

第 4 章

人工衛星起源の空間情報

4.1 衛星測位技術

4.1.1 衛星測位の革新

測位とは、三次元的位置を決めることである。地上でトータルステーションを利用した位置座標を計測する測位法は〔3.1〕で述べた。本節では、衛星データを用いた測位法について、その概略を述べる。

衛星による測位は、USA の軍事利用に始まったが、民間レベルでは SA (Selective Availability：民間利用の測位衛星関連のデータに故意に誤差データを加える操作) による制限があり利用は普及しなかった。2000 年 5 月 1 日の EDT (米国東部夏時間) 0 時 (日本時間 5 月 2 日 13 時) 頃に、米国大統領声明により SA が解除されたことで、位置決定精度が数 m 以下になり、測位衛星の利用の速度が急激に、特に、カーナビで増加した (図 4.1.1-1)。最近では、地上だけで行われてきた測量技術の分野ばかりではなく、地殻変動を測定するなど地球物理の分野、携帯電話など幅広く利用されるようになった。

測位衛星は、宇宙空間に向けて基本的に時間情報と衛星自身の軌道情報を送信しているだけである。一方、受信機は測位衛星から信号を受け取り、衛星位置情報から自分の現在位置を計算し、はじ

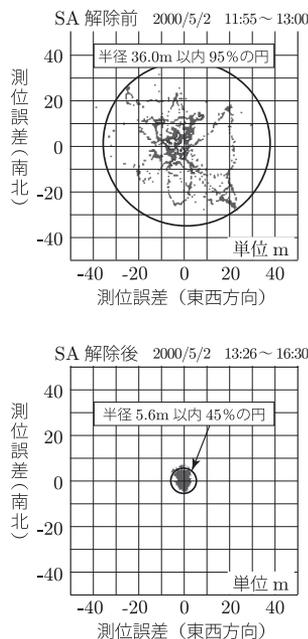


図 4.1.1-1 SA 解除前と後の位置精度 (電子航法研究所 提供)

めて自分の位置が得られる。さらに、ジャイロ機構や方位コンパス等を使用することで、受信機の移動ベクトルを知ることができるので、トンネル内など測位衛星が認知できない場合でも、位置推定が可能である。

4.1.2 測位の流れ

- 1) 測位衛星のデータから解析される位置情報は、WGS-84 (World Geodetic System, 基準: 回転楕円体, 長半径 $a = 6378.137\text{km}$, 扁平率 $f = 1/298.257223563$) 系という世界座標系で出力される。一方、日本の座標系は ITRF94 (International Terrestrial Reference Frame, 基準: GRS80 回転楕円体, 長半径 $a = 6378.137\text{km}$, 扁平率 $f = 1/298.257222101$) を基準としており、WGS-84 系は数度の変更があり、現在、WGS-84 は ITRF94 系と同じと考えてよい。
- 2) 測定された ITRF94 座標を日本の測地系「測地成果 2011」に変換する。測地成果 2011 は、測地成果 2000 を基本とし、関東から東北地方について、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による地盤変動の補正部を含めた日本の座標系である。

4.1.3 測位衛星の種類

測位衛星として GPS (*Global Positioning System*) という名前が広く知られている。GPS という言葉は、実は、概念であり、アメリカの GPS 衛星 Navistar の総称である。2010 年代に入って、GNSS (*Global Navigation Satellite System*) が GPS に代わって測位衛星の総称となっている。

GNSS は、全地球航法衛星システムの総称であり、

- ① 「NAVSTAR GPS」: アメリカ (国防総省) が、船舶・航空機の航法を目的として、1973 年に着手し、1993 年 12 月から運営している航法システムで GPS 衛星といわれている。
- ② 「GLONASS」: ロシアが再構築している航法システムで、3 つの軌道平面上に並べられる合計 24 基の衛星から構成される。

(ГЛОНАСС–ГЛОбальная Навигационная Спутниковая Система = GNSS)

(英語では、GLObal Navigation Satellite System)

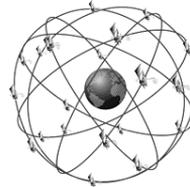
- ③ 「GALILEO」：欧州が進めている航法システムで名前は天文学者ガリレオ (Galileo Galilei) にちなんでいる。
- ④ 「みちびき」：日本が打ち上げる準天頂衛星等測位衛星
- ⑤ 「Compass」：中国が独自に進める航法システムで 35 機の衛星で構成される。などの衛星航法システムが含まれる。

NAVSTAR/GPS と GLONASS を併用する複合測位では、NAVSTAR/GPS 衛星だけでは使用衛星数が少なく、測位が困難な状況でも、GLONASS 衛星の位置次第では測位が可能になる場合があり、測位精度も向上する。また、RTK の場合、仰角マスク 40° で、GPS 単独に比べ、複合測位では 18% 程度の向上があるという報告もある。したがって、複合測位により測位技術にこのような改善が見込まれる。

(1) NAVSTAR / GPS

24 衛星 (6 軌道面, 高度約 20180km)
 実際は 28~30 衛星が稼動中
 軌道傾斜角 55° , 周期 11:58 寿命 7.3 年
 搬送波: 標準測位サービス (SPS): 軍民共用
 L1 (1575.42MHz): C/A コード (1.023 Mcps)
 搬送波: 精密測位サービス (PPS): 軍用
 L2 (1227.6MHz): P/Y コード (10.23 Mcps)
 スペクトラム拡散: CDMA, 測距
 衛星の PRN 番号 (1~37): 拡散コード
 航法メッセージ (50bps): 軌道情報
 衛星

1978~Block I プロトタイプ
 1989~Block II/IIA 実用型 (SA 機能あり)
 1997~Block IIR 衛星間リンク, Autonav



FAA (Federal Aviation Administration) の HP より
[http://www.faa.gov/about/office'org/headquarters'offices/ato/service`units/techops/navservices/gnss/gps/](http://www.faa.gov/about/office%20org/headquarters%20offices/ato/service%20units/techops/navservices/gnss/gps/)

(2) GLONASS

軌道を追跡する追跡局 (TT & C: Telemetry, Tracking & Control) と追跡局からの情報から軌道情報を計算して GLONASS 衛星にその情報を送信する管制局および追跡局は、サンクト・ペテルブルク (St.Petersburg), テルノ

ポリ (Ternopol), エニセイスク (Eniseisk), コムソモルスク・ナ・アムーレ (Komsomolsk-na-amure) にある。

24 衛星：3 円形軌道面；3 つの軌道平面の昇交点は 120° ずつずれ
 (緯度 15° ずつ離れ) 軌道面上に 8 衛星の予定；現在：21 衛星, 予備 3 衛星
 周回高度 約 19100km
 軌道傾斜角 64.8° , 周期 11:15
 搬送波：搬送メッセージ (50 bps)
 L1： $1602 + N \times (9/16)$ MHz；C/A コード, P コード,
 L2： $1246 + N \times (7/16)$ MHz；P コード :5.11 Mbps
 (GLONASS-M は第 2 民生信号対応)
 C/A コード：511 kbps
 P コード：511 Mbps
 衛星：GLONASS 運用開始日 衛星番号 (2005 年 3 月現在)

運用日	衛星番号	運用日	衛星番号
04.11.2000	787	10.02.2003	791
21.11.2000	788	30.01.2004	795
05.01.2001	783	02.02.2004	794
04.01.2002	789	09.12.2004	701
31.01.2003	792	06.02.2005	796
31.01.2003	793	06.02.2005	797
15.04.2003	711		

(3) GALILEO

欧州連合 (EU) は欧州宇宙局 (ESA: European Space Agency) と共同で行う, 第三の GNSS となるガリレオ GALILEO 衛星開発計画によれば, 2014 年末に 18 機による初期運用を目指すとしていたが, 現在初期サービスを開始できる見通しである。2016 年末に規定の機数による本格運用に入るガリレオは宇宙技術市場における EU でのシェアを拡大し, 欧州の経済と市民の安寧にとって重要なこの部門での EU の自立をもたらすと期待されている。また, 衛星航法システムからの信号の精度向上を目指す「EGNOS」(European Geostationary Navigation Overlay Service) 計画に関しても相当な前進がみられた, 衛星航法技術の推進は, 「欧州 2020」戦略に合致しており, 持続可能な経済発展にも寄与する。高度約 24000km の上空に 30 機の航法衛星を運用するとしている。

(4) みちびき（準天頂衛星：quasi-zenith satellites; QZS）

準天頂衛星は、日本のほぼ天頂（真上）を通る軌道を持つ人工衛星を複数機組み合わせた衛星システムであり、高度約 32000～39000km（地球の半径の 5～6 倍）を赤道に対して傾斜角 40～45° で航行している（図 4.1.3-1）. 軌道において、① 120° ごとに 3 個配備され、周期 23 時間 56 分である. ② 軌道は 8 の字型で、③ 日本全国で仰角 60°（東京では 70°）（静止衛星は 48°）であるため、ビル街や山間地などの衛星からの電波が遮られないようになっている（図 4.1.3-2）. 設計寿命は 10 年である. ④ 衛星時計は、ルビジウム原子時計を搭載する.

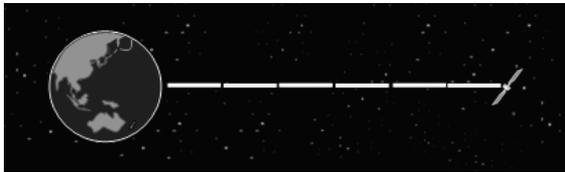


図 4.1.3-1 準天頂衛星と地球の位置関係

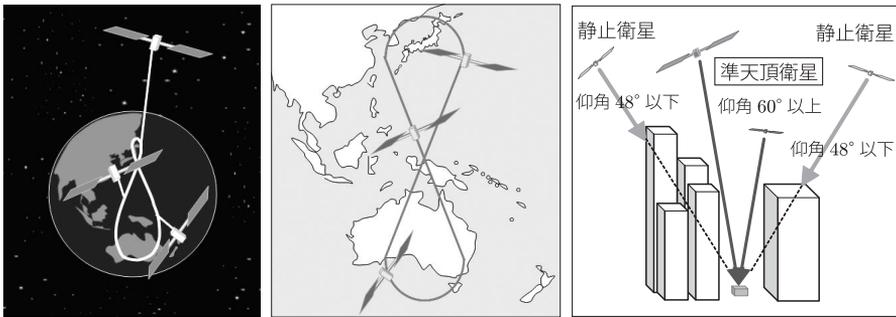


図 4.1.3-2 準天頂衛星の①配置・②軌道・③特長

測位精度について、GPS のみの場合 10m 程度だが、日本の真上を通過しつつ地球の自転周期と同じ 23 時間 56 分で 1 周する軌道を周回する準天頂衛星みちびきを使うと 1m 以下に向上する. また、測位可能時間は約 90% から 99.8% に、受信機の電源を入れてからの捕捉時間は、30 秒～1 分程度が 15 秒程度に短縮される. 打ち上げは 2010 年 8 月を予定していたが、機器の不具合で打ち上げは 9 月に延期になった. 同年 8 月 19 日、種子島宇宙センターで燃料の補充が完了し、同年 9 月 11 日 20:17 に打ち上げられた. ドリフト軌道から準天頂軌道に投入す

るための軌道制御を 21 日から実施し、同年 9 月 27 日 6:28 の最終の軌道制御により、日本上空を通る中心経度約 135 度の準天頂軌道に投入された。

4.1.4 静止衛星の種類

その他の衛星として静止衛星がある。静止衛星にはいくつかの特徴がある。ここでは、それらを概観する。

4.1.4.1 静止衛星の軌道

静止衛星の軌道は、地表面からの距離と考える。

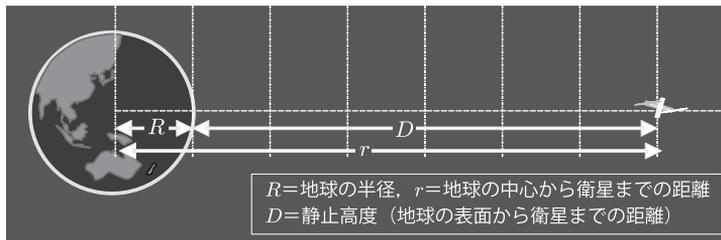


図 4.1.4-1 静止衛星の高度

地球の半径を R 、地球の中心から衛星までの距離を r 、求める静止衛星の高度（地球の表面から衛星までの距離）を D とすると、 $D = r - R$ であり、ニュートン力学から、 $F = m\alpha$ を利用すると、

$$mr\omega^2 = G \frac{Mm}{r^2} \quad \therefore r = \sqrt[3]{\frac{GM}{\omega^2}}$$

$$GM = gr^2 = 4.0 \times 10^{14} \quad \left(\because G \frac{Gm}{r^2} = mg \right)$$

ここで、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ である。

一方、 $\omega^2 = \{2 / (24 \times 60 \times 60)\}^2 = 5.3 \times 10^{-9}$ であるから、

$$r = \sqrt[3]{\frac{4.0 \times 10^{14}}{5.3 \times 10^{-9}}} \cong 42260(\text{km}), \quad R = 6371 \text{ km}$$

$$\therefore D = 42260 - 6371 = 35889 \text{ km}$$

となり、静止衛星の高度 D が約 36000km と求まる。

ちなみに、 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{sec}^{-2} \text{kg}^{-1}$ 、 $M = 5.96 \times 10^{24} \text{kg}$ である。

4.1.4.2 気象衛星 ひまわり

「ひまわり」は世界気象機関（WMO）と国際学術連合会議（ICSU）が共同で行った、地球大気観測計画（GARP）の一環としての計画である。正式名称は、GMS（Geostationary Meteorological Satellite）で、世界気象監視計画の一環として宇宙からの気象観測を目的に東経 140 度の静止軌道に配置された。「ひまわり 6 号」以降は、正式名称が、MTSAT（Multi-functional Transport Satellite）に変更され、運輸多目的衛星とし、その活動範囲が拡張された。ひまわり 6 号以降の状況は以下のとおりである。

- ・ひまわり 6 号（MTSAT-1R） 打ち上げ：2005 年 2 月 26 日 運用中
- ・ひまわり 7 号（MTSAT-2） 打ち上げ：2006 年 2 月 18 日 運用中
- ・ひまわり 8 号 打ち上げ：2014 年（予定）
- ・ひまわり 9 号 打ち上げ：2016 年（予定）

4.1.4.3 放送衛星 BS、通信衛星 CS

その他、我々の生活に密着した衛星として、CS（Communication Satellite：通信衛星）と BS（Broadcasting Satellite：放送衛星）がある（表 4.1.4-1）。

表 4.1.4-1 放送衛星 BS、通信衛星 CS

衛星名	CS（通信衛星）		BS（放送衛星）	
	N-SAT		BSAT-2c	BSAT-3a
静止位置	東経 110 度			
放送方式	BS/CS デジタル方式			
出力	104.7W		106W	120W
トランスポンダ*	左旋 12 本 / 通信 (予定)	右旋 12 本 / 放送	4 本	4 本 (予備 4 本)
偏波方式	右左旋円偏波		右旋円偏波	

* トランスポンダ (Transponder) は、TRANSmitter (送信機) と resPONDER (応答機) の合成語