

GPS による地盤変位モニタリングシステムの開発

近藤仁志¹・M. Elizabeth Cannon²・清水則一³・中川浩二⁴

¹正会員 古野電気(株) システム機器事業部(〒662 兵庫県西宮市芦原町9-52)

²Ph.D., Assoc. Prof., Dept. of Geomatics Eng., The University of Calgary (Calgary, Alberta, Canada)

³正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部 社会建設工学科(〒755 山口県宇部市常盤台2557)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部 社会建設工学科

建設工事ともなう長大斜面、露天掘りにおける長大残壁、また、地すべり地帯などのような大規模な領域において生じる地盤変位を、経済的にかつ精度よく測定する計測システムの開発が必要である。

本研究は、人工衛星を用いる測量システムであるGPS (Global Positioning System) を利用して、地表面の複数の計測点の変位を、長期的にかつ自動的に観測できる地盤変位モニタリングシステムを開発することを目的としている。これは、従来のキネマティック方式による観測方法に基づいているが、ほぼリアルタイムに複数の計測点の変位を同時に連続して得られる点に特徴がある。本論文は、開発した計測システムの主要な点と、システムの性能を検証するために行った野外実験結果について述べるものである。

Key Words : *Global Positioning System (GPS), realtime monitoring system, ground displacement measurements*

1. 序論

地盤構造物の安全な建設や地すべりなどの地盤災害の防止のために、地盤の変位を計測することは重要である。そのため、これまでに地盤の変位計測を目的とした多くの機器が開発され、長期にわたり自動的にかつ精度よく計測されるようになってきた。それらの機器は主に数10 m程度の領域の変位を計測することを目的としたものが多いようである。しかし、長大斜面や露天掘りの長大残壁、あるいは地すべり地帯などのような、数10 m～数 km規模の広範囲な領域の地盤変位の計測には、従来の機器だけでは十分でないことも多い。したがって、大規模な領域の変位を経済的に、かつ精度よく計測する機器、あるいは計測システムの開発が必要と考えられる。

そのために光波測距儀を利用した地盤変位の計測システムが開発され有用な成果をあげている^{1)～3)}。しかし、光波測距儀は天候の影響を受けやすく、精度を確保するためには測量は熟練した人手による必要があり、数カ月～数年オーダの長期計測を行う場合には、計測システムとしてさらに改善する余地があるように思われる。

一方、GPS (Global Positioning System) を利用して、長大斜面や大規模領域の地盤変位の計測が行われ、実用上、光波測距儀と同等な精度で変位計測ができることが明らかにされている^{4)～9)}。また、土木工学的

な目的だけでなく火山活動や地球物理的な視点からも地殻の動きを測定することに利用されている^{10)～14)}。GPSは、すでに知られているように、人工衛星からの電波を受信して計測点の座標を求める測量システムである^{15),16)}。特に地盤変位計測などに利用されるGPS測量の相対測位法は、長距離基線に対して高精度の三次元測量ができること、天候の影響を受けにくいこと、計測点間の視通を要しないこと、自動観測が可能であるなど、従来の測量法を凌ぐ特徴を持っている。

このような特徴から、GPSを大規模領域における長期にわたる継続的な変位モニタリングに適用することが考えられる。しかし、GPS測量における従来の相対測位法は、測量結果を得るために、オフライン処理を行う必要があり、時間と手間を要する問題がある。また、近年開発されたリアルタイム処理による方法¹⁷⁾では、計測点座標を直ちに得ることができるが、その方法は一つの受信点における座標を得ることを目的にしており、地盤変位計測のように同時刻に複数地点の変位を連続して観測し、その時間的な変化を監視する必要のある計測に直接適用することは容易ではない。

そこで、本研究は地盤上の複数の計測点の変位を、長期的にかつ自動的に計測できるGPSを用いた地盤変位モニタリングシステムを開発することを目的とする。本論文は、開発したシステムと、その性能を検証するために行った野外実験結果について述べるものである。

2. GPSの地盤変位計測への応用と問題点

GPSは基本的には計測点の三次元座標を与えるものであるが、計測点座標を連続して観測しその変化を捉えることによって計測点の変位を得ることができる。また、その際、広範囲にわたり、十分多くの計測点の変位を同時に観測すると、対象とする地盤全体がどのような挙動を示しているかを把握することも可能となる。このような観点から、前述のようにすでに多くのGPSによる地盤変位計測が行われている。

GPSにおける測量方法には単独測位法と相対測位法がある。前者は航法援助を目的としたもので、リアルタイムに測量結果を得られ、精度は一般に数10mといわれている。GPSの搬送波を利用する相対測位法は高精度測量を目的としたもので、一つのGPS受信機を基準点として他のGPS受信機の座標を相対的に求める方法である。精度は計測点間の距離に依存するが一般に数mm～数cmである^{15),16)}。これまでのGPSによる地盤変位計測ではこの方法が利用されており、本研究においてもこれを用いる。

相対測位法には、スタティック方式とキネマティック方式がある。スタティック方式とは、複数の観測点に1台ずつの受信機を置き、それぞれのアンテナを固定して数10分～数時間にわたり人工衛星から電波を受信し、座標を求める方法であり、キネマティック方式とは、受信機のアンテナを複数の観測点に順次移動させて、それぞれの座標を求める方法である。両者ともに共通している点は、受信したGPS衛星からのデータ(搬送波位相の積算値および人工衛星位置などの座標計算のために必要な情報)を一旦受信機のメモリに記憶させ、観測が終了した後、そのデータをコンピュータにダウンロードし、座標を求めるための計算を行うことである。つまり、両方式とも電波の受信と座標計算を切り放して処理する、いわゆるオフライン処理を行う点が共通している。

一方、相対測位法を利用する場合においても、リアルタイムに計測点の座標を得る要求が高くなっている。最近、キネマティック方式に基づくリアルタイム測量法が開発され¹⁷⁾、土木工学の分野においてもその応用・開発が見られる^{18),19)}。しかし、先にも述べたように、既存のリアルタイムGPS測量は、一つの移動計測点の座標を求めるものであり、地盤変位計測のように複数の固定された計測点の座標を同時に観測することに、直接適用することは困難である。すなわち、地盤変位計測に対しては、それに適した新しい方式のGPS計測システムの開発が必要である。

本研究は、地盤変位計測を直接の目的とするGPSによる新しい変位モニタリングシステムの基本技術を、

受信機および通信機器のハード面、および、計測点座標を求めるソフト面から開発し、その基本的性能を確認するものである。

3. GPSによる地盤変位モニタリングシステム

本章では、本研究において開発するシステムに課す性能、システムの構成、構成要素の内容、および動作概要について述べる。

(1) システムの性能

開発するシステムの主な性能として以下の事項を設定した。

- (a) 計測点座標は自動観測によってリアルタイムに得られること。
- (b) 計測結果は即座に表示され、計測された地盤変位は監視する位置(管理局)で集中管理できること。
- (c) 計測精度は従来のGPS測量の標準精度を確保すること。
- (d) 広範囲にわたり地盤表面に設置した複数の計測点を同時に計測できること。

それらの内容について以下に示す。

a) 自動リアルタイム計測

本研究では長期的に広範囲の地盤の変位を計測することを考えており、そのためにシステムは自動計測機能を備えていなければならない。すなわち、人工衛星からの電波受信、計測点から管理局へのデータ転送、管理局における計測点座標の計算、計測結果の表示、に対して一連の流れを自動化できるようにする。また、各計測点の変位(座標)は、リアルタイムに得られることが理想的である。本システムでは、計測点の変位は、電波受信、データ転送、座標計算、の流れの結果得られるが、これに要する時間が1分以内になることを目標とした。

b) 計測結果の表示と集中管理

得られた変位は直ちに表示され、利用者へ遅れることなく伝達されることが重要である。また、すべての計測結果は管理局において収集・管理され、必要なときに必要な計測点の変位が直に取り出せることが望ましい。具体的には3.(2)で述べるようなシステム構成と3.(3)に示すような計測結果の表示部を作成した。

c) 計測精度

搬送波を用いる相対測位では、通常得られると期待される計測精度は、基線長に対して

$$0.5 \sim 1 \text{ cm} + 0.5 \sim 2 \text{ ppm} \times \text{基線長}$$

であり、基線長が1km程度の場合、数mm程度が期待できる。ベクトルの3次元成分は、一般にこれより悪くなり、その標準偏差は水平方向に対して1cm、垂直方向に対して2cm程度である²⁰⁾。本システムにおいてもこの程度の計測精度を目標とした。

d) 計測範囲と計測点数

GPSの計測限界(基線長の限界)は、GPSの電波の内L1帯(1.6GHz)のみ用いる1周波測位では10km程度まで、L1およびL2帯(1.2GHz)を両方用いる2周波測位では数100~1,000km程度までと考えられている。本研究では、システム開発の第1ステップとして、基準計測点と変位計測点の距離を1km程度と設定した。これは、GPSの計測限界から比べると短いように思われるが、本研究では受信システムの製作コストおよび座標計算のアルゴリズムの簡素化の観点から1周波測位を採用すること、および、ケーブルによる通信ネットワークを構築するために、この程度の計測範囲を設定した。

また、一つのシステムで同時に計測できる計測点は10点までとした。この点数は、先に述べた計測周期(目標は1分以内)との関連で、あまり多く取ると全計測点の座標を得るために時間を要することになる。したがって、本システムでは10点まで接続可能とした。なお、さらに高速な計算機を用いれば、計測点数を追加することは容易である。

(2) システムの構成

リアルタイムに計測点座標を得るためには、従来のような受信データのオフライン処理にかわって、GPS受信機の出力するデータをオンライン処理する必要がある。そのためには、受信機の間になんらかの通信ネットワークを構築しなければならない。システムの構築に際して、通信ネットワークをどのように構築するかが重要である。

通信ネットワークには、無線を利用することが最も適しているように考えられるが、実際現場で適用する際には、

- i) 各計測点から管理局へデータを送信する際、到達距離が十分な無線通信電波を利用するためには、郵政省電気通信監理局の許可が必要で各現場において無線免許を取ることは難しいと思われること、
- ii) 無線免許の不要な無線通信(特定小電力無線局)^{21),22)}では、到達距離の不足が懸念されること、
- iii) 長期間(数ヶ月以上)にわたり、各GPS受信

機が連続して動作するための電源確保が必要であること、

などの問題がある。そこで、本研究では有線によって通信ネットワークを構築することとする。そして、各GPS受信機の電源を通信ネットワークを通して供給することで、長期観測を容易なものとする。もちろん、本研究で開発した技術をもとに、太陽電池等の電源や無線通信のネットワークを組み合わせたシステムを構築することは可能と思われる。

図-1に、前節で設定した性能を実現するための本システムの構成を示す。すなわち、まず、地盤変位を監視する位置(管理局)に基線解析および計測結果を表示する計算機を、また、変位が生じないと判断される不動点を基準計測点(以下基準点と呼ぶ)としてGPS受信機を設置する。そして、それらと変位を計測する地域に設置された複数のGPS受信機(計測点)とを、中継機・通信I/Fからなる通信ネットワークを介して接続するものである。なお、GPS受信機自身にも他のGPS受信機の出力データを中継する機能を持たせることによって、中継機へ接続される1本のラインに2台のGPS受信機を接続させ計測点を設置できる範囲を拡大している。

電源は通常家庭で利用する商用電源を中継機ならびに通信I/Fへ供給し、各GPS受信機へは中継機あるいは通信I/Fからケーブルを通して供給する。ケーブルの長さは最大で、中継機とGPS受信機間およびGPS受信機とGPS受信機間とも200m、通信I/Fと中継機間が600mと設定している。したがって、計測点の設置範囲は、中継機を中心に半径400mの円内、基準点と計測点の間の距離は最も遠いもので1,200mが可能となる。接続に用いるケーブルの概要を表-1に示す。

各計測点ならびに基準点に設置されたGPS受信機から出力されたデータは、通信ネットワークを経由してリアルタイムに管理局にある基線解析部へ集められ、直ちに各計測点の座標が計算され、過去の計測結果とともに表示される。これらの計測は、任意に設定した周期(例えば、10分間隔、4時間間隔などのように)で繰り返し行われ、連続した地盤の変位の監視が可能となる。

(3) システムのハードウェア

ここでは、前節に示したシステムのハードウェアについて述べる。

a) アンテナおよびGPS受信機

GPS測量で求められる計測点の座標はアンテナの中心位置に対するものである。この場合の中心とは、アンテナの電気的な位相中心であり、精度の良い計測をするためにはこの位相中心が安定していることが求められ

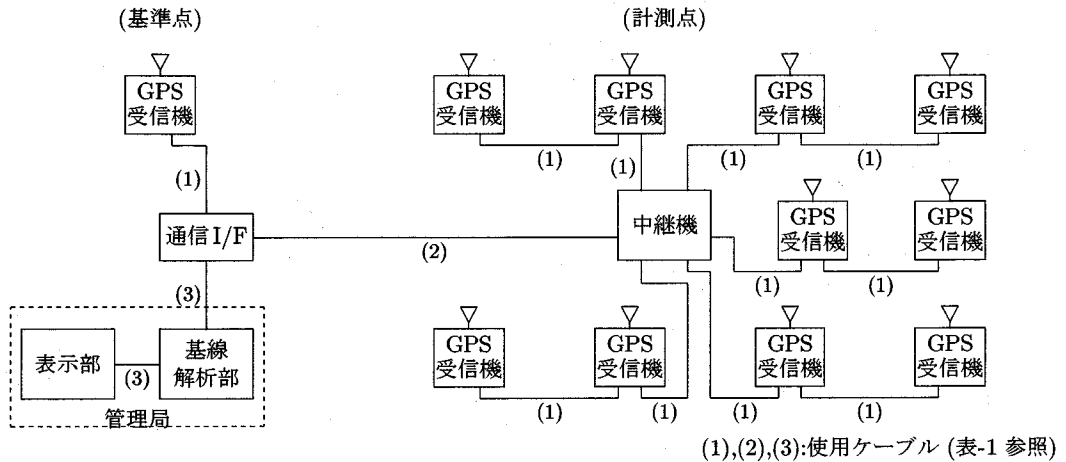


図-1 システム構成

表-1 使用ケーブル

番号 (図-1 参照)	使用箇所	説明
(1)	GPS 受信機-GPS 受信機間 GPS 受信機-中継機間 GPS 受信機-通信 I/F 間	多芯シールド線 最大 200 m
(2)	中継機-通信 I/F 間	同軸ケーブル 最大 600 m
(3)	表示部-基線解析部 基線解析部-通信 I/F 間	RS-232C 通信距離 数 m

る。そこで、本研究では位相中心の安定性が 2.1 mm rms (root mean square; 二乗平均) となるような十分に安定性の高いアンテナを製作した。

一方、GPS 受信機には、L1 帯の信号を受信する 1 周波型の 8 チャンネル受信機を開発した。この GPS 受信機は、受信した各衛星の搬送波位相データ、ドップラー周波数、サンプリング時刻などの値、および、軌道情報 (航法メッセージ) を出力するものである。

写真-1 (a) にアンテナと受信機を示す (表-2, 3 参照)。アンテナは受信機から取り外すこともでき、直接計測点に設置することも可能である。なお、各計測点と基準点には全く同一の GPS 受信機とアンテナを使用する。

b) 中継機および通信 I/F

中継機は、各計測点に設置された GPS 受信機の出力するデータの中継し、通信 I/F へ転送する役割を持つだけでなく、各計測点の GPS 受信機へ電力を供給する。中継機には、GPS 受信機を直列に 2 台接続したケーブルを 5 本、合計 10 台の GPS 受信機を接続できるようにした。なお、中継機へは通常の AC 100 V の商用電源を供給すればよい。

表-2 アンテナの仕様

項目	仕様
形式	マイクロストリップアンテナ
中心周波数	1,575.42 MHz (L1)
インピーダンス	50 Ω
位相安定性	2.1 mm (rms)
外形寸法	φ186 × H 80 (mm)
質量	0.5 kg

通信 I/F は、中継機から送られてきたデータと基準点に設置された GPS 受信機の出力を基線解析部へ送り、また、基準点の GPS 受信機へ電力を供給するものである。通信 I/F へは、中継機と同様に商用電源を供給する。

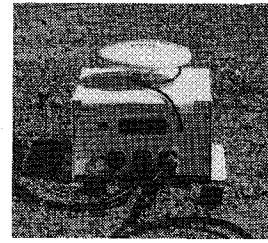
写真-1 (b) に中継機と通信 I/F を示す。

c) 基線解析部および表示部

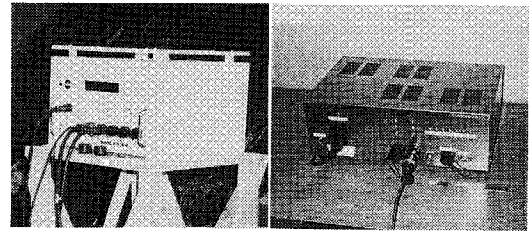
基線解析部は、各計測点の座標を求め必要に応じて結果を表示部へ送るものである。本システムでは基線解析部には CPU に i486 を採用したパーソナルコンピュータを使用し、基線ベクトルを求める計算を高速に行なうことができるようにした。

表-3 受信機の仕様

項目	仕様
受信周波数	1,575.42 MHz (L1)
受信チャンネル数	8 ch
出力データ	C/A コード擬似距離 搬送波位相データ ドップラー周波数 航法メッセージ、他
データ出力レート	2秒毎に1回
外形寸法	W 320 × D 270 × H 162 (mm)
質量	4.3 kg



(a) アンテナと受信機



(b) 中継機(左)と通信 I/F(右)

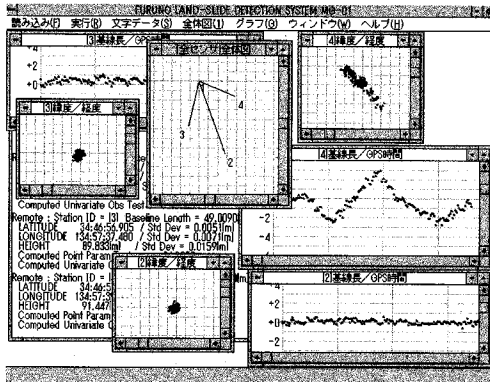
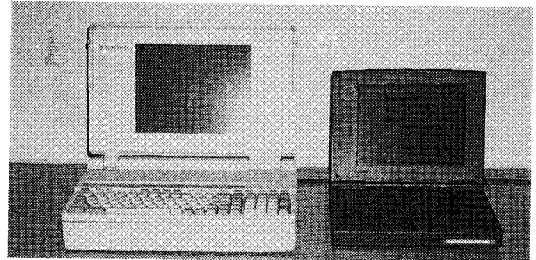


図-2 表示例



(c) 基線解析部(左)と表示部(右)

写真-1 システム構成要素

表示部にはパーソナルコンピュータ上のウインドウシステムを利用し、基準点と各計測点の位置関係、各計測点間の基線ベクトルの長さの時間的な変化、および各計測点の三次元座標の時間的な変化(変位)等の各種の情報を、数値あるいはグラフによって、任意に切り替えて表示できるようにした。

写真-1 (c)に基線解析部および表示部、また、図-2に表示画面の一例を示す。

なお、本システムでは、基線解析部と表示部それぞれに1台ずつの計算機を使用した。さらに高性能な計算機を用いれば、基線解析部と表示部をあわせて1台の計算機で実現することも可能である。

(4) 基線解析とサイクルスリップの処理方法

一般に、GPSの搬送波を用いた相対測位では、人工衛星と受信アンテナ間の距離を受信機で積算された搬送波位相を用いて換算し座標計算を行う^{15), 16), 23)}。実際には、同一の人工衛星から送られる電波について、2台の受信機で同時に搬送波位相を積算し、その差(受信機間一重位相差)をとる。また、他の人工衛星に対しても同様の位相差をとり、2つの人工衛星に対する受信機間一重位相差の差(二重位相差と呼ぶ)を求める。

二重位相差の数学モデルは次式で表され、後述する整数値バイアスがすでに確定しているときには、原理的には4個以上の衛星を受信すれば座標を求めることができる^{15), 16), 23)}。

$$\Delta\nabla\Phi = \Delta\nabla\rho + \lambda\Delta\nabla N + \text{誤差成分} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\nabla$ は二重位相差演算子、 Φ は搬送波位相積算値(観測値)、 ρ は受信機と衛星間の距離、 λ は搬送波位相の波長(約19cm)、 $\Delta\nabla N$ は搬送波位相の整数値バイアスである。

しかし、受信機は小数点以下の位相のみを測定するため、波数の整数部分は不確定となる。その不確定部分を整数値バイアス(integer ambiguity)と呼んでおり、その整数値バイアスをどのようにして求めるかによって、測位の方式が異なる。

本研究における測位方式はキネマティック方式に準じており、整数値バイアスは次節で述べる短時間のスタティック方式によって求める。キネマティック計測において問題なのは、サイクルスリップ(衛星からの電波の受信が中断されること)によって整数値バイアスが不

明となった場合の検出方法とその補正方法である。本研究では、地盤の変位という比較の変位速度の遅いものを計測することに着目して、サイクルスリップの検出および補正方法に以下に述べるような独自の工夫を図った。

まず、観測開始初期に整数値バイアスを決める。それを観測期間中継続して用い、各人工衛星と受信機に対して得られる式(1)を連立し観測方程式群をつくり、最小二乗法によって観測点間の相対座標を求める。

次に、前観測時刻 $t-1$ において知られている整数値バイアス $\Delta\nabla N_{t-1}$ と計算された計測点の座標、および、現観測時刻 t において得られた観測値 $\Delta\nabla\Phi_t$ を用いてサイクルスリップを検出するための指標 w_t を次のように定義する。

$$w_t = \Delta\nabla\Phi_t - \Delta\nabla\rho_{t/t-1} - \lambda\Delta\nabla N_{t-1} \quad (2)$$

$\Delta\nabla\rho_{t/t-1}$: 現観測時刻 t における衛星と受信機の距離の二重位相差(前観測時刻 $t-1$ において求めた計測点の座標を用いて計算した値)

λ : L1波の波長(約 19cm)

この w_t は、i) 前回の観測時刻 $t-1$ から変位が生じる場合、ii) 測定誤差が生じる場合、iii) サイクルスリップが生じる場合、のいずれか、あるいは、その組み合わせに対して0ではない値をとる。本システムの計測周期である1分間に計測点が10数cmの変位を示すことはないかと仮定すると、i), ii) の要因を合わせても、 w_t は1波長に比べて十分に小さい値となる。一方、iii) のサイクルスリップが発生した場合は1波長以上の値となるため、この指標を監視することによりサイクルスリップの検出が可能である。

すなわち、 w_t が波長の85%(約 16cm)を越えた場合にサイクルスリップが発生したと判断し、その場合、指標 w_t の値が最も小さくなるように整数値バイアス $\Delta\nabla N_t$ の値を増減させ、サイクルスリップを自動的に補正する。

以降は、新しく求めた整数値バイアス $\Delta\nabla N_t$ を用いて式(1)によって座標を計算する。この方式によって、樹木など周囲の状況によりサイクルスリップが多発して従来キネマティック測位を適用するのが困難な環境でも連続した観測が可能となる。

なお、上記の処理では、地盤変位は1回の観測周期(本研究では1分)に対して1波長(L1波はおよそ19cm)以上は生じないことを仮定している。この仮定は、日常的な地盤変位モニタリングの範囲では妥当であり、それ以上の速度で変位が生じる場合は、その前兆を本システムで検出できると考えられる。しかし、もし実際に1分間に10数cmの変位が生じた場合、本シ

ステムではサイクルスリップを生じたと判断し、自動的に処理してしまうことに注意しなければならない。

(5) 変位計測のプロセス

本システムによる具体的な計測のプロセスは、システム設置後、基準点座標の入力、初期化、および計測点の周期計測となる。

a) 基準点の座標の入力

相対測位法では、基準点から各計測点の相対座標を求めるため、計算上まず最初に基準点の座標を入力する必要がある。基準点の座標についてあらかじめ測量結果がある場合、それをうければよい。たとえば、その座標値が日本測地系座標であれば、簡単な変換によってすべての計測点の座標がその座標系で表され、得られる変位もまたその座標系に基づいたものとなる。

また、計測点座標を基準点を原点とした相対的な座標で求めればよい場合は、基準点座標を入力する必要はなく、システムが、基準点に設置したGPS受信機により単独測位を繰り返し行い、その平均座標を基準点座標として自動的に処理する。

いずれにしても、計測点の変位は計測点座標の時間的な変化(相対値)であるので、変位のみ注目する場合、基準点の座標は特に重要とはならない。

b) 初期化

初期化は、前述の整数値バイアスと計測点の初期座標を求めるために行う。これは、計測開始時、あるいは、なんらかの形で計測を中断した後に計測を再開する場合に行う。

具体的には、短時間(15分間程度)の観測を行い、通常スタティック方式のアルゴリズム²³⁾により、各計測点の座標と整数値バイアスを決定する。

c) 計測点の周期計測

初期化の終了後、自動的に周期的な計測に移る。ここでは、短時間の観測と各計測点の座標を求める計算を繰り返し実行する。

基準点および各計測点とも同時に人工衛星からの電波を受信している。この間に、積算した位相値と受信した衛星情報を、基準点およびすべての計測点から収集する。

そして、基準点のデータと各計測点それぞれのデータを組にして、前節に述べた基線解析法に基づき各計測点の座標を求める。この繰り返しによって、適当な周期で各計測点の座標が得られる。計算の結果得られた変位(座標)は前述のように画面上に表示される。

なお、GPS測量によって得られる座標は通常、準拠楕円体 WGS-84(World Geodetic System-84)に基づいている¹⁵⁾。本システムにおいてもその座標系を用い

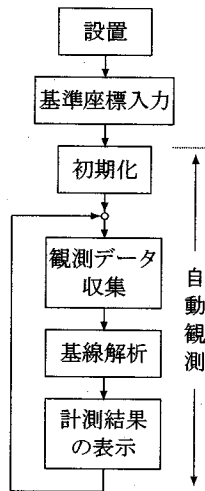


図-3 本システムによる変位計測の流れ

るが、日本測地系への変換や現場における任意の座標系に変換することは容易である^{15),16),24)}。

以上の計測のプロセスをフローチャートにして図-3に示す。

4. システムの性能評価のための基礎実験

本研究で開発したシステムの動作確認および性能を評価するための基礎実験を行った。実験は、仰角 15° 以上の上空には障害物の少ない場所(郊外に立地した工場内のグラウンド)において行った。本実験では受信機を4台接続して、1つの基準点および3つの変位計測点を図-4のように設置し、計測点4のアンテナに変位を与えてどの程度の精度でそれが計測されるかを調べた。また、同時に計測点2および3の座標も計測し、静止した計測点の計測精度もあわせて調べた。

ここでは、まず最初に、初期化と周期的な計測の性能について述べ、続いて、静止計測点2と3の計測結果、および、移動計測点4におけるトレース実験と変位計測シミュレーション実験結果について示す。

(1) 初期化と周期計測

実験ではまず、受信機とアンテナ等を設置後、初期化によって整数値バイアスと各計測点の座標の初期座標を求めた。初期化に必要な時間は受信できる衛星数にもよるが、衛星数が5個以上の場合、15分程度の時間(搬送波の積算間隔は10秒)で整数値バイアスが決まることが確認された。なお、基準点の初期座標には5分間の単独測位による平均値を用いた。

初期化終了後、各計測点で同時に10秒間電波を受信し搬送波の位相の積算を行い衛星情報とともに、基

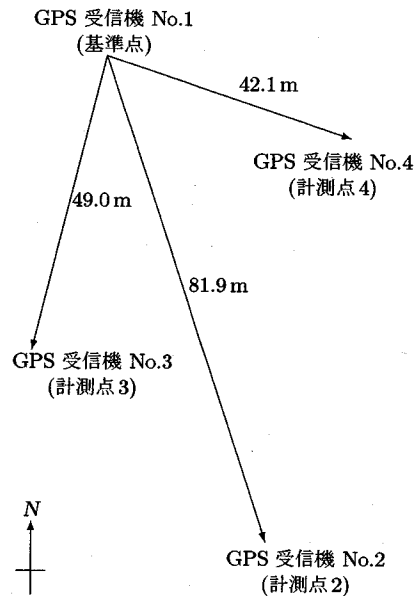


図-4 計測点の配置

線解析部へ送り各計測点の座標が計算される。座標の計算時間は1計測点当たり約3秒であり、本実験のように3計測点では受信から全計測点の座標を得るまでに要する時間は約20秒であった。すなわち、20秒周期ですべての計測点の座標が得られる。本システムは10計測点(1基準点含まず)まで接続可能であり、その場合約40秒周期の計測が可能である。したがって、所期の目標の1分以内の周期計測はほぼ達成されたと判断できる。しかし、計測周期は計測点数に依存するため、より多くの計測点を短周期で計測することについては今後の課題である。

これらのことから、3.(1)において目標とした性能のうち(a),(b)および(d)は概ね達成されたことが示された。

(2) 静止計測点における計測結果

静止計測点2,3に対する20秒毎の計測結果(計測継続時間約5000秒)を、図-5および図-6に示す。両図において、(a)~(c)は、各計測点の初期座標をそれぞれ原点とした、緯度、経度、高さの時間的推移を、また、(d)は基準点からの距離を示している。図-5および図-6の(e)には実験を通して受信した衛星数の変化もあわせて示している。ここで、受信衛星数がこまかく変動しているが、これは使用した受信機が、信号強度が受信レベル限界の衛星を捉えやすく、放しやすいという傾向を持っていることによると考えられる。さらに、図-7に両計測点の緯度経度を平面図上にプロットしたものを示す。なお、これらの図は、計測時にコン

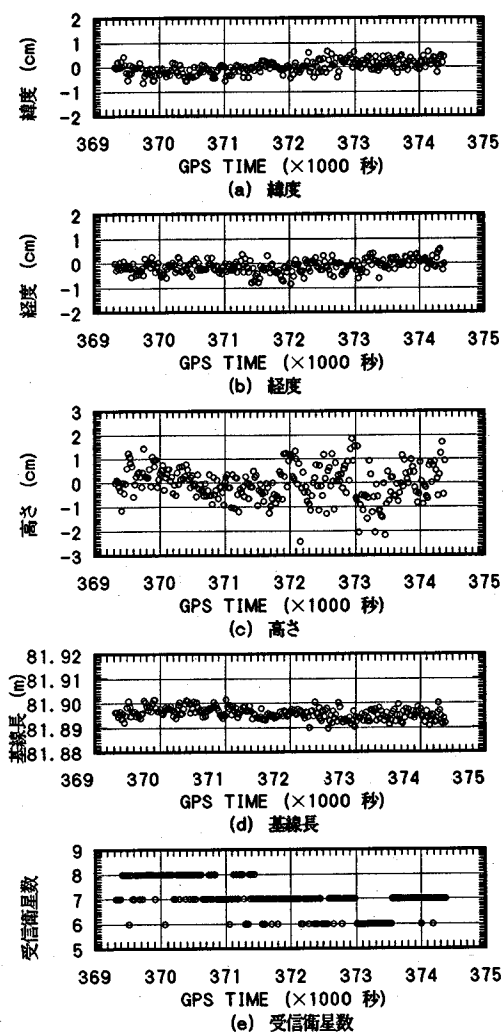


図-5 計測点2の計測結果

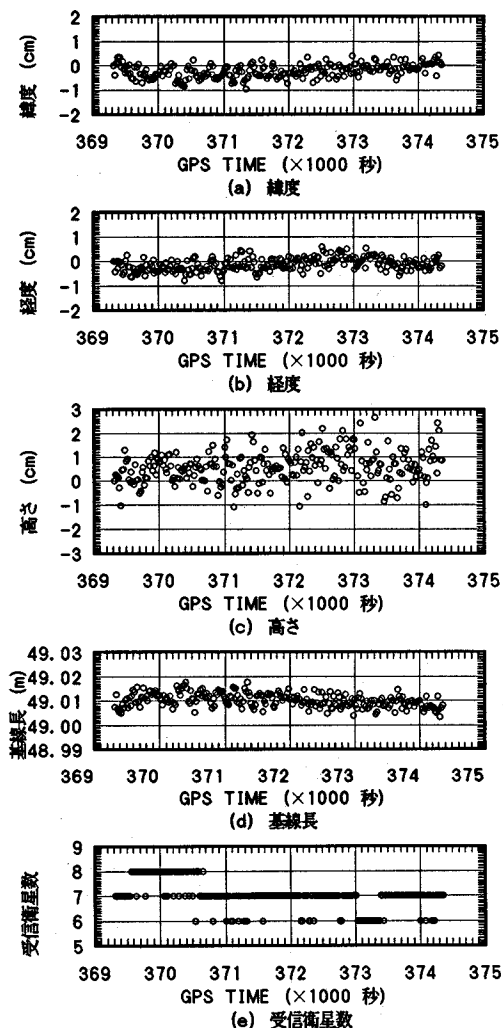


図-6 計測点3の計測結果

コンピュータの画面上にリアルタイムに表示される図と同様のものである。

図-5 および図-6 の(a), (b) ならびに図-7 から緯度経度については、どちらの計測点に対しても ± 1 cmの幅に計測はすべて収まっている。観測値の標準偏差を計算すると、緯度、経度、高さならびに基線長に対して、計測点2では、それぞれ0.3cm, 0.3cm, 0.7cm, 0.2cm, 計測点3では、それぞれ0.3cm, 0.3cm, 0.7cm, 0.3cmである。これらの値は、本システムで得られた座標値の絶対的精度を表すものではなく、計測結果の変動(安定性)をあらわすものと解釈される。計測結果の安定性は、一般に、衛星の個数や配置状況、電波の多重経路伝搬、アンテナの安定性、受信機の雑音などによるものとされているが、これらの値から、受信機の違いによる計測結果の変動にはあまり差がないこと、高さ方

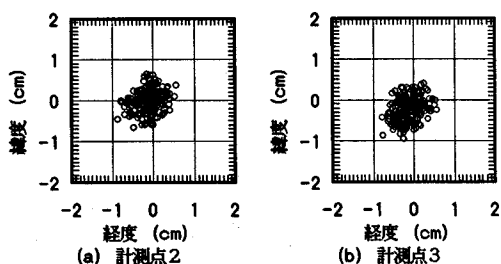


図-7 計測点2および3の緯度・経度

向は緯度、経度(水平方向座標)より変動が大きいことが示された。なお、ここで得られた計測結果のばらつきや標準偏差は、いずれも従来のスタティック方式やキネマティック方式による計測と同程度のものである。

次に、受信した衛星個数別に、緯度、経度、高さ、

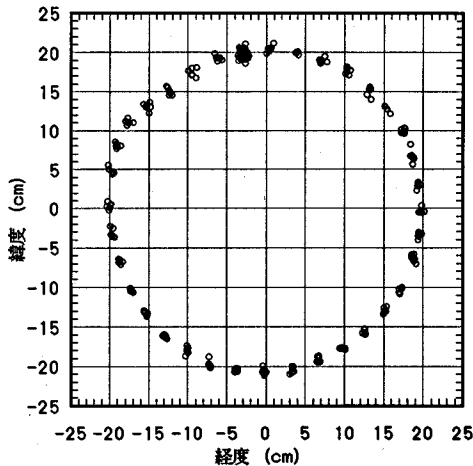


図-8 トレース実験の結果

基線長の標準偏差を計算した(表-4)。表-4 から緯度経度の標準偏差は衛星個数によらず0.2~0.3 cmの範囲にあり、高さに対する標準偏差は衛星個数が増えるにしたがって改善されていることが分かる。GPS測量においては、水平より上空の衛星からの電波しか受信できないことから、高さ方向の誤差は水平方向に比べ大きいことが知られているが、受信できる衛星個数が多い時期を選んで計測すれば、変動幅は小さくなる。なお、基線長の標準偏差が衛星個数の影響をあまり受けていないのは、基準点と計測点の高さの相対座標が水平方向の相対座標に比べ小さいため、高さの標準偏差の影響をあまり受けていないためである。基準点と計測点の高さと水平方向の相対座標が同程度の大きさの場合には、基線長の標準偏差も衛星個数に影響されることに注意する必要がある。

(3) 移動計測点における計測結果

a) 円軌道のトレース実験

計測点 4のアンテナをほぼ水平面上にある直径39.0 cmの円を描くように移動させながら計測を行った。移動は10°移動させた後、2分間の静止させることを繰り返した。計測周期は20秒とし移動の間を含めて継続的に計測した。その結果得られた緯度経度座標を図-8に示す。実験を通して、少なくとも4個以上、平均5.1個のGPS衛星を受信している。

2分間静止させた間における計測結果の最大較差は、緯度、経度、高さについて、それぞれ平均で1.0 cm, 0.6 cm, 1.1 cmである。また、計測結果を用いて円の直径を最小自乗法で求めると39.8 cmとなり、与えた直径とほぼ同じ値を得た。

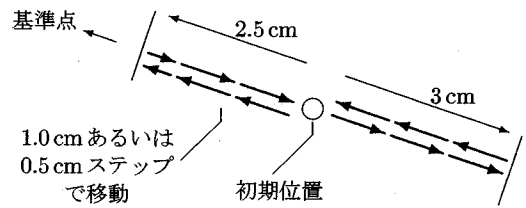


図-9 変位計測シミュレーションにおける計測点4のアンテナ移動方法

b) 変位計測シミュレーション実験

次に、本システムによって変位がどの程度の精度で観測できるかを調べる実験を行った。これは、図-9に示すように、計測点4のアンテナをほぼ水平に一定距離を移動させ、2分間静止させた後再び同じ距離を移動させることをくり返し行い、この間20秒周期で計測点の座標を求めるものである。本実験は先に示した静止計測と同時に行ったもので、アンテナの移動距離は、1.0 cmおよび0.5 cmの2種類とした。

図-10 (a)~(d)に計測点4の受信衛星数と、計測点に変位を与えたときの基線長、緯度・経度ならびに高さの変化を示す。

次にアンテナを1.0 cmおよび0.5 cm移動させる前後において、本システムによって計測された座標を用いて移動距離を計算すると、それぞれ図-11 および図-12のような度数分布が得られる。これは、アンテナ移動前後の座標についてすべての組み合わせについて求めたものである。その結果、本システムによって1.0 cmの変位は平均値1.2 cm, 標準偏差0.4 cm, 0.5 cmの変位は平均値1.1 cm, 標準偏差0.6 cmで計測されたことが分かる。

1.0 cmの変位に対する結果は、これまで得られている精度⁹⁾とほぼ同程度のものである。一方、0.5 cmの変位に対する結果は、全体に正解値からかたよった分布を示し、ばらつきも大きく十分な精度で計測されているとは言い難い。これは、0.5 cmの変位を与えた実験において、図-10 (e)に示すように座標の高さ方向のばらつきが増大していることが直接の原因である。このばらつきの増大は、受信衛星数の減少(同図(a))および衛星配置の変化などの要因によると考えられる。このように計測条件が悪化しても、図-11の示す程度の精度を維持できるような対策を行う必要がある。

計測結果に対する改善策の一つとして、ある時刻の座標を、その時点から過去1分間に得られた座標を平均して求めた。すなわち、本実験では20秒毎に座標を求めているので、連続する3個の計測座標を用いて平均をとり座標を評価する。そのようにして確定した座標を用いて、上記と同様にして変位を求めると、図-13

表-4 計測結果の標準偏差と衛星個数

受信 衛星数	計測点2				計測点3			
	緯度	経度	高さ	基線長	緯度	経度	高さ	基線長
6	0.2	0.2	0.9	0.2	0.2	0.2	1.0	0.2
7	0.2	0.3	0.7	0.2	0.3	0.3	0.7	0.3
8	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3

(単位 cm)

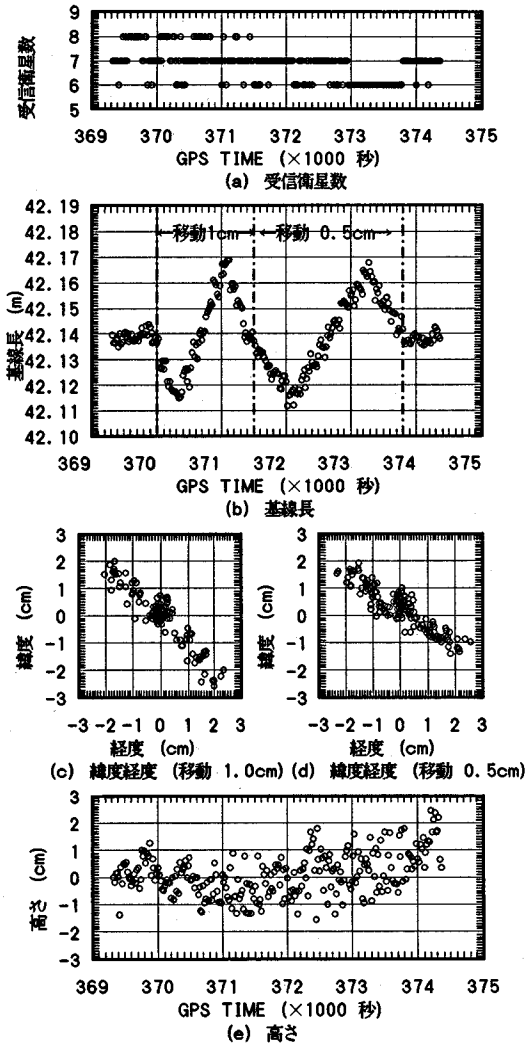


図-10 変位計測シミュレーション実験の結果 (計測点 4)

および図-14 に示すような結果が得られた。1.0 cm の変位を与えた実験に対しては平均値が 1.2 cm から 1.1 cm に、また、0.5 cm の変位を与えた実験に対しては平均値が 1.1 cm から 0.8 cm に、さらに標準偏差が 0.6 cm から 0.4 cm に改善されていることが分かる。

以上の結果、1.0 cm の変位を与える実験では、変位

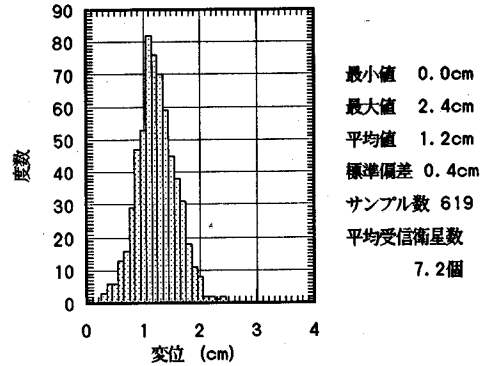


図-11 計測変位の度数分布 (変位 1.0 cm)

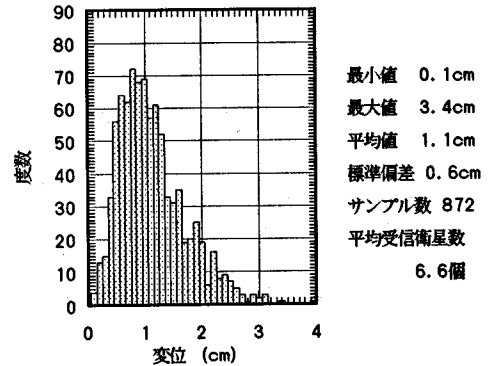


図-12 計測変位の度数分布 (変位 0.5 cm)

が平均値 1.2 cm、標準偏差 0.4 cm で計測できたことから、本システムによって、1 cm 程度以上の変位は計測できることが確認された。さらに、経時的に連続して座標を計測できる本システムの特徴を生かして計測結果を評価すれば、変位計測精度を改善できる可能性が示された。(図-13,14 参照)

5. 結論

本研究では、広範囲な領域における地盤変位の計測を行うことを目的として、GPS による変位モニタリングシステムを開発した。本論文では、システムの構成、ハードウェアとソフトウェアの概要、ならびに、動作・性能確認のための基礎実験の結果について述べた。本

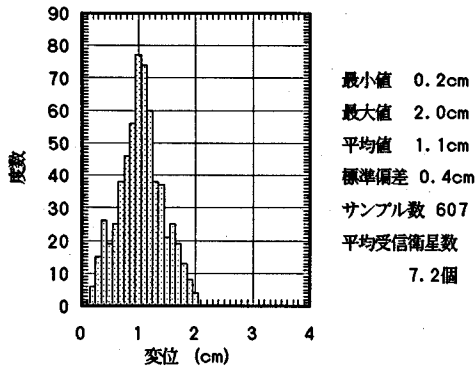


図-13 改善策後の計測変位の度数分布 (変位 1.0cm)

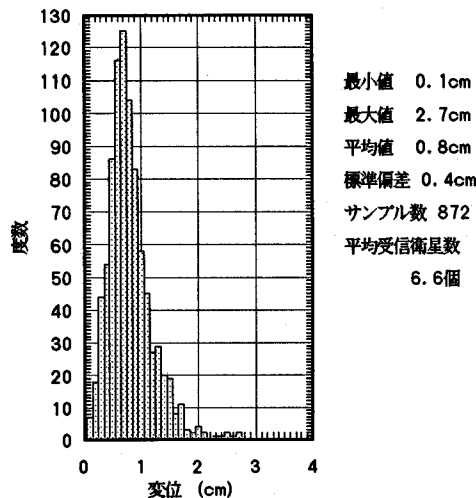


図-14 改善策後の計測変位の度数分布 (変位 0.5cm)

論文は以下のようにとりまとめられる。

- (1) 広範囲な領域の地盤変位計測を対象として、GPSを用いた新しい変位モニタリングシステムを開発した。それは多数の計測点の変位を同時に計測でき、その結果がコンピュータの画面上にリアルタイムに表示される点に新規性がある。
- (2) 本システムは現場における長期自動観測を目的としており、アンテナとコンパクトなGPS受信機、中継機と通信I/F、ならびに、基線解析部と計測結果の表示部から構成される。本システムでは、基準点を含めて10点まで計測点を設置でき、最小約1分周期ですべての計測点の変位が求められ、直ちに表示されるように設計されている。
- (3) システムの動作・性能確認のための基礎実験の結果、15分程度の初期化の後、所期の計測周期で計測点の座標を計測できることが確認された。また、静止計測点の座標は、緯度・経度に対して標準偏差0.3cm、高さ方向に対して0.7cmで計測されることが示された。

(4) アンテナを移動させる変位計測シミュレーション実験の結果、1cm程度以上の変位を計測できることが示された。

以上のように、本研究において、GPSを利用して、ほぼリアルタイムに地盤上の多点における変位が同時計測できるシステムが開発された。今後は、4.3(b)に示した、長時間の現場計測結果に対する移動平均処理の自動化や、その手法の改善など、計測結果の精度を向上させるためのソフト面の開発が課題と考えている。また、現システムは各要素をケーブルで接続しているため計測できる領域が1km程度であるが、より広範囲な領域に対しても有効となるように、ハード面においては無線によるシステム構成が必要である。さらに、現場への適用性を高めるために、現場計測実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 大野睦雄, 馬渡裕二, T. D. フィ・オアン: 光波測距儀を用いた地すべり自動観測システム, 建設の機械化, 7, pp.41-44, 1989.
- 2) 櫻井春輔, 岡野兼夫, 清水則一, 北村元: トータルステーションを用いた地盤変位計測手法の開発, 建設工学研究所報告, 第32号, pp.1-20, 1990.
- 3) 鍛冶茂仁, 田中政芳, 古川浩平, 中川浩二: 山岳トンネルにおける新しい計測方法の開発とその適用, 土木学会論文集, No.486/VI-22, pp.115-124, 1994.
- 4) Chrzanowski, A., Y. Chen, R. Leeman and J. Leal: Integration of the Global Positioning System with geodetic levelling surveys in ground subsidence studies, *Proc. 5th Int. (FIG) Sympo. on Deformation Measurements and 5th Canadian Sympo. on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements*, Fredericton, pp.142-155, 1988.
- 5) Murria, J. & J. Abi Saab: Engineering and construction in areas subjected to subsidence due to oil production, *ditto.*, pp.367-373, 1988.
- 6) Strange, W. E.: GPS determination of groundwater withdrawal subsidence, *J. Surveying Engineering, ASCE*, 115(2), pp.198-217, 1989.
- 7) Blodgett, J. C.: Monitoring land subsidence in Sacramento valley, California, using GPS, *J. Surveying Engineering, ASCE*, 116(2), pp.112-130, 1990.
- 8) 櫻井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 血海章雄: GPSによる切り取り斜面の変位測定, 土木学会論文集, No.475/III-24:137-142, 1993.
- 9) 丸山清揮: 地滑り地におけるGPS測量による地表変動観測, 基礎工, pp.46-50, 1993.
- 10) Lambert, S. R. and D. A. Tyler: Monitoring crustal deformation in Eastern Maine using GPS, *J. Surveying Engineering, ASCE*, 115(1):138-147, 1989.
- 11) Dong, D. D. and Y. K. Bock: Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California, *J. Geophys. Res.*, 94, pp.3949-3966, 1989.
- 12) 木股文昭, 他15名: 中部・関東地域の南部におけるGPS干渉測位(1989-1990), 測地学会, 36(4):219-230, 1990.
- 13) 関口涉次, 大見士朗, 藤縄幸雄, 島田誠一, 江口教雄, 岡田義光: GPSによる伊東沖の地震火山活動後1年間における初島-伊東間の基線変化, 防災科学技術研究所報告書,

- 第46号, pp.21-27, 1990.
- 14) 太田一也, 他 11 名: 雲仙岳火山活動に関連した山体崩壊に関する合同研究報告, 環境システム工学研究センター活動報告, 第4号, 九州大学, pp.35-45, 1992.
 - 15) 日本測地学会編著: 新訂版 GPS 測量 — 人工衛星による精密測位システム —, (社)日本測量協会, 1992.
 - 16) Leick, A. : GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990
 - 17) Peter Griffioen, Timo Allison, Scott Dreier : Real-Time Kinematic: The Next Surveying Tool, *Proceedings of the 1993 ION Technical Meeting*, Sanfrancisco, pp.399-408, 1993.1.
 - 18) 佐田達典, 高田知典: リアルタイムキネマティック GPS を用いた誘導型測量システム, 土木学会誌, 79(2):18-20, 1994.
 - 19) 浜田賢二, 石崎 武, 三浦英夫, 林 忠夫, 清水則一, 中川浩二: 海上作業船の位置測量のためのリアルタイム GPS 測量システムの開発, 土木学会論文集, No.510/VI-26:153-163, 1995.
 - 20) 土屋 淳, 辻 宏道: GPS 測量の基礎, (社)日本測量協会, 1995.
 - 21) (財)電波システム開発センター: RCR STD-17 特定小電力無線局 400 MHz 帯データ伝送用無線設備標準規格
 - 22) (財)電波システム開発センター: RCR STD-18 特定小電力無線局 1,200 MHz 帯データ伝送用無線設備標準規格
 - 23) 土屋 淳, 今給黎 哲郎, GPS 測量と基線解析の手引き, 日本測量協会, 1992.
 - 24) 清水則一, 中川浩二, 櫻井春輔: GPS による斜面の変位計測結果の評価法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.623-628, 1994.

(1995.10.16 受付)

DEVELOPMENTS OF A GROUND DISPLACEMENT MONITORING SYSTEM BY USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Hitoshi KONDO, M. Elizabeth CANNON, Norikazu SHIMIZU and Koji NAKAGAWA

Displacement measurements and monitoring have a important role in design, assessment and control of ground structures as well as in the mitigation of ground disaster. The authors have developed a real-time monitoring system for ground displacement measurements by using the Global Positioning System.

This paper describes the detailed configuration of the system hardware and software. The results of the field experiments, performed to investigate the measurement accuracy of the system, are also shown. The system developed here will be useful for continuous displacement measurements of the ground over an extensive area.