

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289154

研究課題名(和文)最先端遠隔探査手法を用いた富士山周辺の水循環過程の解明と流域管理への応用

研究課題名(英文) Study on Hydrological Process in Mt. Fuji Region by using Advanced Remote Sensing Technology and its Application to River Basin Management

研究代表者

大石 哲(Oishi, Satoru)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター・教授

研究者番号：30252521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：最先端遠隔探査手法を用いて、富士山周辺の水循環を把握し、高度な流域水管理手法の発達につなげる基礎研究を行ってきた。新たに開発してきた洋上の浮体に設置するGNSS装置と、山岳域谷部において準天頂衛星「みちびき」を用いて、これまでに得られていなかった湾域および山岳域からの高解像度の水蒸気移流を測定した。また、既存および新規開発したレーダーを用いて山岳域でも高分解能の降雨情報を得られるようにした。さらにこれらの雨量データを入力として流出・氾濫を考慮した水文モデルを富士山周辺域に展開することによって、独特の地形特性を持つ富士山周辺の水循環を把握してきた。

研究成果の概要(英文)：A basic scientific and engineering study has been conducted by using advanced remote sensing technology in order to capture the hydrological process in Mt. Fuji region and also to develop an advanced basin management. Water vapor advection has been measured by GNSS on ship in Suruga bay and bottom of a valley with signal from GNSS. Highly precise rainfall information with combining MLIT radars and our own radars. Moreover, a hydrological distributed model which uses the precise rainfall information mentioned above has calculated hydrological process in Mt. Fuji region where typical topography characterize special hydrological process.

研究分野：水工学

キーワード：富士山 水循環 GNSS大気遅延量 レーダー 流出モデル 視線方向遅延量 合成レーダー雨量データ

1. 研究開始当初の背景

本研究では、最先端遠隔探査手法 (Remote Sensing) を用いて、富士山周辺の水循環を把握し、高度な流域水管理手法の発達につなげてきた。

日本における山岳域の降雨形成過程における水蒸気供給源としては、湾域から山岳域への水蒸気移流による雨雲の発生あるいは維持と、山岳域と湾域の両方からの水蒸気の収束による雨雲形成などが考えられる。しかし、研究開始時には GNSS による水蒸気推定は陸上観測のみであり、一方、衛星遠隔探査 (Satellite Remote Sensing) による水蒸気推定は現状では時間分解能が十分でない上に、狭い湾域では海洋上と同程度の精度が原理上期待できなかった。したがって、数値計算によって水蒸気流入の推定が行われている。しかし、数値計算の入力条件としている湾内の海面温度の精度および解像度が十分でない状態で推定される水蒸気移流は、現実を十分に表現しているかの検証を必要としている段階で、直接的な高時空間分解能の水蒸気計測によって計算結果の妥当性を評価する必要があった。

一方、湾に接近する陸地に降った雨は流出過程を経て湾に流れ込むが、流域界と降雨域の関係によって河川への応答が決まる。特に富士山のような孤立峰では降雨がもたらされる斜面によって、富士山北側の相模川域、東側の酒匂川域、西側の富士川域などに流出するため、気象学的には微小な変化から生まれる位置の違いが、河川にとっては大きな流量の差となって現れる、すなわち気象学的な微小変化が水文学的な大きな違いを生み出していた。

豪雨の予測を起点とする洪水災害の軽減の意味からも、貯水池の水資源の安定的な運用からも、山岳域においては流域界と降雨域の関係を詳細に理解し、降雨の位置の違いが流出に与えている影響を調査することはきわめて重要である。しかし、これまでは降雨・水蒸気ともに十分な時間・空間解像度と精度を持った情報が得られなかった。昨今では X バンド降雨レーダーの開発と展開によって障害物のほとんどない平地の降雨についてはよい情報を得ることができるようになったが、山岳域では地形による遮蔽や高仰角のデータを使わざるを得ないことによる降雨量推定精度の低下などの問題がある。

以上をまとめると、治水・利水の観点から降雨域を正確に把握して流域界を正確に考慮した流出予測を行う必要があるが、既存レーダーネットワークを用いても山岳域では降雨量推定が平地ほどよくないこと、詳細な降雨量降雨の源になっている湾域の水蒸気情報の欠落が降雨予測精度向上を妨げる一因になって、水管理上の不確実性を向上させていた。

2. 研究の目的

本研究では、超小型超高解像度レーダー・洋上 GNSS 受信装置・山岳谷部 QZSS 対応 GNSS 受信装置を孤立峰・外輪山などの特徴を持つ富士山の周辺域に展開して、富士山周辺の水循環、すなわち水蒸気移流・降雨域の正確な位置と降雨量・河川応答を詳細に理解することを手がかりにして、さらに既存の降雨・流出モデルにこれらから得られる詳細なデータを適用して、降雨予測精度と流出予測精度を向上させることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の最先端遠隔探査装置の設置は GNSS とレーダーからなる。すなわち、駿河湾上に 2 周波 GNSS 受信装置を配置して湾域からの水蒸気移流を把握するとともに、山岳域谷部に準天頂衛星対応 GNSS 受信装置を配置して山岳域の水蒸気移流を把握した。加えて富士山北部の降雨量は山梨大学レーダー、南部の降雨量は国土交通省 X バンドレーダーの情報を用い、外輪山周辺には超小型超高解像度レーダーを設置して山岳谷部の詳細な降雨量を測定した。それらの情報を分布型水文モデルに与えて富士山周辺の水循環過程を計算した。

4. 研究成果

4.1 山岳谷部における大気遅延量算出に QZSS が与える影響

山岳谷部に GPS と QZSS の衛星電波を受けることができる GNSS 受信機を設置し、大気遅延量や水蒸気量の観測を行った。ここで上空が開けた地点と森林によって見晴らしが悪い地点での観測結果の違いなどについても検討するため、山岳部に新しく設置した受信機周辺の既存の GNSS 観測網の電子基準点で観測された天頂大気遅延量 (ZTD) のデータとの比較を行った。

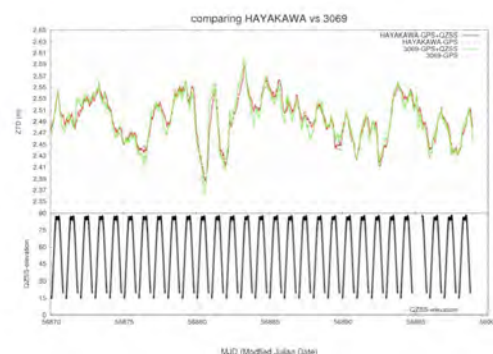


図 1: HAYAKAWA 地点と GEONET3069 地点の ZTD の時系列 (上) と QZSS の仰角 (下)

まず、山岳部における ZTD 解析での QZSS

の効果について検証を行った。検証方法としては、山岳部に設置した GNSS 受信機 (HAYAKAWA) と近傍の GNSS 観測網の電子基準点である GEONET 3069 の「GPS のみ」と「GPS+QZSS」の 2 つの観測データを使用する。天頂大気遅延量の比較では、開けた土地に受信機が設置してあり、マルチパスの影響を受けない天頂方向からの QZSS の衛星データを使用するという理由から GEONET 3069 の「GPS+QZSS」のデータで得られた ZTD の値を正しいものとして比較・検証を行う。

また、HAYAKAWA と 0369 の ZTD には距離によるバイアスが存在するので、それぞれの平均値を算出し、平均値の差を距離のバイアスと仮定して取り除いた。

図 1 は、2014 年 8 月 1 日から 8 月 31 日 (MJD: 56870.625~56890.625) の ZTD と HAYAKAWA で捉えられた QZSS の衛星の仰角の推移を表している。前述のように、現在 QZSS は「みちびき」の 1 機のみによる運用を実施しており、軌道傾斜角 45 度、軌道周期 23 時間 56 分で地球を周回している。1 日に 4 分のずれが生じるが、2014 年の 8 月における HAYAKAWA で捉えられる QZSS 衛星の天頂滞在時間は午後 4 時から午後 11 時の間であることが分かった。午後 4 時から午後 11 時以外は単なる GPS 衛星として機能していた QZSS 衛星は、この時間帯だけは天頂方向に滞在することとなる、その結果 QZSS 衛星から放たれる電波がマルチパスの影響を受けずに直接受信機に到達するようになり、精度の良い観測が行えるようになると思われる。

QZSS 衛星が高仰角に存在している間は、2 つの実線の差が小さい、すなわち、開けた地点で観測を行いかつ、高仰角の QZSS データを使用している GEONET 3069 の「GPS+QZSS」の ZTD 値と HAYAKAWA の「GPS+QZSS」の ZTD の値が、それぞれの「GPS のみ」よりも近い値となっていて、QZSS の効果が現れている。以上の結果から、QZSS が天頂方向に滞在している時間はマルチパスや周辺の山の影響を受けずに、天頂大気遅延量を精度よく解析していることがわかった。

4.2 山岳域における X バンド偏波レーダーによる降雨量観測について

新規開発したレーダーを山梨県立富士山科学研究所に設置して、他のレーダーからは観測が困難な富士北麓地域の降水量分布を測定した。さらに、国土交通省の XRAIN ネットワークと山梨大学レーダーを用いて合成したレーダー雨量を作成した。

山梨大学のレーダーは 2009 年 4 月から常時観測を実施している。また、静岡域の XRAIN の静岡北、富士宮、香貫山レーダーの観測データは、2012 年 6 月から国土交通省「X バンド MP レーダに関する技術開発コンソーシアム」を通じて、2016 年 2 月まで常時受信された。これらにより、一部欠測及

び受信漏れの事例があったが、富士山域の降水現象のデータを、概ね長期間にわたり、連続して取得することができた。

富士山南方斜面上で出現した対流性降水システムが、しばしば長時間停滞および維持し、大雨を形成する。このような大雨をもたらした対流性降水システムの構造と構成する降水セルの発達について、2014 年 9 月 10 日の事例を用いて調べた。

12 時から 22 時まで停滞および維持した対流性降水システムは、289 個の降水セル(反射強度(Z_H)が 40dBZ 以上の極値をもつセル状エコー)によって構成され、それらの出現と消滅の繰り返しによりシステムは維持された。降雨量推定から、この対流性降水システムにより期間の総降雨量が最大で 250mm を越える大雨をもたらしたことが分かった(図 2)。

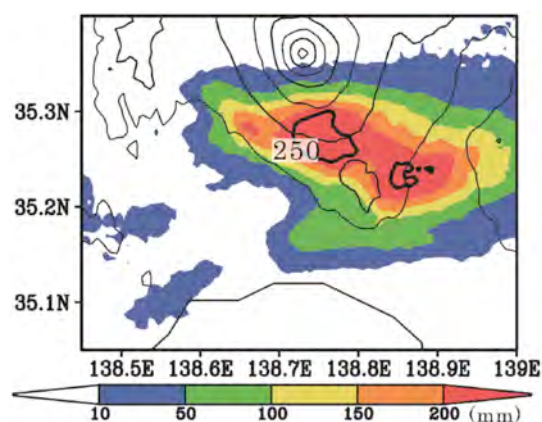


図 2: XRAIN のレーダー観測より推定された 2014 年 9 月 10 日 12 時から 22 時までの総降雨量。

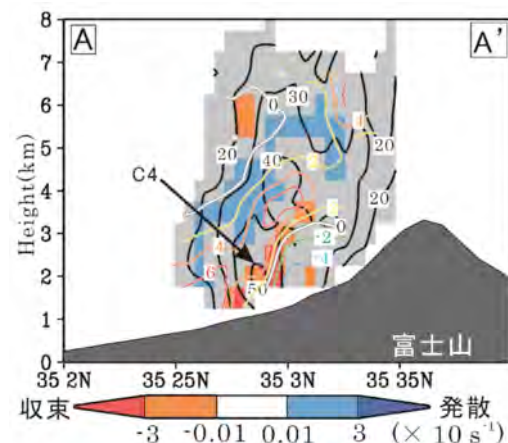


図 3: 図中の線分 A-A' における反射強度(灰色の陰影と黒色の等値線)と断面内の地形に相対する断面に平行な風速 (2 m s^{-1} 毎のカラーの等値線、左から右を正(南成分の風)とする。), そして水平発散(カラーの陰影、負の値は水平収束である。)の鉛直分布。

図 3 は、降水システム構成する降水セル C4 の鉛直断面図を示す。セル C4 の下部、高度 1.25km を見ると、富士山方向への減速を伴う強い水平収束が見られた。また高度 1.75km から 3.25km まで、風下斜面側からの南寄り

の風と、風上斜面側からの北寄り風による強い水平収束が見られ、その上部では強い Z_H のコアが見られた。

このように、富士山における水資源管理において、富士山城の詳細かつ精度の高い降雨量分布の情報を提供できること、そして地形の影響を受けて発達した降水セル、また、局地的な水循環過程の研究において降水システムによる大気中の水の、富士山の地表面への輸送過程の解明につながることを期待される。

4.3 流域界にまたがる降雨量を用いた複数流域の流出計算

前節で述べた合成レーダー雨量を用いて降雨・流出モデルの初期値として用いることができた。流出モデルでは、富士山を起点に、富士川・相模川などに分派していく河川の分布型流出モデルを開発した。

ここでは、2013年9月4日8:00～9月5日7:30の計算結果を図4に示す。本宿地点について見ていくと、実測では5日9時にピーク流量を観測した。対してレーダーデータを用いたものはピーク流量が実測より小さく、アメダスデータを用いたものはピーク流量が実測より大きくなった。共にピーク流量となったのは5日8時であった。この理由として、レーダーデータが7:30までのものを用いたことが挙げられる。アメダスデータを用いたものは、流量減少が実測より早かったが、その後の流量が一定となる流量値は実測値と一致している。

次に、松岡地点について見ていくと、実測値に比べモデルの値は、流量増加の時間早く、流量減少の時間が遅い。これはモデルを用いた多くのケースであてはまることであった。比較終了時間の7日3時の値で実測64.4m³/s、モデル190.4m³/sとなった。

最後に、相模大橋地点だが、ピーク流量とその時間について、モデル値は、実測値に近い値となった。しかし、先に述べたように、モデルの方のピークからの流量減少が遅いことが述べられる。

以上の研究を通してXRAINネットワークと独自レーダーの合成データ雨量を初期値として用いることによって、短期流出すなわち洪水のための水管理においては本研究で開発したシステムで対応が可能になることを示した。

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 23 件)

- ① 小池雄大・太石哲・小川まり子：雷雲中の降水粒子分布測定に基づく電荷量と電場の推定手法に関する研究，土木学会論文集 B1 (水工学)，72(4)，I_1247-I_252，

2016.

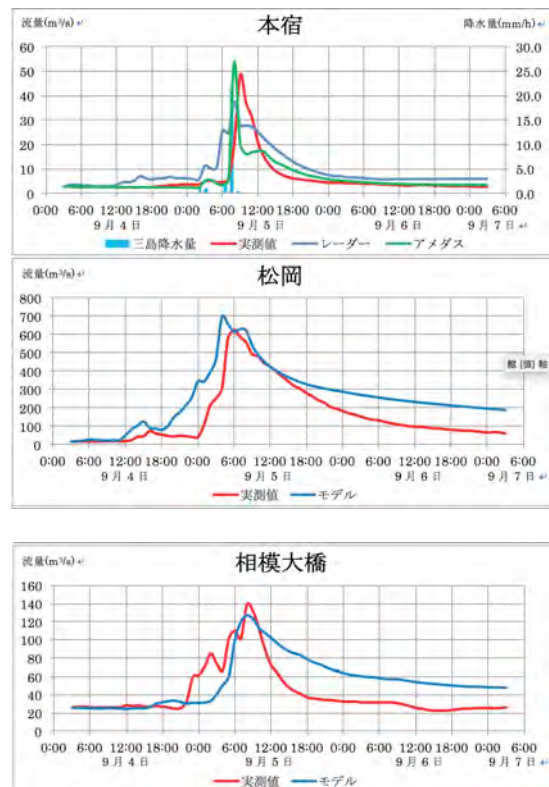


図4：2013年9月4日8:00～9月5日7:30

での3地点での流量比較

- ② 田原俊彦・太石哲：アンサンブル予報を利用した積算予測雨量精度の不確実性の推定に関する研究，土木学会論文集 B1 (水工学) 72(4)，I_1237-I_1242，2016.
- ③ Syarifuddin, M., Oishi, S., Pramudya, A., Masria: Predicting Indonesian tropical monsoonal rainfall in west timor with artificial neural networks, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 71(4), 2015.
- ④ Ogawa, M., Oishi, S., Yamaguchi, K., Nakakita, E.,: Quantitative Parametric Approach to Estimating Snowflake Size Distributions Using an Optical Sensing Disdrometer, SOLA, 2015, Vol. 11, 134-137, doi:10.2151/201a.2015-031, 2015.
- ⑤ Kobayashi, K., Kitamura, D., Ando, K., Ohi, N.,: Parallel computing for high-resolution/large-scale flood simulation using the K supercomputer, Hydrological Research Letters, 9(4), 61-68, 2015

- ⑥ 能登谷拓, 小林健一郎, 奥勇一郎, 木村圭佑: 平成 25 年台風 18 号を対象とした WRF による降水の再現と海面水温温暖化実験, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol. 71, No. 4, I_397-I_402, 2015
- ⑦ Heng, S., Suetsugi, T: Comparison of regionalization approaches in estimating sediment rating curve for subsequent sediment yield prediction, Journal of Hydrology, 512, 240-253, 2014.
- ⑧ Heng, S., Suetsugi, T: Prediction of sediment yield in an ungauged basin under the impact of cascade dam-reservoir development, 土木学会論文集 B1 (水工学), 70(4), I_1-I_6, 2014.
- ⑨ Sulistyowati, R., Hapsari, R. I., Syamsudin, F., Mori, S., Oishi, S. Yamanaka, M. D.: Rainfall-driven Diurnal Variations of Water Level in the Ciliwung River, West Java, Indonesia, Scientific Online Letters on the Atmosphere, 10, 141-144, 2014.
- ⑩ 佐野哲也・末次忠司・大石哲: 下記静音日に甲府盆地上で出現する積乱雲の出現分布と出現前の地上場の特徴, 土木学会論文集 B1(水工学), 70(4), I_889-I_904, 2014.
- ⑪ 末次忠司・橋本雅和: 2000 年代に発生した水害から得られた教訓, 水利科学, 57(2), 36-48, 2013. 椿良太・小林健一郎・内藤正彦・田口丞: 洪水予測技術の現状と課題について, 河川技術論文集, 19, 1-6, 2013.
- ⑫ Souma, K., Tanaka, K., Suetsugi, T., Sunada, K., Nakakita, E., Takara, K., Oishi, S.: The effect of soil moisture on a summertime convective rainfall over mountainous area and its contiguous plain in central Japan, International Association Hydrological Science Publication Vol. 359, pp. 246-252, 2013.
- ⑬ Sawai, N., Takara, K., Kobayashi, K.: Evaluation of water retention capacity and flood control function of the forest catchment, Journal on Food, Agriculture and Society, 1(1), 13-22, 2013.
- ⑭ Heng, S., Suetsugi, T: Estimating quantiles of annual maximum suspended sediment load in the tributaries of the Lower Mekong River, Journal of Water and Climate Change, 4(1), 63-76, 2013.
- ⑮ Heng, S., Suetsugi, T: Using artificial neural network to estimate sediment load in ungauged catchments of the Tonle Sap River Basin, Cambodia, Journal of Water Resource and Protection, 5(2), 111-123, 2013.
- ⑯ Heng, S., Suetsugi, T: Coupling singular spectrum analysis with artificial neural network to improve accuracy of sediment load prediction, Journal of Water Resource and Protection, 5(4), 395-404, 2013.
- ⑰ Heng, S., Suetsugi, T: Investigation on applicability of data-driven models in ungauged catchments: sediment yield prediction, Earth Resources, 1(2), 37-47, 2013.
- ⑱ Heng, S., Suetsugi, T: An approach to the model use for measuring suspended sediment yield in ungauged catchments, American Journal of Environmental Sciences, 9(4), 367-376, 2013.
- ⑲ Widyasamratri, H., Souma, K., Ishidaira, H., Ichikawa, Y., Kobayashi, H., Suetsugi, T.: A comparison of air temperature and land surface temperature to detect the effect of urbanization in Jakarta, Indonesia, Climate, 1, 1-9, 2013.
- [学会発表] (計 27 件)
- ① 佐野哲也・大石哲・末次忠司: 孤立峰の斜面上に大雨をもたらした対流性降水システムの構造, 日本気象学会 2015 年秋季大会, 2015. 10. 29, 京都テルサ (京都府)
- ② 小田切幸次・佐野哲也・大石哲・内山高・小林浩: 2013 年夏季における富士山周辺域での降雨分布とその要因について, 日本気象学会 2015 年春季大会 2015. 10. 29, 京都テルサ (京都府)
- ③ 佐野哲也・末次忠司・Hapsari, R. I., Norzan, N. N. B.: 複数の小河川を対象とする X-MP レーダー降雨量を入力としたセル分布型流出モデルによる流出計算, 土木学会第 70 回年次講演会, 2015. 09. 17, 岡山大学 (岡山県)

- ④ 山本健太郎・大石哲：複数の Xバンド MP レーダーを用いた富士山周辺の降雨流出過程に関する研究，水文・水資源学会 2015 年度総会・研究発表会，2015. 09. 10，首都大学東京（東京都）
- ⑤ 林和成・大石哲：GPS を用いた大阪湾上の水蒸気移流推定に関する研究，水文・水資源学会 2015 年度総会・研究発表会，2015. 09. 10，首都大学東京（東京都）
- ⑥ 大石哲：超高時空間分解能を有するリアルタイム降雨予測技術の研究開発，災害に強くしなやかな社会の創造を目指して，2015. 03. 18，東京エレクトロンホール宮城（宮城県）
- ⑦ 大石哲・山口弘誠・小川まり子・中大輔・林和成・中北英一：GNSS による湾上および山岳域における水蒸気分布と豪雨に関する研究，京都大学防災研究所年報第 58 号 B，pp. 294-304，2015. 02. 24，京都大学防災研究所（京都府）
- ⑧ 直原悠紀子・大石哲・中北英一・山口弘誠：超局地・超高時間分解能レーダーと移流モデルを用いた予測降雨場に関する研究，日本気象学会 2014 年度秋季大会，2014. 10. 23，福岡国際会議場（福岡市）
- ⑨ 中大輔・大石哲：複数の GPS 受信機を使用した天頂大気遅延量の解析，日本気象学会 2014 年度秋季大会，2014. 10. 23，福岡国際会議場（福岡市）
- ⑩ 小田切幸次・佐野哲也・大石哲・内山高・小林浩：複数の Xバンド MP レーダーを用いた富士山周辺域での降雨量推定，水文・水資源学会 2014 年度研究発表会，2014. 10. 23，福岡国際会議場（福岡市）
- ⑪ 田原俊彦・大石哲：アンサンブル予報と分布型流出を考慮した洪水調節最適化に関する研究，水文・水資源学会 2014 年度総会研究発表会，2014. 09. 24，KITEN 宮崎（宮崎県）
- ⑫ Sano, T., Suetsugi, T., Oishi, S., : Characteristics of distribution and preceding surface conditions of cumulonimbus clouds appeared on Kofu Basin on a calm, Japan Geoscience Union Meeting 2014. 05. 24, パシフィコ横浜（神奈川県）
- ⑬ 末次忠司：霞堤による減災のための保全，甲斐の国水災・減災セミナー，2014. 03. 29，南アルプス市わかかくさホール（山梨県），招待
- ⑭ 佐野哲也：X-MP レーダーでみた甲府盆地の降水系，2013. 12. 10，甲府地方気象台（山梨県），招待
- ⑮ 大石哲：高分解能レーダーを用いた気象観測による安全・安心な都市，ビジュアリゼーションカンファレンス，2013. 11. 29，タイム 24 ビル（東京都），招待
- ⑯ 大石哲：「電波で探知！ 豪雨災害」，工学サミット東京トライアル，2013. 10. 22，神戸大学東京六甲倶楽部（東京都），招待
- ⑰ 大石哲：豪雨災害から身を守る，市民講座－災害リスクを考える－，2013. 10. 11，キャンパスプラザ京都（京都府），招待
- ⑱ 小田切幸次・佐野哲也・大石哲・内山高・小林浩：Xバンド MP レーダーを用いた富士山北麓地域での降水量推定に関する検討，水文・水資源学会 2013 年度研究発表会，2013. 09. 25，神戸大学（兵庫県）。
- ⑲ 佐野哲也：山梨大学における X-バンド MP レーダーを用いた山岳域と盆地域で発生する豪雨の形成過程に関する研究，XRAIN シンポジウム，2013. 07. 03，（東京都）
- 〔図書〕（計 2 件）
- ① 末次忠司：もっと知りたい川のはなし、鹿島出版会、2014.
- ② 末次忠司：実務に役立つ総合河川学入門、鹿島出版会、2015.
- 〔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
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
- (2) 研究分担者
小林 健一郎 (KOBAYASHI, Kenichiro)
神戸大学・都市安全研究センター・准教授
研究者番号：60420402
- 末次 忠司 (SUETSUGI, Tadashi)
山梨大学・医学工学総合研究部・教授
研究者番号：60355948
- 佐野 哲也 (SANO, Tetsuya)
山梨大学・医学工学総合研究部・助教
研究者番号：90633589