

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2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	小林 知勝		
宇宙測地研究室	中川 弘之	古屋 智秋	
	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、災害時において災害情報を把握し、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等、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。本研究は、宇宙測地技術を用いて主に日本国内における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の構築を目指し実施する。2年目の令和3年度は、前年度に実施した各技術の高度化やデータ分析用のツール開発を進めた。

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「地表変動の詳細な時空間分布の計測及びモデル化する技術の開発」、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。

2.1 マルチ GNSS-PPP による定常解析技術の開発

本課題では、日本列島における地殻変動の時空間モデル（以下「地表変動モデル」という。）の作成に資する、精密単独測位（PPP）を用いた電子基準点の日々の座標値の推定手法を検討している。地表変動モデルでは、電子基準点の日々の座標値として主に高精度な F5 解と R5 解を想定しているが、電子基準点「つくば 1」の 1 点固定の解析のため、例えば関東地方の大災害で解析に支障をきたし、地表変動モデルを迅速に提供できなくなる可能性がある。一方、PPP は固定点が不要なため、より災害に強いことが期待される。また、F5、R5 解析とは独立な手法なので、F5、R5 解のチェックや冗長性の確保が行える。そこで、令和3年度は地表変動モデルにおける PPP の解の利用可能性を検討する目的で、これと IGS 解や F5 解との整合性を評価した。

PPP の解は、国土地理院で MADOCA を用いて推定した後処理暦（阿部ほか，2021）を使用して 2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日の期間，全国の電子基準点について GPS，GLONASS 及び準天頂衛星による 30 秒間隔の PPP-AR 解析を日々実施し，その日平均値（以下「PPP 解」という．）を使用した．解析は RTKLIB，アンテナ位相特性モデルは F5 解析と同じものを使用している．まず，国内の IGS 観測点，STK2（新十津川 A），ISHI（石岡），TSKB（つくば），TSK2（つくば 2A），AIRA（始良），CCJ2（父島 A），MCIL（南鳥島）で IGS 解と PPP 解，F5 解の座標値の比較を行い，ITRF2014 との整合性を評価した．次に，全国の電子基準点について PPP 解と F5 解との比較を行った．なお，準天頂衛星を含む PPP 解析では，特定の受信機・ファームウェアのデータの場合，RTKLIB の解析パラメータの値によっては解が不安定になる（中川，2022）．本項では解が不安定にならない値を用いて解析を行っている．

IGS 解からの PPP 解と F5 解の座標値のずれの平均値を図-1 に示す．CCJ2（父島 A）と MCIL（南鳥島）以外の 5 観測点では，東西成分，南北成分は F5 解の方が PPP 解よりも小さく，F5 解が約 1～3mm 程度，PPP 解が 1～6mm 程度であり，上下成分は F5 解と PPP 解がほぼ同程度で 3mm～十数 mm である．すなわち，これらの 5 観測点では F5 解，PPP 解とも 1cm 程度の範囲で IGS 解と整合している．CCJ2 と MCIL においても，PPP 解は同様に IGS 解と整合している．CCJ2 の F5 解は東西・上下成分で PPP 解よりもずれの平均値が大きいが，標準偏差も東西約 5mm，上下約 19mm と大きいので，ばらつきの範囲内で IGS 解と整合しているといえる．なお，MCIL の F5 解には IGS 解から顕著なずれが見られる．MCIL の F5 解の上下成分は 2018 年 10 月ごろまでは IGS 解とよく一致していたが，その後 F5 解のみ座標値の減少がはじまり，最終的に前述のずれと同程度まで座標差が増大していることがわかっている（中川，2022）．したがって，このドリフトにより，ずれが生じたと思われるが，その原因は不明である．

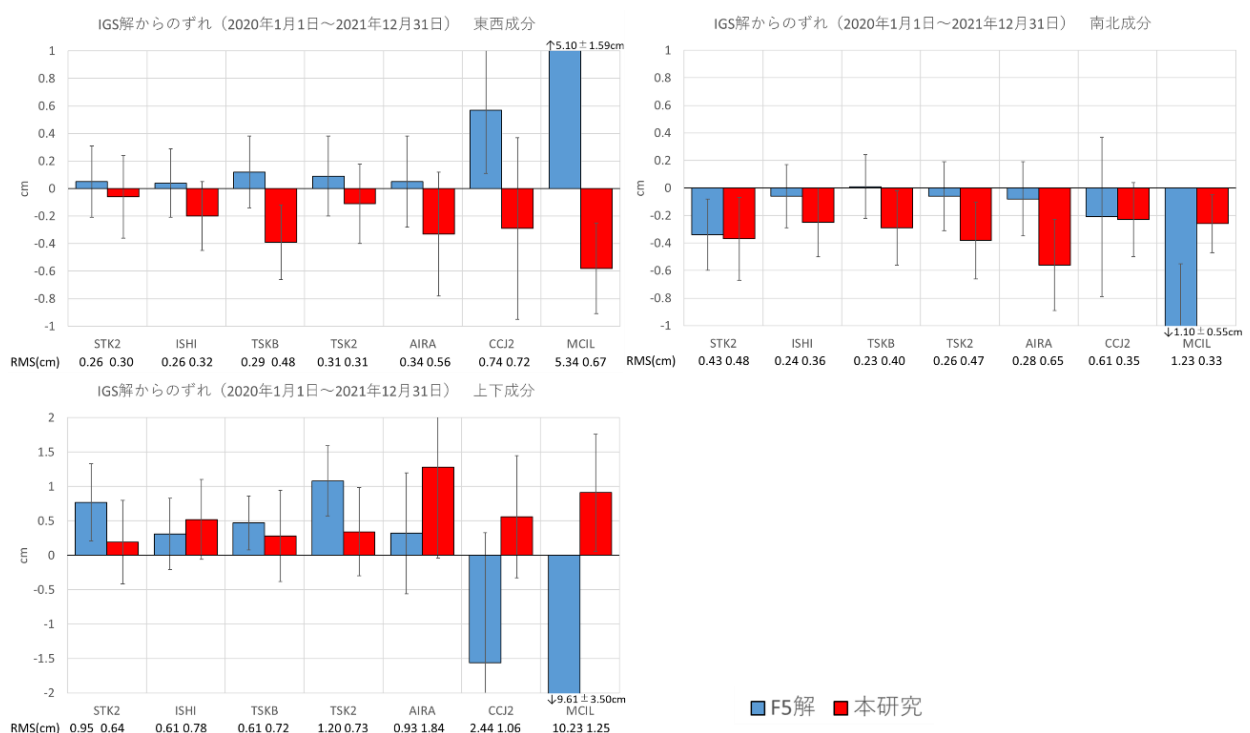


図-1 PPP 解及び F5 解の座標値の IGS 解からのずれ．2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日の平均値．（青：F5 解，赤：PPP 解）．横軸は観測局名でエラーバーは標準偏差．下の数字は RMS（単位：cm）．

図-2 に全国の電子基準点における東西，南北，上下各成分の PPP 解の F5 解からのずれの平均値を示す．東西・南北のずれの平均値は数 mm 程度以下であり，緯度依存性が見られる．一方，上下成分では PPP 解は F5 解に対して下方向のバイアスが見られ，その大きさはおよそ数 mm から 2cm 程度である．本稿の PPP 解析と F5 解析の固定点「つくば 1」の座標を与える解析（村松ほか，2021）の仰角は同じ（7 度）ため，この上下方向のバイアスは仰角の設定の違いによるものではない．また，図は割愛するが，その空間分布を精査すると，緯度方向の系統性を含め，特段の地理的な偏りや系統性は見られない．一方，アンテナタイプ・架台タイプの組み合わせごとの上下方向のバイアスを調べると（図-3），組み合わせごとに大小が見られることがわかった．このことは，アンテナ・架台の位相特性がこのバイアスに何らかの影響を与えていることを示唆している．今後 PPP 解を地表変動モデルに使用の方策を検討するにあたっては，このバイアスの原因を調査し軽減することが必要である．

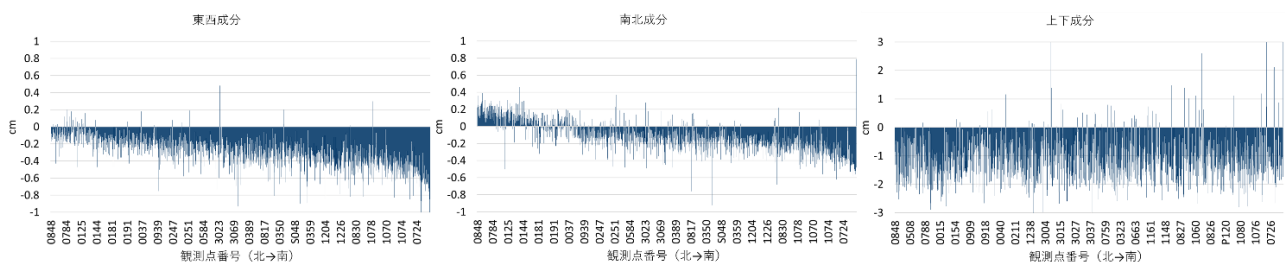


図-2 PPP 解の F5 解からのずれ．2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日の平均値．

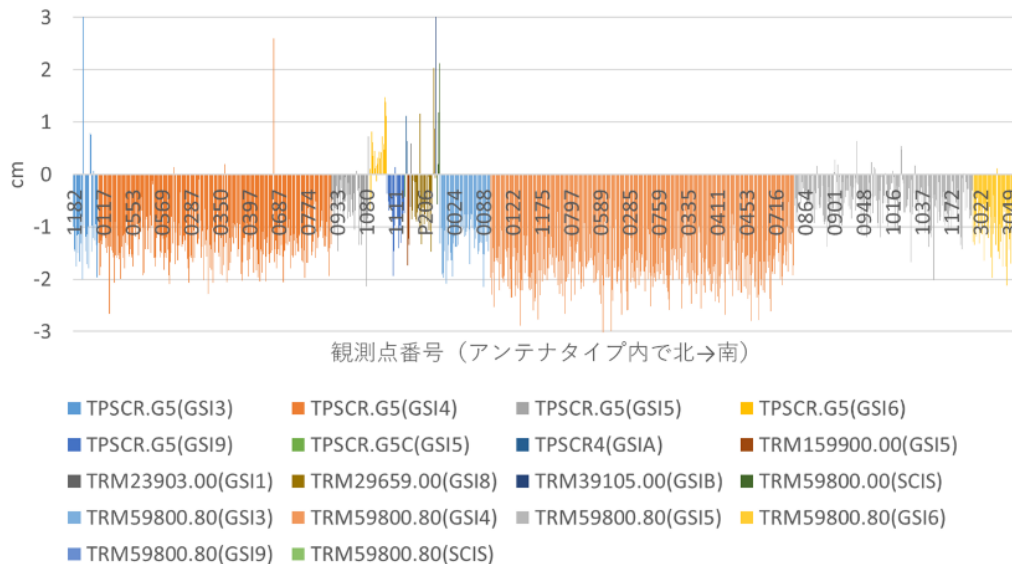


図-3 アンテナタイプ及び架台タイプごとの PPP 解の F5 解からのずれの平均値（2020 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日 上下成分）．同じアンテナタイプ・架台タイプ内で，観測点は北から南に並べている．

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

本課題は，SAR による面的な地表変動の計測により，GEONET 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的としている．定常時には，全国を網羅的に対象として数 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，地表変動の計測を行う．地震等の非定常時には，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．令和3年度は，定常時については，時系列解析結果をウェブ地図上で表示できる機能を開発した．非定常時については，3次元解析のための汎用プログラムの改良を行うとともに，事例解析により精度検証を行った．また，詳細なマニュアルを作成し，事業で利用できる環境を整えた．

定常時のための時系列解析結果は，広範囲かつ高分解能な3次元データであり，一般的にデータサイズが大きく，ウェブ地図上でスムーズかつ判読しやすく表示するのは容易ではない．そこで，今回開発した機能では，時系列解析結果のデータ形式として，データの一部分に高速でアクセス可能なHDF5形式を採用し，大容量のデータでも高速に表示することを可能にした．ウェブ地図はLeafletをベースとし，背景地図の変更や任意のレイヤの表示等の基本機能を備えた．登録された時系列解析結果レイヤを選択すると，地図上に変動速度画像が表示され，解析範囲内の任意の点をウ

ェブ地図上で選択すると，小ウィンドウ内に選択点の変動時系列グラフがスムーズに表示される．基準範囲（変動0を仮定する範囲）をウェブ地図上で変更することも可能である．また，複数の時系列解析結果を同時に表示し，比較することもできる．本機能により，膨大な量の時系列解析結果をスムーズにウェブ地図上で表示し，判読や解釈を効率化することが期待できる．

非定常時のための3次元解析プログラムでは，計測精度が大きく異なる干渉SAR，ピクセルオフセット，SBI（Split-bandwidth Interferometry）の各手法の解析結果を統合的に扱えるよう，各解析結果の誤差を計算し，それを考慮した重み付き最小二乗法で3次元変動量を算出するようにした．これにより，高精度な干渉SARデータが利用可能な領域では，主に干渉SAR由来の高精度な3次元変動量が得られ，かつ，断層沿い等複雑な変動が生じて干渉SARデータが利用可能ではない領域でも，精度は劣るものの，ピクセルオフセット等により空白域が埋められた3次元変動量を得ることができる．また，重み付き最小二乗法により，導出された3次元変動量の各ピクセルの推定誤差も算出できる．平成28年（2016年）熊本地震及び2016年鳥取県中部の地震を対象とする事例解析では，GNSSや水準測量との比較及び3次元変動量の推定誤差による精度検証を行い，4方向以上の干渉SARデータが利用可能な領域では，東西上下成分で約1cm，南北成分で約4cm，それ以外の領域では全成分で10cm弱の誤差（ 1σ ）で3次元変動量が得られることを確認した（図-4）．3次元解析手法や事例解析の詳細については，Morishita and Kobayashi（2022）を参照されたい．本手法を用いることで，地震後数日～1か月以内に高分解能かつ高精度な3次元変動量が得られるようになる．従来の座標・標高補正パラメータは三角点改測を要するため提供まで数か月を要し，また，複雑な変動域はパラメータ範囲外となっていたが，SARによって得られる3次元変動量を利用することにより，迅速かつ網羅的な座標・

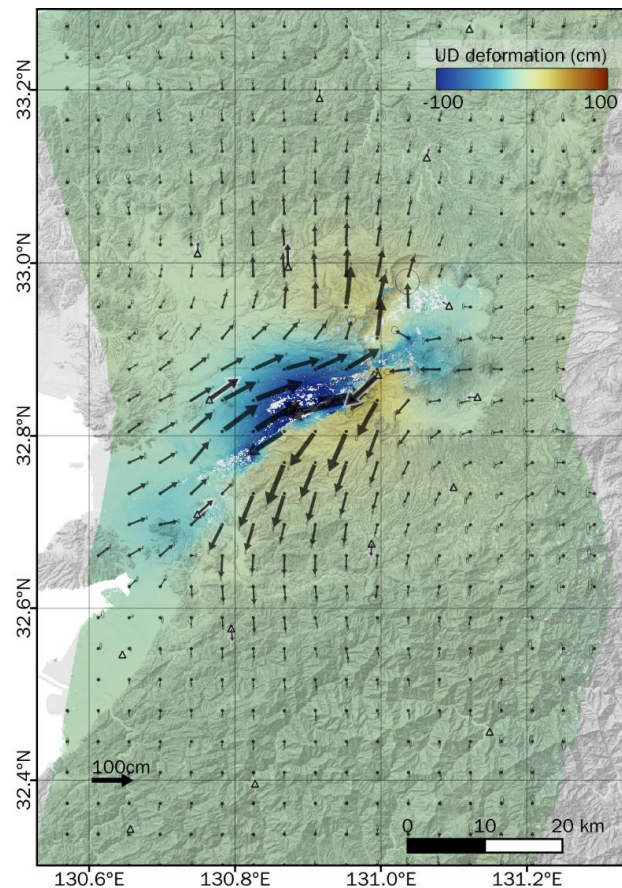


図-4 平成28年（2016年）熊本地震の3次元変動解析結果

標高補正パラメータの作成が可能になることが期待される。

2.3 地表変動の詳細な時空間分布を計測及びモデル化する技術の開発

本課題では、日本のように日々地殻変動にさらされる国土において、任意の計測時点の国家座標を管理するモデルの構築を目的とし、電子基準点の日々の座標値を用いた地表変動モデルを作成する手法を検討している。令和3年度は、地表変動モデルの計算のうち時系列モデルの推定を実施した。推定には、電子基準点の日々の座標値（F5 解）に含まれる余効変動を対数関数や指数関数等によって表現する手法（小門，2019）を用いるが、これらの関数の時定数や係数を推定するため単純に電子基準点の F5 解を用いるだけでは、植生等の電子基準点の周辺環境の変化や観測機器の故障により発生する F5 解の外れ値の影響を受けてしまう。そこで、上記の推定に用いる F5 解とは別に、周辺環境の影響を比較的大きく受けてしまう、精密単独測位（PPP）により電子基準点の 30 秒ごとの座標値を推定し、その 1 日分（2880 個）の座標値の標準偏差を、前述の指数関数・対数関数の時定数等の推定時に重みとして考慮する手法を検討した。

電子基準点「関ヶ原」の時系列モデルを平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震後の F5 解から推定したグラフを図-5 に示す。2014 年前半までに見られる F5 解の変動は、電子基準点の周辺の樹木の生長による見かけ上の変動と考えられ、時系列モデルとしては追従すべきではない。しかし、図-5（左）のように F5 解とモデル値による残差を単純に最小とすべく時系列モデルの推定を行うと、それらの変動に追従してしまい、2014 年後半以降の時系列モデルの推定にも影響を与えていることがわかる。一方、図-5（中）のように PPP の標準偏差（図-5（右））を重みとして時系列モデルを推定した場合、2014 年前半までの見かけ上の変動に追従することがほとんどなくなり、また 2014 年後半の時系列モデルも大きな誤差なく推定できていることがわかる。今後は、この手法により推定される時系列モデルを用いて、任意の日付における電子基準点ごとのモデル値を計算し、地表変動モデルの空間補間の手法に関する検討を実施する予定である。

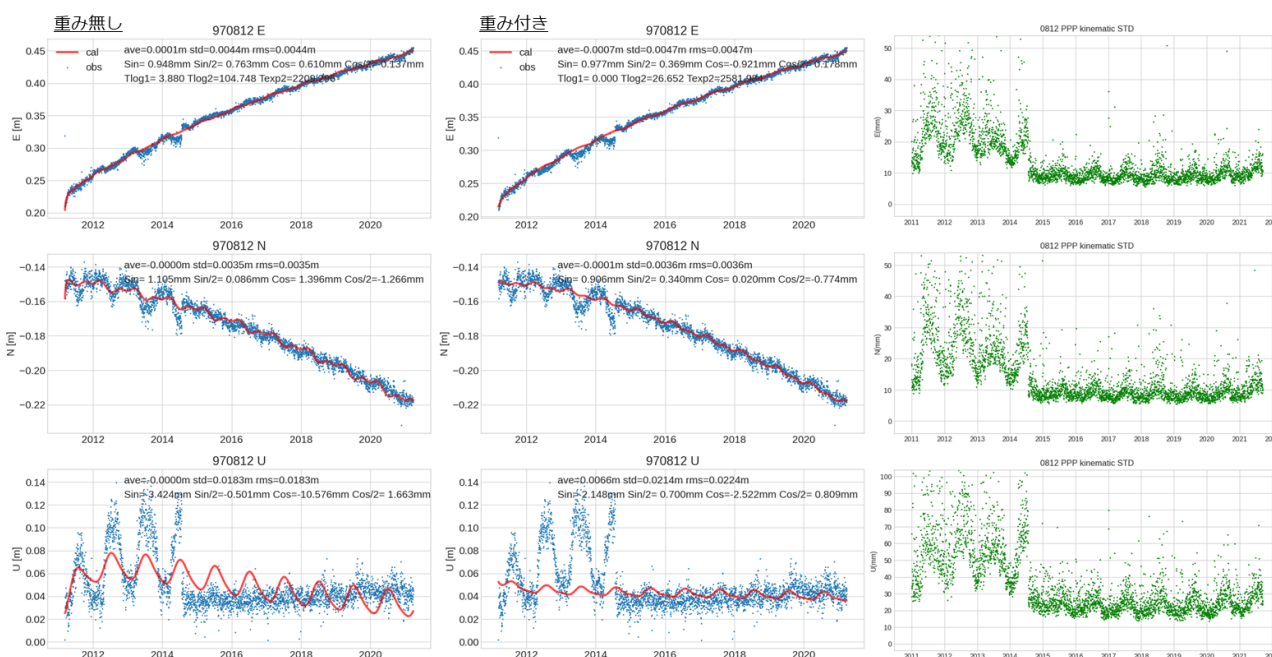


図-5 電子基準点「関ヶ原」における時系列モデル（左，中）と精密単独測位の標準偏差（右）

2.4 ジオイドのモニタリング技術の開発

本課題は、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等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3年度は、重力観測衛星 GRACE/GRACE-FO から日本列島のジオイド時間変化をモニタリングするための研究開発を行った。

GRACE/GRACE-FO は、地球のジオイド及び重力場の観測に特化した人工衛星であり、その時空間分解能はそれぞれ約 1 か月と約 300km である。2002 年 4 月～2017 年 6 月までは GRACE が観測を行い、2018 年 5 月以降は GRACE-FO が観測を行っている。本研究では、球面調和関数の展開係数 60 次からなる GRACE/GRACE-FO Level-2 RL06 データを用いて、日本列島のジオイド時間変化のモニタリングを試みる。GRACE/GRACE-FO データは地球表層流体の折り返し雑音に起因した短波長誤差を含むことから、その影響を空間フィルタによって除去した。また、地球の力学的扁平項（C20 項）は GRACE/GRACE-FO では観測精度が低いことから、SLR によって観測された結果と入れ替えた。図-6 に、GRACE/GRACE-FO によって観測された日本各地のジオイド時間変化の図を示す。得られたジオイド時間変化は、非線形最小二乗法により経年変化・季節変化・2011 年東北沖地震の地震時及び地震後変化を表わす関数でフィッティングを行った。その結果、いずれの地域においても 1～2mm 程度の季節的なジオイド変化が見られた。これは主に、東北日本では冬季の積雪、西南日本では夏季の降雨に伴う質量変化を反映する。また、2011 年東北沖地震に伴う地震時及び地震後のジオイド変化も見られる。地震時のステップ状の変化は主に断層運動に伴う地殻密度の変化を反映しており、地震後のなだかな変化は主に地震時応力の粘性的緩和を反映していると考えられる。それぞれの地域の過去 10 年間の累積ジオイド変化量は、北海道で約 3mm、東北で約 6mm、関東で約 5mm、関西で約 2mm、九州で約 1mm であった。

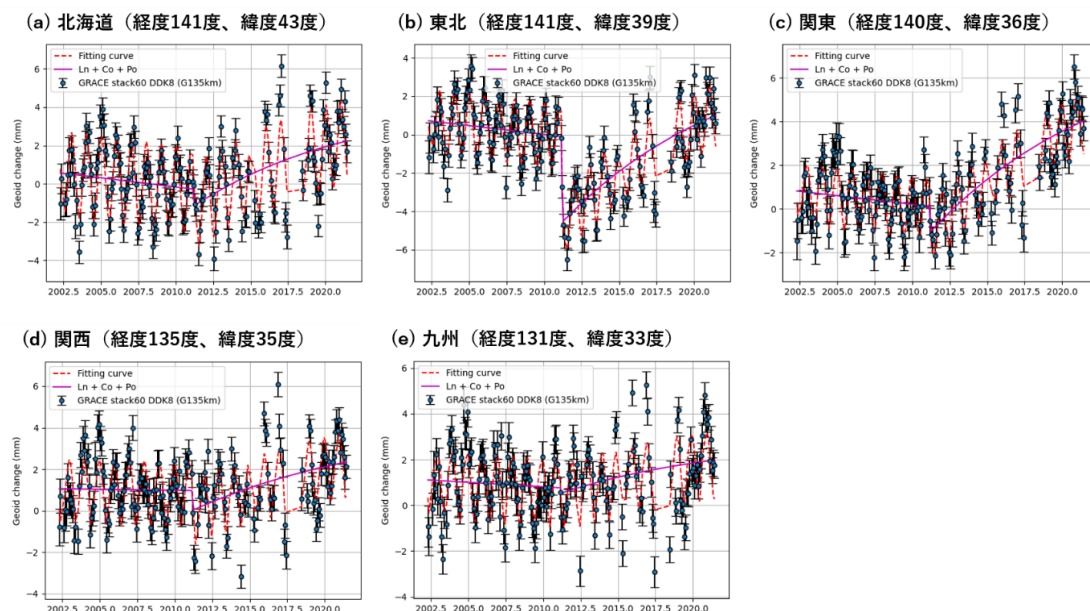


図-6 重力観測衛星 GRACE/GRACE-FO によって観測された日本各地のジオイド時間変化の図。それぞれ、(a)北海道(経度 141 度、緯度 43 度)、(b)東北(経度 141 度、緯度 39 度)、(c)関東(経度 140 度、緯度 36 度)、(d)関西(経度 135 度、緯度 35 度)、(e)九州(経度 131 度、緯度 33 度)、のジオイド時間変化を示す。赤の破線は、経年・季節変化・2011 年東北沖地震の地震時及び地震後変化を示す。紫線は、経年変化・2011 年東北沖地震の地震時及び地震後変化を示す。

GRACE/GRACE-FO からジオイド変化及び重力変化を計算するためのプログラムは Python 言語で開発した。そして、その操作性を高めるため、Graphical User Interface による空間フィルターの調整機能や時系列結果表示機能を開発した。開発したプログラムは、標高基準系の基盤となるジオイドの時間的安定性のモニタリングに活用できる。また、ジオイド測量や重力測量を行う際、必要な測量範囲を検討するための参考情報として活用できる。

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

- 阿部聡, 大野圭太郎, 高松直史, 村松弘規, 古屋智秋 (2021): GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握 (第 2 年次), 令和 2 年度調査研究年報, 108-110.
- 小門研亮 (2019): 将来の測地基準系の保持手法に関する研究 (第 7 年次), 平成 30 年度調査研究年報, 150-153.
- Morishita, Y. and Kobayashi, T. (2022): Three-dimensional deformation and its uncertainty derived by integrating multiple SAR data analysis methods, Earth Planets Space, 74, 16.
- 村松弘規, 高松直史, 阿部聡, 古屋智秋, 加藤知瑛, 大野圭太郎, 畑中雄樹, 攪上泰亮, 大橋和幸 (2021): 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, 国土地理院時報, 134.
- 中川弘之 (2022): 解析手法の異なる GNSS 測位解の整合性に関する研究 (第 3 年次), 令和 3 年度調査研究年報, 194-201.