

## 20. 観測測位データのカルマンフィルタ処理による法面適応評価

### － 設楽原 PA における GPS 測位データ処理の事例 －

大成建設株式会社 技術センター ○近藤 高弘

#### 1. はじめに

広域で橋やトンネル等の構造物の変位や、災害地域の地表面の変位等をモニタリング監視する事は防災対策として有意義である。

一般に変位・変形を測定する手段として、層別式沈下計・多段式傾斜計・挿入式傾斜計・トータルステーション等を用いた測定が実施されてきた。

これらの測定機器は測定対象にセンサを設置しその後配線や電力供給を行い、データ収集装置など大掛かりな装置を必要とする。またはトータルステーションのように見通しが必要であったりして、システムへの電力供給およびデータ収集に問題があり簡易に測定できない場合が多い。

広域を無線センサでかつ自立給電できるシステムで、観測器設置のために特別な工事を行わずに設置し測定できるワイヤレスセンサシステムが望まれる。

簡易に設置できる変位計測手段としてGPSの利用が考えられる。

GPSを用いて連続測位観測すると、受信時の衛星配置の変化等の影響を受けて安定した測位データを取得する事が困難である。

本報告は太陽光発電による自立給電を用いたGPS無線センサによる変位観測データを予測型フィルタ(カルマンフィルタ)を用いた変位計測の実施事例を紹介する。

#### 2. 観測対象と観測機器

新東名高速道路設楽原パーキングエリア工事において、標高差約90m(13段)の長大切土の施工にあたり動態観測の対象とした。この切土斜面の地質はマサ状に風化した石英閃緑岩からなり、路線にやや斜交する数条のリニアメントや低速帯が認められることから工事中および長期的な切土の安定性が懸念されていた。

そこで施工に伴う切土前後における法面挙動を監視するため地表面と地中の動態観測を行う事とした。以下に測定項目と観測機器を示す。

- ・自動追尾トータルステーションによる地表面変位測定30箇所(1時間毎の自動測定)
- ・パイプ歪計1箇所・挿入式傾斜計6箇所による地中変位測定(2週間に1度の手動測定)

これらの観測機器は現場法面監視の機器として採用された。

本報告の検証事例として正式に採用された観測機器とは別に新たに開発したGPS無線センサを3箇所設置(1時間毎の自動測定)しその有効性の確認を行った。

観測機器の配置を図-1に示す。

GPS無線センサは1周波のGPS受信機(GT8032)を採用し、アンテナは一般カーナビに用いられているパッチアンテナ(au-15)を採用、(無線モジュール(MU-1 1252MHz)とマイクロコントローラ(PIC16F877A)により制御されている。電力供給はソーラパネルにより自立給電されノーメンテナンスで観測測位が可能である。

基地局のGPS受信データとGPS無線センサで毎時5分間連続のGPS受信データを基地局に転送し干渉測位を行った。

法面切土施工は上段部の13段目より下段に向け施工を実施。

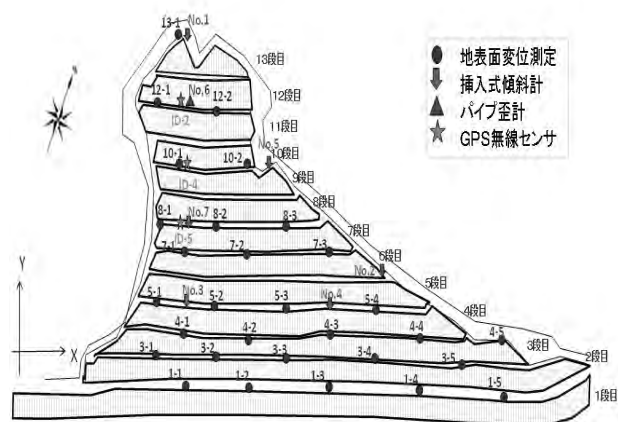


図-1 法面の動態監視計測機器の配置



写真-1 法面の動態監視計測機器の状況

### 3. GPS無線センサシステムの概要

GPS無線センサシステムはGPS無線センサ本体とその測位データを伝送する無線中継機から構成されている。

各装置への電力供給システムは、太陽光発電（ソーラパネル）による発電とバッテリー充電、および無線センサ機器の電力を制御するコントローラで構成されている。図-2に電力供給システムの概要を示す。

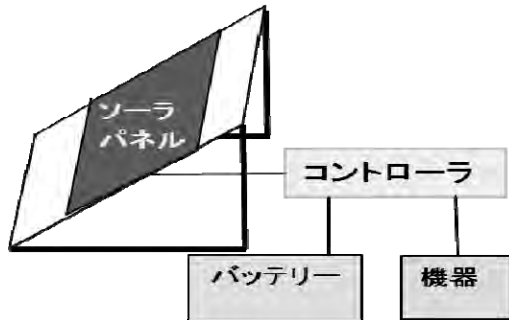


図-2 電力供給システム

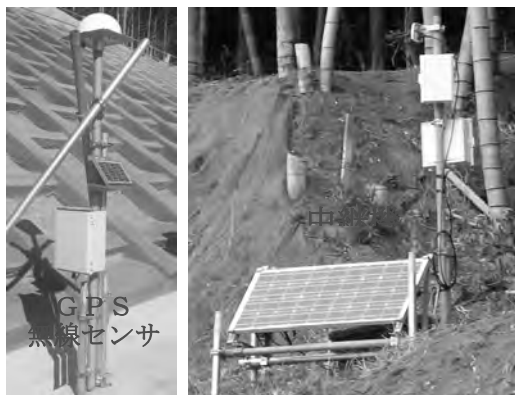


写真-3 GPS無線センサと中継機の設置状況

写真-3にGPS無線センサおよび中継機の設置状況を示す。ソーラパネル・バッテリー・機器の

消費電力（電圧・電流）を約1年間モニターし、有効な太陽光発電の試算を行った。また、情報伝達の中継機に関しては通信状況およびノード間の通信遮断等に対応できる自律式ルーティングのネットワーク試験を行った。図-3に示す様に現状のネットワークに何らかの障害が発生した場合、自律的にネットワーク構成を変更することが可能なシステムである。

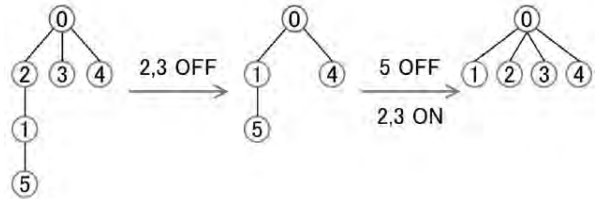


図-3 無線中継機の自律ルーティングイメージ

太陽光発電を用いた自立給電システムは、ソーラパネルの発電量とバッテリー容量の最適選定の問題がある。ソーラパネル設置角の選定として冬至の太陽高度 $=90^\circ - (\text{設置緯度}) - 23.5^\circ$ を南中最高高度としてパネル面に垂直に太陽光が当たる角度で設置した。冬至におけるソーラパネルの発電電力量を測定し、図-4のグラフを得た。この結果を基に、図-5にソーラパネル発電電力量とバッテリー充電時間の関係を示す。グラフに示す機器1日当たり消費電力とパネルの発電容量の違いによる充電時間の関係から、機器毎に最適なソーラパネルの組合せをシミュレーションできる。

例えば、消費電力2.03whの機器では、ソーラパネル40whを組合せると日の出から約3時間で夜間消費した電力をバッテリー充電できることがわかる。また、発電量の日変化を1年間通じて観察した結果、バッテリー容量は約3日分の消費電力容量があれば十分であることが確認できた。

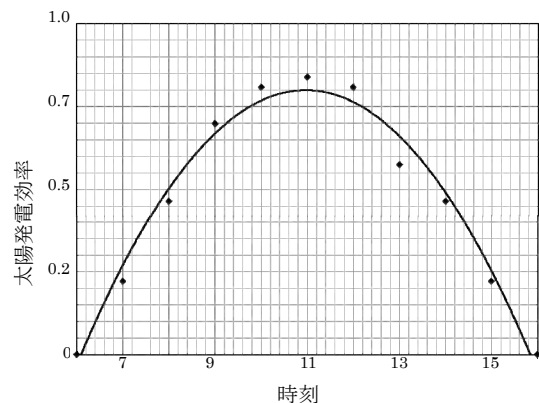


図-4 冬至における太陽発電量の日変化

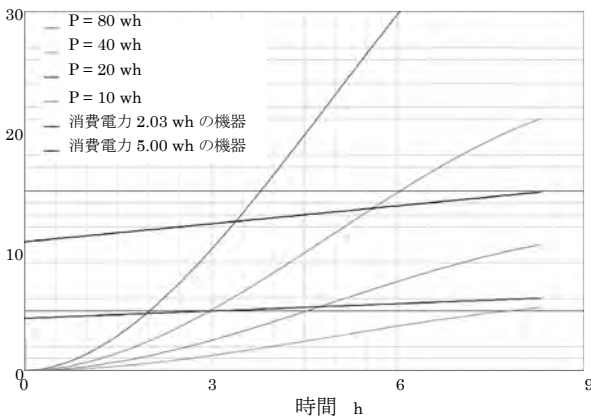


図-5 ソーラパネル発電電力量と充電時間

### 3. GPS無線センサの変位観測解析手法

GPS無線センサシステムは、GPS干渉測位方式を採用した計測システムである。純静的な変位を対象とした。日々の変位量は数mm以下と極めて小さいものとし、短時間の観測データを精度よく変位を推定する解析手法を用いた。

GPS衛星kから送信された電波を受信機iで時刻tに受信した場合の搬送波の位相を $\phi_i^k(t)$ とする。

対流圏遅延や電離層遅延のノイズを無視すると、搬送波位相の二重差 $\phi_{ij}^{kl}(t)$ は以下式になる。

$$\phi_{ij}^{kl}(t) = \rho_{ij}^{kl}(X, t) + \lambda N_{ij}^{kl} + \Delta_{ij}^{kl}(t) + \varepsilon_{ij}^{kl}(t) \quad \text{--- (1)}$$

ここで $\phi_{ij}^{kl}$ の二重差は以下のように計算される

$$\phi_{ij}^{kl} = \phi_i^k - \phi_j^k - (\phi_i^l - \phi_j^l) \quad \text{---- (2)}$$

$\rho_{ij}^{kl}(X, t)$ は衛星と受信機間の真の距離の二重差

$N_{ij}^{kl}$ は整数値バイアスの二重差

$\Delta_{ij}^{kl}(t)$ はアンテナ誤差の二重差

$\varepsilon_{ij}^{kl}(t)$ は種々のノイズの二重差

$\lambda$ はL1帯の搬送の波長である。

静的な変位モニタリングを想定し、受信機の初期位置を何らかの方法で決めれば、その後の位置は数cm精度で把握できる。

その場合、(1)式の右辺の整数値バイアスの二重差は既知とすることが可能となる。

ここで受信機の初期位置を $X_0$ 、ある時刻におけ

る変位を $\Delta X$ 、その時の受信機の位置を $X$ とすると(3)式を得る。

$$X = X_0 + \Delta X \quad \text{--- (3)}$$

これを式(1)の $\rho_{ij}^{kl}(X, t)$ に代入し、 $\Delta X$ について線形化した後に計算可能な量を左辺へ移項する。

$$\begin{aligned} & \phi_{ij}^{kl}(t) - \rho_{ij}^{kl}(X_0, t) \\ &= \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \rho_{ij}^{kl}}{\partial z} \Delta z + \varepsilon_{ij}^{kl}(t) \quad \text{--- (4)} \end{aligned}$$

幾つかの衛星について(4)式を取得し、これを解けば変位ベクトル $\Delta X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を推定する事ができる。

### 4. 観測データの改善方法の検討

GPS無線センサの干渉測位解析手法により観測結果の大幅な改善が認められた。

実際に定時的に観測すると、観測時刻による衛星の配置の違いなどから観測結果に変動が発生する。その改善方法として観測データの平滑化を以下の条件で検討した。

- ・変位は緩慢に変化して発生する。
  - ・急激な変位(段差)は発生しない。
- 以上の条件での有効な平滑化を検討。

一般的に考えられる平滑手法として移動平均法がある。移動平均による平滑化は現在値から過去のある時点までの値を平均化し処理する方法である。そのため平滑化した時点で過去からの結果に大きく影響を受けることになる。

信頼ある改善処理として、カルマンフィルタ処理がある。カルマンフィルタは、系統誤差とシステム誤差の分散量を過去の測定値からバイズ推定し現在値を推定する方法である。

一見この2つの処理は同じ結果を齎すかのイメージを与えるが、移動平均は過去の観測値のみで結果を得る方法である。それに対してカルマンフィルタは観測値の誤差分散を推定して確からしい値を得る方法である。

- ・単純に過去の観測値を平均化処理する方法(移動平均)
- ・観測値の誤差分散を推定処理する方法(カルマンフィルタ)

カルマンフィルタの有効性を移動平均処理との比較でシミュレーションする。

比較データは、三次関数を真値とし真値の中心に乱数を発生しその値を観測値として処理する。

- ・関数(三次関数)により真値を定義する。(この

値を仮の真値とする)

- ・真値を中心に±30mmの幅で乱数を分散発生させ、これを観測値として取り扱う。
- ・カルマン処理後の波形比較がほぼ同じになるように移動平均処理は過去50データの処理とした。

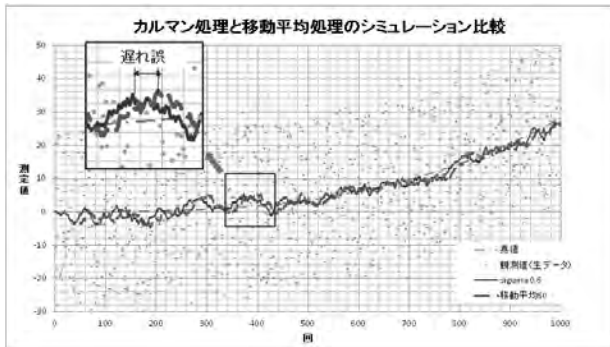


図-6 移動平均処理とカルマン処理の比較結果

図-6にシミュレーション結果を示す。カルマンフィルタは、誤差はあるが真値の変化に即応した計測値を示している。それに対し移動平均処理では、真値と現在値との遅れが発生する。

当然ながら移動平均量を大きくすればさらに遅れは大きくなる。

以上の結果よりカルマンフィルタの適応を考える。

### 5. カルマンフィルタの概要

カルマンフィルタは1960年代米国で宇宙開発における人工衛星の軌道推定に成功し広く知れわたるようになった。現在では観測値をカルマンフィルタ処理することで広く応用され普及している。

その多くが観測値の誤差分散の大きな観測データを確率推定する事で信頼性と安定性を確保するものである。

カルマンフィルタは確率的な枠組みで状態推定を検討する手法である。状態とはある時刻における信号に含まれる不確定な要素（ノイズ）を除いた量を指す。

ある時刻においてノイズ（雑音）の混入した時系列信号を観測した時、その背景にある量を、その時刻における測定可能な観測信号（ $y_i, i = 1, 2, \dots, k$ ）と時系列の状態空間モデルを用いて推定することがカルマンフィルタの目的である。

カルマンフィルタは以下の状態方程式と観測方程式から定義される。

$$x_{k+1} = Fx_k + Gw_k \quad \text{-----状態方程式}$$

$$y_k = Hx_k + v_k \quad \text{-----観測方程式}$$

上式の状態空間モデルを図-7に示す。

$x_k$  は  $n$  次元状態ベクトルで、 $F$  は  $n \times n$  行列、 $G, H$  は  $n$  次元列ベクトルである。 $w_k$  は平均値0、分散  $\sigma_w^2$  の正規分布の白色雑音として、システム雑音と呼ばれる。 $v_k$  は平均値0、分散  $\sigma_v^2$  の正規分布の白色雑音として、観測雑音と呼ばれる。 $w_k, v_k$  は互いに独立であると仮定する。また  $G, H, F$  の確率変数ベクトルは既知であると仮定する。以上の条件で状態空間モデルを設定した。

以上のモデルから、設定されたシステム雑音および観測雑音と観測結果  $y_k$  の値から  $x_k$  を推定するものである。

カルマンフィルタは観測信号から状態を推定するため移動平均処理の様な現在値の遅れは発生しない。また明らかに観測値が推定結果と大きく異なっている場合にも、観測値の結果が大きく変動する事は無く誤差の推定範囲内として処理される。

カルマンフィルタは観測雑音の設定を適正に選択する事で目的の安定性を得る事ができる。この観測雑音の設定値の大きさでどれだけ深く過去の測定結果を参照し推定を行うかが決定される。

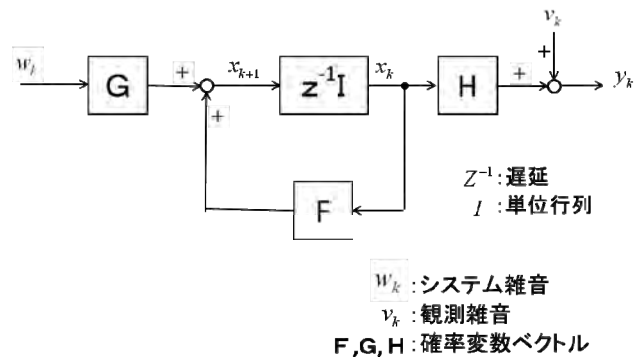


図-7 カルマンフィルタの状態空間モデル

### 6. 観測法面の変位計測結果

新東名高速道路設楽原パーキングエリア工事における法面切土施工で当初懸念された安定性において、現場法面動態観測の結果以下の変位を観測する事ができた。

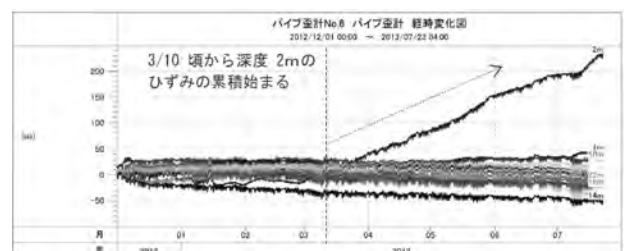


図-8 No.6 のパイプ歪計の計測値の変化

図-8に示すように3月上旬に切土掘削作業による影響と考えられる、No.6のパイプひずみ計の深度2m付近で微量な累積ひずみを検知。その後6月上旬には図-9に示すNo.7の挿入式傾斜計の測定結果から初期の明らかな動きの兆候として累積合成変位5mm程度を観測した。さらに7月上旬には図-10に示す地表面変位計測として観測点8-1でX方向に数mmの変位を観測した。同様の時期にNo.7の挿入式傾斜計では深度15～16.5m付近で明瞭なせん断変位が現れ最大変位速度は0.33mm/日を示した。7月中旬に5段目切土面に大きく変位が発生した。No.7の累積合成変位量は10.6mmを観測した。

同様に地表面変位計測の観測点8-1は最大12mm程度の変位量を観測した。

その後、押さえ盛土の施工を行い8月下旬以降は変位の収束を確認した。

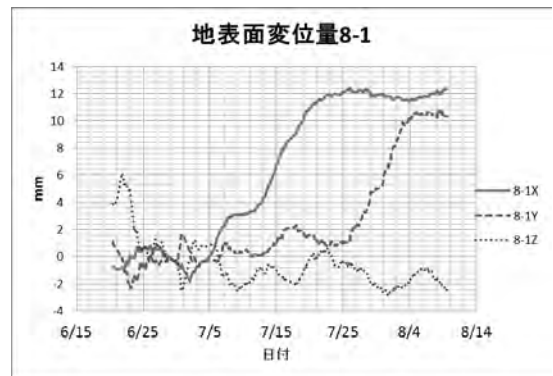


図-10 観測点 8-1 の地表面変位量

### 7. GPS測位データのカルマンフィルタ適応

法面計測機器配置図(図-1)にあるように、GPS無線センサ(ID-5)と地表面変位計測(8-1)および挿入式傾斜計No.7とがほぼ同一箇所であり、各観測値の比較対応が可能となった。写真-1に示す。

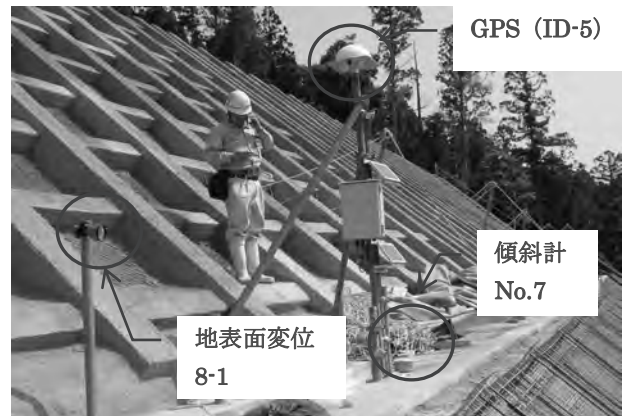


写真-4 法面の動態監視計測機器の配置状況

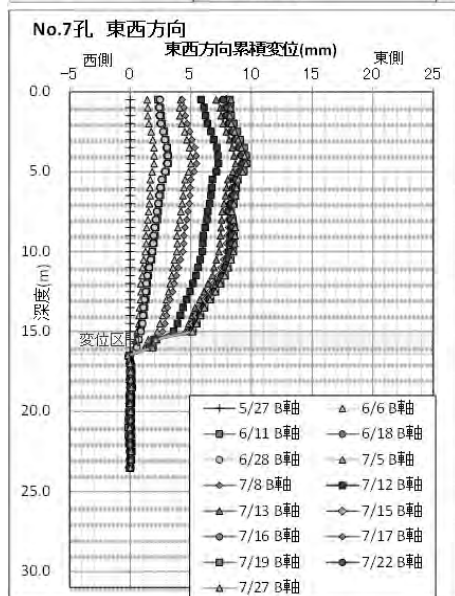
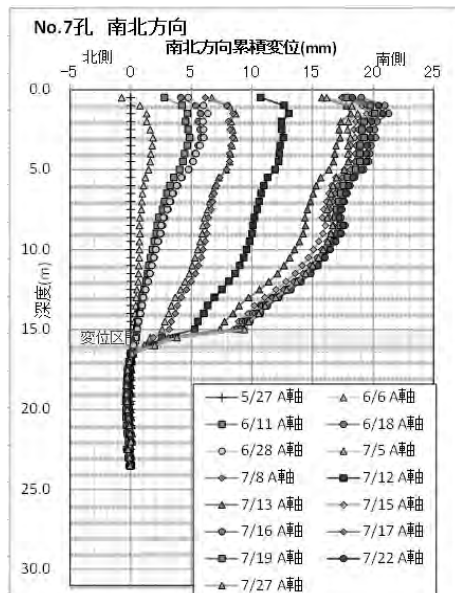


図-9 No.7 傾斜計の累積変位量

観測法面の変位計測結果からNo.7の傾斜計と8-1の地表面変位観測結果は同様な結果を得る事ができた。対してGPS無線センサでの観測結果は従来予想された様に測位観測時の衛星配列の違いや、衛星仰角の違いによる差異から大きなバラつきが観測された。図-11に観測点ID-5のGPS測位結果を示す。

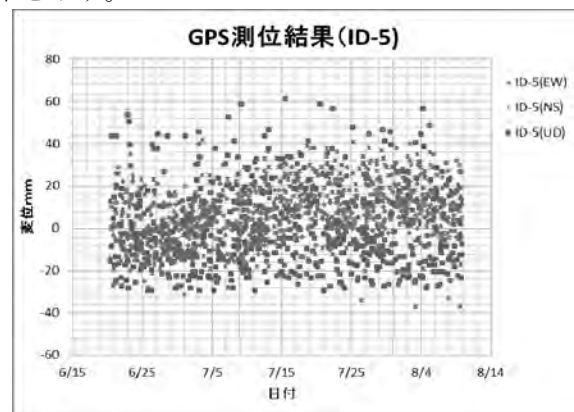


図-11 GPS 測位結果

このバラつきのある測位データをカルマンフィルタ処理を行い地表面変位と比較した。図-12にGPS測位値とフィルタ処理結果およびTSによる地表面変位監視結果の比較を示す。バラつきのあるGPS測位値にカルマンフィルタ処理を行う事で安定値が得られている事が確認できる。

GPS測位結果の三次元座標値は南北方向がY軸方向、東西方向がX軸方向となる。しかし現場のX軸方向は法面に平行にX軸を設定しているため、本結果のY軸とは20度程度傾きがあり測位データに20度の回転補正を行い比較した。

従来のGPS測位データでは観測値のバラつきが大きく全体的な傾向を把握する事は出来ても動態観測には不向きであった。しかし本手法を用いる事で、動態観測の利用が可能になった。また、通常TS等の観測では見通し範囲内で観測されるが、GPS測位では見通しできない広い範囲の観測が可能となる。

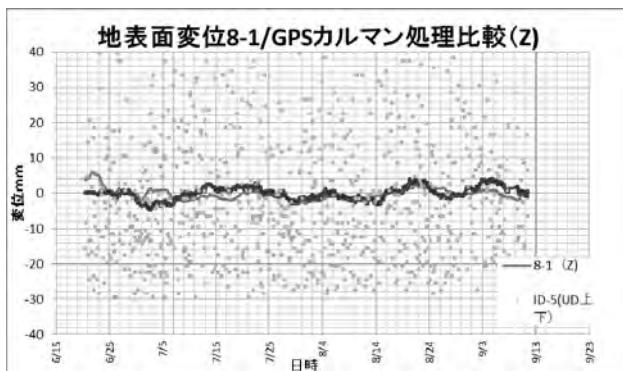
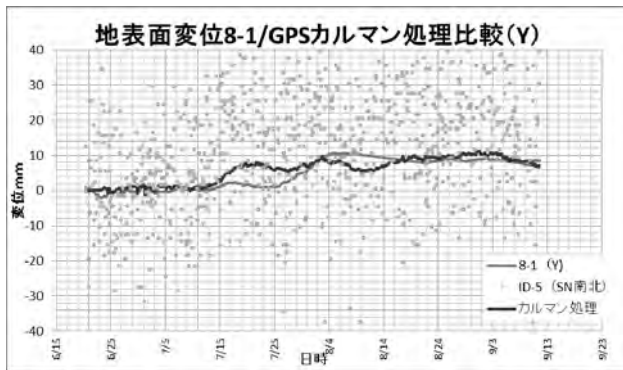
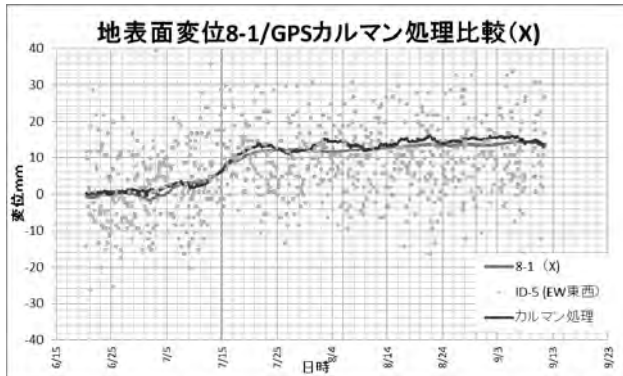


図-12 地表面変位・GPS・カルマン処理の比較結果

## 8. おわりに

本手法により、観測値を確率的に状態推定を行うカルマンフィルタを用いる事で観測値の安定性と信頼性を確保しより実用に向けた手法として検証する事ができた。

今後はこの手法を他の計測値へ応用する事で、より信頼性を向上できるものとする。

しかしこれらの平滑化処理の問題点として観測結果に急激な異常値が発生した場合を推定する事は次の重要な研究テーマであると考えている。

近年では大型プロジェクトの施工に伴い、観測データの大量化が進みそれらの扱いにも何らかの確率的なフィルタリング手法の必要性を強く感じている。

次世代の計測手法として、単に測定する時代から測定値に含まれる真値とノイズを含め、どのように理解し表現するか、この事が非常に重要であると考えます。

## 参考文献

- 1) 佐伯昌之, 澤田菜伊, 志波由紀夫, 小國健二: 準静的変位モニタリングのためのGPS無線センサネットワーク, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 67, No. 1, 25-38, 2011.
- 2) 新見孝之, 近藤高弘, 志波由紀夫: 太陽光発電による自律式ネットローティングの開発, 日本建設機械施工協会, 平成25年度, 建設施工と建設機械シンポジウム, pp82-86, 2013
- 3) 近藤高弘, 川手伸哉: 観測測位データのカルマンフィルタ処理による適応評価, 土木学会第70回年次技術講演会, IV-073, 2015