

# GPS の概要

安田 明生

## Overview of GPS

Akio YASUDA

This article focuses on the current status and future prospect of global navigation satellite system (GNSS). At first, the history, present status and modernization of GPS (global positioning system) are introduced. The main specifications of GPS satellite constellation and GPS signals are also described. Second, the principles of the position calculation by the pseudorange and carrier phase measurements are presented. The error sources and positioning accuracy are analyzed for various cases, such as SPS (standard positioning service) with and without SA (selective availability), future SPS with plural frequencies, PPS (precise positioning service) with dual frequencies and DGPS (differential GPS). Third, the trend of the wide area augmentation systems, such as WAAS (Wide Area Augmentation System) by US, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) by Europe and MSAS (Multi-functional Transport Satellite Satellite-based Augmentation System) by Japan, are reviewed. The GNSS besides GPS, such as GLONASS (Global Navigation Satellite System) by Russia and planned GALILEO by Europe are also reviewed. At last, the Quasi Zenith Satellite System (QZSS) planned by Japan is explained briefly.

**Key words:** global positioning system (GPS), global navigation satellite system (GNSS), pseudorange, carrier phase, quasi zenith satellite system (QZSS)

GPS (global positioning system) は、地球規模でいつでもどこでも、瞬時に高精度な位置が求められるシステムの構築を目指し、米軍により 1973 年に開発が着手された<sup>1)</sup>。1978 年から 1985 年の間に合計 11 機 (うち 1 機は打ち上げ失敗) の試験衛星ブロック I 衛星が打ち上げられ、システム試験が続けられた。1989 年から実用衛星ブロック II 衛星の打ち上げが開始され、26 衛星を地上 2 万 km の軌道上に配置した 1993 年 12 月、正式に GPS の初期運用開始が宣言された。このときから、地球上どこでもいつでも連続的に誤差が水平方向で 100 m 以内、垂直方向で 150 m 以内の高精度測位が保障されることになった。ブロック I 衛星の実験で当初の見積もりよりも格段によい測位精度が得られたので、敵対国の利用を制限するためブロック II 衛

星からは精度劣化機能をもたせ、SA (selective availability: 選択利用性) とよばれる操作を施していた。しかし、2000 年 5 月には対策を施したとして SA が解除され、現在では単独測位でも 10 m 程度の測位精度が得られるようになっている。また、今後 GPS の近代化政策の推進、ロシア版 GPS である GLONASS (Global Navigation Satellite System) の再構築、2008 年運用開始を目指す欧州の GALILEO 計画の推進、わが国の準天頂衛星システムなど、測位環境は今後 10 年間に大幅に改善されるものと期待される。また、衛星航法システムの将来は、受信技術の革新、種々の応用技術の開発により、応用分野は爆発的に拡大していくことが予想される<sup>2)</sup>。

表1 GPS衛星の主要諸元.

衛星個数	4個×6軌道面
設計寿命	7.5年
軌道半径	26561 km
周回周期	12 恒星時間 (約 11 時間 58 分 2 秒)
軌道傾斜角	55°
送信電力	L1: C/A code 約 26 W, P code 約 13 W L2: P code 約 4 W
搬送波	L1: 1575.42 MHz (10.23 MHz×154)
周波数	L2: 1227.6 MHz (10.23 MHz×120)
測距信号	C/A code: L1 波で送信, 民生用に解放 P(Y) code: L1, L2 で送信, 非公開
地上受信電力 (仰角 5° 以上)	L1: C/A code > -160 dBW, P code > -163 dBW L2: P code > -166 dBW
搭載原子時計	セシウム原子周波数標準器 2 台 ルビジウム原子周波数標準器 2 台
単独測位精度	C/A code: 約 15 m ( $2d_{rms}$ ) P code: 約 10 m ( $2d_{rms}$ )

## 1. GPS 衛星の現状と将来動向

GPS は, 表 1 に示すように, 昇交点傾斜角が約 55 度で昇交点経度が 60 度ずつ異なる 6 つの軌道面上に 4 機ずつの人工衛星を配し, 24 衛星で全地球をカバーして所定の機能を果たすとされている. 衛星の周回周期は約 11 時間 58 分 2 秒 (1/2 恒星日) で, 地球上のどこでも約 23 時間 56 分 4 秒ごとに同じ衛星の配置が上空に現れることになる.

各衛星は 10.23 MHz の基準発振器をもっており, 154 倍の  $L1=1575.42$  MHz と 120 倍の  $L2=1227.6$  MHz の 2 周波の右旋円偏波を地球全域に向けて送信している<sup>3)</sup>. 全衛星が同一の周波数を用い, 衛星ごとに互いに異なる擬似ランダム雑音 (PRN: pseudo random noise) で二相位相変調されている. この PRN としては, C/A コードと P コードとよばれているゴールド符号を用いている. C/A コードはビットレート 1.023 Mbps, コード長 1023 (1 ms) で,  $L1$  帯にのみ載せられ, 民間に使用が許されている. これによる測位は SPS (standard positioning service) とよばれている. P コードはレートが 10.23 Mbps で, 暗号化され, P (Y) コードとよばれる. これによる測位は PPS (precise positioning service) とよばれ, 米軍関係者のみ使用可能である. 表 2 に示すように, 航法メッセージとして衛星軌道

表2 航法データの概要.

伝送レート	50 bps
構成	1500 bit/フレーム 1 周期 (12.5 分) 25 フレーム
航法データの おもな内容	衛星軌道情報 (ephemeris) 搭載時計の情報 (GPS 時間との差) 電離層補正データ 他の衛星の位置情報 (almanac)

情報 (ephemeris), 衛星時計の情報, 電離層補正データ, 他の衛星の位置情報 (almanac) 等, 測位計算に必要な航法データなどがコード周期の 20 倍の 50 bps で送信されている. ほとんどの衛星は設計寿命より長く稼動し, 2003 年 5 月現在, 軌道上で利用可能な衛星は 29 機である. ブロック I 衛星はすべて退役し, 現在はおもにブロック II および II A が就役し, ブロック II R が 9 号機まで打ち上げられている. 表 3<sup>4)</sup> に示す新民生用コード (L2C) を  $L2$  に追加したブロック II M の 1 号機は, 2004 年 7 月から打ち上げが開始, 2009 年には初期運用が開始される予定である. またさらに, 民生用  $L5$  (1176.45 MHz) も追加するブロック II F 衛星は 2009 年打ち上げ開始, 2013 年初期運用開始の予定である. また, 30 年後の理想的な衛星測位システムの構築を目指して, GPS III の開発研究が始まっている. 表 3 に, 3 つの民生用周波数と拡散符号の比較を示す. なお, ブロック II M の  $L1, L2$  には M コードとよばれる軍事用のコードが載せられる予定である. M コードの変調方式は BOC (binary offset code) とよばれるもので, 位相変調された信号をさらに特定の周波数で平衡変調して, 信号エネルギーを搬送波周波数から遠ざけている.

## 2. GPS による測位と時刻同期の仕組み

コードを用いた測位では, 図 1 に示すように,  $i$  番衛星から発射された電波が利用者受信機に到達するまでの時間  $\Delta t_i$  を測定し, 光速  $c$  を乗じることにより, 衛星までの距離  $r_i$  を測定する.

$$r_i = c \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

実際の測距は, C/A コードで拡散された衛星信号を, DLL (delay lock loop) を用い, 受信機が発生したコード

表3 3つの民生周波数と拡散符号の比較.

Civil signal	Carrier frequency (MHz)	Code length (chips)	Code clock (MHz)	Modulation	Data bit rate (bps)	Full operation capability
L1	1575.42	1023	1.023	BPSK	50	Now
L2	1227.60	10230 767250	1.023	BPSK	25	~2012
L5	1176.45	10230 10230	10.23	QPSK	50	~2015

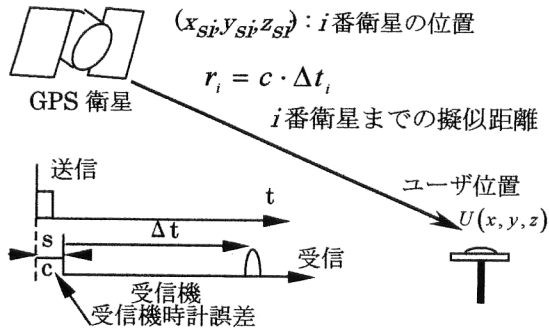


図1 擬似距離測定の仕組み。

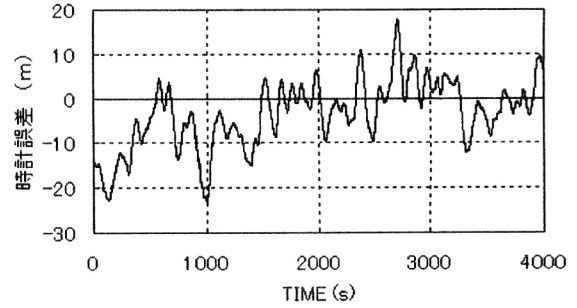


図2 受信機時計誤差の時間変化. 式(2)の  $s$  に相当.

で逆拡散して、相関値が最大になるようコードを追尾し、そのタイミングで衛星からの所要時間  $\Delta t_i$  を求めている。一方、 $i$  番衛星の座標を  $x_{si}, y_{si}, z_{si}$  とし、受信機の未知の座標を  $x, y, z$  とすると  $r_i$  は、

$$r_i = \sqrt{(x - x_{si})^2 + (y - y_{si})^2 + (z - z_{si})^2} + s \quad (2)$$

となる。  $s$  は受信機時計の誤差を距離誤差に換算したものである。

衛星はルビジウム (Rb) やセシウム (Cs) などを用いた原子時計を搭載しており、時計の安定度は  $10^{-12}$  以下ときわめて高いが、利用者はそのような高価で大がかりなものを用意することは困難である。したがって、通常の利用者では正確な距離を求めることができない。すなわち、利用者時計の誤差に相当する共通の距離誤差  $s$  がすべての衛星に対して付加される。そのため、利用者受信機で測定される時間差から得られる衛星までの距離を擬似距離とよぶ。  $s$  はすべての衛星に対して共通となるので、4機の衛星までの擬似距離を測定することにより、受信機の三次元位置と同時に時計誤差が求められる。この誤差成分で発振器の位相を調整することにより発振器を安定化でき、また時刻同期にも利用できる。1秒ごとに PPS (pulse per

second) とよばれるパルスを出力する受信機も市販されている。時刻同期の精度はGPS受信機の測位精度にかかわり、通常移動体用の受信機では100 ns程度、定点で用いる場合は10 ns程度といわれる。測位計算には式(2)を用いるが、これは非線形なので、一意には解けない。そこで、未知数を近似値と補正值との和で表し、式をその補正值について展開し、高次の項を無視して線形化し、逐次近似で補正值が最小となるまで繰り返すことにより正しい位置と  $s$  を求める。図2に、ノバテル社製RT-2受信機により出力された  $s$  の約1時間にわたる1秒ごとの時間変化を示す。3 mが10 nsに相当する。誤差がある値を超えたりリセットをかける機種もある。

後述の干渉測位方式では、搬送波の位相を連続的に、例えば1秒ごとに積算した値(搬送波積算値)を測距に用いる。この場合は位相測定になるので、波長の100分の1程度の高分解能が得られる。誤差が数cmの高精度測位が可能なのである。

### 3. GPSの測位精度

表4は、GPS測位誤差要因とその大きさの見積もりを現

表4 GPSの測位誤差要因と誤差の見積もり。

誤差源	測距誤差の $1\sigma$ (m)				
	SPS (L1 only)	SPS with SA (L1 only)	SPS (C/A code on L2 and/or L5)	DGPS (L1 only)	PPS (L1 and L2)
軌道情報	2.1	2.1	2.1	0	2.1
衛星時計	2.1	20.0	2.1	0.04 m/s	2.1
電離層伝搬誤差	4.0	4.0	0.1	(2 ppm × 局間距離)	1.2
対流圏伝搬誤差	0.7	0.7	0.1		0.7
マルチパス	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
受信機ノイズ	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5
利用者等価測距誤差 (UERE)	5.3 m	20.6 m	3.4 m	1.5~2 m	3.6 m
HDOP (標準値)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
水平方向測位誤差 ( $2d_{rms}$ )	15.9 m	61.8 m	10.2 m	4.5~6 m	10.8 m

状の単独測位と DGPS (differential GPS) 測位, および将来の GPS 近代化後について示す. 文献によって各数値は若干異なるが, 大きな相違はない. 測距誤差の数値は  $1\sigma$  であり, 誤差の目安を表す. 中央の列は L2, L5 が利用可能になった場合の推定値である<sup>5)</sup>.

### 3.1 電離層と対流圏遅延による誤差

GPS 衛星から受信アンテナまでの間には電離層と対流圏がある. 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 2 乗に反比例して電波が減速する. この値は距離にして数~数十 m であるが, C/A コードでは遅延量を推定するモデルをつくり, 電離層の状況に応じてその式の係数を決定し, 航法データとして送信している. L1 のみの受信機では, これを用いて補正しているが, かなりの誤差を生じることがわかる. 現在でも L1, L2 の 2 周波を用いる場合は, 電離層遅延量を測定することができるので, 最右列の PPS のように 1 m 程度まで減らすことができる. L2, L5 に C コードが載り, 利用可能となれば, 表 4 の中央列のように大幅な精度改善が期待される. 図 3 は, ノバテル社製 RT-2 で計測した L1, L2 のコード測距による擬似距離と, 搬送波位相積算値から求めた電離層補正值である. L2 は P(Y) コードのみであるが, S/N 比を犠牲にした特殊な処理により擬似距離と搬送波位相を求めることができる. 擬似距離から求めた電離層遅延量は測距精度が悪いので, 小さな振動がみとれる. 一方, 搬送波位相から求めたものは滑らかであるが, 相対値であることと, 搬送波位相は位相速度で進むので, 遅延量ではなく, 進み量となっていることが特徴的である.

一方, 電波は大気中でもわずかながら減速する. その大きさは数 m 程度であり, 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ある. 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る. ただし, 衛星方位が水平線に近づくとともに遅延量が急激に増大するので, 低仰角の衛星は誤差が大きい. 受信機によっては, 気圧, 高度, 湿度等を入力して, 遅延量をきめ細かく推定するものもある.

### 3.2 衛星位置および衛星時計誤差

GPS 衛星の位置は測位点での位置決め基準であるから, できるだけ正確に決定されなければならない. 刻々の衛星位置は, 航法メッセージ中に含まれる 16 個の軌道要素 (ephemeris) を用いて計算により決定される. これらの値は世界の 5 か所に配置された地上の監視局でモニターすることにより修正されるが, 更新までの間に, 太陽や月の引力, 太陽光の輻射圧等の外乱によりドリフトし, 誤差を生じる. 衛星時計の誤差はおもに原子時計のドリフトによ

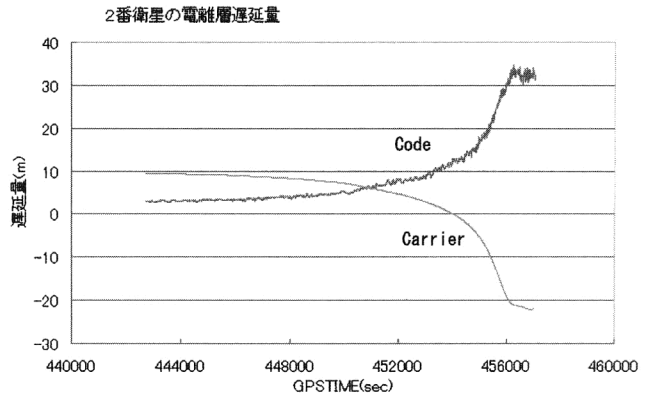


図 3 2 周波の測定による伝送遅延量の時間変化.

るもので, 監視局でモニターして, 時計の補正量を航法データとして衛星からコード信号に載せて送信しているが, それによる補正の残差である. 監視局を増やすことにより, これらの予測精度を増して測位精度の向上を図る試みもなされている<sup>5)</sup>.

また, 衛星位置はサニャック効果のため, 軌道要素により求められた位置よりも最大で数十 m ずれることになるので, 補正が必要である<sup>6)</sup>.

### 3.3 受信機誤差およびマルチパス

コード追尾の方式として一般に用いられる DLL 方式は, 衛星信号に対して 1/2 チップだけ先行したコードと, 1/2 チップだけ遅れたコードを発生し, 両者に対する受信信号の相関が等しくなるようにコードのタイミングを制御する. そこで, 信号に含まれる雑音でタイミングの測定精度が劣化する. 受信機の特長により雑音も大きく異なるが, 最近の受信機は搬送波の位相変化も利用するので, 表 4 に示すような高精度が得られるとされている.

GPS 受信機で受信される電波には, GPS 衛星から発射されて, まっすぐ到達した電波だけではなく, 衛星本体とか受信機のアンテナ近くの地面や構造物等で反射されて, 異なった経路を通ってきた電波も重畳されている. マルチパス波のために, 直接波の波形は乱され, 相関波形に歪みが生じ, 到達時間の測定に誤差を生じる. マルチパス誤差軽減のために, 受信アンテナや受信機の相関器に種々の方式が試みられている. 相関器のコードのタイミング差を狭くすると, 弱い信号に対する追尾が困難になる反面, マルチパスによる追尾誤差を軽減できるので, いくつかの方式が提案されている<sup>7)</sup>.

### 3.4 $2d_{rms}$ と DOP

図 4 に定点測位の模式図を示す. 測位点のばらつきは測距値のランダム誤差に起因するので, 平面的には二次元正規分布に従う.  $j$  番目の測位点の平均値からの距離差を  $d_j$  とすると,  $d_{rms}$  (distance root mean square) は

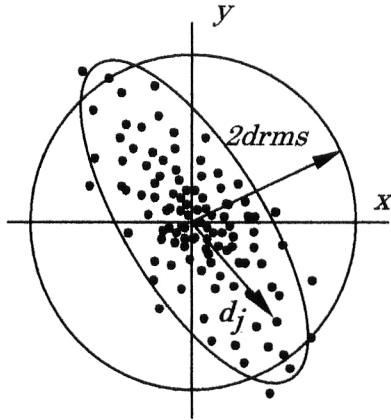


図4 GPSの測位点分布の模式図.

$$d_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n d_j^2}{n}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3)$$

となる. ここで,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  は測位点の  $x$ ,  $y$  方向の散らばりの標準偏差である.  $d_{rms}$  を2倍したものを  $2d_{rms}$  とよび, これを半径として平均値を中心とする円内に95%の測位点が入るとされ, 測位誤差の目安となる.

ドップ (DOP: dilution of precision)<sup>8,9)</sup> は精度劣化係数とよばれるもので, 測位に用いる位置の線どうしの交角が狭いと測位点の分布が大きく広がり, 測位精度が劣化するが, その程度を表す指標である. これは測位点から見た各衛星に対する方向余弦から求めた, 重み係数行列の対角要素の和の平方根として求められる. 水平方向のDOPはHDOPとよばれ, 行列の  $x$ ,  $y$  成分から求められる. 図4の楕円はこれらの値と測距誤差から描くことができ, 測位点分布を囲む<sup>9)</sup>. HDOPを2倍して, 測距誤差を掛けると  $2d_{rms}$  にほぼ等しくなる.

上空にまんべんなく衛星が分布するときはHDOPは小さい. 垂直方向のDOP (VDOP) は, 衛星が上方のみに偏在するので, おおむねHDOPの1.5倍といわれている.

### 3.5 測位誤差の見積もり

利用者等価測距誤差 (user equivalent range error: UERE) は上記の誤差のRSS (root sum square) 値で, 受信機から衛星までの距離測定誤差に相当する. これにHDOPの2倍を掛けたものが  $2d_{rms}$  となる. ここではHDOPを1.5としている. 上空が開けている場合はこれより小さく, 1~1.2程度のことが多い.

## 4. DGPS

DGPSは, 図5に示すように, 位置が正確にわかっている定点に基準局を設置する. そこから各衛星までの距離は計算で正確に求められるので, その地点でGPSの信号で測距を行うと, その値との間に差異を生じる. これ (擬似

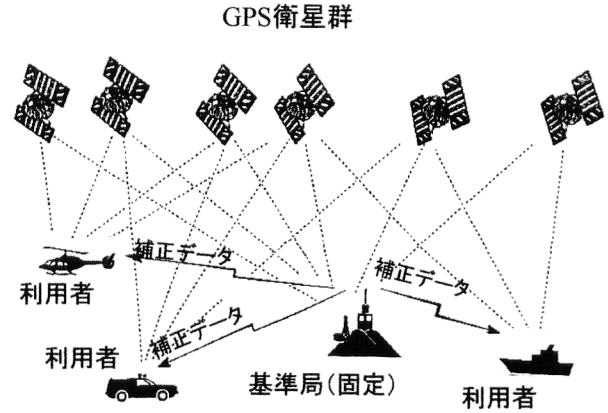


図5 DGPSの構成.

距離補正值) を何らかの通信回線を用いて利用者に知らせれば, 利用者は測定した擬似距離に補正値を適用して, より正確な位置を求めることができる. 表4の右から2列目に示すように, 衛星の位置誤差, 時計誤差, 電離層および対流圏遅延量等も除去することができ, 誤差数mの高精度の測位が可能となる. 衛星時計誤差は補正値の伝送遅延時間による精度劣化を示す. 電離層の不均一性から, 200km程度がサービスエリアとされており, 表4に示すように局間距離に比例して誤差が増大する.

補正データの伝送に関しては, そのメッセージフォーマットがRTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) SC-104<sup>10)</sup> で細部にわたり決められており, これが標準的なものとして世界的にも広く受け入れられている. 補正データ中には基準局から見える衛星の擬似距離補正値とその変化率および時刻が含まれており, 現在ではSAの解除により変化率が小さくなっているため, 伝送遅延が1分以上でも, 誤差の増大は数m程度に抑えられる<sup>11)</sup>.

### 4.1 補正データの伝送

GPSは移動体での利用が原則となるので, 補正データの伝送は無線で行われねばならない. 初期のころは携帯電話で行われていたが, 1999年4月には, 古くから船舶航行用に運用されている中波ビーコン電波に重畳して, 日本列島沿岸全域をサービスエリアとするDGPS補正データ網が完成した<sup>12)</sup>.

図6に, 東京海洋大学 (東京都江東区越中島) の定点での10秒ごとの3日間にわたる単独測位結果 (a), および浦安ビーコン局の補正データを用いて行った測位結果 (b) を示す. 補正により測位精度が大幅に改善されていることがわかる.

また, FM放送の音声周波数領域に76kHzの副搬送波を立てて, DGPS補正データが, おもにカーナビゲーショ

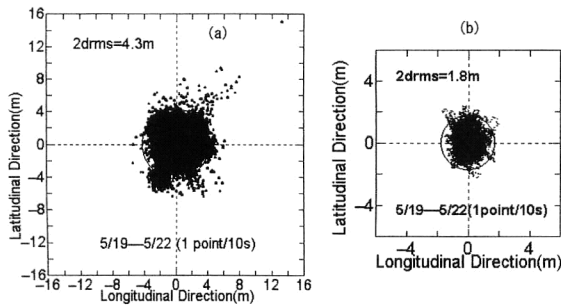


図6 東京海洋大学の定点における DGPS 測位結果. (a) 単独測位. (b) 浦安ビーコン局の補正データによる DGPS 測位. 受信機: NoVatel RT-2. (a) の縮尺が (b) の 2 分の 1 であることに注意.

ン用の GPS を対象として、約 5 秒のデータ更新周期で送信されている<sup>12)</sup>.

#### 4.2 WAAS, MSAS, EGNOS

広域の大洋上を飛行する航空機を対象とした DGPS サービスが開始されようとしている。これは、静止衛星から DGPS 情報を広域に放送すると同時に、その静止衛星も GPS 衛星のひとつとして機能し、GPS システムの機能を補強しようとするもので、WAAS (Wide Area Augmentation System)<sup>13)</sup> とよばれている。静止衛星の可視域全域をサービスエリアとし、洋上を飛行する航空機に補正データを送信するために計画されたが、広域にわたり数 m 程度の精度の DGPS 測位が可能となるので、航空機に限らず、陸上や洋上での測位精度の改善が期待できる。

米国では、FAA (Federal Aviation Administration) により、固有名詞として WAAS とよばれる衛星補強システムの準備が進められている。これは大西洋上のインマルサット静止衛星 AOR-W と太平洋上の POR 衛星を用いる。2002 年 9 月の実験で高精度測位が可能であることが確かめられたが、FAA の航空用としての認証を得るために実験が継続されている。2003 年 7 月から運用が開始される見込みである。

欧州では、EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) とよばれる同様のシステムの準備が進められている。AOR-E 衛星とインド洋上の IOR 衛星と東経 21.4 度の静止軌道上の ARTEMIS 衛星から、GPS と GLONASS の補正情報が流される予定である。2003 年 4 月から AOR-E 衛星と IOR 衛星経由で正式運用に向けてのデータ伝送試験が開始された。

わが国では、東経 140 度の静止軌道上に打ち上げ予定

の運輸多目的衛星 (Multi-Functional Transport Satellite: MTSAT) により広域補強システム MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) が 2003 年夏に再打ち上げが予定されていたが、気象衛星部の部品調達の遅れから 2004 年 1 月以降に打ち上げが延期された。当初予定の 2004 年中ごろからの運用開始が危ぶまれている。

#### 5. RTK-GPS

ここまでの GPS 測位は搬送波に載せられたコードの伝搬時間の測定によるものであったが、搬送波の位相を測定することにより数 mm~数 cm レベルの高精度測位が可能となる。これは電波干渉計<sup>14)</sup>の類推から干渉測位とよばれることがあるように、2つの観測点それぞれにおける搬送波位相積算値の位相差を用いて観測点間の方向と相対距離 (基線長) を求めるものである。

GPS の干渉測位の基本はスタティック測位とよばれるもので、地震予知を目的とした国土地理院の地殻変動観測網では、全国約 1200 点に設置された電子基準点の互いの相対位置を長時間のデータをもとに後処理で求めている。GAMIT<sup>1)</sup>、BERNESE<sup>11)</sup>、GIPSY<sup>111)</sup>などの精細な基線解析ソフトがある。

一方、キネマティック測位は移動しながら計測した搬送波位相データを用いて後処理で測位する。スタティック測位に比べて測位回数が少ない分だけ測位精度は劣るが (数 cm 程度)、多数の点を測量するときには有利な方法である。RTK-GPS (real time kinematic GPS) は基準局の観測データを移動局に伝送することによって、実時間でキネマティック測位を行う<sup>15)</sup>。

移動局では測位計算に必要な数百ミリ秒から数秒の時間遅れがあるものの、実時間で測位結果が表示される。RTK-GPS 測位に必要な伝送データフォーマットは、RTCM が定義している<sup>10)</sup>。

L1 の波長が 19 cm であることから数 mm 程度の分解能の測距が可能となるが、衛星までの絶対距離を知るためには 19 cm ごとの不確定性 (アンビグイティー) が生じる。測位に先立ちこれを決定しなければならないが、これをアンビグイティーを解く (resolve the ambiguity)、あるいは日本語で整数値バイアスを求めるともいう。RTK-GPS では、2 周波受信機を使用する場合は OTF (on the fly) が用いられる。OTF では L1, L2 の 2 周波を利用して得られるすべての観測データ (擬似距離、搬送波位相積算

<sup>1)</sup> <http://www.seismo.berkeley.edu/~battag/GAMITwrkshp/manuals/GAMIT.pdf>

<sup>11)</sup> [http://www.unavco.ucar.edu/data\\_support/processing/bernese/docu/doc40\\_01.pdf](http://www.unavco.ucar.edu/data_support/processing/bernese/docu/doc40_01.pdf)

<sup>111)</sup> <http://gipsy.jpl.nasa.gov/orms/goa/>

値等)を使用するので、10数秒～数分の短い時間で整数値バイアスを決定できる。

実際には、基準局および移動局で各衛星からの搬送波を連続的に観測し、各瞬間の搬送波位相積算値を求める。移動局受信機では、基準局から送信された値をもとに二重位相差を求めることにより誤差要因を除去したうえで、三次元的に分布する1波長ごとの格子点群の中から、正しい位置を特定すると同時にアンビギュイティーが決定される。一度アンビギュイティーが決定されると、搬送波位相積算値が連続的に観測されている間是不変で、連続的に位置が求められる。しかし、一部の衛星の電波が瞬時的にも遮られると、搬送波位相積算値は不連続となり、その衛星のアンビギュイティーを求め直す必要がある。このような場合をサイクルスリップが発生したという。したがって、利用者は受信の瞬断やマルチパスのない、できる限りよい受信環境を維持することが必要となる。測位精度としてセンチメートルレベルの精度を得るためには、基準局と移動局の距離は10 kmまでが目安とされている。これは、それ以上両局が離れると、電離層遅延誤差やGPS衛星の位置誤差のために、アンビギュイティーを誤って求めたり、測位精度が劣化したりする可能性が生じるためである。

最近では、2つの測位衛星システムを利用してインテグリティを向上させる方式も検討されており、GPSとGLONASSを併用したRTK-GPS測位実験が行われている。また、基準局が近くにない場合に、測位精度を向上させる方法として、仮想基準点方式<sup>16)</sup>VRS (virtual reference station)なども検討されている。VRSは、広域に分布する複数の実在する基準局の観測データを使用して、あたかも移動局の近傍に基準局があるかのようなデータをつくりだして利用者に提供するシステムである。少ない基準局で広範囲の多数の利用者にデータを提供することが可能となるため、日本国内でもその利用が検討されている。

## 6. GPSの応用

GPS誕生の契機は、移動体の位置を正しく把握すること、すなわち航法にあった。民間利用も当初は船舶の航行援助が中心であったが、数年前からはカーナビゲーション装置に組み込まれはじめ、2003年3月末現在では1150万台の自動車に装備され、VICS (vehicle information and communication system)のサービス拡大とともにドライバーの必需品になろうとしている。

最近では、携帯電話への搭載が進んでいる。携帯電話経由で測位に必要なデータを受け取り、高速に結果を得るA-GPS (assisted-GPS)が採用されている。発売されてわ

ずか16か月ほどで500万台を超えている。今後、急速な増加が見込まれている。

一方、RTK-GPSにより搬送波位相測定による高精度の測位技術が実時間の測位に適用されるようになり、目標物の得がたい海上や造成地などの土木作業に広く応用され、作業の高能率化をもたらしている。また、地図上に電柱・信号灯・標識等の物標の位置を記入したり、公園の植生や野生動物の動静を正確に把握したりするためのデータベースの作成に活用されるなど、地理情報システム (GIS: geographic information system)の主要ツールになりつつある。移動体測位も、高精度化により、航空機の自動進入・自動着陸への応用研究、土木工事のブルドーザーや農業におけるトラクターなどの自動操縦に活用する実験も盛んに行われている。

GPSでは、三次元の位置と同時に正確な時刻を求めることができる。これによる市販の周波数基準器では $10^{-11}$ 程度の安定度が得られる。今日、隔地間の通信機器の同期に採用され、高効率の通信に不可欠のものとなってきている。

対流圏の伝搬では水蒸気圧による影響も受けるので、湿度に遅延量が依存し、誤差が増大する。この性質を逆に利用して、上層の湿度を測定して天気予報に役立てようという試みもなされている。

## 7. GLONASSとGALILEO

ロシア軍が運用しているGLONASS<sup>17)</sup>は、軌道面が3、傾斜角が高緯度に位置する国土を考慮して約65度であることを除くと、GPSとほぼ同じ性能と機能をもつ衛星測位システムで、ロシア版GPSともいえるものである。1996年には24衛星でGPSと同様に全世界を24時間カバーしていたが、設計寿命は3年といわれており、次々と退役し、1999年、2000年、2002年暮れにそれぞれ3機ずつ打ち上げられたものの、2003年6月現在、9機のみで運用されている。

一方、欧州共同体では、独自の衛星測位システムをもつべく準備を進めている。これは、GALILEO<sup>17)</sup>と命名され、GPSやGLONASSと同様のMEO衛星、Lバンドの3周波とCバンドの搬送波で測距信号を送信しようとするものである。 $2d_{\text{rms}}$ で4m以下の高精度測位と、搬送波測距方式におけるアンビギュイティーの瞬時決定を可能にするといわれている。このシステムが運用開始されるのは2008年であり、今後GLONASSと緊密な協力関係を保ちながら開発が進められることになる。

## 8. 準天頂衛星測位システム

準天頂衛星システム (QZSS: Quasi Zenith Satellite System)<sup>17)</sup> は、移動体通信用衛星通信システムとして1997年ごろから検討されはじめ、実現へ向けての研究が続けられてきた。静止衛星は24時間周期で赤道上空を周回しているが、これに赤道面に対して傾斜を加えることで、日本の上空まで飛行させることができる。険しい山岳地帯や高層ビルの建ち並ぶ都市部での移動体の通信には、天頂方向からの電波が遮断されにくいので都合がよい。数機の衛星を投入すれば、常に複数の衛星を高仰角に望むことができ、上空が制限された場所でも測位ができる確率が増す。2001年になって、測位補強機能を追加する多目的衛星として実現の可能性が出てきて、測位機能の検討が活発になされ、2003年度に開発研究のための予算が認められた。順調に進めば、2008年には第1号機が打ち上げられる予定である。3~5機の準天頂衛星に数機の静止衛星で、単独のシステムでも測位が可能な地域的測位システムを目指している。

GPSの歴史、概要、規格、利用形態、各国の状況、将来展望などについての全般的な解説とGPSの原理について、C/Aコードを利用した単独測位から、干渉測位、時刻同期の技術までを、測量、座標系、光学計測の話にも触れて、技術的側面を中心に平易に解説するようにとの要請であった。しかしながら、広汎にわたる解説は、限られた誌面では十分に対応することが困難であったことをお詫びしなければならない。特に光学計測とのかかわりあいについては、最近の光学研究についてはまったく馴染みがなく、何とか切り口を探そうともがいてみたものの、ついに締切日を迎えてしまった。GPSはさまざまな環境下の応用において、決してオールマイティーではなく、測位精度向上を含めて、解決すべき多くの問題を抱えている。光学分野の研究者の方々にも、これらの問題解決にとどまらず、GPSを活用した新しい研究分野の開拓にも参入していただくことを期待したい。

## 文 献

- 1) B. W. Parkinson and J. J. Spilker eds.: *Global Positioning System: Theory and Application*, Vol. 1 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1995) p. 6.
- 2) 安田明生: “GPS技術の展望”, 電子情報通信学会論文誌 B, **J84-B** (2001) 2082-2091.
- 3) P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance* (Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, 2001) pp. 36-41.
- 4) R. D. Fontana, W. Cheung and T. Stansell: “The modernized L2 civil signal,” *GPS World* (2001.09) 28-35.
- 5) H. Hay: “The GPS accuracy improvement initiative,” *GPS World* (2000.06) 56-61.
- 6) B. W. Parkinson and J. J. Spilker eds.: *Global Positioning System: Theory and Application*, Vol. 1 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1995) p. 248.
- 7) 久保信明, 安田明生: “定点測位におけるコードマルチパス誤差の削減について”, 電子情報通信学会論文誌 B, **J86-B** (2003) 104-112.
- 8) 日本測地学会編著: 新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム— (社)日本測量協会, 1989) p. 132.
- 9) 安田明生, 平田 誠, 奥田邦晴, 今津隼馬: “GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について”, 日本航海学会論文集, 第79号 (1988) pp. 25-31.
- 10) Radio Technical Commission for Maritime Services: “RTCM recommended standard for differential navstar GPS service V2.1,” *RTCM Paper 194*, SC104-STD (1994).
- 11) ディファレンシャルGPS受信機の性能要件に関する調査研究委員会報告書 ((財)日本航路標識協会, 2001).
- 12) A. Yasuda, N. Tanaka and H. Namie: “DGPS correction data dissemination in Japan and evaluation of the positioning accuracy,” *Proc. GNSS 98*, VII-P-02 (1998) pp. 1-6.
- 13) B. W. Parkinson and J. J. Spilker eds.: *Global Positioning System: Theory and Application*, Vol. 2 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1995) p. 114.
- 14) 高橋富士信, 近藤哲朗, 高橋幸雄: VLBI技術 (オーム社, 1997) p. 3.
- 15) 浪江宏宗, 安田明生: “RTK-GPSにおけるデータ伝送システムの評価”, 電子情報通信学会論文誌 B, **J82-B** (1999) 116-123.
- 16) 浪江宏宗, 萩原述史, 新田信治, 芝原芳信, 齊藤雅行, 金井嘉伸, 金 学進, 安田明生: “仮想基準局 (VRS) 方式によるRTK-GPSの評価”, 電子情報通信学会論文誌 B, **J84-B** (2001) 2160-2168.
- 17) GSPシンポジウム2002テキスト (日本航海学会GPS研究会, 2002).

(2003年6月11日受理)