

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	田中優介	提出年	令和 3 年
学位論文の 題 目	GNSS 搬送波位相変化に基づく断層すべりの時空間発展推定 Spatio-temporal evolution of fault slip revealed by GNSS carrier phase change		

論文目次

概要	i
謝辞	v
目次	vii
第 1 章 序論	1
1.1 GNSS を用いた地殻変動観測とその誤差要因	1
1.1.1 地殻変動観測手段としての GNSS の普及	1
1.1.2 搬送波位相を用いた測位における誤差要因	3
1.2 広帯域な断層すべり推定の重要性と現状および課題	5
1.3 初期余効すべり推定の重要性と現状および課題	8
1.3.1 初期余効すべり推定の重要性	8
1.3.2 初期余効すべりの特徴抽出に関する先行研究	10
1.4 測位に基づく断層すべり推定の課題	11
1.5 搬送波位相を直接用いる推定手法	12
1.6 本研究の目的と本論文の構成	13
第 2 章 PTS の原理と定式化	25
2.1 PTS の基本原理と観測方程式	25
2.1.1 GPS の概要と観測量	25
2.1.2 搬送波二重位相差の使用	26
2.1.3 電離層遅延の取り扱い	27
2.1.4 大気遅延の取り扱い	27
2.1.5 PTS の観測方程式	28
2.2 複数の視線を用いた定式化と状態空間モデルの適用	30
2.2.1 複数視線についての観測方程式	30
2.2.2 状態空間モデルの適用	32
2.2.3 カルマンフィルタによる未知パラメータ推定	33
2.2.4 確率過程とプロセスノイズ	35

2.2.5 断層すべり分布推定への拡張	37
2.3 推定値リセットの導入	38
2.4 Sidereal filter の適用	39
2.5 本章のまとめ	40
第 3 章 PTS による 2016 年熊本地震の地震時すべり分布推定	49
3.1 2016 年熊本地震の概要および断層すべり推定の先行研究事例	49
3.2 PTS の 2016 年熊本地震への適用	51
3.3 PTS で推定された 2016 年熊本地震の断層すべり分布	54
3.4 PTS の熊本地震への適用結果の意義と課題	55
3.5 本章のまとめ	59
第 4 章 PTS による 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり・初期余効すべりの連続推定	77
4.1 2011 年東北地方太平洋沖地震の概要および断層すべり推定の先行研究事例	77
4.2 PTS の 2011 年東北地方太平洋沖地震への適用	81
4.3 PTS で推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布	84
4.4 PTS で推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべり	87
4.5 推定値リセットと Sidereal filter の効果	91
4.6 本章のまとめ	92
第 5 章 議論	135
5.1 PTS で推定された初期余効すべりに関する議論	135
5.1.1 ランダムウォークの確率過程を用いた初期余効すべり推定	135
5.1.2 地震時すべり・先行研究による余効すべりとの比較	137
5.1.3 初期余効すべり域のプレート境界の摩擦特性の推定	139
5.2 PTS の活用に向けた技術的課題	148
5.2.1 PTS を用いたリアルタイム地震時すべり推定	148
5.2.2 PTS における未知パラメータ推定・分離精度の定量把握	149
5.2.3 PTS 解析における時系列安定性の向上に向けた課題	151
第 6 章 結論	179
参考文献	183

論文要旨

地震発生サイクルの一連の過程に伴う地殻変動および断層すべり現象は、秒から年にわたるきわめて広い時間スケールにおよぶ。すなわち、断層のすべり・ひずみ収支や摩擦特性、そして地震発生メカニズムの総合的な理解には、広帯域な地殻変動観測手段が必要である。また巨大地震の地震規模やその断層すべりの即時把握は、津波の即時予測や被害予測の高度化といった防災・減災の観点からも重要な課題である。これらの要請に対して全地球測位衛星システム (GNSS, Global Navigation Satellite Systems) は、広帯域にわたって感度を持つ観測手段として、地震時から地震後および地震間にいたる様々な現象の把握に大きく貢献している。

一方、地震直後の初期の余効すべりのような数分から半日の時間スケールの現象に対して GNSS を用いた研究事例はきわめて少ない。これは同時間帯域が大気遅延等の地殻変動以外の誤差要因の時定数と重複し、未知パラメータの分離困難性により測位精度が低下するためである。一方、初期余効すべりを扱ったいくつかの先駆的な研究においては、初期余効すべりが地震発生サイクルにおける断層すべり・ひずみ収支のうち大きな割合を占めることが示されている。またその時空間発展の把握が断層の摩擦特性の正確な理解に特に重要であることも指摘されている。すなわち、初期余効すべりを高い時空間分解能で把握することは、地震発生サイクルの理解の観点からもその重要性は高い。

また近年、リアルタイム GNSS を地震規模や津波の即時予測に活用する事例が増えつつある。一方、それらの実運用においては GNSS アンテナの位置を推定する測位解析による座標時系列の導出に大きな計算機コストを要し、また測位精度が外部供給の衛星位置情報等に大きく依存するなど、システムとしての冗長性の低さが課題となっている。

これらの課題に対し本研究は、GNSS 衛星から送信されるマイクロ波の搬送波の位相変化から、直接断層すべりを推定する手法 (PTS, Phase To Slip, Cervelli et al., 2002) に注目した。同手法は断層すべりから期待される地表変位を衛星に向かう視線方向の動きに幾何学的に変換することで、GNSS の一次観測量である搬送波位相の変化と直結する。これにより断層すべりと他の誤差要因が並列に扱われ、未知パラメータの分離困難性を議論する上で優位性がある。また座標推定を介さないため計算機コストが低下するほか、視線方向の相対変化を扱うため衛星位置情報の精度の影響を受けにくい。一方、PTS はその観測量が GNSS の一次データの位相変化そのものであり、その取り扱いが複雑なことなどから、同手法を用いた先行研究はきわめて少ない。特に地震時から地震後にいたる過程への適用事例は存在しない。これらを受けて、本研究は PTS を用いた広帯域な断層すべりモニタリング技術の実現と、それによるプレート境界の摩擦特性の特徴抽出をその目的とした。

PTS を用いたリアルタイム地震時すべり推定手法の実現を目的とし、同手法を 2016 年熊本地震 ($M_w7.0$) の本震および本震の 25~28 時間前に発生した二つの前震に適用した。その結果、同手法による地震時すべり分布推定に初めて成功した。本震については布田川断層の北東寄りの浅部で最大 5.7m、日奈久断層の北東端付近で最大 3m 程度のすべりがそれぞれ推定された。推定されたすべりは正断層すべりを含む右横ずれすべりであり、地震規模は $M_w7.08$ と推定された。これらの断層すべり分布の特徴や

推定された地震規模は、いずれも通常測位による座標時系列 (以下、通常測位) を用いた先行研究による推定結果とよく一致した。また推定されたすべり分布から期待される地表変位も、通常測位で得られる永久変位量とよく一致した。さらに本研究では、観測点で直接リアルタイムに取得できる衛星位置情報として、放送暦を用いた推定も試行した。その結果、誤差の範囲内ではほぼ一致する本震のすべり分布が得られた。また二つの前震のすべり分布推定も行った結果、両者の合計で平均 1m 程度の右横ずれすべりが推定された。地震規模は $M_w6.1$ となり、通常測位に基づく推定結果に近い値となった。

以上の結果より、PTS で M7 級の内陸地震の断層すべりを、通常測位と同等の精度かつ外部供給の軌道暦に頼らずに推定可能なことが示された。また M6 級の内陸地震であっても一定程度の感度を持つことが示された。これらの結果から PTS のリアルタイム地震時すべり推定に対する適用可能性が示された。一方、推定すべり時系列は未知パラメータ間のトレードオフによるとみられるドリフトを示し、長期安定性については課題が残った。

次に、PTS による数分から半日の時間スケールを含む広帯域断層すべり推定手法の実現を目的として、同手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_w9.0$) に適用した。そして同地震の本震のすべりと、本震 22 分後に岩手沖で発生した余震 ($M_w7.4$) のすべり、29 分後に茨城沖で発生した余震 ($M_w7.8$) のすべり、および本震直後数十分間に発生した初期余効すべりの時空間発展を連続的に推定した。その結果、本震については岩手沖から茨城沖の南北約 500km の範囲で最大 26m の逆断層すべりが推定され、地震規模は $M_w8.94$ と推定された。また岩手沖の余震については震源近傍の浅い側で最大 0.3m の逆断層すべりが推定され、地震規模は $M_w7.24$ と推定された。茨城沖の余震については同じく震源近傍の浅い側で最大 1.6m の逆断層すべりが推定され、地震規模は $M_w7.72$ となった。これらの地震規模および推定されたすべりの量と位置は、通常測位に基づく推定結果と整合的な結果となった。また推定されたすべり分布から期待される地表変位も、通常測位で得られる変位と整合的となった。これらの結果は、PTS によって M7~M9 級の海溝型地震のすべりを、通常測位と同等の精度かつ連続的に推定可能なことを示唆する。

地震直後の余効すべり推定では、本震のすべり域の深部側に隣接する深さ 50km 付近の領域を中心に明瞭な初期余効すべりの発生が確認された。主に青森・岩手・宮城付近に 3 つのすべり域が推定され、そのすべり量は本震直後の 34 分間で 0.1~0.2m となった。3 つのすべり域の合計の解放モーメントは $M_w7.5$ 程度となった。また推定された初期余効すべりは、すべりの開始時刻の空間不均質やすべり速度の時間変化を明瞭に示す。例えば岩手付近のすべり域は最も早い本震 14 分後からすべり量が増加し、以降継続したすべりの増加が推定された。また本震 24 分後からすべり量が推定誤差より大きくなった。一方で、宮城付近のすべり域は岩手より 10 分程度遅い本震 24 分後からすべりが開始し、同 29 分後に推定誤差を超えた。青森のすべり域はさらに遅い本震 29 分後付近からすべりが開始し、同時刻に推定誤差を超えた。また、いずれの領域も本震 35 分後付近を境にすべりが減速するなど、すべりの速度変化が推定された。

東北地方太平洋沖地震への適用においては、熊本地震への適用事例における課題を受けて、本震のすべりの寄与を本震後の期間の推定において保存する推定値リセットと呼称する手法を新たに開発した。

その結果、初期余効すべり推定時系列の安定性が顕著に改善した。また通常測位で広く用いられる **Sidereal filter** を断層すべり時系列に対して適用し、マルチパスノイズの大幅な低減に成功した。一方、未知パラメータの推定・分離状況の評価を行った結果、断層すべりと他の未知パラメータとのトレードオフ等、分離精度向上の余地がある可能性が示唆された。

PTS で推定された初期余効すべりの発生域は、本震・余震および過去の大地震の震源域とおおむね相補的となった。また通常測位で推定された余効すべりとの比較から、本震直後の数時間以内において、余効すべり域の段階的な拡大・移動が生じていた可能性が示唆された。さらに、PTS で推定された初期余効すべり速度と、本震のすべりから期待される応力変化を用い、速度状態依存摩擦構成則における、速度の効果のパラメータに相当する A の推定を行った。その結果、岩手・宮城のすべり域における A の値は $0.10 \sim 0.20$ MPa 程度の範囲に推定された。また、 A の値の推定誤差については引き続いた議論が必要ではあるものの、岩手・宮城のすべり域の値は 1.5 倍程度の相違を示し、岩手のすべり域の方が A が小さくなった。すなわち載荷せん断応力変化に敏感である可能性が示された。このほか解析領域内で、走向方向に最大数倍の A の不均質が推定された。推定された A の値の空間不均質は、先行研究において繰り返し地震の分布から示唆される摩擦特性の空間不均質と一定程度整合的となった。

以上の通り、本研究では GNSS の適用例が少ない数分から半日の時間スケールを含む、広帯域な時間帯域における断層すべり推定を行った。そして地震時すべりおよび地震直後の数十分の短時間に生じた初期余効すべりの時空間発展を連続的に把握することに成功した。また推定結果に基づき、プレート境界の摩擦特性の定量評価も試行した。初期余効すべりは地震発生サイクル全体の断層すべり収支において大きな役割を果たす。また、その時空間発展の把握は断層面の摩擦特性の正確な理解において重要である。本研究で改良および開発された断層すべりの推定手法は、これら初期余効すべりの動態の解明や、その背景にある断層面の摩擦特性の議論に大きく貢献しうるものであり、地震発生サイクルに伴う広帯域な断層すべり現象の総合的な理解を進めるうえで重要な成果と考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、GNSS (全地球測位システム) の搬送波位相の相対変化から、断層すべりを高い精度で推定するための手法 (Phase To Slip, 以下 PTS) 開発と同手法の実データへの適用による地震時、地震後に引き続く余震、そして地震直後の初期余効すべりの連続把握を推定、議論したものである。GNSS は地震にともなう様々な地殻変動を時間的に高い時間分解能で捉えることができる観測センサーとして一般的に活用されているものの、数分から半日程度の時間帯における測位時系列の精度が対流圏遅延等の誤差要因によって低下するという問題点があり、それら時間帯の断層すべり現象の理解における阻害要因となっていた。これらの背景から、本論文では、(1) PTS によるリアルタイム地震時すべり分布推定手法を実現すること、(2) PTS による数分から半日の時間スケールを含む広帯域断層推定手法を実現すること、(3) (2)の結果にもとづく 2011 年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべりの時空間発展の抽出およびプレート境界の摩擦特性の定量評価を行うこと、以上 3 点をその研究目的とした。

(1)について、PTS による断層すべり分布推定手法の開発を行い、2016 年熊本地震の本震および二つの前震の断層すべり分布推定に成功した。本震については布田川断層の北東寄りの浅部で最大 5.7m、日奈久断層の北東端付近で最大 3m のすべりが推定され、従来の測位時系列や他の観測データにもとづく推定結果と整合的な結果が得られた。リアルタイムで取得可能な衛星軌道歴である放送暦を用いた本震のすべり分布推定を行ったところ、後処理で得られる精密暦と誤差の範囲で整合する結果が得られた。同結果は PTS によって外部軌道情報に依存しない高精度な地震時すべり分布推定が可能なことを示唆する結果である。(2)について、PTS による地震時から地震後の断層すべりの連続的な推定の実現のための技術開発を実施した。具体的には本震のすべりの寄与を本震後の期間の推定において保存する推定値リセットと呼称する手法を新たに考案し、適用した。また通常の測位時系列のノイズレベル低減に用いられる Sidereal filter の手法を初めて PTS による断層すべり時系列に適用した。これらによって、本震とそれに引き続く余震および初期余効すべりの時空間発展を高い精度で推定することに成功した。(3)について、PTS で推定された初期余効すべりの時空間発展にもとづき、地震時すべりおよび半日後以降の余効すべりとの時空間的關係性について議論した。さらに推定された初期余効滑りのすべり速度と本震にともなう応力変化から速度状態依存摩擦校正速のうち、速度の効果のパラメータに相当する A の推定を行った。その結果、プレート境界 50km 程度の深さにおける走向方向の A の不均質を示唆する結果が得られた。

これらの結果は、GNSS による断層すべり分布推定の高精度推定に新たな道を切り拓くものであり、その重要性は極めて高く、田中優介氏が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示す。以上より、田中優介氏提出の博士論文を、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。