

令和 5 年 10 月 26 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20543

研究課題名（和文）Xバンドレーダとデータ駆動の融合による高分解能かつ多角的な洪水モニタリングの創出

研究課題名（英文）Development of flood monitoring system using microwave radar with data driven signal processing

研究代表者

安田 浩保（Yasuda, Hiroyasu）

新潟大学・災害・復興科学研究所・研究教授

研究者番号：00399354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,600,000円

研究成果の概要（和文）：一般的に洪水監視に用いるCCTVカメラやUAVは、光学的な手法のため、夜間の観測が厳しく制約される上、高頻度での広範囲の観測は難しい。本研究で用いたμ波レーダは、昼夜で完全に同一の観測ができ、数kmの範囲を数秒ごとに10m程度ごとの細密さの観測ができる。μ波にはフラッグ散乱を測定原理とするため水面が大きく揺動する大きな洪水の観測ほど有利となる特徴もある。本研究では、μ波の反射強度は固体と流体とで数倍以上異なる性質を用い、河道の変形を直接的に把握できることを実証した。また、μ波の反射強度の数理処理による流速を推定でき、この流速と洪水前の河道断面測量に基づき流量の推定ができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、昼夜を問わずに避難情報や河川と並走する道路と渡橋に対する交通規制の即時的な発令が可能となる。これは、安全な避難経路の選択を可能とし、近年の夜間の洪水における落橋の発見の遅れによる洪水時の河川への車両の転落事故を予防できるようにする。また、本研究により、誰も見たことがない洪水のピーク付近の河道の大規模な変形過程の観測事実を初めて蓄積でき、新たな河道の設計法や堤防の設計法を基礎資料を得ることができる。これらの技術が確立されれば、堤防が決壊した場合の人命の喪失と数千億円規模の経済損失の軽減、不可逆的な過疎化を予防が可能となる。

研究成果の概要（英文）：CCTV cameras which are optical methods used for flood monitoring, are severely limited in their ability to observe at night, and it is difficult to observe large areas at high frequency. The  $\mu$ -wave radar used in this study is capable of completely same observation during the day and night, and can observe an area of several km every few seconds with a resolution of about 10 m. Since  $\mu$ -waves use flag scattering as their measuring principle, they are advantageous for observing large floods where the water surface fluctuates greatly. In this study, it was demonstrated that the  $\mu$ -wave reflection strength can directly measure the deformation of the channel by using the property that the  $\mu$ -wave reflection strength differs several times more than that of solid and fluids. It was also shown that the velocity can be estimated by image-analysis the  $\mu$ -wave reflection intensity, and that the discharge can be estimated based on this velocity and the cross-sectional survey of the channel.

研究分野：防災工学、河川工学

キーワード：洪水 水害 マイクロ波 危機管理

## 1. 研究開始当初の背景

2019 年台風 19 号による洪水では計画水準の堤防が完成していた千曲川でさえ多数の破堤と越流による氾濫が生じた。我が国の洪水監視体制は世界最高水準といわれ、数 km 程度毎に水位計と CCTV カメラが設置されているが近年の洪水・水害を通し、以下の課題が明白となった。

### (1) 下流区間の課題

洪水氾濫の形態の一つは、河川水位が堤防高を上回る越流型の破堤氾濫で、特に下流区間で懸念される。洪水時の水位監視の理想は「いつ頃にどこから溢れるかの把握」で、それには最低でも 100m の間隔以下での水位計測が必要である。しかし、水位計の一基あたり 1000 万円程度の設置費用が制約となり、国が管理する河川でさえ数 km 毎の測定が大半を占め、越流箇所を把握できない。自治体が管理する河川では一つの河川に水位計が一基のみや設置されていない事も珍しくない。近年、一基あたり 100 万円程度の安価な水位計が開発され、一部の河川で 1km 間隔の監視が開始した。しかし、堤防高の縦断形は直線とはならず起伏があるため、水位監視の理想には遠い。設置位置の一点の水位しか計測できない既存の計測原理による水位監視の理想の実現は難しく、新たな計測原理による水位の把握が不可欠である。

### (2) 中流区間の課題

洪水氾濫の形態のもう一つは、河川水位は堤防高に届かないものの洪水流が河岸や堤防を浸食して堤防を破壊する浸食型の破堤氾濫である。この形態は中流区間で特に懸念され、2016 年の北海道水害では河岸や堤防の浸食が要因と推測される 100 以上の落橋、河川との併走道路の流失が多発した。現状では、浸食破堤の危険箇所の科学的な予知は困難とされ、その発見は建設業者などの巡視に依存している。24 時間昼夜を問わずの縦断路流失や落橋の把握もしくはその余地のための監視方法の確立は急務である。

### (3) 流量観測の課題

気候変動の進行速度は予想よりも速く、近い将来、気候変動の影響で降水量は 1.1 倍、流量は 1.2 倍に増大すると予測されている。このため、今後、各河川における計画の見直しが要求され、その時に最も基本となる洪水時における物理量は流量である。現状では、有人作業により、浮子という流下物を河川に投入してその移動速度から水表面付近の流速を推定し、洪水前の断面形から水深を推定し、その流速と水深の積を流量としている。この手法の問題点として、十分な精度で流量の把握ができないことと、特に夜間における作業者の安全の確保が困難であることが挙げられる。洪水中に昼夜連続かつ十分な精度かつ無人で流量を観測できる従来の手法とは一線を画す方法が待望されている。

上記の通り、既存の洪水モニタリングは明らかに能力不足である。新たな計測原理の導入により、洪水時の危機管理と流量など定量化ができる多元的かつ高分解能な洪水モニタリングへのパラダイムシフトは急務である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、 $\mu$  波を測定原理とすることで、24 時間連続した時空間に細密な水位の把握、河川との併走道路の流失や落橋などの誘引する大規模な河道の変形の検知、洪水時の連続した流量の把握が可能となることの実証である。

## 3. 研究の方法

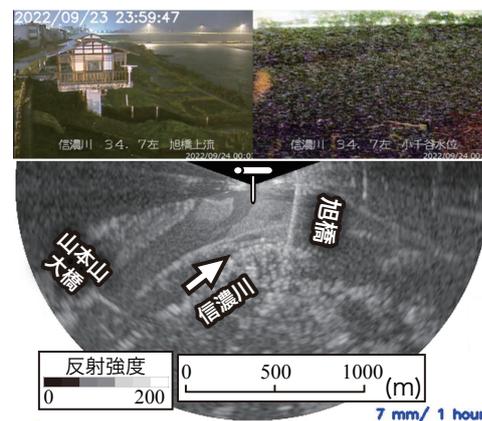


図 1: 夜間かつ降雨時の CCTV カメラ画像 (上段) と  $\mu$  波の反射強度 (下段) の比較

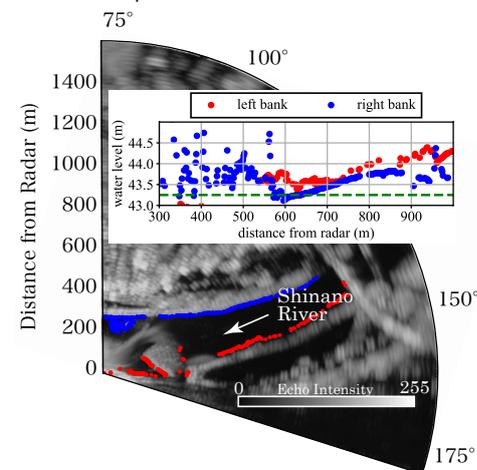


図 2: 機械的に検出した水際と細密な水位の縦断路流失や落橋の把握

一般的に洪水監視に用いられる CCTV カメラや UAV は、光学的な手法のため、夜間の観測が厳しく制約される上、高頻度での広範囲の観測は難しい。これに対し、本研究で用いる  $\mu$  波レーダは、昼夜で完全に同一の観測ができ、障害物がなければ数十 km の範囲を数秒ごとに  $10\text{m}^2$  程度の細密さの観測ができる。また、 $\mu$  波にはフラッグ散乱を測定原理とするため水面が大きく揺動する大きな洪水の観測ほど有利となる特徴もある。

本研究では、まず、 $\mu$  波の反射強度は固体と流体とで数倍以上異なる性質を用い、河道の変形を直接的に把握でき、この性質に基づき水位の細密な把握ができることを実証する。次に、 $\mu$  波の反射強度の数理処理による流速の推定ができ、この流速に基づき流量の把握が可能となることを示す。

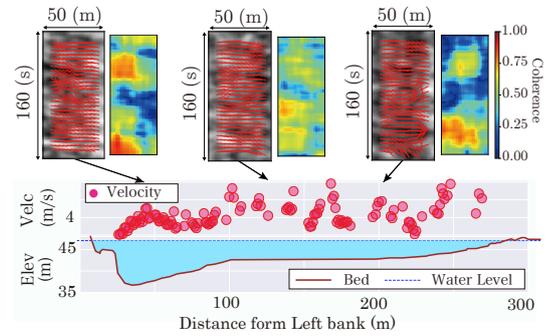


図 3: 推定した横断流速分布と底面高及び観測時の水位

時を示す。

## 4. 研究成果

### (1) 水際の機械的な検出と細密な水位の縦断分布

本研究で用いた  $\mu$  レーダは、探索範囲における  $\mu$  波の反射強度の平面分布を 1.2 秒ごとに  $10$  から  $20\text{m}^2$  の空間的な密度で 24 時間均質に測定できる。 $\mu$  波は液体と固体とで反射強度が 1 オーダーほど異なる性質がある。この性質を用いると、水際の機械的な検出ができ、別途河道内の標高値が測定されていれば、その水際の水位を定量化できる。以下のその実証例を示す。

図-1 は、夜間における  $7\text{mm/h}$  ほどの降雨時の CCTV (上段) と  $\mu$  波の反射強度 (下段) を比較してのものである。上段の CCTV カメラと比べ、 $\mu$  波の反射強度は水際や橋梁を明瞭に捉えていることが分かる。

図-2 は、機械的に検出した水際と細密な水位の縦断分布を定量化した一例である。同図のモノクロの濃淡が反射強度を示し、堤防や橋梁の明度が高く、水面の明度が低いことがわかる。つまり、明度の急変点を水際と仮定できるため、この画像に対して距離方向に微分値を計算し、その結果を青と赤の丸シンボルで示し、良好に水際の検出ができることが分かる。また、この検出された地点の平面座標に該当する標高値に基づき水位の縦断分布を得られることも実証した。

これらの成果は、現状では把握できない夜間における越流箇所や河岸欠損の箇所を 24 時間連続した検出が可能となり、観測事実に基づく避難経路の選択や交通規制が可能となることを示す。

### (2) $\mu$ 波の反射強度に基づく流速と流量の推定

本研究で用いた  $\mu$  波レーダは 1.2 秒ごとに図-1 などに示した範囲の  $\mu$  波の反射強度を得ることができる。つまり、細密な時系列の測定ができ、紙面での表現に制約があるために、本紙上に示せないが洪水が流下する様子を示す動画が得られる。

本研究ではこの性質に着目し、SITV 法により流速の推定を行なった。その結果を図-3 に示した。図中の上段が左岸からそれぞれ  $40\text{m}$ 、 $127\text{m}$ 、 $202\text{m}$  における時空間画像とそのコヒーレンス、下段の赤の丸シンボルが SITV で推定された流速である。図中の左岸から  $80\text{m}$  ほどの範囲に着目すると、水深が深い箇所ほど流速が高速となる結果が得られていることが分かる。

この流速の推定の直近の横断図の測量成果に基づき水深を推定し、SITV で得た流速との積として流量を算定した。規模の異なる二つの洪水時の流量を推定し、国交省が公表する流量と対比したところ  $\pm 10\%$  程度の差異であることが分かった。今後、いくつかの流速の測定値との対比による検証が不可欠であるが、 $\mu$  の反射強度に基づき流速と流量の推定ができる可能性は高い。

## 参考文献

- [1] (社) 日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説 調査編, 1997.
- [2] I. Fujita et al.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV), Int. J. River Basin Man., 5(2), 105-114., 2007.
- [3] 海面におけるマイクロ波散乱メカニズムの解析, 海岸工学論文集, 第 51 巻, 1426-1430, 2004.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Moteki D., Seki S., Muramatsu S., Hayasaka K., Yasuda H.	4. 巻 35
2. 論文標題 On the occurrence of sandbars	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 016608 ~ 016608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0128760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Moteki D., Murai T., Hoshino T., Yasuda H., Muramatsu S., Hayasaka K.	4. 巻 34
2. 論文標題 Capture method for digital twin of formation processes of sand bars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 034117 ~ 034117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0085574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ishihara Michihide, Yasuda Hiroyasu	4. 巻 127
2. 論文標題 On the Migrating Speed of Free Alternate Bars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Earth Surface	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021jf006485	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Dongqi LIU , Yutaka NAITO , Chen ZHANG , Shogo MURAMATSU , Hiroyasu Yasuda , Kiyoshi HAYASAKA , Yu OTAKE	4. 巻 -
2. 論文標題 River Flow Path Control With Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of The IEEE International Conference on Autonomous Systems (IEEE ICAS 2021)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂木大知, 大原由暉, 室永武司, 西村雄喬, 有澤良佑, 前野仁, 早坂圭司, 村松正吾, 安田浩保	4. 巻 29
2. 論文標題 地上マイクロ波レーダのエコーデータ処理による洪水流量の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大泉尚紀, 茂木大知, 安田浩保	4. 巻 78
2. 論文標題 流水深に基づく平面二次元流速の推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_577-I_582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_577	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 黛由季, 茂木大知, 大原由暉, 安田浩保	4. 巻 78
2. 論文標題 交互砂州が誘発する流路変動の発現指標	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1159-I_1164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_1159	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 関 翔平, 安田 浩保	4. 巻 78
2. 論文標題 模型実験における砂州の起源とその発達過程	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集 B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_961-I_966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.78.2_I_961	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ARAI Yusuke, MURAMATSU Shogo, YASUDA Hiroyasu, HAYASAKA Kiyoshi, OTAKE Yu	4. 巻 -
2. 論文標題 Sparse-Coded Dynamic Mode Decomposition on Graph for Prediction of River Water Level Distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/icassp39728.2021.9414533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂木大知, 大原由暉, 室永武司, 西村雄喬, 有澤良佑, 前野仁, 早坂圭司, 村松正吾, 安田浩保	4. 巻 27
2. 論文標題 マイクロ波レーダーによる河川モニタリングの概念実証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 in Print
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小関 博司, 安田 浩保	4. 巻 76
2. 論文標題 水深波長比を用いた河床波の統一的な区分	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_489 ~ I_498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_489	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 石原道秀, 安田浩保
2. 発表標題 交互砂州上の流れを再現する数値計算に要求される空間分解能
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯澤広晃, 大泉尚紀, 安田浩保
2. 発表標題 静水圧条件下における堤体越流侵食過程の再現手法の検討
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田所祐輝, 茂木大知, 安田浩保
2. 発表標題 空中写真を用いた砂州の自動検出法の開発
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関翔平, 茂木大知, 村井剛徳, 安田浩保
2. 発表標題 平坦床からの自発的な河床波の発生過程の実測
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大泉尚紀, 安田浩保
2. 発表標題 摩擦損失係数を定数とした浅水流解析の再現性について
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大原由暉, 茂木大知, 早坂圭司, 村松正吾, 安田浩保
2. 発表標題 マイクロ波の反射強度を用いた左右岸水位と表面流速の推定
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤浩輝, 茂木大知, 安田浩保, 村松正吾, 早坂圭司
2. 発表標題 DMD による移動床水理の観測ビッグデータの時系列解析
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村井剛徳, 安田浩保
2. 発表標題 実河川における自発的に形成された澇筋の形状安定性
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂木大知, 村井剛徳, 安田浩保, 早坂圭司, 村松正吾
2. 発表標題 砂州の形成・発達過程における水面測定の不確実性について
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黛由季, 茂木大知, 村井 剛徳, 安田 浩保
2. 発表標題 交互砂州が左右岸の水位差に及ぼす影響
3. 学会等名 第39回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会 2021年11月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大原由暉, 茂木大知, 安田浩保
2. 発表標題 マイクロ波を用いた河川における左右岸の検出
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会概要集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 茂木大知, 安田浩保, 大竹雄, 早坂圭司, 村松正吾, 西村雄喬, 有澤良佑
2. 発表標題 マイクロ波レーダによる河川モニタリングの概念実証
3. 学会等名 第38回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	村松 正吾  (MURAMATSU Syogo)  (30295472)	新潟大学・自然科学系・教授    (13101)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	早坂 圭司  (HAYASAKA Kiyoshi)  (40377966)	新潟大学・自然科学系・教授    (13101)	
研究分担者	大竹 雄  (OHTAKE Yu)  (90598822)	東北大学・工学研究科・准教授    (11301)	
研究分担者	岡田 将治  (OKADA Syoji)  (80346519)	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授    (56401)	
研究分担者	萬矢 敦啓  (YOROZUYA Atsuhiko)  (00314740)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（つくば中央研究所）・主任研究員    (82114)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関