

## 報告書概要

<b>技術研究開発 課題名</b>	リアルタイム画像処理合成開口レーダの実用化に関する技術開発
<b>技術研究開発 テーマ名</b>	合成開口レーダ（SAR）を利用した防災情報把握に関する技術開発
<b>研究代表者</b>	
氏名	所属・役職
犬竹正明	東北大学電気通信研究所客員教授
<b>共同研究者</b>	
氏名	所属・役職
池地 弘行	九州大学産学連携センター客員教授
近木 祐一郎	福岡工業大学工学部・電子情報工学科准教授
間瀬 淳	九州大学産学連携センター特任教授
佐藤 源之	東北大学東北アジア研究センターセンター長
山鹿 光紀	富士重工業株式会社企画管理部課長代理
山根 峯治	富士重工(株)航空宇宙カンパニー顧問室非常勤顧問
奥野 善則	(独)宇宙航空研究開発機構 研究開発本部飛行技術研究センターへリコプタセクション セクションリーダー
富尾 武	(独)宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ運航・安全技術チーム 客員研究員
<p><b>【1】背景・課題</b></p> <p>悪天候時の夜間等の被災状況把握は、光学カメラや赤外線カメラでは困難であるが、雲や霧を透過するマイクロ波を使用した合成開口レーダ（SAR）では可能である。我国既存の衛星および航空機搭載合成開口レーダ(SAR)はLバンドおよびXバンドマイクロ波を使用し、空間分解能は、それぞれ300cmおよび150cmである。最近、Xバンドで分解能30cm、Kuバンドで国内初の分解能10cmが達成された。しかし、水害時等における災害情報収集では、人工衛星搭載SARは衛星の回帰日数が長いため、またリアルタイムに画像変換できないため迅速な災害情報収集には不向きである。</p> <p>これに対して、航空機による観測は機動性に富んでおり、必要時いつでも災害情報を収集できる。これまで国内で運用されている航空機搭載SARはストリップマップモードSARと呼ばれ、航空機の飛行方向に対し垂直方向にマイクロ波ビームを発射し、飛行経路に沿った帯状の画像を収集する。ただし、災害現場を真横に見ながら画像取得した後、再度画像収集するためには旋回して戻ってくる必要がある。</p>	

もし、真横ばかりでなく、斜め前方でも斜め後方でも、飛行方向に対し任意の方角の画像を何回でも収集できるなら、緊急の災害時に非常に威力を発揮できる。

このような場合に有用な SAR が、図 1 に示す“スポットライトモード” SAR がある。しかし、我が国では“スポットライトモード” SAR は民生技術として実用化されていない。

したがって、水害等の大規模自然災害時や夜間・悪天候下における防災情報を機動的に収集でき、防災活動や救助活動の初動対応に威力を発揮できるスポットライトモード SAR の開発は焦眉の急である。

## スポットライトモード SAR の特徴



- スポットライト SAR により、 $\pm 45^\circ$  範囲の災害現場の画像収集ができ、機動的な災害救助・防災監視が可能。
- 画像収集および移動体検出が可能。

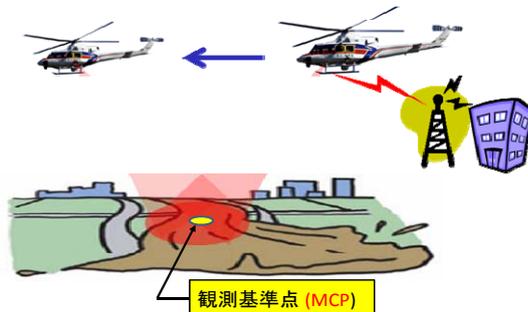


図 1

## 【2】技術研究開発の目的

本委託研究は、大規模水害等の自然災害時の河川・道路・鉄道・電力・港湾の施設等の防災監視や救助活動の初動対応に威力を発揮でき、有人・無人の航空機・ヘリコプタに搭載可能な小型軽量の高分解能・高画質 SAR を開発するものである。

具体的には、Ku バンドのマイクロ波を用い、最高分解能(10 cm)、小型軽量(25kg 以下) で、機上におけるリアルタイム画像生成が可能なスポットライト SAR を開発した。(本委託研究で開発した SAR を“Live SAR”と呼ぶ)。

スポットライトモード SAR “Live SAR” を実現するために、下記の「要素技術」の設計・開発を行った。

- (1) Live SAR システム設計
- (2) 高精度遅延電子回路系
- (3) レーダ回路系
- (4) 慣性センサー(IMU)付きジンバル・アンテナ系
- (5) 画像生成ソフトなどの各種ソフトウェア、およびユーザーインターフェース
- (6) SAR 地上試験の実施
- (7) 航空機による SAR 動作試験の実施

## 【3】技術研究開発の内容・成果

### 1. 開発体制と年度ごとの実施概要

開発体制と役割分担は以下の通りである。

平成 21 年度はシステムの全体設計をすると共に、システムの心臓部分である高精度遅延電子回路系の開発をおこなった。高精度遅延電子回路系とは、Frequency Synthesizer, Waveform

Synthesizer, Digital Receiver の 3 ブロックにより構成される。

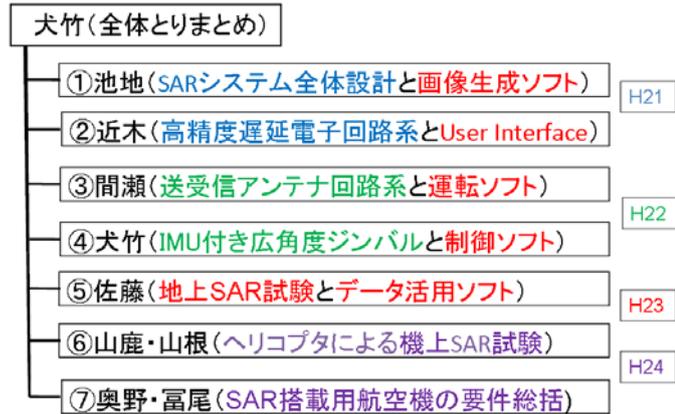
Frequency Synthesizer から出力される高精度のクロックを基準信号として Waveform Synthesizer, Digital Receiver の運転を行った。

平成 22 年度は送受信アンテナ回路系、慣性センサー付きジンバルの開発を行った。送受信アンテナ回路

系とは Antenna, Ku Band Front, Frequency Converter の 3 ブロックにより構成される。慣性センサー付きジンバルとは IMU, GPS, ジンバルの 3 ブロックにより構成される。平成 22 年度までにスポットライト SAR のハードウェアを完成させた。また平成 23 年度は 3GHz 程度の低周波領域で、外部に電波を放射しないテストを行った。

平成 23 年度は平成 21、22 の両年度で開発されたハードウェアを統合し、地上動作試験を行った。また、ユーザーインターフェース等や、信号処理ソフトウェアなどの各種ソフトウェアの開発を進めた。

最終年度である平成 24 年度は、全体をとりまとめ総合的な試験を進めると共に、航空機搭載試験を行った。



## 2. スポットライトモード合成開口レーダ(SAR)の原理

スポットライトモード SAR (以後、スポットライト SAR) の原理を説明するために必要な各種幾何学的変数やスポットライト SAR レーダ本体と測定範囲の幾何学的な関係を図 2 に示す。

レーダ本体は航空機やヘリコプタなどの飛翔体に搭載され、図のプラットフォーム 1 からプラットフォーム 2 まで移動しながらレーダ計測を繰り返す。レーダ計測においてアンテナからマイクロ波を観測したい範囲(イメージエリア)に向け照射する。スポットライト SAR では、マイクロ波の照射方向は、プラ

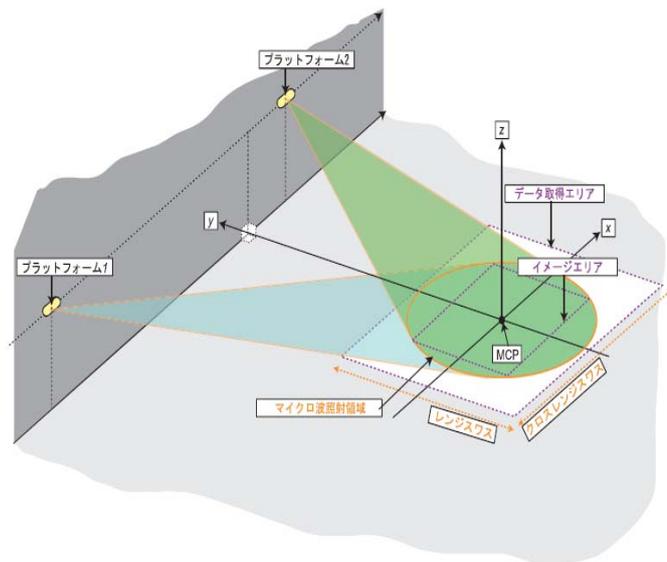


図 2 レーダ本体と測定範囲の幾何学的な関係

ットフォームの移動中、常に基準点：Motion Compensation Point (MCP) に向けられている。

図 3(a)に示すように、画像取得領域が常にレーダのマイクロ波でスポットライトのように照射され続けているところが、本レーダがスポットライト SAR と呼ばれる所以である。例えば、レンジ距離 3km で空間分解能 0.1m の画像生成には、アジマス方向の 1 画像に 300 m の開口長が必要であり、時速 100km で飛行する場合、約 10 秒間のデータ収集が必要である。図 3(a)に示すように、種々の角度から（飛行方向に垂直から±45 度以内）の画像収集が可能である。また、種々の方角から取った画像を重ねることにより高画質画像が得られる。300m 毎にデータ収集と休止を交互に 5 回繰り返す場合 3000m (100 秒間)の直線飛行が必要であり、間隔を開けない場合には  $300\text{m} \times 5 = 1500\text{m}$  (50 秒間)の飛行となる。画像は機上でほぼリアルタイムに（数秒～数 10 秒後から）連続的に表示される。

図 3(b)のように、基準点(MCP)を適宜移動させながら画像収集を行うことにより、ストリップマップ画像も、さらにモザイク状に画像を取得できる。

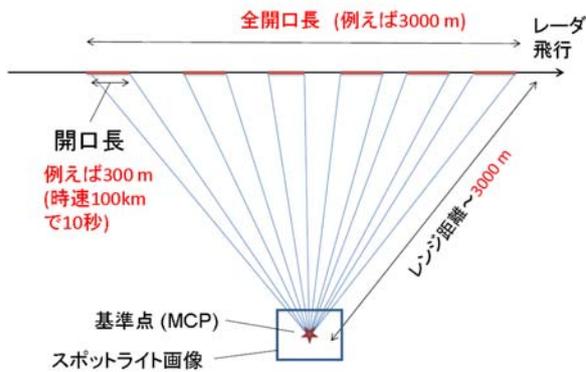


図 3(a) スポットライト画像の取得法

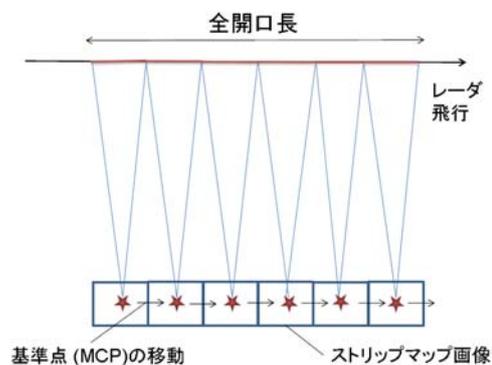


図 3(b) ストリップマップ画像の取得法

### 3. “Live SAR”のシステム構成 (H21 年度)

本委託開発で目指すスポットライト SAR (“Live SAR”)システムを図 4(a) に示す。

#### “Live SAR”のシステム構成

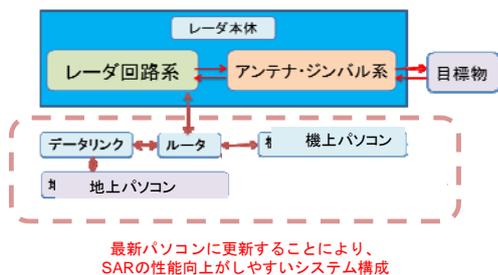


図 4(a) Live SAR システム構成図

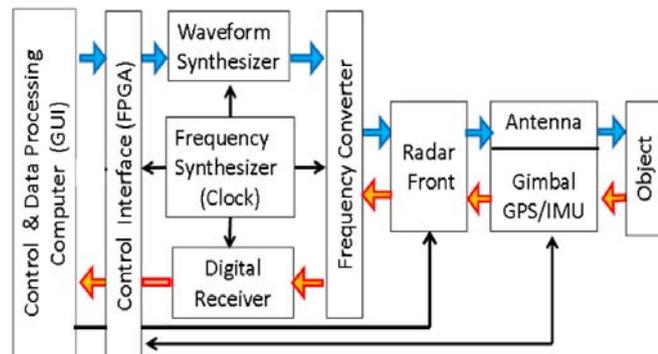


図 4(b) LiveSAR のデータの流れ

本“Live SAR”システムは大きく分けて3つのブロックに分けることができる。

- (1) マイクロ波発生器などの「レーダ回路系」

- (2) アンテナ駆動ジンバルとそれに付随する GPS-慣性センサー(IMU)などの「アンテナ・ジンバル系」
- (3) AD 変換器等の信号処理・ユーザーインターフェース・画像表示を行う機上および地上コンピュータなどの「PC 系」

図 4(a)に示すように、レーダ本体は一度製作するとそれほど改修は必要ないが、「PC 系」は高性能で安価な最新 PC や応用ソフトに更新することにより、SAR 画像処理の高速化が可能となる。したがって、高性能化された「PC 系」を導入しやすいシステム構成とした。

図 4(b)に従って、スポットライト SAR のデータの流れを簡潔に説明する。

- (1) 機上 PC 画面に表示された地図上で、画像収集したい基準点(MCP)を選択する。
- (2) プラットフォームと MCP の幾何学的な位置関係がユーザーインターフェース(GUI)上で計算され、結果が Radar Control Computer に送信される。
- (3) 機上 PC で、方位・位置、画像取得範囲(swath)・画像精度(ピクセルサイズ)と、航空機速度、アンテナ放射パターンなどの特性データを考慮して、周波数掃引(チャープ)パルスの時間幅、周波数範囲、繰り返し周波数、参照波パルスのタイミングを計算し、Waveform Synthesizer に送信され、チャープパルス信号を生成する。
- (4) チャープパルス信号は Frequency Converter に送られ、Ku バンドのマイクロ波に周波数変換される。
- (5) Frequency Synthesizer によりクロック信号が定常的に供給される。
- (6) Ku バンドマイクロ波は Radar Front で増幅された後、アンテナから外部へ放射される。
- (7) 目標物体からの反射マイクロ波を同一のアンテナにより受信し、Radar Front で増幅する。
- (8) 増幅された反射波と遅延時間を高精度に設定した参照波とを混合・増幅し、ミキサ出力を得る。
- (9) このミキサー出力を Digital Receiver で周波数変換・増幅・A/D 変換を行い、USB を介して Data Processor PC に転送する。
- (10) PC で各種信号処理や 2 次元逆フーリエ変換が行い、生成されたレーダ(JPEG)画像はほぼリアルタイムに機上あるいは地上 PC 画面に表示される。

#### 4. . “Live SAR”のハードウェア (H21-22 年度)

##### (1) レーダ回路系の開発

スポットライト SAR には、時々刻々変化するレーダアンテナと基準点(MCP)の距離を常時モニターし、高精度の遅延時間設定ができる波形合成回路が必須である。高精度で遅延時間を設定できる遅延参照波合成回路の開発に成功した(図5参照。特許出願中)。

これにより、最高空間分解能 10cm を達成できる。H22 年度に、送信マイクロ波増幅回路が完成し、図 6 に示すように、「レーダ回路系」全体が完成した。総質量 15kg と軽量化に成功した。



図 5

##### (2)慣性センサー(IMU)付きジンバル系(H22 年度)

スポットライト SAR には、マイクロ波ビームを基準点(MCP)に向けるためのジンバル系が必須である。アンテナの位置と方角を常時モニターするための慣性センサ(IMU)を装備したジンバル系が完成した(図 6 参照)。アンテナおよびジンバルの 総重量は 10kg と軽量化に成功した。

## 5. “Live SAR”のソフトウェア（H23 年度）

図7に示すユーザーインターフェース(GUI)、およびジンバル追尾制御ソフトウェア、画像生成ソフトウェアが完成した。GUI 画面に表示された地図上の扇形領域内の任意の点をクリックすると、その基準点(MCP)周辺の画像が、選択されたモード・分解能・撮像領域で自動的に収集できるようになっている。

GUI 画面は、左から設定画面、地図画面、画像サムネイル画面に分かれている。

それぞれの画面の機能を以下に説明する。

### (1)設定画面

設定画面では SAR モード、レンジ解像度、アジマス解像度、MCP の座標を設定することができる。SAR モードは、現在は観測対象エリアの1画面のみ画像を取得する“通常モード”しか設けていないが、今後、ストリップマップモード、移動体検出のための MTI モードなどを追加していく予定である。レンジ解像度、アジマス解像度、MCP の座標が入力されると、プラットフォームの位置情報と共に、運転パラメータが算出される。

### (2)地図画面

中央の画面が地図画面である。地図の中心がプラットフォームの現在位置である。この図は、プラットフォームが北方向に移動している状態である。通常モードではこのような移動方向に対して、東西方向から $\pm 45^\circ$ の範囲の対象物を観測できる。観測対象のエリアを橙色の扇形で同時に示している。プラットフォームから 15km 以下の対象の画像は信号強度が十分のため画像化できる。15km の位置に円弧を表示して、境界を示している。地図画面に表示されている地図は最初は国土地理院発行の数値地図 CD-ROM を利用していたが、複数の地図を 20km 以上にわたって隙間なく貼り合わせた。現在は、スーパーデジタルマップ12の地図を利用しているが、この地図は高度データを持っていない。Live SAR は高度のデータも利用して、プラットフォームと MCP 間の距離を算出するため、高度データは国土地理院発行のデジタル高度地図 (DEM) のデータを利用している。DEM として、5m メッシュ(高度分解能 0.1m)と 50m メッシュ(高度分解能 1.0m)の2種類の地図を適宜採用した。50m メッシュの DEM は全国がカバーされている。

### (3)画像サムネイル画面

地図画面の右エリアが画像サムネイル画面である。SAR 画像を取得した後、サムネイルを画像サムネイル画面に順次表示していく。

## “Live SAR” 本体

全質量 25 kg

(a) レーダ回路系



15 kg

(b) アンテナ・ジンバル系



10 kg

図 6

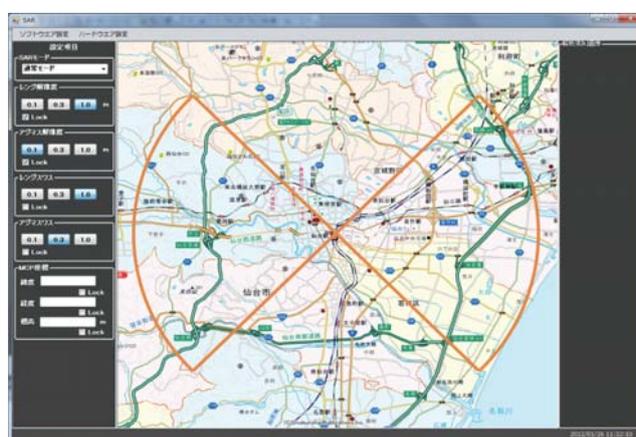


図 7

## 6. レール上試験/車上試験/機上試験 (H24 年度)

H24 年 6 月に無線実験局予備免許受領後、屋外における電波発射試験を行った。福岡工業大学の屋上に設置したレール上試験(図8)、および小型トラックの荷台に設置して、福工大周辺にて車上試験(図9)を行った。

レール上試験でレーダの送受信信号が検証された後、Live SAR をトラック荷台に搭載して画像取得を試みた。

本試験で検証を行いたい項目は、

- (1) 時々刻々と変化する MCP と Live SAR 間の距離を、GPS と IMU が正確に計測し、その距離の変化に応じて送信パルス波のパラメータが変更されることを確認すること
- (2) MCP をアンテナが自動追尾し、常に MCP 周辺にマイクロ波パルスを照射すること
- (3) SAR 画像の出力を確認することである。

福工大屋上に設置したレール試験



図 8



図 9

図 10 に、走行する車から 3km 先の島の防波堤と灯台の画像取得結果を示す。SAR 画像はグーグルの航空写真とよい対応していることが分かる。Live SAR の画像は、ポーラーフォーマットとオートフォーカスの処理を行っている。レンジ方向には 0.1m の解像度で、クロスレンジ方向には 0.25m の解像度である。防波堤や波打ち際の岩、森林の様子や灯台が衛星写真と対応付けられる。一方、海水面は黒く写り、ほぼ反射がないことが分かる。

これらの地上試験を通して、ジンバル系等のハードウェアおよびソフトウェアの初期故障が見いだされ、機上試験に備えて、逐次改修した。

### トラック車上からSAR画像取得



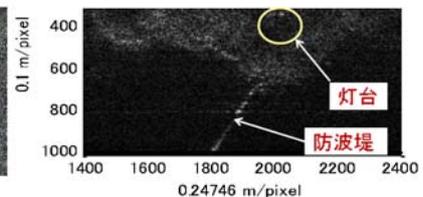
航空写真(Google earth)



図 10

(2012/11/14)

Live SAR画像



空間分解能: 13 cm(レンジ), 25 cm(アジマス)  
レンジ: 3km スクイント角: ~90°

## 7. ヘリ搭載試験とリアルタイム画像収集試験 (平成 24 年度)

富士重工業(株)のヘリコプタ「富士ベル式 205B」に“Live SAR”を搭載するために航空法第3条ただし書きの適合検査等を済ませ、さらに、総務省の現地電波監査を受けた後、H24 年 12 月から飛行試験を開始した(図 11 参照)。

Live SAR の基本的性能を確認するため、様々な目標に対するデータ取得を実施した。本試験では以下の目標物を対象とした。

- (1) 建造物
- (2) 河川及び川堰
- (3)(4) 農地

画像生成ソフトウェアの高速化、およびデータ転送速度の高速化などの改修の結果、ヘリ機上で 30 秒

以下の画像生成が可能となった。機上でのリアルタイム画像取得という委託研究の当初目標は達成できた。

H25年1月に入って、宇都宮周辺地域でヘリ搭載“Live SAR”による画像収集を行った。ヘリの飛行条件を図12に示す。



図 11

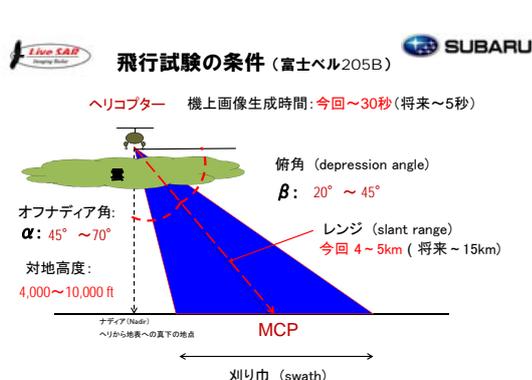


図 12

洪水域観測を想定して収集した鬼怒川河川敷の画像を図13に示す。“Live SAR”画像とグーグル航空写真の川筋は、1年ほどの撮影年月経過のため異なっているが、支流やゴルフ場の池など、陸域と水域の境界を明瞭に確認できる。

また、図14、図15に、農地、住宅地の画像を示す。現地写真と比較すると、小川の堰や学校の校庭とプールなどがはっきりと識別できる。

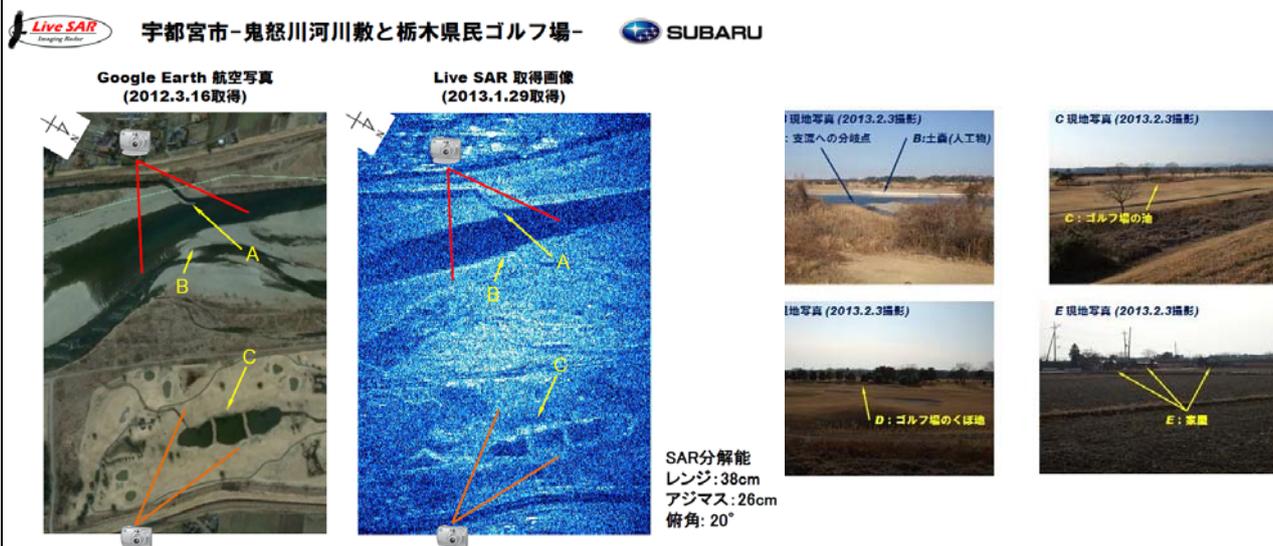
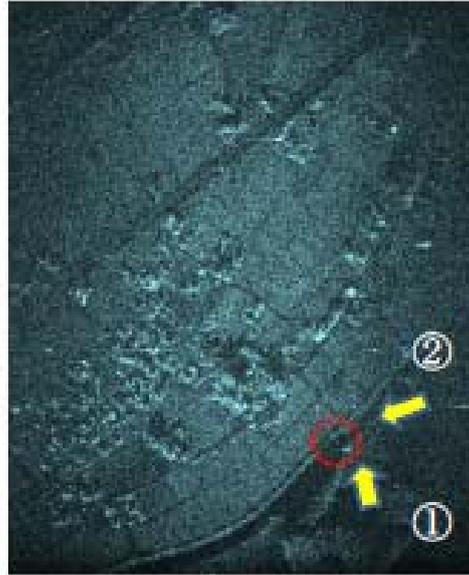


図 13



計測場所  
(出典: GoogleEarth)



SAR画像  
(分解能は1m(縦), 1m(横), ONA70°)

現地写真



現地写真

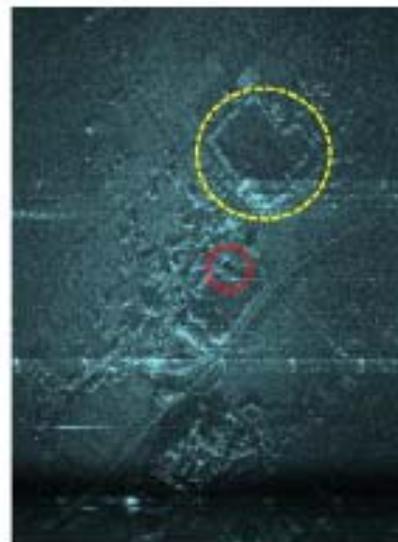


図 14 宇都宮市下田原周辺 (川堰)

左上: Google マップ、右上: Live SAR 画像。左下: ①方向から撮影した川堰の現地写真、右下: ②方向から撮影した川堰の現地写真。



計測場所  
(出典: GoogleEarth)



SAR画像  
(分解能は1m(縦), 1m(横), ONA70°)

図 15 宇都宮市田原小学校 プール  
(赤丸) と校庭 (黄色丸) とともに黒色になっている

## 8. まとめ

本委託研究で、小型航空機やヘリコプタに搭載でき、洪水や津波などの大規模災害時に迅速な情報収集が可能なスポットライトモード合成開口レーダ(SAR)を開発し、以下の成果が得られた。

- ・ 総質量 25kg の小型軽量なスポットライトモード SAR “Live SAR” の開発に成功した。
- ・ 省庁保有の防災・災害対策ヘリに搭載可能なサイズのジンバル系を開発した。着脱は 10 分以内で行える。
- ・ 機上のパソコン画面の地図上で災害現場周辺をクリックすることにより、任意方角の災害現場画像を迅速に収集でき、誰にでも操作し易いユーザー・インターフェイス(GUI)を開発できた。
- ・ 最高空間分解能は 0.10m(設計値)、0.13m(実測値)の画像を取得できた。
- ・ 機上におけるリアルタイム画像処理により、データ収集から 30 秒以内に画像を表示できる。
- ・ 省庁保有のデータリンク（ヘリテレ、ヘリ映伝、無人機データリンク等）を用いて、機上で取得したデータを地上に同時配信することが可能である。
- ・ 大学等研究者の連携協力、およびヘリコプタ試験飛行に対する企業支援により、低コストで “Live SAR” を開発できた。
- ・ 主な性能仕様は表 1 の通りである。

なお、スポットライト SAR を応用して人間などの移動体を検出できる「スプリットビーム方式 SAR」に関する特許を出願した（特願 2009-150179）。また、本委託研究実施による「高精度遅延電子回路」の特許を出願中である。

### 【4】今後の課題・展望

本委託研究開発により、スポットライト SAR の基本的ソフトウェア開発は完了した。

今後は、“Live SAR”による画像収集を重ねて、種々の観測対象物の SAR 画像データベースを蓄積したり、洪水域観測のための応用ソフト開発やストリップマップ画像やビデオ画像のソフトの開発を行う必要がある。さらに、地形や構造物の微小変位や移動体検出など、SAR の位相データを利用した Live SAR の活用と、これらの実績を踏まえた実用化が期待される。

表 1 Live SAR 主要性能と仕様

#### ◆主要性能(試作品)

- ・最高分解能 0.1 m
- ・最大観測距離 15 km

#### ◆仕様

- ・周波数帯 Ku レーダバンド
- ・最大帯域幅 1.9 GHz
- ・最大送信器出力 7 W
- ・寸法(mm) / 質量:
  - (a)回路系 320 × 270 × 250 / 15 kg
  - (b)アンテナ系 φ 220 × 430 / 10 kg
- ・最大消費電力 300 W