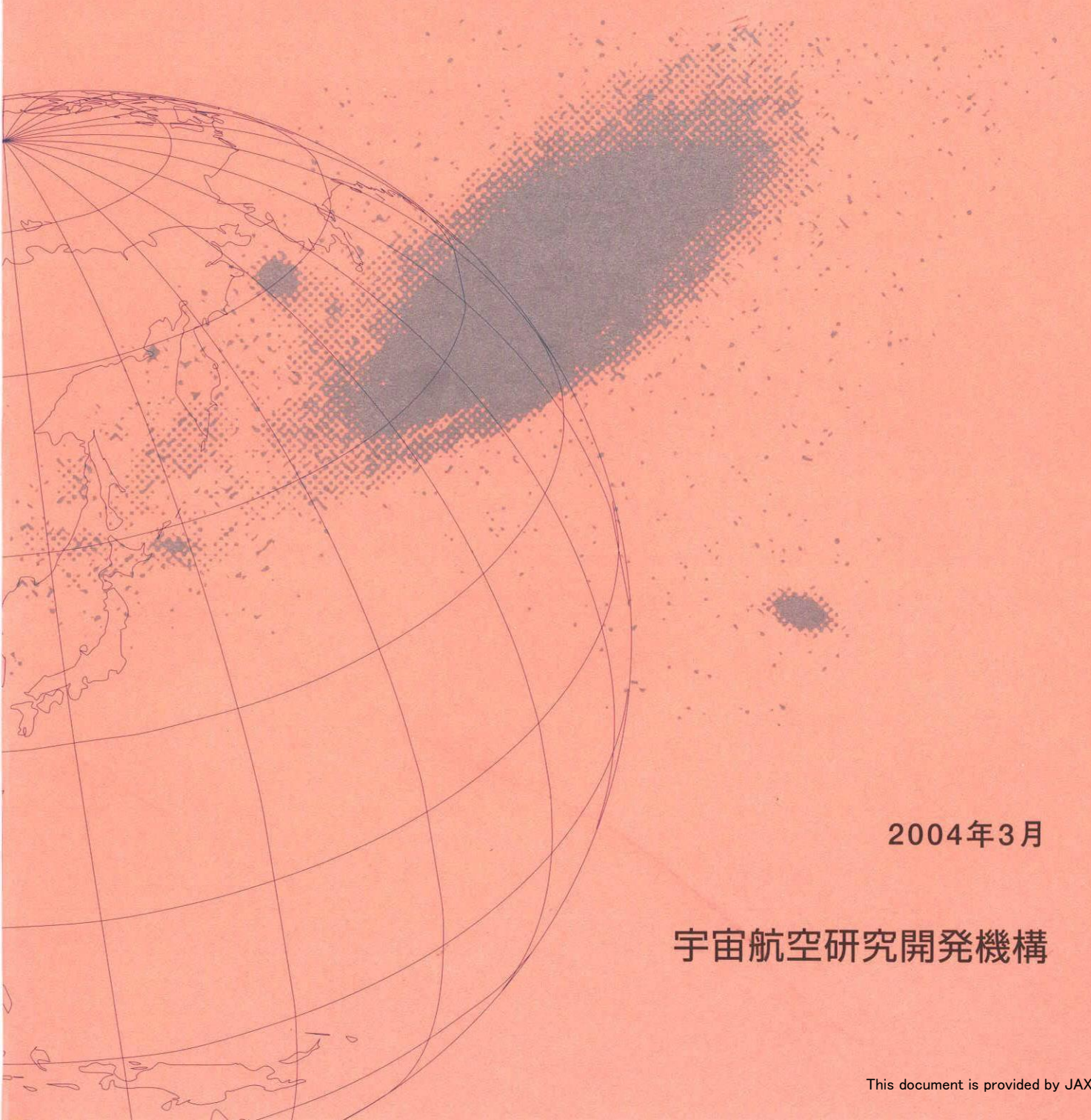


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

# 21世紀に向けた航行衛星システムに関する一検討



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料  
JAXA Research and Development Memorandum

21世紀に向けた航行衛星システムに関する一検討  
A Study on a Navigation Satellite System toward 21st Century

稲宮 健一、森 雅裕  
Kenichi INAMIYA, Masahiro MORI

技術研究本部 先端ミッション研究センター  
Advanced Mission Research Center  
Office of Research and Development

2004年3月  
March 2004

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



和 文 抄 録	<p>最初に GPS の歴史を概観した。GPS の裾野はロケットの出現、マイクロ波領域に至るエレクトロニクスの発達、それらが基礎となり、Sputnik が引き金となって、ロランや、拡散符号の技術が基本要素となって、今日の GPS 時代が築かれた。1990 年代に現在の GPS の形態が定まり、それ以降補完システムの開発と、その利用分野に力が入れた。この資料では補完システムについては触れない。</p> <p>最近バールを脱ぎ始めた次世代の Galileo の意義について述べた。ここまでの 20 世紀に築かれた航行衛星システムである。</p> <p>21 世紀の GNSS(Global Navigation Satellite System)は過去の実績に立脚するが、今後出現するであろう革新技術と相俟って、過去に捉われすぎず、新しい展開が期待される場所である。そこで、将来、世界的な航行衛星システムはより国際的な管理にゆだねられるようになり、国際的な資産になって行くであろう動向について述べた。</p> <p>21 世紀の航行衛星システムは単独でできる限り高精度が達成できる構造が望ましく、それに寄与できる可能性のある要素技術のアイデアを 1 件検討した。これは衛星測距の精度を向上できる技術で、それを通じて、さらに高精度な GNSS が築いていける。このアイデアが今後の発展に寄与できることを期待したい。</p>
和文キーワード	GPS,GPS の歴史、Sputnik と GPS、GNSS、Galileo、衛星間通信、高精度測距、測距信号形式、高精度測位信号、測位信号形式

<p>Abstract</p>	<p>A history of GPS is briefly surveyed. In that, a fact is described that a foot of birth of GPS is appearance of rockets and a remarkable progress of electronics in the micro wave region, an origin of GPS is triggered by Sputnik, and the present GPS has been constructed by those past advanced effort and the technologies used in Loran and the spread spectrum code as key factors. The essential structure of GPS had been established in times of 1990, after that, major concern of development has been placed on augmentation systems and civil utilization. This document, however, does not include the augmentation systems. A comment is added on a position of Galileo, which is unveiling recently, for the next generation in the world. Those contents are the activities of 20 century.</p> <p>GNSS (Global Navigation Satellite System) of 21 century will be, of course, based on the already developed achievement at the fundamental layers, however, it is expected that a new deployment for that will be opened through an innovated breakthrough not emergence yet at this moment without too much prepossessed by the past knowledge. And, the future GNSS will be controlled under an international organization and become an international resource.</p> <p>It is preferable that the GNSS of 21 century will be a unified and have higher accuracy than it is, and an idea for trial which would contribute for this purpose is described herein. This is a technology to attain a higher accuracy in area of the inter-satellite ranging, a higher accuracy GNSS would be realized through the technology. It is expected that the described content herein could contribute to progress for the future GNSS.</p>
<p>Keywords</p>	<p>GPS, a history of GPS, Sputnik and GPS, GNSS &amp; Galileo</p>

# 目 次

概要 .....	1
はじめに .....	2
1. 航行衛星システムの始まり .....	2
1.1 Sputnik ショック .....	2
1.2 電波航法の実験者 .....	3
1.3 航行衛星システムの実験者 .....	3
1.4 開発段階から運用段階まで .....	5
2. 検証の時代の GPS .....	6
2.1 初期軌道上の検証 .....	6
2.2 Block II 時代の星座 .....	9
3. 欧州の挑戦 .....	10
3.1 英国航海学会の見解 .....	10
3.2 Intelsat の例 .....	11
3.3 航行衛星システムの国際管理 .....	12
4. 航行衛星システムの将来スコープ .....	12
4.1 GPS の技術革新 .....	13
4.2 GNSS のシステム検討 .....	14
4.3 DINACS の提案 .....	15
5. 現在の GPS の課題 .....	18
6. 21世紀型 GNSS への提案 .....	21
6.1 周波数の課題 .....	21
6.2 衛星間通信の課題 .....	22
6.2.1 最近の衛星間通信 .....	22
6.2.2 GNSS への適応性 .....	22
6.2.3 高速衛星間通信回線の接続 .....	23
6.2.4 測距 .....	27
(1) 信号の規模 .....	27
(2) 信号の形式 .....	28
7. まとめ .....	37



平成15年2月28日

## 21世紀に向けた航行衛星システムに関する一検討

先端ミッション研究センター  
招聘研究員 稲宮健一

### 概要

最初に GPS の歴史を概観した。GPS の裾野はロケットの出現、マイクロ波領域に至るエレクトロニクスの発達、それらが基礎となり、Sputnik が引き金となって、今日の GPS 時代が築かれた。1990 年代に現在の GPS の形態が定まり、それ以降補完システムの開発とその利用分野に力が入れた。この報告書では補完システムについては触れない。最近ベールを脱ぎ始めた次世代の Galileo の意義について述べた。ここまでの 20 世紀に築かれた航行衛星システムの資産である。21 世紀の GNSS( Global Navigation Satellite System ) の将来は今後出現するであろう革新技术と相俟って、過去の技術に立脚するが、しかし、過去に縛られず、新しい展開が期待される場所である。そこで、ここではより国際的な管理にゆだねられ、国際的な資産になって行かろう動向と、高精度化に寄与するであろう技術の要素技術を記述した。

### はじめに

電波を航法に活用することは 20 世紀の始めから、特に第二次世界大戦中に著しい進歩があった。その開発努力は 1947 年に出版された MIT の Radiation Laboratory の Radar 技術に関するシリーズに記述されている。またこれより少し前の時代にロケットに関する技術開発が実績を積んでいた。そして、1957 年 10 月 4 日突然出現した Sputnik に西側は大いに驚き、それが切っ掛けとなって、この二つの主要な技術が結び付き、その後の宇宙開発を後押しした。(1)、(2)

衛星を使って測位を行おうと言う動機は Sputnik のビーコン電波を観測しているうち、初めての構想が浮かび、現在の GPS へと繋がっている。そして、その期間に紆余曲折があった。航行衛星システムの未来を検討するとき、今の GPS の現状認識が必須であるが、その時の GPS は物理的な特性のみならず、誕生から現在までの歴史も重要である。

GPS のシステムが構築される過程は冷戦時代であって、とにかく全地球的な覆域を持つ航行衛星システムをなりふり構わず実現することが求められた。冷戦が終了して、GPS が広く民生用に開放され始めると、GPS が持つ全地球的航行衛星システムの意義が吟味され



るようになってきた。その走りは航空機への応用で、1991年にICAOから打ち出されたFANS (Future Air Navigation System)であり、現在のCNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management)である。また、日本におけるカーナビ、測量、地球観測などへの普及である。さらに、もっと広い立場で全世界的な立場にたったGNSSが1994年に英国航法学会から提起された。その考えに従い、2000年に入ってGalileoが登場して、GNSSに多国の所有と、民生用を第一の用途とする革新が導入された。また、GPSに関しては補完システムの開発が多岐にわたり発展して、優れた特性が引き出されてきている。しかし、ここでは補完システムについては触れず、単独測位に関する検討を行った。GPSプロジェクトはブロックⅡFの最新型の計画を示すだけでなく、将来30年にわたって、GPSⅢを展開する計画を示している。

しかし、GPSの原点であるSputnikの出現から48年で現在の形態が確立したわけであるが、革新技術の進歩はドッグイヤーと呼ばれているように加速度的に昨日の不可能が、今日可能になる現実であるので、現在の形態が変わらず維持されるとは限らない。それ故、GPSⅢに縛られることなく新しい開発に挑戦することは後年になって、意義のあることとなるであろう。航行衛星システムの検討に当たっては航行衛星の基本的な特性をよく踏まえてシステムの検討を行う必要がある。以下のようなシステム固有の特性がある。

- 航行衛星システムは宇宙空間に拡散した多数の衛星が投入される条件下で、有効な測位が実現できる。従って、システムの有効性を示す(サービス地域の面積 / 必要な衛星数) 指数はサービス地域が広いほど良い値を持ち、衛星を有効に使えることになる。
- 衛星が広く分布して、利用者が地球的な規模で移動しながら利用できて、システムの有効性が高まる。そのため、衛星システムは広域で共通的に使える特性が必要である。
- GPSはGNSSが可能であることを立証した。Galileoは技術的にはGPS likeであるが、多国籍管理と言う新局面を開いた。21世紀はこれらの20世紀の資産を引き継ぎ、技術革新を取り込み、本格的な国際管理へと繋げていくべきである。

ここでは、高精度化を目指してその可能性を高めるための検討を行った。後年の検討のため資されることが目的である。

## 1 航行衛星システムの始まり

### 1.1 Sputnik ショック

1957年10月4日にSputnikが打ち上げられた。ロケットの先駆者はロシア、米国、ドイツに居た。ロシアのK.E.Tsiolkovskyは1883年にロケットが真空中を飛翔する記事を書き、1895年にDream of the Earth and Skyを出版し、その中で人工衛星の可能性を述べている。彼は革新的なアイディア、例えば液体燃料などを明らかにした。これはライト兄

弟が Kitty Hawk を飛ばす 5 年前である。ロシア革命後、その活動が認められ、1926 年にはロケット推進や、衛星制御の理論の基本理論を打ち立てた。Sputnik の打ち上げ日も最初は彼の誕生日である 9 月 17 日が計画されたが、実際は 17 日間遅れた。

米国の H. Goddard は 1909 年に液体燃料の研究に着手し、1914 年に液体燃料のエンジンの特許を取得、スペースチャンバの開発を行ったり、それ以降実際に飛翔実験を行い、実際に 50 発以上の小型ロケットの打ち上げを手掛けた。1926 年に世界初の液体燃料のロケットを打ち上げた。

ドイツの H. J. Oberth は Tsiolkovsky や Goddard が孤独な開発者であったのに比較して、彼らの論文を基にして、ドイツに宇宙開発の機運を起こさせた。”The Rocket into Planetary Space”で液体燃料のロケットを使い地球圏を脱出できることや、数十年の後に有人宇宙船、恒星間飛行が可能であることを示した。この Oberth の本は 1920 年代にドイツに宇宙航空の活動を起こさせる切っ掛けになった。他に宇宙船のドッキング、宇宙空間に望遠鏡を持って行って解像度を上げるなどの概念を初めて提唱した。1927 年に”Society of Space Travel”を発足させ、そこの会長になった。1920,30 年代のドイツはベルサイユ条約の制約を受けて、再軍備は難しかったが、条約の禁止項目にロケットは入ってなかった。

そして、Oberth の学会と軍の結びつきが始まった。1929 年に W. V. Braun が学会に入会して、1932 年に渡って活動して、その成果が軍に取り入れられて行く。新たにバルチック海に面した Peenemunde が射場に選ばれ、V-2 号の生産へと結び付く。

第二次世界大戦の終了後、ロケットの研究は米国とソ連に分かれて継続されて行く。米国では三軍に分かれて開発が進められて行った。ソ連側の開発状況は外部に出ないまま、その成果は突然 Sputnik の電波が世界中を駆け巡り始め、全世界にデビューした。冷戦構造の中であって、このニュースは西側社会にとって衝撃的であった。核兵器と結びつけ、恐怖心が煽られ、米国内の開発体制の見直しに火がついた。丁度黒船来航のような感じであったのかも知れない。(2)

## 1. 2 電波航法の先覚者

戦前に既に電波航法に関する開発が進んでいた。1940 年に Ivan Getting が LORAN A を開発した。LORAN の電波航法の考え方は、GPS の測位方式の基礎になった。

## 1. 3 航行衛星システムの先駆者

1957 年、Sputnik のビーコンが世界を駆け巡っているとき、John Hopkins 大学の Applied Physics Laboratory (APL) の George Wieffenback と William Guier の二人の科学者がその受信信号のドップラ変移を観測することにより、衛星の軌道要素が決定できることを初めて明らかにした。また、その翌年 Frank McClure がこの方法の逆を行うことで、衛星の軌道が既知のとき、そのビーコンを観測することにより観測者の地上位置が決定できることを明らかにした。

米海軍がこの事実に注目して、検討を開始して、1960年4月に最初のTransit衛星が打ち上げられた。衛星からは150MHzと400MHzの2周波数が送信され、初めて2周波数の到着時間の差から電離層の伝搬誤差の補正が施された位置の決定が試された。可視時間は20分程度で、30秒毎に測位が行え、静止地点または遅い移動速度の地点で観測精度は50～200m程で、さらに、もし高度が正確に判明していた場合、同一地点での観測を繰り返し行って、かつ日単位での長期間観測を行えば数メートルの観測精度が達成できることが分かった。

しかし、Transitは観測結果を算出するのに処理時間が長い、3次元の測位、移動している観測点に適さないなどの欠陥があるものの、GPSへの扉を開いた大きな意味がある。

この技術を背景にLORANの開発者であるIvan Gettingを中心に1960年にAerospace Corporationが設立された。ここでは軍のプロジェクトであるProject 57に着手、この中で、1963年にGPSの概念が誕生し、空軍のProject 621Bと命名された。開発の目標は不特定多数の航空機や艦船が世界中のあらゆる所で、送信信号を使用することなく、自分の位置が決められることである。1964年から66年に渡って、Project 57のメンバがGPSの基本原理を創造した。The Aerospace Corp.のHideyoshi Nakamuraとそのグループは4個の衛星からの時刻信号を受信して、独立した4個の時間差情報を未知の時刻バイアスを持つ1個の時計に入力することにより、3次元の位置決めが可能であるとの原理を発想した。

次の問題は当時のGPS用の打ち上げ機はAtlasで、当時のロケットの能力から厳しい重量制限が課せられ、発生電力は1kWが上限であり、送信機に許された消費電力は200Wであり、送信電力は20Wが許容限界であった。このような制限条件の中で発案されたのが、帯域圧縮である。James B. WoodfordとPete Souleは広帯域の擬似雑音符号を用い、同じ周波数を全部の衛星に使った符号多重方式の発想を提案した。これらを基に1965年頃までに詳しい構想案が完成して、航空機や、バルーンを用いて、実験が行われた。当時の航行衛星システム構想は16個の衛星を軌道傾斜角30度の静止高度に投入し、4個の衛星の重複した可視域を作るものであった。(3)、(4)

APLの発想を基に、1958年にTransit Navigation Systemの基本計画が作成され、1960年代に実験と実用化に向かったの活動が行われた。Richard KershnerがAPLの活動のリーダーになり、衛星計画が進められた。原理は衛星からの電波を追跡してドップラ変移から測位を行うもので、衛星は出来る限り簡単な構造で作ることを目標とした。

最初のTransit 1Aは1959年に打ち上げられたが、軌道に載らなかった。沢山の失敗を重ねて、最初の試作機Transit 5A-1は1960年に打ち上げられ、1963年にTransit 5BN-2が打ち上げられ、初の実運用の航行衛星システムが誕生した。しかし、衛星の性能は安定せず、その後Oscarと名前を変え、Oscar 12以降安定に動作した。

同じ頃、米海軍のNaval Research Laboratory (NRL)ではTimation計画が進められていた。Timationは1964年に構想ができ、1967年に最初の衛星が打ち上げられた。NRLのシステム計画は全地球を覆域とするため、8時間軌道に12~27個の衛星を必要とする案

であった。

以上の APL の Transit、NRL の Timation、空軍の 621B が競い合う状態であった。これに対して 1968 年から、一本化の調整が行われ、第二次世界大戦時のレーダ開発のリーダーであった Lee A. DuBridge の意見などが取り入れられ、1972 年に空軍の Bradford Parkinson (現 Stanford 大学教授) が統一したプログラム・マネジャーに任命され、以降一つのプログラムに統合する努力が始まった。軌道の採用に当たっては 12 時間軌道が選ばれた。これは空軍の 24 時間と海軍の 8 時間の妥協案であった。この案はバンアレン帯を避けるという点では良い選択ではないが、もし、24 時間軌道を採用した場合、米大陸の覆域が終わった後、インド洋など地球の反対側を覆うために必要な衛星製造の予算が議会で認めないのではないかと言う疑念があった。12 時間軌道なら、米大陸に置かれた全衛星を管理する管制局に外国からの干渉がないなどの利点も挙げられた。

1970 年代の試験段階に打ち上げられた衛星を表 1-1 に示す。

表 1-1 60 年代の航行衛星

	T-1	T-II	NTS-1	NTS-2	NTS-3
打上げ日	67/5	69/10	74/7	77/6	81/10
高度(km)	925	925	13,697	20,324	20,324
傾斜度	70	70	125	63	63
重量(kg)	39	57	295	440	490
電力(W)	6	18	125	400	450
原振	Q	Q	Q/Rb	Q/Cs	Cs/HM

ここで、Q は水晶、Rb はルビジウム原子時計、Cs はセシウム原子時計  
HM は水素メーザ時計

海軍の Timation と空軍の 621B が統合され、Timation-III は設計変更され、最初の GPS となった。GPS に搭載された原子時計は Timation からの開発を引き継ぐものである。

#### 1. 4 開発段階から運用段階まで

開発から運用の段階まで、初期計画ではプロジェクト全体の期間は三つの Phase が定義されて、現在の GPS が実現して行った。Phase I (74~78 年) は Concept and Validation Program、Phase II (79~82 年) は Full Scale Development and Test、Phase III (83 年~) は Full Operational Capability である。Phase I、II の段階で試験データの取得や、性能確認がなされ、Phase III の段階から実運用に入った。

衛星の開発は同じ性質の衛星群を Block と称して、Block 毎に衛星の性能の向上を図りな

がら現在に至っている。Block I は 1974 年から 78 年までの期間の開発研究の段階で、軌道上の試験の代わりに地上での実験が行われた。1978 年に最初の Block I の試験衛星が打ち上げられた。Block I の衛星は 78～85 年に渡って上げられた。Block II は初期製造段階で、1989 年に 9 機の衛星が打ち上げられた。Block I からの改良点は耐放射線対策である。Block II A は性能向上型で、データの蓄積期間が以前より長くなった。そのため、地上からのデータの更新が途絶えても、以前より長くシステムの機能が継続する。Block II R は一層の自己完結型で、この時点での完成した性能を目指したものである。20 個の衛星が予定されていた。Block II F は継続型で、II R の予定寿命に達した後、の後続機である。各ブロック毎に分けた開発工程表を図 1-1 に示す。

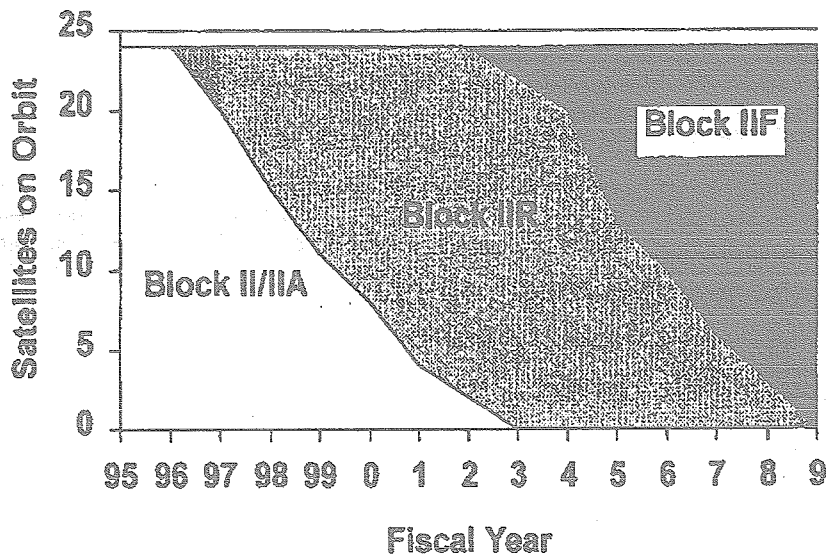


図 1-1 GPS 衛星の開発工程表  
文献 (5) より引用

さらにその後 2001 年から検討を開始して、2011 年から打ち上げが予定される今後 30 年実用になる GPS III の構想が進められている。(5)、(6)

## 2 検証の時代の GPS

### 2.1 初期軌道上の検証

Block I の時代、システム検証が行われ、主要な欠陥が指摘された。その 1 は完全性が維持できない欠陥、その 2 で多くの地域に規定の DOP (Dilution of Precision) が保持できないことが発生する欠陥である。

その 1 は衛星搭載の原子時計あるいは時刻回路の出力が突然変化する現象に起因する。

例えば、GPS の信号を航空機の航空管制に使用している場合、測位信号が突然異常になることは許されない現象である。もし、測位信号が異常になったら、その衛星の信号を排除して、測位を行わなければならない。測位信号の異常が発生からユーザに通知される時間は 10 秒以内が必要とされていた。最近では航空機の離着陸時への適用時はさらに厳しく、1 秒とも言われている。異常の発生を通知する方法として、静止衛星からの GPS 信号の監視が提案され、現在 WAAS(Wide Area Augmentation System)として実現している。

その 2 は星座を構成する衛星の数と配置の問題である。あるいは星座の設計の問題と言える。この時代の計画では最初 24 個の衛星で星座が構成される予定であったが、しかし、1980 年に 18 個で構成するような縮小案が実行された。その結果、全地球を覆域とすることは難しく、広い地域で PDOP の劣化が発生した。

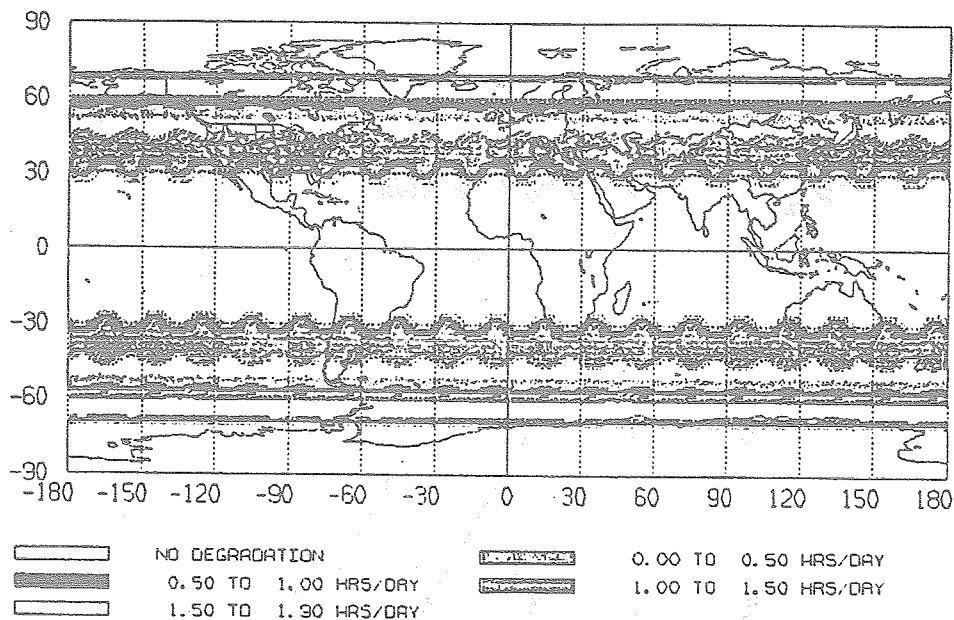


図 2-1 18 個衛星の星座の劣化特性  
資料 (7) より引用

図 2-1 では仰角 7.5 度以上の空間にある衛星を観測対象とし、PDOP が 6 より劣化するところを示している。中緯度や、高緯度地帯の広い地域で劣化が見られる。さらに、3 個の予備衛星の追加が考えられるが、その衛星を追加したときの同様な覆域図を図 2-2 に示す。

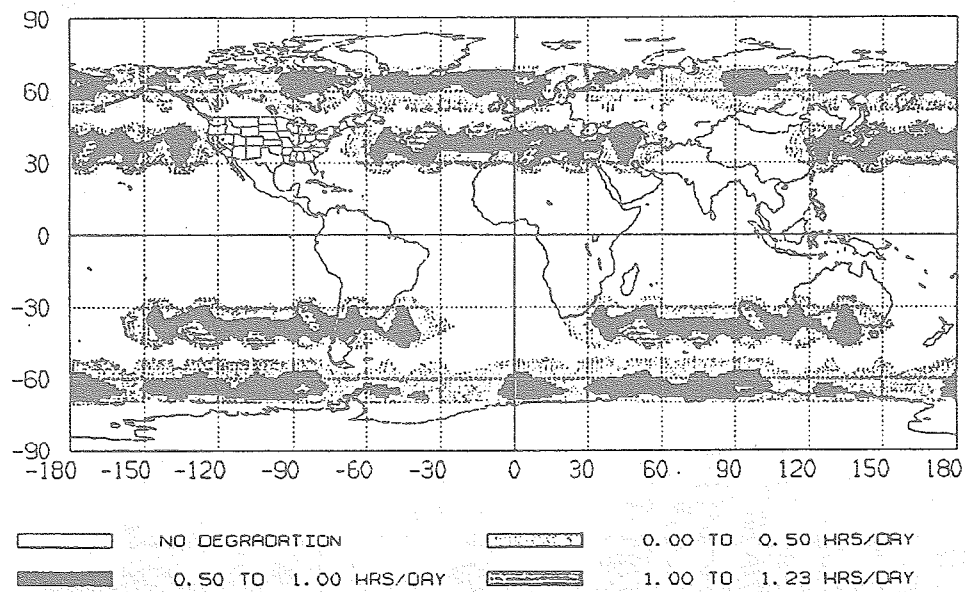


図 2-2 21 個衛星の星座の劣化特性  
文献 (7) より引用

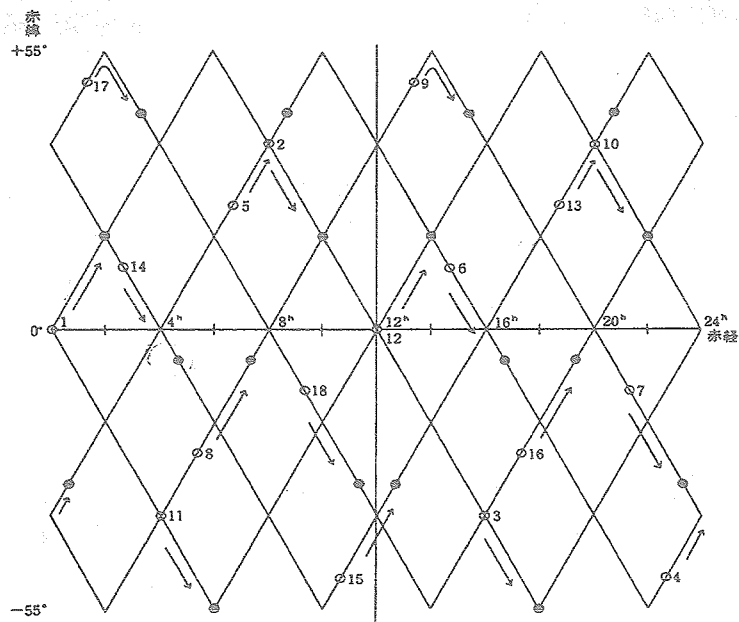


図 2-3 18 個衛星の星座の配置の変化  
文献 (8) より引用

図2-1と図2-2の場合を比較したとき、後者では衛星個数が増加されが、特性の改善はあまり著しくない事が分かる。この問題点は前者が持つ、劣化の原因は衛星の数が少ないことのみではない事を示している。文献(8)によると、劣化をもたらす原因が指摘されている。図2-3によると、白丸に位置にあった衛星が、1時間後に黒丸に達する。そのとき、同一平面上に沢山の衛星が属するようになり、測位に必要な衛星間を結んで作られる幾何学的な条件が満足されず、PDOPを劣化させていると指摘している。

## 2.2 Block II時代の星座

2.1節で示したようにBlock Iの世代は18個の衛星と3個の予備衛星から星座は構成されていた。これをBlock IIの世代にはGPS 21 Primary 星座に変更した。中間段階として、Optimal 21 星座があり、この星座の目標は仰角5度以上にある衛星を測位に使用できる衛星であるとして、全地球域でPDOPが11以下になる星座である。GPS 21 Primary 星座は図2-4に示してある。衛星の位置は24個存在していて、4個の衛星が軌道予備である。最低限必要な衛星数は21個で、仰角5度以上の範囲の衛星を有効な衛星として、全地

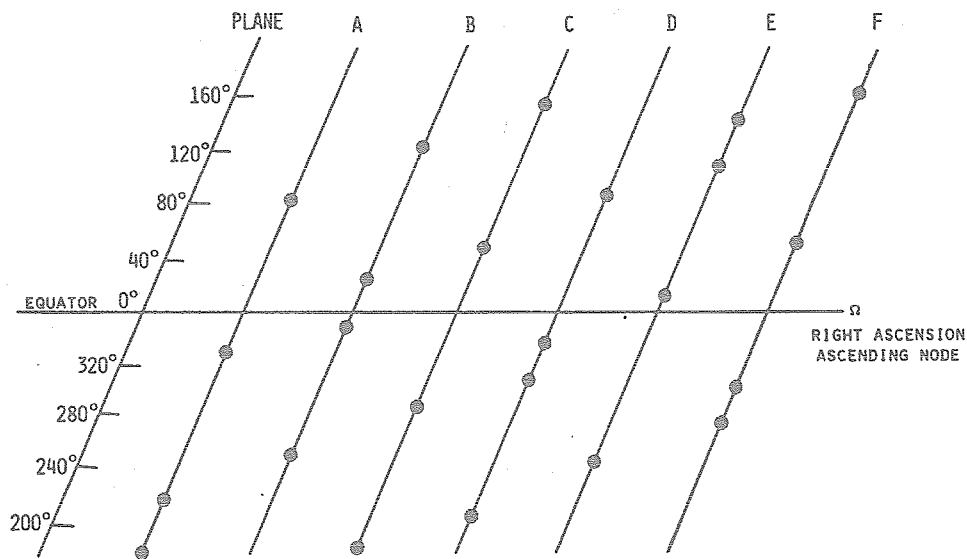


図2-4 GPS 21 primary 星座

文献(9)より引用

球域に渡って、常に4個の衛星が見える確率が0.9960で、そのPDOPが10以下である。図2-3と図2-4の差を比較すれば星座の改善点は良く理解できる。



### 3. 欧州の挑戦

Sputnik ショック以来、衛星を利用した測位は軍事利用の目的で開発が進められてきた。しかし、1983年に起きた大韓航空機の撃墜事件を機に1988年一部が民間に開放された。米国では当然ながら、軍事用に利用されたが、日本においてカーナビなど民生用の製品開発が急激に拡大した。このような背景を基に、欧州で独自にシステムを開発すべきである機運が高まった。

#### 3. 1 英国航海学会の見解

英国航行学会の W. Blanchard は 1994 年に国際学会で当時の航行衛星システムの現状と全地球規模の衛星を使った航法援助の国際的な位置づけについて講演した。彼の主張は以下の通りである。

Global Navigation Satellite System (GNSS) を管理する国際的な機関は現在のところ世の中に存在しない。過去の電子航法システムを扱ってきた団体はこれらの研究をし、勧告を公告してきたが、システムの所有はせず、各国はその勧告に従い、各国の裁量で各国の管理するシステムを稼働させ、維持管理していた。GPS はこの形態と異なる。この点が問題である。衛星航法は多くの恩恵を将来に渡りもたらすもので、誰もが使いたがっている。それ故、人為的に制限を加えた民生用 GNSS は上手く機能しないであろう。

1944年に International Civil Aviation Organization (ICAO) が創設された。ここで、航行衛星を管理できる Civil Aviation Board を設立しようとしたが、米国の賛成が得られず、この案は流れた。しかし、このような問題は克服していかなければならない。国際的な組織が必要なことは明らかである。技術的な問題は解決するだろうが、各国が満足できる国際的な制度につて合意に達するのは難しい。欧州では 16 カ国が参加する Eurocontrol が航行衛星の関する調整機能を持っている。Eurocontrol は航行衛星システムの発展時系列から考えて、GPS と GLONASS までの世代を GNSS-1 と定義し、それ以降の新しいシステムを GNSS-2 と定義した。GNSS-2 は国際的な要求に合致して、万人に開放させたものとするべきである。現在のところそのような権限を持った組織は存在しない。

GNSS に関心のある団体は多数あるが、Intersat のような纏まった団体は存在しない。将来の GNSS さらには Communication, Navigation and Surveillance (CNS) を管理運営する超国家的な団体が必要である。この団体は国連の傘下が一番適している、役割として重要なことはシステムの所有権ではなく、管理運営していくである。ただし、設立に関わる立法措置に、過去の経験から考えて最低でも 10 年間を要する。GPS が抱える法的な問題点はある国が自国の航法援助に GPS を採用した場合、GPS の如何なる不具合もその国が責任を負うことになる。従って、その国は GPS の運用に関して、是正措置を執りたいが、そのような申し出を米国は受け付けない。また、多くの国の航法を管理している部門は自ら管理できない航法援助を自国内で使用許可を与えることを禁じている。正当に創設された GNSS はこれに類似する問題点が発生する可能性を回避する手段を講じるべきである。

GNSS は航空利用に最も関心が持たれているが、各種、各方面にユーザは拡大しており、これらの分野の経済的な活動の重要性は日増しに増大している。もはや、一つの団体の意向だけで、GNSS を運営していくことはできない。また、当然ながらユーザは使用する割合に応じて課金されるべきである。以上のような件を管理する団体は今存在しないが、そのような団体が設立されるとしてその要件は以下の通りである。

1. 領土内の交通、航行の管理、安全に関わる律法措置に関する国の権限と義務
2. 全領域にわたって、永続的にサービスが行われること
3. 利用が可能な方法の明示
4. 責務範囲の定義
5. 購買方針
6. 説明責任
7. 費用ならびに費用回収方法
8. 総てのユーザに対する公平なサービス

GPS に所望の追加を行い、GNSS-2 として機能するように向上させることは民間の組織の役割である。このような役割に対して欧州は大変に良い立場にいる。

### 3. 2 Intelsat の例

衛星通信の歴史はやはり Sputnik ショックに誘発されて進歩してきた。GPS が軍事利用を目的として、米国の管理下で展開してきたのと異なり、前節で挙げた国際機関の管理下で、全世界にその恩恵が及んだ。Blanchard が主張する国際管理の例として、簡単に関連する所をあげる。

静止衛星の構想が発案されたのは 1940 年の Authur C. Clarke であるが、本格的に開発が進んだのは 1963 年に始まった SYMCOM series の挑戦からである。1962 年にケネディ大統領によって、衛星通信に関する法律が承認されて Comsat が設立された。それが契機となり Intelsat が 1964 年に設立された。

Intelsat I (Early Bird) が 1965 年に打ち上げられ、商業衛星の第一歩を築いた。そして、現在 Intelsat X が打ち上げを待っている。この 38 年間の間に数千億円規模の産業を興し、地上局産業は年間数百億円の規模に達している。通信の利用範囲は大規模な通信会社、国、放送などから、家庭で使える小型のアンテナ端末にいたるまで広範囲に至っている。

Intelsat は国連の管理下で、100 ヶ国以上が加入し、出資し、実際に静止衛星を所有して、管理している国際機関である。Intelsat の衛星および地球局は全世界に発注が公告され、システムの構築が世界中の産業の育成に寄与し、かつ完成したシステムの利用は全世界に遍く及んでいるし、また、全世界にわたる研究支援も行っている。(10)、(11)

### 3. 3 航行衛星システムの国際管理

航空管制では ICAO がそれに相当する。しかし、ICAO は GNSS への勧告は公告するが、航行衛星は管理してない。1990 年代に ICAO では航行衛星を使った航法の将来像を描き、FANS (Future Air Navigation Systems) として、公告している。FANS 構想の中では、航法のみならず、衛星は通信、捜索にも応用されるべきであると宣言して、その構想を CNS (Communication Navigation and Surveillance) と呼んだ。CNS の中では航法は GNSS と称して、GPS よりさらに完全性の高いシステムの構想を打ち出した。FANS 構想は現在 CNS/ATM と称され、航空管制のため整備すべき国際的な目標としている。

Blanchard は 3. 1 節で示したように航行衛星システムは国際管理が望ましいとして、ICAO の他に、IOM (International Maritime Organization)、IALA (International of Lighthouse Authorities) などの団体の候補を挙げている。また、GNSS-2 の時代を主張されていたが、現在その主旨をかなり踏まえた Galileo が着々と軌道投入される準備が進んでいる。

Galileo と GPS を Blanchard の主張を基に考察するなら、色々な相違点が浮かんでくる。その相違点を表で表す。

表 3-1 GPS と Galileo の比較

項目	GPS	Galileo
所有	米国	EU (多国籍)
管理	米国	ESA (多国籍)
軍/民関係	軍用 (主)、民 (併用)	民生 (主)、軍 (併用)
衛星の製造	米国内発注	EU 内多国へ発注
信号の解放	無料開放	無料と有料併用
受信機ライセンス	なし	なし

表 3-1 に挙げたように GPS と Galileo を比較すると、3. 1 節で多くの主張が掲げられたが、その中で Galileo ではシステムの管理が一国から多国に変わったことは大きな違いである。ただ、多国は EU 域内の多国であって、Intelsat のような完全な多国とは異なる。しかし、一国の所有から、多国に変わった点は将来、均一な多国の管理への風穴が明けられたように思われる。(12)、(13)、(14)

### 4 航行衛星システムの将来スコープ

#### 4. 1 GPS の技術革新

1 節から述べているように、GPS の開発は 1957 年の Sputnik ショック以来の数多くの革新的な発想のほとばしりと、長い期間に渡って開発努力が実って、現在の GPS がある。そして、補完システムを除いた GPS の近未来の姿は GPS Modernization 計画に示されており、新しい民生用、軍事用周波数の追加、UHF 帯の衛星間通信の追加など、改善を図ることが述べられ、以降 30 年に渡って費用対効果の良いシステムが提供される計画であると報告されている。(15)、(16)

Galileo は GPS の 30 年来の実績を取り込み、新鮮な技術を重畳する機会があったが、3. 2 節で述べた衛星システムを支える体制上の革新はあったが、プロジェクトの関心が欧州の名の下に GPS 相当システムを実現することに主眼が置かれたので、航行衛星システムに関する飛び抜けた技術革新は含まれてない。

米国は GPS の将来像を明確に宣言すると同時に少し古くなるが、1991 年の ICAO の FANS を打ち出した総会で、米海軍の James B. Busey (Admiral) は現在の GPS は最初の第一歩であり、その将来は国際社会が育てて行くべきものであり、米国の最終的な目標は総ての人が参加できる国際的なシステムの構築にあると宣言している。また同時に、公の立場で、もし革新的なシステムが現れれば現在のシステムと代替することもやぶさかではないと発言しているが、将来について革新的な技術の芽を育成するために、この精神を生かしていかなければならないと考える。(17)

GPS は現在まで 30 年余が経過してシステムの構築が成されてきた。近年にあつては補完システムの目覚ましい発展があったが、衛星本体には革新技術の取り込みより、安定したシステムの実現に力が注がれているように思われる。ここでは補完システムには触れない。安定した衛星の実現はユーザからシステムに対する高い信頼度を獲得できるという側面と、もう一つ費用対効果の良い、言い換えれば廉価な衛星が実現できるという面がある。廉価な衛星は現在の衛星の発注主が国の機関で、資金は納税者負担になっている。このような資金の還流になっているので、過去の実績を十分生かした廉価な衛星を実現することは納税者に説明し易い話の筋である。さらには、現在の GPS プロジェクトは将来の 30 年間も現在の延長上に衛星を展開することが表明されている。

しかし、過去の実績を十分生かすことは大切なことであるが、過去の実績で将来 30 年を縛ることは問題が多い。過去 30 年間に多くの革新的な発明があつて、現在が築かれたのであるから、世界の進歩は同様に止むことがないので、さらなる技術革新が航行衛星システムに取り込まれて行くことが予測される。この傾向を阻害してはならない。

例えば先端の情報処理能力と通信能力の進歩と、分子ナノ技術の進歩で GPS IV を考察する提案もある。(18)

すでに開発済みのシステムを安定的に供給することと、一方更なる革新技術を並行して進めることが、いつの時代にも求められる。これは鉄道で言えば、在来線の充実と同時に、新幹線の開発を進めることであり、空の移動と言う点から見ると、ジャンボジェット

信頼度をさらに高める開発と同時並行で、オリエントエクスプレスの実現に挑戦することに似ている。

#### 4. 2 GNSS のシステム検討

GPS はブロック I の時代に骨格ができ、それ以降は部分的な改善が進められた。革新技術は補完システムの開発に移ったと言う傾向である。Galileo は 3. 1 節の述べた通り GNSS の中に GNSS-2 を定義して、GPS とは独立なシステムの構築が試みられた。Galileo の仕様が固まる以前の 2000 年頃まで、色々なシステムの提案があった。Galileo が GPS like のシステムを採用することが決まってからは文献 (18) のような超革新技術の適用の検討以外には少なくなったこと残念である。ここで、Galileo の仕様が決まる前に提案された例を挙げて見る。A.Skoog らが提案したドイツとロシア共同の PROPASS がある。この GNSS-2 は 64.8 度の高い軌道傾斜角を持った静止高度 (IGEO) に投入される衛星から成り立ち、8 個の衛星で地球の 1/3 を覆域とする星座が基本である。その群の星座を 3 群組み合わせ、全地球的な覆域を実現する。仰角制限を 15 度として、GDOP を 5 以下の特性を持つ。(19)

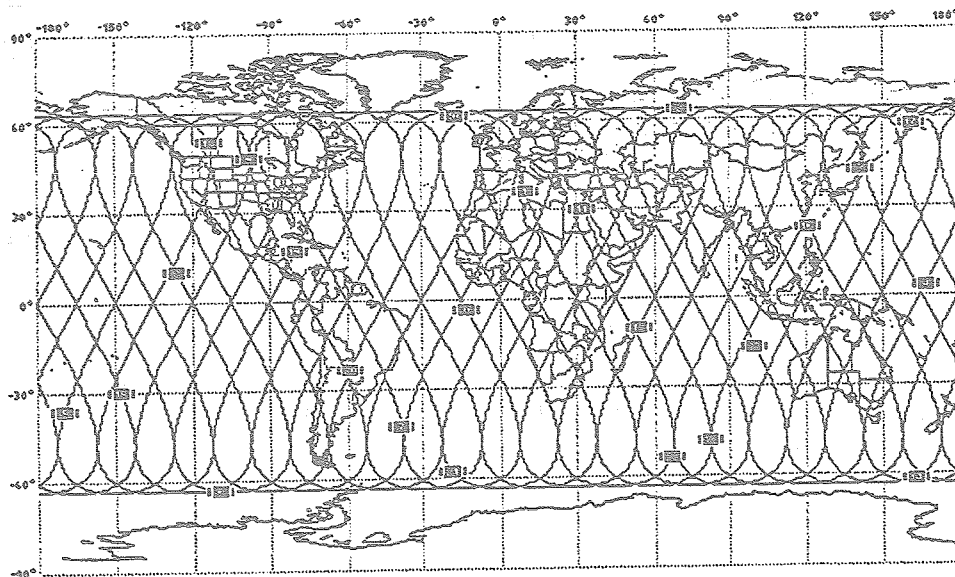


図 4-1 PROPASS の軌跡

文献 (19) より引用

また他に同様なシステムとして、M. Romay-Merino らの提案した構想がある。星座は IGEO 衛星と静止衛星を組み合わせたものである。星座の案は 5 個の静止衛星と 20 個の IGEO 衛星、5 個の静止衛星と 25 個の IGEO 衛星、5 個の静止衛星と 30 個の IGEO 衛星であり、各々に付いて全地球上での VDOP の算出が行われ、システムの評価が行われた。

### 4. 3 DINACS の提案

筆者は A.Skoog、M.Romay-Merino らの構想と同様に IGEO 衛星を使った DINACS (Diamond Navigation and Communication Satellite System) と称する GNSS-2 の構想を提案した。図 4-2 にシステムの概観を示す。DINACS は 15 または 18 個の IGEO 衛星で全地球を覆域として、隣り合う衛星は衛星間通信回線で接続し、さらに移動通信を含むシステム構成に成っている。

システム構成のなかで主要な項目である星座の設計に当たっては地上の任意な地点で衛星を眺めたとき、できる限り同数の衛星が測位に使用できることと、衛星相互間の位置関係が 2. 1 節で示したような規則的な配置のため GDOP の劣化をまねかないように考慮した。前者の条件を達成するため、A. Skoog、M. Romay-Mario らの案と異なり、軌道傾斜角を単一でなく、複数使用する構成とした。

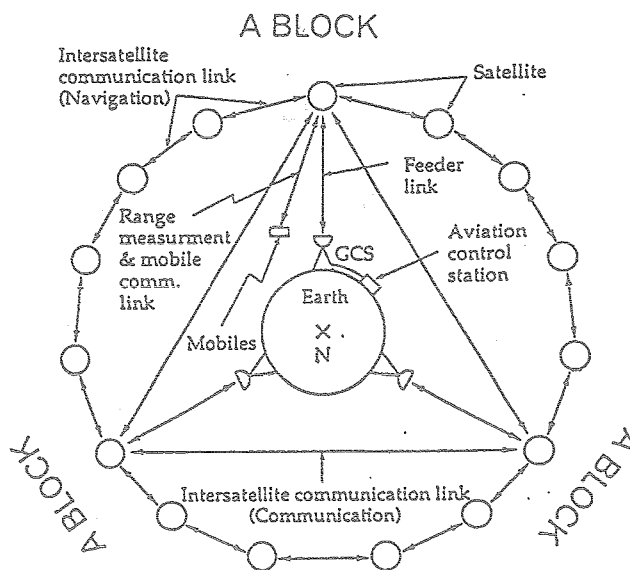


図 4-2 DINACS のシステム構成

後者の条件を達成するため、隣り合う衛星間の軌道周期の位相差 120 度を原則として、さらに 120 度に 10~30% のバイアス成分を加え、2. 1 節で示された現象が再現しないように考慮した。その様子を図 4-3 に示す。図 4-3 の円グラフは IGEO の星座を構成する衛星をある時刻において軌道上において静止できたと仮定して、星座を構成する衛星の相互位置関係を示したものである。円グラフの周囲は IGEO の 1 周期の 360 度目盛られ、衛星の軌道上の位置を示す。半径方向は軌道傾斜角を示す。実際には星座に属する衛星は異なる昇交点を持つ IGEO 上のある点存在しているが、今昇交点の位置を同じ赤経に移動

できたとして、その時の衛星の位置を一枚の円グラフ上にプロットした。2. 1節で示されたような星座の場合をこの円グラフで示すと、単純な正三角形で衛星の位置が示され、図2-3のような現象が発生する。そこで、このような現象を避けるため非対象な線図で描けるように衛星相互間の位相値を選んだ。図4-3は全地球を18個の衛星の星座で構成したときの6個を1群とした星座を示したものである。

次に15個で全地球を覆域とする星座の時、地上で見える衛星の数を世界地図上にプロットしたものを図4-4に示す。可視衛星数の世界分布をこの図より見ると、測位に必要な最低限4個の衛星の地区は僅かに存在するが、ほとんどが4個以上の地域である。15個でこの分布であるから、さらに衛星数を増やせば、かなり余裕を持って可視衛星数を確保できる。星座の設計が測位に影響する要素は、最低限の要求は4個以上の衛星個数であるが、精度を的確に表すのはGDOPである。図4-5に全地球的に81点、各点毎に2時間置きに12時間にわたりGDOPを計算して、その点における一番良い値を選んで、GDOPの度数分布を表した。(21)

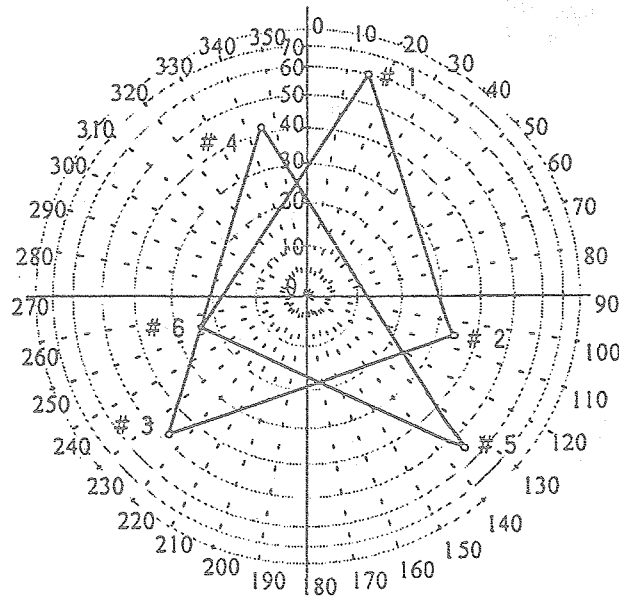
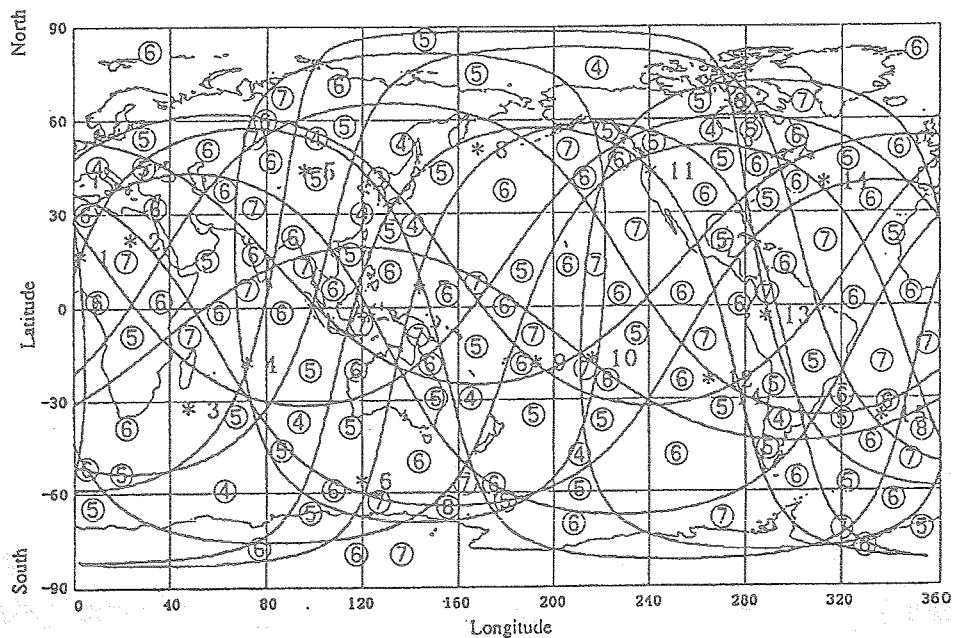


図4-3 DINACS 位相図



Visible area : Inside of the contours.  
 Satellite conditions : 15 IGEO Satellites, elevation  $\geq 5$  deg.  
 Sub-satellite points : Indicated by the mark "\*" .  
 #7 : Satellite number  
 ⑦ : Number of Satellites visible

図 4 - 4 全地球的覆域の衛星可視分布

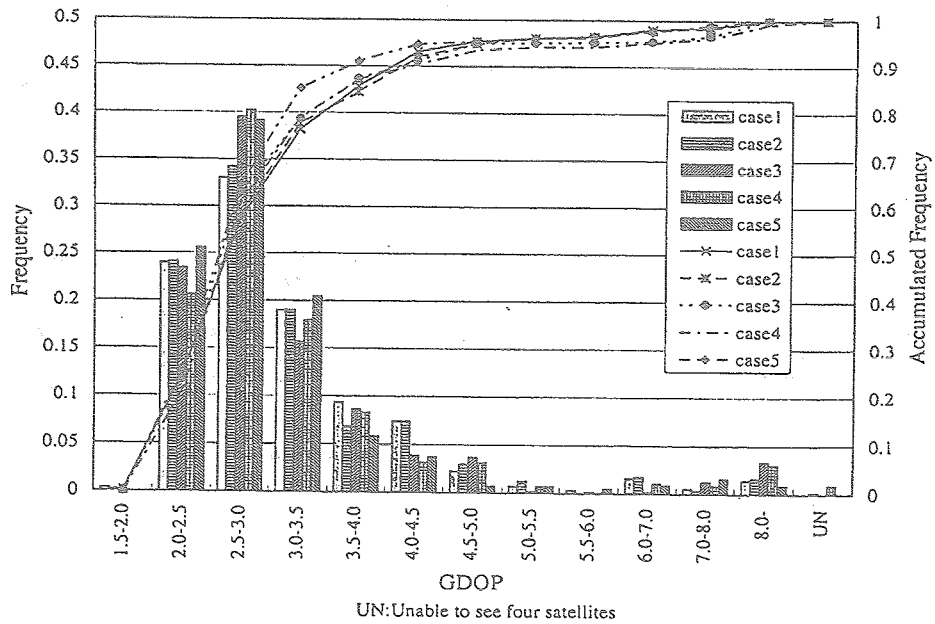


図 4 - 5 18 個衛星の場合の GDOP 度数分布



## 5 現在の GPS の課題

Sputnik ショック以来 45 年経過して、現在の GPS が確立した。その GPS ファミリの全貌は GPS が大樹として中心にあり、補完システムである WAAS、LAAS が大きな枝として茂り、さらに IGS が接木のように一体になって、GPS の機能向上に寄与している。GPS の隣に同じころ植えられた GLONASS があるが、幹の発達具合が悪く、GPS の影に隠れて見えない。また、GPS の枝葉は全世界を覆っているが、根の養分は米国から供給されていて、また枝ぶりは米国のみが、剪定したり、植え替えができるという現状になっている。これに対して、従来の航法管制は国際機関が管理するという原則に反するとして、3. 1 節に記述したように国際的な協調を旗印とした Galileo の植林計画が進められている。Galileo をどんな木にすべきかの議論は色々な案が計画策定段階にあったが、システムの特徴は結局 GPS と極めて似たものになった。

しかし、Galileo の登場は多国籍な管理、民生用の優先、GPS と一緒になり二重の全地球的航行衛星サービスの提供等の新しい局面を開くであろうし、全地球的規模で信頼度や稼働率の向上をもたらすであろう。そして、システムの供給側の層の厚みが増す中で、現在の開発の動向は利用者側が用途の拡大、高精度追求、完全性の表現される高信頼度の達成の追求を目指している。

最初の GPS 以来 28 年で現在のシステム構築が仕上がった。そして供給側の構想は将来 30 年を概観して衛星計画を策定している。過去約 30 年間に発生した多くの技術革新を取り入れて現在に至っているが、同じ考え方で将来を展望するなら、現在の GPS の将来計画にとらわれずに新規要素をの構想を提案していくことは有意義なことと考える。

この点を課題と考察して T. Mckendree は GPS IV を提案している。しかし、この提案は相当時代を先取りしていて、現在将来に花が咲くと思われる分野の先端技術が実現したらという想定条件がある。時代を先取りして将来を展望することは意義の深いことであるが、現在との繋がりも大切にしなければならない。(22)

GPS の開発コストであるが、1995 年に DOD が発表した総額は \$14B ドルであり、この額は 1975 年から 2016 年にわたる Block II F までの開発、実用に掛かる全コストを含む。ただし、打上機と、核爆発検出器に関するコストは含まれてない。衛星のコストのみに注目すると、74 年から 95 年までに \$3.89B ドル、将来に打ち上げまで含んだ総額は \$8.57B ドルである。全期間にわたる衛星の個数は 118 機であるから、1 機換算で \$72.6M ドル、円換算で 87.1 億円 (120 円/ドル換算) である。(23)

Galileo 場合、2000 年の見積もりで、2001 年から 2007 年までの総額で 3.25B ユーロ、その内衛星のみを取り出すと、900M ユーロである。2008 年に全面的に運用開始で、その時 30 個の衛星が投入される。衛星 1 個あたりのコストは 30M ユーロで、GPS の半額程度になっている。また、総額から見ても半額であり、初期開発なしで、実運用へ突入するので、原価が安くできると考えられる。(24)

ユーザ側の代表として、航空機の乗客数を対象とすると、1997年のデータで、全世界で年間12000機のジェット機が飛翔して、1500万回の飛行を行い、延べ150億人を運搬したことになる。(25)

仮定であるが、もし航空機を利用した人が1回飛行するごとに、10円の負担金を払ったとしたら、10年間で1500億円の基金ができる。航行衛星システムの利用は航空機は言うに及ばず、カーナビ、測量、携帯電話と結び付き、緊急通信や、誰でもできる地図検索など、多岐にわたっている。従って、特定の利用者負担でなく、広く薄く負担すれば、豊富な基金が創設できる。この基金を基に3.1節で示された国際管理が可能であり、3.2節で示したように Intelsat のように全世界にシステム構築の資金が還流して、恩恵が全世界に等しく及ぶことが望ましい。

そこで筆者は現在の技術と直接結びつくが、しかし、現在のシステムにとらわれない新規な技術開発を提案する。

#### 参考文献

- (1) Ridenour, L. N., "Radar System Engineering", MIT Radiation Laboratory Series, 1948
- (2) Dickson, P., "Sputnik, the shock of the century", Walker Publishing Company Inc. 2001
- (3) Getting, I., "The Global Positioning System", pp.36-47, IEEE Spectrum, Dec.1993
- (4) Crosslink, The Aerospace Corporation, <http://www.aero.org/publication/crosslink/summer2002/01.html>
- (5) Shaw, M., et al., "The DOD: Stewards of a Global Information Resource, the Navstar Global Positioning System", Proc.of the IEEE, VOL. 87, No. 1, Jan. 1999
- (6) Clark, J., "GPS Modernization", pp.2773-2803, ION GPS 2001, Sept. 2001, Salt Lake City, UT, USA
- (7) Jorgensen, P., "Achieving GPS Integrity and Elimination Areas of Degraded Performance", Navigation, Journal of ION, Vlo.34, No.4, Winter, 1987-88
- (8) 日本測地学会編、GPS ー人工衛星による精密測位システムー、1986年11月、社) 日本測量協会
- (9) Green, G., "The GPS 21 Primary Satellite Constellation". NAVIGATION. Journal of ION, Vol.36, No.1, Spring 1998
- (10) Pritchard, W., "Satellite Communication Systems Engineering" 2nd Edition, Prentice Hall Inc., 1993
- (11) <http://www.intelsat.com/satellites/satellites/asp>

- ( 1 2 ) Report of the Tenth Air Navigation Conference, Doc 9583. AN-CONF/10, Montreal, Sept. 1991
- ( 1 3 ) The Report of the World Wide CNS/ATM Implementation Conference, ICAO Report, May 1998, Rio de Janeiro
- ( 1 4 ) Hein, G., et al., " The European Satellite Navigation System Galileo ", pp.23-33, GPS シンポジウム 2002, 2002 年 11 月、日本航海学会 GPS 研究会、東京商船大学
- ( 1 5 ) Clark, J., " GPS Joint Program Office Modernization Efforts ", pp.2151-2174, ION GPS 2000, ION, Sept. 2000, Salt Lake City, UT
- ( 1 6 ) Clark, J., " GPS Modernization " pp.2773-2803, ION GPS 2001, ION, Sept. 2001, Salt Lake City, UT
- ( 1 7 ) Busey, J., " Remarks by Admiral James B. Busey " Administrator United States Federal Aviation Administration, ICAO Air Navigation Conference, Montreal, Canada, Sept. 1991
- ( 1 8 ) McKendree, T., " GPS IV ", pp.2745-2750, ION GPS 2001, ION, Sept. 2001, Salt Lake City, UT,
- ( 1 9 ) Skoog, A., et al., " PROPANASS A German/Russian Concept to Demonstrate a Next Generation Navigation Satellite System ", IAA-96-IAA3.3.05, 47th International Astronautical Congress, Oct. 1996, Beijing, China
- ( 2 0 ) Romay-Merino, M., et al., " Design of High Performance and Cost Efficient Constellations for a future Global Navigation Satellite System ", pp.1085-1095, ION GPS 98, ION, Sept. 1998, Nashville, TN
- ( 2 1 ) Inamiya, K., " A Study on the Navigation and Communication Satellite System for the Next Generation " pp.1131-1140, ION GPS 98, ION, Sept. 98, Nashville, TN
- ( 2 2 ) Mckendree, T., " Ideas for GPS IV", pp.2745-2750, ION GPS 2001, ION, Sept. 2001, Salt Lake City, UT
- ( 2 3 ) " The Global Positioning System Assessing National Policies RAND ", 1995
- ( 2 4 ) " Commission Communication to the European Parliament and Council On GALILEO ", Commission of the European communities, Nov. 2001, Brussels
- ( 2 5 ) Seixas, P., " Letter to Transmittal to President of the Council ", Chairman of the World-Wide CNS/ATM Systems Implementation Conference, ICAO, May 1998, Rio de Janeiro

## 6 21世紀型 GNSS への提案

前章まで議論された GPS に対する意見や、将来の航行衛星の望ましい姿などを基にして、21世紀型 GNSS を展望したとき、次のような課題が浮上する。第一は3.1節で示されたように国際管理を Intelsat と同じレベルまで高め公共性を増すこと。国際管理を高めることに関して、基金と安全保障の問題がある。基金は5章で示したように GNSS の受益者が全世界の広範囲な分野におよぶので、受益者負担を広く、薄くすれば受益者と提供者間の資金還流が可能で、さらに、新規開発への環を拡大することもその延長上に見えてくる。安全保障に関しては、GPS と GLONASS は冷戦構造から誕生して、民生へと利用面を広げ、次の Galileo は民生が主で、軍用も含めるという基本方針になった。世界の緊張は5年、10年単位で変化するし、Galileo は軍事利用と民生利用の共存の恵も盛り込めるようになった。安全保障の課題は今すぐ解がある訳ではないが、今後さらに検討されるべき基本課題である。第二は新しい技術の取り込みである。新規技術はすでに提案可能なレベルから、現在は種で育成中のレベルまで色々な段階があるが、システムの実用化に合わせて、取り込んで行くべきである。ここではその可能性のある課題について提案する。

### 6.1 周波数の課題

GNSS に適する周波数は文献(27)の Vol. I、70 ページに示されているように L バンドと C バンドが最初に候補になり、1960 年代の技術の実力から L バンドが選ばれた。現在 L バンドは既存のすべての GNSS に隙間なく割り当てられている。(29)、(30)

文献(31)に GNSS に割り当てられている 1GHz 以上で、10GHz 以下の周波数について、特性が検討されている。周波数割り当てを表6-1に示す。

表6-1 GNSS の周波数配分

業務	配分(MHz)	業務	配分(MHz)
航空無線航行	960 ~ 1215	航空無線航行	4200 ~ 4400
無線航行衛星*	1215 ~ 1260	航空無線航行	5000 ~ 5250
航空無線航行/ 無線航行衛星	1559 ~ 1610	無線航行*	5460 ~ 5470
航空無線航行*/ 無線航行衛星#	1610 ~ 1625.5	海上無線航行*	5470 ~ 5650
無線測位衛星#	2483.5 ~ 2500		

注： 無印 一次業務 \* 共同使用 # 二次業務

新たな GNSS を構築するとしたら、C バンドは有力な候補である。すでに Galileo で構想が提案されているが、L バンドのように高密度に割り当てられていることはない。ただ

し、現在すでに割り当てられている領域があると思われるが、その分野と GNSS の利便性を比較して、必要なら割り当てを移動するなどの国際間の協議が必要であろう。一般に産業機器の寿命が 7 年程度であるから、10 年単位の時間スケールの計画があれば、移行も可能だろう。現に、携帯電話、デジタル放送などで周波数帯の移動は行われている。

## 6. 2 衛星間通信の課題

### 6. 2. 1 最近の衛星間通信

2002 年 9 月 10 日 H-IIA3 号機で打ち上げられた DRTS (データ中継衛星) は軌道上で順調に動作している。データ中継衛星は最初に NASA の全世界に分布する追跡完成網 STDN の地上設備の削減策の一環として提案された衛星システムで TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) と呼ばれ、衛星は TDRS と称した。TDRS は S と K バンドの回線を有して、S は追跡管制に使われ、K バンドは低軌道衛星からの高速データを広範に地球局に中継するために使われた。国際宇宙ステーションが実現するようになると、地球との高速な中継回線として、注目され日米欧で同様な衛星を打ち上げることとなった。DRTS の中継回線は S、Ka バンドで、Ka バンドは低軌道衛星から高速なデータ中継に使われる。最近の TDRS は Ka バンドも有している。

衛星間通信は TDRS 以外にも米空軍の Milstar II が 2001 年 2 月 27 日に打ち上げられ、軌道投入された。Milstar II は 60GHz の高い周波数帯を使用している。このように宇宙空間では大気層や、電離層などの伝播経路で電波を吸収する媒体がないので、高い搬送波が使用できて、高速のデータ伝送が可能である。(26)

この特性を活用して将来の高速通信を目指して、光領域の衛星中継回線の開発も進んでいる。このように衛星間通信技術は宇宙空間に高速な通信ネットワークを構成することが可能ある。ネットワークのノードである衛星は地上の端局とは異なる色々な機能を持ち得るので、地上の光ネットワークとも異なる情報網を構成することができる。

GPS も Block II F 以降、衛星間通信が搭載されるが、回線に使用する周波数は UHF 帯であるので、衛星システムの完全性を高めるためのデータ中継が目的である。

### 6. 2. 2 GNSS への適応性

現在の GPS の測位方法には単独測位と相対測位がある。単独測位の測位精度は衛星位置とそれに深く関わる時刻の確定に現在のシステムでは限界がある。文献(27)の 478 ページにエフェメリスの誤差を 2.1m、クロックの誤差も 2.2m と示されている。この精度は衛星が全地球的に展開しているにもかかわらず、モニター局の数が限定されていることや、測距信号の限界などによってもたらされた数値である。この弱点を補完する方式として、IGS (International GPS Service) が構築され、GPS 単独では得られない高精度な補完データを全世界に配布している。(28) IGS は全地球的範囲で観測局を分布させ、GPS

を観測している。IGS は JPL が中心になって、管理しているが、非常に大規模な処理システムである。即ち、GPS プラス IGS で初めて、GPS 単独では達成できない基本機能の向上が図れている。

ここでは IGS のような付属の補完システムを使用せず、単独測位の精度向上に寄与する方法について検討する。相対測位については触れない。

### 6. 2. 3 高速衛星間通信回線の接続

ここで考察する衛星間通信回線は 20/30GHz あるいは 60GHz などのミリ波帯の広帯域高速回線で、同時にフィード回線も同様な広帯域高速回線を使用する。高速衛星間通信回線網が衛星間で接続されると、地上の管制局からフィード回線を通して衛星群を眺めるとき、両者間の距離がないのと等価な状態が実現できる。また、衛星間、衛星と管制局間の距離を高精度で計測することが可能である。この機能によって、衛星の高精度な位置の確定、衛星時刻の校正、完全性の向上などが達成できる。図 6-1 に衛星間通信回線の回線接続の構成を示す。

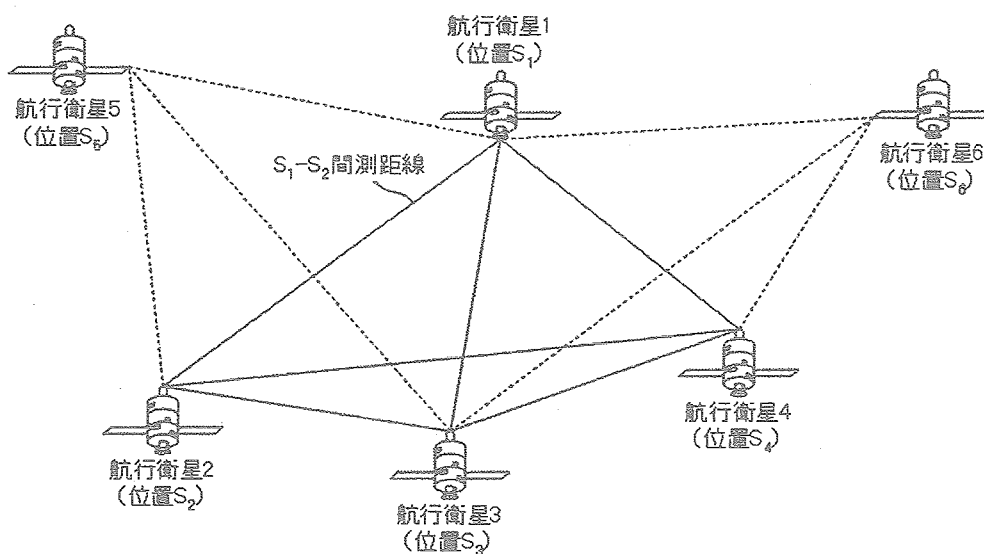


図 6-1 衛星間通信回線網

航行衛星 1 から 6 までを示している。航行衛星 1 から 4 は 3 次元の最小の多面体である四面体の頂点に位置する。四面体の稜の長さが確定すれば立体が決定できる。さらに、航行衛星 5、6 と拡張すれば空間における立体を順々に確定して行くことができる。ただし、稜の長さが常時連続で計測されるためには衛星回線用のアンテナが多数必要になるが、稜の測距が間歇的であればよいとするなら、一個の衛星が搭載するアンテナの数は 1 個より多いこ

とが必要条件になる。図6-1の航行衛星1は周辺の5個の航行衛星と回線接続された状態が示してあるが、アンテナ搭載は衛星の構造上大きな負担になるので、時系列的に見るなら、回線接続は時分割になる。各衛星と管制局間の回線が常にリアルタイムで接続されていることが最も望ましいが、そのためには衛星に多数のアンテナを搭載するなど、衛星のハードウェアに大きな負担が掛かる。実際に衛星は軌道運動をしているので、衛星間の相対距離が急激に変化することはない。従って、衛星、管制局全体の回線接続の要求はシステム設計の段階で具体的な衛星位置の確定に必要な精度要求に基づき算出され、それに合わせて衛星が搭載すべきアンテナの数は決められべきである。ここでは衛星に搭載されるアンテナは最低1個、精度要求により必要ならそれ以上搭載するという条件のシステム構築を考える。

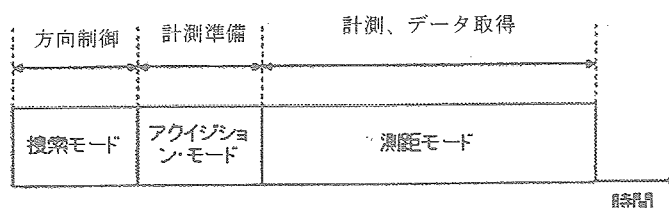


図6-2 測距のデータ取得時系列

衛星間、あるいは衛星と観測局間で測距が行われるときの測距のデータ取得の時系列を図6-2に示す。探索モードは測距を行う相手の方向が不確定なとき、相手の方向を探す期間である。ミッションの初期にはこの期間は必要であるが、衛星の軌道が確定した後、この期間は極めて短時間にできる。アキュジション・モードはRF入力があった後、受信機が信号に位相同期するための期間である。PN符号の位相同期に要する時間は受信機の構造に左右される。測距モードは2点間の測距の実施と、測距データの記録の要する期間である。取得された測距データに計測時の時刻タグが付けられ、ヘッダを付加され測距データ・パケットが作成される。このデータが衛星と管制局で構成されるネットワーク内部で伝送される様子を説明する。

図6-3に衛星と管制局で構成されるネットワークを示す。このネットワークでは衛星と管制局は結合点（ノード）で衛星間通信ならびに衛星と管制局間が通信回線である。通常の通信回線ではノードから端末へはアクセス回線があり、この回線は常時接続、あるいは呼びに応じて接続され、ノード間の回線は常時高速の回線で接続されている。しかし、この図の構成の場合、ノードと端末は同一で、かつノード間の接続は間歇的である。このネットワークの回線の伝送はTCP/IPプロトコールと同様な方式が設定されるべきである。そのため各ノードは測距データ・パケットを蓄積するメモリを持つ必要がある。また、回線接続の基本になるルーチング・テーブルは管制局で衛星群の総ての衛星の軌道情報に基づいて作成され、常に更新されて管理される。

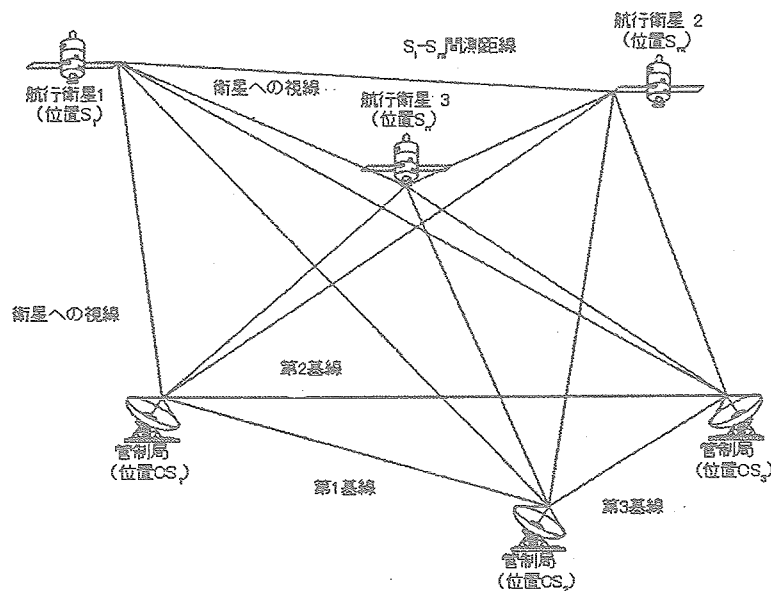


図 6 - 3 衛星間通信回線とフィーダ回線を使ったネットワーク

ノードの運動は長時間にわたって予測可能なので、ある時間に取得された測距データはルーチング・テーブルを参照すると最寄の管制局に到達する経路は明らかであるので、測距データ・パケットのヘッダの経路指定をして、転送しても良いし、また、ノードの測距データは放送式に可能なノードに総て送り、管制局が受信したらそのメモリを消去するのも一方法である。実際は、このネットワークに一番適したプロトコールを設計する必要がある。

衛星あるいは管制局のアンテナがフーズドアレー型が使用できるようになると、測距のサンプリング率が向上して、ほぼリアルタイムで管制局は測距データを手に入れる。また、上記では測距データの転送についてのべたが、その期間は同時に管制局が衛星群を総て管理するための衛星管理データの送受信にも使われる。

上記は航行衛星の位置の確定について説明したが、位置と同じ程度に搭載時計の時刻のUTCとの同期も重要である。時刻は管制局が国の一次基準と正確に同期していると言う前提を置く。実際は同期の精度が高度になると、同期は難しい課題であるが、達成できる課題である。搭載時計が校正できる期間は管制局と航行衛星間のフィーダ回線が接続している間、双方向の回線接続で高精度な校正が可能である。校正期間は間歇的になるが、搭載時計の安定度は原子時計のような長安定な素子を使うので、搭載時計の高精度時刻は維持できる。ただし、航行衛星からの送信時刻の監視は完全性を期するため、多数のモニタ局



で連続的に受信して、監視されるべきである。

図6-3は衛星と管制局を含むネットワークを示すと同時に、この図は図6-1の3個の衛星に管制局が加わって衛星位置の確定ができることを示す図でもある。管制局は3ヶ所あり、その位置ならびに相互を結ぶ3本の基線はあらかじめ正確に計測されているとする。宇宙空間の3個の航行衛星は図6-1の計測により、相互の位置関係は固定されている。この航行衛星と管制局の間はフィード回線を通じて、衛星間回線と同様に精密な測距が実施できる。管制局の位置の絶対位置が確定しているので、管制局と航行衛星からなる多面体の決定ができ、多面体の頂点にある航行衛星の絶対位置も確定できる。

一般に航行衛星は最低であっても、4個の衛星が必要であるが、ある地方を覆域とするには6個から7個、全地球的覆域を得ようとする、筆者の提案するシステム文献(21)では18個、GPSで約25個(時期によって増減する)、Galileoの30個計画など多数の衛星群が必要である。図6-3では航行衛星の位置を固定するため、最低限の要素として、3個の航行衛星と3ヶ所の管制局の構成を示したが、この構成は3個の航行衛星に限定せず、一般の多くの航行衛星を含むシステムにそのまま拡張することができる。その例を図6-4に示す。図6-3の3個の航行衛星は衛星間通信回線網で接続された多数の衛星群、例えば全地球的覆域を提供する航行衛星のシステムに置き換えることが可能である。

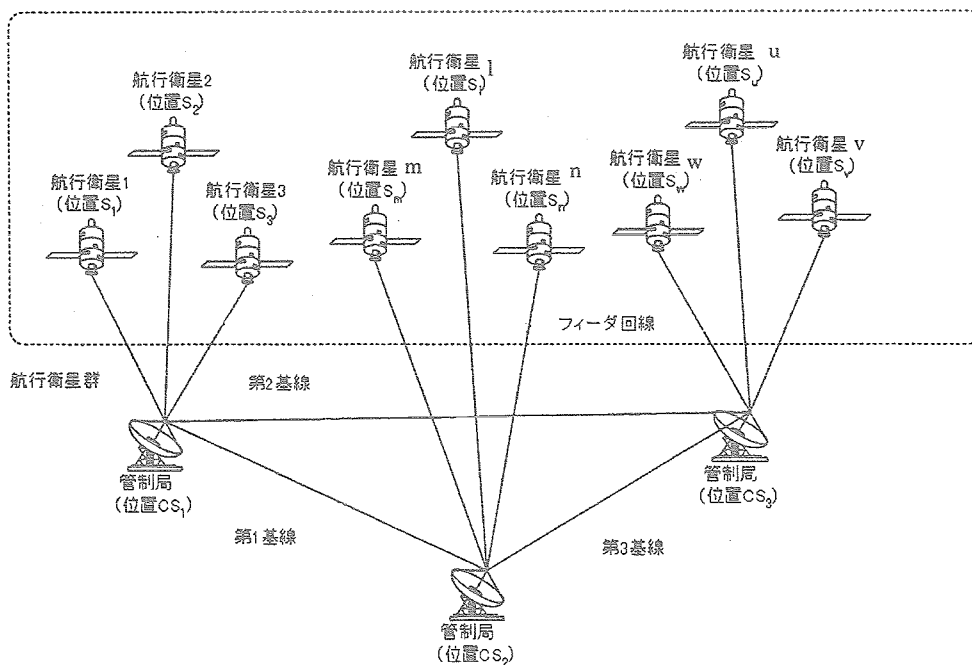


図6-4 衛星群と管制局

図6-4には衛星間通信回線の接続する様子は示していないが、当然航行衛星をノードと

する回線のネットワークは接続されている。航行衛星群が全地球的な覆域をもつものであれば、管制局の設置位置は地球的な規模の設置となる。

#### 6. 2. 4 測距

##### (1) 信号の規模

測距は航行衛星間と航行衛星と観測局間で実行される。航行衛星間の測距の様子を図6-5に示す。各航行衛星は測距を実施するとき、航行衛星間で回線が接続されなければな

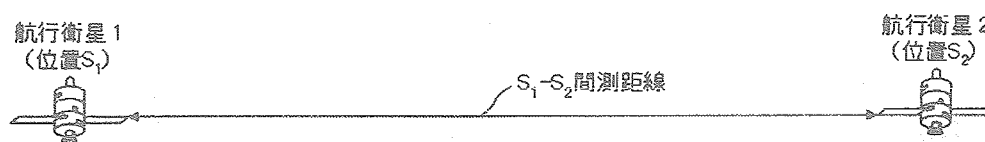


図6-5 衛星間測距の構成

らない。そのため、最初にアンテナを対向させる。次に搬送波が送受されるが、測距に使用される搬送波はミリ波が使用されると想定する。ここでは Milstar に使われた 60GHz 帯を使用した例を検討した。長距離の測距は連続する正弦波などを使用すると都合が良い。測距情報は連続的に送信し、受信処理も連続的に行える。このような方法は測距情報を長時間にわたって送信するので、測距信号の振幅値が一定である。測距信号をパルス状にして、使用する場合より経済的である。衛星の軌道決定に所用されている R&RR 装置がこの方式を採用している。

回線定数で大枠を決める要素に2点間の距離がある。そこで、宇宙空間における航行衛星の配置で、一番距離が遠くなる条件を考える。地上の観測者から見て、航行衛星が測位に適した宇宙空間の配置になる典型的な例は、測位に必要な4個の衛星のうち、天頂に1個、仰角5度の円錐体と航行衛星が存在する球の接する円周上に、120度間隔で3個配置される場合である。この後者の3個の衛星間の直距離は航行衛星で発生する一番長い距離である。実際は航行衛星システムを構築する場合、4個より多くの衛星が使われるので、隣り合う衛星間距離はこれより短い。しかし、安全側の検討として一番長い距離における回線特性を検討した。この場合の直距離は70,676kmである。次に、測位に必要な信号を受信機が受信できる最小の受信電力が重要な要素である。この研究に使われる測距信号の形式は後の項で詳細は述べるが、基本はGPSの測位信号であり、それに純粋な正弦波が重畳されたものである。従って、信号の強度はGPSと同等と考えて良い。文献(27)の84ページに受信地点におけるアンテナ受信端の電界強度が示されている。ここではその定数を使った。

この条件で Milstar の回線表を見直し、表 6-2 に示した。この回線表は測距を実行するために必要な回線定数を表したのもであるが、航行衛星が実行した測距の結果は前項で

表 6-2 搬送波 60GHz の時の回線表

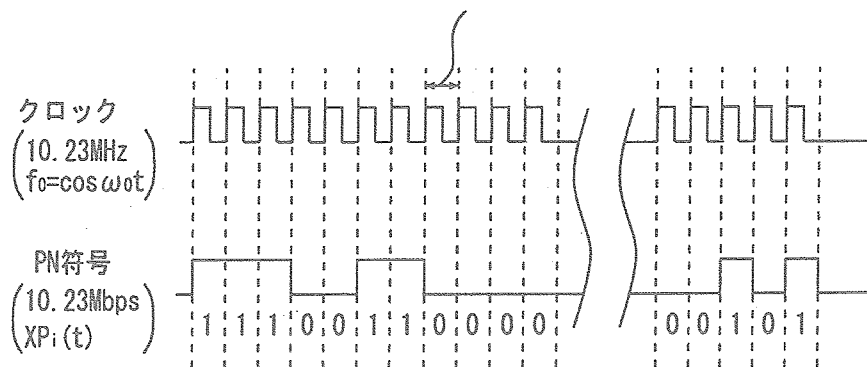
項目	数値	備考
1.送信電力	-13.63dBW	43mW
2.送信機損失	-1.20dB	
3.フィーダ損失	-0.60dB	
4.送信アンテナ利得	43.55dB	30cm φ η=0.63
5. EIRP	28.12dBW	項目 1~4 の合計
6.自由空間伝搬損失	-224.99dB	70,676km
7.ポインティング損失	-0.07dB	
8.偏波面損失	-0.20dB	
9.追尾損失	-0.03dB	
10.全伝搬損失	-224.69dB	項目 6~9 の合計
11.受信アンテナ利得	43.55dB	項目 4 と同じ
12.フィーダ損失	-0.60dB	T=10K
13.受信機損失	-1.40dB	
14.受信機雑音温度	-27.77dB.K	598.6K
15.実効 G/T	22.52dB/K	
16.搬送波受信レベル	-153dBW	項目 5+10+11 受信端入力 文献 1 * の基準
17.ボルツマン係数	-228.60dB	
18.受信 C/N <sub>0</sub>	45.83dB·Hz	項目 16+12+13+14+17

示したごとく測距実施時刻、その航行衛星のシステムに必要なデータと一緒に測距データ・パケットが作成される。そのデータを伝送するためのデータ伝送の回線は表 6-2 には含まれない。従って、システム設計時にはデータ伝送の速度に合わせて、表 6-2 を見直す必要がある。

## (2) 信号の形式

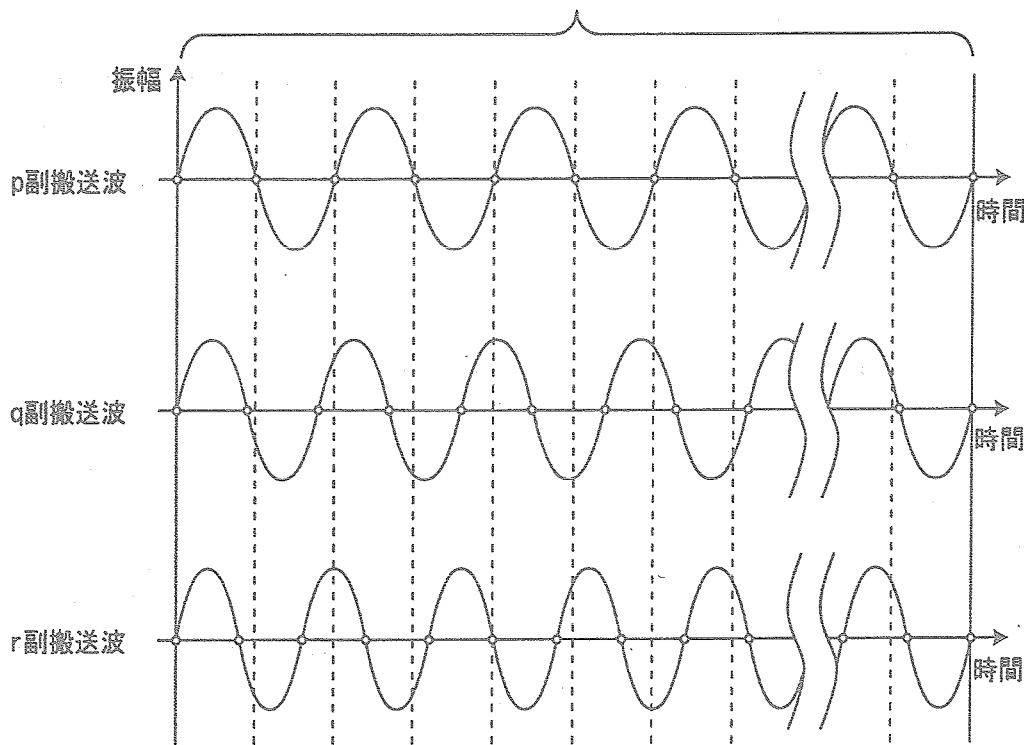
測距使用する信号は GPS で使用している測位信号を基本に考える。GPS では測位信号は 1.023Mbps と 10.23Mbps の擬似雑音符号と L バンドの搬送波で構成されている。前項目 (1) で述べたようにこの提案では航行衛星間、および航行衛星と管制局間の回線にはミリ波を使用する。ミリ波の搬送波は GPS の測位信号よりはるかに高い周波数であるから、GPS の搬送波も測距信号の一部として扱うことが可能である。ここでは GPS の測位信号全体を測距信号として、ミリ波に変調して、測距信号を形成する案を提案する。提案するのは測位信号の考え方であって、ここで使われた特定の周波数や、定数に捉われるべきで

PN符号の駆動信号(クロック周波数)の1周期



(a) クロック80とPN符号

PN符号の駆動信号(クロック周波数)の1周期



(いずれも「O」はゼロクロス点)

(b) 副搬送波同士の関係

図6-6 測距信号の波形

はない。ここでは具体的な数値を使って方が理解しやすいので、GPS に馴染みのある数値を例として使った。提案する測距信号の波形を図 6-6 に示す。図 6-6 の (a) は GPS の P 符号のクロックと PN 符号が示されている。(b) は GPS の搬送波で、この提案では副搬送波を示している。

この提案では副搬送波を 3 種類使う。副搬送波は PN 符号と同じ原振から逡倍された波形であるので、PN 符号と位相が同期している。逡倍数は互いに素となる 120、154、169 倍を想定した。図では P 符号の 1 ビットの中に位相同期した p、q、r 副搬送波が存在することを示しており、また副搬送波間の位相関係を示している。

図 6-6 の測距信号を式で表すと次のようになる。

$$R_b(t) = XP_i(t)\sin(\omega_p t + \phi_p) + XP_i(t)\sin(\omega_q + \phi_q) + XP_i(t)\sin(\omega_r + \phi_r) \quad (6-1)$$

ここで、 $R_b(t)$  は測距信号、 $XP_i(t)$  は PN 符号、 $\omega_p$ 、 $\omega_q$ 、 $\omega_r$  は副搬送波の周波数、 $\phi_p$ 、 $\phi_q$ 、 $\phi_r$  は位相

次に測距信号  $R_b(t)$  をミリ波に変調した形式を式 (6-2) に示す。

$$R_s(t) = \sqrt{2PR_p} \sin(\omega_c t + \phi_c) \quad (6-2)$$

ここで、 $P$  はミリ波の振幅値、 $\omega_c$ 、 $\phi_c$  はミリ波の周波数と位相

式 (6-1) の意味は測距信号の分解能は P 符号のみを使った場合、10.23Mbps の位相計測の精度である 1 ビット内の細かさに限界がある。しかし、文献 (27) の 91 ページに示されている通り、受信信号を位相同期回路で搬送波を再生同期すれば、搬送波レベルで精度の追求が可能であると述べられている。そこで、この提案では P 符号の 1 ビット内を副搬送波で細かく刻み、かつ 1 ビット内部の不確定性を除去するため、位相同期した 3 種類の副搬送波を使用した。P 符号と 3 種類の副搬送波で測距信号を形成した。

図 6-7 に測距信号発生部のブロック図を示す。原振は航行衛星が持つ原子時計など、超安定な発振源で測位信号、測距信号の共通の周波数源である。PN 符号発生器はここでは P 符号を想定した。副搬送波 p、q、r は P 符号で 2 相に変調され、合成され、式 (6-1) に示すような測距信号が形成される。その波形をミリ波で変調して、式 (6-2) で示す

測距信号の原信号が作成される。この信号は相手の航行衛星に伝送されるレベルまで、電力増幅されて、アンテナから送信される。アンテナ追尾制御部は開口面アンテナが相手の衛星の方に指向して、測距を行う期間にその方向を維持するための制御ループである。また、測位信号発生制御部は測位信号発生部の機能を維持、管理するための信号の送受を担当する機能である。

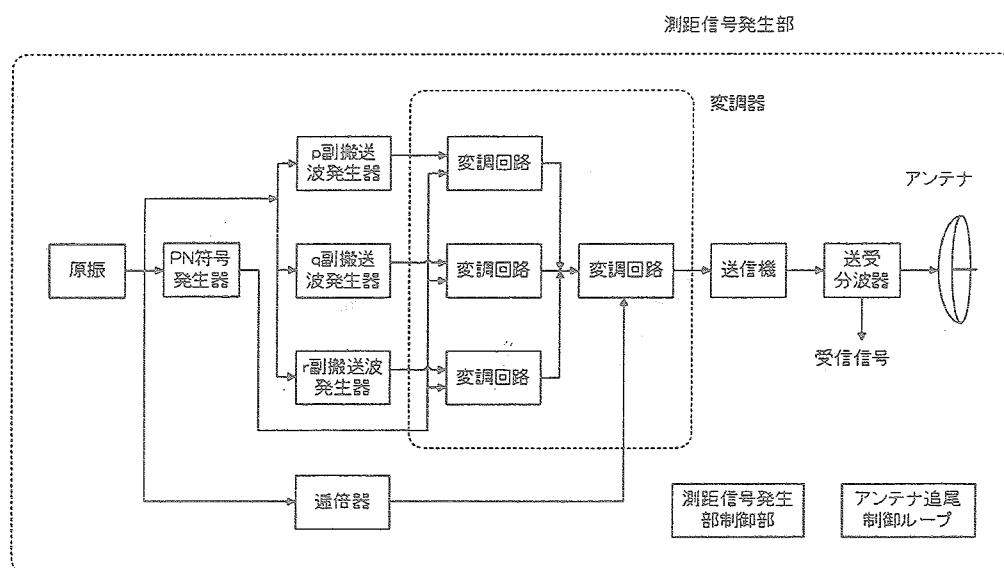


図6-7 測距信号の発生部のブロック図

図6-8に相手の航行衛星に搭載する測距信号用のトランスポンダを示す。トランスポンダは60GHz帯の搬送波から副搬送波と測距信号を位相同期して、抽出して、これらの信号を再生した後、合成して、返信用の測位信号を作成して、60GHz帯の受信周波数と多少異なる周波数に変調して、所定の電力増幅を行い、アンテナを通じて送信元の航行衛星に送信する。トランスポンダの形式によって、60GHz帯の搬送波を内部で位相同期している場合と、周波数変換のみ行う場合がある。同期している場合はPLLの狭いフィルターで雑音の除去ができ、良い受信感度を得られ、S/N比の優れた送信波が再生できる。しかし、トランスポンダの構造が複雑になる。一方、同期していない場合、受信感度は低下するが、トランスポンダの構造は簡単になる。ここでは同期している場合で、搬送波に含まれる副搬送波とPN符号が抽出される過程を図6-8で説明する。

まず、アンテナから入力された信号は周波数変換で副搬送波より高い第一中間周波数に変換される、ここには3種類の副搬送波を含む。この内特にp副搬送波に注目すると、二番目の周波数変換で、PN符号のビットレベルまで周波数を降下させた段階で、ビット同期ループで入力信号とVCXOから発生した再生信号を同期させて、雑音対信号比率の良好な

ビットストリームを再現する。

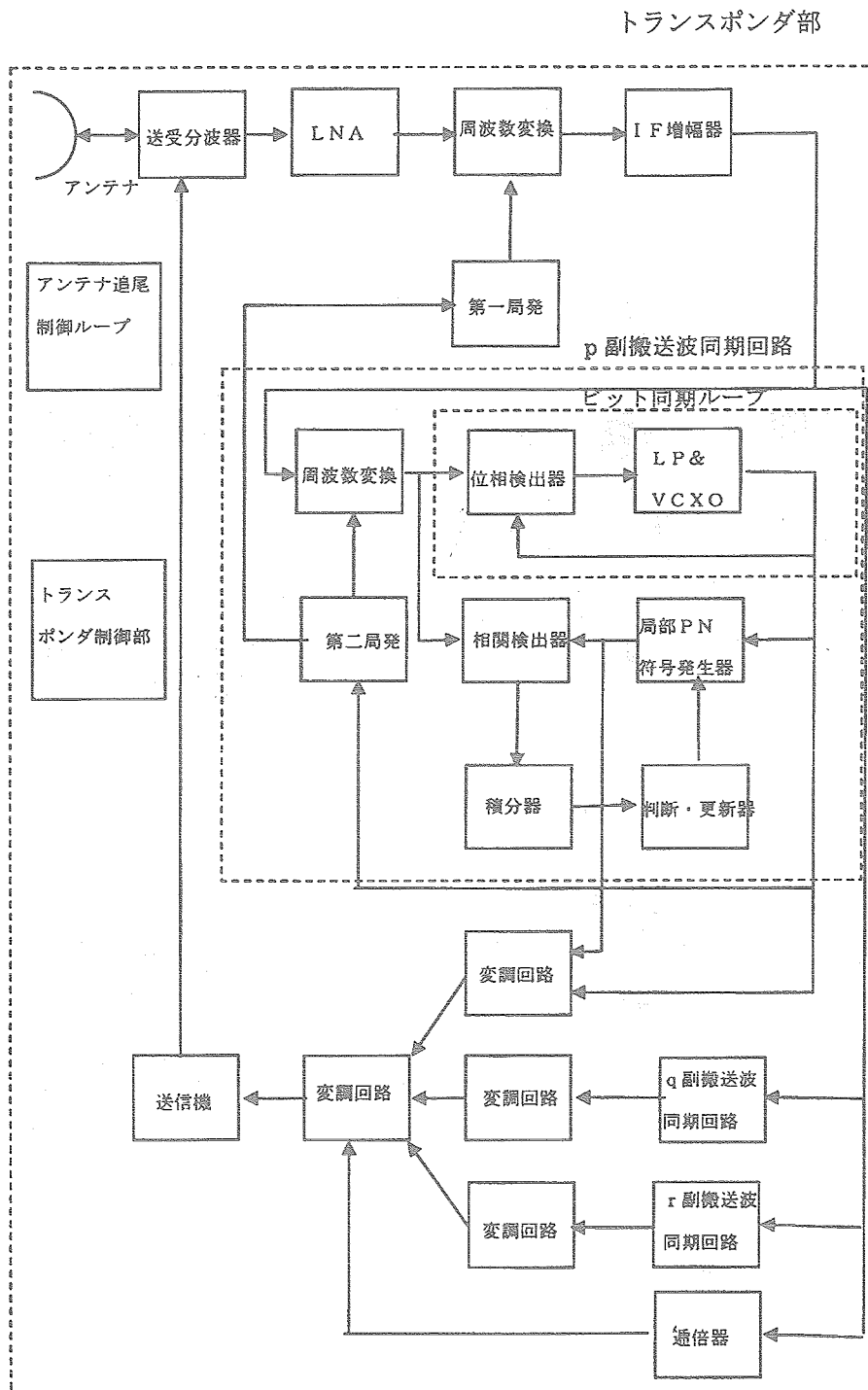


図6-8 トランスポンダ

またこのビットストリームで駆動された相関検出器で入力 PN 符号と位相同期した PN 符号を再生して、p 副搬送波に PN 符号を変調して、入力信号と位相の同期した再生された測距信号を発生させる。同様に q、r 副搬送波についても同様な受信信号の再生を行う。

PN 符号を含む p、q、r 副搬送波は再生または周波数変換された 60GHz 帯の搬送波に変調されて、返信する測距信号を作成する。

次にトランスポンダから返信された測距信号を送信元で受信して、送信信号と受信信号を比較して衛星間の測距を実行する。

図 6-9 に測距信号処理のブロック図を示す。この信号処理部は図 6-5 の航行衛星 1 に含まれていて、測距信号発生部と測距信号処理部から構成されている。測距信号発生部は図 6-7 に示したブロック図と同一であり、ここでは測距の送信源のデータを信号処理部に供給する。測距信号処理部では測距信号発生部のデータと図 6-8 のトランスポンダからの返信された信号を比較して、図 6-5 の S<sub>1</sub>-S<sub>2</sub> 間の距離を計測する。

次に図 6-9 に機能の概要を示す。アンテナで受信した信号は送受分波器で受信信号を抽出して、測距処理部の低雑音増幅器で増幅され、60GHz 帯の搬送波は周波数変換で p、q、r の 3 波を含む第一中間周波数に変換される。この図では p 副搬送波の例を代表で示している。p 副搬送波を含む第一中間周波はさらに周波数変換され、ビット同期回路でビットストリームが再生され、この信号を基に PN 符号が再生され、p 副搬送波が復調される。この PN 符号と p 副搬送波は PN 符号位相差検出器と p 副搬送波位相差検出器に入力され、それぞれに該当する信号を測距信号発生部からも入力して、相互の位相差の検出が行われる。同様に q、r 副搬送波についても同様な位相検出が行われる。p、q、r 副搬送波、PN 符号、ビットの位相差データを組み合わせて、不確実性が除かれた測距が行われる。測距の実行された時の時刻を付加して測距データが得られる。

以上の機能を数式で表現すると以下ようになる。PN 符号の測距は測位の PN 符号の位相検出と同じであるので、ここでは副搬送波の部分についてのみ述べる。

$$S_p(t) = \sin(\omega_p t + \phi_p) \quad (6-3)$$

式 (6-3) は式 (6-1) の p 副搬送波の位相項のみ取り出した。振幅は正規化されたと考える。ここで、 $\omega_p$ 、 $\phi_p$  は p 副搬送波の周波数と初期位相を示している。S<sub>p</sub>(t) は測距信号発生部から発生する測距信号であり、相手の衛星に送信されと同時に、自分の衛星の測距信号処理部に供給される。相手の衛星に送信された副搬送波は 2 個の衛星間の距離に相当する位相差を受けて、再び衛星に受信される。その式を (6-4) に示す。



測距信号発生部

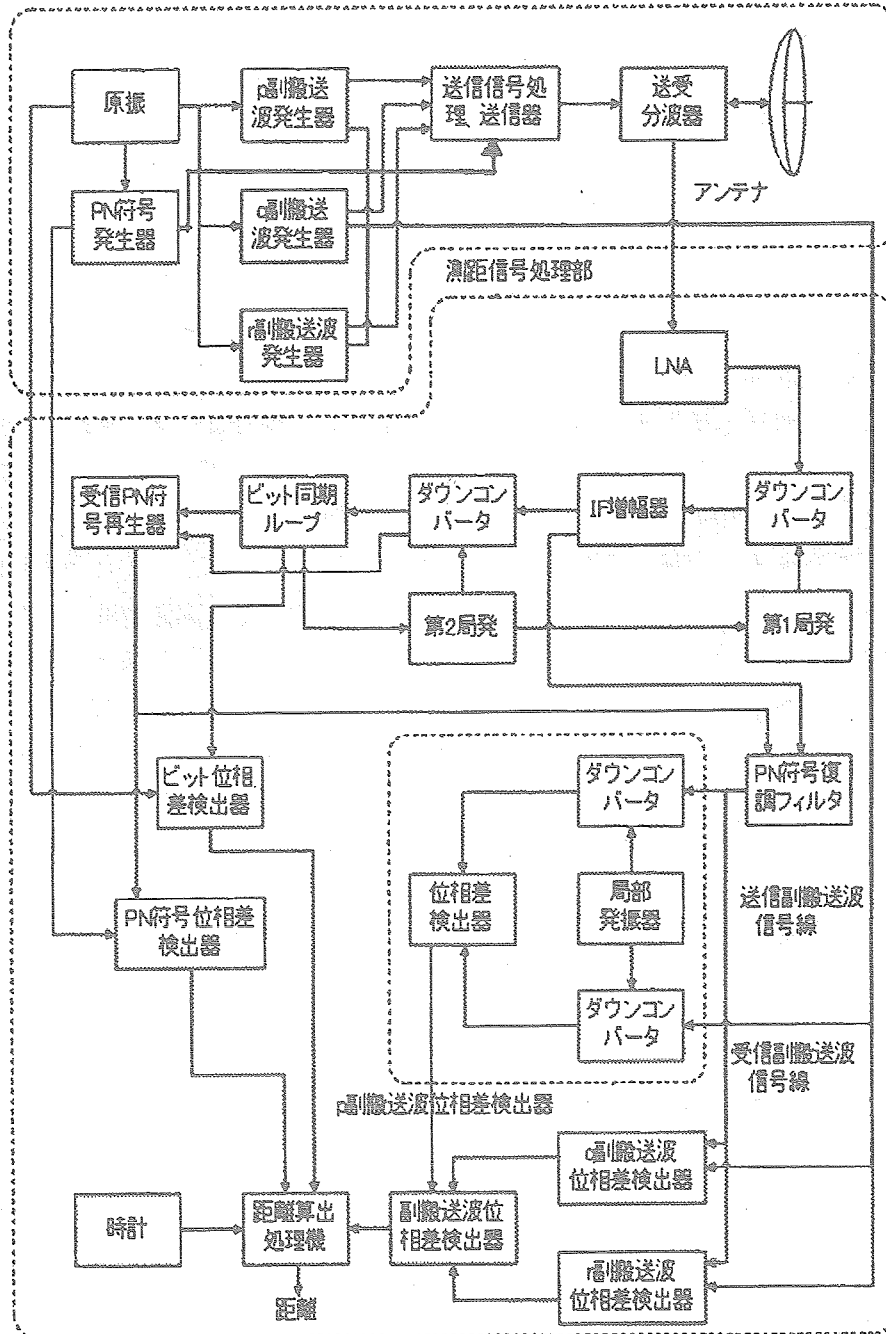


図 6 - 9 測位信号処理部

$$S_p^r(t) = \sin(\omega_p^r t + \phi_p^r) \quad (6-4)$$

ここで、 $\omega_p^r$ 、 $\phi_p^r$ は受信 p 副搬送波の周波数と位相である。

p 副搬送波の送信源信号  $S_p(t)$ 、受信信号  $S_p^r(t)$  は GPS の搬送波のレベルの高い周波数なので、中間周波数に周波数変換する。

$$S_l = \sin(\omega_l t + \phi_l) \quad (6-5)$$

ここで、 $\omega_l$ 、 $\phi_l$ は局部発振周波数の周波数と位相である。

局部発振周波数  $S_l(t)$ は周波数変換器で p 副搬送波の送信源信号  $S_p(t)$ と受信信号  $S_p^r(t)$ に乘算されて、差分の中間周波数に変換される。式 (6-3)、(6-4)、(6-5) より中間周波数の各信号が導ける。

$$\left. \begin{aligned} S_i(t) &= \cos(\omega_p t - \omega_l t + \phi_p - \phi_l) \\ S_i^r(t) &= \cos(\omega_p^r t - \omega_l t + \phi_p^r - \phi_l) \end{aligned} \right\} \quad (6-7)$$

GPS の搬送波レベルの高い周波数は式 (6-7) の変換で取り扱い易い低い周波数に変換される。変換された後、両信号  $S_i(t)$ 、 $S_i^r(t)$ は差分を検出される。式 (6-7) の両方の式の周波数成分は図 6-5 の 2 個の衛星相対運動してない場合等しく、また、運動している場合はドップラ効果で周波数が変動するが、その変動分を位相項に移すと、周波数は同じになり、両信号  $S_i(t)$ 、 $S_i^r(t)$ の差分は位相差で示される。

$$D_p(t) = \phi_p - \phi_p^r \quad (6-8)$$

式 (6-8) の  $D_p(t)$ は航行衛星 1 と 2 の間の距離を示す。両衛星が静止しているときは位相は定数であるが、運動している時は時間に関数で位相  $\phi_p^r$ は変化するので、 $D_p(t)$ は時間関数で示す。

同様に q、r 副搬送波も同じ形式の測距ができ、 $D_q(t)$   $D_r(t)$  の計測ができ、3 種類の副搬送波の位相計測のデータが入手できる。

$$R_b(t) = (D_p, D_q, D_r) \quad (6-9)$$

式 (6-9) は PN 符号 1 チップ内の位相を不確定なしに示している。PN 符号の 1 チップより長い距離の計測は GPS の受信機で用いられている方法がそのまま提供できる。

#### 参考文献

- (26) USAF Fact Sheet, [http://www.af.mil/news/factshee...star\\_Sattelite\\_Communicati\\_html](http://www.af.mil/news/factshee...star_Sattelite_Communicati_html),
- (27) Parkinson, B., et al., "Global Positioning system: Theory and Applications" AIAA
- (28) <http://igsbc.jpl.nasa.gov/>
- (29) Eisseffler, B., et al., "Requirements on the Galileo Signal Structure", pp. 1772-1781, ION GPS 2000, ION, Sept. 2000, Salt Lake City, UT
- (30) Lazar, S., et al., "Issues in Sharing and Encroachment", pp. 973-908, ION GPS 2000, ION, Sept. 2000, Salt Lake City, UT
- (31) Lazar, S., "Signal Design Guidelines for Navigation Satellite System Design" pp.2079-2085, ION GPS 99, Sept. 99, Nashville, TN

## 7 まとめ

航行衛星システムに関する背景を第一章から第五章までに概観した。GPS は全地球域にわたり自分の位置を簡単に高精度で検出できること、また欧州が計画している GPS と同等な Galileo が 2008 年から稼動し、全地球規模の航行衛星システムが拡充して行くことなど、システムによってもたらされる機能に関心が集まっている。しかし、現在その機能が満開状態で披露されている GPS の起源は 1957 年のスプートニク・ショックに深く関連があること、さらにそれを基本にしたうえに、大きなブレークスルーがあって、始めて今日の GPS があることや、現在の GPS を従来の航行援助システムの国際慣行に照らした時、GPS が国際社会で基盤となるためには色々と問題点が存在することがあること、またこの問題点を部分的に解決する対策と言う触れ込みで、EU の範囲であるが、多国籍管理に基づく Galileo が登場したことなどを意識することは有意義なことと考えこの章を記述した。この記述の意義の要点を簡単にまとめると以下のようになる。

・1957 年のスプートニク・ショックを切っ掛けにして始まった航行衛星システムの構築はその後、実用システムを完成させ、世界的な展開を完成して、1994 年まで唯一の全地球的システムとして独占的地位を占めてきた。その根源は衛星の出す電波を受信して、ドップラ効果から軌道決定ができる可能性と、測位の可能性を見出した「ひらめき」と、ロランからヒントを得た受動的な測位方式と、当時の衛星の実力から最大で 50W の出力電力で測位が可能となる拡散符号測位方式などの「新規な技術の創造」にある。この原理に基づき、約\$10B に届く投資と、長い年月にわたる開発努力の結果として現在の GPS がある。

・その結果として、GPS に関わる米国の独占的強みと、ユーザに徹して、カーナビなどの製品開発に邁進する日本を横目に眺め、流を欧州に引き込む活動が動き始めた。底流は航空機のボーイングに対するエアバス、米国ロケットに対するアリアンのように欧州に仕事と資金の還流をもたらすための利潤追求の欲求であると思われるが、航行衛星システムを欧州が手に入れるための理由付けは地球規模の航行衛星システムの従来の世界的な慣行に求めた。GPS 市場が発祥地の米国を中心に栄えているが、長い目で見るとこの分野の世界秩序の将来像は欧州の主張する方が本流である。現在の世界は 9/11 のテロに象徴される安全保障の問題が重くのしかかり、米国が GPS を本来の目的に則り、独占的に管理している現況は必然的であるが、10 年単位で世情を見通すなら、今の世界的な緊張はそれほど長続きしないであろう。時代が変わっても、変わらないのは基礎的な技術開発と、世界で普遍的に通用する思想体系である。そのような意味で GPS の登場と、Galileo の登場の意義を噛み締めることは有意義である。

・GPS 全体の計画として、近未来に GPS III がある。公表されている GPS III の構想によれば、GPS II から GPS III への拡張に関わる技術の進歩は小さい。また、GPS は将来 20~30 年かけて GPS III に移行していく計画であるが、世界の航行衛星システムを GPS III で縛るのは技術の進歩を阻害する恐れがある。GPS の基礎が築かれた当時のような新鮮な発想と等

価な発想がほとぼしるなら、GPSIIIを描く将来像とは異なった進化が期待できる可能性があり、その芽は育てていかなければならない。その意味で、米国民の税金で米国の製造業が衛星を製造する閉じた環の中で行われている資金の還流の現状では、その環に加わることができる技術の参加の範囲が狭い。即ち、世界中の新鮮な知恵が集められない。Galileoの登場でその環が広がった。しかし、究極的には Intelsat のように資金が世界規模で隈なく還流して、その資金で世界中の技術開発を等しく刺激されることが望ましい。

第六章では GPS から GNSS への発展と言う提案がなされ、より完成度の高い航行衛星システムの出現が期待されている。その最初の具体的な解答が Galileo である。近未来に GPS と Galileo が重畳して地球を覆うことで、システム稼働の信頼度が向上することが期待されるが、しかし、Galileo と GPS の特性を比較した時、Galileo は GPS like でシステム単体ではあまり飛躍はない。そこで、この章では GNSS が将来的に発展して行くであろう時に、その発展に寄与できる可能性がある提案を一件記述した。

この案は現在の GPS が特性の改善のため、WAAS や IGS が GPS を補完する形で、精度の向上に寄与している。しかし、これらの補完システムの支援なしに、航行衛星システム単独でさらなる精度の向上が図られる可能性について検討した。衛星の位置確定の精度の向上と、時計の精度向上を図る課題がある。そのため、広帯域の衛星間通信回線と、フィード回線の活用の方策を提案した。

提案した案のエッセンスはミリ波を使用した回線が利用できるという前提を置き、衛星間の測距の方法を提案した。提案した方式は GPS の搬送波レベルの高い周波数を測距信号に使用したことに特徴がある。この高い周波数レベルで複数の信号を使って、不確定性を除き測距を実行する案である。また、時計の校正はフィード回線を広帯域化することで、管制局と衛星間で信号を往復させ、より精度を高めることが可能である。

実際に使われる段階では観測データに基づき、高度なデータ処理が加えられ衛星の位置や、時刻の校正が行われるが、その基本になるのはそのデータ処理に入力される観測データの精度が高いことである。高い精度の入力データがあって始めて全体的に高精度を達成することが可能になるので、そのデータの精度向上に寄与する方法について提案した。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-024

---

発行日 2004年3月25日  
編集・発行 独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522  
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1  
TEL 0422-40-3000 (代表)  
印刷所 株式会社ビー・シー・シー・  
東京都港区浜松町2-4-1

---

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

