

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19206054  
 研究課題名（和文） 次世代型偏波レーダによる降水量推定・降水予測の高精度化と水管理へのインパクト評価  
 研究課題名（英文） Improvement of Rainfall Estimation and Rainfall Prediction Using the Next Generation Polarimetric Radar and Its Impact Evaluation for Water Management  
 研究代表者  
 中北 英一（NAKAKITA EIICHI）  
 京都大学・防災研究所・教授  
 研究者番号：70183506

研究成果の概要（和文）：豪雨災害の軽減を目指して、次世代型偏波レーダの降水量推定・降水予測への利用を目的に、偏波レーダとビデオゾンデの同期集中観測を実施し、その結果、降水粒子の粒径と種類の推定手法を構築することに成功した。さらに、モデル予測への応用や現象の理解を深めることで降水量推定・降水予測の高度化を実現した。

研究成果の概要（英文）：With a view to improve quantitative precipitation estimation and forecast for river control, the campaign observation of the next generation polarimetric radar synchronized with videosonde were carried out in Okinawa. As the result, the method of estimation of the drop size distribution and the type of precipitation particles using the polarimetric radar data was developed. Moreover, the advanced techniques of QPE and QPF were brought to realization by applying the estimation method to the numerical weather prediction, or by deeply understanding of precipitation mechanism.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	20,400,000	6,120,000	26,520,000
2008年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

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：降水量推定、降水予測、偏波レーダ、ビデオゾンデ

## 1. 研究開始当初の背景

昨今、温暖化・都市化と絡んで頻発化が議論される集中豪雨災害が目についている。その予測技術はかなり進歩したとはいえ、まだまだ難しい。例えば、2004年に生じた新潟・福島豪雨のように比較的規模の大きな豪雨は最新のメソ数値気象モデルでおおよその予測が可能となってきたが、それより規模の小さな福井豪雨は未だ再現が不可能な状況である。一方、現在の地上雨量計ネットワークではその空間分解能から、豪雨を捕らえ

きれていないとの新たな認識も得られている。その中、レーダリモートセンシングとタイアップした形で、降雨予測精度、降雨量推定精度の向上、ならびにそれらが流量予測その他の水管理に与えるインパクトを評価することが、古くて新しい火急の課題となっている。

降雨予測精度、降雨量推定精度の向上に大いに利用できると大きな期待が寄せられているのは、次世代型と称される偏波レーダであり、降水粒子の粒径分布や、雨や雪とい

った降水の種類が推定できる可能性のあるレーダーである。わが国の現業用ネットワークレーダーが今後偏波化されるかどうかを担う極めて重要なものとなるという使命感をもって本研究に着手した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、(ア) 次世代型偏波レーダーによる降水量推定精度の向上、(イ) メソ数値気象モデルとのタイアップによる降水予測精度の向上、(ウ) これら推定精度の向上が水管理に与えるインパクト評価、である。特に(ア)、(イ)において、次世代型偏波レーダーで観測される新たなパラメータにより推定可能性が極めて高くなる降水粒子の粒径分布や雨、雪、霰、雹といった降水粒子タイプの判別は、望まれてきた極めて重要な観測情報となる。

## 3. 研究の方法

本研究では、購入する観測機器を用いて、降水粒子の粒径分布とタイプの推定に関する緻密な基礎的検証・研究を土台として研究目的(ア)を目指す。一方、(イ)の予測精度の向上の鍵はモデル初期値の改善の可能性を探索することである。メソスケールの擾乱の予測をターゲットとして開発された非静力学数値気象モデル CReSS(Cloud Resolving Storm Simulator)、WRF(Weather Research Forecast)を用いた数値予報を実施し、初期値作成の際にレーダーで観測される3次元風速や降水粒子(雨、雪、霰、雹)の分布情報を適切にモデルに取り込む手法を開発するとともに、どの程度降水の予測精度が改善されるかを検討する。さらに、(ウ)ではモデルの予測雨量を分布型流出モデルへの入力として流出計算を実施することにより、降雨量推定精度の向上、データ同化を通じたメソ数値予報改善が、どの程度洪水流出の予測精度にインパクトを与えるかを明らかにする。図1に研究のロードマップを示す。

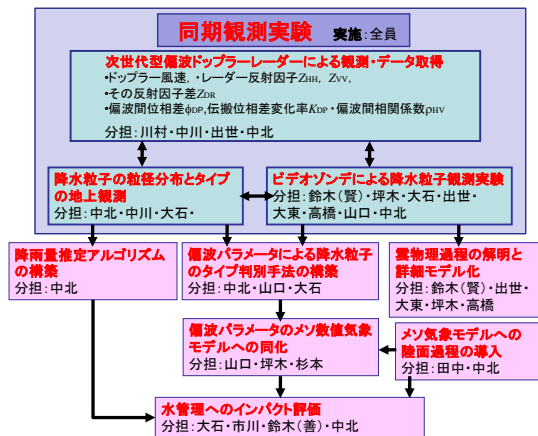


図1 研究のロードマップと役割分担

本研究では、偏波レーダーで観測している

まさに上空でどのような降水粒子が存在するのかを測るため、偏波レーダーとビデオゾンデを同期させるという世界でも類を見ない夢のような観測を実施した。ビデオゾンデとは、気球に取り付けて降水雲内に飛揚し、雲内の降水粒子画像をリアルタイムで記録する特殊ラジオゾンデであり、内部には CCD カメラのほか、赤外線センサー、ストロボ、ビデオアンプ等が搭載されている。得られた降水粒子画像はその形状、コントラスト、輪郭等により雨滴、凍結水滴、霰、氷晶、雪片に分類され、鉛直粒径分布や粒子数密度、質量密度が算出される。また、同時に雷の発生メカニズムに大きく関与する降水粒子の帯電電荷も測定できる。2007年11月に6台、2008年に6台、2009年には16台を情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターより降水雲内に飛揚した。加えて、2次元ビデオディストロメータ(2DVD)、インパクト型ディストロメータ、パーシバル雨滴計、マイクロレインレーダ、レーザ雨滴計(LD)、光学式雨量計、転倒桁式雨量計などの地上観測装置を設置し、大規模な集中観測を実施した。図2に集中観測に持ち込んだ機器を示す。

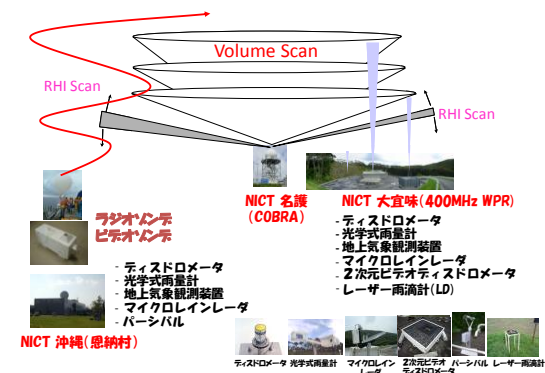


図2 沖縄集中同期観測における観測機器

## 4. 研究成果

### (1) 降水量推定アルゴリズムの構築

2DVD など地上雨滴計の観測結果を用いて、偏波パラメータと粒径分布の関係について整理し、偏波パラメータを用いて粒径分布の中心値  $D_m$  の推定式の同定を行った。そして C バンド偏波レーダーに適応させる降雨強度推定式の構築をした。独立行政法人情報通信研究機構(NICT) 沖縄亜熱帯計測技術センターが試験運用している C バンドレーダーである COBRA を用いて、実運用に耐えうる降雨量推定アルゴリズムの構築した。その結果、一般的な降雨量推定アルゴリズムに加えて、粒径分布の中心値  $D_m$  による判定を導入することで、新たな降雨量推定アルゴリズムを構築した。精度評価としては 16 の降雨イベントを通して平均誤差、RMSE、相関係数そして総降雨量比によって評価し、降雨量推定精度を向上させた。

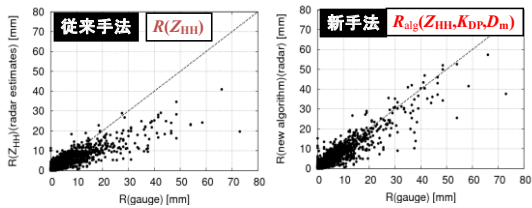


図3 開発した手法と地上雨量との比較

(2) 降水粒子のタイプ判別手法の開発

最新型の偏波レーダーは、降水粒子の大きさや形、向きなどの特性に敏感であるため、降水粒子タイプの判別が可能であるとされている。しかし、上空の降水粒子を直接観測することは大変困難であり、観測に基づく降水粒子タイプの推定法はこれまでほとんど例がなかった。そこで、同期観測のデータを用いて、どのような降水システムにも適用可能で、かつ、複数種類の混在状態を表現可能な降水粒子タイプの判別手法の開発に取り組んだ。3ヶ年にわたる数多くのデータを用いた場合における整合性に注意を払いながら判別手法を開発し、特に偏波間位相変化率を使用する閾値を工夫し、氷晶粒子をうまく判別できるようにした。また、混在状態を考慮した判別をしても、7割近くの的中率という高スコアを得た。この判別手法の開発によって、今後、データ同化による降水予測に大きな進歩をもたらすものと期待できる。

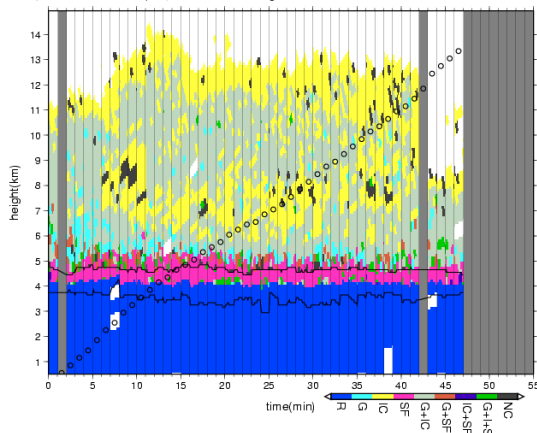


図4 降水粒子のタイプ判別結果. 丸印はビデオゾンデが飛行している位置を示す. R:雨粒、G:霰、IC:氷晶、およびそれらの混在.

(3) 降水粒子種類情報のデータ同化による降水予測手法の開発

実際に観測された偏波レーダーの観測情報をデータ同化した研究はなく、(2)で述べた偏波レーダーから推定することができる降水粒子種類情報をデータ同化し、降水予測への効果を調べた。降水粒子の混在具合に関してレーダー観測情報から算定されるメンバーシップ関数の値から降水粒子の存在比(数密度比)を推定する手法を提案すること

により、予測モデル変数と観測値間の演算子に関するまったく新しいアイデアを示した。実際の降雨事例に適用した結果、大気の気温0度層より上空における霰や氷晶などの雲微物理量の推定精度が向上することを明らかにし、これまでよりもリードタイムを長く精度を維持する降雨予測が可能であることを示した。

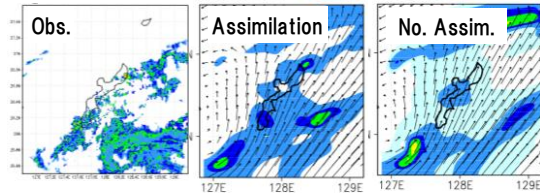


図5 降水粒子種類のデータ同化による降水予測結果

(4) 梅雨降水雲で形成される霰粒子の特徴

一般に、雲内での霰形成は柱状結晶(氷晶)に過冷却水滴が付着する着氷成長により紡錘状になる。しかしながら対流性雲の融解層少し上層ではしばしば球状の霰粒子を観測することがある。そこでビデオゾンデで得られた霰粒子の形状を定量的に評価した。霰粒子の形状を示す量として、その長径と短径から算出する扁平率(f)と、粒子の形状を回転楕円体と仮定したときの断面積と実際の粒子画像の面積の比(r)を用いて解析した。

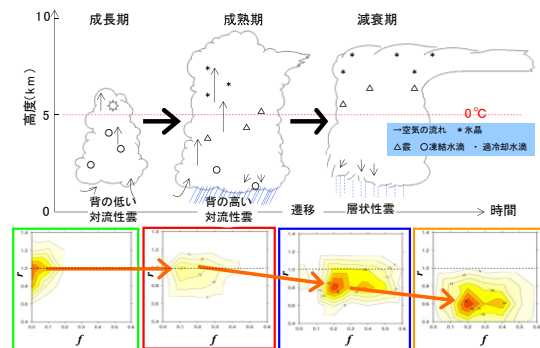


図6 降水雲の発達段階と霰の形状

背の低い対流性雲で最も球状の霰粒子が顕著で、上空ほど不規則な形状が増加し、その粒径が小さくなる傾向が明らかになった。また、発達段階が変化し、雲頂が高くなるに従い上層で不規則な形状が増加し、層状性に変化すると球状の霰粒子はほとんど観測されず、紡錘形や不規則な形状の霰粒子が支配的になっていることがわかった。これは下層のWarm Rain プロセスで形成された小雨滴が上昇により持ちあげられ凍結した凍結水滴を起源として、それに着氷成長したものであると考えられ、実際にビデオゾンデにより得られた画像では凍結水滴から球状の霰に変化する様子が捉えられている。この凍結水滴

を介する降水プロセスは、凍結することによって効率よい水の集中化を行うことができ、雲内の降水機構を考える上で、下層の Warm Rain プロセスと上空の Cool Rain プロセスの降水への寄与だけでなく球状の霰形成にみられるような融解総付近の降水プロセスの重要性を示す結果であった。

(5) 層状性雲融解層付近の雪片の電荷分布  
ビデオゾンデではアルミ製のリングを通過する際に発生する誘導電流を電気信号として取り出すことで降水粒子個々が持つ帯電電荷を測定することができる。層状性雲の電荷分布はこれまでも多くの研究が行われているが、降水粒子の帯電電荷を直接観測した研究はなく、今回初めて層状性雲の融解総付近の雪片の電荷分布を観測することができた。これまでの研究では対流域上部の正電荷に帯電した氷晶が層状域に運ばれることが言われていたが、観測で得られた雪片の電荷分布は融解層すぐ下で正、上で負に分布するというこれまでの考えでは説明ができないものであった。この帯電メカニズムについては観測された氷晶や霰の帯電電荷より凝集過程を仮定することで説明できることが示唆されたが、今後さらなる観測が必要だと考えている。

#### (6) 最大雪片粒径推定手法の提案

梅雨前線や低気圧などの層状性の厚い雲から降ってくる雨の多くは、上空で形成された雪片が融解層を経て融解してできたものである。そのため、レーダー観測によって降雨強度を予測・推定するためには、レーダー情報から上空の降水粒子の粒径分布を推定することが必要である。しかし、レーダーによって観測される粒径分布は雨滴を仮定しているため、レーダー観測による固体粒子観測時、粒径分布の推定誤差は大きくなる。そこで沖縄集中観測における COBRA のレーダー情報とビデオゾンデ観測により捕捉された雪片粒子データおよび雪片粒子融解モデルの結果を相互比較し、雪片粒子がレーダーで観測される融解層の厚さと関係していることを利用した融解層上空に存在する可能性がある最大雪片粒径推定手法を考案した。

層状性の雲における雪片粒子を対象とした雪片粒子融解モデルを用いた。この粒子融解モデルは雪片を球形と仮定し、環境場（気温・相対湿度・気圧）での顕熱・潜熱フラックスを計算している。計算条件として雪片粒子の初期粒径、密度を与えることで融解開始から融解完了までの融解高度区間、融解中の粒径、落下速度、含水量の変化が計算できる。

沖縄集中観測中、最大の雪片粒子 6.695mm が観測された降水の偏波間相関係数  $\rho_{HV}$  の時系列データを図 7 に示す。 $\rho_{HV}$  の値が小さ

い融解層の高度を確認し、上端・下端高度の差を融解層厚さとする。最大の雪片粒子が観測された時間は図 7 の四角部分である。このとき融解層厚さが 600m 前後であることがわかる。次に雪片粒径 6.695mm とラジオゾンデの環境場のデータを用いて雪片粒子融解モデルを用いて計算した各高度における粒径、落下速度の変化を図 8 に示す。粒子密度は  $0.1\text{g/cm}^3$  とした。この図から融解開始から融解完了までの距離が 600~650m であることがわかる。この距離を融解高度区間とする。この融解高度区間と融解層厚さを比較すると、およそ一致していることが分かる。このことから COBRA 観測による融解層の厚さから雪片粒子融解モデルを用いて存在する可能性がある最大雪片粒径を算出できることが示唆された。

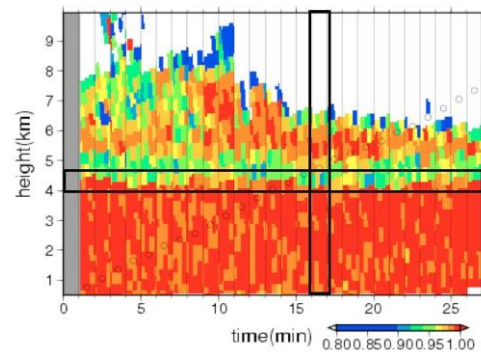


図 7 偏波間相関係数  $\rho_{HV}$  の時系列データ

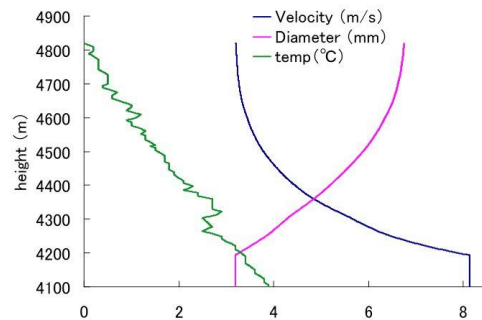


図 8 計算された雪片の落下速度と径

沖縄集中観測で COBRA 同期観測中に取得されたビデオゾンデデータのうちで、雪片粒子が捕捉され、融解層が存在する層状性の降水イベントのデータは 9 事例でそれぞれの事例で最大雪片粒径算出を行った。図 9 は 2007 年 No3 という観測イベントにおける最大確率推定量算出結果の例であり、最大確率推定量は 7.0mm であることがわかる。このときビデオゾンデデータによる最大雪片粒径は 6.75mm であったので、よく推定できていると言える。9 事例の誤差を RMSE で表すと、0.77mm であった。これは融解層の厚さに換算すると

100m以内になることから、本手法では最大雪片粒径をよく推定できていることが考えられる。次に最大確率推定量とビデオゾンデデータの関係を検討するために全9事例の相関関係の確認を行ない、相関係数の値も0.87と良い相関であることがわかった。

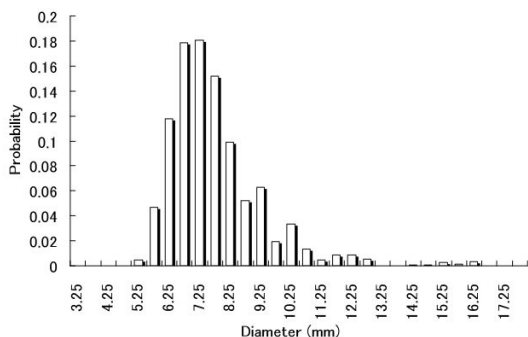


図9 2007年No.3事例における最大雪片粒径の確率

### (7) 雲物理過程モデルにおける氷晶形成の高度化

高度なレーダデータ同化と連携した数値モデルによって降水予測の高精度化が期待されている。しかしながら、降水レーダで観測できないような微小粒子については、それらが降水粒子のもととなる重要な役割をもっているにもかかわらず、降水レーダの同化では予測の改善を得ることができない。したがって、微小粒子については、その物理過程を直接改善する必要がある。そこで本研究では、その発生が特によくわかっていない微小固体粒子の氷晶に焦点を絞り、観測とモデルとの比較を行うことで、数値モデルの評価を行った。ビデオゾンデの一種である接触型雲粒子ゾンデ (HYVIS) を気球によって飛揚し、雲内部の氷晶をビデオカメラによって直接観測した。観測された画像から氷晶粒子の数量、種類、大きさなどを解析した。これらに加えて衛星等の各種データも用い、名古屋大学で開発されている数値モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) との比較を行った。

2007年11月、2008年5~6月、2009年5~6月の沖縄における観測で、計8台のHYVISを飛揚させ観測を行った。HYVISが液水の多い雲に上げられた例はこれまでになく、防水不良に関すると思われる問題が多発し、一部の時間でデータを取得できないHYVISが多かった。これら測器の問題については今後の一つの課題である。

HYVIS観測を行った事例のうち、下層から上層まで全てデータ取得でき、画像も良好であった2008年6月12日の事例について観測と数値モデルによる比較を行った。CReSSの結果に衛星シミュレータ SDSU

(Satellite Data Simulation Unit) を適用させ、衛星観測データと比較したところ、降水システムの発達に伴って上空に広がった氷晶雲が、モデルでは長時間上空に滞留することがわかった。これはモデル中では氷晶粒子が空気に相対的に落下しないためと考えられる。これはモデルの改善が必要とされる。

降水に関してはレーダとの比較を行った。降水システムの盛衰や、システム南端にみられたバンド状の強降水域はよく再現された。一方で、北側に広がる層状性の降水域がモデルではうまく表現されなかった。この原因については精査が必要である。

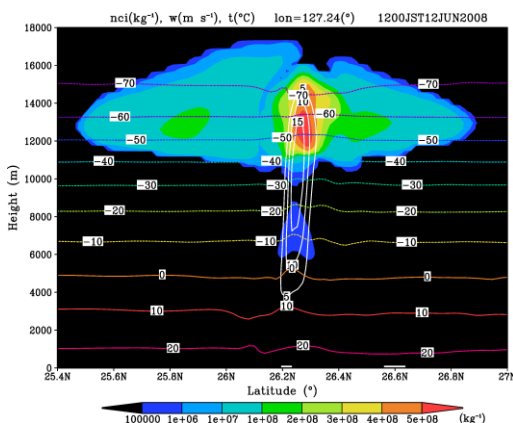


図10 HYVISが放球された地点と時間に対応する、数値モデルCReSSによってシミュレートされた氷晶の数密度(kg-1)。

HYVISと数値モデルによる比較は、HYVISでは融解層直上に氷晶の数密度が高い部分があるのに対して、 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下となる高度12km付近での数密度は相対的に少ない。これはCReSSによってシミュレートされた氷晶の数密度(図2)とは逆となっている。 $-5^{\circ}\text{C}$ 付近では二次氷晶生成、 $-40^{\circ}\text{C}$ 付近では均質核形成といった氷晶形成過程が有効であり、今後これらの過程や、その発生割合などを精査する必要がある。

以上のように、氷晶に関して観測と数値モデルの比較を行った。HYVISとの比較については今後HYVISから量的な値を導出して数値モデルとさらに詳しく比較することが必要であるが、いずれにしても数値モデルの氷晶量は観測と合致しない点があった。今後は数値モデル内の氷晶の発生と成長の過程に関して、発生量や成長量を変化させた感度実験を行い、氷晶の生成と成長の物理過程の改良につなげていく。

### 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27件)

① 中北英一・山邊洋之・山口弘誠:ゲリラ

豪雨の早期探知に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, pp. 343-348, 2010. 査読あり

- ② 中北英一・山口弘誠・隅田康彦・竹畑栄伸・鈴木賢士・中川勝広・大石哲・出世ゆかり・坪木和久・大東忠保: 偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測および降水粒子タイプ判別, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp. 361-366, 2009. 査読あり
- ③ 山口弘誠・中北英一: 偏波レーダーCOBRAを用いた降水粒子種類の同化手法の提案, 土木学会水工学論文集, 第 53 巻, pp. 355-360, 2009. 査読あり
- ④ Shusse, Y., K., Nakagawa, N. Takahashi, S. Satoh, T. Iguchi, Characteristics of Polarimetric Radar Variables in Three Types of Rainfalls in a Baiu Front Event over the East China Sea, JOURNAL OF THE METEOROLOGICAL SOCIETY OF JAPAN, 87, 5, 865-875, 2009. 査読あり
- ⑤ 中北英一・竹畑栄伸・中川勝広: Cバンド偏波レーダーによる降雨量推定アルゴリズムの構築に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第 52 巻, pp 349-354, 2008. 査読あり

[学会発表] (計 57 件)

- ① 鈴木賢士, 重藤峻介, 黄河匠, 井原充貴, 和田華代, 伊関一悟: ビデオゾンデで観測された霰粒子の雲物理学の特徴, 2009年度日本気象学会秋季大会, アクロス福岡, 福岡市, 2009年11月25日.
- ② 川村誠治, 中川勝広, 花土弘, 出世ゆかり, 佐竹誠, 佐藤晋介, 高橋暢宏, 井口俊夫, Research and development of the COBRA at NICT, International Symposium on Radar and Modeling Studies of the Atmosphere, Kyoto, Nov. 10, 2009.
- ③ Kosei Yamaguchi, Eiichi Nakakita, and Yasuhiko Sumida: Data assimilation of hydrometeor types estimated from the polarimetric radar observation. World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting, Telus Whistler Conference Centre, Whistler, British Columbia, Canada, 31 August - 4 September 2009.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中北 英一 (NAKAKITA EIICHI)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号: 70183506

### (2) 連携研究者

大石 哲 (OISHI SATORU)  
神戸大学・都市安全研究センター・教授  
研究者番号: 30252521  
坪木 和久 (TSUBOKI KAZUHISA)  
名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授  
研究者番号: 90222140  
鈴木 賢士 (SUZUKI KENJI)  
山口大学・農学部・准教授  
研究者番号: 30304497  
川村 誠治 (KAWAMURA SEIJI)  
情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・主任研究員  
研究者番号: 10435795  
高橋 劭 (TAKAHASHI TSUTOMU)  
桜美林大学・名誉教授  
研究者番号: 20197742  
田中 賢治 (TANAKA KENJI)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 30283625  
中川 勝弘 (NAKAGAWA KATSUHIRO)  
情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・主任研究員  
研究者番号: 80359009  
市川 温 (ICHIKAWA YUTAKA)  
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号: 30293963  
杉本 聡一郎 (SUGIMOTO SOUICHIRO)  
電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員  
研究者番号: 20371479  
鈴木 善晴 (SUZUKI YOSHIHARU)  
宇都宮大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 80344901  
出世 ゆかり (SHUSSE YUKARI)  
防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部・研究員  
研究者番号: 80415851  
大東 忠保 (OHIGASHI TADAYASU)  
名古屋大学・地球水循環研究センター・助教  
研究者番号: 80464155  
山口 弘誠 (YAMAGUCHI KOSEI)  
京都大学・生存基盤科学研究ユニット・研究員  
研究者番号: 90551383