

令和 2 年 4 月 18 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年

受付番号 201860201

氏 名

夏秋 領

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地(派遣先国名) 用務地: ミュンヘン (国名: ドイツ)
2. 研究課題名(和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
能動型適応合成開口処理
3. 派遣期間: 平成 30 年 4 月 1 日 ~ 令和 2 年 3 月 20 日
4. 受入機関名及び部局名
ドイツ航空宇宙センター マイクロ波レーダ研究所
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入也可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

研究・調査状況

当初の予定通り、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) の適応的な信号再生処理に関する研究を行った。初年度は、数値計算ソフトを利用し、実際の観測画像に近い非線形成分の再現を試みたところ、衛星搭載型の SAR におけるダブルレシーバ方式 (double receiver mode, 図 1 参照) とアップダウンチャープ方式 (図 2 参照) の組み合わせが、従来想定されていた以上に虚像を生じることが判明した。

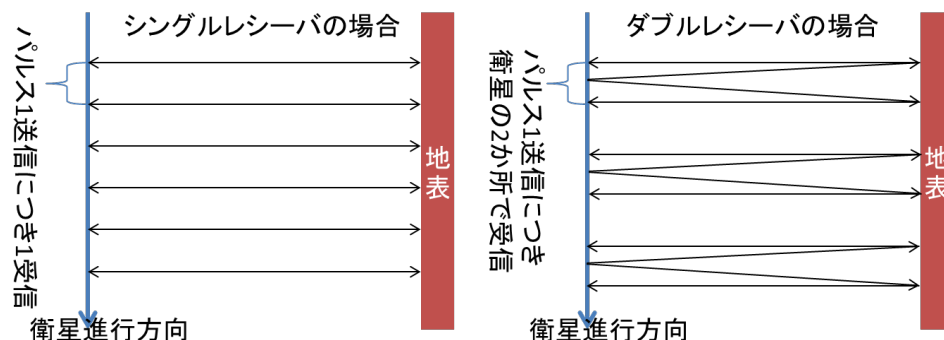


図 1: 従来法 (シングルレシーバ) とダブルレシーバ法の模式図

ダブルレシーバ方式は、SAR から発射され、地表で散乱されたパルスを衛星の 2 か所のアンテナで受信するものである。2 つの受信信号を図 2 (4) のように後処理で合成することにより、パルス送信回数を疑似的に 2 倍にする技術である。これにより、理論的には空間分解能を低下させずにパルス送信間隔を 2 倍に (観測幅を 2 倍に) することが可能となる。一般的な SAR はパルス送信間隔が長いほど観測幅が広がる一方で、サンプリング回数が減るために空間分解能が低下してしまうため、1 パルス送信に対する受信個所の増加 (いわゆる Single-input and Multiple-output: SIMO 化) は、将来の衛星 SAR における重要な要素である。

アップダウンチャープ方式は、帯域の低い側から高い側へ周波数掃引するアップチャープとその

逆の掃引を行うダウンチャープの FM パルスを交互に送信することで、一つ前もしくは後に送信されたパルスが所望のパルスと混信するレンジアンビギュイティと呼ばれる虚像を抑圧する技術である。通信における多重化と類似の問題ではあるが、レーダの場合は観測対象の散乱特性や電波伝搬環境が不明である点や送信パルス長を短くする必要がある点など、通信とは異なる制約がある。SAR において実用化されているのは、周波数掃引の方向を逆にする前述のアップダウンチャープの他に、Azimuth phase coding (APC) と呼ばれる送信チャープに位相変調を加える手法の二つである。

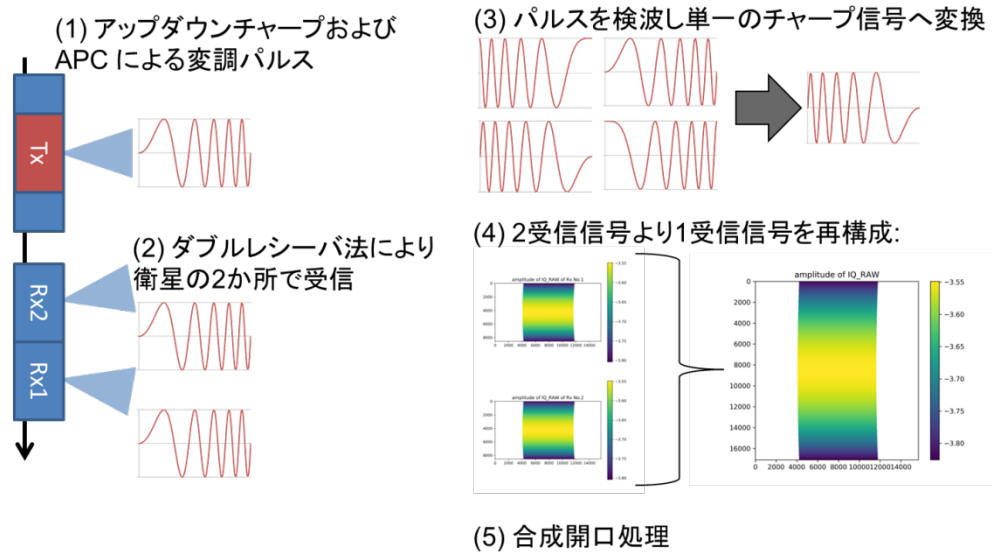


図 2: ダブルレシーバ法および各パルス変調方式から合成開口処理に至る模式図

これらダブルレシーバ方式とアップダウンチャープの影響は、従来 SAR の合成開口処理において無視できると考えられてきた。これは、電波を送受信している間、衛星は静止しているもの近似して計算がなされていたためである。また、過去の衛星 SAR の性能が、これらの影響が無視できる程度の解像度と SN 比であったほか、単一のパルス変調のみを送受信していたために、このような近似に何らの問題も生じなかった。しかし、実際には電波が衛星と地表を往復する間に衛星自身も移動している (Bistatic effect) ほか、電波の送信、受信の最中も衛星は移動している (Intrapulse motion)。従って、厳密にはこれらの衛星の挙動が再生処理に影響を与える。そして、本研究の結果、図 3 のようにアップダウンチャープを採用した場合はこれらの影響を無視できず、アジマスアンビギュイティと呼ばれる虚像が生じることが判明した。一方で、これらの影響を完全に排除するためには地上と衛星の距離を厳密に求める必要があるが、電波伝搬経路中の電離層遅延や大気中の水蒸気遅延などの影響を完全に把握することは不可能であるため、適応的な補正処理が必要とされることが判明した。これら 1 年目の研究成果は 2019 年の国際学会にて発表した[1]。

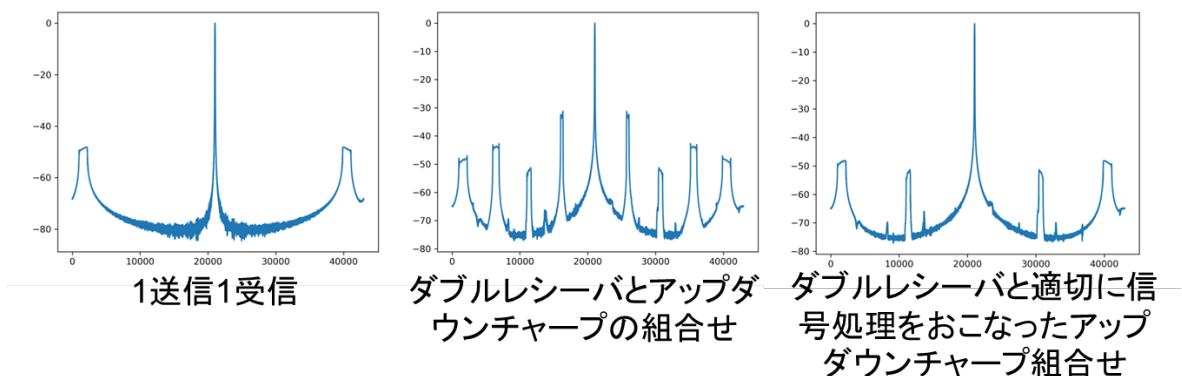


図 3: 送受信方式とチャープ変調の組み合わせによるアジマスアンビギュイティの発生。各グラフ中央のピークが所望の像に対応し、グラフ端の各ピークがアジマスアンビギュイティである。

研究の結果、この虚像がとりわけ Intrapulse effect の影響により生じることが解明し、合成開口の信号処理の過程で類似度を利用した手法により、精度よく虚像を生じさせる信号を判別できることを発見した。アジマスアンビギュイティは、所望の分解能を得るために必要なサンプリング周波数を観測時のパルス送信周波数が下回ってしまうことにより強く生じる。特に、Intrapulse effect によってアップダウンチャープやダブルレシーバが、あたかもパルス送信周波数を低下させたかのような効果を生み出し、アンビギュイティを生じさせてしまうのである。このようなアンビ

ギューティは周波数領域においては通常、所望の信号にオーバーラップしているために判別がつかない。これに対し、合成開口前の生データのドップラー・パルス時間領域ではアンビギューティが所望波と分離しているため、類似度を利用したアンビギューティ信号の検知が可能となるのである。本成果は 2020 年の学会および論文誌論文へ投稿中である[2]。

上述の成果に加え、衛星 SAR の観測幅を拡大できる可能性についても発見した。レンジアンビギューティの抑圧手法としては、前述のアップダウンチャープおよび APC の 2 種類が提案されているが、いずれの手法も 2 種類のチャープ信号を交互に送信するものであり、両者の併用はその特性上困難であると考えられてきた。しかし、本研究の遂行過程で、実際には抑圧レベルを落とさずに併用可能であると判明した(図 4)。これは、従来 2 種類であったチャープ信号を 4 種類まで増加させ、原理的には観測幅を 3 倍まで増加させられることを意味する[1]。

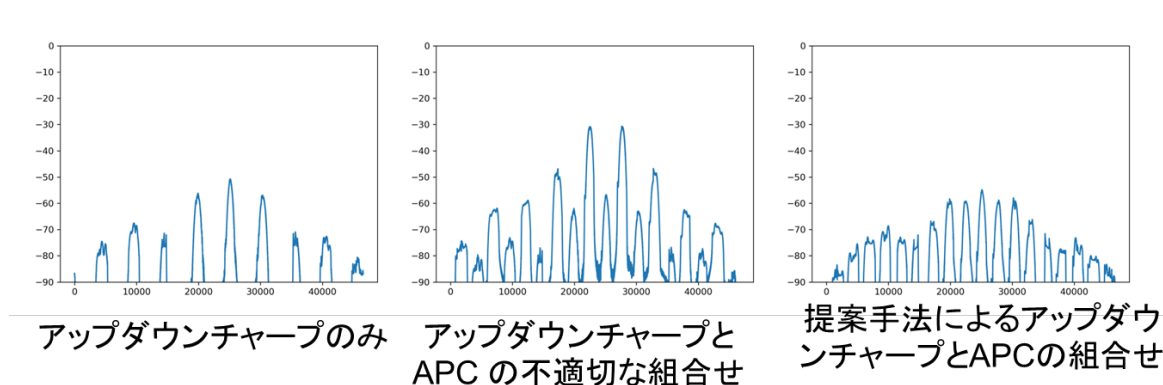


図 4：送信パルスの変調方式と組み合わせによるレンジアンビギューティの強度レベル（ピークが低いほど高画質）。

これらの研究結果を、適応的な外来不要波（RFI）の検知と除去へと応用した。ダブルレシーバを採用した SAR では、2 台の受信機が同時に対象を観測している。従って、不要波が重畳された場合、2 台の受信機の間には不要波の到来時間差が記録されている。そこで、受信信号の類似度を計測することにより、より高精度に不要波の検知を可能とする手法を考案した。図 5 に示す通り、類似度（図 5 左）を利用すると、従来の信号強度を利用した検知法（図 5 右）に比べより不要波を感度よく検知していることがわかる[3]。

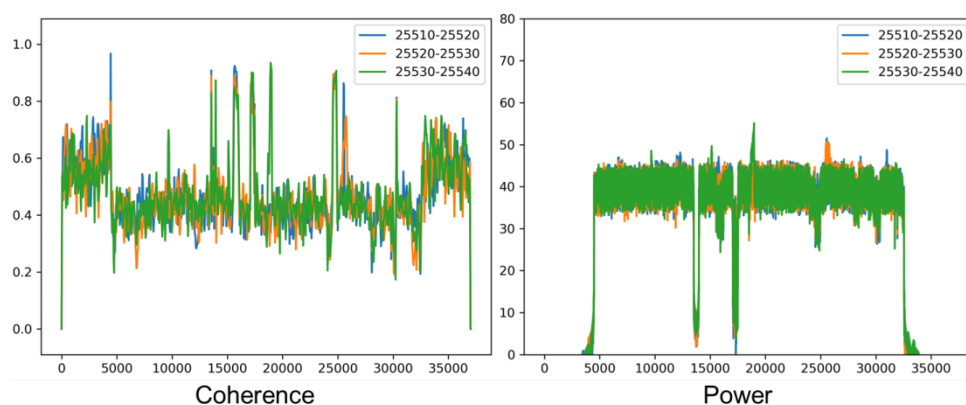


図 5：適応的な不要波検知の適用結果。左のように 2 受信機間の類似度を利用すると、不要波の重畳している周波数のみが極端に類似度が高くなっていることが分かる。右のように信号強度のみを判定基準にしていると信号強度の弱い不要波の検知漏れを起こす。

当初の予定では SAR の実測データを利用した実験を行う予定であったが、実験には通常非公開とされる合成開口前の生データが必要であり、夏秋は生データ取り扱い資格を得ることができず、実観測データを利用した実験を行えなかった。この代替として、SAR の逆再生データ（合成開口処理を逆順に適用することで、一般に流通する SAR データから生データを再現したもの）を利用して実験を行い、所期の結果を得ることができた。また、提案手法が実用的であることから RFI の検知方法についてはさらに発展させたものを特許申請中である。

成果発表・学会への参加状況

前項の研究成果は自身が Publicity Chair を務めた International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2019 で発表したほか、翌年の IGARSS 2020 にて発表予定である。また、

不要波への対応の成果については、自身がScientific Organizing Committeeを務めたRFI workshop 2019にて発表したほか International Conference on European Synthetic Aperture Radar (EUSAR) 2020にて発表予定であった（新型コロナウイルスの影響により会期は2021年へ延期）。

また、渡航前に査読中であった論文や、日本における指導学生の論文が受理された。これらは、偏波干渉 SAR の処理における適応的な補正方法に関するものや、入射角の微小な変化が SAR の位相情報に非線形の歪みを与える状況について実験的に明らかにしたものであり、本研究と連携したものとなる。これらを含めた査読付き論文誌論文の発表件数は、受理・出版済みが6報、投稿予定が2報である。

学会発表は渡航前の研究成果のほか、渡航後の成果を一部含む発表を16件おこなった。うち2件はアーヘンで開催されたEUSAR 2018 (Jun. 4-7, 2018)、3件はバレンシアで開催されたIGARSS 2018 (Jul. 22-27, 2018)であり、派遣先DLRでの初期の研究成果が発表に含まれている。本研究の内容からはやや離れた、より実用的な研究である洪水の発生した地域における被災状況の把握に SAR を利用したものもあり、日本の土木研究所およびNASA ジェット推進研究所と共同して得られた成果であり、日米欧の国際連携に寄与した。このほか、災害時の SAR 観測について、アウトリーチ活動として書籍を他の研究者と分担共著した。派遣中の学会である IGARSS 2019 および RFI 2019 において、派遣期間中の研究成果についても報告を行ったほか、派遣終了後の EUSAR 2020 および IGARSS 2020 へも投稿を行い、合計4件受理されている。

このほか、ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) 主催の2つのワークショップへ聴講参加した。ひとつは SAR の生物物理学および地球物理学における利用に関する国際ワークショップ (7th International Workshop on Retrieval of Bio- & Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Applications, Nov. 12-15, 2018) であり、もうひとつは SAR を含む地球観測データのビッグデータとしての利用に関する国際会議 (Conference on Big Data from Space - BiDS' 19, Feb. 19-21, 2019) である。

その他の成果

本研究の目的からは外れるものの、夏季および冬季の休業期間を利用し、SAR 観測データの時系列的解析における三次元変動への拡張に関する自主的な研究を行った。SAR の干渉解析では、衛星と地表の間の視線方向の距離のみが求まる。すなわち、本質的には1次元の変動しか求まらない。そのため、従来は地盤沈下や地滑りなど1次元方向の変動を仮定できる現象のみが時系列解析の研究対象とされてきた。一方で、衛星の飛行方向や観測方向などを変化させ、3方向以上から対象を観測すると、三次元の変動を求めることが可能となる。しかし、衛星の数は増えないため、複数の方向から同時に対象を観測することは不可能である。そのため、三次元の地殻変動が生じる現象の中でも、地震のように一回のみ発生するイベントや地盤沈下のように長期的に線形とみなせる単調な変動のみが選択されてきた。

今回、太平洋上の活火山である西之島における複数の SAR 衛星が観測したデータを解析することで、火山活動に伴う非線形な成分を含む三次元的な時系列変化の解析に成功した。この成果も IGARSS 2019 にて発表を行った[4]。

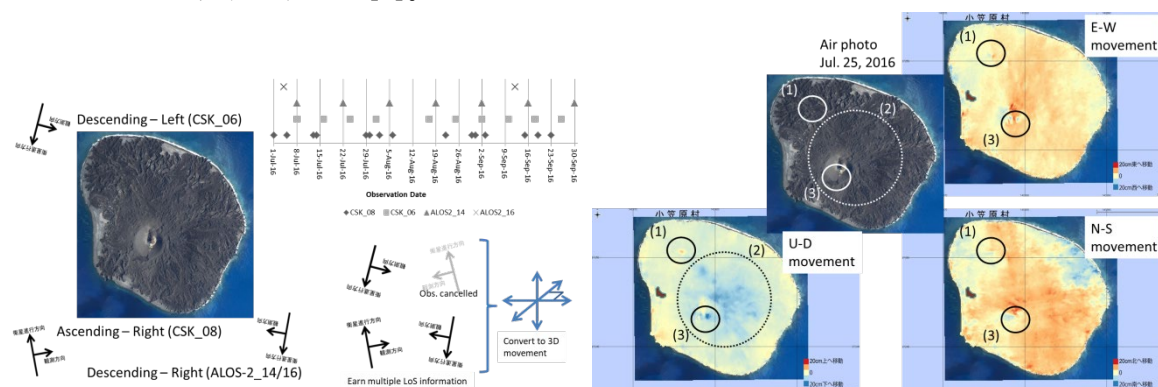


図6：西之島の時系列地殻変動の検知

2年目の冬季の自主的な研究として、2019年台風19号による長野県の洪水被害を SAR の観測で検知する研究を行い、論文誌にて発表した。洪水などの災害においては発災後ただちに被災域を観測する必要があるが、衛星からの観測の場合、観測条件が通常時と異なる場合が多く、一般的な変化抽出に関する解析手法の多くが同一軌道、同一モードによる定期的な観測を前提としているために、十分な解析精度を得られてこなかった。そこで、本研究では、複数の軌道、複数のモードによる観測により、どの程度従来手法の解析精度が低下するかを定量した[5]。また、洪水行の検知に関する研究では、派遣先研究機関の別の研究グループと協力することにより、機械学習により高精度に洪水検知を可能とする手法を提案した[6]。

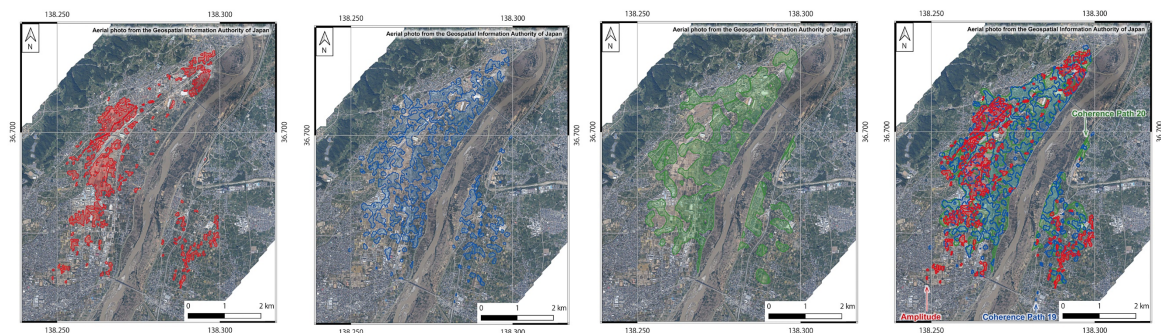


図 7 : 2019 年台風 19 号による長野市の浸水に対する衛星観測の解析手法ごとの検知領域の違い。洪水発生後の観測データは同一であっても、比較対象のデータが異なると検知できる領域が異なる。

代表的な発表文献

- [1] **R. Natsuaki**, N. Sakar, N. Yague-Martinez, M. Pinheiro and P. Prats-Iraola, “Investigations on the Optimum Combination of Azimuth Phase Coding and Up- and Down-Chirp Modulation for Range Ambiguity Suppression,” International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2019, WEP1.PC.1, (ポスター発表) Jul. 2019.
- [2] **R. Natsuaki**, P. Prats-Iraola, “Suppression of Additional Azimuth Ambiguities under Multi-Channel and Multi-Waveform SAR”, IGARSS 2020 (ポスター発表) Accepted 2020.
- [3] **R. Natsuaki** and P. Prats-Iraola, “Interferometric Analysis of Raw Data for Radio Frequency Interference Detection in ALOS-2” EUSAR 2020, (口頭発表), Accepted, 2020.
- [4] **R. Natsuaki** and A. Noda, “Demonstration of InSAR-based Three Dimensional Continuous Deformation Monitoring,” International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2019, TU2.R7.3 (Invited) (口頭発表), Jul. 2019.
- [5] **R. Natsuaki**, H. Nagai, “Synthetic Aperture Radar Flood Detection under Multiple Modes and Multiple Orbit Conditions: A Case Study in Japan on Typhoon Hagibis, 2019” Remote Sensing, Vol. 12, 903, 2020.
- [6] Y. Li, S. Martinis, M. Wieland, S. Schlaffer, and **R. Natsuaki**, “Urban flood mapping using SAR intensity and interferometric coherence via Bayesian network fusion,” Remote Sensing, , Vol. 11, No. 19, 2231, November 2019.