

高精度衛星測位を用いた地すべりブロックの 長期監視システムの設計とその初期検証結果

瀬川 佳祐^{†1,a)} 宇佐美 拓真^{†2} 曾根 卓朗^{†3} 木谷 友哉^{†4,b)}

概要：近年のGNSS搬送波位相測位と呼ばれる高精度測位技術を用いた地すべり観測では、基準局からの補正情報をもとに観測点の絶対位置を求めるという手法が主であった。しかし、このような手法では基準局からの距離に起因する基線長誤差によって、地すべりの観測に必要なミリメートルレベルの精度を得ることが難しい。地すべりブロック単位での地すべりの監視では、観測点の絶対位置ではなく、複数の地すべりブロックごとに設置された観測点の間の相対位置を求めることが出来れば、地すべりの発生を検知することが可能である。観測点間で互いを基準局として扱い、基線長誤差を最小にすることで精度の向上を図る。以上のような手法を用いた地すべりブロックの長期監視システムを設計し、地すべり地域の2地点と測位について理想的な環境の1地点の計3地点で実験を行った。3つの実験から、提案システムが半年以上無人で地すべりの監視を行うことができること、地すべり地域における変位観測でミリメートルの精度が得られること、理想環境ではミリメートル以下の精度が得られることを確認することが出来た。

1. はじめに

従来の地すべり観測では、地すべりの初期の兆候によって生じた亀裂をまたいで設置した変位計センサによって、両端の土地の動きを観測するものが一般的であった。しかしながら、このような観測方法では亀裂周辺の狭い範囲での観測に限定されるほか、変位計センサそのものが滑っていく、土地全体が動いてしまうような地すべりを観測することができないことがわかってきた。

近年のGNSS搬送波位相測位と呼ばれる高精度測位技術を用いた地すべり観測では、基準局からの補正情報をもとに観測点の絶対位置を求めるという手法が主であった。しかし、このような手法では基準局からの距離に起因する基線長誤差によって、地すべりの観測に必要なミリメートルレベルの精度を得ることが難しい。

本研究では、従来の変位計センサなどを用いた狭い範囲の地すべりの観測ではなく、数百メートルの範囲の地すべりブロック単位の地すべりの観測の実現を目的として、高精度衛星測位技術を用いたシステムの設計を行う。

地すべりブロック単位の観測では、地すべりブロックごとに観測点を設置し、観測点間の相対位置を監視すること

で地すべりの発生を検知することが可能である。相対位置を求める場合、ペアとなる観測点から補正情報を受け取ることができるため、基線長誤差の影響を最小限に抑えることができる。

GNSS測位には、移動体の測位を行うKinematic測位と、静止物の測位を行うStatic測位が存在する。Static測位は、Kinematic測位よりも観測に時間を要するが、精度が良いという特徴を持つ。従来のGNSS測位を用いた地すべり観測では、観測点を移動体とみなし、Kinematic測位を行うものが主であったが、地すべりの観測点は短時間では移動しないため、観測点を固定点とみなしStatic測位を行うことで精度を向上させることができる。

提案システムでは、観測点間の相対位置を求めることで基線長誤差の影響を緩和し、Static測位を用いることで地すべりの検知に必要なミリメートル精度を得ることを目的とし、地すべり危険区域で行った実験結果をもとに提案システムの地すべり検知への有用性を示す。

2. 既存の地すべり検知手法と課題

2.1 地すべりのメカニズム

地すべりとは、斜面災害の一つで、斜面の一部が地下水や重力の影響によってある程度原形を保ったままゆっくりと下方に移動し、ある時点で急激に崩れる現象のことである[1]。斜面の地下に水を通しづらい粘土層などが存在すると、台風や大雨などの際に地下水水位が上昇、その結果、斜面

^{†1} 現在、静岡大学 情報学部 情報科学科

^{†2} 現在、静岡大学 大学院総合科学技術研究科 情報学専攻

^{†3} 現在、静岡大学 創造科学技術大学院 情報科学専攻

^{†4} 現在、静岡大学 大学院情報学領域

a) k-segawa@kitanilab.org

b) t-kitani@kitanilab.org

が浮力と重力によって地盤ブロックが下方に移動する(図1)。ブロックの移動が始まった当初は、様々な特徴的な前兆現象が発生し、代表的なものは亀裂、はらみだし(斜面の押出)、樹木の傾き、井戸水の濁りなどである。

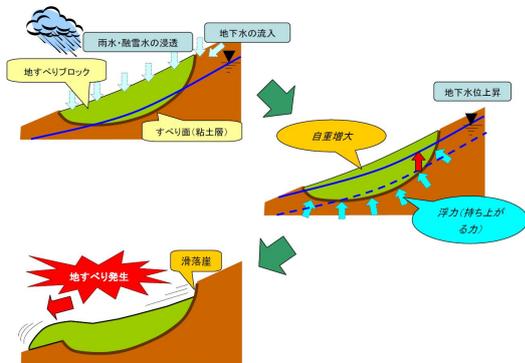


図1 地すべりのメカニズム ([1]の図2-2を引用)

2.2 従来の地すべり検知手法

従来の地すべり検知では、センサを地すべり兆候によって生じた亀裂を跨ぐようにして設置し、単純な2点間の移動変位を計測するものが多い[2]。後で述べるが、実験場所とする浜松市天竜区でも2020年の8月から簡易的な変位観測計によって、地すべりの観測を行っている。以下の図2は現地に設置されている、鉄線のテンション(張り具合)によって地盤のズレを観測する伸縮計である。

さらに、木板を2枚向かい合わせ、その隙間の変位を直接観測するセンサも現地には設置されている。図3が実際の木板移動変位センサである。ブルーシート部分の下に亀裂が存在しており、その亀裂を跨ぐようにセンサを設置している。図中央の木板同士の小さな隙間を直接測りなどを用いて計測している。



図2 従来の伸縮計センサ



図3 移動変位を計測する木板センサ

2.3 地すべり検知の課題

従来の地すべりセンサの設置にはいくつかの条件と課題点が存在する。本節ではその条件と課題点、そして今日における地すべりブロックがどのようにして特定されているかを提示する。

2.3.1 地盤ブロックごと動く地すべりの存在

従来センサでは、地盤の亀裂を跨いで設置する必要がある。しかしながら近年、浜松市土木事務所の調査によれば、地盤ブロックごと移動を見せる地すべりの存在が確認されており、従来のセンサではこれらのようなタイプの地すべりの検知は困難であると述べている。

2.3.2 地すべりブロック特定の困難性

地すべりを観測するセンサを設置するにあたり、地すべりブロックを特定することが重要であるが、これには多くの費用・労力と時間がかかってしまう。

今日の地すべりブロックの予測・解析について、桜井・岩丸らは、近年精度が高まっていて実績の増えている三次元解析の手法だけでは、ダムや河川の湛水池の水位変動に対応することが難しく、こうした特殊な地形条件などに対する技術的な信頼性が乏しいため、ひとまずは大規模な地すべりにおける実績の多い簡易的な三次元解析を行い、参考として三次元における安定解析の結果と大きな乖離が生じてないかを確認することで、融雪・降雨による地下水供給が要因とされる岐阜県揖斐郡揖斐川町榎原地内の一般国道417号沿いの地すべりブロックの予測を行い、のちの地すべり対策工法の決定に役立てた[3]。

近年になり、地すべりの要因のひとつである山間部の普通河川における湛水池の出現が、実際に少なからず確認されている。平成25年5月には、北海道管理河川(地区は未公表)において、同年5月5~6日の降雨と融雪による山地等からの土砂流出でコルゲート管流入部の埋没、管路の閉塞が発生したことで、流入部上流のズリ山と山地に囲まれ窪地となっていた場所(旧川跡)に雨と融雪水が流入し湛水が始まったと札幌市は調査から予測している[4]。

3. 高精度衛星測位

GNSS とは、Global Navigation Satellite System の略称で、各国が開発を進めている測位衛星システムの総称である。現在、地球を周回する測位衛星の数は急速に増加している。米国の GPS が最低 24 機 (2016 年 4 月時点で 31 機)、ロシアの GLONASS が 24 機、中国の BeiDou が 35 機 (2007 年 4 月～16 年 3 月に 22 機打ち上げ済)、欧州のガリレオが 30 機 (2011～15 年に 12 機打ち上げ済)、そしてわが国のみちびきは最終的に 7 機 (現在は 4 機) で、インドの IRNSS が 7 機が開発され、全世界をカバーするシステムが 4 種類に、地域をカバーするシステムが 2 種類となっている。これらがすべて完成する 2020 年代半ばには、地球を回る測位衛星の総数は、予備機も含めると 130 機を超えることになる [5]。

3.1 搬送波位相測位

近年、農業や交通を始めとした様々な分野で、高精度衛星測位が活用されている。これらの分野で用いられるのは、主に RTK (Real Time Kinematic) -GNSS 測位と呼ばれる測位方法である。

RTK-GNSS 測位とは、移動中の受信機が、位置が既知である地上基準局から補正情報を受け取り、地上基準局から相対的に位置を決定する測位方法である。RTK-GNSS 測位では、搬送波位相を用いて測位演算を行う搬送波位相とは、受信機で復調した測位信号の搬送波位相角を連続的に測定したものである。搬送波位相を L (m) として、その観測モデルは式 (1) のように表すことができる。ここで、 λ は搬送波波長 (m)、 ϕ は搬送波位相 (cycle)、 ρ は衛星と観測地点の幾何学距離 (m)、 c は光速 (m/sec)、 dt は受信機時計誤差 (sec)、 dT は衛星時計誤差 (sec)、 I は電離層遅延 (m)、 T は対流圏遅延 (m)、 N は整数値バイアス (cycle)、 σ_L は搬送波位相測定における観測誤差 (m) である。

$$L \equiv \lambda\phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \sigma_L \quad (1)$$

搬送波位相には、連続的な測定では固定値となる整数値バイアス N (cycle) と呼ばれるバイアス誤差が含まれており、式 (2) より表すことができる。ここで、 ϕ_{0r} は受信機初期位相 (cycle)、 ϕ_0^s は衛星初期位相 (cycle)、 n は整数不定性である。

$$N = \phi_{0r} - \phi_0^s + n \quad (2)$$

搬送波位相は整数部 (1 波長の数) と小数部で構成され、小数部は正確に測定できるが、整数部の絶対値は整数値バイアスのため正確に測定できない。整数値バイアスはその名の通り整数値となるが、衛星ごと、受信機ごとに異なる値を示す。そこで、搬送波を連続的に観測できている期間

においては、整数値バイアスは固定であるため、一度決定できると連続的に正確な搬送波位相の数を得ることが可能である。

さらに衛星測位におけるランダム誤差要因は、図 4 のような行路差を 2 つの衛星から求め、互いの行路差を引いた 2 重差を求めることで、衛星クロック誤差を除去し、基線長 (地上基準局と受信機の距離) が短距離であれば、電離層遅延や対流圏遅延、衛星軌道誤差を除去することが可能である。

ここで、RTK-GNSS において整数値バイアスの決定が問題となる。整数値バイアスを決定する方法として LAMBDA 法が挙げられる。LAMBDA 法では、FLOAT 解アルゴリズムと呼ばれる整数値バイアスを未知数の 1 つとして考えて逐次近似計算によって求める方法 [6] を用いて整数値バイアスを決定する。RTK-GNSS のアルゴリズムは、衛星と地上基準局との間の搬送波位相の正確な数を計算しようとする。RTK-GNSS による測位では、出力として FIX 解と FLOAT 解という結果を返す。FLOAT 解は、搬送波位相の数を計算する過程で整数値バイアスが定まらない測位解であり、測位精度は最大 5m である [7]。一方で FIX 解は、正確に搬送波位相の数が定まった測位解であり、測位精度は数センチメートルである。FIX 解を算出するためには、一般的に衛星数が十分であり、衛星配置 (DOP) がよく、地上基準局との通信が良好である必要がある。

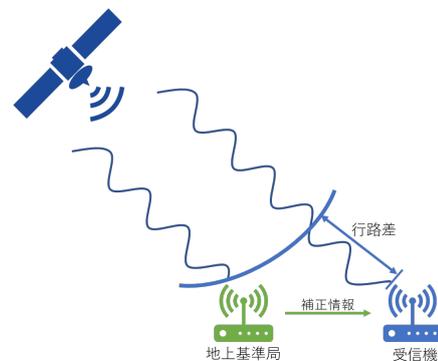


図 4 搬送波位相の行路差

3.1.1 Static 測位

Static 測位とは、移動中の受信機の位置を求める RTK-GNSS 測位に対して、静止状態にある受信機の位置を求める測位方法である。Static 測位は、測量などに用いられる測位方法であり、すべての測位方式の中で、もっとも高精度な測位が可能である [8]。数ミリメートルの非常に高い精度で測位を行うことが出来るが、RTK-GNSS 測位に比べて多くの観測時間が必要となる。また、RTK-GNSS 測位と同様に、FIX 解を算出するためには、信号を受信できる衛星数が十分である必要があり、そのために受信機の上空には信号を遮る障害物が少ないことが望ましい。

3.2 当研究グループで提案している地すべり計測手法 [9]

近年の高精度衛星測位を用いた地すべり観測においては、RTK-GNSS 測位を用いて、地上基準局からの補正情報をもとに地すべり観測点の位置を求めるといった手法が主であったが、このような手法では、基線長による誤差の影響によって、ミリメートルの精度で観測することは困難である。

そこで、我々の研究チームでは、地すべり観測点は1時間程度の短時間では移動しない静止点であるとみなすことができると仮定し、Static 測位で観測するという手法を用いる。さらに、地盤ブロックごとと動く地すべりの予兆を検知するためには、地盤ブロックごとに設置した観測点の間の相対的な変位が検出できればよい。近くの地盤ブロックの観測点を地上基準局とすることで、搬送波位相測位における基線長誤差を最小限にすることができると考えた。地盤ブロック内ならば観測点をどこに設置しても良いため、エリア内の最も測位環境が良い場所を選択することができ、観測精度の向上が期待できる。

また、地すべり観測点を短時間の中で静止点とみなすため、測位演算をリアルタイムで行う必要がなく、後処理演算を行うことができる。後処理演算を行うことで、観測時よりも未来のデータを用いることができるため、より高い測位精度を得られると考える。

3.3 提案手法の検証

2021年1月27日に静岡県浜松市天竜区大滝地区で提案手法の精度評価実験を行った。約180m離れた2つの地点に観測点を設置し、1月27日の12時から18時まで観測を行った。2つの観測点は、空が開けており測位条件は良い。観測環境を表1に示す。

表1 大滝地区実験の観測環境

評価に使用したデータ	2021/01/27 12:00 ~18:00 (天候：晴れ) 計6時間
測位演算プログラム	RTKLIB ver2.4.3 b33 2周波 L1+L2+L5, Static, 仰角マスク 25度
受信アンテナ	u-blox ANN-MB-00-00
使用衛星システム	GPS, GLONASS, Galileo, QZSS

測位演算ソフトウェアとしてRTKLIBを用いて、1時間毎に測位演算を行った結果、概ね3ミリメートルの範囲で収束していることが確認できた。図5に測位結果のプロットを示す。評価実験から、提案手法を用いることで、実環境下で数ミリメートル精度の観測を行い、地盤ブロック単位の地すべりの検知に利用できる可能性が示された。

4. 提案する地すべりモニタリングシステム

本提案システムでは、提案観測手法を用いて地盤ブロッ

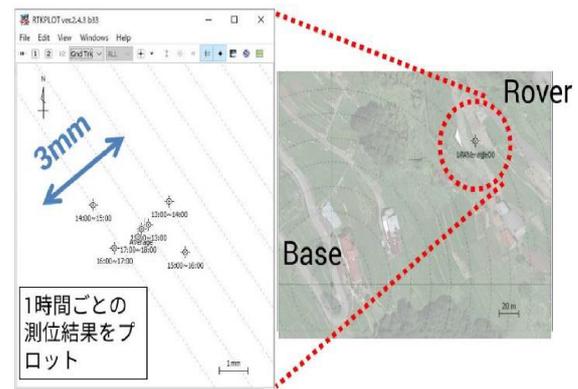


図5 大滝地区実験の測位結果

ク単位の長期地すべり監視を行う。地すべりを検知するためには、1mm~10mmの変位観測をする必要がある(表2)。したがって、提案システムにおいても最低でも10mmの精度を、可能であれば1mmの精度で変位観測を行うことが必要となる。

表2 伸縮計の変位と避難レベル [10]

区分(レベル)		伸縮計の変位
レベル1	注意	1mm/日 以上
レベル2	警戒	10mm/日 以上
レベル3	避難準備	2mm/h 以上
レベル4	避難	2mm/h が1時間以上継続 または4mm/h 以上
レベル5	立入禁止	10mm/h 以上

また、地すべりが発生しやすい地域は、頻繁に人が出入りできる場所でないことや、電源やネットワークなどの設備がないことを考慮して、無線通信によるデータの回収とシステムの長期稼働をシステムの要件とする。

使用する機材は、一般的に入手できるものを主とした。

5. 提案システムの評価実験

提案システムが、地すべり検知に効果的であるかを検討するために、システムが実環境下において長期の無人観測を実現できるかどうかという点、システムが実環境下においてどの程度の観測精度を得られるかという点、システムが最大でどの程度の観測精度を得られるかという点の3点を検証する必要がある。これらを検証するために、3つの実験を行った。

岐阜県高山市奥飛騨の地すべり危険地域において、提案システムを2020年11月16日に設置した。本実験では、主にシステムの消費電力や電池の持続性を確認し、高精度衛星測位を用いた無人地すべり観測システムの実現可能性の検証を目的とした。

次に、静岡県浜松市天竜区の地すべり危険地域において、提案システムを2021年6月26日に設置した。本実験では、実環境下におけるシステムの変位観測精度の検証を目

的とした。

最後に、静岡県浜松市中区の静岡大学において、提案システムを2021年7月26日に設置した。本実験では、システムの変位観測精度の上限の検証を目的とした。

実験に用いた機材を表3に示す。

表 3 使用機材

GNSS モジュール	u-blox F9P (2周波GNSS受信機)
無線通信 モジュール	モノワイヤレス TWELITE (2.4GHz無線通信ユニット)
データロガー	Sparkfun OpenLog (オープンソースのMicroSDカード用ロガー)

5.1 実環境におけるシステムの長期稼働実験

5.1.1 実験環境

システムは図6に示す通り、GNSS測位を行う観測局、無線通信の中継を行う中継局、中継されたデータを受け取基地局の3つから構成される。

観測局は、過去に地すべりが発生した山の斜面に設置した。観測局の観測機材は、GNSS受信モジュールと無線通信モジュール、ソーラー電源から構成される。地すべり検知において、測位データは1時間に1度得られれば良いので、システムの省電力化のためにタイマーを組み込み、1時間のうち10分間測位を行い、残りの50分間は電源をOFFにするよう設定した。測位データは無線通信によって中継局へと送られる。無線通信が失敗したときのバックアップとして、データロガーにも測位データが残る仕組みとした。GNSS観測は1Hzで行った。

中継局は、観測局付近の林道の脇に設置した。中継局の観測機材は、無線通信モジュール、タイマー、ソーラー電源から構成され、観測局から受信した測位データを基準局へ中継する。タイマーは観測局のものと同様の設定とした。中継局においても、無線通信のバックアップとしてデータロガーへのデータの保存を行う。

基地局は、電源とインターネットが使用可能な観測局近くの小屋に設置する予定であったが、電源とインターネットが利用できないということになったため、機材設置日に中継局からのデータを無線通信で受け取れることを確認したのみである。

5.1.2 実験結果

2021年7月11日に観測局の回収を実施した。SDカードに残されたデータから、6月21日まで観測が行われていたことが確認できた。回収した観測局の機材には落石によるものと思われる破損、浸水の跡が見られた。観測局が動作を停止した直接的な原因は機械的な機材の故障だと推測される。

さらにデータを解析すると2021年の1月14日から19

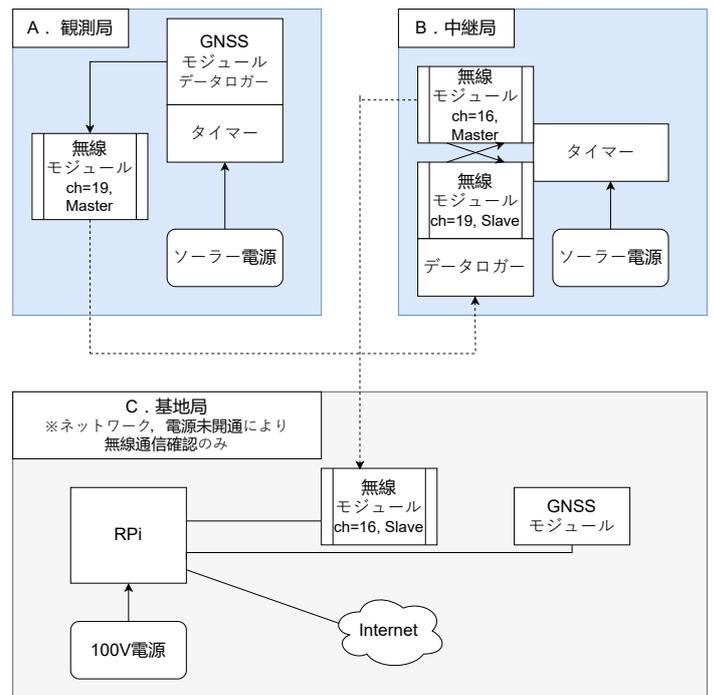


図 6 奥飛驒に設置したシステム

日の5日間に観測が停止されていたことが分かった。この前後では観測が問題なく行われていることから、観測機材の故障ではなく一時的な電力不足が原因であると推測される。該当の日付は雪が降っていたため、ソーラーパネルに雪が積もり、発電量が著しく減少した可能性が高い。約7か月間の観測において、電力が原因で動作が停止した期間が5日間のみであることは、システムの十分な稼働実績と捉えることが出来る。バッテリーの容量を増やすことで、さらに長期の安定したシステムの動作が実現できると考える。

中継局では、観測局と同じソーラー電源とタイマーを使用した。機材設置後1週間程度で停止しており、観測点からのデータをほとんど受け取れていなかった。中継局の設置場所は、1日を通して日光が当たらない場所であったことから、発電量の不足による電力切れが停止の原因であると考えている。

次に、測位データの精度について評価する。本実験では、設置場所の問題から観測点を複数設置することが出来なかったため、近くの観測点から補正データを受け取り、観測点間の相対距離の変位を監視するという提案観測手法を用いることが出来ない。そこで、国土院が提供している電子基準点のデータ [11] を用いて、観測局と電子基準点の相対位置を求める測位演算を行った。

次の図7は、観測局の電子基準点からの相対位置をプロットしたグラフである。東西方向、南北方向のどちらも100m程度の位置のばらつきが見られた。基準局からの補正情報を受け取らず、観測点単独で測位を行う単独測位から数メートルの精度が得られることを考慮すると、この結

果は非常に悪い結果である。

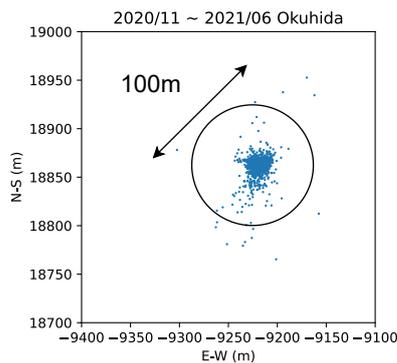


図 7 電子基準点と観測局の相対位置の観測結果

図 7 のような非常に大きな値のばらつきが発生した原因として、電子基準点を基準局として利用した点が挙げられる。提案システムでは、数百メートル単位の地すべりブロック間の相対位置を求めるのに対して、本実験では約 20km の相対位置を求めたため、精度が大きく低下したと考えられる。

精度が悪くなった別の原因として、測位環境が悪いという点がある。観測局の設置場所は、山の斜面や背の高い木などの測位障害物が多く、衛星からの信号を十分に受け取ることが難しい環境であったため、FIX 率が低くなり図 7 のように測位結果が大きくばらついた。

5.2 実環境下におけるシステムの観測精度評価実験

5.2.1 実験環境

実験区域を図 8 に示すように地盤ブロック A、地盤ブロック B、地盤ブロック Ex の 3 つに分割し、それぞれに観測点を設置した。地盤ブロック Ex は地盤の動きが報告されている地盤ブロック A、B に対して地盤が動いていないとされるエリアである。観測点を設置した場所は図 9 に示すように、背の高い木に囲まれているため測位環境が悪い。観測は 5Hz で行った。

3 つの観測点には、全て同じ観測機材を設置した。観測機材は GNSS モジュールとデータロガー、バッテリーから構成される。図 10 は、本実験で設置した観測機材である。

5.2.2 実験結果

2021 年 7 月 14 日にデータの回収を行った。データロガーの設定不良により、実際に観測データを取得できたのは 7 月 1 日までの 6 日分のみであった。地盤ブロック A に設置した観測機材は、GNSS アンテナの信号受信強度が不十分であったため、精度評価については地盤ブロック B と Ex の 2 つの観測点のデータを用いて行った。

6 月 27 日の 1 日分のデータを分析すると、1 日のうち高精度な測位解である FIX 解が得られたのは、全データの半分程度であることが分かった。FIX 解から 1 時間ごとの位

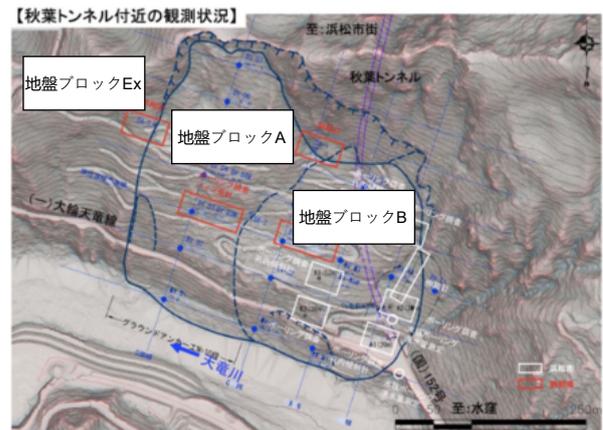


図 8 天竜区の対象地における地盤ブロックの区分け

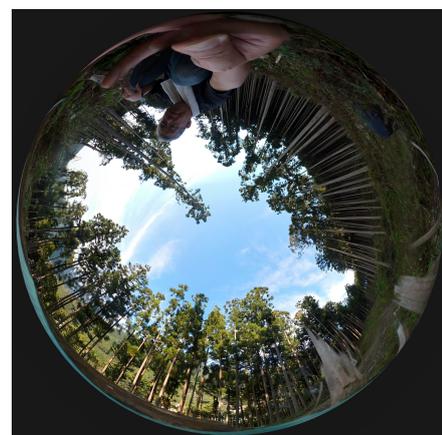


図 9 地盤ブロック B の観測点上空



図 10 天竜区の対象地に設置した観測機材

置を決定し、プロットしたグラフが図 11 である。1 日間の連続観測を行うと、全データの半分ほどの観測時点にて FIX 解が得られ、数ミリメートルの観測精度が得られることが確認できた。この結果から、実環境下において 1cm 以上の変位があれば提案システムで検知可能であると判断できる。

5.3 システムの観測精度の上限評価実験

5.3.1 実験環境

観測点が動かないことが保証されており、測位環境が理想的である地点として大学の屋上を選択し、2021 年 7 月

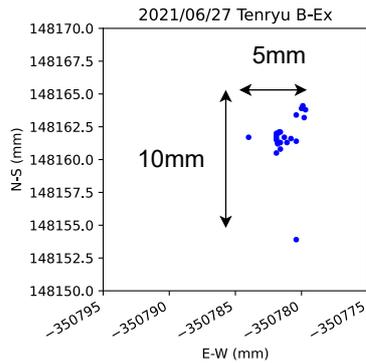


図 11 天竜区の地盤ブロック B と Ex に設置した観測点間の相対位置の観測結果

26日に2つの観測点を約3メートルの距離をとって設置した。観測機材は、GNSS モジュール、データロガーから構成される。図 12 は、本実験で設置した観測機材である。観測は 5Hz で行った。



図 12 大学屋上に設置した観測機材

5.3.2 実験結果

2021年7月27日に機材の回収を行い、約1日分の観測データを得た。1日分のデータのうち、FIX 解を得られたのは全体の 90%程度であった。得られた FIX 解から1時間ごとの位置を決定し、プロットしたグラフが図 13 である。測位結果が、0.1 ミリメートルの範囲内の2点に収束した。理想的な測位環境では提案システムによる1日間の連続観測から 0.1 ミリメートルの精度が得られることが分かった。

提案システムにおいて、1日間の連続観測から測位結果を得ようとする、地すべりの検出のスピードとして不十分となる場合がある。観測精度が確保できるのであれば観測時間は短いほうが良いため、連続観測時間を1日から短くした場合の精度評価として、連続観測時間ごとの標準偏

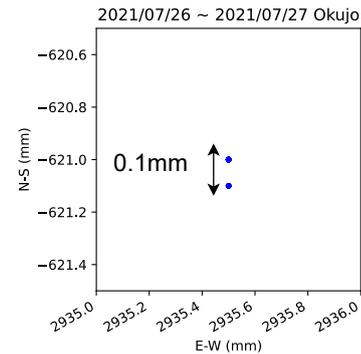


図 13 約 3m 離して固定した 2 受信機間の相対位置の観測結果

差を求めた。結果をプロットしたグラフが図 14, 図 15 である。観測時間を1時間以内としても、1~2 ミリメートルの標準偏差が得られた。

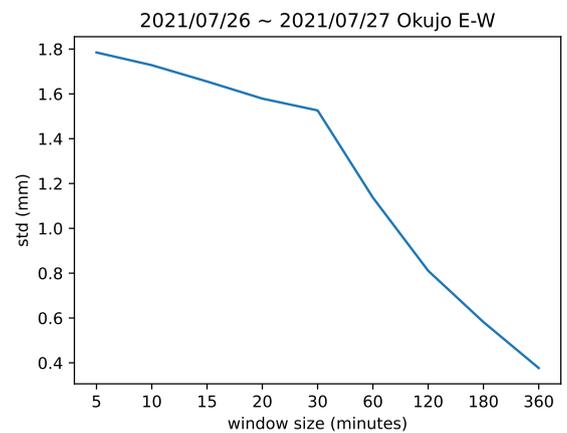


図 14 連続観測時の観測時間と距離の標準偏差（東西方向）

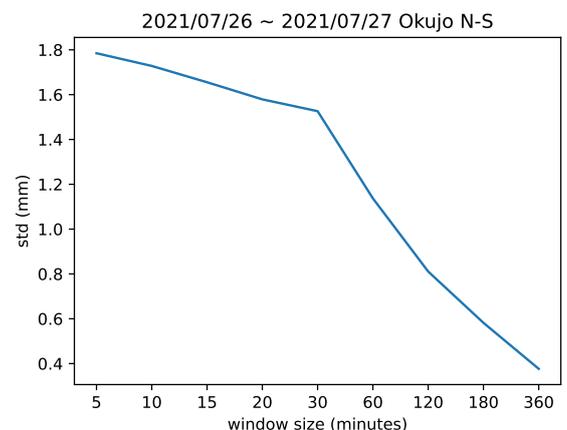


図 15 連続観測時の観測時間と距離の標準偏差（南北方向）

連続観測を行って1時間以上の長い時間をかけて固定点を観測すると、非常に高い精度が得られることが分かった。しかし、提案システムを実環境で運用する際には、電力面

の問題から常時観測し続けることは困難である。そこで、奥飛騨で行ったような1時間に10分のみ観測をするタイマー駆動をした場合の観測精度の上限の検証を行った。1日間のデータのうち、1時間に10分のデータだけを用いて測位演算を行った結果が図16である。精度は約8ミリメートルであり、地すべりの検知に利用できる精度の最低ラインである10ミリメートルに近い結果となった。

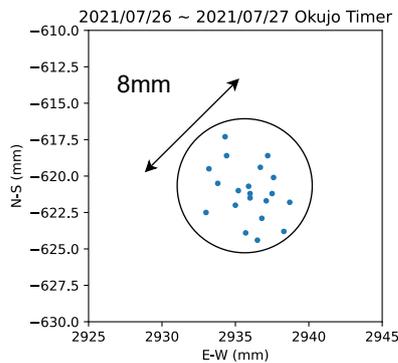


図16 タイマー駆動を行った場合の2受信機間の相対位置の観測結果

5.4 提案システムの評価

各評価実験の条件と観測精度について次の表4にまとめた。奥飛騨での実験のように、基線長が非常に大きくなると提案システムは地すべりの検知に利用できるような観測精度を得ることが出来ないが、基線長が数百メートル程度まで短くなれば数ミリメートルの精度を実環境下で得ることができ、地すべりの検知に十分利用可能であると評価できる。

さらに、理想的な条件下では1日間の連続観測から0.1ミリメートルの測位を行うことが分かっており、測位環境によっては、天竜区の観測よりもさらに高精度な観測が実環境下で行える可能性がある。

また、観測時間を1日間から1時間まで短くしても、理想的な条件下では1~2ミリメートルの精度を得ることができるため、地すべりの検知を行うシステムとしての即時性も確保できると考えられる。

タイマー駆動を行った場合は、理想的な条件下においても精度が地すべりの検知に利用できる最低精度に近くなったため、実環境下では地すべり検知を行うことが難しいというのが、現状の提案システムに対する評価である。実環境下でタイマー駆動を用いた観測を実現するには、さらなる精度向上の手法を検討する必要がある。

奥飛騨の実験から、半年以上のシステム稼働実績が得られたため、観測精度の確保ができれば長期的な地すべりの監視システムとして十分活用であると評価できる。

表4 評価実験の条件と測位精度

	測位環境	相対距離	観測間隔	観測精度
奥飛騨	悪い	約20km	1時間に10分	>1m
天竜区	悪い	約400m	連続	5~10mm
大学屋上	良い	約3m	連続	0.1mm
			1時間に10分	8mm

6. まとめと課題

3つの評価実験から、相対距離の大きさや測位環境などの条件に左右されるものの、提案システムが地すべりの長期無人監視に利用できることを確認することが出来た。

今後の課題として、観測時間を短くしたり、タイマー駆動を行った場合においても実環境下でミリメートルの精度を得るための精度向上手法を検討することが必要となる。

謝辞

本研究はJSPS 科研費17H01731の助成を受けたものです

参考文献

- [1] 農林水産省：地すべり災害を予防・軽減するための活動の手引き，2008。
https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/pdf/yobou_tebiki_1.pdf
(参照：2021/11/05)
- [2] 静岡県浜松市土木事務所：令和2年7月豪雨災害関連緊急地すべり対策事業大滝地区（静岡県浜松市天竜区佐久間町大字大井），※2020年9月に浜松土木事務所への取材時に取得
- [3] 桜井孝昭，岩丸圭一：地すべり対策事業に関する取り組み，国土交通省中部地方整備局，
<https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/2017kannai/pdf/ge03.pdf>
(2021/11/09 アクセス)
- [4] 及川春久，斉藤好生，藤原清隆：平成25年度山間部の普通河川に出現した湛水池における大規模土砂災害対応訓練について，札幌開発建設部河川計画課・札幌開発建設部江別河川事務所計画課，
<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/100222724854601b940a34f.pdf>
(2021/11/10 アクセス)
- [5] 内閣府：航法の歴史(8) マルチGNSSの登場，みちびき（準天頂衛星システム：QZSS）公式サイト，
https://qzss.go.jp/overview/column/column08_160425.html（参照：2021/11/05）。
- [6] 富永麗司：LAMBDA法によるアンビグイティ決定に関する研究，東京海洋大学商船学部流通情報工学課程卒業論文，2005。
- [7] Hall, K.W., Gagliardi, P. and Lawton D.C.: GPS accuracy part 2: RTK float versus RTK fixed, CREWES Research Report - Volume 22, 2010.
- [8] 吉田直子：GNSSの基本知識，測位衛星技術株式会社，
<http://gnss.co.jp/wp-content/uploads/2016/07/ddd790b4eae745d43594c4f302b14761.pdf>（参照：2021/11/05）。
- [9] 宇佐美拓真，瀬川佳祐，阿武穂高，曾根卓朗，木谷友哉：GNSS搬送波位相測位を用いた広範囲地すべり観測手法の初期検証結果，測位航法学会全国大会研究発表会，2021。

- [10] 土木研究所：土木研究資料 地すべり防止技術指針及び同解説（提案），2007.
https://www.pwri.go.jp/jpn/results/offer/jisuberi-boushi/jisuberi-boushi_shishin.pdf
(2021/11/10 アクセス)
- [11] 国土地理院：電子基準点データ提供サービス
<https://terras.gsi.go.jp/>（参照：2021/11/10）.