

# 地震時地盤変状把握における GPSの適用性の検討

小金丸健一<sup>1</sup>・塚本博之<sup>2</sup>・磯山龍二<sup>3</sup>・清水善久<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東京ガス株式会社 防災・供給センター (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail:kenici\_k@tokyo-gas.co.jp

<sup>2</sup>日本技術開発(株) パブリックマネジメントセンター (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:tsukamotohi@jecc.co.jp

<sup>3</sup>日本技術開発(株) パブリックマネジメントセンター センター長 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail:isoyama@jecc.co.jp

<sup>4</sup>東京ガス株式会社 防災・供給センター マネージャー (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail:yshimizu@tokyo-gas.co.jp

埋設管の被害は、地震による地盤の永久変位量に大きく影響されるため、広域的な地盤変状監視が必要である。そのため、GPS (Global Positioning Systems, 汎地球測位システム) を利用した地盤大変状の検知方法の適用性を検討する。ナビゲーションを目的として開発・運用されてきたGPSであるが、精密測量の他、大規模構造物の挙動計測に応用が図られている。このようなGPS技術の現状を整理するとともに、液化による地盤大変状やそれに伴う架管被害をモニタするシステムの可能性を検討する。

**Key Words :** *Measurement of Ground Deformation, Earthquakes, Lifeline, Global Positioning System*

## 1. はじめに

埋設管の被害は、地震による地盤の永久変位量に大きく影響される。そのため、地盤変状モニタリングを行うシステムの要素技術として、土木の分野にも適用されているGPSの利用を取り上げる。

低廉化や計測技術の高精度化等が急速に進んでいるGPSの分野は、適用範囲が拡大するとともに、その計測方法も複雑多岐に渡る。そのため、GPS計測技術の現状を調査するとともに、利用可能な計測方法について整理を行う。また、利用可能な計測方法をベースとした、地震前後の地盤永久変位量に着目したシステム構成についても検討を行う。

## 2. GPSの概要と利用範囲

### (1) GPSの概要<sup>1)~4)</sup>

GPSは、米国によって航空機・船舶等の航法支援用として開発されたシステムであり、1) 宇宙部分

(GPS衛星)、2) 制御部分(5つのモニター局、1つの主制御局、3つのアップロード局)、3) ユーザー部分(GPS受信機、解析システム)で構成される。

表-1に示すように、GPS衛星は測位のために色々な信号と情報を電波(搬送波)に乗せて送信している。この搬送波が2種類あることから、GPS受信機には大別すると、L1帯のみを使用する1周波型GPS受信機とL1帯及びL2帯を使用する2周波型GPS受信機がある。

一方、測位方法は様々な分野で適応されていることもあり、複雑多岐に渡る。しかし、大別すると図-1、図-2のように分類できる。以下に、個々の測位方法の概要を述べる。

#### a) 単独測位

単独測位は、1つのGPS受信機により1地点の座標値を求める測定方法である。観測方法は、1つのGPS受信機で同時に4基以上のGPS衛星から送信される搬送波に乗ったC/Aコードを受信する。解析方法は、GPS衛星から送られる電波を地上のGPS受信機で受信し、GPS受信機に届くまでの所要時間を求

め、その所要時間に電波速度(約30万km/s)をかけることにより距離を計算、更に、同様の距離計算を他のGPS衛星に対しても実行し、言うなれば「衛星を使った三角測量」により位置を求める。

### b) ディファレンシャル測位 (DGPS)

DGPSは、基準局(既知)と利用者局(未知)との相対位置を測定し、利用者局の座標値を求める測定方法である。観測方法は、基準局と利用者局双方のGPS受信機で単独測位と同じ方法をとる。解析方法は、基準局と利用者局の双方で、単独測位と同様の計算を行い、両者の測定値の差をとることにより得られる相対位置と基準局の座標値(既知)を用い、利用者局の座標値を求める方法である。

この方法は、基準局と利用者局の電波受信環境が同等であるため、双方の計測値の差をとることにより、単独測位における誤差要因の多くを相殺することができる。そのため、測定精度は単独測位より高く、数メートル~10m程度であり、単独測位用GPS受信機がそのまま利用できることと、相対位置の計算も簡単であること等が特徴である。また、実時間でも利用可能である。

更に、このDGPSを高度化したものも存在する。基準局における座標値(既知)と単独測位して得られた計測値との差から誤差データを作成、補正情報として利用者局のGPS受信機に送信し、利用者局にて実時間的に計測値を補正できるような仕組みである。この場合、測定精度は1m程度にまで向上する。なお、利用例としては、中波ビーコンを用いる船舶航法支援システム等がある。

### c) 干渉測位

干渉測位は、DGPSと同様、基準局と利用者局との相対位置を測定し、利用者局の座標値を求める測定方法である。ただし、単独測位ではなく、基準局と利用者局双方のGPS受信機で搬送波の位相を測定し、基準局と利用者局との相対位置を計算する。

この方法で用いている搬送波の波長(L1帯、L2帯)は、搬送波に乗っている信号(C/Aコード、Pコード)に比べて2~3桁程度短い。そのため、GPSによる測位の中でも最も計測精度が高くmm単位での計測も可能である。なお、基準局及び利用者局の双方を固定して測定するスタティック(静的)方式と利用者局を移動させながら測定するキネマティック(動的)方式とがある。

スタティック方式は、GPS衛星を長時間観測し、GPS衛星の時間的位置変化を利用した高精度な測位方式であるため、測定計算は後処理となる。つまり、1箇所の測定に数10分から数時間程度の観測時間を要するが、測定精度は最も高くmm単位での測定が

表-1 GPS衛星の測位用電波信号と情報

搬送波(全衛星同一)	乗っているコード	メッセージ	備考
L1帯 1, 575.42MHz =154×10.23MHz	C/Aコード Pコード(Yコード)	航法メッセージ	一般に開放
L2帯 1, 227.60MHz =120×10.23MHz	Pコード(Yコード)		原則として軍用GPS測量では使用

	ビット率	コードの長さ	備考
C/Aコード	1.023Mbps	1.023bit=1ms	一般用
Pコード	10.23Mbps	約6×10 <sup>12</sup> bit=7day	軍用、現在秘操作中 Yコードに変換
航法メッセージ	50bps	サブフレーム=300bit=6s メインフレーム=1500bit=30s 5サブフレーム=1メインフレーム 25メインフレーム=1マスターフレーム	自分自身の軌道情報 全衛星の軌道情報 電離層補正係数 衛星時計の補正係数等

基準周波数	10.23MHz - 0.00455Hz (軌道上の重力に対応した相対論補正)
-------	---

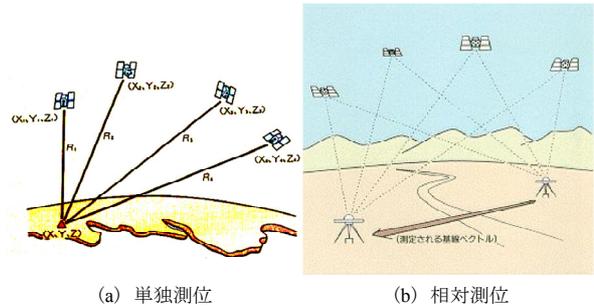


図-1 単独測位と相対測位<sup>3)</sup>

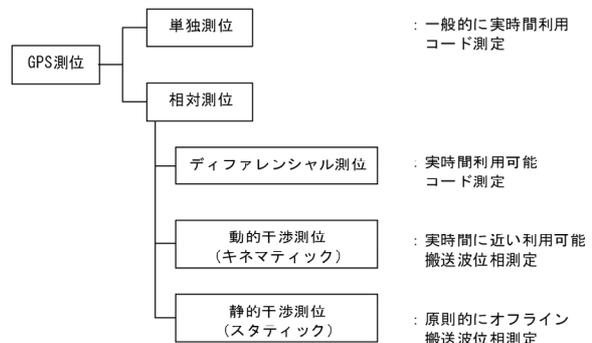


図-2 GPSを用いた測位形態

表-2 測位方式による相違点

測位方式	観測情報	観測時間	補正情報 (GPS受信機間通信)	解析計算	GPS受信機出力データ	精度
単独測位	コード	数秒	-	GPS受信機内	位置データ	100m ~ 10m
DGPS	コード	数秒 ~ 数十秒	必要有り	利用者局(未知)側のGPS受信機内	位置データ	10m ~ 1m
スタティック	位相	数10分 ~ 数時間	必要無し	パソコン	RAWデータ* (RINEX)	5cm ~ 1mm
RTK	位相	数秒 ~ 数分	必要有り	利用者局(未知)側のGPS受信機内	位置データ	10cm ~ 1cm

\*) 後処理による測定計算のためにGPS受信機が出力する生データ。RINEXは、データ交換のための標準フォーマットである。

可能である。

一方、キネマティック方式の場合、測定演算は後処理でも実時間的にも行える。特に、実時間的に行える方式は、RTK(リアルタイムキネマティック)方式と呼ばれ、基準局から送信された位相データと利用者局で得られた位相データとをリアルタイムで解析することにより測定が行える。なお、スタティック方式より測定精度は劣り、概ねcm単位での測定が可能である。

以上、測位方式による相違点をまとめると表-2のようになる。

## (2) 利用範囲

(1)で述べたように、GPSによる測位では、mm単位のモニタリングが可能であり、リアルタイム変動監視に関する研究等も行われている<sup>5)</sup>。また、地震時におけるモニタリングシステムとして、地震時の地盤の残留ひずみ量をクリッキングで推定する方法が提案されている<sup>6)</sup>。これらは、主に測定精度の向上を目途に研究されているものである。

一方、本調査検討では、液状化による地盤の大規模大変状やそれに伴う架管の被害の早期検知を目的としていることから、mm単位での測定精度は要求されない。すなわち、1m～5m程度の大規模な地盤変状をリアルタイムに捉えることを目指しているため、測定精度として50cm程度が確保できれば十分であると考えられる。

図-3に、地震前後の地盤永久変位量に着目したモニタリングの概念図を示す。GPS1とGPS2の距離は、概ね50m～数100mを対象とし、地震前にGPS1とGPS2の距離Dを計測しておく。地震後に再度GPS1とGPS2の距離D'を計測、水平変位量「D-D'」を計算することで、地盤変状がおきているかどうかを確認できる。

ここで、(1)で述べたGPSの概要を、GPS受信機の種類[1周波型、2周波型]やリアルタイム性の観点からまとめると、表-3のようになる。上記の要求精度50cm程度の観点からみると、RTKまたはスタティック方式の測位で要求を満たすことが可能である。一方、リアルタイム性の観点からみると、RTK方式となるが、最近では長時間観測を行わなくても良い後処理ソフトウェアが開発され、スタティック方式でも最短1秒毎に測定結果を出力するものが存在する。

以上の調査検討結果と最近の動向を踏まえ、RTKまたはスタティック（両者とも1周波型、2周波型を含む）方式の測位を用いたシステムを検討することとした。

## 3. システム構成の検討

表-2に示したように、図-4のRTK方式の場合、基準局と利用者局とで補正情報のデータ通信を行い、利用者局側で座標値の測定を行う。更には、その座標値を解析部等に送り水平変位量を求めることとなる。一方、図-5に示すように、スタティック方式の場合、GPS受信機から得られるRAWデータ(後処理による測定計算のためにGPS受信機が出力する生データ。)を解析部に送信し、後処理ソフトウェアを

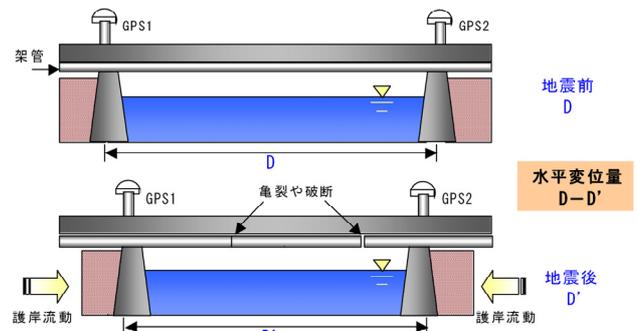


図-3 地盤永久変位に着目したモニタリングの概念図

表-3 GPSを用いた測位方法と利用範囲

	観測種類とその精度	代表的な利用例	利点と欠点
リアルタイム(動的)観測	単独測位 精度: 100m～10m	カーナビゲーション	利点: 安価、使いやすい 欠点: 精度が期待できない
	DGPS 精度: 10m～1m	船舶航法支援等多岐に渡る	利点: 安価で比較的高精度 欠点: 補正情報が不可欠
	1周波RTK 精度: 10cm～5cm	地すべりの連続観測等	利点: 2周波GPSに比べ安価 欠点: 補正情報が不可欠
	2周波RTK 精度: 5cm～1cm	測量、移動体管理等	利点: リアルタイム観測で最高の精度 欠点: 補正情報が不可欠、機器が高価
スタティック(静的)観測	1周波スタティック 精度: 5cm～5mm	短基線での基準点測量、地盤変動モニタリング等	利点: 2周波GPSに比べ安価 欠点: 長基線の解析は不可能(短基線のみ解析可能)
	2周波スタティック 精度: 1cm～1mm	長基線での基準点測量、地盤変動モニタリング	利点: スタティック観測で最高の精度、長基線の解析が可能 欠点: 機器が高価

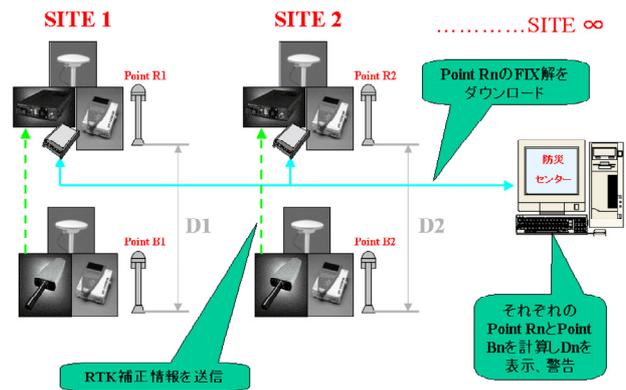


図-4 RTK方式によるモニタリング

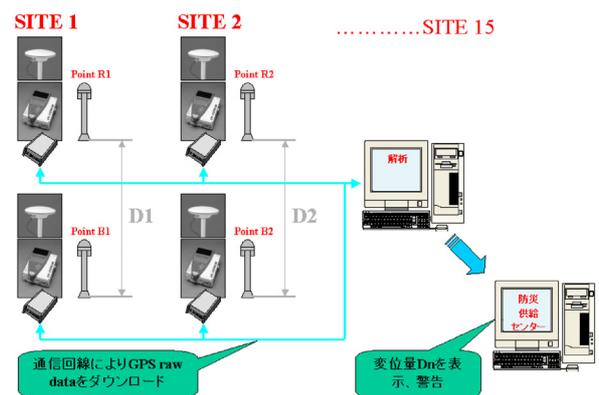


図-5 スタティック方式によるモニタリング

用いて測定を行う。すなわち、データ通信が行われる部分やデータ量が異なり、オンサイトで水平変位量を計算し警告を出すのか、オフィス等で警告を出すのかにより、システム構成は変わる。

スタティック方式の場合、後処理ソフトウェアが必要で、一般的にパソコン上で稼動するものであり、

また価格も高い。そのため、複数のオンサイトでの測定(警告発信)を前提としたシステムには導入しづらい。

一方、RTKの場合、後処理ソフトウェアは必要としないため、複数のオンサイトでの測定(警告発信)を前提としたシステムにも導入しやすい。ただし、基準局と利用者局とで補正情報のデータ通信を行う必要があるため、スタティック方式と比べ無線等通信機器の導入コストが高くなる(GPS受信機自体も高めである。 )。

従って、RTKまたはスタティック方式のどちらを採用するかは、基本的に後処理ソフトウェアの導入コスト(本数に比例)と無線等通信機器の導入コスト(GPS受信機数に比例)との比較になる。

次に、1周波型GPS受信機または2周波型GPS受信機のどちらを採用するかであるが、一般に基準局と利用者局との距離が10kmを超えるような場合、電離層による電波遅延の影響が除去できる2周波型GPS受信機の利用が必要となる<sup>7)</sup>。しかし、10kmを超えるような観測範囲は想定しておらず、数百万円と初期コストが高く、観測点を増やすのにネックともなる2周波GPS受信機の導入は現実的でない。すなわち、オフィスでの測定を前提とした、1周波型GPS受信機を用いたスタティック方式によるモニタリングが現状では最有力である。

#### 4. まとめと今後の課題

地盤変状モニタリングを行うシステムの要素技術として、GPS計測技術の現状を調査するとともに、利用可能な計測方法について整理を行った。また、地震前後の地盤永久変位量に着目したシステム構成についても検討を行った。

現状では、1周波型GPS受信機を用いたスタティック方式によるモニタリングが最有力である。今後の課題としては、設置環境に依存する問題(電源供給、電波受信状態等)やデータ通信方法の検討、要求精度の達成等を確認するためシステムを具体化し、実証実験を行っていく予定である。

なお、今後更に調査が必要と思われる測位方式を以下に述べる。海上保安庁では、元々船舶航行支援用として、中波ビーコンの電波を使って、GPSを用いた測位の精度が向上するよう補正值と、GPS衛星の故障、システムの運用状況等の情報を提供している<sup>8)</sup>。1局の有効範囲は約200kmであるが、全国で現在27局が運用されているため、内陸部においても補正情報を受信することが可能である。この中波ビー

コンを用いたDGPSは、測定精度が1m程度と高いことと、基準局を設置する必要がないこと、ならびに後処理ソフトウェアが必要ないこと等からコスト的にも有効と思われる。現状では、1m程度の測定精度であるが、事前に観測値の傾向分析を行うことや、平滑化処理を行うことにより、要求精度の50cm程度になる可能性があるため、今後の更に調査が必要と思われる<sup>9)</sup>。

#### 参考文献

- 1) 清水隆夫 : パソコンカーナビを始めよう! 電子地図とパソコンGPS活用のすすめ, 株式会社インプレスコミュニケーションズ, 2000.10.
- 2) 衛星即位システム協議会 : GPS導入ガイド, 日刊工業新聞社, 1998.4.
- 3) 国土地理院 : 国土地理院のホームページ <http://mekira.gsi.go.jp/gps/gps.html>
- 4) トリンブルジャパン株式会社 : 地理情報システムのためのGPS入門, 1999.5.
- 5) 須江次郎, 大瀧茂, 菅富美男 : GPSによるリアルタイム変動監視システムに関する研究, (財)日本測量調査技術協会論文集 APA NO.79-5, 2001.8.
- 6) 加賀谷俊和, 風間基樹, 佐々木静男, 清野純史 : GPSを用いた地盤変状の把握とその利用, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol.3, M-9, 1998.11.
- 7) 椎名義徳, 備前信之, 白旗克志, 及川典生, 河合剛匡 : 1周波型GPS計測センサーによる地すべり連続観測の試み(その2), 第39回日本地すべり学会研究発表会講演集, 151-154, 2000.8.
- 8) 海上保安庁 : 海上保安庁のホームページ <http://www.kaiho.mlit.go.jp/index.html>
- 9) 片哲也, 斉藤章, 鈴木芳朗 : 中波ビーコンによるDGPS測位の都市部における利用可能性, (財)日本測量調査技術協会論文集 APA NO.76-7, 2000.8.

(2003. 10. 10 受付)