

GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握（第7年次）

実施期間	令和元年度～令和7年度
測地観測センター電子基準点課	大野 圭太郎 阿部 聡 橋本 繭未 山本 理久 宮崎 隆幸 横川 正憲

1. はじめに

国土地理院は東北大学との共同研究の下、電子基準点リアルタイム解析システム（以下「REGARD」という。）を開発しており、2016年から運用している。REGARDは、電子基準点のリアルタイムデータを用いた相対測位により各電子基準点の座標値をリアルタイムに算出し、地震が発生した際には、地殻変動量の計算と震源断層モデル（矩形断層モデル、すべり分布モデル）の推定を自動的に実施するシステムである。REGARDにおける矩形断層モデル推定手法を、東北大学との共同研究の下開発された Markov Chain Monte Carlo 法（以下「MCMC」という。）による推定手法（Ohno et al., 2021）に置換することで、不確実性を定量化し、発信情報の品質と信頼性を向上させることを目的とした開発を進めてきた。リアルタイム解析に適用可能なアルゴリズムを構築し、2020年から試験運用を開始（橋本ほか、2025）、2025年に本格運用を開始した。また、すべり分布モデルについて、有意な推定事例を蓄積して REGARD の信頼性を高めることを目的に、マスク強度のチューニングを検討した。

2. 研究内容

2.1 MCMC の実運用化

REGARD の最大の特徴は「即時性」であり、災害時の初動対応に有効な情報を、表-1 に示す送付先に約 10 分未満で自動提供している。即時性を優先するため、後処理と比較してモデル推定の不確実性が大きく、送付される断層モデルや地震規模は暫定的であるという側面が強い。一方で、従来 REGARD はその不確実性を定量的に提示できないという課題があった。特に矩形断層モデルの推定手法である最尤推定法は初期値依存性が大きく、過去の事例（例えば、2016 年熊本地震）では探索不足による極値への陥りが課題であった（Kawamoto et al., 2016）。また、断層モデルやモーメントマグニチュード（Mw）に誤差情報を付与できないことから、単一の推定値があたかも真値と誤認される危険性があった。

MCMC は、観測データを説明する多数の断層モデルを乱数的に生成し、そのアンサンブルとして解を表現する手法である。これにより、①初期値依存性が小さい、②推定結果を事後確率分布として可視化できるという特徴を持ち、上記の REGARD の課題を解決するポテンシャルを持つ。MCMC をリアルタイム解析システムで活用するには、一般に、計算時間の長さ（通常は数分～数時間を要し、即時性に欠ける）やハイパーパラメータの多さ（安定したサンプリングには試行錯誤的な調整が必要）といった困難性がある。国土地理院が東北大学と共同開発した推定手法（Ohno et al., 2021）は、これら困難性を解決し、REGARD が要求する十数秒以内で、完全自動処理かつ理学的根拠を保持した MCMC 推定を実現した。

表-1 REGARD による推定結果の送付先とその目的

送付先	目的
気象庁	津波警報更新の判断を支援する情報の一つ
内閣府	津波浸水被害推計システム
JR 東海／東北大	列車運行計画策定
国土交通省水管理・国土保全局 防災課災害対策室	被害状況把握
国土地理院内	被害状況把握 災害時初動対応

矩形断層モデルの MCMC 推定は 2020 年にシステム実装後、約 3 年間の試験運用を経て、2025 年 7 月に全提供情報を MCMC による結果へ置換した。試験期間中は、巨大地震だけでなく M6～M7 クラスの地震に対する安定動作を重視し、チューニングを継続した。これにより、REGARD は従来の即時性に加えて、信頼性を両立した新たな運用体制に移行した。

2.2 すべり分布モデルのマスク強度のチューニング

REGARD のすべり分布モデルは、プレート境界面上における空間的に不均質な断層すべりを推定するためのモデルであり、矩形断層モデルでは表現しきれない巨大地震のすべりを記述する上で重要な役割を果たしてきた。しかし、2016 年の運用開始以降、矩形断層モデルでは有意な推定事例が蓄積されている一方で、すべり分布モデルについては十分な成功事例が得られていない。REGARD では、推定された断層モデルの品質を VR (Variance Reduction; 観測変位量とモデルから計算される変位量との一致度合いを 0～100%で表す) で評価しているが、十分信頼に値する閾値として設定している 80%を超える動作事例がすべり分布モデルには存在しない。この要因の一つは、REGARD が想定するような大きな地殻変動を伴う巨大プレート境界型地震がこの約 10 年間で少なかったことである。加えて、REGARD のハイパーパラメータが M8 クラスの巨大地震に最適化されており、発生頻度の高い M6～M7 クラスの地震への適応性が限定的であることも大きい。

REGARD は自動解析システムであるため、逐次的な試行錯誤でパラメータ調整を行うことは想定されていない。そのため、事前にターゲットとする地震規模を規定し、その地震規模に対して安定的に推定が行われるよう、ハイパーパラメータを固定している。すべり分布モデルの平滑化パラメータはその典型であり、巨大地震を想定して地域ごとにチューニングされた値が用いられている (Kawamoto et al., 2017)。さらに同モデルでは、推定結果に含まれるノイズ的すべりを除去するため、誤差行列に基づくマスク処理を施している。これは、各小断層のすべり推定誤差の標準偏差を基準に、閾値以上の誤差を持つすべり量を強制的にゼロとするものである。REGARD のリアルタイム測位のノイズは後処理と比較して大きいため、ノイズ変位を説明する擬似的なすべりが推定されやすく、提供される Mw や VR が過大な値となることを防ぐ目的で重要な役割を果たしている。しかし、このマスク強度も巨大地震を想定した設定となっており、中小規模の地震においては有意なすべりが過剰に削られる可能性がある。実際に、2025 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖の地震においては、REGARD で推定された地震時地殻変動量は後処理解析と比較しても遜色ない結果が得られているものの、すべり分布モデルの推定ではハイパーパラメータを原因としたすべり量の抑制が過剰に働いていることが確認された。本節では、これらのハイパーパラメータを調整することにより、REGARD のすべり分布モデルを「M8 クラスでのみ機能するモデル」から「M6～M7 クラスでも有効に機能するモデル」へと拡張でき

るかを検討する．ここで、平滑化パラメータは α とし、マスク強度はすべり量推定誤差の標準偏差に対する比（0～1）によって制御される．

2025 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖の地震（M7.5）は、上記のチューニング効果を検証する上での好例である．図-1 (a) に示すように、マスクなしの場合には震源付近およびその周辺に広くすべりが推定されるが、図-1 (b) の現行設定によるマスク処理では、それらの多くが除去され、震源の主要すべりまで消失してしまう．その結果、VR が大幅に低下し、観測変位をほとんど説明できない削りすぎの状態となる．平滑化パラメータ α とマスク強度の両方を変化させた試験を実施したところ、平滑化よりもマスク強度の影響が支配的であることが明らかとなった（図-1 (c)、図-2）．特に、現行のマスク強度 0.8 をマスク強度 0.3 に変更すると、Mw は 7.42 と妥当な値となり VR も大きな値を維持することで、本地震が REGARD によるすべり分布モデルの有意な動作事例となり得ることを確認した（図-1 (c)）．

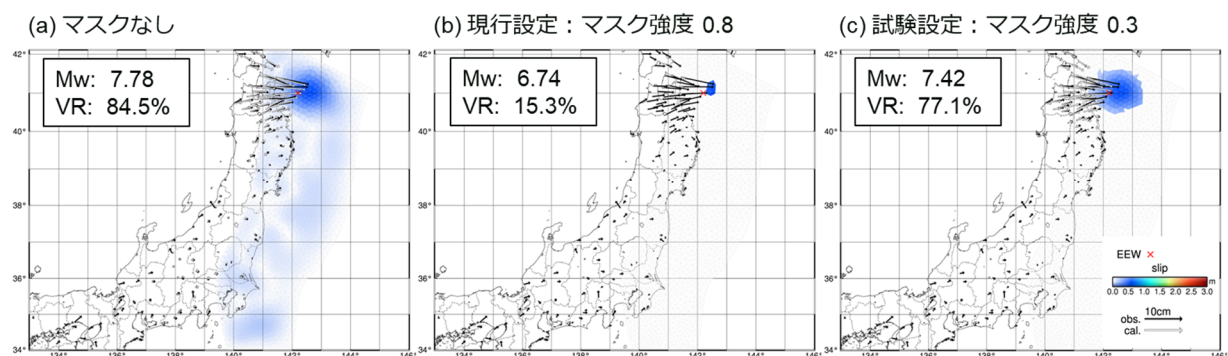


図-1 2025 年青森県東方沖の地震における REGARD のすべり分布モデル．いずれも平滑化パラメータ α は現行設定 0.25 で固定．(a) マスクなし，(b) マスク強度 0.8 の場合，(c) マスク強度 0.3 の場合．

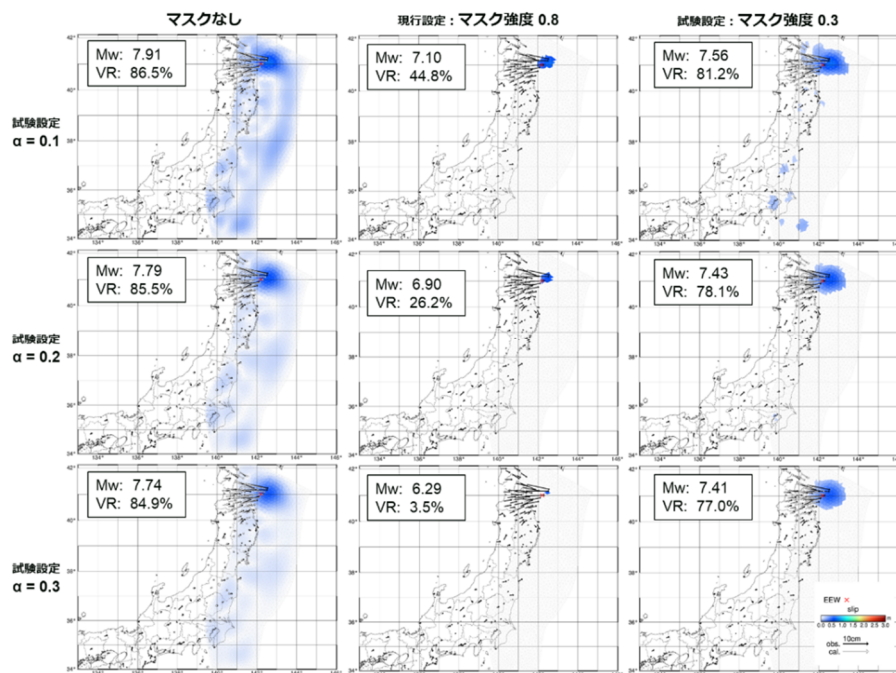


図-2 平滑化パラメータ α を変化させた試行

次に、過去の全事例を対象に、マスク強度 0.3 の適用によって不適切な VR の過大評価が生じない

かを検証した（図-3）. VR の大小関係は、マスクなし>マスク強度 0.3>マスク強度 0.8 であり、強度が大きいほど VR が小さくなるのは当然の挙動である. ここで、VR が 0%となっている事例は、マスクによりすべりが完全に削られた場合である. マスクなしで VR が 80%を超えた事例は 1 件（2025 年青森県東方沖の地震）のみであり、有意な地殻変動事例であるため、マスク後も高い VR が維持されることが望ましい. 前段のとおり、この事例はマスク強度 0.3 とすることで VR が現行の 15%から 77%に改善した. また、マスクなしで VR が 60-80%の事例は 6 件であり、いずれもノイズ変位への事例であるため、VR は小さくなることが望ましい. これらは、観測点密度が疎な島しょ域でノイズが卓越したケースや並進性のノイズが卓越したケースであり、従来のマスク強度 0.8 の方が小さい VR になるものの、十分に対処できていないケースである. これらのノイズに対しては、別途導入しているデータ品質評価情報を用いることで提供品質を確保可能である（大野ほか，2022）.

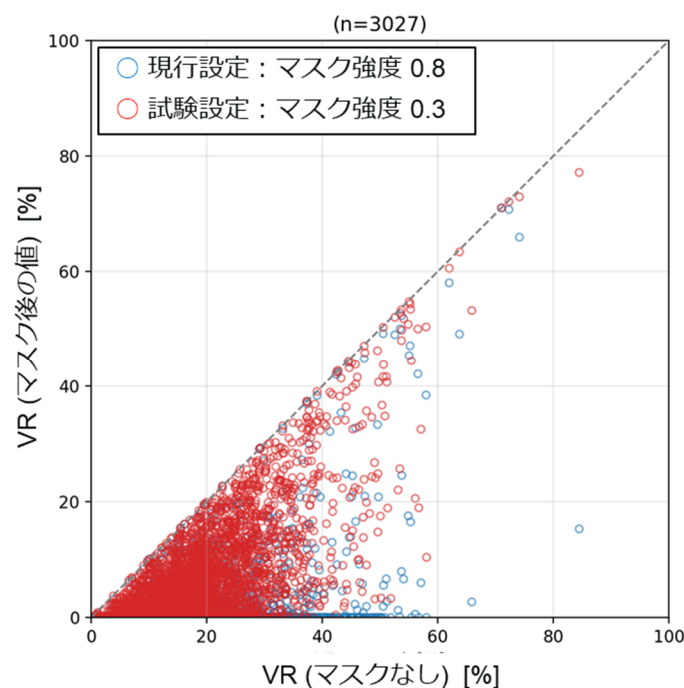


図-3 マスク強度を変更した場合の網羅的な試験

以上より、マスク強度をチューニングすることで、すべり分布モデルの成功事例の蓄積に効果があることを確認した. また、マスク強度を弱めることによりノイズ事例における VR がやや高くなる可能性はあるが、運用上支障が出るレベルではないことを確認した. 今後、地震規模が小さい場合にはマスク強度を 0.3 とする調整を、運用に導入していく予定である.

3. 稼働状況報告（令和 7 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖の地震）

令和 7 年 12 月 8 日 23 時 15 分頃に青森県東方沖で発生した地震において、REGARD は正常に稼働し、地殻変動情報及び震源断層推定結果を関係機関に提供することに成功した. 以下に REGARD の稼働状況を報告する.

3.1. 地殻変動

青森県東方沖の地震発生直後に REGARD の地殻変動量算出機能は正常に動作し、地震時の地殻変動を捉えることに成功した. 特に変動量が大きかった電子基準点「東通 2（020896）」における本震前

後の REGARD が算出した座標時系列を図-4 に示す。「東通 2」は約 9 cm の水平変位を観測した。また、地震発生翌日に国土地理院の Web ページから公開した、REGARD による地殻変動ベクトルを図-5 に示す。

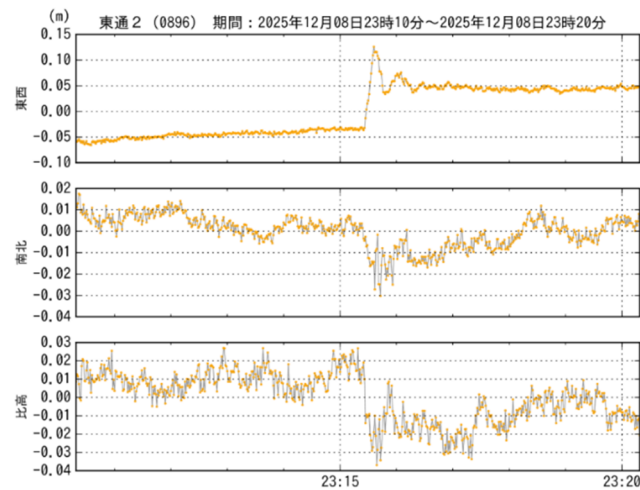


図-4 電子基準点「小松」を固定点とした「東通 2」の地震時 RTK 測位時系列グラフ

令和7年12月8日23時15分頃の青森県東方沖の地震 (M7.6 (速報値)) 前後の観測データ (リアルタイム解析結果)
地殻変動(水平)
この地震に伴い地殻変動が観測された

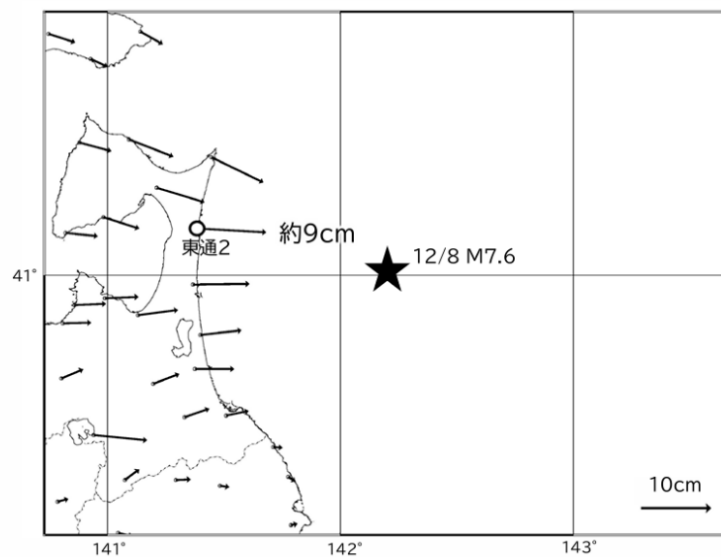


図-5 REGARD が捉えた青森県東方沖の地震の地殻変動ベクトル (水平)

3.2. 震源断層モデル

図-6 に REGARD で推定された震源断層モデルと後処理の GNSS 観測データを使用して国土地理院が推定した震源断層モデル (国土地理院, 2025 ; 以下「後処理モデル」という.) を示す。推定された M_w は, REGARD が 6.91, 後処理モデルでは 7.10 と近い値を示した。ただし, M_w の計算における剛性率を REGARD では 30 GPa, 後処理モデルでは 40 GPa と仮定している。

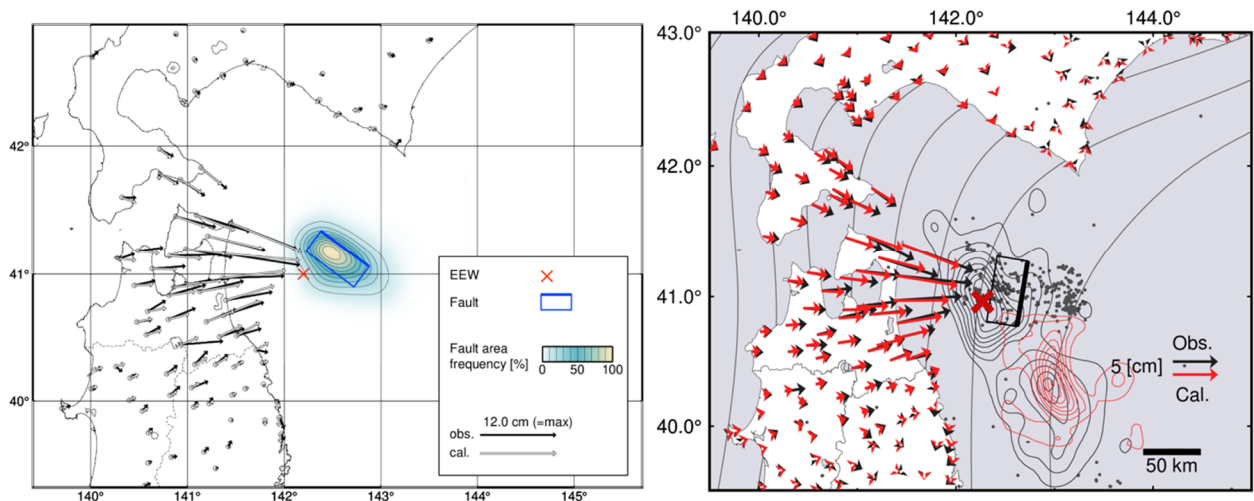
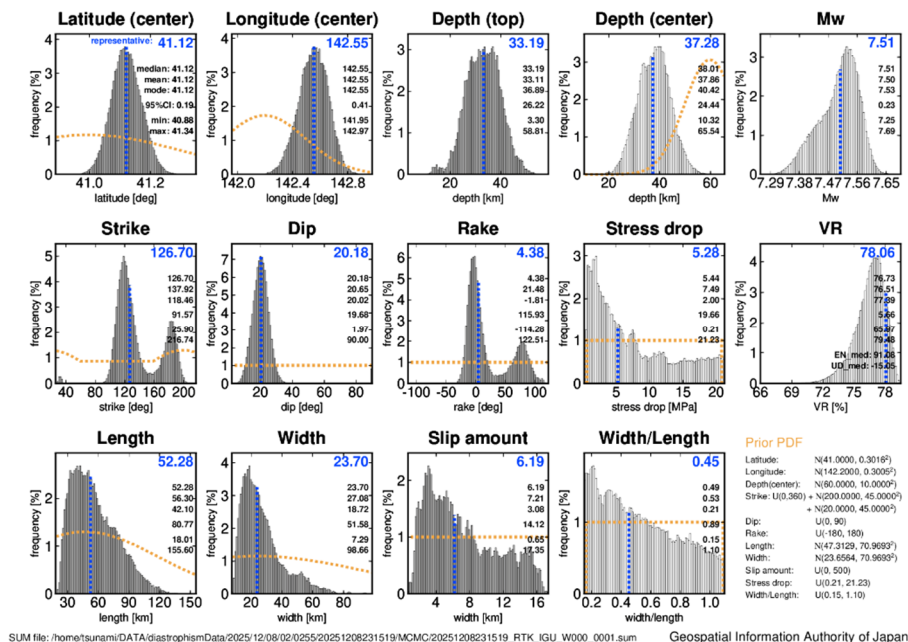


図-6 (左) REGARD が推定した震源断層モデル, (右) 国土地理院が推定した後処理震源断層モデル

推定された矩形断層モデルは、後処理モデルと比べて走向が約 90 度異なる共役断層になっている。今回の地震では下北半島の点が大きく動いているが、北側が海であることにより南北の抑えが弱かったことが原因として考えられる。REGARD が推定した事後確率分布 (図-7) をみると、走向 (Strike) やすべり角 (Rake) の分布に二峰性がみられ、その中央値は高い山の値を示している一方で、後処理断層モデルに対応する走向のモデルも探索が及んでいることがわかる。これは、REGARD が使用するリアルタイムデータにこれらモデルを分離する解像度がないことを示しており、それを不確実性の幅として提示している。

このように REGARD の震源断層パラメータの結果の代表値については、より精度を高めたモデルと一部整合しない部分があるが、リアルタイム運用での制約及び事後確率分布の情報を加味すれば、REGARD の断層推定結果は一定の精度を有していると言える。REGARD の地殻変動情報や推定された震源断層モデルはそれらの算出後、約 10 分で各関係機関へ提供された。



SUM file: /home/tsunami/DATA/diastrophismData/2025/12/08/02/0255/20251208231519/MCMC/20251208231519_RTK_IGU_W000_0001.sum Geospatial Information Authority of Japan

図-7 REGARD が推定した震源断層モデルの事後確率分布

4. 結論

REGARD では、矩形断層の推定を MCMC による推定に移行した。移行後の令和 7 年 12 月 8 日に発生した青森県東方沖の地震において、REGARD は正常に稼働し、地殻変動情報及び震源断層推定結果を関係機関へ提供することに成功し、MCMC 法によるモデルの有効性を確認できた。さらに、すべり分布モデルのハイパーパラメータを調整し M6~7 クラスでも有効に機能するモデルとできるかを検討した。今後も、より安定した信頼性の高いシステムとするため、開発を続けていく。

参考文献

- 橋本繭未, 大野圭太郎, 村上真亮, 宮崎隆幸, 高松直史, 若杉貴浩 (2025) : GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握 (第 6 年次), 国土地理院令和 6 年度調査研究年報, 102–108.
- Kawamoto S, Hiyama Y, Ohta Y, Nishimura T (2016): First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 190. doi:10.1186/s40623-016-0564-4
- 国土地理院 (2025) : https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20251209_aomorikentohouoki_earthquake_00001.html, 令和 7 年 12 月 15 日時点.
- Ohno, K., Ohta, Y., Kawamoto, S., Abe, S., Hino, R., Koshimura, S., Musa, A., and Kobayashi, H. (2021): Real-time automatic uncertainty estimation of coseismic single rectangular fault model using GNSS data, *Earth Planets and Space*, 73 (127), 1–18. doi:10.1186/s40623-021-01425-0
- 大野圭太郎, 高松直史, 阿部聡, 多田直洋, 村松弘規, 川元智司 (2022) : GNSS リアルタイム解析による地殻変動の即時把握 (第 3 年次), 国土地理院令和 3 年度調査研究年報, 124–127.