

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04672

研究課題名（和文）災害時情報収集のための合成開口レーダによる移動体検出の研究

研究課題名（英文）Study on moving object detection by synthetic aperture radar for disaster surveillance

研究代表者

近木 祐一郎（Kogi, Yuichiro）

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：10398109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、合成開口レーダで移動体検出を行うべく既存のレーダの改修および地上試験による検証実験を展開した。レーダの改修では異なる2方向の後方散乱波を受信できる2系統のスプリットビームアンテナを製作し、スプリットビーム状の放射パターンが実現できたことを確認した。また計画通りにスイッチングシステムを開発して前述のスプリットビームアンテナと組み合わせて、スプリットビームSARへの改修を達成した。地上試験における実機検証では2系統の画像を取得し、移動体物体像のシフト量から移動速度の推定ができたものの、画像強度がスイッチングシステムの損失により低下したため満足な移動体抽出が難しかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スプリットビームSARによる移動体検出のために展開したアンテナ開発では1つのリフレクタに2系統の一次放射器を最適設計・配置しスプリットビームが実現できたことはアンテナ分野での学術的な成果であるといえる。残念ながら移動体の抽出は今回の研究では完全には実現できず、災害時に役立てるという社会的に意義のある貢献は達成できていない。一方で、今回の高強度の反射体を用いた実証実験で得られた知見により、移動体検出をより最適に実現できる足がかりを得ることができた。その知見を基にレーダのさらなる改修方針を準備して実験提案をしていきたい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted development of split beam antenna system and verification study by ground tests in order to detect moving objects using synthetic aperture radar. We manufactured the split beam antenna and confirmed that the antenna is capable of receiving backscattered waves in two different directions. In addition, we developed a switching system as we initially planned and combined it with the developed antenna system to convert to split beam SAR. In the actual verification in the ground test, we could successfully acquire two images by the split beam antennas, and confirmed that moving speed could be estimated from the shift amount of the moving object image. However, it was difficult to satisfactorily extract the moving object because the image intensity decreased due to the loss of the switching system.

研究分野：電磁波計測、リモートセンシング

キーワード：合成開口レーダ 移動体検出 スプリットビーム

1. 研究開始当初の背景

豪雨による洪水や土砂災害くい止めるべく、堤防の強靱化、遊水池や地下放水設備、MP 降雨レーダ網の整備など進められ、予防対策や避難指示の強力なツールとなっている。また、災害現場における情報収集は、天候が良く昼間の間であれば航空機に搭載された光学カメラを用いてリアルタイムかつ遠隔から詳細に行うことが可能であったが、流水や堤防の決壊、土砂の崩落、家屋の崩落や流木などの移動体の状況をリアルタイムに観測することで、災害規模をよりの確に把握でき避難指示の精度を高めることができると考えた。しかし研究当初において、悪天候時、夜間、何らかの原因により災害地域に近づけないときは、リアルタイムに情報収集できるツールはなく、光学カメラを補完する技術の開発は切迫した課題であった。

2. 研究の目的

本研究は移動物体の検知を実証すべく、我々が開発した合成開口レーダ (SAR) および本研究担当者が取得したスプリットビーム方式特許技術を応用し、移動体検出の実地検証を行うことを目的としている。

スプリットビーム SAR による移動体検出原理は、図 1 に示すようにスプリットビームによる 2 系統 (ビーム 1、ビーム 2) の SAR 画像を同時に取得し、

- a. 静止物体に対しては図 2 (a) のように、2 系統の画像に表示される静止物体像強度はそれぞれの系統のアンテナゲインに比例すること、
- b. 移動物体に対しては図 2 (b) に示すように、移動物体の表示位置はシフトするため移動物体像強度はそれぞれの系統のアンテナゲインに比例しない、

という特性を利用して移動物体像のみ検出する方法である。

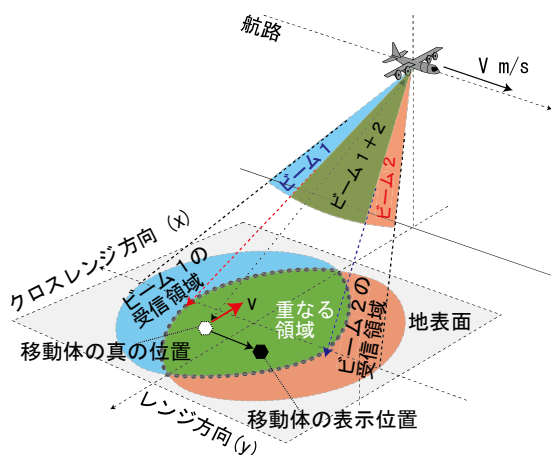


図 1 : スプリットビームパターン

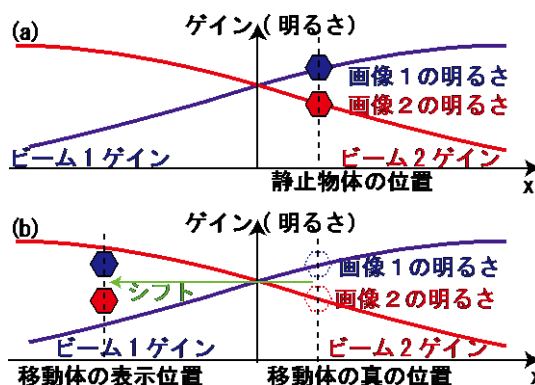


図 2 : 静止物体 (a) と移動体 (b) の画像明るさとアンテナゲインとの関係

図 1 ではレーダのプラットフォームとして航空機が描かれているが、本実験ではプラットフォームとしてトラックを採用し、地上からの実験で移動物体を検出することを目的とし、特に A. 移動体の抽出、B. 移動速度の推定、C. 実際の位置の推定することを当初の目的として挙げる。

3. 研究の方法

はじめに既存のレーダは図 3 (右側) に示すように送受信系統が 1 つのみのため、スプリットビームが受信できるように受信系統を 2 つに増やす改修を行う。改修は、高速マイクロ波 PIN スイッチとスプリッタを用いたシステムを送受信システムとアンテナ間に挿入し、デジタル制御系により受信アンテナ系統を高速に切り替え 1 つの AD 変換器でデータを取得する。一次放射器も 2 系統のビームを受信できるように 2 系統のホーンアンテナを製作する。

移動物体として模擬移動体を複数作成する。移動体は後方散乱断面積が大きい 30cm 程度のコーナーキューブリフレクタ型を製作する。

地上試験ではレーダから 3km 程度遠方の数百 m 四方の地表面に複数のコーナーキューブリフレクタを設置し、レーダ実験によりデータを取得する。ここで、複数のコーナーキューブリフレクタのうち 1 つはコンピュータ制御移動ステージによりコントロール下に置かれた移動体として扱い、その他は地上に固定設置する。実験条件として移動速度を様々に変えてデータを



図 3 : 既存のレーダ

取得し、移動体検出、移動体の速度の推定、実際の位置の推定などの原理実証実験を行う。

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 スプリットビーム化改修 —アンテナの改修—

アンテナで 2 方向からの反射波を個別に受信できるようにするため、既存のオフセットパラボラアンテナの改修を行った。具体的にはパラボラアンテナの 1 次放射器が既存のアンテナでは 1 つのホーンアンテナを用いていたものを、2 つのホーンアンテナに換装した。2 つのホーンアンテナを図 4(a)に示すように横方向に配置し、さらに異なる方向に向けることで 2 方向の遠方からの反射波を受信できるようになる。開発には電磁界シミュレータを利用し、2 つの放射パターンを横方向のオーバーラップを最適化し、水平方向に 5 度程度の範囲内でスプリットビームを生成できるように設計した(図 4(d))。また、放射器の開口形状の変更により、パラボラ反射鏡表面での電界分布の最適化(図 4(b), (c))を行うことで 30dB 近くサイドローブレベルを減少できる(図 4(d))。

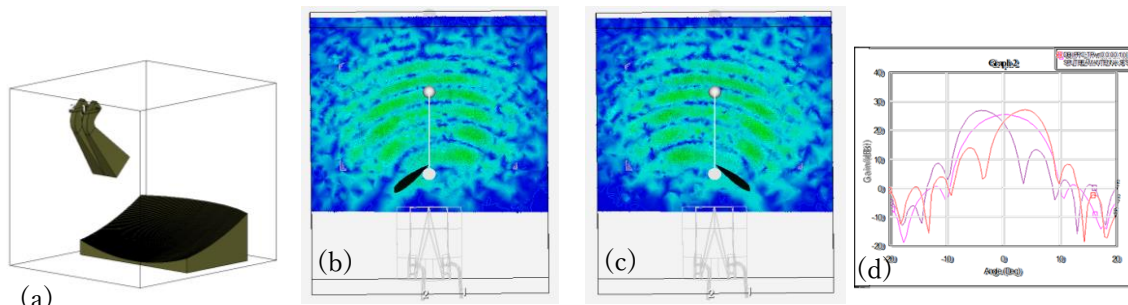


図 4: (a)スプリットビーム対応アンテナ、(b)系統 1 のみ受信時のリフレクタ面での電界分布、(c)系統 2 のみ受信時のリフレクタ面での電界分布、(d)アンテナの放射パターンのシミュレーション値(全系統、系統 1、系統 2)

設計した 1 次放射器を図 5(a,b)のように本学の工作センターにて製作し、既存のオフセットパラボラアンテナの 1 次放射器を図 5(c)に示すように置き換えた。換装したオフセットパラボラアンテナを電波室内で放射パターンの評価を行ったところ、図 5(d)のようにシミュレーション結果と同様のスプリットビームの放射パターン特性、サイドローブレベルを確認することができた。

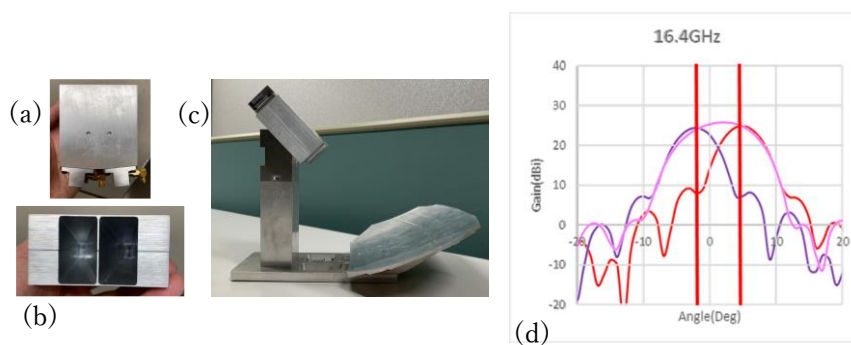


図 5 : (a)製作した一次放射器 (上面)、(b)製作した一次放射器 (開口面)、(c)スプリットビームオフセットパラボラアンテナ、(d)アンテナの放射パターンの実測値(全系統、系統 1、系統 2)

##### 4. 2 スプリットビーム化改修 —スイッチングシステムの開発—

既存の 1 チャンネルの受信システムでは 1 つの SAR 画像しか取得できなかった。アンテナのスプリット化に伴い異なる方位角方向から受信されるそれぞれの反射波を用いて個別の画像を既存の受信系を用いて生成できるように、2 方向からの反射波を時間を隔てて交互に受信できるようにスイッチングシステムを設計・製作した(図 6 左)。スイッチングシステムをレーダの運転と同期するためのロジック回路を用いて制御している。図 6 (右)はスイッチングシステムの信号の特性評価結果であり、約 8 dB の減衰がある。従って、送受信双方で約 16 dB の減衰があり問題となった。スイッチングシステムは図 3 に示すレーダ電子回路系と図 5 のアンテナシステムの間挿入・接続する。



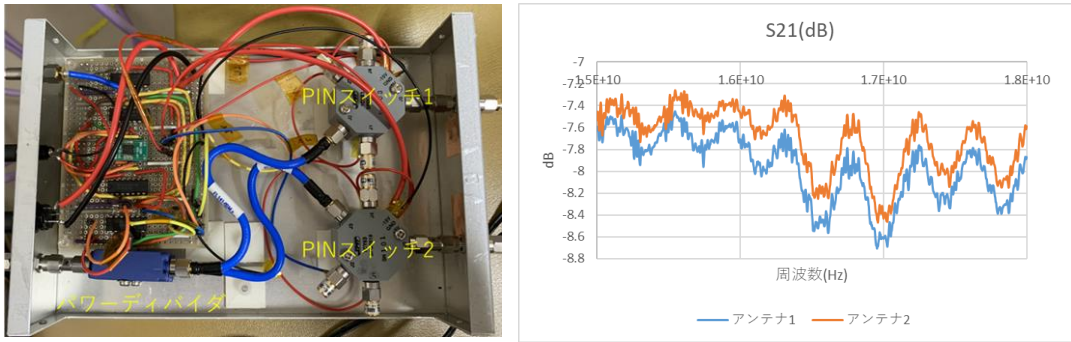


図6：開発したスイッチングシステム（左）と、信号の透過特性評価結果（右）

#### 4. 3 ターゲットと可動装置の製作

4. 2に記載した通り、スイッチングシステムにより信号の減衰が大きく通常の地表は撮像できないことが分かった。そこで反射物体として一辺 450mm のコーナーキューブリフレクタを5つ作成した。また、コーナーキューブリフレクタのうち一つは作成した直線型可動装置上にも設置できるようにした。可動装置の移動可能量は約 1m、移動速度は最大約 300mm/s である。



図7 コーナーキューブリフレクタと一軸可動装置

#### 4. 4 移動体像抽出検証実験

能古島沿岸に計 5 つの反射体をクロスレンジ方向に 30m 間隔で並べて撮像実験を行った。5 つの反射体のうち 1 つを移動体（図 7）として、残りの 4 つを地上に固定し使用した。3600m 遠方の路上のプラットフォームより撮像した結果を図 8 に示す。5 つのコーナーキューブリフレクタの設置位置を衛星写真上に黄色ピンで示す。5 つのうち、中央のリフレクタを移動体としている。レーダによる撮像結果を赤色の輝点としてオーバーレイ表示する。4 つの固定物体像は実際に設置された黄色ピンで示す位置に表示されるが、移動物体像のみクロスレンジ方向にシフトして海上に表示（図上では右方向にシフト）されていることがわかる。画像上のシフト量は移動体の実際の速度(75mm/s)から算出されるシフト量と一致することが確認された。ここで物体像が横に伸びた形状をしている。これは通常 SAR 画像生成時にオートフォーカス処理を行うことで点像になるように補正するが、今回のケースでは像の明るさが小さかったためオートフォーカス処理が正常にかからなかったためである。図 9 に、系統 1 像(a)、系統 2 像(b)で取得された SAR 画像を示す。系統 1 および系統 2 の画像それぞれには、赤丸で示した静止物体、緑○で示した移動物体、強度の大きなノイズが表示されている。撮像された 4 つの固定ターゲット像の明るさからスプリットビームの放射パターンの推定は概ね可能で、推定放射パターンと図 9(a)及び(b)の 2 系統の SAR 画像を用いてクラッターキャンセル処理を図 9(c)のように行った。4 つの静止物体およびノイズの画像上の明るさは低下し、逆に移動体像の明るさは維持されるといった望ましい方向性は見られたものの、依然として 1 つの静止物体は消えなかった。このような原因として、1. 放射パターンを 4 つの固定ターゲットで完全に推定できていない可能性、2. 非常に強い反射波を発生するコーナーキューブリフレクタを異なる 2 つの位置で計測していることによる表示される明るさのファクター程度の変化の可能性、3. オートフォーカスが機能しないことによる画像のぼやけとそれに伴う明るさの局所的な変化が考えられる。上記を解決しより高精度な移動体の検出を確認するにはスイッチングシステムによる系統増加ではなく、受信システム全体を 2 系統にするか、よりレンジが 2 km と近い対象地をえらび、受信強度の増強を図ることである。以上の対策は予算確保も含めてさらに準備を進め今後の課題としたい。



図 8 : 能古島沿岸に設置されたコーナーキューブリフレクタの位置 (黄色ピン) とオーバーレイ表示された物体像 (赤の輝点)

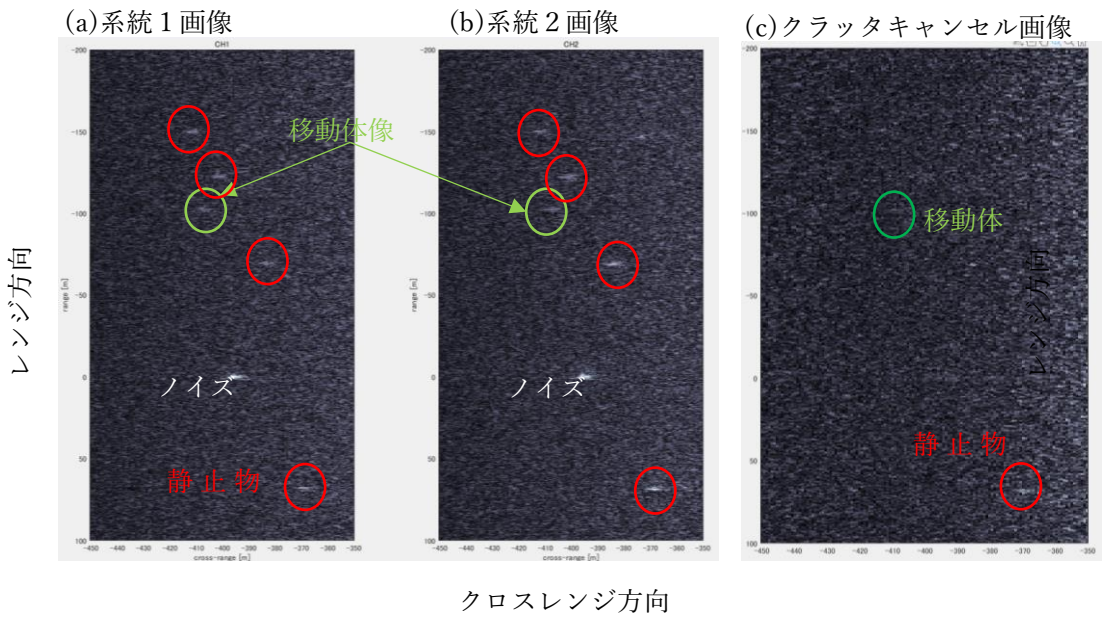


図 9 : 系統 1 画像(a)、系統 2 画像(b)、クラッタキャンセル画像 (移動体画像) (c)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>I. Gondo, Y. Kogi, A. Mase, H. Ikezi, M. Inutake   | 4. 巻<br>1         |
| 2. 論文標題<br>Development of the calibration method for the multi-channel sea-tide measurement radar    | 5. 発行年<br>2020年   |
| 3. 雑誌名<br>2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) | 6. 最初と最後の頁<br>1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ICEAST50382.2020.9165390   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>N. Kimura, Y. Kogi, A. Mawse, H. Ikezi, M. Inutake   | 4. 巻<br>1         |
| 2. 論文標題<br>Throughput improvement and evaluation of a laser radar with a high-speed sweep oscillator | 5. 発行年<br>2020年   |
| 3. 雑誌名<br>2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) | 6. 最初と最後の頁<br>1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ICEAST50382.2020.9165369   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>A. Mase, Y. Kogi, T. Maruyama, T. Tokuzawa, F. Sakai, M. Kunugita, T. Koike, H. Hasegawa                      | 4. 巻<br>91          |
| 2. 論文標題<br>Non-contact and real-time measurement of heart rate and heart rate variability using microwave reflectometry | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Review of Scientific Instruments  | 6. 最初と最後の頁<br>14704 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5128959   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>A. Mase, Y. Kogi, T. Maruyama, T. Tokuzawa, M. Kunugita, T. Koike, and H. Hasegawa | 4. 巻<br>90          |
| 2. 論文標題<br>Non-Contact and Non-Invasive Driver's Monitor Using Microwave Reflectometer       | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Progress In Electromagnetics Research M  | 6. 最初と最後の頁<br>81-88 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2528/PIERM20010103  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>A. Mase, Y. Kogi, D. Kuwahara, Y. Nagayama, N. Ito, T. Maruyama, H. Ikezi, X. Wang, M. Inutake, T. Tokuzawa, J. Kohagura, M. Yoshikawa, S. Shinohara, A. Suzuki, F. Sakai, M. Yamashika, B. J. Tobias, C. Muscatello, X. Ren, M. Chen, C. W. Domier & N. C. Luhmann Jr. | 4. 巻<br>3             |
| 2. 論文標題<br>Development and application of radar reflectometer using micro to infrared waves   | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Advances in Physics: X  | 6. 最初と最後の頁<br>634-676 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1080/23746149.2018.1472529   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Ryota Nakazono, Ryusei Noda, Daisuke Kaneko, Yasuhiro Takeuchi, and Yuichiro Kogi       | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Development and Calibration of a Prototype Radar for Sea-Tide Level Measurement        | 5. 発行年<br>2018年 |
| 3. 雑誌名<br>2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST) | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ICEAST.2018.8434449   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Yuichiro Kogi, Narumi Kimura, Hiroyuki Ikezi, Masaaki Inutake and Atsushi Mase            | 4. 巻<br>12(19)     |
| 2. 論文標題<br>Visualizing Small Objects Using Amplitude-Modulated Laser Light at Microwave Frequencies | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>applied science   | 6. 最初と最後の頁<br>9836 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/app12199836   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する       |

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>権藤偉央利、近木祐一郎、間瀬淳、池地弘行、犬竹正明              |
| 2. 発表標題<br>2チャンネル潮位測定レーダを用いた複数の移動散乱体からの反射波位相分布の調査 |
| 3. 学会等名<br>電気・情報関係学会九州支部連合大会                      |
| 4. 発表年<br>2021年                                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>木村成美、近木祐一郎、池地弘行、犬竹正明、間瀬淳         |
| 2. 発表標題<br>マイクロ波変調近赤外レーザSARの実験室内における原理的検証実験 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会九州支部学生会講演会               |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>木村成美、近木祐一郎、池地弘行、犬竹正明、間瀬 淳                       |
| 2. 発表標題<br>マイクロ波強度変調近赤外線を用いたFMレーザレーダによる高精度三次元計測の実証と測定誤差の考察 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会ソサエティ大会                                 |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>I. Gondo, Y Kogi, A. Mase, H. Ikezi, M. Inutake   |
| 2. 発表標題<br>Development of the calibration method for the multi-channel sea-tide measurement radar            |
| 3. 学会等名<br>2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>N. Kimura, Y. Kogi, A. Mawse, H. Ikezi, M. Inutake  |
| 2. 発表標題<br>Throughput improvement and evaluation of a laser radar with a high-speed sweep oscillator         |
| 3. 学会等名<br>2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ryota Nakazono, Ryusei Noda, Daisuke Kaneko, Yasuhiro Takeuchi, and Yuichiro Kogi |
| 2. 発表標題<br>Development and Calibration of a Prototype Radar for Sea-Tide Level Measurement   |
| 3. 学会等名<br>ICEAST 2018 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

|                             |                                 |               |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>潮位推定装置および潮位推定方法 | 発明者<br>近木祐一郎、金子大祐、間瀬淳、池地弘行、犬竹正明 | 権利者<br>福岡工業大学 |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、6978049   | 取得年<br>2021年                    | 国内・外国の別<br>国内 |

〔その他〕

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                    | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)               | 備考 |
|-------|--|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 間瀬 淳<br><br>(Mase Atsushi)<br><br>(00023325) | 福岡工業大学・付置研究所・研究員<br><br><br>(37112) |    |

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1件

|  |                    |
|--|--------------------|
| 国際研究集会<br>New development of practical research on microwave and laserbased synthetic aperture radar | 開催年<br>2020年～2020年 |
|--|--------------------|

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 |
|---------|---------|