

# RTD-GPSを用いた自動観測システムの 地すべりへの適用報告

RTD-GPS AUTO-MONITORING SYSTEM APPLICATION FOR THE LAND SLIDE

・池邊 浩司<sup>1</sup>・内山 雅之<sup>2</sup>・森 俊行<sup>3</sup>

Hiroshi IKEBE, Masayuki UCHIYAMA, Toshiyuki MORI

<sup>1</sup>株式会社パスコ 九州事業部 技術センター 生産促進部 (E-mail;heibre1916@pasco.co.jp)

<sup>2</sup>ジオサーフ株式会社 (E-mail;masayuki\_uchiyama@geosurf.net)

<sup>3</sup>ジオサーフ株式会社 (E-mail;toshiyuki\_mori@geosurf.net)

**Key Words:** RTD-GPS, Epoch by Epoch, Land Sliding Dam-Reservoir, Auto-Monitoring system, Exponentially Weighted Moving Average, EMA

## 1. はじめに

我が国は労働人口の減少と本格的な少子高齢化を迎えており、厳しい財政事情等から社会資本整備は「新たな施設整備から、既存施設の維持管理や長寿命化による予防・保全的な整備」へと方針転換を余儀なくされている。この様な中で大規模構造物であるダムも、新規整備中止や事業計画の大幅な見直し(ダムによらない施策)、あるいは整備の一時凍結等の新たな措置が次々と打ち出されている。

他方、地球温暖化による異常気象は、時間雨量100mm/h超の短時間豪雨やゲリラ豪雨、さらに台風や熱帯低気圧の強度の増加による記録的な大雨を頻繁にもたらすなど、土砂災害の激甚化や河川治水安全度低下などを招きつつある。<sup>1)</sup>

本論は第4回土砂災害に関するシンポジウム(2008)にて紹介した四国地方の一級河川Y川上流域にあたるダムの貯水地におけるRTD-GPSを用いた地すべり自動観測システムについて、そのシステムの稼働状況や観測状況等について概要報告を行うものである。

## 2. 三波川帯の貯水ダム域に構築したRTD-GPS地すべり自動観測システムについて

RTD-GPSを用いた地すべり自動観測システム(以下、本システム)は、洪水調節や河川流量のコントロール、さらに都市域への水の安定供給を行っているダムの貯水域において、特に貯水位付近にあたる地山の地すべり挙動をモニタリングするために構築されている。

貯水域における地質は、中央構造線の南側にあ

る西南日本外帯の三波川帯に属する結晶片岩類や緑色凝灰岩類、破碎帯及びこれらの崩積土(崖錐堆積物)等から構成されている。

これらの地層は、地質構造運動により変質作用を被っており、特に結晶片岩については片理に富む等して板状剥離しやすい性質を有している。

他の地層についても、褶曲や弱線に沿った脆弱化や変質を被り、開口亀裂に富んでおり、これらの地層が日本有数の地すべり地帯を形成している。

ダム施設管理者は、この様な貯水池域に分布する個々の地すべり危険箇所に対し、動態観測機器(孔内水位計、地盤伸縮計、多段式孔内傾斜計等)等による自動観測システムを構築し、その挙動について常時監視をしている。

本システムは、地すべり危険箇所へのモニタリング手法の一つとして、特に以下の整備方針に基づき構築された。

- (1) 貯水池両岸に多数分布している地すべり危険箇所(区域)のうちで、特に「地山挙動の監視を密にすべき」と判断される箇所への挙動の監視(稼働中である他の地すべり自動観測システムと併用し、特に貯水位付近にあたる地すべり末端域への地山挙動に着目した連続監視)
- (2) ダム貯水試験や洪水調節等に伴って発生する貯水位の上下変動期における地すべり危険箇所のリアルタイムでの挙動監視
- (3) 貯水池域全体を「面的に」捉え、地すべり地帯となっている貯水域両岸の斜面に対する全体的な地すべりの活動傾向を把握するための連続観測(次ページ図-1参照)

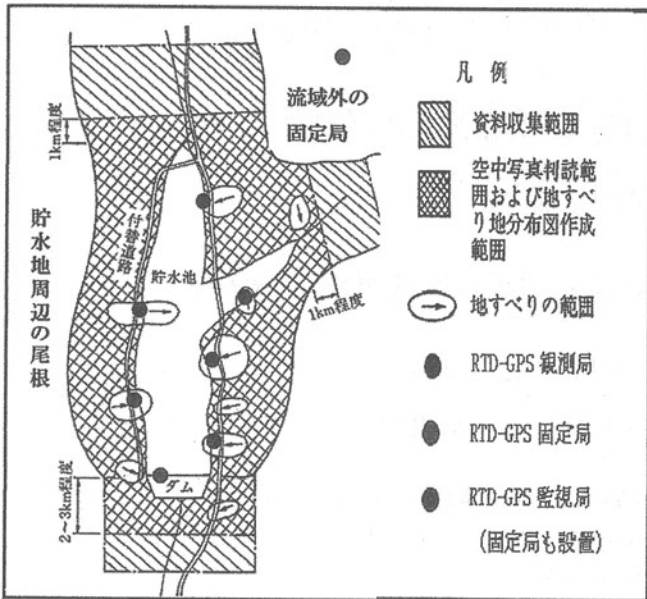


図-1 ダム貯水池におけるRTD-GPSを用いた地すべり自動観測システム配置平面図(イメージ) 4)を一部改変

GPS測位法について概説をすると、概ね下図-2の様に整理される。すなわち、スタティック方式では高精度(概ねmm単位)を得る代わりに、一定時間の静止による観測データ蓄積が不可欠であり、リアルタイム性に乏しいこと、またキネマティック方式によるRTK-GPS方式では、リアルタイム性に富むものの既知点より観測点への補助的な測位情報を常時送信する必要があり、また両点間の基線長が長くなると観測精度が急激に劣化する(概ねcm単位)等々の得失を有している。RTD-GPS方式では、衛星から送られる測位情報を1エポック毎に独自の解析アルゴリズム(Epoch by Epoch)により解析する方式であり、表-1に示す様に、スタティック測位の精度確保面での利点とキネマティック測位でのリアルタイム性確保面での利点を両立させることが可能な新手法である。<sup>2)</sup>

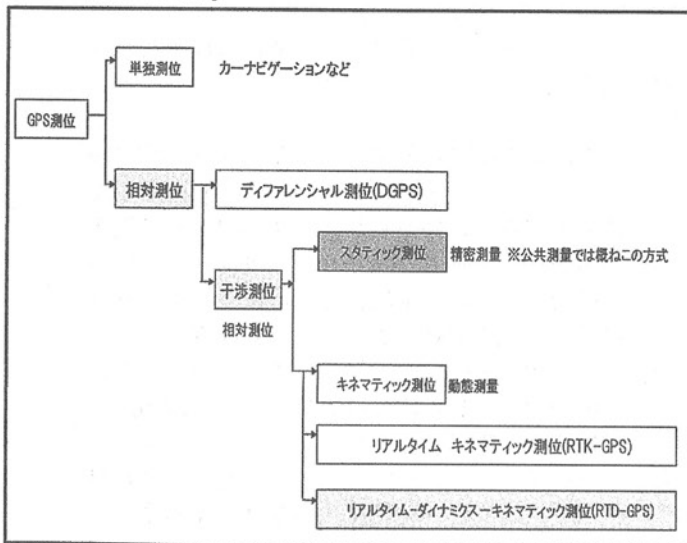


図-2 GPS測位法の種類 3)図-2.1を修正加筆

表-1 代表的なGPS測位法の得失整理表 2)表-1を改変

| 項目/測位方式         | スタティック-GPS  | RTK-GPS   | RTD-GPS (Epoch-by-Epoch™)                            |
|-----------------|---|---|--|
| 解(座標値)取得までの待機時間 | 1時間~数時間   | 数10秒~数分(初期化時間を要する)  | データ受信後即時(1エポックデータで決定可)                               |
| リアルタイム性         | ×(後処理)  | ○   | ◎  |
| 精度(水平)          | 5mm+0.5ppm程度  | 1cm+2ppm程度  | 1cm+0.2ppm程度(1エポック)<br>2mm+0.2ppm程度(24時間)            |
| 基線解析            | 長時間の観測データから基線解析(平均的な解)                              | フィルタリング(補正情報を元にした基線解析(予測的な解))                             | エポック毎の独立基線解析   |
| 観測条件            | ・後処理解析のみ<br>・観測中の観測点移動は×(固定点に限定される)<br>データ通信負荷 比較的小 | ・リアルタイム観測~解析突発的な変位把握は×<br>・2周波受信機のみ対応(高価)<br>データ通信負荷 比較的大 | ・突発的な挙動検知も可能<br>・観測点は固定点・移動点ともに区別なく利用可能<br>データ通信負荷 大 |
| 突発的変動に対して       | 事前・事後の変動量のみ   | フィルター加工される。   | 正確に把握できる。  |
| ゆったり変動に対して      | 事前・事後の変動量のみ   | フィルターの影響は小さい(追従できる)                                       | 正確に把握できる。  |
| GPS受信機価格        | 高い  | 安価  | 高い   |

### 3. GPS地すべり自動観測システムの課題

GPS地すべり自動観測システムは、広範な地すべり土塊に対し観測局を多点配置することによって、地表面の水平変位を比較的高精度(数mm~数cmオーダー)で、且つ面的に捉えていく事が可能である。他方、GPS自動観測システムとしての全体的な課題として、大きく以下の7点が掲げられる。<sup>2)</sup>

- (1) 鉛直成分(高さ方向)の観測精度は、測位原理上の問題があり悪い(水平方向の観測精度に対し、約2~5倍程度の誤差を持つと言われる)。
- (2) 衛星を捕捉する観測局の上空視界の善し悪しによって観測精度自体が大きく変化する。
- (3) 観測はGPSアンテナで受信するため、地表とアンテナを介する支柱や継手ポール等の構造や安定に影響を受ける。  
※観測点はあくまで地表点であり、中空にアンテナを配置するのは(2)によるため。
- (4) 概ね±5mm前後の高精度の水平変位を得るには、スタティック測位による後処理解析方法が適している。しかし、最低1時間の待機時間を要するほか、複数の観測局や固定局(最低3局)での検証が必要となるため、地すべりの緊急変動を捉えるには向かない。
- (5) 変位をリアルタイムで監視するためには、RTD-GPS測位法(1観測局での単独運用が可能)、

もしくはRTK測位法(キネマティック測位法で、複数局での運用が基本)が適しているが、その際には観測精度を概ね cm 単位まで犠牲にする必要があり、cm 単位の観測精度では、ゆっくりと複雑な動きを示すことが多い地すべり滑動を正確には捉えきれない場合がある。

- (6) GPS 測位は複数衛星から連続して送信される大量の位置座標データなどを統合し、解析を行うため、観測局と監視局間の通信インフラの整備環境がシステム構築上で最も大きな制約となる。また、大量の観測情報を解析し保存する監視局では、定期的なサーバーメンテナンスなどが不可欠である。
- (7) GPS 機器を始めとして、システムを構成する各種機器が全体に特殊な機能を必要とするものが多いため、他の地すべり自動観測システムに比較すると全体に高価なものとなる。

この様に、GPS 地すべり自動観測システムには一長一短の得失がある。しかし、広範な緩傾斜地形を土塊がゆっくりと滑動する地すべり現象に対しては、地表の水平変位を面的で高精度に把握できる能力は、他の地すべり動態観測機器から構成される観測システムでは得られにくい点でもある。

本システムは上述の得失を踏まえつつ、整備基本方針や予算制約等も鑑みながら構築し、運用を開始したが、その中で下記の様な課題が発生した。

- (1) 本システムが貯水池域の中で特に「要監視」とされる地すべり危険箇所の末端域(貯水面付近)での地すべり滑動現象をリアルタイムで監視することを最優先事項としたため、観測局は各危険箇所について貯水池の外周道路沿いに1局のみを設置した。このため、各危険箇所の地すべりブロックの全体的な変位傾向を1局の観測データのみで判定する形となり、未だ地すべりの滑動傾向を明瞭に捉え切れていない。(図-3)
- (2) 各観測局は、設置前に衛星捕捉試験を複数回行ない、その稼働環境を確認したが、設置場所の多くが貯水池両岸にあたるV字谷底部であり、山側の急斜面を呈する地形により上空視界を妨げられ易く、捕捉衛星が常時天球上で偏ってしまう観測局が発生した。この様な観測局では観測精度自体が著しく低下してしまった。(図-4)
- (3) 本システムは、リアルタイム監視機能を第一義としたため、RTD-GPSによるEpoch by Epochでの解析結果をリアルタイム解析し表示する機能を有している。しかし、GPS観測データを長期蓄積し(例えばRINEXファイル変換による処理)、改めて後処理解析としてスタティック測位等に

よって再解析する機能については、改善課題として保留されてしまっている。このため、本システムの観測精度検証が非常にに行いにくい環境にあり、同時に他の地すべり自動観測システムによる観測成果とも観測データの時系列的な連続性の評価という面で、比較・検証が行いにくい状況となってしまっている。



図-3 GPS観測局の配置位置(青丸)と地すべりブロックの位置関係(赤↓は主測線位置)

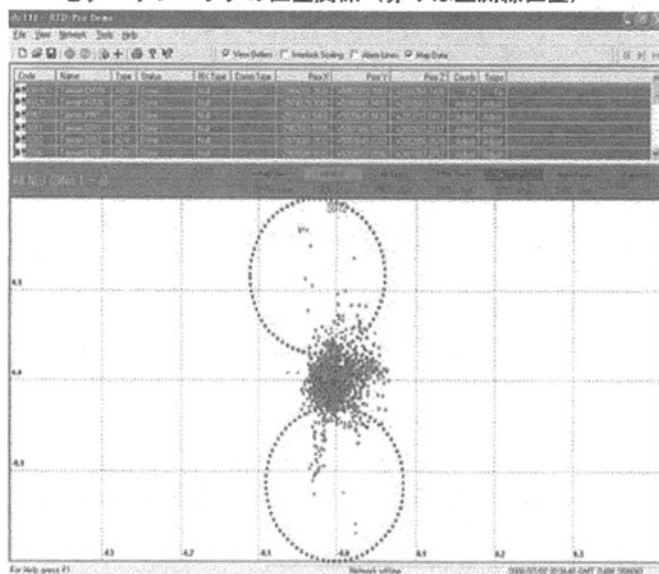


図-4 GPS観測局設置環境によるデータ取得状況の違い(上空視界の制限による捕捉衛星の偏り)に伴うRTD-GPS観測データ(二次解析処理後)のパラッキ(赤破線丸印)。※縦軸がN-S方向、横軸がE-W方向を表す。なお測位精度が最も良いとされるのは天頂に1つ、水平線に120°の方位角で3つの計4衛星の捕捉状態とされる<sup>3)</sup>

ここで、GPS観測データを用いた解析方法について、一般的な考え方について述べておく。

GPS 衛星から送られてくるデータは、L1, L2 の 2 周波搬送波であり、詰まるところは地球上の X, Y, Z の未知座標を各衛星のその時点で発する X, Y, Z 座標と時間軸データに関する暗号化コードであり、観測局ではこれらも含めて再処理を行い、逆算する形で地球上の任意座標を求めていくものである。

そのために得られる情報は、基本的には図-5 の様な「散布図データ」の集合体となる。但し、これでは mm 単位での地すべり滑動に対する警戒・避難基準値に適用する情報とはならないため、測位法毎によりその手法は異なるが、図-6~図-8 の様な解析アプローチを経ながら、二次的処理を行って観測精度を上げていく事となる。

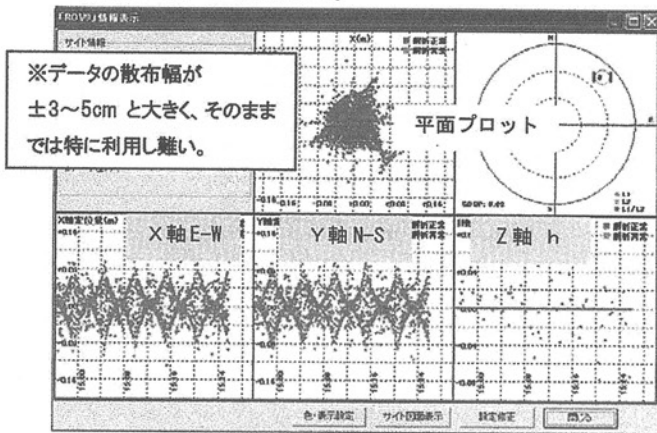


図-5 GPS 観測(生)データ表示

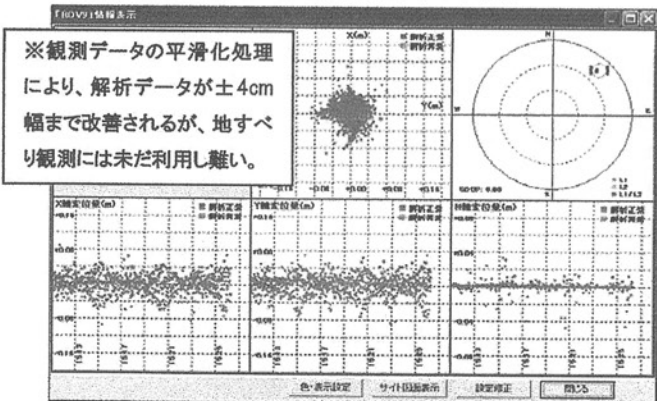


図-6 GPS 観測データ(平滑化処理後)の表示

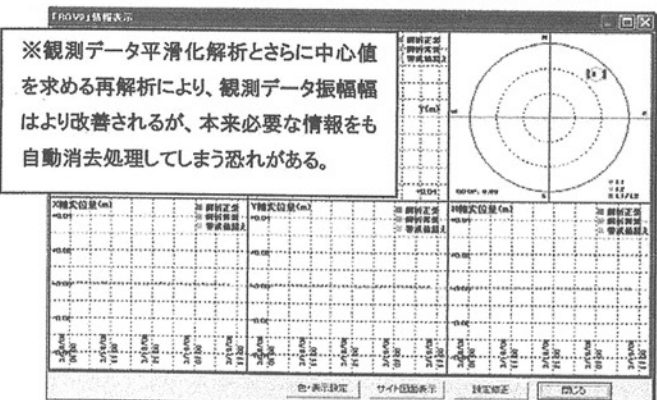


図-7 GPS 観測データ(中央値プロット)の表示例

なお、本システムの RTD-GPS 方式では、独自の基線解析アルゴリズム解析によって、リアルタイムの観測状態にて、下図-8 の様な ±1cm のオーダーまで観測データの振幅を押さえ込む事ができている。

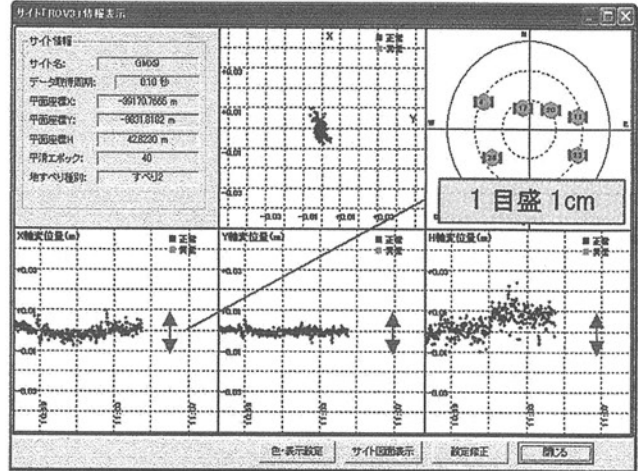


図-8 RTD-GPS 解析後の解析精度

#### 4. システムメンテナンスを通じたGPS観測データの解析方法を変えた精度検証の試行

本システムは、メンテナンスフリーを整備の基本コンセプトとしていたが、ダム流域が中山間にあり、気象条件が夏場は局所的豪雨に伴う落雷の多発、冬場は凍結・降雪と言った具合に、設置した電子機器にとって非常に厳しい環境にあった。このため、システムの運用開始後に、一部機器の交換を含めた保守メンテナンス作業を行った。

今回は、前述した課題も踏まえて現地メンテナンス実施時に、観測局のデータの一部を自主回収して室内に持ち帰り、後処理解析方式によって観測データの精度について後検証として試みる事とした。

なお、精度検証に際しては、各危険箇所の地すべりブロックが新たな地表変状を起こしていないとの情報をヒアリングにより確認した上で、基線解析アルゴリズムを Epoch by Epoch 方式からキネマティック方式とスタティック方式とに変えて試行する事とし、さらにこれと併せて「指数加重移動平均法-EMA」によるトレンドグラフを作成し追加検証をする事とした。

図-9~図-11 にこれらの再解析結果を示す。ここで、指数加重移動平均法 (Exponentially Weighted Moving Average : EMA) について説明する。

これは、時系列的なデータを平滑化する移動平均手法の一つであり、金融市場や気象、水象等の計測分野にて活用される「統計処理手法」である。類似解析手法である単純移動平均法とは異なっており、個々のデータに対し指数関数的に異なる重みをつけて平均値を計算していく方法である。

指数関数的に減少する重み付けは、最近のデータ

を重視すると共に、古いデータを完全に切り捨てないとの考え方のため、データがより平滑化されることにより、精度の向上が図れるとされている。

また、各図は縦軸(水平変位幅)目盛りが両者共に1cmであり、再解析結果としてはキネマティック測位法によると約5cm幅のバラツキ幅が、またスタティック測位法によれば約2cmのバラツキ幅が得られている。

なお、鉛直方向(高さ方向)の変位については、両方式でも共に、水平方向の成分の約4~10倍のバラツキ幅が得られた。

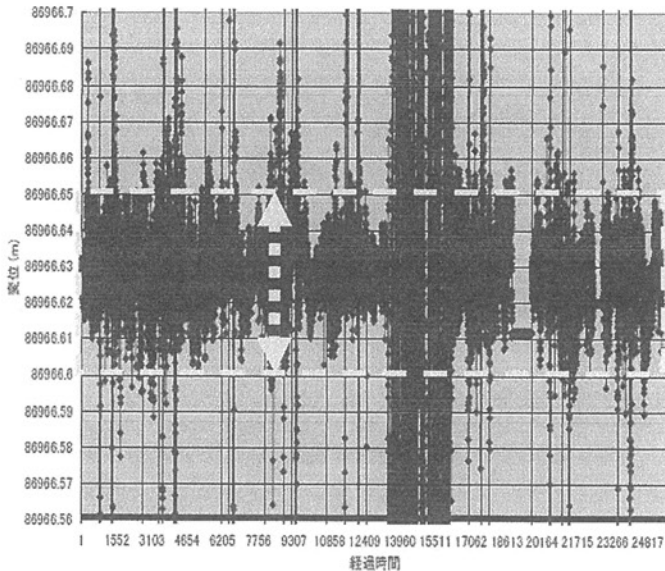


図-9 キネマティック測位法による水平変位成分(N-S方向)の観測データ再解析結果(破線:約5cm)

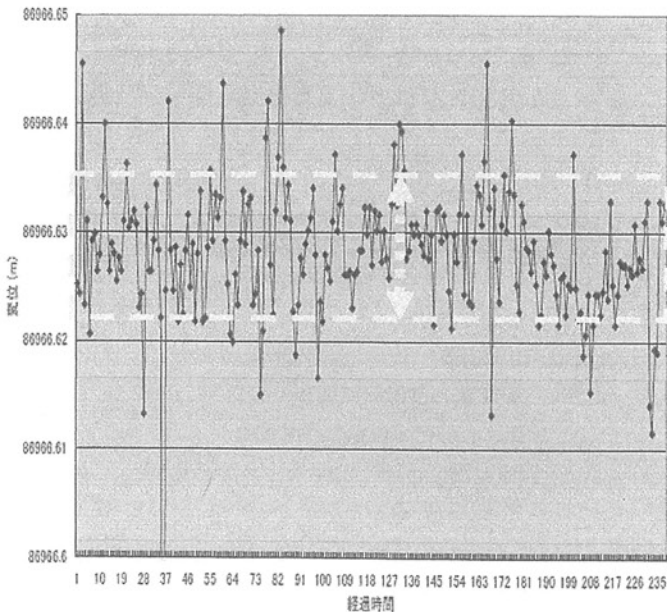


図-10 スタティック測位法による水平変位成分(N-S方向)の観測データの再解析結果(破線:約2cm)

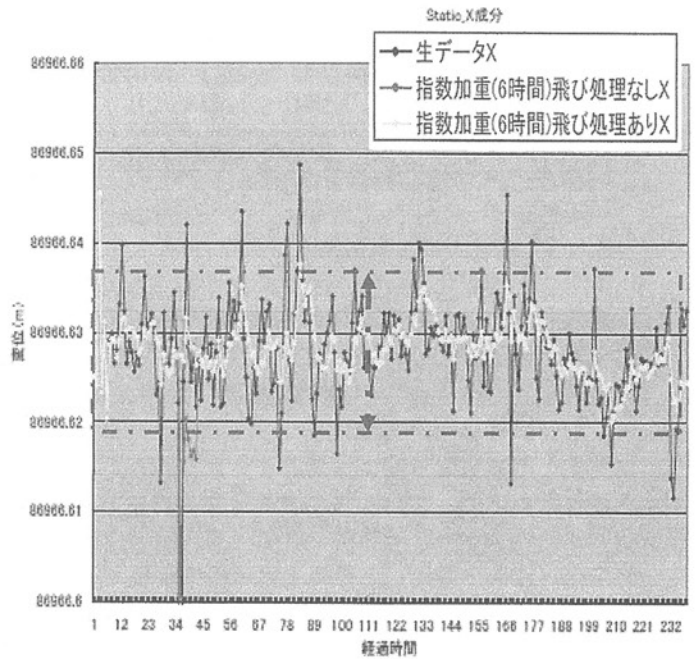


図-11 スタティック方式での再解析結果(図-10)に指数加重移動平均での追加補正を行った結果(一点破線:約1cm)

各図に示す様に、精度面から見るとGPS観測データを再統合し後処理で解析するスタティック測位方式では、より観測誤差を小さくできる事、さらに指数加重移動平均補正という手法を追加する事でより変位傾向(トレンド)を見極めやすくなる事等が見て取れる。

RTD-GPS測位法は、キネマティック測位方式に近い方式であるが、RTK方式よりもやや高い精度と、リアルタイムで解析結果が表示できる機能、並びに監視局にて観測局毎に単独でその都度基線解析の処理を行う機能等を兼備している事が特徴である。

このため、地すべり現象の活発化等の緊急事態等においては、観測局単独で地表の変位をリアルタイムな地すべり滑動傾向として常時監視できるメリットがある反面、上空視界等の制約により衛星捕捉環境が元々良くない観測局では、解析データが分散化してしまう傾向も併せて強くなり、どれが「正しい」変位トレンドを示しているかが明瞭に判定できにくくなるデメリットも有している。

また、特に本システムでは、各観測局それぞれにリアルタイムで監視ができる反面、本システムの補助機能として組み込んだ異常値を感知した際に同時に発出される緊急通報機能(携帯メール送信機能)が、この解析データが暴れてしまう事によって、誤作動発信を繰り返してしまい、システム管理者に大きな心理的負担(オオカミ少年現象)を強いてしまった欠点も今回明らかとなった。

以上から、本システムを今後より良い地すべり自動観測システムとして改善していくためには、平常時における監視を主な目的とした後処理解析方式（スタティック方式+指数加重移動平均補正）による変位傾向（トレンド）の把握機能の付加と、貯水試験等の人為的な貯水位変動時におけるリアルタイム監視が必要不可欠とされる緊急時の Epoch by Epoch™方式の単独基線解析アルゴリズムによる解析手法とを併用、あるいはシステム上での切替えが可能となる機能の付与が必要であると思われる。

## 5. RTD-GPS 地すべり自動観測システムの今後

本システムは、要求仕様の調整を繰り返しつつ、整備の基本方針を密に検討し、実施設計を経て構築されたもので、これから本格運用となる。

GPS 測位は、近年の GPS 観測機器自体の性能向上や汎用性向上等で、多くの土木・建築現場で高い観測精度が確保できる測量法として普遍的に使用されている。また、国産準天頂衛星が運用を開始した場合には、常時捕捉可能な衛星が得られる事となり、上空視界確保を目的とした用地調整（渉外）や観測局設置前の試験観測作業、さらに固定局での手作業による観測局データの繰り返し基線解析～測位確定といった諸処の作業からは、少なくとも大きく解放されていくものと考えられる。

特に、本システムで、設置条件面から多くの不安要素を持っている観測局においても、観測（測位）誤差は必然的に小さくなり、より高精度な観測ができる利便性がより高まっていくものと思われる。

但し、これら得られる観測データについては、あくまで衛星から送られる座標データ等である。このため、解析については、その手法が異なったとしても、観測データ群に対する「統計处理的」な側面を強く持っており、計測対象の特性により最適な観測解析手法を採用しなければ間違った、あるいは難解な測位結果を導き出してしまう恐れがある。

また、GPS 地すべり自動観測システム自体が、より高い観測精度を担保しようとした場合には、観測局の多点配置が必要となる等、概して非常に高価なシステムとなってしまう傾向があるため、投資効果を最大とするためにシステム基本設計をしっかりと行い、データのアウトプットイメージを明確にしておく事、他の自動観測システムとの融合（統合）について将来イメージを持って対応できるよう、互換性を確保する方策について事前検討しておく事が肝要な事項となる。

本システムの様な地山の長期的なリアルタイム監視等の導入が望まれる土砂災害地域等は、多くが山間部に位置している事が多いため、大量の GPS 観

測データ群を監視局へ負荷なく行える通信回線等の整備如何は、システム導入に向けた重要な条件となってくる。このため、システムの構築作業と併せた通信回線の能力・仕様に関する事前検討を十分にしておく事も肝要である。

以上、今後は GPS 観測生データを何らかの形で蓄積できる形に現システムの改良を行い、後処理解析による地すべり滑動に伴う地表変位のトレンドを、より確実に把握する様にしていきたいと考えている。さらに、他の既存地すべり動態観測機器による自動観測システムデータとのインターオペラビリティ機能を強化し、より多角的な視点から GPS 観測データの地すべりへの警戒避難体制の発令基準値の一つとして検討を続ける等して、より有効に活用できる様にしていきたいと考えている。

**謝辞：**本報告を行うにあたり、本システムの構築や保守メンテナンスに携わった関係各位には、現地支援やシステム改善に関するご指導等も含め、多大なる御支援や御鞭撻を賜った。ここに改めて深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通白書 2009, 国土交通省
- 2) RTD-GPSを用いた自動観測システムの地すべりへの適用 第4回土砂災害シンポジウム, 2008
- 3) 連載 GPSと情報化施工 2.GPSの基礎-概要と単独測位-佐田・重松, 土と基礎, 53-10(573)
- 4) 貯水池周辺の地すべり調査と対策 1995  
旧)建設省 河川局開発課監修, (財)国土開発センター編集
- 5) 災害復旧事業における地すべり対策の手引き 2006  
地すべり災害復旧技術研究会編集, (社)全国防災協会発行
- 6) 日本の地すべり-第6版-  
(社)日本地すべり学会 2002
- 7) GPS 測量と基線解析の手引き-改訂版-  
土屋淳, 今給黎哲郎著 (社)日本測量協会
- 8) 新・GPS 測量の基礎  
土屋淳, 辻宏道著 (社)日本測量協会
- 9) 地すべり管理基準値の実態調査報告書  
旧)建設省土木研究所資料第3184号
- 10) RTD-GPSの測位方法 2006  
ジオサーフ(株)技術資料
- 11) GPS スタティック測位法・RTK 測位法を併用する地すべり自動観測技術について  
H15. 近畿地整管内技術発表会

(2010. 5. 14 受付)