

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3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	
	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、利用者へ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。3年目の令和4年度は、前年度に実施した各技術の高度化やデータ表示・分析用のツール開発・改造を進めた。

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を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、複数の衛星系（マルチ GNSS）による精密単独測位（PPP）を用いた電子基準点の座標値測定手法を検討している。地表変動モデルで使用する電子基準点の日々の座標値（以下「F5 解」という。）は電子基準点「つくば 1」の 1 点固定で求めるため、例えば関東地方の大災害により解析に支障をきたす可能性がある。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。令和4年度は、PPP におけるマルチ GNSS の効果の検証と、IGS 点における PPP 解と F5 解とのバイアス量の時間変化について調査を行った。

2.1.1 PPP におけるマルチ GNSS の効果の検証

PPP の解の安定性におけるマルチ GNSS の効果を検証するために、衛星系の組み合わせを変えて解の標準偏差と FIX 率を調査した。F5 解や PPP 解ではアンテナや受信機の保守・交換等の前後に、解の時系列にオフセットが生じるため、調査期間はこのようなオフセットが発生していない 2021 年 8 月 1 日から 31 日とした。この 1 ヶ月間について、全電子基準点に対して、①GPS のみ ②GPS と GLONASS ③GPS と 準天頂衛星 ④GPS, GLONASS 及び準天頂衛星の 4 通りの衛星系の組み合わせで PPP-AR の 1 日ごとのスタティック解析を行い、解の標準偏差と FIX 率を調査した。暦は MADOCA を用いて国土地理院が推定した後処理暦（阿部ほか，2021）を使用している。観測点ごとの標準偏差の累積度数分布を図-1 に、FIX 率の割合を図-2 に示す。

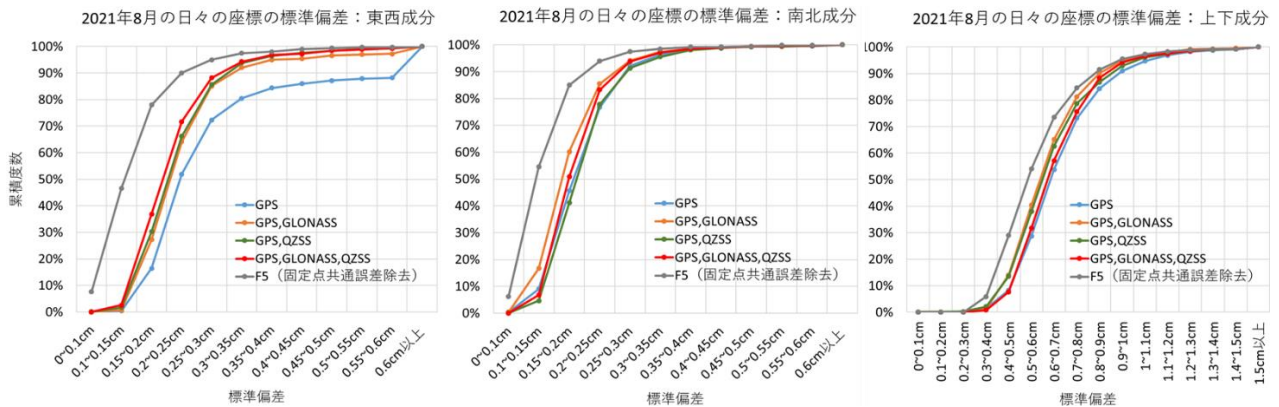


図-1 2021 年 8 月 1 日から 31 日における全電子基準点の日々の座標の標準偏差。

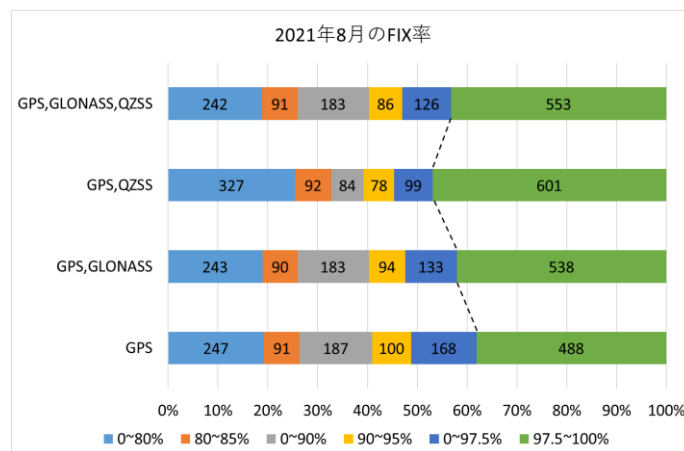


図-2 2021 年 8 月 1 日から 31 日における FIX 率ごとの観測点数の割合。グラフ中の数値は観測点数。

図-1 を見ると、マルチ GNSS による PPP 解は F5 解には劣るものの、GPS のみの場合に比べ複数の衛星系を用いた場合の方がいずれの成分でも解の標準偏差が小さな観測点の割合が増加しており、解の安定性が向上していることを確認できる。FIX 率の違いは標準偏差ほど明確ではないが、FIX 率が 97.5%以上の観測局の割合は、GPS のみの場合よりも複数の衛星系を用いた場合の方が高い傾向が見られる（図-2）。

2.1.2 IGS 点における PPP 解と F5 解とのバイアス量の時間変化

将来にわたって PPP 解を地表変動モデル作成に使用するためには、時間が経過しても PPP 解と F5 解が整合していることが望ましい。そこで、離島を除く国内 5 点の IGS 点について、F5 解と PPP 解

との間のバイアスの時間変化を調査した。調査には、宗包（2017）による後処理 PPP 解析システムのスタティック解（以下「後処理 PPP 解析システムの解」という。）を使用した。調査期間は GLONASS のデータが安定して取得されている 2013 年から 2021 年末までの 9 年間とし、F5 解に対する後処理 PPP 解析システムの解の日々の座標差について、1 年ごとの箱ひげ図を作成して年ごとの分布の変化を調べた。なお、各観測点について保守・交換等の日の前後の座標差の時系列のステップを目視し、補正を行っている。

結果を図-3 に示す。これらの IGS 点においては F5 解とのバイアスはいずれの年も概ね cm レベルであり、顕著な時間変化も認められないといえる。

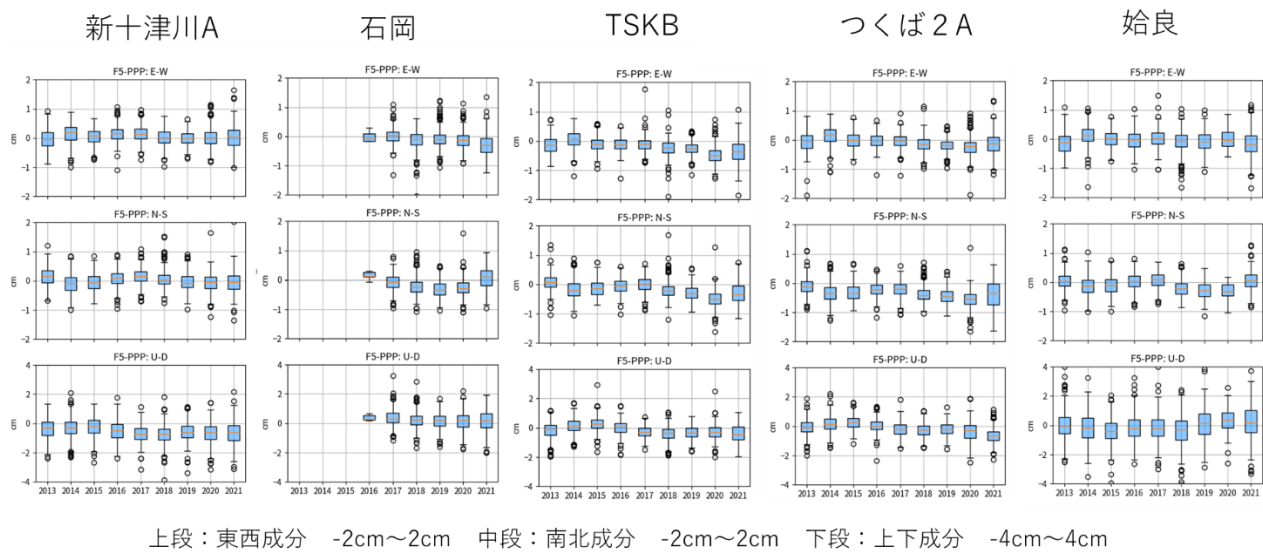


図-3 F5 解に対する後処理 PPP 解析システムの解の差の時間変化。

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 4 年度は、前年度開発した、時系列解析結果をウェブ地図上で表示・分析できる機能の改造を実施した。時系列解析結果は、広範囲かつ高分解能な画像データであり、一般的にデータサイズが大きく、ウェブ地図上で高いレスポンス性能をもって表示・操作するのは容易ではない。前年度に開発を始めた表示・分析機能では、時系列解析結果のデータ形式として、データの一部に高速でアクセス可能な HDF5 形式を採用することで、大容量のデータでも高速に表示することを可能にした。令和 4 年度は、時系列解析結果の判読性能の向上を目指して、画像タイルレイヤの合成表示機能（対象のレイヤより下にあるレイヤと乗算合成する機能）や透過率設定の機能等を追加実装した（図-4）。これら機能により、膨大な量の時系列解析結果の判読や分析の効率性をさらに向上させることが期待できる。

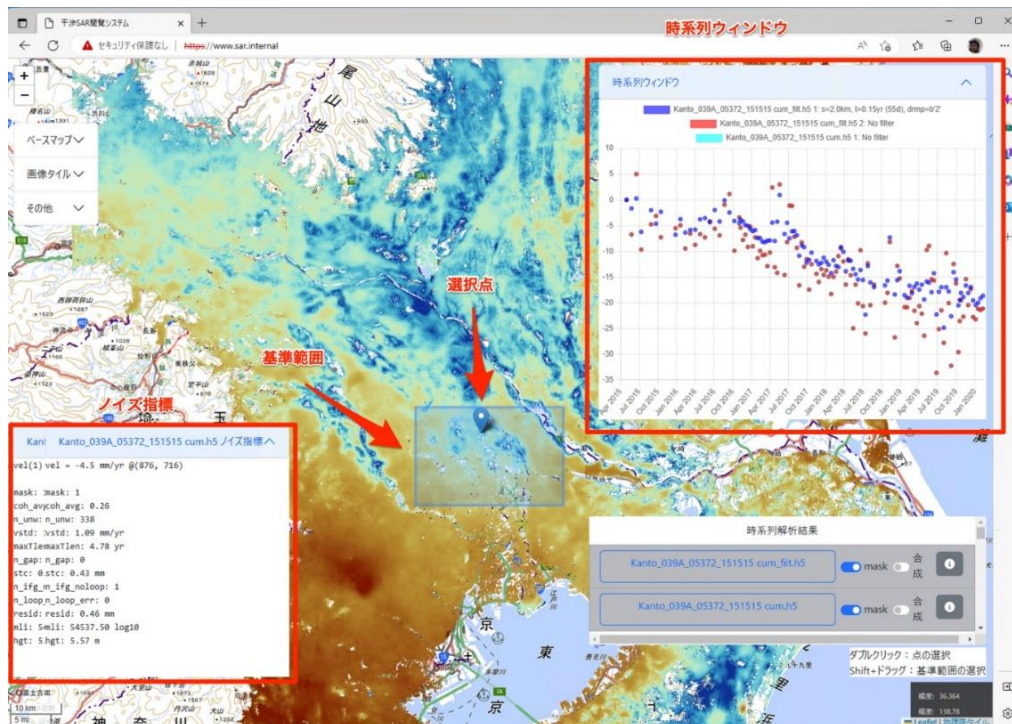


図-4 干渉 SAR 時系列解析結果ウェブ地図表示機能の表示例。

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ために、定常時及び地震等の災害時に対する地表変動をモデル化する技術の開発を実施している。

定常時においては、F5 解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 4 年度は、前年度に検討した時系列モデルの推定手法を用いて、2003 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日の期間で各電子基準点の時系列モデルを推定した。推定を進める中で、遠く離れた電子基準点同士で、F5 解と時系列モデルの残差に共通のパターンが見られる期間があることを確認した(図-5)。これは、F5 解の解析固定点である電子基準点「つくば1」の誤差が全電子基準点に共通に含まれてしまうことが原因と推察され、これら共通誤差を除去するため、以下の手順により時系列モデルの推定に用いる新たな座標値(以下「F5 修正解」という。)を計算した。

- ① 全国の電子基準点から配置が偏らないように 50 点選定し、その時系列モデルを F5 解から推定
- ② 推定された時系列モデルから計算されるモデル値と F5 解の 1 日ごとの残差をそれぞれの電子基準点で計算し、50 点分を平均
- ③ 得られた値を共通誤差として、すべての電子基準点の F5 解から減算

図-6 に F5 解と F5 修正解を用いた電子基準点「釧路町」の時系列モデルの推定結果を示す。F5 修正解を用いた場合の残差には、F5 解を用いた場合の残差には見られない、2004 年 11 月 29 日に釧路沖で発生した地震 ($M_j7.1$) 後の余効変動と思われる緩やかな変化を確認することができる(図-6 (左)、(中))。これは、釧路沖の地震後に電子基準点で観測することができる程度の余効変動が存在したことを意味し、時系列モデルの推定時に対数関数でフィッティングすることで、より残差の小さい時系列モデルを得ることができた(図-6 (右))。このように、F5 修正解を用いることで、各電子基準点の微小な変動を確認することが可能となり、より高精度な時系列モデルの作成が可能となった。今後は、

F5 修正解で推定した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。

また、災害時に関しては、前年度までに作成した非定常時のための SAR 3 次元解析プログラム（小林ほか，2022）をもとに、設定や解析を GUI で行うことができるソフトウェアの開発に着手した。

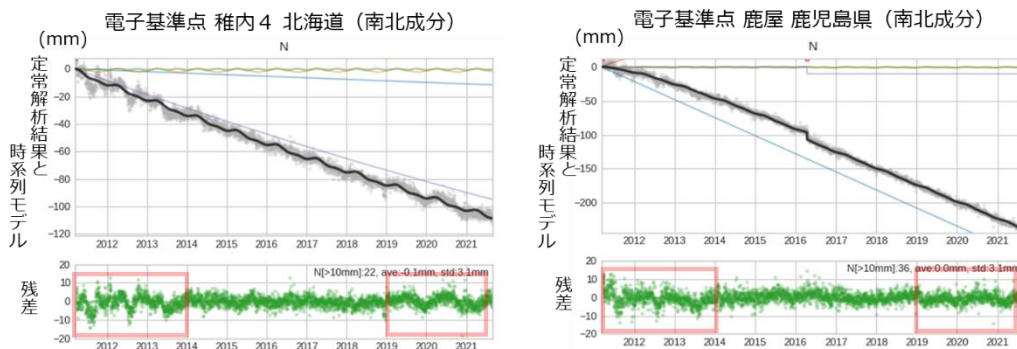


図-5 時系列モデルの推定結果と残差（赤枠は共通パターンを確認できる期間）。

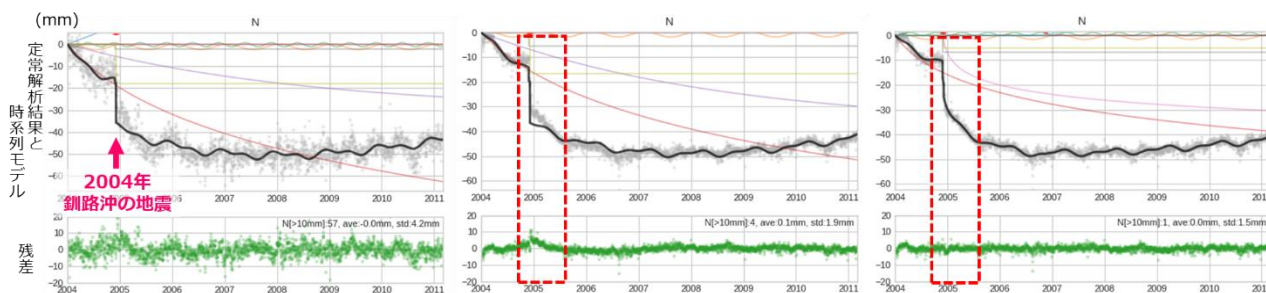


図-6 電子基準点「釧路町」の時系列モデルの推定結果と残差（左：F5 解を使用，中：F5 修正解を使用，右：F5 修正解を使用して釧路沖の地震の余効変動を対数関数でフィッティング）。

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や様々な測地観測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 4 年度は、地震時に生じるジオイド変化を数値モデリングによって推定するための研究開発を行った。

ジオイドは地震に対し極めて安定しているが、 M_w8 を超える規模になるとその影響は無視できなくなる。例えば、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M_w9) の際には、震源付近で約 2cm、震源に近い陸域で約 1cm のジオイド変化が生じたと考えられている。地震時ジオイド変化をもたらす要因としては、(1)地殻変動、(2)地殻の体積膨張/圧縮、(3)モホ面の変形、(4)マンツルの体積膨張/圧縮、等が挙げられる。その大部分は(1)と(2)によって占められており、これらは Okubo (1992)による dislocation 理論によって推定可能である。そこで本研究では、Okubo 理論に基づき、想定南海トラフ地震によって生じる地震時ジオイド変化の推定計算を行った。計算に使用した断層すべり分布モデルは、Ohno et al. (2022)による 2951 個の矩形要素からなるモデルで、 M_w は 8.75 である。

図-7 に計算された想定南海トラフ地震によるジオイド変化の分布図を示す。ジオイド変化量は、最大で約 1cm であり、内陸では高知・愛媛の西部で約 8mm、三重で約 5mm にも及んだ。2011 年東北地方太平洋沖地震と比べると、今回の想定南海トラフ地震は震源が陸に近いので、陸域の広い範囲でジオイド変化が見られた。断層すべり量とジオイド変化量は、おおよそ線形関係にあることから、断層

すべり量が2倍になるとジオイド変化量も2倍となる。すなわち、 M_w9 クラスになるとジオイド変化量は内陸部でも2~3cmに達すると予想される。

国土地理院は現在、全国規模の航空重力測量を行うことで精度3cmを持つ精密重力ジオイド・モデルの構築に取り組んでいる。仮に M_w9 クラスの地震が発生した場合、この精度を維持することが難しくなる可能性がある。そのため、本研究の成果は、大規模地震発生時における精密重力ジオイド・モデル改定の検討や、その事前シミュレーションに活用することが可能である。

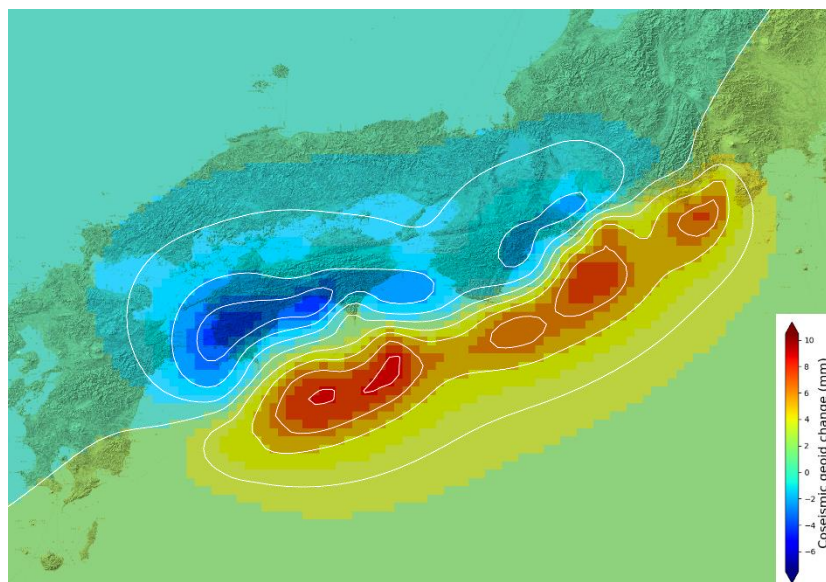


図-7 Ohno et al. (2022)による断層滑り分布モデルと Okubo (1992)の dislocation 理論に基づき推定された想定南海トラフ地震 ($M_w8.75$) 時のジオイド変化。等高線の間隔は2mmである。

謝辞

MADCOA 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.

小林知勝, 中川弘之, 古屋智秋, 森下遊, 松尾功二 (2022): 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), 令和3年度調査研究年報, 168-174.

Ohno, K., Ohta, Y., Hino, R. et al. (2022): Rapid and quantitative uncertainty estimation of coseismic slip distribution for large interplate earthquakes using real-time GNSS data and its application to tsunami inundation prediction. *Earth Planets Space* 74, 24. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01586-6>.

Okubo, S. (1992): Gravity and Potential Changes due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Journal of Geophysical Research*, 97, B5, 7137 – 7144.