

「衛星情報を利用したドローン搭載SARの開発と実証」の成果の概要について

実施体制	主管実施機関	日鉄鉱コンサルタント株式会社	実施期間	平成29年度～令和元年度 (3年間)	実施規模	予算総額(契約額) 35.8百万円		
	研究代表者名	出口 知敬(次長)				1年目	2年目	3年目
	共同参画機関					12.0百万円	11.9百万円	11.9百万円

背景・全体目標

防災先進国である我が国において、活火山や地滑り斜面、鉱山切羽などにおける斜面監視や、社会問題化した老朽化インフラの維持管理対策は重要課題と考えられる。近年はセンチメートルオーダーの微細な地表面変位を非接触で、遠隔的且つ面的に計測できる合成開口レーダ(SAR)の干渉解析(DInSAR)が測量技術として確立され、地震や火山活動に伴う地殻変動解析や、都市部の地盤沈下計測等に実用されている。航空技術の分野では、空の産業革命と称されるドローンの普及が急速に拡大しており、産業利用に対する期待が高まっている。

本課題では、SARの強力な応用技術であるDInSAR計測が実現可能な『ドローン搭載SAR』の開発と実証を目的とする。衛星から得られる測位情報や地形情報を用いてドローン搭載SARの基礎研究から干渉解析の実用化に至るまでの開発を行うとともに、地盤変動計測に係るサービスを創出できる段階への到達を目指す。

全体概要・主な成果

小型・軽量・低消費電力を念頭に置き、国内の電波法に準拠したKuバンドレーダを設計した。高精度なRTK測位が可能な産業用ドローンに取り付けた『ドローン搭載SAR』を開発し、露天掘鉱山の切羽斜面や斜面崩壊対策工事現場の法面を対象とした実証試験を実施した。

- 開発したKuバンドレーダは、サイズが255×184mmとA4用紙内を、重量がバッテリー込みの状態で約600gを、消費電力が約5.5Whを達成した。第三者機関の審査により特定実験試験局の規定条件を満足することが確認されたので、無線局の免許申請を行い、総務大臣より免許状が交付された(有効期間は令和4年6月30日まで)。
- ドローン軌道の非直線性に対してロバスト性を向上させる目的で、アジマス方向に参照信号を切り替えながら周波数領域相関法を適用する信号処理アルゴリズムを開発した。コーナーリフレクタを用いた試験結果から、最大84.5倍のアジマス圧縮率を確認することができ、鉱山道路や斜面のラフネス、地滑りの滑動を抑制する目的で施工された金属製のアンカーなどを明確に検出できることを検証した。ドローンのフライトログ及び高解像度衛星画像から作成されたDEM(AW3D高精細版)を用いて地図投影処理を行い、ジオメトリの精度を検証した結果、1m以下の精度を確認した。
- 衛星搭載SARのDInSAR処理フローを応用し、AW3D高精細版の地形情報を参照したドローン搭載SAR用のDInSARアルゴリズムを開発した。
- 単一のDInSAR処理では良好な干渉画像を取得できないが、複数の干渉画像を用いたスタッキング法によるノイズ低減処理を講じた結果、CバンドやXバンドの衛星搭載SARによる従来のDInSAR処理では計測が困難であった植生地域に対しても地盤変動計測を適用できる可能性が見い出され、茶畑が耕作される斜面の滑動を示唆する結果を得るに至った。



① 「Kuバンドレーダの開発と軽量化」

実施内容・成果

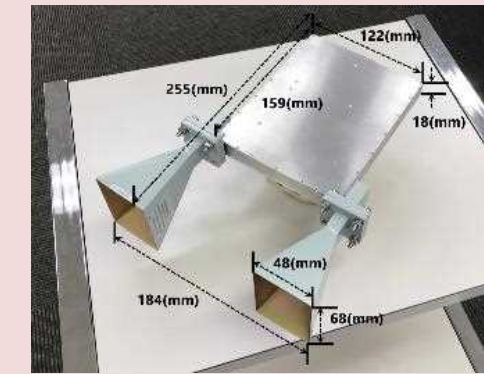
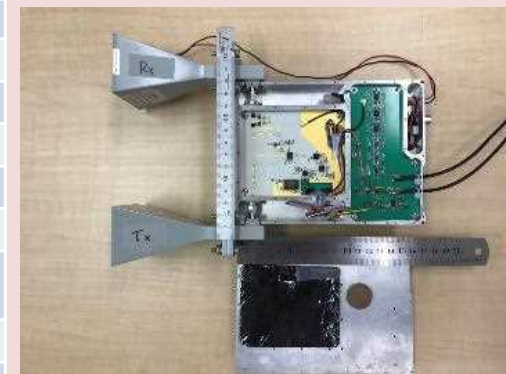
Kuバンドレーダの開発

- 日本の電波法において、特定実験試験局の制度で定められた12.8~12.95GHz (Kuバンド) のレーダを設計した。
- レーダ部のサイズは255×184mmとA4用紙内を、重量(バッテリー込み)は約600gと当初計画の半分以下を、消費電力は約5.5Whと従来の1/3以下を達成した。
- 第三者機関の審査で、スプリアスが発生しないこと、空中線電力が規定値以下であること等が検証されたので、総務大臣より無線局の免許交付を受けた。
- 動作耐久試験では、単三乾電池×4本で約63分の連続稼働が可能であることを確認した。
- 鉱山斜面、斜面崩壊工事対策現場、火山の山肌を観測対象とした場合に、それぞれで約それぞれ約1.4km、約600m、約3.2kmの遠隔探知計測が可能と評価された。

ドローンへの搭載

- DJI社製の産業用ドローン『Matrice 600 pro』と同社製GNSSモジュール『D-RTK Type-B』を選定し、プラットフォームを構築した。
- ドローンから引き下ろした支柱に、ペイロード一式を固定した台座をネジ止めで連結させることにより、Kuバンドレーダをドローンに搭載した。
- 支柱の長さやネジ止めの位置を機械的に切り替える平易な操作を施すことで、レーダの仰俯角を10段階で変更できる仕組みとした。
- ペイロード一式の重量は約4.05kgとなり、ドローンの最大可採重量を大きく下回るシステムを構築することができた。
- A/D変換器とPCを組み合わせて、ドローン搭載SARのプロトタイプシステムを開発した。

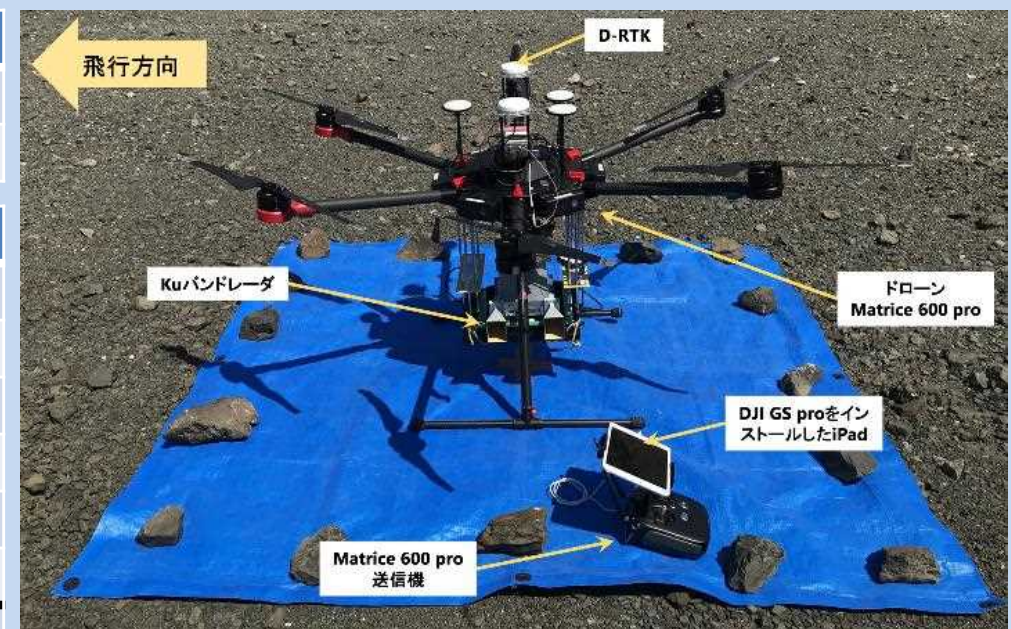
項目	仕様
中心周波数	12.875GHz
波長	23.2mm
帯域幅	150MHz
変調方式	FM-CW
レーダ方式	合成開口
アンテナ利得	15dBi
空中線電力	14.8dBm (30.2mW)
レンジ分解能	1m
重量(Batt.含)	600g
消費電力	5.5Wh



開発したKuバンドレーダ

Matrice 600 pro (DJI)	
Weight	9.5 kg
Max. payload	6.0 kg

Payload	
D-RTK	0.6 kg
Ku-band radar	0.6 kg
AD converter	0.4 kg
PC	1.4 kg
Pole	0.6 kg
others	0.45 kg
Total	4.05 kg



ドローン搭載SARの外観

② 「ドローン向け高精度GNSSモジュールによる位置情報抽出と精度検証」

実施内容・成果

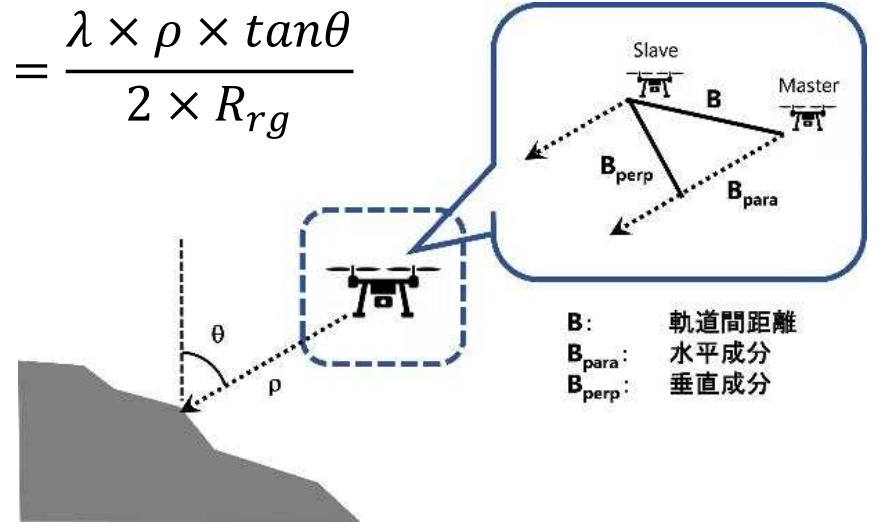
静止状態におけるD-RTKの測位精度は、基準局までの距離が9kmの時に3cm以下の3σ標準偏差が確認され、RTK測位技術の理論精度と整合することが検証された。

DInSAR処理では、異なる2時期に取得したデータの位相差から地表面の微小変位を計測するが、二回の飛行における軌道間距離の垂直成分が狭いほど計測精度が高い性質を示すので、ドローン搭載SARを自動操縦で飛行させ、フライトログを用いて軌道制御精度を検証した結果、10cm以内に回帰できることが明らかとなった。

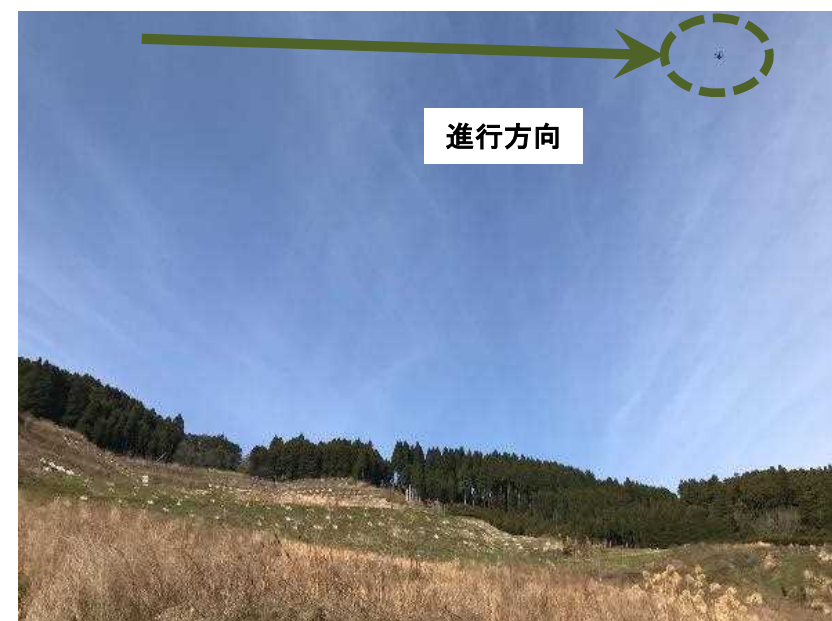
後述する実証試験において、飛行高度20m、飛行速度3m/sの条件下で自動飛行を行った結果、垂直成分の最大値は57.9cmとなり、84.5%の確率で10cm以下に制御できることが検証され、DInSAR処理が適用可能となる実効的な臨界値 (Bc) と評価された1.3~1.4mを十分に下回る結果を得た。

約4kgのペイロードを搭載したドローンを、数十回に渡って数十cm以内の再現性を持って繰り返し自動飛行させることができた事実は、RTK測位技術が大きく貢献した成果であり、多くの測位衛星が運用される現代における宇宙由来の情報ならではの功績と評価できる。

$$B_c = \frac{\lambda \times \rho \times \tan\theta}{2 \times R_{rg}}$$



飛行試験(栃木県・石灰石鉱山)



飛行試験(福岡県・斜面崩壊対策工事現場)

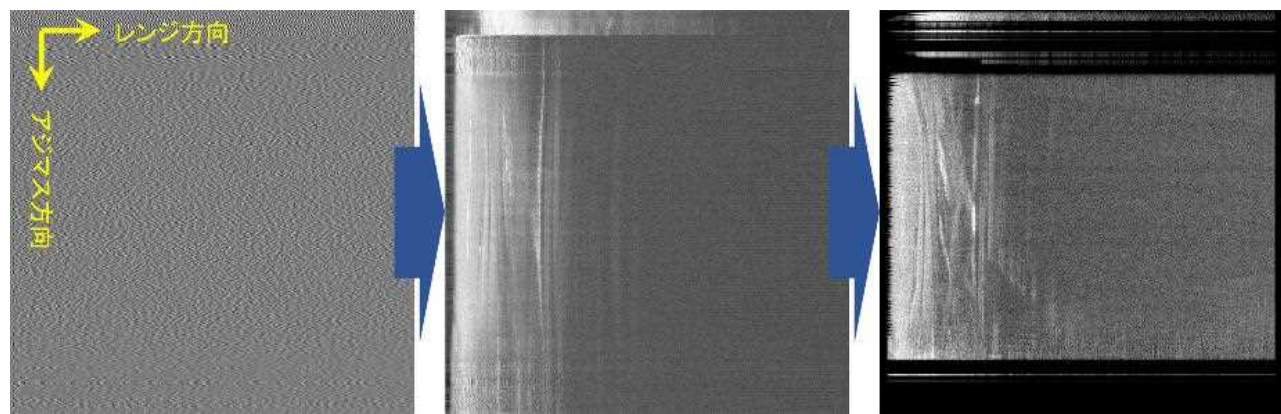
③ 「ドローン搭載レーダの合成開口処理技術開発」

実施内容・成果

ドローンの飛行軌道が強い非直線性を示すことを考慮し、ロバスト性を向上させる目的で、RTK測位による高精度なフライトログに基づいてアジマス方向に参照信号を切り替えながら周波数領域相関法を適用する信号処理アルゴリズムを開発した。

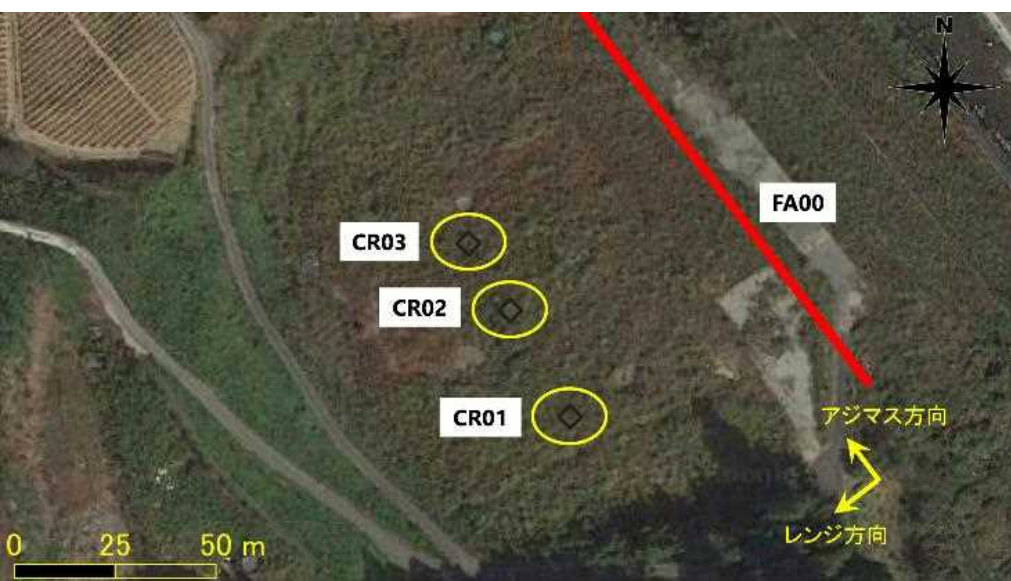
コーナーリフレクタを用いた試験を実施し、最大84.5倍のアジマス圧縮率を確認することができたほか、鉱山道路や斜面のラフネス、地滑りの滑動を抑止する目的で施工された金属製のアンカーなどを明確に識別できることを検証した。

ドローンのフライトログ及び高解像度衛星画像から作成されたDEM（AW3D高精細版）を用いて地図投影処理を行い、コーナーリフレクタを参照してジオメトリの精度を検証した結果、1m以下の精度を確認した。

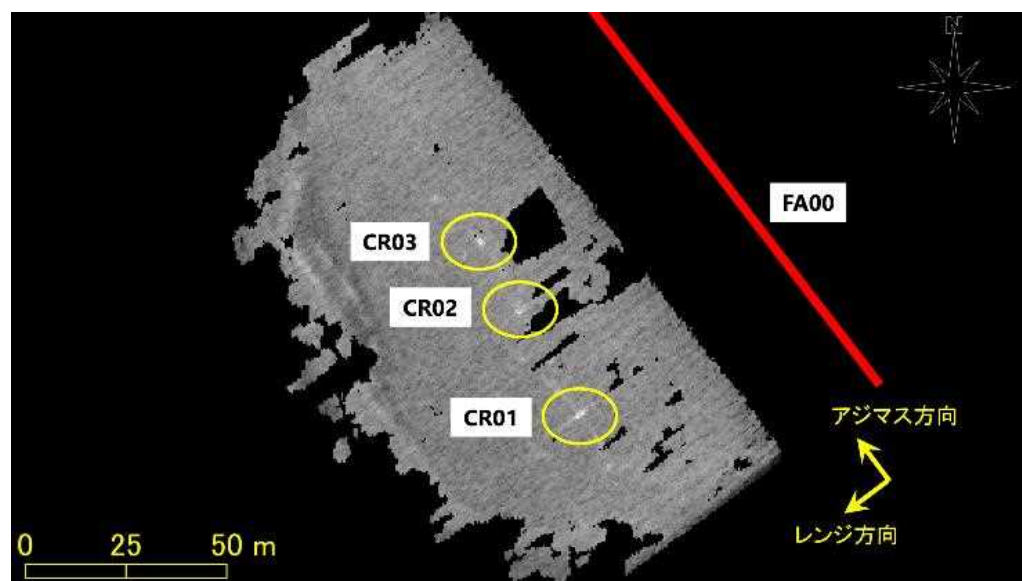


(a) 原データ (b) レンジ圧縮処理後 (c) アジマス圧縮処理後

原データから画像化までの流れ



高解像度空中写真上に示したコーナーリフレクタの位置



ドローン搭載SARの撮像画像

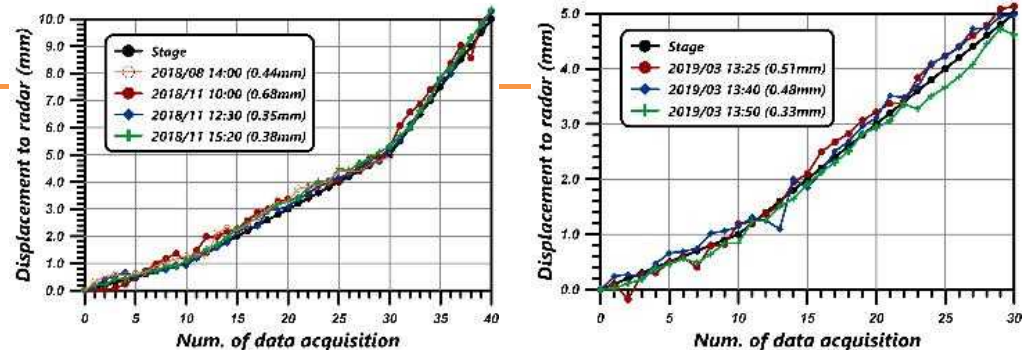
④ 「高精細衛星画像を用いたDInSAR技術の開発」

実施内容・成果

DInSAR処理の変位計測精度を把握するために、集録したレーダデータの位相情報について精度の定量的評価試験を行った。試験を実施した時間や季節の違いによる影響は確認されず、疎らな植生被覆を被った状況においてもミリメートルオーダーの変位計測が実現可能であることが明らかとなった。

高解像度衛星画像から作成されたAW3D高精細版地形データを取り入れた自動処理によるDInSAR処理アルゴリズムを開発し、合成開口処理からDInSAR処理までの一連の流れを、GUI上のボタン操作だけで実行できるソフトウェアを作成した。

DInSAR処理による単一の干渉画像は、SN比が低く位相の空間連続性に乏しいが、スタッキング法によるノイズ低減処理を適用することにより、有意な計測を実行できる可能性が示唆された。



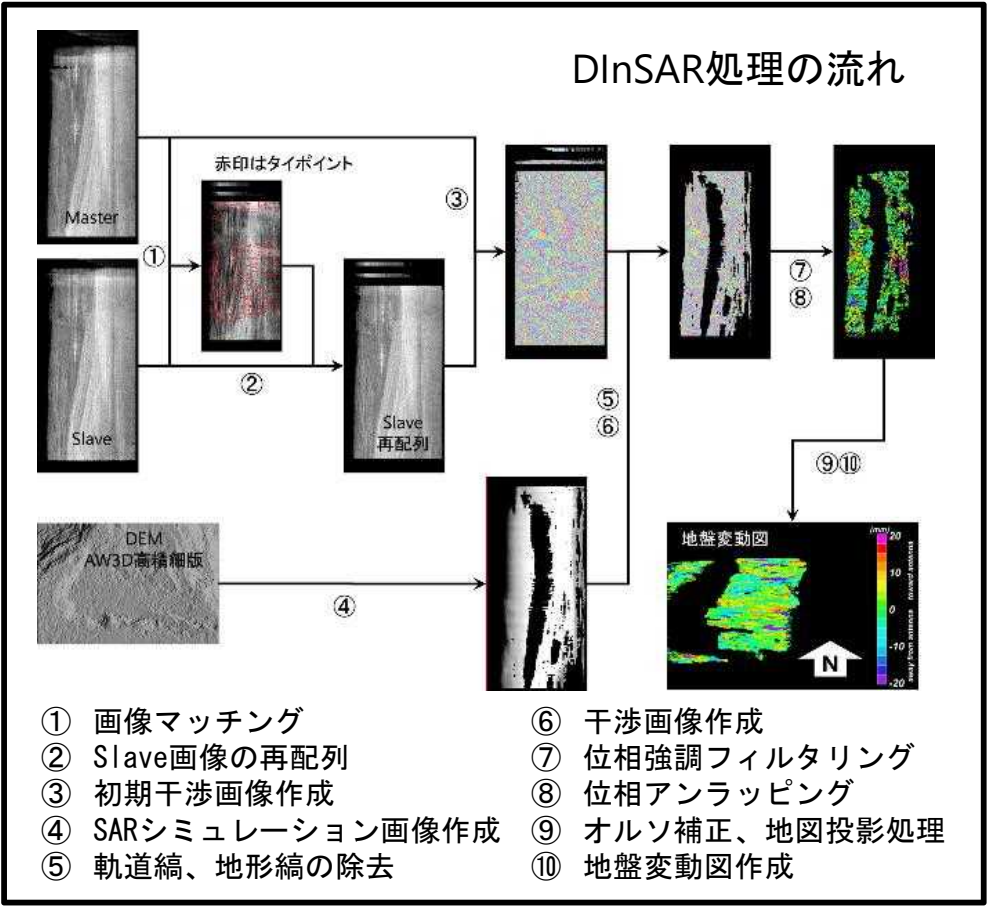
(a) 植生被覆無し

(b) 植生被覆あり

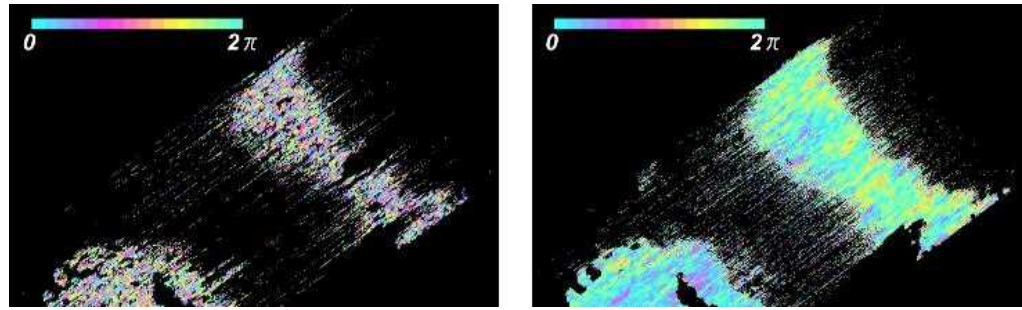
変位計測精度検証試験



変位計測精度検証試験の風景



- ① 画像マッチング
- ② Slave画像の再配列
- ③ 初期干渉画像作成
- ④ SARシミュレーション画像作成
- ⑤ 軌道縞、地形縞の除去
- ⑥ 干渉画像作成
- ⑦ 位相強調フィルタリング
- ⑧ 位相アンラッピング
- ⑨ オルソ補正、地図投影処理
- ⑩ 地盤変動図作成



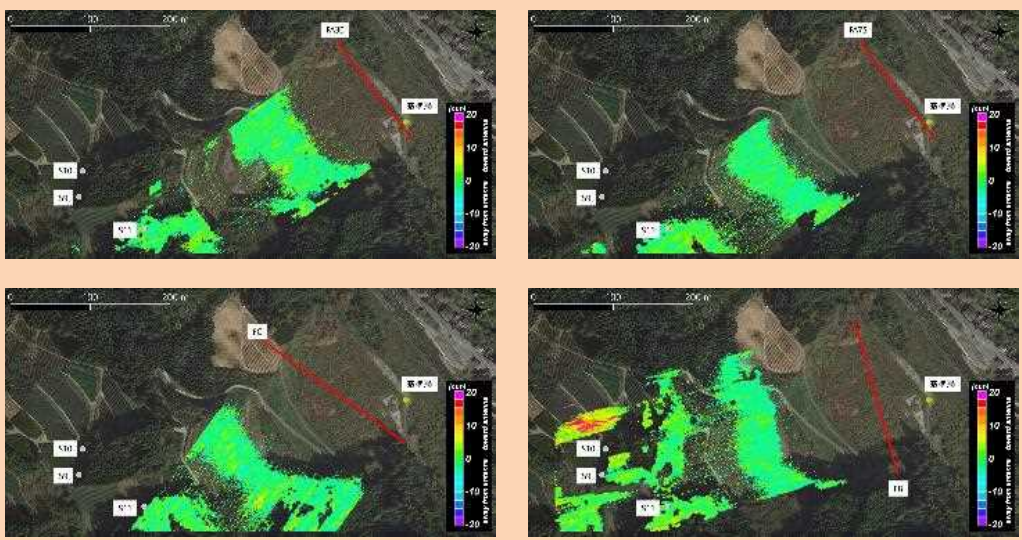
(a) 単一の干渉画像

(b) スタッキング後の干渉画像

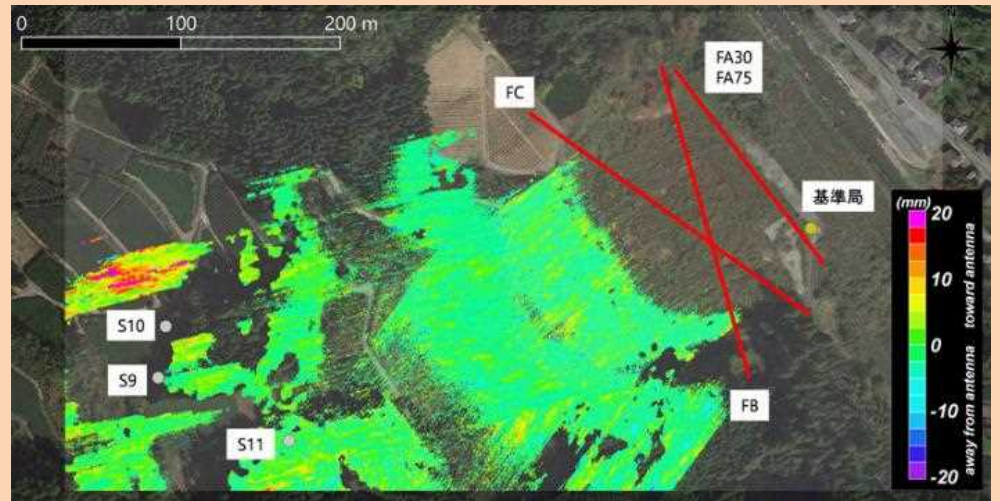
DInSAR処理で作成される干渉画像

⑤ 「ドローン搭載SARによるDInSAR計測の実証試験」

実施内容・成果

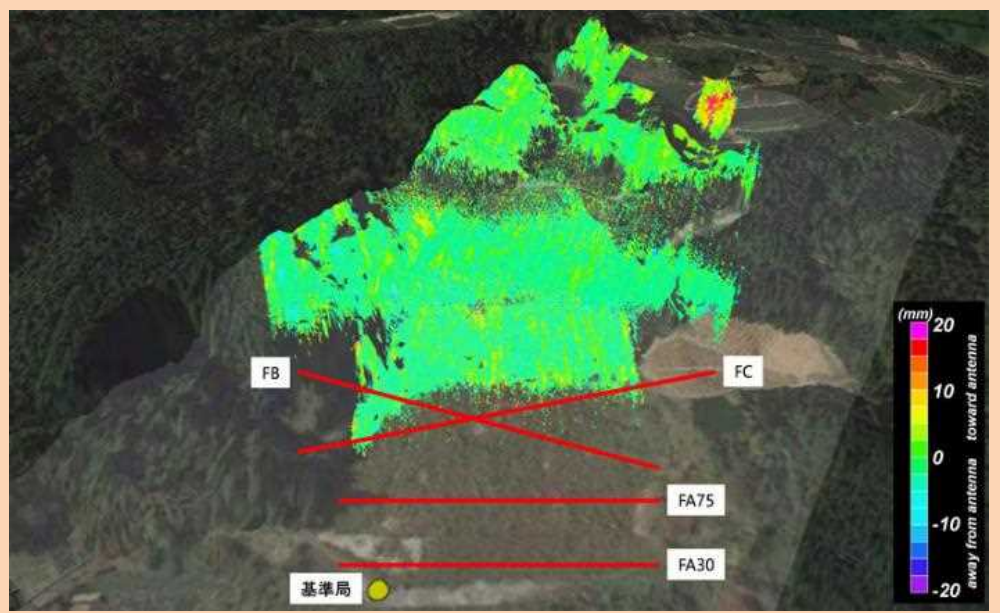


4つの飛行軌道から計測した地盤変動結果を統合



地盤変動計測結果統合図

QGISを用いた3D表示



地盤変動計測結果統合図の鳥瞰画像

露天掘方式による石灰石鉱山の切羽斜面（栃木県）及び斜面崩壊対策工事現場の法面（福岡県）で、ドローン搭載SARによるDInSAR計測の実証試験を行い、実用化と社会実装に向けた課題を洗い出した。

福岡県の斜面崩壊対策工事現場では4つの軌道を設定して、3時期に計60回の飛行を行い、DInSAR処理を適用した。DInSAR処理の各組み合わせについて軌道間距離を算出した結果、約84.5%が10cm以下の垂直成分を達成していた。

KuバンドのDInSARでは、単一の処理では良好な干渉画像を取得できないが、複数の干渉画像を用いたスタッキング法によるノイズ低減処理を講じた結果、CバンドやXバンドの衛星搭載SARによる従来のDInSAR処理では計測が困難であった植生地域に対しても地盤変動計測を適用できる可能性が見い出され、茶畑が耕作される斜面の滑動を示唆する結果を得るに至った。

当該現場に精通した技術者に対して、後に実施したヒアリングにおいて、DInSAR処理が検出した異常は、地滑りの滑動ブロックと整合しており、表層部の変位を捕捉した可能性が示唆された。

その他の成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	特許出願	査読付き 投稿論文	その他研究発表	実用化事業	プレスリリース・取材対応	展示会展展
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 2 国際 : 4	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 1 国際 : 0
	受賞・表彰リスト		該当なし			

成果展開の状況・期待される効果

本研究課題では、小型化・軽量化・省電力化を念頭に置いて自社開発したKuバンドレーダを、一般に普及が拡大したドローンに取り付けた『ドローン搭載SARシステム』のプロトタイプを開発した。ドローンの利活用は通常空撮に留まらず、太陽パネルの監視、インフラ点検、物流・輸送、農業散布といった高度利用にまで浸透しているが、測量技術としてレーダ装置を搭載したシステムを開発し、DInSAR計測の有効性を実証した成果は世界的にも前例が無い。

従来のSARは人工衛星や固定翼航空機に搭載されてきた特殊性の高い観測技術であったが、身近な存在となったドローンを用いてSAR観測を実感することが可能となった状況は、SARの技術者・研究者を育成する教育ツールとしての活用が期待され、学会や展示会等を活用して本課題の成果を開示することによりSAR利用の裾野拡大に貢献できる波及効果が考えられる。

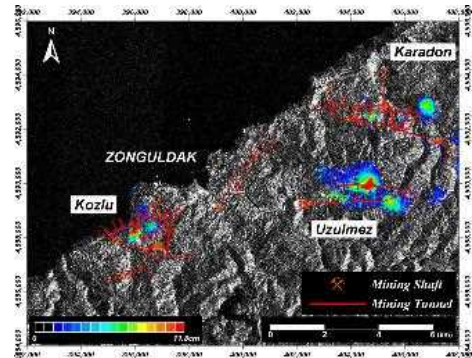
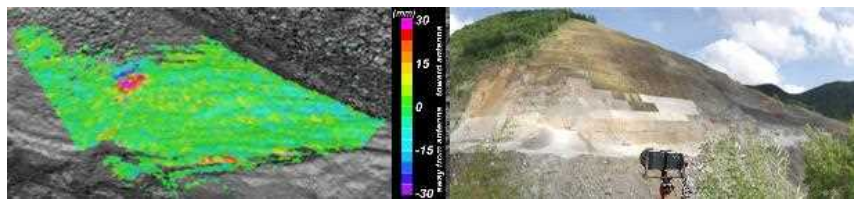


今後の研究開発計画

提案書提出時の計画では、事業終了後に、産業界のみならず一般市民が集結する展示会等でブースを設営して、本事業の成果を周知させると共に、学術的意義を深める目的で国内外の学会等において成果発表を行い、専門家との意見交換を行う予定であった。また令和2~3年度の2年間は、実費負担でのデータ取得サービスを実施してドローン搭載SARの性能や改善点について客観的見解を仰ぎ、継続的な研究開発・技術開発へ反映させる計画を立てた。しかし、2020年2月頃から始まった新型コロナウイルスの世界的な感染拡大が影響し、いずれの計画も実行するに至っていない。今後の感染状況を静観しつつ、活動計画を再考する予定としている。

社会実装に向けた具体的な手段として、操業中の露天掘鉱山において残壁の安定性評価及び崩壊監視の手段として導入を試みるほか、建設コンサルタント事業への積極的な投入を計画する。本研究課題の実証試験に選定したフィールドは社会実装への展開を視野に入れており、斜面監視に対する問題意識やドローン搭載SAR導入の可能性等について現場側と協議する。

将来的な構想としては、広域同時性という唯一無二の特長を誇る衛星搭載SAR、リアルタイム性を備えた地上設置型レーダに、本研究課題で開発したドローン搭載SARを組み合わせ、それぞれの長所を相補的に活かしながらレーダ技術を最大限に役立てた統合システムの構築を目指す。



(上図) 衛星搭載SARのDInSAR処理による地盤変動計測結果
(左図) 当社の地上設置型ミリ波レーダを用いて斜面崩壊の前兆現象を検出した結果

事後評価票

令和2年3月末現在

1. プログラム名	宇宙利用技術創出プログラム
2. 課題名	衛星情報を利用したドローン搭載 SAR の開発と実証
3. 主管実施機関・研究代表者	日鉄鉱コンサルタント株式会社・出口知敬（次長）
4. 共同参画機関	—
5. 事業期間	平成29年度～令和元年度
6. 総経費	35.8百万円
7. 課題の実施結果	
(1) 課題の達成状況	
「所期の目標に対する達成度」	
◆ 所期の目標	
<p>本課題では、合成開口レーダ（以下、SAR とする）の強力な応用技術である差分干渉解析（以下、DInSAR とする）が可能な『ドローン搭載 SAR』の開発と実証を目的とする。レーダに採用する電波の周波数は 12.8～12.95GHz（Ku バンド帯）とし、合成開口処理と DInSAR の適用に必要な高精度位置情報は RTK 技術で cm 級の測位を達成できる GNSS モジュール（準天頂衛星対応）を用いる。また、DInSAR の処理過程における地形縞の除去とオルソ補正については AW3D 高精細版（1m 解像度）を利用する。</p> <p>防災先進国である我が国において、活火山や地滑り斜面、鉱山切羽などにおける斜面監視や、近年社会問題化した老朽化インフラの維持管理対策は重要課題と考えられる。そこで、衛星から得られる位置情報や地形情報を用いてドローン搭載 SAR による DInSAR 技術の実用化を行うとともに、地盤変動計測に係るサービスを創出できる段階への到達を目指す。</p>	
◆ 達成度	
<p>本研究課題の目的を達成するうえで設定した課題は以下の6つとした。</p> <ul style="list-style-type: none">(A) 国内電波法に適合した周波数設定(B) ドローンに搭載可能なレーダ装置の設計(C) 合成開口処理と DInSAR の適用に必要な高精度位置情報の取得	

- (D) 不安定なドローン軌道に対応した信号処理技術の開発
- (E) DInSAR の処理過程における地形縞の除去に必要な地形データの取得
- (F) 実用化とサービス創出に向けた実証試験の実施

これらの課題に対する本研究の実施項目を以下のように掲げた。

- ① Ku バンドレーダの開発と軽量化【課題(A)及び(B)】
- ② ドローン向け高精度 GNSS モジュールによる位置情報抽出と精度検証【課題(C)】
- ③ ドローン搭載レーダの合成開口処理技術開発【課題(D)】
- ④ 高精細衛星画像を用いた DInSAR 技術の開発【課題(E)】
- ⑤ ドローン搭載 SAR による DInSAR 計測の実証試験【課題(F)】

① Ku バンドレーダの開発と軽量化【課題(A)及び(B)】

以下に記す成果を挙げることができ、所期の目標であった『国内電波法に適合した周波数設定』及び『ドローンに搭載可能なレーダ装置の設計』を達成した。

- ・ ドローン搭載を念頭に置き、『小型化』、『軽量化』、『省電力化』を意識しながら、特定実験試験局の制度で定められた 12.8~12.95GHz (Ku バンド) のレーダを開発した。
- ・ レーダ装置について、サイズは 255×184mm と A4 用紙内を、重量はバッテリー込みの状態でも約 600g と当初計画の半分以下を、消費電力は約 5.5Wh と従来の 1/3 以下を達成した。
- ・ 第三者機関の客観的な審査により、スプリアスが発生しないこと、空中線電力が規定値以下であること等が検証され、特定実験試験局の規定条件を満足することが確認されたので、無線局の免許申請を行い、総務大臣より免許状が交付された（有効期間は令和 4 年 6 月 30 日まで）。
- ・ プラットフォームには DJI 社製の産業用ドローン『Matrice 600 pro』と RTK 測位が可能な同社製『D-RTK』を選定し、Ku バンドレーダに小型且つ軽量の A/D 変換器とコンピュータを組み合わせて、ドローン搭載 SAR のプロトタイプシステムを開発した。
- ・ 動作耐久試験では、単三乾電池×4 本で約 63 分の連続稼働が可能であることを確認した。
- ・ 鉱山斜面で約 1.4km、斜面崩壊対策工事現場で約 600m、火山帯で約 3.2km の遠隔探知計測が可能と評価された。

② ドローン向け高精度 GNSS モジュールによる位置情報抽出と精度検証【課題(C)】

以下に記す成果を挙げることができ、所期の目標であった『合成開口処理と DInSAR の適用に必要な高精度位置情報の取得』を達成した。

- ・ 静止状態における D-RTK の測位精度は、基準局までの距離が 9km の時に 3cm 以下の 3σ 標準偏差が確認され、RTK 測位技術の理論精度と整合することが検証された。
- ・ DInSAR 処理では、異なる 2 時期に取得したデータの位相差から地表面の微小変位を計測するが、二回の飛行における軌道間距離の垂直成分が狭いほど計測精度が高い性質を示すので、ドローン搭載 SAR を自動操縦で飛行させ、フライトログを用いて軌道制御精度を検証した結果、10cm 以内に回帰できることが明らかとなった。
- ・ 後述する実証試験において、飛行高度 20m、飛行速度 3m/s の条件下で自動飛行を行った結果、

垂直成分の最大値は 57.9cm となり、84.5%の確率で垂直成分を 10cm 以下に制御できることが検証され、DInSAR 処理が適用可能となる実効的な臨界値と評価された 1.3~1.4m を十分に下回る結果を得た。

③ ドローン搭載レーダの合成開口処理技術開発【課題(D)】

以下に記す成果を挙げることができ、所期の目標であった『不安定なドローン軌道に対応した信号処理技術の開発』を達成した。

- ・ ドローンの飛行軌道が強い非直線性を示すことを考慮し、ロバスト性を向上させる目的で、RTK 測位による高精度な測位情報を記録したフライトログベースでアジマス方向に参照信号を切り替えながら、周波数領域相関法を適用する信号処理アルゴリズムを開発した。
- ・ 15cm 角のコーナーリフレクタ（以下、CR とする）を用いて合成開口処理の効果を検証した結果、最大 84.5 倍のアジマス圧縮率を確認することができた。
- ・ 試験用に設置した CR や鉱山道路、斜面の形状、地滑りの滑動を抑制する目的で施工された金属製のアンカーなどを明確に識別することができた。
- ・ ドローンのフライトログ及び高解像度衛星画像から作製した DEM を用いて地図投影処理を行い、3 つの CR を用いてジオメトリの精度を検証した結果、1m 以下の精度を確認することができた。

④ 高精細衛星画像を用いた DInSAR 技術の開発【課題(E)】

以下に記す成果を挙げることができ、所期の目標であった『DInSAR の処理過程における地形縞の除去に必要な地形データの取得』を達成した。

- ・ 変位計測精度評価試験では、季節や時間を問わず、疎らな植生被覆状況においても、実開口レーダの状態でも 0.5mm の精度を検証することができ、ミリメートルオーダーの変位計測が可能と判明した。
- ・ 地形縞を除去するために必要な DEM には、高空間分解能の衛星画像から作成された AW3D 高精細版地形データを使用した。
- ・ 衛星搭載 SAR の DInSAR 処理を応用し、自動処理によるドローン搭載 SAR 用のアルゴリズムを開発した。
- ・ 合成開口処理から DInSAR 処理までの一連の流れを、GUI 上のボタン操作だけで実行できるソフトウェアを作成した。
- ・ DInSAR 処理による単一の干渉画像は、SN 比が低く位相の空間連続性に乏しいが、スタッキング法によるノイズ低減処理を適用することにより、有意な計測を実行できる可能性が示唆された。

⑤ ドローン搭載 SAR による DInSAR 計測の実証試験【課題(F)】

以下に記す成果を挙げることができ、所期の目標であった『実用化とサービス創出に向けた実証試験の実施』を達成した。

- ・ 栃木県の石灰石鉱山及び斜面崩壊対策工事現場で実証試験を行い、実用化と社会実装に向け

た課題を洗い出した。

- ・ 単一の DInSAR 処理では良好な干渉画像を取得できないことが明らかとなったことから、複数の干渉画像を用いたスタッキング法によるノイズ低減処理を講じた結果、CバンドやXバンドの衛星搭載 SAR による従来の DInSAR 処理では計測が困難であった植生地域に対しても地盤変動計測を適用できる可能性が指摘され、茶畑が耕作される斜面の滑動を示唆する結果を得るに至った。

「必要性」

本研究課題は以下の観点から、十分な必要性が認められる。

・ 科学的・技術的意義（独創性、革新性、先導性、発展性等）

本研究課題では、ドローン搭載 SAR のシステム開発を達成した。これは宇宙由来の測位情報と地形情報、そして『空の産業革命』と表現されるドローンを活用した航空技術に、合成開口レーダの測量技術を融合したシステムで、チャレンジ性の高い取り組みであり、十分な新規性と独創性を有すると評価できる。ドローンの利活用は通常空撮に留まらず、太陽パネルの監視、インフラ点検、物流・輸送、農業散布といった高度利用にまで浸透しているが、測量技術としてレーダ装置を搭載したシステムを開発して有効性を実証した成果は世界的にも前例が少なく、科学的な意義を高めることに貢献した。

・ 社会的・経済的意義（産業・経済活動の活性化・高度化、国際競争力の向上）

従来は人工衛星や固定翼航空機に搭載されてきた特殊性の高い観測技術が、一般に身近な存在となったドローンを用いて実現可能となった成果は意義が大きい。『日本再興戦略』の重点施策や『未来投資戦略』が実現を目指す Society5.0 で推進される無人航空機の産業利用とも合致し、大きな社会的効果を期待できる。

本研究課題で開発したドローン搭載 SAR には、国内の電波法で制度化された特定実験試験局で周波数が割り当てられている 12.8~12.95GHz のレーダ装置を搭載したが、レーダ装置自体は自社で独自に設計・製作したハードウェアであるため、諸外国の電波法に準拠するレーダ装置へ容易にカスタマイズすることが可能である。本研究課題で蓄積したノウハウや技術を海外に移転することが可能となり、ODA 事業を通じた国際協力の面において強いインパクトと、防災先進国としてのプレゼンスを示すことが可能と思慮できる。

「有効性」

本研究課題は以下の観点から、十分な有効性が認められる。

・ 新しい知の創出

衛星搭載 SAR では、波長の短い C バンドや X バンドの DInSAR 計測は、植生被覆地域において有効に機能しないことが定説であった。本研究課題では、ドローンの特長である機動性と操作性を有効に活用して、一日の中で複数回のフライトを実施し、慣例的なスタッキング法を用いて SN 比を向上させることで、斜面崩壊対策工事現場周辺の植生被覆に富んだ茶畑で地滑りを反映した有意な

異常を検出するに至った。この成果は、DInSAR 計測の常識を覆すほどの強いインパクトがあり、ドローン搭載だけが成し得る新たな成果を生んだと評価できる。

・ **直接・間接の成果・効果やその他の波及効果**

従来の SAR は人工衛星や固定翼航空機への搭載が主流であり、一部の研究者や大企業のエンジニアだけが触れることのできるハードルの高い観測技術であったが、一般市民にも馴染み深い存在となったドローンを用いて SAR 観測を実感することが可能となった状況は、SAR の技術者・研究者を育成する教育ツールとしての活用が期待され、学会や展示会等を活用して本課題の成果を開示することにより SAR 利用の裾野拡大に貢献できる波及効果が考えられる。

「効率性」

本研究課題は以下の観点から、十分な効率性が認められる。

・ **費用構造や費用対効果向上方策の妥当性**

研究計画としては、ハードウェア開発を第一年次に、ソフトウェア開発を第二年次に、実証試験を第三年次に集中できるような配分で予算を計上した。労務費の拡大を抑制するため、それぞれの開発と試験を専任で着手して費用対効果と生産性の向上を図った。研究開発の進行に応じて、屋外試験の実施計画を柔軟に策定し、旅費の削減に努めた。以上より、費用構造ならびに費用対効果向上策は共に妥当であったと考える。

・ **計画・実施体制の妥当性、目標・達成管理の妥当性**

本研究課題に設定した各開発要素に関して、汎用性の高い部分は既製品を応用しつつ、レーダ装置のように独自性を主張できる技術項目について設計・製作を集中できるようスケジュールと費用配分を策定した。室内試験や事務所屋上を活用し、予備試験を実施してデバッグしながら、屋外試験を短期間で効率良く遂行できるよう工夫を凝らした。

研究代表者が進捗状況と目標の達成状況を管理できる実施体制を構築し、それぞれの開発要素は独立して進行させる一方で、情報共有を欠かすことなく効率性の向上に努めた。

・ **研究開発の手段やアプローチの妥当性**

ハードウェアに係る研究開発は、かねてより自社事業で開発してきたミリ波レーダ装置のノウハウを活かし、ソフトウェアに係る研究開発は衛星画像解析で培った経験を活用することで、本研究課題の要素技術開発に対する計画を最適化させ、時間対効果の向上を図った。

(2) 成果

「アウトプット」

具体的なアウトプットについては、(1)「所期の目標に対する達成度」に記述した通りである。特筆すべき成果は、本研究課題では植生に覆われた斜面において、地滑りの滑動ブロックに対応する地表面変位を検出した点である。衛星搭載 SAR による DInSAR 計測に係る既往研究において、Cバ

ンドやXバンドのデータでは電波の波長が短いために、時間に対する相関性の低下が大きく、植生地域で良好な干渉画像が作成されることは皆無であった。本研究課題では、更に波長が短いKuバンドのレーダを採用したにも関わらず、有意な地表面変位を計測するに至った。これは、同日内に複数回のフライトと画像取得を実行してスタッキング法によるSN比改善手法が有効となったが、ドローンが持つ機動性と操作性の高さに着目した本研究課題の重要な成果と言える。

本研究課題と同様に、無人航空機に搭載したSARに係る国内外の研究開発動向としては、固定翼タイプへ搭載する研究は複数報告されている反面、操作性が高いマルチコプタータイプのドローンへの搭載実績は、スイスのチューリッヒ大学が研究を進める一例に留まる。

https://www.geo.uzh.ch/en/units/rsi/research/SAR_Lab/SARLab-Computational-SAR.html

同大学の研究ではDInSAR計測の適用実績が報告されておらず、マルチコプタータイプのドローン搭載SARでDInSARに成功した本研究課題は、世界的にも前例が無い成果を得たと考える。

「アウトカム」 (令和2年10月末時点)

本研究課題の成果や取組に関しては、国内外の学会や展示会で紹介し、ドローン搭載SARの周知活動に努めた。ドローンの利活用は通常空撮に加えて、太陽パネルの監視、インフラ点検、物流・輸送、農業散布といった高度利用にまで発展しているが、測量技術としてレーダ装置を搭載したシステムを開発し、合成開口処理やDInSAR処理の適用可能性を実証した研究例は世界的にも稀有であり、ドローンの利活用拡大への貢献が期待できる。また、波長が短い電波のDInSAR処理は、衛星搭載の場合には難易度が高い事実は既往研究で明らかにされているが、ドローンに搭載することにより、KuバンドレーダのDInSAR計測を可能とした実績は強いインパクトを残す成果と言える。

(3) 今後の展望

3カ年の研究期間でドローン搭載SARを開発し、プロトタイプシステムではあるが、地盤変動計測に係るサービスを創出できるレベルに到達することができた一方、実証試験サイトが石灰石鉱山と斜面崩壊対策工事現場の二ヶ所に留まった。

当初計画では、産業界のみならず一般市民が集結する展示会等でブースを設営して、本事業の成果を周知させると共に、学術的意義を深める目的で国内外の学会等において成果発表を行い、専門家との意見交換を行う予定であった。また令和2~3年度の2年間は、実費負担でのデータ取得サービスを実施してドローン搭載SARの性能や改善点について客観的見解を仰ぎ、継続的な研究開発・技術開発へ反映させる計画を立てた。しかし、2020年2月頃から始まった新型コロナウイルスの世界的な感染拡大が影響し、いずれも実行するに至っていない。これらの計画に関しては、今後の感染状況を静観しつつ、活動計画を再考し、産業利用へのアプリケーション拡大と社会実装を展開する。

社会実装に向けた具体的な手段として、操業中の露天掘鉱山において残壁の安定性評価及び崩壊監視の手段として導入を試みるほか、建設コンサルタント事業への積極的な投入を計画する。本研究課題の実証試験に選定したフィールドは社会実装への展開を視野に入れており、斜面監視に対する問題意識やドローン搭載SAR導入の可能性等について現場側と協議する。

また、当社が自社事業で開発したミリ波レーダ装置は、JICA が実施する SDGs ビジネス支援事業に採択されており（2018 年度第二回、2020 年度第一回）、資源大国として知られる南米チリにおいて鉱山斜面監視に係る案件の創出を進めている。当該事業を活用しながら防災保安に対する意識向上を図り、ドローン搭載 SAR の技術導入について検討する予定をしている。

将来的な構想としては、広域同時性という唯一無二の特長を誇る衛星搭載 SAR、リアルタイム性を備えた地上設置型レーダに、本研究課題で開発したドローン搭載 SAR を組み合わせて、それぞれの長所を相補的に活かしながらレーダ技術を最大限に役立てた統合システムの構築を目指す。

8. 評価点

A

評価を以下の 5 段階評価とする。

- S) 優れた成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に著しく貢献した。
- A) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献した。
- B) 相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。
- C) 一部の成果を挙げているが、宇宙航空利用の明確な促進につながっていない。
- D) 成果はほとんど得られていない。

9. 評価理由

本課題において、これまでに実装されているケースが少ないドローン搭載 Ku バンド SAR を開発し、干渉解析に至る手法を開発したこと、既存のドローンのペイロードに搭載可能なセンサ部の開発に成功してドローン搭載 SAR の課題である飛行と位置決定精度の安定性を克服したこと、実際に運用評価し、地表を覆う植生の影響も評価して、実用としての技術実証まで試行していることは高く評価される。

一方で、実用性の検討や実証成果が不足しており、当初目的としていた「実用化やサービスを創出できる段階」への到達には至っていないと考えられる。また、開発終了後の実用展開の停滞の理由を新型コロナウイルスの影響とされているが、開発期間から見れば影響は実質で最後の 1 か月程度とわずかで、開発自体の評価としては一部未達で合理的な説明が無いと評価される面もある。更に、本プログラムの枠組みである宇宙利用の観点から、GNSS の活用についての技術的深耕が不十分であると考えられるとともに、事業終了後の継続性・実用化に向けての具体案が提示されていなかった。

以上より、本課題は、相応の成果を挙げ、宇宙航空利用の促進に貢献している。

今後は、以下の点が期待される。

- この技術を現在の目的のみに止めることなく様々な業界に技術提供と応用展開をすることを期待する。
- 宇宙技術との連携が弱いと、様々な衛星データとの連携を十分考慮されたい。
- 周波数帯を最適化することで、災害時の緊急対応などに向けての総務省との交渉を行うことを期待する。

- ドローンの搭載のみではなく、より広い機材との統合を行い、技術を世に広めることを期待する。
- 自治体等と連携し、他の拠点において、更なる実証を進めるとともに海外における実証も進めることを期待する。
- 精度検証、グッドプラクティスの創出などビジネス展開に向けた課題に取り組むことを期待する。