

人工衛星GPSによる高精度定点測位法に関する解析的研究

神崎 正*・西沢修一**

本論文は、GPS (Global Positioning System) を用いて、定点の測位を精度よく、簡易に行う方法に関して記述したものである。多くの実験を積み重ねて、人工衛星の配置、観測時間、基線解析方法など多くの問題点を明らかにした。このことによって、独自の測量手法を開発し、既に3カ所のトンネル工事で実用化しており、100万分の1以上の精度を得ている。

Key Words : static positioning, integer fixing double phase difference, world geodetic system 1984, baseline analysis

1. はじめに

鉄道、ダム、トンネル、長大吊橋などの大規模工事では、構造物位置決定のための基準点測量は10 km前後の広範囲に及ぶことが多く、高精度の位置決めに多大の労力と時間を費やしている。

トータルステーションや経緯儀を用いた従来測量法は、測角と測距の2つの計算手段を結合し3次元座標を決定している。従って、基準点間の全方向の視通が確保できないことや光波距離計測での光路上の気象状況の不確かさなどの理由で、精度上のいくつかの問題がある。

そこで、基準点間の視通を確保することなしに基準点間を直接測定することが可能なGPS (全地球測位システム: Global Positioning System) を基準点測量に適用するため、その観測方法、基線解析方法および測位結果を分析し、実用化の検討や実験を通じて定量的に測定精度を把握し、GPS精密測位法を確立した。

本論文は、GPS精密測位の原理と実用化のための各種実験について述べるものである。

2. GPS高精度測位の概要

GPSは米国が開発、運用している人工衛星を用いた全世界で24時間利用可能な航法システムである。軍事利用のほか、航空機、船舶のナビゲーションなどにも利用されている。

GPSは軍事利用の位置決めシステムとして、いつでも、どこでも測位可能なように半径約26000 kmの6軌道上にGPS衛星を各3~4個配置し、少なくとも4個以上の衛星が同時観測できるように運用される。1993

年4月現在では23衛星が配置され、日本付近では仰角5°以上に伝播の受信障害が無い限り、完全に24時間、4衛星以上からの電波受信が可能となった。

GPS衛星からはLバンド信号であるL1、L2の搬送波が送信されている。これに、C/A及びPコードというPRN (擬似雑音符号: Pseudo-Random Noise) をのせており、このPRNに重ねて航法メッセージが送られて来る。4衛星からこのコード信号を受信し、受信機位置の絶対座標をリアルタイムで求める方法がGPSの本来の使用法である。これを単独測位法といい、4衛星の位置情報及び衛星の電波伝搬時間に光速をかけて求めた擬似距離を用いた受信機の3次元座標を算出する。

しかし、この方法では衛星および受信機の時計誤差、電波伝搬遅延による誤差など、観測での共通誤差は消去できず、精度は30 m~50 m程度となり、高い測位精度は得られない。しかも、現在軍事利用以外の一般ユーザーに対しては100 m程度まで単独測位精度を低下させた情報を送るS.A (利用の選択性: Selective Availability) が実施されている。

従って、複数台の受信機でGPS衛星からの搬送波を同時受信し、コード信号のかわりに搬送波の位相を測定する位相測位方式の実用化が大きな課題であった。この課題を解決することが、衛星~受信機間の誤差要因を効果的に除くことができ、各受信機間の基線ベクトル (3次元座標差) を高精度で測定するための重要なポイントであった。

測定誤差に影響を与える主要因として、①衛星時計誤差、②受信機時計誤差、③電離層や大気による電波伝搬遅延誤差がある。そこで、同一衛星からの搬送波位相を同時に2つの受信機で受信し、1サイクル単位で両受信データの位相差を求める。これを2衛星に対して各々求め、この2つの位相差をとる二重差によって、衛星および受信機時計誤差の消去が可能である。さらに、二重

* 正会員 工博 大成建設 (株) 生産技術開発部 遠隔計測システム開発室長

(〒169 新宿区百人町3-25-1)

** 正会員 大成建設 (株) 同部副課長

差を求める組合せを 3 組以上作り、多数回の測位データを利用して最小二乗法により各衛星～受信機間の搬送波の受信機の各チャンネルの整数波長分の不確定要素（整数値バイアス）を推定して基線ベクトル（3 次元座標差）を決定する。

もう一つの誤差要因である電離層や大気による電波伝送遅延の影響は、基線長が数 10 km 程度においては、電離層及び対流圏補正モデルを利用することで、十分な精度確保が可能である。

3. GPS 測位法の理論的検証

GPS 測位の各種実用化実験にあたり、測位精度に及ぼす誤差要因を消去するための理論的検証を行う。

相対測位法の実用化には二重差の処理が不可欠であるが、三重位相差は、測定時間の異なる 2 つの二重位相差の差を取ることで、整数値バイアスの項が除去できるので、概略座標の推定やサイクルスリップの除去を行う場合に効果的である。従って、整数値バイアスの推定は不要であるが、長時間観測を行わないと測位精度が向上しない欠点をもつ。これに対し、二重差は整数値バイアスを推定する必要があるが、整数値バイアスを適切に確定できれば、三重差よりも座標の推定精度は高く、高精度な 3 次元測位結果を得ることができる。過去の解析結果より、20 km 前後を超える基線については、一般に整数値バイアスを推定する最小二乗解の精度は低下し易い。従って、整数値バイアスの推定が難しくなるため、整数値バイアスを少数点付きの実数値で求める方法をとるか、または三重差解を適宜選択して使用する必要がある。

(1) 擬似距離 (Pseudo Ranges)

擬似距離による単独測位の原理は光速に衛星から受信機までの伝搬時間を乗じて次式のように求める。

$$P_r^s = (t_r - t^s)C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに P_r^s は受信機から GPS 衛星までの擬似距離、 C は光速、 t^s は衛星の時刻、 t_r は受信の時刻を表す。

GPS 受信機の時刻は精度が低いので上式に受信機時計の補正値を加えると次式が与えられる。

$$P_r^s = (dt_r^s - \Delta t_r)C \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 dt_r^s は電波伝搬時間、 Δt_r は受信機時計の補正値を表す。

単独測位を決定するために受信機時計の補正値と受信機の位置 (X, Y, Z) の 4 未知パラメータを下記の式で解く。

4 パラメータを解くための 4 衛星以上からの擬似距離を使い 4 個以上の次式を組成する。

$$P_r^s = \sqrt{(X^s - X_r + \Delta X_r)^2 + (Y^s - Y_r + \Delta Y_r)^2 + (Z^s - Z_r + \Delta Z_r)^2} + C(\Delta t_r) \quad \dots\dots\dots (3)$$

但し、人工衛星の 3 次元座標は $(X^s \cdot Y^s \cdot Z^s)$ 、受信機位置の概算 3 次元座標は $(X_r \cdot Y_r \cdot Z_r)$ 、受信機位置の概算 3 次元座標の補正値は $(\Delta X_r \cdot \Delta Y_r \cdot \Delta Z_r)$ 、 Δt_r は受信機時計の補正値で表わす。

測定誤差への影響は、測定に使用する衛星の空間配置に依存する。すなわち、測距誤差が座標成分に与える影響の「重さ」は、測点から使用する衛星への視線の方向余弦に關係する。そして、この關係を表わす指標として位置精度低下率 PDOP (Position dilution of precision) がある。これは、受信機時計の補正要素を除いた空間座標成分を用いた重み係数行列の対角要素の和の平方根として定義される。

上記 (3) の式より $v = AX + L$ の残差の二乗を最小とする条件「 $v^T v = \text{minimum}$ 」で正規方程式を組成すると次の式が与えられる。

$$A \cdot X = L \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 A は係数行列、 X は改正数、 L は観測値と概算値の差を示す。

上記の解を求めるため、正規方程式の係数行列の逆行列 A^{-1} を作成すると改正数 X は下記の式で与えられる。

$$X = A^{-1} \cdot L \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらを行列のかたちにあてはめると、式 (4) は、

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \alpha_4 & \beta_4 & \gamma_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \gamma_1 \\ \Delta \gamma_2 \\ \Delta \gamma_3 \\ \Delta \gamma_4 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表わされる。

ここで、 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ は、測点から使用する衛星への視線の方向余弦に關係する量であり、 $\Delta \gamma_i$ は観測値と概算値の差を示す。

この分散・共分散行列は下記のように表わされる。

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \alpha & \sigma^2 \alpha \beta & \sigma^2 \alpha \gamma & \sigma^2 \alpha t \\ \sigma^2 \beta \alpha & \sigma^2 \beta & \sigma^2 \beta \gamma & \sigma^2 \beta t \\ \sigma^2 \gamma \alpha & \sigma^2 \gamma \beta & \sigma^2 \gamma & \sigma^2 \gamma t \\ \sigma^2 t \alpha & \sigma^2 t \beta & \sigma^2 t \gamma & \sigma^2 t^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

そして、空間座標に關係する成分のみを扱う PDOP は、 $PDOP = \sqrt{\sigma^2 \alpha + \sigma^2 \beta + \sigma^2 \gamma} \quad \dots\dots\dots (8)$ と求められる。

(2) 搬送波位相 (Carrier Ranges)

搬送波位相測定の一重差の式は下記の通りである。

$$\phi_{mn}^i = -\frac{f}{c}(R_m^i(t) - R_n^i(t) - \phi_m(t) + \phi_n(t)) + N_{mn}^i \quad \dots\dots\dots (9)$$

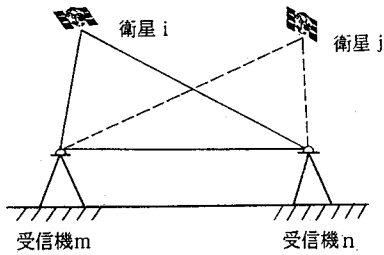


図-1 二重差概念図

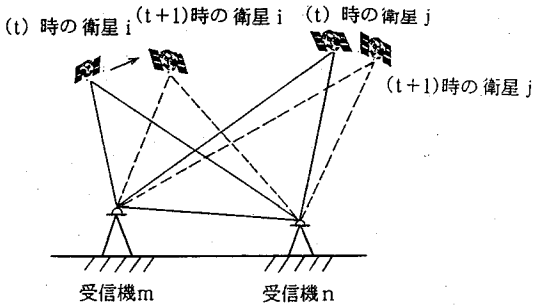


図-2 三重差概念図

但し、 ϕ_{mn}^i は i 衛星より受信機 m, n の位相差、 f は搬送波位相の周波数、 C は光速、 $R_m^i(t)$ は t 時刻の受信機 m と衛星 i の搬送波位相レンジ、 $\phi_m(t)$ は t 時刻の受信機オシレータの位相、 N_{mn}^i は i 衛星と受信機 m, n の位相の整数値バイアスを示す。

一重差で衛星の発信機の時計誤差は除かれている。さらに i 衛星の一重差と j 衛星の一重差を取る二重差の式は以下の通りである。

$$\phi_{mn}^{ij} = -\frac{f}{c}(R_m^i(t) - R_n^i(t) - R_m^j(t) + R_n^j(t)) + N_{mn}^{ij} \quad (10)$$

二重差の組成によって受信機の時計誤差は打ち消される。また対流圏および電離層の電波伝搬時間の遅延にともなう補正は、適切な補正モデルを使って行われる。これらの一重差・二重差の組合せで除かれないファクターとして、整数値バイアスがある。整数値バイアスは二重差の処理においては未知数として扱い、未知点の座標を最小二乗法で推定する場合、整数値バイアスをまず小数点付きの実数値で求めた後に整数化を行う。確定された整数値バイアスを与件として二重差の再処理を行い、基線ベクトルだけを再び最小二乗法により推定して基線ベクトルを決定する。

建設工事での精密測位に三重差解を適用する事は測位効率や精度の面から見て必ずしも有効な測位とは考えられない。しかしながら三重差では整数値バイアスの推定は必要ないため、サイクルスリップの修正に利用すると効果的である。

衛星～受信機間の距離は、搬送波の波の数に基づき決

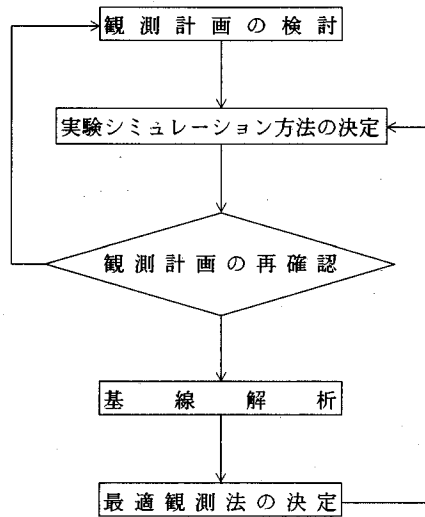


図-3 実験シミュレーションの流れ

定されるが、サイクルスリップとは、観測中に障害物などで電波が瞬間的に中断することにより観測中の搬送波の波長整数分に誤りが生じる現象をいう。

三重差は二重位相差の差を取ることににより、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_{mn}^{ij} = & -\frac{f}{c}(R_m^i(t+1) - R_n^i(t+1) - R_m^j(t+1) + R_n^j(t+1)) \\ & + \frac{f}{c}(R_m^i(t) - R_n^i(t) - R_m^j(t) + R_n^j(t)) \\ & \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここで整数値バイアス N_{mn}^{ij} は $(t+1)$ と (t) で等しいので、三重差を取る事で取り除かれる。

(3) データ解析処理の方法

基線解析の検討は、図-3の手順で実施した。

データ解析の手順は以下のとおりである。

- ① 各観測点で受信した搬送波位相データをコンピュータへ転送する。
- ② 基準となる既知点以外の各観測点に対して、概略の位置を仮定し、その仮座標値に基づく位相観測量(搬送波位相)の理論値を求め、観測された値との残差を計算する。
- ③ 搬送波位相測定値の中から、大きなサイクルスリップを探し、観測値をスリップに対応する整数値の波長分を修正する。
- ④ 搬送波位相から二重差を作り、サイクルスリップを探す。発見したら、それがどの衛星の搬送波位相を推定し、整数波長分の調整を行う。
- ⑤ 最小二乗解を用いた繰り返し計算を用いて、受信点、座標値を絞り込むためのバイアス項の調整を行う。そして、座標値の標準誤差が許容内に納まるような整数値を確定する。

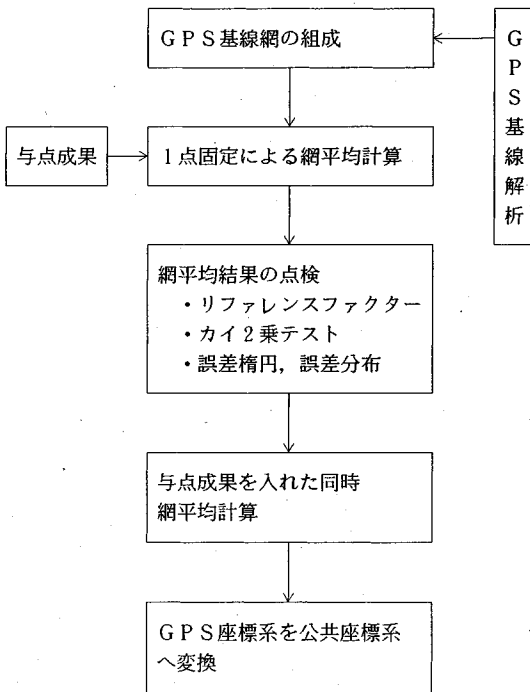


図-4 網平均計算処理の流れ

(4) GPS 網平均

搬送波位相二重差の GPS 基線解析を建設工事の基準点測量で実用を行うためには、同時網平均計算を用いた図-4 の処理が必要である。

GPS 網平均は $v=AX+L$ の残差の二乗を最小とする条件「 $v'v=\text{minimum}$ 」で正規方程式を組成し、下記の計算式で調整される。

$$\hat{X} = -N^{-1}R(N=A^T P A \quad R=A^T P L \quad P=\Sigma_{\Delta b}^{-1}) \dots\dots\dots(12)$$

図-4 中のリファレンスファクターとは、網平均計算での分散共分散より求められた単位重量の標準誤差のことで、自由度の数によって割られた誤差の重みのついた二乗和の平方根を示す。

但し、 \hat{X} は最確値を示す。概算値に加える改正数の最小二乗解を求める。 N^{-1} は正規方程式の係数行列 N の逆行列、 R は観測値と概算値の差に転置行列 A^T を乗じたもので A は係数行列、 P は各観測の重み、 L は観測値と概算値の差を示す。

$$\text{また、} \hat{X} = -N^{-1} A^T P L \dots\dots\dots(13)$$

ゆえに $A \cdot$ プリオリな $\Sigma_{\hat{X}}$ (最確値 \hat{X} に対する分散・共分散行列の要素を表し、 \hat{X} の精度を証明する) は次式で求められる。

$$\text{aposteriori} \Sigma_{\hat{X}} = \partial \Sigma N^{-1} \dots\dots\dots(14)$$

但し、 N^{-1} は正規方程式の係数一般逆行列を表す。

(5) 座標系変換

GPS 衛星は WGS-84 という測地系で運用されており、GPS 成果の全て WGS-84 系で求められる。この GPS 成果を公共座標系に変換するため以下の座標変換が必要となる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(15)$$

ここで公共座標値を (X_1, Y_1, Z_1) 、人工衛星座標値を (X_0, Y_0, Z_0) 、直交座標間の変換シフト量を (d_x, d_y, d_z) とする。

また緯度・経度・高さから 3次元座標 (u, v, ω) の変換は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} u &= (N+H) \cos \phi \cos \lambda \\ v &= (N+H) \cos \phi \sin \lambda \dots\dots\dots(16) \\ \omega &= (N(1-e^2)V+H) \sin \phi \end{aligned}$$

ここで ϕ は緯度、 λ は経度、 H は高さを表し、ここで使用される WGS-84 楕円体の原子は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} a &= 6\,378\,137 \text{ m} \\ f &= 1/298.257223563 \end{aligned}$$

但し、

$$N = a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$$

$$e^2 = f(2-f)$$

ここで、 a は赤道半径、 e は離心率、 f は楕円体の扁平度を表わす。

また、3次元座標より緯度、経度、高さへの変換は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \{ Z + e^2 \sin^2 \theta / (P - e^2 \cos^2 \theta) \} \\ \lambda &= \tan^{-1} (Y/X) \\ H &= P / \cos \phi - N \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

ここで使用されるベッセル楕円体の原子は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} a &= 6\,377\,397.155 \text{ m} \\ f &= 1/299.152813 \end{aligned}$$

但し、

$$e'^2 = (e^2 / (1 - e^2))^{1/2}$$

$$P = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \{ Z \cdot a / (P \cdot b) \}$$

4. GPS 精密測位に関する技術的課題と解決方法

GPS 精密測位法の実用化に当たっては、観測された測位データの質に大きな影響を及ぼす以下の 4 点の基本的課題解決が不可欠であり、それらを明らかにすることが精度検証実験の大きな目的と考えた。

- 1) 衛星の配置 (衛星数・衛星軌道方向・衛星の配置形態)
- 2) 受信時間 (整数値バイアスの決定可能な観測時間)
- 3) 受信条件 (サイクルスリップ・ノイズ)
- 4) 基線網 (網の形状・基準となる点の配置)

これらの諸条件に関する技術的課題について検討を行い、精密測位に必要な最適観測方法を確立した。

同時に、実験に当たっては、工事管理のための実用性を考慮し、①衛星軌道情報は広報暦を使用、②観測はL1帯の1周波を測定、③基線解析は搬送波位相二重差による整数波長分の推定と固定化の3条件を設定した。これは、工事前精密測量の範囲が最大で10km前後であることから、実用性を重視し、その測位精度と作業効率とのバランスを考慮したものである。

また、20km以上の長大辺長をもつ工事前基準点の設置を行った場合、観測には2周波の使用が必要になること、基線解析では二重差による整数値バイアスの固定化が困難になること、基線長1km前後の坑口基準点との極端な基線長差の発生など、いくつかの点で20km以上の長大基線の採用には疑問が残る。むしろ、10km前後の四角形鎖の使用が工事前基準点としては実用的であると考える。

(1) 衛星の配置

1993年4月現在で利用可能なGPS衛星は23個となった。対流圏の伝搬遅延の影響を考慮して仰角を15°とした場合、上空に4衛星以下となるのは、1日でわずか4時間程度となった。また、1日に2回程度、最多の7~8個の衛星数が同時観測できるようになった。

このように、衛星数が増えると、衛星配置による組合せの選択が測位精度に大変重要となってきた。

a) 衛星配置と基線解析誤差の関係

相対測位法では、搬送波位相の二重差処理による整数値バイアスの固定化が、2点間の基線ベクトルを求める測位精度を決定する。そして、この測位結果の精度を表す指標として、RDOP (Relative Dilution of Precision) の使用が考えられる。すなわち、正規方程式を用いた基線ベクトル解析の重み係数行列の答えとして、水平、鉛直誤差成分の二乗和が最小になるとき、RDOPも最小となる。従って、高精度観測に最適な衛星配置時間を決定する場合、このRDOPを検討指標として用いる事が最適であろう。

また、別にRDOP (幾何学的精度低下率: Geometrical Dilution of Precision) とい指標が衛星配置の組合せで測位精度を予測するものとしてある。しかしこのRDOPは単独測位での擬似距離を使用した測位精度を表すものであり、厳密には、相対測位における搬送波位相の基線解析精度を表すRDOPとは異なるものであ

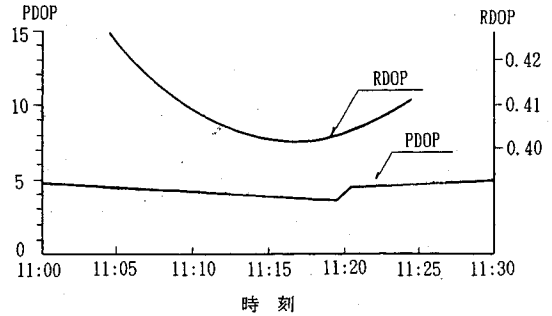


図-5 RDOPとPDOPの類似性

る。RDOPは通常0.1以下を基準値とする。

RDOPは以下の式で表される。

$$RDOP = \frac{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_u^2}}{\sigma_E} \dots\dots\dots (18)$$

但し、Eは水平(東西)成分、Nは水平(南北)成分、uは鉛直成分を示す。

b) PDOPとRDOPの関係

PDOP (Position Dilution of Precision) もGDPOと同様に単独測位精度を現すものでRDOPとは本質的に異なるものであるが、どちらも衛星配置と測位精度との関係について、両指標はほぼ類似性を表している。三重差を用いた20km以上の長大基線解析では衛星の天球上での大きな動き、つまり精度向上のためには長時間観測がPDOPより重要なファクターと考える。しかし、二重差を用いた通常の基線解析では、RDOPとPDOPはある程度正比例の関係にあり、PDOPを使用した測位精度予測が可能である。図-5では、RDOPとPDOPの変化がほぼ類似した傾向を示している。

c) 衛星軌道方向と基線解析誤差の関係

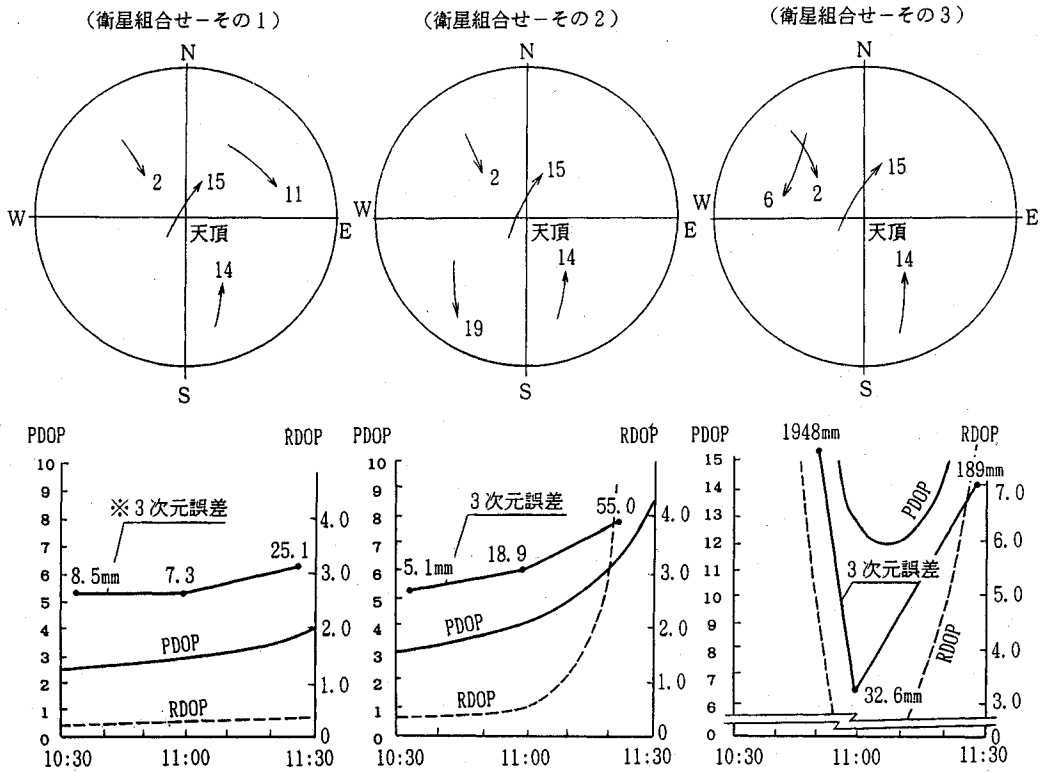
衛星軌道方向が基線解析誤差に及ぼす影響を調べるため、測位データを利用し、衛星配置の異なる組合せを作り、それぞれ基線解析を行い、測位精度との関係について検討を行った。

4衛星からなるそれぞれ軌道方向と衛星配置の異なる組合せは図-6に示す3通りを対象とし、組合せの各測位データを用いて、約1500mの基線解析を実施した。

この解析結果よりGPS衛星軌道の方向と基線解析精度の関係について以下の結論を得た。

- 1) 瞬時の4衛星の受信データを使用して高い基線解析精度を得るためには、衛星配置を示すPDOPは5以下が必要である。
- 2) 図-6「その1」で示すPDOP 5.0以下の条件下で測定を実施した場合、次ページ図-7の平面・鉛直誤差の図で示す通り、個々の測定値の偏位する範囲は、「その1測定値」では最大2cm程度に納まっている。

静止測量法により60分間で120個の全測定データを用いて算出した測位座標を基準として、30秒



※ 3次元誤差 = (1秒間測位座標) - (静止測位座標)

図-6 衛星軌道の組合せと基線解析結果

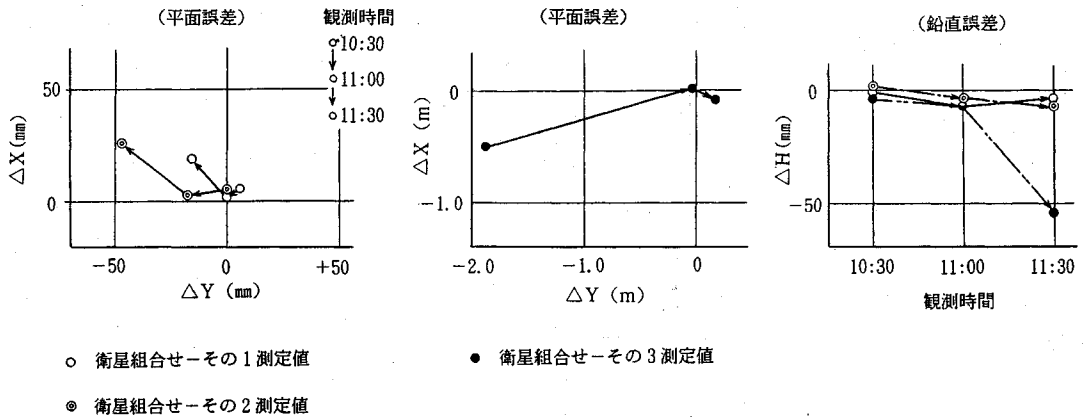


図-7 衛星組合せと三次元誤差量

ごとの個々の1秒間測定データ120個について測位座標の標準偏差を求めたところ、下表に示す通り概ね1cmの標準偏差であった。

dx	10mm	dy	12mm	dz	5mm
----	------	----	------	----	-----

3) 衛星配置が天頂付近に集中している状態の図-6「その3」では、RDOPが7以上、PDOPは15以上

上となって基線解析の精度も低く、基線解析に最大でY座標において1.886mの誤差を生じた。

4) 図-6「その2」の後半30分では、天頂付近の衛星が、他の3衛星で形成される三角形の中央部から次第にはずれた方向へ移動するにつれて、PDOPおよびRDOPは上昇し、同時に基線解析の精度低下が見られ5cm程度の誤差を生じた。このことは、図-7の平面誤差で示す通り、「その2測定値」で

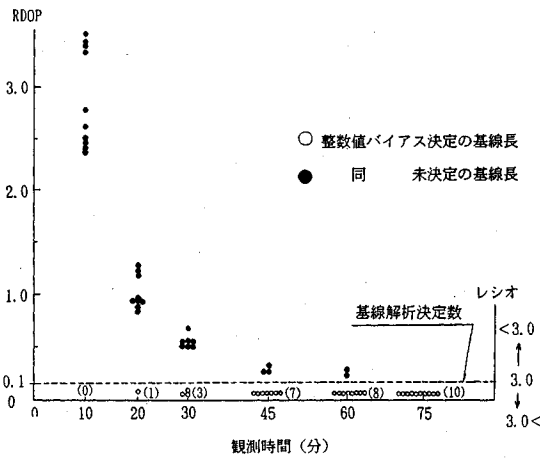


図-8 時間分割した基線解析結果

の偏位する範囲は、前半 30 分に比べ後半 30 分の方が同様に増大傾向を示している。

この衛星組合せの比較検討結果より、GPS 相対測位法での基線解析精度を表す指標として PDOP および RDOP の利用が有効である事が確認された。しかし、PDOP は事前に衛星軌道情報に基づく推定が可能であるのに対して、RDOP は測定精度を検討する最適指標ではあるが、実測データを用いた 2 点間の基線ベクトル解析結果からしか算定することができない。

これらの結果から、確認できた測位精度に影響する衛星配置や衛星移動方向の特徴は次の通りである。衛星は天頂の中央部に 1 個あって、東、西、南、北に散らばっている場合は高い精度が得られる。衛星軌道の方向として、複数の衛星が中心方向へ集中して動く衛星配置は基線解析の精度劣化をもたらす。さらに衛星軌道方向の南北・東西軌道への広がり、PDOP の低下と基線解析精度の向上をもたらす衛星軌道の配置である事が確認できた。

(2) 搬送波位相二重差と観測時間

整数値バイアスの固定化がどの程度の観測時間で確定可能かを調べるため、最大で 10 km 前後の基線長をもつ GPS 基準点測量を実施し、180 分の測位データを図-8 のように一定時間ごとに分割して基線解析を行った。その結果、60 分ぐらいが整数値バイアスを確定するクリティカルポイントであることが確認できた。

また、レシオ (整数値バイアス決定の妥当性の評価精度を表す: Ratio) と RDOP を比較した結果、整数値バイアスが確定すると、小数点付きの実数で扱われた整数値バイアスが与件となり、未知量が少なくなる。そのため図-8 で示す通り、重み係数行列で求められる RDOP も少数 1 桁以下に小さくなる事でクリティカルポイントの確認ができた。

表-1 基線解の決定状況

		第 1 回	第 2 回	第 3 回
観測時間		60 分	60 分	60 分
衛星数 Max ~ Min		6 ~ 4 個	7 ~ 5 個	5 ~ 4 個
P-Dop Min. ~ Max. 平 均		2.5 ~ 5.4 4.0	2.0 ~ 3.0 2.5	2.5 ~ 4.5 3.5
Fix 解 の得ら れた基 線数	長(3 線本)	2 本	1 本	3 本
	中(6 線本)	4 本	5 本	6 本

表-1 に示す PDOP, 衛星数, 辺長と整数バイアスの固定は必ずしも比例しない事が判明した。60 分間の処理結果において顕著にその傾向が出ており、約 500 m, 約 4 km の基線とともに約 10 km の長基線の整数値バイアスが同時に確定している。この理由として、次の「(3) 受信条件」, 特にサイクルスリップが大きく影響するものと考えられる。

(3) 受信条件

搬送波位相二重差の測定においてサイクルスリップ (受信データのと切れ) やノイズなどの受信条件は測位精度に大きな影響を与えている。

特に本論では工事中精密測量への効果的利用をめざすものとして、より測位効率を高めるために、可能な限り短時間で整数値バイアスを確定することが重要なポイントである。

しかし、あまりにも測位効率を高めようとするため、観測データの取得量を少なくすると基線解析の安定性が損なわれ整数値バイアスの誤った推定をする可能性がある。とりわけ衛星配置状況の指標である PDOP が高い時間帯や、受信障害の多い観測条件下ではいたずらに受信時間を短縮する事は、最小二乗法による整数値バイアスの推定に誤りを生ずる危険性が高い。

さらに原因が不確定な系統的ノイズの発生や、受信点付近の電波反射物の輻射波によるマルチパスの問題も観測点の選定場所によっては生ずる。

いずれにしても観測点での受信条件が GPS 測位において、最も不確定な要素であり、精度劣化の大きな原因の一つとなっている。

(4) 基線網の形成

GPS 測位の精度向上のため、単独で各基線の相対測位と基線解析を行い、これらを使用し GPS 基線網を形成する。この GPS 基線網を同時に網平均することにより、セッションの異なる測位データを使用した調整が行

われるため、全基線を同時観測した場合よりも測定条件に片寄りが少ないため、より高精度な 3 次元座標が決定できる。

網平均によって調整された基線ベクトルは、日本測地系で与えられた既知座標を与点として持つ GPS 基線網を形成することで、日本測地系と WGS-84 系との変換が可能となり、より信頼度の高い GPS 測位成果を得るとともに既設成果との座標比較も可能で、既設測量網に合致した実用成果を得ることができる。

GPS 基線網を同時網平均調整計算を行うとともに網平均の統計データの出力結果より、客観的に測位精度を点検し、建設工事に必要な測量成果としてまとめるためには、下記の調整が必要であろう。

- 1) 工事測量基準への成果変換 (WGS-84 系より工事測量座標系)
- 2) 既設基準点の精度点検
- 3) 既設基準点網への整合

これらの調整を含めて GPS 基線網の網平均を行うため、網平均計算は単なる最小二乗法の数学モデルだけでは決定できないことも多く、工事測量座標への調整と GPS 測位成果の取りまとめに当たっては、工事管理上の高度な判断を必要とする。

5. GPS 精密測位の提案

工事測量の分野で GPS 精密測位を導入するにあたり、GPS の実用化実験を通じて、観測方法と測定間距離、衛星配置、観測時間などに関する基本的な問題点について、定量点な解明を行った。

さらにこの解析結果に基づき、GPS 精密測位法のマニュアル化を行い、すでにリニア実験線九鬼トンネル、中部電力 (株) 二軒小屋導水路、北陸新幹線ノ瀬トンネルなどの基準点測量で実施し、ミリ単位での測量精度を実証している。

建設工事にともなう基準点測量に GPS 精密測位法を導入することは次のような利点が考えられる。

- 1) 水平位置と高さの 3 次元での測位
- 2) 測定点間の視通が不要
- 3) 全ての測定ポイントの直接測定
- 4) 測位から 3 次元 CAD への一貫処理
- 5) 昼夜ならびに全天候条件での測位
- 6) 熟練技術者を必要としない簡単な運用

しかし、GPS 人工衛星の配置が遅れ 24 時間完全に 4 衛星以上を捕捉することが困難であったため、実際の衛星データ受信時間に相当の制限があった。1993 年 2 月に SV#22、同年 4 月に SV#31 の 2 衛星が供用されて、23 衛星が配備した現在では、衛星データ受信時間の制約も 1 日に 3~4 時間程度となり、実用上ほとんど観測時間選定の大きな問題点が解消した。

これらの技術的利点ならびに測位時間の制約という問題点の解消によって GPS 測位はナビゲーションから精密測位の分野まで広く実用化の段階に入っている。

(1) GPS 座標変換処理

GPS 精密測位法での解析・座標変換処理は下記の通りである。

1) 人工衛星測地系

楕円体：WGS-84

$$a=6\,378\,137\text{ m}$$

$$f=1:298.257223563$$

2) 東京原点日本測地系

楕円体：Bessel

$$a=6\,377\,397.155\text{ m}$$

$$f=1:299.152813$$

3) WGS-84 から東京測地系への変換パラメータ

$$dX=146.43\text{ m}$$

$$dY=-507.89\text{ m}$$

$$dZ=-681.46\text{ m}$$

上記の座標変換シフト量は国土地理院 (筑波) における VLBI 値に準拠。

(2) 実利用へのマニュアル化

GPS 精密測位を運用するための標準化にあたり、以下に説明する測位方法を提案する。

a) 観測前の準備

干渉測位 (搬送波位相 2 重差) を行うにあたって、より効率的な観測時間で測定精度の基準値をクリアーする観測法を確立するため次の事前準備が必要となる。

- 1) GPS 受信点の選定ならびに受信条件の検討
- 2) 衛星配置状況の検討
- 3) 最適な観測時間帯の決定
- 4) 既存測量成果より GPS 基線網のフィットを検討

b) 測位データの解析

観測された GPS 受信データは各セッションごとに下記の基線解析処理の工程を通じて実用成果にまとめられる。

- 1) 3 重差処理後、サイクルスリップの除去を行う。
- 2) 2 重差処理により整数値バイアスを決定し再度 2 重差処理を行い固定解を求める。
- 3) 座標変換プログラムで WGS-84 成果を実用成果に変換する。

(3) GPS 精密測位法の運用

GPS 精密測位法の実利用のため、上述の通り搬送波位相 2 重差の測位についてガイドラインを示した。この測位手順の中で均一な品質の観測データならびに測位精度を得るため、以下の基準を定める。

a) GPS 受信点の選定

GPS 受信点の選定基準は次の通りである。

- 1) 受信点の周囲 360° について仰角 15° 以上に受信

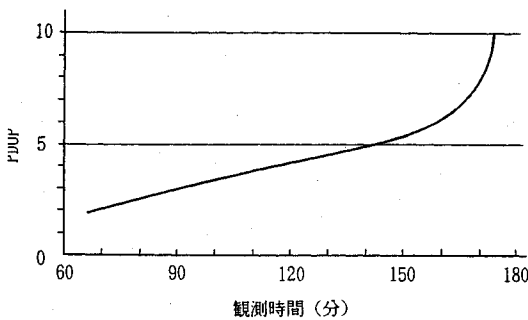


図-9 PDOPと観測時間

障害物が無い場所。

- 2) 受信障害物について障害物調査を行う。
- 3) 全ての受信点については障害物を考慮した衛星数・衛星配置・PDOPの検討を行う。
- 4) 衛星数が最低で4個以上捕捉可能な時間帯を選定する。
- 5) 受信障害物のため連続して衛星4個以上の捕捉が困難な場合は、その日の最良PDOPの時間帯を中心にその前後に観測時間帯を設定する。
- 6) すべての測定基線について3~4個衛星を同時捕捉している時間帯が短い場合はさらに観測時間帯を延長する。
- 7) 観測時間を延長しても4衛星受信時間が十分に得られない場合は、受信点は簡易測標を設置して受信アンテナを上げて受信条件を改善する。

b) 最適な観測時間の決定

最適な観測はGPS観測点の受信条件によって確定される。

- 1) 仰角15°以上に受信障害が無い100m~10km程度の基線網の場合；

100m~10kmの範囲を標準的な測量網とすると最適観測時間は図-9の通りである。

- 2) 受信点間の距離が全て100m以下の基線網の場合；

データ受信障害物の有無、PDOP・衛星配置の良否によって判断し、適宜データ受信時間を60分~10分程度まで短縮可能である。

- 3) 仰角15°以上に受信障害物がある場合；

4衛星捕捉可能時間帯が図-9の最適観測時間を越えているか判定する。もし不十分であれば3~4衛星捕捉の時間帯の内、不連続な4衛星捕捉の時間帯の合計が図-9の最適観測時間を越えるように設定する。

(4) 受信条件不良地域でのGPS測位精度の確保

工事現場では、各種プラント設備や大型建設機械など衛星電波の受信障害物が集中する区域がで易い。これらの区域では、簡易測標を設置したり測位時間を延長し

ても不良地域の受信点間で共通衛星を4個以上捕捉不可能な測定ポイントが生じる。

この場合、光波測距儀の測定辺長をGPS基線網の受信不良箇所に加える。光波測距長を含めてGPS基線ベクトルの同時網平均を行いGPS基線網の補強をする。

今後GPS精密測位法で測量される実作業において受信障害物のためのGPS測位が不可能な区域の発生は考えられる。この場合の対応として、光波測距儀を使用した測距データもGPS基線網に加えることにより、網平均による測位精度の向上を図ることが重要である。

6. GPS精密測位の実施結果

本論で述べて来たGPS精密測位法の実施例として、山梨県JRリニア実験線九鬼トンネル工事における基準点測量結果を報告する。

延長約4kmの九鬼トンネル工事において、4点の外周基準点間が10km~15kmの長基線を含む既設基準点17点について、GPS精密測定測位を2回実施した。36辺長の基線ベクトル解析と座標計算を行い、GPS測量の再現性と精度の確認を行った。

その結果は以下のとおりである。

- 1) 2回の測定による座標差は、平均して7mmであった。基線長が10km前後あることから、測位精度は100万分の1を越えている。
- 2) 観測時に使用するGPS受信機の台数、設置点関係など、2回の観測方法は各々異なっても、適正な観測と解析により、両観測は高精度の測位精度が得られた。
- 3) 120mの短い基線長においても、2回の測位誤差は方向角の誤差1秒であった。

一方、高さに関しては、基準点11点についてGPS測定高さとレベルを用いた測定標高とを比較したところ、この区域のジオイド面と準拠楕円体面との鉛直線偏差は10秒あることがわかった。しかし、定性的にとらえるには、さらに測定密度を高くする必要がある、今後も引き続きの研究が必要と考える。

参考文献

- 1) Alfred Leick: GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, pp.204~213, 1990.
- 2) B. Wanless, G. Lachapelle: NOVAS-an automated program for precise reduction of GPS Static carrier phase observations, Manuscripta Geodaetica, Vol.13, No.4, 1988.
- 3) 村田一郎: GPSにおける衛星の選択, 日本測地学第74回公演会要旨, pp.25~26, 1990.
- 4) 村上亮・辻宏道・黒石裕樹: GPS干渉測位幾何学的考察, 測地学会誌, Vol.34, No.2, pp.125~135, 1988.
- 5) 木股文昭・佐々木嘉三: 異なる衛星配置下におけるGPS干渉測位の短期再現性, 測地学会誌, Vol.37, No.4, pp.359~361, 1991.

-
- 6) 神崎 正・西沢修一：人工衛星 GPS による土工総合管理システム，土木学会誌，1991-9，Vol.76，pp.12～14，1991.
- 7) 神崎 正・西沢修一・戸井田博：人工衛星 GPS による土工総合管理システム，土木学会第 47 回年次学術講演会論文集.
- 8) 西沢修一・神崎 正・戸井田博：人工衛星 GPS による精密定点測位法，土木学会第 47 回年次学術講演会論文集.
- 9) 戸井田博・神崎 正・西沢修一：人工衛星 GPS による高速ダイナミック測位，土木学会第 47 回年次学術講演会論文集.
- (1992.7.31 受付)
-

ANALYTICAL STUDY ON HIGH-PRECISION CONTROL-POINT POSITIONING SYSTEM USING SATELLITE GPS

Tadashi KANZAKI and Shuichi NISHIZAWA

Control point surveys by the conventional method entail an enormous amount of work and time, since it is necessary to cut down trees from a national control station which may be dozens of kilometers away. This study discusses an easy, highly precise method of control-point surveying based on the GPS (Global Positioning System). Through series of experiments, many of the problems which were hampering this new method have been solved, including major concerns such as the position of the artificial satellite, the survey time, and the baseline analysis method.

This unique new surveying system is now fully established and has proved effective in actual surveys. Successful results have been obtained at three tunnel construction sites, where a precision of more than 1/1 000 000 was achieved.
