

GPS の課題と将来

星野尾 一明

Challenge and Future of GPS

Kazuaki HOSHINO

The initial operation of global positioning system (GPS) began in 1992 and fully operational capability has been available from 1995. At present, GPS is used for maritime, land mobile, space vehicle navigation, geodetic survey, time synchronization, and scientific measurement as GPS meteorology. For stringent safety requirements, GPS remains at supplemental navigation use on aeronautical applications. Because GPS can provide precise three-dimensional position and accurate time for users, there are very wide applications. In this paper, technology on GPS, GPS applications, and requirements for GPS and issues that should be solved for various navigation applications are described. At the last part, requests for optics are mentioned.

Key words: global positioning system (GPS), GPS technology, navigation, differential GPS (DGPS), GPS modernization

GPS (global positioning system) は、1993年12月に初期運用が、1995年には全面的な運用が開始された。現在、航空、海上、陸上、宇宙での航法 (navigation)、測量、測地・GPS 気象をはじめとする科学観測、時刻同期等各方面での利用が進んでいる。GPS は三次元位置と正確な時刻を提供するシステムであり利用範囲は広いが、ここでは航法を中心とした GPS の課題と将来について述べる。

航法とは、航空機や船舶などの移動体がある地点から目的地へ、安全にかつ効率的に移動する進路を与える技術である。そのために必要な情報は、移動体の三次元位置、進行方向、速度であり、GPS が航法に使用されるゆえんである。GPS を用いた航法では、どのようなアプリケーションを考えるかによって課題と将来は異なるものと考えられるが、ここでは筆者がかかわっている航空航法への GPS の応用を中心として、GPS 技術、航法への応用の概要、航法のために GPS に要求される課題を述べ最後に GPS の将来について述べる。

1. GPS の技術¹⁾

1.1 GPS の基本となる技術

GPS 開発の経緯、測位原理等については、本特集の「GPS の概要」で述べられている。また、文献 1) 等に詳しく述べられているので、ここでは詳細は割愛するが、GPS に使用されている技術は、

- (1) 高精度 (Phase I 仕様, 1×10^{-12} /日) の宇宙用時刻基準 (打ち上げ環境, 宇宙環境に耐える小型, 軽量の原子時計) と PRN (pseudo random noise) コードを利用した一方向測距離技術: GPS ではこれらが最も基本となる技術と考えられる。PRN の利用には複数の衛星が同時に同一周波数を利用できることを含む (CDMA: code division multiple access)
- (2) 測距用 PRN コードを利用した衛星軌道暦 (エフェメリス) と時刻情報等航法メッセージの放送, すなわち同一信号による測距信号と航法メッセージの送信
- (3) 航法メッセージに含まれる GPS 衛星の衛星軌道暦, 時刻の推定と予測技術, 電離層伝搬遅延補正技術

(8パラメーター)の利用または2周波数の利用(軍用のP(Y)コード利用者のみ, 4章参照)

(4) 長寿命衛星(5~10年)の開発運用実績がベースとなっている。これらの技術をベースにシステムが構築され、運用されている。

詳細は本特集の「GPSの概要」を参照していただきたいが、衛星と利用者間の測距、測位は概略次のようにして行う。

衛星からGPS時間(時系の一種)の正秒に同期したPRNコードで搬送波をPSK変調(phase shift keying: 位相偏移変調)し送信する。送信されたPRNコードを地上の受信機で受信し、受信機は受信したPRN符号の伝搬遅延時間を各受信機の時間上で測定する(GPS時間)。PRN符号は鋭い自己相関特性をもっており、受信機に衛星が送信したPRNの複製があれば、複製PRNのタイミングを走査して受信信号との相関が最大となるタイミングを知ることができ、受信PRNが受信機のGPS時刻に対してどの程度遅れているかを測定できる。これを4個の衛星信号に対して実施する。本来、受信機が正確な時計をもっていればこれは単純であるが、受信機の時計は正確でないので、あらかじめ誤差をもったものとして伝搬遅延時間を測定する。このようにして、利用者の未知の位置(3個の未知数)と受信機時計誤差である未知数の合計4個の未知数について4個の観測値が得られ、4個の二次方程式をつくることができる。これは解くことができ、利用者の位置と、受信機の正確なGPS時刻が求められる。

また、上記の技術に加え、原子時計を原振とするRF搬送波位相の利用がある。周波数にかかわらず、位相を1波長の100分の1まで測定することは困難なことではない。これは、現在GPSで利用されている波長約20cmのL1信号(周波数1575.42MHz)により衛星と利用者間を約2mmの分解能で測定できることを意味する。なお、距離の絶対値を算出するためには、搬送波位相は約20cmごとの不確定性(アンビギュイティー)があるので取り除く必要がある。現在、搬送波位相の利用は測量、測地、科学観測の分野で行われ、数cm~mmの精度を達成している。

ここで述べた技術でGPS測位は可能であり、多くの利用者が使用している。高精度、他のサービスが必要な場合は、次項で述べるディファレンシャル方式が利用される。

1.2 ディファレンシャル方式²⁾

GPS衛星は自分の位置と時刻を放送しており、利用者はこの情報と4個の衛星までの距離を測定して、自分の位置と時刻を計算で求める。しかし、放送している衛星の位置と時刻は誤差を含んでいる。また、電離層伝搬遅延、対流

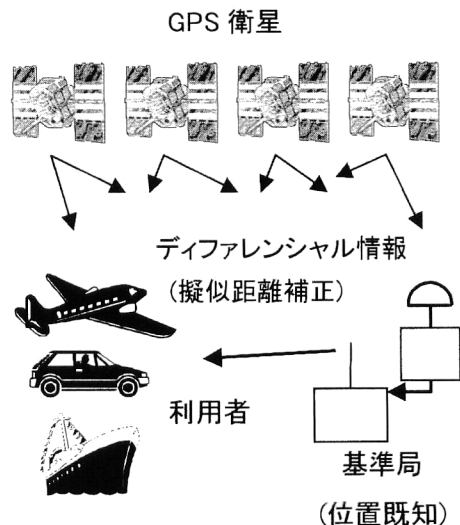


図1 狭域ディファレンシャル方式概念図。

圏伝搬遅延、マルチパスが誤差要因として加わる。GPSのみでは得ることのできない測位精度を得るため、これらの誤差を補正するディファレンシャルGPS(DGPS)とよばれる方法がとられる。

1.2.1 狭域ディファレンシャル

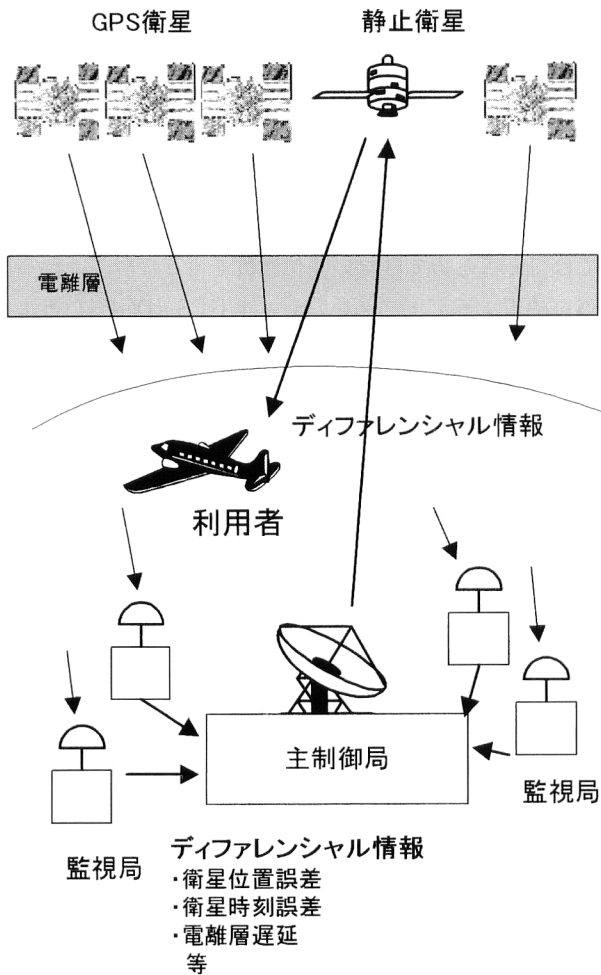
通常、測位精度を改善するため、測量により正確に位置が知られた場所(真の位置)にGPS基準局を設置し、GPSにより測位されたその真の位置から各衛星までの距離と、各衛星の放送軌道暦による衛星位置と真の位置とから求めた計算距離との差を擬似距離補正データとして利用者に向けて放送する。利用者は、その補正値を各衛星からの擬似距離に加えて補正位置を求める。この方法により、衛星の時刻誤差、衛星軌道暦(位置)誤差、電離層伝搬遅延誤差、対流圏伝搬遅延誤差を除くことができる。マルチパスによる誤差は、基準局と利用者で異なるので、補正はできない。この方法は、狭域ディファレンシャル補正(DGPS補正、またはスカラー補正)ともよばれ、基準局より200km程度までの範囲で広く利用されるようになってきており、数cm~10mの精度がある。

狭域ディファレンシャル方式では、図1に示すように、ディファレンシャル情報として擬似距離誤差を基準局で測定し、それを利用者へ放送している。衛星時刻誤差を除いて、衛星位置誤差、電離層伝搬遅延、対流圏遅延は、基準局から離れるに従って基準局で測定した値と異なってくる。いわゆる地域相関性が失われる。このため、ディファレンシャル情報の有効範囲が数百km程度に制限される。表1に、狭域ディファレンシャル方式における擬似距離誤差の残差を示す。基準局から1000km離れた地点では、電離層遅延による擬似距離誤差は2m程度、衛星位置誤差

表1 狭域ディファレンシャル方式での擬似距離の残差.

	DGPS 補正なしの場合		DGPS 基準局, 利用者間距離 0 の場合の残差		時間相関性による誤差の残差		地域相関性による誤差の残差 (m/100 km)
	バイアス誤差 (m)	ランダム誤差 (m)	バイアス誤差 (m)	ランダム誤差 (m)	速度 (m/s)	加速度 (m/s ²)	
衛星位置誤差	10.0	0.0	0.0	0.0	無視可能	無視可能	$< r \cdot \Delta R / R$
衛星クロック誤差	21.0	0.1	0.0	0.14	0.21	0.004	0.0
電離層遅延誤差	2~10	<0.1	0.0	<0.14	<0.02	無視可能	$< r$ の 2 ppm
対流圏遅延誤差	2	<0.1	0.0	<0.14	無視可能	無視可能	<0.2
マルチパス誤差	0.3~3.0	0.2~1.0	0.4~3.0	0.2~1.0	0.0	0.0	0.0
受信機雑音による誤差	0.5	0.2	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0

r : 基準局, 利用者間の距離, R : 基準局, 衛星間の距離 (約 20000 km), ΔR : 衛星の位置誤差.



100 m としたときの衛星位置誤差による擬似距離誤差は, 基準局と GPS 衛星間の距離が約 20000 km であるので, 5 m 程度となる.

1.2.2 広域ディファレンシャル

一方, 航空機等は広い範囲を高速で移動するため, 数千 km に及ぶ広範囲をサービス範囲とする必要がある. このため, 200 km 程度までをサービス領域とする狭域ディファレンシャル方式とは異なった方式でディファレンシャル

情報を伝送する必要がある.

静止衛星による補強システムのような数千 km の範囲を対象とする広域システムでは, 多数の地上モニター局を設置し, それらで受信した多数のデータをもとに衛星位置誤差, 衛星時刻誤差, 電離層伝搬遅延をそれぞれ独立した情報として推定し, これらを利用者に送ることにより測位精度を向上させる. これらの独立した誤差情報は, モニター局の配置と利用者の位置関係に依存する部分もあるが, 地域相関性が少ない絶対的な誤差データとして推定されるので, 非常に広範囲に適用することができる. これは広域ディファレンシャル補正とよばれ, スカラー補正に対してベクトル補正ともよばれている. 図2に概念図を示す. 地上の基準局ネットワークのデータから各 GPS 衛星の三次元の正確な位置および衛星時刻を推定し, この値と放送されている航法メッセージのエフェメリスから計算される衛星の位置と時刻の差がディファレンシャル情報として静止衛星経由で放送される. また, 電離層誤差は, モニター局で2周波の受信機による電離層遅延の測定値および電離層の遅延モデルから, サービス領域内の電離層遅延マップを作成し, 経度, 緯度それぞれ5度ごとの格子点の遅延時間として放送される. これは地域ごとのデータであり, 電離層遅延の地域相関性の影響がなくなる.

1.2.3 干渉測位の応用

リアルタイムキネマティック (RTK: real time kinematic) 方式は GPS 信号の搬送波位相情報を利用する干渉測位方式のひとつであり, 数 cm の精度を必要とする応用に利用されはじめています. この方式では, 基準局で測定した搬送波位相情報, 基準局の位置等の情報を利用者に送り, 利用者側で測位計算を行う. 通常, 二重位相差³⁾がとられ, 衛星位置・時計誤差, 受信機時計誤差, そのほか基準局と利用者間で相関の高い誤差はほぼ解消できる. また, 前述したように, 距離の測定精度 2 mm 程度は簡単に実現できるため, この方式による測位精度は数 cm 以下を得ることができる. また, この方式では, 搬送波の位相情報を

使用するため、測位の初期段階および搬送波同期がはずれた場合に短時間で位相のアンビギュイティーを除去するための技術である OTF (on the fly)⁴⁾ 技術が開発されている。

上記3つのディファレンシャルGPSでは、補正情報をなんらかのデータリンクあるいは放送機能を利用して利用者に配信している。このデータ配信機能を利用して、インテグリティ（後述）に関する情報を利用者に伝えることができる。

2. GPSの航法利用の概要⁵⁾

2.1 航空分野

航空交通分野では、ICAO (International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関) においてGPS等の利用について検討されている⁶⁾。GPS等を民間航空機のすべての飛行局面における航法装置として使用するには、システムが正常に動作していることの保証として、航法に利用できなくなったときに、利用者に適切な警報を与えることができるシステムの能力（インテグリティあるいは完全性）、測位精度、システムが利用できる時間率（利用率）の確保が必要であり、静止衛星等を利用したGPSの補強システムが考えられている。このシステムは、広域ディファレンシャル方式で、衛星による補強システム（SBAS: Satellite-Based Augmentation System）とよばれており、米国のWAAS (Wide Area Augmentation System)⁷⁾、EU（欧州連合）のEGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)⁸⁾ および日本のMSAS (Multi-functional Transport Satellite (MTSAT) Satellite-Based Augmentation System: 運輸多目的衛星用衛星航法補強システム)⁹⁾ があり、整備計画が進められている。洋上航空路から精密進入（CAT-I）までにおいてGPSを利用した航法を導入すべく、ICAOにおいて基準づくりが進んでいる。

2.2 海上分野¹⁰⁾

海上交通分野では、陸岸から十分離れた航行上制限がないオープン水域とよばれる水域および港口やその進入路など、航行上多くの制限があるアプローチ水域といわれる水域の航法装置としてGPSが使用されるようになってきている。また、船舶の着岸にキネマティックGPSを利用すること、非常用位置指示電波標識（EIRP）の位置情報源としての利用など、GPSの利用が広まっている。さらに、中波無線標識（中波ビーコン）によるDGPS情報の放送が開始され、測位精度は数mとなり、沿岸地域ではさらに利用範囲が広がるものと考えられる。

2.3 陸上分野¹¹⁾

陸上交通分野では、GPSはすでにカーナビゲーションとして多く使用されているが、緊急車両、タクシー、トラック等車両の位置管理の情報源としても利用が広がりつつある。陸上交通分野での利用では、FM多重、MCA (Multi Channel Access System) 無線、公衆回線、衛星回線等さまざまな通信回線を使用したDGPSおよびRTK情報の利用が可能となっており、数cm～数mの精度でリアルタイムの位置情報を入手でき、GPSの利用範囲は非常に広いものと考えられる。

2.4 宇宙での利用¹²⁾

宇宙での利用については、ロケット打ち上げの航跡監視、人工衛星にGPS受信機を搭載し人工衛星の軌道決定への利用、人工衛星のランデブー、宇宙往還機の誘導、着陸への利用等がある。

3. GPSの航法上の要求と問題点

前章で述べたようなさまざまなGPSの利用があるが、どのような要求をするかにより、種々の問題が出てくる。図3に、利用形態ごとの必要精度とインテグリティ要求概要を示す^{13,14)}。なお、図3の精度、インテグリティは航空分野を除いて利用形態、利用する人数等から類推したものであり、各利用団体等から出されたものではないことに注意願いたい。

精度要求は、洋上の航空機、船舶等で数十～数百m、自動車あるいは人の航法では数cm～数十cmが要求される。また、測量・測地・科学観測では数mm～数cmの精度、速度計測においても数mm/sが要求される。さらに、高速度の移動体では高速の測位レートが要求される。数m以下の測位精度は、1章で述べたディファレンシャルGPSでmm～1mの測位精度が可能となっている。また、高精度が要求された場合、それまで問題にされなかったさまざまな誤差要因が問題になってくる。これには、衛星の位置および時刻誤差、マルチパスの影響、電離層の水平・垂直構造、および衛星・受信機において異なる周波数の信号が異なる経路を通るため、および経路の周波数特性等により生じる遅延時間の差である衛星・受信機の周波数間バイアス（数十cm～数m）、対流圏遅延等が含まれる。さらに、GPSをはじめとする衛星航法は、衛星の位置に基づいて地球上の位置を求めるため、地球回転パラメーター（自転速度、極位置等）も誤差要因のひとつとなる。干渉測位では、3日前の地球回転パラメーターを使用した場合、約1cmの誤差となる¹⁵⁾。

航空での利用に限らず、車両、列車等の衝突防止、事故

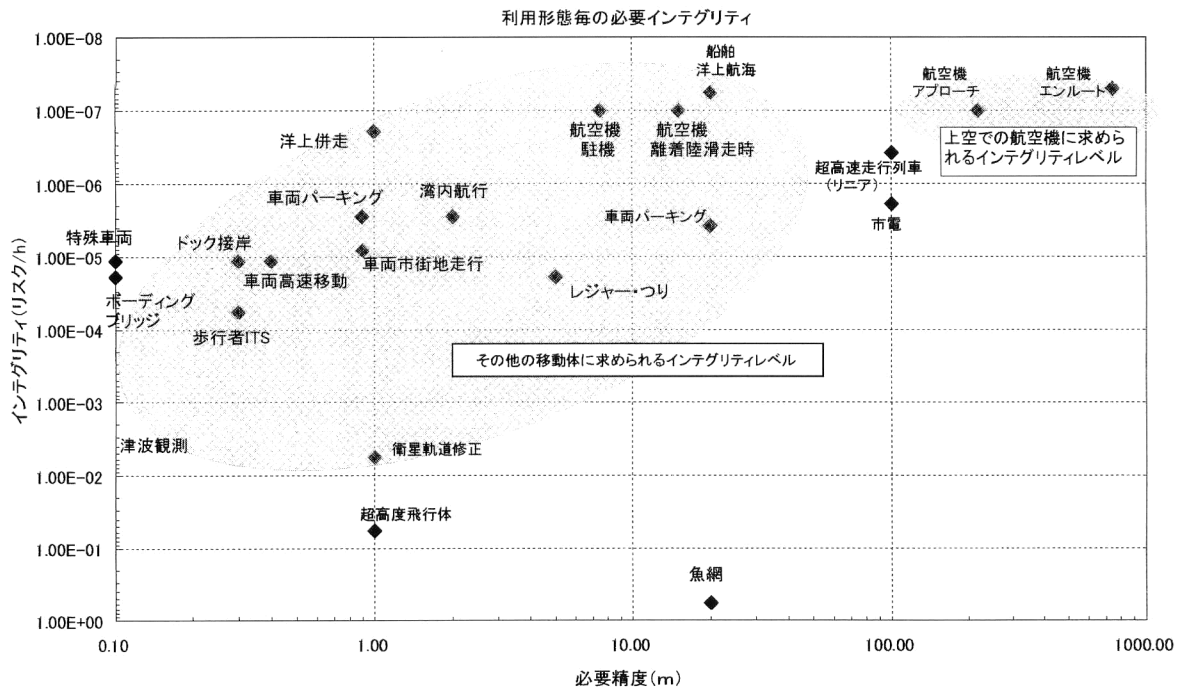


図3 利用形態ごとの必要精度とインテグリティ。

表2 GPS 標準測位サービス性能基準 (抜粋)¹⁶⁾。

項目	性能基準	
カバレッジ	≥98%	世界平均
PDOP*≤6	≥88%	最悪地
アベイラビリティ	≥99%	世界平均
水平精度 36 m (95%)	≥90%	最悪地
垂直精度 77 m (95%)		
測位精度 (95%) all-in-view	≤13 m	水平方向, 世界平均
	≤22 m	垂直方向, 世界平均
	≤36 m	水平方向, 最悪地
	≤77 m	垂直方向, 最悪地
測距精度 (rms)	≤6 m	垂直方向, 最悪地全衛星平均
タイムトランスファー精度	≤40 ns	95%時間
インテグリティ, 警報時間	規定なし	

*Position dilution of precision (位置精度低下率)。

防止など人命にかかわる GPS の利用では、なんらかの方法でインテグリティを確保することは重要である。

また、GPS は世界中いつでも、どこでも利用できるとされるが、厳密にはそうではない。標準測位サービスは、表 2 に示すように、99% (最悪地では 90%) の利用率が保証されているのみである¹⁶⁾。また、GPS 衛星の軌道配置または衛星の故障により測位精度が劣化する一部の地域も存在する。現在、GPS のみではこの測位精度の劣化を回復する手段がない。このため、GPS を補強するシステムが考えられており、追加の衛星として静止衛星を用いるもの (SBAS)、地上の擬似衛星を用いるものなどがある。

このように、さまざまな要求がさまざまなレベルであると考えられるが、航空、船舶への利用を除いて明確な要求はまだ定義されていないのが現状である。

4. GPS の将来¹⁷⁾

2, 3 章で述べた多様な GPS の利用、GPS への要求、問題点などを背景として、GPS の運用開始後、軍および民間にとって GPS の重要さが増大し、新信号増設、より強力な送信電力、よりよい精度、制御されたシステムインテグリティ、システムの高堅牢性、敵対的利用の防止、よりよいスペクトラム管理などに関する要求が広がってきた。このような状況下、1996 年の大統領令 (PDD: Presidential Decision Directive) および 1998/1999 年の副大統領の GPS 近代化および改良に関する方針において、2006 年までに、故意に精度劣化をもたらす選択利用性 (SA: selective availability) をゼロにすること、新軍用信号 (M (military) コード) を追加すること、2 個の新民間用信号 (L2C: 周波数 1227.6 MHz と L5: 周波数 1176.45 MHz) を全世界的に自由に利用できるようにすることを明らかにした。2000 年から、これらが実行に移され、2000 年 5 月に SA がゼロとなった。また、衛星打ち上げ計画の変更が行われ、Block-II F は 12 個の衛星で最後となり、GPS-III の開発が始まることとなった。表 3 に近代化計画内容、図 4 に衛星打ち上げ計画を示す。

GPS の近代化計画には、新しい周波数の民間用信号

表3 GPS近代化計画.

衛星	近代化内容	信号スペクトラム, 擬似距離誤差等
Block-ⅡA/ⅡR (現在の衛星) 2012年末ごろまでⅡR-M, ⅡFに置き換えられる	標準測位サービス (~100 m) 精密測位 (~16 m) 2周波数 L1: C/A, P(Y) L2: P(Y)	スペクトラムは図5(a)参照 ・擬似距離誤差: 1.5 m (1 σ)
Block-ⅡR-M ・2004年より打ち上げ ・L2C初期運用は2009年	ⅡAの全能力の改善と ・L2への第2民間信号の付加 ・新L1M, L2Mコード付加	スペクトラムは図5(b)参照 ・擬似距離誤差: 1.2 m (1 σ)
Block-ⅡF ・2006年より打ち上げ ・L5初期運用は2012年	ⅡR-Mの全機能とⅡR-MにL5第3民間用信号の付加	スペクトラムは図5(c)参照 ・擬似距離誤差: 0.8 m (1 σ)
GPS-Ⅲ 2010年以降と予想される	<ul style="list-style-type: none"> 耐妨害特性の改善 精度向上 改良型時計, 衛星間測距, 衛星軌道暦・軌道モデル改良, クロスリンクによる時宜を得た情報アップデート 利用率向上 補強システムの利用を排除しないが補強を必要としない(LAAS等を除く), 高送信電力による利用率, 連続性向上 インテグリティの向上 航空利用等安全に関する利用が重要, 監視と報告機能強化, 補強システムとのインターフェイス 大きな残存性 追尾性能の向上(パイロット搬送波の利用) 航法関連メッセージ通信機能 	スペクトラムは未定 ・擬似距離誤差: 0.2 m (1 σ) L1信号の近代化が議論されている L2CとL5信号は, ・相互相関を防ぐための2個の長いコードの使用 ・前方誤り訂正符号を用いた自由度の高い新メッセージを提供できる 近代化L1はほかに, 上記L2C, L5信号機能に加え, 現C/Aコードに後方互換性が必要

本格運用に入る前のGPS衛星はBlock-I衛星とよばれ, 本格運用に入ってからBlock-II衛星(1989年1号機打ち上げ)とよばれ, その後Block-IIA(Advanced, 1990年1号機), Block-II R(Replacement, 1997年1号機), Block-II RM(Replacement Military, 2004年1号機), Block-II F(Future, 2006年1号機予定)と機能, 性能向上が図られてきた. GPS-Ⅲ衛星(2010年以降1号機予定)はBlock-II Fに続く衛星で, 現在その機能, 性能が検討されている.

L1: 周波数 1575.42 MHz, L2: 周波数 1227.6 MHz, L5: 周波数 1176.45 MHz.

(L5)の追加, 新信号の追加(L2C), Mコード(L1, L2)の追加等による測位精度の向上, 脆弱性に対する対策, 対干渉特性, 追尾特性等の向上が図られる. また, 地上でGPS衛星の軌道および時計を管理運用しているコントロールセグメントとよばれる部分のハードウェア, ソフトウェアも更新され, 精度向上, 信頼性の向上が図られる. 表3に, GPS-Ⅲまでの測距誤差の改善計画を示す. また, 図5に, 現在およびL2C, Mコード, L5信号が付加された場合の信号スペクトラムを示す.

L2Cは民間用の信号で, L5が利用可能となるまで民間利用者もL1とともに電離層遅延の測定に利用できる. また, L2CのPRNコードは1.023 MHzでL1C/Aコードと同じであるが, 10230ビット長と767250ビット長のPRNコードの組み合わせにより長いコードを作成し, コード間の干渉を軽減している. また, 信号をデータありなしの搬送波の直交成分に分け, データなしの信号を利用して信号追尾性能向上を図っている.

L5信号は, L1C/Aとの共用により, GPSの脆弱性に対

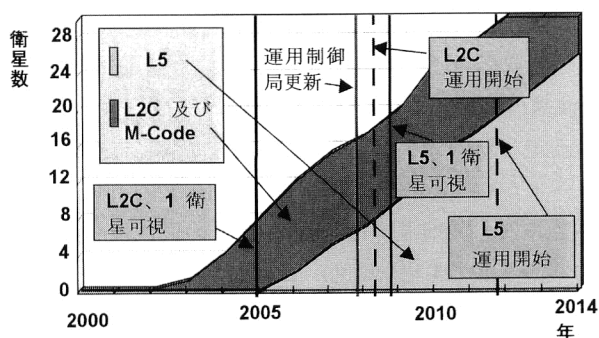


図4 GPS近代化衛星打ち上げ計画.

応するためと民間利用者の電離層補正のために追加された信号と考えられる. L5では10.23 MHz, 10230ビットのPRNコードが2個使用され, L2Cと同様に搬送波の2つの直交成分をそれぞれPSK変調する. 各PRNコードはさらにNeuman-Hoffman符号¹⁸⁾で変調され, ビット同期, 相関特性の改善が図られている. 情報レートは, 50 bpsで5個の6秒300ビットのメッセージが予定されている.

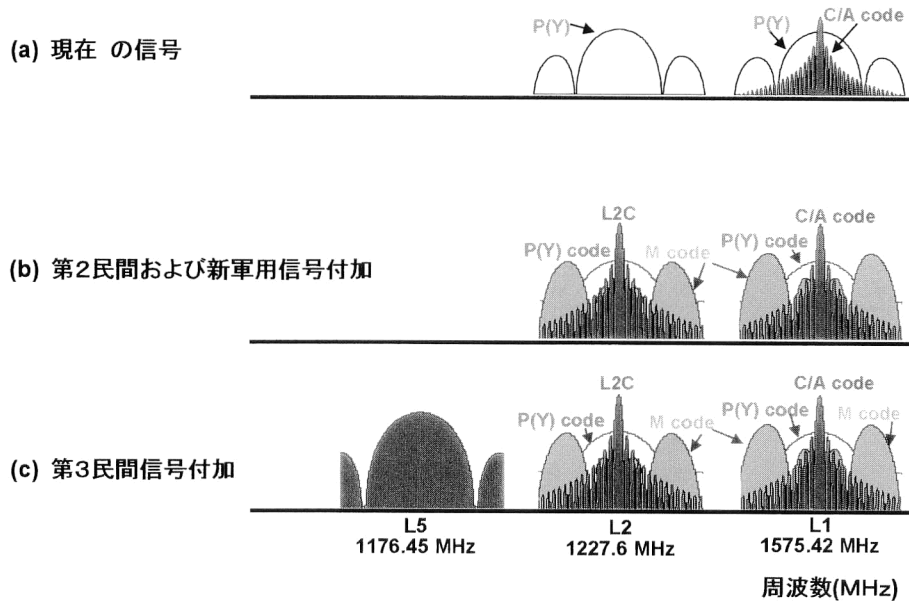


図5 GPS近代化信号スペクトラム.

Mコードの信号は軍用であり詳細は不明であるが、Binary Offset Carrier (BOC (10,5) と記される) 測距信号が使用され、図5からもわかるように、従来のC/A, P(Y)コード信号との干渉が少ないスペクトラムとなっているとともに干渉妨害にも強いスペクトラム構造となっている。5.115 MHzのコードレートが使用され、スポットビームアンテナが使用されるようである。

このようなGPSの近代化を背景に、2周波数による電離層遅延補正、高チップレートによる測距精度の改善などにより、DGPSなどの補強なしで測位精度1 m程度が得られるようになると予想できる。さらに、信号追従能力の向上、3周波数の利用により、搬送波位相サイクルスリップの減少、安定したアンビギュエティー除去が容易になり、センチメートルレベルの測位の信頼性、利用性向上が期待できる。さらに、GPS-IIIではL1C/A信号の近代化も議論されており、ますます利用範囲が広がることが期待できる。また、日本版GPSともいえる準天頂衛星システムが計画されており、GPSとともに移動体用のセンチメートル～サブメートルレベルのサービスが可能となると考えられる。

5. 光学の技術分野への要望

すでに利用されている技術もあると思うが、レーザー測距(パルス、干渉の利用、電波と同様に変調波も利用可能であろう)の衛星位置、時刻測定への応用で精度向上を図ることが考えられる。これには、ミリメートル～センチメートルの位置精度、サブナノ～ナノ秒の時刻精度と全天候運用が必要となる。また、宇宙空間では見通しに問題がな

く、衛星の自律的な衛星間精密測距による高精度衛星位置決定システムへの応用も考えられる。

GPSを補強する立場からは、地下街などGPS電波の届かない場所、あるいは航空機のバンクによる衛星信号の欠落に対して、慣性航法センサーとしてレーザージャイロの利用が考えられるが、現在は高価であり、小型で高精度のものがない。歩行者用であればドリフト10 cm/h、ハンディタイプの端末機器に内蔵可能なものが望まれる。

宇宙用の高精度の原子時計をはじめとするGPSの基本的技術および精度等を補強するディファレンシャル技術を利用して、各方面でGPSの利用が進んでいる。しかし、多方面に利用されるほど、社会のインフラとしての性格が強くなり、精度、安全に関する機能・性能の確保、信頼への要求など、現在のGPSがもっていない機能・性能への要求が厳しくなっているように思える。今後10～15年は同様な傾向でGPS等の衛星高航法システムの機能・性能向上が行われるものと考えられるが、高精度・小型のジャイロ等の出現により画期的に航法の方法が変わることも期待したい。

文 献

- 1) B. W. Parkinson, J. J. Spilker, P. Axelrad and P. Enge: *Global Positioning System: Theory and Applications I*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1996) pp. 3-55.
- 2) B. W. Parkinson, J. J. Spilker, P. Axelrad and P. Enge:

- Global Positioning System: Theory and Applications II*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 164 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1996) pp. 3-50.
- 3) 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).
 - 4) P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance* (Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, 2001) pp. 209-250.
 - 5) 星野尾一明：“GPS の交通における利用”，日本機械学会第7回交通・物流部門大会講演論文集 (1998) pp. 13-18.
 - 6) International Civil Aviation Organization: *Special Committee on Future Air Navigation Systems Fourth Meeting Report*, ICAO Doc 9524, FANS/4 (May 1988).
 - 7) Federal Aviation Administration: *U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Specification Wide Area Augmentation System (WAAS)*, FAA-E-2892 (May 9, 1994).
 - 8) ESA GNSS-1 Project Office: *EGNOS AOC System Requirements Document*, E-RD-SYS-E-001-ESA (May 16, 1997).
 - 9) 星野尾一明：“静止衛星による GPS 補強システム”，GPS シンポジウム '97 (日本航海学会 GPS 研究会, 1997 年 11 月) pp. 91-106.
 - 10) 今津隼馬：“船舶航行における利用”，GPS シンポジウム GPS/DGPS 利用技術の展望 (日本航海学会, 1996 年 11 月) pp. 85-94.
 - 11) 杉崎幹彦：“業務用車両の GPS 利用について”，GPS シンポジウム '97 (日本航海学会 GPS 研究会, 1997 年 11 月) pp. 167-176.
 - 12) 電子情報通信学会論文, GPS 論文小特集, **J84-B**, No. 12 (2001).
 - 13) 移動体に適した位置情報補正技術に関する調査報告書 (電子航法研究所, 2003 年 3 月).
 - 14) International Civil Aviation Organization: *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Communications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I—Radio Navigation Aids* (2002).
 - 15) 高島和宏：“オンライン・リアルタイム VLBI 観測の夢と現実”，第 32 回国土地理院技術研究発表会, 国土地理院技術資料, A・1-No. 280 (2003) pp. 11-19.
 - 16) Assistant Secretary of Defense for Command, Control, Communications, and Intelligence: *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard* (The U. S. Department of Defense, October 2001).
 - 17) C. Khan: *GPS Modernization*, US-Japan GPS-QZSS TWG (GPS Joint Program Office, December 4-5, 2002).
 - 18) The Radio Technical Commission for Aeronautics: *Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces*, RTCA DOCUMENT ICD-GPS-705 Rev. 2 (2002).

(2003 年 6 月 16 日受理)