

無線LANを利用したGPSによる 地すべりの準リアルタイムモニタリング

中里裕臣*

目次			
緒言	43	結言	48
GPS観測システム	43	参考文献	48
GPS基線解析システム	45	Summary	49
現地適用試験	45		

緒言

GPS受信器の低価格化と通信インフラの整備に伴い、近年では地すべりの移動量計測や斜面施工時の上方監視などにGPSによる自動計測が普及しつつある。斜面上方監視では変位検知の即時性が求められるため、GPS受信器をオンライン化し、1時間以内の周期で自動基線解析を行い、現場や関係機関へのデータ配信を行うシステムが実用化されている（例えば田山ら，2005）。一方、地すべりのGPS移動量観測では、移動特性や積雪による冬期のデータ回収困難等の現場環境に応じて、オンライン/オフラインの観測システムが選択されている（例えば有澤ら，1998；中里ら，2005）。その中でも、地すべり災害発生初期の移動量計測では、移動傾向の把握のための高頻度のデータ更新や24時間体制の観測が求められるため、斜面上方監視と同様なGPS受信器のオンライン化と基線解析のリアルタイム化が必要となる。しかし、山間地で偶発的に発生する地すべり災害では、オンライン化と高頻度通信に必要な通信回線および電源を即座に確保することが困難な場合が多い。

そこで、本研究では地すべり災害時の初動調査への対応を目的に、太陽電池を電源とし、無線LANを利用することで通信機材と通信のコストを抑えた、汎用性、機動性の高いモニタリングシステムを構築した。さらに、連続的に取得するGPSデータを利用し、統計処理に依らず測位結果の誤差幅を低減する手法を検討した。これらのシステムを2006年の融雪期に発生した地すべり地に適用し、その有効性を確認したので報告する。

本研究の実施に当たっては、古野電気株式会社、ジオサーフ株式会社、国土防災技術株式会社の関係各位に技術的協力をいただいた。さらに、現地適用に当たっては富山県耕地課、高岡農地林務事務所、子撫川統合ダム管理事務所および北陸農政局の関係各位にお世話になった。ここに感謝の意を表します。

GPS観測システム

1 リアルタイム性について

GPSによる地すべり移動量観測では、地すべり地外の不動地に設置した基準点と地すべり地内の複数の移動点で同時にGPS衛星からの信号を受信し、そのデータを基線解析し、基準点を固定したときの移動点の3次元座標の時系列変化から各移動点の空間移動量を求める。GPSによるリアルタイム計測には、短時間の観測やエポック毎に整数値バイアスを確定可能なRTK-OTF (Real Time Kinematic on-the-fly) 法（例えば佐田，2003）やRTD (Real Time Dynamics) 法（内山，2004）が知られているが、これらの手法では高価な2周波型受信器を使用した場合でも後述の干渉測位法の測位精度には及ばず、地すべり分野では普及途上にある。日移動量がcmオーダー以下であることが多い地すべり分野では、1時間以上の観測データから移動点座標を決定し、安価な1周波型受信器によっても必要な測位精度が得られる干渉測位法の適用が一般的である。本研究でも干渉測位法のシステムを用いるが、本法による地すべり移動量計測は過去一定時間の観測データを必要とし、厳密にはリアルタイムとはならないため、ここでは準リアルタイムモニタリングと呼ぶ。連続的に受信されるGPSデータから、例えば1分周期で前1時間のデータファイルを逐次生成し、リアルタイム的に基線解析を行うようなシステムも報告されている（丸山ら，1998）。しかし、1分あたりの移動量

*農村総合研究部広域防災研究チーム

平成19年3月19日受理

キーワード：災害対応，GPS，移動量観測，無線LAN，地すべり

が数mに及びような移動速度では1時間あたりの移動量が解析誤差幅を超え、干渉測位解が得られない可能性が高く、地表伸縮計や光波測距等の他の手法による計測が望ましい。また、商用電源を確保できない場合、消費電力の面から高頻度の通信は困難である。そこで、本研究では1時間毎の移動状況が把握できる準リアルタイムモニタリングシステムを構築することとした。

2 オンラインシステム

準リアルタイムモニタリングを行う場合、まず各観測点のGPS受信器と基線解析PCとをオンライン化する必要がある。その伝送方法にはTable 1に示すものがあり、それぞれ優劣がある。毎時以下の高頻度通信を行う場合、商用通信回線では通信コストがかかり、山間地で商用電源が無い場合を想定すると、消費電力の小さい特定小電力無線が第1候補となり、その実績も多い。しかし、ここでは大規模地すべりや不動産が近傍に得られない場合を考慮し、消費電力は大きいものの、長距離伝送が可能で機材費が安く、緊急時にも入手が容易な無線LANシステムの導入を検討した。

Fig.1に構築したシステムのブロック図を示す。本システムの特徴は、オンライン時間を1時間に5分間とし、消費電力の大きい無線LAN装置のON/OFFをタイマーにより制御する点にある。また、後述する基線解析システム

ムではGPSの連続観測データを必要とするため、受信器には低消費電力の1周波型受信器である古野電気製MG21(消費電力0.5W)を使用した。MG21では、本体に記録したデータをダウンロードする際に観測が中断されるため、受信データを常時出力するモード(30秒エポック固定)を使用し、無線LANの接続時間までの常時出力データの一時的な保存にはバッファを内蔵したRS232C-Ethernetプロトコル変換器(以下IP変換器とする)を用いた。これはもともと斜面上方監視などで多数の受信器を配置する際の有線LANによる通信に利用されていたものであるが、観測点に常時出力データのロガーを置かない点でシステムのコストを下げるができる。無線LANはビル間通信用の八木式指向性アンテナの対向使用とし、この場合のカタログ上の最大通信距離は3km(2Mbps通信時)である。観測点と無線基地局が直接見通せない場合や、通信限界より長距離の場合は、それぞれの方向に向けた2本の指向性アンテナもしくは1本の無指向性アンテナと無線ルータによる中継点を設けることで対応できる。なお、通信は暗号化され、セキュリティ対策が施されている。

システムの電源となる太陽電池の様子は、以下の検討により40Wパネル2枚とし、12V17Ah鉛シールバッテリー4個により1週間程度のバックアップを可能とした。

GPS受信器 + IP変換器 0.288A 常時ON
無線ルータ 0.462A 5min/1h

1日あたりの消費電流

$$0.288 \times 24 + 0.462 \times 5 \div 60 \times 24 = 7.84\text{Ah/day}$$

1週間あたりの消費電流 54.9Ah/week

太陽電池稼働率 3h/day, 4day/weekとして

必要な電流量 $54.9 \div 3 \div 4 = 4.58\text{A}$

必要な電力 $4.58\text{A} \times 16\text{V} = 73.3\text{W}$

用意した太陽電池 $40\text{W} \times 2 = 80\text{W}$

バッテリー容量 $17\text{Ah} \times 4 \div 7.84\text{Ah/day} = 8.7\text{day}$

今回使用したMG21と異なり、受信を中断することなくデータ出力を行えるGPS受信器、もしくはデータの一時保管用のロガーを使用する場合は、IP変換器の対向使用により無線LAN回線をRS232C回線と見なしてダウンロードする方法がとれる。今回使用したバッファ内蔵IP変換器の消費電力は2Wと大きいため、これを時間制御するか、さらに低消費電力の機種(1.32W, 1.05Wのものがある)を利用することにより、消費電力を抑えることができる。

Fig.1のオンラインシステムによる観測の流れは以下の通りである。各観測点のGPSデータは受信器から30秒ごとにRS232Cにより常時出力され、それぞれのIP変換器のバッファにストアされる。これらのデータは、商用電源が確保できる場所に設置され、GPS観測点間の無線LAN網に有線もしくは無線LAN回線で接続されたデータ収録PCにより、1時間毎にダウンロードされる。このデータ収録PCに自動基線解析ソフトを組み込めば、現

Table 1 伝送方法の比較(常時観測の場合)
Comparison of communication method in continuous measurement

伝送手段	設置コスト	通信コスト	消費電力	適用性
有線 ケーブル直結	距離による	0	0	短距離に限る
有線 電話回線	電話線の位置による	中	小	電話線の位置による
無線 携帯電話	中	大	大	サービス範囲内に限る
無線 衛星電話	大	大	大	通信可能範囲は広い
無線 特定小電力無線	中	0	小	最大数100km
無線 LAN	小	0	大	最大3km

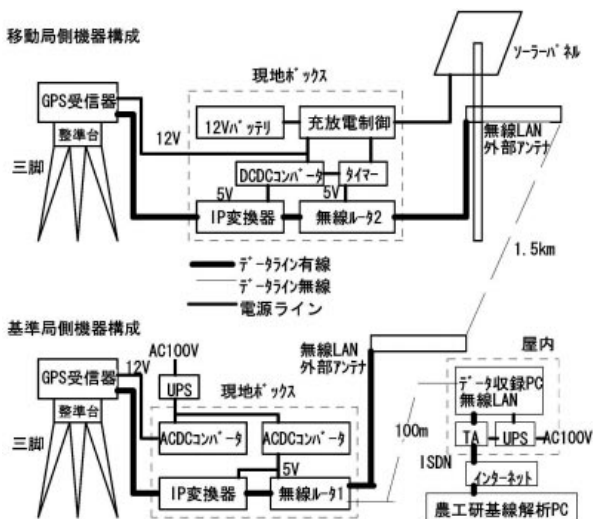


Fig.1 システム構成図

Component diagram of GPS system

地において観測システムが完結するが、ここでは基線解析を農村工学研究所防災研究棟に設置した基線解析PCで行うこととした。データ収録PCはインターネットを通じて基線解析PCにGPSデータをFTP送信する。基線解析PCは、毎時の自動基線解析後、解析結果をテキストファイルとして出力・保存する。この結果ファイルは、解析PC側からの自動メール送信、もしくは現場や行政部局等の監視クライアント側からの自動/手動FTP通信に応じて送信され、監視クライアント側で図化・分析が可能となる。

GPS基線解析システム

地すべりでは微小な移動の検知が必要となるが、GPSの干渉測位法では水平方向で次式の誤差があるとされ、

$$\pm \{ 5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基線長}(\text{mm}) \} \quad (1)$$

基線長を1km以内に抑えたとしても解析結果には±6mm程度の誤差が見込まれる。誤差の影響を抑えるため、従来移動平均やトレンドモデルによる真値の推定が行われているが(例えば清水ら, 1998), 解析にかかる計測時間(セッション)の増大も基線解析誤差の低減に有効である(黒田ら, 2005)。しかし、移動体の測位の場合、セッションを長くすると移動量が平均化されてしまったり、移動量が大きいときに解が得られなくなる場合も考えられる。そこで、1時間毎のデータダウンロード時点の前1時間、3時間、6時間などの複数の連結データを作成し、それぞれの動きを比較しながら移動量を判断できる解析バッチプログラムを作成した。プログラムの流れは以下の通りである。

1 時間データファイルのダウンロード

これを(n-1)時間ファイルが格納してある、n時間ファイル連結用に用意したフォルダ(1~24時間)にそれぞれコピー

各フォルダ内でファイル連結

必要な時間の連結ファイルを基線解析

24時間ファイルを保存用フォルダに移動

n時間ファイルを(n+1)時間フォルダへと逐次移動

解析結果の図化更新

現地適用試験

1 試験地概要

現地試験を行った麻生谷地すべりは、富山県高岡市の五位ダムの上流約1.5kmの湖岸に位置し、幅約160m、斜面長約130mの規模を持ち、移動土塊量は約30万m³と推定されたものである(Figs.2,3)。基岩地質は中新統八尾累層の泥岩である。本地すべりは既存の地すべり地形の再活動であり、2006年4月13日に発見され、4月18日の富山県および北陸農政局の調査では右岸側部で水平方向5.5m、垂直方向1.8m、左岸側部では水平方向2.5m、

垂直方向3mの変位が認められ、その後も7月の梅雨期を中心に継続的な変位が孔内伸縮計等により観測された(Fig.4)。

2 試験観測システム

移動ブロック周辺は携帯電話各社のサービスエリア外であり、商用電源も得られない場所であった。さらに、基岩が分布し基準点として適当なダムサイト周辺とは1.5kmの距離があったため、準リアルタイムモニタリングには太陽電池を電源とした無線LANを利用したシス

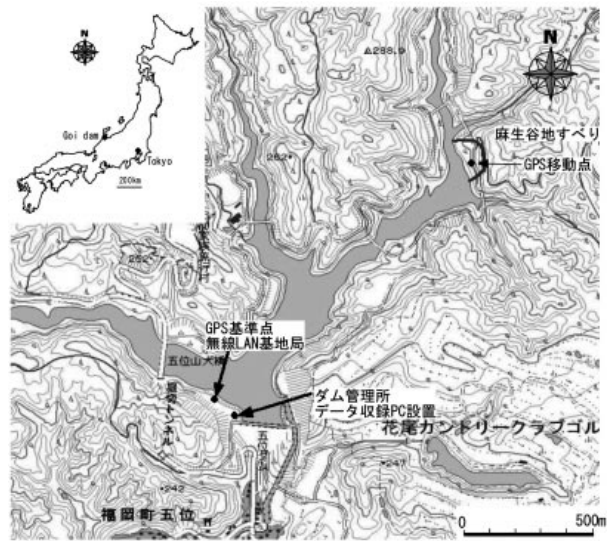


Fig.2 試験地位置図
(国土地理院発行1/25000地形図飯久保使用)
Index map of test site

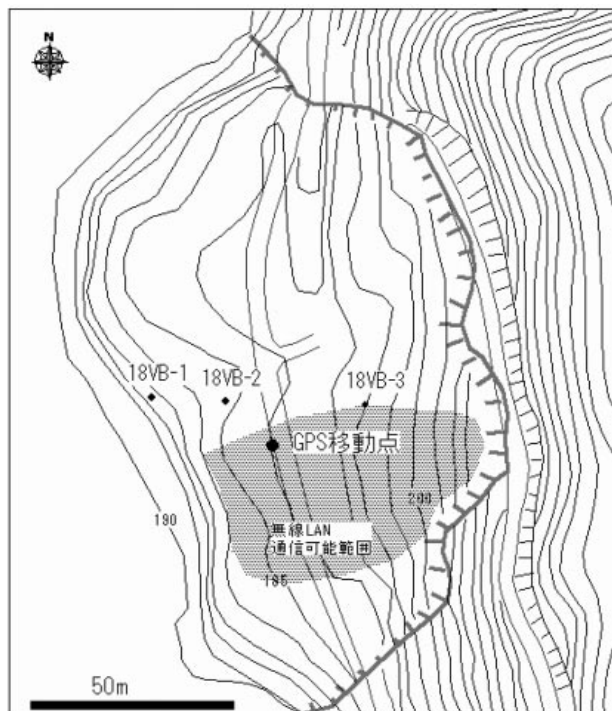


Fig.3 移動ブロック平面図
Detail map of landslide block

テムが適当と考えられた。そこで1:25,000地形図を検討したところ、移動ブロックとダムサイト周辺は直接見通せることが期待された (Fig.2)。このため、まず商用電源を得られる管理所付近に無線LANアンテナを置き、地すべりブロック内で八木式アンテナ、無線LANルータ、PCを携行し、通信テストを行った結果、通信可能な範囲が得られなかった。次に基準側を西側の舟艇庫付近 (Fig.2の基準点付近) に移し、通信テストを行ったところ、ブロックの中心より南側で通信可能な範囲を確認した (Fig.3)。地すべりブロック内は杉林であり、GPS移動観測点は通信可能範囲のなかでも道路沿いの比較的上空の開けた場所を選定した。各点の上空視界はFig.5のとおりで、移動点の天空率は約30%と悪い部類に入る。無線LANアンテナとGPS受信器は同一箇所にある必要はないが、アンテナ用の同軸ケーブルを長くすると損失により通信距離が低減すること、電源や信号ケーブルの野生動物による損傷防止のため、観測システムは1カ所に集約した (Fig.6)。GPS基準点も無線LANアンテナに合わせて舟艇庫付近とし、システム電源は舟艇庫よりAC100Vを供給した (Fig.7)。データ収録PCはダム管理所屋内に設置し、基準点の無線LANルータと無線LANで接続した。データ収録PCは、新設したISDN回線により民間プロバイダを経由してインターネットに接続し、農村工学研究所の解析PCへのデータ送信を行った。

基線解析は前章のバッチプログラムによる自動解析を行ったが、バッチプログラムに組み込み可能な基線解析ソフトウェアでは移動点の上空視界が悪いため、セッシ

ョン長によらず厳密解が得られないことが多かった。このため、全てのGPSデータをRINEX標準フォーマットに変換し、Trimble社製GPSurveyを用いて後解析を行ったところ、解析失敗が少なくなった。よって、以下の検討では、GPSurveyによる基線解析結果を用いた。



Fig.6 GPS移動点状況
Situation of GPS monitoring point



Fig.7 GPS基準点状況
Situation of GPS datum point

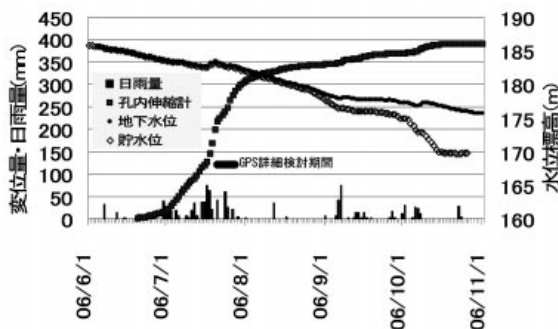


Fig.4 孔内伸縮計観測記録 (18VB-2: 富山県観測)
Landslide monitoring data of 18VB-2



Fig.5 GPS観測点の天空率
左: 移動点(約30%), 右: 基準点(約70%), 画面下が北
The sky view of GPS points
left: monitoring point(30%), right: datum point(70%)

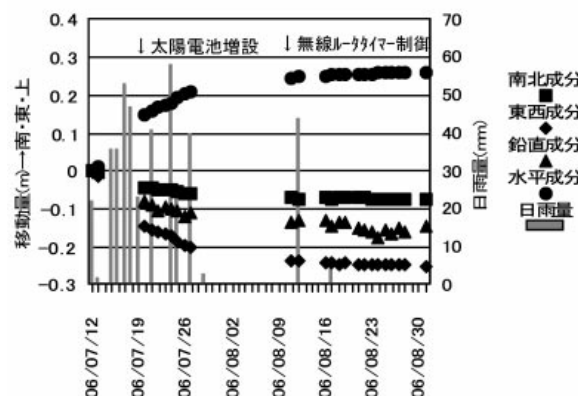


Fig.8 日データによるGPS観測結果
GPS monitoring result using day by day data

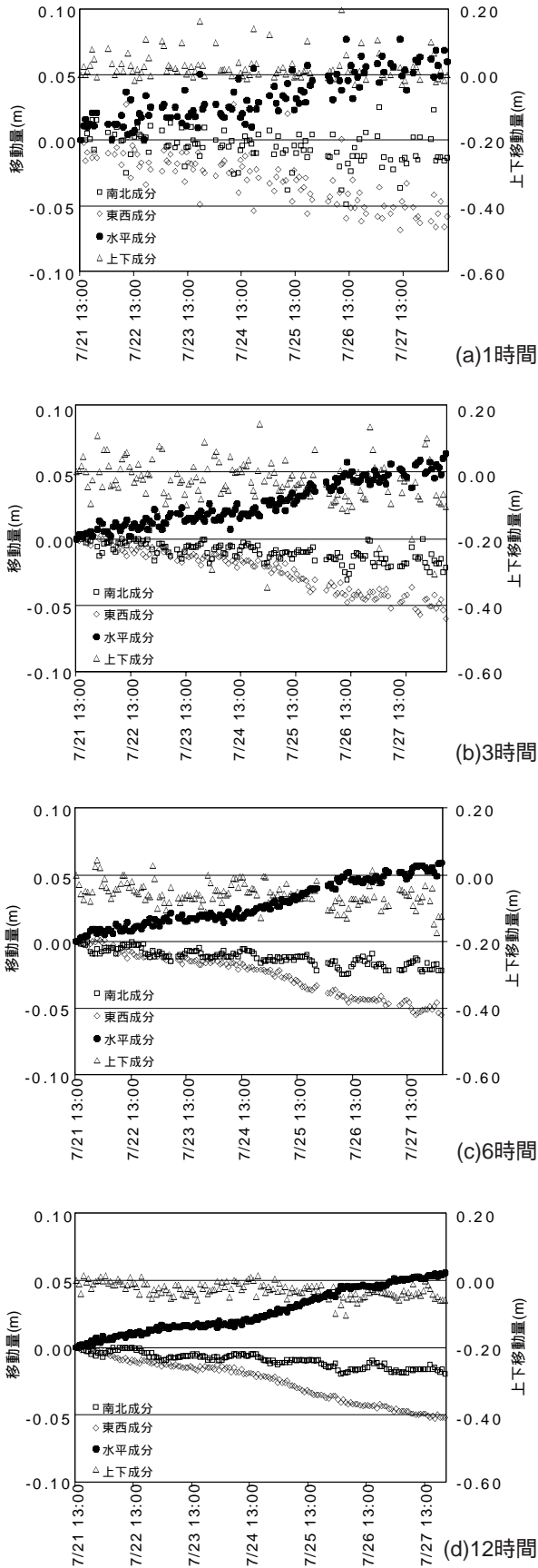


Fig.9 観測時間を変えた1時間周期の基線解析結果

Monitoring result with data at cycle of one hour of different measurement time

3 観測結果と考察

Fig.8に2006/7/12~8/31の1日ごとのデータファイルを連結し、基線解析した結果による、7/12を初期値とする移動点の移動状況を示す。梅雨期の降雨と低下運用中の貯水位の地すべりへの影響が懸念されたため、観測開始を優先し、当初は在庫のあった24Wの太陽電池1枚を電源とし、無線LANは常時接続としたため、移動点側の電源ダウンによる欠測が生じた。しかし断続的ではあるが、梅雨末期の降雨によると考えられる移動の継続と、その後の沈静化をとらえることができた。上記観測期間中の水平移動量は25cm、沈下量は15cmに及んだ。太陽電池の増設と無線LANルータのタイマー制御を開始した8/16以降は12月まで電源トラブルは発生しなかったが、9月以降は植生繁茂の影響が1時間あたりの観測データファイル容量が基準点で7~10kBなのに対し、移動点では1~2kBとなり、基線解析が不可能となった。

移動速度の大きい7/21-28のデータについて1時間、3時間、6時間、12時間と観測時間の異なる毎時データの基線解析を行った結果をFig.9に示す。各グラフとも、西南西への動きを主体とする水平変位が認められるが、セッション長が短いほどばらつきが大きく、特に上下成分については12時間データまで移動傾向がつかめない。また、1時間データでは、天空率が悪いことによる解析不能も多く見られた。

これらの結果から、移動状況の把握や予測のため1時間毎に基線解析を行う場合、1時間データそのものの解析ではばらつきが大きく、何らかの誤差低減処理が必要であることがわかる。そして、その手法の一つとして、前3時間や6時間といったデータを基線解析することで、セッション長とともに誤差幅が低減され、毎時の基線解析によって移動傾向がつかみやすくなると評価できる。

Fig.10は各観測時間の水平成分のみを取りだして比較したものである。6時間および12時間データでは7/24か

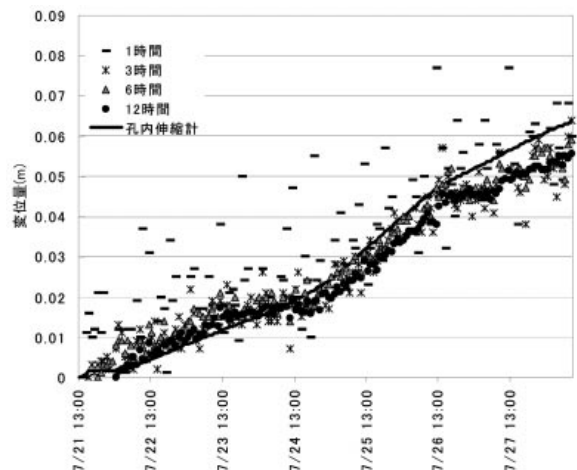


Fig.10 水平変位量の比較

Comparison of horizontal displacement

ら7/25にかけての加速や7/26以降の減速など、移動速度の細かい変化が読み取れるが、その傾向は併記した孔内伸縮計の毎時データの移動傾向と一致する。このことは、本手法による移動観測結果が地すべりの動きによるものであることを示し、1cm/日程度の移動速度では12時間データの連結によっても移動速度の変化を鈍らせずに正確に捉えられることを示すと考えられる。

結 言

地すべり災害時の初動調査への対応を目的に、無線LANを利用し、設置機材と通信のコストを抑えて基線長数kmの準リアルタイムモニタリングを可能にするGPS計測システムおよび解析システムを構築した。現地適用試験の結果、最も電力を消費する無線LANルータをタイマーを利用してon/offを制御することにより、太陽電池を電源としながら長期的に安定した観測が可能になることを確認した。今回の現地では、移動点側の上空視界が悪く、短時間の測位精度を大きく悪化させているが、連続観測データを利用して、データダウンロード時点以前の複数の観測時間データを同時に基線解析することで、特に6~12時間のデータの解析により誤差幅を低減し、毎時の移動傾向が把握しやすくなることを示した。このことは、必ずしも良好な上空視界が確保できない地すべり地においても、6~12時間データを利用することで、基線解析に利用可能な衛星の組を数多く捕捉し、測位精度を改善できる可能性を示す。さらに、地すべり現場におけるLAN回線の開通は、地下水位計や孔内伸縮計等もオンライン化し、総合的な地すべり監視システムの構築を容易にすると期待される。

今後は、上空視界が悪いときにも対応できる自動基線

解析用ソフトウェアの検討や、強制変位試験等による干渉測位法における移動速度と有効な解析時間の関係の解明を行う予定である。

参考文献

- 1) 有澤英樹・小林郁雄・大石 哲・岩井雅彦 (1998): 巨大地すべりにおけるGPS測量の効果と課題, 第37回地すべり学会研究発表講演集, 289-292
- 2) 黒田清一郎・奥山武彦・中里裕臣・有吉 充 (2005): GPS測位による地すべり対策事業概成後の安定性確認, 農工研技報, 203, 239-244
- 3) 丸山英司・会津隆士・荒井正・竹内均 (1998): 降水量と地表面移動量との関係 - とくにGPS自動観測を用いた長野県倉並地すべりの例 (その2), 第37回地すべり学会研究発表講演集, 285-288
- 4) 中里裕臣・奥山武彦・黒田清一郎・井上敬資・中西憲雄・楠本岳志 (2005): 四国秩父帯地すべり地におけるGPSによる地すべり移動量観測, 平成17年度農業土木学会講演会講演要旨集, 624-625
- 5) 佐田達典 (2003): GPS測量技術, オーム社, 163p
- 6) 清水則一・安立寛・小山修治 (1998): GPS変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源と素材, vol.114, 397-402
- 7) 田山 聡・増成知宏・岩崎智治・清水則一 (2005): 道路施工でのGPS自動変位計測システムの導入, 建設機械, 41, 40-44
- 8) 内山雅之 (2004): エポック・バイ・エポックによる精密な基線解析とアプリケーションについて - RTDの紹介, GPS/GNSSシンポジウム2004, 2.8

Semi-real-time Monitoring of Landslide by GPS Using Wireless LAN

NAKAZATO Hiroomi

Summary

This report introduces a semi-real-time monitoring system by GPS using wireless LAN for landslide hazard observation. The system enables landslide monitoring with several km baseline while suppressing the cost of the installation for measuring equipments and the communication without commercial power source. As the result of field test of the system on a landslide slope, it was confirmed the intermittent operation of wireless LAN router with a timer, which consumed much electric power, made possible long-term and stable observation with solar batteries. At this test site, the sky view on the monitoring point of GPS was bad, and it greatly deprived accuracy of measurement for a short session data. However, it is possible to discriminate easily the moving tendency per hour by analyzing continuous GPS data in two or more session time, especially 6-12 hour, just before download of the data. This result shows that it is effective to analyze sets of 6-12 hour session data to observe the displacement with comparatively high accuracy in landslide area where sky view is often poor.

Keywords : disaster corresponding, GPS, displacement monitoring, wireless LAN, landslide