

# GPS と物理

野村 清英

九州大学理学部物理

平成 21 年 6 月 10 日

## 概要

GPS(Global Positioning System) は人工衛星のネットワークを使った全世界的測位システムで、位置、時間、速度を手軽かつ正確に計測できるものです。元来はアメリカ国防省が軍事用に開発したのですが、一部は民間用に公開され、航空、船舶の航法用のみならず、カー・ナビゲーションシステムで広く使われるようになりました。また、GPS 受信機内蔵の携帯電話、デジタルカメラも出てきました。他に精密測量用途にも使われつつあります。

実は GPS には特殊相対性理論、一般相対性理論、量子力学など物理の基本原則が関係しています。

## 1 GPS の概観

24 ~ 28 個の GPS 衛星に互いに同期した原子時計を積んでおり、GPS 衛星の位置と時刻の情報を電波で地球表面へ送信しています。これにより、測定地点から衛星までの時間差を測定でき、それに光速を掛けることで距離が求まります。4 つ以上の衛星からの情報で、位置と時間を求めることができます。

1970 年代からアメリカ国防省が開発を進め、原型のブロック I 衛星は 1978 年から 1985 年まで 10 機打ち上げられました。1989 年からは運用型のブロック II 衛星が打ち上げられ、1994 年からシステムとして完成しました (しかしそれ以前から部分的運用はされており、1991 年の湾岸戦争でも使われました)。

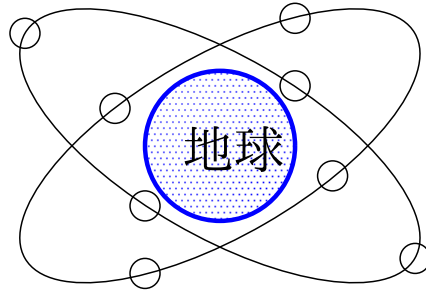


図 1: 中央の球が地球、周囲の小さな丸印が GPS 衛星

## 1.1 GPS 測位の原理

GPS による測位の原理は、局所慣性系での光速

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/sec} \quad (1)$$

が一定であること (特殊相対性理論) を利用して、GPS 衛星からユーザー受信機への電波の到達時間差から、位置を求めるものです。

### 1.1.1 理想的な場合

まず、GPS 衛星とユーザー受信機ともに正確な時計を共有している場合を考えましょう。この時、ある GPS 衛星から電波を送信した時刻  $t_t[\text{sec}]$  と、ユーザー受信機で受信した時刻  $t_r[\text{sec}]$  を測定すれば、その間の距離  $r[\text{m}]$  は光速  $c[\text{m/sec}]$  を使って

$$r = c(t_r - t_t) \quad (2)$$

により求めることができます。

次に複数の GPS 衛星 ( $N$  個) を考え、 $i$  番目の GPS 衛星とユーザー受信機の間での測定距離を  $r_i[\text{m}]$  とします。GPS 衛星の位置はわかっているものとしてユーザー受信機の位置を求めることを考えます。ユーザー受信機位置を  $(x, y, z)$ 、 $i$  番目の GPS 衛星の位置を  $(x_i, y_i, z_i)$  とすると、

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \quad (3)$$

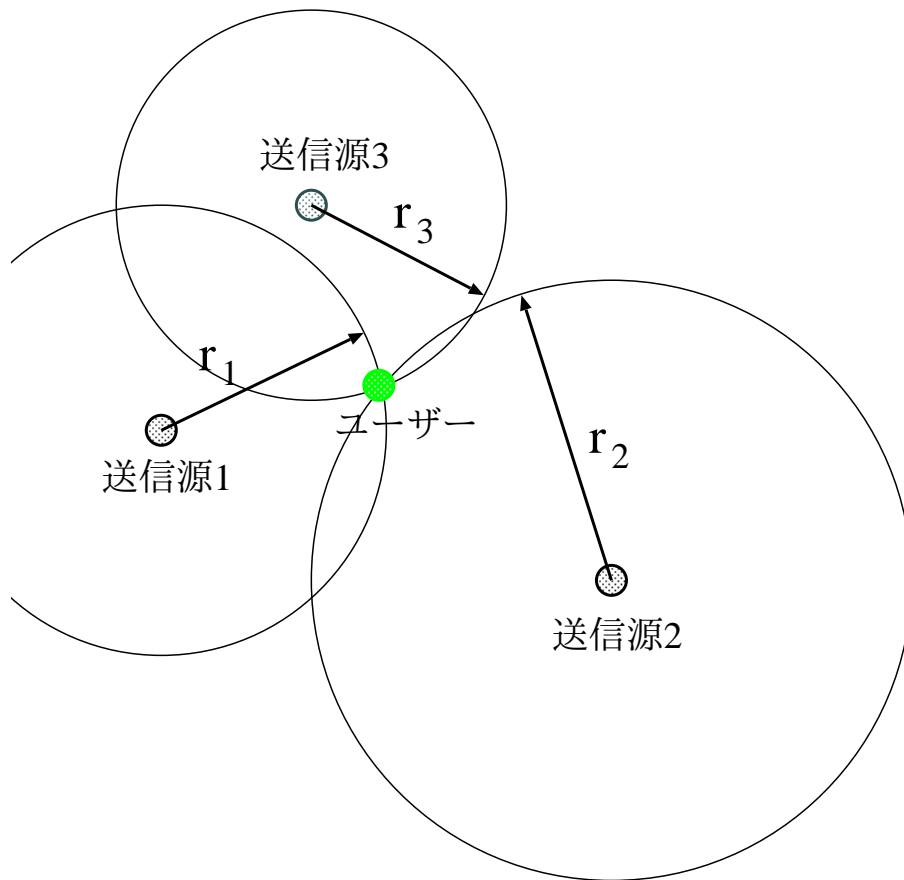


図 2: ユーザー位置は、送信源からの距離が一定の球面の交点として求められる。

したがって、ユーザー受信機位置を求めるには

$$\begin{aligned}
 r_1^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\
 r_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\
 &\dots \\
 r_N^2 &= (x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

の連立方程式を  $(x, y, z)$  について解けば良いわけです。これは平面図で表すと、図 2 のように、各送信源を中心とする円の交点として位置を求めることに当たります。

### 1.1.2 ユーザー受信機の誤差を考えた場合

次にユーザー受信機の時計に誤差がある場合を考えます。実際、GPS 衛星には高精度の原子時計が搭載されているのに対して、ユーザー受信機には原子時計より精度は落ちますが、ずっと安価で取扱いの容易な水晶時計を使っています。

$i$  番目の GPS 衛星とユーザー受信機の正確な距離を  $r_i$ [m]、受信機の時計の進みを  $\delta$ [sec]、受信機の時計誤差を含む測定時間差から求めた疑似距離 (pseudo-range) を  $r'_i$ [m] とするとその間の関係は

$$r'_i = r_i + c\delta \quad (5)$$

となります。この場合はユーザー受信機位置を求めるには

$$\begin{aligned} (r'_1 - c\delta)^2 &= (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ (r'_2 - c\delta)^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ &\dots \\ (r'_N - c\delta)^2 &= (x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

の連立方程式を  $(x, y, z, \delta)$  について解けば良いわけです。未知数が 4 つですので、最低 4 つ以上の方程式、つまり 4 つ以上の GPS 衛星のデータが必要です。

より多くの GPS 衛星のデータが利用できれば、より精度の高い位置情報を得ることができます。

## 1.2 高精度の時刻同期の必要性

GPS にもとめられる距離精度は数 m 程度です。従って時間精度としては 10 n sec ( $10^{-8}$  sec、1 億分の 1 秒) 程度あれば良いわけです。ではなぜ高精度の時刻同期システムが必要なのでしょう？

例えば、 $10^{-12}$  (1 兆分の 1、または 3 万年に 1 秒の誤差に相当) の精度の時計を使ったとしましょう。これを 1 日 (=86400 sec) 動かすと

$$8.64 \times 10^4 \text{sec} \times 10^{-12} = 8.64 \times 10^{-8} \text{sec} \quad (7)$$

の誤差がでます。これに光速度を掛けて距離の誤差に換算すると、

$$8.64 \times 10^{-8} \text{sec} \times 3 \times 10^8 \text{m/sec} = 25.9 \text{m} \quad (8)$$

となります。したがって、数 m 程度の距離精度を実現するためには、頻繁に衛星の時刻を較正するか、原子時計のような高精度の時計が必要ということになります。

まとめると、高精度の距離測定のためには、各衛星間の高精度の時刻同期が要求され、このため高精度の原子時計や、相対性理論を考慮した補正が必要となります。

## 2 原子時計 (量子力学)

GPS 衛星には周波数安定度  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  程度の高精度な原子時計が搭載されています。

ある 2 つのエネルギー準位  $E_1, E_2$  を考えると、その吸収、放出のスペクトル線の周波数  $\nu$  は次の式で与えられます [3]。

$$\nu = (E_2 - E_1)/h \quad (9)$$

ここで、 $h$  はプランク (Planck) 定数です。

測定周波数の精度はハイゼンベルク (Heisenberg) の不確定性関係により測定時間により決まります。測定時間を  $\Delta t$ 、エネルギーの不確定性を  $\Delta E$  とすると、ハイゼンベルクの不確定性関係 [3] から

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \quad (10)$$

となります。式 (9) から  $\Delta E = h\Delta\nu$  であることを考慮すると、周波数の不確定性は

$$\Delta\nu = (2\pi\Delta t)^{-1} \quad (11)$$

であたえられます。したがって、観測時間を伸ばすほど周波数精度の向上が出来ます。 $\Delta t$  は励起状態の寿命、相互作用時間などにより決まります。

ハイゼンベルクの不確定性関係は 1 個の原子の共鳴周波数を計測する場合の精度の限界でしたが、多数の原子 (数百万個) による共鳴周波数を計ることでさらに高い精度が実現できます。

原子時計では、原子固有の性質を使っているため、誤差が大変小さいのです。

## 2.1 原子時計と超微細構造

主な原子時計は、水素原子や、セシウム、ルビジウムなどアルカリ金属原子の基底準位の超微細構造準位間のマイクロ波遷移を利用したものです。アルカリ金属原子では、閉殻の外に1個の電子をもつ原子ですので、原子のエネルギーはこの最外殻電子の状態により決まり、理論的扱いが水素原子と同様、容易になります。

アルカリ金属原子の全エネルギーは電子の軌道角運動量とスピン（電子、陽子、中性子などの素粒子の固有角運動量）で決まります。原子核の核スピンと電子スピン ( $1/2$ ) の相互作用により、基底準位に分裂が生じます。これを超微細構造と呼びます。

電子の軌道角運動量  $L$ 、電子のスピンは  $S = 1/2$  ですので、これらを合成した電子の全角運動量  $J$  は  $J = L + 1/2, L - 1/2$  といった値をとります。アルカリ金属原子の基底状態では最外殻電子の軌道角運動量  $L$  は0です。軌道角運動量が0以外では、電子のスピンとの相互作用でエネルギー準位が分裂 (LS 結合) しますが、これを微細構造と呼びます。さらに電子スピンと核スピンとの相互作用でより小さなエネルギー準位の分裂が見られ、これを超微細構造と呼びます。

原子核の核スピン  $I$  は原子核の質量数が偶数、原子番号が偶数の時  $I = 0$ 、質量数が奇数の場合は核スピンは  $I = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ 、質量数が偶数、原子番号が奇数の場合は  $I = 1, 2, 3, \dots$  といった値をとります。

原子核のスピン  $I$  と電子のスピン  $S = 1/2$  の合成スピン  $F$  は  $F = I + 1/2$  と  $F = I - 1/2$  の2つの値をとります。この2つの状態の間にはエネルギー準位の分裂が見られ、これを超微細構造と呼びます。

超微細構造のスペクトル線は以下のような特徴をもちます。

1. 周波数がマイクロ波領域にあるので、直接計数が可能です。
2. 超微細構造の励起状態の寿命は極めて長く ( $10^{18}$ [sec] 程度<sup>1</sup>)、スペクトル線の自然幅は無視できます。
3. エネルギー準位間の分布差は、熱平衡状態では極めて小さいので、その観測には準位間に分布差を与える下準備が必要です。

---

<sup>1</sup>超微細構造準位間遷移は磁気双極子遷移であるため。

## 2.2 セシウムビーム型原子時計

セシウム (Cs) 原子時計は、 $^{133}\text{Cs}$  の基底状態 (6S 軌道) の超微細構造準位間の遷移周波数<sup>2</sup>

$$\nu_{Cs} = 9,192,631,770\text{Hz} \quad (12)$$

を計測して、高精度に時間と周波数を求めるものです。 $^{133}\text{Cs}$  の原子核のスピンは  $I = 7/2$  なので、基底状態 6S には  $F = 4, 3$  の超微細構造があります。

セシウムビーム型原子時計ではセシウムを摂氏 100 度で加熱して原子ビームをつくり、これを偏向磁場 (最近では半導体レーザーによる光ポンピング) で準位間の分布差を作り、さらに 2 個の空洞共振器の組み合わせで共鳴周波数を測定します (ラムゼイ (Ramsey) 共鳴) [4]。2 個の空洞共振器の間を原子ビームが移動する時間が観測時間  $\Delta t$  にあたり、これによりスペクトル線幅が決まります。

ラムゼイ共鳴では原子ビームと垂直方向に電磁波を加えるので、1 次のドップラー効果は寄与しませんが、特殊相対性理論による 2 次のドップラー効果は残ります。また、偏向磁場を用いるものではこれによる残留磁場の影響があります。光ポンピング方式では残留磁場の影響がないので時間精度が向上します。

## 2.3 ルビジウムガスセル型原子時計

ルビジウム (Rb) 原子時計は  $^{87}\text{Rb}$  の基底状態 (5S 軌道) の超微細構造の遷移周波数

$$\nu_{87Rb} = 6,834,682,612.8\text{Hz} \quad (13)$$

を計測して、高精度に時間と周波数を求めるものです。 $^{87}\text{Rb}$  の核スピンは  $I = 3/2$  なので、その基底状態 5S には  $F = 2, 1$  の超微細構造があります。

この型の原子時計はガスセルに閉じ込めたルビジウム原子の光ポンピングとマイクロ波遷移の 2 重共鳴によるものです [4]。(5S 準位と 5P 準位からなる) 3 準位系の光ポンピングにより基底状態の 2 つの超微細構造の間に分布差を作り、上の準位の原子がマイクロ波により誘導放出することを利用して超微細構造の遷移周波数を測定します。

---

<sup>2</sup>1967 年の国際協定での秒の定義の採択値でもある。

具体的には、当初  $^{87}\text{Rb}$  原子は  $5\text{S}$  の  $F = 2, 1$  の準位にほぼ均等に分布していますが、これに  $F = 1$  と  $5\text{P}$  のエネルギー準位差に対応する光スペクトルを当てることで、 $F = 1$  から  $5\text{P}$  へと励起します。次に  $5\text{P}$  から自然放出して  $F = 2, 1$  準位に落ちます。 $F = 1$  準位に落ちた原子はさらに光による励起を受けますが、 $F = 2$  準位にある原子は励起されません。このような過程を繰り返すことで、 $F = 2$  準位に多くの原子が集まり、大きな分布差を生じます（図 3 参照）。この状態のガスセルにマイクロ波を当てると  $F = 1$  と  $F = 2$  の遷移周波数と一致したところで誘導放出が起きます。ここで光スペクトルの透過強度を測定すると、マイクロ波周波数が  $F = 1$  と  $F = 2$  の遷移周波数と一致したところで吸収が最大となります [4]。

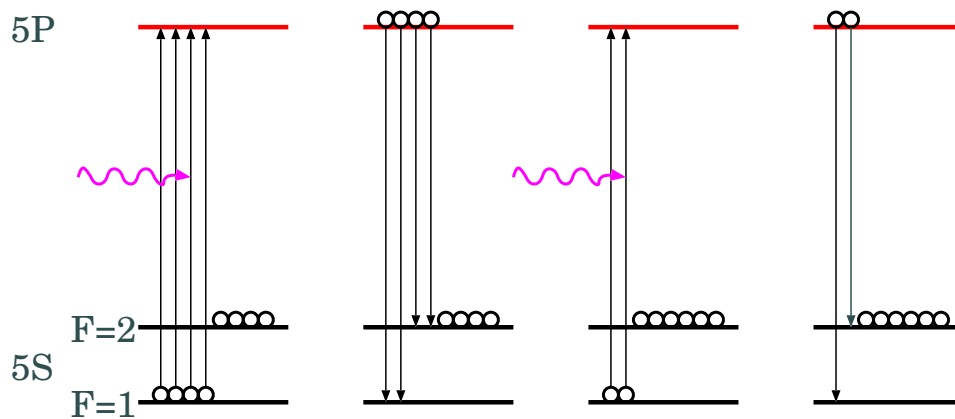


図 3: 3 準位系の光ポンピング

なお、ガスセル中でルビジウム原子が拡散して壁でトラップされるまでの時間を長くするため、緩衝気体 (Ne, Ar, Kr,  $\text{N}_2$  など) を封入します。ルビジウムガスセル型の原子時計の観測精度は原子の緩和時間で決まります。

ルビジウムガスセル型の原子時計はガスセルに Rb とともに封入する緩衝気体による共鳴周波数のシフトが大きく、1 次標準器には適していません。しかし小型軽量にできるので、実用標準器として広く使用されています。



### 3 時刻同期 (相対論)[5]

#### 3.1 GPS 衛星側での補正

GPS 衛星上では相対論的效果により、時間の進み方が地表と異なるので、あらかじめ衛星搭載時計の周波数を  $-4.45 \times 10^{-10}$  オフセットして、UTC(協定世界時) と同期しています。

1. 一般相対論による補正 (重力による赤方偏移)

地球表面と、GPS 衛星上での重力ポテンシャルの差により、GPS 衛星上での時間は地表より早く進みます。その大きさは、

$$\Delta U/c^2 = 5.27 \times 10^{-10} \quad (14)$$

です。

2. 特殊相対論による補正 (2次ドップラー効果)

GPS 衛星の速度 (3.874 km/sec) により、GPS 衛星上での時間は地表より遅くなります。その大きさは、

$$-(v/c)^2/2 = -8.4 \times 10^{-11} \quad (15)$$

です。

相対論的效果による時間の遅れをまとめると、地球中心を基準にした慣性座標系 ECI(Earth-Centered Inertial system) の中を速度  $v$  で移動する時計の示す固有時  $d\tau$  は、座標時  $dt$  と以下の関係になります。

$$d\tau \approx \left(1 + \frac{U}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2}\right) dt \quad (16)$$

GPS 衛星は完全な円軌道ではないので、一様なオフセットだけでは相対論的效果を除去できません。精密な位置決定のためには式 (16) まで立ち戻って考慮する必要があります。

#### 3.2 ユーザー受信機側での相対論的補正

GPS システムの相対論的補正の中には、ユーザー受信機側に委ねられている部分があります。この部分のソフトウェアに関しては、さまざまな GPS 受信機メーカーによって異なり、中には相対論的補正を2重に勘定していた例もありました [2]。

### 3.2.1 サニャック (Sagnac) 効果

ユーザー側では、地球とともに回転する座標系 ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) をとる方が便利です。このとき、地球回転に伴う誤差が生じます。GPS 衛星から観測点まで電波は有限時間 (約 70 m sec) で到達するが、その間に地球が回転しているために非回転系と回転系では差が生じるわけです。その効果は、緯度によっても異なりますが、数十 m です。この補正はユーザー側の受信機にまかされています。

なお、航空機、低軌道の人工衛星など高速で移動する物体に対するサニャック効果の扱いは微妙です。

### 3.2.2 相対論的離心率効果

GPS 衛星は完全な円軌道ではないので、一様なオフセットだけでは相対論的效果を除去できません。精密な位置決定のためには式 (16) まで立ち戻って考慮する必要があります。たとえば離心率 0.0015 では、 $\pm 10$  m の周期的な変動が起きることが理論的に予想され、GPS 衛星と海洋観測衛星 TOPEX/Poseidon 衛星<sup>3</sup>の組み合わせで 1995 年に実証されました [2]。

初期の GPS 衛星では搭載コンピューターの能力が限られていたため、相対論的離心率効果の補正はユーザー側の受信機にゆだねられることになっています。

## 4 その他の誤差要因

### 4.1 衛星軌道

GPS 衛星の位置は測位点での位置決めの基準ですから、できるだけ正確に決定されなければなりません。刻々の衛星位置は衛星から放送される 16 個の軌道係数を用いて計算により決定されます。これらの値は地上の監視局でモニタすることにより修正されますが、更新までの間に、地球が完全な球形からずれていること、太陽や月の引力、太陽光の輻射圧等の外乱などによりドリフトし、誤差を生じます。

---

<sup>3</sup>NASA とフランス国立宇宙開発センター (Center National d'Etudes Spatiales: CNES) 共同開発

## 4.2 電離層遅延

電波が地上に届くまでの伝搬経路には、地上約 50 ~ 1000 km の電離層と地球を取り囲む大気の層があります。電波が電離層中を通過するとき、電子密度に比例し、電波の周波数の二乗に反比例するある量だけ電波の速度が遅くなります。したがって、その遅延量を補正する必要があります。また、電離層の性質は一定ではなく、昼と夜、太陽活動の活発化などで大きく変動します。

電離層による遅延量を  $D_{iono}$ [m] とすると、

$$D_{iono} = \frac{40.3N_e}{f^2}, \quad (17)$$

となります。ここで、 $f$  は電波の周波数、 $N_e$  は経路上の全電子数です。

したがって、2周波以上の電波を使うと、電離層遅延量を測定することができ、補正できます。1周波でも電離層遅延量を推定するモデルを作り、補正することで 50 % 程度電離層遅延の誤差を補正できます。

## 4.3 対流圏遅延

電波は大気中を伝搬するときもわずかながら減速します。その程度は周波数に依存しないので、電離層と異なり 2周波でも測定は不可能です。しかし、電離層に比べて変化が少ないので、モデル化により比較的容易に補正ができます。

なお、水蒸気量の変化による対流圏遅延はモデル化しにくいですが、これを逆に利用して GPS のデータから水蒸気量を測定する GPS 気象学が進展しています。

## 4.4 マルチパス

GPS 衛星からユーザー受信機への直接の電波の他に、地上付近の建物・樹木・地表からの反射波による電波が入ります。これによる誤差をマルチパス誤差と呼びます。高度の低い GPS 衛星ほどマルチパス誤差を受け易いので、一定高度以上の GPS 衛星のデータのみ使えばマルチパス誤差の影響を小さくできます。

## 5 GPS システムの構成

GPS のシステム構成としては、宇宙部分、制御部分、利用者部分に分かれます。

### 5.1 宇宙部分 (space segment)

24 ~ 28 個の GPS 衛星が、昇交点赤経が 60 度ずつ異なる 6 つの軌道面 (1 軌道面に 4 ~ 5 個) に配置されています。衛星は赤道面軌道傾斜角 55 度、軌道半径 26,562 km (高度 約 20,200 km) のほぼ円軌道 (離心率 0.01 以下) を周期 11 時間 58 分で周回します。

GPS 衛星には高精度の複数の原子時計が搭載されています。1989 年から打ち上げられている GPS ブロック II, IIA では 2 つのセシウム (Cs) 原子時計 (主) と 2 つのルビジウム (Rb) 原子時計 (バックアップ) が搭載<sup>4</sup>されています。1997 年から打ち上げられている GPS ブロック IIR では 3 つのルビジウム (Rb) 原子時計のみが搭載<sup>5</sup>されています。

周波数安定度は  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  程度です。この高安定な周波数標準から、10.23MHz の基本周波数を作り、さらにこれを 154 倍 (1.57542 GHz の L1 波) および 120 倍 (1.2276 GHz の L2 波) して 2 つの搬送波周波数を得ます [1]。

### 5.2 地上制御部分 (control segment)

GPS 衛星の追跡と管制を行う地上の管制局です。制御部分は、5 つのモニター局 (monitor station: Ascension Island, Colorado Springs, Diego Garcia, Kwajalein, および Hawaii)、1 つの主制御局 (master control station: Colorado Springs の Schriever 空軍基地)、3 のアップロード局 (Ascension Island, Diego Garcia and Kwajalein) からなります (2006 年時点)。

モニター局からの衛星追跡データおよび衛星クロックデータは、主制御局に集められて軌道決定が行なわれます。そして最新の軌道情報・衛星クロック補正值が 1 日数回程度アップロード局のアンテナから GPS 衛星に伝えられます。

<sup>4</sup>ブロック II, IIA 搭載の原子時計の寿命は期待より短かった。

<sup>5</sup>ブロック IIR には Rb 原子時計 2 台、Cs 原子時計 1 台搭載の計画でしたが、宇宙用の Cs 原子時計の開発に失敗したため、Rb 原子時計 3 台の構成になりました。

GPS 時刻の基準は、アメリカ海軍天文台 (USNO: US Navy Observatory) のおよそ 50 台のセシウムビーム原子時計と 1 ダースに及ぶ水素メーザー原子時計のアンサンブルに基づく合成時計です (2003 年の時点)。GPS 衛星の時計の時刻は通常、海軍天文台のアンサンブルからおおよそ 20 n sec 以内であります [2]。

### 5.3 ユーザー部分 (user segment)

測位を行うための利用者の受信機システムです。3次元の位置を知るためには、最低限3つの GPS 衛星からの情報が必要ですが、他に受信機の時計の補正のために最低限4つの GPS 衛星からの情報が必要です。さらに4つ以上の GPS 衛星からの情報があれば、精度および信頼性の向上ができます。

精度に影響するのはユーザーから観測可能な GPS 衛星の数のみではなく、その配位にもよります。また、水平線に近い GPS 衛星からの電波は電離層遅延、対流圏遅延、マルチパスなどの誤差の影響を受けやすいのでこれらを除いたデータから位置、時間を決めます。

受信機側の時計は短時間の安定性のみ必要とされるので、水晶振動子で十分です。

## 6 精度と応用

### 6.1 単独測位

P (軍用) コードと C/A (一般用) コード

GPS は、1.57542 GHz(L1 波) と 1.2276 GHz (L2 波) の2つの周波数帯の電波を使っています。これにより、2周波により電離層による電磁波の遅延の補正が可能です。なお、L1 波のみの情報でも、適当な電離層モデルを使うことで電離層遅延の補正が 50% 程度できます。この周波数を周波数拡散変調 (PSK:Phase Shift Keying) することで、時刻の情報を載せています。

GPS は元々軍用に開発されたため、高精度の P コード (精度 6 ~ 16m, L1,L2 波) の仕様は公開されておらず、一般用の C/A コード (精度 40 ~ 100m L1 波) では、安全保障上の理由から意図的にノイズ (SA:Selective Availability) を入れ精度を落していましたが、2000 年 5 月 2 日以降 SA

は解除されました。SA の解除以降、一般用の C/A コードでも 5 ~ 20m 程度の精度は出せるようになりました [6]。SA の解除は、SA の影響を除く DGPS 技術 (後述) が一般的になり、もはや SA をかけている意義が薄れたとの判断によるものでしょう。

C/A コードは 1.023 Mbps; コード周期 1msec で変調されています。P コードは 10.23 Mbps; コード周期 1 週間で変調されています。

## 6.2 相対測位

### 6.2.1 DGPS(Differential GPS)

GPS の精度向上にはいくつか方法があります。すでに位置が分かっている地上の基地局で GPS 衛星からの電波をとらえることで、GPS の誤差を逆に推定できます。この誤差情報を別の電波を使って流すことで、一般用の C/A コードでも基地局周辺 (100-200 km 程度) での測定精度を数 m にまで向上させることができます。これを相対 GPS(Differential GPS) といいます。DGPS により、SA による人為的誤差、電離層遅延による誤差を除くことが出来ます。なお、遠距離になると、電離層での電波伝搬の遅延の揺らぎにより、精度に限界が出ます。

### 6.2.2 干渉測位法

元来 GPS は移動体での位置計測用ですが、固定した (複数の) 地点の測地用には観測時間を伸ばすことで精度を向上できます。10 km 離れた 2 点間の距離を数 mm の精度で図ることができます。これは、従来方式の GPS が搬送波に乗っているコードパターンの時間差を検出するのに対し、搬送波そのものの位相差 (波長の約 1/100 まで) を直接検出するものです。

干渉測位での誤差要因としては GPS 衛星の原子時計の誤差、GPS 衛星の位置誤差、受信機の時計の短時間時間安定性などがあります。これを打ち消すため、2 つの衛星からの電波を 2 点の受信点で受け、位相差の組合せにより誤差を相殺する「2 重位相差方式」[1] が開発され、精度が向上しました。なお、電離層遅延、対流圏遅延は距離が近い場合には相関があるので 2 重位相差方式で消去可能ですが、距離が遠くなるにつれこれらの誤差要因が大きくなります。

干渉測位特有の誤差要因としては波長の整数倍の不確定さがあります。これを消去するには、時間経過に伴う GPS 衛星の位置変化の情報を用いますが、この補正には 30 分から 1 時間程度の連続的な観測（初期化）が必要です。したがって移動体の計測には向きません。なお、多数の衛星を利用したり、複数の周波数を使うことで初期化の時間は短縮できます。

干渉測位法は精密測量に用いられています。これにより、地震前後の地面の変移なども観測できます。

### 6.2.3 RTK GPS(Real Time Kinematic GPS)

干渉測位法でも、固定地点の測量だけでなく、(やや精度は落ちますが)移動しながら多数の地点の測量も可能です。つまり、最初に波長の整数倍の不確定性を除去するための観測（初期化）を行なった後、移動しながら次々と多数の観測点の座標を決めます。RTK GPS(Real Time Kinematic GPS) は、通常移動中の観測局に基準局のデータを伝送するため無線データリンクと組み合わせて使用されます。

ただし RTK GPS は基準局からの距離が 10 数 km を越える場合には、電離層による位相の揺らぎにより、初期化までの時間が長くなったり、誤差が大きくなったりします。

一般の測量の他、空港など精密さを必要とする建設現場などでもつかわれています。

## 7 GPS 以外の衛星航法システム

アメリカの GPS 以外にも、同様の原理に基づく衛星航法システムが運用、計画されています。

### 7.1 GLONASS (ロシア)

GLONASS (Global Navigation Satellite System) はロシアにより運用されている衛星航法システムです。GPS に類似した衛星航法システムですが、GPS が符合分割多重接続 (CDMA) により衛星を識別しているのに対して、GLONASS では周波数多重多元接続 (FDMA) 方式を採用している点が大きな違いです。

仕様上は軌道傾斜角度 64.5 度、軌道半径 25,510 km の 3 軌道面に 8 衛星ずつ、計 24 衛星で運用されるものでしたが、1990 年代初頭に 24 衛星で運用された後、衛星の打ち上げが中断した時期があり、2004 年の時点で軌道上にあるのは 12 機程度です。測位を行なうには 4 機以上の衛星からの信号を受信する必要がありますが、GLONASS システムの現状では困難です。2008-2010 年までに再建しようという計画があります。

## 7.2 Galileo(EU)

Galileo システムは、欧州連合 (EU) および欧州宇宙機関 (ESA: European Space Agency) による、衛星航法システムの計画です。

Galileo 計画は 2000 年 4 月より具体的なシステム開発作業が開始されており、2005-2012 年にかけて実用衛星を製造、配備し (最初の衛星「GIOVE-A」は 2005 年 12 月 28 日にカザフスタンのバイコヌールから打ち上げ)、2006 年には初期運用を開始、2012 年 (当初計画より 4 年遅れ) までに本格運用を開始する予定です。

Galileo の特徴は、設計段階から具体的な民生用アプリケーションに必要な性能要件を考慮していることで、軍用システムではなく民生用ベースで開発が進められています。つまり、GPS や GLONASS では後から補うことになった部分が、当初から考慮されています。

Galileo システムは、3 つの軌道面を回る 30 個 (そのうち 3 つは予備) の衛星群により構成され、衛星軌道は 56 度の軌道傾斜角と軌道半径 30,000 km (高度 約 23,616 km) のほぼ円軌道となる予定です。

現在の GPS システムによる位置情報では約 5 ~ 20 m 程度での精度ですが、Galileo システム利用では、1 m 以内の精度を目指し (高速で移動する航空機に対しては 4 m 以内)、より正確な情報を発信できます。

Galileo システムでは、1164 ~ 1214 M Hz (E5 波)、1260 ~ 1300 M Hz (E6 波)、1563 ~ 1591 M Hz (L1 波) の 3 つの周波数帯で信号を放送することとしています。

- 公開サービス (Open Service, OS)

誰もが自由に使えるサービスで、1164 ~ 1214 M Hz (E5 波) と 1563 ~ 1591 M Hz (L1 波) の 2 つの周波数帯を使います。

精度は水平方向 4 m 以内、垂直方向 8 m 以内です。



- 暗号商用サービス (encrypted Commercial Service, CS)

暗号商用サービスは有料ですが、さらに高精度 (1 m 以内) です。

1164 ~ 1214 M Hz (E5 波)、1260 ~ 1300 M Hz (E6 波)、1563 ~ 1591 M Hz (L1 波) の 3 つの周波数帯を使います。

また、3 周波を使うことで干渉測位法 (RTK) の初期化が非常に短時間で行なえるようになります。これを TCAR (Three-Carrier Ambiguity Resolution) と呼びます。

### 7.2.1 国際協力

- 2003 年 10 月 30 日に中華人民共和国が Galileo 計画の開発・投資への参加の合意文書に EU・中国首脳会合で正式調印しました。
- 2004 年 7 月には、イスラエルが Galileo 計画のパートナーとなることに合意しました。
- 2005 年 6 月 3 日、ウクライナが Galileo 計画に参加する交渉を始めました。
- 2005 年 9 月 7 日 インドが Galileo 計画へ参加に調印しました。
- 2005 年 11 月 モロッコとサウジアラビアが Galileo 計画に参加しました。
- 2006 年 1 月 12 日韓国が Galileo 計画に参加しました。

## 7.3 北斗 (中国)

中国は、2000 年から 2003 年に 3 機の測位衛星「北斗」を静止軌道に打ち上げています。現在のところ、試験的なものです。

## 7.4 準天頂衛星システム (日本)

準天頂衛星システムは現在日本が計画中の衛星測位システムです。準天頂衛星システムは、日本のほぼ天頂を通る軌道 (周期一日) の衛星を、複数機並べることで、常に 1 機の準天頂衛星が日本の上空に位置するよ

うに配置されます。このような配置をとることで、マルチパスなどの影響が小さくなり、ビルの多い都市部でも使い易くなります。

日本上空での滞在時間が長くなるような楕円軌道(離心率 0.1 程度)の採用も考えられていますが、この場合、相対論的離心率効果は GPS よりずっと大きくなります。

準天頂衛星からは、L1 周波数、L2 周波数、E6 周波数、L5 周波数帯の合計 6 種類の衛星測位信号の送信が計画されています。

## 7.5 静止衛星による GPS 補強システム

DGPS による GPS 補強システムでは、基地局から利用できる範囲が限られるという問題がありました。

また、GPS 衛星の一部が故障したり、メンテナンスのために精度が落ちた場合、それを迅速に知るシステムがないと、航空機の航法のような広域かつ高い安全性を要求する用途には使えません。

そこで、静止衛星による GPS 補強システム(SBAS)があります。

### 7.5.1 WAAS

アメリカの SBAS(静止衛星による GPS 補強システム)で、2003 年 7 月より運用中です。

### 7.5.2 EGNOS

ヨーロッパの SBAS で、2005 年 7 月より試験運用中です。

### 7.5.3 MSAS

日本の SBAS で、ひまわり 6 号(MTSAT-1R) (2005 年 2 月打ち上げ) ひまわり 7 号(MTSAT-2) (2006 年 2 月打ち上げ) を使用して試験を行い、2007 年 3 月末に試験終了、2007 年 9 月 27 日から運用を開始しています。

## 参考文献

- [1] 「宇宙における電波計測と電波航法」、高野、佐藤、柏本、村田 共著、(コロナ社 ISBN:4-339-01221-1)
- [2] 「相対論と GPS」、ニール・アシュビー、パリティ(丸善) 2003 年 6 月号 18 ページ
- [3] 「現代の量子力学」、J.J.Sakurai, 吉岡書店
- [4] 「周波数と時間」、吉村 和幸、古賀 保喜、大浦 宣徳共著、(電子情報通信学会 ISBN:4-88552-085-1)
- [5] Neil Ashby,  
“Relativity in the Global Positioning System”,  
Living Rev. Relativity 6, (2003), 1. [Online article]  
<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/index.html>
- [6] 「GPS 技術入門」、坂井 文康 著、(東京電機大学出版会 ISBN:4-501-32260-8)