ開発に追われ、観測データに対し十分な解析ができなかった。プローブの検証観測実験を国土交通省のX-band 偏波降水レーダの観測レンジ内で行ったため、今後、計測粒子画像と偏波シグナルの比較解析が可能であり、プローブがもたらす科学的意義の評価を行う予定である。

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2件)

- ① H. Minda, N. Tsuda, Low-cost laser disdrometer with capability of hydrometeor imaging, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 7(S1), 2012, 132-138, (査読有)
② 辻淳一, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, 近赤外レーザーを利用した降水粒子観測プローブの開発, 愛知工業大学研究報告, 47, 2012, 209-214, (査読無)

[学会発表] (計9件)

- ① 民田晴也, 中村健治, 津田紀生, 低コスト Laser disdrometer の開発—強雨中の計測性能—, 日本気象学会, 2013年5月18日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京)
② 民田晴也, 中村健治, 津田紀生, 低コスト降水粒子観測プローブの開発 (その2), 日本気象学会, 2012年5月29日, つくば国際会議場
③ 牧野智也, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, 半導体レーザープローブによる雨滴粒径分布計測, 電気関係学会 東海支部連合大会, 2012年9月25日, 豊橋技術科学大学
④ 民田晴也, 中村健治, 津田紀生, 低コスト降水粒子観測プローブの開発, 日本気象学会, 2012年10月3日, 北海道大学
⑤ 牧野智也, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, レーザプローブを用いた降水粒子観測, レーザー学会中部支部 若手研究者研究発表会, 2012年12月14日, 名城大学 (名古屋)
⑥ 牧野智也, 辻淳一, 板倉健二郎, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, レーザによる降水粒子形状計測プローブの観測実験, レーザー学会中部支部若手研究発表会, 2011年12月9日, 名城大学
⑦ 民田晴也, 中村健治, 津田紀生, 小型降水粒子観測プローブの開発, 日本気象学会, 2011年11月16日, 名古屋大学
⑧ 辻淳一, 永田純平, 平本充, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, LD降水粒子形状計測装置による雨滴計測, 電気学会, 2011年3月16-18日, 大阪大学
⑨ 辻淳一, 永田純平, 津田紀生, 山田諄, 民田晴也, 半導体レーザーを用いた雨滴粒径測定装置に関する研究, レーザー学会中部支部若手研究発表会, 2010年12月3日, 名城大学

[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]

ホームページ等

<http://tec.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~minda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

民田 晴也 (MINDA HARUYA)

名古屋大学・地球水循環研究センター・技術専門職員

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・教授

研究者番号: 20278229