

衛星航法システム：GPS による測位と測量

唐沢 好男

衛星航法システムとは、衛星を用いた測位システムの総称で GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれる。その代表が GPS (Global Positioning System) である。衛星航法システムの本来の目的は、目印の無い海洋上での船舶や航空機が自位置を正確に知るためのものであるが、近年、カーナビや携帯端末の普及に伴って、GPS が我々の身近な存在になっている。GPS には、高精度な測位を可能とするために、一般相対性理論まで駆使した高度な技術が結集されている。GPS による測位には、衛星信号に含まれる拡散符号の位相から位置情報を得る方式と、搬送波の位相から既知局と未知局の基線ベクトルを求める方式に大別される。前者は数 m 程度の、後者は cm~mm 程度の測位精度を有し、後者はその応用目的から GPS 測量と呼ばれる。本資料では、この GPS の概要と、GPS による測位・測量の仕組みを大学院レベルの教科書風にまとめている。

目次

1. 衛星航法システムとは	2
2. GPS の概要	2
2. 1 システム構成	
2. 2 GPS 電波	
2. 3 測位の方法	
3. 単独測位	6
3. 1 測位原理	
3. 2 測位誤差要因	
4. ディファレンシャル GPS	9
5. 搬送波位相による測位・測量	10
5. 1 スタティック法	
5. 2 キネマティック法	
6. その他の衛星航法システム	14
7. 電子基準点と測地系	15
7. 1 電子基準点	
7. 2 測地系	

参考文献

1. 衛星航法システムとは

衛星航法システムとは、衛星を用いた測位システムの総称で GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれる。目印の無い大洋上を航行する船舶や、大空を飛ぶ航空機にとっては、自位置を知る手段が必須機能で、GNSS はこれを提供する。

衛星航法システムの実用化以前は、船舶等の位置決めには海岸等に設置された複数の基準点からの電波により、直距離や角度を求めて自位置を知る電波航法が用いられていて、ロラン (LORAN)、オメガ (OMEGA)、デッカ (DECCA) 等と呼ばれる双曲線航法【注】がその役割を果たしていた。しかし、その測位精度は、良好な受信状態においても 1km 程度であり、全地球的により高精度な位置決めを可能とする衛星航法の普及に伴って、双曲線航法はその使命を閉じつつある。

GNSS は衛星航法システムの汎用的な名称であるが、その代表であり、デファクトスタンダード (多くの人々が利用することによる事実上の標準) になっているのが GPS (Global Positioning System) である。GPS 自体の開発史は 1970 年代初頭にまでさかのぼるが、1980 年代の検証実験を経て、1990 年代中ごろには公式運用に入っている。GPS は米国の軍用システムとして生まれかつ運用されている背景があるため、一般の利用 (特に、国際的なシステムとしての利用) には懸念があるが、主要機能が民間用途にも開放されているため、衛星航法の本来目的である船舶や航空機利用にとどまらず、カーナビや携帯端末での利用へと、爆発的な普及を見せている。

本稿では、カーナビ等、我々に身近な GPS に焦点を当て、測位・測量の仕組みをまとめる。

【注】 双曲線航法

2 つの送信局からの電波の時間差や位相差によって距離の差が求められれば、現在位置は、送信局を焦点とする双曲線上にある。そこで 2 つの送信局のいずれかと別の送信局からもうひとつの双曲線を求め、2 つの双曲線の交点から現在位置が求められる。このようにして求める位置決め方式を双曲線航法と呼ぶ。

2. GPS の概要

2. 1 システム構成

GPS 衛星は地上高約 20,000km のところの円軌道を一周約 12 時間 (正確には半日恒星時: 11 時間 58 分 02 秒) で周回している。経度方向に 60° ずつシフトした六つの軌道に 4~5 基配置され、24~30 基で運用されている。この軌道面は地球の赤道面に対して 55° 傾いている。図 1 は GPS 軌道と衛星配置のイメージ図である。後述するように、測位・測量のためには、最低 4 基の衛星が同時に見える環境が必要であるが、この配置によって、通常は 5~10 基程度の同時受信が可能になっている。

GPS は、その機能により、三つのセグメントから構成されている。「スペースセグメント」、「コントロールセグメント」、「ユーザセグメント」であり、図 2 はこの三つのセグメントを示している。スペースセグメントは、宇宙に浮かぶ衛星群を言う。ユーザとの距離決めをするためには、電波の周波数が高精度であることが必須であるため、衛星には、時刻基準として、セシウムやルビジウムによる原子時計が搭載されている。この衛星から、ユーザセグメントに対して、それぞれが位置決め (測位・測量) を行うことができる電波 (拡散符号や航法メッセージ) を放送モードで発射している。GPS 衛星の位置や電波の管理、あるいは、GPS 衛星がユーザに向けて放送する航法メッセージを衛星に向けて送信する機能をもつのがコントロールセグメントである。この主制御局が米国コロラド州にあり、また、三大洋における赤道付近の島々に監視局が置かれている。ユーザが有する様々な受信機をユーザセグメントという。スペースセグメントとコントロールセグメントは、米国政府が開発・運用しているが、ユーザセグメントに関しては、GPS ユーザの自由な活用に任されている。

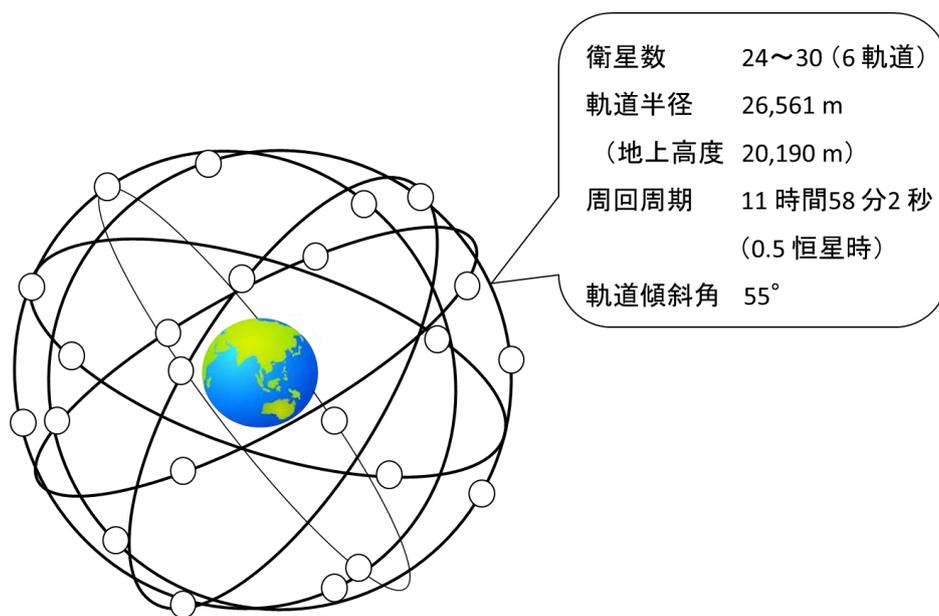


図1 GPS 衛星の軌道 (イメージ) と諸元

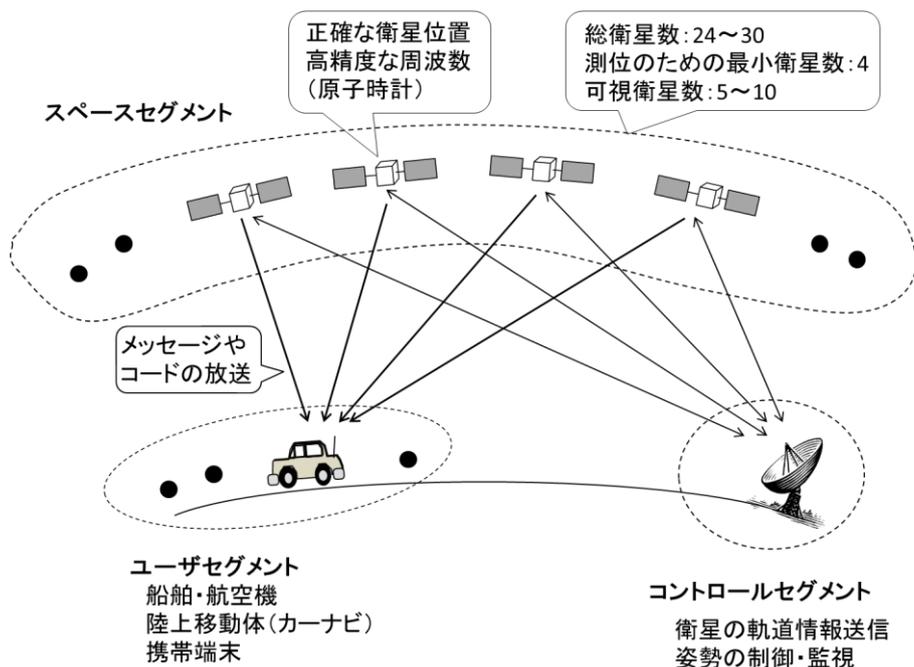


図2 GPS を構成する三つのセグメント

2. 2 GPS 電波

GPS 衛星からの電波は、測位に使う「コード」と測位計算に必要な「広報メッセージ」が放送モードで常時送出されている。現在、測位に利用されている電波の周波数は「L1 波」と呼ばれる 1,575.42MHz (波長: 19.029cm) と「L2 波」と呼ばれる 1,227.6MHz (波長: 24.421cm) である。2009 年以降の衛星には「L5 波」と呼ばれる 1,176.45MHz も追加されており、これからの測位に使われてゆく予定であ

る。L1 波は、民間用に開放されている C/A コード (coarse/acquisition code) と軍用に使われる P コードがあり、コード速度は、C/A コードが 1.023Mcps、P コードが 10.23Mcps である。L2 波は軍用として、P コード (10.23Mcps) が用いられている。表 1 は、GPS 衛星電波の種類をまとめている。以下では、民間利用に解放されている L1 波の C/A コードでの測位原理を述べる。

GPS の送信信号 $s(t)$ は次式で表される。

$$s(t) = D(t)p(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

ここで、 f_c は搬送波の周波数、 $D(t)$ は航法メッセージで、 ± 1 のどちらかの値をとる 50bps のデータ信号である。また、 $p(t)$ は距離測定用の拡散符号で、 ± 1 のどちらかの値をとる 1,023Mcps の信号である。コード周期 $N=1,023$ であるため、コードは 1ms ごとに繰り返される。航法メッセージもコードも ± 1 であるので、式(1)で表される信号は BPSK (2 値位相変調) である。図 3 は、GPS 信号 (L1 波 : C/A コード) を上述の三つの成分に分けてまとめている。

航法メッセージ $D(t)$ は、ユーザが測位計算を行うときに必要な GPS 衛星の位置情報や遅延を生じる電離層の情報が含まれている。1 フレームは 1,500 ビットで構成され 50bps の速度で 30 秒かけて伝送される。この 1 フレームは、さらに 5 つのサブフレームで構成され、サブフレーム 1~3 は、衛星個別の情報 (衛星軌道情報 (エフェメリス) やクロック補正係数)、サブフレーム 4, 5 は全衛星共通の情報 (衛星全体の概軌道情報 (アルマナック)、電離層情報など) で、25 回に分けて分割送信される。このため、全衛星共通情報の送信完了には 12 分 30 秒が必要である。図 4 は、航法メッセージのフレーム構成をまとめている。

表 1 測位用 GPS 電波の種類

名称	周波数 (MHz)	コード	コード速度 (Mcps)	用途
L ₁	1575.42	C/A	1.023	民間用
		P	10.23	軍用
L ₂	1227.6	P	10.23	軍用
L ₅	1176.45	PRN	10.23	(今後の民間用)

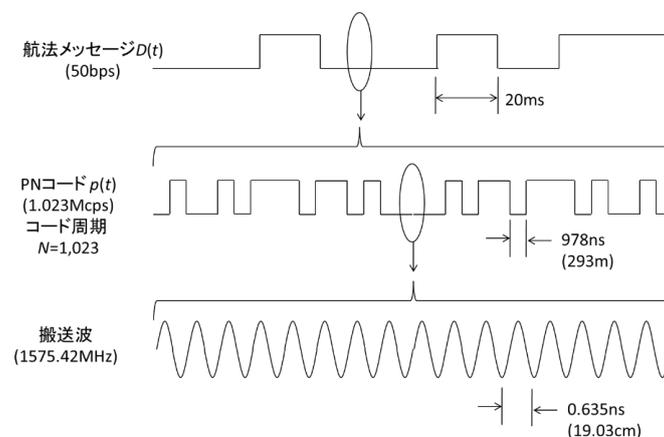


図 3 GPS の電波信号 (L1 波)

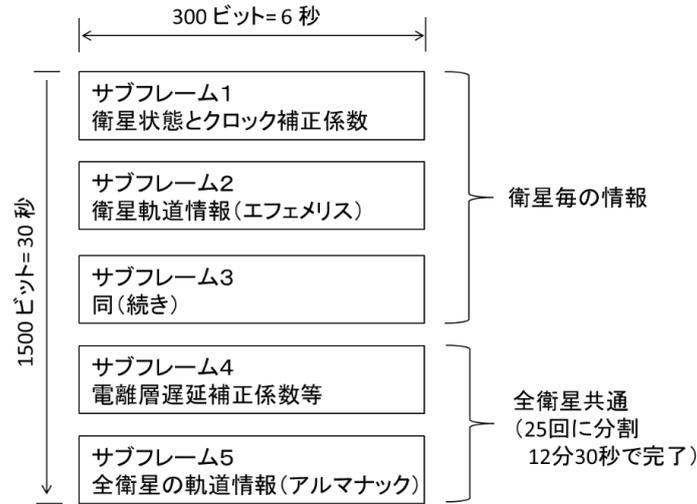


図4 航法メッセージのフレーム構成

2.3 測位の方法

GPSを使った位置決め（測位・測量）には、応用や目的とする精度に応じて、様々な方式があり、分類の仕方も大別して2種類ある。一つは、利用の形態から、単独測位と相対測位に分ける方法である。単独測位は、地上（海上、空中も含めて）の一地点の位置決めを、GPS衛星電波のみを使って行う方式であり、相対測位は地上の二つ以上の地点間の相対的な位置関係（基線ベクトル）を求めるものである。もう一つの分類は、位置決めの手段、すなわち衛星電波の何に注目して測位を行うかという視点である。すなわち、電波に乗っているコードの位相を使うか、電波そのものである搬送波の位相を使うかによる分類である。図5は後者の視点で、本章で学ぶ種々の測位方式をまとめている。コードによる測位ではコードのチップ周期：978ns（光が進む速度に換算して293m）の位相を調べて得られる精度になるため、測位精度としては10m程度である。カーナビに利用されている測位はこの方式である。搬送波位相による測位では、1サイクル周期：0.635ns（同19.03cm）の位相を調べて得られる周期になるため、1cmオーダの精度が得られる。ただし、搬送波位相を用いる位置決めは、既知点を基準とするベクトル距離を求める方式なので、第一の分類で言うと、全て相対測位に含まれる。搬送波位相を利用する方法は、極めて高精度であり、かつ、得られる情報が基準点からのベクトル距離であるため、測量応用に適しており、GPS測量と呼ばれている。以下の節では、図5の右側に分類した4つの測位方式について学んでゆく。

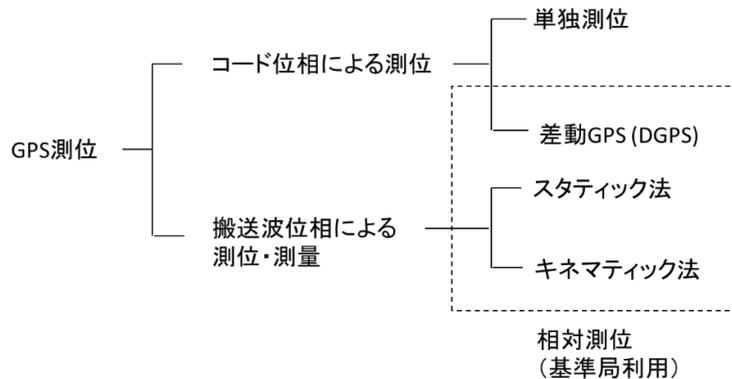


図5 測位の方法と分類

3 単独測位

3.1 測位原理

GPS 衛星からの電波を受信し、コードと航法メッセージの解析により自らの位置決めを行う単独測位の原理を述べる。

衛星の位置は既知として、コードを解析して得た疑似距離から、ユーザの位置を求めることを考える。衛星毎に異なる拡散コードが使われているので、衛星信号の識別は対応するコードによる逆拡散（相関演算）を行う。そしてその相関ピークの位置、すなわちコード位相によって、衛星と受信機間の距離を求める。ユーザの位置は、緯度・経度・高度の3次元で表される。3次元の位置を決めるためには、未知の数が3なので、また、三角測量の原理からも、三つの衛星との距離が必要になる。距離を測るためには、コードが到着する時間を正しく測らなければいけないが、ユーザ受信機の時計の精度は悪く、これを用いると大きな誤差を伴う。そのため、時刻情報も未知数として、4つの未知数による連立方程式を立てる必要がある。すなわち GPS 測位を行うためには、最低4つの衛星が必要になる。

受信機の位置を直角座標を用いて (x, y, z) とする。また、衛星 i の位置を (x_i, y_i, z_i) とすると、衛星 i と受信機の正確な距離 r_i は

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2)$$

と表される。

測定によって得られた距離を疑似距離と呼ぶと、受信機に時間誤差 Δt がある場合の衛星 1~4 に対する疑似距離 r'_i は次式で表される。

$$r'_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + c\Delta t \quad (3a)$$

$$r'_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + c\Delta t \quad (3b)$$

$$r'_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + c\Delta t \quad (3c)$$

$$r'_4 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + c\Delta t \quad (3d)$$

ここで、 c は光の速度である。

式(3)において、それぞれの式は、衛星を中心とした球面上に解があり、強制的に $\Delta t=0$ と置くと、図6の「クロック誤差有」に示すように、それぞれの球面の交点が一点で交わらない。これに対して、 Δt を調整すると、同図の「クロック調整後」のように一点で交わる。このようにして、式(3)の連立方程式から、受信機の位置 (x, y, z) と時刻ずれ Δt が同時に求められる。実際の解法では、式(3)が非線形の連立方程式であるため、適当な解の予想値の周りで線形化を行い、逐次近似法により解を得る。

衛星が5基以上ある場合には、残留誤差要因によって交点が一点に交わらないため、最小二乗法により、各球面と受信機との距離の誤差の二乗和が最小になる点を探して解を求める。

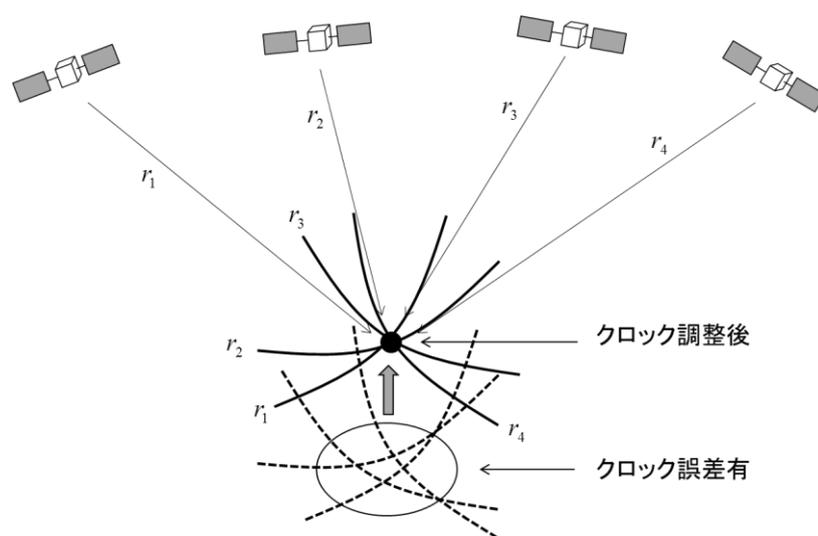


図6 単独測位の原理

3. 2 測位誤差要因

疑似距離は、コードで拡散された信号 $p(t)$ を逆拡散して、その相関ピーク値の時間タイミングから求める。拡散コードは 1ms ごとに繰り返されているため、相関値のピークも 1ms ごとに現れる。このため、距離の測定においても 300km 単位の不確実性が現れるが、どの 300km の範囲にあるかは比較的容易に特定でき、地上付近の測位では特に問題は生じない。

位置決め精度を損なう要因は、図7に示す以下のものが挙げられる。

- ・衛星軌道
- ・衛星クロック
- ・電離圏伝搬遅延
- ・対流圏伝搬遅延
- ・マルチパス

衛星軌道

航法メッセージには、GPS 衛星の軌道情報が乗せられているが、衛星位置に関して数 m から 10m の予測誤差が避けられない。測位における距離測定では、衛星とユーザを結ぶ方向（視線方向）の誤差が問題となるが、これと直交する方向の誤差はほとんど影響を与えない。このため、上記予測誤差がそのまま精度劣化に現れるわけではない。

衛星クロック

GPS 衛星には時刻同期用の発振器として 10^{-13} 程度の精度を持つ原子時計（セシウムあるいはルビジウム）が搭載されている。それでも、1日の間には 10^{-8} 程度の時刻誤差（距離に換算すると約 3m）を生じ、日がたつにつれて誤差も成長してゆく。このため、この補正情報が航法メッセージに含まれている【囲み記事】。衛星クロック誤差は、この補正情報により補正してもなお残る誤差を言う。なお、GPS の初期のころには、民生利用に対して意図的にクロック精度を落とす選択利用性（selective availability: SA）が行われていた。しかし、一般ユーザに不評であったり、後で示す GDPS の普及によって、SA の影響が回避されるようになったりしたことにより、2000年以降、SA は解除されている。

電離圏伝搬遅延

太陽からの放射線、特に、エネルギーの大きい紫外線やX線によって大気を構成する分子や原子が電子

とイオンに分離されプラズマ状態になる。この現象を電離と呼ぶが、そのプラズマ密度が高い領域が電離圏である。電離圏は地上 60km から 800km に亘って広く存在するが、F 層と呼ばれる領域、その中でも、300km~450km 辺りでは、特にプラズマ密度が高く、通過する電波に対して最も大きな影響を及ぼす。具体的には、GPS に用いられる周波数帯 (L 帯) の電波に対しては、伝搬速度を遅める働き、すなわち伝搬遅延をもたらす。天頂方向で、5~100ns 程度と算定されている。電離圏の状態は、太陽活動の活発さ、地域、季節、時間帯といった様々要因で変化する。そこで、GPS では、あらかじめ決められたモデル式により遅延量を推定して補正している。それでも補正しきれない誤差が、電離圏伝搬遅延誤差となる。この値は、大きくても 10m 程度までと言われている。

二つの周波数帯域の電波 (L1 波と L2 波) を使うことができる受信機では、電離圏伝搬の周波数特性の違いを利用して、電離圏状態を把握することができるので、この方法によって、電離圏伝搬遅延誤差を小さくすることが可能である。

対流圏伝搬遅延

地上高 10km 以下では、大気密度が高くなって屈折率が 1 よりわずかに大きい値になるので、この影響で遅延が生じる。これが対流圏伝搬遅延で、大気密度が濃い地表付近で大きくなる。対流圏伝搬遅延の補正は、受信機側で行われ、受信点の高度と衛星仰角を関数とするモデルで計算される。モデルで補正されたのちに残る誤差は 0.5m 程度以下である。

マルチパス

図 7 に示しているように、地表付近には様々な構築物があり、そこからの反射波が多数到来する。この現象はマルチパス伝搬と呼ばれる。当然、それぞれのパスの到着時間が異なるため、疑似距離算定に誤差として表れる。これは、ユーザ毎の利用環境に依存することなので、共通モデルで補正することができない。

マルチパスの問題は、仰角の低い衛星に大きく現れるため、一般的には、受信機側で十分な衛星数がある場合には、低仰角の衛星を使用しないという対策がとられる。各衛星の仰角は受信機側で把握できるため、一定仰角以下の衛星の電波を信号処理から外すような「仰角マスク」が用いられ、仰角 15~20° 程度に設定されることが多い。

総合誤差

上記の誤差は、衛星と受信機間の疑似距離に現れるが、現象が独立であるため、単純に足し合されるものではない。また、実際の測位では、自位置の水平方向誤差や垂直方向誤差が問題になる。総合誤差については、水平方向測位誤差および垂直方向測位誤差の標準偏差は、それぞれ、10.2m, 12.8m と算定されている[1]。

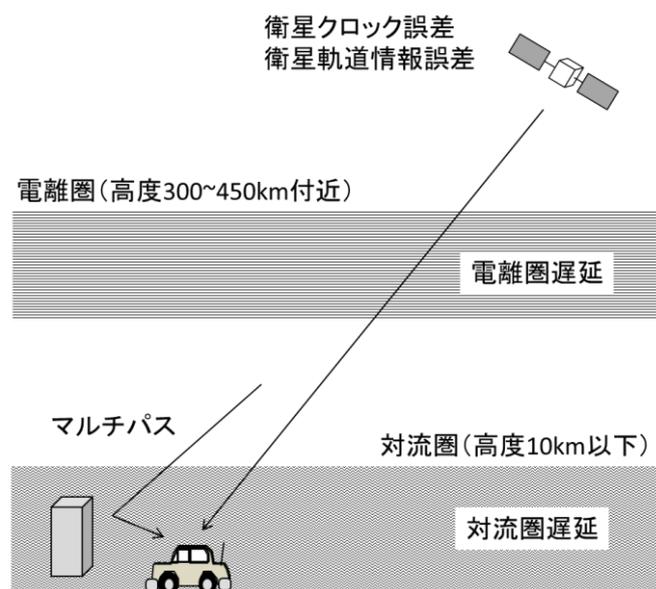


図7 GPS測位の誤差要因

【囲み記事】こんなところに相対性理論

宇宙のブラックホールや重力波の説明に威力を放っている相対性理論、我々の日常生活にはあまり縁がない。「ニュートン力学で十分」という世界である。ところがGPSでは、人工衛星の時計に相対性理論による補正をかけている。衛星に搭載されている精度 10^{-13} の原子時計の何が問題なのだろう。

相対性理論では、以下のことを教えてくれる。

- ・動いている人の時計は進みが遅くなる【特殊相対性理論】
- ・加速度空間（重力場）では、その大きさに応じて時計の進みは遅くなる【一般相対性理論】

このことから、以下のことが起きている。

- 地上から見て、衛星は速いスピードで動いており、衛星の時計の進みが遅れる
- 衛星は上空にあって、重力加速度は弱くなっているため、地上に比べて時計の進みが速い。

二つの効果は反対方向に働いているが、量的には ii) の一般相対性理論の効果が勝り、時計が速く進むようである。GPSでは、衛星からの到来電波の到着時間を精度よく図らなければいけないので、地上と衛星で時計の進み方が違っては困るのである。これは、原子時計の精度の問題ではなく、時の進み方の問題である。このため、GPSには、この補正が組み入れられている。相対性理論が、しかも一般相対性理論までもが、こんなに身近なところで活躍しているのは驚きである。

4 ディファレンシャルGPS

GPS測位における誤差要因は、システムに起因して受信機の設置場所に関係なく現れるものと、受信機の場所や性能に依存するものに大別できる。このうちの前者の誤差要因、すなわち、衛星軌道誤差・衛星クロック誤差・電離圏伝搬遅延誤差を取り除くために、場所が既知の地点に基準局を置き、そこで把握した誤差情報を、通信メディアを介してユーザに通知することにより、単独測位より高精度な測位が実現できる。この方法はディファレンシャルGPS (DGPS) と呼ばれる。図8はこのシステム構成を示している。基準局からの誤差補正情報は、種々の伝送媒体による無線通信回線によって、ユーザに通知される。

DGPSによる各種誤差要因に対する改善度は以下のとおりである。衛星軌道誤差については基本的に補

正できるが、基線長が長くなると精度は低下する (○)。衛星クロックの誤差は完全に補正できる (◎)。電離圏伝搬遅延についても補正できるが、基線長が 100km を超える程度に長くなり、かつ、電離圏不規則構造の空間スケールが短いときには、効果は小さくなる (○)。対流圏伝搬遅延については、モデルで良く補正されているのでともと大きな差がないが、モデルのパラメータになっている高度に両地点の差が大きいと、むしろ誤差が大きくなる (△)。マルチパスは、受信機周囲の環境によるので、この補正はできない (×)。(◎、○、△、×は DGPS にすることの効果の大きさをこの順に定性的に示している)

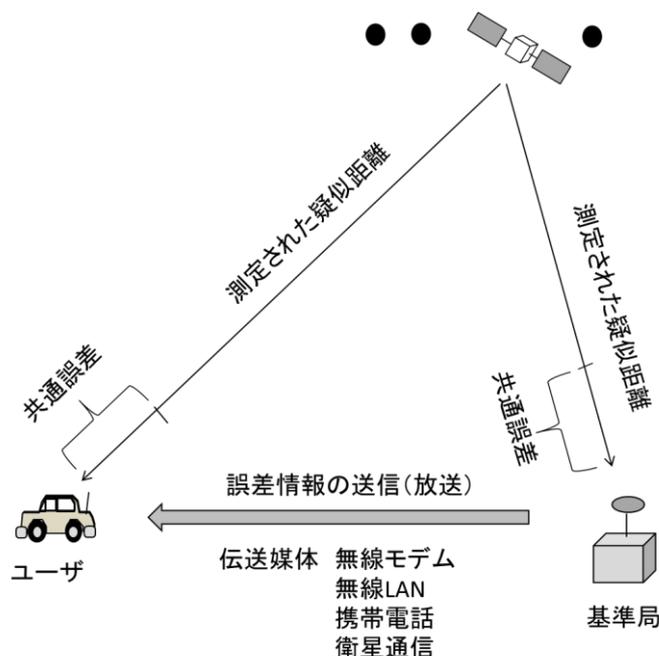


図8 ディファレンシャル GPS のシステム構成

5. 搬送波位相による測位・測量

前節までの単独測位と GDPS はコードの位相 (到達時間) から距離を測る方法であったが、本節では、搬送波の位相から距離を精密に測る方法：スタティック法とキネマティック法の仕組みを学ぶ。この場合は、衛星からの距離を直接測るのではなく、場所が既知の基準点からの基線長 (ベクトル距離) を cm オーダの高精度に測る方法で、DGPS と同じ相対測位に分類される (図5)。基線長を精密に求めることが目的になるので、「測量」という言葉が使われる。GPS 測量である。

5. 1 スタティック法

(1) 原理

スタティック法は、既知の基準点からユーザ位置までの基線ベクトルを搬送波位相を利用して精度よく求める方法である。実際の衛星配置も基線も 3 次元空間に置かれるが、原理の理解のために、以下では、図9に示す1次元モデル (基線ベクトルが x 軸方向を向く) で考える。既知点 O と衛星の距離を r 、その角度を θ 、未知点 A とのベクトル距離を d (その距離 d) とする。何らかの手段により、衛星と未知点 A までの距離の差 Δr が分かったとする (実際は後述するように Δr を求めるのは簡単ではない)。このとき、それぞれの量は以下の関係式で結ばれる。

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta \quad (4)$$

既知点 A から衛星方向への単位ベクトルを \mathbf{r}_0 として、(4)式を整理すると、次式となる。

$$\Delta r = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{r}_0 + \frac{|\mathbf{d}|^2 - \Delta r^2}{2r} \quad (5a)$$

$$\approx -\mathbf{d} \cdot \mathbf{r}_0 \quad (r \gg d \text{ のとき}) \quad (5b)$$

式(5a)は、 d と Δr の関係を与えている。また、式(5b)は、 d に比べて r が十分大きいとき、すなわち、両地点に衛星電波が平行に到来する場合である。(5)式の関係は、電波干渉計の原理である。既知の量 r と \mathbf{r}_0 、測定値 Δr を式(5a)に与えて、基線ベクトル \mathbf{d} を求めることができる。

(2) 整数値バイアス

上記の原理の説明の中で、「何らかの手段により、衛星と未知点 A までの距離の差 Δr が分かったとする」と述べた。ここではその方法を説明する。今度は、「何らかの手段で、2地点の電波の位相差 $\Delta\phi_{meas}$ が分かったとする」という仮定を導入する。

正弦波のように連続的に送られてくる電波の位相の測定では、 $0 \sim 2\pi$ の範囲しか値が得られない。すなわち Δr に相当する位相変化分 $\Delta\phi$ に対して、測定では $0 \sim 2\pi$ の範囲の $\Delta\phi_{meas}$ しか得られないので、測定値からは $2n\pi$ (n は整数)の不確定な部分が残る。この関係は次式で表される。

$$\Delta\phi = 2n\pi + \Delta\phi_{meas} \quad (6)$$

この整数値 n が求められないと距離 Δr が定められない。この不確定性は整数値バイアスと呼ばれる。整数値バイアスはあるものの、距離の候補は、位相変化 2π に相当する一定間隔ごとの複数点に存在している。スタティック法では、この整数値バイアスを解くために、時間と共に衛星が動くことを利用する。図10はこの原理を示す。ある時刻 t_1 では、衛星位置により、図の一番下の線に○で示すような未知点の候補が残ったとする。少し時間をあけた時刻 t_2 では、衛星が移動して、2番目の線のような候補になったとする。さらに時間すぎれば、図のように候補点に変化してゆく。真の未知点は、場所が固定されているのだから、どの時刻に対しても同じ場所に現れるはずである。図で見ると点線で囲った点が、求める点であったと特定できる。このようにして、整数値バイアスを解くが、そのためには、衛星の位置がある程度変化する一定時間が必要である。通常、30分～1時間程度の時間をかけて行われる。複数の衛星が見える場合には、独立な情報が多くなるため、測定時間を短縮することができる。

整数値バイアスの問題は、コードを用いた単独測位でも同様に起きるが、コードの繰返し周期が1msであり、距離に換算して300kmになるため、実際には問題にならない。一方、搬送波位相の測定では、L1波の周波数1,575.42MHzで周期が0.635ns、距離換算で19.03cmであるので、整数値バイアスを解くことが最重要になる。

(3) 二重位相差

整数値バイアスを解くとき、「何らかの手段で、2地点の電波の位相差 $\Delta\phi_{meas}$ が分かったとする」という仮定を導入した。これは、GPS測位の原理を理解するために理想化した仮定であって、現実には、既知点と未知点の二つの受信機同士の時計が完全にあって（同期がとれている）という前提は成り立たない。ここでは、受信機間で時刻ずれがあった場合でも、測定を可能とする具体的な手段を述べる。

既知点 O の受信機と未知点 A の受信機の双方に時刻ずれがある状態を考える。先に学んだ単独測位では、受信機の時計の誤差を補正するため、位置特定に本来必要な衛星数3に対して、もう一つ衛星を加え

て処理する方法がとられている。スタティック法でも、受信機間の時刻補正に、新たな衛星を一つ加え、図 1 1 のような系での測定を行う。既知点 O と衛星 1, 2 との距離を $r_1^{(O)}$, $r_2^{(O)}$ 、未知点 A と衛星間距離を $r_1^{(A)}$, $r_2^{(A)}$ とする。それぞれの衛星に対する 2 点間での距離差を Δr_1 , Δr_2 とすると、 $r_1^{(A)} = r_1^{(O)} + \Delta r_1$, $r_2^{(A)} = r_2^{(O)} + \Delta r_2$ である。受信機 O の時刻誤差を $\Delta t^{(O)}$ 、受信機 A の時刻誤差を $\Delta t^{(A)}$ とし、これを距離に換算し $\Delta r^{(O)}$, $\Delta r^{(A)}$ とする。それぞれの測定位相値は以下となる。

$$\phi_{1,meas}^{(O)} = k(r_1^{(O)} + \Delta r^{(O)}) \quad (7a)$$

$$\phi_{2,meas}^{(O)} = k(r_2^{(O)} + \Delta r^{(O)}) \quad (7b)$$

$$\phi_{1,meas}^{(A)} = k(r_1^{(O)} + \Delta r_1 + \Delta r^{(A)}) \quad (7c)$$

$$\phi_{2,meas}^{(A)} = k(r_2^{(O)} + \Delta r_2 + \Delta r^{(A)}) \quad (7d)$$

ここで、 k は電波の波数 ($=2\pi/\text{波長}$) である。

衛星毎に 2 地点の位相差を求めると、次式となる。

$$\Delta\phi_{1,meas} \equiv \phi_{1,meas}^{(A)} - \phi_{1,meas}^{(O)} = k(\Delta r_1 + \Delta r^{(A)} - \Delta r^{(O)}) \quad (8a)$$

$$\Delta\phi_{2,meas} \equiv \phi_{2,meas}^{(A)} - \phi_{2,meas}^{(O)} = k(\Delta r_2 + \Delta r^{(A)} - \Delta r^{(O)}) \quad (8b)$$

このようにして求めた位相差は一重位相差と呼ばれる。一重位相差にはそれぞれの受信機の時刻誤差が含まれている。そこで、二重位相差と呼ばれる二つの位相差の差を求めると以下の式になる。

$$\Delta^2\phi_{meas} \equiv \Delta\phi_{2,meas} - \Delta\phi_{1,meas} = k(\Delta r_2 - \Delta r_1) \quad (9)$$

このようにして求めた二重位相差には、両受信機の時刻誤差がなくなっている。それゆえ、スタティック法では、二重位相差を求めて基線距離 d の解析を行う。二重位相差の測定によって得られる距離差の差 $\Delta^2\phi_{meas}/k$ を、式(5a)に入れて d を求める。衛星距離 r_1, r_2 が基線距離 d に比べて十分大きい場合には式(5b)が適用でき、その場合には

$$d \approx |(\Delta^2\phi_{meas}/k)/(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)| \quad (r_1, r_2 \gg d) \quad (10)$$

として求めることができる。

(4) 3次元測定

ここまでは、原理の理解のために 1 次元モデルで説明してきた。そしてその場合には、二つの受信機（既知点と未知点）の時刻に誤差があることを考慮して二重位相差の考えを導入し、そのため、必要な衛星数は 2 つであった。実際は、衛星配置も基線ベクトルも 3 次元空間に横たわるので、最小衛星数は 4 になる。3 次元の場合には、幾何学的な煩雑さが増し、数式処理も複雑になるが、1 次元で学んだ手順を拡張してゆけばよいことは理解できるであろう。

スタティック法では、10km 程度の基線ベクトル距離に対して、30 分から 1 時間程度の観測時間で、1 cm 程度かそれ以下の精度での測量が可能である。

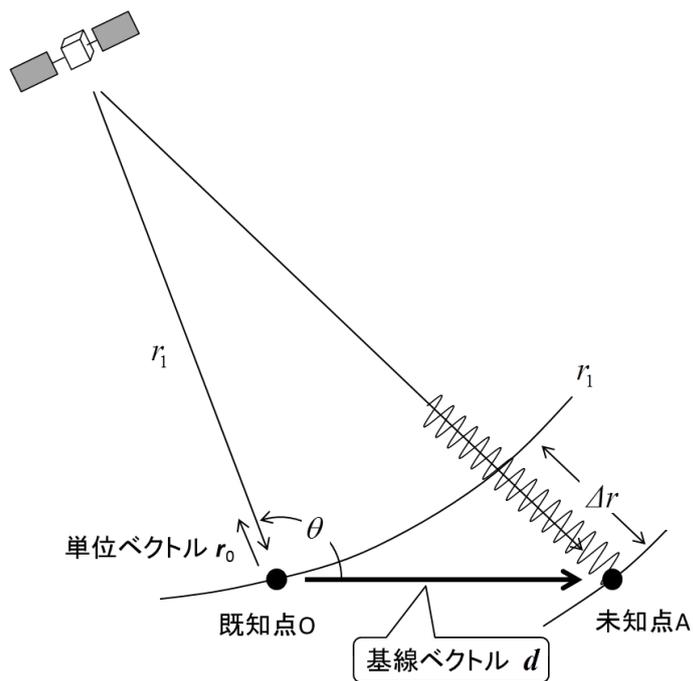


図9 搬送波位相を用いたスタティック法測定の原理（1次元モデル）

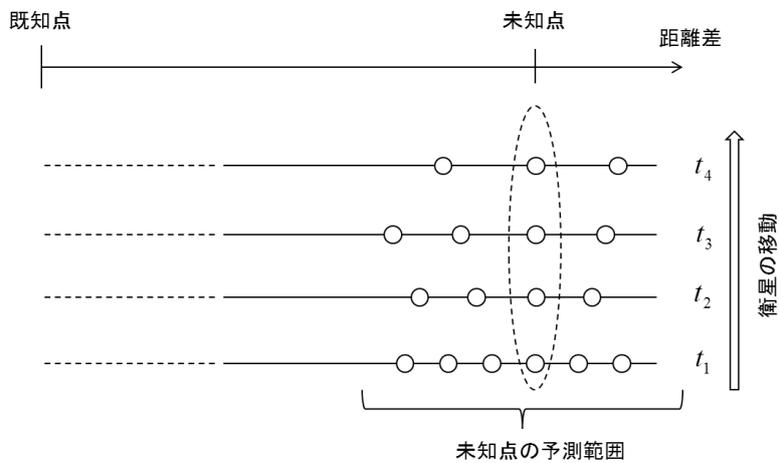


図10 整数値バイアスと真の解

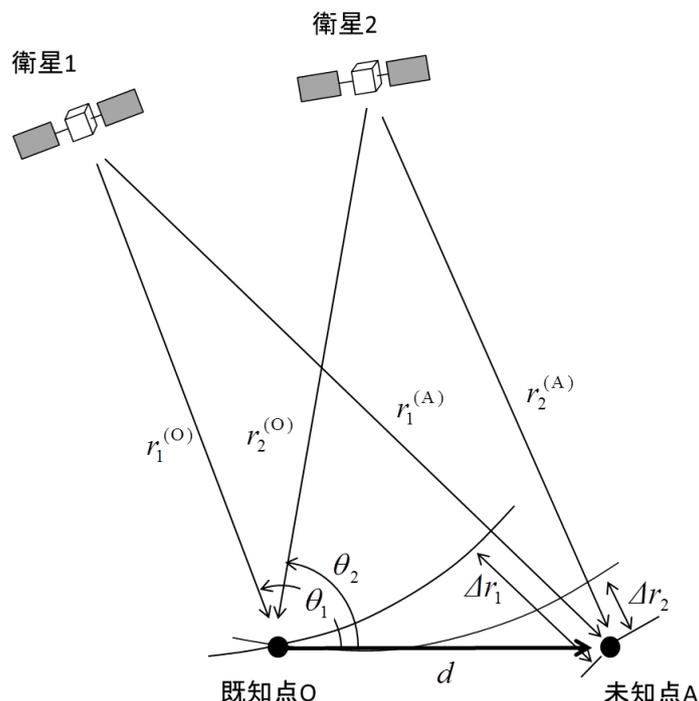


図 1 1 二重位相差による受信系系統誤差の消去 (1次元モデル)

5. 2 キネマティック法

スタティック法は受信機が一点に固定された状態での測量であったが、本項で述べるキネマティック法は動きながら行う GPS 測量である。

スタティック法では、整数値バイアスを確定させるために衛星の動きを利用したが、未知局での整数値バイアスが一旦解けてしまえば、そこから動き出しても、受信電波の位相は連続的に変化するだけなので、整数値バイアスの対応関係が外れることは無く、以降、短時間で連続測定が可能になる。このように、受信機を動かしながら測定する方法（実際は測定時は止まって行うのでストップアンドゴー (stop and go) 方式）がキネマティック法である。

キネマティック法でもスタティック法と同様、既知点での整数値バイアスを特定させるための時間が必要である。受信機を位置が分かっている既知点に持って行って、そこから移動させれば、整数値バイアスの n の特定が容易なので、測定の開始時間を早めることができる。逆に測定が長時間に及ぶと、衛星の組み合わせが変わってくるので、連続性が保たれなくなる等の留意点もある。

既知点での位相情報を、携帯電話などの無線機器を使って未知点に送信し、そこで処理してリアルタイムに位置決めする方法は、リアルタイムキネマティック方式 (RTK-GPS) と呼ばれている。

6. その他の衛星航法システム

本稿の冒頭でも述べたように、GPS は高性能測位を可能にし、かつ、その利便性に優れているため、衛星航法システム (GNSS) のデファクトスタンダードになっている。一方、GPS は米国の軍事目的によって生まれ、かつ、運用されている背景があり、一般の利用（特に公共システムとしての継続的な利用）には懸念があるため、独自の衛星航法システムも構築されている。GPS を商品に例えて言うなら、大変素晴らしいものであるが、売り主が気に入らないので買いたくない、という心理である。

GLONASS は旧ソ連が開発し、現在はロシア宇宙軍によって、主に、ロシア政府のために運用されてい

る衛星測位システムである。高度 19,100km の 3つの軌道に合計 24 基の衛星が配置されているシステムで、2011 年から実用に入っている。北斗は中華人民共和国が独自に開発を行っている衛星測位システムで、2012 年から、アジア太平洋地域での運用を開始している。2020 年ころまでには、合計 30 基余りを打ち上げ、世界各地での運用が可能なシステム構築を目指しているようである。

欧州連合 (EU) では、民間主体の衛星航法システム Galileo を構築中である。高度約 24,000km の上空に 30 基の衛星を打ち上げる構想である。2005 年より試験衛星が徐々に打ち上げられ開発は進んでいるが、採算性を疑問視する声もあり、当初の思惑通りの進み具合にはなっていないようである。

日本では、衛星測位への応用を目指して、準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System: QZSS) の構築が進められている。準天頂衛星軌道を図 1 2 に示しているが、軌道を若干楕円にして、日本上空での滞在時間を長くする軌道 (同図の点線で描いた軌道) がとられている。近い将来に 4 基体制で、2025 年度には、7 基体制とする計画がある。また、準天頂衛星からの信号と GPS 衛星からの信号を組み合わせることで、GNSS の統合運用を目指している。

それぞれのシステムの詳細説明は割愛している。また、ここで取り上げたもの以外にも、GPS を補完するシステムの開発や構想もある。

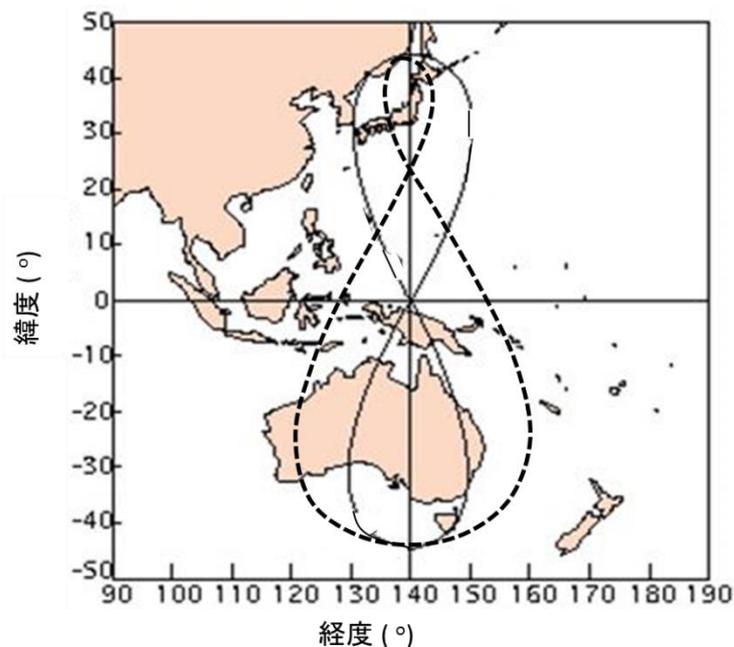


図 1 2 準天頂衛星システムの軌道例 (地球を止めた状態で見た)

7. 電子基準点と測地系

7. 1 電子規準点

電子基準点は、国土地理院が整備した常設の GPS 連続観測点で、測量での基準とすることを目的としている。高さ 5m 程度のステンレスタワーの頂部に受信アンテナが取り付けられている (図 1 3)。観測データは茨城県つくば市にある国土地理院へ送られ、解析結果は、国土地理院のホームページで公開されている。日本全国に約 1300 か所 (2017 年現在) の電子基準点が稼働している (地域気象観測システム: アメダスの観測点とほぼ同数)。

電子基準点には、①測量における基準、②位置情報サービスの支援、③地殻変動の監視、の三つの役割

がある。①については、スタティック測量などの既知点として利用されている。②については、特に、これからにおいて、公共測位や民間測位を広域で実現するためのネットワーク型 RTK-GPS 測量などへの幅広い利活用が期待されている。



図 1 3 電子基準点の例（入間市博物館敷地内）

7. 2 測地系

地球上のどこにおいても位置決めができるのが GPS の特徴である。その位置決めは、緯度・経度・高度で表される。一般に、標高は平均海面からの高さになるが、平均海面そのものが、地形や地球内部を構成する土や岩石の種類によって生じる重力の不均一性によって起伏がある。全地球を覆う平均海面はジオイドと呼ばれる。一方、GPS 測位では、そのようなこととは関係なく、絶対座標上において位置が定まる。地球は、東西方向が南北方向より若干長い楕円体で近似できる。扁平率 $((\text{長軸長} - \text{短軸長}) / \text{長軸長})$ はおよそ $1/300$ である。GPS では、この地球楕円体で緯度・経度を定め、楕円体の表面を高度 0 としている。この地球楕円体を「準拋楕円体」と呼び、そこで定まる緯度・経度を「地理学的経緯度」と呼んでいる。GPS で使われているこの測地系は、WGS-84 (World Geodetic System 1984) と呼ばれている。東京付近では、ジオイド面が準拋楕円体面より 40m 程度高い位置にある。図 1 4 は、準拋楕円体、ジオイド面、地表面と、それらの差を表す楕円体高、ジオイド高、標高の関係を表している。

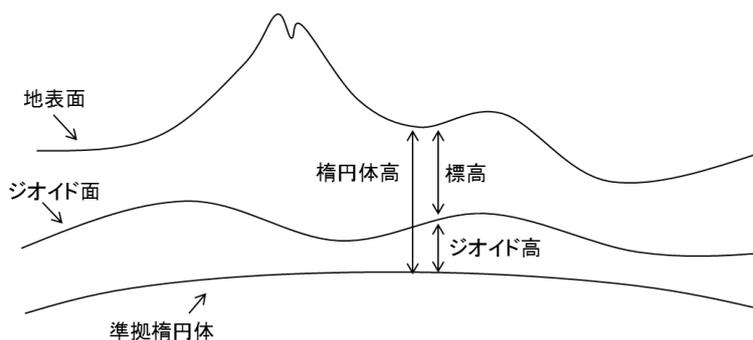


図 1 4 標高・ジオイド高・楕円体高の関係

本資料のまとめ

- ① 衛星航法システムは、衛星を用いた測位システムの総称で GNSS と呼ばれる。種々システムがある中で GPS がその代表であり、GNSS のデファクトスタンダードになっている。GPS は軍用を目的として、船舶や航空機の自位置を知る手段として生まれたが、現在は、カーナビや携帯端末にも組み入れられ、日常生活に欠かせないものになっている。
- ② 衛星航法システム以前は、ロラン、オメガ、デッカ等と呼ばれる双曲線航法によっていたが、位置特定精度が悪いため、双曲線航法はその使命を閉じつつある。
- ③ GPS は、高度 2 万 km に 2 4 ~ 3 0 基の周回衛星を置くシステムで、L 帯電波が用いられている。その周波数や信号クロックは、セシウムやルビジウムによる原子時計で制御されている。GPS の電波は、距離測定用の拡散符号と受信機位置特定のための航法メッセージよりなる。
- ④ 測位の方法には、単独測位と相対測位での分類と、コード位相による測位と搬送波位相による測位での分類の二通りの整理の仕方がある。後者の分類で整理したものが図 5。
- ⑤ コード位相による単独測位では、三角測量の原理に基づく 3 基の衛星と、端末側の時計の誤差を補正するためのもう一つの衛星の合計 4 基の衛星の信号を受信して、端末位置を求める。測位精度は 10m 程度である。基準局での受信情報と併用する差動 GPS (DGPS) では、衛星システムに起因する誤差が消去できるので、単独測位よりは精度が良い。
- ⑥ 衛星信号の搬送波位相から、干渉計の原理に基づき、測定地点と基準局とのベクトル距離を求めるスタティック法がある。1cm 程度の精度が得られ、測量に利用される (GPS 測量)。この測定では、位相差が 2π を越える範囲の不確定性 (整数値バイアス) を取り除くことが鍵になる。
- ⑦ 日本には、約 1,300 箇所に、国土地理院が整備した GPS 連続観測点があり、電子基準点と言われる (図 1 3 に例)。測量における基準、位置情報サービスの支援、地殻変動の監視などに利用される。

参考文献

- 1) B. W. Parkinson, "Chapter 11: GPS Error Analysis," Global Positioning System; Theory and Applications, vol. 1, pp. 469-483, AIAA, 1996.
本文中での引用はないが、この資料執筆に際して、下記の本を参考にしている。
- 2) 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, 2003.
- 3) 小白井亮一, わかりやすい GPS 測量, オーム社, 2010.