

GPS と情報化施工

3. GPS の基礎—干渉測位と測量—

佐田 達典 (さだ たつり)

三井住友建設株式会社 室長

重松 文治 (しげまつ ぶんじ)

五洋建設株式会社 部長

3.1 はじめに

GPS による測位方式のうち、測量や地殻変動観測、施工機械のモニタリングや制御に用いられるのは干渉測位方式である。今回はこの干渉測位方式の原理と応用について解説するが、干渉測位の原理は極めて難解であり、筆者も完全に理解しているわけではない。本稿では筆者の経験から建設技術者が理解しておくべきと考える要点の解説を試みたい。

干渉測位方式の中でも特に施工管理や機械制御に利用されるリアルタイムキネマティック測位方式については実際の操作で留意すべき点等を詳しく述べる。さらに GPS による測量の特徴、観測計画や座標系、高さの基準についても触れる。最後に電子基準点を利用したネットワーク型 RTK-GPS など、最新の技術動向を紹介する。

3.2 干渉測位

3.2.1 干渉測位の概要

干渉測位という言葉の由来は、電波星を観測して長基線を計測する VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 長基線電波干渉法) に類似しているからといわれている。以下に、干渉測位の概略の仕組みを説明する。

(1) 搬送波位相の測定

干渉測位はディファレンシャル測位 (2.5.4 参照) と同じく相対測位であるが、大きく異なるのは、干渉測位では衛星からの搬送波の波の数 (波数) を測る点である。搬送波はサイン波形を有し、位相角を度やラジアンによって表すが、GPS 干渉測位では位相角を波数で表し、単位としてサイクルを用いる。度、ラジアンと波数の単位であるサイクルは図-3.1 のように対応している。

干渉測位用受信機は次の機能と特徴を有している。

① 搬送波位相の検出機能

L1 波の波長は約 19 cm であるが、干渉測位用受信機は波長の 100 分の 1、距離にして 2 mm の分解能で位相角を検出できる。しかし、ある瞬間に検出できるのは 0 から 2π までの位相角、すなわち、波数の小数部の値である。

② 位相 (波数) の積算機能

測定開始時から任意の時刻までの衛星と受信機間の波数の変化分を積算することができる。一旦測定が始まれば小数部分での繰り上がりや繰り下がり数を数えることで、

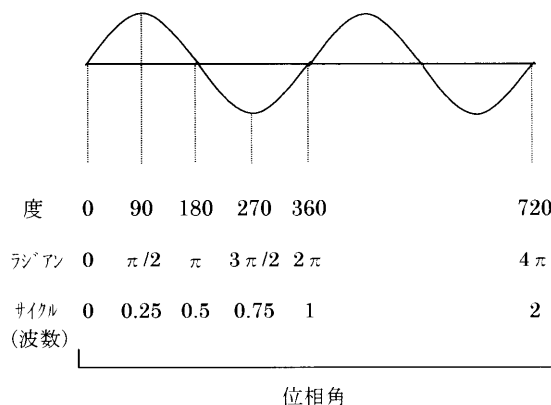


図-3.1 搬送波位相の表し方

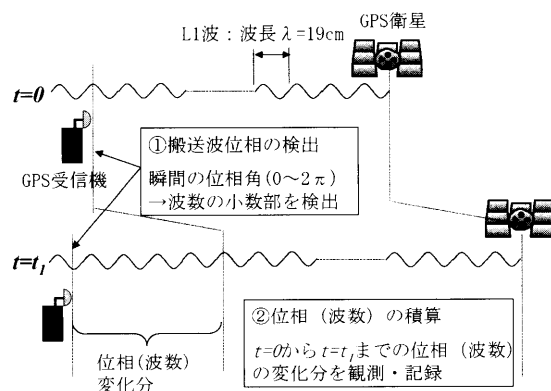


図-3.2 干渉測位用受信機の機能

整数部でどれだけ波数が変化したかを知ることができる。その積算の概略の仕組みは次のとおりである。地球上の受信機と衛星との距離は時々刻々絶えず変化している。したがって、地上の受信機ではドップラー効果を受けて周波数が変化した搬送波を受信している。この周波数が変化した搬送波からドップラー効果の成分のみを取り出し、ある一定時間積分することによって、受信機と衛星間の波数の変化量を知ることができる (図-3.1)¹⁾。

f を搬送波周波数、 Δf をドップラー効果による周波数の変化、 v を受信機に対して衛星が動く速度、 c を搬送波の伝搬速度とすると、次の関係がある。

$$\Delta f/f = v/c \quad \dots\dots (3.1)$$

受信機は Δf を毎秒測定して積算する機能を有している。 Δf を $t=0$ から $t=t_1$ まで積算すると、式 (3.1) から

$$\int_0^{t_1} \Delta f dt = (f/c) \int_0^{t_1} v dt = \frac{1}{\lambda} \{x(t_1) - x(0)\} \quad \dots\dots (3.2)$$

講 座

ここで、 $x(0), x(t_1)$ は $t=0, t=t_1$ での受信機からみた衛星の位置であり、 λ は搬送波の波長である ($\lambda=c/f$ の関係がある)。式(3.2)の右辺は受信機と衛星間の距離の変化量を波長で除したもので、すなわち波数の変化量を表している²⁾。

③ 受信機時計と衛星時計の誤差

干渉測位用受信機では衛星からの搬送波を再生して受信機時計のタイミングに合わせて位相角を測定している。したがって、観測した位相角には受信機時計の誤差が含まれている。また、衛星からの搬送波到達のタイミングには衛星時計の誤差が含まれている。誤差の大きさは数ns (10^{-9} s)であり、電波の進む距離に直すと1m前後の誤差に相当する。単独測位では衛星時計の誤差は無視できたが、干渉測位では誤差として扱わねばならない。

(2) 距離測定と整数値バイアス

衛星から受信機までの距離は波数に波長を乗じて求める。受信機が最初に波を受信したとき、それが連続波のどの部分であるか波数の小数部はわかるが、この瞬間に衛星から受信機までの全体の波のうち観測した波数小数部を除いた整数部の波数は不明である。すなわち、最初の受信時 ($t=0$) では

観測距離 = (波数の整数部分 + 波数の小数部) × 波長
であり、続けて受信すると、波数の変化分は位相積算値として測定できるので時刻 $t=t_1$ では

観測距離 = (最初の波数の整数部分 + 最初の波数小数部 + 位相積算値) × 波長

となる (図-3.3)。波数の変化量は受信機で観測される位相積算値であり、衛星が受信機から遠ざかるときは位相積算値は増加し、近づくときは積算値は減少する。また、時間経過後も最初の波数の整数部分は未知のまま同じ値であり、これを整数値バイアスという。

観測距離から真の距離を求めるには、観測距離から時計誤差による距離誤差を引けばよい。すなわち、

真の距離 = 観測距離

− 受信機時計誤差 × 搬送波の伝搬速度

− 衛星時計誤差 × 搬送波の伝搬速度

(3) 差分観測による時計誤差の消去

干渉測位では受信機時計誤差、衛星時計誤差を消去するために、距離の差分をとる操作を行う。そのために受信機2台、衛星2個の組合せを基本に考える。既知点に設置した受信機Aの座標を (X_A, Y_A, Z_A) 、未知点に設置した受信機Bの座標を (X_B, Y_B, Z_B) として受信機Bの座標を求めることを考える。

いま、時刻 $t=t_1$ における衛星 i 、受信機 j 間の真の距離 $\rho(i; j)$ は、整数値バイアス $N(i; j)$ 、位相積算値 $\Phi(i; j)$ ($t=0$ での波数小数部を含む)、波長 λ 、受信機時計誤差 $\delta R(j)$ 、衛星時計誤差 $\delta S(i)$ 、搬送波の伝搬速度 c とすると、(2)での議論から

$$\rho(i; j) = \{N(i; j) + \Phi(i; j)\}\lambda - c\delta R(j) - c\delta S(i) \quad (3.3)$$

となる。

一方、 $\rho(i; j)$ は衛星と受信機の座標から次の式で表

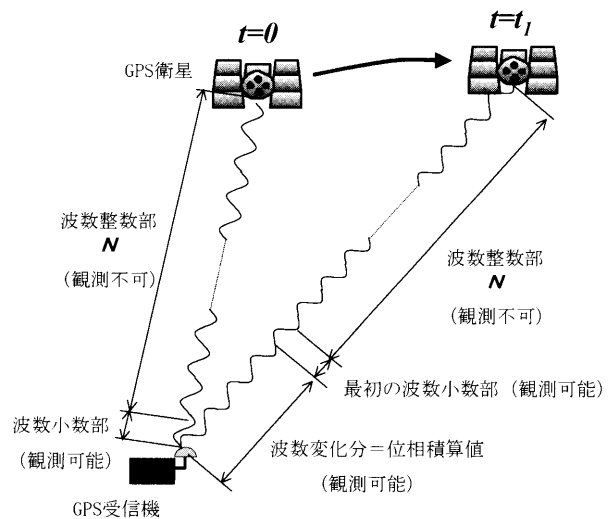


図-3.3 干渉測位用受信機による波数測定

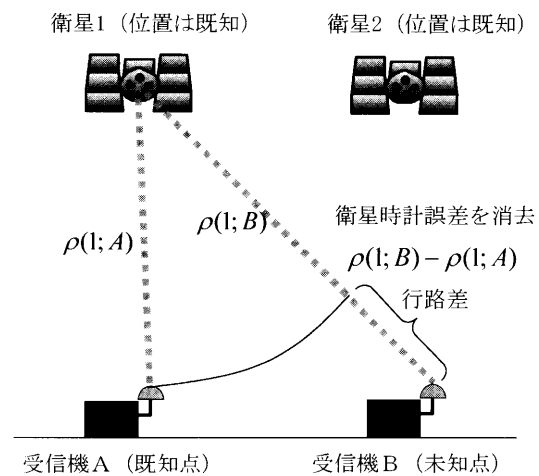


図-3.4 行路差と受信機間一重位相差

すことができる。

$$\rho(i; j) = \{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2\}^{1/2} \quad (3.4)$$

なお、任意の時刻における衛星1および衛星2の座標 (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) は航法メッセージの軌道情報から計算できる。

式(3.3)から衛星1、受信機Bとの距離から衛星1、受信機Aとの距離の差をとると衛星時計の誤差の項が消える。この距離の差を行路差と呼ぶ。このとき、位相積算値の差を受信機間一重位相差という (図-3.4)。

$$\rho(1; B) - \rho(1; A) = \{N(1; B) - N(1; A)\}\lambda + \{\Phi(1; B) - \Phi(1; A)\}\lambda - c\{\delta R(B) - \delta R(A)\} \quad (3.5)$$

同様に衛星2、受信機Bとの距離から衛星2、受信機Aとの距離の差をとり、その結果を式(3.5)から引くと受信機時計の誤差の項が消える。このとき、位相積算値の差の項を二重位相差という (図-3.5)。

$$\begin{aligned} & \rho(2; B) - \rho(2; A) - \rho(1; B) + \rho(1; A) \\ &= \{N(2; B) - N(2; A) - N(1; B) + N(1; A)\}\lambda \\ &+ \{\Phi(2; B) - \Phi(2; A) - \Phi(1; B) + \Phi(1; A)\}\lambda \end{aligned} \quad (3.6)$$

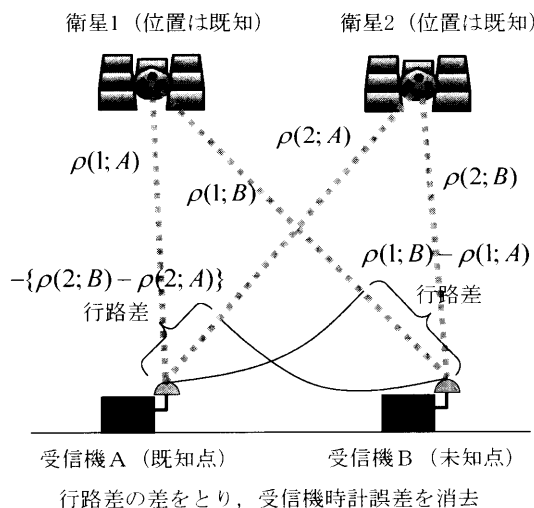


図-3.5 行路差の差と二重位相差

式(3.6)は行路差の差であり、受信機時計の誤差と衛星時計の誤差の項を消去した式となっている。

(4) 二重位相差による未知点座標の計算

式(3.6)をみると左辺は $\rho(1; A)$, $\rho(2; A)$ は既知であり、未知数は、 $\rho(2; B) - \rho(1; B)$ の項に含まれる受信機 B の三次元座標 X_2, Y_2, Z_2 の 3 個となる。一方、右辺は整数値バイアスの項と位相積算値の項である。整数値バイアスの項は別途計算するとすると、位相積算値の項は観測値であり既知である。したがって、式(3.6)には 3 個の未知数が含まれている。

3 個の未知数を解くためには、式(3.6)で示される二重位相差の方程式を 3 個以上つくる必要がある。観測する衛星数を n とすると線形独立な二重位相差の式は $n - 1$ 個となる。よって、3 個の未知数を解くためには 4 個以上の衛星から電波を受信する必要がある。これは単独測位で必要とする衛星数と一致する (図-3.6)。

(5) 整数値バイアスの推定と解の種類

整数値バイアスの値は全くの未知というわけではなく、ディファレンシャル測位 (Differential GPS: DGPS, 2.5.4 参照) による観測距離からある程度絞り込まれる。DGPS による観測距離は精度 0.5 m 程度で求めることができる。L1 波の 1 波長は約 0.19 m であるから、整数値バイアスの候補は DGPS の観測距離から求まる N に対して例えば ± 3 の範囲に絞り込まれる。その組合せ毎に式(3.6)を最小二乗法によって計算し、残差が最小となる組合せをバイアスの組合せとして決定する。その際、推定したバイアス値に対して統計的な検証を行う。検証結果が良好であればバイアスは整数値として確定するが、良好でなければバイアスは実数値のままである。

整数値バイアスの組合せが確定すれば、式(3.6)から受信機 B の三次元座標が計算される。バイアス値が整数値として確定した場合の解を厳密解 (フィックス解) と呼び、バイアス値が実数値の場合の解を非厳密解 (フロート解) と呼ぶ。フロート解となるのは観測時間が短い (観測データセットが少ない) 場合や衛星電波の受信が頻繁に中断した場合など、観測条件が十分でなかった

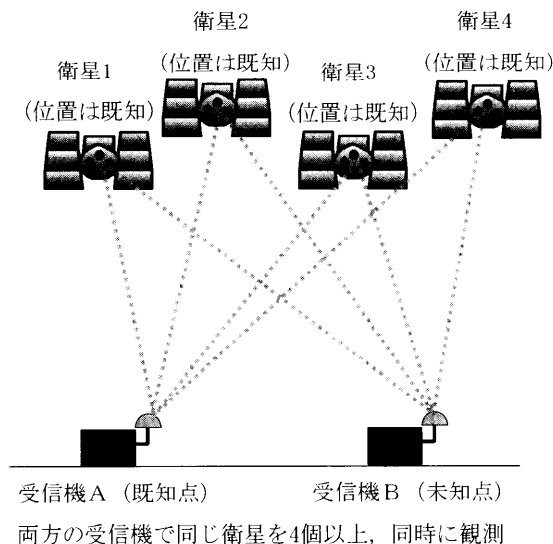


図-3.6 未知点座標の測定方法

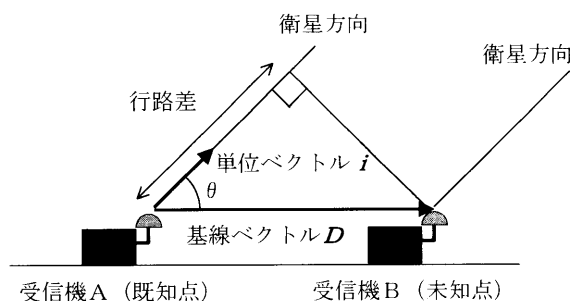


図-3.7 行路差と基線ベクトル

ことに起因する。フィックス解の精度は 5~20 mm 程度であるが、フロート解の精度は十 cm~数 m になる。

3.2.2 行路差と基線ベクトル

干渉測位の原理は行路差と基線ベクトルとの関係からも説明できる。受信機 A から受信機 B への基線ベクトルを D 、受信機 A から衛星方向への単位ベクトルを i とすると行路差 PD (Path Difference) は、

$$PD = D \cdot i + 0(D \cdot i) \quad (3.7)$$

で表される (図-3.7)。 D と i のなす角を θ とすると、

$$D \cdot i = |D| \cdot 1 \cdot \cos \theta \quad (3.8)$$

である。これは基線ベクトル D を衛星の視線方向に投影した長さであり、A, B から衛星までの距離の差 (行路差) に等しくなる。 $0(D \cdot i)$ は衛星までの距離が有限であるために受信機 A からの衛星方向と受信機 B からの衛星方向がわずかに異なるための補正項であり、基線距離が短い場合はほとんど 0 に近い³⁾。

一方、基線ベクトル D と単位ベクトル i をベクトル成分で表すと、

$$D = (X_B - X_A, Y_B - Y_A, Z_B - Z_A) \quad (3.9)$$

$$i = (\alpha, \beta, \gamma) \quad (3.10)$$

である。 (α, β, γ) は受信機 A から衛星方向への方向余弦 (A からみた衛星の相対座標を A から衛星までの距離で除したもの) の 3 成分であり、これらのベクトル成分は受信機 A と衛星の位置座標から計算される。

式(3.9)と式(3.10)から

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{i} = (X_B - X_A)\alpha + (Y_B - Y_A)\beta + (Z_B - Z_A)\gamma \quad (3.11)$$

式(3.7)と(3.11)から $0(\mathbf{D} \cdot \mathbf{i})$ を無視すると、

$$PD = (X_B - X_A)\alpha + (Y_B - Y_A)\beta + (Z_B - Z_A)\gamma \quad (3.12)$$

行路差 PD は観測量であり、式(3.12)から基線ベクトル $\mathbf{D}$ の3成分を求めるには独立な3個の PD があればよい。すなわち、3個の衛星観測で良いと考えられる。しかし、行路差 PD には、式(3.3)から受信機時計誤差が含まれているため、行路差同士の差分をとって受信機時計誤差を消去しなければならない。そのために4番目の衛星観測が必要となる。

3.2.3 干渉測位の種類と特徴

干渉測位には測位形態や整数値バイアス推定法に応じた次に示す三つの種類がある(表—3.1)。

(1) スタティック測位

三次元座標が既知の点と未知の点に受信機を固定して衛星電波の受信と記録を行い、既知点と未知点で同時に取得した位相積算値を用いて後処理で測位計算を行う方式である。通常は30秒あるいは15秒毎に位相積算値を記録する。観測終了後に既知点、未知点の観測データをパソコンに転送して、データ取得時毎に観測衛星の三次元座標計算と二重位相差の計算を行う。そして、式(3.6)から最小二乗法により測位計算を行い未知点の座標を計算する。なお、受信機でのデータ取得時をエポックと呼び、データ取得間隔をエポック間隔という。

整数値バイアスの推定は、衛星の移動を利用して行う。図—3.8に示すように整数値バイアスの組合せ毎の未知点座標の候補は、 $L1$ 波長0.19 m 毎の立体格子点でイメージされる。真の未知点座標は、衛星が移動しても動かない(不動点)という性質を使って、整数値バイアス組合せと未知点座標の決定を行う。この方式では衛星が十分移動する必要がある、通常60分程度の衛星観測をとる。長時間の観測データが平均化されるため、測位精度は最も高い。基線計測精度は $L1$ 波、 $L2$ 波を受信する2周波受信機の場合、 $5\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \cdot D$ (D は基線長) である。

(2) キネマティック測位

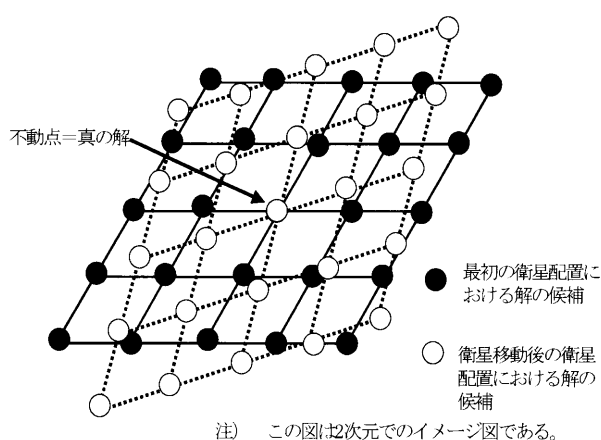
既知点に基準局の受信機を固定し、利用者の受信機は移動局として移動しながら順次位相積算値データを取得し、後処理で基準局と移動局のデータを用いて測位計算を行う方式である。

整数値バイアスの推定はスタティック測位のような長時間の観測を要する衛星の移動を利用する方法はとれないため、移動局が既知点から出発する方法が主に用いられる。既知点で観測を行うと式(3.6)において二重位相差の項は観測データから計算され、距離の項は衛星の位置、受信機の位置が既知であるから計算される。よって整数値バイアスの項は式(3.6)から値が決定することになり、以降は整数値バイアスの組合せの値を固定して処理すればよい。

(3) リアルタイムキネマティック測位

表—3.1 干渉測位の各種方式

方 式 項目	スタティ ック測位	キネマティ ック測位	リアルタイ ムキネマティ ック測位
処理方式	後処理	後処理	実時間処理
観測時間	60分以上	1秒(標準)	1秒(標準)
受信機種別	1周波受信機 2周波受信機	1周波受信機 2周波受信機	2周波受信機
基線計測精度	5mm + $1 \times 10^{-6} \cdot D$ (D : 基線長)	20mm + $2 \times 10^{-6} \cdot D$ (D : 基線長)	20mm + $2 \times 10^{-6} \cdot D$ D : 基線長)
整数値バイ アス決定方 法	衛星移動利用	既知点法	既知点法 オンザフライ 法(OTF)



図—3.8 整数値バイアスの探索

RTK-GPS (Real time Kinematic GPS) と呼ばれる実時間でキネマティック測位を行う方式である。基準局はその観測した位相積算値データを通信システムを介して移動局へ伝送する。移動局ではそのデータを利用し、リアルタイムに移動局の測位計算を行い結果を出力する。整数値バイアスの推定は任意の場所で移動しながら行えるオンザフライ (OTF: on the fly) 法が主に用いられる。

3.3 RTK-GPS

3.3.1 システム構成

GPS 受信機は $L1$ 波、 $L2$ 波の両波を受信できる2周波受信機を用いる。三次元座標既知点に設置する基準局受信機と計測用である移動局受信機の2台を基本構成とする。基準局から移動局に対する通信システムを両局に備え、基準局から基準局座標と基準局で受信した全衛星に関する搬送波位相積算値および擬似距離のデータを送信する。移動局は基準局からのデータを受けてリアルタイムに連続して基線計算を行い、測位結果を出力する。出力結果はハンディターミナルや携帯パソコンで表示記録される(図—3.9)。通信システムとしては、主に免許が不要な特定小電力無線や携帯電話などが用いられる。

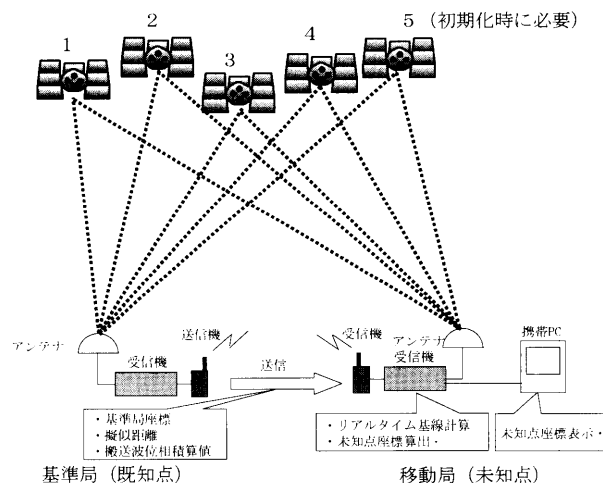


図-3.9 RTK-GPS のシステム構成

3.3.2 オンザフライ法

オンザフライ（OTF: on the fly）とは、移動局のいかなる運動形態（静止、移動）にも対応できるという意味であり、任意の場所で移動しながらでも短時間（数秒～数分）で整数値バイアスを解く方法の総称である。

(1) OTF の意義

OTF 以前の RTK-GPS では既知点法で初期化操作を行っていたため、適用範囲が大幅に制限されていた。例えば、RTK-GPS を実行中に捕捉衛星数が4個未満になると高精度な厳密解（フィックス解）が失われ非厳密解（フロート解）になってしまうため、その都度、既知点に戻って再初期化をする必要があった。したがって障害物により衛星受信中断が頻繁に発生する環境では、操作性が甚だしく劣っていた。

ところが、OTF の実現により衛星受信中断が発生しフィックス解が失われても、任意の場所で短時間での再初期化が可能となった。また高速移動中でも初期化ができるなど、RTK-GPS の操作性は大幅に向上し適用範囲は飛躍的に増大した。したがって、OTF はいまや RTK-GPS を適用する上で必要不可欠な技術となっている。

(2) OTF の要件

① 初期化には5個以上の衛星観測が必要

OTF では最小二乗法を用いて整数値バイアスを推定する際、スタティック測位のように長時間の衛星観測によってエポック数を多くとるわけにはいかないため、観測する衛星数を増やして処理を行う。すなわち、最低でも5衛星以上を観測する必要がある。これは、最小二乗法の適用に当たって未知数の数より観測方程式の数が多くなければならないという条件による。

② 2周波受信機が必要

L1波（波長約0.19 m）とL2波（波長約0.24 m）の位相差をとって生成されるワイドレーン（波長約0.86 m）を用いれば、整数値バイアスの探索空間を小さく絞り込み探索時間を劇的に削減できる。多くの OTF 手法ではワイドレーンを採用している。

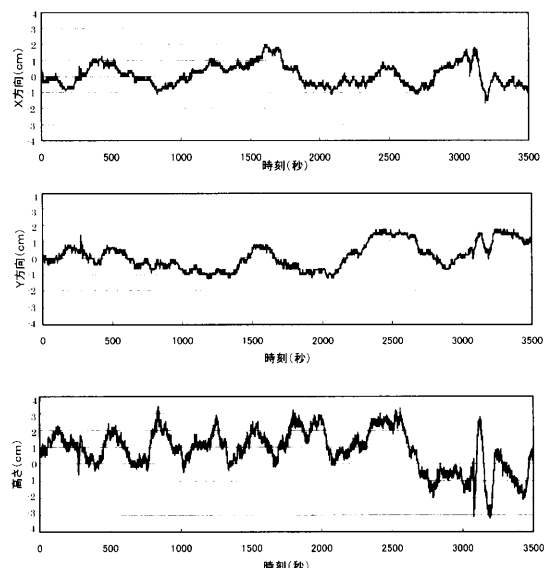
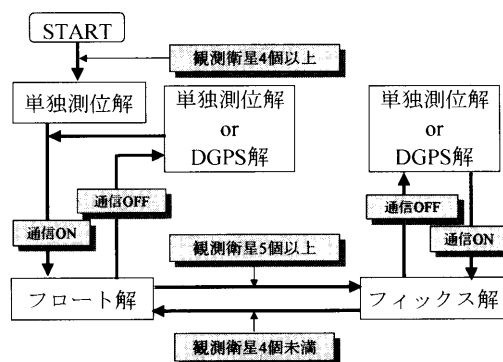


図-3.10 RTK-GPS データの時間変動の例

図-3.11 RTK-GPS 測位の状態と解のタイプ⁴⁾

3.3.3 RTK-GPS の特徴

(1) 測位解の種類と精度

整数値バイアスが確定した厳密解（フィックス解）の基線計測精度は表-3.1に示すように $20 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} \cdot D$ で表されるが、水平方向と垂直方向では精度が大きく異なる。垂直方向には水平方向に比較して2～3倍の誤差が発生する。固定して観測していても、電離層の変動やマルチパスによる影響を受けて解の値は常に変動する（図-3.10）。一方、受信機からは次に示す測位の状態に応じて、フロート解、DGPS 解、単独測位解が出力される。各々の精度の目安は、フロート解（十 cm～数 m）、DGPS 解（数十 cm～数 m）、単独測位解（10～15 m）である。

(2) 測位の状態と解のタイプ

RTK-GPS の測位解のタイプは観測衛星数と基準局からの通信の有無、そして整数値バイアスの確定・不確定の組合せに依存する（図-3.11）。衛星数が5個以上の安定した測位条件で考えてみよう。まず、基準局からの通信がつかないとフロート解となる。その後 OTF 機能によって整数値バイアスの決定処理がはじまり（5個以上の衛星受信が必要）、バイアスが決定（初期化が終了）するとフィックス解となる。ここで、観測衛星数が4個未満となるとフィックス解が失われ、フロート解と

講座

なる（5個以上の衛星受信をすれば再びフィックス解となる）。しかし、フィックス解の状態で通信が途絶すると単独測位解または DGPS 解となる（どちらになるかは受信機の機能と設定による）。そして、通信が再びつながるとフィックス解に戻るのである。

3.4 GPS 測量

GPS の干渉測位方式を用いた測量を GPS 測量という。図—3.12 に示すように基準点（既知点）から計測点（未知点）までの基線ベクトルを求めることが基本となる。GPS 測量にはスタティック測位による基準点測量やキネマティック測位による応用測量などがある。GPS 測量に関して基本的な事項を以下に示す。

3.4.1 GPS 測量の特徴

GPS 測量は、光波測距儀と経緯儀を組合わせたトータルステーションと同様に計測点の三次元座標を同時に計測できる。トータルステーションなどの従来の光学測量方式と比較すると GPS 測量は次の特徴を有している。

- ① 光学測量で角度や距離の観測を行う場合、測点間の視通が必要であるが、GPS 測量では測点間の視通は必要ない。ただし、測点上に設置する受信機では共通の衛星を4個以上観測する必要がある。
- ② 光学測量では観測が天候に左右されるが、GPS 測量では天候にはほとんど左右されない。ただし、衛星が運動しているため、観測時間帯や観測地点の周辺地形や障害物の状況によって観測可能衛星数が4個以下になる場合は観測不能となる。
- ③ 光学測量と GPS 測量では高さの基準が異なる。光学測量ではジオイド面からの高さである標高を用いるが、GPS 測量で得られる高さは準拠楕円体からの高さである楕円体高である（3.4.4 で説明する）。

3.4.2 観測計画

(1) 衛星観測条件の確認

干渉測位を行うためには、少なくとも4個以上の GPS 衛星から連続して電波を受信することが必要である。4個以上衛星を受信できる時間帯を見つけるには、観測計画ソフトと軌道情報が必要になる。測量用 GPS 受信機の基線解析ソフトウェアには、必ず観測計画立案のためのプログラムが付属している。また、軌道情報は

衛星電波を受信すると受信機のメモリーに記録されるので、それを利用すればよい。観測日と場所が決まったらこのプログラムと軌道情報により、観測する衛星番号や上空の配置、時間帯毎の観測可能衛星数等を確認し、最も条件の良い時間帯で観測計画を立てるようにする。

(2) 観測点の選点

GPS による観測の要諦はいかに衛星を安定して観測できる場所、時間帯を選定するかにある。その意味で選点は極めて重要であるが、従来の測量とは考え方が大きく異なる。GPS の場合に考慮する主な条件は、

- ・上空視界が確保できること
- ・GPS 受信障害となるような外来雑音電波の少ないこと（電波塔の近傍等は避ける）
- ・同時観測する他の測点の状況を考慮すること

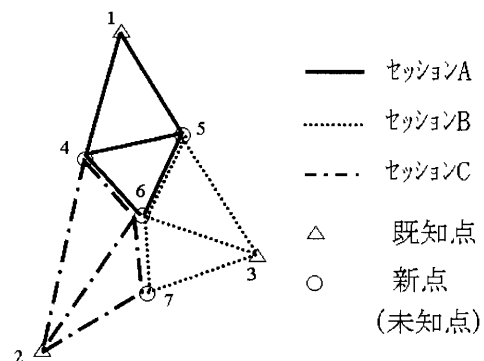
である。

(3) セッション計画

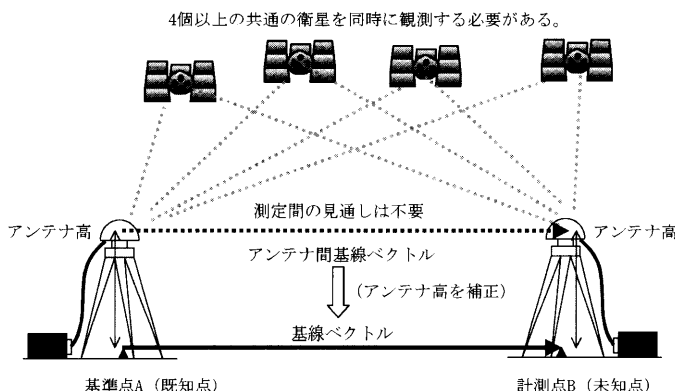
スタティック測位による基準点測量において、複数の GPS 受信機で同時に行う観測をセッションと呼ぶ。基準点測量では既知点と新点（未知点）に GPS 受信機を設置して同時に衛星電波受信を行い、二重位相差を用いた基線解析により基線ベクトルを計算して新点の座標を求める。この場合、GPS 受信機の台数は2台に限らず、3台以上でも可能である。したがって、観測する基準点網と GPS 受信機の台数に応じてセッションの数や観測時間帯を計画しなければならない。図—3.13 は観測網とセッション計画の例である。

3.4.3 測地系

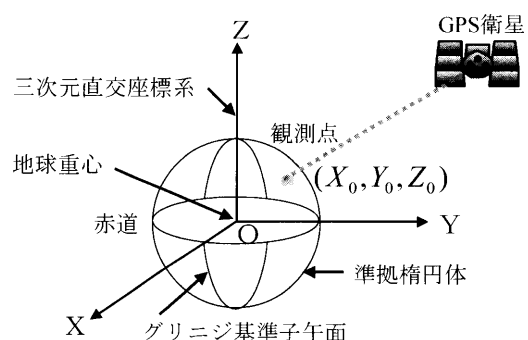
GPS は WGS84 という座標系と楕円体を基準として



図—3.13 観測網とセッションの例



図—3.12 GPS 測量の基本形



図—3.14 三次元直交座標系

いる。WGS84 座標系は地球重心を原点とした三次元直交座標系であり、地球の自転軸方向を Z 軸、グリニジ基準子午線と赤道が交わる方向を X 軸、これらと右手系をなすように Y 軸をとる（図—3.12）。衛星や受信機の位置はこの座標系 (X, Y, Z) で記述される。三次元座標は WGS84 楕円体を準拠楕円体として緯度、経度、楕円体高に換算される。

楕円体は赤道半径 a と偏平率 f で定義される。

偏平率 f は

$$f = (a - b) / a \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

で表される。ただし、 b は短軸の長さである。表—3.2 に主な楕円体の定数を示す。

我が国では改正測量法の施行前は、明治時代に当時の東京天文台の緯度・経度が天文観測によって決定され、日本経緯度原点となった。楕円体としてはベッセル楕円体を使用していた。この測地系を「日本測地系」と呼んでいる。

平成13年6月20日に測量法が改正され、平成14年4月1日から世界測地系 ITRF94 (International Terrestrial Reference Frame 1994) と GRS80 (Geodetic Reference System) 楕円体が採用され、公共的な測量成果はすべてこの座標系に準拠する。GPS で使用する WGS84 座標系と WGS84 楕円体は ITRF94 座標系と GRS80 楕円体と各々実用上はほぼ同じと考えて良い。

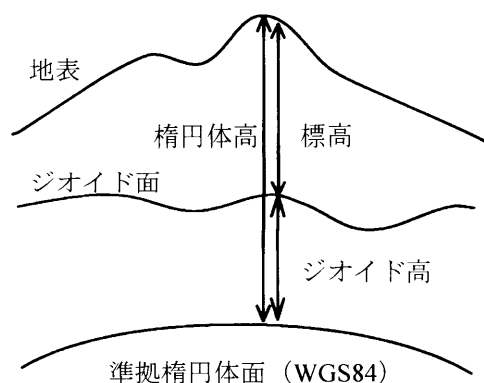
3.4.4 高さの基準

GPS による測位によって最初に出力される位置座標は地球重心を原点とする三次元直交座標系での座標 (X, Y, Z) であり、その値を WGS84 楕円体上の緯度、経度、高さに変換している。したがって、GPS から得られる高さは WGS84 楕円体面からの高さである楕円体高である。

一方、水準測量で得られる高さである標高はジオイド (geoid) 面を基準とする高さである。ジオイドとは地球

表—3.2 主な楕円体の定数

楕円体	赤道半径 a (m)	逆偏平率 $1/f$
WGS84	6378137	298.257223563
GRS80	6378137	298.257222101
ベッセル	6377397.155	299.1528128



図—3.15 標高、楕円体高、ジオイド高の関係⁵⁾

重力の等ポテンシャル面のうち平均海面に一致するものである。ジオイド面はこの楕円体面とは一致しない。楕円体からジオイドまでの高さをジオイド高という。GPS で観測した高さ (楕円体高) は従来の水準測量 (標高) とは一致せず、ジオイド高を補正する必要がある。楕円体高と標高、ジオイド高の間には、楕円体高 = 標高 + ジオイド高の関係がある (図—3.15)。なお、日本国内における任意の位置におけるジオイド高は国土地理院によって整備されたジオイドモデルによって推定できる。

3.5 GPS 関連のインフラストラクチャ

3.5.1 電子基準点

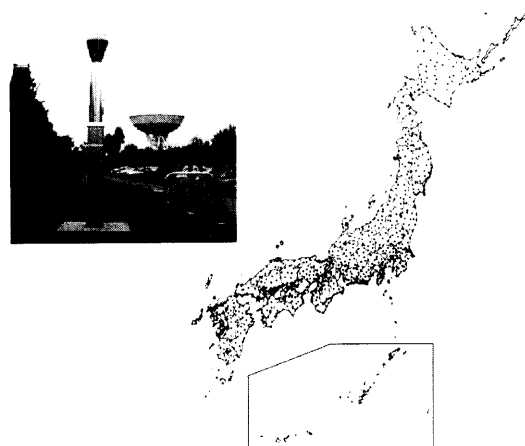
電子基準点とは国土地理院が全国に約1200点配備している GPS 連続観測局である。GPS 電波を連続して受信している電子的な基準点であり、基本測量や公共測量に利用される。また、連続観測によって地殻の変動検出、地震および火山活動の監視に利用されている (図—3.16)。

電子基準点の出現は GPS 測量の方法を大きく変えた。GPS 観測による従来の基準点測量では、既知点である基準点と未知点である新点との双方に GPS 受信機を設置して観測する必要があった。しかし、電子基準点を利用すれば新点 (未知点) に GPS 受信機を設置して観測するだけで基準点測量を実施できる。電子基準点は連続して観測を行っているため、該当する時間帯の電子基準点の観測データをインターネット等で入手して基線解析を行えばよい。

さらに、RTK-GPS も電子基準点を基準局として実施できる。これは後述するネットワーク型 RTK-GPS と呼ばれるものであり、電子基準点の観測データは配信機関を通じてリアルタイムに配信されている。利用者は携帯電話等でこのデータを受信すれば移動局の GPS 受信機を用意するだけで RTK-GPS による測量が可能である。

3.5.2 ネットワーク型 RTK-GPS

RTK-GPS では基準局からの移動局までの距離が十数 km を超えるような長い場合、初期化に要する時間が



図—3.16 電子基準点と配置状況⁶⁾

講 座

通常より長くなる、測位誤差が大きくなるなどの現象が生じる。これは基準局と移動局の間の距離が大きくなると、各々の上空での電離層や対流圏の状態の差が無視できない量となることに起因する。電子基準点の間隔は、20～30 km であるので、電子基準点を基準局とする RTK-GPS では安定した測位ができない場合が出てくる。

そこで、近年、複数の電子基準点での GPS 観測データを処理することにより、それらの電子基準点で囲まれる領域の電離層遅延等の補正を行ったデータを提供して、領域内であれば安定した測位を実現する技術が開発され、運用されている。これをネットワーク型 RTK-GPS と呼んでいる。

ネットワーク型 RTK-GPS の概略の仕組みは次のとおりである。図—3.17 に示すように実基準点 3 点で囲まれた領域内に移動局があり、その近傍に仮想基準点 V を考える。V の位置は移動局が単独測位によって測定した値をとることが多い。仮にこの仮想基準点に本当の基準点が置かれていたとした時、その受信機によって測定されるであろう観測量（図—3.17 では ϕ で表示）を、周辺の複数の実基準点による観測量から推定して観測量を作成し、移動局へ放送して基線解析を行う方式である。仮想観測量としては、受信した各衛星電波の L1 波、L2 波の搬送波位相積算値と擬似距離（2.4.1 参照）であり、これらは電離層と対流圏における電波遅延に対して線形補間（通常は 1 次補間）を行った値である。ネットワーク型 RTK-GPS にはいくつか方式があるが、ここでは VRS 方式と FKP 方式について説明する。

(1) VRS 方式

VRS (Virtual Reference Station) 方式では、次の手順で RTK-GPS を行う（図—3.18）。

①各基準点を結んだ計算センターで連続観測量をリアルタイムに収集する。②移動局で携帯電話により単独測位による概略位置 (V) をセンターに送信する。③計算センターでその位置 (V) に対応した仮想観測量を作成する。④移動局で携帯電話により仮想基準点の位置、各仮想観測量を受信する。⑤これらのデータを GPS 受信機に取込んで干渉測位計算を実施する。

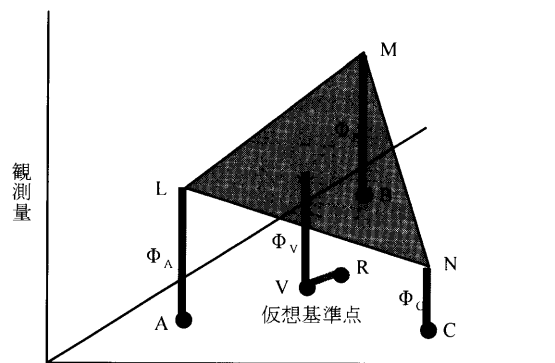
このように、VRS 方式では移動局と計算センターとの間で双方向の通信システムが必要となる。

(2) FKP 方式

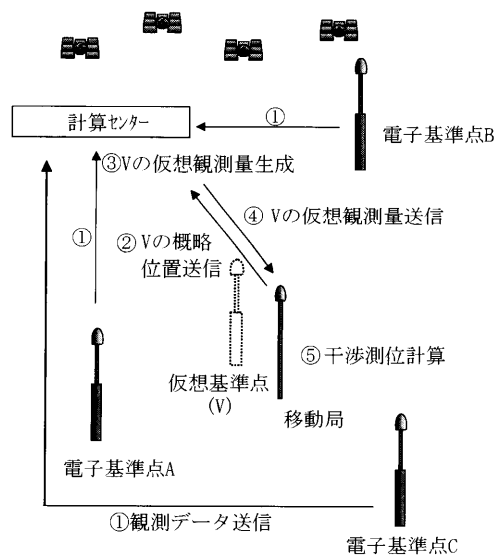
FKP (Flachen Korrektur Parameter) 方式は、仮想基準点 (V) での仮想観測量を作成するための面パラメータを周辺の基準点の観測データから計算センター側で生成して移動局に送り、移動局はその面パラメータを用いて仮想観測量を作成する方式である。面パラメータとは図—3.17 の LMN の面を定義するパラメータである。FKP 方式では、計算センターと移動局間は片道通信でよく、放送形式をとることもできる。

3.6 おわりに

本稿では GPS で最も精度の高い測位手法である干渉



図—3.17 仮想観測量の原理⁷⁾



図—3.18 VRS 方式のしくみ

測位について説明した。干渉測位の原理については詳細な理論は省き、要点のみを極力平易に記述したつもりであるが、わかりにくかったとすればご容赦願いたい。

干渉測位はスタティック測位による基準点測量や RTK-GPS による各種計測、機械制御に利用されている。次回以降の講座では、GPS を利用した情報化施工について説明していくが、主としてこの干渉測位を利用したシステムを扱うこととなる。干渉測位は単独測位に比較し原理も複雑で実務上の制約も多い。施工や測量での利用に当たっては、こうした干渉測位の特徴をよく理解した上で活用法を検討すべきであろう。

参 考 文 献

- 1) 日本測量機器工業会編：最新測量機器便覧，山海堂，pp. 179～185, 2003.
- 2) 土屋 淳・辻 宏道：新・GPS 測量の基礎，日本測量協会，pp. 142～146, 2002.
- 3) 土屋 淳・辻 宏道：新・GPS 測量の基礎，日本測量協会，pp. 130～131, 2002.
- 4) 佐田達典：GPS 基礎講座—共通フォーマット—，測量，pp. 27～30, 2001.
- 5) 重松文治・佐田達典：GPS の解説，GPS フロンティア，日本測量協会，pp. 11～22, 2004.
- 6) 国土地理院ホームページ，<http://gsi.go.jp/>
- 7) 西修二郎・今給黎哲郎・土屋 淳：VRS 方式によるリアルタイム測位，測量，pp. 13～20, 2001.