

## GPS の仕組み

### 1. はじめに

GPS は米軍が開発した軍事技術であり、その威力は湾岸戦争、コソボ紛争、アフガニスタン戦争、イラク戦争でいかに発揮されており、米軍のミサイル技術のかなめである。民生分野においても、高精度測位を利用した地震や火山活動による地殻変動の観測、カーナビや携帯電話に組み込まれるなど、いまやさまざまな分野で広く使われており、現代社会の欠くことのできないインフラになっている。種々の使用法があるが、地殻変動観測などに用いられる最も精度の高いものは、ミリメートルの精度で位置を測定できる。測位ばかりでなく、大気中の水蒸気量計測のような気象学への応用など、今後ますますその応用範囲を拡大していくものと思われ、まだ発展途上にある先端技術といってよい。

さらに、GPS モダニゼーションおよびガリレオの登場に伴い、近い将来に飛躍的な進展が生まれようとしている。それに備えるためにも、また新しい応用分野を開くためにも、GPS の測位アルゴリズムをきちんと理解しておくことは、極めて重要である。

本論では、主として参考文献(土屋,辻(1995))(土屋(2001))(長沢(1983))および(Misra & Enge (2001))を参考にしている。最近では、インターネットのキーワード検索で必要な文献をダウンロードできることが多い。ぜひこの方法を活用していただきたい。

### 2. GPS の仕組み

GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) 衛星は、図 2.1 に示すように、地球の赤道面に対して 55 度傾いた 6 枚の軌道面上に 4 個ずつ合計 24 個が、高度約 20,000km の円軌道面上に配置されている。周回周期は約 11 時間 58 分 02 秒で、これは 0.5 恒星日になっている。

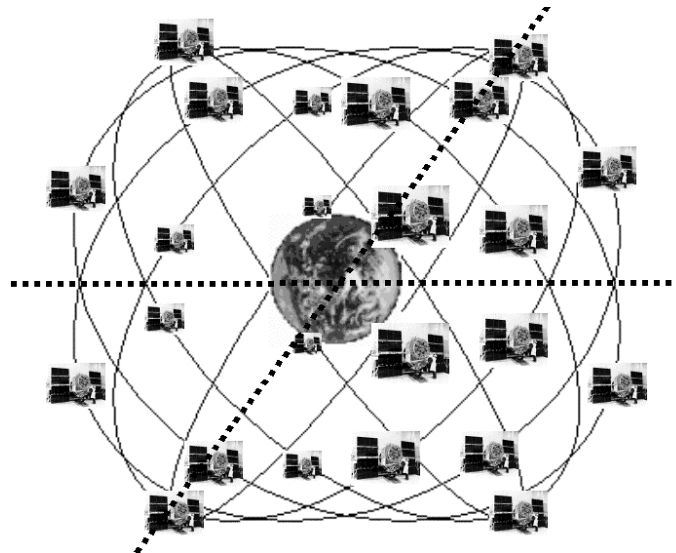


図-2.1 GPS 衛星の軌道

GPS による測位の原理について簡単に説明する。現在 24 個の GPS 衛星が高度 2 万 km で地球の周りを飛んでいるので、常時 5~8 個の衛星を捕捉できる。これらの衛星は地球を周回する惑星であるから、天体力学でその位置を計算できる。もしも、位置を測りたい物体と 3 個の衛星との距離が正確に分かると、衛星の位置が分かっているので、物体の位置、

すなわち座標を求めることができる。

精度の低い標準精度測位では、搬送波に埋め込まれたコードを用いて、衛星と物体の間の距離を測る。高精度測位では、搬送波そのものを使って測る。そのために、衛星からは46 時中電波が発射されている。また、その電波を受けるために、物体にはアンテナを付けておいて、アンテナで受けた電波を受信機で処理する。高精度測位の場合にどんな処理をするかという、衛星から発射された電波を受信機で再生して、受け取った波の数をカウンタで測る。一方、衛星が送り出した波の数は、時間の関数であるから計算できる。衛星が送り出した波の数から、物体に積んである受信機が受け取った波の数を引くと、衛星と物体の間にある波の数になるので、これに電波の波長を掛けると衛星と物体との間の距離になる。

受信機で受けた波の数を測るといったが、ここに大きな問題が一つある。受信機が波の数を測りだすのは、受信機の電源がオンになったときからである。それまでの波の数は分からない。このことを不定性というが、これを何らかの方法で求める必要がある。このことが高精度測位の一つの重要なキ・ポイントである。

GPS の電波にはいろんな誤差が乗っている。銀河電波雑音、対流圏雑音、地面の熱輻射、ケ・ブル熱雑音、増幅器熱雑音などである。衛星からの電波は、誤差で完全に埋もれている状態である。GPS 信号にはコードが埋め込まれているので、相関計算によって信号を回復する。

これ以外に、別の種類の誤差が乗っている。この誤差をうまく除去することが、もう一つの重要なキ・ポイントである。誤差の原因としては、衛星の位置や時計の狂いと言ったような衛星に起因する誤差、受信機の時計の狂いと言ったような受信機に起因する誤差、衛星と受信機のアンテナを結ぶ伝播路に起因する電離層遅延、対流圏遅延などの誤差がある。時計が1/1000 秒狂うと、光の速度は毎秒30 万 km であるから、 $30 \text{ 万 km} \times 1/1000 = 300 \text{ km}$  の誤差になる。しかし、これらの誤差のほとんどは、原因がはっきりしているの、バツサリ落とすことができる。例えば、衛星の時計の狂いは、観測点の他に、基準点を設けて同時観測し、計測値の引き算をすることにより落ちる。何故なら、衛星の時計の狂いに基づく誤差は、両方の計測値に共通に入っているからである。しかし、電離層遅延や対流圏遅延はこのような方法では処理できない。高精度測位ではこれが大きな問題となる。

歴史的には、GPS は VLBI (Very Long Baseline Interferometry) によって開発された測位技術を、人工的なシステムに発展させたものであるといわれている。GPS 衛星の主要諸元を表 2.1 に、測位用電波信号の仕様を表 2.2 に示す。GPS 衛星には精度の高いセシウム原子時計が積まれている。また、L1 および L2 と呼ばれる約 1.6GHz (波長 19cm) および約 1.2GHz (波長 24cm) の2 種類の電波を発しているが、2 波を使う理由は後述するように、電離層の影響を除去するためである。この電波には、民間の使用が許されている C/A コードと軍用の P コードおよび衛星の位置計算のためのメッセ・ジが乗っている。

24 個の全 GPS 衛星はまったく同じ周波数を用いているが、混信しないのは拡散スペクトル通信方式 (spread spectrum, SS) という技術を用いているからである。図 2.2 に搬送波と信号の変復調について示す。表 2.3 に GPS の測位方式による分類、表 2.4 と図 2.3 に GPS による測位の精度を示す。

表 2.1 GPS 用の人工衛星群の主要諸元 (土屋, 辻 (1995))

衛星の通称	NAVSTAR/GPS					
衛星総数	24					
軌道の形	円 (離心率はほぼ 0)					
軌道高度	約 20,000km (軌道半径 約 26,600km)					
周回周期	約 11 時間 58 分 02 秒 (0.5 恒星日)					
衛星の軌道面	6 面 (1 面に 4 衛星ずつを配置)					
軌道傾斜角 (衛星の軌道面と地球赤道面とのなす角)	55°					
昇交点赤経 (衛星が南から北へ地球赤道面を横切る点の赤経)	330, 30, 90, 150, 210, 270°					
	軌道面記号	A	B	C	D	E F
衛星重量	844kg					
太陽電池出力	700W					
測位用電波	L 1 帯 C/A	480W (EIRP (equivalent isotropic radiated power) 輻射電力、送信機の出力にアンテナ利得を乗じた値)				
	P	240W				
	L 2 帯 P	81W				
基準発振器	10.23MHz	セシウム原子周波数標準 (原子時計) 2台 安定度 $10^{-13}$ ルビジウム原子周波数標準 2台 予備水晶発振器				
送信アンテナ	12 素子ヘリカルアンテナ 衛星直下よりも周辺により強く放射するように設計されている (成形ビームアンテナ)。					
衛星の設計寿命	7.5 年					
打ち上げロケット	デルタロケット (始めはスペースシャトルを予定)					

(現在の状況で、実験段階では違う数値の項目もある)

表 2.2 GPS 衛星から送られてくる測位用電波信号 (土屋, 辻 (1995))

L 1 帯	1,575.42MHz = 154 × 10.23MHz	C/Aコード Pコード (Yコード)	航法メッセージ	一般用に解放
L 2 帯	1,227.6MHz = 120 × 10.23MHz	Pコード (Yコード)		原則として軍用 GPS測量では使用
	ビット率	コードの長さ	備考	
C/Aコード*	1.023Mbps	1.023bit = 1 ms	一般用	
Pコード#	10.23Mbps	約 $6 \times 10^{12}$ bit = 7 day	軍用、現在秘密操作中 Yコードに変換	
航法メッセージ	50bps	サブフレーム = 300bit = 6 s メインフレーム = 1500bit = 30s 5 サブフレーム = 1 メインフレーム 25 メインフレーム = 1 マスターフレーム	自分自身の軌道情報 全衛星の概略軌道情報 電離層補正係数 衛星時計の補正係数等	
基準周波数	10.23MHz + 0.00455Hz (軌道上の重力に対応した相対論補正)			
註*	C/Aコード (Sコード)	Clear and AcquisitionまたはCoarse and Accessの略、 Standard code (S code) ということもある。		
#	Pコード	PrecisionまたはProtectの略		

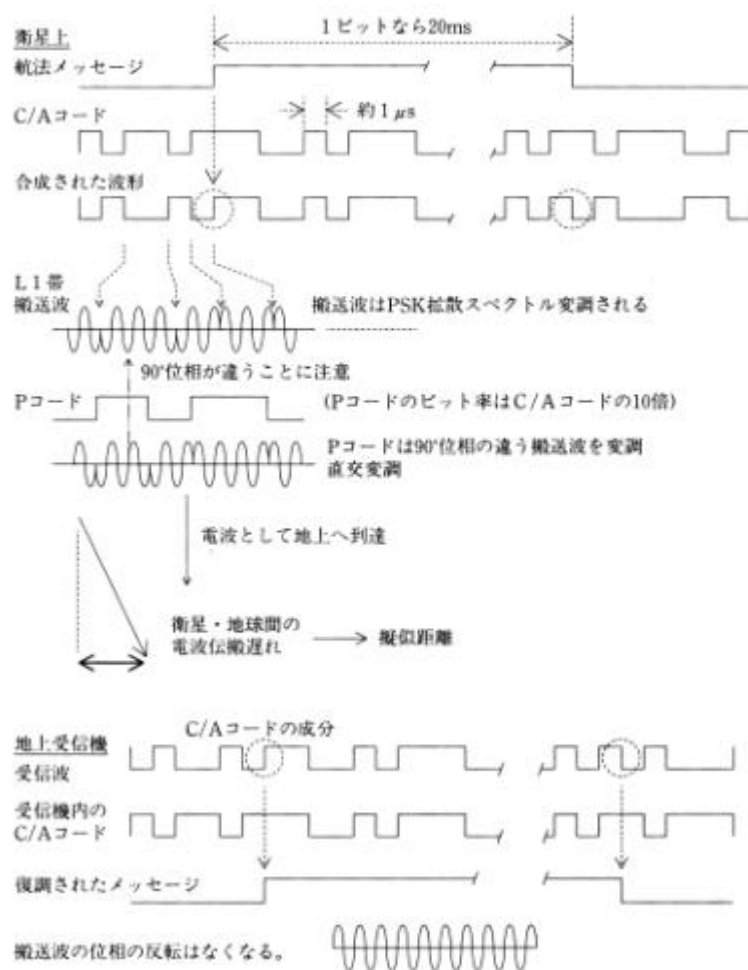


図 2.2 コード、航法メッセージ、および搬送波の関係（土屋，辻（1995））

表 2.3 測位方式からみた GPS の分類

	コード	搬送波位相
単独観測	単独測位	PPP(高精度単独測位)
相対観測	DGPS	スタティック， キネマティック

表 2.4 GPS による測位の精度

名称	精度	備考
単独測位	10m	SA 作用時は 100m
DGPS	1m	SA は無関係
キネマティック	1cm	測量，高精度計測，オフライン
RTK	1cm	キネマティックと同等，ただし短基線，リアルタイム
スタティック	1mm	測量，地殻変動観測，オフライン

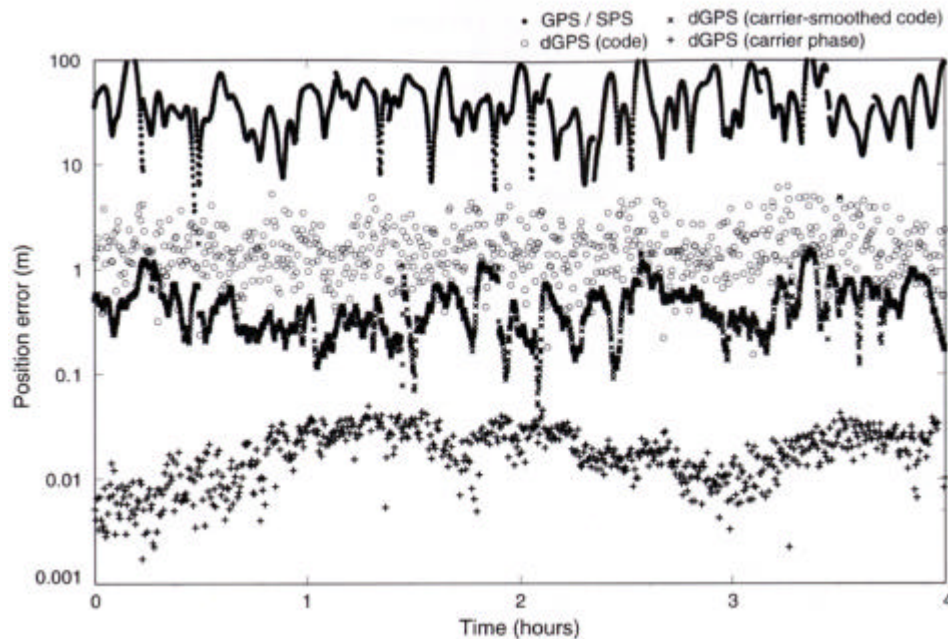


図 2.3 単独測位，コ - ド DGPS ，位相 DGPS による測位の精度。このデ - タは 1997 年の  
ものであるので，SA がアクティブで，単独測位（GPS / SPS）は，この影響を受けている  
（Misra & Enge（2001））

擬似距離（コ - ドを用いて測った衛星と受信機間の距離の観測量）の精度は，パルス長の 1/100 くらいであるので，C/A コ - ドの場合には伝送レ - トが 1.023Mbps であるので精度は 3m，P コ - ドの場合には伝送レ - トが 10.23Mbps であるので精度は 0.3m である。表 2.2 に示したように，C/A コ - ドのコ - ド長は 1ms（300km），P コ - ドのコ - ド長は 7 日である。

#### 参考文献

- [1] 土屋 淳，辻 宏道，(1995)，「GPS 測量の基礎」，(社)日本測量協会。
- [2] 土屋 淳 (2001)，「仮想基準点方式について」，RTK-GPS 測位に関する研究発表会  
仮想基準点方式等による 資料集，日本測量協会，p.1 ~ 11
- [3] Misra, P., Enge, P., (2001), Global Positioning System, Ganga-Jamuna Press.