

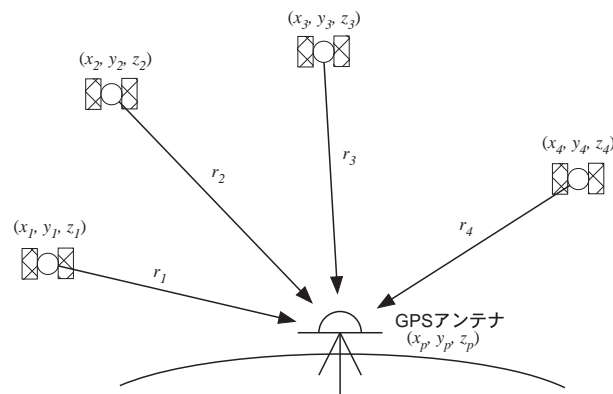
1 GPS 測量

1.1 GPS 測量の原理

GPS(Global Positioning System) は、アメリカの軍事衛星を利用した測位技術である。1990 年代の始めから打ち上げられ、2008 年現在、32 機の GPS 衛星が地球を周回している。GPS 衛星は、セシウムやルビジウムの原子時計を搭載し、高精度の時刻情報を発信している。地上で GPS 衛星の電波を受信すると、その時刻情報は、衛星ごとにばらついている。このばらつきは、受信機と各 GPS 衛星との距離にばらつきがあるためである。つまり、距離が長いと、その分だけ遅れた時刻情報を受信することになる。したがって、受信機に正確な時計が搭載されているならば、各衛星からの時刻の違い ΔT は、各衛星と受信機との距離を測ることが出来る。電磁波の速度を C とすると、その距離は $C\Delta T$ で計算できると思われるが、実際にはそう単純には行かない。地球の重力場による時間の遅れと、高速で移動する衛星の運動による時間の遅れを考慮しなければならない。これらは、それぞれアインシュタインの一般相対性理論と特殊相対性理論により補正することが可能である。現在、GPS はカーナビゲーション等に利用され、一般に利用されるようになった。アインシュタインの相対性理論が、生活に生かされているのを見ると、科学技術の進歩を痛感せざるを得ない。

さて GPS 衛星と受信機との距離に加えて、各衛星の位置が正確に解っていれば、受信機の位置を求めることが可能となる。GPS 衛星の位置は、人工衛星の軌道情報により高精度で求めることができる。特に GPS 衛星は、高度約 2 万 km の彼方を運行しているために、大気の影響を受けず、安定した軌道を持っている。それに加えて、GPS 衛星は常に地球から軌道を監視されており、常に高精度の軌道情報が維持されている。

下図は、GPS による測位の仕組みを模式図に表したものである。



各 GPS 衛星の位置は、 $(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ で表している。各 GPS 衛星と受信機との距離は、 r_1, \dots, r_n である。これらの情報をもとに受信機の位置 $P(x_p, y_p, z_p)$ を計算するわけである。この測位は、既知点を観測することにより、測点の位置を求めるので、測量の種別でいえば後方交会法にあたる。

測点 P の位置計算を解析的に行うためには、連立方程式をたてる必要がある。ある GPS 衛星 (x_i, y_i, z_i) の位置と測点までの距離 r_i が求まっているので、測点 P は、GPS 衛星の位置を中心とし、半径 r_i の球面上にあるといえる。式で表すと次のようになる。

$$(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2 = (r_i + C\Delta t)^2 \quad (1)$$

ここで、 Δt は、受信機の時計の誤差を表している。GPS 衛星には高精度の原子時計が搭載されているが、それは非常に高価な時計である。市販の受信機にはそのような時計が搭載されていないため、受信機の時計には誤差が含まれている。その誤差を変数 Δt で表しているのである。この式における変数は、 $x_p, y_p, z_p, \Delta t$ となり、4つ存在する。したがって、この方程式を解くためには4つ以上の式を立てて、最小二乗法により解かなければならない。つまり、4つ以上の GPS 衛星が観測点から見える状態でなければならない。

GPS 衛星から発信している電波の種類を下に示す。このように、一般用と軍用にわかれている。

表1 GPS 衛星の電波信号

周波数	信号コード	備考
L1 帯 1,575.42 MHz	C/A コード	民間用
	P コード	軍事用
L2 帯 1,227.6 MHz	P コード	軍事用

軍事用の信号は暗号化されているために、一般には信号を解読することができない。一方で一般用の信号は、コードが公開されているので、その情報を活用することができる。送信している情報は、時刻情報、衛星の軌道情報、電離層での電波遅延の補正情報等である。今後は、航空機のナビゲーションのためのコードも追加されるようである。

1.2 GPS 測量の種類

1.2.1 単独測位

単独測位 (standalone GPS) は、民間でも利用できる C/A コードを用いて測るもので、様々な補正を施す必要があるが、基本的に式(1)を用いて計算される。この C/A コードは、2000 年までは情報を劣化させて、30m 以上の低い精度でしか測位することができなかったが、それ以降は情報を劣化させていないので 10m 程度の精度で測位できるようになっている。

単独測位は、廉価なカーナビゲーションやハンディタイプの端末に組み込まれ、レジャーに活用されるだけでなく、警備等のセキュリティ分野にも活用されている。

1.2.2 ディファレンシャル測位

単独測位は、10m 程度の精度であるため、それを 1m 程度の精度を担保するための技術が、**ディファレンシャル測位** (differential GPS) である。ディファレンシャル測位では、二つの GPS 受信機

を用いるのが一般的である。一つの GPS 受信機は基地局として固定した状態にし、もう一つは移動局として利用する。基地局にて GPS による測位結果を時系列的に並べると、様々な要因によって、測位結果の示す位置は、実際には固定されているにもかかわらず変化している。この変化が誤差であり、この誤差は、基地局から非常に遠くない限り、同程度のものがもう一方の移動局の GPS 受信機にも含まれていると見なせる。したがって、基地局で得られる誤差情報を移動局に送り、移動局側でその情報を用いて補正することで、精度向上を図ることが出来る。このような測位をディファレンシャル測位と呼んでいる。ディファレンシャル測位向けの誤差情報は、様々な機関で発信されている。例えば、海上保安庁は中波ラジオの電波を利用して発信していたり、地方の FM 局は FM ラジオの音声放送の隙間に誤差情報を載せて発信していたりする。

1.2.3 干渉測位

干渉測位 (relative GPS) は、L2 帯の P コードも利用し、数 cm の精度で測位を行うもので、測量分野に利用されている。ディファレンシャル測位と同様に 2 台の GPS 受信機を利用し、コード情報だけでなく、2 台で受信する電波の位相差も利用して高精度化を図っているため、干渉測位と呼ばれている。L1 帯の波長の長さは 19cm、L2 帯の波長の長さは 24cm 程度なので、波長の 1/10 まで読み取れば、2cm の精度が実現できる。干渉測位の原理については、各専門書に委ねたい。下の表は、干渉測位の種類を示したものである。時間をかけて固定された点を測るスタティックは、非常に精度が

表 2 干渉測位の種類

名称	観測時間	精度
スタティック	30 分～数時間	1cm 以内
高速スタティック	10 分～30 分	3cm 以内
キネマティック	1 秒～10 秒	3cm 以内

高い。移動しながら測るキネマティックでも 3cm の精度を有している。何れにしても干渉測位に対応した 2 台の GPS 受信機が必要であるが、国土地理院が設置している**電子基準点** (continuous GPS station) の情報を用いれば、1 台の受信機でも測位が可能である。また、最近では複数の電子基準点の情報を活用して**仮想基準点** (virtual relative station) を構成し、その情報を携帯電話回線で送信することでリアルタイムでのキネマティック測量を実現する技術も出ている。