

GPSの利用 (日食観測の必需品)

連載第1回 GPSの原理(その1)

丹羽 誠

1. はじめに

みなさん、GPSと聞くと何を思い浮かべるでしょうか?。聞いたこともないよと答える人もみえるかと思いますが、カーナビと言えばわかると思います。GPSもカーナビの普及とともにかなり一般的なものに最近はなってきたようです。

GPS(Global Positioning System)とは一言で言ってしまえば、地球上で自分が今どこにいるかを知るための道具です。GPSは米国防総省が元々は軍事目的で開発されたものです。GPS衛星と呼ばれる人工衛星からの電波を地上のGPS受信機で受けて、今自分がどこにいるかを知ることができます。ですから、電波の受けられない地下や、天空の開けていない谷間などではGPSの利用は困難です。

日食の観測との関係は、この日食情報をざらんにしている方ならすでにご存じでしょう。日食を追いかけて、地の果てまでも出かけていく時に、観測地の正確な緯度経度の情報がなければ、正確な接触時刻を計算することができません。観測地の精度のよい地図があればいいのですが、通常我々が遠征する観測地は、そのほとんどが地図情報もほとんどないところだと思っています。

GPSが登場するまでは、観測地の正確な緯度経度を知るためには天測などにたよるしかありませんでした。これは誰にでも手軽にできるものではありませんでした。

この記事ではGPSを日食観測(天体観測)を応用するに当たっての、原理から実践までを順を追って説明していきたいと思います。

まず、最初は少々難解かつ面白味に欠けますが、GPSの原理からです。

2. GPSの原理

この章では、基本となるGPSの原理について説明します。普段はブラックボックスとして全く中身のわからないGPSですが、その中身は驚くようなハイテク技術の塊なのです。その原理を垣間見ることによってGPSの性質を理解できれば、普段からの使い勝手も向上するはずです。

2.1 GPSの利用形態

まず、GPSがどんな使われ方をしているか簡単にまとめます。我々が普段利用しているハンディGPSやカーナビ用のGPSの使い方は、GPS受信機を一個単独で利用することがほとんどです。これを単独測位と呼んでいます。この他にもGPSは色々な方法・用途で用いられています。この単独測位を含めて、GPSの利用形態は次のように分類できます。

①単独測位

- a. C/Aコード利用 精度 100m
- b. P (Y) コード利用 精度 16m (軍事利用で一般には利用不可能)

②相対測位

- a. デイファレンシャルGPS (DGPS、トランスロケーション)
 - ・複数点での単独測位 (座標の差) による補正 精度数 ~ 数 10m
 - ・疑似距離誤差による補正 精度数 m
 - ・搬送波併用 精度数 10cm ~ 1m
- b. 干渉測位
 - ・静的干渉測位 (スタティック測位) 精度 1 ~ 2cm
 - ・キネマティック測位 精度 1 ~ 3cm

③時刻同期 同期精度 100ns

この中で①単独測位と②相対測位が位置を知るための手段です。相対測位は単独測位より測位精度を向上させる目的で利用されます。2個以上のGPS受信機で同時に電波を受信し、お互いの相対的な位置関係を求めることによって精度を向上させます。相対測位の総称をDGPSと呼ぶこともあります。ここではDGPSは次の干渉測位と区別して用います。DGPS (デイファレンシャルGPS) と一般に呼ばれている技術は、アメリカなどでは既に一般に利用できるようになっており、日本でもVICIS等での利用が期待されています。② b の干渉測位はGPS測量の分野で用いられている方法です。

③時刻同期は、GPSを超高精度の時計として利用する技術です。時計としての精度は、普段我々が利用できるものの中では、最も高精度です。これはGPS衛星に搭載されている原子時計により可能となっています。この 100ns という精度が接触観測の精度を一気に向上させることが可能です。

GPSで使用されているデータは上記のような利用形態によって異なるが、すべてに共通するデータがあります。それは、GPS衛星までの距離と、衛星が今どこにいるかという位置情報です。この基本となるデータは、衛星からの電波を受けることによって知ることができます。その他にも衛星からは色々な情報を送ってくるが、これを航法メッセージといって、受信機で解読されます。

2.2 GPSのシステム

GPS (Global Positioning System) はその名の通りシステムです。GPSのシステムは、

- ・宇宙部分 (space segment) GPS衛星
- ・制御部分 (control segment) 地上の追跡・管制局
- ・利用者部分 (user segment) 利用者のGPS受信機

の3部から構成されています。それぞれのシステムの概略を如何に述べます。

(1) 宇宙部分

宇宙部分にあたるGPS衛星(図2.1)は、NAVSTAR、GPSといった通称で呼ばれています。GPS衛星は、高度約20,000km(軌道半径約26,600km)の6つの円軌道上に4個ずつ、合計24個(予備機を含

図2.1 NAVSTAR/GPS 衛星

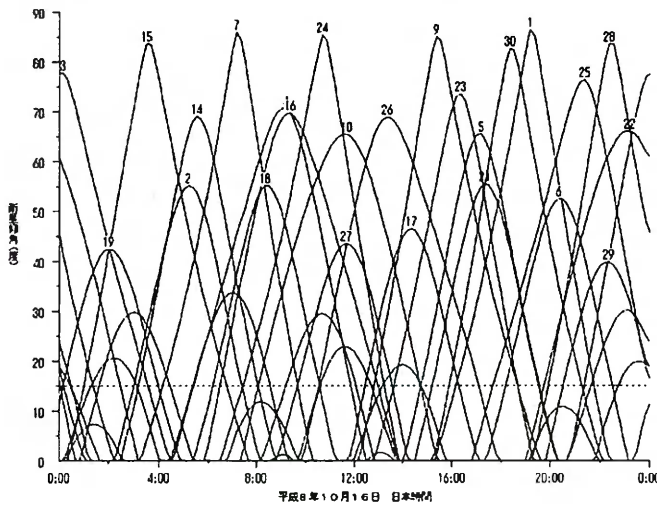
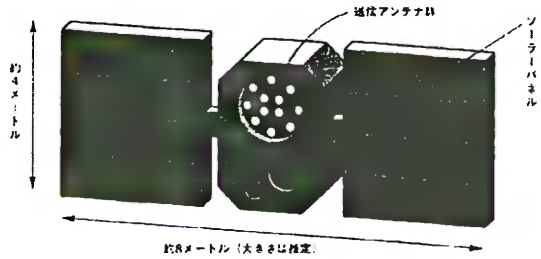


図2.2a 1996年10月16日の東京における衛星の仰角

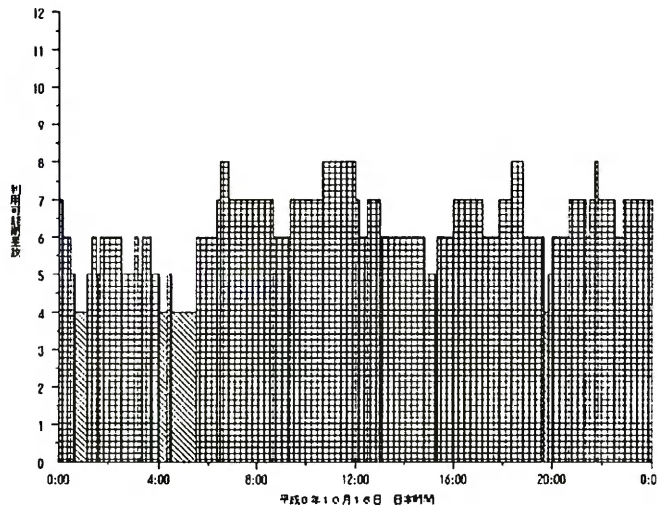
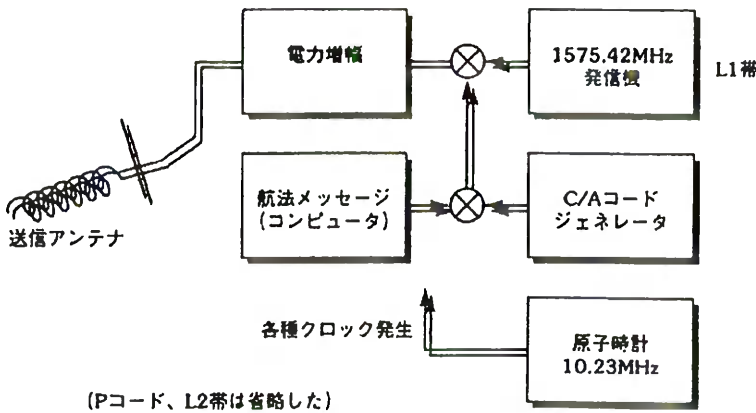


図2.2b 1996年10月16日の東京における利用可能衛星数(仰角15度以上)

めると1996年10月現在26個)が配置されています。衛星は、0.5恒星日(約11時間58分)で地球を一周します。GPS衛星は実験機(ブロックI)と実用機(ブロックII)と呼ばれる2種類がありますが、現在はブロックIIのみでの運用となっています。現在のこの配置になってからは、地球上のどの位置でも、常時、測位に必要な4個以上の衛星が見えるようになっています。図2.2a~bは1996年10月16日の東京での衛星の見え方です。

図2.3はGPS衛星の信号発生のプロックダイアグラムです。それぞれの衛星は測位のためにL1帯(1575.42MHz)とL2帯(1227.6MHz)の電波を送信しています。この周波数はすべての衛星に共通で、衛

図2.3 GPS信号発生ブロックダイアグラム



星の識別にはC/Aコード、もしくはPコードというデジタル符号によって行われています。

衛星から発信されるデータの基準となる部分には、基準発信器としてセシウム原子時計とそれより若干精度の落ちるルビジウム原子時計が利用されています。

正常なときはセシウム原子時計が、これに不具合を生じたときにはバックアップのルビジウム原子時計に変えられます。これら基準発信器の発信周波数は 10.23MHz となっており、一見中途半端に見える周波数ですがC/Aコードのコード長 (2^{10-1}) をベースに決められています。

(2) 制御部分

制御部分では、GPS衛星の軌道追跡を行って、衛星を制御し、GPSの運用管理を司る。これらの制御局は、コロラドスプリングスの主制御局と、他に無人の追跡・制御局の4箇所から構成されています。衛星を制御する上で最も重要なのは、地上からの観測から得られた正確な軌道情報を、衛星に送ることです。GPS受信機はこれを航法メッセージとして受け取り、衛星の位置の計算に使われます。この情報は通常2時間毎に更新され、エフェメリス (ephemeris)、放送歴などと呼ばれています。なぜ、わずか2時間毎に情報を更新するかというと、衛星の軌道が完全な楕円軌道でなく、外乱によってふらつきながら飛行していますためです。その他、衛星の軌道修正や点検をこの制御部分で行っています。

(3) 利用者部分

普段我々が直接接触していますGPS受信機です。GPS受信機にも単独測位用、DGPS用、測量用と色々ありますが、共通しているのは複数の衛星を同時に受信して、それぞれの衛星の信号を同時に処理するという点です。測量用のGPSでは、単独測位用のGPSに加えて位相カウンターというものを持っている点が大きな特徴です。

2.3 GPSの電波

GPS衛星は測位に必要な情報と信号を電波に乗せて常時発信しています。この信号のしくみはきわめて複雑であり、GPSの中でももっともわかりにくい部分です。電波それ自体は情報は持っておらず、一般に情報伝達の手段という意味で搬送波 (carrier) と呼ばれています。GPS

ではこの搬送波は2つあって、それぞれL1帯、L2帯と呼ばれています。一般に利用されているのはL1帯です。このL1帯にはC/Aコードと航法メッセージ、さらにPコードが乗っています。

(1) スペクトラム拡散変調

GPSに用いられる電波の周波数はL1帯で 1575.42MHz、占有帯域にして 2.046MHz もの範囲を使っています(図2.4)。この占有帯域の広さは、通常のトランシーバーの 15 ~ 25KHz に対して、

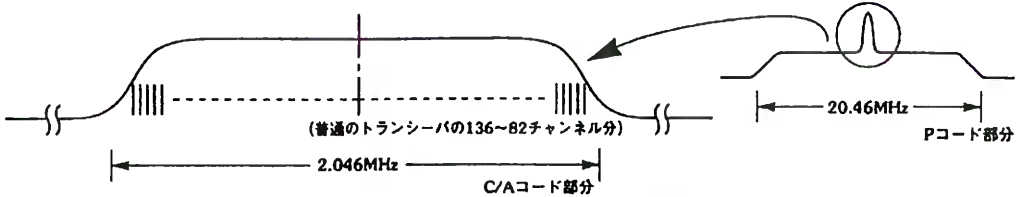


図2.4 GPSに使用する周波数

実に 136 ~ 82 チャンネル分にも相当します。いかにGPSの電波が広帯域を占有していますかわかります。

これはGPSに採用されています拡散スペクトラム変調 (SS : Spread Spectrum modulation) (図2.5) の特徴のひとつです。

この技術によりすべてのGPS衛星が同一周波数を同時に発信しても混信もなく情報を取り出すことが可能となったのです。これは、もともと軍事目的の電波使用時において、秘話性を得るために開発された技術です。この方式では、疑似雑音符号 (PRN : Pseudo Random Noise code) によって、原信号を広帯域に拡散して送信します。疑似雑音符号が一致しない限り、もとの信号を取り出すことはできないのです。

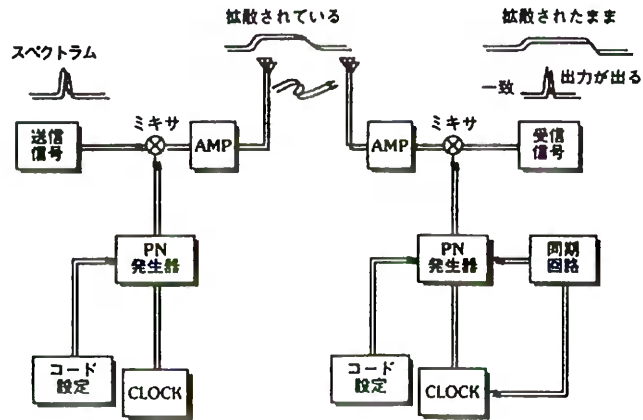


図2.5 SS方式の原理

GPS衛星では、PRNにC/A (clear and acquisition または coarse and access) コードとP (precision または protect) コードの2種類があります。Pコードは原則として軍事用であって一般には利用できません。C/Aコードでは、1023 チップ (繰り返し周期 : デジタルパターンの最小単位) に拡散されています。またC/Aコードのビット率 (チップ率) は 1.023Mbps (Mega bit per second) で、ちょうど 1msec の周期でC/Aコードは繰り返します。

SS方式の原理のポイントは、同期にあります。これには、次のようなたとえがあてはまるでしょう。平行する2つの軌道上を、2組の同一編成電車が同じ方向へ走るとします。まず最初に

片方が先に出発します。少し後でもう一台が、先に出発した電車を追い抜くように、やや速い速度で走ります。ふたつの電車が並んだ瞬間、同期がとれた状態ということになります（図2.6）。同期が確立した後は、外れないように口ツクして、情報の伝達を行うわけです。

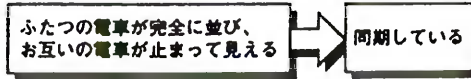


図2.6 同期の概念

この技術は、デジタル通信との相性が良く、チャンネル効率も良いなどの特徴も併せ持っています。このため、最近では携帯電話や無線LANなどの分野でも応用されています。

(2) 航法メッセージ

このC/A (P) コードに重ねて送られてくるのが航法メッセージです。航法メッセージには測位計算に必要な衛星の軌道情報などが含まれています。航法メッセージは、C/AコードやPコードに比べるとはるかに低いビット率の 50bps で送られてきます。

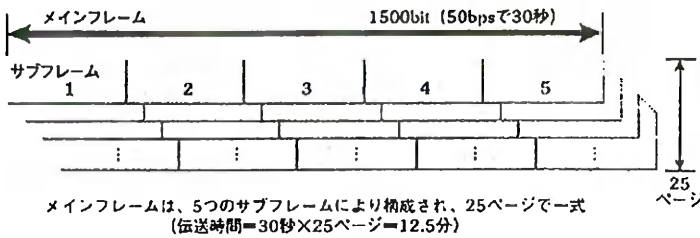


図2.7 航法メッセージのフォーマット

航法メッセージの構造は、300 ビットのサブフレーム5個で、メインフレームを形成して30秒ごとに繰り返されます（図2.7、表2.1）。メインフレーム毎にその衛星の軌道情報（ephemeris）が

サブフレーム No.	おもな内容	備考
1	時計補正情報、各種フラグ類	25ページ同一内容
2	軌道情報 (1)	
3	軌道情報 (2)	
4	衛星のアルマナック (#25~#32) ほか	ページごとで異なる
5	衛星のアルマナック (#1~#24) ほか	

表2.1 航法メッセージのサブフレームの内容

送られてきます。さらにメインフレーム25個で1マスターフレームとなり、もとの情報に戻ります。すなわち、1個の衛星から全ての情報を受けるには、12.5

分かることになります。メインフレームのサブフレーム No.4、5には自分自身の情報も含めた全衛星の概略軌道（アルマナック（almanac））が含まれています。このアルマナックは、他の衛星が大体どこにいますか（見えているか）を知るために使われています。

この他航法メッセージには、電離層補正計数や衛星の時計の補正值、衛星自身の動作状態を示すヘルス（health）などの情報が含まれています。

これらの情報は一度GPS受信機が解読すると、受信機のメモリーに蓄えられ、通常はバック

アップされて電源を切っても保存されます。このため、一度測位ができるようになったGPS受信機は、次に使うときは1分から数分で測位できるようになるのです（これをウォームスタートという）。逆に工場出荷時のように、GPSのメモリーが空の状態からの測位には時間がかかり、早くても数分、通常10分～20分程度の時間が必要です（これをコールドスタートという）。購入して初めてGPS受信機を使うときなどは、空のよく開けたところで、一晩くらい電源を入れっぱなしにして衛星からのデータを十分に蓄えておいた方がよいでしょう。

(3) SA (selective availability)

GPS衛星の情報そのものではありませんが、GPSが軍事目的で開発されたものですことがよくわかるのがこのSAです。これはL1帯のC/Aコードによる単独測位の精度を意図的に低下させる目的で操作されています。SAが発動（ON）のときの単独測位の精度は公称値の100m程度です。これが解除されると測位精度は約30mまで向上すると言われています。通常時はほとんどSAはONです。まれに有事の際にSAが解除されることがあると、単独測位の精度は先に述べたようになりに向上することがあるようです。

SAの操作は、C/Aコードに雑音をのせたり、航法メッセージの精度を劣化させたりして行っていますといわれています。

SAとよく似た言葉にAS (anti spoofing) というものがあります。これは本来軍事秘密であるはずのPコードの内容が一般に流れてしまい、その秘匿性がなくなってしまったことがもたで行われるようになったものです。この操作は、Pコードの上にさらにWコードと呼ばれるものを重ねて、Yコードと呼ばれる新しいコードパターンを作って秘密性を保とうとするものです。ただし、このASは我々が普段利用していますC/Aコード利用のGPS受信機では全く関係ないものです。

2.4 GPSの座標

普段我々が自分の今いる位置を表すのには、住所や最寄りの目標物を頼りに指し示すのがほとんどでしょう。それに対して地図やGPSの世界では、緯度、経度、そして高さという尺度を基準としています。ところが基準となるこの尺度が測り方によって変わってしまうのです。特にGPSを使う上で、この座標の問題は重要なポイントです。

(1) 高さとは？

高さというと、富士山の高さは標高3776mなどという表現をしますが、この標高とはどこから測った高さでしょうか？実はこれが問題なのです。ご存じのように地球は回転楕円体として表現されていますが、標高という高さの基準となる水準面は、この楕円体の表面とは一致しません。これがジオイド面の問題です。このジオイド面の凹凸は世界的に見ると150mにもおよぶ高低差があります。

図2.8はこの地表面とジオイド面、楕円体との関係を表す模式図です。この中で楕円体高 h と

というのが、GPS受信機から出てくる高さです。すなわちGPSから出てくる高さにはジオイド面の凹凸という補正は含まれていないのです。

しかし、2.1で述べたようにGPSの単独測位の精度が100m程度であることから、普段我々が利用しています単独測位ではあまり問題にならないのです。単独測位でも問題となるのは、次に説明する測地系の違いです。

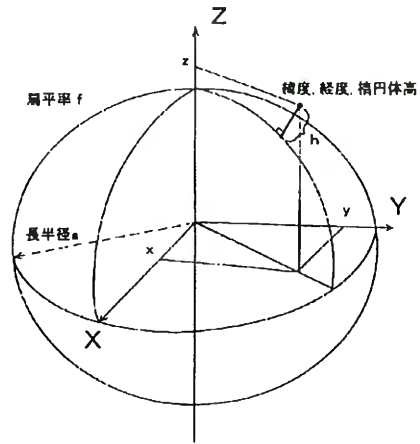


図2.8 地表面とジオイド面、地球楕円体との関係

(2) 地球楕円体と測地系

地球の形を表すのに準拠楕円体という幾何学的な楕円体を我々は利用しています。この楕円体が世界中どこでも共通ならば問題ありませんが、先に述べたジオイド面の問題から、その地域にできるだけ合うような準拠楕円体と座標系が選ばれています。これを測地系 (DATUM) と呼んでいます。世界にはこの測地系が100以上あり、SONYの IPS-3000/ 5000 のGPS受信機でも26の測地系をコマンドで選択できるようになっています。

GPSで基準となる測地系は WGS-84 と呼ばれるものです。日本では日本測地系と呼ばれるものが採用されています。日本測地系は明治時代に設定されて現在も運用されています。東京麻布の経緯度原点での天文観測からこの座標系が決定されました。表2.2にこの2つの測地系の違いを示します。

この測地系の違いによる差はかなり大きく、東京近郊で緯度経度とも約 11 秒の差があります。これは距離に直すと 400m 以上の違いです。つまり、測地系を誤ると単独測位の精度 100m をはるかに上回って、地図上では全く別の位置になることになってしまうのです。通常、ハンディ機も含めてGPS受信機は、この測地系を選択できるようになっているものがほとんどです。

もし、日本国内で地図とGPS受信機で表示される位置とが大きく異なっていことがあれば、まずこの測地系が日本測地系になっているかどうかを確認する必要があります。なお、この日本測地系は、TOKYO もしくは Bessel 1841、と表記されることもあるので注意してください。

もし、手持ちのGPS受信機で日本測地系の選択ができない場合には、WGS-84 の測地系から日本測地系に座標変換をすることになります。具体的な方法はここでは述べませんが、最後に示した参考書に詳しく書かれていますので、興味のある方はそちらをごらんになって下さい。ここでは簡単にその手順だけ述べます。

- ① WGS-84 の緯度、経度、楕円体高さの測地座標を図2.9に示す (x, y, z) の3次元直交座標に変換する。変換に用いるパラメータは WGS-84 系の値を使う。すなわちこの (x, y, z) の値も WGS-84 系の値です。
- ② 表2.2にあるように WGS-84 と日本測地系の原点のずれ (平行移動量) を、(x, y, z) に加

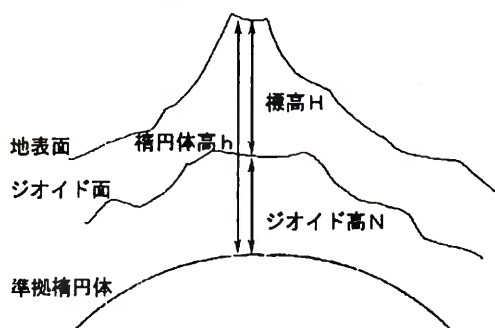


図2.9 測地座標と3次元直交座標との関係

えて (x', y', z') を求める。この平行移動量については、現在の VLBI による観測では次の値が用いられる。

$$\Delta x = 147.5 \text{ m}$$

$$\Delta y = -507.8 \text{ m}$$

$$\Delta z = -680.2 \text{ m}$$

ここで求められた (x', y', z') は日本測地系に基づく値となる。

③ 3次元直交座標値の (x', y', z') を、日本測地系のパラメータを用いて、緯度、経度、高さに座標変換する。

では、日食観測でGPSを利用して緯度経度を測る場合はどの測地系を利用したらよいでしょうか？ これは、一般には WGS-84 を利用します。接触時刻の計算に使うプログラムのパラメータに合わせるのが一番よいのですが、天文の計算で一般に使われている天文測地系と WGS-84 系は非常によく似ているので近似としてもかまわないと思います。

表2.2 WGS-84 と日本測地系

	WGS-84	日本測地系
準拠楕円体	WGS-84 楕円体	ベッセル楕円体
長半径 (a)	6378137m	6377397.155m
扁平率 (f) の逆数	298.257223563	299.152813
楕円体原点	地球重心	地球重心からずれている

2.5 単独測位

(1) 単独測位の原理

単独測位はGPSの利用方法として、もっとも基本的かつなじみの深いものです。単独測位の原理は、今まで述べたGPSのシステムに比べればそれほど複雑なものではありません。GPS受信機が衛星からの電波を受信して、その伝搬時間に電波の速度を掛ければ衛星までの距離がまずわかります（これを疑似距離という）。さらにその航法メッセージのエフェメリスから衛星の座標をGPS受信機で計算します。これを4個の衛星に対して同時に観測できれば自分のいる位置（緯度、経度、高さ）を求められます。

このとき、知りたい未知数が、緯度、経度、高さとして3つに対して、4個の衛星が必要なのは、GPS受信機自体の時計の誤差（ずれ）も未知数として扱うからです。なお、未知数のうちのひとつ（高さ）がわかっているならば、3個の衛星でも解を求めることが可能です。これが2次元

測位です。図2.10はこの関係を模式的に表したものです。なお、図では(X , Y , Z)の3次元直交座標で表しています。

この図から、観測点(X₀ , Y₀ , Z₀)とそれぞれのデータとの関係はピタゴラスの定理を用いて次式で表されます。

$$\{ (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \}^{1/2} = c (T_i + \Delta T) = R_i + c \cdot \Delta T$$

式中のそれぞれの記号の意味は、次の通りです。

- (X_i , Y_i , Z_i) : 受信できた i 番目の衛星の座標値
- c : 電波 (光) の伝搬速度
- T_i : i 番目の衛星から受信機までの電波の到達時間
- R_i : i 番目の衛星から受信機までの疑似距離
- ΔT : 受信機の時計の誤差

この式が各衛星毎に成り立っており、未知数(X₀ , Y₀ , Z₀ , ΔT)の4個を4つの衛星で解くわけです。ただし、この4元連立2次方程式は直接解くことができず、繰り返し

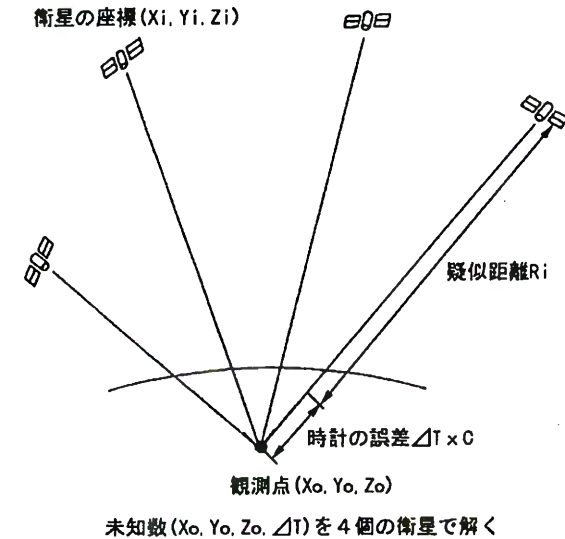


図2.10 単独測位の原理

し計算によって求めることが一般的です。通常は解の初期値として、前回観測された最後の値を用います。

このため、前回観測した場所と、今回観測したい場所が大きく離れている場合(1000km 以上)には、なかなか測位できないことがあります。この場合、多くのGPS受信機は自分のいる大体の位置(初期値)を入力できるようになっていますので、その値を入力してやれば、ずっと短時間に測位できることがほとんどです。海外などに遠征して日本から遠く離れたところでGPSを使うときには、あらかじめ行き先の大まかな緯度経度を調べておくのがよいでしょう。

(2) 単独測位と衛星の配置

単独測位の精度に影響するものとして、先に述べたSAの他、疑似距離測定の影響、電離層の影響、座標系の変換誤差等があります。これに加えてよく耳にするのが、DOP (Dilution of precision) … 精度低下率という言葉です。このDOPは測位に使う衛星の天空での配置が、精度に影響するパラメータとして用いられます。この値が小さいほど測位の精度が向上します。

天空で4個の衛星が一箇所に集中しているより、天空に散らばっています方が精度の良い測位

ができるのは想像できるだと思います。具体的にいうと4個の衛星と、観測点とを結んでできる四角錐の体積が大きいほど測位の精度は向上するのです。

DOPにも着目する精度によって色々な定義があつて、

GDOP (Geometrical Dilution of Precison) … 幾何学的精度低下率

PDOP (Position Dilution of Precision) … 位置精度低下率

HDOP (Horizontal Dilution of Precision) … 水平精度低下率

VDOP (Vertical Dilution of Precision) … 垂直精度低下率

TDOP (Time Dilution of Precision) … 時間精度低下率

などがあります。この中ではPDOPの値がもっとも一般的であり、この値に着目しておけばよいでしょう。GPS受信機でも3次元測位が行われています場合、通常表示されるのは、このPDOPです。

(次号に続く)

参考文献

- ・日本測地学会編著、日本測量協会発行「新訂版GPS 人工衛星による精密測位システム」、1989
- ・土屋 淳、辻 宏道著、日本測量協会発行「GPS測量の基礎」、1995
- ・電波実験社発行「PC WAVE1994年11月号 特集2 パソコンGPS」
- ・電波実験社発行「PC WAVE1995年10月号 特集1 パーソナルGPSの構築」