

# 災害に強い位置情報の基盤（国家座標）構築のための 宇宙測地技術の高度化に関する研究（第1年次）

実施期間

令和2年度～令和6年度

地理地殻活動研究センター

宇宙測地研究室

宮原 伐折羅

中川 弘之 小門 研亮

森下 遊 松尾 功二

## 1. はじめに

地球の形状、回転及び重力場とその時間変化を与える測地基準座標系は、地球における正確な位置の計測の基盤であり、様々な社会活動が互いに位置がずれることなく実施されるために不可欠な人間活動の基盤インフラである。宇宙測地研究室は、日本においても、現在の科学技術で達成しうる最も正確な測地基準座標系を構築し、それを国家の位置の基盤である、“国家座標”として、国内の様々な利用者が容易に利活用できる仕組みを構築することを目的として研究に取り組んでいる。正確な国家座標は、災害時に迅速な災害情報を把握し、復興・復旧のための活動を迅速に行うためにも欠かせない基盤である。地球全体の長期の測地観測に基づいて測地基準座標を構築するためには、観測データの取得、蓄積、高度な解析と多くの労力と時間を要するため、従来、地震等の災害直後に、正確な国家座標を更新し、利用者に届けることは困難であった。しかしながら、近年、GNSS衛星、SAR衛星、重力観測衛星、アルティメトリ衛星など、地球の形状を捉える宇宙測地技術の進歩は目覚ましく、これらを用いることによって、災害時に従来よりもはるかに迅速な国家座標の更新、提供が可能となる状況が整いつつある。本研究では、宇宙測地技術を用いて主に日本国内において正確な地球の形状と変化を把握し、それらを国家座標として災害時にも迅速に更新して利用者へ届ける仕組みを構築することを目標に実施する。初年度である本年は、必要となる計算機を調達し、開発環境を整備するとともに、先行研究及び国土地理院のこれまでの研究成果に基づいて、解析技術の高度化を進めた。

## 2. 研究内容

本研究では、主に、1) 迅速な変動把握のための「マルチ GNSS-PPP による定常解析技術の開発」、2) 空間分解能の高い変動場の把握のための「干渉 SAR により地表面の変動を計測・監視する技術の開発」、3) 地殻変動場の正確なモデルを作成するための「地表変動の詳細な空間分布を計測・監視する技術の開発」、4) 正確な標高の基準面（ジオイド）の維持を行うための「ジオイドのモニタリング技術の開発」を実施する。各々の研究開発の進捗を以下に示す。なお、各研究課題の進捗を受け、その成果を統合することで、正確な国家座標を利用者に届ける仕組みの検討を開始する予定である。

### 2.1 マルチ GNSS-PPP による定常解析技術の開発

本年度は、国土地理院の測地観測センターにおいて試験的に生成している GPS、GLONASS 及び準天頂衛星システム（QZSS）の後処理暦（衛星軌道情報）の品質を検証し、本研究で実施するマルチ GNSS-PPP 解析への使用可能性を評価した。

まず、2019/1/1～2020/12/31 の2年間、GPS と GLONASS について、IGS 最終暦を基準として、地理院の暦を IGS の各解析センター及び JAXA 暦（後処理）と比較した。その結果を図-1 に示す。地理院の暦の IGS 最終暦からの差は、GPS、GLONASS とともに数 mm 以内にあり、他機関の暦と同程度の整

合性である。RMS についても同様に、GPS では他機関とほぼ同じである。GLONASS では、IGS 最終暦からの差は、JAXA 暦とはほぼ同程度であるが、他の IGS 解析センターに比べると若干大きい。GLONASS では、IGS 最終暦との差の平均値及び標準偏差の時系列は、地理院の暦と JAXA 暦ではほぼ一致するが、他の IGS 解析センターに比べると振幅が大きく、これにより差が大きくなったと考えられる。JAXA と地理院は、暦推定に同じソフトウェア MADOCA（高須他，2013）を用いていることから、ソフトウェアに起因する可能性が高い。また、QZSS 初号機では、JAXA 暦を基準とした地理院の暦の差の時系列は、各成分とも RMS が数 cm の範囲で一致した。

次に、地理院の暦を用いて PPP 測位を行い、測位解の ITRF との整合性の確認を通じて、暦の ITRF との整合性を確認することを目的として、国内の IGS 観測点 6 点に関して、2019/1/1~2020/12/31 の 2 年間の地理院の暦を用いた PPP-AR 解を求め、IGS の日々の座標値との較差を算出した。その平均値は水平成分では 5mm 以内、上下成分では 2cm 以内で一致しており、この範囲で ITRF2014 に整合していると言える（図-2）。

上記のとおり、IGS 暦と一定の整合性は確認されたため、本研究が目標とする、国家座標に生じた変動量（地殻変動モデル）の災害後数日以内の提供に向け、要求される迅速性で電子基準点の位置を定常的に計算可能とするよう、引き続き、暦の作成環境を研究センターに移植してシステムを構築する。

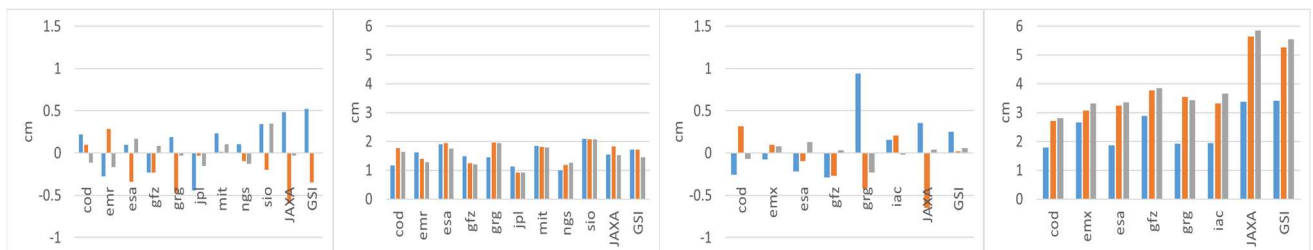


図-1 IGS 最終暦を基準とした各暦の差と RMS. 左から GPS の差の平均値、RMS、GLONASS の差の平均値及び RMS. 青：Radial（半径方向）成分，オレンジ：Along-track（速度方向）成分，灰色：Cross-track（R と A に垂直）成分（各成分の RMS の二乗和が 10m を超える日は異常値として除外）

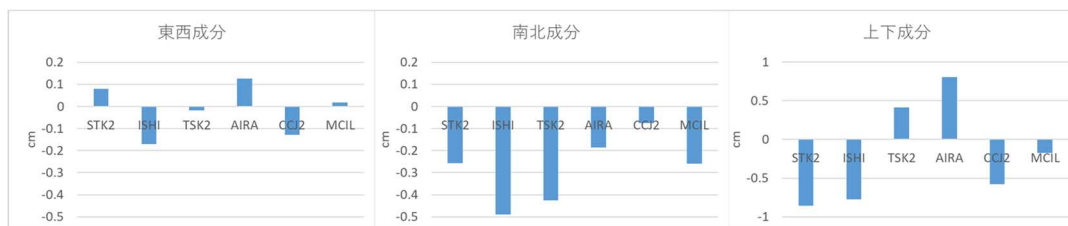


図-2 IGS 観測点の PPP-AR 解の IGS daily solution からの差

## 2.2 干渉 SAR により地表面の変動を計測・監視する技術の開発

SAR 観測の活用では、面的な地表変動の計測により、GEONET の GNSS 連続観測を中心とする地表変動観測網の空間分解能の不足を補うことを目標としている。定常時は、全国を対象に数 mm/yr の計測精度が達成可能な干渉 SAR 時系列解析を実施し、地表変動の監視を行う。地震等に伴う非定常変動が想定される際には、複数方向からの観測データを組み合わせて、3次元の変動情報を算出する 3次元解析を行い、断層沿いを含めた複雑な地表変動を詳細に計測する。これらを実現するためには、解析手法の確立、効率化、自動化等の研究開発が必要である。

本年度は、定常時の干渉 SAR 時系列解析では、Sentinel-1 及び ALOS-2 のデータを使用して、全国の解析を試行した。時系列解析の入力データとなる干渉画像は、Sentinel-1 では英国 COMET が公開している LiCSAR プロダクトを利用し、ALOS-2 では国土地理院が干渉 SAR 事業のために蓄積している位置合わせ済み SLC データを使用して GSISAR で作成した。時系列解析ソフトは LiCSBAS (Morishita et al., 2020) を使用した。LiCSBAS は効率的かつほぼ自動的に時系列解析を実施が可能であることから、全国を対象とする膨大なデータも数日という短い所要時間で処理可能なことが確認できた。

Sentinel-1 の周波数帯は C バンドであるため、森林等の深い植生では干渉性が低下しやすく、国土の 7 割が森林で覆われる日本では都市域以外で良好な解析結果を得ることは困難であった。そこで、日本全国の主要都市域 73 地域のみを対象とし、当該領域を切り出して時系列解析を行った。その結果、弘前・九十九里・新潟・金沢の線形地盤沈下(約 10-40mm/yr)、三条の突発的な地盤沈下(約 4cm)、弘前・山形・米沢・小千谷・野木の年周上下変動(振幅約 5-20mm)、調布における線形隆起(約 5mm/yr)、奈良と大阪の未知の非線形隆起(約 1cm)、平成 28 年(2016 年)熊本地震後の複雑な余効変動等、時間的・空間的特性が多様な変動が高精度(約 2mm/yr, <1cm/epoch)に多数検出された(Morishita, 2021)。一方の ALOS-2 では、L バンドの高い干渉性のおかげで、森林域も含めて網羅的かつ安定した変動速度が得られた。しかし、観測頻度は年 2-4 回程度と年 15-30 回の観測がある Sentinel-1 と比べて大幅に低く、非定常変動や年周変動の詳細な検出は困難であることが改めて認識された(図-3)。2022 年度に打ち上げ予定の後継機 ALOS-4 では、観測幅が約 200km に拡大し、Sentinel-1 に匹敵する年 20 回程度の高頻度観測が実現する予定である。これらのことから、ALOS-4 データを使用すれば、Sentinel-1 のような非定常変動の詳細な計測が森林域も含めて網羅的に可能となるとみられ、国土全域の時空間的に詳細な変動監視が実現する見込みが得られた。今後は、解析結果を利用しやすくするための地図表示機能の開発や、さらなる計測精度向上・効率化・自動化のための研究開発を行っていく。

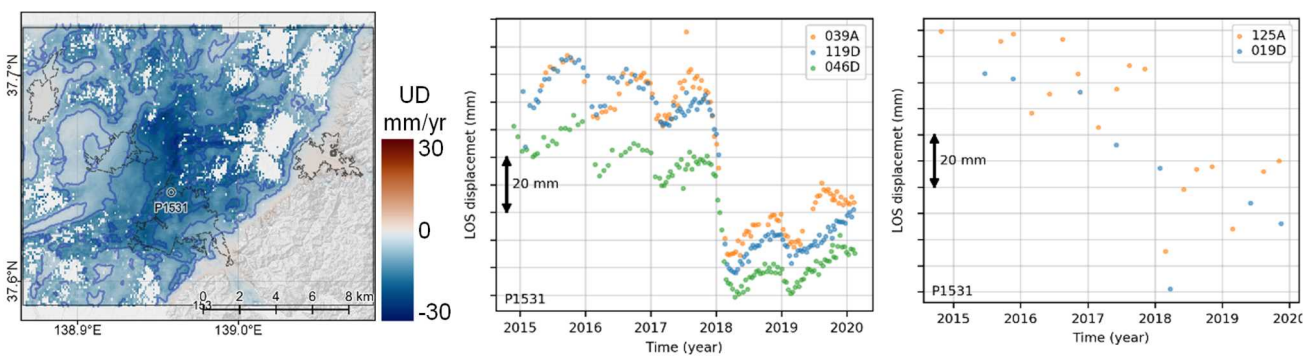


図-3 新潟県三条市の(左) Sentinel-1 上下変動速度、(中) Sentinel-1 時系列、(右) ALOS-2 時系列。

非定常時のための 3 次元解析については、職員が簡易に実行できるよう、汎用プログラムのプロトタイプの開発を行った。解析手法は基本的に Morishita et al. (2016) を踏襲したが、入力データの重み計算等で改良を加えている。プログラム内部でリサンプリングを行うことで、異なる範囲や空間分解能のデータをそのまま入力データとして扱えるようにする等の工夫をし、効率化を実現した。平成 28 年(2016 年)熊本地震のデータに暫定的に適用したところ、GNSS と整合した妥当な結果を容易に得ることができた。今後は、さらなる精度向上のための解析手法の細かい調整や、解析結果を確認しやすくするための出力データ形式の工夫等を行うとともに、事例解析で GNSS 等の外部データとの比較による精度検証を行う。

### 2.3 地表変動の詳細な空間分布を計測・監視する技術の開発

「将来の測地基準系の保持手法に関する研究（平成 24 年度～令和元年度）」において構築した地表変動モデルの計算システムと電子基準点の日々の座標値（F3 解）を用いて、2011 年 5 月 24 日を基準とした 2020 年 10 月まで 3 か月毎の地表変動モデルを作成し、当該モデルの精度検証を 1 点抜き交差検証（LOOCV）で実施した。検証の結果、福島県いわき付近や房総半島等で再現性が悪いことが確認されたため（図-4）、当該地域における詳細な地表変動を把握するために必要な観測点の設置に向けた検討及び観測装置の開発を行った。観測点の設置場所については、地盤沈下やスロースリップ等による複雑な地表変動が生じている房総半島を対象とし、千葉県内の 10 か所を候補場所として選定した。また、観測装置については、近年普及し始めている廉価版の GNSS 機器を用いて、図-5 に示す簡易的な装置を開発し、国土地理院構内の研究棟屋上にて約 1 か月間の連続観測を実施した。近傍の電子基準点 4 点の F3 解を基準に基線解析及び三次元網平均計算を実施し、日々の座標値を算出した結果を図-6 に示す。座標時系列の標準偏差は、水平 5mm、上下 10mm 以内となり、cm レベルの地表変動であれば把握可能な測位精度が得られた。令和 3 年 2 月に当該観測装置を各候補場所に設置し、4 程度の連続観測を実施する予定である。

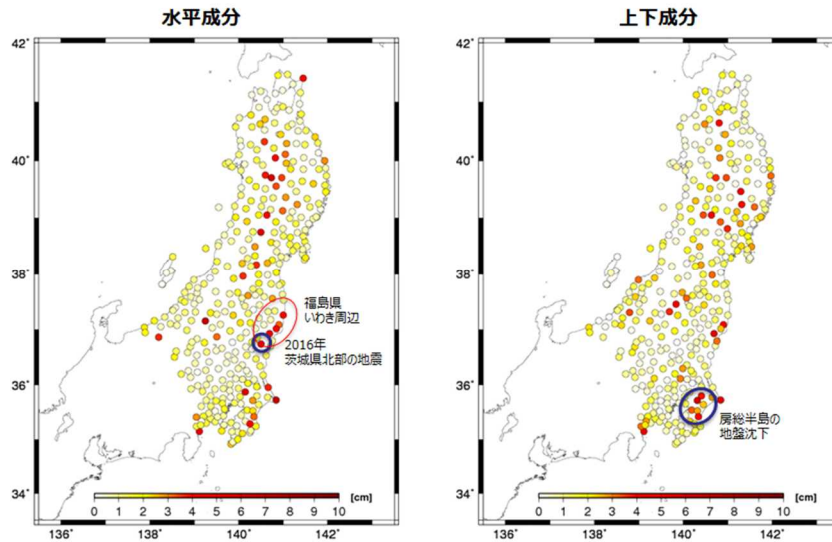


図-4 地殻変動モデルの LOOCV 結果 (2020/10/1 時点)

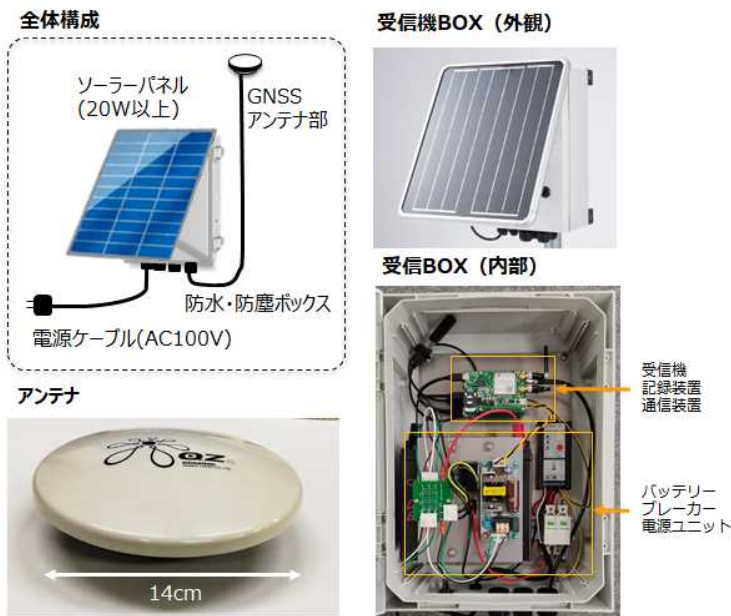
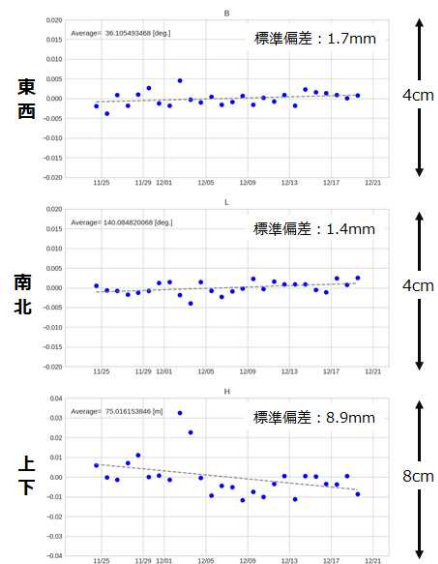


図-5 廉価版の GNSS 機器による観測装置の構成



※上下方向の座標解のトビは、三次元網平均計算時の固定点とした電子基準点の座標値 (F3解) 自体のトビに依存している。

図-6 試験観測の結果 (時系列プロット)

## 2.4 ジオイドのモニタリング技術の開発

本項目では、標高の基準面となるジオイドの形状を精密に決定し、その時間変化を重力観測衛星によってモニタリングすることで、ジオイドの時間的安定性を評価する技術を開発することを目的とする。令和2年度は、ジオイド時間変化をモニタリングする際の Reference モデルとなるジオイド形状の高精度決定に係わる研究開発を実施した。具体的には、2019年12月から2020年6月にかけて関東地方にて新たに収集された航空重力データを用いて当地域の重力ジオイド・モデルを構築し、航空重力データの導入によってもたらされるジオイド精度の改善効果について調査した。計算手法は除去還元ストークス・ヘルムート法であり、地表重力データと航空重力データの統合は最小二乗コロケーション法で行った。図-7(a)に航空重力データと既存の重力データをもとに計算されたジオイド高の空間分布を示す。航空重力データの効果を調べるため、図-7(b)に示すとおり航空重力データ導入前のジオイド高と導入後のジオイド高との間の差分の空間分布を調べた。この結果から、航空重力データは特に海陸接合部でジオイド計算結果に顕著な変化をもたらすことが分かった。航空重力データの導入に

よるジオイド精度の改善効果を調べるため、図-7(c)に示すとおり、GNSS 水準法による実測ジオイド高と計算されたジオイド高の比較を行った。その結果、実測ジオイド高と計算されたジオイド高との間の較差は、航空重力データ導入前では標準偏差 3.49cm であったのに対し、導入後では 2.43cm となった。すなわち、航空重力データの導入によってジオイド精度は改善され、目標とする精度 3cm のジオイドが計算可能であることが確認できた。

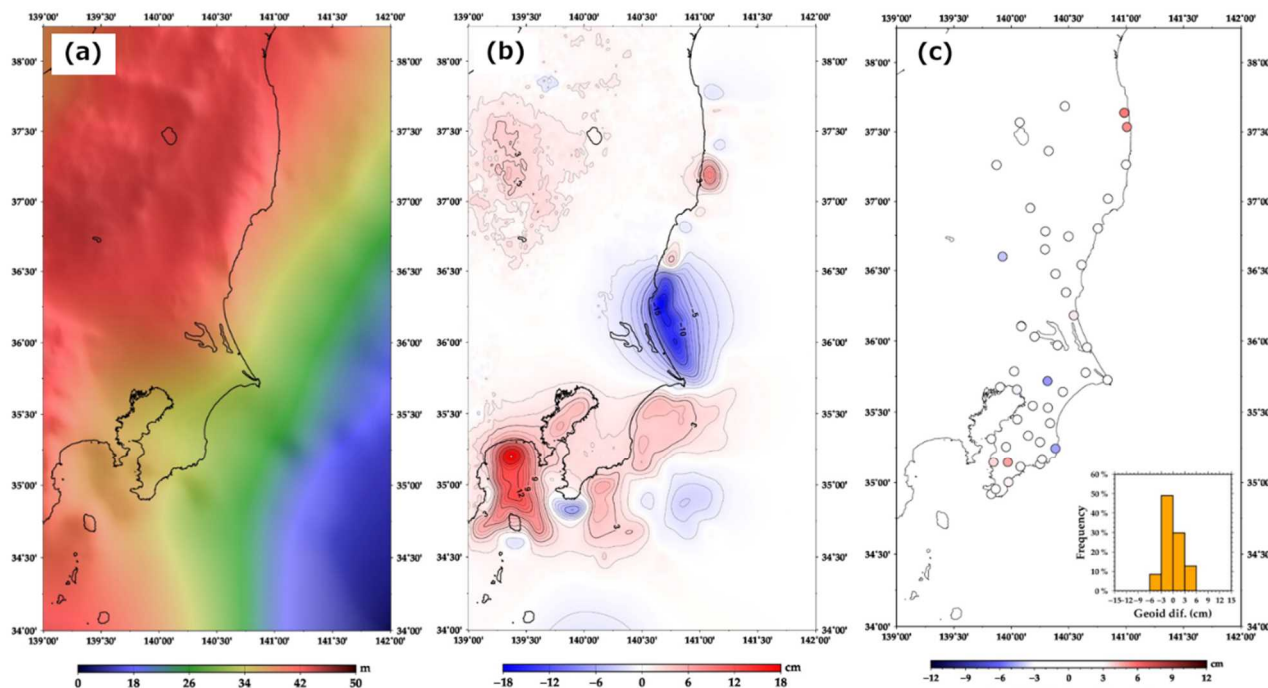


図-7 (a) 計算されたジオイド, (b) ジオイド計算への航空重力データの効果, (c) GNSS 水準法による実測ジオイド高と計算されたジオイド高との較差。

### 3. 研究を支える国際測地連携の推進

地球の正確な形状の把握には、地球全体を可能な限り均等かつ高密度に網羅した測地観測を長期間継続する必要がある。こうした観測は、1 か国では実現できないため、多くの国の協力のもと、国際的な測地連携が必須となる。こうした国際連携は、現在、国際測地学協会 (IAG) のもとで、VLBI、GNSS など各々の技術ごとに IAG 事業が活動を進めており、ITRF、地球回転パラメータ、全球重力場モデル、GNSS 衛星軌道暦など、様々なプロダクツが構築され、利用者に提供されている。さらに、全球統合測地観測システム (GGOS) によって連携が強化され、さらなる精度や利便性の向上にむけて活動が進められている。国土地理院は、GGOS 議長として議論を主導するとともに、国際 VLBI 事業、国際 GNSS 事業の国際共同観測に参加し、評議会のメンバーとして活動方針の議論に参加している。測地基準座標系は、国連においても総会決議 (国連, 2015) によって社会活動の基盤として持続可能な維持が推奨されており、国土地理院は、国連のもとで国同士が連携して測地基準系を維持するための議論に参加している。こうした活動を通じて、世界全体での測地基準座標系の構築へ貢献するとともに、日本の国家座標が世界の最新の知見に基づいて高度化されるよう、連携を行っている。

### 謝辞

MADOCA は JAXA と国土地理院の包括的協力の協定書に基づき JAXA から貸与を受けた。ALOS-2

の原初データは、国土地理院と JAXA の間の協定に基づき提供された。ALOS-2 の原初データの所有権は JAXA にある。

#### 参考文献

- Morishita, Y. (2021): Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8, 6.
- Morishita, Y., Kobayashi, T., Yarai, H. (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4197-4204.
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., Hooper, A. (2020): LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor, *Remote Sens.*, 12, 424.
- 高須知二, 安田明生, 小暮聡, 中村信一, 三吉基之, 河手香織, 平原康孝, 澤村寿一 (2013): 複数 GNSS 対応高軌道時刻推定ツール MADOCA の開発, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集.
- United Nations (2015): A global geodetic reference frame for sustainable development, <https://ggim.un.org/knowledgebase/Attachment157.aspx?AttachmentType=1>