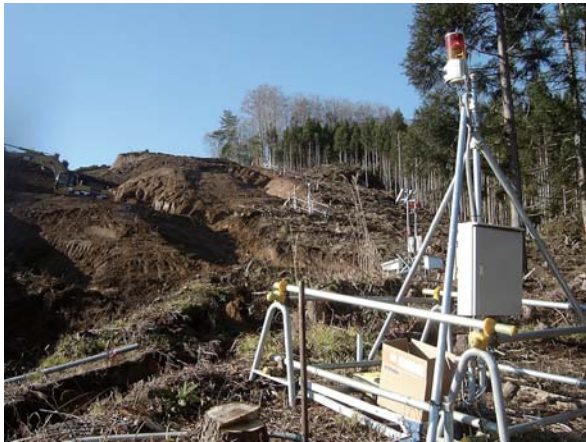


地盤・大型構造物連続監視システムの開発

Development of a Land and Structure Health Monitoring System



山田浩章	Hiroaki Yamada	㊴
林 稔	Minoru Hayashi	㊴
柿本英司	Hideshi Kakimoto	㊴
熊 敏	Min Xiong	㊴
齊田優一	Yuichi Saida	㊴
小畑弘毅	Hirofumi Obata	㊴
和田晃	Akira Wada	㊴
杉本淳	Jun Sugimoto	㊴
三宅寿英	Toshihide Miyake	㊵
山崎琢哉	Takuya Yamasaki	㊵
高松繁男	Shigeo Takamatsu	㊶

あ ら ま し

地盤・大型構造物連続観測システムは、高精度 GPS 測位技術により橋梁などの大型構造物の変位監視や地盤沈下や地すべりを 24 時間連続で監視するシステムである。

本システムは、監視対象に設置して GPS 衛星からの電波を受信する GPS 観測局、GPS 観測局の受信したデータを収集し解析する解析システム、解析結果の表示や警報通知を行うモニタリングシステムから構成されており、独自のリアルタイム解析技術とフィルタリング手法により、高精度かつ短時間での変位検知を目指している。

Abstract

The Land and Structure Health Monitoring System (LSHMS) offers round the clock monitoring of ground subsidence, landslide and displacement of large structures, such as a bridge, using high precision GPS technology.

This system is composed of a GPS observation stations which receives signals from GPS satellites, an analysis system which analyses the data received at the GPS observation station, and a monitoring system which displays the results and provides timely warnings. LSHMS offers high precision, and rapid displacement detection using real-time analysis and filtering technology.

1. 緒 言

我が国では地震・火山活動、台風・集中豪雨など自然災害の影響を受け、地盤変化、地すべり、橋梁や水門、ダムなど大型構造物の変形や崩落が発生している。災害発生が予想される場所の安全対策や、災害発生後の二次災害防止の観点から、地盤・大型構造物の高精度な変位傾向の把握および、変位検知時の通報システムが求められている。

GPSを利用した観測システムは、観測位置の変位を3次元絶対座標で24時間連続観測が可能であるため、地盤変化や大型構造物の変形・崩落の恐れのある場所におけるセンサーとして注目を集めている。

従来行われているGPSによる精密解析として、Static法（静止）がある。Static法はmm精度での解析が可能だが、解析結果の出力間隔が通常1時間、さらに過去の数時間の情報を利用して処理を行うため、座標（変位量）が確定するのに数時間から数日かかっていた。一方、リアルタイムに座標解析が可能なGPS計測としてRTK法（Real Time Kinematic）があり、数cm精度での解析できるため工事計測や移動体計測の分野で利用されているが、地盤・大型構造物の監視用途で利用するには、精度の面で問題があった。そこで、本システムでは、独自のリアルタイム解析エンジンとフィルタ技術により精度の問題を解決した。

リアルタイム解析技術を中心に、変位監視に特化したGPS観測局、Webによる解析結果の表示、警報通知を開発し、総合的な変位監視システムの構築を目指している。

本報では、本システムのシステム構成と代表的な適用事例について述べる。

㊴ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 開発センター

㊵ Hitz日立造船㈱ 製品開発本部 技術研究所

㊶ Hitz日立造船㈱ 精密機械本部 電子制御ビジネスユニット 電子システム部

2. システム構成

本システムは、現場の変位を観測する点（以下、変位観測点）に設置してGPS衛星からの電波をGPS受信機でデータの取得を行う「現場システム」、現場システムからGPSデータを収集、解析および変位検知を行う「解析システム」、解析結果の表示や警報通知を行う「モニタリングシステム」の3つのシステムで構成される。図1に本システムのシステムイメージを示す。

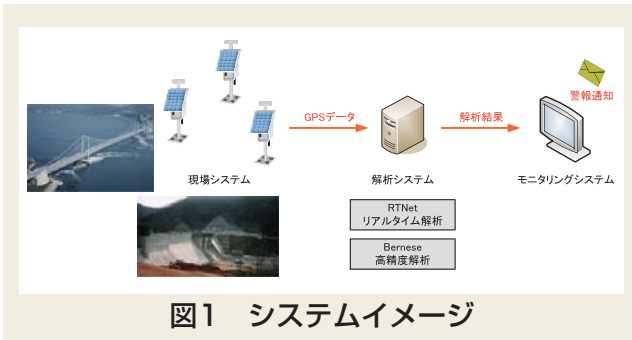


図1 システムイメージ

2.1 現場システム 現場システムは、変位観測点に設置してGPS衛星から送信される電波を受信する「GPS観測局」、現場近傍で座標変化の影響をほとんど受けず上空視界が確保できる位置に設置して解析の基準となるデータを観測する「GPS基準局」、GPS観測局とGPS基準局からのGPSデータを収集し解析システムに送信する「中継局」から構成される。現場システムのシステム構成例を図2に示す。

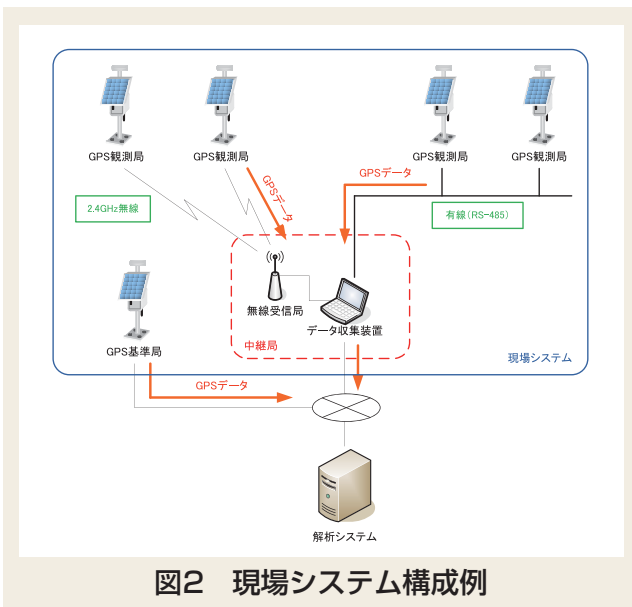


図2 現場システム構成例

本システムでは、変位観測に特化することにより従来のGPS受信機と比較して低価格かつ低消費電力なGPS観測局を開発した。

今回開発したGPS観測局は、現場の環境に合わせた様々な構成が可能となっている。

GPS衛星から電波を受信するGPSボードは、高精度で急激な変化も検知することが可能な2周波GPSボード（GPS衛星から発信される2つの周波数帯の電波を



図3 GPS観測局

両方受信する）と、低価格で消費電力が低い1周波GPSボード（1つの周波数帯の電波のみ受信）から選択することが出来る。

GPS観測局のデータを送信するための通信方式として、低消費電力な無線通信であるZigbeeと、マルチホップの可能な有線通信であるRS-485から選択することが出来る。表1にGPS観測局の組み合わせを示す。

表1 現場システムの組み合わせ

項目	内容	特徴
GPS ボード	1周波 GPS	・低価格 ・消費電力1W以下
	2周波 GPS	・マルチパスに強く、急激な変位に対応可能 ・消費電力2~3W
通信方式	無線 (Zigbee)	・通信距離：200~300m ・メッシュ接続が可能
	有線 (RS-485)	・通信距離：500m ・マルチホップが可能

1周波GPSボードとZigbeeを組み合わせることにより消費電力は1W以下になり、太陽光発電や風力発電などによる電力供給で動作可能でケーブルレスな自立型のGPS観測局を実現した。

2.2 解析システム 解析システムは、現場システムから送信されるGPS観測データを収集、保存、配信と変換を行う「データ収集」、リアルタイムに解析し結果を出力する「リアルタイム解析」、保存された長時間のGPS観測データを用いて高精度な後処理解析を行う「後処理解析」、解析結果から不要な誤差成分を除去して真のトレンド成分を抽出する「フィルタリング処理」から構成される。

解析システムの処理フローを図4に示す。

本システムでは、解析処理をリアルタイム解析と後処理解析から目的に合わせて選択することが出来る。解析処理の特徴を表2に示す。

表2 解析処理の特徴

	リアルタイム解析	後処理解析
解析エンジン	RTNet	Bernese
解析精度	水平：10mm 高さ：20mm	水平：5mm 高さ：10mm
出力間隔	1秒	1時間
適用範囲	地すべり監視など 突発変位観測	大規模構造物など 長周期な変位観測

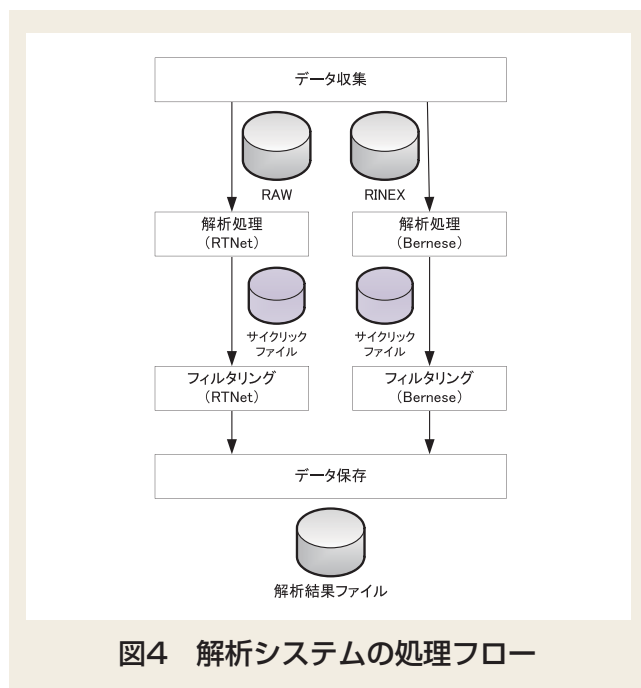


図4 解析システムの処理フロー

2.2.1 データ収集 データ収集は、現場システムからリアルタイムに送信されるGPS観測データを受信し、観測データの保存、RINEX形式（GPSデータ保存時の標準フォーマット）への変換、リアルタイム解析へのデータ配信を行う。

2.2.2 リアルタイム解析 (RTNet) リアルタイム解析では、当社と米国のGPS Solutions 社が共同開発したリアルタイム解析エンジン「RTNet (Real Time Network)」を使用する。

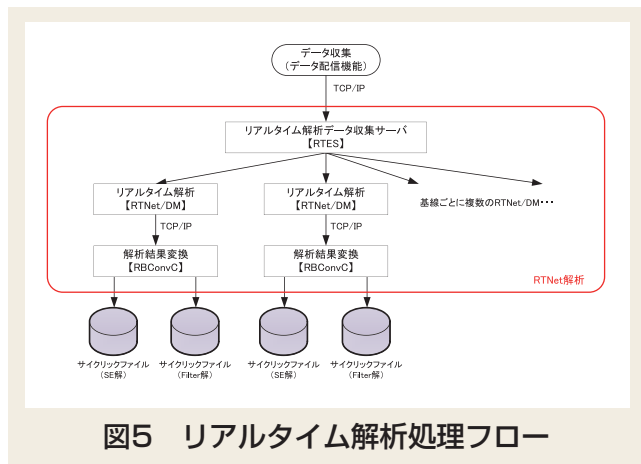


図5 リアルタイム解析処理フロー

RTNetには様々な解析モードが備えられているが、本システムでは構造物等の変位監視に適用したRTNet/DM (Deformation Monitoring: 変位監視) モードで解析を行う。RTNet解析の処理フローを図5に示す。

RTES (Real Time Epoch Server: リアルタイム解析データ収集サーバ) は、データ収集からTCP/IPプロトコルで送信されるリアルタイムGPSデータを受信、デコードし、RTNet/DMに渡す。

RTNet/DMでは、RTESから受信した基準局データおよび観測局データから基線毎にリアルタイム解析を

行い、解析結果をバイナリ形式でTCP/IPソケットから出力する。解析結果には、フィルタを適用しないSE (Single Epoch) 解と、フィルタを適用したFilter解がある。

解析結果変換 (RBConvC) では、バイナリ形式の解析結果をTCP/IPソケットから取得し、フィルタリング処理に渡すためにサイクリックファイルへの出力を行う。SE解、Filter解それぞれ別々のサイクリックファイルに結果の出力を行う。

リアルタイム解析では、毎秒のデータを利用し、1秒間に1つの解析結果（変位座標値）の出力を行う。

2.2.3 後処理解析 (Bernese) 後処理解析では、スイス ベルン大学で開発されたソフトウェアであるBerneseを使用する。Bernese解析の処理フローを図6に示す。

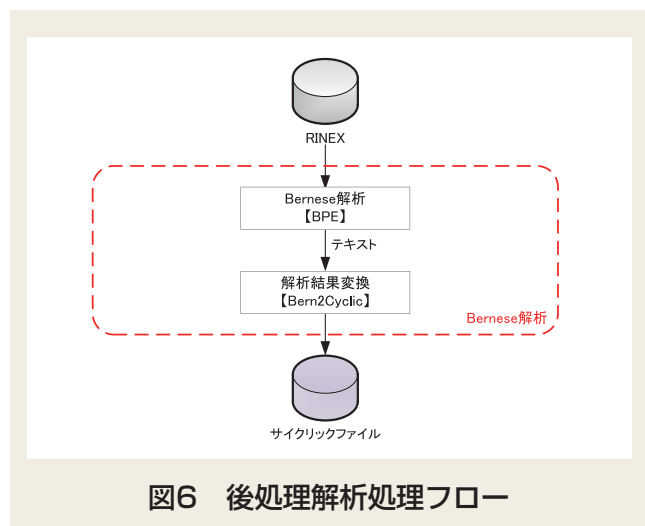


図6 後処理解析処理フロー

BPE (Bernese Processing Engine) では、データ収集のデータ変換機能で生成したRINEXファイルを取得し、基線解析を行う。解析結果をテキスト形式で出力し、解析結果変換 (Bern2Cyclic) でフィルタリング処理に渡すためにサイクリックファイルへの出力を行う。

Bernese解析では、過去24時間分のデータを利用し、1時間に1つの解析結果（変位座標値）の出力を行う。

2.2.4 フィルタリング GPS観測データによる座標解析の精度は、解析処理に利用した衛星の個数と位置に依存する。また、衛星電波の伝搬経路における大気の状態、変位観測点周囲の樹木や壁面などの影響による恒常的な電波遮断や、構造物などによる電波多重反射誤差が含まれるため、解析結果そのままではmm単位での変位検知に適用できない。そこで、不要な誤差成分を除去して真のトレンド成分のみを抽出するフィルタ手法の開発を行なった。本システムでは、大気の影響や周囲の環境に依存して恒常的に繰り返される誤差を除去する「恒星日フィルタ」、電離層や対流圏など様々な誤差要因のために発生する解析結果のばらつきを除去する「カルマンフィルタ」を適用する。フィルタリングの処理フローを図7に示す。

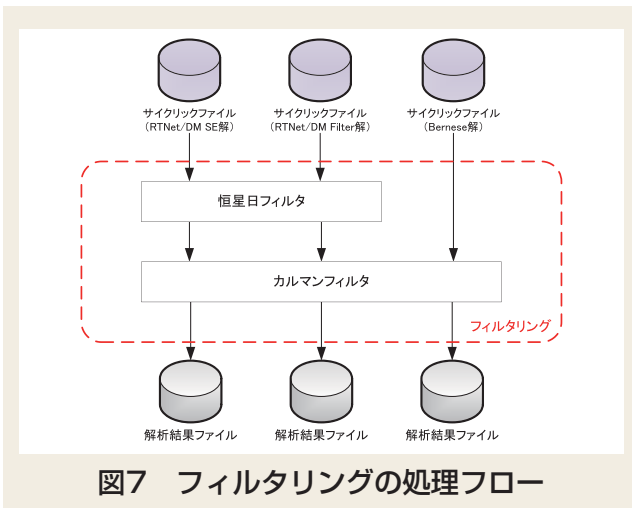


図7 フィルタリングの処理フロー

恒星日フィルタとは、GPS衛星が軌道半径約26,000 km、軌道傾斜角55°の6つの軌道面にそれぞれ4基ずつ配置され、地球を約11時間58分（1/2恒星日）で周回することを利用して、本来は変動しない位置における観測局の観測誤差をモデル化して、周囲の環境によって生じる誤差を低減させるものである。恒星日フィルタは、RTNet解析結果に対してのみ適用する。恒星日フィルタを適用した結果例を図8に示す。上3段はRTNet解析結果であり、青は東西方向（東+、西-）、赤は南北方向（北+、南-）、緑は高さ方向のそれぞれの変位量を表している。下3段が恒星日フィルタを適用した結果である。

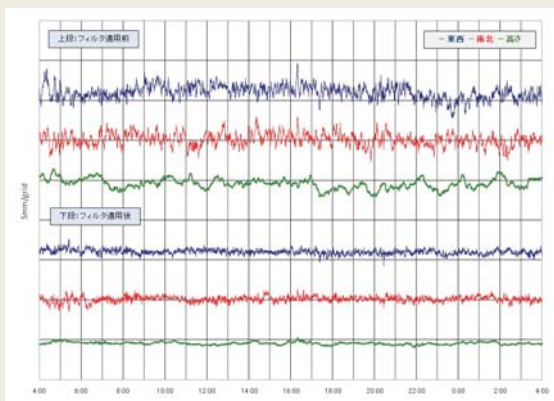


図8 恒星日フィルタ適用例

カルマンフィルタは、電離層や対流圏など様々な誤差要因のために発生する解析結果のばらつきを高精度で真値を推定するものである。

カルマンフィルタを適用した結果例を図9に示す。青は解析結果の値、赤はカルマンフィルタ結果の値を表している。

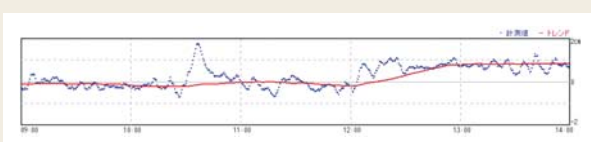


図9 カルマンフィルタ適用例

2.3 モニタリングシステム モニタリングシステムは、解析結果を汎用のWebブラウザを利用してグラフィカルに表示する「結果表示Webシステム」と、変位量が基準値を超えた場合にメールや警報装置を利用して通知する「警報通知システム」から構成される。

2.3.1 結果表示Webシステム 結果表示Webシステムは、解析結果を汎用のWebブラウザを利用して解析結果の時系列グラフ表示画面および、変位ベクトル図画面が閲覧できる。

図10にリアルタイムデータ表示画面（グラフ部分のみ抜粋）を示す。リアルタイム解析結果（青：解析結果、赤：フィルタ処理結果）から東西方向、南北方向、高さ（楕円体高）方向の変位をグラフ表示したものである。

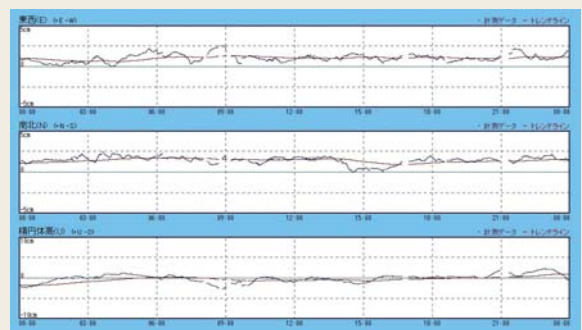


図10 リアルタイムデータ表示画面

変位ベクトル図は、リアルタイム解析（RTNet）および高精度解析（Bernese）の結果から指定日の平均値の差（比較日-基準日）をベクトル表示したものである。図11に変位ベクトル図例を示す。



図11 変位ベクトル図

ベクトルの表示方向は、水平成分（東西方向、南北方向の合成成分）および、垂直成分（高さ方向）とする。背景地図には、国土交通省国土地理院が提供する電子国土Webシステムを利用することが可能である。

2.3.2 警報通知システム 警報通知システムは、各GPS観測点の監視を行い、基準値を超える変位を検知した場合に警報通知を行う「変位監視に伴う警報通知機能」とサーバの状態を監視し、異常が発生

した場合に警報通知を行う「サーバ監視に伴う警報通知機能」から構成される。

変位監視に伴う警報通知機能は、リアルタイム解析の結果を常時比較し、基準値からの距離（変位量）が許容量を超えた場合に異常と判定する。

サーバ監視に伴う警報通知機能は、解析システムやモニタリングシステムで利用するサーバの状態や、サーバ内で稼働する各プロセスを監視する。異常を検知した場合、登録したメールアドレスへのメール発信や、現場に設置した回転灯により通知を行う。

3. 適用事例

本システムの有効性を実証するため、地すべり災害復旧工事現場にて連続試験運用を行った。施工場所は、平成20年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震により発生した大規模地すべりに対する崩落崖の頭部排土工事現場である。排土工事に際して周辺の地山が緩み、中・小規模な崩落を起こすことや、大規模崩壊崖の頭部において新たな大規模崩落が発生する可能性が懸念された。また、従来の伸縮計などの設置は排土工事の障害になることや、積雪などの影響が懸念されるため、これらの影響を受けにくいGPSを利用した本システムでの計測を実施した。適用対象とした工事の概要を表3に示す。また、施工場所・崩落崖の全景を図12に、計測設備の配置を図13に示す。

GPS基準局を現場事務所近傍に設置し、GPS観測局は施工範囲を取り囲む形で山側5局、崖側5局の計10局設置した。工事現場の入り口付近に中継局と警報通知用の回転灯を設置し、中継局とGPS観測局は有線で接続した。システム構成図を図14に、GPS観測局の外観図を図15に示す。

表3 適用工事概要

項目	内容
工事名	荒砥沢治山工事
工期	平成21年7月30日～平成22年6月30日
工事概要	岩手・宮城内陸地震により発生した地すべり災害復旧工事－滑落崖の頭部排土工事



図12 施工場所崩落崖の全景

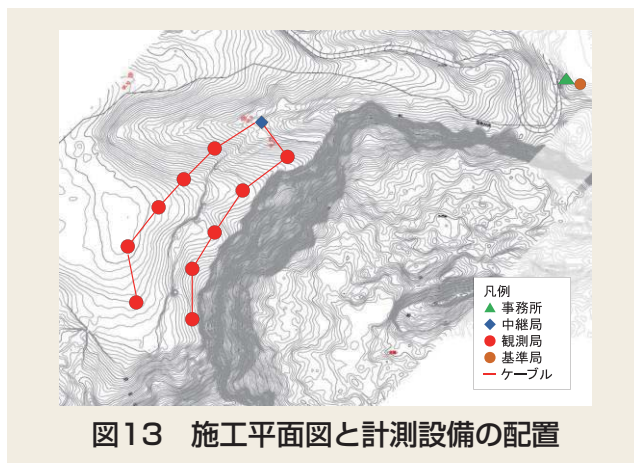


図13 施工平面図と計測設備の配置

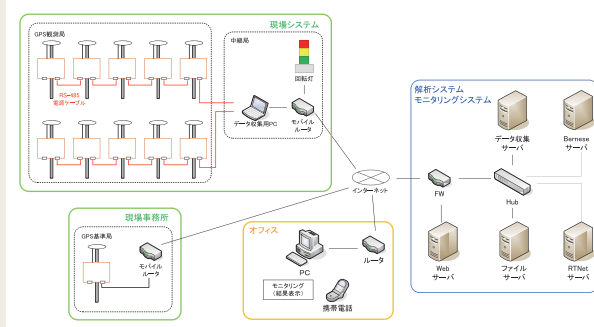


図14 システム構成図



図15 左:GPS観測局 右:中継局

GPS観測局が受信したGPS観測データを中継局で収集し、インターネット経由で東京のデータセンターに送信し、データセンターで解析を行なった。

解析結果は、現場事務所に設置したPCのWebブラウザで時系列グラフ表示画面と変位ベクトル図画面を閲覧することで監視を行った。時系列グラフ表示画面を図16に、変位ベクトル図画面を図17に示す。

異常発生時には、中継局に設置した回転灯の点灯およびサイレンによる警報通知を行い、現場作業者の携帯電話へ警報メールを通知した。

設置当初は電源、通信などでトラブルが発生したが、対策した結果、安定した運用が行えた。また、工期中に崩落は発生しなかったが、積雪によるGPS観測局の変位、除雪による復帰を短時間に検知したことなどから、ユーザからは高い評価を得ることができた。

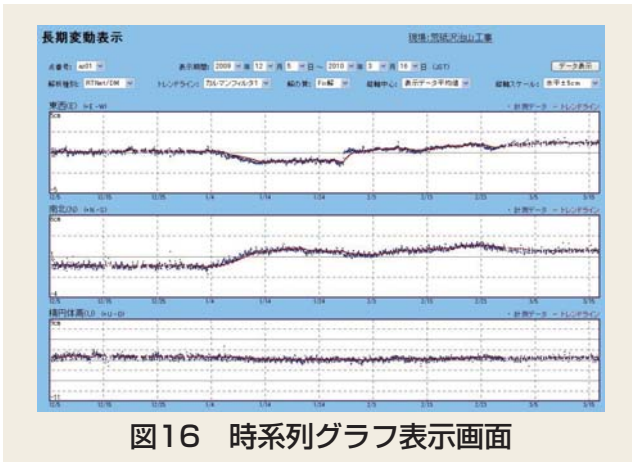


図16 時系列グラフ表示画面

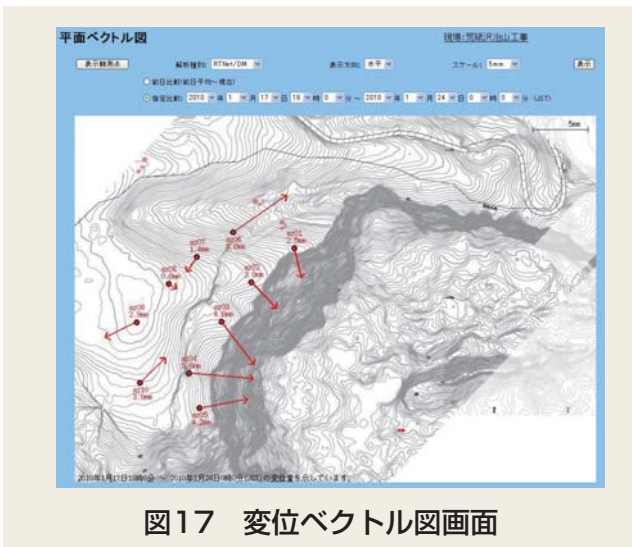


図17 変位ベクトル図画面

4. 結 言

本システムの開発により、従来の後処理による精密測位分野に加えて、リアルタイム精密測位の分野への展開が可能となる。

橋梁などの大型構造物の変位を監視する「維持管理」や地盤沈下、地すべりを監視する「防災」などへの新製品投入、新市場開拓を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 熊敏ほか：地域電離層モデルを適用した高精度1周波GPS測位方式の開発，日本地球惑星科学連合大会2010年大会予稿集 (S,B,G,M) (CD-ROM)，2010, SGD001-009
- (2) 神崎政之、北原成郎：災害応急・復旧工事におけるGPS動態計測システム構築に関する研究，第12回建設ロボットシンポジウム論文集，2010, 81-88
- (3) 北原成郎、神崎政之：防災：災害応急・復旧工事におけるGPS動態計測システム，土木技術66巻第4号，2011, 35-40

【文責者連絡先】

Hitachi日立造船(株) 機械・インフラ本部
開発センター ICT高度化グループ
山田 浩章
Tel : 06-6569-0066 Fax : 06-6569-0115
e-mail : yamada_h@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Product Development Division
Machinery & Infrastructure Headquarters
Hiroaki Yamada
Tel : +81-6-6569-0066 Fax : +81-6-6569-0115
e-mail : yamada_h@hitachizosen.co.jp



山田 浩章



林 稔



柿本 英司



熊 敏



齊田 優一



小畑 弘毅



和田 晃



杉本 淳



三宅 寿英



山崎 琢哉



高松 繁男