

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22226010

研究課題名(和文)最新型偏波レーダーとビデオゾンデの同期集中観測と水災害軽減に向けた総合的基礎研究

研究課題名(英文)Scientific and Integrated Research by In-situ Campaign Observations Synchronizing Video-sonde and the Latest Polarimetric Radar, Heading for Reduction of Water Related Disaster

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 169,700,000円

研究成果の概要(和文)：集中豪雨やゲリラ豪雨による水災害軽減のための総合的基礎研究を実施した。最新型偏波レーダーとの同期フィールド基礎観測実験においてビデオゾンデ観測の汎用化をはかることでこれまで夢に描いてきた積乱雲内の多地点連続観測を実現するとともに、ヒートアイランドの影響を受ける都市域での積乱雲形成・発達過程のマルチセンサー同期観測の緒も開いた。それらを土台に積乱雲のモデル化と豪雨予測手法の開発を行い、加えて早期警戒情報提供や水位予測などの水管理に重要な手法をも構築した。特に、開発したゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測手法は国土交通省で現業化され試験運用が開始されており、科学的にも社会的にも意義深い貢献を果たした。

研究成果の概要(英文)：An integrated research has been conducted to reduce water related disasters caused by localized heavy rainfall and "guerrilla-heavy rainfall". During the in-situ observations, newly developed videosonde system was utilized to understand the life stages of convective clouds by synchronizing it with the polarimetric radar. And, another fundamental observations toward understanding storm-genesis was started over heat-island urban, by utilizing multi-sensors observations. Valuable data collected during the in-situ observations provide important information to the consequent researches, such as numerical modeling of cumulonimbus cloud, developing a method of rainfall prediction, and establishing an earlier-alert system. The earlier detection and risk prediction system for guerrilla-heavy rainfall is under test operation by the River Bureau of Japan, for its practical utilization, which is one of our great contributions to the society and the related research area as well.

研究分野：水文気象学

キーワード：偏波レーダー ビデオゾンデ ゲリラ豪雨 降水量推定 降水予測

### 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集中豪雨は未だ再現すら不可能な状況である。また、2008年7月28日には神戸都賀川河道内、8月5日には東京雑司ヶ谷の幹線下水道内で、突然発生した単独の積乱雲による突然の出水により、ともに尊い5名の命が失われた。いわゆるゲリラ豪雨災害であり、ほんの5分でも10分でも早い避難情報がどれほど重要かを愕然と認識させられた災害であり、単独積乱雲の5分、10分前の発生予測の難しさを思い知らされた災害であった。こういった中、雷発生も含めた雲物理過程のさらなる解明、降雨予測精度・降雨量推定精度の向上、ゲリラ豪雨等の早期探知・予測、急激な出水・浸水の予測、ならびに新たな避難情報発信手法の確立が古くて新しい課題となっている。その中、本研究グループでは、最新型偏波ドップラーレーダーに関する研究成果が「わが国の現業用ネットワークレーダーの偏波化に命運を握っている極めて重要なものとなる」との使命感をもって、ビデオゾンデとの世界初の同期観測実験やそれによる大気モデルの精緻化、上空の降水粒子識別手法、降雨量推定手法・予測手法などの有効利用手法の基礎開発を、一連の基盤研究(B)(平成16~18年度)、基盤研究(A)(平成19~21年度)として実施してきた。

### 2. 研究の目的

その中、本研究では降水粒子の大きさや形状が推定できると期待されている最新型偏波レーダー、ならびに上空に存在する降水粒子を撮影できるビデオゾンデを同期させた基礎観測実験において、ビデオゾンデ観測の汎用化をはかることで積乱雲内の多地点連続観測を実現するとともに、ヒートアイランドの影響を受ける都市域での積乱雲形成・発達過程のマルチセンサー同期観測を実施する。それらを土台に、積乱雲のモデル化と豪雨予測手法の開発を行い、加えてゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測手法の開発による早期警戒情報の提供や水位予測などの水管理に重要な手法をも構築する。以上により、集中豪雨やゲリラ豪雨による水災害軽減のための基礎的かつ総合的研究開発を実施する。

### 3. 研究の方法

これまでの一連の基盤研究(B)、(A)の6年間を通して実施してきた現象観測・解明ならびに手法を、より高くかつ深化したアドバンスなものにしたと共に、新たに温帯の京阪神都市域において積乱雲の生成過程にも焦点をあてた。また、水管理へのインパクト評価にゲリラ豪雨災害を加え、年限内での実用化を強く意識しながら、以下の方法で進めた。

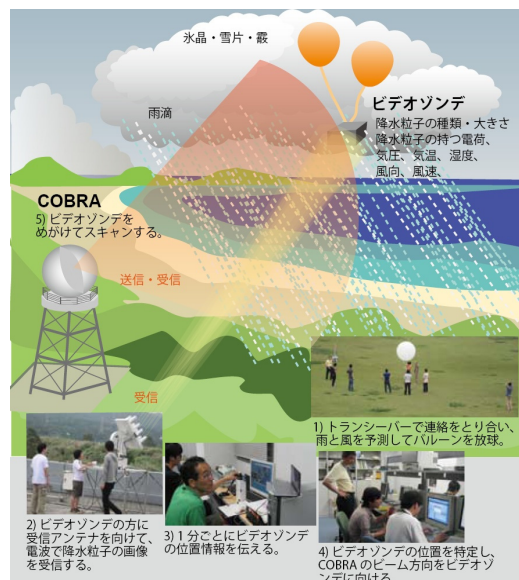


図1 偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測

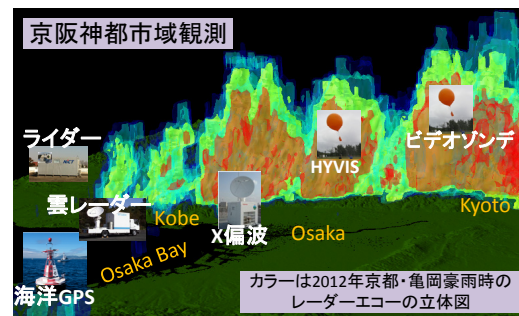


図2 京阪神都市域におけるマルチセンサー観測

- (1) 本研究の基礎となる最新型偏波レーダーとビデオゾンデの同期観測(図1)に関して、平成22年度は汎用ビデオゾンデ観測システム開発を主目的として実施し、平成23年度以降は開発した汎用システムを用いて高度な観測を沖縄で実施した。沖縄観測に加えて平成23年以降は、新たに温帯域の梅雨やゲリラ豪雨を対象として、京阪神都市域において積乱雲の生成過程にも焦点をあてたマルチセンサー観測を実施した(図2)。並行して下記の(2)から(6)を進めた。
- (2) 積乱雲内の多地点連続観測によって雲物理過程の理解を深め、雲物理過程の概念モデル化を行った。
- (3) 混在する降水粒子の種類だけでなく、それらの量をも推定する手法を確立し、その推定情報をメソ大気モデルに同化させた豪雨予測手法を開発した。
- (4) 地上降雨量推定アルゴリズムの高度化に向けて、強雨時の雨滴粒径分布の推定手法を開発した。
- (5) 豪雨予測に対する都市ヒートアイランドの影響を評価した。
- (6) 水管理へのインパクト評価として、大河川の洪水予測だけでなく、ゲリラ豪雨の早期探知・予測、急激な出水の予測手法や避難情報発信手法をも構築した。

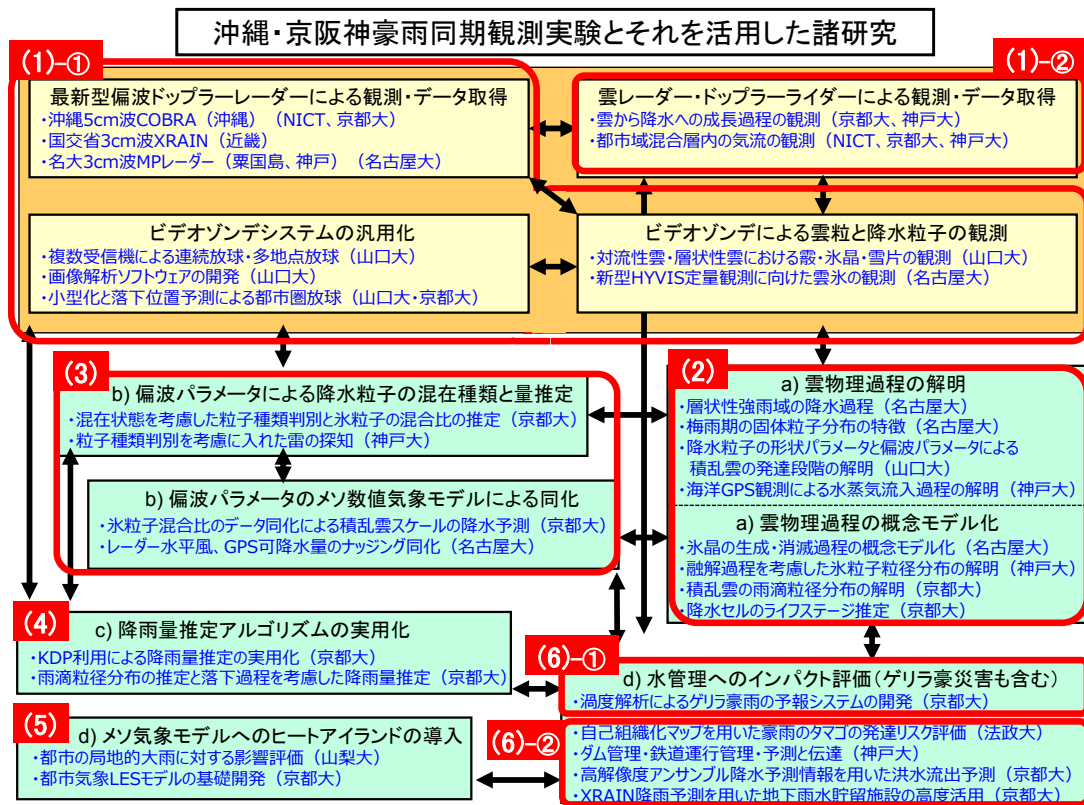


図3 研究の全体像と流れ。(赤字は4章「研究成果」の節番号と対応している。)

#### 4. 研究成果

研究の全体像を図3に示す。

##### (1) ビデオゾンデの汎用化と同期基礎観測

###### ① ビデオゾンデの汎用化と観測の高度化

当時世界に3機しかなかったビデオゾンデ受信機であるが、汎用性の高い新たなビデオゾンデ観測システムを開発したことで(論文⑪)、連続放球や多地点放球といった高度な観測を沖縄で実現し、これまでビデオゾンデ観測の課題とされてきた時間・空間的な代表性に関する議論が可能となった。汎用システムでは受信装置を小型軽量化、低コスト化、画像の鮮明化を行い、粒子画像を自動的に解析するための画像解析処理ソフトウェアをも開発した。これによって、今後気象分野を中心に世界的な普及が見込まれ、雲物理の観測的研究が益々進むものと期待される。

###### ② 温帯都市域における積乱雲の生成・発達を捉えるマルチセンサー観測

沖縄観測では積乱雲の発達における雲物理過程に主な焦点をあてて実施してきたが、後述するゲリラ豪雨予測における気流渦管の基礎観測や実用化の検証、もしくはより早期探知の実現に向けた基礎観測の位置づけとして、積乱雲のより早期のステージである“生成”過程にも焦点をあてた新たなフィールド基礎観測が必要不可欠であると考えた。そこで、i) 降水粒子に成長する前の水蒸気の挙動を捉えるための洋上GPS観測、ii) まだ水蒸気を伴っていない気流の動きを捉えるためのドップラーライダー観測、iii) 水蒸気が凝結し雲を伴うようになった上昇気流を捉えるための雲レーダー観測、iv) 雲粒子からさ

らに成長した降水粒子の挙動を捉えるためのXバンド偏波レーダー観測、といったこれらマルチセンサー観測網を神戸市に設置した。加えて、ビデオゾンデ観測においても京阪神都市域で実施した。すなわち、申請時には都市域観測はゾンデ落下位置によっては重大事故を招きかねないため不可能と考え滋賀県信楽MU観測所での観測を想定していたが、ビデオゾンデの小型化・上空任意地点におけるゾンデの切り離し落下・ゾンデ落下位置の予測手法開発、という3つの技術開発によって高い精度で落下位置をコントロールできるようになり、実は夢と考えていた「温帯域の豪雨を対象に都市域における積乱雲の生成・発達をターゲットとした同期観測」を本当に実現することができた。

観測結果として、大阪湾GPS観測から水蒸気の移流方向と降雨に関係性があることを示し(論文⑫)、ドップラーライダー観測から高度300m付近で積乱雲の冷気外出流にぶつかった暖湿流が持ち上がっている様子が確認され、雲レーダーによって降水レーダーでは判別できなかった高度3km付近における積雲形成の様子を捉えることに成功した(発表①)。本課題研究期間内に都市域でのこの共同観測体制を確立できたことそのものが想定以上の成果であり、次期観測にも引き継がれる礎を築くことができたと言える。

###### (2) 雲物理過程の解明と概念モデル化

開発した汎用システムを複数用いて初めて実現したビデオゾンデの連続放球観測と偏波レーダーとの同期観測を梅雨期沖縄で実施し、線状降水帯の発達から成熟、衰退ま



での一連のステージを捉えることに成功した。発達ステージ～成熟ステージでは、0°C 高度よりも少し上空において大きく丸い形状の凍結水滴や霰が多く観測されており、下層からの強い上昇流に吹き上げられた雨滴が凍ることで生成されたものと推測できた。一方、成熟ステージ～衰退ステージでは、凍結水滴や霰が 0°C 高度やそのすぐ下層で観測され、その形状は発達ステージのものとは異なっておりびつな形状であり、上層で形成された氷粒子が融解しているものと推測できた。このように、同一の降水システムへの連続放球を初めて実現することで凍結水滴の形成由来と霰形成プロセスまでを明らかにすることができた(論文③)。

さらに、後述する降水粒子種類の判別手法を利用して、図4に示すような降水粒子種類から積乱雲のライフステージの推定するモデルを開発した(論文⑤)。統計解析から、霰や大粒子(一部凍結水滴と考えられる)が融解層直上に存在することで降水セルが発達段階にあることが明らかになり、これは上述したビデオゾンデの連続放球から明らかになった結果を裏付け、モデルの妥当性を示唆するものであった。

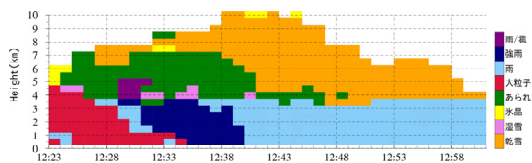


図4 降水セルを構成する粒子種類

一方で、雲微物理過程の中で最も未解明な部分の一つが氷晶形成過程であり、このプロセスを明らかにすることが数値モデルの雲微物理過程の精緻化において重要である。そこで、ビデオゾンデよりも小さな粒子の観測を対象とした雲粒子ビデオゾンデ HYVIS を用いて、梅雨期の強い層状性降水の観測を行った結果、融解層直上の多量の氷晶の形成が、数多くの雨滴の形成に寄与し、強い降水をもたらす重要な点であることが明らかになった(論文①)。さらに数値モデルでこの事例の再現計算を行い HYVIS 観測と比較した結果、融解層直上ではモデルの方が1桁～数桁氷晶の数濃度を過小評価していることが明らかになった。融解層直上における凝集過程や着氷過程といった雲微物理過程の改良を今後促す重要な結果であった。

### (3) 氷粒子混合比の同化による積乱雲スケールの降水量予測

線状対流系集中豪雨に関する数時間先の降水量予測において、空間的・時間的に高解像の観測値が得られるレーダーデータの同化は有効である。特に偏波レーダーは降水粒子種類を高精度に判別することができるため、この氷粒子情報を数値予測モデルに同化することは最先端、かつ重要であり、それを目指した。まず、同期観測のデータを基に粒

子判別結果からの種類別の存在比を推定し、レーダー反射強度によって氷粒子混合比の総量の制約条件を設けることで、氷粒子の種類別混合比の推定手法を開発した。さらに、積乱雲の形成時における氷粒子混合比やドップラー風速を同化することで、対流雲を形成するための上昇流や固体降水を表現することが可能となった(論文⑨)。

### (4) 降雨量推定アルゴリズムの実用化

現況降雨量推定手法に関しては、これまでの一連の基盤研究(B)、(A)の6年間の成果もあって、国土交通省 XRAIN が2010年にいち早く現業化した。そこで XRAIN 情報をより有効に活用するため、偏波レーダーの特性を活かした強雨時の雨滴粒径分布の推定手法を新たに開発し、積乱雲内の雨滴粒径分布に関する時間・空間構造の特徴を解析した(論文⑭)。今後、偏波機能を有しないもの高時間分解能を持つフェーズドアレイレーダーによる降水量推定への重要な応用が見込まれる結果であった。

### (5) 豪雨予測における都市ヒートアイランドの影響評価

ゲリラ豪雨・集中豪雨によらず豪雨予測の一側面として、都市ヒートアイランドの影響が強く指摘されている。そこで、都市活動・農地灌漑を考慮した陸面過程モデルをメソ気象モデルに結合した CReSiBUC と、そこに詳細な都市活動情報を導入するシステムを構築し、関東や京阪神において都市の影響を見積もる感度実験を行い、都市が局地的豪雨を強化する可能性を示した(論文⑧)。また、量的予測に限らず、都市で発生するサーマル(熱的上昇流)が豪雨のきっかけをもたらしているとも考える。そこで、都市の建物を解像するスケールで、豪雨の「種」を捉えるための都市気象 LES (Large-Eddy Simulation) モデルの開発に着手した(論文④)。(1)～②で述べた積乱雲の生成に関するフィールド観測とも今後連携してじっくり取り組むべき新たな研究課題の芽がでてきた。

### (6) 水管理へのインパクト評価

#### ①ゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測システムの開発

ゲリラ豪雨災害においては少なくとも人命を守るということという視点が大切であり、定量的な降水予測ではなく、数分でも早く危険性を予測することを最重要とし、積乱雲の力学的特性を利用したゲリラ豪雨の早期探知・危険性予測システムを開発した。開発した早期探知・危険性予測システムでは、国土交通省が2010年から導入を開始し現在全国に38機を設置している X バンド MP レーダー網(XRAIN)を用いて、後に豪雨となる可能性のある積乱雲(ゲリラ豪雨のタマゴ)を地上で降雨となる以前に上空で早期に探知し、追跡しながらそのタマゴが本当にゲリラ豪雨まで発達する危険性があるか否かを判断する(図5)。また、この危険性予測に関しては、“発達するタマゴには必ず高い渦度があ

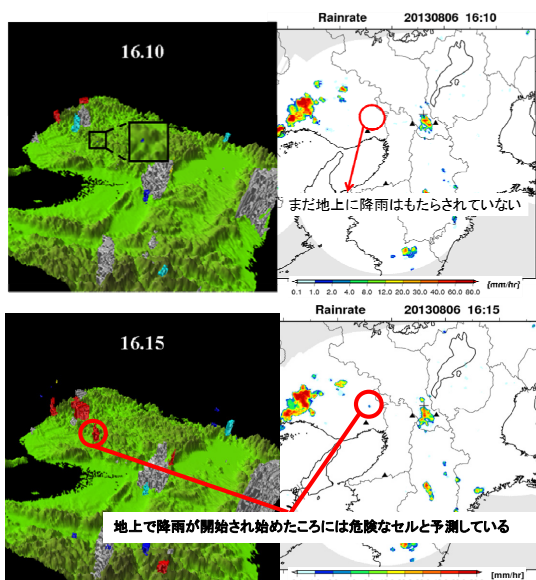


図5 ゲリラ豪雨危険予測

(左: 3次元危険予測、右: 地上降雨強度)

る”という関係を発見したことで、ドップラー風速から推定した渦度によって危険性を判断する手法を実現しており(論文⑥)、平成25年度から国土交通省近畿地方整備局で現業化システムとして試験的導入が開始されている。今後は、河川流域の出水危険性の警告表示も重要であり、流域に危険なタマゴが接近し流域が危険地域になると予測されると川辺に設置されている回転灯が働く、といったシステムが実現可能である。これこそが、都賀川水難事故以来、ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知に取り組み始めたときから描いてきた究極のシステムであり、行政と更なる連携を進めている。

## ②その他の水管理への応用研究

ゲリラ豪雨の緊急避難情報の提供以外にも、水管理への応用研究として、アンサンブル降水予測情報を利用した台風時のリアルタイム洪水予測(論文②)、レーダー降水予測情報による都市河川水位や浸水の瞬時予測(論文⑦、論文⑬)、ダムや地下貯留施設の高度活用、鉄道運行管理、などを実施した。

以上、水管理まで含めた豪雨予測に関する総合研究として、最後に5年間の成果を報告書(第I部「研究プロジェクト概要(82pp.)」、第II部「研究成果発表(413pp.)」)にとりまとめた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計63件) 査読有47件を含む

- ① Oue, M., T. Ohigashi, K. Tsuboki, and E. Nakakita: Vertical Distribution of Precipitation Particles in Baiu Frontal Stratiform Intense Rainfall around Okinawa Island, Japan, J. Geophys. Res., 2015. (in press) 査読有 doi: 10.1002/2014JD022712
- ② Yu, W., E. Nakakita, S. Kim, and K. Yamaguchi: Improvement of Rainfall and Flood Forecasts by Blending Ensemble NWP Rainfall with Radar Prediction Considering Orographic Rainfall, Journal of

Hydrology, 2015. (in press) 査読有 doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.055

- ③ Suzuki, K., M. Matsuo, E. Nakano, S. Shigeto, K. Yamaguchi, E. Nakakita: Graupel in the Different Developing Stages of Baiu Monsoon Clouds Observed by Videosondes, Atmospheric Research, Vol. 142, pp. 100-110, 2014. 査読有 doi: 10.1016/j.atmosres.2013.09.020
- ④ 山口弘誠, 高見和弥, 中北英一: 都市気象 LES モデルの開発による豪雨の「種」を捉えるための基礎研究, 京都大学防災研究所年報, 第57号B, pp. 328-338, 2014. 査読無
- ⑤ 増田有俊, 中北英一: Xバンド偏波レーダを用いた降水セルのライフステージ判別手法の開発, 土木学会論文集, B1(水工学), 第58巻, pp. I\_493-I\_498, 2014. 査読有
- ⑥ 中北英一, 西脇隆太, 山邊洋之, 山口弘誠: ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 第69巻4号, pp. I\_325-I\_330, 2013. 査読有
- ⑦ Yoon, S., and E. Nakakita: The Development of Rain-Based Urban Flood Forecasting Method for River Management Practice Using X-MP Radar Observation, Advances in River Engineering JSCE, Vol. 19, pp. 223-228, 2013. 査読有
- ⑧ Souma, K., K. Tanaka, T. Suetsugi, K. Sunada, K. Tsuboki, T. Shinoda, Y. Wang, A. Sakakibara, K. Hasegawa, Q. Moteki, and E. Nakakita: A Comparison between the Effects of Artificial Land Cover and Anthropogenic Heat on a Localized Heavy Rain Event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan, Journal of Geophysical Research, Vol. 118, pp. 600-610, 2013. 査読有 doi: 10.1002/jgrd.50850
- ⑨ 山口弘誠, 古田康平, 中北英一: 偏波レーダーから推定した定性的降水粒子情報の雲アンサンブル同化, 京都大学防災研究所年報, 56号B, pp. 369-377, 2013. 査読無
- ⑩ Nakakita, E., T. Yoshikai, S. Kim: Application of Error-Ensemble Prediction Method to a Short-Term Rainfall Prediction Model Considering Orographic Rainfall, Proceedings of a Symposium Held in Exeter, UK, April 2011, IAHS Publ., Vol. 351, pp. 317-322, 2012. 査読有
- ⑪ Suzuki, K., K. Shimizu, T. Ohigashi, K. Tsuboki, S. Kawamura, K. Nakagawa, K. Yamaguchi, and E. Nakakita: Development of a New Videosonde Observation System for In-Situ Precipitation Particle Measurement, SOLA, Vol. 8, pp. 1-4, 2012. 査読有 doi: 10.2151/sola.2012-001
- ⑫ Oishi, S., K. Tsuchiya, A. Wada, T.

Iwabuchi, and E. Nakakita: Advanced Usage of GPS Slant Delay for Detecting Water Vapor Variation Over the Osaka Bay, Proceedings of ION-GNSS 2012, CD-ROM, 6 pp., 2012. 査読有

- ⑬ Kimura, M., Y. Kido, and E. Nakakita: Study on Real-Time Flood Forecasting Method for Locally Heavy Rainfall with High-Resolution X-Band Polarimetric Radar Information, Proceedings of a Symposium Held in Exeter, UK, April 2011, IAHS Publ., Vol. 351, pp. 454-459, 2012. 査読有

- ⑭ 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), 第 68 巻 4 号, pp. I\_367-I\_372, 2012. 査読有

[学会発表] (計 97 件)

- ① 中北英一, 鈴木賢士, 大石哲, 坪木和久, 川村誠治, 橋口浩之, 中川勝広, 鈴木善晴, 大東忠保, 相馬一義, 山口弘誠: 豪雨の発生・発達をとらえる大規模フィールド同期実験と水災害軽減に向けた総合的基礎研究, 水文・水資源学会 2013 年研究発表会, 神戸大学, 2013 年 9 月 25-27 日.

[著書・図書] (計 18 件)

- ① 中北英一: 「水文観測におけるレーダー降水観測の最前線」, 水工学に関する夏期研修会講義集 A コーステキスト, 土木学会水工学委員会, A-3-1-A-3-22, 2011.

[その他]

ホームページ:

<http://hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp/nakakita/nakakit a.html>

一般公開シンポジウム:

「豪雨災害軽減のための基礎研究の魅力と利用技術創出の使命」, 三宮センタープラザ, 神戸, 2014 年 8 月 31 日.

主なメディア出演:

中北英一: 夢の扉+, TBS (全国版), 2012 年 8 月 5 日.

中北英一: NHK スペシャル, 「巨大災害 MEGA DISASTER 地球大変動の衝撃」第 5 集, 日本に迫る脅威激化する豪雨, NHK 総合テレビ (全国版), 2014 年 11 月 15 日.

## 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) 研究分担者

鈴木 賢士 (SUZUKI, Kenji)

山口大学・農学部・准教授

研究者番号: 30304497

坪木 和久 (TSUBOKI, Kazuhisa)

名古屋大学・地球水循環研究センター・教授

研究者番号: 90222140

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

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

橋口 浩之 (HASHIGUCHI, Hiroyuki)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号: 90293943

### (3) 連携研究者

高橋 劭 (TAKAHASHI, Tsutomu)

桜美林大学・名誉教授

研究者番号: 20197742

城戸 由能 (KIDO, Yoshinobu)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 50224994

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, Katsuhiko)

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

岩井 宏徳 (IWAI, Hironori)

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: 10359028

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, Soichiro)

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)

法政大学・デザイン工学部・准教授

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

若月 泰孝 (WAKAZUKI, Yasutaka)

筑波大学・生命環境科学研究科・助教

研究者番号: 70455492

相馬 一義 (SOUMA, Kazuyoshi)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号: 40452320

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・防災研究所・特定助教

研究者番号: 90551383