

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686072

研究課題名(和文) 降雨粒径分布のリアルタイム推定による最新型偏波レーダー雨量計の開発

研究課題名(英文) Quantitative Precipitation Estimation by Real-Time Estimation of Drop Size Distribution Using Polarimetric Radar

研究代表者

山口 弘誠 (Yamaguchi, Kosei)

京都大学・防災研究所・特定助教

研究者番号：90551383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,100,000円、(間接経費) 4,830,000円

研究成果の概要(和文)：地上降水量の推定精度の向上を目的として、XバンドMPレーダー(国交省XRAIN)を用いて強雨時でも精度良く雨滴粒径分布推定できる手法を開発し、雲内部における時空間構造を推定した。発達した対流性雲では、雲発生後に上空で初めてDSDが推定された段階から比較的大きな雨滴が多く存在している様子が多くの事例で観測され、ゲリラ豪雨の危険性の判断の指標となりうると期待できる。さらに、DSDの時間的・空間的な変化を導入した雨滴落下モデルを構築し、高度差により生じる地上と上空の降水量のズレを直接物理プロセスに従って降雨強度を算出したところ、一般的なKDPを用いた手法よりも高い相関を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In Japan, X-band polarimetric weather radar network is currently-operated. Polarimetric radar has an advantage over conventional non-polarimetric systems since they measure raindrop-shape-related parameters. In this study, a retrieval methodology of raindrop size distribution (DSD) is used to improve accuracy of quantitative precipitation estimation (QPE). After the accuracy of retrieved DSD is checked through a rain gauge on surface, 3-D drop size distribution of cumulonimbus is retrieved from X-band polarimetric radar. Next, a raindrop evolution model is used to estimate DSD at ground level. The model is used to lessen the gap of rainfall rate between radar observation height and ground level. Growth rate of DSD at ground level is given to rainfall rate estimating algorithm.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：偏波レーダー 雨滴粒径分布 降水量推定

1. 研究開始当初の背景

2008年7月の兵庫県都賀川事例に代表されるように豪雨災害が頻発している。河川流出管理・ダム操作・下水道の排水処理といった防災上の観点から、降水量を正確に知ることは極めて重要である。さて、国土交通省が現業運用している降水量推定手法はレーダー雨量計システムであり、これはレーダーによって第一近似的に推定された降水量分布を、約20km間隔に設置している地上雨量計で補正したものである。しかしながら、近年の局地的大雨(いわゆるゲリラ豪雨)がもたらす災害の様相を見る限り、現状の降水量推定精度は降水予測精度と併せて社会の要求に対して極めて不十分である。下記に、推定誤差を生み出す原因と解決すべき課題をまとめた。

(1)レーダー観測値から降水強度を推定するときに降雨粒径分布を仮定することによる誤差:この誤差が大きい。降雨粒径分布の違いによって、たとえ同じレーダー反射強度であっても、降水強度に換算して1オーダー以上異なることがある(Battan, 1973)。現業のレーダー雨量計では統計的平均値の降雨粒径分布を仮定しているが、本研究で対象とする粒径の大きい雨滴を多く含む対流性雲では大きな誤差要因となる。加えて、1つの対流性雲の面積スケールは50km²以下であり、地上雨量計の配置間隔では1つの対流セルをまるまる取り逃してしまうことすらあり得る。これは地上雨量計に頼って補正している現業のレーダー雨量計の最大の弱点である。

(2)上空を観測するレーダーと地上降雨のずれ:山岳域は有効なダム操作を行うために重要な地域であるにもかかわらず、山地などに遮蔽された裏側においては地上から大きく離れた上空をレーダービームが通る。そこで、ビーム仰角を変えて観測することで、地上方向へ外挿補間する簡便な手法が開発されている(Franco et al., 2008)。ただし、雨滴生成の物理プロセスを考慮した補正手法は未開発である。

(3)レーダー観測の時間分解能に関する誤差:レーダーは広範囲を観測するため観測時間分解能が存在する。現状のレーダー運用は降水量推定を目的としているため、地上付近の降雨を観測するための低仰角観測を高頻度に行い、観測時間分解能に起因する誤差を小さくしている。一方、降水予測の観点に立つと、ビーム仰角を可変させて3次元立体観測(ボリュームスキャン)することで降水システムの全体像を把握できるため、データ同化を用いた降水予測に非常に有効である(Yamaguchi et al., 2008)。すなわち、降水量推定と降水予測のどちらを優先すべきかのトレードオフ問題が存在する。

(4)地上雨量計の観測誤差:転倒マス雨量計は横風を受けると雨量計の側面に上昇流が生じ、集水口での雨滴捕捉率が減少する。

また、直径20cmのサンプルボリュームは空間代表性に欠ける。これは地上雨量計を真値として補正しているレーダー雨量計にとって致命的である。強風時でも捕捉率を上げる集水口形状の開発が進んでいるが(日阪ら, 2006)、未だ誤差を定量的に評価できていない。

上述の通り、レーダー雨量計において降雨粒径分布が最重要ファクターであるが、現状のシステムでは様々な誤差を含んだままで、地上雨量計から粒径分布情報を補っているに過ぎない。その理由は、そもそも従来型レーダーでは降雨粒径分布に関する情報が全く得られないこと、および、大気中の降雨粒径分布を直接観測した研究が存在しないという致命的な問題があるからである。

2. 研究の目的

これまでに実施してきた偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測を土台として、対象を降水粒子種類から降雨粒径へ焦点を当てて観測することにより、偏波レーダーから推定する降雨粒径分布の精度を明らかにする。さらに、マイクロレインレーダーと呼ばれる雨滴落下速度から降雨粒径分布の鉛直プロフィールをおおまかに推定できる観測機器を利用し、偏波レーダーの3次元立体観測とビデオゾンデ観測を同期させることで、降雨粒径分布の立体構造を解明する。観測結果に基づき、「偏波レーダーから推定される降雨粒径分布の誤差」と「雨滴生成の物理プロセス」をそれぞれ考慮した3次元降雨粒径分布推定手法を構築し、降雨粒径分布をリアルタイムに推定することによって地上雨量計に頼らない革新的な最新型偏波レーダー雨量計を開発する。開発する降水量推定手法を実用化するために、偏波レーダーの3次元立体観測によって低仰角観測の頻度が減少しても、現状の降水量推定精度よりも高まることを明らかにする。また、地上降水量を至極精度良く測るために独自の巨大雨量計を新たに作成し、転倒マス雨量計の空間代表性と捕捉率による誤差を定量的に評価する。

3. 研究の方法

本研究課題を3年間の計画で遂行する。本研究の根幹をなす、降雨粒径分布に焦点を当てた偏波レーダー・マイクロレインレーダー・ビデオゾンデ・巨大雨量計の同期観測は、H23年度に準備観測としてビデオゾンデ以外の観測体制を築き、H24年度に係留式ビデオゾンデ観測を加えて、梅雨と台風を対象とした本観測に臨む(図1)。観測結果に基づいて降水量推定における様々な誤差要因を定量的に評価し、H25年度には、偏波レーダーから推定される降雨粒径分布の誤差と雨滴生成の物理プロセスをそれぞれ考慮した3次元降雨粒径分布推定手法を構築することで、最新型偏波レーダー雨量計を開発する。

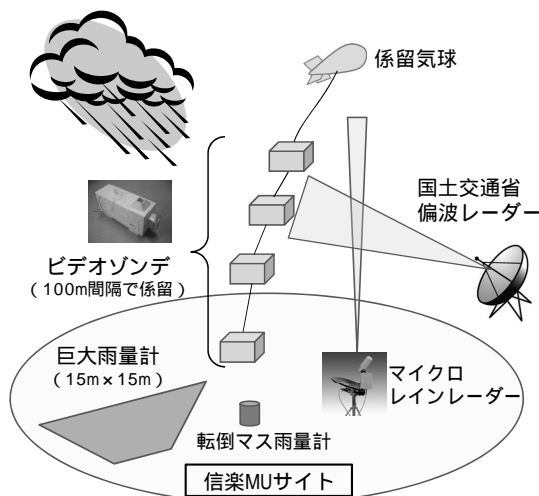


図1 観測の全体像

上述の観測データを基に、下記の順序で研究を実施した。

(1) 巨大雨量計を用いた転倒マス雨量計の空間代表性と雨滴捕捉率の評価 (H23 年度)
 新たな観測機器として、15m 四方の集水面積を持つ独自の巨大雨量計を作成し、転倒マス雨量計の直径 20cm というサンプルボリュームの空間代表性を評価する。また、風速計を設置し、転倒マス雨量計の雨滴捕捉率を風速ごとに算出する。本研究の最終目標は地上雨量計による補正を必要としない手法開発であり、ここでは現業手法の誤差を見積もる。

(2) 雲物理プロセス理論に基づく雨滴粒径時間発展モデルの構築 (H23 年度)

雨滴粒径時間発展モデルを構築するために、雨滴粒径の大きさごとにクラス分けするビン法 (Takahashi et al., 2006) を用いて、「衝突 - 併合 - 分裂」という雨滴成長の雲物理プロセスを表現する。風や湿度などの大気環境場には、初期・境界値に気象庁数値予報 GPV データを与えた大気モデル CReSS (Tsuboki et al., 2002) による予測値を用いる。気象分野で開発段階にあるビン法搭載の大気モデルは極端に計算負荷量が大きいため、ここではあえて大気モデルと雨滴粒径時間発展モデルを別々に計算することで、リアルタイム運用を意識したモデル構築を目指す。

(3) 偏波レーダーから推定される降雨粒径分布の誤差評価と降雨粒径分布の立体構造の解明 (H24)

偏波レーダーから推定される降雨粒径分布をビデオゾンデ観測による実際の大気上空の降雨粒径分布と比較し誤差評価する。降雨粒径分布の推定手法として、Constrained method (Zhang et al, 2001) を用いて、Xバンドレーダーに利用できるように減衰補正の工夫を施した手法を開発する。さらに、マ

イクロレインレーダーから推定される高解像度の降雨粒径鉛直分布を利用し、偏波レーダーの3次元立体観測の粗い鉛直解像度を補うことで降雨粒径分布の立体構造を解明し、次項の3次元降雨粒径分布推定手法の検証に用いる。

(4) 3次元降雨粒径分布推定手法の構築 (H24, H25 年度)

構築する雨滴粒径時間発展モデルをベースに、ここでは偏波レーダーから推定される降雨粒径分布情報をデータ同化して3次元降雨粒径分布推定手法を構築する。申請者は最新のデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ法に関する研究に取り組んでおり (山口ら, 2009 など) ここでもデータ同化手法として採用する。データ同化に必要となる偏波レーダーの誤差情報は (3) で算出している。ゆえに、偏波レーダーから推定される誤差を考慮に入れた降雨粒径分布情報をモデルを通して時間軸に修正することによって3次元降雨粒径分布を推定する。すなわち、単なるパラメータキャリブレーションではなく、データ同化という新たな視点を通じた高度な降水量推定が可能となる。

(5) 偏波レーダー雨量計の開発・検証 (H25 年度)

構築する3次元降雨粒径分布推定手法を用いて、粒径分布を仮定することなく偏波レーダー情報から降水量へ換算し、地上雨量計を必要としない革新的な偏波レーダー雨量計システムを完成させる。評価する際には、地上雨量計と比較するだけではなく、降雨粒径分布の3次元分布を求めている効果が顕著となる山岳域において評価する。

4. 研究成果

(1) 大型雨量計による地上雨量計の捕捉率の誤差評価

3ヶ月積算雨量、10分間雨量による捕捉率の評価

9m² 巨大雨量計と転倒マス雨量計のそれぞれの10分間降雨量と積算降雨量の時系列に約3ヶ月間分を整理した。3ヶ月積算雨量に関して、9m² 巨大雨量計は367.8mmであったのに対して、転倒マス雨量計は349.8mmであった。割合にして5.1%ほど9m² 巨大雨量計の方が大きい値を示したということであり、捕捉率にすると95.1%となる。設置した場所が平野部ということもあり、降雨イベントにおける風速はほとんどが3m/s以内であったためか、極端に大きな差となっていない。

風速による捕捉率の評価

最大で風速4m/s程度までの事例しかないものの、風速が強くなるほど転倒マス雨量計の方が大きい値を示すことが少なくなっている。ただし、前節で述べたように9m² 巨大雨量計の方が大きい10分間雨量を記録した小雨から中程度の雨においては、風速は決し

て大きくなかった。すなわち、風速が弱い場合に限られるが、風速だけでは捕捉率が説明できないことがわかった。鉛直風の場合も同様に調べてみたが、上昇流もしくは下降流と捕捉率の間に明確な関係性は確認できなかった。

雨滴粒径分布の中央値による捕捉率の評価

9m2 巨大雨量計から約 10 m ほど離れた場所に設置してある 2 次元ビデオディストロメータを用いて、雨滴の粒径分布を算出し、さらに雨滴粒径分布の中央値である D_0 を求めた。粒径分布の中央値が低い値である $0.5 \text{ mm} < D_0 < 1.0 \text{ mm}$ (青色)を見ると、風速が強くなるにつれて捕捉率が低くなっていること(9m2 巨大雨量計の方が高い値を示す右肩上がり)がわかる。 D_0 が小さいということはすなわち粒径が小さく軽い粒子が多く含まれていることを意味しており、風の影響を強く受けることがよくわかる。次に $1.25 \text{ mm} < D_0 < 1.5 \text{ mm}$ (橙色)を見ると、先ほどと比較して風速の依存性が小さいことがわかる。最後に、 $D_0 > 1.5 \text{ mm}$ (赤色)を見ると、縦軸方向に大きくバラツキがあることがわかる。捕捉率の低下に大きく寄与している点もあれば、9m2 巨大雨量計よりも転倒マス雨量計の方が大きい 10 分間雨量を示している点もいくつか存在しているが、風速の強いときのデータ数が少ないためここでは議論を避けたい。表 1 は、粒径分布の中央値の色ごとに粒径をクラス分けし、クラスごとに平均的な捕捉率を求めたものである。この表からも粒径分布の中央値が小さくなるにつれて捕捉率が低下していることが明らかである。粒径ごとに風速に対して異なる挙動を示すことが明白であり、今後は風速だけではなく粒径分布情報を利用した補正式の構築が期待される。

表 1 雨滴粒径分布の中央値 D_0 と捕捉率の関係

雨滴粒径分布の中央値 D_0 [mm]	捕捉率 [%]
0.50 – 1.00	84.8
1.00 – 1.25	90.6
1.25 – 1.50	97.8
1.50 – 2.00	98.1

(2) 位相差変化率を用いた強雨時の雨滴粒径分布推定

この手法は、降雨減衰の影響を受けにくい偏波パラメータである伝搬位相差変化率 KDP を用いて DSD を推定するために山口ら(2012)により開発された手法である。 D_0 の推定には不向きであると考えられている KDP を、雨滴の個数の情報を含む ZHH を KDP で割って用いることで C-G 法で用いられている ZDR と似た

意味合いをもつパラメータとすることができ、従って ZHH を組み合わせることで、KDP を用いても ZDR と同程度の D_0 の推定が見込まれるうえに、降雨減衰の影響を少なくすることができる。ただし、弱雨時には KDP の観測精度が低くなるため、KDP が 0.5 未満の場合には C-G 法が適用する。以降、本研究では DSD 推定手法は山口ら(2012)の手法と CG 法に対し様々な改良を行ったうえで DSD の推定を行う。

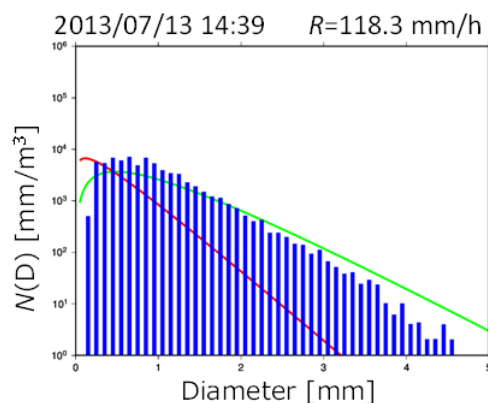


図 2 DSD 推定精度の比較 (青: 実測値, 緑: 開発した手法, 赤: 従来手法)

(3) 局地的豪雨における DSD の時空間構造
京都府南部に設置された国土交通省鷲峰山レーダーの観測値を用いて 3 次元的に DSD を推定した。対流性降雨を中心にいくつかの特徴的な事例を降雨タイプごとに分けて見ていく。それぞれのパラメータがどのような傾向を示すか、時間経過による発達・衰弱を考慮しながら考察を行う。鉛直分布の時間変化を追うために、雨滴の数濃度や DSD 分布形そのものではなく DSD パラメータの鉛直分布を示す。そのため、雨滴の総数や分布形を表す代わりに雲水量 W (Liquid water content, 図中では LWC と表記) を二分する粒径である D_0 を代表的な粒径として扱う。また、雲水量 W も DSD パラメータと併せて考察する。上空での水滴の質量を表すにあたり、単位体積あたりの含水量である W を用いる。本文中に特筆した場合以外は、減衰等による DSD パラメータの推定誤差は十分小さいとする。合計 4 日間、9 つの発達したセルと、1 つの発達しないセルにおける鉛直方向の DSD パラメータの時間変化について考察を行った。その際に、上空の風による影響の少ない事例を中心に、レーダーで周囲に降雨がないことを目視で確認した状態から、単体のセルが出現したものを抽出し、積乱雲が上空で発生して消滅するまでを捉えている。

12:04 に初めて上空にセルが観測された時点で D_0 が 1.7mm 前後という比較的高い値を示している一方、 W は 0.5 g/m^3 と小さい。事例 a 以外にも、近隣の降水セルから分裂等の影響を受けていない単体セルの事例の場合では、ほぼすべてが上空にセルが出現した時

点で D0 が大きな値を示している。12:14 に高度 4km 付近に W の値が局所的に高いコアが生まれ、コアを中心に発達していく。その 10 分後の 12:24 には高度 2km と 4km 付近に非常に高い W を持ったコアとなり、それは時間とともに広がり高度が下がっている。12:19 から 12:24 の間には高い D0 がセルの中央に地上付近まで柱状に伸びており、大きい雨滴が先行して落下していると考えられる。一方で、同時期の W では 2km 以下では 1g/m³ 以下と低い値であり、地上付近の降雨強度も高くない。12:25~12:34 に地上付近での W の値が低いことに加え D0、W の値が高いことから、大粒の雨が地上に落下している。同時に、地上付近で観測された降雨強度の水平分布では 50mm/h を超えるなど、ピークを迎えている。降雨強度ピーク時での D0 は柱状に観測された 12:19 の D0 より低い。高い D0 が落下した後の上空では、大きい粒が落下した後の小さい雨滴が卓越していることが考えられるので、高い NW が観測されている。衰退時には残された小さい雨粒が地上に落下し、12:54 を最後にセルは消滅する。

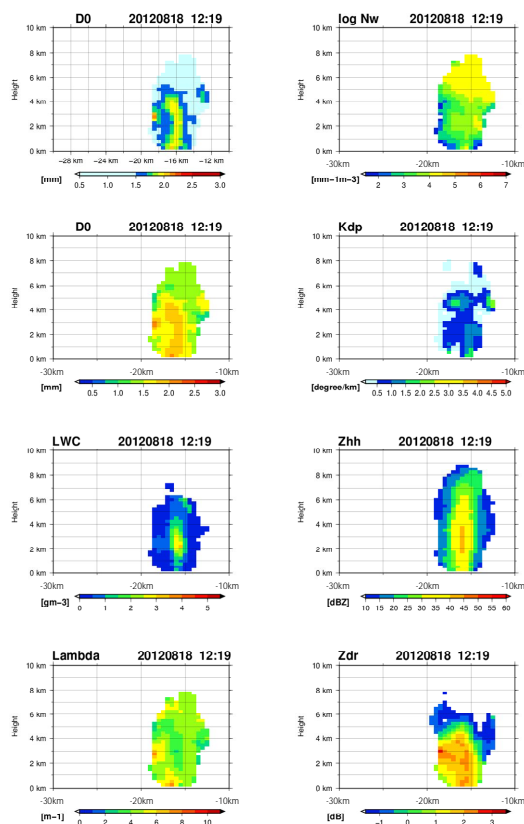


図3 強雨時の雨滴粒径分布パラメータ

(4) 雨滴粒径ごとの落下過程を考慮した降水量推定

上空でレーダーにより観測された降水量と地上における降水量の差を縮めるため、雨滴が地上に到達するまでの雨滴の併合等の過程を反映する雨滴の落下モデルを使用した。落下による DSD の変動を表した結果から降水量推定を行い、KDP を用いた降水量推定

式と比較する。三隅・圓山(2004)らのピン法雲微物理モデルを参考に、雨滴落下の部分のみを用いてモデルを構築した。

雨滴粒径ごとに落下過程を考慮することで、1 つは落下に伴う降水強度のピーク(14:30, 14:40)が地上雨滴計でのピークと一致した。落下しながら他の雨滴を併合する過程についてもピークが R-KDP と比較して大きくなっていることから表現されている。また、14:15 ごろと、14:50 ごろに R-KDP で見られる小さなピークが Rfall(DSD)では低くなっている。降り始め・降雨の中断時の飽和していない大気中を雨滴が落下することにより、雨滴から蒸発が発生し、降雨強度の減少につながっている。

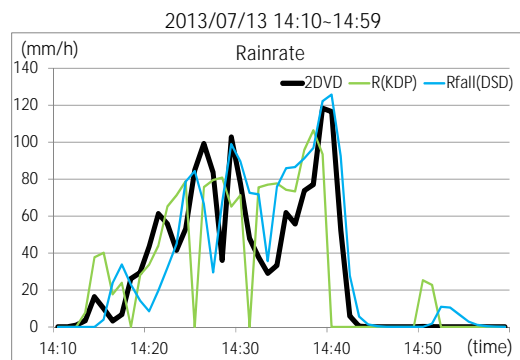


図4 雨滴粒径ごとの落下過程を考慮した降水量推定精度の時系列グラフ

地上雨滴計で観測された降雨強度との相関係数は Rfall(DSD)では 0.86, R-KDP では 0.74 であった。Rfall(DSD)と雨滴計で降雨強度のピークが一致したことにより、R-KDP と比較して相関係数が大幅に増加したためである。雨滴落下モデルの地上での結果から算出した降水強度は、現在使用されている KDP を用いた降水量推定式と比較した結果、地上で観測された降水強度とより高い相関を示した。さらに、落下モデルから算出した降雨強度からは落下、蒸発による変動が確認できた。現在は鉛直 1 次元のモデルで計算を行っているが、将来 3 次元的に落下を計算する際に風による移流を加えることで、さらなる降水量推定精度の向上が見込まれる。また、高い仰角のレーダービームしか届かない山岳域においても、精度良く推定することが可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

山口弘誠, 金原知穂, 中北英一: X バンド偏波レーダーを用いて推定した雨滴粒径分布の時空間構造, 京都大学防災研究所年報, 査読無, 第 57 号 B, 14pp., 2014. http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no57/content_menu.htm#Btop

山口弘誠, 中北英一, 野中理伸: 9m2 巨大雨量計の開発による地上雨量計の捕捉率の評価, 土木学会論文集 B1(水工学),

査読有, 第 69 巻 4 号, pp. 1_307-1_312, 2013.http://dx.doi.org/10.2208/jscejhe.69.1_307

山口弘誠, 金原知穂, 中北英一: X バンド偏波レーダーを用いた雨滴粒径分布とその時空間構造及び降水量の推定手法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 第 68 巻 4 号, pp. 1_367-1_372, 2012.http://dx.doi.org/10.2208/jscejhe.68.1_367

他 7 件 (全 10 件中 5 件査読有)。

〔学会発表〕(計 19 件)

山口弘誠, 中北英一: 最新型偏波レーダー等とビデオゾンデを用いた豪雨の観測実験と予測、平成 25 年度気象予報士会関西支部総会特別講演, 大阪市立阿倍野市民学習センター, 大阪市, 2013 年 6 月 30 日。

山口弘誠, 中北英一, 野中理伸: 10m2 雨量計の開発による転倒マス雨量計における捕捉率の評価, 水文・水資源学会 2012 年度研究発表会, 広島市西区民文化センター, 広島県広島市, 2012 年 9 月 26-28 日。

Kosei Yamaguchi, Chiho Kimpara, and Eiichi Nakakita: Estimation of Space-Time Structure of Raindrop Size Distribution at Heavy Rainfall, International Symposium on GCOE-ARS, Uji Campas, Kyoto University, Kyoto, Japan, 3-4 August 2012.

Kosei Yamaguchi, Chiho Kimpara, and Eiichi Nakakita: Estimation of Space-Time Structure of Raindrop Size Distribution Using Specific Differential Phase, 8th International Workshop on X-band Weather Radar, TU Delft, Delft, The Netherlands, 14-16 November 2011.

Kosei Yamaguchi, Chiho Kimpara, and Eiichi Nakakita: Estimation of Space Time Structure of Raindrop Size Distribution Using Specific Differential Phase, International Symposium on Earth-science Challenges (ISEC), National Weather Center, The University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, USA, 14-16 September 2011.

他 14 件。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 弘誠 (YAMAGUCHI, Kosei)

京都大学・防災研究所・特定助教
研究者番号: 90551383

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし