

航行衛星システムの概観

An overview of the navigation satellite system

稲宮 健一*

It is said that Rome was not built in one day. GPS has also same character. Today, almost all persons look only present convenience in their hand of the present existing GPS, however, it have had a long story to reach the present golden age, the history of which should be studied by a person who wants develop a new innovation at a stage of a basic structure, such as a long span like a order of a decade. However, a person want to get into an arena what GNSS-2 will be should have concerns on the tendencies of GPS, augmentation GPS and Galileo, etc.

はじめに

航行衛星システムは日本ではカーナビの信号源として、よく知られている。しかし、カーナビのみならず、このシステムの用途は軍事目的と、民生用に広く使われており、一例として高精度な地殻変動の観測手段として地球物理に役立て、また、建設業界の測量用として従来の方法に比較して測量に要する時間を極限なまで短縮が図れ、大変便利に使われており、その用途は多の面でも深く我々の実生活に結びついている。

現在世界に存在する稼働中の航行衛星システムは米国のGlobal Positioning System (GPS) とロシアのGlobal Navigation Satellite System (GLONASS) が宇宙上に存在して作動中である。システムの完成度から言って、GPSが主役で、GLONASSは脇役である。この論文では、GPSが革新的な考え方に支えられ、長い歴史を経て現在の姿に到達した経過と、GPSを中心にした将来の航行衛星システムを概観した。

*Inamiya, Kenichi [情報システム学科]

1. Sputnik ショックと衛星時計の開発

西洋の社会は天文学に関して古くから深い歴史がある。大航海時代には天測が用いられた。近代になり光学的な天体観測だけでなく、光の代わりに電波を用いる方法が登場してきた。1912年ボストンにおいて、視界の悪い中での方向探知に電波が用いられた。1940年Alfred Loomisは電波を利用した地表面で使用する電波航法の構想を発表した。この航法は離れた地上の2点から時間的に同期した短いパルス波形を送信する。船に搭載された受信機は2点から受信したパルス波形を比較して、到着時間の差を検出することにより、自分の位置が通っている双曲線の線分を見出すことができる。この双曲線の方式を2組組合すことで、自分の位置が検出できる。このシステムは第2次世界大戦時にMIT (Massachusetts Institute of Technology) によって開発されたLong Range Navigation (LORAN) と呼ばれている。その原理図を図1に示す。第2次世界大戦後、パルスの代わりに連続波を使用したOmegaが開発され、これの発展系であるLORAN-Cは現在も用いられている。これらは船舶の測位（地球上の自分の位置を検出すること。）に使われた。従って海上である2次元平面上の上で自分の位置を検出できるものである。

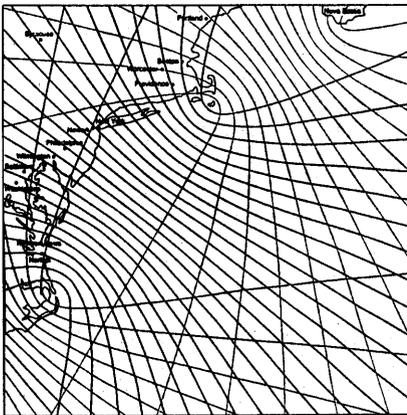


図1 Loran航法の双曲線
(参照文献1より引用)

宇宙開発の先駆けであるSputnik が出現すると、3次元の宇宙空間での運動に興味を持たれるようになった。1957年にJohns Hopkins (JHU) 大学、Applied Physics Laboratory (APL) のGeorge WeiffenbackとWilliam GuierはSputnikが送信するビーコン連続波を注意深く観測して、自分の位置で受信したドップラ変化を基に衛星の軌道が計算できることを発表した。この事実に基づき、翌年、Frank McClureは丁度その逆が可能で、衛星の軌道があらかじめ分かっているなら、衛星からのビーコン波のドップラ変化を観測すれば自分の位置が分かることを発表した。

即ち、人工衛星に正確な周波数を送信できるビーコン波の送信源を搭載して、測位を試みる試行錯誤が始まった。

2. 人工衛星を使用した電波灯台の試み

当時のことであるから、用途は軍事目的であった。まず、水晶振動子を人工衛星に搭載することから始まった。衛星のプロジェクトは米海軍が企画した Navy Navigation Satellite System (NNSS) で、水晶はAPL/JPUが担当した。この水晶は測位の原振に使われるので、高い精度が要求された。長期の安定度は $1/10^9$ （以下分母のみで表示する。）で、数分間の短期安定度は 10^{11} を目標にしていた。研究室内や地上局では通常 10^{10} から、良く枯らしたものでは 10^{12} /日の物が得られていたが、人工衛星に搭載する搭載品質を満たす低電力消費、高信頼度部品を使用したものは平均では 10^{12} を満たした。

当時の打ち上げロケットは大きな重い人工衛星を打ち上げる能力はなく、限られた重量制限と、少ない電力供給のなかで人工衛星を設計しなければならず、さらに、打ち上げられた人工衛星の内部の環境は低温と高温の激しい温度差を持ち、太陽から放射される高いエネルギーの粒子の流れに晒されなければならず、地上と比較して大変厳しい環境条件のもとにあった。従って、研究室で実現した搭載機器の特性は単なる一性能に過ぎず、実際に人工衛星に搭載して宇宙空間上で長い期間にわたり観測し、その特性を検証しなければ、実用に供するものを実現することはできない。

3. TIMATION プロジェクト

TIMATION 1の衛星プロジェクトは1967年5月31日に打ち上られた軌道高度900km、軌道傾斜角70度、重量39kgの人工衛星である。衛星の目的は搭載された水晶振動子から送信されたUHF帯の電波を地上で観測して観測者の位置を求めるものである。その頃、水晶を宇宙上で動作させた経験がほとんどなかったので、水晶の搭載は航法の実用を目指すものでなく、航法の基準となる宇宙での特性を観測するのが目的であった。図2に8ヶ月にわたった軌道上の温度変化と周波数の変動の関係を示す。この図から読むと水晶の温度係数は1度当り、 2×10^{11} である。温度が一定であるとするなら、1日当りの経時変化は 2×10^{12} である。この値は地上で計測した値より良い値であり、宇宙上での放射環境が良い方向に影響したと考えられる。図3に地上に置かれた予備の水晶と実際に搭載した水晶の経時変化を比較した特性を示す。

TIMATION 2は1と同じ軌道に打ち上げられた。しかし、水晶の素子に温度特性が向上する対策が施された。さらに、衛星の中では衛星内部の温度が変化しても、水晶の素子の温度が

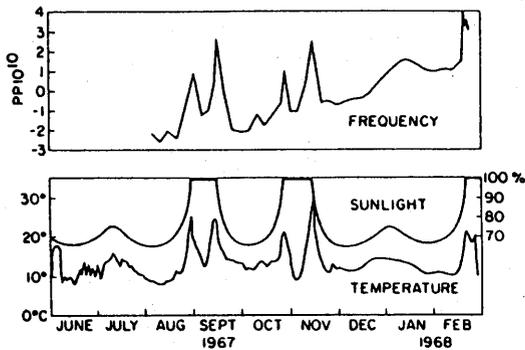


図2 衛星内部の温度変化と周波数
(参照文献2より引用)

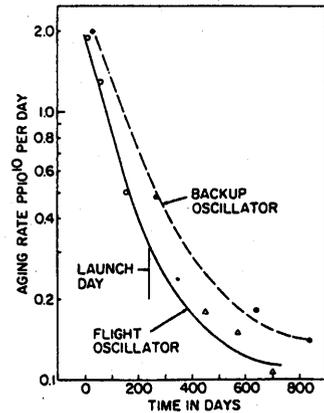


図3 衛星搭載機器と地上設置
機器との比較
(参照文献2より引用)

一定になるように電子的な温度補償装置を備え付けた。衛星内部の温度が -2°C から 24°C の間変化するのに対して、水晶素子の温度は $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$ しか変化しないよに制御できた。実際にTIMATION 2の軌道上で計測された周波数の経時変化を図4に示す。図4によれば、最初の期間は打ち上げ時の振動や、無重力状態に影響されるが、徐々に落ち着くことが分かり、軌道上の宇宙環境の影響は 10^{-2} /日程度である。

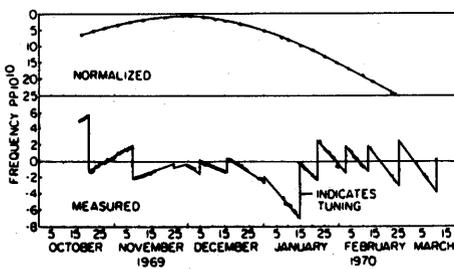


図4 TIMATION IIの周波数変化
(参照文献2より引用)

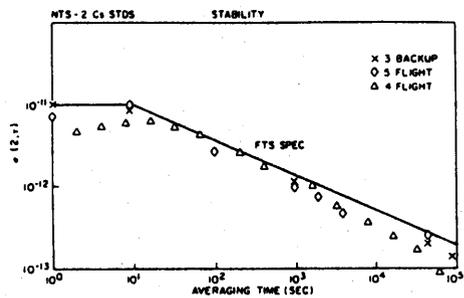


図5 セシウム原子時計の特性
(参照文献2より引用)

この成果を踏まえて、TIMATIONプロジェクトはGPSの母体となるNavigation Technology Satellite (NTS) プロジェクトへと引き継がれて行った。1974年に打ち上げられたNTS-1ではル

ビジュウムの原子時計が搭載され、GPSの原振として十分機能することが確認された。図5にNTS-2で搭載されたセシウムの原子時計が示した周波数の経時変化を示す。このようにGPSの一番基本になる搭載時計のデータを長い期間に渡って着実に取得し技術を確認していた。

4. GPSの方式

初期のGPSの構想は軍事目的で1960年にAerospace Corporationを中心に開始された。目標は地球全体の規模で観測者の位置が3次元で確定できることである。そのための前提条件として、第一に衛星の位置が一点に絞って判明していること。これはちょうど天体の星を衛星に置き換えることと等しい。第二に星の光の代わりにあらゆる天候のもとで、雲や電離層を貫通して使用可能な電波に変えること。第三はLoran型のように時刻を計測して比較する方式であること。これを実現するため、総ての衛星に搭載された原子時計を原振にした時刻装置は地上に設置された管制局から標準時刻に同期させられ、また衛星を監視するモニター局は衛星を追跡して、各衛星の軌道情報を正確に計算する構想を定めた。

この一般的な条件の基でGPS固有な計測方式が作り出された。Hideyoshi Nakamuraのグループが考えたのは、観測者が4個の衛星から独立変数である4個の時刻差を計測して、観測者が持つ標準時刻から不確定なバイアス誤差を有する単一の観測者の時計にこの4個の時刻差を与えることを提案した。即ち、この方式に従えば、4個の未知数である観測者の3次元位置、観測者の時計のバイアス値が、4個の衛星の衛星位置と4個の衛星までの距離が既知数として含まれる4個の方程式が与えられるので、方程式を解くことができ、観測者の位置と時計のバイアス値を計算で求めることができる。これがGPS計測の基本になった。

次の条件は衛星ハードウェアの制限である。当時のロケットの能力からして衛星の重量と消費電力の上限があった。許される重量下での太陽電池の発生電力は1kWで送信機に与えられる電力は最大限200Wであり、RF放射電力は20Wであった。しかも、この電力で全地球を覆うように放射すると、地上の観測者が受信できる電力は観測者の周辺から自然に発生する雑音の1/1000の強さになり、通常の方法では衛星から信号を受信できない。そこで、1965年、James B. WoodfordとPete Souleが疑似雑音信号を使用した帯域圧縮が効果的であることを提案した。即ち10MHz疑似雑音信号の符号帯域を復号時に10Hzに絞り、周囲雑音から60dB(1000000倍)改善した信号を受信できるようになる。この疑似雑音信号を使用した方式によ

れば、総ての衛星は衛星固有の符号を有するが、送信する搬送波の周波数は同一でよく、しかもお互いに干渉することはない。1965年までにこの構想は十分詳細に検討され確立した。

5. GPSシステムの構成

GPSシステムは衛星、管制局、受信機、の3要素が地球全体に分布して、その総てがお互いに影響し合い、統合的に機能している全地球規模のシステムである。各々の要素について、簡単に説明する。GPS全体図を図6に示す。

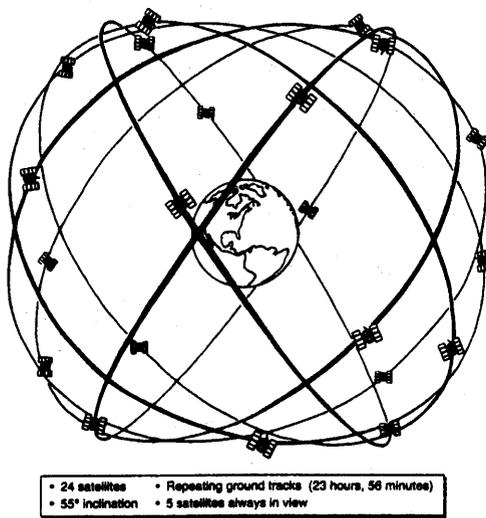


図6 GPSの星座
(参照文献3より引用)

5.1 衛星

24個の衛星が6種類の軌道面に投入されている。各軌道面は傾斜角が55度で12時間周期の円軌道である。観測者から見て、最低5個以上の衛星が視野内にあるようになっている。衛星は2種類の測位信号を観測者に送信している。その一つは10.23MHzのP符号で、軍関係者のみが使用可能であり、もう一つは1.023MHzのC/A (Coarse Acquisition) 符号で、一般の観測者が使用可能である。

5.2 地上管制局

24個の衛星の搭載機器は地上にある管制局から総ての点で管理されている。主管管制局はコロラド州Colorado Springs、他に監視局がHawaii、Ascension Island、Diego GarciaおよびKwajarinの広い地域に設置されている。衛星が管理される主要項目は衛星の搭載時計の精密時刻補正、衛星の最新の軌道要素である。衛星が観測者に向けて放送するテレメトリ情報は管制局から送信される最新のデータに基づいている。

5.3 GPS測位検出器

GPS測位検出器はGPS受信機、測位検出用計算機、アンテナなどから構成されている。GPS測位検出器の一番の基本機能はGPS受信機の疑似雑音符号の復号と、搬送波の検出機能である。疑似雑音符号は各衛星毎に固有の符号である。特定な衛星の疑似雑音符号を復号することは、同一な周波数からなる他の衛星の信号と識別することであり、疑似雑音符号が持つ広い帯域を狭い帯域に変換して信号対雑音比を大幅に改善することである。測位検出用計算機は4個の衛星の疑似測位信号を入力信号として、現にGPS測位検出器が存在する位置における測位、時刻を算出する。

6. GPSシステムの欠陥

GPSシステムは軍用と民生用に使われる2面性を持っている。P符号は高精度であるが、軍用としてしか使用できない。さらに、軍事の立場からテロ等の不適切な使い方がされる懸念より、意図的にC/A符号疑似測位信号を変動させて測位精度を劣化させるSelective Availability (SA) が施されている。これは民生用の利用者にとってGPSシステムの利用価値を低下させるものである。さらに、民生用にシステムの立場から一番厳しい要求を持っているのは航空管制である。この面からGPSシステムを見ると、別の欠陥が見えてくる。GPSはリアルタイムで測位情報を提供するシステムであるから、航空機が受信しているGPS信号は常に正しいと信頼して航行している。そのような状況の中で、受信信号が一瞬たりとも欠損したり、誤ったりすると、航空機が危機状態に陥る可能性がある。米国連邦航空局 (Federal Aviation Administration, FAA) はもし、GPSの信号に誤りが生じたら、10秒以内にその事実を航空機に通知しなければならないと宣言している。しかし、航空機の離着陸時のような緊迫した状態の時にはこの秒時はさらに短い必要がある。

このような要求が在る中で、GPSのシステムを眺めると、GPSシステム単独ではこの要求条件を満たすことが出来ない。GPSの衛星は全地球上に周回しているが、これを監視している管制局は前項で述べたと通り全地球で数か所に過ぎない。宇宙環境は厳しいものがあり、軌道上の人工衛星は常に宇宙からの高エネルギー粒子にさらされているので、搭載電子機器が一時的な誤動作をする可能性は否定できない。

そこで、このような誤動作を回避して、システムの完全性 (Integrity) を維持するため、次

の3つの方法が提案されている。

- a. GLONASSによるGPSのバックアップ
- b. RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitor)
- c. GNSS Integrity Channel (GIC)

GLONASSによるGPSのバックアップはGPSと独立に存在するGLONASSのデータをGPSと同時に取得することにより、冗長システムを構成することである。ただし、GLONASSの完成度があまり高くないことと、GLONASS単独の将来像があまり明確でないので、将来にわたり保証される方法ではない。

RAIMは航空機の可視衛星が6個以上ある場合、同時に受信した4個の信号の組み合わせからなる位置情報を算出して、結果を比較して、誤りのある信号源を排除するものである。GPSに新しい機能の追加を要求することなく、航空機内部で総てのデータ処理ができる点が特徴であるが、あらゆる状況の中で、可視衛星の数がRAIMの条件を満たせるか問題である。

GNSS (Global Navigation Satellite System) はICAO (International Civil Aviation Organization) で定義された航行衛星システムで、GPSやGLONASSもGNSSの定義の内に入るシステムであるが、GNSSはGPSやGLONASSさらに完全性の高いシステムと定義している。

GICは地上に置かれた監視局でGPSの信号を監視して、管制局で誤りの検出を行うが、その信号を静止軌道にある衛星に直ちに通報し、その衛星から即刻、航空機対して警告を放送するシステムである。監視局や管制局との連絡や、誤り情報の放送に静止衛星が使用される。GICは規模の大きなシステムであるが、Differential GPSの機能と兼ね備えて、広域に適用できるシステムとして、Augmentation GPSが定義されている。現在米国、日本を中心とした太平洋、欧州にWAAS、MSAS、EGNOSの3つのGICのシステム構築がされてところである。

ICAOの議定書がより完成度の高いGNSSの出現を期待していることもあって、GPSの改善やさらなるシステムの提案がなされている。欧州ではAugmentation GPSまでの世代をGNSS-1と定義して、さらに、次の世代向けにGNSS-2の時代として定義している。

7. 新しい航行衛星システムの提案

筆者はGNSS-2に相当する新しい航行衛星システムの提案を行っている。提案しているシステム全体のブロック図を図7に示す。システムは宇宙空間に配置された多くの衛星を遠方から

眺めた様子から、DINACS (Diamond Navigation and Communication Satellite System) と称している。DINACSの軌道はGPSと異なり、大きな軌道傾斜角を持つ静止高度を有する。現在の解

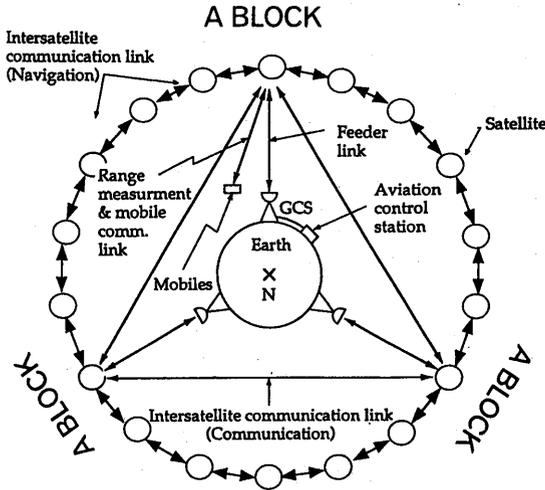


図7 DINACSブロック図
(参照文献5より引用)

析では、18個と15個の衛星で全地球の覆域を有する2ケースを提案している。通信衛星の場合はよく知られているように、3個の衛星があれば極地方を除き、全地球的な覆域を達成できる。従って、航行衛星の場合は測位に最低限4個の衛星が視野にある必要があるため、その4倍である12個が理想的最低限航行衛星に要求される衛星の個数である。静止型の通信衛星の場合は赤道上の約120度づつ離れた経度に置かれるのが条件ですが、それ以上に軌道上の位置に関する複雑な付

加条件はない。しかし、航行衛星はこれと異なり、多くの条件を持っているため、12個で全地球を覆域とするシステムを構築することはできない。今観測に必要な4個の衛星が軌道上に在るとするならば、観測者がこの4個の衛星を眺めて、視線方向に単位ベクトルを描くとする。4本の単位ベクトルの衛星側の先端を結ぶと4辺形が得られ、その体積が大きい程、衛星の配置から来る測位精度が向上する。そのため、宇宙空間に位置する総ての航行衛星は地球上の多くの点から見て、この体積が常に大きく成るような星座を選ぶ必要がある。

まず、軌道傾斜角は18個の場合、6種類、15個の場合、5種類の異なる軌道傾斜角の組み合わせを選んだ。多種類の軌道傾斜角を選んだ理由は、地球の等緯度地点で緯度方向に等しい幅の帯を考えたとき、その帯の面積は赤道に近いほど面積が大きく、極地方ほど小さいことが分かる。そこで、或る軌道傾斜角を持った衛星が軌道運動をして、地表面に軌跡を描いたとき、極地方に近いほどその帯に描かれる軌跡に単位面積当たりの密度は濃い。総ての地表面にいる観測者に等しい数の衛星観測の機会を与えるために、この現象は好ましくない。そこで、高低の多種類の軌道傾斜角を与えて、できる限り地上の観測者から均等に衛星個数が

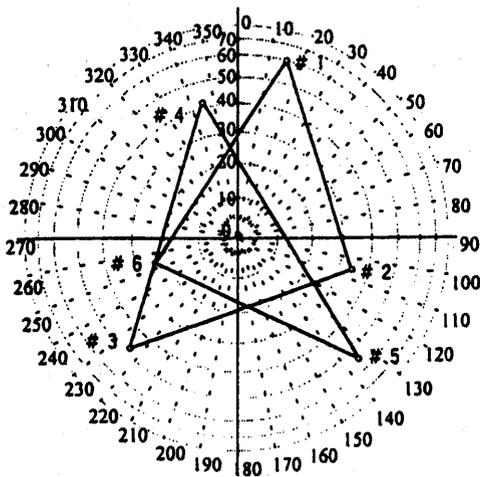


図8 DINACSの衛星相互間の位相
(参照文献5より引用)

18個或いは15個の全部の衛星を4つのブロックに分割して、軌道傾斜角、隣り合う衛星の位相角を一枚のグラクに表現し、位相角を選ぶ方法を開発した。図8にその1例を示す。その上で隣り合う衛星の位相角を決めた。

昇交点は衛星に位置の変化を与える1つの要素であるが、ここでは赤道面上、均等な経度位置に設定した。

このシステムの全地球的覆域から見た可視衛星の数と衛星の可視域を示した図を図9に示す。

DINACSでは地球上の3カ所で、それぞれ1/3の衛星が視野に入るので、システムは全地球的を対照としているが、3カ所で分割管理し易いシステムである。Augmentation GPSではWAAS、MSAS、EGNOSと世界を3分して管理しているので、この傾向によく一致している。また、隣り合う衛星間は衛星間通信で回線接続されており、地球上に3局管制局が置かれた場合、その管制局で総ての衛星が管理出来るのみならず、衛星の測位信号のアンテナ出力端における信号も衛星間通信回線、ファイダ回線経由で管制局でリアルタイムで常時監視できる。もし、誤り信号が発生したならば、即刻警報を発生できる。この機能はAugmentation GPSの最重要な機能であるが、DINACSでは単一のシステム内に同時に監視機能を備えることが可能である。

航空管制の分野ではCNSが主要機能であると言われている。CNSはCommunication、

観測できるように各軌道傾斜角の値を定めた。

次に隣り合う衛星間で衛星の位置が測位精度を向上するよう考えられなければならない。そのためには18或いは15個の衛星の内、任意で隣り合う4個の衛星を選んだとき、上記で指摘した4面体の体積が、できる限り大きくなるように衛星が宇宙空間に配列されていることが必要である。しかし、任意に選んだ1組みの衛星でこの条件を満足しても、全地球的な広がり度、この条件を満たせないで、

Navigation、Surveillanceで、通信、航行、搜索の意味である。DINACSでは航行の機能が有ることとは上記に述べたとおりであるが、同時に通信の機能もシステム内部に含められる。

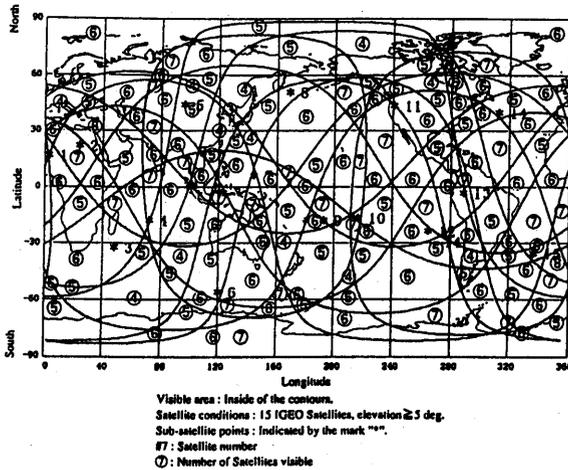


図9 DINACSの可視範囲及び可視衛星の個数
(参照文献5より引用)

DINACSでは多数の軌道傾斜角を使用しているの、その一番低い衛星に移動通信のアンテナを搭載する事が可能である。上記の検討では18個、15個の内、3個だけ0度から24度までの軌道傾斜角が低い衛星である。これは丁度この衛星に通信衛星と同じ考え方で移動通信のアンテナを搭載できる。航空機の運航にとって、全地球覆域で質の高い音声通信は管制局と航空機間の貴重な管制手段であるが、音声

のみならず、管制局で処理した現在の気象情報、安全航法データ、経済的な航路の選択などデータ通信が活発に使われることが期待されている。また、この通信機能を使って、搜索の一部であるADS (Automatic Depending System) で安全航法の確保に役立つことも出来る。

8. 米国のGPSと欧州のGNSS-2

米国はGPSが唯一の現用システムであることから、将来にわたっての永続的なサービスの提供を宣言している。宣言の中には民生用として第3の周波数の追加、将来的にはS/Aの廃止が含まれている。GPSのみならず、米国が主導権を握るWAAS、MSAS、EGNOSでシステムの完全性が達成できるとしている。

一方、欧州は委員会を設けて欧州の立場を検討した。EUは衛星システムを持つようとしている。この新しい開発に立ち向かう試みは、単に衛星の開発のみならず、広く裾野が広がる経済活動を考慮している。EU内部の委員会の調査結果に依れば、航行衛星システムがEUの圏外に在ると、主権および安全上の問題があり、現在、存在するシステムでは民生用としての

全要求条件を満たし得ない。即ち、GPSの全管理は米国一国が行っており、将来にわたってシステムの変更、課金等に関して欧州の意向が反映される見込みはない。

航行衛星システムの全プロジェクトの経済波及効果は400億ユーロに登り、欧州が自主開発に踏み込まなければ将来的に取り残されてしまう。

GNSSはインテリジェントなインフラストラクチャの一部となり、安全上欠かすことができないものであるとEUは考えている。このため、欧州はGalileoを開発すると言う決断を1999年に行うべきで、遅くなればなるほど米国のGPSの優位が確かなものとなり、欧州の経済、産業、運輸の面で重大な影響を与えるであろうと考えている。この10年間の通信衛星と放送衛星の発達を見れば、航行衛星に関しても、激しい競争と規制の緩和が行われれば、Galileoが欧州の宇宙産業と防衛産業を刺激する事は明らかである。

GNSS-2を開発するに当たって、今までと異なる点は少なくとも2種類のサービスが考えられる。その一つは米国が従来無料で提供しているものであり、もう一方は完全性の高い保証されたサービスである。

現在の衛星の候補はMedium Earth Orbit (MEO) である。MEOを考えた理由はすでに米国およびロシアで十分な実績があり、それを引き継ぐことが可能である。星座の案は2つあって、21MEOが核となる場合GPS、Augmentationとの統合があって、はじめて欧州の要求を満たすものとなる。もう一つは36MEOで、欧州独立のシステムが組める。MEOの場合EGNOSのように3から9個のGEOやIGSOも必要になってくる。

投資額に関して、36MEOと9GEOで1999-2008年にわたって22億ユーロが必要であり、21MEOと3GEOで16億ユーロに成るだろう。GPSとの協力にもよるが、Galileo全体として、1999年から2008年まで総投資額は22億から29億ユーロに成るだろう。

新しい収入の道として、3つのレベルを考えている。レベル1は一般のマーケットへのサービス、レベル2は限定サービス、レベル3は人命にかかわるなど安全のサービスである。GNSSはICAOのCNS/ATMと深く結びつき、IMOでは2000年からGNSSの搭載を要求している。レベル2や3のサービスはGPSでは得られない完全に安全が保障され、かつ受信が限定される型になる。将来的には現在の航空地上管制設備が置き換えられる可能性がある。

米国はGPSが他国に関与されることを拒否しているが、将来的にはGPSと完全に適合性があるGalileoとGPSとなり航行衛星システム全体が強化され、GPSの近代化にも寄与出来ると考え賛意を示している。

9. 参照文献

1. Ivan A. Getting, "The Global Positioning System", IEEE SPECTRUM, Dec. 1993
2. C. A. Bartholomew, "Satellite Frequency Standard", GLOBAL POSITIONING SYSTEM, The Institute of Navigation, pp.21-28, 1980
3. C. Page, et al., "The Global Positioning System, Assessing National Policies", RAND, 1995
4. Paul S. Jorgensen, "Achieving GPS Integrity and Elimination Areas of Degraded Performance" ION, Vol.34, No.4., Winter, pp.297-306, 1988
5. Kenichi Inamiya "A Study on the Navigation and Communication Satellite System for Next Generation", ION GPS98, pp.1131-1140, Sept. 1998
6. "Galileo, Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation services", A draft of European commission, Feb,1999