別紙 2

平成２９年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書
無人機搭載ＳＡＲのリピートパスインターフェロメトリＭＴＩに係る研究

平成 30 年 5 月

機関名
学校法人　東京電機大学

様式第１９

研究成果報告書への標記について

委託業務に係る成果報告書の表紙裏に、次の標記を行うものとする。

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、学校法人東京電機大学が実施した平成２９年度「無人機搭載SARのリピートパスインターフェロメトリMTIに係る研究」の成果を取りまとめたものです。

1.0 委託業務の目的

Lバンド[*1]合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar、以降SAR）を搭載した2機の無人機の飛行コースを協調制御した観測飛行によってアンテナ離隔距離に可変性を付加し、様々な速度の移動体を検出できるリピートパスによるアロングトラックインターフェロメトリ（以下、ATIとする）[*2]を用いた移動体検出（Moving Target Identification: MTI）技術を開発する。特に本研究では非常にゆっくりと移動する対象物の検出やその速度を高い精度で検出する技術の開発を目標とする。

移動体の速度は、それと異なる速度で移動する二つの（同一）信号源で構成された観測計系で観測した移動体からの反射信号を差分処理して求められる（ヤングの実験の変化形）。速度の検出精度は、信号源の距離（アンテナ離隔距離）に反比例、観測系の移動速度と信号の波長に比例し、本研究では、溶岩流や地滑りなどの検出を可能とする1cm/s程度を目標とする。

観測系として、2台の低速無人機を協調制御飛行させ、アンテナ離隔距離を100m程度、さらに横方向に1mのずれ内で、対地速度30m/s程度で飛行させることを想定している。ただしこれらの条件については、SAR側要求や飛行高度等の試験条件に基づく再検討を行い、無人機による協調制御飛行実験前に確定するものとする。また、送受信するシステムとしては、地表を覆う植生の透過性に優れるL-band SARを用いる。また、映像化処理、解析処理はプロジェクトに参加の研究者が開発した技術を活用する。

したがって、本計測の実現のために、3年間にわたって

1) 2機の無人機で協調した誘導制御技術の開発を目的として、
   1-1) リピートパスインターフェロメトリを成立させる誘導制御技術、
   1-2) 2機間の飛行状態共有によるフォーメーションフライト技術

2) リピートパスによるATIを用いたMTI技術の開発を目的として、
   2-1) 搭載するSARデータとINS（慣性航法装置）データを用いた高精度SAR映像化技術、
   2-2) 2台のSARを干渉処理し移動速度や標高情報の抽出を行う処理アルゴリズム

の研究開発を行う。

年度展開として、平成27年度はシステム設計と一部製造、平成28年度は1機の航空機とSARを用いた実験の実施と映像化機能の確認、平成29年度に2台の無人機とSARを用いた観測実験を行い移動体速度の推定検証実験を行う。精度の検証としては、地上でゆっくりと移動する反射体を用いた移動速度検証を行う。また、森林の信号透過性を確認するために、森林内に設置したコーナー反射鏡を確認する実験を行う。

*1：Lバンドは波長が長く樹木などを透過する特性があるため、国土の7割を樹木に被覆される日本国内では漏れのない移動体検出に適したバンド帯

*2：2 つの SAR アンテナで同一軌道を繰り返し観測し、各アンテナが受信する反射波の差分を移動体として検出する技術

これらを実現するために、東京電機大学では SAR の設計と SAR 映像化及び ATI に関わる技術開発、さらには SAR 製造と運用委託を含めたプロジェクトの総合的推進、宇宙航空研究開発機構では、2 台の無人航空機を開発し、2 機の無人航空機が予め決められた観測軌道に沿った限定空間を正確

に飛行して干渉可能なデータを取得するための一定の間隔を保持した誘導制御技術と協調フライト運用に関わる研究開発を実施する。

1．1　研究開始時に設定した研究目標の達成度

システムの全体概要は、図 1-1 に示すように、小型 UAV に小型軽量の SAR と INS を搭載し、時速 100km（秒速 30m）で水平飛行しながら、地表を観測する。もう一台の UAV+SAR システムが、同一高度を同一速度で飛行し地表を観測する。その状態で、移動体のクロストラック成分の速度を検出できるかを本研究の目的とする。

SAR の干渉性を利用して移動体を検出する方法は、アロングトラック干渉と呼ばれ、これまでに、人工衛星や大型航空機 SAR を利用して観測された。観測方法は、衛星には送信は共通、受信を分割できるアンテナを搭載し、その距離差から衛星に直交する速度成分を検出するものである。速度検出精度は、衛星や航空機の移動速度に反比例、アンテナ間距離やレーダ波長に比例するために、高速移動体の検出はできても低速移動体の検出は不向きであった。本プロジェクトは、近年発達してきた、UAV や小型電子機器等を活用して、2 式の低速 UAVSAR がどこまで、SAR の映像化機能を有するか、干渉性が実現できるか、移動速度が検出できるか（1cm/s）を目標とした。

本プロジェクトは設計、開発、実験、解析で構成される。また、開発最小の要素としては、1）UAVSAR、2）画像化アルゴリズム＋干渉アルゴリズム、3）UAV、4）UAV 制御アルゴリズム、5）単機及び二機の観測実験、6）データを用いた解析作業で構成される。新規性の高い研究でありながら、時間の限定されているプロジェクトをどのように進めるかの課題であったが、SAR に関しては、設計と映像化ソフトウェアの開発及びデータ解析を主研究実施機関の東京電機大学が、UAV とその制御則の開発、さらには、実験場（北海道大樹町）を有する共同研究者 JAXA が実験運用を分担した。SAR は東京電機大学の実施した設計に基づき、業者に委託し、製造された機器の有償貸与を受け、本実験を実施した。

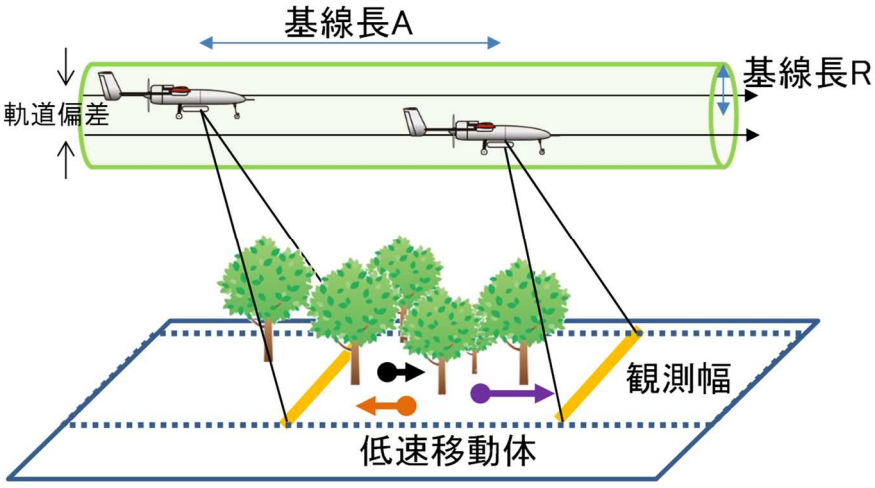


図 1-1　本プロジェクトの全体概要図

小型 SAR を搭載した二機の UAV が垂直基線長 R、水平基線長 A で飛行し、観測域内の低速移動体やその速度の検出を目的とする。開発にあたっては、UAV の開発、SAR の開発、得られたデータの画像かと干渉処理をおこなう部分に分割できる。

開発体制と分担は図 1-2 に示す。

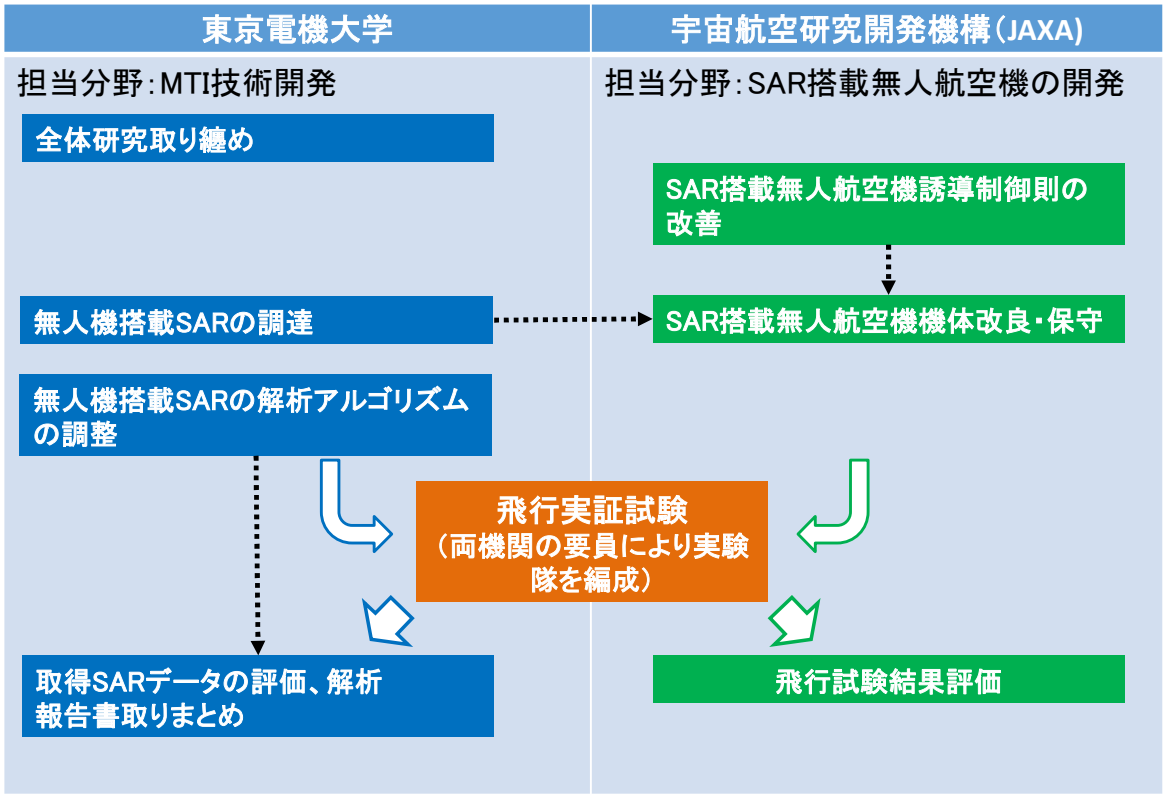


図 1-2　開発体制

また、開発スケジュールを図 1-3 に示す。

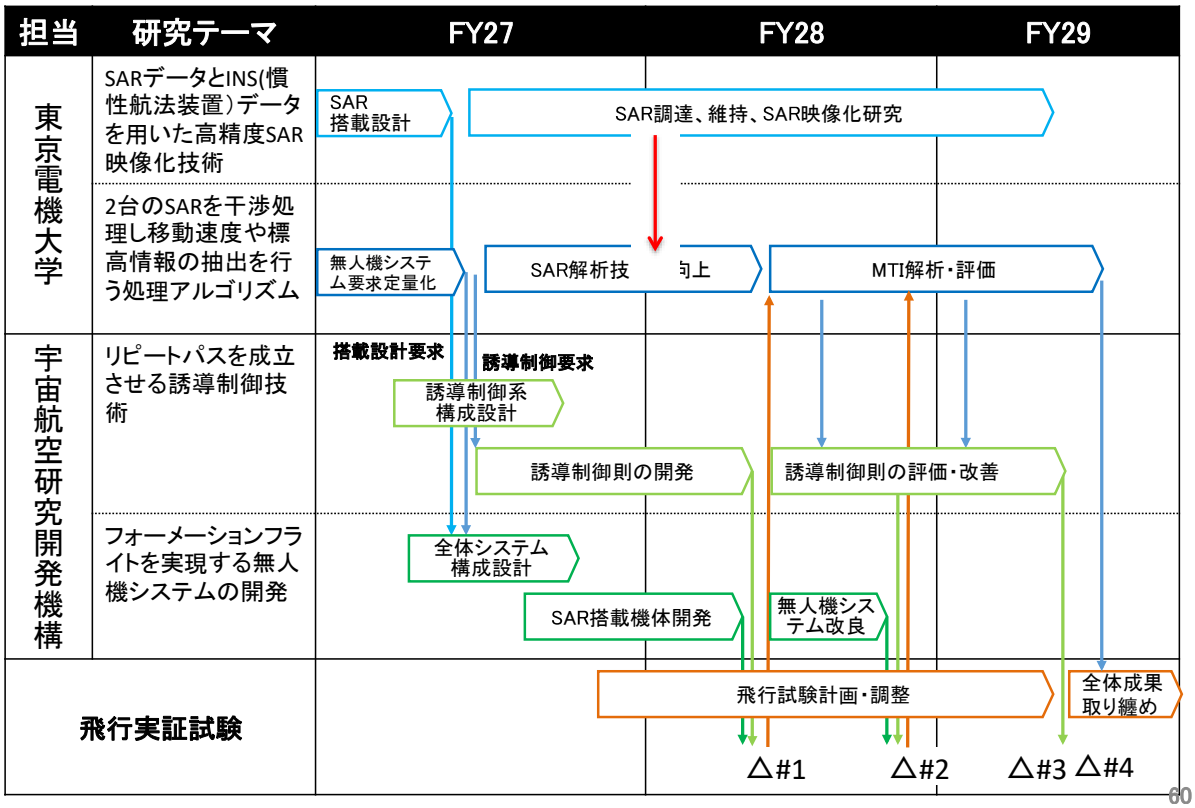


図 1-3　開発スケジュール

委託業務では以下の業務を実施した。

1) 2機の無人機で協調した誘導制御技術の開発を目的として、
　1-1) リピートパスインターフェロメトリを成立させる誘導制御技術、
　1-2) 2機間の飛行状態共有によるフォーメーションフライト技術
2) リピートパスによるATIを用いたMTI技術の開発を目的として、
　2-1) 搭載するSARデータとINS（慣性航法装置）データを用いた高精度SAR映像化技術、
　2-2) 2台のSARを干渉処理し移動速度や標高情報の抽出を行う処理アルゴリズム
の研究開発を行う。

以下で、各々について記述する。

1) 2機の無人機で協調した誘導制御技術の開発

1-1) リピートパスインターフェロメトリを成立させる誘導制御技術、

本事業においては、リピートパスインターフェロメトリを成立させるために 2 機の SAR を搭載した無人航空機（以下、SAR 搭載無人航空機と呼称する。）が一定の距離を維持してほぼ同一のコースを飛行する必要がある。このような飛行を自動制御にて実施するための誘導制御則の開発、および飛行試験による実証を実施した。

本事業にて開発、運用した SAR 搭載無人航空機は、後述するように JAXA における先行研究である放射線モニタリング用無人航空機（以下、UARMS 機）の基本設計を用いており、機体システム構成も同様である。そのため、自動制御飛行のための誘導制御則についても UARMS 機のものを引き継いでおり、速度、高度を一定に保持しつつ、事前に設定したウェイポイントを順にたどって自動制御飛行をおこなうことができる。この機能だけでも 2 機の機体に同一のコースを飛行させることが可能であり、2 機の距離を一定に保持することも概略可能ではあるが、外乱等によって 2 機の距離が接近、または拡大した場合に一定値に保持するように補正することはできない。このため、誘導制御系の開発は以下の方針で実施することとした。

- 2 機の無人航空機のうち先行機については UARMS 機の誘導制御系を踏襲し、設定された速度、高度を自動的に維持して計測コースの周回飛行をおこなう。
- 後続機については、UARMS 機の誘導制御系を踏襲し、設定された高度を自動的に維持して計測コースの周回飛行をおこなう一方、機体間通信によって取得した先行機の位置情報から先行機までの距離を算出し、飛行速度を調整することにより同距離を一定値に保持するような制御を追加する。

1-1-1) 同一経路を飛行する誘導制御則の開発

前述の通り、本無人航空機は UARMS 機の誘導制御則を引き継いでおり、予め指定された（または飛行中に地上局からの指示により変更・設定された）指令値により速度、高度を一定に保持しつつ、予め座標位置を指定したウェイポイントを順にたどって自動制御飛行をおこなうことができる。

後述するように、本事業にて開発、運用した SAR 搭載無人航空機は機体間の直接通信により先行機の現在位置を後続機に随時送信する機能を有しており、これによって最初に設定したコースではなく、実際に先行機が飛行したコースを後続機の目標経路として制御をおこなうことも検討された。しかし、これまでの事例から目標コースから実際の飛行経路が逸脱した場合には横風に流された場合、旋回時に旋回半径が膨らんだ場合など同一方向に誤差が出る傾向があり、先行機の実際の飛行経路を目標として制御をおこなうと却って経路偏差が増大してしまう可能性が懸念された。このため最終的には後続機は先行機の飛行経路に関わりなく先行機の目標コースと同一の目標コースを取ることとした。

経路誤差の精度としては、当初先行機の実際の飛行経路に対して 1m 以内という目標を設定した。先行研究における単一機体の周回飛行における事例などから、相応に達成の可能性のある目標と考えられたが、問題点として、そもそも先行研究の機体が使用していた複合航法装置の計測誤差が公称で 1m 程度であり、実際にそこまでの精度が出ていることを確認する手段がなかったことが懸念された。一方、後述する複合航法装置の問題から、飛行中にリアルタイムに 1m を大きく上回る精度の位置情報を取得してそれをもとに飛行経路の制御をおこなうことが難しくなったこと、また SAR による先行的な計

測結果から低高度でのデータ取得が難しいことが判明し、最終的なデータ取得は高度 500m 程度を主とすることになったことなどから、経路誤差への精度要求を緩和できる可能性が出てきたため、平成 28 年度末の時点で目標精度を当初先行機の実際の飛行経路に対して 5m 以内と修正した。

1-1-2) 先行機との距離を維持して飛行する制御則の開発

SAR 搭載無人航空機は機体間の直接通信により先行機の現在位置を把握できるため、後続機の側で先行機の位置情報から先行機までの距離を算出し、飛行速度を調整することにより同距離を一定値に保持するような制御(以下協調制御)を追加する制御則を開発した。

試験時の飛行空域が限定されることから、2 機の機体は矩形の周回コースを飛行しつつ、計測を行うことになる。そのため機体間の距離は単なる直線距離ではなく予測される飛行経路に沿った距離(図 1-4)である必要があり、そのための計算ルーチンを制御則に追加した。

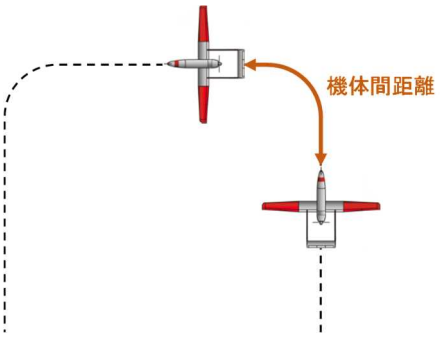


図 1-4 機体間距離の考え方

既存の誘導制御則への変更を最小限に抑えるため、協調制御則は後続機が機体間距離に応じてその対気速度指令を増減させることで一定の機体間距離を維持する。これにより UARMS 機の制御系そのものには殆ど改修を加えることなく協調飛行用の誘導制御系を実装することができるため、確実な開発にも寄与することになった。機体間距離から対気速度指令の生成は PI 制御によりおこなう。機体の制御周期 100 Hz に対して、機体間通信によって送られてくる先行機の位置情報更新周期が 10 Hz と遅いため、D 制御は採用しなかった。対気速度指令の変動によって飛行そのものに悪影響を来すことないよう、追加した制御則による対気速度指令の変更については 28～32 m/s の間に留めるようにリミッタを設定し、失速速度である 25 m/s 等に至らないようにした。また、協調制御は地上からの指令によって ON/OFF することが可能であり、OFF にした場合は後続機も予め指定された(または地上局からの指示により設定された)指令値により速度を一定に保持する。

また、協調制御則は 2 機の無人航空機が同じウェイポイントへ向かっている場合のみ速度の調整を行う。これは各機が矩形経路の異なる辺上を飛行していた場合に、機体に対して異なる方向から外部風を受けるために制御が悪影響を受け、最悪の場合、急速に機体間距離が縮まることを防止するためである。協調制御中に 2 機がそれぞれ異なるウェイポイントへ向かう状況になった場合には、ウェイポイントが切り替わった瞬間の対気速度指令を保持しておき、再び同じウェイポイントへ向かうまでその値を維持する。

後続機の協調制御は先行機との位置関係に依存するため、先行機で発生した不具合や機体間通信の不具合が後続機の制御に波及する恐れがある。そのため、後続機の制御に波及しうる不具合等の分析をおこない、以下のように対策することとした。

通信等の不具合により先行機の位置情報が更新されなくなった場合、自動制御系は位置情報が失われる前の機体間距離の値を保持し、この値を参照して制御を継続する仕様とした。これは、先行機に近接していると誤判断して速度指令値を大幅に下げてしまうことを防ぐためであり、また通信の瞬断が断続的に発生した場合の制御系のチャタリングを防ぐためでもある。位置情報のロストが長時間にわたる場合には制御系の出力や実際の機体間距離に危険が生じる可能性があるため、地上局からの監

視により協調制御を OFF にするなどして対応することとした。

先行機が故障等により自動帰還または緊急回収等をおこなった場合にも、機体間距離の予期しない増大により協調制御系の出力に異常が生じる可能性がある。協調制御系の出力にリミッタがあり直ちに危険な状況にならないため、この点については制御則の中で自動的に対策される機能等は設けず、地上局からの監視により協調制御を OFF にして対応することとし、非常手順に明記する形で対応した。

1-1-3) シミュレーションによる検証

平成 27 年度から 28 年度にかけて、上記の制御則の検証をおこなうためのシミュレーション環境の整備を実施した。此方についても、UARMS 機用に開発されたシミュレータをベースとして、2 機の協調運用が可能なシミュレーション環境を構築した。

整備した環境の概要を図 1-5 に示す。2 台の PC で構成しており、各 PC の中で機体シミュレータと地上局を模擬してデータの共有を行い、それぞれの飛行状態に基づいた飛行制御シミュレーションを実施する。一方で、機体間通信を模擬する機能を追加し、機体間通信データを用いた協調制御も含めたシミュレーションをおこなった。また、シミュレータに実装した機体モデルについては、合成開口レーダの搭載に伴う空力特性の変動を推算し、反映することで顕著な影響が出ないことを確認した。また、シミュレータには単独でシミュレーションをおこなうだけでなく、機体に接続してシミュレータからセンサ情報を与えて実際に機体の飛行制御計算機で制御演算をおこなって飛行を模擬する Hardware in the Loop Simulation（以下、HiLS と記す。）の機能も有している。

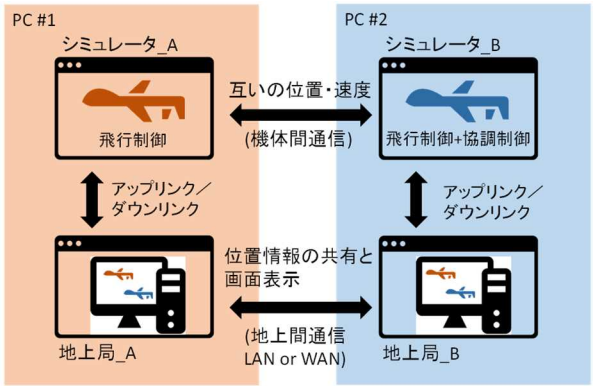


図 1-5　2 機の協調シミュレーションのイメージ

シミュレーション実施状況の例を図 1-6 に示す。このシミュレーションにより、追加実装した協調制御系により 2 機の機体が所定の機体間距離を維持して飛行し、極端な接近や離隔が発生しないこと、また後続機の速度指令の変動による飛行経路の大きな偏差等がないこと等の基本的な機能を確認した。一方で、シミュレーションにおいては実際に飛行において影響する可能性のある先行機の後流による後続機への影響、機体性能の個体差（設計上は全く同一の機体であるが、部品の性能、機体施工上の個体差がまったくないわけではない。）等の影響については反映されておらず、実際の飛行結果により最終的に評価することが必要になる。

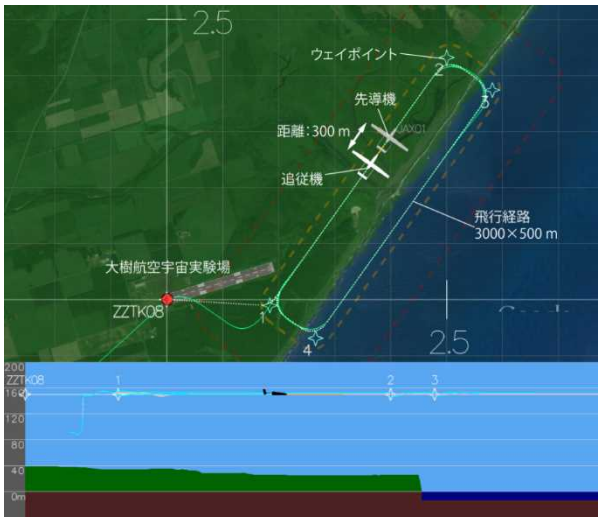


図 1-6　2 機の協調シミュレーション例

1-1-4) 飛行試験による検証

a）同一経路を飛行する誘導制御則の検証

同一経路を飛行する誘導制御則については、まず平成 28 年度に実施した飛行試験にて、単機での周回飛行の結果から検証をおこなった。先行研究例と同様に複数回の周回の飛行経路が 1m 近傍の誤差に収束する可能性が確認された。一方で、矩形のコースを周回する際に、コーナーの旋回時に目標コースからの逸脱が大きく、収束するまでに相応の距離を移動してしまうために実際に計測をおこなう直線距離が充分に確保できないことが懸念された。図 1-7 に実際の飛行軌跡の例を示す。旋回時に目標コースから偏差が生じるために飛行軌跡が収束するのは 1km の矩形長辺のほぼ終端付近となっている。通信機器の有効距離や無人地帯に飛行領域を確保しなければならない要求などから本事業では矩形長辺の長さは 1.5～2.0 km と想定されており、最低限の計測距離は確保できることが期待された。

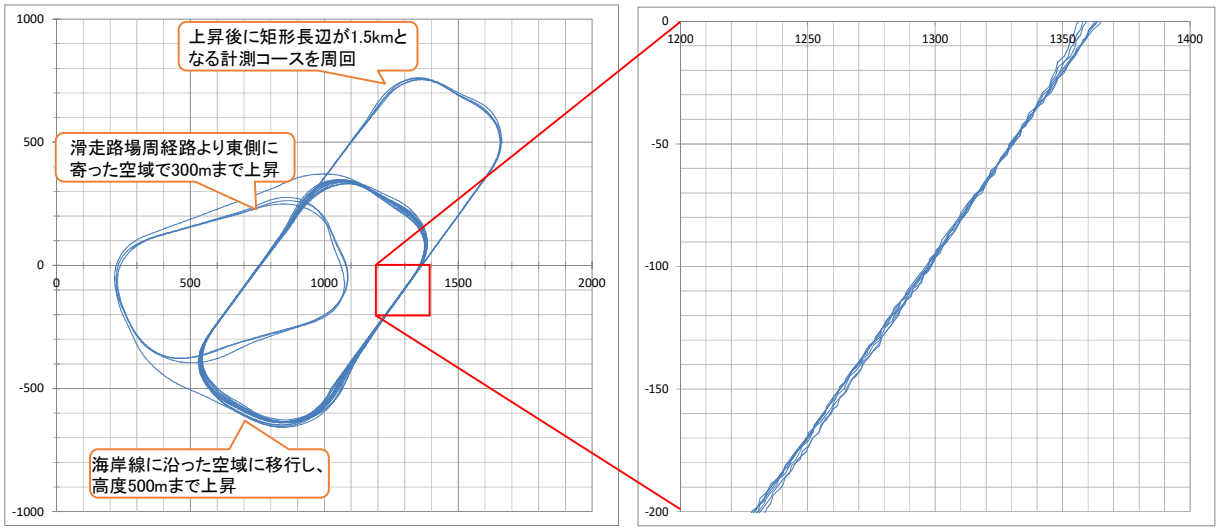


図 1-7　単機での周回飛行時の軌跡（H28.11.21）

平成 29 年度に実施した飛行試験では、実際に 2 機の機体よる同一経路の飛行を実施した。結果の飛行軌跡例を図 1-8 に示す。単機での周回の事例と同様に矩形のコーナーの旋回時に目標コースから偏差が生じ、かつその度合いに両機で差があるが、経路の後半では充分に所定の目標内に偏差が収まっていることが確認できる。

旋回時の偏差が両機で異なることについては、1 つには後述する機体間距離の制御のために両機の速度設定が異なっていることが要因であるが、全般的な傾向として比較的速度の近い時でも両機の挙動に差が見られ、恐らくは同一設計、仕様による機体であっても厳密には性能、特性に個体差があり、このような高い精度が求められる飛行ではそれが影響してしまうことも考えられる。

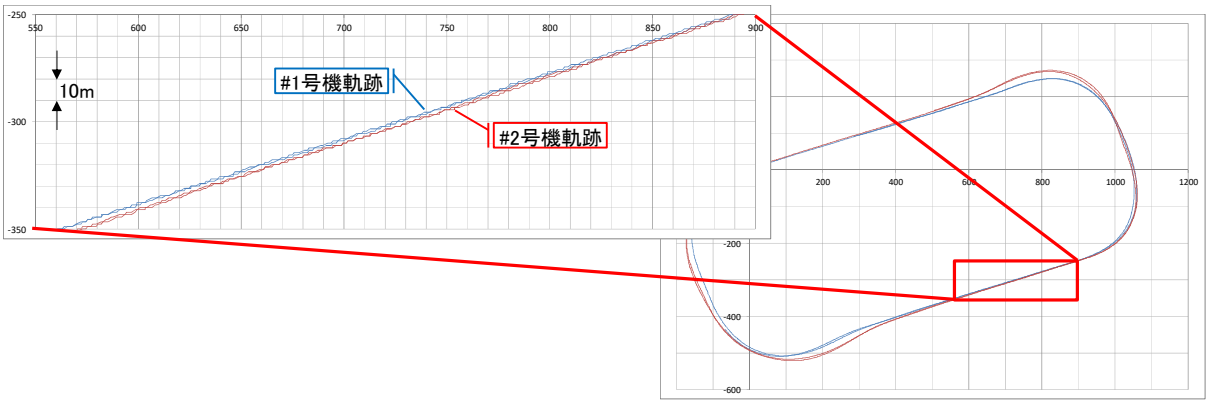


図 1-8　2 機同時の飛行における飛行軌跡例(H29.11.19)

また、同様に軌道偏差の一因である高度制御について、同一飛行時の結果を図 1-9 に示す。

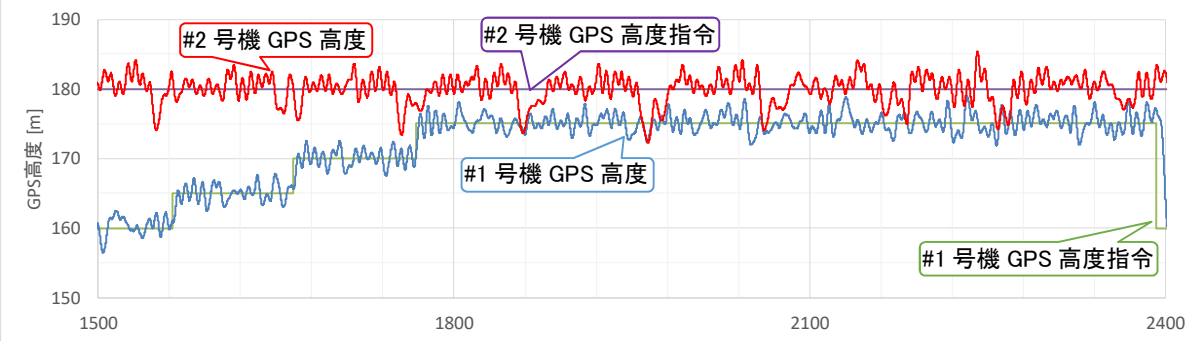


図 1-9　2 機同時の飛行における高度制御例(H29.11.19)

目標高度に対して 2～3m 程度の誤差に収まっており、目標高度を同一に設定すれば軌道偏差を 5m 以内に抑えることは充分に可能と考えられる。尚、2 機の同時運用については後続機が先行機の翼端渦による後流の影響を受けることが懸念されたため、当初目標高度を 20m 程度離して設定し、徐々に先行機の高度設定を上げていって最終的に 3m 差まで近づけていったものである。前述の通り目標に対して 2～3m 程度の誤差があるためこの状態で既に両機の飛行高度は交錯していると考えられるが、飛行履歴を見る限り後続機に顕著な振動等はなく、この距離であれば後流の影響は殆どないものと思われる。機体間の距離は最終的には 100m 程度を目標としており、その状態で同様に後流の影響がないことを確認できれば、本制御則により軌道偏差の目標は達成されたと言ってよいと思われる。

一方、リピートパスインターフェロメトリを成立させるためには単に軌道偏差を目標値以内に抑えるだけでなく、計測経路を飛行中の姿勢角の変動を最小限に抑える必要がある。此方については当初に適切な目標精度を設定することが困難であったため、可能な限り変動を抑える一方で、実際に取得した計測データの解析から成立性を判断していくこととした。実際の飛行中の姿勢角制御の結果の一例を図 1-10 に示す。

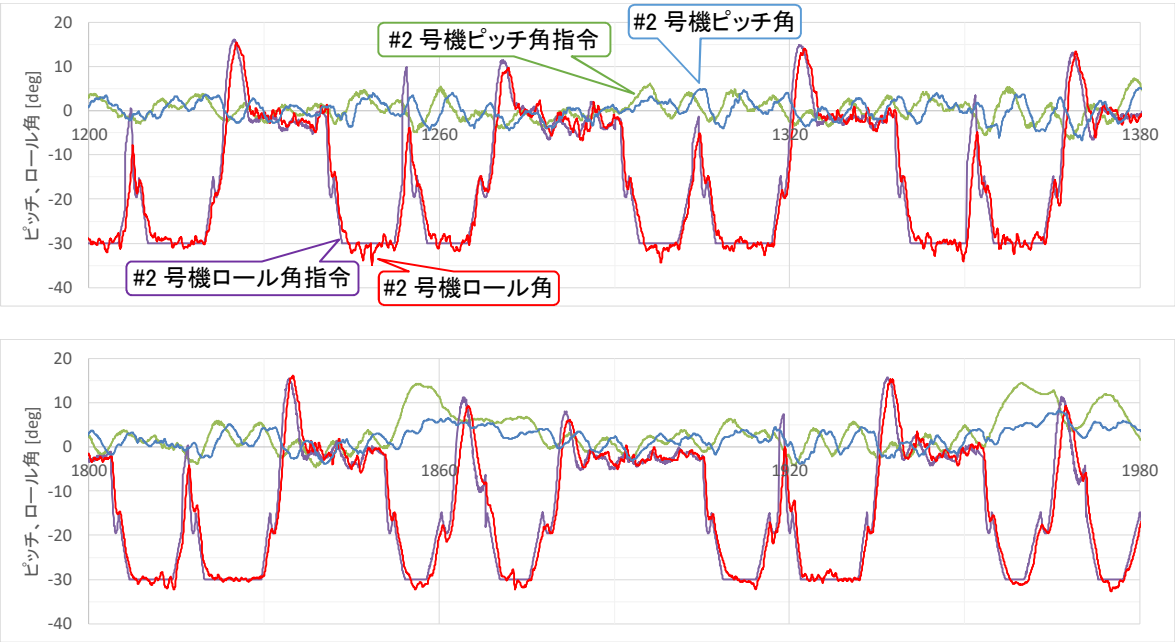


図 1-10　飛行中のピッチ角、ロール角の制御例

いずれも#2 号機（後続機）の時歴であり、上段（1200～1380sec）は先行機との高度差が 20m 程度ある時、下段（1800～1980sec）は高度差を 2～3m まで近接させたときのものであり、両者の比較から、この機体間距離では後流の顕著な影響は見られないと言える。旋回時に大きなロール角が出ているが、それ以外の局面ではロール、ピッチ角とも±5° 以内に抑えることができている。この値の妥当性については上記の通り計測結果との比較で検証していく必要があるが、本事業の期間内では充分なデータを取得することができず、明確な結論は出ていない。ただ、固定翼型の無人航空機に取って位置の偏差を補正するために姿勢角を変更することは本質的に不可欠であり、実際に図 1-7 にも見られるように、コース補正の必要からロール角指令がそもそも 0° とはならないのが偏差の一因であり、指令値と実際の値の偏差は極めて小さい。今後軌道偏差の精度要求とセットで姿勢制御の目標を明確にし、制御則を調整していく必要がある。

b）先行機との距離を維持して飛行する制御則の検証

先行機との距離を維持して飛行する制御則については、平成 29 年度に実施した飛行試験にて検証をおこなった。確実な実施のため、1 機を飛行状態、もう 1 機を地上で hardware in the loop simulation 状態で協調制御の機能を確認するなど段階を踏んで実施した。

最終的に場周経路（高度 150m まで）で 2 機の同時運用を実施し、協調制御の機能を確認し、制御精度などを評価した。開発した制御則は正常に動作し、空中で 2 機の無人機が機体間通信を行いながら同時に自動飛行することに成功した。先行機の対気速度指令は 30 m/s で一定値とした。経路差 800 m 程度から開始し、段階的に 200 m まで接近させた。地上から撮影した様子を図 1-11 に示す。

図 1-11　協調制御中の 2 機の無人航空機

協調制御を開始してからの結果を抽出したものを図 1-12～15 に示す。図 1-12 は経路差変化、図 1-13 は後続機の速度変化、図 1-14 は後続機の GPS 高度変化、図 1-15 は 2 機の飛行経路を示したグラフであり、赤点線が先行機の軌跡、緑線が後続機の軌跡、青矢印は飛行中に先行機が推定した上空の風向風速を示している。風向、風速は対気速度と GPS による対地速度の差分より推定した。

試験時はまず機体間距離が 800m 程度になったところで目標経路距離を 300m に設定して協調制御を有効にして 2 機を接近させた。その後状況が安定するのを待って目標経路距離を 250m、200m と接近させていった。図 1-13 に示すように、対気速度指令が機体間距離に対応して変更され、また対気速度もそれに追従して変動しており、制御則が機能していることが確認できる。図 1-12 に示すように、結果としての機体間距離は目標が 300m の間は概ね目標値以上のところで変動しており、誤差も最大で 120m 程度と大きい。これは全体の経路が充分に長くとれないために目標経路距離を長くとると 2 機の機体が矩形コースの同じ辺上を飛行している時間が相対的に非常に短くなってしまい、制御則が有効に機能していないためと考えられる。目標が 200m 付近では 2 機の機体が同じ辺上にいる時間帯が長くなることから、機体間距離が目標値を中心に変動するようになり、誤差も平均で±30 m 程度と大幅に改善されている。

機体間距離制御の ON/OFF のタイミングは図 1-12 の背景に網掛で示す。実際の時間で見ると、目標が 300m の時は 2 機が長辺上を同じウェイポイントに向かって飛行しているのは 20 秒程度なのに対し、異なる辺上にあって速度調整が OFF になっている最大で 20 秒以上存在している。一方で、目標距離が 200m になると、長辺の直線部分で協調制御が 30 秒間有効になっているのに対し、旋回時に速度調整が行われていない時間が最大で 7 秒間程度と減少しており、このために制御則の有効性が大きく増大していると考えられる。目標値を最終目標である 100m まで試験することができ、または長辺の長さを充分に大きくとることができればより精度の高い機体間距離制御が可能になることが想定される。

また、飛行中の高度履歴を図 1-14 に示す。旋回時に高度が低下する傾向はあるものの、SAR 計測に関わる直線飛行中の高度誤差は概ね±3m 程度までに抑えられており、速度制御をおこなうことによる高度制御への顕著な影響はなかったといえる。

図 1-15 に実際の飛行軌跡を示す。機体間距離が比較的広い状態から制御を始めたために当初はほぼ一貫して後続機が高速で接近する傾向にあり、そのため旋回時の膨らみも大きくなっている。このため後続機がより長い距離を飛行することになり、結果的に目標とする距離への収束に想定以上の時間がかかる傾向が見られた。これは安全のため自動制御による旋回時のバンク角に一定の制限を設けていることが一因でやむを得ない面もあるが、可能であれば今後リミッタの緩和も含めて検討していきたい。また、収束に時間がかかるのは、そもそも今回比較的重量の大きい、かつ空気抵抗も大きいペイロードを搭載していることから機体の速度制限幅が小さくなっており、そのため 2 機の機体の速度

差をあまり大きくとれないことも影響している。将来的にはこういった計測に最適な機体設計も含めて検討していきたい。

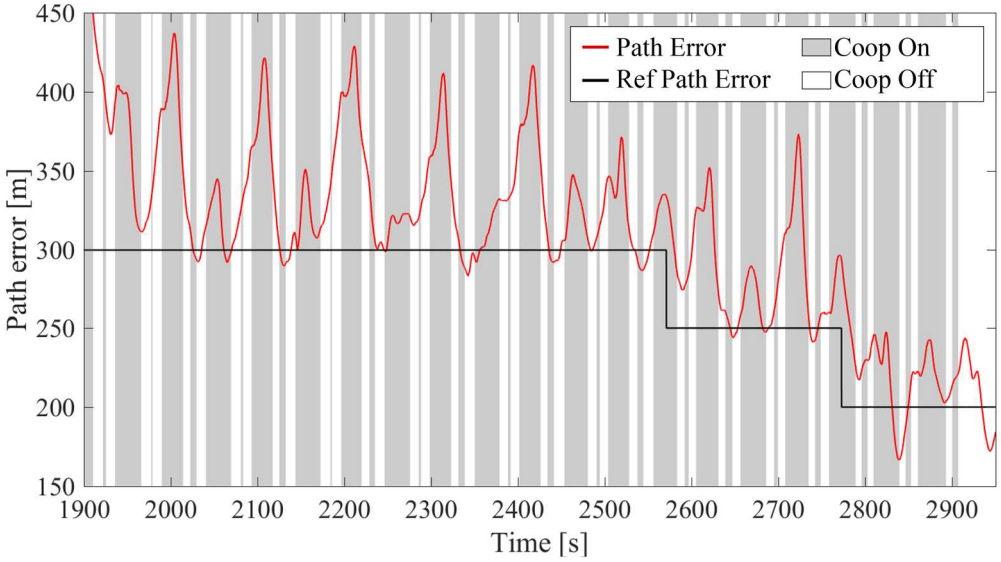


図 1-12　飛行試験結果：機体間距離の変化

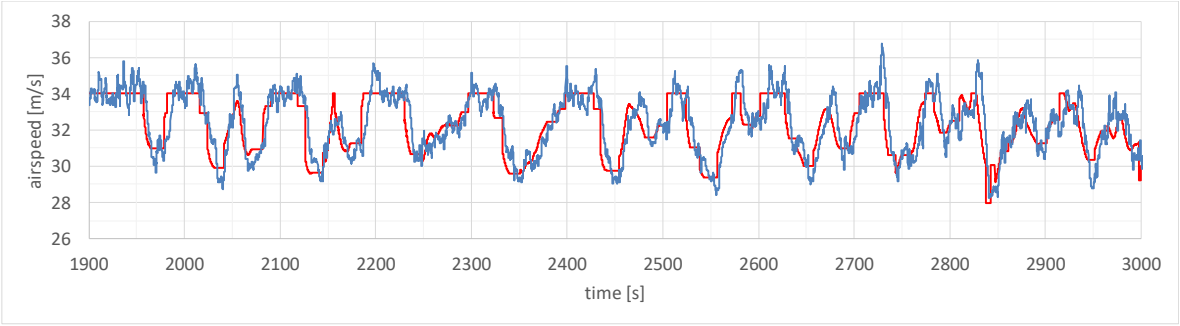


図 1-13　飛行試験結果：2 号機の飛行速度変化

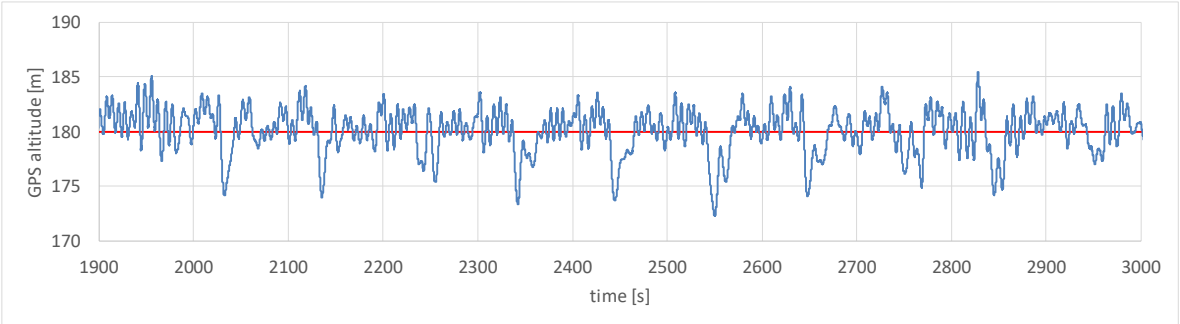


図 1-14　飛行試験結果：2 号機の高度変化

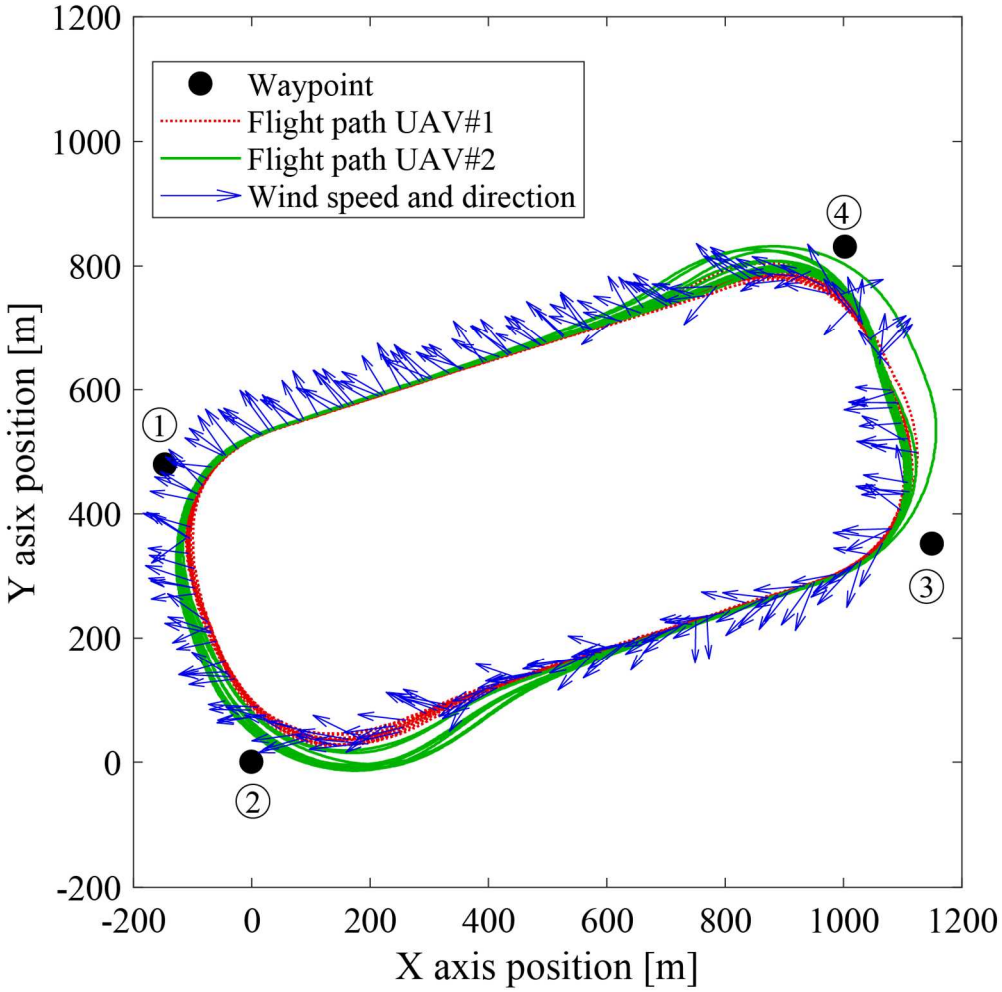


図 1-15　実験結果：飛行軌跡と外部風の状況

1-2) 2 機間の飛行状態共有によるフォーメーションフライト技術

本事業においては、自動飛行のための誘導制御則を開発するだけではなく、実際に SAR を搭載して開発した誘導制御則による飛行試験を実施できる機体を開発、製作することが必要であった。またそのような機体規模の固定翼型無人航空機を複数同時に運用する例は世界的に見ても希少であり、実験の安全、確実な実施のために運用体制、運用手順なども新規に確立する必要があった。

最終的に開発、製作した機体を用いて飛行試験を実施し、

- 飛行場周辺の場周経路(高度 150m まで)で 2 機の同時運用を実施し、協調制御の機能を確認し、制御精度などを評価した。また SAR 計測データを取得した。
- 海岸に沿った計測経路に単機を進出させ、高度 500m からの SAR 計測データを取得した。

速度計測系、電源系等の不具合もあり、干渉計測が可能になるような SAR 計測データの取得には至らなかった。

1-2-1) 機体システム仕様およびベース機体の検討

本事業においては、SAR を搭載して 2 機の協調飛行を実施し、干渉計測を可能とする無人航空機システムを極力低コストかつ開発リスクを抑えて開発、製作することが必要になる。開発する無人航空機は以下のような要求に対応する必要がある。

- 東京電機大学が調達する SAR を搭載し、同装置を用いた観測飛行をおこなうこと。
- 同一空域において、2 機を同時運用する能力を有すること。
- 2 機の無人航空機が一定の間隔を維持しつつ、同一経路を高精度で追従飛行する機能を有すること。
- 立入制限、監視区域上空における飛行運用について、JAXA 無人機システム安全技術基準(JERG-5-001A)に適合すること。
- 遠隔操縦者の目視視程外の飛行、また飛行試験実施上の必要に応じて対地高度 150m 以上の飛行について航空法第 132 条及び第 132 条の 2 に定める国土交通大臣の許可、承認を取得しうる仕様であること。

この要求を満たす無人航空機システムを開発するため、JAXA が 2012～2015 年度に国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)と共同で研究開発を実施した放射線モニタリング用無人航空機(以下、UARMS 機)をベースとして開発をおこなうこととした。同機体は単発ガソリンエンジンを動力とする固定翼型無人航空機であり、外観を図 1-16 に示す。また、その主要諸元は表 1-1 に示す通りである。同機体をベース機体として設定した根拠としては

- ペイロードの搭載容量が本研究にて想定するものとほぼ同等であること。
- JAXA で設計、製作のための製造図面、システム構成等を把握しているため本研究に転用するための改設計等が容易であり、また開発リスクを低減することができること。
- 運用実績が豊富であり、運用にあたってのリスクも抑えることができること。
- JAXA が無人航空機を用いた実験等を安全に実施するために設定した無人機安全システム技術基準に適合するように設計・製作されており、本研究で想定する運用に対して十分な安

全性、信頼性を持つことが期待できること。

が挙げられる。

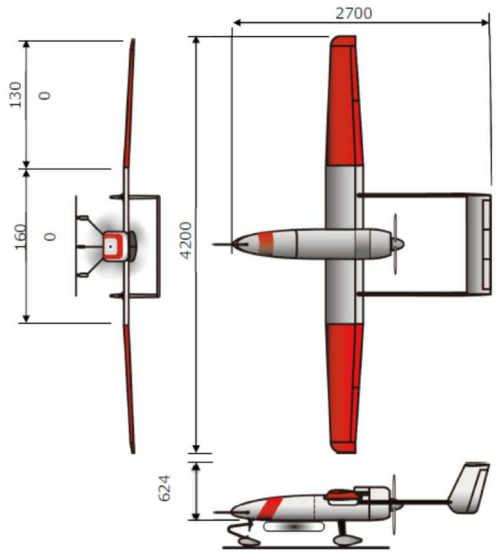


図 1-16 UARMS 機体外観図

表 1-1 UARMS 主要諸元

要 目	仕 様	備 考
最大重量	55kg	
最大高度	250m (AGL) 未満	航空法(当時)による
飛行時間	6 時間	
通信範囲	50km 以上	
搭載容量	3～10kg	
飛行速度	25～30m/s	
離着陸距離	200～300m	
風速制限	15m/s	
運用時間帯	日中	
推進	単発レシプロエンジン	
操縦	プログラム飛行 手動離着陸	

ベース機体の仕様、及び東京電機大学との協議によるリピートパスによるATI計測のための要求等を元に、本研究にて開発する機体のシステム性能要求を表 1-2 のように規定した。尚、参考としてUARMS機の仕様を併記している。

表 1-2 小型無人航空機システム要求性能

	要求仕様	UARMS 機仕様(参考)	備 考
飛行時間	1 時間以上	6 時間	
最大飛行高度	500～2,000m(TBD)※1)	250m (AGL)	
通信範囲	3～5km	50km 以上	
搭載容量	5.5kg	3～10kg	
測位精度	位置精度 0.5m(TBD)内 方位角精度 1° (TBD)以内		
経路追従精度	1m 以内(TBD)※2)		
運用時間帯	夜間含む(TBD)※3)	日中	
機体質量	55kg 以内	55kg	
飛行速度	25～35m/s	25～35m/s	
離着陸距離	200～300m	200～300m	
風速制限	15m/s 以下	15m/s 以下	
気温制限	-20℃～50℃	-20℃～50℃	地上局を除く
防水性	少雨飛行可	少雨飛行可	
操縦方式	プログラム飛行および マニュアル操縦(離発着時)	プログラム飛行および マニュアル操縦(離発着時)	

※1) 最大飛行高度については、東京電気大学との協議により今後決定されるが、原則としては UARMS 機の推進系統をそのまま利用することを前提として、必要な性能が得られる高度域でのみ運用することとした。最終的には高度 500m までの空域で飛行試験を実施した。

※2) 経路追従精度については、精度向上のための誘導制御系の改良が研究テーマの一環であること、飛行高度によって要求が変化すること等に鑑み、品質保証要求とはせず、適宜東京電機大学との協議により設定することとした。最終的に高度条件等を考慮して 5m 以内とした。

※3) 最終的に日中のみの運用とした。

1-2-2) システム構成の検討

ベースとしたUARMS機はJAXAが無人航空機を用いた実験等を安全に実施するために策定した無人機システム安全技術基準に適合し、立入制限・監視区域(領域全体の立入制限、監視により、飛行中に機体が故障等により落下する可能性のある領域全体に第三者の立入がないことが保証されている領域)、及び一定の人口密度の非高密度地域での安全性を担保するように設計・製作されており、そのために必要な故障許容設計、冗長設計等の要求を満たしている。本研究では原則として立入制限・監視区域での運用を想定しているため UARMS 機のシステム構成を原則として適用することにより、運用に対して十分な安全性、信頼性を持つことが期待できる。一方で、2 機の同時運用のためにUARMS機の測位系、通信系統に変更を加える必要があった。

UARMS機においては機体の位置、姿勢を計測する手段としてXSens社のMTi-G-700複合航法装置を搭載、使用していた。しかし本研究においては当初リピートパス計測を成立させるために軌道偏差1m以内での飛行誘導制御が要求されており、そのためには1mを大きく上回る位置計測精度が要求される。また、姿勢計測に関しても方位角の計測精度を 1° (TBD)以内とすることが要求されている。このため、従来の機種では計測精度の達成が不可能であり、新規にRTK GPS機能をもつ複合航法装置の選定をおこない、必要な精度を満たしつつ重量、費用等の増分が許容範囲内と考えられる機種としてAdvanced Navigation社のSpatial Dualを導入することとした。表1-3に従来の複合航法装置と新規に導入を試みた複合航法装置の性能比較を示す。

表1-3 複合航法装置の性能比較

	XSens MTi-G-700	Advanced Navigation Spatial Dual	備考
受信周波数帯	L1	L1, L2, L5	
RTK 補正機能	無	有	
位置計測精度(水平面)	2.5 m	0.1 m	
位置計測精度(高度)	2.5 m	0.1 m	
姿勢角計測精度	< 1deg	0.1 deg	アンテナ間距離1mの場合
方位角計測方式	磁気センサ方式	Dual アンテナ方式	
主要寸法	58×58×33 mm	90×127×31 mm	
重量	68 g	285 g	

しかし、同装置はGPSのL2帯信号を使用することからSARによる放射電波の干渉を受けやすい傾向があり、事前の地上試験等では検出できなかったものの、平成28年度飛行試験においては同複合航法装置の出力データが不安定になる事象が観測され、同装置を用いた自動制御飛行を実施することができなかった。平成29年度に飛行経路の制御精度目標を引き下げたこともあって、最終的に同装置は飛行制御用としては使用せずペイロードとして搭載し、取得したデータをSAR観測結果の解析に用いることとした。結果的に機体システムにおける測位系の構成は UARMS 機のものを踏襲することと

なった。

一方ベース機体となる UARMS 機では、機体と地上局との間のコマンド／テレメトリ通信をおこなうために 460MHz 帯の UHF 無線と、2.4GHz 系特定小電力無線を併用し、コマンド／テレメトリ通信系統の冗長化を図っていたが、同機体で使用していた 460MHz 帯の UHF 無線通信機では複数チャンネルを同一空域で同時に使用することができないため、同一空域で 2 機の同時運用をおこなう本事業においては使用することができなかった。そのため最終的に開発したシステムでは主系通信に 2.4GHz 系無線通信、非常系に 351MHz デジタル簡易無線を使用することとした。351MHz デジタル簡易無線は地上移動局として技適を有するものを使用したためコマンドアップリンクのみを送ることができ、機体の情報をダウンリンクすることはできない。そのため通信系統の全二重化はできなくなったが、本事業については地上監視者の目視内でのみ運用をおこなうため問題ないと判断された。

また機体間の通信についても主系通信と同じ 2.4GHz 系特定小電力無線を別途搭載し、チャンネルを変えて使用した。最終的なシステム構成を図 1-17 に、アンテナ類の実装状況を図 1-18 に示す。

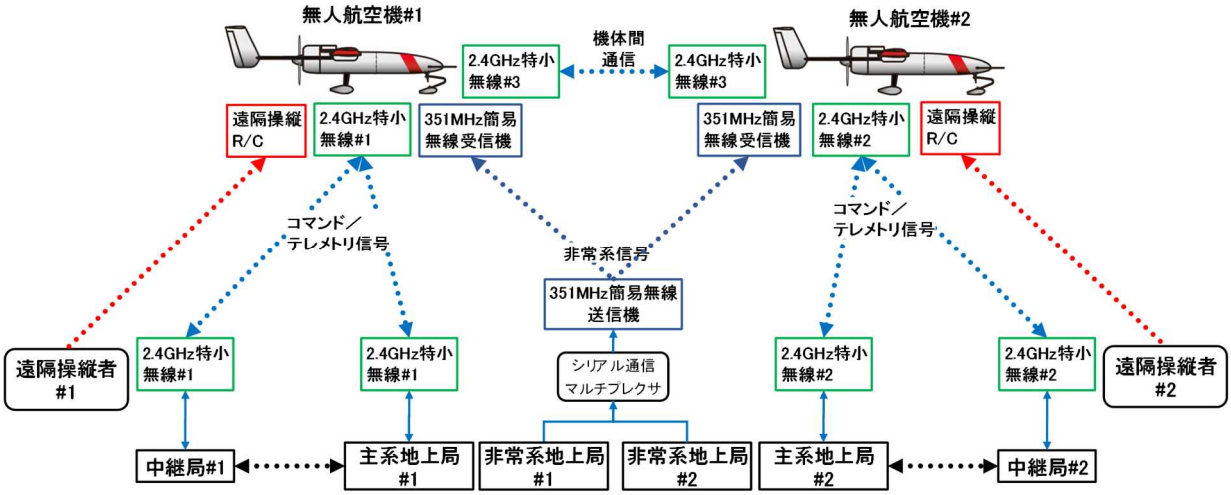


図 1-17　SAR 搭載無人航空機の通信機器とシステム構成

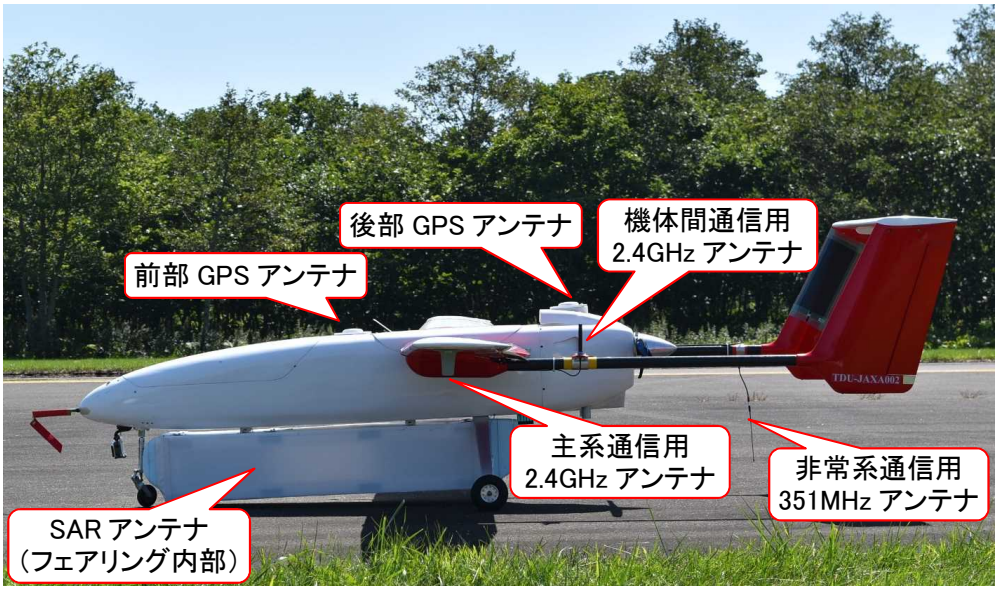


図 1-18　アンテナ機器の実装

1-2-3) 機体製作および SAR の搭載

無人航空機の機体構造については平成 27 年度に主翼、尾翼部分を製作し、平成 28 年に胴体部分を製作した。これらの構造については原則として UARMS 機から変更の必要がないため、UARMS 機の設計図面をそのまま流用して製作を実施した。構造材料としては、主翼主桁および翼胴結合構造、尾翼支持構造は CFRP であり、胴体、主翼外板、尾翼等は GFRP を使用している。全機機体の組立および搭載機器の組み付け、動作確認等は JAXA 内部にて実施した。

本事業にて調達、搭載する SAR は無人航空機用に小型、軽量化されたものであるが、それでも小型無人航空機の機体に搭載品としては比較的規模の大きいものであり、また搭載に当たっての制約条件も多いため充分な検討をおこなう必要があった。検討に当たっては

- 発信、受信アンテナを機体外部に向けて、側下方 55° 方向を照射するよう設置すること
- 両アンテナを同一平面上に配置すること
- 両アンテナ間の機軸方向距離を 30cm 離隔すること

を条件として検討をおこなった。これを満たす配置案として

A) 胴体直下に配置する方法
B) 胴体側面に配置する方法

の 2 案を検討したが、B)は前後アンテナを同一平面上に配置しようとすると前側アンテナによる胴体外側への張り出し量が増大すること、機体の重心、空力特性を左右対称にするために反対舷にダミーを装備する必要があることなどから機体の空気抵抗や重量が増大することが懸念され、A 案を採用することとした。A 案においてはアンテナ近傍に金属製の主脚柱があることから反射等による電波干渉が懸念されたが、主脚柱がアンテナ前面には干渉しないよう配置しても前後アンテナ間の離隔距離 30cm を確保できること、事前の解析等により干渉の影響が仮にあっても許容範囲内と推定されたことなどからこの配置にて装備することとした。

実際の取付にあたっては機体下方に懸架するアルミ製の取付フレームを製作し、SAR アンテナおよび SAR 本体を取り付けた。SAR 電源については機体側電源系より供給することとし、機体操縦系、飛行制御系に使用しない 12V 系電源を供給することで SAR での電力消費により飛行への悪影響が出ることを防止した。また、全体を保護し飛行時の空気抵抗の低減をはかるため、取付治具を含む全体をポリカーボネイト系プラスチック板(所謂プラダン)等で製作したフェアリングで覆った。尚、取付治具は取付変更により機体のどちらの舷も照射できるよう製作したが、結局、試験およびデータ取得はすべて機体左舷側を照射する配置で実施した。図 1-19 に製作した取付フレームを、図 1-20 にアンテナの取付状態を、また図 1-21 に最終的な機体外観を示す。

図 1-19 SAR 搭載フレーム

図 1-20 機体への SAR アンテナ搭載状況

図 1-21　製作機体外観（左:1 号機、右:2 号機）

1-2-4)　2 機同時運用方法の確立

本事業においては、一般に固定翼型の無人航空機では殆どおこなわれた実績のない同一拠点からの 2 機の同時運用をおこなう必要があり、2 機の間に空中衝突に繋がる干渉等を起こすことなく同一滑走路より離陸して同一周回経路に投入し、計測飛行をおこなった後に順次同一滑走路に帰還させる必要があった。これを実現するための手順について検討をおこない、

- 1 機ずつ離着陸運用をおこない、1 機が自動制御での周回飛行状態に入ったところで 2 機目を離陸させる。非常事態を除き、複数機体が同時に遠隔操縦飛行をおこなうことはしない。
- データ計測時以外は、自動制御での目標高度を 2 機で 20m 程度異なる設定にして、空中衝突を防止する。
- データ計測時は追従制御が安定したことを確認して、地上からのコマンドにより 2 機の目標高度を同一にする。計測終了後は地上からのコマンドにより、再度 2 機の目標高度を異なる設定にする。
- 1 号機より順に手動操縦に切り替え、周回経路から離脱、着陸させる。もう一方は着陸退避まで自動制御で上空を周回待機し、非常事態を除き、複数機体が同時に遠隔操縦飛行をおこなうことはしない。

といった手順・原則を確認した。図 1-22 に運用手順の概略を示す。運用の詳細については運用担当者、遠隔操縦者等を含めて手順を検討、詳細化し運用手順書に反映した。また、非常手順についても、非常事態が発生した機体だけでなくもう一方の機体も含めた安全性の評価をおこない、もう一方の機体側の対応も含めて手順の見直しをおこなって運用手順書に反映した。

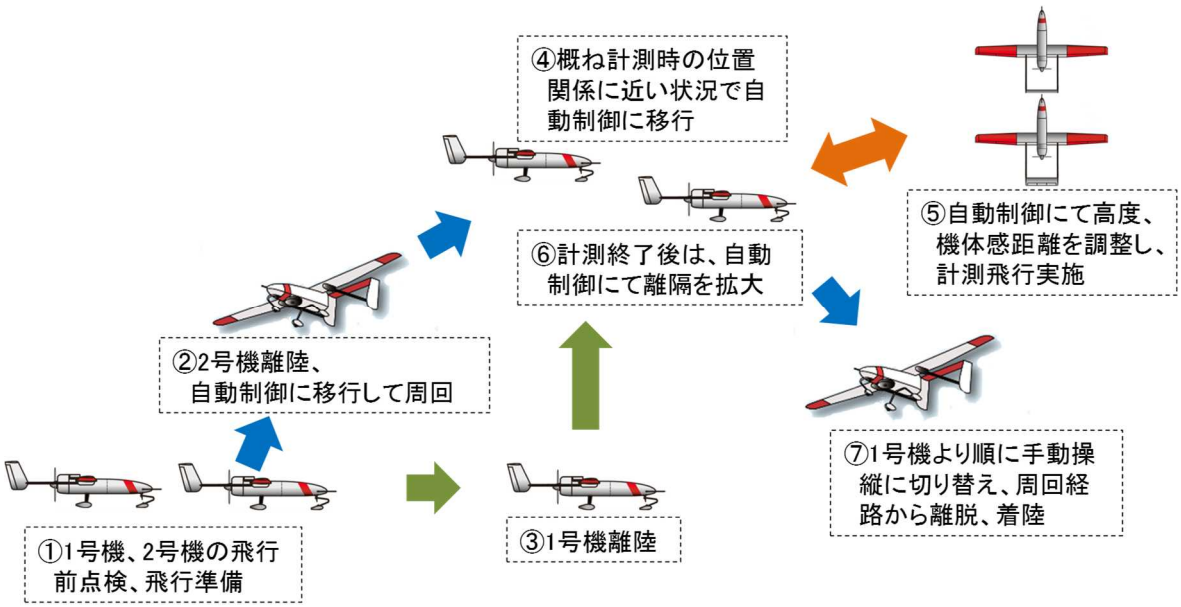


図 1-22　2 機同時運用手順の概略

1-2-5) 飛行試験の実施

開発した無人航空機を用いていかに示す計 4 回の飛行試験を実施した。

第 1 回:　平成 28 年 10 月　3 日 ～ 10 月　3 日
第 2 回:　同　　11 月　16 日 ～ 11 月 25 日
第 3 回:　平成 29 年　8 月　30 日 ～　9 月　7 日
第 4 回:　同　　11 月　9 日 ～ 11 月 21 日

また実際の飛行回数、時間は以下の通りであった。

飛行回数:　48 回(機能確認、慣熟等含む。うち 1 号機 30 回、2 号機 18 回)
総飛行時間:　12 時間 4 分(うち 1 号機 8 時間 11 分、2 号機 3 時間 53 分)

いずれの飛行も離発着場として北海道広尾郡大樹町の同町多目的航空公園滑走路を使用し、周辺空域にて飛行をおこなった。また、航空法 132 条及び第 132 条の 2 の規定に従い、目視視程外運航および地上高度 150m 以上の飛行のための国土交通大臣の許可・承認を取得して実施した。

平成 28 年度の飛行試験においては実際の SAR データの取得を想定した飛行経路を単機で飛行させ

- 自動飛行誘導制御機能、高度 500m までの到達を含む機体システムの機能・性能確認
- 遠隔操縦者(2 名)を含めた運用要員の慣熟
- 周回飛行による SAR データ取得

を実施した。平成 29 年度における進捗については第 2 章に記す。

2) リピートパスによるATIを用いたMTI技術の開発

2-1) 搭載するSARデータとINS(慣性航法装置)データを用いた高精度SAR映像化技術

本項目に含まれてないものとして、SARの設計がある。開発業者には、システム設計値を提供し、それに基づいてSARを製造委託。

2-1-1) SARの基本設計とUAVSAR飛行に関する詳細条件の設定(平成27年度業務)

小型軽量なSARとしては、FMCW型が有効であること、実績があることについてはすでに認識されており、観測に関わる幾つかの条件の元でSARの設計を行った:

a)高度:150m、500m、1000m、2000m

b)観測パラメータ:送信電力、帯域幅、雑音等価後方散乱係数、観測幅等である。この中で、これらのパラメータは、①SARの相関処理画像に対するモデル式を作成し、②Pi-SAR-L2で得られる雑音等価後方散乱係数と類似性を有することを前提として、送信電力を求めた。その結果、送信電力は1～2W程度でもレーダの回線設計は成立し、SARは感度を有することができた。送信電力は、観測高度が高くなるにつれて、大電力を必要とするが、高度の減少とともに送信電力は小さくすることができる。

c)移動体の干渉処理のために、二機の航空機は各々のビームが移動体を同時に照射するように、平行飛行が必要である。つまり、両信号は干渉状態になければならない。このために、二つの実験を実施した。①クロストラック干渉のための二機間の基線長の必要条件の計算、②アロングトラック干渉のために二機間の干渉性の計算。特に①に関しては、二機の相対位置に対する地表の干渉に伴う周波数シフト量の計算が必要であり、これをいくつかの高度に対して広い入射角ごとに実施することで、以下の結論を得た。高度150mであれば、1)二機の基線長は1m以内が望ましいこと、2)入射角30度以上であれば、5m以内でも干渉の可能性はあること、3)アロングトラック方向に関しては、100mであれば、相関性は十分に保たれることなどを得た。

d)アンテナパターンの計算:アンテナは、一辺30cm(アジマス方向)x17cm(レンジ方向)の矩形の2素子アンテナであり、放射パターンは約60度(アジマス方向)、90度(レンジ方向)の非常に広いパターンを有する

e)地上実験の検証に必要となるコーナー反射鏡の大きさと、移動可能なCRに関する設計を行った。上記、SARの基本性能の設定の元に、CRは一辺50cm、後方散乱断面積として16dBm^{2}が適切とした。理由は、1)移動させる必要性から重量物とならないこと、2)実験場で強風時にも、正しく移動し、また静止時に強風に煽られて移動や展開がないようにあまり小型形状を保有すること、3)ただし、SARとの回線条件は満足すること、4)最後に一定速度で移動可能なこと(1cm/s、10cm/s・20cm/s、50cm/s)とした。また、森林内への展開が可能なことも考慮した。これらの条件下で、CRの明るさは、雑音等価後方散乱係数に比べて、かなり明るいこととした。本装置は、地球観測センターで検証実験を行い、JAXAのPi-SAR-L2が実験に合わせて、本装置を移動させ、反射画像を確認し

た。

これらの設計に基づき、特に送信電力についてはSARの開発元の業者にインプットされ、それに基づき、SARが開発された。アンテナも開発され、一号機のアンテナは平成27年3月に納入された。SARの処理はメインビーム内の受信信号に対して行われる。計測されたアンテナパターンは、メインビーム以外ではやや変動するものの、その利得はピーク方向より17デシベル以上小さく画像化には影響がないと考えられる、また、主ビームは半値幅が45,80度（アジマス、レンジ方向）と計測され、理論的なパターンと良好な類似性を保持している（45=23.8/30/3.14x180,80=23.8/17/3.14x180）。（図1-23参照）

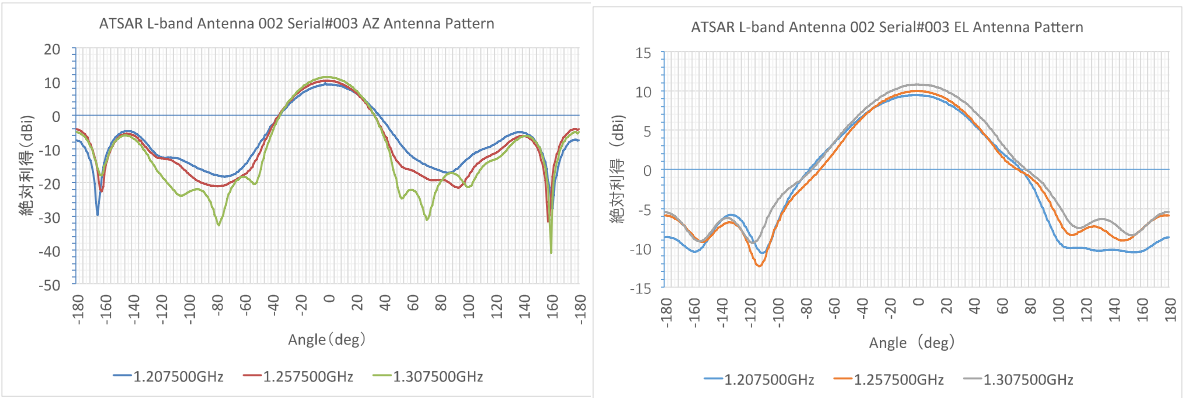


図1-23 UAVSARの実測アンテナパターン、左がアジマス・アンテナパターン、右がエレベーション・アンテナパターン

なお、SARは送信電力1ワットといえども、UAVの管制用機器や、SARの画像化に必要となるINSの位置決定精度に影響を及ぼす可能性があり、東京電機大学の電波暗室において、屋上に設置したGPSアンテナから受信した信号を暗室内で再輻射させ、UAV近くに設置したUAVSAR用のGPSアンテナで、SARを駆動時、非駆動時での受信状況を細かく観察し、SARの送信系の及ぼす位置決定への影響を調べた。その結果は、SARを85MHz駆動した時には、GPSのL2受信は完全に不動作状態になった。従って、測位用のGPSアンテナは、UAV上でSARの遮蔽部に設置するか、SARの送信帯域幅を削減させ、L2が受かるように調整するかの2者択一が必要となった。なお、本システムに使用する INSは小型軽量化、廉価物であるが、位置精度も検証対象である（本来は、INSは非常に高価で、物によっては一億円、3100万円、やや廉価としても約1000万円程度するが、本プロジェクトでは、廉価な民生品を使用することとして、約150万円の機器を選択した。カタログ記載の位置決定精度は8mmとある）。

なお、SARハードウェアの記述も非常に重要なので、本プロジェクト用に開発した（メーカー製造委託）SARについて記述する。

FMCW型SARであり、送信とともに周波数を周波数sweepし、受信信号に同じ周波数sweep信号を合成することで、距離信号を周波数領域に変換する。利点としては、積分時間を長く取ることができ、レンジ圧縮の効果を従来のパルスレーダー比べて大きいことである。通常のパルスレーダーは、15μ秒くらいのパルス幅を有するが、今回のシステムでは約800マイクロ秒を有し、それだけで、60倍程度の振幅利得（3600倍の電力利得を有する）。一方、飛行高度が500mの場合、prfは非常に大きく、今回の最

終実験でも3333Hzを選択する。このような場合には、周波数帯域をいかに小さく設定するか（適切なフィルタ処理を見出すこと）が重要である。（図1-24に搭載されたSARを示す）

図1-24　SARとアンテナ（搭載したところ）

2-1-2）実験と検証

平成28年度はSAR1号機が完成し、実験を2016年10月と11月に行い、得られたデータの画像化を進めた。また、平成29年度は2号機も完成し、2017年9月、11月の合計2回実験を実施した。

SARアルゴリズムは、2016年10月の実験前に一部作成したが、実データを用いて追い込みを実施した。2017年のデータを用いてより確実動作するものに仕上げた。

SARアルゴリズムは、2種類で構成される。1）生データ解析、2）映像化処理。

1）　生データ解析：生データをレンジ・アジマス方向に平均化処理、周波数解析することで、信号の分布特性、周波数帯域幅の分布などを計測する。また、衛星用SARでよく見られる不要波の状況を把握する機能。

2）　映像化処理として、軌道データ解析、生データ平滑化処理、レンジ圧縮、アジマス圧縮を備え得る。また、処理方式としては、1）時間領域処理と2）周波数領域処理を有する。後段の処理

や構成処理においては、両者のうち性能の良い方を使用することとした。

（ア） 軌道データ解析：軌道データ観測用機器として、UAVSARはMTi-G（単独測位方式）とSD（2周波干渉型）の2種類が用意された。これらのデータは、各々フォーマットが異なり、前者はバイナリ方式、後者はCSV形式でテキストとして与えられる。前者は、約100Hzでサンプリングが、後者は約50Hz（実験ごとに周波数が異なる）でサンプリングされており、このデータを、1）平滑化したのちに、（イ）で述べられる平滑化したデータ観測時刻ごとに内挿される。直線飛行軌道データ、直線飛行からのレンジ方向変動分、航空機直下軌跡を等間隔補正するためのデータベースの計算を行った。（以上、動揺補正成分の計算）

（イ） 生データ平滑化処理：UAVSARのPRFは3333Hzであり、SARの有するドップラー信号帯域（約80Hz）に比べて約40倍と高い。そのために、効率的に周波数帯域を下げる必要がある。通常考えられる移動平均では、その間のUAVの振動を除去できない恐れがあり、16サンプルのアジマス単純平均、帯域削減フィルターとの内挿関数で上記サンプリング時刻におけるデータ作成の2段階処理方式が一番アンビギィギュイティを小さくすることがわかり、本方式を開発した（それ以外に、周波数領域ゼロフィル方法も試験開発したが、アンビギュイティは残留する。）

（ウ） レンジ圧縮：FMCW方式は受信信号は送信信号とミックス（デランプ処理）され、 フーリエ変換によりレンジ圧縮される。しかしながら、標準的なフーリエ変換は0詰めを行うために、FMCW方式ではサンプルデータ分解能が大きくなる、レンジ分解能が下がるという欠点がある。その欠点を保善するために、Chirp-z変換方式を採用し、任意数のサンプルに対する周波数変換を行なった。これにより、レンジ方向の分解能の劣化は防げた。

（エ） アジマス圧縮：アジマス圧縮方式として、時間領域方式と、周波数領域方式の2種類がある。

① 時間領域処理：処理方式自体は簡単であり、映像化すべく地上点に対応した観測時刻の計算、その点の合成開口時間内の軌道データを用いた位相補正量の計算、各時刻におけるレンジ圧縮データの計算、位相合成により映像化信号を得る。地上に分布する（正方格子状に）各点に対する、アジマス圧縮を順次行うので、計算時間は非常に長い。

② 周波数領域処理。人工衛星のような安定した軌道から取得したかのような生データ（レンジ圧縮データ）を、レンジ同様補正再構築し、アジマス方向にデータを再構築したのちに、通常のマイグレーション処理、アジマス圧縮処理を行い、SAR画像作るものである。高速、高精度が売り物である。

（オ） 表1-4に本SAR処理においての試行したパラメータと、最終設定値をまとめる。

表1-4　SAR映像化アルゴリズムにおける試行項目と効果一覧

項目	選択肢	採用
生データの圧縮処理	(1)平滑化＋シンク関数内挿処理、(2)平滑化処理、(3)周波数領域バンドパスフィルター処理	(1)
アジマス低周波フィルタ	生データのアジマス周波数変換において、0周波数成分近辺にゼロフィルすること:雑音が削減された。	アジマス周波数ゼロ
合成開口時間	(1)0．5、(2)1、(3)2秒を試した中で試験	(3)
窓関数	アジマス、レンジ参照関数に(1)矩形窓、(2)ハミング窓を施工すると	分解能優先の場合には(1)、干渉性優先時には(2)を得た。したがって、処理ではこの結果を使い分けてオイル。
不要波除去	(1)生データで極端に大きなノイズを除去(notch filter)すると画質が劣化、	(2)何もしないほうが画質的には良好。そのために、何もしないを選択。
時間領域＋周波数領域処理	(1)周波数領域処理が、画質、処理速度の観点から、(2)時間領域処理を凌駕した。	(1)
動揺補正処理	レンジ動揺補正は本来内挿処理である。しかし、精度向上のために周波数シフト演算で精度向上(内挿尻よりも良好) アジマス同様補正も本来内挿処理である。しかし精度向上のためbに、周波数シフト演算を実施。 本検討は、周波数良医k処理で実施。	レンジ:周波数シフト アジマス:内挿方式
MTiG/SD(INSの選択):軌道情報源	両者ともに画質に対する際はさほど見られないが、いくつかの例で、SDが良好な分解能のSAR画像を、また、干渉画像を提供した。そのために、SDがやや良好との印象を持った。	SD
自動焦点処理の可否	1)レンジ方向に画像を8分割して、1ルックと4ルックの画像を合わせるようにfDDを再調整、 2)理論的fDDをそのまま使用:本処理は、RD	2):1)で特に効果が見られない。

	方式のみで対応可	
合成開口時間内の姿勢角の変動	1)合成開口時間内で揺らぎのある実軌道に姿勢角変動を考慮、2)合成開口時間内で揺らぎのある実軌道のみを考慮:本処理は時間領域しょりのみで対応	2)を採用:1)で処理時間が増えるのと逆に画像がボケる。
レンジ圧縮としての周波数変換	1)サンプル数が2の冪乗となるFFT方式、2)サンプル数は任意整数で成立するChirp-z方式	2)を採用する。

なお、 SAR本体については、H28のデータ解析の結果、運用パラメータの変更を行なった。

表1-5 SARのパラメータ変更

パラメータ	変更内容	採用
帯域幅	1)85MHz、2)55MHz	28年度は、1)、29年度は2)を設定、理由は、1)はSDが受信不可のため。現状どちらも一長一短
PRF	1)3333Hz、2)2500Hz	1)を採用。FMCWの雑音低下に貢献
ハウリング軽減	H28に見られたハウリングを軽減した	

(カ)なお、CRを使用した校正実験は、H28とH29の二年間実施した。H28にも一部実施したが、CRが小さいことと、設置した森林内では、CRがあまり目立たなかったこともあり、H29に再度校正実験を実施した。その結果を、表1-6に示す。備考に詳細を示す。2台のSAR共に良好な分解能や校正精度が確認できる(一部は仕様外れであるが外れ量は小さい)。図1-25にCRの応答特性や校正結果を示す。図1-26に代表的なCR画像を示す。

表1-6 校正精度の整理

項目	計測値 平均値(標準偏差)		仕様要求
ラジオメトリック精度 校正係数(dB)	-66.65(2.54) -71.20(1.52)	SAR1 SAR2	2.0 dB
分解能(m)	アジマス方向 1.659(0.96) レンジ方向 2.204(0.386)		2.0 3.0
ジオメトリック精度(m)	11.89(7.81)		10.0m

注1) 仕様要求に対応するのは、ラジオメトリック精度はカッコ内の数値、分解能は平均値、ジオメトリック精度は平均値である。下線部は仕様はずれである。

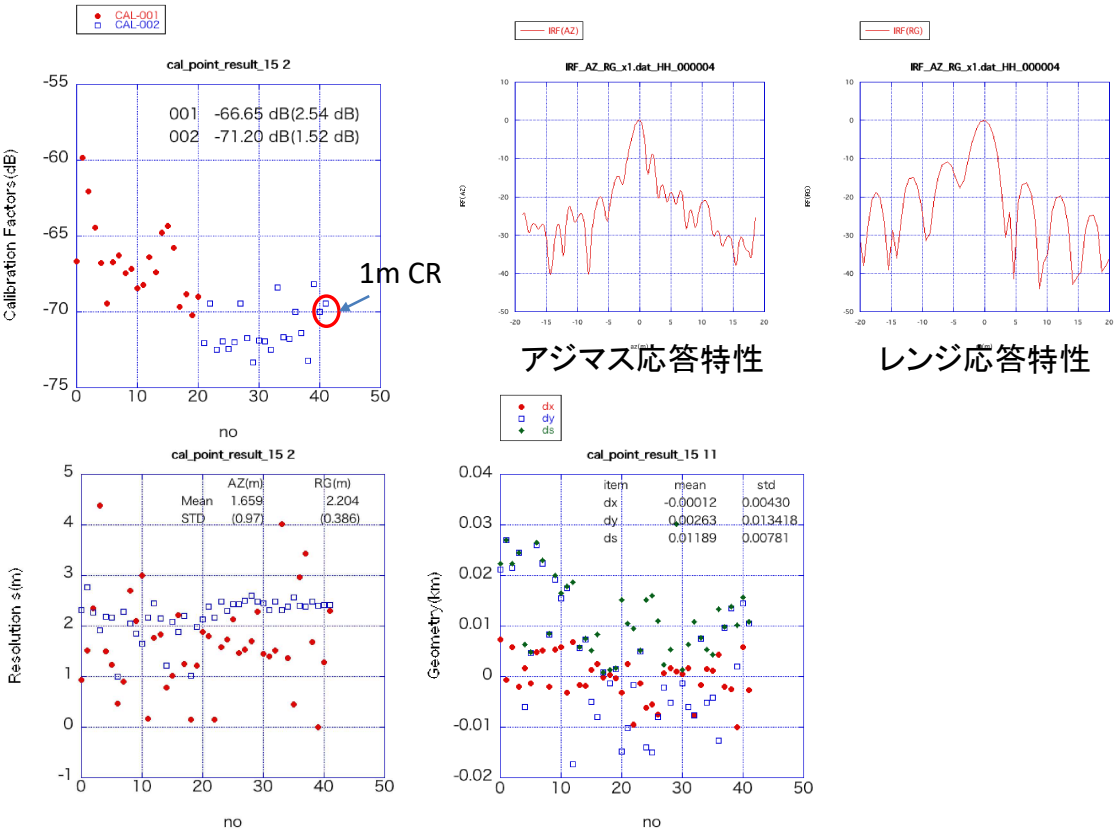


図1-25　全てのCRの応答特性等を表示したもの：上段左（校正係数の全CRに対する分布：赤ダイヤモンドは1系SAR、青四角は2系SAR）、上段中（特定のCRに対するアジマス方向応答特性:x軸は距離でm単位）、上段右（特定のCRに対するレンジ方向応答特性:x軸は距離でm単位）、下段左（全CRに対する分解能：赤ダイヤモンドアジマス分解能、青四角：レンジ方向分解能）、下段右（幾何学誤差：dx:東西方向誤差、dy：南北方向誤差、dz：距離）

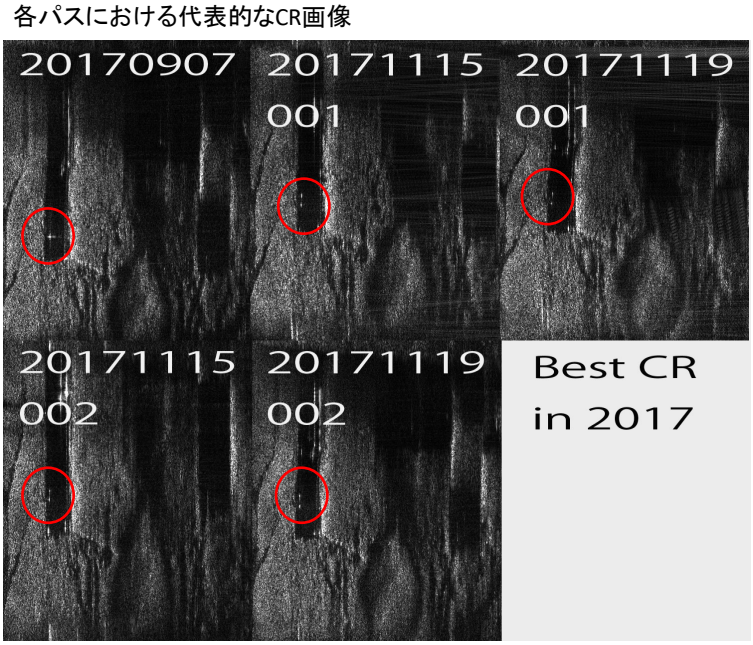


図1-26　代表的なCRの画像

2-2) 2台のSARを干渉処理し移動速度や標高情報の抽出を行う処理アルゴリズム

2-2-1) 干渉処理アルゴリズム

干渉処理アルゴリズムは、H28-29 の二年間にわたって映像化アルゴリズムと同期して継続的に開発した。SAR 干渉アルゴリズムは2枚の SAR 画像の作成、2枚の画像の合わせこみ、ピクセルの相関処理と平滑化、さらに位相の抽出、位相の地殻変動量への変換あるいは高さへの変換で行われる。本アルゴリズムは、単機の観測データにも、二機の同時観測データに適用できるように調整している。映像化アルゴリズム同様に、各機能の調整項目と適切なパラメータを表 1-7 に示す。干渉 SAR と方式として、2 種類を用意し、試行錯誤した。1)地上に設置した観測点(正方格子点)に対して、第一軌道を時間処理で映像化し、同様に第2軌道で映像化した画像を干渉処理させ、解析を行う方式(調整の非常に困難なマッチング処理を簡略化できる点が利点)。特に、H28 は干渉処理の開発当初であり、本方式を採用した。2)周波数領域か、時間領域で SAR 画像を各々作成し、マッチング処理、干渉処理、位相の、地形補正、軌道補正を行い、地殻変動量を抽出する方式。結果的には、動作の安定性と処理時間の短い方式2を解析に採用した。

表 1-7 InSAR 調整データの作成

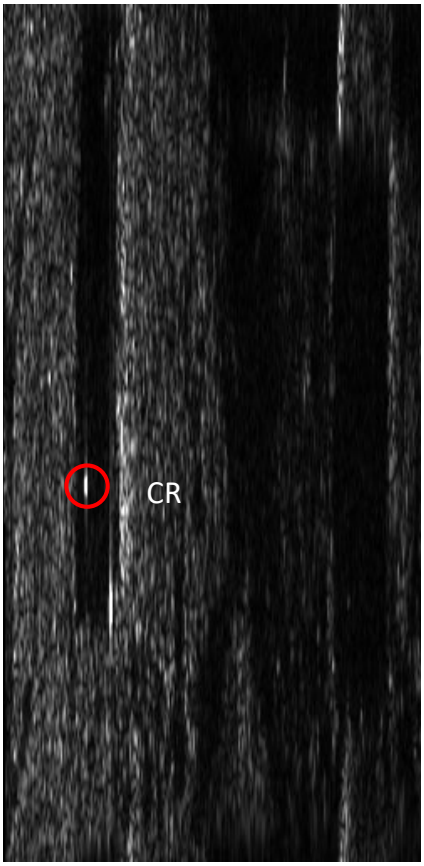
評価項目	内容	採用
処理方式	1)事前に設定した地表メッシュ化(正方格子化)、して時間領域処理で映像化、干渉処理する方法、2)個々の画像を時間領域＋周波数領域処理し、マッチング、干渉処理を別途行う方式:H28 は方式1)を H29 は方式2)を使用した。理由は、H29 の方が、データ数が多いのと、処理時間が短いからである。	2)時間領域処理
マッチング関数	1)アフィン変換、2)擬似アフィン変換	2)を採用
窓関数	表2でも整理したが、ハミング窓の方が、分解能は落ちるが干渉性が大いに向上した。	ハミング窓を採用
地形補正	1)個々の軌道から地形点までの距離を計算し、その差分を取る方法、2)スラントレンジをマスタースレーブ毎に計算し、基線長を別途計算し、あとで差し引く計算方法	1)を採用
平滑化数	レンジ・アジマス平滑化数、任意整数をセット可能であるが、1)2x4、2)2x8	2)を採用
CW filter の適用	1)適用、2)不適用	1)で係数 1.0 を採用

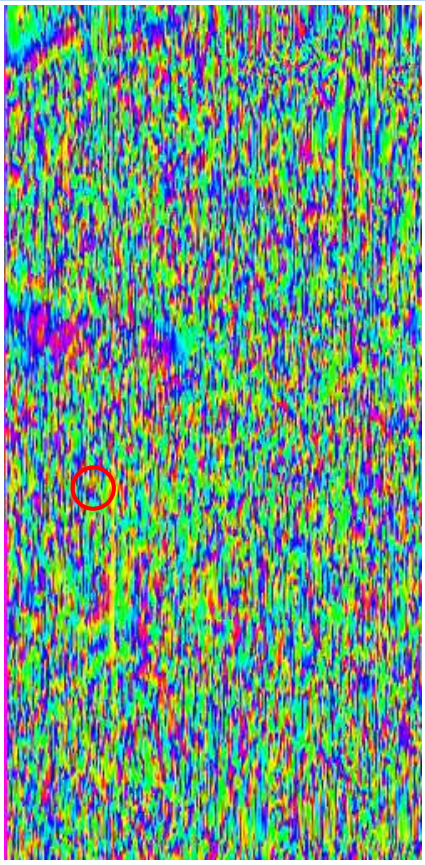
2-2-2) 干渉結果について

H29 は高度 150m と 500m を飛行する観測データが収集できた。観測コースは、高度 150m の場内コースと、高度 500m の場外コースの2種類を選択、その中から、代表的な 6 種類のペアを選択し、すべてのデータは、干渉処理を行った。その結果を表 1-8 に示す。また、代表的な干渉画像を図 1-27～1-30 に示す。

表 1-8　代表的な干渉処理結果

ケース	**観測日＋観測内容**	CR	結果
1	20170907、UAVSAR2、繰り返し干渉観測、場内コース、150m 高度、Bw=55MHz	1m CR 固定	高い干渉性、干渉位相を得る。位相がうねる
2	20171115、UAVSAR1 の2連続データ、場内コース、150m 高度、合計4CR、Bw=55MHz	50cm CR 固定	高い干渉性、位相がうねる
3	20171119、UAVSAR1 の2連続データ、場外コース、500m 高、Bw=55MHz	なし	高い干渉性、地形に干渉縞検出
4	20171119、UAVSAR1 と UAVSAR2 の干渉処理、場内コース、150m 高度、合計 4CR、Bw=55MHz	50cm CR 固定	高い干渉性、Bperp が大きい)
5	20171115、UAVSAR1 の2データ、場内コース、150m 高度、合計4CR (002(固定)と006(1cm/s で移動)を使用、Bw=55MHz	50cmCR 1cm/s で移動	高い干渉性、しかし、速度は検出できず
6	20161120,UAVSAR1 の 2 データ、場内コース、150m、Bw=85MHz	自然地形	非常に高い干渉性、位相がうねる





CR付近の拡大図

全面的に干渉。

CRは静止体であり、本来、位相は周辺物と変化なし。

画像全体で干渉を確認。また、連続的な位相変化を確認。

うねりを確認。

考えられる理由として、航空機軌道の不正確性、帯域幅が狭いことなど。

図 1-27　ケース1の静止 CR に対する干渉例（高度150m、Bw=55MHz）：左は振幅画像、右は位相差画像

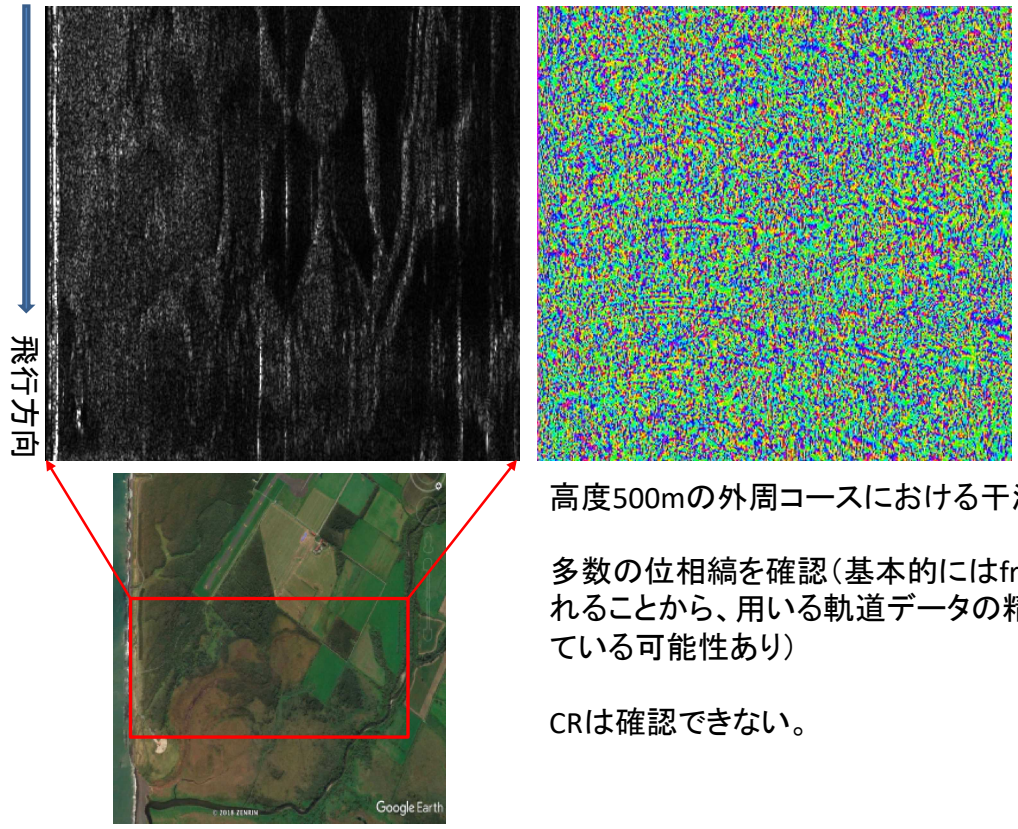


図 1-28　ケース3の自然地形に対する干渉例（高度500m、Bw=55MHz）：画像はともにスラントレンジ画像であり、x 方向にレンジ方向、-y 方向にアジマス方向を取る。

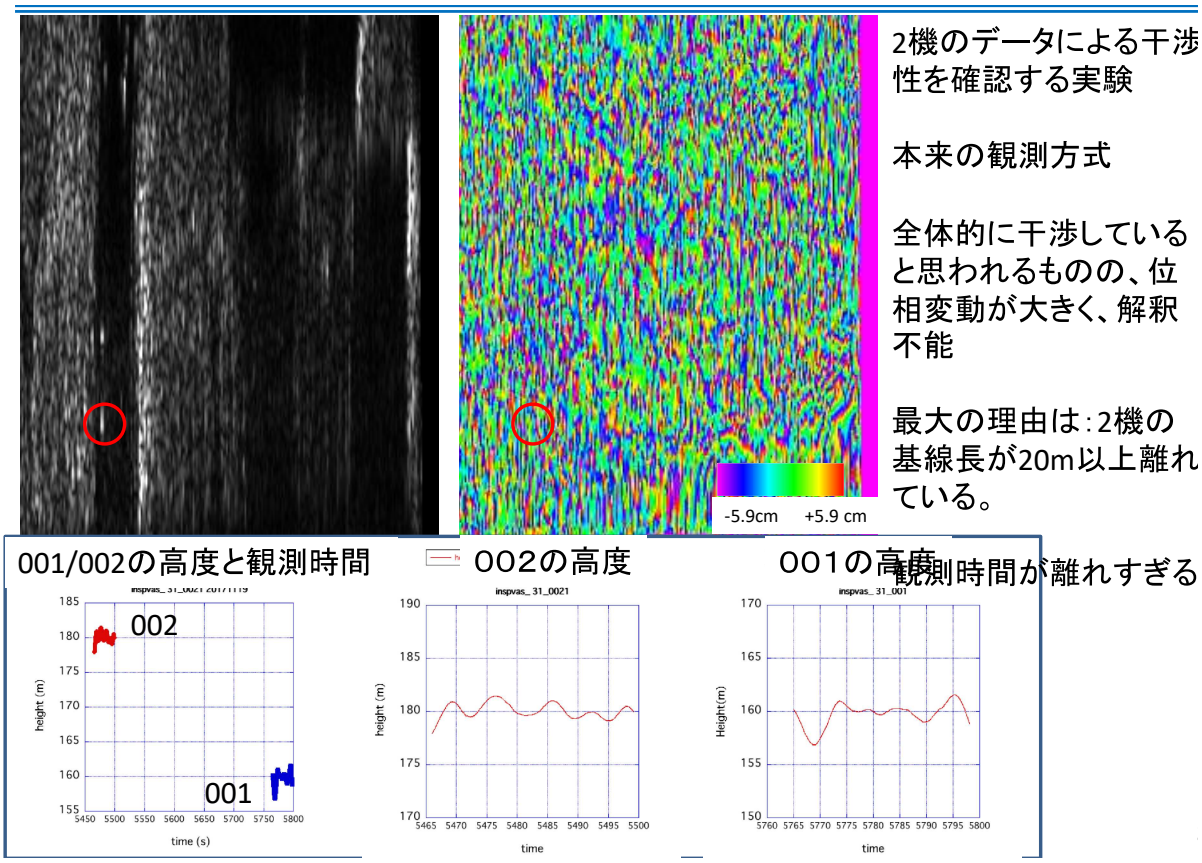


図 1-29　ケース4の二機観測事例（高度150m、Bw=55MHz）：下のグラフの横軸は観測日内の UTC 通算秒である。001 は UAVSAR1, 002 は UAVSAR2 を表す。

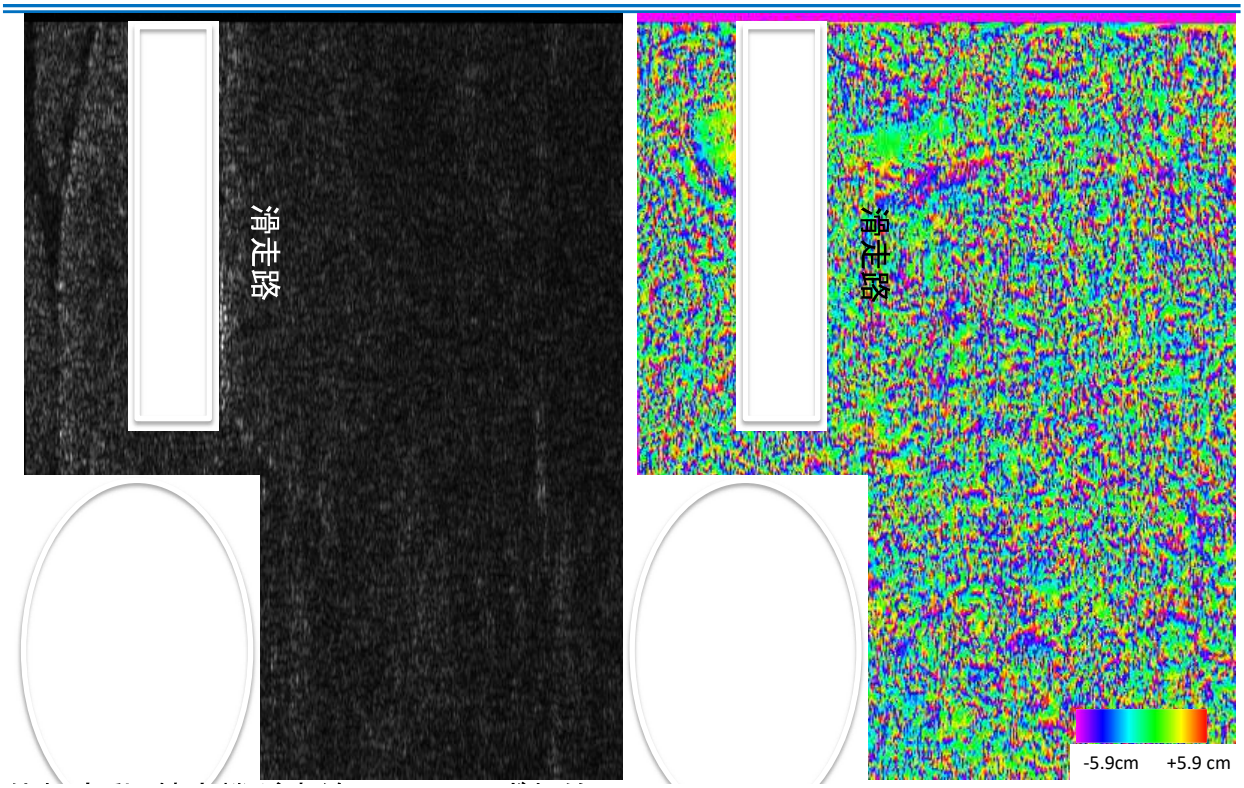


図 1-30　ケース6の干渉事例（高度150m、Bw=85MHz）：二つの画像はともに、スラントレンジ画像であり、x 軸がレンジ方向、-y 軸がアジマス方向である。左は振幅画像、右は位相差画像（色の一周期が12cm に対

応）

この結果：以下の結論を得た。

1） UAVSAR は単機観測時には約1m の基線長を実現する。その場合、繰り返し干渉の干渉性は非常の高く、得られる位相情報の信頼性が高い。

2） 観測対象物は、無変動（一部約3m/s の風が吹いており、実験場近くの森林が揺れていたが）状況を観測した2枚の画像の位相差は、やや変動する。本来、無変動を観測しており、位相はゼロであるべきがうねりが見られる。この原因としては、1）森林内での反射点が完全に地表でないための残留高の影響（DEM-DSM）、2）映像化に使用した軌道情報に残留誤差があること、3）姿勢変動に伴う位相変動があることの3点が考えられた。特に、2）、3）については、小型 UAV に特有の残留変動であり、将来の検討課題である。また、2）に関しては、今回使用の SD は仕様値が 8mm とあるものの、その検証方法がないことから、そこまでの値が出てない可能性がある。

3） 100m 離した二機の干渉実験は、ケース4に対応するが、場内実験では二機の衝突を懸念して20m の高度差をつけた、気流が速く、常時一定間隔を保持するのが困難であり、300秒離れた代替実験となった。CR も静止状態であり、2）と同様な実験結果をうることができた。ただ、基線長が長いために、干渉性は他に比べて小さい。軌道解析では入射角60度以上で干渉するとあり、実画像でも大入射角で位相が安定する。

4） 移動体の実験は単機を用いた。干渉性は良好であるが、2）と同様な理由で、移動体の干渉位相を得られなかった。理由は、1）移動体の大きさが小さすぎたこと（一点しか変動がないが）この変動が、他の雑音状の変動と区別がつかないこと、2）滑走路上でも少なからず位相が変動しており、両者の区別がつかなかった。観測できなかった原因としては、移動対象物の面積が小さかったことによるものと思われる。また、2機で同時に移動体を観測できなかったことが大きな要因である。今後は、点像ではなくより面的に変動する領域にするのも方策と考えられる。（例えば、海流の観測。ただし、感度を上げるために、送信電力の増強が必要である）

5） 参考に2016 年の85MHz での実験を再解析し、55MHz よりも高い干渉性を観測した。位置の計測に MTiG を使用したものであり、位置精度に不安はあるものの干渉性は高く、また画像分解能も高い。滑走路上での位相のうねりは、55MHz に比べて小さい。画像の最下部で一部変動が見られるが、UAV が旋回飛行により軌道間距離が確保されたことに関連したものであり、本システムが良好な干渉することを示している。

6） 最後に、各ケースに見られる位相変動量に対応する速度変動量を表 1-9 に示す。ばらつきはあるものの、本 UAV システムの速度計測量（ばらつきは）1cm/s 程度と考えられる。なお、本計算では、B=100m と仮に設定した。

表 1-9 位相ゆらぎ量の速度変動量

ケース番号	位相変動量(標準偏差)度	速度変動量(標準偏差)cm/s
1	67.7	6.77mm/s
2	40.9	4.9mm/s
3	61.5	6.55mm/s
4	74.1	7.41mm/s
5	70.7	7.7mm/s
6	48.8	4.8mm/s
平均	61.7	6.1mm/s

1．2 研究課題終了後の将来性

1) 災害時に危険箇所の画像が即時に取得することが求められる。特に荒天時の画像が重要であり、UAVSAR は今後、大きく利用要求が高まると思われる。映像だけであれば、今回のUAVSAR システムで十分である。分解能は、2m 程度を維持し、衛星搭載 SAR と同等である。ただ、さらに高分解能が必要な時には、Lband では周波数帯域に制約があり、X バンド(300MHz、1200MHz)が望ましい。また、INS としての SD あるいは MTi-G でも、十分な画像品質を得ている、また高速処理も可能である。近年、多く発生する火山噴火に関しては、火口の位置の決定が重要であり、火山弾の噴出、火山灰の浮遊する中での観測を可能とするUAVSAR は重要な観測機器である。SAR に関しては、もう少し送信電力を上げることで、よりクリアーな画像が取得できる。

2) InSAR に関しては、INS と航空機の揺れが大きな課題であるが、得られた干渉画像から(干渉性)のみで得られる、地物の移動や変動(例えば、マグマの噴出やマグマの流動)の位置、火山灰の降灰箇所の特定などができそうである。また、位相量(変動速度)に関しては、CR を用いた実験では明瞭なパターンを得ることができなかったが、もっと大きな(大面積の)変動域の抽出に関しては可能性が残っていると考えられ、災害箇所の特定に有効であると思われる。

3) 将来実験はないが、H28,29 の場内飛行では、反対コース(コーナー反射鏡が写ってないコース)で海岸域や、沿岸に押し寄せる波などが画像から見られる。そのために、このコースを用いた解析を行うことで、より広い移動領域に関する干渉性の抽出を試みたい。

4) 固定翼型無人航空機の位置、姿勢制御精度については、これまで研究レベルでは様々な報告があったものの、実際のミッションの中でどの程度必要なのか、どこまで実現可能なのかがあまり議論されたことがなく、今回のように精度の高い制御要求のもとで固定翼型の無人航空機の制御精度について検証できたことは、今後同様の用途に供する同形式の有用性を評価する意味でも非常に有用であったと考えられる。また、今回同一設計の機体の個体差について有意なデータが得られたことは、今後無人航空機に対する要求が高度化していく中で、製造管理に関する標準化などの議論をおこなっていくためにも興味深い知見が得られたと考える。

5) 無人航空機間での直接通信による位置情報の伝達は航空交通管制の対象とならず、また機上に高性能なセンサを搭載することも難しい小型無人航空機の運航管理や衝突回避の手段としても注目されている。

6） 一方で、今回の飛行試験では使用できる通信機器や、地上の安全地帯の確保のために飛行領域が大きく制限され、結果的に制御の確認や SAR の計測に必要な直線飛行区間を充分に長くとることができなかった。電波については無人航空機用に広い覆域で、干渉の心配なく容易に使用できる周波数帯がなく、今後の法制度の整備や機器の充実が期待される。また、地上の安全地帯の確保については、実際に地上監視等で飛行領域下の広大な領域が無人になるように管理・担保するのは困難であり、ある程度地上に人がいる可能性のある領域を飛行するための法基準の整備や、無人航空機そのものの信頼性を評価するための研究開発が必要になってくると思われる。

1．3 副次的成果や目標を超える成果

1） 周波数領域処理の完成：UAVSAR の画像解析において、想定以上の試験を繰り返し、現時点で最適と思われる画像化アルゴリズムに仕上げた。この中で、小型 UAVSAR の映像化処理は、当初時間領域処理以外にないと考えていた。理由は、小型 UAV の飛行コースの振れ幅が大きいことである。しかし、試行を繰り返すことで、周波数領域処理が可能であり（さらに、画質も時間領域処理を凌駕する）、それにより、高速な SAR 処理が可能になった。

2） 姿勢変動処理の簡略化：さらに、同じく画像化処理の中で、小型 UAV は非常に多く振動する。振動も、画像化の中で補正しなければならないと考えていたが、実際は、軌道の変動だけを考慮することで高品質な画像化が達成できた（高速化も行えた）。逆に言うと、短い合成開口時間の中では、姿勢変動は無視してもいいということがわかった。

3） 廉価型 INS の利用：INS として MTiG と SD を比較し、現時点では SD がやや良好な結果を出している。これまで、INS は数千万円するもの以外ないと思っていた。実際は、150 万規模の機器でも、映像化に遜色がない画像を提供することがわかった。

4） 森林内部の干渉性が高いこと：干渉処理に関して、森林領域の干渉性が意外に高い（衛星に比べると非常に高い）。この理由として、パルス幅が約60倍程度長いことが挙げられる。また、森林内での位相のうねりが見られており、これは、前述したように DSM と DEM の違いが出たものと思われる。つまり、森林内構造が見えた例として挙げられるかもしれない。

1．4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

これまでに、3 種類の発表を実施した。2 種類は、UAV の開発と制御則の検証、1 種類は、UAVSAR の干渉実験についてである。

1） UAVSAR 干渉実験：超小型 SAR を UAV に搭載し、地表の観測が増加、位相差計測実験は成果に例がない。初めての実験である。また、小型 SAR は X や Ka バンドでの例が見られる中、より航空機の振動を受け、かつ合成開口時間の長い L バンドを適用した事例は、例がない。2017 年 12 月の発表は、比較的小規模学会であったが、初めての実験ということで多くの興味を感じた。また初期の結果だったので、干渉性は高くなかったことから、十分な反響は得られなかったが、さらに、解析を進めて、2019 年ごろにはより大きな学会で発表したい。

2） 無人航空機の開発については平成 29 年 11 月の第 55 回飛行機シンポジウムにて発表し、類似例が殆どない 55kg 級の比較的大型の無人航空機による複数機の同時運用のための研究開発や試験運用の実際について講演し、実際に無人航空機を運用している研究者等からも興味深い事例であるとのコメントが多かった。

3） 制御則については平成 30 年 5 月の第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会で発表し、特に機体間での通信を用いた機体間距離の制御についてその手法と実際の試験結果について講演をおこなった。

1．5 研究実施体制とマネジメント

本プロジェクトは世界最先端の実験であり、チーム内の情報共有を密に行い、効果的にプロジェクトを進めることができた。

1．6 経費の効率的執行

1） UAV の開発に関しては、これまでの経験を基にして、廉価にして信頼性の高い部品の調達と技術のあるエンジニアによる組み立てを行なった。大量生産品でないために、一部試行錯誤で機器の開発、修理が行われたが、限定された予算内の活動なので仕方ない。
2） SAR の開発については、費用面から、購入せずカタログ品をレンタルすることで経費内に納めた。
3） SAR アルゴリズム開発は、それ自体が研究なので、内作とした。

2.1 平成 29 年度の実施計画

以下の 5 項目を実施した。

①無人機搭載SARの調達と画像化・解析アルゴリズムの調整

平成27年度に納入された無人機搭載SARアンテナとあわせて、再委託先で開発した無人航空機のアビオニクス系と非電波干渉の無人機搭載SAR2台を調達し、宇宙航空研究開発機構と合同で実施する④の飛行試験にて、SARを動作させ、SAR観測データを取得する。

当該実験において得る2機同時飛行によるSAR観測データを平成28年度に開発したアルゴリズムを使用して画像化・干渉処理を行う。当該実験において、移動型コーナー反射鏡（CR）を一定速度で移動させ、干渉処理から得られる移動速度とCRの移動速度の合致具合をデータ解析を通して評価する。CRの移動方向は無人機飛行コースに直交、速度は1cm/sとする。

また、平成28年度の実験において、SAR処理に必要な無人機GPSの位置決定精度が不十分であり、本年度、再調整したGPSを用いて実験を行い、SAR画像が所定の精度（ラジオメトリック精度（2dB以内）、ジオメトリック精度（10m以内）、分解能（レンジ方向の地上分解能3m以内、アジマス方向の地上分解能2m以内）を有すかどうか、リピートパス干渉処理を行えるかどうか確認する。本研究の3年間の達成度について評価する。

②SAR搭載無人航空機誘導制御則の改善（再委託先：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

平成28年度に実施した機体製作、飛行試験、およびその結果を踏まえた改修等により最終的に確定した機体性能・仕様に基づき、2機の協調運用に必要な誘導制御系の改良を行い、飛行シミュレーションにより開発した誘導制御系の評価を行う。

③SAR搭載無人航空機機体改良・保守（再委託先：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

平成28年度に製作した無人航空機について、飛行試験結果に基づく改良や機能確認、保守維持作業をおこなう。

④SAR搭載無人航空機の飛行試験運用（再委託先：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）

SARによる観測条件、昨年度飛行試験結果などに基づき、必要なSAR観測データを取得するための飛行試験計画を再度検討し、策定する。また試験期日までに目視視程外運航、高高度飛行等のための国土交通大臣の許可、承認の取得を行う。

東京電機大学との合同で飛行試験を実施し、

（④−1）　2機の同時飛行による協調誘導制御則の最終確認

（④−2）　SAR搭載無人航空機を用いたリピートパスSARデータの取得

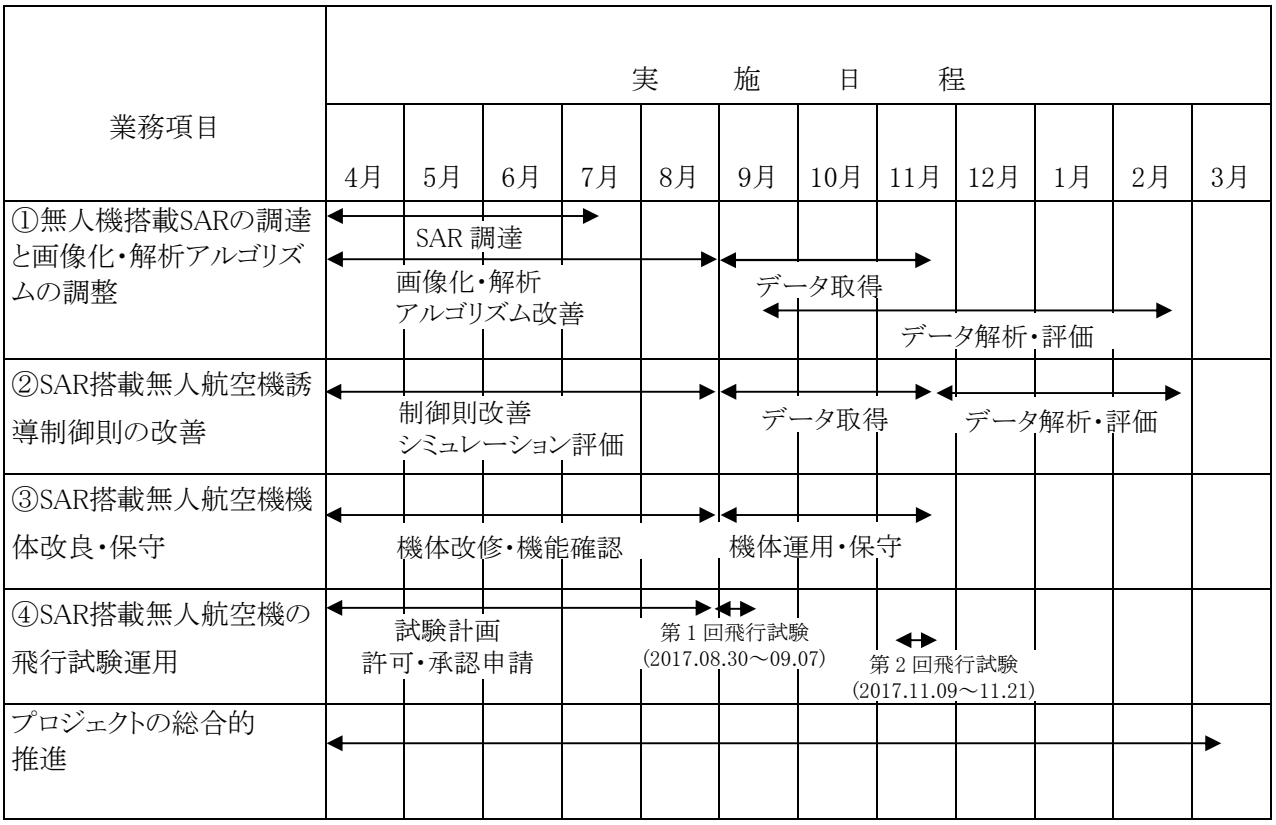
を実施する。この飛行試験において、宇宙航空研究開発機構は無人航空機の操作・運用および、機能・性能確認を担当する。

⑤プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、両機関の調整会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。

特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。

2.2 平成 29 年度の研究実施日程



2.3 平成 29 年度の研究成果の説明

① 無人機搭載 SAR の調達と画像化・解析アルゴリズムの調整
本業務において、大きく分類して3つの項目を実施した。(表 2.1 参照)

表 2.1 検証内容の整理表

実験項目	内容	注釈
SAR 単体性能検証	H28 の解析結果をもとにして必要項目を改修し、さらに、SAR の UAV に搭載した状態での性能の確認	1)ジオメトリック性能 2)ラジオメトリック性能 3)分解能
干渉機能1	単機による繰り返し干渉機能の確認	
干渉機能2	二機による干渉実験	

(1) SAR 単体性能検証:H28 の実験において、UAV 搭載状態で SAR データを取得できた。SAR は設計通り 85MHz の帯域幅を有すこと、一部地上からの不要波を強く受けたことを確認した。映像化により、地上高 150m における画像を得た。観測対象物は、UAV 直下を含む海域、入射角(20～45 に広がる低木層、45 度以上の滑走路、低木層域である)である。データの映像化は予定通り行われ、計測された分解能は、ほぼ理論通りであったが、森林内に設置した一辺 50 センチメートル

のコーナー反射鏡の視認度が低く、性能評価の継続が困難であった。また、UAVSAR の処理に必要不可欠となる INS のデータが UAVSAR の送信信号と混信し、正常な受信ができなかった(干渉型 INS の場合、L1／L2周波数の受信が必要であるが、L2が SAR 送信信号により受信されない)ことは問題であった。そのために、H29 は、SAR 送信帯域幅を 85MHz から 55MHz に削減し、L2 の受信を可能にさせ、INS の位置決定精度の向上を目的とした。29 年度実験開始までに、この改修を行い、さらに、L1/L2 が正常に受信されることも確認した。2)50cm の CR は、森林内に設置したことで周りの森林の明るさと大きな差が出なくなったことから、H29 の実験では、コーナー反射鏡の大きさを一辺1m の大型に暫定的に変更、設置場所を森林よりも暗い滑走路上に変更した。

(2) UAVSAR1 と UAVSAR2 を使用して、同機間の干渉実験を実施した。H28 には UAVSAR1 の単機による干渉飛行を実施し、一部干渉画像を得た。画像処理領域の選定や二種類の画像の選定をマニュアル(マスターとスレーブ画像の開始位置の選択)で実施した。適切な干渉性を得た。H29 はより長時間の飛行により、より安定した飛行時のデータ取得を行い、より定量的な干渉性能の確認を行うこととした。

(3) H29 で始めて登場した UAVSAR1 号機と UAVSAR2 号機の同型機間の干渉実験により当初の目的である、移動体計測実験を行うものである。

①－1 観測原理

本章では、本業務実施に必要となる基本原理について記述する。本業務の基本となるのはア)映像化、イ)SAR の校正とウ)繰り返し干渉である。

ア) 映像化

本研究は、1)小型航空機に搭載し、大気の不安定性の影響を受ける中でどこまで SAR の画質を担保することができるかという課題も併せ持つ。2)宇宙用 SAR と異なり、航空機の飛行経路の正確な把握は一般に困難であるが、補正のための、INS(Integrated Navigation System)が精度をどこまで担保できるか、姿勢変化をどこまで許容できるかも合わせて検討課題とした。3)処理の方式としては、時間領域積分と周波数領域積分法を採用し、両者を比較した。また、アンテナサイズは、アジマス方向に30cm あり、通常で 45 度近くのアンテナ半値幅を有している。これの効率的な狭帯域化も開発対象であった。

以上の評価を行いながら、干渉性や分解能向上に対するパラメータ調整を行なった。なお、レーダは FMCW 型であり、映像化はレンジ圧縮(として、逆周波数変換)＋動揺補正＋マイグレーション＋アジマス圧縮の周波数領域処理と、レンジ圧縮＋アジマス圧縮の時間処理方式の二種類を用意した(表 2.2 参照)。

表2.2 画像処理方式の比較

項目	方式1	方式2
処理方式	時間領域処理	周波数領域処理
窓関数	矩形窓	ハニング窓
FFT	2 の冪乗 FFT	CFT
アジマス積分時間	積分時間にして2秒	1秒
INS	二周波測位(SD)	単独測位

イ)　SAR の校正

SAR の校正は、1)ジオメトリック校正、2)ラジオメトリック校正の二種類に分類できる。

1)　ジオメトリック校正:

SAR の幾何学校正は以下の方程式(2.1)を満足するように、地表面位置を計測し、それが、地上に設置したコーナー反射鏡の位置と合致することの確認である(図2．1参照)。

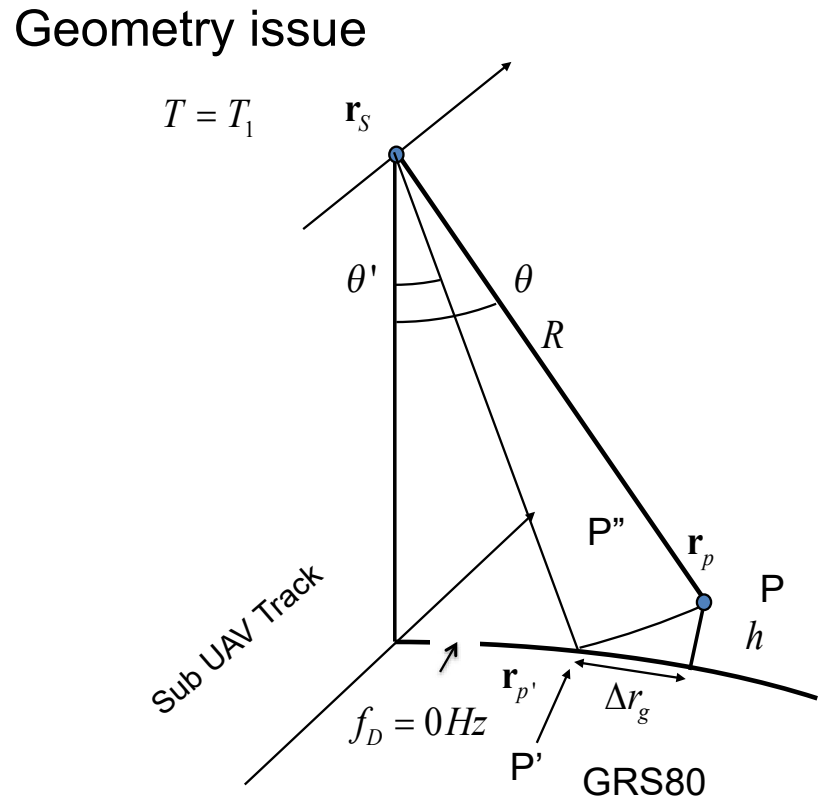


図 2.1　座標系

SAR の観測位置の決定に必要な条件として、1)UAVSAR が観測する地球とともに自転する対象物間のドップラー周波数は外部から与えられたものと等しいこと、2)地表の対象物は準拠楕円体上に存在すること(GRS80 を使用)、3)UAVSAR と地表の距離は UAVSAR の観測画像から計算できることが挙げられる。これらを数式で表現したものが、(2.1)である。

$$f_{d1} = \frac{2}{\lambda}\left(\mathbf{u}_s - \omega \times \mathbf{r}_p'\right)\frac{\left(\mathbf{r}_p' - \mathbf{r}_s\right)}{\left|\mathbf{r}_p' - \mathbf{r}_s\right|}$$

$$r = \left|\mathbf{r}_p' - \mathbf{r}_s\right|$$

$$\frac{x_p^2}{R_a^2} + \frac{y_p^2}{R_a^2} + \frac{z_p^2}{R_b^2} = 1$$

$$r = \frac{c}{2}\frac{i}{f_{sample}} \qquad (2.1)$$

ここに、f_{d1} はドップラー周波数、$\mathbf{u}_s$ は UAV の速度ベクトル、λは波長、ωは地球自転ベクトル、$\mathbf{r}_p'$ は GRS80（GeoReference System80）上での位置ベクトル、rs はUAV位置ベクトル、rp は地上点ベクトル、h は地上点の高さ（楕円体高）、r はスラントレンジ距離、xp,yp,zp は P 点の3次元座標、f_{sample} はサンプリング周波数である。

今回の実験では、P はコーナー反射鏡であり、上記説明のようにいずれも滑走路に設置した。fd はゼロで画像化した。上記方程式の解として、点 p は GRS80 上で決定される。しかし、現地では P 点の、緯度（測地緯度）、経度、高さが計測されており、現地データを GRS80 上に変換して、現地データと、画像から得られる緯度経度を比較した（E）（**M. Shimada**, "Ortho-rectification and Slope Correction of SAR Data Using DEM and Its Accuracy Evaluation," IEEE JSTARS special issue on Kyoto and Carbon Initiative, vol. 3, Issue 4, 2010, pp. 657-671.
）。

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{R_a^2}{R_b^2}\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$$
$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \qquad (2.2)$$

ここには φ, λ 測地緯度、経度である。また、Ra,Rb は赤道半径、極半径である。

$$E = \frac{1}{N}\sum_i^N \left\{\left(x_i^U - x_i^g\right)^2 + \left(y_i^U - y_i^g\right)^2 + \left(z_i^U - z_i^g\right)^2\right\} \qquad (2.3)$$

ここに、E は幾何学的精度として定義した。N は評価に使用するサンプル数である。

3）分解能評価

Impulse Response Function(IRF)とは CR が描く輝点の1次元応答特性である。この応答の先鋭さはセンサの特性の良好なことを示しており、2 次元画像である SAR はレンジ方向に c/2/帯域幅、アジマス方向に周波数帯域に対応した分解能を有する。IRF の2次元応答特性を評価する。（最高分解能の SAR は $L_A/2$ となるが、本研究では、帯域幅を狭めて約2m とした。ここに L_A はアジマス方向アンテナ長）

2）ラジオメトリック評価

IRF はレーダと映像化アルゴリズムの総合的な特性を表しており、分解能はその形状を評価したのに対して、校正係数は、そのエネルギーを評価する。つまり、本来一点に集約すべきがそうなっているかどうか。このエネルギー集約度合いを利用することで、SAR の画像を、後方散乱係数に変換することが可能である。

$$\sigma^0 = 10\log_{10}\left\langle DN^2\right\rangle + CF \qquad (2.4)$$

ここに、DN は画像化された SAR の画素値（デジタルナンバー：0−65535）、CF が校正係数である。この CF の安定性を見ることで、レーダーシステムの安定性が評価できる。

ウ） 干渉処理

干渉処理は以下の式に依存する。

$$\begin{aligned}\phi &= -\frac{4\pi}{\lambda}\left(r_1 - r_2\right) \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{B_{perp}\cdot z}{r\cdot\sin\theta} + B_{parr}\right) - \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B}{V_g}u\end{aligned} \tag{2.5}$$

が干渉位相を表現する基礎方程式である。

ここに、r_1,r_2 はマスタ画像、スレーブ画像から観測対象物までの距離、ϕ は干渉位相、λ は波長、Bperp は垂直基線長、Bpara は水平基線長、z は高さ、θ は入射角、r はマスタ画像からのスラントレンジ（r1 と同じ）、Vg は航空機の速度、B は航空機の水平間隔、u は観測対象物の移動速度（航空機に垂直な方向の）である。

S1, S12 をマスター観測データ、スレーブ観測データとし、両画像の位置関係が明確な時、干渉位相は

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Im\left\langle S_1\cdot S_2^*\right\rangle}{\Re\left\langle S_1\cdot S_2^*\right\rangle}\right) \tag{2.6}$$

で得られ、(2.5)より、

$$u = -\frac{\lambda}{4\pi}\frac{V_g}{B}\left\{\phi + \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{B_{perp}\cdot z}{r\cdot\sin\theta} + B_{parr}\right)\right\} \tag{2.7}$$

$$\sigma_u = \sigma_\phi \frac{\lambda}{4\pi}\frac{V_g}{B} \tag{2.8}$$

で、移動速度(u)とその標準偏差（σ_u）を抽出する。

なお、干渉位相の信頼性は、以下の干渉性で計測される。本数値は0から1の間を取り、1に近いほど、干渉位相が正確であることを言う。

$$\gamma = \frac{\left|\left\langle S_1\cdot S_2^*\right\rangle\right|}{\sqrt{\left\langle S_1\cdot S_1^*\right\rangle\left\langle S_2\cdot S_2^*\right\rangle}} \tag{2.9}$$

$$\phi' = \phi + \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{B_{perp}\cdot z}{r\cdot\sin\theta} + B_{parr}\right) \tag{2.7}'$$

を地形や軌道縞を補正した差分干渉位相として以下で用いる。

以上三種類の実施項目に対して、平成 29 年度は平成 29 年 9 月の実験と 11 月の実験の 2 時期を行なった。

エ) 干渉処理における比較

差分干渉法として、以下の2種類を比較した。

表 2.3　差分干渉法における軌道間距離の補正方法

方法1	上記変換式に従って Bperp, Bpara,などを計算する方法
方法2	直接 r1−r2 を計算する方法

結果的に方法 2 が正しい結果を出力した。理由は、方法1では一部異常な地殻変動図が見られたのに対して、方法 2 では全体に異常な挙動を示す縞模様は見られなかったことにある。処理流れ図を図 2.2 に示す。

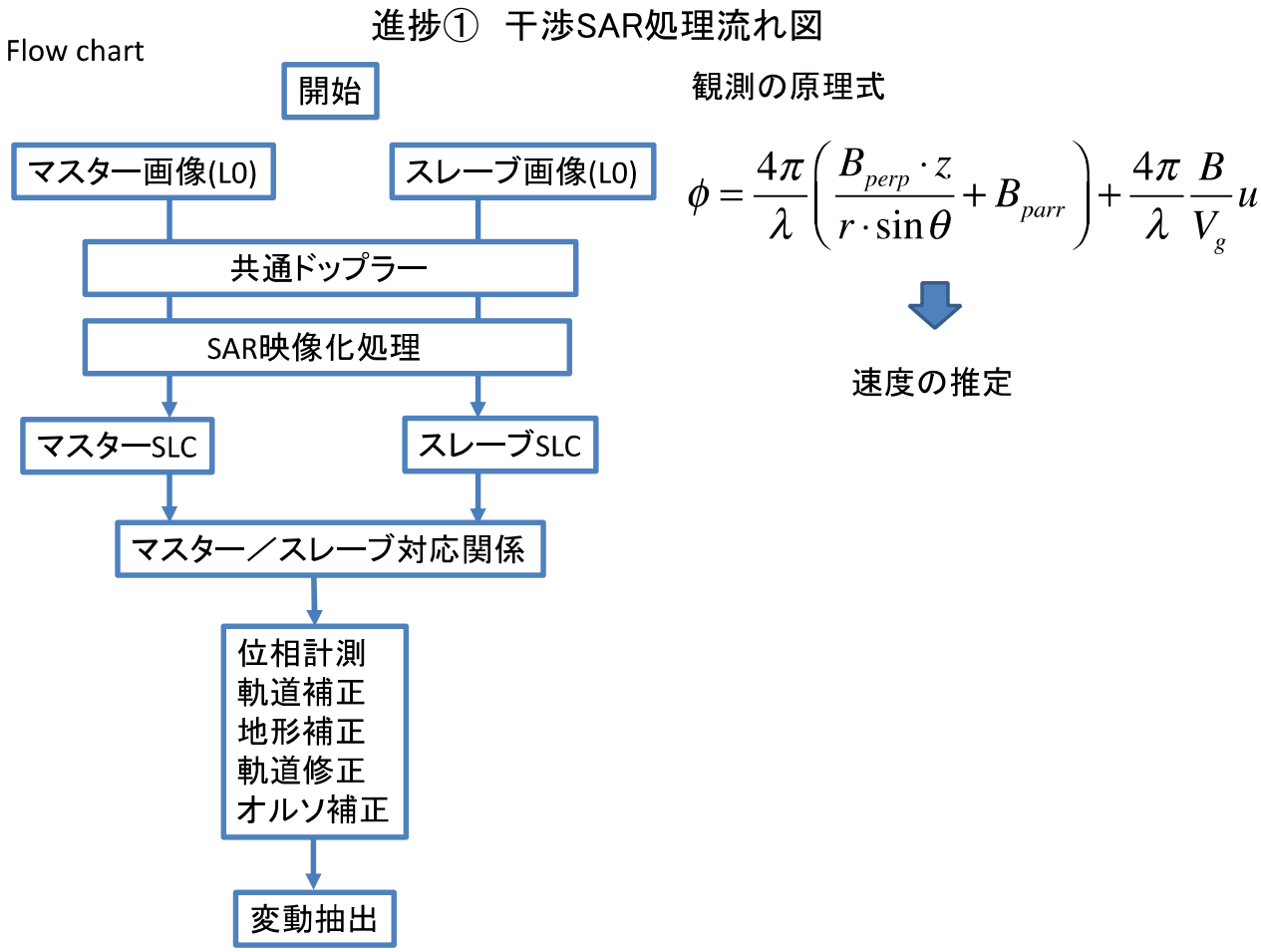


図 2.2　処理流れ図

①－2 実験について

1) 得られたデータ一覧

得られたデータの詳細な一覧は表 2.4 に与えられるが、平成29年度の画像解析は全てのデータを画像化し、目視確認にて良好な点像が確認できた 5 種類のデータと平成28年の再解析データの合計6種類とした。また選定されたデータは、飛行機の飛行状況を目視して、比較的正常に飛行していた可能性が高いこと、また SAR も同様に正常運用の可能性が高いこと思われる。

表 2.4 画像解析に使用した画像リスト一覧

観測日	内容	SAR	CR
20170907	高度 150m の場内コースを観測飛行、帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD)、映像化領域は 368 秒	UAVSAR1	1m MCR x 1
20171115	高度 150m の場内コースを観測飛行帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD) 、映像化領域は 1585 秒	UAVSAR1	0.5m MCR x1 0.5m CR x3
20171115	高度 150m の場内コースを観測飛行帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD) 、映像化領域は 2248 秒	UAVSAR2	0.5m MCR x1 0.5m CR x3
20171119	高度 150m の場内コースを観測飛行帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD) 、映像化領域は 2949 秒、 高度 500m の場外コースを観測飛行帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD) 、映像化領域は 1751 秒	UAVSAR1	0.5m MCR x1 0.5m CR x3
20171119	高度 150m の場内コースを観測飛行帯域幅は 55MHz、IMU は(MTIG+SD) 、映像化領域は 368 秒	UAVSAR2	0.5m MCR x1 0.5m CR x3
20161120	高度 150m の場内コースを観測飛行帯域幅は 85MHz、IMU は(MTIG)	UAVSAR1	0.5m MCR x1

注）MCR は移動可能な CR、CR は通常の正方形型 CR である。

これらのデータに対するブラウズデータを以下に添付する。画像は、高度 150m 以上のデータをレンジドップラー処理方式で画像化したものである。観測パスにより映像化の時間は各々異なる。各図共に SAR は右から左に向かって周回飛行するが、それを帯状に処理したものである（地図投影はしていない）。同様なパターンが帯の長手方向に向かって繰り返される。この一つのパターンが一周回に対応する。図 2.3 だけが 2 枚の画像を続けて示すが、これは 150m の高度の飛行と 500m の高度の飛行が異なる観測パスだからである。

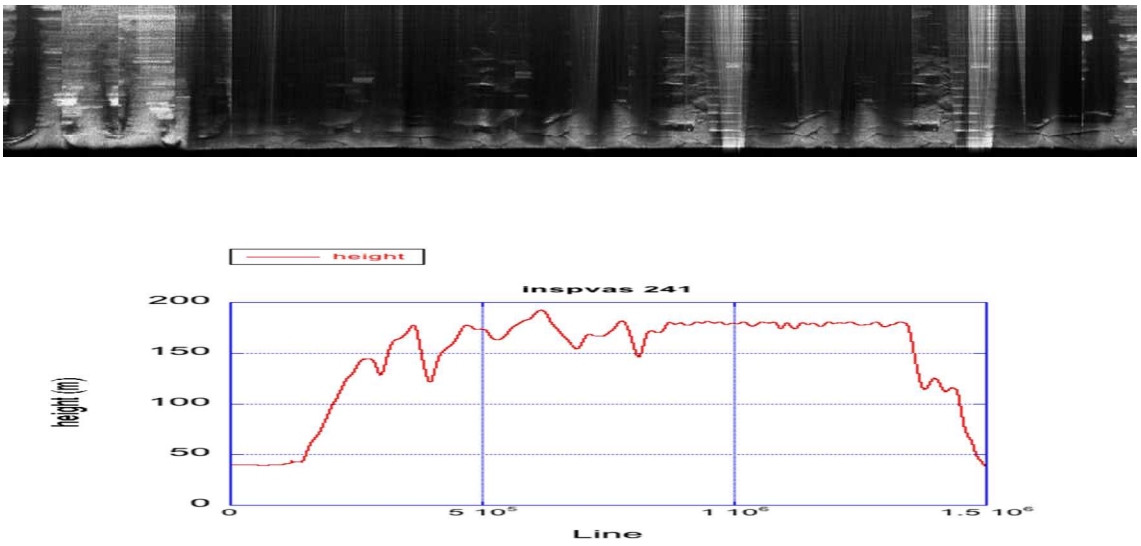


図 2.3　9月7日観測画像（航空機は左から右に飛行、映像化領域は 368 秒）

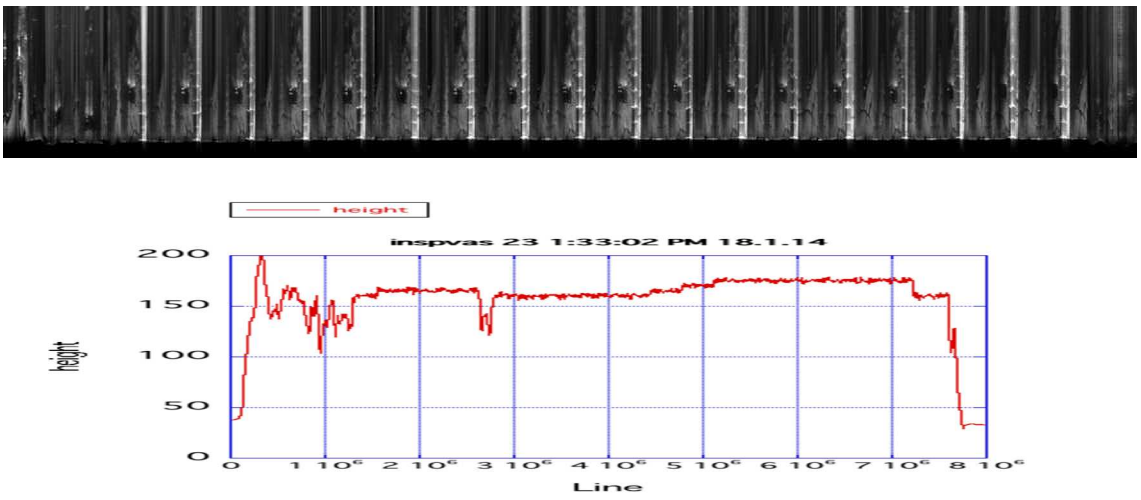


図 2.4　11月15日観測画像 UAVSAR1（映像化領域は 1585 秒）

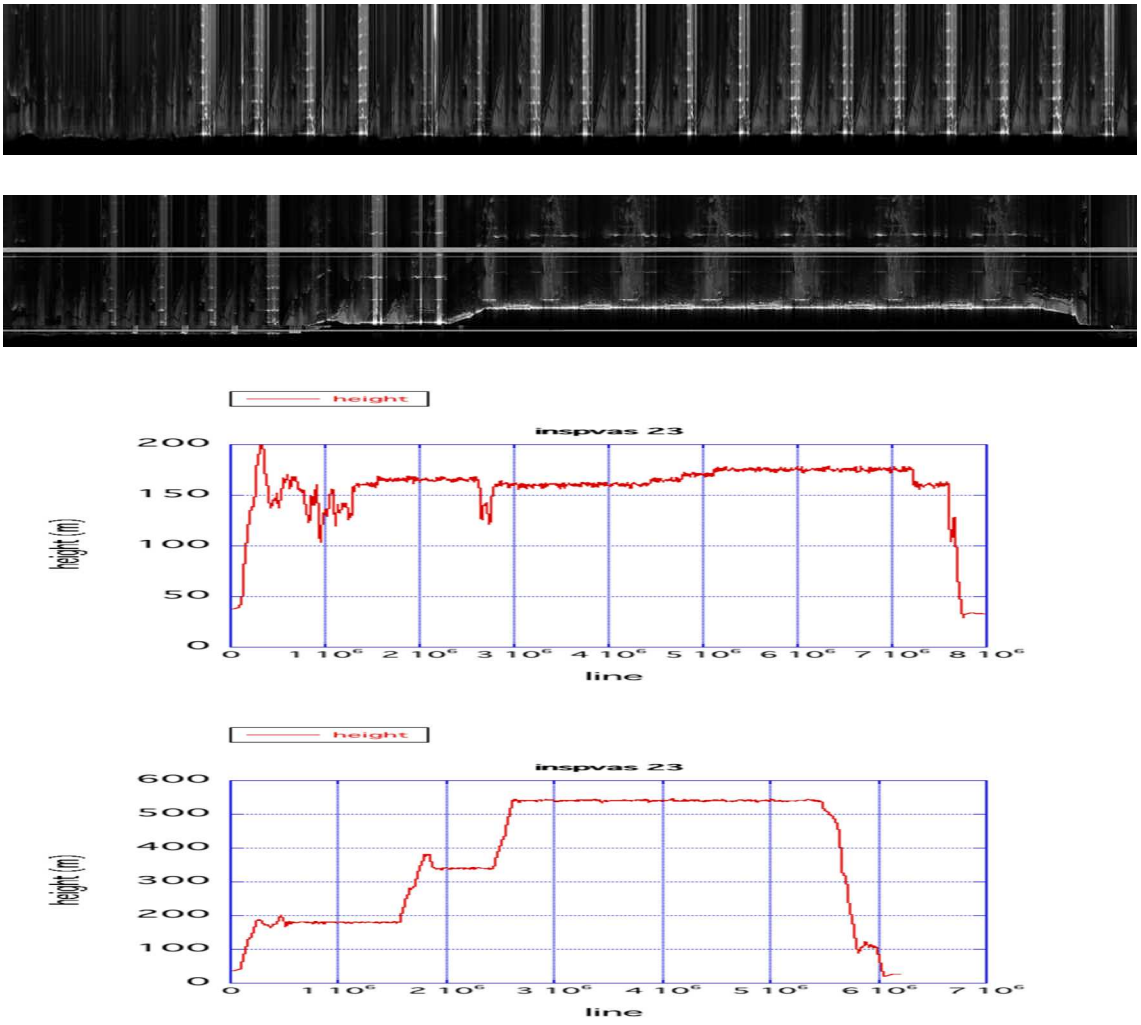


図 2.5　11月19日観測画像(上:UAVSAR1、2248 秒、150m)、(下、UAVSAR1、1751 秒、500m)

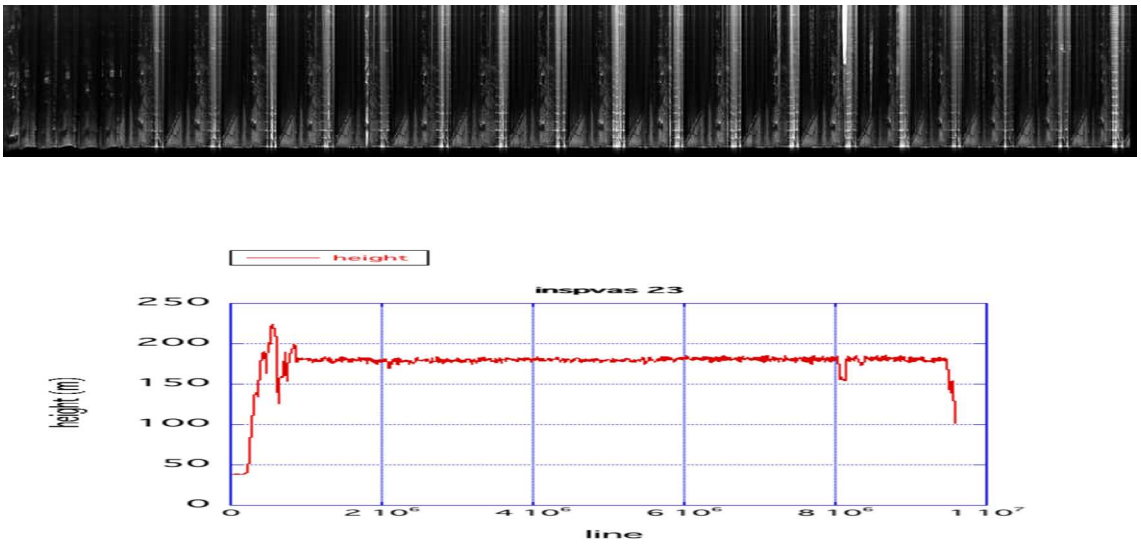
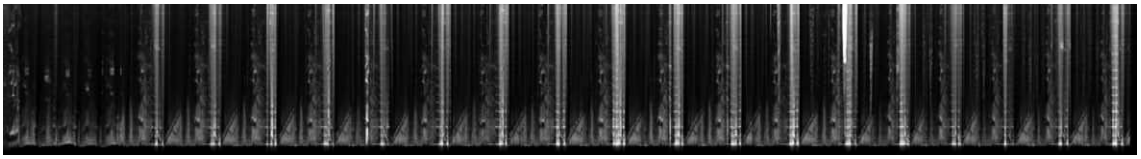


図 2.6　11月15日観測画像(UAVSAR2、2949 秒)



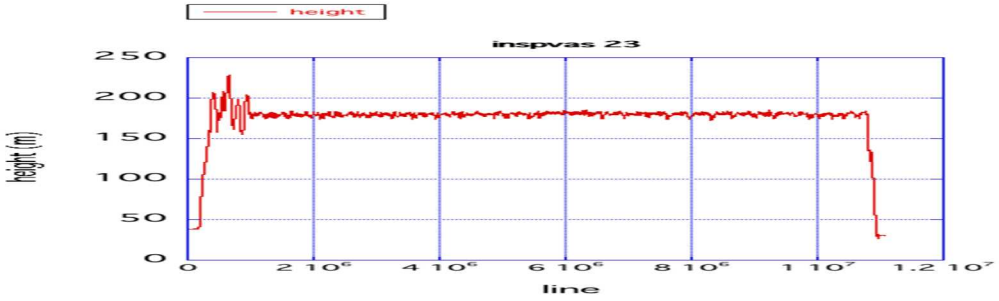


図 2.7　11月19日観測画像(UAVSAR2、2156 秒)

2) 実験機材と CR の設置

実験機材としてこれまでに四種類の CR を用意、実験に使用した。表 2.5 に各々を整理する。また、現地における CR の写真を図 2.8 と 2.9 に示す。

表 2.5　実験に使用した CR の整理

機器名	性能	注釈
1m 可動型 CR、図 2.8.a 参照 1 台	移動体の再現を目的に、一辺1m の正方形型 CR を可動レールに設置したもの、可動速度は 1 cm/s 、10cm/s 、20cm/s, 50cm/s が再現できる。反射係数は 27.3dB	2016 年の実験で使用した CR(一辺 50cm の反射鏡を滑走路南の森林内に設置したもの)の認識が困難だったために、大きさを 1m に拡大して視認性を向上させた。後述のように、2017 年 9 月の実験で十分すぎるくらいに明るく視認されたために、11 月の実験では使用しない。
50cm 可動型 CR、図 2.8.b 参照 1台	同上、反射係数は 16.3dB レール部分や可動部分は上と供用である。	2017 年 11 月の実験で使用。滑走路の近くの芝生上に設置し、後述の解析でも視認性は非常に高い。 また、11 月 19 日は場外コースにも設置(しかし、この場合は視認性は低い)
50cm 固定型 CR 図 2.8.c&d(アルミ板タイプ) 2台	反射係数は 16.3 dB である。平打ちのアルミ板を反射板にするもので、平板自体の剛性も組み上げた後の反射体の剛性も高く理想的である。また重量物のために、複数日に渡っての設置でも、環境条件の変化に強い。ただ、反射係数が16．3dB とやや小さいことが難点である。	2017 年 11 月の実験で、1 台は、滑走路南に、もう 1 台は滑走路北側に設置、いずれも南方向に開口部を設置する。 また場外コースにも設置(11 月 19 日)、しかしこの場合の CR 視認性は低い

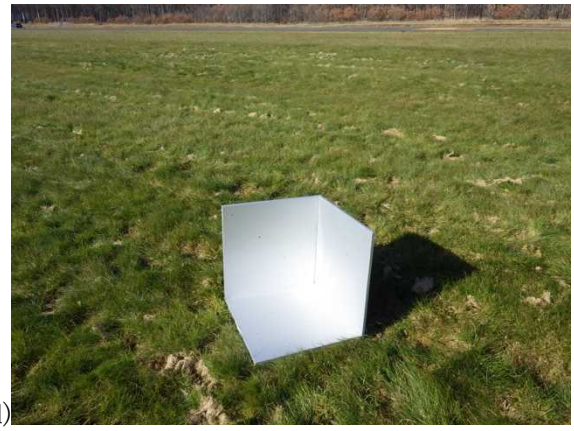
50cm 固定型 CR 図 2.8.e(アルミメッシュタイプ) 1台	1辺 50cm のアルミメッシュ 3 枚をガムテープで貼り合わせたタイプが1式、後方散乱断面積は計算上 16.3dB であるが、実際はそこまでは明るくないとの印象を受ける。複数日に渡って設置した場合、構造上軽量のために、位置が変化する可能性が高い。校正実験には使用せず、視認性の確認のみに使用。	地上監視局の滑走路を横切った南側に設置、開口部は南方向を指向 また場外コースにも設置(11 月 19 日)、しかしこの場合の視認性は低い

また、設置場所を表 2.6 に示す。

a)

b)

c)

d) 

e)

f)

図 2.8　CR 写真(a のサイズは 100cm,その他は全て50cm)f)は b)からの滑走路西方向を撮った写真

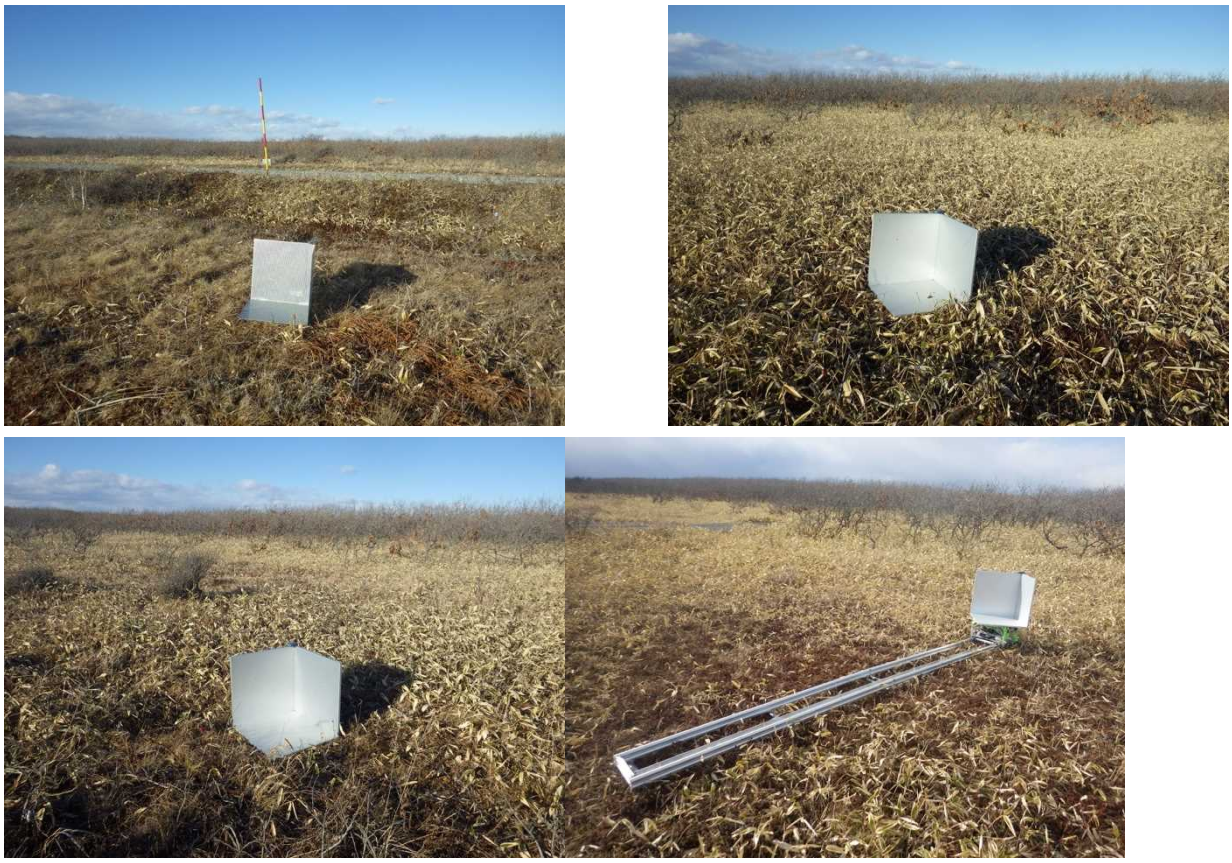


図 2.9　11月19日の場外コースにおける CR の設置

表 2.6　CR 設置位置一覧

CR#	日 日	緯度	経度
1-MCR-100cm	20170907	42.501010 N	143.447873 E
2-MCR-50cm	20171115	42.500901 N	143.447785 E
3-FCR-50cm	20171115	42.500880 N	143.447613 E
4-FCR-50cm	20171115	42.501788 N	143.447936 E
5-QCR-50cm	20171115	42.500158 N	143.444336 E
2-MCR-50cm	20171119	42.500936 N	143.447831 E
3-FCR-50cm	20171119	42.500875 N	143.447598 E
4-FCR-50cm	20171119	42.501840 N	143.448073 E
5-QCR-50cm	20171119	42.500488 N	143.445781 E

3) フライトコース外観

フライトコースは、大樹町の JAXA 航空実験所を中心として、二種類設定しており、1）滑走路に沿った、高度150mを維持する内周コースと、高度を段階的に500mまで上昇させる外周コースの2種類を用意した。（図2.10で左に見えるのが内周コース、右に海岸に沿って設定されたのが外周コースである）

図 2.10　実験箇所（場内コース（11 月 15、19 日使用）と場外コース（11 月 19 日使用））

場内コースとは、図 2.10 に示すように、JAXA 大樹町実験所の滑走路に沿った高さ 150m の周回コースである。一方、場外コースとは、海岸線に沿った、高度 500m の周回コースである。最長 1000m 程度の長さのコースをとることができる。

①－3 画質評価

ここでは画質評価について述べる。図 2.11 に示す CR の含まれる画像を合計42枚抽出する。以下には、5種類の観測データ最も画質のいい（写り具合のいい）画像を抽出したものである。

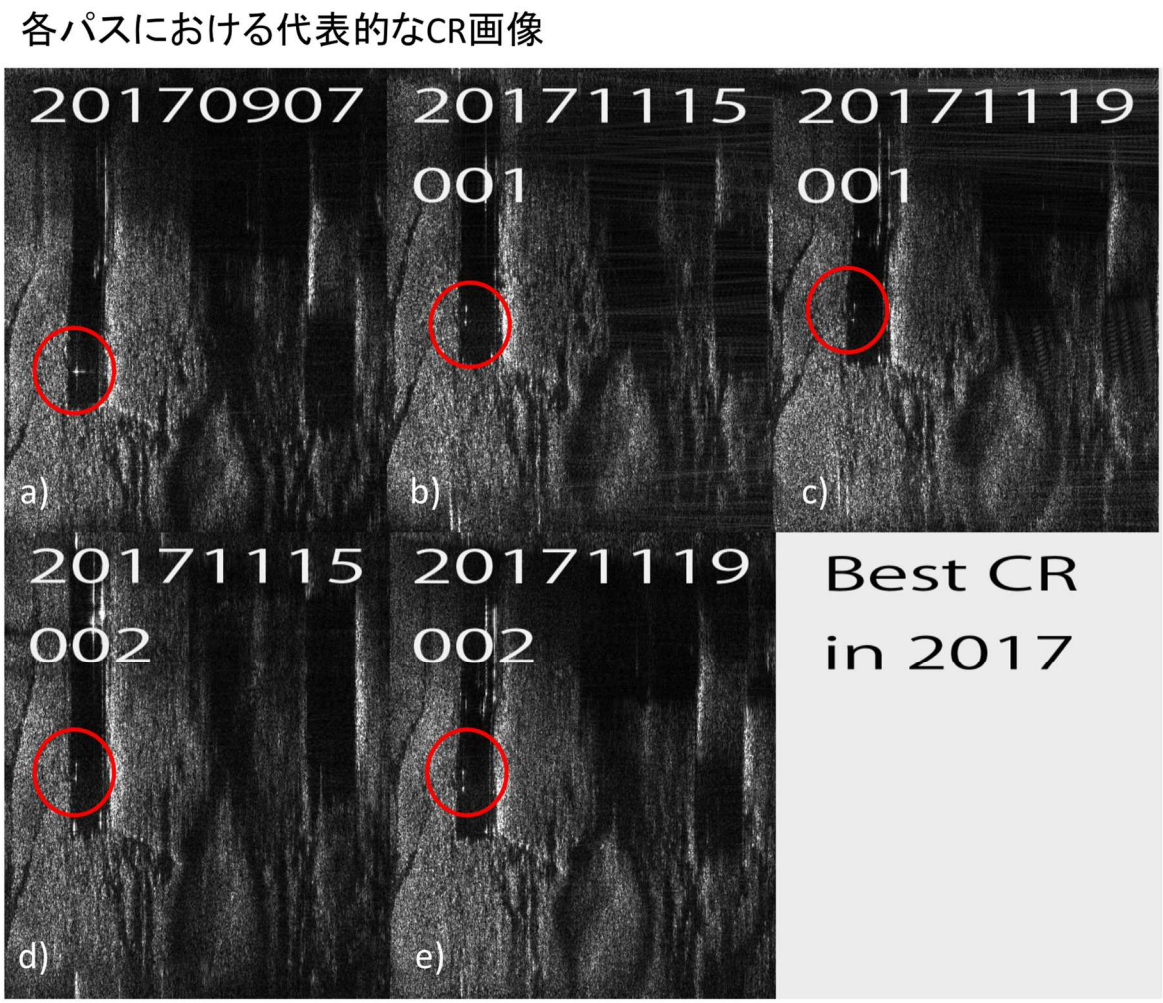


図 2.11　各々左下赤丸内が CR の映像である。図 2.11a)が他に比べて大きな白い点像を有するが、これは CR の断面積が他に比べて大きいからである。ちなみに、a)は1mCR、その他は 50cmCR である。

CR の評価は以下の各項目で行う。

1）　校正係数の算出とその安定性評価

2）　点像についての分解能評価

3）　点像の位置精度の評価

1）ラジオメトリック精度

ラジオメトリック精度しては、SAR 画像の後方散乱係数への変換係数（校正係数）を算出し、その安定性を定義する。校正係数は平成 28 年度報告書に記述したように、以下の手法を採用する。

SAR の観測画像が表現するのは地表の後方散乱係数であり、SAR の画素値（DN）は(2.10)を用いて後方散乱係数に変換される。

$$\sigma^0(dB) = 10\log_{10}\left\langle DN^2 \right\rangle + CF \qquad (2.10)$$

ここに、CF は校正係数であり、散乱係数が既知の反射体を用いて行う。(2.10)が係数の算出式である。

$$CF = \frac{\sigma}{\iint_{Area} \frac{DN^2 - DN_N^2}{\sin\theta} dA} \tag{2.11}$$

$$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \tag{2.12}$$

ここに、DN は SAR 画像の振幅値、DN_N は背景雑音に対する DN、θ は入射角、σ は CR の散乱断面積であり、一辺が 50cm の正方形、波長が 23.6cm であることから、散乱断面積は 42.30m^2(16.264dBm2)である(ただし、1点だけは 1m の CR が含まれる)。この CF が校正係数であり、本節では全部で 42 点の CR 点像を評価する。図 2.12 が 42 点の CF の分布特性である。図中 001 は UAVSAR1 を 002 は UAVSAR2 に対応する。UAVSAR1 は平均値-66.65dB(標準偏差:2.54dB)を、UAVSAR2は-71.20dB(1.52dB)を有する。2台の SAR で感度に違いが見受けられる。要求仕様が2dB であるのに対し、UAVSAR1 は仕様を 0.54dB 割っている。UAVSAR2 は仕様を満足している。2台の SAR は全く同様に製作されたはずであるが、約1dB ほどバラツキ及び利得に差が認められる。本来は、CR のエネルギー保存のために同じ値をとるものと思われるが、図に見られるようにばらつく。これは、積分領域以外にも高輝度のエネルギーが含まれた可能性がある。

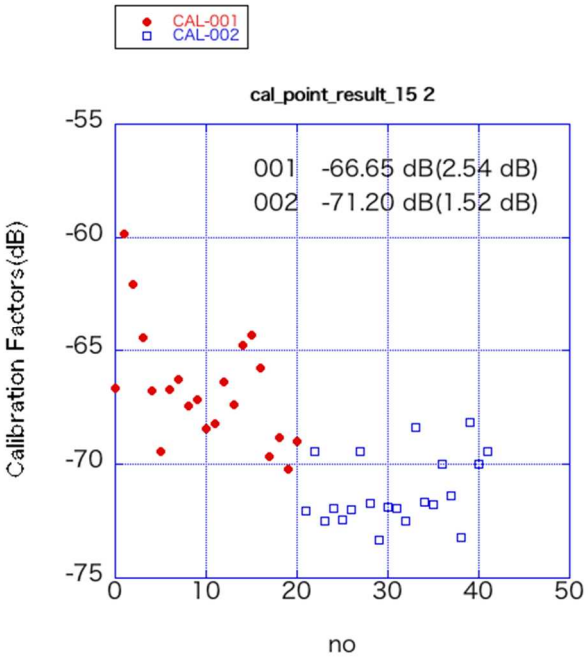


図 2.12 CF の分布関数。赤丸は UAVSAR1、青四角は UAVSAR2 に対応する。縦軸は校正係数(dB)、横軸は観測データ

2)点像の分解能評価

点像のレンジ方向、アジマス方向の応答関数を分析し、3 デシベル降下点における両方向の幅を求め、これを空間分解能とした。また、空間分解能を 42 点について分析し、その平均値や標準偏差を求めた。また、代表点については、アジマス断面や、レンジ断面を求めてその応答性を図示した(図 2.13)。この結果、代表点に関する IRF はアジマス、レンジ方向ともに良好な立ち上がり特性を有している。アジマス方向

の分解能は 1.67m（標準偏差が 0.97m）、レンジ分解能は 2.2m（標準偏差 0.39m）でともに仕様を満す。

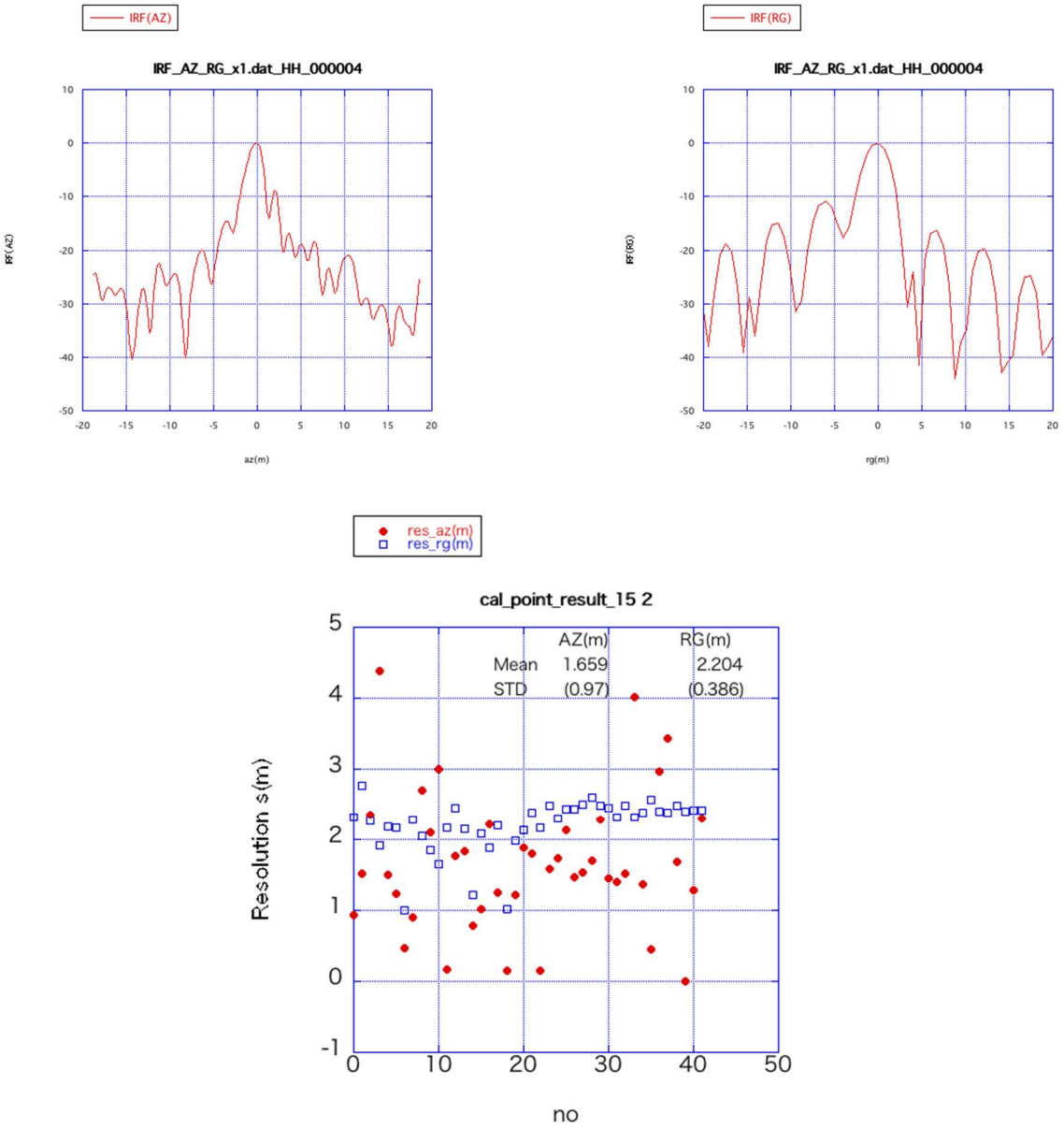


図 2.13 分解能評価結果、1）上段左：特定の CR に対するアジマス方向の応答特性（横軸は m）、2）上段右：特定の CR に対するレンジ応答特性、3）下段：42点の CR に対するアジマス分解能（赤丸）とレンジ分解能（青四角）の分布

3）ジオメトリック精度：

CR の位置情報と SAR 画像から得られる位置情報の平均残差として以下を得る。42点の CR の東西方向誤差、南北方向誤差、距離をそれぞれ、dx,dy,ds として図 2.14 に示す。この結果、平均で 11.9m となる。10m の仕様を約2m 割っている。ただ、標準偏差は 7.8m であり、原点調整などで 10m 以下することは可能である。

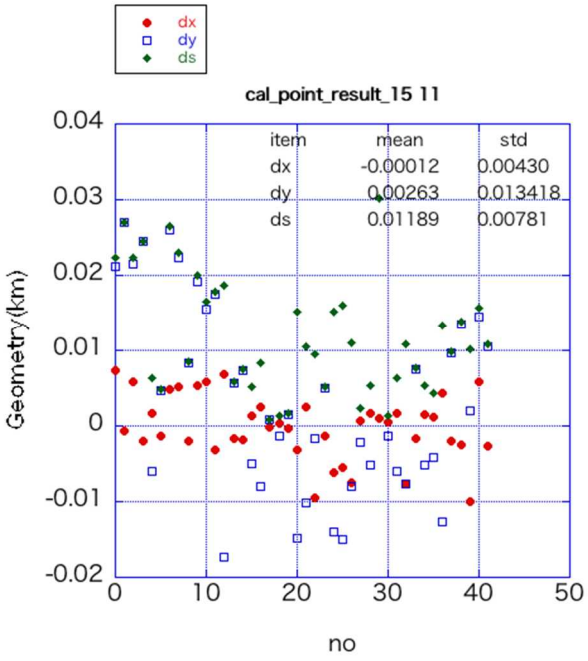


図 2.14　CR の位置精度（X は東西成分、Y は南北成分、S は距離、単位は km）

これらの結果、2017 年度において取得した SAR 画像の校正精度と表 2.6 を以下を得た。この結果、ラジオメトリック精度は UAVSAR1 と UAVSAR2 で異なっていること、UAVSAR2 は安定な特性を示すことが確認された。CR の分解能は、2 台の SAR ともに良好な分解能を有することが確認された。ジオメトリック精度についてはやや仕様値を割るものの、良好な特性が確認できた。

表 2.6　校正結果

項目	計測値	コメント/仕様	コメント
ラジオメトリック精度 校正係数と安定精度(dB)	−66.65(2.54)　UAVSAR1 −71.20(1.52) UAVSAR2 −68.93(3.10)　全部	2dB 以下	データ数 21 データ数 21 データ数42
分解能(m)	アジマス方向　1.659(0.96) レンジ方向　2.204(0.386)	<2m <3m	データ数42
ジオメトリック精度(m)	11.89(7.81)	<10m	データ数42

①−4　MTi-G と SD の比較

UAVSAR に搭載した IMU には二種類ある。単独測位タイプの MTi-G と2周波測位タイプの SD である。前者は、GPS 衛星の測位信号を受信し、航空機の位置速度、姿勢などを計測するセンサ、後者は GPS の2周波数の L1/L2 を受信し、実験の近隣の基準局の情報を用いて、高精度に位置決定をするものである。前者は、約 100Hz で計測し、後者は約 50Hz で計測する。」前者の絶対位置精度は不明であるが、数メートルと言われる。後者は、Kinematic（株）にローデータをアップロードし、処理され次第処理済みデータがダウンロード可能にな

るもので、仕様書によると位置精度は8mm とされる(処理方法の詳細について問い合わせを試みたが、8mm と答えるのみでそれ以上の情報は得られない)。

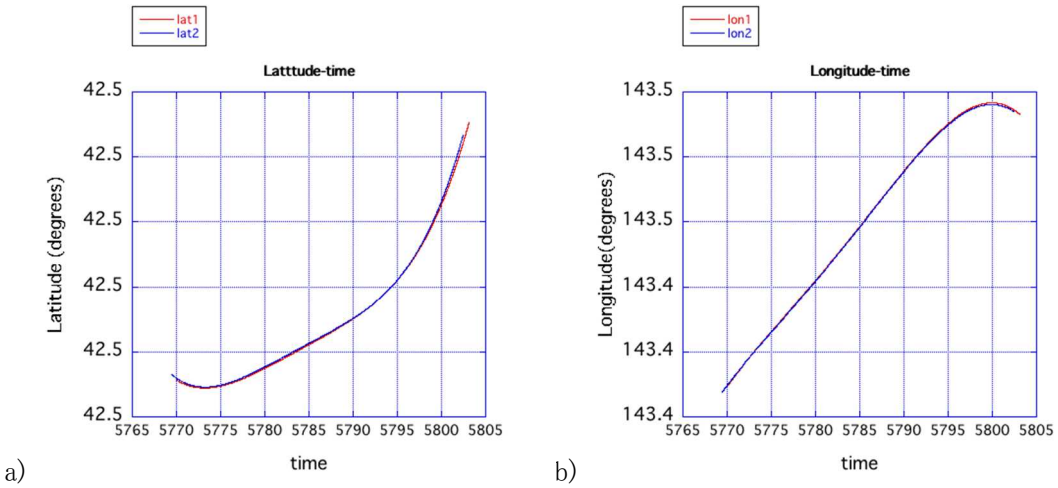
今回の実験では、以下の情報について比較した。

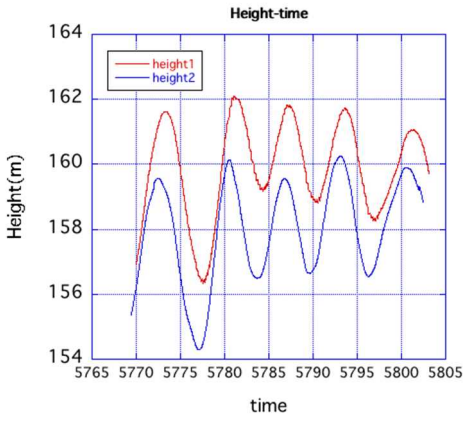
1) 両者の受信状況
2) 両者の位置情報の違い
3) 両者を利用しての画像の比較。

1) 受信状況については、両者ともに非常に良好である。単独測位は SAR 信号との干渉は全くなく、すべての情報が受信される。一方、後者は SAR の送信帯域幅を 55MHz に削減し、L2 信号帯から外したことによって、L1/L2 ともに問題なく受信されている。

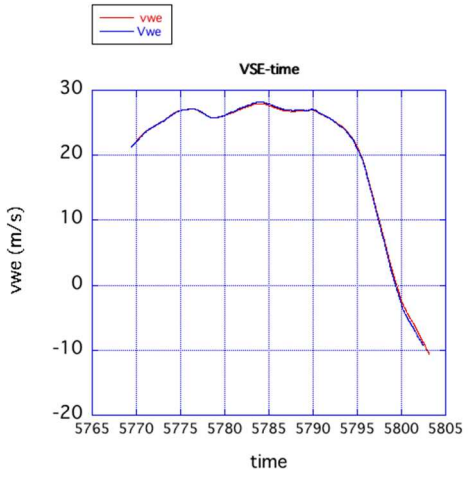
2) 両者の位置情報の違い。今回の観測データのすべてにわたって、MTIG/SD の情報をは得られている。ここでは、2017 年 11 月 15 日のデータについて比較を行った。図 2.15 に緯度、経度、高さ(楕円体高)の比較を示す。緯度、経度ともに非常に高い反復精度を示す。しかし、高度については、定常的に約2m の残差が生じている。その他速度データについては、水平成分は大差ないが垂直成分に差が残留、また、姿勢成分についてはピッチ成分には少し、ヨー成分に非常に多くの残差が残っている。ヨー成分については、センサごとに定義が多少異なるので仕方ないかもしれない。

3) 画像の比較を図 2.16 に示す。20171115-001-005 の画像を使用した。RD-MTIG を a)、RD-SD を b)、TD-MTIG を c)そして TD-SD を d)に示す。概ね差はないが、特に RD 方式が良好な結果を示す。この結果から特に、SD だからこそ分解の精度が向上したとの感触は得られてない。なお、MTIG の計測値はステップ状に変化し、約 50 サンプルを用いた移動平均により滑らか処理が行われる。ただ、後で紹介する干渉処理において一部良好な結果が、SD の処理において確認されたことから、SD が優位性を有するとの感触を得る。

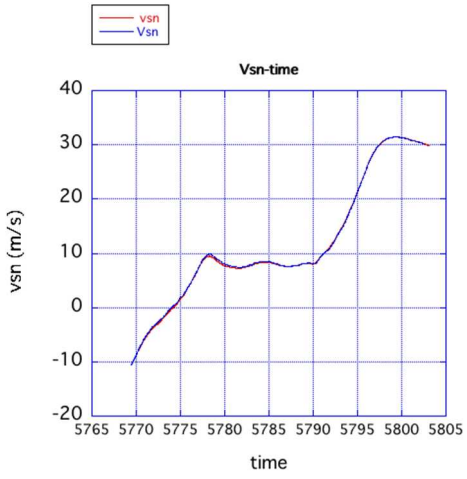



Height-time
height1
height2
Height(m)
164
162
160
158
156
154
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

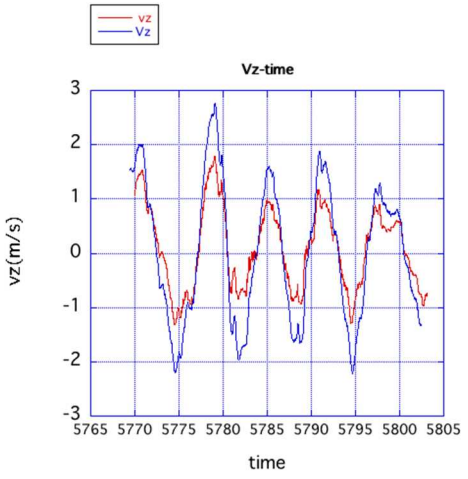
c)


vwe
Vwe
VSE-time
vwe (m/s)
30
20
10
0
-10
-20
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

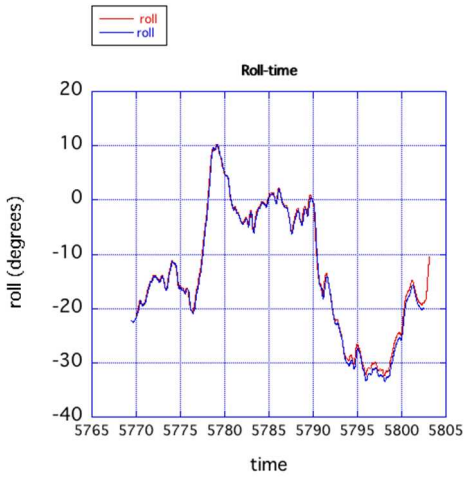
d)


vsn
Vsn
Vsn-time
vsn (m/s)
40
30
20
10
0
-10
-20
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

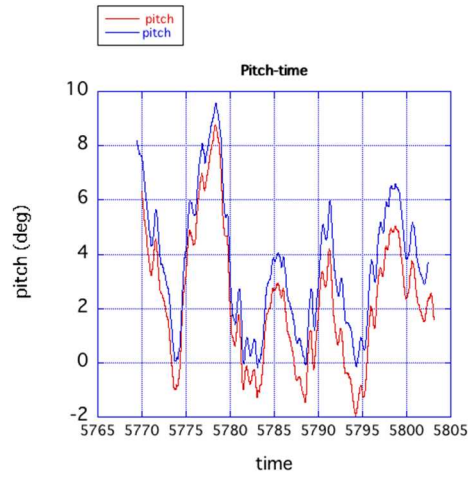
e)


vz
Vz
Vz-time
vz(m/s)
3
2
1
0
-1
-2
-3
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

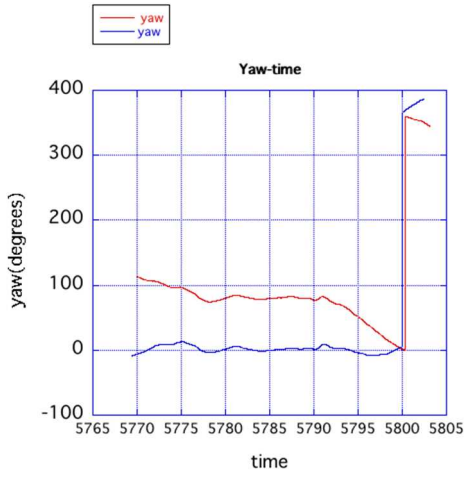
f)


roll
roll
Roll-time
roll (degrees)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

g)


pitch
pitch
Pitch-time
pitch (deg)
10
8
6
4
2
0
-2
5765 5770 5775 5780 5785 5790 5795 5800 5805
time

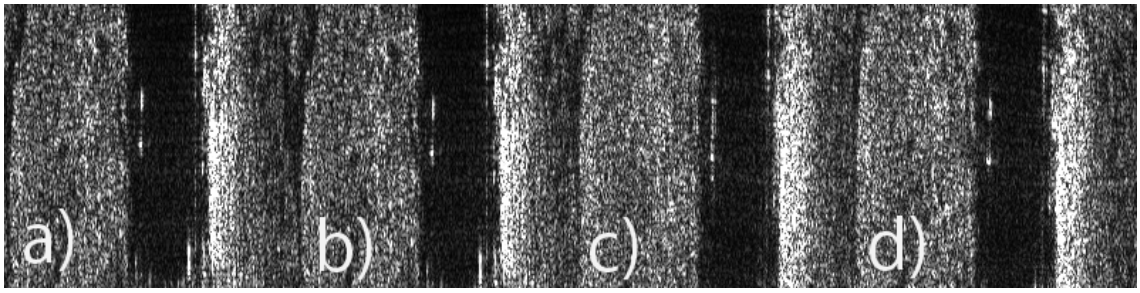
h)



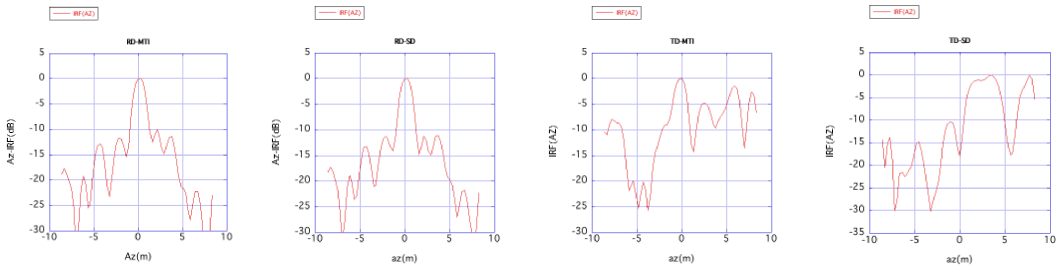
i)

図 2.15 a) 緯度、b)経度、c)高さ、d)東西速度、e)南北速度、f)垂直速度、g)ロール角、h)ピッチ角度、i)ヨー角度の1シーン内の変化、ここで全グラフともに横軸は、観測日の通算秒である(UTC 表現: Universal Time Coordinate:世界標準時)。

処理方式(レンジドップラー(RD)-時間領域(TD)、MTi-G - SDの比較)



a) RD-MTIG, b) RD-SD, 3) TD-MTIG, 4) TD-SDの処理の比較。
全体的に同様な画像を得る。他の事例を比較すると、RD-SDが良好な結果をしめす。



11

図 2.16 a) RD-MTIG, b) RD-SD, 3) TD-MTIG, 4) TD-SD の処理の比較。各図の下に描くのは、点像応答である。

①－5　干渉処理

本 UAVSAR の干渉処理は基本的に繰り返し干渉 SAR であり、同じ観測対象物を連続して2回観測しその間の位相差を計測する。処理方式については、昨年度報告書で述べた通りであり、本年度はこれまでの実験で得た観測データから干渉処理を行った結果を整理する。処理流れを図 2.2 に示す。干渉処理は 4lookx2nr とした。

以下の 6 種類について調べる。また、その結果を合わせて結果欄に記入した（表2．7参照）。

表 2.7　干渉に使用したデータ詳細と結界一覧

ケース	観測日＋観測内容	CR	結果
1	20170907。1機、繰り返し干渉観測、場内コース、150m高度、Bw=55MHz	1m　CR　固定	高い干渉性、位相がうねる
2	20171115、001系の２連続データ、場内コース、150m高度、合計4CR, 、Bw=55MHz	50cm　CR固定	高い干渉性、位相がうねる
3	20171119、001系の２連続データ、場外コース、500m高, 、Bw=55MHz	なし	高い干渉性、地形上の干渉縞検出
4	20171119、001系と002系の干渉処理、場内コース、150m高度、合計4CR, 、Bw=55MHz	50cm　CR固定	高い干渉性、Bpが大きい）
5	20171115、001系の２データ、場内コース、150m高度、合計4CR（002（固定）と006（1cm/sで移動）を使用, 、Bw=55MHz	５０ｃｍＣＲ1cm/sで移動	高い干渉性、しかし、速度は検出できず
6	20161120,001系の２データ、場内コース、150m,Bw=85MHz	自然地形	高い干渉性、位相がうねる

また、処理環境を表 2.8 に示す。注）UAVSAR1 は 001、UAVSAR2 は 002 である。

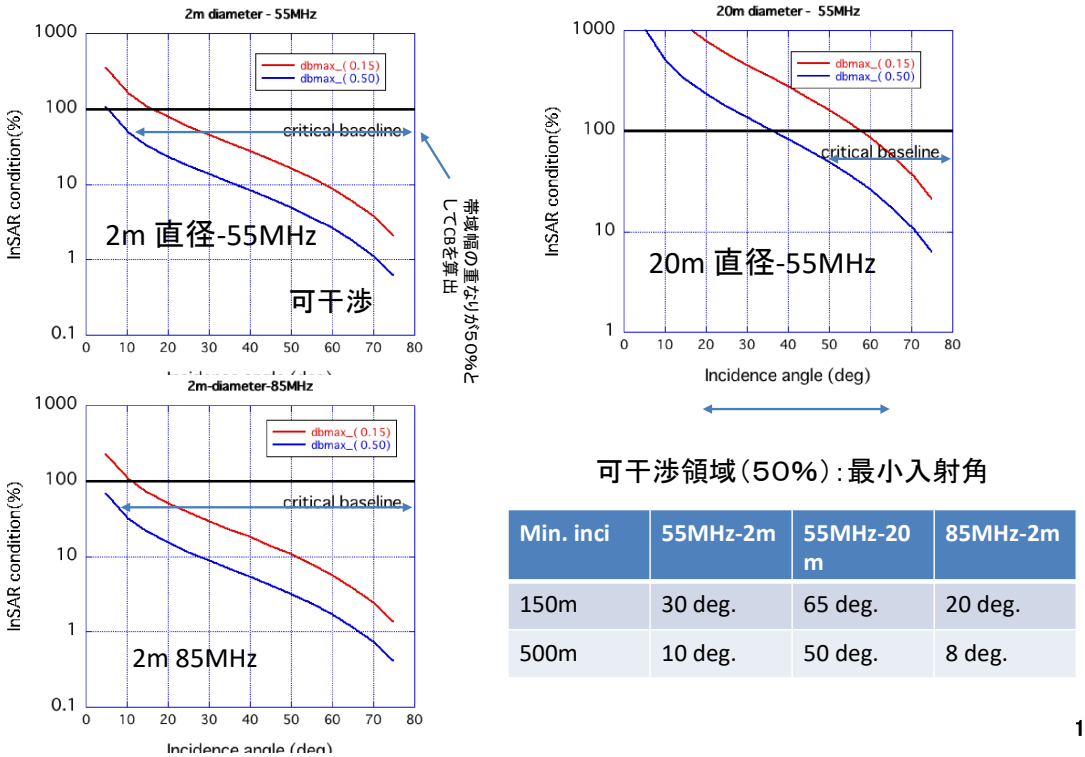
表　2.8（処理環境）

干渉処理概要	ハードウェア
FMCW-RD 型の SAR 処理。SD，MTi-G の軌道情報を使用。良い方を用いる（SD　がやや良好）。ハミング窓関数を適用する方が干渉性は向上する。しかし、計算は、二種類を使用。 国土地理院 10mDEM 使用。2x4look 処理、WG filter、高次位相除去フィルター適用	Linux　CENT OS, machine 32GB memory

①　－6　解析結果

今回の実験では GPSL1/L2 の受信精度を向上させ、その結果として位置決定精度を向上を狙った。反面、帯域幅を55MHz に減少せざるを得なくなり、クロストラックインターフェロメトリとしての干渉条件がどう変わるかを調べる必要性が生じた。これを干渉条件の解析として、図2－17に結果を示す。帯域幅として 55MHz と 85MHz の二種類を試した。また、ケース4に対応する事例として Bperp=20m の場合も計算した。3事例を紹介

する。グラフの縦軸は、干渉条件として二つの軌道間の周波数差を帯域幅で除したもの、すなわち2観測データがどれくらい離れているかを示したものである（数値が大きいほど離れることを示す）。各事例ともに赤字（高度150m での軌道間隔）と青字（高度500m での軌道間隔）は入射角とともに単調減少する。今、帯域幅の50%離れたところを臨界基線長(critical baseline)とすると、それよりも小さい干渉条件で2データは干渉することが期待できる。そのように見ると、左上の図では、高度500m では入射角10度以上で干渉する、高度150mでは干渉が厳しくなるものの、入射角30以上で干渉することが期待される。干渉条件は、このように帯域幅や高度、入射角、さらには2航空機の垂直方向の隔たりにも依存することとなるが、本解析から、55MHz にすることで、干渉条件がど厳しくなったことが理解できる。以下の右下の表は、これら3事例に関する干渉可能な最小入射角を示したものである。



Min. inci	55MHz-2m	55MHz-20m	85MHz-2m
150m	30 deg.	65 deg.	20 deg.
500m	10 deg.	50 deg.	8 deg.

15

図 2.17 干渉条件と帯域幅の関係を示したもの、ここで干渉条件とは2データのオーバーラップする帯域幅を SAR の帯域幅で除したものを%表示したもの、左上から Bperp が2m で帯域幅が 55MHz、右上が Bperp が20m で帯域幅が 55MHz、左下が Bperp が2m で帯域幅が 85MHz（H28 年度実験のケース）に対応する。

合計6ケースの処理結果を図 2-18 から図 2-29 に示す。各図ともに二種類の処理を行なっている。右肩に20180326 とあるのが、本研究で最も精度が高いと思われる処理、20180202 とあるのが、やや精度面で落ちる処理処理結果である。

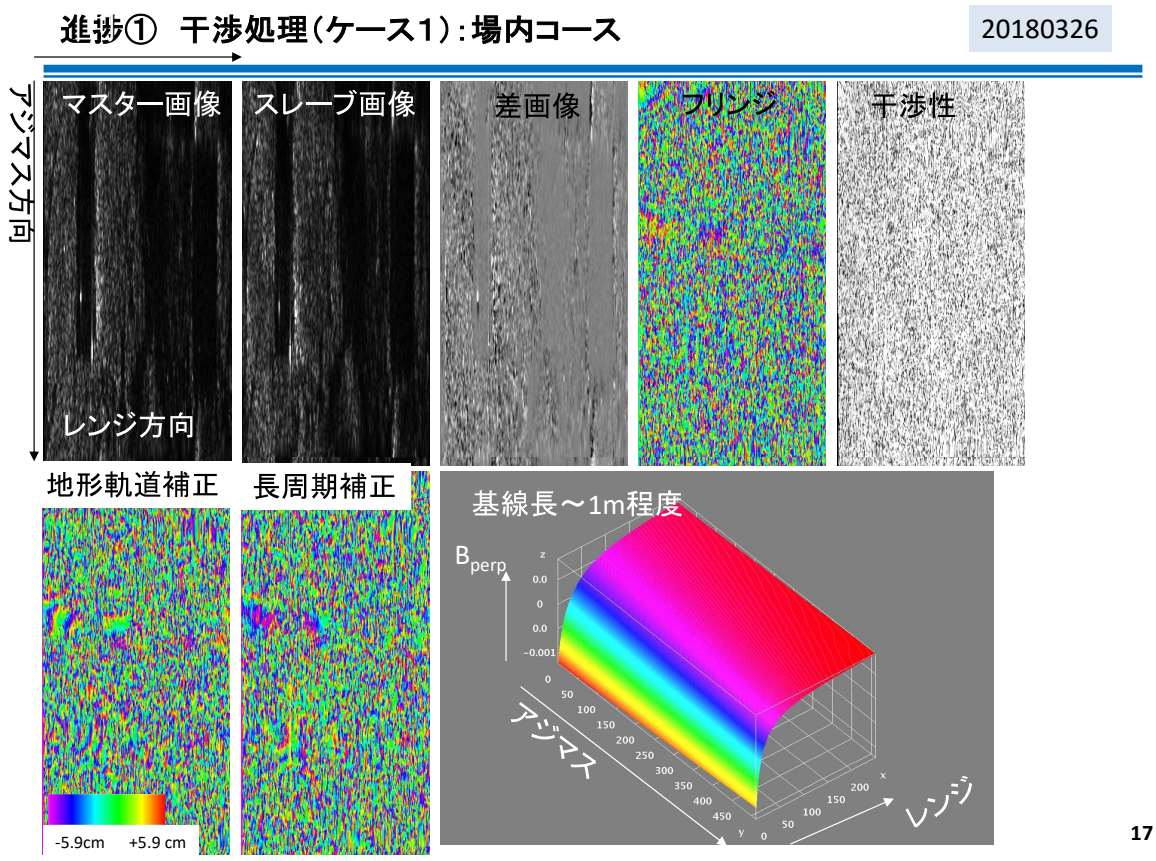
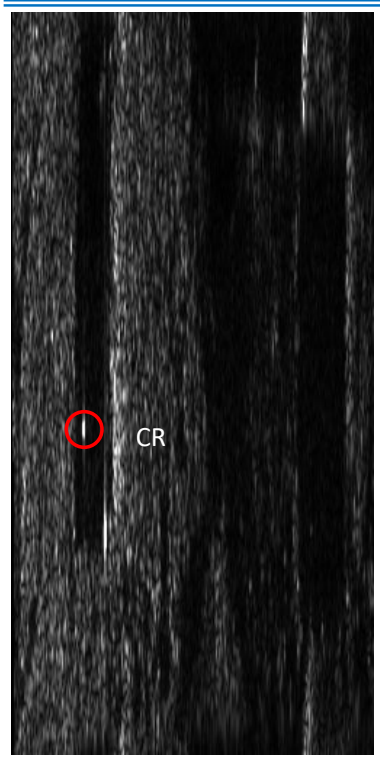
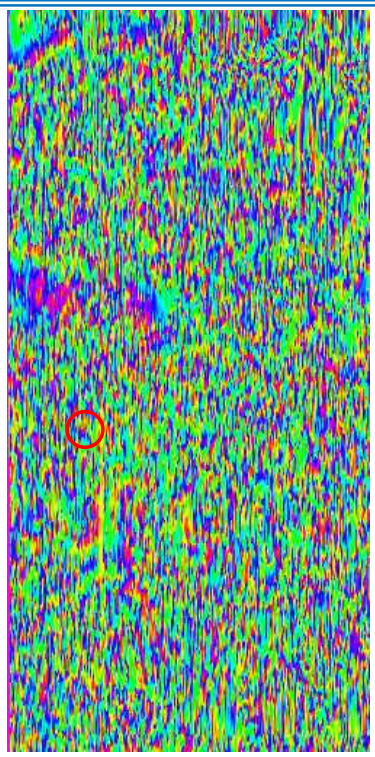


図 2.18 ケース1：左上より右に向かって、マスタ画像、スレーブ画像、両者の差画像、フリンジ（2.6）、干渉性

(2.9)、左下より右に向かって、差分干渉図(2.7)'、主成分を取り除いた差分干渉図((2.7)'を FFT 解析し高次周波数を除去したもの)、Bperp の3次元図を示す。特に、振幅画像と差分干渉図を再度示したものが以下である。Bperp の3次元図は奥から手前にアジマス方向、右方向にレンジ方向、縦方向に Bperp を取っている。その他の画像は全て、上から下へアジマス方向、右にレンジ方向を、差分干渉図はカラーコードを示すが、360度を虹色で示し、色の一サイクルが半波長に対応する。以下の図には、判例を省くが、本例と同様な表現である。

進捗① 干渉処理（ケース1-1：拡大図：静止CR）：場内コース 20180326





CR付近の拡大図

全面的に干渉。

CRは静止体であり、本来、位相は周辺物と変化なし。

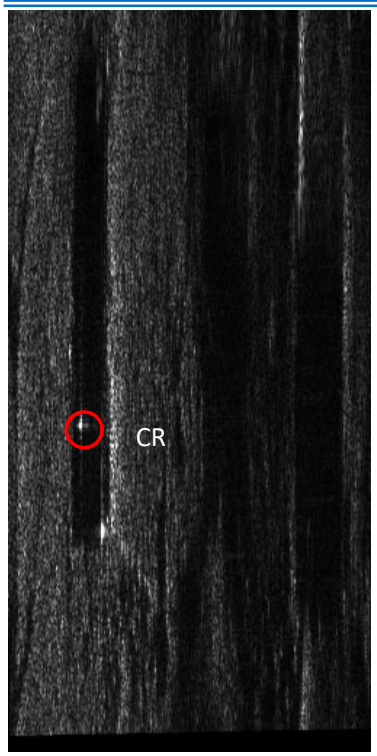
画像全体で干渉を確認。また、連続的な位相変化を確認。

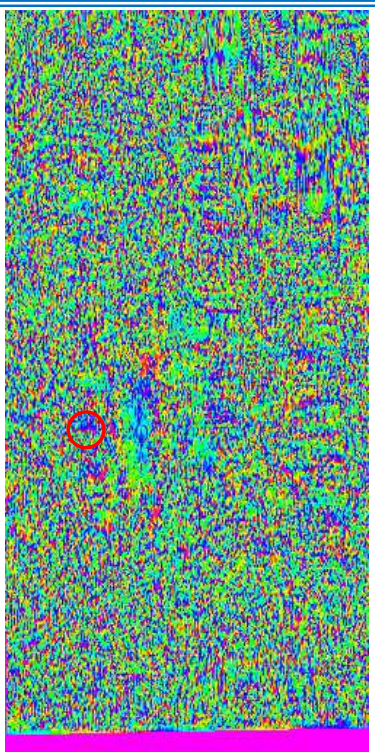
うねりを確認。

考えられる理由として、航空機軌道の不正確性、帯域幅が狭いことなど。

18

進捗① 干渉処理（ケース1-1：拡大図：静止CR）：場内コース 20180202





CR付近の拡大図

部分的に干渉。

CRは静止体であり、本来、位相は周辺物と変化なし。

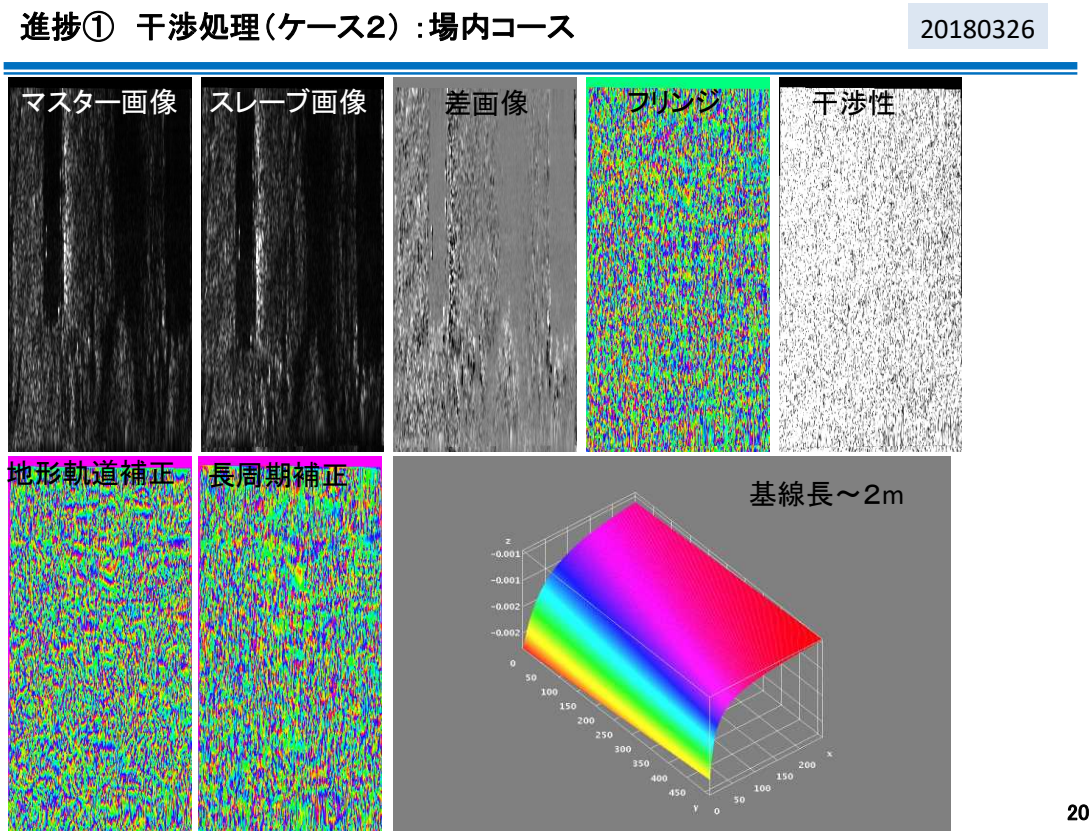
滑走路を中心として干渉位相を確認。

本来見えないはずのうねりを確認。

考えられる理由として、航空機軌道の不正確性、帯域幅が狭いことなど。

19

図 2.19　マスタ振幅画像と差分干渉図を示したもの。



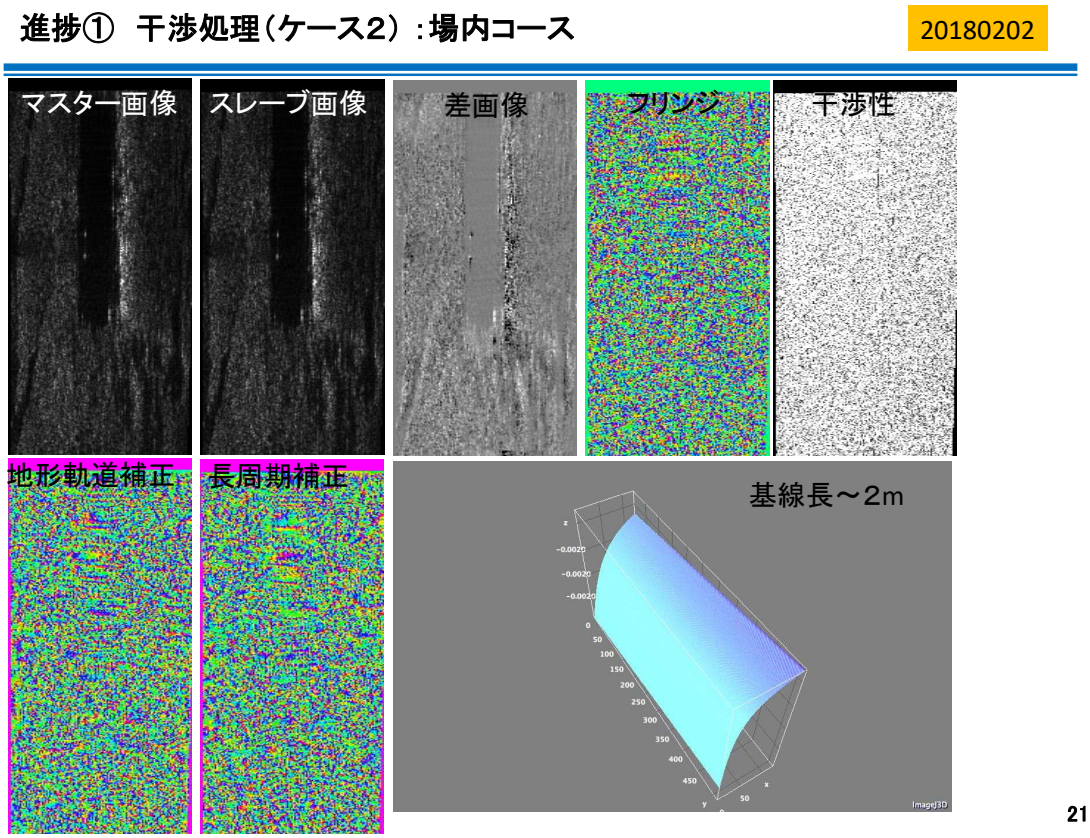
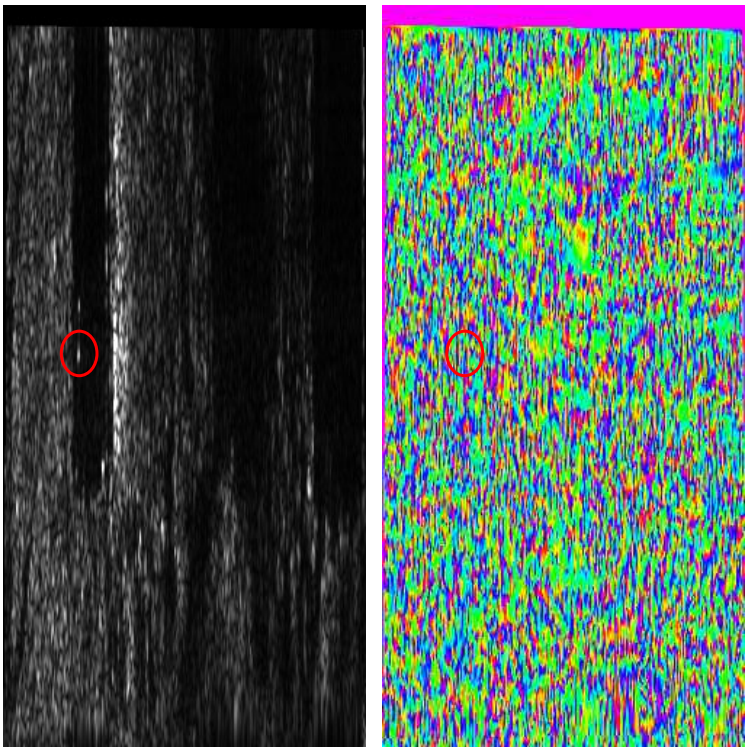


図 2.20 ケース2の事例：20171115001(UAVSAR1)データの干渉処理

上と同様に全体俯瞰図を以下に添付する。

進捗①　干渉処理（ケース2-1）：場内コース

20180326



ケース1と同様に全面で干渉

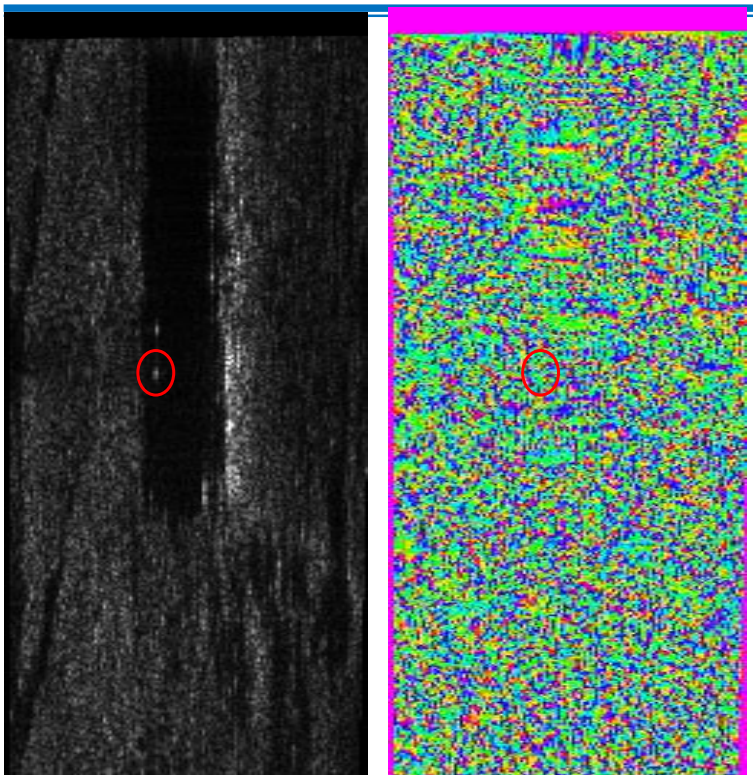
滑走路と森林で区別なく干渉位相が見られる。

位相画像内にCRと周りの違いなし

22

進捗①　干渉処理（ケース2-1）：場内コース

20180202



ケース1と同様に滑走路上で干渉を確認

多少のうねりを確認

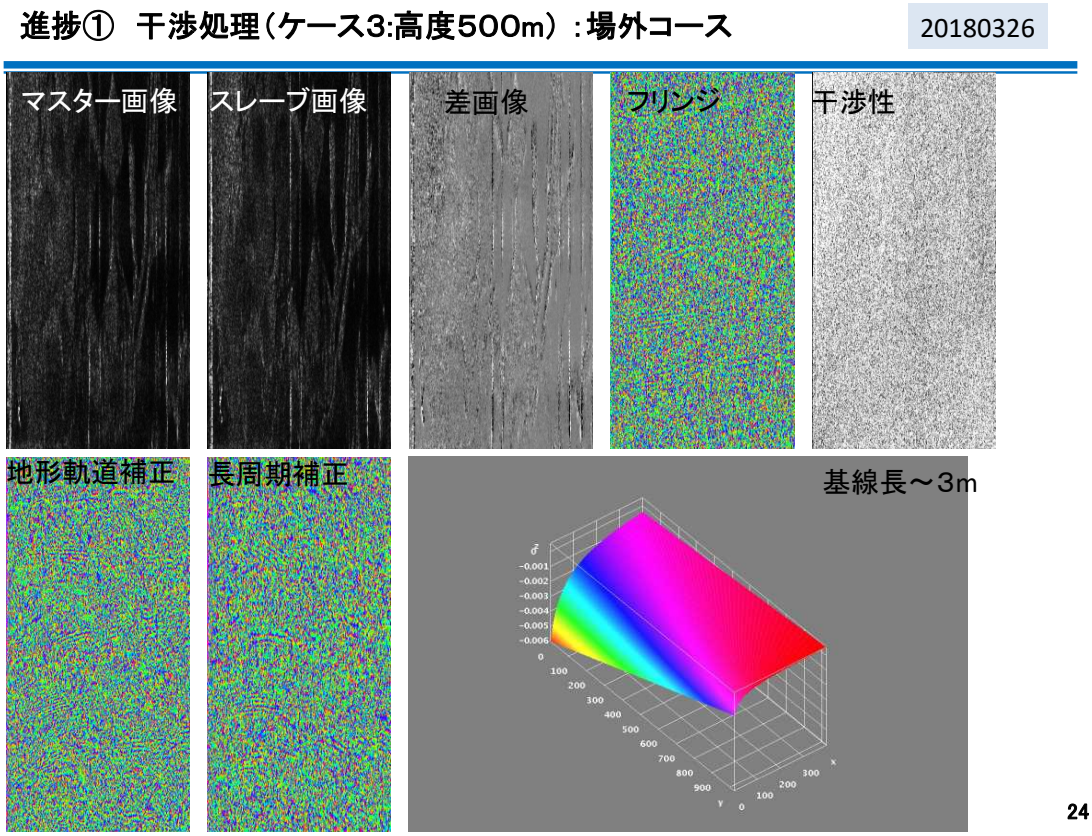
位相画像内にCRと周りの違いなし

しかし、ごま塩状の位層変動を確認

23

図 2.21 ケース2の事例：20171115001(UAVSAR1)データの干渉処理（拡大図）

ケース3：高度500m の場外コース繰り返し干渉処理



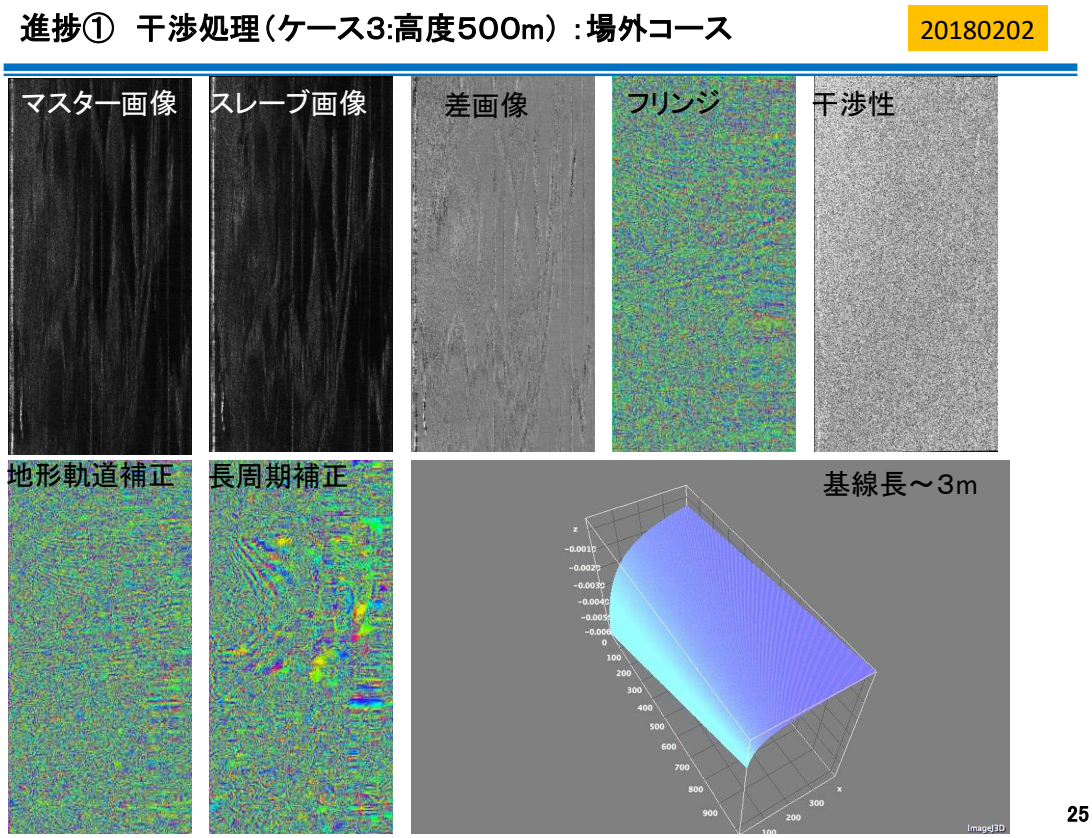
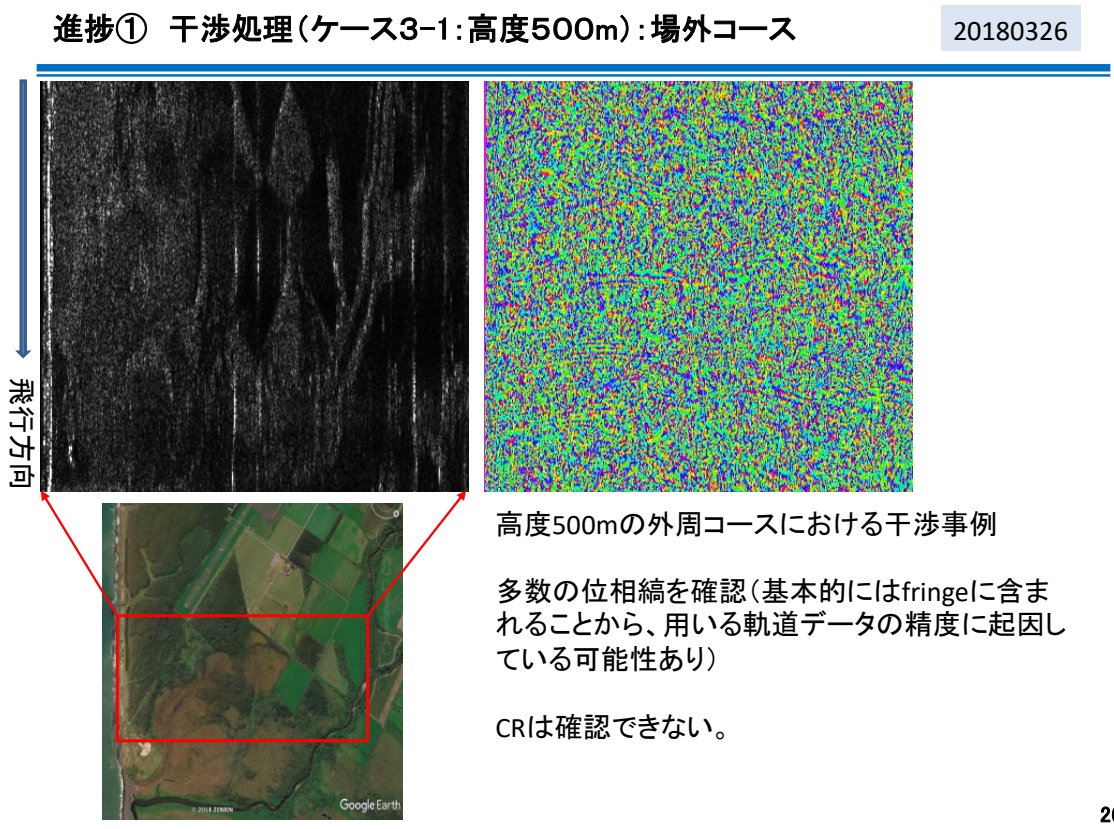


図 2.22:ケース3の事例（高度500m の場外コース繰り返し干渉処理）



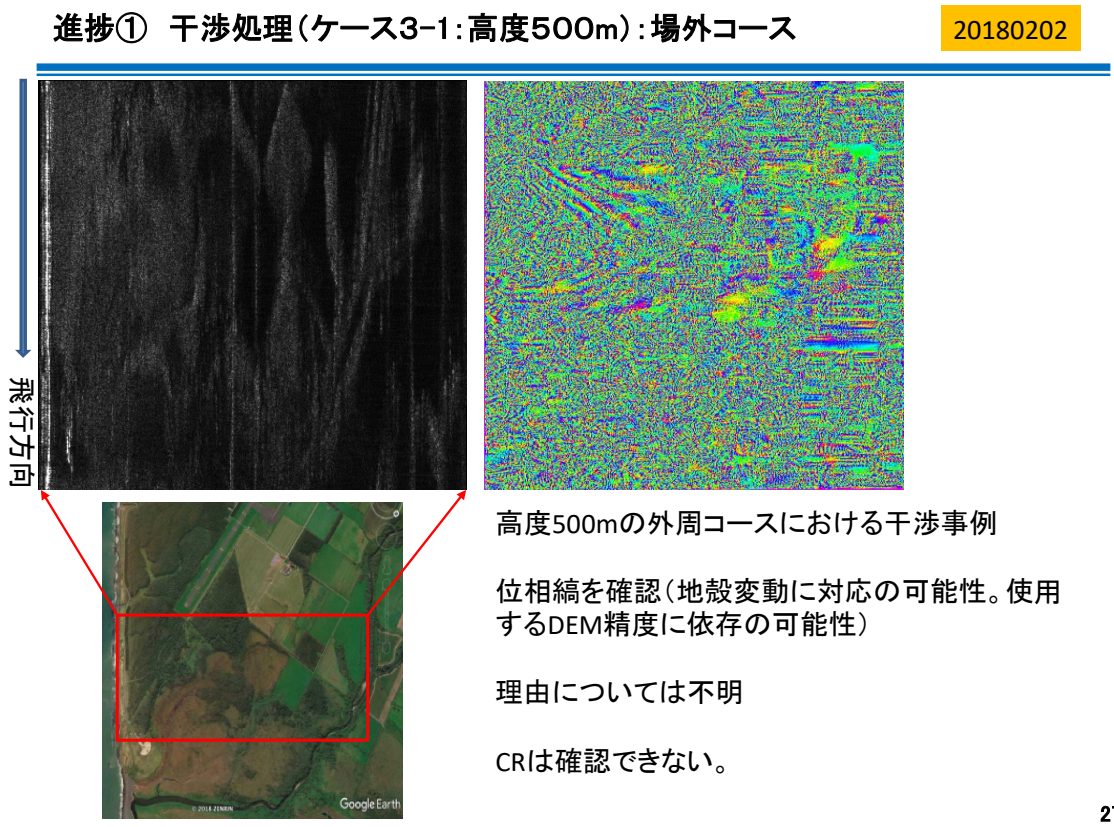


図 2.23:ケース3の事例（高度500m の場外コース繰り返し干渉処理）

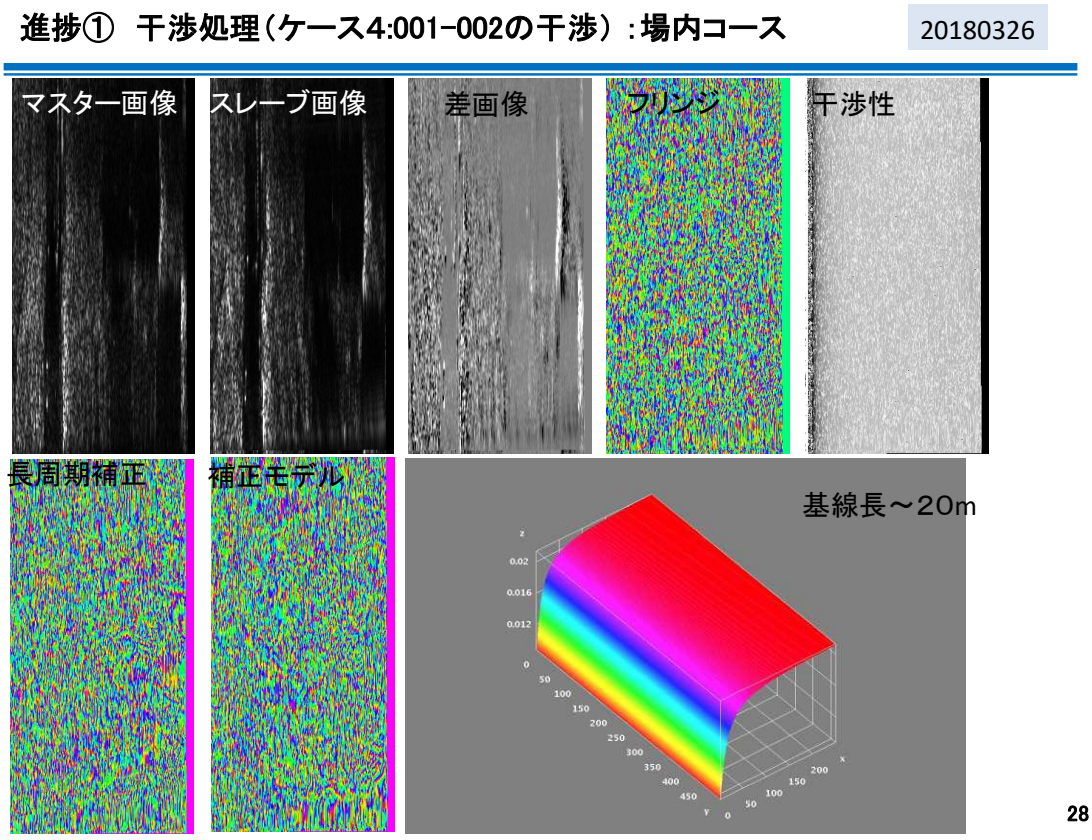
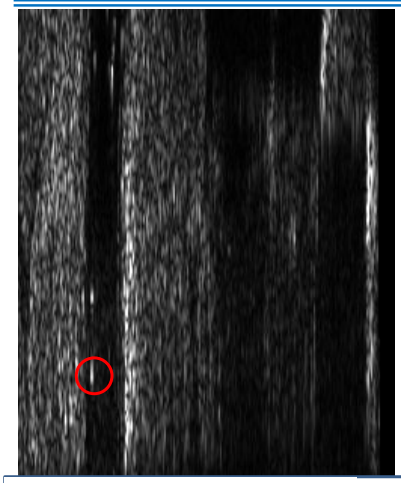
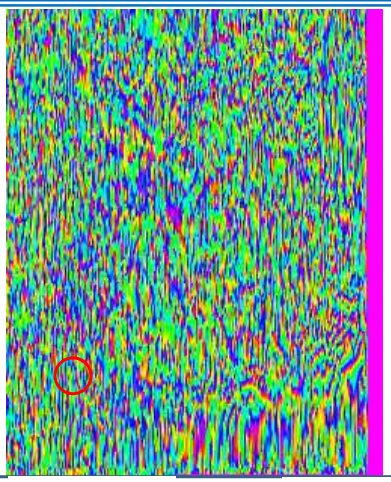


図 2.24: 2 機の編隊飛行による干渉観測、150m

進捗①　干渉処理（ケース4-1 :001-002の干渉）：場内コース　20180326





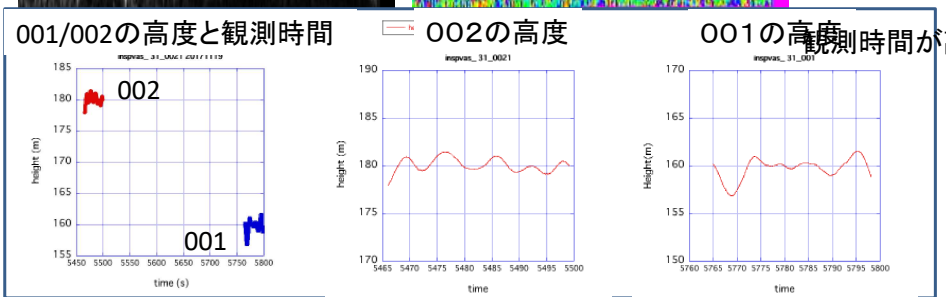
2機のデータによる干渉性を確認する実験

本来の観測方式

全体的に干渉していると思われるものの、位相変動が大きく、解釈不能

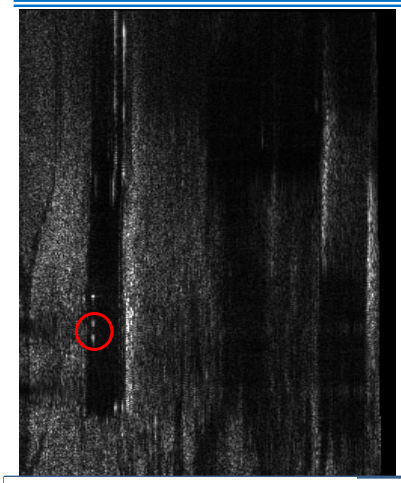
最大の理由は：2機の基線長が20m以上離れている。

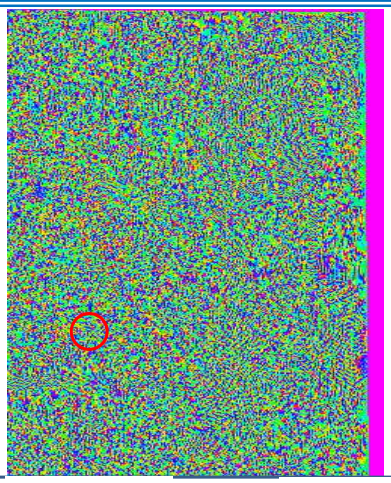
観測時間が離れすぎる



30

進捗①　干渉処理（ケース4-1 :001-002の干渉）：場内コース　20180202





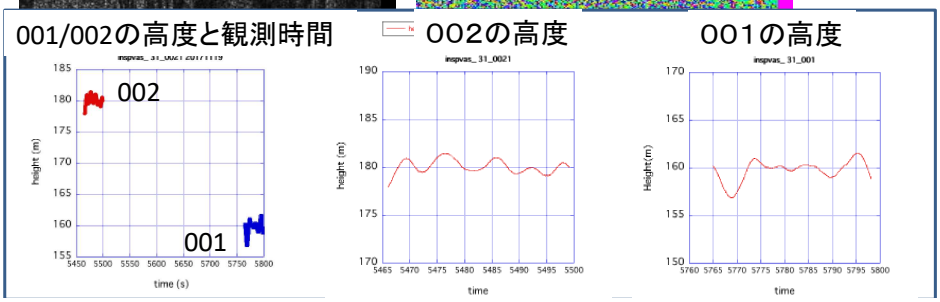
2機のデータによる干渉性を確認する実験

本来の観測方式

一部干渉箇所も見られるが、解釈不能

最大の理由は：2機の基線長が20m以上離れている。

観測時間が離れすぎる



31

図 2.25: 2 機の編隊飛行による干渉観測、150m（拡大図）：下図の x 軸は当該日の通算秒である。

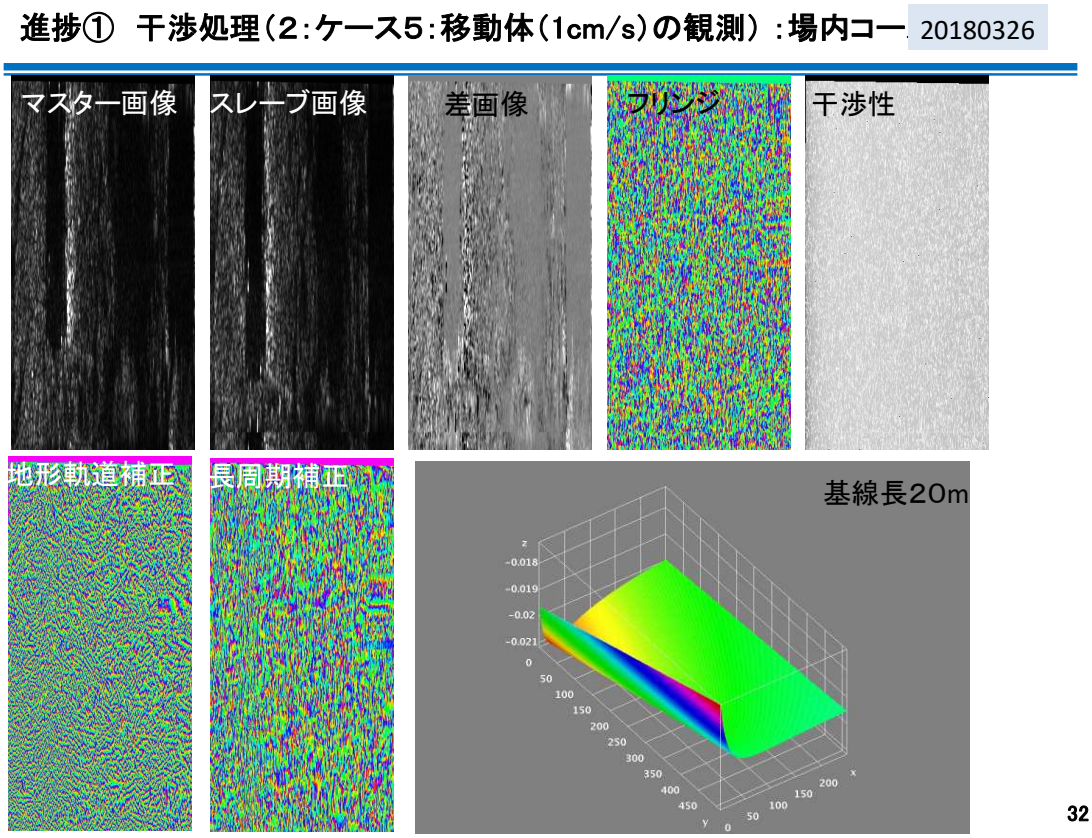
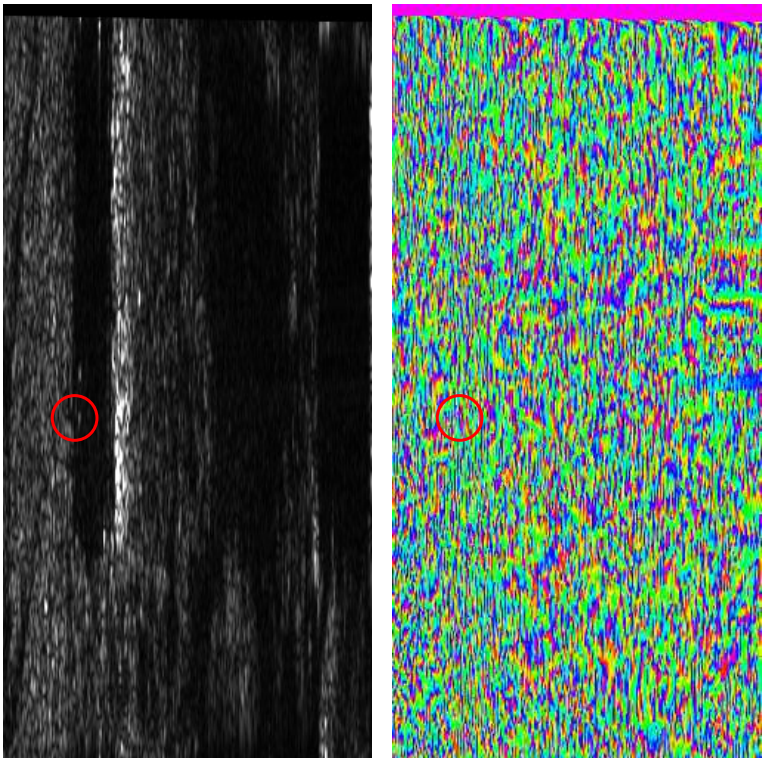


図 2.26: ケース5:同一機による移動体観測

進捗①　干渉処理（ケース5-1 ：移動体（1cm/s）の観測）：場内コー 20180326



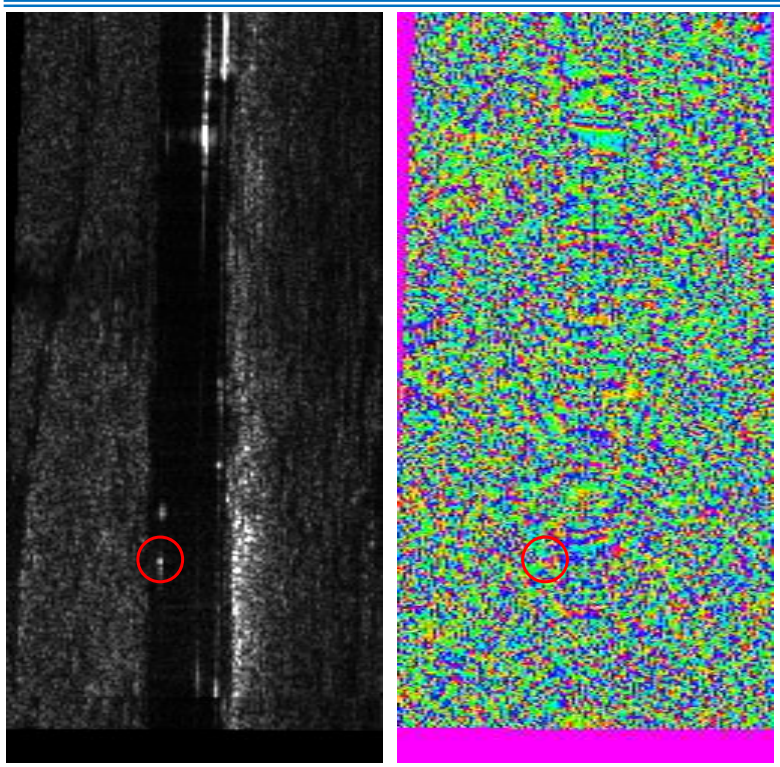
Masterを固定体、スレーブを移動体（1cm/s）で駆動

実験の最終に移動させたものであり、干渉処理は、002の画像と006の画像を用いた。その結果、2画像全面で干渉する。

ただ、速度移動に関する解釈は困難

34

進捗①　干渉処理（ケース5-1 ：移動体（1cm/s）の観測）：場内コー 20180202



Masterを固定体、スレーブを移動体（1cm/s）で駆動

実験の最終に移動させたものであり、干渉処理は、002と006を用いた。その結果、2機は滑走路で干渉している用にも見られる。

ただ、速度移動に関する解釈は困難

35

図 2.27: ケース5：同一機による移動体観測（拡大図）

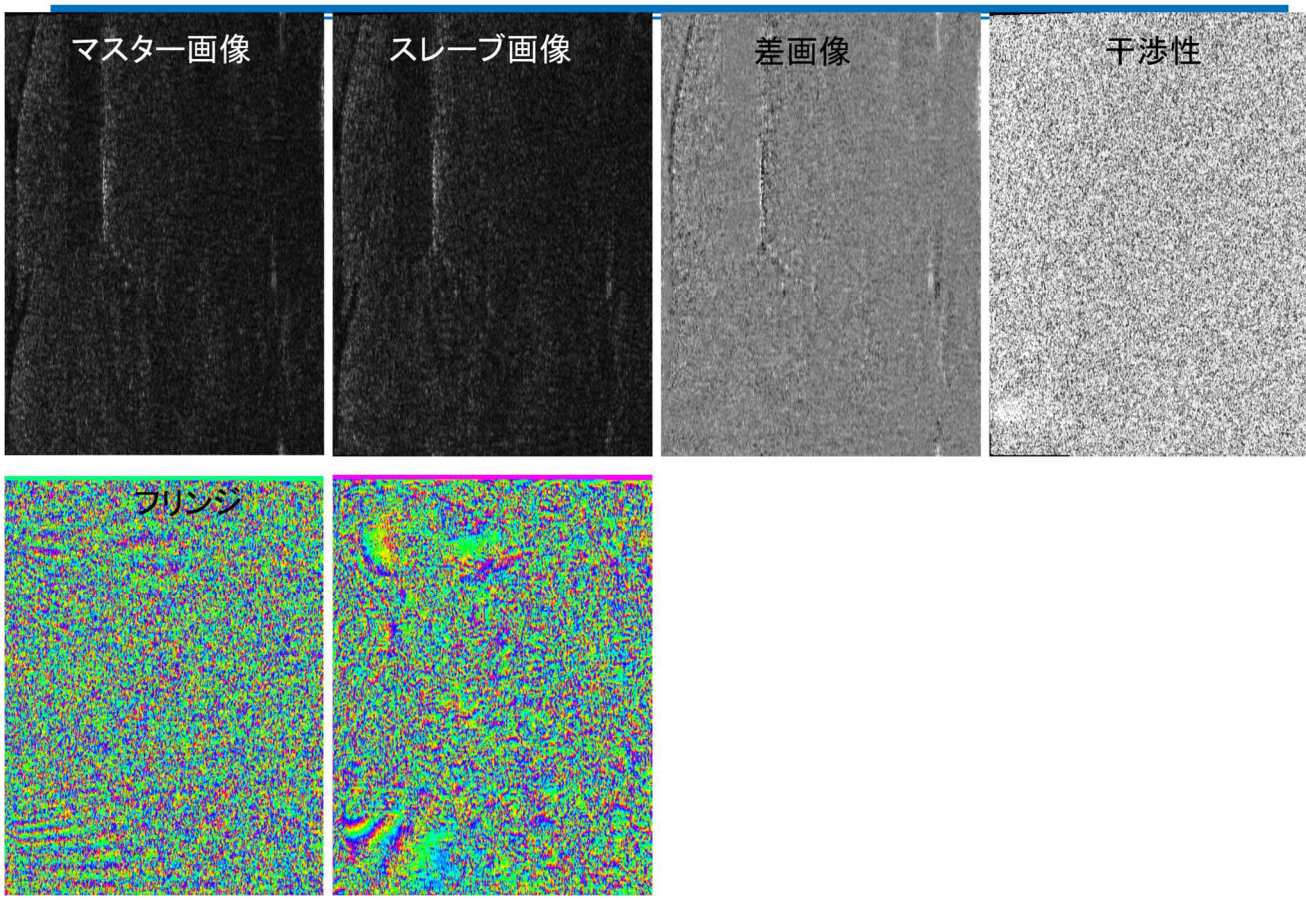


図 2-28: ケース 6:平成28年度画像の再解析

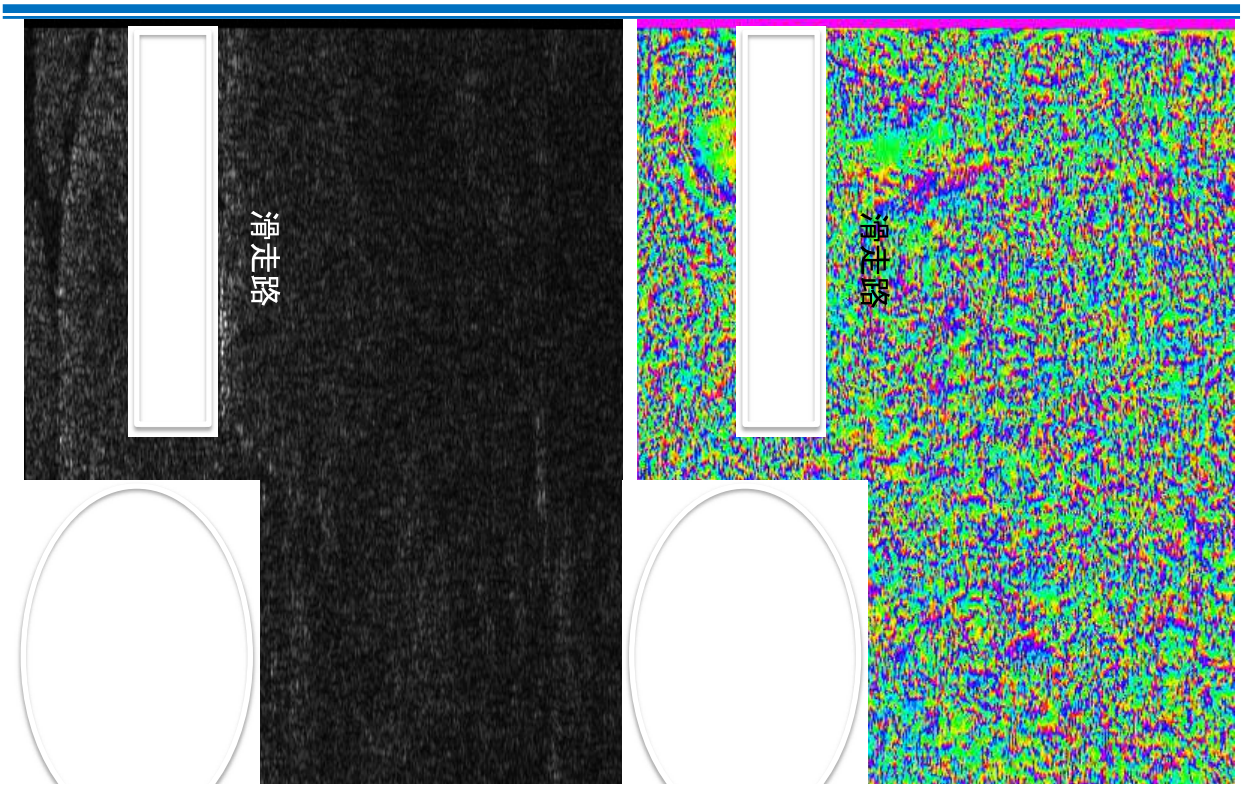
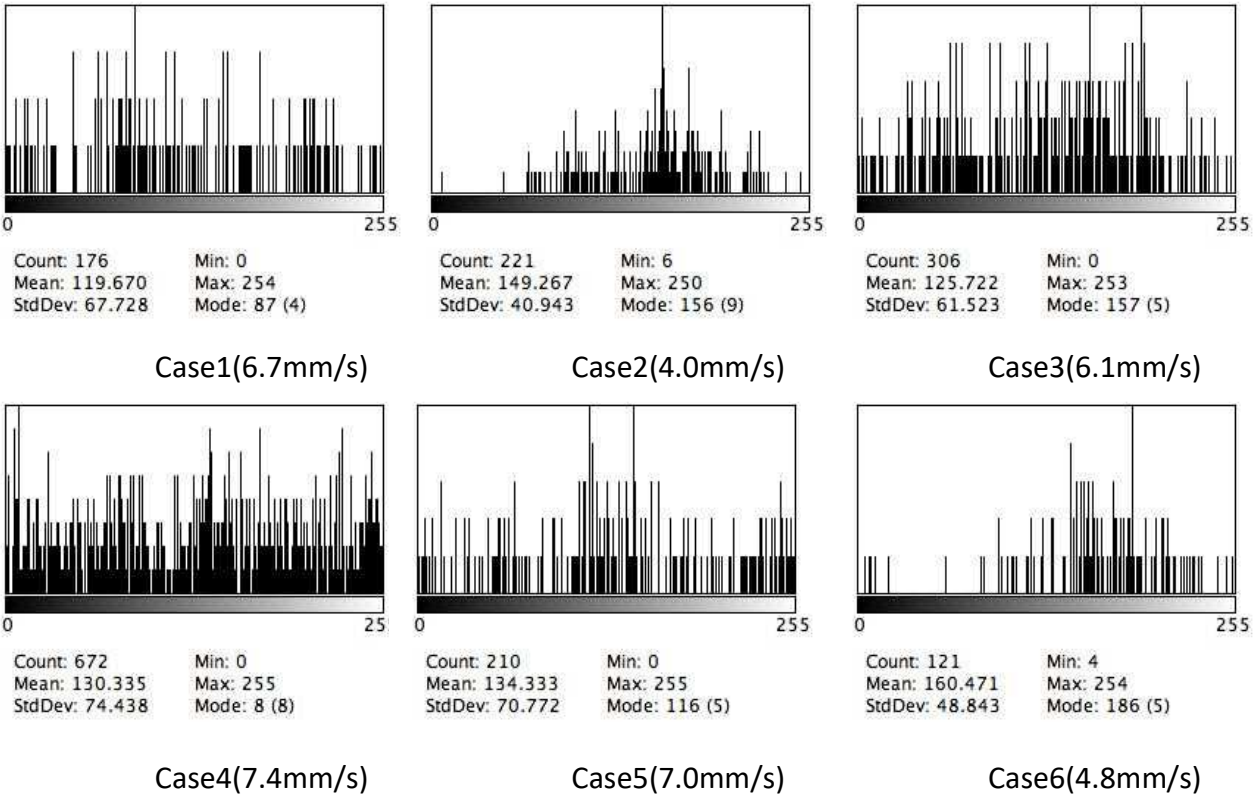


図 2.29: ケース 6:平成28年度画像の再解析(拡大図)変動が見られる

① －7位相変動

前解析では無変動対象物に対して、位相のうねりが見られた。ここでは、その変動量として位相の分布を調べ、それらが B=100m, vg=30m/s,で観測された場合の移動速度の精度を調べる。図 2.30 に CR あるいは自然物体の位相分布の調査結果を示す。又、仮想的な速度のばらつきを調べたものを表 2.9 に示す。



CR設置点における位相変動　　**B=100m, Vg=30m/s, lamda=24cmとした速度変動量**

評価点周りの位相のばらつき、それに対応する、速度変動量を表 2.9 に示す。各ず、横軸は画素値（0から255）をとるがそれは、位相差に換算して-180 度から 180 度となる。縦軸は、頻度である。

表 2.9　位相ゆらぎ量の速度変動量

ケース番号	位相変動量（標準偏差）度	速度変動量（標準偏差）cm/s
1	67.7	6.77mm/s
2	40.9	4.9mm/s
3	61.5	6.55mm/s
4	74.1	7.41mm/s
5	70.7	7.7mm/s
6	48.8	4.8mm/s
平均	61.7	6.1mm/s

①－8　まとめ

1）SAR 処理及び画質確認：
2017 年 9 月 7 日、11 月 15、19 日に得られたデータから良好に映像化された合計 42 点の点像を選別し、画質評価を実施。校正係数は 1 系で 2dB を超えるものの、2 系は 2dB 以内となり条件を満たす。分解能は仕様値を満たす。幾何学精度は、約 12 メートルと仕様値を 2 メートル超えるが、CR の標高を計測しておらず、レンジ長の調整や標高の調整で仕様内に収めることは可能である。

2）処理方式と軌道データの組み合わせ：
画像化には Range Doppler (RD)方式と Time Domain (TD) 時間方式を用いたが、処理や画質の観点で RD 方式を採用した。また、MTi-G と Spatial Dual(Post process)の軌道データについては、Spatial Dual の方が良好な結果（処理時間と画質）を示した。

3）飛行コースについて：
高度 150m の場内コースと高度 500m の場外コースがあり、画像化・解析には、それらの直線部分だけを使用。

4）CR について：
2016 年度実験では CR が暗かったことから、大型化（1m）を提案し、9月の実験で確認したところ、十分すぎる明るさが確認された。（一部、 SAR の利得調整にもよる）、SAR の利得が適正になったこともあり、50cm の CR で機能確認は十分と思われる。CAL 係数は両者で違いなし。

5）SAR について：
昨年度は利得が高めに設定しており、地面からの反射が大きすぎた。今年は、利得を小さくし、かつ AGC を使用することで、マルチパスは軽減できた。
アンテナパターンは、アジマス方向に約 60 度の半値幅を有する。この帯域幅は 200Hz であり、アジマス分解能2m を実現するために必要な帯域幅は、15Hz であり、prf3333.3Hz をこの帯域内に抑えるために、挟帯域フィルタを適用することで画像化が可能になった。また、窓関数を適用することで分解能は劣化するものの干渉性は向上した。

6）航空機について

- 航空機については同一経路に近い飛行をさせることについてはある程度目途が立ったが、旋回等による経路からの逸脱の影響を排除するためには、ある程度長い直線区間の飛行が必要となる。
- そのためには相応に広い飛行領域を覆うことのできる通信機器が 2 系統必要であり、現状よりも領域を拡大するためには通信系の見直しが必要となる。
- また機体間の距離を維持する協調制御については、機能としては確認できたが精度については課題が残る結果となった。此方についても、ある程度長い直線区間の飛行によっても改善する可能性がある。
- また機体の不具合による試験日程の遅れも最終的に問題となった。

7）UAVSAR-InSAR：

- 6 ケースともに、同一機での繰り返し干渉は、良好な干渉を得る。（理由は、処理帯域幅を狭めたことと窓関数を適用したこと）
- 同一機による実験では、周回コースを繰り返し飛行の再現精度は高く、Bperp も約1m と条件が良い。帯域幅は 55MHz・飛行高度も低く、28 年度の 85MHz の実験よりも干渉位相が乱れる。
- 高度 500m の場外コースでは、直線観測時間は約 18 秒（600m）であり、干渉縞は局所変動・地震・機器の不具合か特定できない。ただ、変動現象と思しきものを観測。
- 本来の目的の 2 機体制による移動体検出実験は、1）2 機が高さ方向に 20m 離れる、2）2 機の間隔が大幅に長い（当初の 100m を超え、時間差が約 300 秒~9000m）ためか、不干渉（最短時間は 20 秒程度があるが画像がボケる）。
- 単機による移動体観測実験では、1cm/s の移動 CR は画像内に映るも、1）振幅画像での移動も不確認（理由は、SAR を 55MHz にしたために、低分解能）、2）位相差もノイズが卓越し、認識はできない。
- SAR の繰り返し干渉は、全体的に干渉を得るものの、地物の変動に関連する結果を得ることができなかった。
- 干渉画像自身は、静止体に対してややうねる傾向はあるもののその標準偏差は小さく、B=100, 30m/s を想定すると、速度ばらつき（変動）は 1cm/s 以内に収まる。
- 平成28年度の実験データをより調整された本年度改修ソフトウェアで処理をすると、非常に明瞭な干渉縞を得ることができた、理由として、1）帯域幅が 85MHz と広いこと、2）コース変更のために軌道間隔が一定値になり、大きな干渉位相差が保持できた。ことによると思われる。

8）干渉処理結果がやや雑音を含む結果になったこと（うねりも同様）：

- UAVSAR 画像化への高度化
  - IMU の精度としてカタログ仕様値 8mm の post process を望んだが、8mm の精度が達成されたかどうか不明
  - 航空機の揺れが大型機に比べて大きい
  - RD により画像化したが、より高精度な揺れを補正する機能の開発必要性。
  - SAR 運用：高度が低すぎ、IF 帯への信号混入や不要波の影響が完全に除去できない。
- SAR ビームが広すぎ、外部からの信号混入が防げない。SAR の送信電力が低く、海洋などの移動体の観測ができない。現在1W で運用しているが、10W 程度は必要かもしれない。
- 2UAV の編隊飛行
  - ケース4において、両機の高度が約 20m 異なっており、干渉条件を満足していない。また、両機の観測時間は約 150 秒離れており、100m 離れていない。

まとめ2（29年度の実施事項）

- 高度 150m の周回飛行では、直線飛行時の SAR データを画像化し、地上対象物の認識。
- 連続 2 軌道画像のリピートパス干渉処理を行い、可干渉性を確認。

- 移動速度の検出のためには以下が望ましい。
  - 軌道決定及び維持精度に改善。
  - 高高度(500m 程度)か

- 次年度への反映事項。
  - 無人航空機
    - GPS の高精度化:機上受信機能の強化(GPS L1/L2 波の確実な受信)　済み
    - GPS 受信機のアンテナ中心位置への設置　済み
    - GPS の RTK 制御(Bperp～1m の実現)
  - SAR:帯域フィルタ／内部発振のないことの確認　済み
  - 飛行方法
    - ナディアエコーの無いフライトコースの選定(陸上):高度500m　済み
    - 人工対象物の含有　済み
  - 映像化アルゴリズム
    - 地形位相の除去　済み
  - 校正サイト(移動コーナーリフレクタ)
    - 裸地を選定(画像の暗部:大樹町海側湿地帯)　済み

図 2.30 は同様 SAR による画像化、干渉処理の事例。

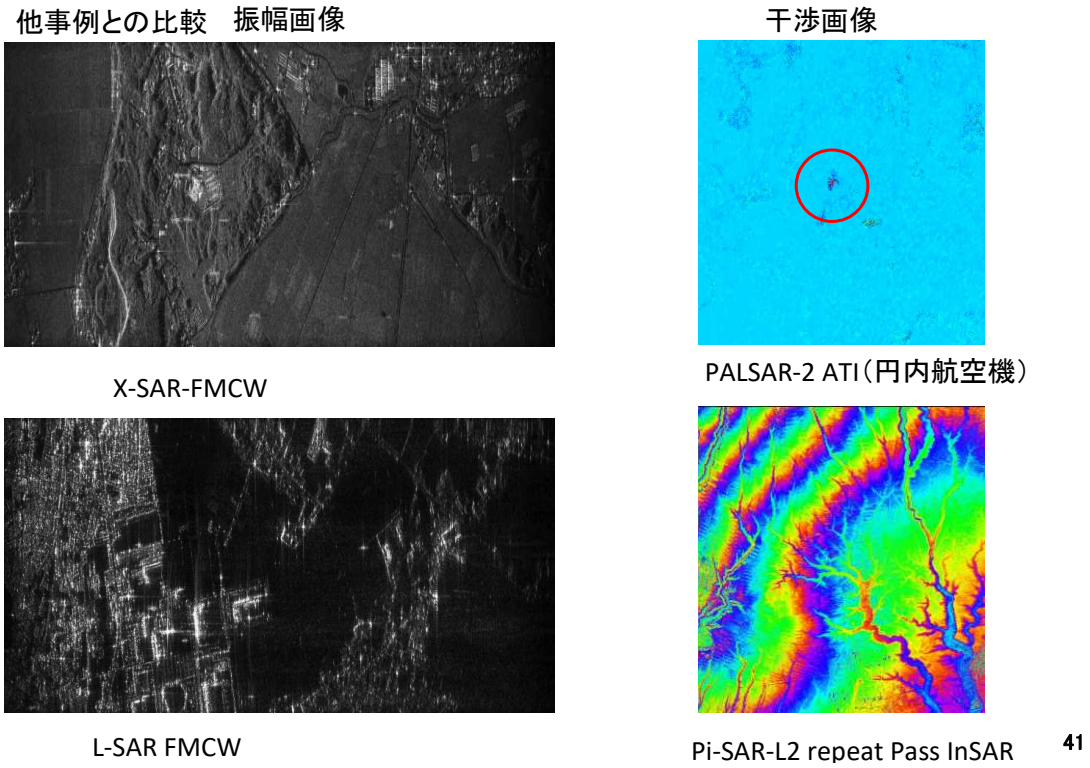


図 2.30 その他の事例集、左上)X-SAR-FMCW 型データ/Kingair、左下)L-SAR-FMCW/Cessna、右上)ATI-PALSAR-2、右下)Pi-SAR-L2 繰り返し干渉画像

本例をより成功に導くための提案

- より信頼性が高く、高精度が期待できる INS の搭載
- 周波数帯域幅が狭いので、L1/L2 の影響を受けない周波数に変更＞S-band（200MHz）
- SAR の送信電力の増加による SNR の向上。
- 現状の UAV は姿勢変動が大きい。小さくすることは可能か？姿勢安定度がいいのであれば、大型ドローンでも代替可能か？。
- 2 機の編隊飛行の高精度化（長い直線コースの確保）：周回飛行では、直線部分に戻るのに姿勢の建て直しや安定性の確保に時間がかかる。また、そのために安定に直線飛行する観測時間が短い。
- 姿勢変動の抑制が困難であれば、1 ドローンに、2受信アンテナ＋1送信アンテナタイプで Single pass InSAR を構築も案かもしれない。

付録データ：5種類のパスで得られた画像を以下に示す。本文中で紹介した画像は各パス共に最良のものである。

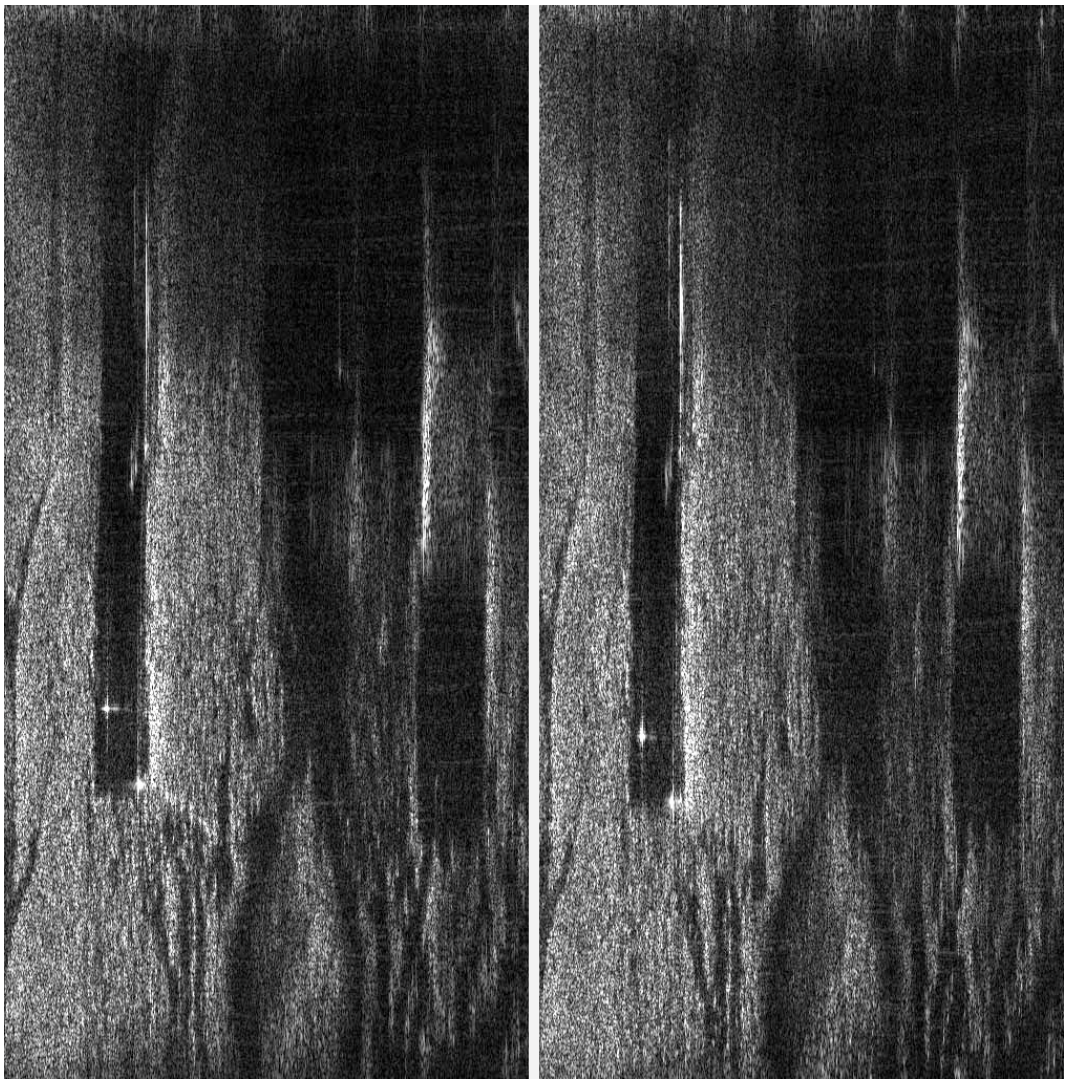


図 A-1；20170907 の画像全て

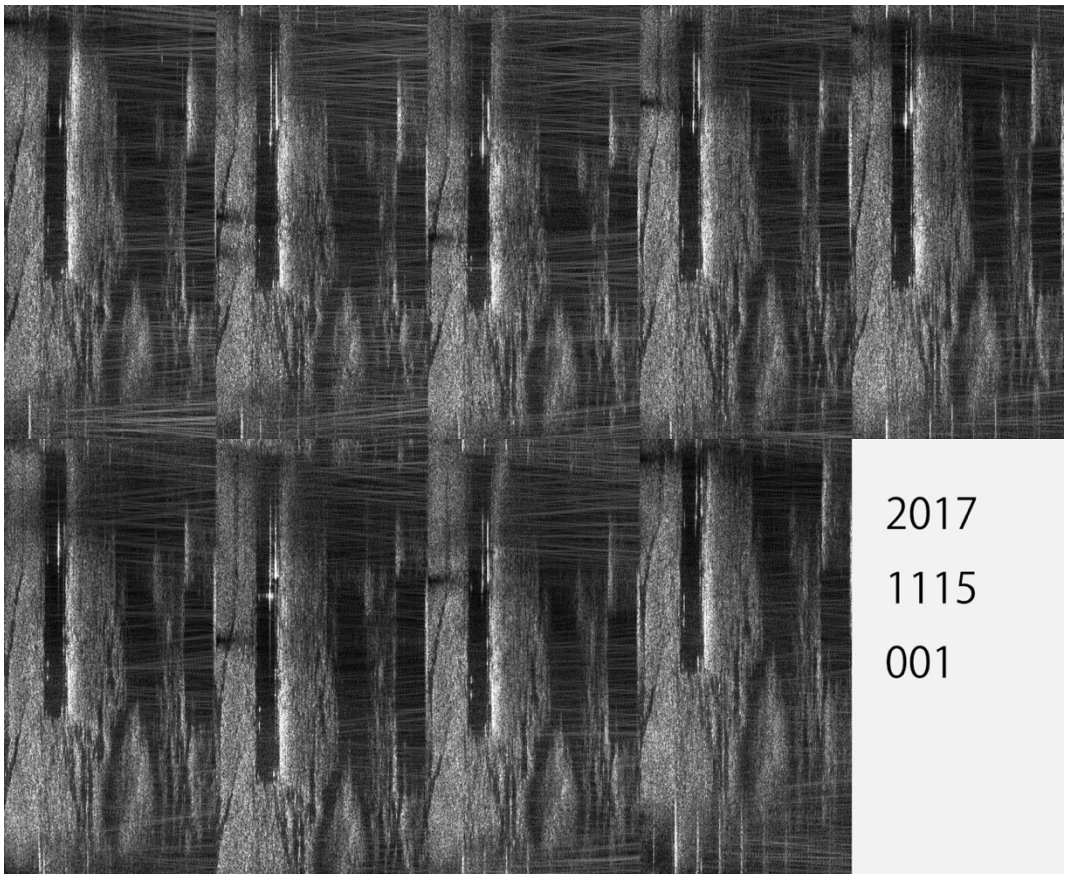


図 A-2;20171115/UAVSAR1 号機の画像全て

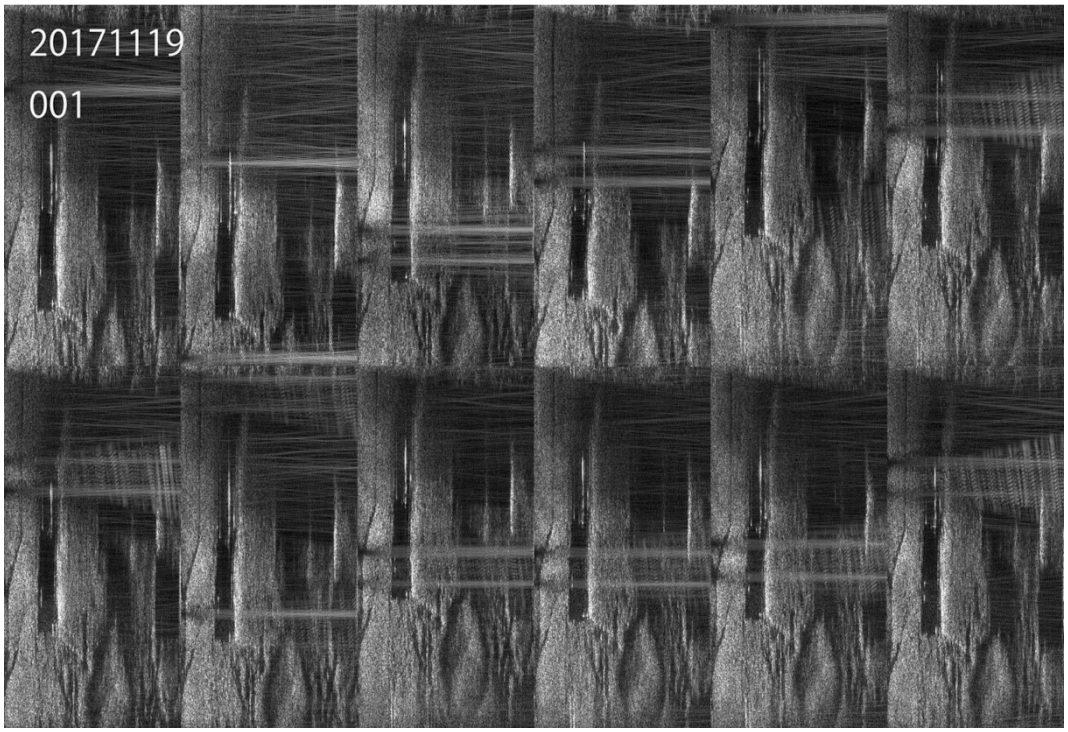


図 A-3;20171119/UAVSAR1 号機の画像全て

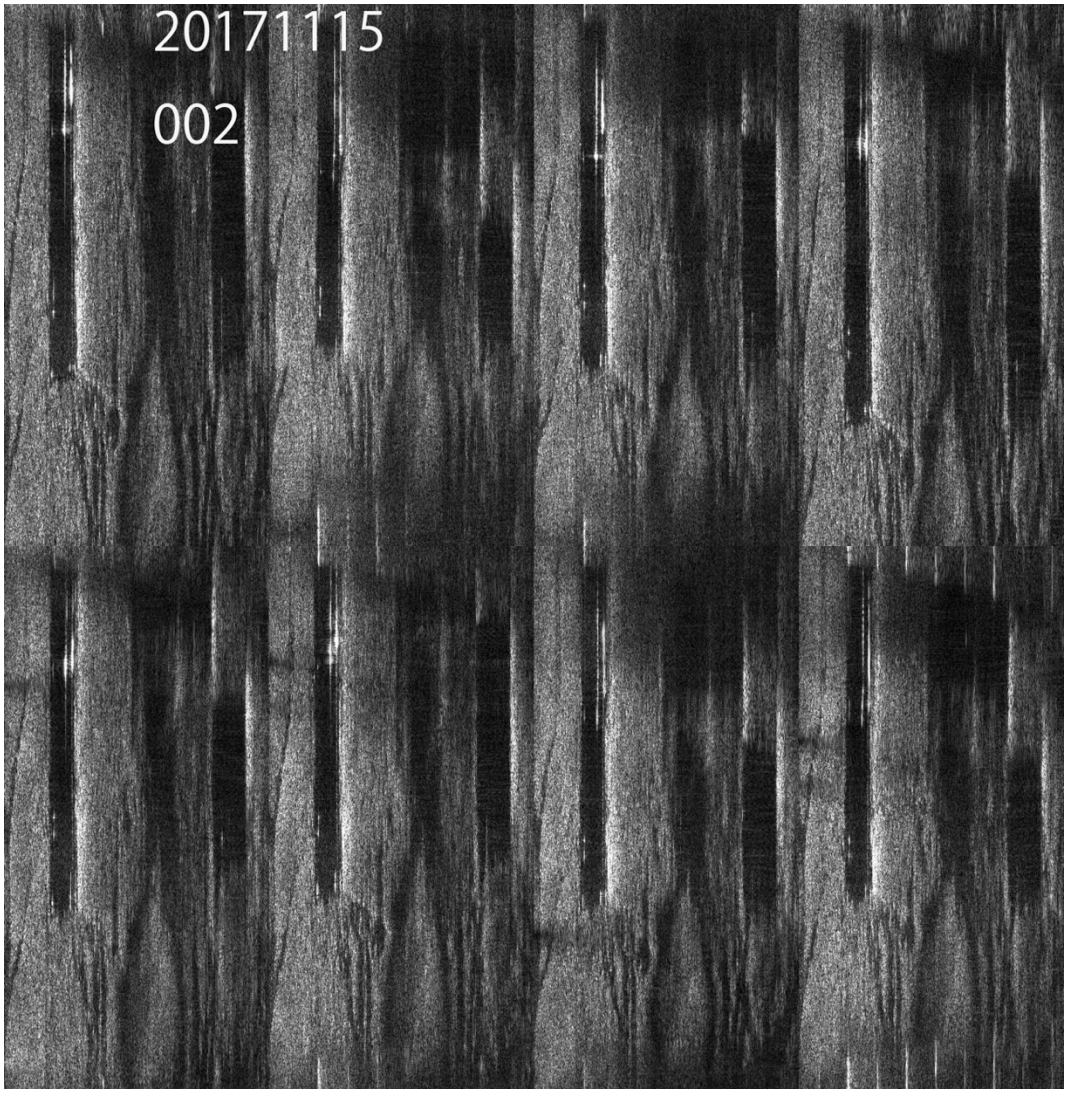


図 A-4；20171115/002(UAVSAR2)の画像全て

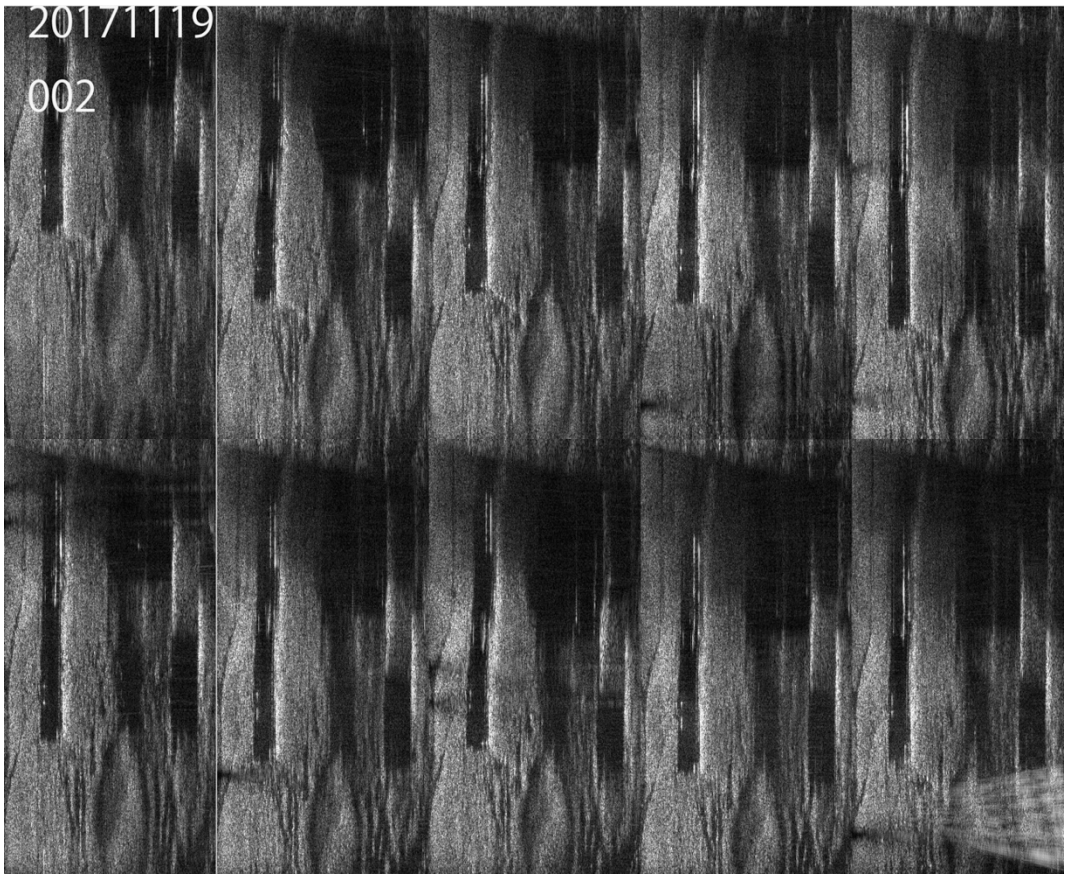


図 A-5；20171119/002(UAVSAR2)の画像全て

② SAR 搭載無人航空機誘導制御則の改修

前年度に実施した飛行試験、およびその結果を踏まえた改修等により最終的に確定した機体性能・仕様に基づき、2 機の協調運用のために追加した誘導制御系の修正をおこなった。また、飛行試験により開発した誘導制御系の評価をおこない、外部風の影響を抑えるための修正等をおこなった。

段階を踏んで検証をおこなうため、9 月に実施した第 1 回の飛行試験ではまず 1 機を自動制御で飛行させつつ、地上で HiLS を実施しているもう一方の機体と通信をおこない疑似的に協調制御の確認を実施した。これにより、単機での飛行で協調制御の確認をおこなうことができたが、実際に飛行している機体とシミュレーションにおける飛行とでは外部風の影響が異なるために、制御則の機能は充分に検証できたが精度等については実際の飛行による必要があった。

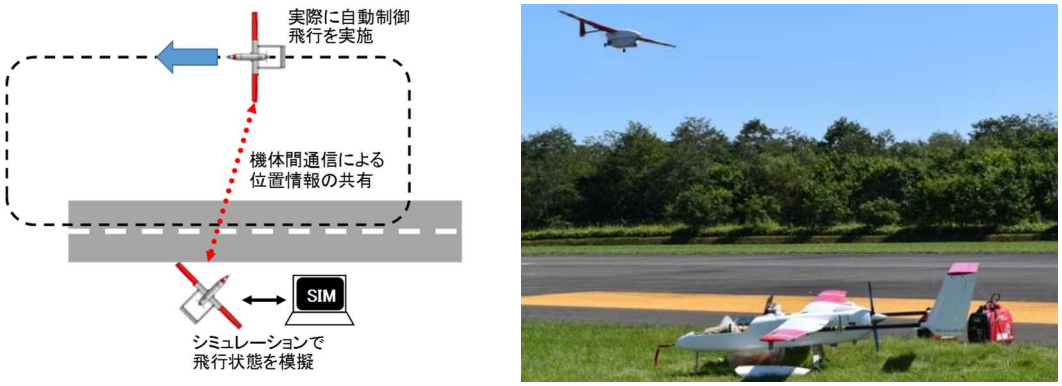


図 2-31　2 機同時飛行に先立つ HiLS による協調制御の検証

実際の 2 機同時運用も滑走路周辺の場周経路における高度 150m 以下での飛行で検証をおこなった。1 章でも述べたように制御則の検証のためにはある程度の直線距離を飛行する必要があり、通常使用している経路では不足のため海側に経路を延長し、長辺 1.2km の矩形コースにて検証をおこなった。飛行高度は 1 号機を AGL120m、2 号機を AGL140m として制御をおこない、地上からの指令により 1 号機の目標高度を段階的に上げていくことで最終的に目標高度を 3m 程度まで接近させて試験を実施した。1 章に述べたように、機体間の経路距離を目標 200m まで接近させて自動制御が想定した通りに機能することを実証し、また追従精度についてのデータを得た。残念ながら、試験日程の都合により、当初目標であった機体間距離 100m まで近接の最終確認や、開発した制御による SAR 干渉データのより高高度からの取得にまでは至らなかった。

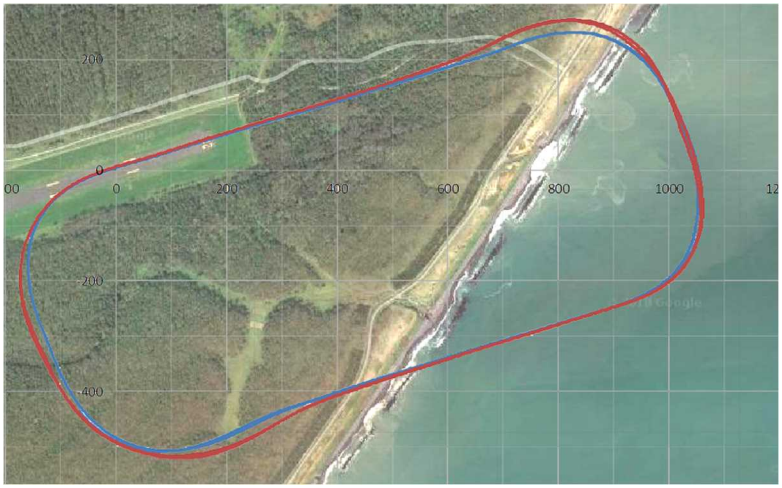


図 2-32　2 機同時飛行の際の飛行軌跡

② SAR 搭載無人航空機誘導制御則の改修

前年度に実施した飛行試験、およびその結果を踏まえた改修等により最終的に確定した機体性能・仕様に基づき、2 機の協調運用のために追加した誘導制御系の修正をおこなった。また、飛行試験により開発した誘導制御系の評価をおこない、外部風の影響を抑えるための修正等をおこなった。

③ SAR 搭載無人航空機機体改良・保守

昨年度まで開発した機体について保守維持作業をおこなった。また、昨年度飛行試験において課題の残った測位系、通信系に関する再調整、地上機能確認をおこない、飛行試験に供した。

測位系については、昨年度の知見をもとに L1/L2 帯を使用する複合航法装置に対する SAR の影響について電波暗室を用いた試験等で検証し、影響を確認した。最終的には SAR 側の帯域を制限することで L2 帯への影響を抑えることになったが、それでも L2 帯への影響があった場合に試験日程に致命的な影響が出ることから確実な実施のために L1 帯のみを用いる従来の測位系を継続して使用することとし、L1/L2 帯を使用する複合航法装置はペイロードとして搭載して爾後の SAR データ解析に測位データを使用することとした。このため、機体に 2 基装備している GPS アンテナのうち、L2 帯に対する SAR の影響が比較的小さいと思われるアンテナを L1/L2 帯を使用する複合航法装置で使用することとした。

通信機器については昨年度の検討結果に従って、2.4GHz 特小無線機のモード変更、および機体間通信専用に用いる 2.4GHz 特小無線機の調達、搭載をおこなって機能確認をおこなった。

改修等を完了した機体について、最終的な地上機能確認を実施した。その際単機での確認だけではなく、2 機を同時に HiLS 状態として機体間の通信、およびそれを用いた制御則の動作なども含めて確認をおこなった。SAR の影響については最終的に SAR を入れた状態で搭載センサの影響の少ない遠隔操縦による飛行をおこない、SAR の影響により搭載センサ、機器等に悪影響がないことを確認するとともに飛行領域を逐次拡大して SAR の影響も含めた通信機器の覆域の確認をおこなった。

④ SAR 搭載無人航空機の飛行試験運用

SAR 観測データを取得するための飛行試験計画を検討、策定した。また目視視程外運航のための承認を国土交通省東京航空局より、また高高度飛行のための許可を釧路空港事務所より取得した。

また、2 機同時運用のための運用シークエンスを再検証し、実際の運用を想定したシミュレーション等による確認を経て手順として規定した。

平成 29 年 9～11 月に 2 回飛行試験を実施し、機能確認等含め、計 x 回、x 時間 x 分の飛行を実施した。これにより

- 場周経路（高度 150m まで）で 2 機の同時運用を実施し、協調制御の機能を確認し、制御精度などを評価した。また SAR 計測データを取得した。
- 海岸に沿った計測経路に単機を進出させ、高度 500m からの SAR 計測データを取得した

を実施した。速度計測系、電源系等の不具合もあり、干渉計測が可能になるような SAR 計測データの取得には至らなかった。

④－1　飛行試験計画と許可、承認の取得

飛行試験計画については平成 28 年度に検討した飛行試験計画を踏襲し、北海道広尾郡大樹町にある JAXA 大樹航空宇宙実験場およびその周辺空域にて実施することとした。コース設定についても前年度検討結果を踏襲したが、事前の解析等から SAR データの取得についてはできるだけ高高度での実施が望ましいとされたため、当初想定していた高度 150m 以下における長距離の周回データ取得飛行はおこなわず、離発着場周辺経路で飛行機能確認等を実施したのちは速やかに高度 500m 付近でのデータ取得を目指すこととなった。また周辺の安全性に対する監視を容易にすること等から当初約 3.0km の直線を含む周回コースを想定していたのに対し、1.5km～2km 程度の直線にて計測を行う計画とした。実際の飛行パターンおよび地上局、中継局、監視員等の配置計画を図 2-33 に示す。周辺に非常時の機体の落下分散、特にパラシュートを用いて降下した際の落下分散等を考慮した立入制限・監視区域が確保できること、機体の飛行領域全体を必要な通信電波の覆域に収めることができること、飛行空域を網羅できるように監視員を配置可能であること等が確認できた。

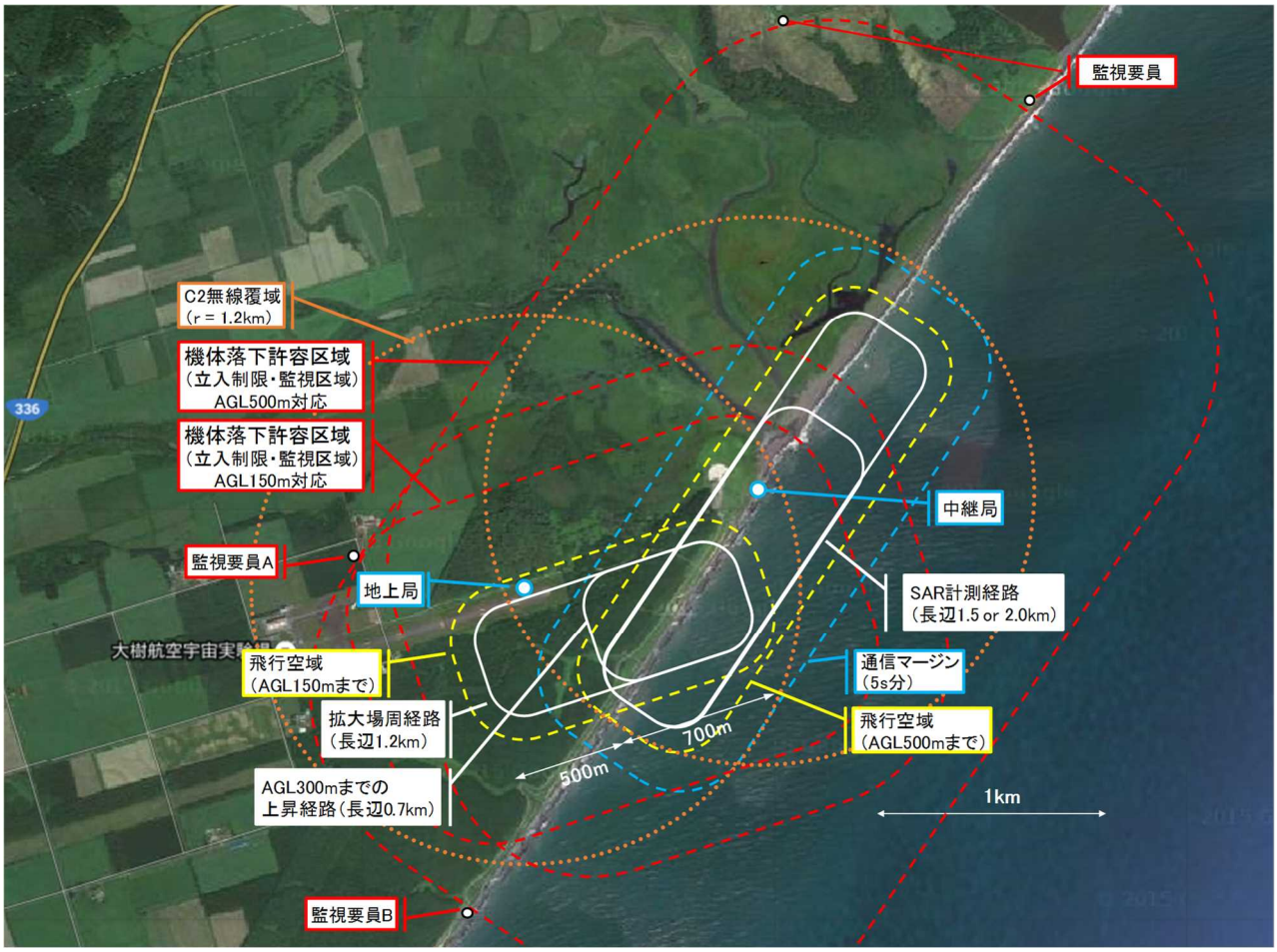


図 2-33　飛行空域等の設定例(高度 500m 飛行時)

本試験においては航空法 132 条で禁止されている対地高度 150m 以上の無人航空機の飛行、同 132 条の二で規定されている飛行の方法に拠らない飛行である、操縦者の目視視程外における飛行を実施するため国土交通大臣の許可、承認を得る必要があった。このため、前者については近傍の管制機関である釧路空港事務所、後者については東京航空局に申請をおこない、試験の目的及び日程、飛行空域、

使用機材等を明確にすると共に、飛行させる機体、操縦者の資格要件、整備手順等を含む運用体制について安全を確保する要件について説明した。この結果、

- 釧路空港事務所(高度 150m 以上の飛行):
  平成 29 年 8 月 28 日付申請、8 月 31 日付取得(釧運第 302 号)
- 東京航空局保安部運用課(操縦者の目視視程外の飛行):
  平成 29 年 7 月 27 日付申請、8 月 24 日付取得(東空運第 5922 号、東空検第 2705 号)

の許可および承認を受けて飛行試験を実施することができた。同申請にあたって申請した飛行空域を図 2-34 に示す。(飛行試験計画の詳細化と並行して申請をおこなったため、実際の飛行エリアよりも広めに申請している。)また、当該空域は民間訓練空域および洋上空域を含むことから

- 航空交通管制センター(ATMC): 民間訓練空域(HK2-11 SFC – 6000ft)内の飛行のため
- 札幌航空交通管制部: 洋上の飛行のため

とも許可申請に先立って調整をおこない、釧路空港事務所と NOTAM 発行のための連絡体制や飛行時の安全確保体制を条件として了解を得ることができた。

図 2-34 飛行許可・承認申請時の飛行空域

また、高度 150m を超える飛行の許可に伴う釧路空港事務所との合意により、当該空域を航行する航空機への NOTAM を発行するため、飛行前日の 15:00 までに翌日の飛行計画を同事務所担当管制官宛に e-mail にて連絡し、安全に試験を実施することができた。

④－2 二機同時運用手順の検討

2 機同時運用の手順については昨年度に引き続き、2 機の間に空中衝突に繋がる干渉等を起こすこと

なく同一滑走路より離陸して同一周回経路に投入し、計測飛行をおこなった後に順次同一滑走路に帰還させる手順の検討をおこなった。実際に昨年度飛行試験をおこなった知見に基づき遠隔操縦者、その他運用関係者も含めて検討をおこない、1 章での記述したように非常手順も含めて運用手順書の形にまとめた。また機能確認のための HiLS に際しては実際に運用に関わる要員を地上局に配置して実際の運用を模擬したシミュレーションをおこない、要員間の連携も含めた確認をおこなった。

④－3 飛行試験の実施

実際の飛行試験は以下の日程で実施した。

第 1 回: 平成 29 年 8 月 30 日 ～ 9 月 7 日
第 2 回: 同 11 月 9 日 ～ 11 月 21 日

また実際の飛行回数、時間は以下の通りであった。

飛行回数: 25 回(機能確認、慣熟等含む。うち 1 号機 12 回、2 号機 13 回)
総飛行時間: 6 時間 58 分(うち 1 号機 3 時間 42 分、2 号機 3 時間 16 分)

飛行実績の詳細については巻末の付録:無人航空機の許可に基づく飛行実績報告書に示す。これらの飛行試験により、以下を達成することができた。

- 場周経路(高度 150m まで)で 2 機の同時運用を実施し、協調制御の機能を確認し、制御精度などを評価した。また SAR 計測データを取得した。
- 海岸に沿った計測経路に単機を進出させ、高度 500m からの SAR 計測データを取得した。

2 機の同時運用について、実際の手順を図 2-35 の高度履歴に示す。また、高度 500m まで進出時の飛行軌跡を図 2-36 に示す。高度を上げると万が一の事故等の際の落下分散域が広がるため、海岸線付近に進出して周辺の民家等からの距離を充分に取ってから高度を上げるようにしている。

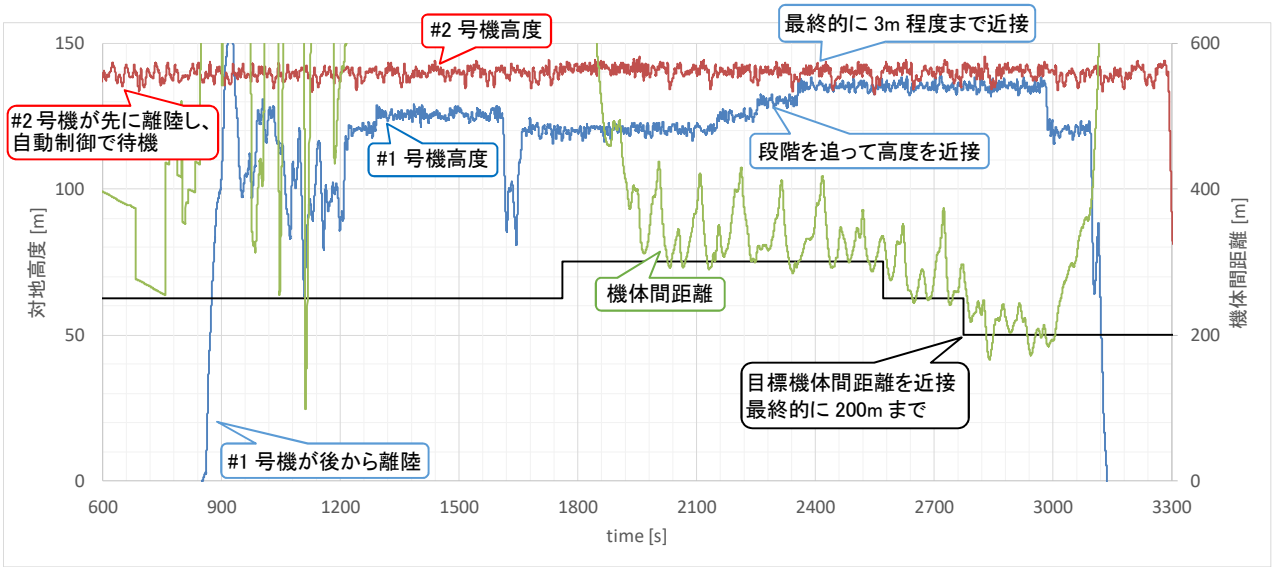


図 2-35 2 機同時運用時の運用手順

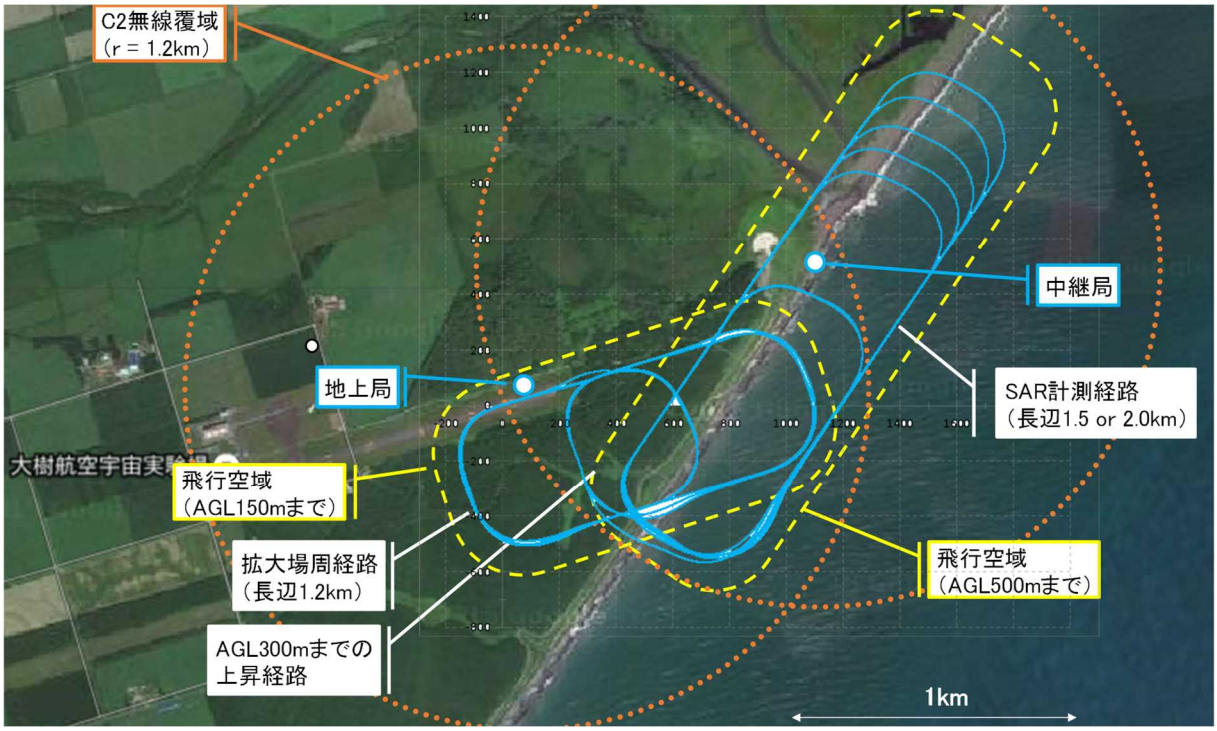


図 2-36　高度 500m まで進出時の飛行軌跡

一方で、天候や速度計測系、電源系等の不具合などによる試験日程の都合からも、干渉計測が可能になるような SAR 計測データの取得には至らなかった。飛行試験時の状況を図 2-37～40 に示す。

図 2-37　待機中の機体および地上局配置

図 2-38　離陸する試験機

図 2-39 SAR フェアリングを付けて飛行中の試験機

図 2-40　着陸する試験機

⑤プロジェクトの総合的推進

プロジェクト推進を効率的に実施するために、電話会議、スカイプ会議、東京電機大学における会議、現地実験場での会議を実施した。

3. 成果の外部への発表及び活動

論文発表

1)「合成開口レーダを搭載した複数無人機による干渉計測試験の速報」, 河野 敬, 村岡 浩治, 穂積 弘毅,佐藤 昌之, 大瀬戸 篤司, 島田 政信, 第 55 回飛行機シンポジウム, 2017 年 11 月 20～22 日

2) L-band interferometric UAVSAR Dual L-band FMCW SAR experiment for repeat pass interferometry in Taikicho, Hokkaido(口頭)、島田政信、河野敬、IEEE Conference for Antenna measurement and application, Dec. 5-7, 2017.

3)「合成開口レーダーを搭載した二機の無人航空機による干渉計測実現のための協調飛行制御実験」, 大瀬戸 篤司, 佐藤 昌之, 河野 敬, 村岡 浩治, 穂積 弘毅, 島田 政信, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2018 年 5 月 16～18 日

一般公開

1) 平成 29 年度宇宙航空研究開発機構一般公開(2017 年 4 月 23 日)

2) 平成 30 年度宇宙航空研究開発機構一般公開(2018 年 4 月 22 日)

※いずれも機体、研究概要のパネル、運用状況の動画を展示

4．まとめ、今後の予定

多くの方々の支援を受けて、平成２７年度から２９年度の２年半にわたる本プロジェクトを実施することができた。２台の小型 UAV に超小型 L-band SAR を搭載し、‘空飛ぶ干渉計’を目指した開発実験を世

界に先駆けて実施することができ、極めて有意義なプロジェクトであった。その成果内容については、1.に記述したとおりである。また将来への提言は p73 に示した。本プロジェクトは極めて新規な実験であり、今後もその実現に向けた検討を継続してゆきたい。また、得られたデータについても、継続して解析を続けたいと考える。最後に、関係各位には大いに感謝申し上げる。

以 上