

我が国における衛星測位技術開発への 取り組み方針について

平成9年3月
宇宙開発委員会
計画調整部会 衛星測位技術分科会

目次

図リスト	i
表リスト	ii
略語集	iii
1. はじめに	1
2. 衛星測位システムの現状と問題点	
2. 1 衛星測位システムの現状	2
2.1.1 衛星測位の歴史	2
2.1.2 衛星測位の基本的特性	4
2.1.3 衛星測位に関する政策/制度/体制	4
2. 2 衛星測位システムの問題点	6
2.2.1 衛星測位システム特性上の問題点	6
2.2.2 衛星測位システム制度上の問題点	7
2. 3 我が国の衛星測位関連技術レベル	8
2.3.1 衛星搭載用原子時計	8
2.3.2 時刻管理技術	9
2.3.3 高精度軌道決定技術	10
2.3.4 ETS-VIII搭載高精度時刻基準装置の概要	10
3. 衛星測位システムに対するニーズ、利用状況、問題点及び将来動向の予測	
3. 1 建設分野	11
3. 2 地殻変動観測・地図分野	15
3. 3 農林業分野	18
3. 4 陸上交通分野	21
3. 5 海上分野	24
3. 6 航空分野	25
3. 7 宇宙分野	26
3. 8 その他の分野	30
4. 我が国が取り組むべき技術開発課題	
4. 1 想定する衛星測位技術開発のシナリオ群	32
4. 2 シナリオの選択について	37
参考1 衛星搭載用水素メーザ時計の開発	38
参考2 衛星群時刻管理技術の開発	42
参考3 高精度軌道決定技術の開発	45
5. まとめ	47
平成8年度後期における宇宙開発に関する調査審議について	75
衛星測位技術分科会の設置について	76
計画調整部会衛星測位技術分科会構成員	77
衛星測位技術分科会審議実施状況	78

図リスト

- 図2-1 GPSの構成図
- 図2-2 GPS打上げ計画図
- 図2-3 GLONASSの概要
- 図2-4 EGNOS構想
- 図2-5 GNSS開発スケジュール概要
- 図2-6 IEGB体制
- 図2-7 CGSIC民間GPSサービス組織連絡委員会
- 図2-8 GNSSアプローチ体制
- 図2-9 GPSとGLONASSの制度比較
- 図2-10 GPSによる時刻管理システム
- 図3-1 GPS測位の種類
- 図3-2 業種別普及台数比較
- 図3-3 GPSによる基準点測量
- 図3-4 RTKのシステム構成
- 図3-5 応用計測例
- 図3-6 GPSを利用した道路施設点検支援システム
- 図3-7 海上工事における衛星測位利用
- 図3-8 GPS測位による自動水深測量システム
- 図3-9 日本における中波ビーコン局の配置
- 図3-10 地震前後の地殻変動
- 図3-11 プレート理論の見直しの必要性を示唆する証拠
- 図3-12 房総半島における地震を伴わない地殻変動
- 図3-13 農業用運搬支援装置の情報表示例
- 図3-14 PFシステムの概念図
- 図3-15 衛星通信を利用したDGPS&RTK精度補完システム
- 図4-1 ルビジウム、セシウム、水素メーザの原子周波数標準器の基本構成
- 図4-2 K-3VLBIシステム用水素メーザの周波数安定度
- 図4-3 ループギャップ共振器を用いた小型水素メーザの周波数安定度
- 図4-4 水素メーザ量子系の構造図
- 図4-5 TEOO1円筒共振器
- 図4-6 ループギャップ型共振器
- 図4-7 サファイア装荷型共振器
- 図4-8 衛星利用周波数/時刻比較法
- 図4-9 搬送波位相の利用
- 図4-10 NOCSの構成図
- 図4-11 SNOCSによる軌道決定の概要図
- 図4-12 RTEPによる軌道決定の概念図
- 図4-13 HATSの概要図

表リスト

表3-1	平成8年2月末調査の業種別普及台数
表3-2	海上建設において将来利用が見込まれる分野
表3-3	農用車両の無人走行研究例
表3-4	農林業への衛星測位システム導入に際しての条件
表3-5	1995年における主要農業機械の普及台数等
表3-6	カーナビゲーションの市場予測
表4-1	衛星測位技術として確立する要素技術
表4-2	各原子時計の特徴比較
表4-3	共振器構造と目標性能
表4-4	宇宙技術における周波数/時刻比較誤差要因
表4-5	CRLにおける宇宙技術を用いた周波数/時刻比較技術開発経緯
表4-6	軌道測位方式と到達位置決定精度

略語集

ADEOS:	Advanced Earth Observing Satellite 地球観測プラットフォーム技術衛星
ADEOS-II:	Advanced Earth Observing Satellite-II 環境観測技術衛星
AEF:	Apogee Engine Firing アポジエンジン燃焼
AHS:	Automated Highway System 自動高速道路システム
AIS:	Automatic Identification System 陸と船、船と船間相互認識システム
ALFLEX:	Automatic Landing Flight Experiment 小型自動着陸実験
ALGOS:	BIPMの時系計算アルゴリズムの固有名詞
ALOS:	Advanced Land Observing Satellite 陸域観測技術衛星
AVM:	Automated Vehicle Management 自動車両管理
BIPM:	Bureau International des Poids et Measures 国際度量衡局
C/Aコード:	Coarse and Acquisition Code SPSを利用する場合に必要なコード
CCD:	Charge Coupled Device 電荷結合素子
CCDS:	Consultative Committee for the Definition of the Second 基準時刻決定協議委員会
CCR:	Corner Cube Reflector コーナキューブリフレクタ
CGGTS:	CCDS Group on GPS Time Transfer Standards GPS 時刻伝送プロトコル標準化部会
CGNIS:	Coast Guard Navigation Information Service center 民生用GPS利用関連情報発信センター
CGSIC:	Civil GPS Service Interface Committee 民生用GPSサービス連絡委員会
CNES:	Centre National d'Etudes Spatiales フランス国立宇宙研究センター
COMETS:	Communication and Broadcasting Engineering Test Satellite 通信放送技術衛星

CRL: Communications Research Laboratory
郵政省通信総合研究所

DG-7: Directorate General-7
欧州委員会運輸総局

DG-12: Directorate General-12
欧州委員会科学技術総局

DG-13: Directorate General-13
欧州委員会電気通信総局

DGPS: Differential GPS
差分GPS

DME: Distance Measuring Equipment
距離測定装置

DOD: Department of Defense
米国国防総省

DOT: Department of Transportation
米国運輸省

ECDIS: Electronic Chart Data Information System
電子海図

EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service
欧州の静止衛星を利用した航法増強サービス

ERNP: European Radio Navigation Plan
欧州無線・航法計画

ESA: European Space Agency
欧州宇宙機関

ETS: Engineering Test Satellite
技術試験衛星

EU: European Union
欧州連合

EURECA: European Retrieval Carrier
欧州回収型キャリア

EUVE: Extreme UltraViolet Explorer
NASAの極紫外線探査機

FAA: Federal Aviation Administration
米国連邦航空局

FANS: Future Air Navigation System
将来航空航法システム

FHWA: Federal High - Way Administration
米国連邦高速道路管理局

FOC宣言: Full Operational Capability
軍事用精密測位サービスの正式運用能力達成宣言

FRP: Federal Radio Navigation Plan
連邦無線航法計画

GIAC: GPS Interagency Advisory Council
GPS米国政府関係省庁調整会議

GIS: Geographical Information System
地理情報システム

GLONASS: Global Navigation Satellite System
ロシア地球の衛星航法システム

GMDSS: Global Maritime Distress and Safety System
地球的海難救助安全システム

GNSS: Global Navigation Satellite System
地球の衛星航法システム

GPS: Global Positioning System
地球の衛星測位システム

HATS: High Accuracy Trajectory Determination System
NASDA高精度軌道決定システム

HOPE-X: H-II A Orbiting Plane Experimental-X
宇宙往還技術試験機

HTV: H-II A Transportation Vehicle
宇宙ステーション補給機

IAG: International Association of Geodesy
国際測地学連合

ICAO: International Civil Aviation Organization
国際民間航空機関

IGS: International GPS Service for Geodynamics
国際GPS地球力学事業

IHO: International Hydrograph Organization
国際水路機構

ILS: Instrumental Landing System
計器着陸装置

IMO: International Maritime Organization
国際海事機関

INS: Inertial Navigation System
慣性航法装置

IOC宣言: Initial Operational Capability
民生用標準測位サービスの正式運用能力達成宣言

IRS: Inertial Reference System
慣性基準装置

ISNS: International Satellite Navigation System
国際衛星航法システム

ISO: International Standardization Organization
国際標準機構

JPO: Joint Program Office
共同計画班

LAAS: Local Area Augmentation System
狭域補強システム

LANDSAT: Land Satellite
地球観測衛星ランドサット

LORAN-C: Long Range Navigation-C
ロラン-C (地上電波航法用信号の一種)

MCA: Multiple Channel Access
多元チャネル接続

METEOR3M: ロシア地球観測衛星の固有名詞

MOS-1: Marine Observation Satellite -1
海洋観測衛星1号

MSAS: MTSAT Satellite-based Augmentation System
運輸多目的衛星用衛星航法補強システム

MSS: Mobile Satellite Service group
低軌道周回衛星移動体通信事業者

MTSAT: Multi-functional Transport Satellite
運輸多目的衛星

NAGUS: Notice Advisory to Glonass Users
衛星メンテナンス情報サービス

NASA: National Aeronautics and Space Administration
米国航空宇宙局

NASDA: National Space Development Agency of Japan
宇宙開発事業団

NAVSTAR: Navigation System for Time And Ranging
時刻位置航法システム

NNSS: Navy Navigation Satellite System
米国海軍衛星航法システム

NOCS: NASDA Orbit Computation System
NASDA軌道決定システム

ns: nano second
 10^{-9} 秒

OREX: Orbital Re-entry Experiment Vehicle
軌道再突入実験機

Pコード: Precise Code
PPSを利用する場合に必要なコード

PF: Precision Farming
精密農法

PPS: Precision Positioning Service
高精度位置情報サービス

ps: pico second
 10^{-12} 秒

RADCAL: Radar Calibration Satellite
米国空軍Cバンドレーダ校正衛星

RADIO ASTRON: ロシアVLBI衛星の固有名詞

REX: Radiation Experiment Satellite
米国空軍電波実験衛星

RIRT: Russian Institute of Radionavigation and Time
ロシア電波航法研究所

RSA: Russian Space Agency
ロシア宇宙庁

RTEP: Real-time Trajectory Estimation Program
NASDA実時間軌道推定システム

RTK: Real Time Kinematic
リアルタイムキネマティック法

S/A: Selective Availability
意図的精度劣化

SFU: Space Flyer Unit
宇宙実験・観測フリーフライヤ

SLR: Satellite Laser Ranging
衛星レーザ測距装置

SNOCS: NASDA Orbit Computation System for Space Network
NASDA宇宙ネットワーク対応型軌道決定システム

SPS: Standard Positioning Service
標準測位サービス

STDMA: Self-managed Time Divided Multiple Access
スウェーデンで開発された精密時刻分割多重通信システム

TAI: le Temps Atomique International
国際原子時間

T&F機関: Time and Frequency organization
周波数/時刻標準研究機関

TOPEX/POSEIDON: Ocean Topography Experiment/POSEIDON
NASA/CNES共同の地球観測衛星の固有名詞

USCG: United States Coast Guard
米国沿岸警備隊

USNO:	United States Naval Observatory 米国海軍天文台
UTC:	le Universel Temps Coodonne 協定世界時間
VHF:	Very High Frequency 超短波
VICS:	Vehicle Information and Communication System 道路交通情報通信システム
VLBI:	Very Long Baseline Interferometer 超長基線干渉計
VNIIFTRI:	ロシアの周波数/時刻研究機関の固有名詞
VOR:	VHF Omnidirection Radio Range 超短波全方向式無線標識施設
WAAS:	Wide Area Augumentation System 広域(精度)増強システム
WGS-84:	World Geodetic System -84 世界測地系(1984)

1. はじめに

人工衛星からの電波を利用した測位技術は、24時間全世界・全天候で使用でき、これによって3次元の絶対位置をリアルタイムで高精度に測位できる。また正確な時刻・速度も計測できる等の特徴を有しており、今後の発展が期待されている宇宙技術の一つである。

現在、稼働している衛星測位システムの中で、米国国防総省によって開発されたGPSは、軍事目的のみならず、民生分野でも広く利用されている。

我が国においても、カーナビゲーションが既に広く一般に普及しており、また測量・地殻変動観測分野でもGPSは不可欠なものとなっている。さらに、航空管制や海上航行システム等多くの分野で幅広く利用され始めている。一方、衛星測位技術に関する研究開発については、我が国ではこれまで利用技術の研究開発は進められ実用化されつつあるが、衛星測位システム全体の技術開発は行われていない。

平成8年1月改訂の宇宙開発政策大綱で、衛星測位は、通信・放送・測位等の分野の一つとして「我が国におけるニーズの高度化・多様化に対応できるよう、国際協力の可能性を勘案しつつ、測位精度の向上のための測位システム関連の要素技術の開発を進めるとともに、通信機能との複合化等を考慮した将来型の測位技術の開発を進める」と位置付けられ、開発の必要性が示唆された。

大綱を受けて、平成8年7月に計画調整部会において行われた「宇宙開発計画」の見直しに関する要望事項審議の中で、郵政省から「高精度測位衛星システムの研究」、科学技術庁・郵政省から「技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)の開発研究」の一部として同衛星への高精度時刻基準装置搭載が提案され、両者共に9年度からの開始が妥当とされた。一方、科学技術庁からの「測位技術実証に係るミッション実証衛星のミッション機器開発」の提案は、我が国として衛星測位システム開発への取り組み方針が不明確な段階で衛星打上げを目指したミッション機器開発を行うことは時期尚早とされた。またその際、測位に関して、利用者等の意見を踏まえ、具体的にどのように進めていくか検討する必要があるとの意見も加えられた。

そこで宇宙開発委員会は、我が国における衛星測位技術開発のあり方について必要な調査審議を計画調整部会に付託し、同部会は、専門的な検討を行うため、衛星測位技術分科会を設置した。

本報告書は、本分科会にて審議した衛星測位システムの現状と問題点、各利用分野での利用の現状とニーズ及び将来動向、並びにそこから抽出した我が国の取り組むべき方針と技術開発課題についてまとめたものである。

2. 衛星測位システムの現状と問題点

2.1 衛星測位システムの現状（執筆担当：西口専門委員）

現在稼働している衛星測位システムは、以下の2種類である。

- ①米国国防総省が管理運用しているNAVSTAR/GPS
- ②ロシア連邦国防省が管理運用しているGLONASS

いずれも軍用に開発されたシステムであり、その利用の一部が民生用に解放されているが、民生用で地球規模の衛星測位システムを保有・管理・運用する国際的機関は、現在、存在しない。

更に、広域的にGPSやGLONASSの機能・性能を増強・拡張する目的で計画されている増強システムに以下の3種類がある。

- ①FAAが推進中のWAAS
- ②欧州連合の提唱するGNSS/EGNOS
- ③日本運輸省が計画しているMTSATを利用するMSAS

衛星測位システムは、原則として全世界にボーダーレスで利用でき、幅広い分野で利用可能なものであり、様々なユーザーの現在および将来のニーズを満たすサービスを提供する目的を有している。

また、地域的なDGPSを含む増強システム等のインフラ構築により、飛躍的に利用分野を拡大し新市場を活性化するものと期待されている。

2.1.1 衛星測位の歴史

(1) 米国のGPS

1960年代初期に米国海軍が開発したNNSSは、第一世代衛星測位システムであり、初期の軍事利用を経て1967年民生利用に転用されたが、サービス範囲・時間の制約等で利用が少なく、GPSの実用化後、1994年末にサービスを停止した。

GPSは第二世代衛星測位システムである。様々な基礎技術開発や米国防・海・空軍の調整を経て、新システムは全ての軍関係機関が参画するJoint Program Officeが開発するものとして1974年にロックウェル社に発注された。

1978年2月に最初のBlock I衛星が打ち上げられ、以降Block II、Block II A衛星により、1993年にシステムが完成し同年12月8日付けにて米国国防長官がIOC宣言を発表した。

Block II、II A衛星24基の軌道上完成をもって1995年9月にFOC宣言がなされた。1997年1月から、代替衛星Block II R衛星の打ち上げが始まり、2001年から2016年にかけて打ち上げ予定の次世代のBlock II F衛星の発注手続きも完了している。

1996年3月29日に発出されたGPSに関する米国政府の新政策（米国大統領決定）は大略次の通りである。

第一の要点は、GPSシステムを継続的に維持し、利用者に直接課金することなく全世界に開放することを再確認した点である。

第二の要点は、民生利用信号（L1波C/Aコード）の精度を引き下げているS/Aを向こう10年以内に廃止するという決定である。この実施に対し米国政府は軍でS/A抜き運用に向けての十分な準備期間と資金を提供することになっている。

その他の要点は、GPS基本システムと米国の精度増強部分を国際標準として利用することを提唱し外交努力するというものである。

本教書は、約3年間に亘る調査や討議、立案作業が行われ、更に米国政府内関係省庁の調整を経てそれらの諸機関の間で合意をみた上での発表であり、堅牢な政策指針である。即ち、GPS政策は国防総省や運輸省、商務省等が独自に解釈できるものではなくなったことをも意味している。

図2-1にGPSの構成図、図2-2にGPS打上げ計画図を示す。

(2) ロシアのGLONASS

旧ソ連時代の1982年に実験衛星を打ち上げ1984年にテストを開始し、その後の10年間は打上げ/故障衛星の排除を繰り返してきたが旧ソ連からCISロシアになり、システム完成に向けて計画を継続してきた。

初期のプロトタイプ衛星の設計寿命は1年に過ぎなかったが、ロシアは寿命を延ばすことより打上げ回数を増やすことを優先しており、将来に亘って衛星群を維持できる在庫衛星を有していたと思われる。

1995年始めには16基の稼働であったが、1996年1月18日に軌道高度19,150kmに25基（スペア1基）の衛星群を完成させ本格的な稼働に入った。現在稼働中の衛星は設計寿命3年であるが、7基は既に3年以上稼働している。

1995年3月7日付けにてチェルノムイルジン首相は、近くシステムを完成させ民生利用に開放すること、サービス提供体制を整えること、ICAOおよびIMOに正式にオファーすること等を事前布告し、ロシア政府運輸大臣は、1996年2月5日付けでICAO宛に正式オファーを出状した。図2-3にGLONASSの概要を示す。

(3) 欧州連合のGNSS構想

DG-7では、European Transport Approachの一環としてGNSS構想を発表した。一国の軍当局の制御権に委ねられた衛星測位システムを国際的な民生機関による制御権に移行させる一つの解決策を提案するものであり、欧州が真の国際的な民生衛星測位システムの構築に指導力を発揮しようという構想である。第一にまとめ易い欧州の民生航空分野のニーズを満たすGNSS-1計画で基盤を作り、その後内外の参画を得て全ユーザー対象の多機能多重システムとしてGNSS-2に引き継ぐ構想である。GNSS-1の段階は、GPSおよびGLONASSを衛星測位基本

システムとして受入れ、インマルサット衛星を利用したEGNOSを構築し、GNSS-2の段階では、民生用測位システムペイロードのみを積む衛星（GPS衛星より小型軽量低コスト40基程度）を保有し、費用を国際的に分担する形で管理運用するアイデアである。

1991年9月5日の第10回ICAO会議(Air Navigation Conference)に引き続き、1992年5月8日のIMO会議(38th Subcommittee on Safety of Navigation)に対し、米国政府が「GPSの国際的民生利用に関する正式なコミットメント」を提案したのを契機に、IMO、ICAO FANS委員会を舞台に各種論議が活発化した。更に欧州全体の問題としてEU委員会で取り上げられる等の経緯を経てGNSS構想へと発展した。図2-4にEGNOS構想、図2-5にGNSS開発スケジュール概要を示す。

2.1.2 衛星測位の基本的特性

衛星測位システムの5大特徴を以下に示す。

- ・ 24時間、宇宙を含む全世界をカバーし、全天候型である。
(旧来の地上型測位システムに比し圧倒的にカバー率が高くグローバル)
- ・ 静止点、移動体を問わず3次元(緯度、経度、高度)の絶対位置を、リアルタイムで且つ高精度測位ができる。
- ・ 正確な時刻、速度を計測できる。
- ・ 移動体の方位確認・姿勢制御にも利用できる。
- ・ 各種通信システムとの組み合わせで補強ができる柔軟性を有している。

2.1.3 衛星測位に関する制度/体制

(1) 米国のGPS

①制度：軍事・民生両用であることが基本的制度である。

(i) GPS基本システムに関するサービスには、次の2種類がある。

PPS

- ・ L1波(1575.24MHz C/Aコード), L2波(1227.6MHz P-Yコード)両波利用可能。L2波(Pコード)はスクランブルされている(Yコード)。
- ・ 精度保証の対象：水平測位精度、高度、時刻、速度
- ・ 利用可能資格者：軍関係機関等米国当局と利用契約締結者のみ

SPS

- ・ L1波のみ利用可能。(現実には、L1、L2両搬送波が利用されているがL2波については国防総省が公式に認めたものではない。)
- ・ L1 C/AコードにはS/Aと呼ばれる精度劣化信号が付加されている。この為ranging errorレベルで30mの誤差となりPPSと差別化されている。
- ・ 精度保証の対象：水平測位精度、高度、時刻(速度は保証対象外)。
- ・ 利用可能資格者：全世界の民生・商用・学術等平和的利用者の全て。

(米国及びその同盟国の有事の際は48時間前の事前通知によりサービスを中断することがある。ICAOに対しては少なくとも6ヶ月前までに事前通知する。)

(ii) WAAS、LAAS等のGPS 増強サービス

米国の政府機関が提供するものについては隔年公告のFRPの中で通達される。

民間企業が提供する増強サービスについてはこれを抑制しないことを基本原則とする。但し、利用する通信の周波数割り当てに関しては当局の指導に基づくこと、及び国家的有事の際は上記(i)による。

米国以外の国が実施するWAASは、国際安全保障上の必要性から、米国との2国或いは多国間協定に基づくことを米国政府が希望している。

②体制

DODとDOTが共同で実施している「Pos/Nav Executive Board」を頂点に、恒久的な米国政府関係省庁調整会議としてGIACを新設し、旧来より活動してきた国際交流機関CGSICとの並列で、国内外にGPSの民生利用促進を奨励する体制を固めている。

Pos/Nav Executive Boardは、FRPの政策・方針策定機関でもある。最近になって、Pos/Nav Executive Boardは、DODと6省庁共管のIGEBに刷新された。図2-6にIGEB体制を、図2-7にCGSIC組織を示す。

(2) ロシアGLONASSシステム

①制度

基本的にはロシア連邦の軍事用技術であるが、ICAOおよびIMOに対して15年間無料提供を申し出る等民生利用にも開放している。S/Aを伴わないため、精度は、水平方向60m、高度75m、使用率99.7%である。図2-9にGPSとGLONASSの精度比較を示す。

②体制

ロシア連邦国防省、運輸省及び宇宙庁が開発・管理・運用の責任官庁である。また国内外向けの民生利用サービスのための政策・方針について国防省、運輸省、軍事産業委員会、宇宙庁等で調整会議を開催している。

(3) 欧州のGNSS

GNSS機関の設立、予算確保等の体制作りを以下の如く展開している。

①制度

欧州委員会の手による欧州無線・航法計画ERNPがその基本的ガイドラインとなる予定。

②体制

EU各国の運輸大臣で構成される閣僚理事会(GNSS Council)を頂点に、EU委員会のDG-7が中心となりDG-12およびDG-13が関与

してGNSSアプローチが推進されている。

1994年12月にEU閣僚理事会で承認された推進体制は、次の3グループによるハイグループが中心である。GNSS体制を図2-8に示す。

- ・ Senior Official Group : 各国政府代表及び政府機関、国際機関の代表
- ・ Conference Group : ユーザ組織、DGPS・テレコム事業者及び産業界
- ・ Adhoc Working Group : 各種専門家による4種類の作業部会

2.2 衛星測位システムの問題点 (執筆担当: 西口専門委員/北原専門委員)

2.2.1 衛星測位システム特性上の問題点

(1) 波長約20cmの極超短波Lバンドを使用しているため電波の直進性がよく、非常に安定した高精度測位を維持できるが、逆に直進性故にトンネル内・ビル陰・谷あい等地理的条件により衛星を捕捉できない場合がある。

(2) 11年周期でやってくる太陽活動の最盛期Solar Highによる電離層への影響がある。平時では、衛星からの無線信号の電離層遅延についてはモデル化されて補正の上、測位情報の一つとして放送されているが、Solar High時には、複雑な要因が絡み合って、遅延を特定できない。今世紀末のSolar High時には受信機の能力を超える位相変動現象に直面する可能性があり(6~7mの誤差と推定)、特に2波利用の精密測量分野への影響が大きいと予想されている。この影響は、精度問題以上に使用率(Availability)及び完全性(Integrity)の問題である。

解決策として第2周波数L5 (C/Aコード) 追加を検討し、GPS Block II Fの契約にはL5 Optionが含まれているが、今世紀末には間に合わない。

(3) GPS信号が地上の電波干渉源(VHF TV電波等)に侵されている事例が報告されており、特に航空業界にとって問題である。

欧州では「GPS Interference Working Group」を結成して干渉源検知活動に熱心に取り組んでいる。

我が国においても、Lバンドのデジタル携帯電話等がGPSやGLONASS信号に近接しており、カーナビゲーション等のマルチパス対策を含めたGPS受信機のフィルター対策強化等が要求される。

2.2.2 衛星測位システム制度上の問題点

(1) GPSもGLONASSも軍事・民生両用であるという点が問題である。

GPSは、全世界に亘ってユーザーが利用できるが、その管理運用権は米国国防総省にあり当面その制御権を手放す意図は米国にはない。

GLONASSは、ロシアの軍当局が保有・運用しており、その一部が世界的に民生ユーザーに提供されているというGPSと同様の状況にある。

また米国は、GPSに核不拡散モニター機能を搭載しており、宇宙開発

競争力から全面的な情報公開は期待できない。従って米国は、民生利用にはSPSサービスの無料開放政策を採用し、国際標準としての認知を得る努力をしている。更に安全保障上、米国による一元管理運用体制が好ましいと主張しており、幅広い利用ニーズにどの程度対応するか不透明である。

さらに、民生市場の拡大発展につれて、米国GPS政策が変化する可能性をも否定できない。

(2) ボーダーレスな利用領域である航空、海運等の分野においては、衛星測位システム及びその増強システムは国際的な標準化が望ましい。現在、これに関してICAOやIMO、CGGTT S等の国際機関で標準化に取り組んでおり、我が国も対応が必要である。

(3) 国際的な周波数配分問題でGLONASSは、システム変換を余儀なくされている。当初の周波数割り当ては、 $1602 + 0.5625n$ MHz ($n=0, 1, 2, \dots, 24$)であったが、1610.6~1613.8MHz帯域における電波干渉問題やイリジウム等の低軌道周回衛星移動体通信事業者グループ(MSS)とのL波帯における使用周波数帯域の調整協議の結果、1610MHz以上をMSSに譲り2005年1月より1605MHz以下にすることとなった。目下GLONASS-Mへのシステム変換に取り組み中であるが打ち上がるまで不明である。

GLONASSはS/Aを伴わず衛星寿命の延長にも成功しているが小故障を頻発しており、ロシアにおいてすらGLONASS受信機の保有台数はGPS受信機の1,000分の1程度という現実から、システムの信頼性及び普及等について問題が残っている。また衛星の健康状態やメンテナンス情報であるNAGUSサービスによる追跡モニター試験の結果とロシア当局の発表に相違がある場合があり、この点も今後の重要課題である。

2.3 我が国の衛星測位関連技術レベル

(執筆担当：北原専門委員／飯田専門委員)

2.3.1 衛星搭載用原子時計

GPSにはルビジウムまたはセシウム時計が搭載されている。我が国の原子時計技術は、CRLにおいて水素メーザ時計を中心とした研究が進められている他、地上の通信・放送の同期確保等を目的とした小型ルビジウム原子時計が2社により開発され、運用されている。セシウム原子発振器も開発されたが、外国製品の競争力が強い。

(1) ルビジウム時計

地上用ルビジウム原子発振器の宇宙用への改修においては、ロケット打上げ時の機械的環境に耐え、軌道上における熱真空環境、放射線環境下で特性の劣化を抑え性能を満足させるように設計する必要がある。

① 打上げ時の機械的環境耐性の向上

地上用ルビジウム原子発振器の電子回路部は宇宙用の実装設計に近いことから、宇宙用の開発は可能である。ルビジウムガスを封じ込めてある光学部（ランプセル、検出部等）がガラスで構成されており、保持機構が不十分なことから、耐振性（振動、衝撃）の改良等が課題である。

② 宇宙環境下での周波数安定度の確保

・耐熱真空特性

周波数安定度は温度依存性があるので、周波数安定度の向上のためには、光学部の温度変化を抑えるように熱制御を施す必要がある。

・耐放射線特性

周波数安定度はルビジウムの光強度に大きく依存することから、光学部品には放射線照射による透過率の低下を生じない耐放射線性部品が必要となり、特性劣化の少ない光学部品に変更する必要がある。

・ルビジウムランプの光強度の増大化

周波数安定度向上のためには、光学部を通過するルビジウム光強度を増大させる必要がある。

(2) セシウム時計

セシウムについてはルビジウムに比べて技術的に難しいこと、また地上用の生産が維持されていないこと等から、宇宙用を国産化することは困難と考えられる。

(3) 水素メーザ時計

我が国の衛星測位技術の確立を図る上で、測位精度向上を考えるとルビジウムよりも周波数安定度が優れた水素メーザ型原子発振器が必要となる。地上用で周波数安定度 10^{-15} レベルに達しているが、衛星に搭載するためには耐機械振動性、耐熱真空特性、耐放射線特性の改善の他、小型軽量化、低消費電力化が課題である。課題の詳細は、4章 参考1で説明する。

2.3.2 時刻管理技術

(1) 原子時構築の現状

周波数、それを積分して得られる時刻／時間は現在もっとも精度が高く、各種標準の中での基準ともいえる存在である。

現在、1秒の長さはセシウム原子の超微細構造間の遷移周波数に基づいて定義付けられており、その確度は 10^{-16} 台に達している。また、“長さ”の基準は、真空中の光速度を仲介として、1秒の時間間隔に基づいて定められている。

周波数／時刻標準の特殊性として、遠隔地点間の標準器を電波等の手段を用いて比較可能なことが挙げられる。これにより、世界各国のT&F機関間の比較が定常的に高精度に実施され、全世界のT&F機関の周波数標準器（原子時計）の平均値としてTAIやUTCが決定される。この作業はフランス・パリ郊外のBIPMにおいて実施されており、全世界のT&F機関の原子時計のデータと時刻比較結果が集約され、ALGOSと呼ばれるアルゴリズムにより計算がなされる。この結果出力されるTAI、並びにUTCは、現在最も確度と一様性の高い時系である。

精密衛星測位において、周波数／時刻の管理はシステム全体の運営上、重要な要素技術であり、最終的な利用者測位精度にも影響する。

GPSにおいては、システム全体を維持するため1つの時系—GPS timeが代表時刻として統括されており、GPStimeは、USNOが維持するUTC（USNO）に同期する形で維持されている。

(2) 精密測位衛星システムにおける時刻管理

GPSのような複数の衛星を用いたシステムにおいては、システム全体の時刻管理が重要な要素であり、GPSでは、米国コロラド州コロラドスプリングスのFalcon空軍基地内のGPS Master Control Station内で維持されるGPStimeがシステムの基準時系となっている。

GPStimeと各GPS衛星搭載原子時計（送信信号の基準時計）との時刻差情報は、GPS衛星からの広報データに補正情報（GPStimeと搭載原子時計の差の情報を2次式で近似した係数）として利用者に送信されており、これを用いることにより利用者は同一の時系を共有することが可能になる。

図2-10にGPSにおける時刻管理システムを示す。各GPS衛星搭載時計とGPStimeの比較は、GPS Master Control Stationを含む6カ所のモニター局で各GPS衛星の信号を受信（L1, L2の測距信号を1.5秒毎に15分間積分）し、気象データと共にMaster Control Stationへ伝送され、処理がなされる。USNOとコロラドスプリングスとの間は、通信衛星を用いた衛星双方向時刻比較システムにより高精度、高頻度（サブns、1時間毎）に時刻比較がなされ、UTC（USNO）

と比較がなされている。各モニター局の基準時計はセシウム原子時計である。

2.3.3高精度軌道決定技術

衛星測位システムでは、測位衛星の軌道を実時間・高精度で決定し、軌道情報を航法メッセージの放送軌道暦として、ユーザーに通知する必要がある。GPSの場合、航法メッセージの軌道精度は、位置で10～20m程度と言われており、GPSでは測位信号を地上局（既知の固定点）で受信・処理して、軌道決定を行っているようである。

NASDAでは、測距データをバッチ処理して軌道決定を行っており、その精度は周回衛星で150m程度であるが、測位信号を測距データとして処理することで、10m程度の軌道決定精度は達成可能である。軌道要素をユーザーに通知するためには、軌道決定値を伝搬し、放送軌道暦を生成する必要があるが、GPSのように8時間の伝搬後に必要な精度を満たすためには、重力モデルの高精度化と、自然外乱の高精度推定が必要である。また、実時間軌道決定については、ETS-VIで試験を行っており、実用化への取り組みを行っている。但し、全世界的な衛星測位システムを構築する場合には、軌道全周回に渡って測距を行うことが望ましく、世界的なモニター局ネットワークが必要となる。衛星測位システムとしてGPSを上回る測位サービスを行う場合には、1m程度の軌道決定精度が望ましく、衛星間測距等が必要となると考えられるが、必要な技術要素は現在研究中である。

2.3.4ETS-VII搭載高精度時刻基準装置の概要

(1)ETS-VII搭載高精度時刻基準装置の構成

・基準周波数発振部

原子時計により高安定な基準周波数を発生する。

・時刻基準信号発生部

基準クロックを用いて時刻コードを生成し、衛星の軌道情報等の各種情報を時刻コードに付加し、時刻基準信号を発生させる。

・高周波部

搬送波をPコード及び時刻基準信号により変調し送信する。

・レーザCCR

地上からのレーザ光信号を本リフレクタで反射させ、地上で受信することにより測距を行なう。

(2)搭載実験

ETS-VIIで実施する主な搭載実験項目は以下の通りである。

・原子時計の評価及び管理

・測距手法及び誤差の評価

・衛星軌道決定

・その他

3. 衛星測位システムに対するニーズ、利用状況、問題点及び将来動向の予測

3.1 建設分野（執筆担当：佐田専門委員）

(1) 利用状況全般

① 受信機の種類

建設分野への応用は、陸上・海上における測量、計測、建設機械の位置計測など広範囲に及んでいる。ここで用いられているGPS受信機は干渉測位用であり、単独測位用受信機は精度が低いためほとんど使用されない。干渉測位によれば、基線の測定にmmオーダーの精度が得られるが、機器の価格が数百万円と高価である。干渉測位にはスタティック法とキネマティック法があり、固定点の計測にはスタティック法が、移動しながらの計測にはキネマティック法が用いられる。また、受信帯域数がL1帯のみのもの（1周波タイプ）とL1、L2帯を両方受信するもの（2周波タイプ）とがある。前者は短距離のスタティック法専用機として用いられることが多い。一方、後者は長距離計測やRTKが可能な機種で、応用範囲が広い。図3-1にGPS測位の種類を示す。

② 機器の普及台数

国土地理院の調査によれば、平成6年11月末1894台であったGPS測量機は、平成8年2月末には4395台に増加している。業種別では測量業2392台、建設業160台、学校関係396台、官庁関係1013台となっている。急速な普及の背景としては、技術革新の結果、GPS測量機が小型・軽量化されたこと、「GPSを用いる公共測量マニュアル（案）」などにより、広く測量業界に浸透しつつあること等が挙げられる。表3-1に平成8年2月末調査の業種別普及台数、図3-2に業種別普及台数を示す。

(2) 陸上建設での利用状況

① 測量分野

測量分野ではスタティック法による基準点測量に主に用いられている。スタティック法は、座標が既知の点と未知の点にGPS測量機を設置し、通常60分以上衛星電波を受信・記録した後、パソコンによる解析処理によって既知点、未知点間の基線を計算し、座標を求める方法である。従来の測量法と異なって測定する点間の視通を必要とせず、長距離でも、また天候にほとんど左右されず1日24時間測定できる。

例えば、山越えの基準点測量の場合、在来測量法では、始点から終点まで視通を確保しながら点をつなげるため、木や下草などの障害物を除去しながら作業し、1～2週間も作業することもある。しかし、GPS測量ではわずか1時間程度の測定で作業が終わるため極めて効率的である。今やGPSは基準点測量には不可欠である。

基準点測量に用いるGPS測量機は1周波タイプのもので十分であり、

最近は、GPS測量機の小型化、低価格化により、普及が進んでいる。
図3-3にGPSによる基準点測量を示す。

② 計測分野

陸上建設分野では、GPSを計測に利用している例も多い。2周波タイプの受信機を用いたRTKが主に用いられている。これは、既知点と未知点のGPS受信機間を通信システムを介してリアルタイムにデータ伝送を行い、未知点側の受信機で基線解析を実時間で行う方法である。RTKでは高精度測位のために初期化を行う必要があり、任意の点で初期化を実施するには、整数値バイアスを短時間で求められる2周波タイプの受信機でなければならない。

RTKはハンディターミナルやハンディパソコンに接続することで移動しながら自らの位置を確認できるナビゲーション機能を持つことができる。大規模な造成工事などでの切土や盛土の作業量計測、平面形状の連続計測等の業務に用いられている。また、ナビゲーション機能を用いて、構造物を現地に設置する作業にも利用されている。

図3-4にRTKのシステム構成、図3-5に応用計測例を示す。

③ 建設機械分野

ブルドーザ、振動ローラー等の建設機械にGPS受信機を搭載し、機械の作業軌跡を記録したり、リアルタイムに機械の位置を計測することにより、遠隔地から機械を制御することに利用されている。雲仙普賢岳の災害復旧工事において、人が入れない危険区域でCCDカメラとGPSを用いて遠隔地から建設機械を制御する無人化施工が試験的に実施された。

建設機械メーカーにおいても、GPSを組み込んだ遠隔制御システム、自動運転システムが研究開発されている。これらの利用においては、高精度とリアルタイム性が要求されるため、RTKが用いられている。

(3) 陸上建設における衛星測位の問題点

① 衛星のVisibility

衛星測位には4個以上の衛星捕捉が必要なため、市街地や山林部などで建物や樹木が障害物となって、使用不能になることが多い。スタティック法では、GPSアンテナを高所に固定するアンテナタワーの利用によって対処しているが、対応しきれない場所も多く、その場合は在来の測量法によるしかない。また、移動しながら計測するRTKでは高精度測位を保つために連続4個以上の衛星を把捉する必要があり、障害物により、受信が途切れると再初期化に数分を要する。障害物が多い場合、効率が低下する。

② マルチパス、電波障害の問題

L2帯を使用するRTKにとって特に問題である。L2帯はL1帯に比し受信強度が弱いので、マルチパスや電波障害の影響を受けやすいので、RTKの初期化が不能になったり時間がかかるという問題が発生する。

③ 通信の制約

RTKでは基準局（固定局）と移動局間を通信システムで結び、リアル

タイムにデータ伝送を行っている。現在、自由に使用できるのは特定小電力無線であるが、使用範囲が最大でも半径2km程度と限られている。

④ 衛星測位利用の継続性

測量業者や計測業者は、会社規模に比してGPSに多額の投資を行って、GPS機器を直接用いて業務を行っているところも多く、GPS利用の継続性に対する関心は非常に高い。また、技術的にはSolar Highの影響についても懸念されている。

(4) 陸上建設における将来動向

測量分野においては、建設省公共測量作業規程の改正が行われたこと、更なる軽量・小型の機種の開発、使いやすいソフトウェアの整備、国土地理院による電子基準点の設置等が進むものと考えられることから、GPSを用いる測量が主力になると予想され、更に普及していくと思われる。

計測分野では、機器の価格低下が進めば測量・計測分野の汎用機として位置づけられるであろう。その一つとして、斜面崩壊予知のための地盤変位観測システムに組み込み、リアルタイムでの変位計測が考えられている。

また、道路などのインフラの維持管理システムへの利用として、道路施設点検支援システムがある。これは、道路点検用車両にDGPS受信機とビデオカメラを搭載し、走行しながら撮影を行い、そのビデオ画像とGPSによる位置データを照合して道路施設の点検を支援するシステムである。図3-6にGPSを導入した道路施設点検支援システムを示す。

建設機械の制御においては、機械本体に測位機器が組み込まれて、自動制御のための位置決め技術として一般化するであろう。

以上の将来動向に関して求められるのは、衛星測位の継続性確保と利用可能範囲の拡大である。

測量業者や計測業者にとって衛星測位サービスの中断は、業務の中断を意味する。したがって、業務用の衛星測位機器が大量に供給されはじめた以上、衛星測位サービスの継続性確保が重要である。

現在の衛星測位利用可能範囲では、衛星測量は条件の良い特別な場所ではなければ使えないという評価もでてくるであろう。「余程条件が悪い場所以外はどこでも使える」というところまで環境整備が求められる。例えば、GPSとGLONASSとの併用による干渉測位が可能となれば、利用可能範囲は格段に広がる。一方、日本上空に補完する衛星を配置してGPS衛星と同等の機能を持たせれば、ほとんどのエリアで利用可能になるという意見もある。いずれにせよ、利用可能域拡大が今後の最大の課題である。

(5) 海上建設での利用状況

海上工事においてGPSを利用している総合建設会社は現在12社ある。利用している測位は、DGPSとRTKであるが、ほとんどでRTKが用いられている。図3-7に海上工事における衛星測位利用を示す。

適応工種としては、土運搬船管理、深淺測量、ケーソン据付、杭打ち工事、捨て石均し工事などであり、要求精度は±5cm～3mである。工種に対応して応用システムが開発されており、例えば深淺測量システムでは音響測深機と組み合わせ、ケーソン据付や捨て石均し機では、コンピュータグラフィック表示により作業船の位置決めをリアルタイムに行っている。表3-2に将来利用が見込まれる分野、図3-8にGPS測位による自動水深測量システムを示す。

平成8年11月に民間12社が発起人となり、DGPSシステムの実用化へ向けて調査研究や普及活動を行う「海上DGPS利用推進協議会」が設立された。RTKに必要な基準局を全国に設置することを目的にしている。平成9年春からの運用開始へ向けて基準局は、新潟、伊勢湾、京浜地区に1局ずつ、阪神地区に2局、関門地区に3局設置される。さらに平成11年4月に京浜、伊勢湾地区に1局ずつ追加し、全国展開を図る。また、海上保安庁のDGPS補正データ実験放送が平成7年12月、剣崎と大王崎の中波ビーコン局から開始された。サービスエリアは半径約200kmの範囲である。平成9年度には若宮と室戸の他に瀬戸内海に3局が新設され、計5局でDGPS補正データ放送が開始される予定である。平成12年初頭までにこれらの他に、東京湾と伊勢湾の奥に更に2局設置し、全国展開が完成予定である。コントロールセンターは東京に設置予定である。

図3-9に日本における中波ビーコン局の配置を示す。

(6) 海上建設での問題点

① 高さ

平面座標X、Yに比較して高さHのばらつきが大きいため、測量船の波による上下動の検出にそのままでは利用できない。Hは標準偏差では2～3cmとなっているが、最大値と最小値の差は10cm以上ある。

また、GPSは座標系としてWGS-84に準拠しているため、ジオイドに基づく従来の水準測量とは、高さの基準が場所によって異なる。従って、GPSで求めた高さをそのまま標高に換算することはできず、場所ごとにジオイドの傾斜を考慮した補正が必要である。しかし、その補正マップ（ジオイドマップ）はまだ十分に整備されてはいない。

② 同期

GPS受信機の測位データの出力時間が一定ではなく、約0.5秒程度変化しているため、音響測深機との同期の問題がある（特に、移動しながら計測する場合）。

(7) 海上建設での将来動向

海上工事に関しては、表3-2に示した分野で今後も利用が予想される。また、RTKの精度が必要な作業とDGPSの精度で十分な作業とに棲み分けがなされるであろう。

3.2 地殻変動観測・地図分野（執筆担当：村上専門委員）

(1) 利用状況全般

衛星を利用した位置計測技術の主な特徴は、地球上の絶対的な位置が決定できること及び高精度で位置が計測できることである。これらは測量・地図・地殻変動観測において最も重要な条件であることから、この分野においては、衛星利用のニーズが従来より高い。

実際に、宇宙利用の比較的初期の段階から、この分野への利用が実用化されている。GPSの登場以前にも、一連の反射型の光学衛星やNNSS等が利用された。我が国においても、これらの衛星を積極的に利用し成果が上がっている。

しかしながら、従来のシステムは、比較的大規模な装置や複雑な計算処理が必要であったことから、一国規模の座標の決定や学術的な研究に利用されるに止まっていた。

一方GPSは、簡単にしかも高精度の位置決定を可能にしたことから急速に導入が進み、測量・地図の分野においても、既に不可欠の基本的技術として定着している。今後も加速し、利用の一層の拡大が確実な状況にある。

(2) 地殻変動観測の条件

地震、火山噴火、地滑り等に伴う地殻変動は、数mから数mm程度の大きさである。このような地殻変動を観測するために、衛星測位手法の応用が現実的になったのは、GPSの登場以降である。

GPSによる地殻変動観測の特徴は、高精度、天候に左右されない、無人連続観測可能という3点である。

世界でも有数の地震・火山国である我が国は、GPSの有用性にいち早く注目し、地殻変動観測を通じて災害による被害を減少させる手法を確立するため、世界に類をみないGPS連続観測網を構築した。

(3) 我が国のGPS連続観測網

GPS観測施設は、国土地理院が全国に610点（平成9年1月現在）のGPS連続観測局（電子基準点）を設置したもので、地震・火山活動調査のための地殻変動の様相を把握することを大きな目的としている。現在、新たに276点の設置も進行中である。

この大規模な施設による観測は、これまではその詳細が明らかでなかった、日本列島で進行中の地殻変動の様相を次々と明らかにしつつある。代表的な成果として、

事例-1 北海道東方沖地震をはじめとした地震前後の地殻変動（図3-10）を明らかにした。

事例-2 日本列島周辺の詳細なプレート運動を明らかにし、プレート境界に関する理論の見直しの必要性を示唆する証拠（図3-11）を捉

えることに成功した。
等がある。

このように、従来手法では想像すら困難であった成果を連続して提供し、世界的にも注目されている。この事例に触発されて、最近では同様に地震多発地帯である米国カリフォルニア州において、類似のGPS観測網の構築が始まっている。

また、最近では、平成8年5月に房総半島で地震を伴わない地殻変動を捉えることに成功した(図3-12)。この地殻変動は、プレートの沈み込み地帯で大きな揺れを起こす一般的な地震と異なり、長時間かけてゆっくりと準静的に断層が動いたものと考えられる。このような現象を観測したのは、世界で初めてである。

ここで紹介した連続観測を初めとして、各種機関が実施するGPS地殻変動観測結果は、地震調査研究推進本部、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会等に報告され、専門家の詳細な検討を経て、防災情報として利用されている。

(4) GPSによる地殻変動観測と国際協力

GPSを地球科学の国際的共有資源とするための、国際的な協力活動も活発である。地球科学的なGPSの利用には、測位精度の向上が最も重要であるが、通常GPS衛星から提供される軌道情報は、地殻変動観測には十分な精度ではない。そのため地殻変動観測への利用のための高精度の衛星軌道情報(精密軌道)を独自に作成することが必要である。地球を周回するGPS衛星の軌道は、国際協力によって地球を均等にカバーする観測網を構築し、集積されたデータに基づく解析計算を行うことによって決定できる。学術目的のユーザーに精密軌道を提供する目的で、測地学に関する国際学術団体であるIAGが、学術的非営利事業であるIGSを1994年に開始した。以来、この事業は国際的な分業によって、最高精度の衛星軌道を定常的に提供している。この軌道決定は、事後計算となるため軌道データが入手できるのは早くても約10日後である。

一方、我が国においても、国土地理院や運輸省電子航法研究所において独自のGPS衛星軌道決定の研究を行った実績がある。国土地理院はこの研究の成果をさらに発展させて、地震発生直後や火山噴火の前後など、緊急に精密な軌道が必要とされる際に、精密軌道を計算するシステムを構築・運用している。

(5) 地図分野におけるGPSの利用

パーソナルコンピュータ技術の急速な発展と普及や、インターネットに代表される通信情報ネットワークの普及により、地図情報をデータベースとして一括管理する地理情報システムGISの実用化が注目されている。GISは、コンピュータによる検索機能や分析機能を駆使して、様々な社

会・経済活動における意思決定支援手段として幅広い利用が期待されている。我が国においても、様々な分野において、GISの利用が進んでいる。各行政機関によるGISの効率的な整備及びその相互利用を促進するため、GIS関係省庁連絡会議が平成7年9月26日に設置され、全省庁的な取り組みが進んでいる。

一方、GISは世界的にも普及に向けての動きが活発に進んでおり、ISOにおいて進行しているGISに関する世界標準の策定はその代表的なものである。この国際標準において位置を提供する標準的な手段としてGPSの利用が念頭におかれている様子であり、携帯に便利なPCとGPSの組み合わせによる実用的なGISの開発により、両者の普及が一気に進むことが期待される。なお、このような利用方法は、阪神・淡路大震災の復旧に利用されている先駆的なGISにおいて既に実現されている。

(6) ニーズ

測量・地殻変動観測の分野においては、GPSが実用的な道具として定着している。

特に、地殻変動を高精度に安定的に検出するためには、衛星測位システムが最も効率的であり、今後ともその利用が拡大する情勢である。また、国土庁の国土調査事業や地震調査研究推進本部が計画する地殻変動観測施設でも、測位の重要な手法としてGPS連続観測が取り入れられつつあり、GPSの利用は飛躍的に拡大するものと見込まれる。

GPSにおいて、衛星測位に求められる条件は、技術的にほぼ完成の域に達しているため、仮に新しい衛星測位システムを開発する場合は、GPSの欠点をカバーする機能、例えば、受信機及びアンテナのさらなる小型化、地下及び水中での測位を可能とする補完を想定した仕様とする等、GPS機能拡大を盛り込めば、現在よりさらにニーズは拡大すると考えられる。なお、新しいシステムでは、現状のGPS受信機等のインフラストラクチャー及びソフトウェアが利用可能となるように適合性を考慮する必要がある。

(7) 問題点

GPSは、米国によって軍用航法支援用を目的として開発されたシステムで、運用も同国のみで実施されている。このため、精度の低下、提供規制等の運用が米国の判断により左右される可能性があることが本分野での最大の問題点である。

3.3 農林業分野（執筆担当：行本専門委員）

農林業は、自然を相手に成立つ産業であり、対象である自然（生物体の生育）はまだ人工的に制御し得ない状況である。このことが農林業にとって、技術的にも、経済的にも他の産業と同様に扱い得ない制約条件になっている。従って衛星測位技術のニーズ、利用状況、将来動向を把握するうえで、はじめに農林業の実状を概観する必要がある。

(1) 農業をとりまく情勢

就業人口及び国内自給率は減少傾向にあり、農業従事者の過半が60歳以上である。一方、我が国の農業は、農産物の内外価格差拡大と輸入自由化圧力及び安全で高品質な農産物に対する消費者ニーズに曝されてきた。

世界的にはこの数十年間、化学肥料、農薬、機械といった資材、技術により、単位面積あたり収量（単収）は向上してきたが、近年では逆にこれら資材の大量投入により、土地の荒廃が進み、単収の伸びは急速に鈍化し、人口問題と併せて食糧危機の懸念が表面化しつつある。

このような情勢から「新しい食料・農業・農村政策の方向」（新農政）が農林水産省より示され、このなかでは、農家が少数の大規模経営体と兼業を行う小規模経営体に分極化していくことも想定しており、農産物のコストダウンをはかりながら、自給率の減少傾向には歯止めをかけ、かつ産業として自立し得る、日本の農業を再構築することが当面の目標となっている。

(2) 作物や家畜と農作業

作物や家畜、圃場といった農業の構成要素の特徴を、以下に列記する。

- ・ 生長速度を人為的に制御できない。
- ・ 形状と大きさを規格化できない。
- ・ 対象物の配置を人為的に制御することに限界がある。
- ・ 農作業は季節と気候、作物等の生育段階に強く制限される。
- ・ 農作業は大半が屋外で行われ、環境条件は厳しい。
- ・ 経営体は個人が多く、資本に限界があり、また、投資と収益の関係が不明瞭になりやすい。

(3) 衛星測位システムに対するニーズ

① 測地・測量

農業において農地の区画は固定的なものではなく、短期的な作付状況や長期的な土地改良事業などに応じて、適切な区画に分割、あるいは統合して使われる。小面積の割付には歩数や巻尺が、土地改良事業などでは、大面積に適した高精度な測量機器が使用される。これらの測量機器を衛星測位システムに置換える動機は、コスト、作業性にメリットがない限りない。

林業においては、森林の管理に地図が欠かせない。植生の変化や水系の変化によって、所有者の異なる林地間の境界線は不明瞭になりやすく地図

と現地の照合が必要になる。これら森林管理のために衛星測位システムを適用するメリットは、平面上の見通しが悪い森林内でも絶対的な位置を容易に求められるという点である。ただし方法によっては精度不足、長い測量時間、あるいは急峻な谷間等では必要な電波が得られない問題がある。

② 運転支援と自動化、無人化

従事者の高齢化とコスト削減に対応するため、機械化→自動化→無人化といった流れがある。機械化は既の実績を上げてきたが、無人化は、研究段階であり、目下各種の自動化が進みつつある。

農林業に用いられる車両は、移動しながら、あるいは移動した地点で何らかの作業を実行することに主眼をおいている。従って、運転者は車両移動のための運転操作と作業実行のための操作を同時に行う点が、一般の車両と異なる。このことから以下のようなニーズが想定される。

・ 車両運転の支援装置

圃場では目的地（作業の終了点）は明確であるが、事実上、圃場内の地図はなく、既作業領域と未作業領域を識別して未作業領域を処理していくことになる。この両者の境界が不明瞭な場合、自らが処理してきた既作業領域をモニタできる運転支援装置が、作業の無駄な重複ややり残しを防止する上で必要になる。図3-13に運転支援装置の情報表示例を示すが、自車位置情報に衛星測位システムの利用が考えられる。

・ 遠隔操縦と部分的自動化

農用車両は、屋外の悪環境下で低速、単調な作業を実行するため、作業の快適性を追求すれば、遠隔操縦の導入が考えられる。また、利用規模、資格、安全性などの観点からラジコンヘリコプターは農薬散布作業などに、既に多くが使用されている。これら運転支援装置、ラジコン支援装置、部分的自動操縦装置などに共通する情報は、圃場に対する絶対的な位置情報であり、衛星測位システムに対する期待感が強い。

・ 無人化

究極の自動化は無人化であり、表3-3に示す様な研究例が存在する。これらには共通して圃場内の位置情報が必要であり、現在、精度、信頼性、価格の面から決定的なシステムがないことなどから、衛星測位システムを導入した研究例もみられる。現在衛星測位システムを導入したトラクタの無人走行試験において所要の精度は確保しつつあるものの、農業に導入可能な安価なシステムとなる見通しは不透明である。衛星測位システムによるメリットは、集落単位などで共通的に利用できる固定局情報が得られれば、圃場内に一切の投資をしなくてよく、従って圃場を選ばず無人化でき、また作目、圃場状態、気象などの影響を無視できる、などである。

③ 精密農法

これまでの農業は圃場区画を一つの単位として扱ってきた。しかし、現実には1枚の圃場であっても、部分によって、水分、肥料分、土質などが異なり、その結果、収量も同一ではない。そこで、圃場を所要メッシュに

区切って、収量、水分等の情報を調査記録して、作業時にはメッシュごとに最適な処理を行うという考え方が精密農法PFである。PFにより、無駄な資材の投入を防ぎ、コストダウンを図るとともに環境負荷を軽減でき、適切な管理により増収が可能になる。図3-14にPFシステム概念の例を示す。欧米においては、圃場区画が大きく、一般測量機器ではシステム構成が困難なことから、既に衛星測位システムを利用した多くの研究例と実用例がある。

④その他

- ・放牧牛1頭ずつにGPS受/発信器を装着して、管理する試み
 - ・水田の耕うん整地作業において水平度の高い仕上げを行うために、衛星測位システムの高度情報を利用しようとする発想
- いずれも衛星測位システムの利用場面と想定される。

(4) 利用状況

①国内

現在のところ、農林業においては衛星測位システムは国内ではほとんどが研究用であり、実用には供されていない。

②海外

PF用のシステムが市販され、欧米の農業雑誌に紹介され始めている。従ってある程度の利用があると推定されるが、普及台数等は不明である。

(5) 問題点及び将来動向の予測

現状ではほとんど衛星測位システムの利用がなされていないが、各種統計、ニーズと研究状況からの予測を以下に記す。

①問題点

- ・精度、サンプリングレート
利用のケースに応じた、必要な情報等を表3-4に示す。この条件を例えばカーナビにおけるマップマッチング手法のような補完システムで確保できれば利用が推進される。
- ・価格、その他
衛星測位システムの利用価格は、農林業での利用形態により異なるものとなろう。また、要求精度が高く、デファレンシャル測位は必須となり、低コスト化にも固定局情報を共通的に供給するシステム構築が期待される。

②将来動向の予測

主要な農業機械の普及、出荷台数、及び出荷価格は表3-5のとおりである。国内の農業機械市場規模は約7,000億円と推定されており、ここ数年ほとんど変化がない。これらから、仮に何らかの形で衛星測位システムが農業機械に導入されたとした場合の、最大需要は推定しうるものとする。農林業は、生産性向上が求められており、衛星測位システムを組込んだ農林業用機器の需要は拡大するであろう。

3.4 陸上交通分野（執筆担当：松田専門委員）

(1) 利用状況

①カーナビゲーション

陸上交通分野への応用は、現時点ではカーナビゲーションが圧倒的に多く、その他の応用は非常に少ない。

カーナビゲーションでは、自車の位置を決定することが、他の色々な機能を利用するためにも最初に要求される。しかしGPSによる測位は、単独に使われることは少なく、ジャイロによる方位信号と、タイヤの回転による車速信号とから相対的に位置を決める、自立航法との併用が大部分である。自立航法では地図データベースの情報に基づき、もっとも確からしい道路に自車位置を設定する、いわゆるマップマッチングを利用して精度を上げている。しかし使用開始時や、フェリーなどで移動した直後は起点が定まらないので、自立航法のみでは位置を決められず、GPSによる初期化が必要である。したがって、GPSをまったく利用しないカーナビゲーションは存在しない。

1997年以降は若干伸びが小さくなるが、着実に拡大し、2000年には1,800億円の市場になると見込まれている。1996年度末で全乗用車（約4,000万台）に対する普及率は、3.5%程度と推定される。表3-6にカーナビゲーションの市場予測を示す。1996年には道路交通情報通信システムVICSがスタートしたが、これにより利用が推進されると推定する。なおVICSセンターの発表によれば、4月から12月末までで、VICS対応カーナビゲーション（アダプター形式も含む）は、9.5万台が出荷された。

②カーナビゲーション以外の応用

カーナビゲーション以外の応用については、タクシー、トラックの効率的運行管理を行うAVMがある。これはカーナビゲーションと異なり、管理センターで各車両の位置を把握し、最適な配車を実現しようというもので、車載機は地図ディスプレイは持たず、GPSレシーバと通信端末を持つだけで、MCA、タクシー無線などの通信手段で、自車の位置をセンターに知らせ、センターから目的地、経路の情報などを受け取るシステムである。現状での利用規模はまだそれほど大きくなく、タクシーでは1万台程度、トラックではさらに少なく、400台程度と見られる。

ポータブルタイプは、主としてヨット、釣り、登山などレジャー用途に使われ、海外メーカーのものも輸入されているが、市場としてはそれほど大きくはなく、年間5,000台程度と見られる。

また徘徊老人の位置特定、現金輸送車の安全対策を兼ねた位置特定など、乗用車以外の応用もあるが、まだ研究開発段階といえる。

(2) 精度

現在のGPS受信機による位置精度は最悪100m程度であるが、カーナビゲーションについては、前述の通りマップマッチングを利用して精度を高めており、位置精度は地図データベースの精度で決まる状態になっていて、10m以下程度となっている。しかし何らかの原因でマッチングが外れ、しかもGPSが受信できない時は、数100mの誤差もありうる。

マッチングが外れる原因は、ジャイロと車速信号の誤差と、高密度の道路分布、パーキングなど道路データの無いところに移動することがある、などである。

ジャイロは以前は精度の高い光ファイバージャイロが用いられたこともあるが、現在はほとんどが比較的廉価な振動ジャイロを用いており、ゼロ点ドリフトが大きく、精度はそれほど高くない。

車速信号は乗員数の変化、路面の状況変化、タイヤの熱膨張その他で数%の誤差を生じる。

これに対しリファレンスはGPSしかないので、GPSの高精度化はカーナビゲーションにとって重要である。この要求に沿ってDGPSサービスが1997年から開始される。これによりGPSのみの測位で10m程度の精度となる。

以上の状況はカーナビゲーション以外のタクシー、トラックの運行管理システムについても同様である。

車以外の用途については、地図データベースを持たないGPS単独測位となり、歩行者の位置特定まで考えると、精度は数m程度が要求される。しかし現在はこの精度を得る方法は確定していない。

(3) 問題点

現在のGPSの問題としては、精度といつでもどこでも利用できるかどうかの受信率がある。

精度は前述の通りで、DGPSによりかなり改善でき、カーナビゲーションには十分であるが、歩行者まで考慮した用途には不足である。

また現在計画されているDGPSは、誤差情報の伝送にFM多重を使うので、FM放送のサービスエリア外では効果がなくなる。これを解決するにはS/Aの解除とL5波の併用で20m程度の精度を得る必要があるが、カーナビゲーションにおいては、FM放送が受信できないような場所は道路密度が低いので、マップマッチングが外れる確率が激減し、実質的にはあまり問題にはならないと予想される。

受信率は、問題が大きく、都会のビル谷間でGPSの利用が制限される。歩行者向けシステムでは、利用者が都会に多いことを考慮すると、影響が大きい。これには衛星の数を増やすしか、解決方法はないと思われる。したがって現段階では、GPSとGLONASSをオーバーレイする方法も、有効と考えられる。

(4) 将来動向

カーナビゲーションについては、今後とも順調に発展を続けると見られるが、さらに広く使われるようにするためにはコストが重要である。現在のシステムはディスプレイとCD-ROMドライブがコストのかなりの部分を占める。

これを低減するために、ヨーロッパでは多く発表されている、簡単な矢印だけでガイドするシステムが考えられる。インテリジェントな部分はすべてセンターが持ち、車載機はデータベースを持たず、単純な入出力端末となる。自車位置の検出はGPSのみとなるので、受信率が重要である。

また既に米国で発表が相次いでいる、故障や事故時に迅速に助けを呼ぶために、自車の位置を携帯電話などを經由して、通知するセキュリティ対応システム(メデーシステム)が、我が国でも必要になると思われる。米国では道路密度が低いため、GPS単独で問題ないと考えられるが、我が国では道路密度が高く、高速道路の上下の判断などが重要になるので、DGPS対応レーバが必須になる。

またITSが大きく取り上げられるようになっているが、その中でも主要なテーマとして、AHSがある。これにはレーンの確保と車両相互の位置を正確に把握する技術が重要であるが、レーンの確保は磁気ネイルと呼ばれる磁石を道路に2m程度の間隔で埋め込み、車両はこの磁界を検出してレーン中央に位置するよう自動制御する。車両相互の位置認識については、現在ミリ波レーダー、レーザーレーダー、CCDカメラによる画像認識などの手段が研究されている。

これに対し、DGPSを利用すれば10m程度の精度で位置検出ができるので、これと車車間通信、路車間通信を組み合わせれば、車間距離を適当に保つことが可能になる。

いずれの応用についても、GPSが何時でもどこでも利用できるか否かが非常に重要で、これには再補足時間を短縮する等、端末側で対処する部分はあるが、基本的には衛星の数を増やすしかないと思われる。

利用者の立場から言えば、現在の24機に対し、2倍程度の機数であれば問題点はかなり少なくなるとみられる。したがってGPSとGLONASSの併用は有効な手段となりうる。

精度はDGPS(WAASのような広域増強システムも含む)で解決することを前提とする。

3.5 海上分野（執筆担当：西口専門委員）

(1) 利用状況

海上分野における船種別のGPS利用率は以下ようになる。

内航船・外航船：76.3%

沖合・遠洋漁船：90%（大手漁業会社船はほぼ100%の普及率、航海の長期化に伴い複数台搭載船舶が多い）

沿岸漁船：15%（海上保安庁のDGPSネットワーク整備に伴い100%普及へと進展するものと予想されている）

以上は1995年現在の社団法人日本船主協会による調査結果である。

(2) 利用ニーズと将来動向

- ・従来のNNSやロランCの航法システムに比べ、精度の安定性や利便性からGPSの優位性が認知され内航、外航船ではGPSが標準装置としての地位を築きつつある。
- ・沖合、遠洋漁船では、外国の200海里周辺での操業管理（オートパイロット）に不可欠の装備として利用されている。これは操業海域や操業条件等が非常に厳しい国際環境下、より正確な自船位置把握が必要なためと思われる。
- ・沿岸漁船では、小型漁船等は受信機システムの導入コストが負担ということもあるが、やはり好漁場探しの際の精度が最大のニーズである。
- ・IMO、IHO並びに各国の関係機関で推進中のECDISデータインフラの進展に伴い、通信システムとの統合や効率・安全性の向上が期待され要求精度も高くなる。従って、沿岸では地上局からのDGPSサービスが、遠洋では通信衛星による増強サービスが期待されている。
- ・その他のプレジャーボート等の利用動向については統計数値がないが、DGPSネットワークの進展に比例して利用急増が期待されている。

(3) 問題点

- ・技術的な問題点はほとんど無い。通信システムとの統合等、利用の高度化に伴うニーズへの対応が求められる。
- ・システム運用上の問題点は、衛星測位サービスの継続性が最大であろう。航行の安全と衝突防止に位置情報の把握が密接な関係にあり、この為IMO等の国際機関を中心にGMDSS標準やSTDMA等の通信システムAISが検討されている。いずれもDGPS増強システムのインフラ整備が大前提であり、ロランやオメガ等との併用やGLONASSの利用等冗長性確保の一環である。サービスの継続性に関連して費用負担の軽重も普及面での大きな課題である。

3.6 航空分野（執筆担当：篠原専門委員）

(1) ニーズ

航空分野における衛星測位システムの利用は、ICAOにおいて、将来予想される航空交通の増大や多様化に対応するために、将来の航空航法システムFANS構想が1991年に承認され、その実現に向けて取組がなされている。

その中で、衛星航法システムとしてGNSSが提唱され、当面利用可能な衛星システムとして米国のGPSとロシアのGLONASSがあげられている。

衛星を利用した航法システムは、現行の地上支援型の航空保安システムの限界を克服し、地球上のいかなる空域を飛行しても一定水準の航空保安サービスを提供できるものとして期待されている。

(2) 利用状況

航空分野における衛星測位システムの利用としては、航空路等を航行する際の航法システムとしての利用（自機位置の把握）と空港への進入・着陸時の誘導システムとしての利用が考えられる。現在、航空路を航行する航空機の航法システムとして、陸地上空ではVOR/DME等の地上に設置された航空保安施設を利用している。地上の電波が届かない洋上では慣性航法システムINSや慣性基準システムIRS等の慣性航法装置が用いられているが、慣性航法装置から得られる位置情報は原理的に時間の経過に伴い誤差が大きくなるという問題がある。

従って、今後は洋上等における航法システムとして衛星測位システムの利用が進むと考えられている。

現在、空港への着陸誘導システムとしてはILSが利用されているが、DGPS等の高精度化によって衛星測位システムによる着陸が可能となるものと期待されている。

当面利用可能な衛星測位システムとしては、米国のGPSが考えられており、GPS受信機を搭載した航空機が既に就航しており、米国等において航空におけるGPSの利用に関する実用化試験等が実施されている。

我が国の大型航空機のGPS受信機の搭載率は、現時点では少ないが、将来的には航空機の大半がGPSを搭載すると考えられ、今後はGPSの積極的な利用が見込まれている。

小型機においても現在、大型機と同様に自機位置を知るためのセンサとしてGPSの利用が始まっている。小型機の場合、航法装置の参考としてGPSを利用しているが、搭載機数は少なく、国内では小型機（ヘリコプターを含む）の内数十機程度と推定される。しかし、航法装置として既存の機器よりも多くの面で優れていると認識されている。

(3) 問題点

現行の衛星測位システムを航空に利用する場合の問題点としては、測位精度、衛星測位システムの完全性、サービスの継続性等に関するものが挙げられる。測位精度等については洋上及び航空路での利用においては十分と考えられるが、空港への着陸誘導システムとして利用するためにはさらに高精度の位置情報を提供するためのシステムが必要となる。航空分野において、安全性は必須であることから、衛星測位システムの完全性やサービスの継続性等の確保が課題となり、それらを増強するシステムが必要となる。

(4) 将来動向の予測

GPSを航空航法用に利用できるようにするため、上記の増強システムの整備が進められており、我が国においても運輸省航空局が運輸多目的衛星を利用したGPS増強システムとしてMSASの整備を進めている。これらの整備により、GPSの航空航法への利用が進むものと考えられている。

3.7 宇宙分野（執筆担当：北原専門委員）

(1) ニーズ

宇宙分野におけるGPS利用は、人工衛星などの宇宙機の軌道決定（位置、速度）と姿勢決定の2種類がある。宇宙機の軌道決定については地上での測位と同様に、GPS受信機を人工衛星に搭載することにより可能であることから、地上局による測距なしで容易に衛星の軌道決定ができる利点がある。また、一般に人工衛星は、地球センサ、太陽センサ等により姿勢を検出しているが、GPSの搬送波を複数のアンテナで受信し、その位相差を計測して計算処理することによっても姿勢が決定できる。このためGPS受信機により軽量、低電力、安価な姿勢決定システムが構築できるとともに、信頼性の向上も期待できるなど長所がある。

(2) 利用状況

宇宙におけるGPSの主な利用状況は以下の通りである。

① 軌道決定

GPSによる宇宙機の軌道決定は、1982年に打ち上げられたLANDSAT 4が実験的に実施したのを皮切りに、米国を中心に多数行われている。本分野における主なGPS利用・実験衛星を以下に示す。

LANDSAT 5

- ・ 打ち上げ：1984年
- ・ 軌道高度：約700km
- ・ ミッション：地球観測

GPS利用方法：

軌道決定と衛星時刻システム同期（従系として使用）

EUVE

- ・ 打ち上げ：1992年
- ・ 軌道高度：約500km
- ・ ミッション：極紫外線観測（NASA）
- ・ GPS利用方法：
Pコード疑似距離及びL1搬送波位相計測により軌道決定実験をJPLで実施している。

TOPEX/POSEIDON

- ・ 打ち上げ：1992年
- ・ 軌道高度：1,336km
- ・ ミッション：全地球規模の気象予測改善等のための海面高度の精密マッピング等（NASA/CNES共同プロジェクト）
- ・ GPS利用方法：

3種類の手法（レーザーフレクターアレー、レーダ高度計、ドップラレンジングシステム）により衛星高度を10cm以下で推定している。これに加えて6チャンネルGPS受信機を精密軌道決定の新手法実証のために搭載し、L1、L2搬送波位相受信干渉測位方式により、オフライン処理で衛星位置を数十cm以下の精度で推定していると言われる。

OREX

- ・ 打ち上げ：1994年
- ・ 軌道高度：約450km
- ・ ミッション：
再突入飛行環境下での空気力及び空力加熱等の基礎データ取得
- ・ GPS利用方法：
軌道上及び再突入時におけるGPS受信機による航法基礎データの取得及び再突入時の評価解析用航法データの初期値決定（L1、C/Aコード受信）

SFU

- ・ 打ち上げ：1995年
- ・ 軌道高度：約300kmから500km
- ・ ミッション：宇宙環境における長期間の実験
- ・ GPS利用方法：
GPSを利用したオンボード軌道決定試験を実施。

ALFLEX

- ・ 実験：1996年

- ・高度：約1500m～着陸まで
- ・ミッション：宇宙往還技術試験機の自動着陸技術の基礎を固め及び種々の技術データの取得等
- ・GPS利用方法：地上に模擬GPS衛星を配置する方式のGPS差分航法による、自動着陸フェーズの高精度航法実験を実施。（分離地点設定、着陸航法データ取得）（L1、C/Aコード受信）

ETS-VII

- ・打ち上げ：1997年予定
- ・軌道高度：約550km
- ・ミッション：ランデブー・ドッキング技術実験、宇宙用ロボット技術実験等
- ・GPS利用方法：500m以遠の自動ランデブ用の軌道制御センサとしてGPS受信機をターゲット衛星とチェイサ衛星に搭載し、GPS相対航法を実施する計画。（L1、C/Aコード受信）

ADEOS-II

- ・打ち上げ：1999年予定。
- ・軌道高度：約800km
- ・ミッション：地球観測プラットフォーム技術衛星による観測の継続・高度化、地球環境問題に係わる全地球的規模の水・エネルギー循環のメカニズム解明に不可欠な地球科学データの取得等
- ・GPS利用方法：ミッションデータへの位置情報配信をGPSを用いて行う。オンボード受信機と地上基準点のGPS受信機を用いた相対測位方式で、高精度位置決定実験を計画している。（位置情報配信：100m以下、高精度位置決定実験目標値：2～3m）（L1、C/Aコード受信）

ALOS

- ・打ち上げ：2001年度予定
- ・軌道高度：約690km
- ・ミッション：地図作成、地域観測、災害状況把握、資源探査等
- ・GPS利用方法：2周波搬送波位相のオフライン処理で高精度位置決定を行い、観測地点の特定に利用する計画である。（精度要求：1m以下）、（L1、C/Aコード、L2受信）

②姿勢決定

GPSの搬送波位相計測データを利用した姿勢決定は、小型衛星等の姿勢制御系の簡略化を意図して、近年急速に研究開発が進んでいる。1993年打ち上げのRADCALで初の軌道上GPS姿勢決定実験が行われ、その後スペースシャトル等を利用した実験が行われ、1996年打ち上げのREX-IIでは軌道上で初めてGPSによる姿勢決定値を使用した閉ループの姿勢制御を実施した。我が国においては、軌道上宇宙機への利用は研究段階にあり、航空宇宙技術研究所において、航空機を用いたGPS姿勢決定の飛行実験が実施された。世界の主なGPS利用・実験衛星を以下に示す。

RADCAL

- ・打ち上げ：1993年（米国空軍）
- ・軌道高度：約800km
- ・ミッション：軍事及び民間用Cバンドレーダシステムの校正
- ・GPS利用方法：2台のGPS受信機による搬送波位相計測による姿勢決定

REX-II

- ・打ち上げ：1996年（米国空軍）
- ・ミッション：電子密度不規則性による電波伝ぱんへの影響等の研究
- ・GPS利用方法：姿勢及び軌道決定

(3) 問題点・課題

- ①S/Aにより測位精度に作為的な劣化措置が施されている。
- ②インテグリティの問題があり、宇宙機の実時間制御用のセンサとして不安がある。
- ③民生用としての測位サービスの将来的継続性に不安がある。
- ④宇宙用航法としては高度3,000km程度の低軌道までしか利用できないので、それ以遠の宇宙機も使用できるようなシステムが望まれる。

(4) 将来動向

GPSを利用することにより地上局の支援なしに自立的測位が可能になること、またGPSによる宇宙機の姿勢決定は、従来の姿勢センサに比べて、小型軽量、低電力、低価格、システムの単純化等の長所があることなどから、多くの研究・試験等がなされており、今後ますます利用されていくと考える。なお、我が国ではHOPE-XでのGPSを利用した航法、または姿勢決定基礎実験、HTVでの宇宙ステーションとのランデブーのための位置・速度決定、相対位置決定等が計画されている。

3.8 その他の分野（執筆担当：西口専門委員）

(1) 概況

現在世界各国で実用化或いは実用化に向けて取り組まれている利用例は多様である。特にRTKと呼ばれる、低速移動体のcmオーダの高精度測位を準リアルタイムで計測できる新技術の登場により、各種用途でその有用性が認められ活性化しつつある。

図3-15に衛星通信を利用したDGPS増強サービスの概要を示す。

GPSを中心とする衛星測位システムは、その拡張性の高さや使い勝手の良さからあらゆる分野に浸透しつつある。

(2) その他の分野の中の特徴的な事例

①情報通信分野

衛星測位システムには、高精度の原子時計が搭載されている。宇宙空間に展開しているGPS衛星群が発信する精密計時を絶対基準とすることにより、地球上、宇宙空間上の何処にいても世界共通の標準時刻が得られることから、現在、主要国の標準時間管理機関が観測実験協力し合う等UTC標準時刻の基準化に向けて国際的な活動が繰り広げられている。

他方、この宇宙ベースの基準である精密時計を利用した時刻同期や周波数同期への活用が衛星測位システムのもう一つの利用分野として注目されている。利用者は、通信事業者や電力供給事業者であるが、特に通信・放送の分野では、デジタル化、移動体無線通信の進展、地上型無線通信から周回衛星移動体通信への発展、通信・放送の融合、インターネットの世界的浸透等、一大変革期を迎えている。

特に、デジタル化の進展に伴い大容量双方向通信を含む国際通信インフラ時代に多様な情報が多様な伝送媒体を介して世界中を伝わる時、重要な役割を果たすのがタイミング同期、周波数同期であり、そのツールとしてGPSが期待されている。大容量通信の高速リンクには、交換局による間接的非同期接続よりもGPS同期による独立的瞬時接続が好ましくGPS同期やが注目される理由であり、一部でGPSの採用が始まりつつある。

更に、スウェーデンでSTDMA方式と呼ばれるGPSの高精度時刻同期により細分化された時刻スロット割り当てを複数の多様な移動体間で通信に利用する斬新な通信システムが開発され、主として欧州で実用化に向けて検討されている。

②気象観測分野

衛星測位システムの誤差要因の一つに大気圏の電波伝播遅延誤差がある。種々の数学的補正モデル等によりかなりの誤差を消去できるが、mmオーダの精度向上には、大気中に偏在する水蒸気がノイズとして障壁となる。

一方、気象学では、数値予報によって数百kmスケールの予報が実用化されているが、集中豪雨のような数十km程度の予測を数値予報で行うにはモ

デルの改良や観測の充実が必要であり、中でも時間空間ともに高分解能の水蒸気観測が予報精度の向上の鍵を握るとされている。

この両者がGPSで結びつくことで諸々の分野に波及効果をもたらすGPS気象学が誕生した。気象学から見ると、GPS信号の大気遅延量はノイズでなく貴重な観測データであるが、GPS連続観測網のような時間空間分解能の高い水蒸気観測は実現しておらず、GPSによる高密度、高頻度、高精度の降水量データへの期待は非常に大きい。

また気象学で得られた精度の向上した数値予報データを、測地側に準リアルタイムにフィードバックしてGPS観測における大気遅延量の超精密な補正に用いることによってGPS測位精度の向上に資することもできる。

例えば米国サンフランシスコ湾で頻繁に発生する厚い霧による測位誤差でDGPSナビゲーション中の船舶が事故を起こしており、ローカル気象予報への応用に関心が高まっている。

我が国は、地理的・気象学的条件により水蒸気量の局地的な変化が大きいという特徴を有しており、国土地理院によって展開されている、十分に細かいメッシュで国土を覆うGPS連続観測網によって得られる降水量データと、気象庁の気象予報技術との統合により、我が国はGPS気象学で世界をリードできる条件が揃っている。

既に、気象庁と国土地理院を中心として、気象学・測地学に関係する国立研究所や関連大学、大学等の研究機関が「GPS気象学」に結集して研究に着手しつつある。この成果は、気象予報精度、測地精度の向上みならず、地球科学への国際貢献等々その波及効果は極めて高いと期待される。

更に、郵政省の提唱する「成層圏無線中継システム」が実現すれば、その飛行体に搭載した高精度GPS受信機で複数のGPS衛星からの電波を受信し、大気の屈折率計算により大気の大気温度や湿度を求めることができ気象予報の精度向上に寄与する。また、海上での気温または湿度の頻繁な観測によりGPS測位の大気圏遅延誤差補正にフィードバック可能である。

③災害救難等

測位と移動体通信の複合は、有効利用分野が多く、研究開発が世界で活発である。その一つとして、災害救難を効率的・効果的に実施するメーディシステムの実証実験が米国の州レベルで盛んである。

モトローラ社等による携帯電話とカーナビ端末の組み合わせ商品が市場に出回っており、公共救済部門に中継する民間のサービス事業者も既に存在している。災害者の心理的安心感のニーズ、技術的な可能性、救助側への複数の通報錯綜を特定選別でき混乱を回避する等、その有効性については十分実証されている。新たなサービスとして今後期待される分野である。

なお、海難事故については、国連機関IMOを中心としてGMDSSと称するレーダー物標の自動識別のための国際標準化作業が1999年2月完成目標に進展している他、STDMA方式も併行検討されている。

4. 我が国が取り組むべき技術開発課題

4.1 想定される衛星測位技術開発のシナリオ群

3章までで明らかにした様に、米国のGPSは、最も信頼性の高い衛星測位システムとして世界で広く利用されている。我が国においてもGPS利用は、広く普及しており、特にGPSカーナビゲーションは、一つの産業として発展しつつあり、測量・地殻変動観測分野においても既にGPS利用が主流技術として欠かせないものになっている。GPSは、1996年3月に発表された米国政府の新政策（大統領決定）により、継続的な無償利用が保証されるとともに、10年以内にS/Aが廃止（ただし政府は軍に対し、S/A廃止に向けての十分な準備期間と資金を提供する）される。従って我が国の衛星測位は今後ともGPS利用が中心になると考えられる。

しかし現在、計画されているGPSのBlock II F衛星が寿命を終える2020年頃、GPSが依然として民生用にも運用され続けているか、国際的に共同で衛星を開発・調達・運用する機関（以下「国際機関」という）による民生用衛星測位システムの運用が開始されているか、欧州のGNSSが民生用衛星測位の中心になっているか等を現時点で予測することは不可能である。

一方、本分野における我が国の技術レベルは米国等よりも大幅に遅れており、今後、技術を確認しようとする、基礎技術研究、要素技術開発、宇宙での実証といった着実な開発ステップを踏む必要がある。

衛星測位システムに対する利用者の意見を要約すると次の様になる。

①現行GPSの継続性が保証されれば十分な分野、GLONASS等他の衛星測位システムないし様々な増強システムとの併用により完全性・定常性が増すことで更に利用が拡大する分野がある。

②利用者は、完全性（世界中どこでも利用中に必要な精度が保証されること）

定常性（精度高いサービスを途切れることなく使用できること）

公開性（誰でも自由に利用できること。）

の3条件が担保された衛星測位システムを望んでいるが、現状では、GPSでも3条件を完全に担保しているとは言い難い。そこで利用者側は、GPS自身の発展、利用技術の向上、衛星測位技術開発等により更に質の高い衛星測位システムが利用できることを望んでいる。

③我が国が衛星測位技術を開発する場合、利用者は上記3条件のGPSで不足している部分を補完するか、GPSに対して付加機能がある、もしくはGPSを凌駕する機能をもつことを期待している。

衛星測位システムに対する技術開発側の意見を要約すると次の様になる。

①衛星測位技術の開発は、GPSの不足している部分を補完する方策の一つとして有効である。

②GPSが民生用衛星測位サービスを継続しているか否かに関わらず、衛星測位技術を他の宇宙開発プログラムへの応用も可能なこれからの我が国の宇宙基礎技術として確立すべきである。

③将来、国際機関が民生用衛星測位システムを整備する際には、我が国は技術面から貢献できる能力を備えておく必要がある。

ここでは、上記の様な利用側、技術開発側両者の考え方を基本として、衛星測位を巡る諸事情の変化に柔軟に対応できる様に、技術開発を行わない場合を含む5つの技術開発シナリオについてそれぞれの長所・短所をまとめた。

なお、衛星測位技術は、軍用としても重要な意味を持つが、ここでは、軍用ニーズ・諸問題については検討を行っていない。

シナリオ1：衛星測位システムに関する技術開発をしない。

（将来に渡ってGPS利用のみ）

現在同様、GPS等の海外衛星測位システムを利用し、我が国で技術開発は行わず、衛星測位システムを開発・保有しない。ただし、国際情勢を考慮しつつ、衛星測位技術に関するボトムアップを図り、GPS等が最大限に利用できる環境整備を推進する必要がある。

測位精度の向上等のユーザニーズには、次の様な利用技術開発により応えることとする。

①DGPS等増強システムの開発

②MTSATによるGPS増強システムの推進

③GPSとGLONASSの同時受信方式の開発

④その他、GPSの利用方法の改良

（長所）

技術開発経費が少ない。

（短所）

本シナリオでは、我が国の衛星測位利用におけるGPS継続性の不安は解消しない。

更に衛星測位技術という基本システムを海外に依存することになり、かつ国際協力において技術面から貢献できないなど、技術立国としての我が国の立場について、国際的な評価が落ちる可能性がある。

シナリオ2：将来の衛星測位システムに必要な基礎技術の開発

(当面GPS利用のみ、ただし複数衛星による技術試験を行う)

基本的には現状の延長で、測位精度向上等のユーザニーズにはシナリオ1と同じ方法で応えるが、将来、国際機関による民生用衛星測位サービス提供が開始される場合に備えて技術面から貢献できる様に最も基礎になる技術のみを開発する。

ここで確立すべき衛星測位システムの要素技術を表4-1に示す。下記に示す3技術が以降のどのシナリオにおいても必要不可欠な基礎技術であり、技術試験の段階までには7年程度の期間が必要である。

①衛星搭載用原子時計

ルビジウム時計の衛星搭載化開発を実施し並びに最も精度の高い衛星搭載用水素メーザ時計の開発を目指す。

本技術は、高安定度周波数発生装置として通信衛星、深宇宙探査衛星等の高機能化にも適用可能な基礎技術である。

②衛星群時刻管理技術

衛星測位システム構築において最も重要な基礎技術である。

③高精度衛星軌道決定技術

本技術は、衛星測位システム構築において重要な技術であり、かつ正確な高度測定を要求される地球観測衛星等の軌道決定にも使われる基礎技術である。

なお、上記①から③については、国際機関による測位衛星打上げ計画が具体化した際に速やかに衛星開発へ移行する準備としてコンポーネントを地上で研究開発し、加えてそれを宇宙で技術試験を実施する最低数の衛星(技術試験衛星、ミッション実証衛星等)を開発する。

(長所)

宇宙基礎技術としての衛星測位技術を確立できるとともに、国際的な諸条件に配慮すべき点が少ないことが長所である。

また国際機関が民生用衛星測位システムを確立する際に、我が国が技術面から貢献する基盤を最小経費で確立できる。

(短所)

国際機関による民生用衛星測位システム整備は、当面開始される動きもなく、その様なシステムが整備されない場合には、技術開発の成果が社会に生かされないこととなる。

一方、本シナリオで開発する技術のみでは、利用者側ニーズとしての利用可能性向上、精度向上、多機能化に対し、十分応えることはできないし、GPSが民生用衛星測位サービスを停止した場合の問題点も完全に解消できない。

シナリオ3：GPS補完を基本とする衛星測位システムの開発。

(GPS補完が基本となるが、単独でも利用可能なシステム)

本シナリオは、GPS補完機能を基本とした上で、GPSなしでも我が国周辺の地域的な衛星測位サービスが可能な技術を実証する衛星(技術試験衛星、ミッション実証衛星等)を開発するものである。

ここで開発すべき衛星測位システムの要素技術は、表4-1に示すように、共通3技術に加えて以下が加わる。宇宙実証の段階までには、10年程度の期間が必要である。

①GPS補完技術

②測位サービスシステム技術

③レンジング放送技術

④インテグリティチェック技術

⑤衛星バス要素技術

⑥衛星群追跡管制技術

(長所)

本シナリオで実証後は、同一規格の衛星を必要数製作・打ち上げれば実用化につながる。

更に実用化後は、GPSとの併用により利用可能性が広がり、精度向上が望めることはもとより、GPSが万が一、民生用信号を停止した場合にも、我が国周辺での衛星測位サービスを継続できる。

また国際機関による民生用衛星測位サービスが計画された場合にも、比較的短期間での衛星開発が可能であることからシナリオ2よりも積極的な技術貢献が可能である。

(短所)

実証に必要な経費は、シナリオ2よりも遙かに高くなり、その割に確立する技術は、現状のGPSとの差異を明確化できるものにはならない。また本シナリオは、我が国独自の衛星測位システムの実用化につながることから、GPSの我が国での民生利用の継続性の確保に悪い影響を及ぼす恐れがある。

シナリオ4：複合ミッションを取り入れたGPS補完衛星測位システムの開発

(GPS補完が基本となるが、単独でも利用可能かつ複合ミッションを搭載するシステム)

測位と移動体通信が合体した複合システムは、今後のマルチメディア時代に向けて脚光を浴びると予想されている。また現状のGPSでも3章に述べた様にその特徴を生かし通信分野等、測位以外の利用が進められている。

本シナリオは、GPS利用の補完を基本とする点はシナリオ3と同様であるが、静止衛星と中高度軌道等の衛星を組み合わせた移動体通信ミッションと複合化することにより、ユーザとの双方向通信、第3者による

位置確認等、現在のGPSでは行っていないサービスも可能な技術を実証する衛星（技術試験衛星、ミッション実証衛星等）を開発する。ここで開発すべき衛星測位システムの要素技術を表4-1に示す。本シナリオについても宇宙実証の段階までには、10年程度の期間が必要である。（長所）

シナリオ3の長所に加え、衛星測位と移動体通信等の複合ミッションが主体となると考えられる将来動向を先取りしている。GPSとの差異も明確である。

（短所）

衛星が複雑化・大型化し、必要経費もシナリオ3よりも上昇する。また複合ミッションという実験的要素を含んでいるが、衛星測位システムの実用化に直結することは変わりなくシナリオ3同様、GPSの我が国での民生利用の継続性の確保に悪い影響を及ぼす恐れがある。

シナリオ5：国際協力による世界規模の衛星測位システムの開発

（当初から国際的なシステム開発を想定し、それを目指した技術開発を行う）

GPSを考慮しつつ、世界規模の新しい民生用衛星測位システムを国際協力により開発する。シナリオ2～4でも国際機関が全世界的な民生用衛星測位システムを整備する場合に備えているが、本シナリオは、当初から国際協力プロジェクトによるシステムの開発を前提としている。

これに該当する可能性のあるプロジェクトとしては、米国のBlock II F以降の次世代GPS、欧州のGNSS等が挙げられる。技術的には、シナリオ3とほぼ同様のものを10年程度で我が国が実証し、いずれかの計画におけるシステム開発に反映することを目指す。ここで開発すべき衛星測位システムの要素技術を表4-1に示す。

（長所）

シナリオ3の長所に加え、当初から国際協力による世界規模での民生用衛星測位システムの整備を目指しており、開発目的が明確である。本シナリオが実現すれば、新しい民生用衛星測位システムを確立できるので、GPSに依存する場合に避けられない継続性の問題点も解消し、GPSとの差異も明確である。

（短所）

いずれの計画も現在のところ具体化の段階に至っておらず、不確定な部分も多い。従って本シナリオを開始するまでに、多くの調整と長い期間が必要と考えられる。

更に開発終了まで技術・管理両面共に協力国との複雑なインタフェース調整を要するとともに、衛星測位システム整備に向けて相当数の衛星製作も我が国が負担するとなれば、必要経費も大きなものとなる。

4.2 シナリオの選択について

4.1項で検討したシナリオ群のうち、どれを選択するかについては、GPSの利用状況、衛星測位技術の開発ニーズ、技術開発の自在性、衛星測位技術の宇宙基礎技術としての重要性、技術的な国際貢献基盤の確立の必要性、国民理解の向上性、開発コストと予算上の制約、国際的な環境の不確定性等を総合的に考慮すれば、当面はどのような状況にも対応できるよう、シナリオ2により開発を進めるべきである。

その後、他のシナリオへの移行等を視野に入れながら、慎重な検討を継続して行うべきである。

シナリオ2による衛星測位技術開発のスケジュールについては、以下の様に考えられる。

現在、我が国のプロジェクトとして1997年度（平成9年度）から、衛星搭載用原子時計（水素メーザ）の研究が開始される予定である。

また原子時計を利用した高精度時刻基準装置を搭載したETS-VIIIは、2002年度頃（平成14年度頃）打上げを目標として、開発研究が1997年度（平成9年度）から開始される。ETS-VIIIで実施予定の衛星測位要素技術試験は、シナリオ2における時刻管理技術の実証を効率的、かつ低コストで実施するための実証試験になり得る。以上の2つのプロジェクトにより衛星測位の基礎技術開発は、緒に付いたばかりである。

ETS-VIIIの寿命が3年であり、その期間内に7年程度を要するシナリオ2の基礎技術開発及び技術試験を完了させることを考慮する必要がある。GPSのBlock II Fのサービス終了時に国際機関によってサービスを提供するという考えについて議論が行われることも想定され、そのリードタイムとして10年程度は必要であることも考慮すると、シナリオ2による衛星測位の基礎技術開発は、早急に本格化する必要がある。

なお、シナリオ2において挙げた我が国が取り組むべき基礎技術の研究開発について、技術の内容、我が国における取り組み状況、今後の課題等を参考に示す。

参考1 衛星搭載用原子時計（執筆担当：飯田専門委員）

ルビジウム、セシウム、水素メーザの3種類の原子時計の基本原理は、共通であるが、図4-1に示すように基本構成は、異なっており、性能等もそれに応じて異なる。表4-2に各原子時計の特徴比較を示す。

原子時計で重要な性能である周波数安定度では水素メーザが最も優れており、平均化時間10,000秒で 1×10^{-15} が得られるが、遷移周波数が他の原子より低いため共振器が大きく、真空装置が必要なため、大きさ等でルビジウム、セシウムに比べ劣るという問題がある。

(1) 水素メーザの利点

測位衛星システムでは衛星搭載時計は常に同期がとれていることが前提になるが、現実には各衛星の時計にずれが生じる。このずれが距離誤差に直接影響するため衛星搭載時計には高い安定度が要求される。

例えば、1mの総合測位誤差は時計誤差で3nsに相当するが、実際には時計誤差の影響を十分小さくするためにこれより一桁程度良い0.3ns以下という値が必要になる。このためには、測位衛星システムで行う時刻あわせ頻度を1日に1回とすると、時計の周波数安定度は 3×10^{-15} 以下が必要になり、この実現には水素メーザが必要である。

(2) 我が国の水素メーザの研究開発

水素メーザは、優れた周波数安定度を持っており、周波数標準やVLBI等の精密計測分野では不可欠の存在となっている。我が国では、水素メーザの研究開発はCRLで行われている。

CRLの水素メーザの研究は1965年に開始され、翌1966年には米国、スイスに次いで世界で3番目に発振に成功した。その後、1970年代後半からVLBIの研究開発の本格化に伴い、周波数安定度の優れた原子発振器の実用機が必要とされるようになり、1982年にはVLBIシステム用水素メーザの開発を実施し、平均化時間数千秒で 2×10^{-15} の周波数安定度を達成した。（図4-2参照）

その後、研究開発の目的は小型軽量化に移り、ループギャップ型小型共振器が開発され、小型水素メーザの発振に成功し、平均化時間10,000秒で 3×10^{-14} の周波数安定度が得られている。（図4-3参照）

(3) 水素メーザの研究開発の国際動向

米国の現状

米国では、スミソニアン天文台グループが、1970年代にロケットに水素メーザを搭載して打ち上げ、相対論的重力シフトの影響を検証している。同グループは、最近では、ESAのEURECA計画用の搭載水素メーザの開発を行い、必要な性能を確認したが、EURECA計画が頓挫し、当面搭載する計画はない。開発した水素メーザはフルサイズの共振器を採

用しており、重量は110kg、消費電力は95W以下である。

ヨーロッパの現状

スイスのオシロクォーツ社が水素メーザを製品化したが、その技術はニューシャテル天文台に移転され、今ではニューシャテル天文台が主に研究開発を行っている。現在、ニューシャテル天文台はロシアの地球観測衛星METEOR3MおよびロシアのVLBI衛星RADIO ASTRON搭載予定の水素メーザを開発している。計画ではMETEOR3Mは1997年末、RADIO ASTRONは1997年～1998年に打ち上げられる予定である。ニューシャテル天文台の水素メーザはサファイア装荷型共振器を採用して、水素メーザを直径46cm、高さ80cmと小型化でき、重量は50kg以下を達成した。

ロシアの現状

RIRT等の機関が水素メーザの研究開発を行っており、優れたメーザを開発している。特にRIRTではGLONASS搭載用水素メーザの開発を行っている。この水素メーザではループギャップ型共振器を採用し小型を図っており、容積65リットル、重量40kgを達成してGLONASS搭載原子時計をセシウムから置き換えることを目指している。

(4) 技術開発課題

水素メーザは我が国でも既に実用化され、カタログ製品も販売されているが、これらは、地上用であるため、衛星搭載用水素メーザの開発では、水素メーザの本来の特徴である高い周波数安定度を維持しながら、小型・軽量化、低消費電力化、耐宇宙環境特性の改善を図ることが課題になる。

小型・軽量化

欧米ではフルサイズの水素メーザで100kg弱、小型共振器を採用した水素メーザでは40～50kg程度の開発例がある。一方、我が国の水素メーザは約450kgあり、衛星搭載用として大幅な軽量化が必要である。

①真空系の軽量化

水素メーザでは、量子系の小型軽量化が特に重要である。量子系の中でも、真空系はこれまでステンレスの真空容器やイオンポンプ等を使用しているため、この部分に改良を加える必要がある。例えば真空ポンプとして、軽量化、低消費電力化が可能な水素用ゲッターポンプを適用し、更に真空容器を従来のステンレス容器からアルミ合金製容器に変え、さらに、機械的強度を保ちながら容器の肉厚を薄くして軽量化を図る等が今後の課題である。

②共振器の小型化

量子系の中心部に設置されているマイクロ波共振器は通常はTEO1モードの円筒共振器（図4-5参照）であり、この共振器の周囲に恒

温槽、静磁場発生コイル、磁気シールド、真空容器が配置されている。したがって、共振器を小型化できれば、その周囲の構成要素も小型軽量化が可能であり、効果は大きい。

共振器の小型化には二つの方法がある。一つはCRL等で行っているループギャップ共振器（図4-6参照）である。この方法では、増幅器の熱雑音も増幅され、周波数安定度はフルサイズの共振器に比べ劣る。もう一つの方法は、共振器内に低損失の誘電体を挿入して、共振器を小型化する方法である（図4-7参照）。スイスのニューシャテル天文台グループは誘電体にサファイアを使用した衛星搭載用水素メーザの開発したが、必要な大きさのサファイア結晶を作ることが難しく、共振器周波数の温度変化率が大きく、さらにコストが高いことなどが問題である。

③磁気シールドの軽量化

磁気シールドはパーマロイ等の高透磁率の材質で作られるが、密度が約 8g/cm^3 であり鉄と同程度以上である。磁気シールドの厚さは1~1.5mm程度で、通常のTEO11円筒共振器の4重磁気シールド総重量は30~40kgにもなる。したがって、宇宙空間での磁場変動を考慮して十分な磁気シールド率を確保しながら重量を最小にするために、シールド材の厚さとシールドの層数を最適化することが必要である。

温度特性の改善

共振器周波数の安定化は、水素メーザの周波数安定度に直接影響する。このためには、共振器用恒温層の温度制御回路の改善、共振器周波数の温度変化率の改善が必要であるが、 $1/10,000^\circ\text{C}$ の温度制御は容易ではなく、温度制御以外に共振器周波数を安定化する方策が必要になる。

共振器周波数の安定化以外にも、水素ビーム量制御回路、高周波放電回路および静磁場コイル用定電流源等の温度特性についても現在より一桁以上の改善が必要である。

耐打上げ時機械的衝撃特性の改善

打上げ時の機械的衝撃および振動により、共振器周波数のずれと水素ビームの軸ずれが生ずる。共振器周波数と水素原子の遷移周波数のずれが共振器周波数の半値幅より大きくなると水素メーザの発振パワーの減少や発振停止などの問題が発生するため、共振器高さの変化を極小に抑える必要がある。また水素ビームの軸ずれによっても発振パワーの減少や発振停止などの問題が発生するため、機構部品の固定方式を改善する必要がある。

また、水素放電管や水素蓄積球のようなガラス製部品の機械的強度の改善や機械的衝撃による磁気シールド率の劣化も検討する必要がある。

(6) 研究計画

水素メーザ本来の特徴である高い周波数安定度を維持しながら、小型・

軽量化、低消費電力化、耐宇宙環境特性の改善を図り、将来水素メーザの衛星搭載計画が具体化したとき対応できる技術的基盤を確立する。

実際に開発するプロトタイプの大きさ、重量、周波数安定度等の仕様は共振器の構造によってかなり変わってくる。表4-3はフルサイズ共振器、ループギャップ型共振器、サファイア共振器を採用したときの、期待される主な仕様である。衛星ミッション、衛星計画による要求性能から最適の構造が決まる。

スケジュールの一例と各年度に行う主な技術開発課題は以下のとおりである。

初年度	水素供給系、水素ビーム発生部、真空系
2年度	共振器系、静磁場発生系、磁気シールド系
3年度	受信・位相同期系、その他電子制御系
4年度	総合試験

将来への発展の課題

上述は基本技術を確認するものであり、実際に衛星に搭載する水素メーザの開発は、水素メーザを搭載する衛星計画が具体化してからになる。この際、水素メーザの具体的な仕様（周波数安定度、大きさ等）は搭載ミッション、衛星バス等を考慮して最適化すべきである。諸外国においても、衛星搭載用水素メーザの開発には長期間を費やしており、実際に搭載する段階で挫折しているものも多い。

このような現状を踏まえると、衛星搭載用水素メーザの開発については我が国に経験がなく、実際の衛星搭載用機器の開発の難しさ、問題点を把握することは困難である。したがって、衛星搭載用水素メーザは長期的に基礎から研究開発していくべきものと考えられている。

参考2 衛星群時刻管理技術の開発（執筆担当：飯田専門委員）

(1) 精密周波数／時刻比較技術とその課題

遠隔地点間の周波数／時刻比較技術は、原子時計の発展、電波航法システムの出現により、1950年代より発展してきた。当初は、オメガやロランC等の広域の地上電波航法用信号を遠隔多地点で同時に受信し、それを仲介にすることにより比較が行われてきた。

その後、宇宙技術の進歩に伴い、周波数／時刻比較法の進展も著しく、1960年代半ばより人工衛星の利用が進められ、比較精度の向上が図られてきている。図4-8に衛星を用いた周波数／時刻比較法を示し各々の概要を以下に記す。

①衛星信号仲介法

衛星から送信される信号を多地点で同時に受信することにより、遠隔地点間の時計の時刻・周波数の比較を行うものである。従来の地上の電波航法信号やTV同期信号を仲介とするものと同じ考え方であり、衛星の位置情報や受信点位置情報が高精度であることが必要であるため、高精度な時刻比較は困難である。

②衛星中継片送り法

時刻比較を行う一局から相手局へ衛星中継で信号を伝送し時刻比較を行う方式で、①と同様に、衛星位置、受信点位置の精度が時刻比較精度に直接影響するため高精度管理は困難である。時刻比較というよりも、放送衛星や気象衛星による標準時の広範囲な供給が多い。

③衛星搭載時計仲介法

衛星に搭載された時計を原振とした信号を仲介として周波数／時刻比較を行うもので、GPSでの周波数／時刻比較がこれに相当する。搭載時計の安定度、衛星位置、受信点位置誤差、及び伝搬媒質の影響などが課題であり、GPSでは、これらの影響軽減のため、Common-view法（同時に同一のGPS衛星を受信する方式）が用いられている。

④衛星中継双方向伝送方式

周波数／時刻比較を行う局から相手局に対して相互に衛星中継で比較用信号を伝送しあう方式で、現在最も高精度な方式の一つである。この方式では、双方の信号がほぼ同一の伝搬経路を通過するため、相殺され、また、衛星の位置の不確定性や変動も打ち消されるため、高精度比較ができる。さらに、衛星上で同一中継器の同一帯域を双方からの信号が共有でき、中継器内での誤差も無し得る。本方式は、次世代の国際時刻比較法として各国のT & F機関で実証実験や新型時刻比較用装置の開発／実験が行われている。

以上のほか、VLBIを用いた時刻比較（時刻比較精度0.1 ns程度）、レーザーパルスを用いた時刻比較（衛星上で到来レーザーパルスの時間間隔を測定；精度1 ns程度）など特殊例があるが、定常運用には至っていない。

(2) 比較精度、確度と課題

宇宙技術、特に衛星を用いた高精度周波数／時刻比較技術における性能（精度、並びに確度）に影響する要素をまとめたものを表4-4に示す。これらの内、送受信装置等の電子回路に起因する要因は、高精度化のため最も重要、かつ、補償が困難なものである。特に、サブns以下での実現は重要な開発課題である。

(3) 研究の経緯と現状

周波数／時刻管理

CRLは、現在10台程度の原子時計を保有し、各原子時計の性能に応じた重みづけ平均を行う独自のアルゴリズムによる計算でCRLの協定世界時（UTC（CRL））を決定している。

こうして決定されるUTC（CRL）は、GPS国際時刻比較ネットワークにより国際比較がなされ、TAIやUTCの決定に寄与するとともに、実時間ローカルUTC、日本の標準時（UTC（CRL）を9時間シフトしたもの）として日本全土に提供される。

UTC（CRL）は、良好な長期的安定性を有して維持されている。

精密周波数／時刻比較

CRLにおける宇宙技術を用いた時刻比較の歴史は古く、1960年代から開始されているが表4-5には1970年代中頃以降の経緯を示す。

(4) 今後の計画

開発目標

目標とする衛星測位システムの全体像の設定が問題であるが、

- ・実時間で単独測位により1 m以内の測位精度
- ・搭載原子時計として平均化時間10,000～100,000秒で1～3×10⁻¹⁵程度の安定度の水素メーザー型周波数標準器

を想定し、そのための搭載原子時計との周波数／時刻比較技術に必要な基本仕様として以下を設定する。

- | | |
|---------|-------------------|
| ①時刻比較精度 | 10 ps 10 min.平均 |
| ②時刻比較確度 | 100 ps以内 |
| ③長期安定性 | 確度以内（校正システムによる補償） |

また、同システムは、利用者に対しては、測位用測距信号として利用できるもの考えるべきである。

方式と技術開発課題

高精度周波数／時刻比較方式として、衛星－地上間双方向伝送高精度

周波数／時刻比較法を基本とし、かつ、搬送波位相を利用する（図4-9参照）。

これは、

双方向伝送 ———> 伝搬媒質（電離圏・大気圏）や衛星位置誤差を相殺

搬送波位相利用 ———> 比較的狭帯域で高精度比較が可能であることなどを考慮したことによる。

また、信号処理系（周波数／時刻比較）は、安定性・再現性を考慮し極力デジタル処理を基本としてシステム設計を行う。さらに、衛星系、地上系共に電子回路の遅延変動（局内遅延変動）を補償するための校正システムを構築するかが重要な技術開発課題である。

開発スケジュール例

初年度	基本設計 コヒーレント変復調系
2年度	デジタル信号処理系（搬送波位相測定） 校正系
3年度	実証実験系 長期間実験による安定性評価

参考3 高精度衛星軌道決定技術の開発（執筆担当：北原専門委員）

1970年に打ち上げられた我が国初の人工衛星「おおすみ」以来、日本から打ち上げられたほぼ全ての人工衛星の追跡及び軌道決定／予報等の軌道計算業務は宇宙開発事業団が行なっている。

この軌道計算業務は、筑波宇宙センター内にある中央追跡管制所を中枢として、勝浦、沖縄、増田の各追跡管制所及び宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所により構成された追跡管制網により実施されている。

また、これから本格化する宇宙ネットワーク時代に対応するため、ETS-VI、COMETSを利用した衛星間通信試験用として、4way 測距データを処理する宇宙ネットワーク軌道決定システムが整備された。

さらに、2000年代に必要とされる地球観測衛星等の高精度な軌道決定要求に応えるために、GPS及び衛星レーザ測距を利用した高精度軌道決定システムの整備が計画されている。

(1) 宇宙開発事業団における軌道決定技術の現状

① NOCS

宇宙開発事業団の軌道決定の根幹となるシステムは、NOCSと略称されており、MOS-1以降の低中高度衛星、静止軌道衛星運用に対応するため、1985年度から運用を開始した。

NOCSは、トランスポンダを搭載した衛星に対して各追跡管制所で電波リンクにより距離及び距離変化率データ及びドップラデータ等を取得し、それを最小二乗法により処理し衛星軌道を推定するバッチプログラムである。このNOCSの構成図を図4-10に示す。

NOCSの現状における軌道決定精度は、低中高度衛星で衛星位置精度150m (3 σ)、静止衛星では1km (3 σ)である。

② 宇宙ネットワーク対応型軌道決定システム

ETS-VIの衛星間通信実験及び、将来の宇宙ネットワーク運用に対応した軌道決定システムとしてSNOCSが整備された。

SNOCSは、宇宙ネットワーク実験局からデータ中継衛星(COMETS, DRTS等)を介したユーザ衛星までの4way RARRデータを取得し、それを最小二乗法により処理しデータ中継衛星とユーザ衛星の軌道を推定するバッチプログラムである。SNOCSによる軌道決定の概要図を図4-11に示す。

③ 実時間軌道推定システム

RTEPは、トランスファ軌道から静止軌道への液体アポジ推進系を使用した軌道変換、すなわちAEF中における衛星軌道、並びに推力方向を実時間で推定し、モニターする実験プログラムである。

ETS-VIにおいて初めて実験的に運用し、国内主局の2Way ドップラー

データ、国内従局及び深宇宙探査ネットワークのキャンベラ局の3Way ドップラーデータを使用して、実時間軌道推定を行ない、当初の設計要求を満たすことを確認した。今後は、モニター機能の充実、運用の柔軟性を計り、COMETSを始めとする今後の宇宙機に対応する計画である。

RTEPによる軌道決定の概要図を図4-12に示す。

(2) 将来計画

①高精度軌道決定システム

将来の地球観測衛星等では、高分解能センサ等のデータ解析のために現状の電波リンク距離及び距離変化等RARRデータでは到達不可能な高精度軌道決定の要求が考えられる。特に、高度計搭載ミッションにはセンチメートルオーダの高精度な軌道位置決定が必要となる。

NASDAでは、1999年度に打上げ予定のADEOS-IIに、GPS受信機及びCCRを搭載し、対応した高精度軌道決定実験を行うためにHATSを整備することを計画している。本システムは、軌道観測システムと高精度軌道決定ソフトウェアから成る。

軌道観測システムは、地球周回衛星の測位精度が最も高いGPS干渉測位システムとSLRを利用する。表4-6に軌道測位方式と到達位置決定精度を示す。高精度軌道決定ソフトウェアは、現行の軌道決定システムで培った技術をベースとし衛星運度モデル、観測データ補正モデルの高精度化を図る。なお、HATSは、2001年度頃に打上げ予定であるALOSの実運用にも供する計画である。

HATSの概要図を図4-13に示す。

HATSの軌道決定精度は、低中高度衛星で衛星位置精度25cmを目標としている。

②測位衛星システム対応軌道決定システム

測位衛星システムでは、高精度且つリアルタイムに測位衛星の軌道を推定しなければならない。

例えばGPSの軌道は、IGSで、汎地球上に展開したGPS地上受信機網のデータを使用して、20～50cmの精度で精密暦を計算している。宇宙開発事業団でも、これに必要な技術は前述の高精度軌道決定システムと実時間軌道推定システムの整備、実験を経て技術が確立されれば可能であり、現在、測位衛星システム対応軌道決定システムの要求条件の検討を行っている。

5. まとめ

衛星測位技術分科会では、衛星測位システムの現状と問題点、衛星測位に対するニーズ及び将来動向の予測並びに我が国が取り組むべき技術開発課題について各分野の専門家による審議を行い、以下の様な知見及び結論を得た。

現在、全世界的に稼働している衛星測位システムは、米国国防総省が管理運用しているGPSとロシア連邦国防省が管理運用しているGLONASSの2種類であり、いずれも、軍用に開発されたシステムであり、その利用の一部が民生用に開放されている。

米国は、1996年3月に発表したGPSに関する米国政府の新政策（大統領決定）により継続的な無償利用を保証するとともに、10年以内にS/Aを廃止（ただし米国政府は、軍に対しS/A廃止に向けての十分な準備期間と資金を提供する）することとした。またGPSを世界の衛星測位の標準とすることを提唱し将来のGPSBlock II F衛星まで計画している。

ロシアは、GLONASSを1995年に完成させ測位信号を1996年から15年間、民間に無償開放することとしている。

欧州は、GNSS1として、オーバーレイ方式によるGPS/GLONASS増強計画を進行させており、また内容は明確ではないもののGNSS2として静止衛星と周回衛星を組み合わせた将来型民間衛星測位システムを検討している。

実用化しているGPS、GLONASS共に地理的条件により信号が途切れる問題、太陽活動最盛期の精度劣化問題、地上との電波干渉問題といった利用面での技術的問題があり、同時に軍民両用システムに起因する問題、国際標準化の問題等、制度面での問題もある。

従って、両システム共、衛星測位システムとして望まれる完全性（世界中どこでも利用中に必要な精度が保証される）、定常性（精度高いサービスを途切れることなく使用できる）、公開性（誰でも自由に利用できる）の3条件を担保しているとは言い難い。

衛星測位システム構築上、基礎となる衛星搭載用原子時計、時刻管理技術及び高精度軌道決定技術について我が国の現状は次のとおり。

原子時計は、CRLで水素メーザ時計の研究を実施しており、必要な周波数安定度は得られているが、衛星搭載のためには、耐振動特性、耐熱真空特性、耐放射線特性の改善、小型軽量化及び低消費電力化等に課題が多い。

衛星群の高精度時刻管理技術は、我が国に経験がない、未知の技術であり、ETS-VIIで原子時計を搭載した衛星測位要素技術試験が計画されている。

軌道決定技術は、NASDAでのこれまでの衛星軌道決定技術の実績を基に開発可能である。実時間軌道決定については、ETS-VIにおいて既に試験を実施し、今後の衛星でも更に実験を計画しているが、未だGPSの精度

を上回るサービスの実現には課題が多い。

衛星測位利用面では、我が国においては、GPSが幅広く利用されている。建設、測量、地殻変動観測では、GPSが主流技術として不可欠なものになっている。農林業では、まだ研究段階で普及してはいないものの、利用の潜在的ニーズは高い。陸上交通では、カーナビゲーションが広く一般に普及して、一つの産業として発展しつつある。海上航行システムや航空管制システムにも安全な航行にGPSは利用されつつあり、更に宇宙開発でも衛星の高度推定及び軌道決定に利用されている。

このような状況の中で利用者は、完全性、定常性及び公開性が担保された完全な衛星測位サービスを望んでおり、その手段としてGPS自身の発展、利用技術の向上及び我が国での衛星測位技術の開発が必要と考えている。

技術開発側は、衛星測位技術はGPS補完方策の一つとして有効で、我が国の基礎技術として確立すべきであり、国際協力面での技術貢献にも必要と考えている。

衛星測位を巡る諸事情を考慮して、5つのシナリオを立案し、各々の長所・短所を検討した。

シナリオ1

将来にわたって海外衛星測位システムを利用するのみで、衛星測位技術を開発保有しない。

シナリオ2

GPS利用を基礎とするが、最も基礎となる3技術のみを開発し最小限の数の衛星により実証する。

シナリオ3

GPS補完を基本として、GPSなしでも我が国周辺の地域的な衛星測位システムサービスが可能な技術を衛星により実証する。

シナリオ4

シナリオ3に加えて移動体通信ミッションと複合化し、GPSにはないサービスが可能な技術を衛星により実証する。

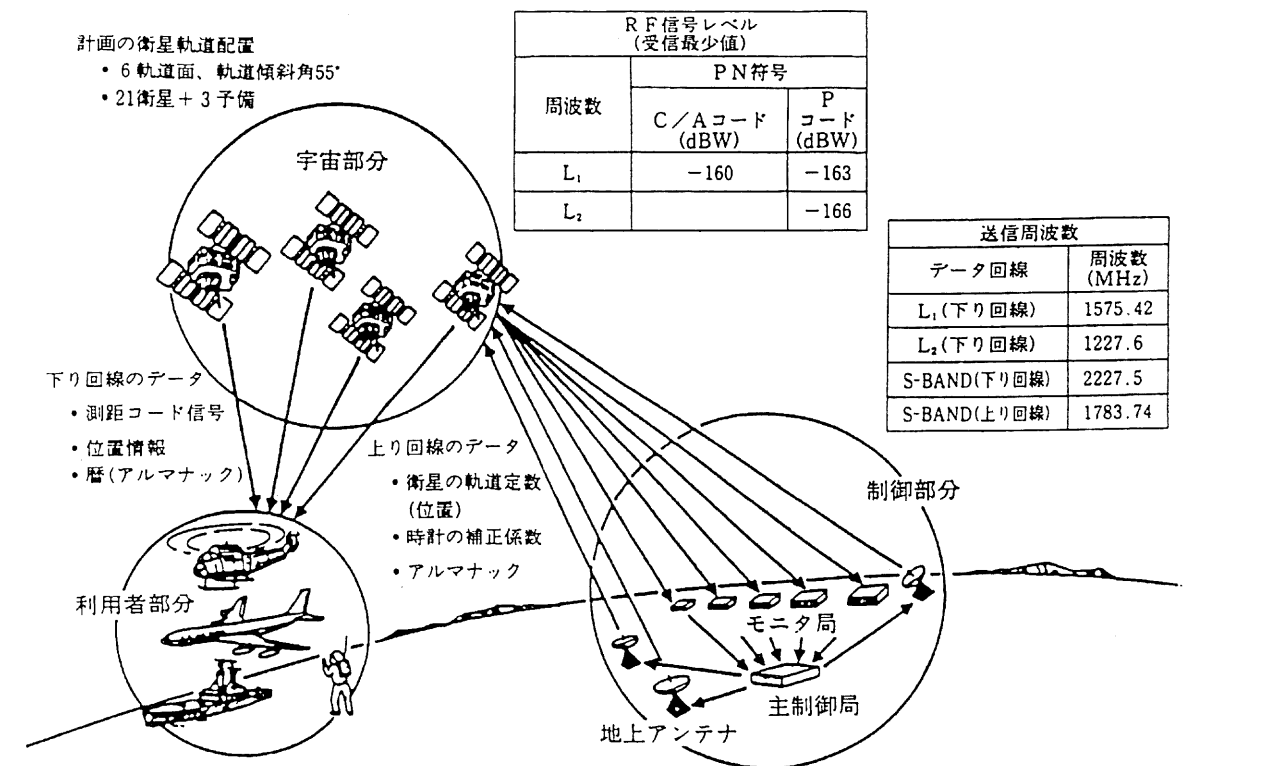
シナリオ5

GPSを考慮しつつ、世界規模の新しい民生用衛星測位システムを国際協力プロジェクトとして開発するために必要な技術を衛星により実証する。

現在、我が国の衛星測位を巡る国際的な環境等には不確定な部分があることから、当面はどのような状況にも対応できるよう衛星測位技術の開発方針としてシナリオ2により開発を進めるべきである。

我が国では、ETS-VII等によりシナリオ2の技術開発は緒についたばかりであり、ETS-VIIの衛星寿命、必要な技術開発期間を考慮し、更に国際機関によるサービス提供についての議論が行われる可能性も配慮すると早急に技術開発を本格化する必要がある。

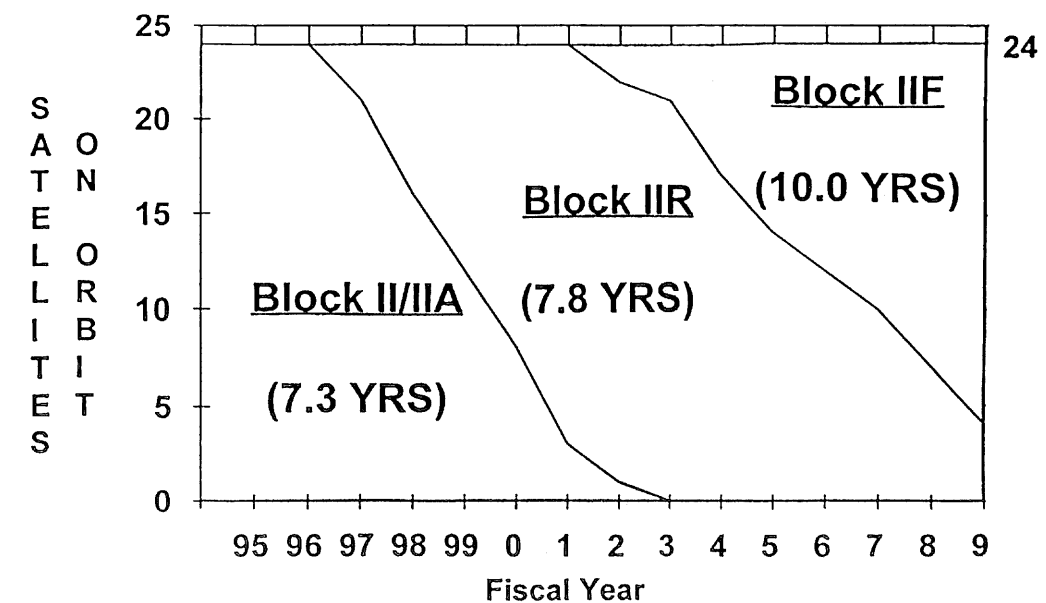
シナリオ2開始後も衛星測位を巡る環境変化に対応して他シナリオへの移行も視野に入れながら慎重な検討を継続する必要がある。



出典：Magnavox社、IEEE Report

図2-1 GPSの構成図

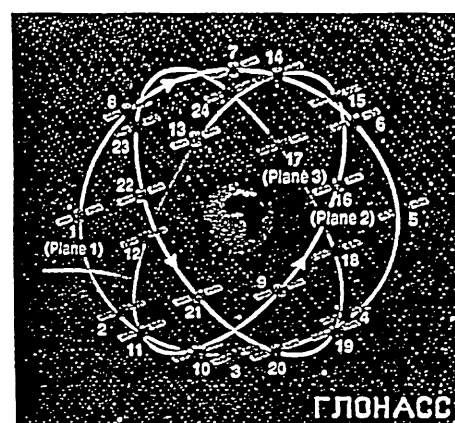
GPS BLOCKS (Current Life Estimate)



出典：95.9 第26回CGSIC議事録

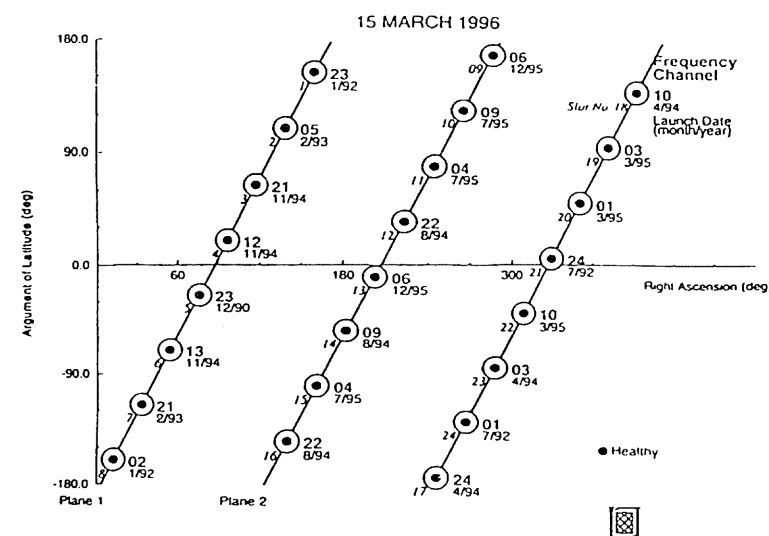
図2-2 GPS打上げ計画図

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM GLONASS



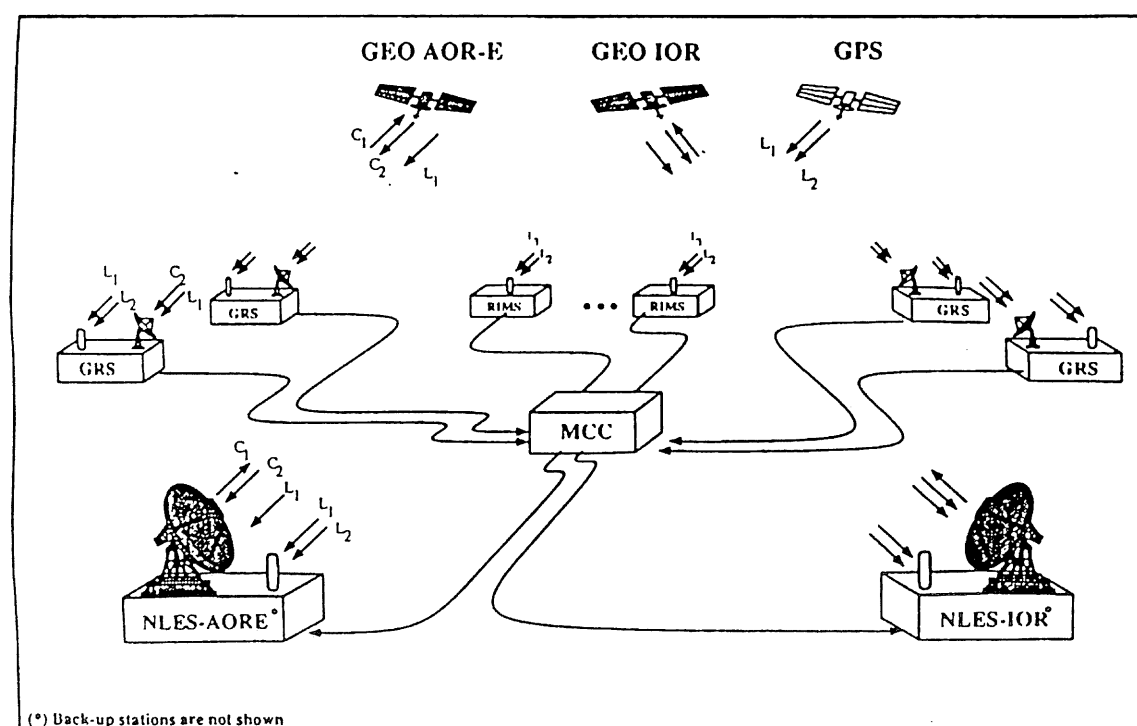
PRATAP MISRA
MIT LINCOLN LABORATORY

GLONASS DEPLOYMENT



出典：英国リーズ大学ホームページ

図2-3 GLONASSの概要



(*) Back-up stations are not shown

出典：96.4 CGSIC/IISC スウェーデン会議議事録

図2-4 EGNOS構想

	Present	GNSS 1 IOC	GNSS 1 FOC	GNSS 2 IOC	GNSS 2 FOC
Tripartite Group		Develop and operate EGNOS to IOC	Develop EGNOS to FOC		
Policy Office	Set up	Facilitate negotiations with DoD Propose strategy for GNSS 2 Negotiate with potential GNSS 2 service providers Ongoing policy consideration including preparation for commercial service provision			
Consultative Office	Set up	Assess user requirements and assess whether service is meeting those requirements Liaise with potential equipment manufacturers and service providers			
Development Office	Set up	Stimulate development of GNSS 2 including standardisation and certification Operate EGNOS after IOC Plan and manage transition to GNSS 2		Liaise with industry	
GNSS 2 Space Segment Provider (Inmarsat?)			Develop technology Launch and operate during transition		Launch and operate post-IOC
European Ground Segment Service Providers (Regional and Local)			Develop technology Implement and operate during transition		Operate post-IOC

出典：96.4 CGSIC/IISC スウェーデン会議議事録

図2-5 GNSS開発スケジュール概要

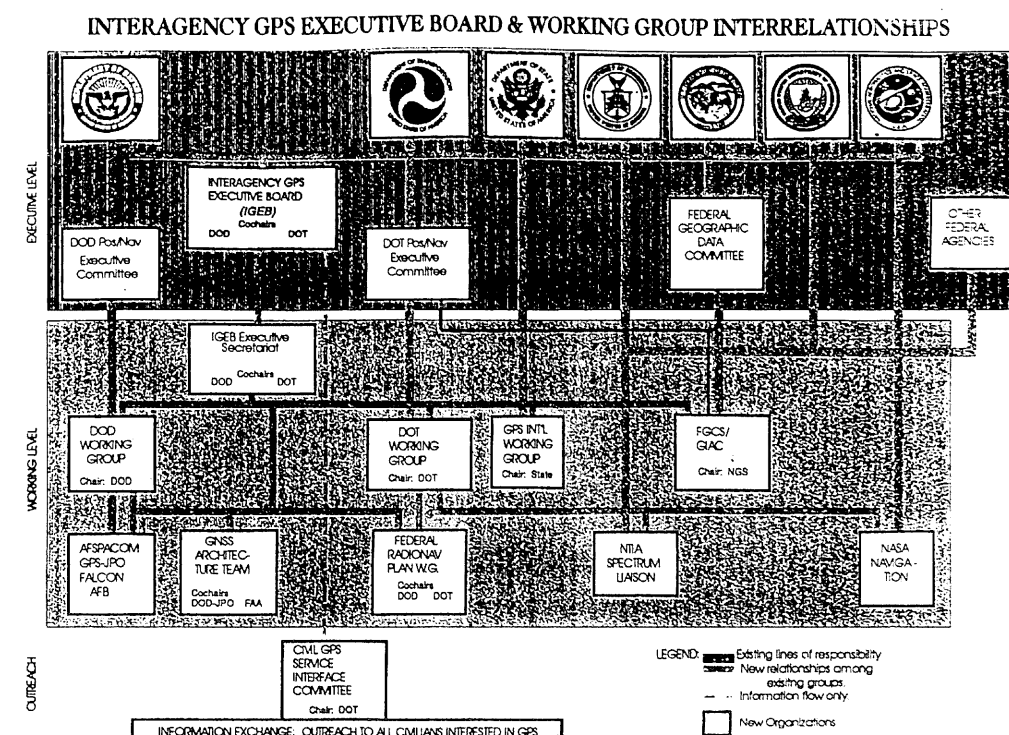


図2-6 IGEB体制

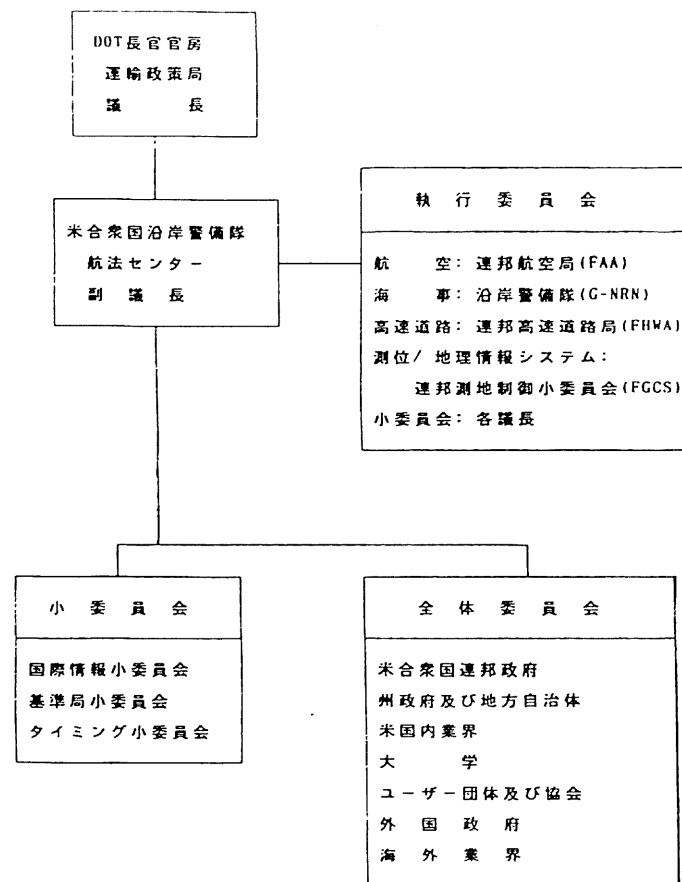
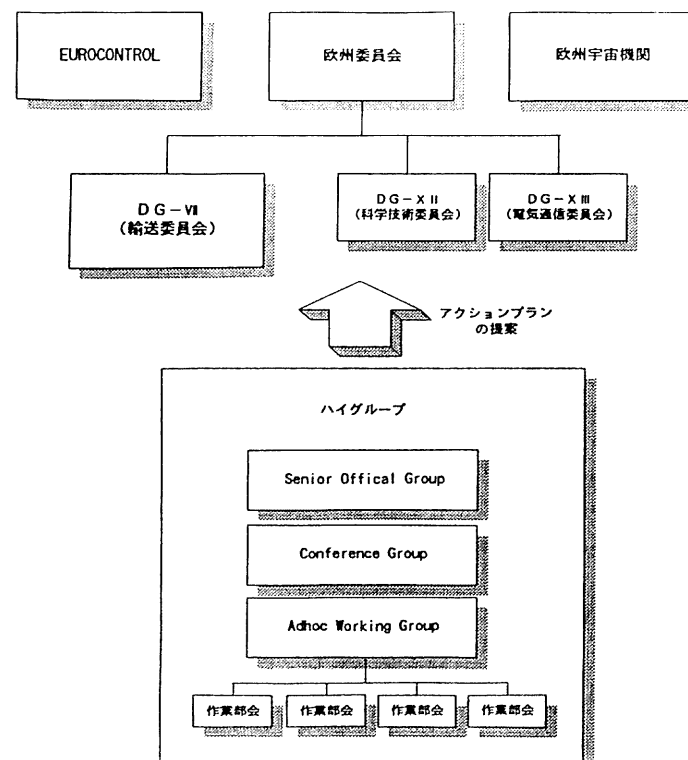


図2-7 CGS/C民間GPSサービス組織連絡委員会



「将来の全世界的衛星測位システムの在り方に関する調査研究会」報告書

図2-8 GNSSアプローチ体制

	GPS	GLONASS
水平方向	100m (95%) 300m (99.99%)	60m (99.7%)
垂直方向	156m (95%) 500m (99.99%)	75m (99.7%)

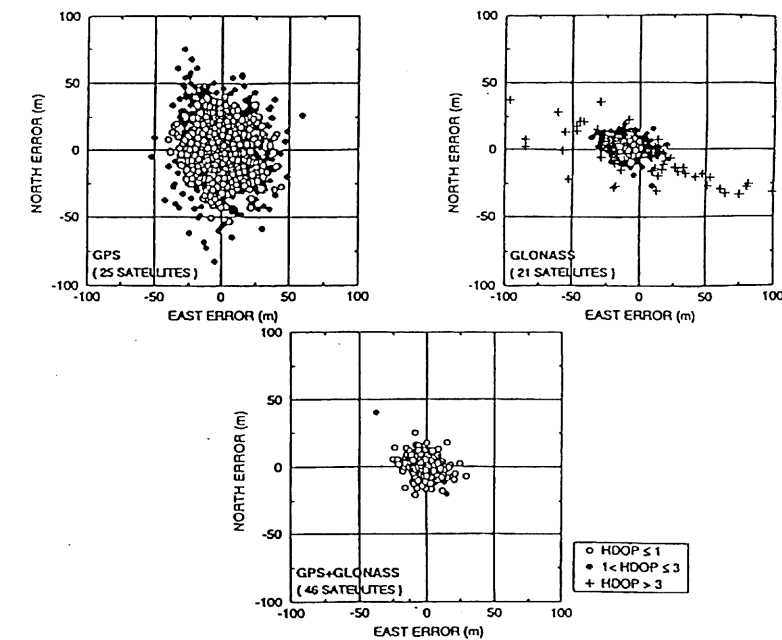


Figure 3. GPS & GLONASS Position Estimates (1-minute samples, 1 September 1996).

出典：英国リーズ大学ホームページ

図2-9 GPSとGLONASSの精度比較

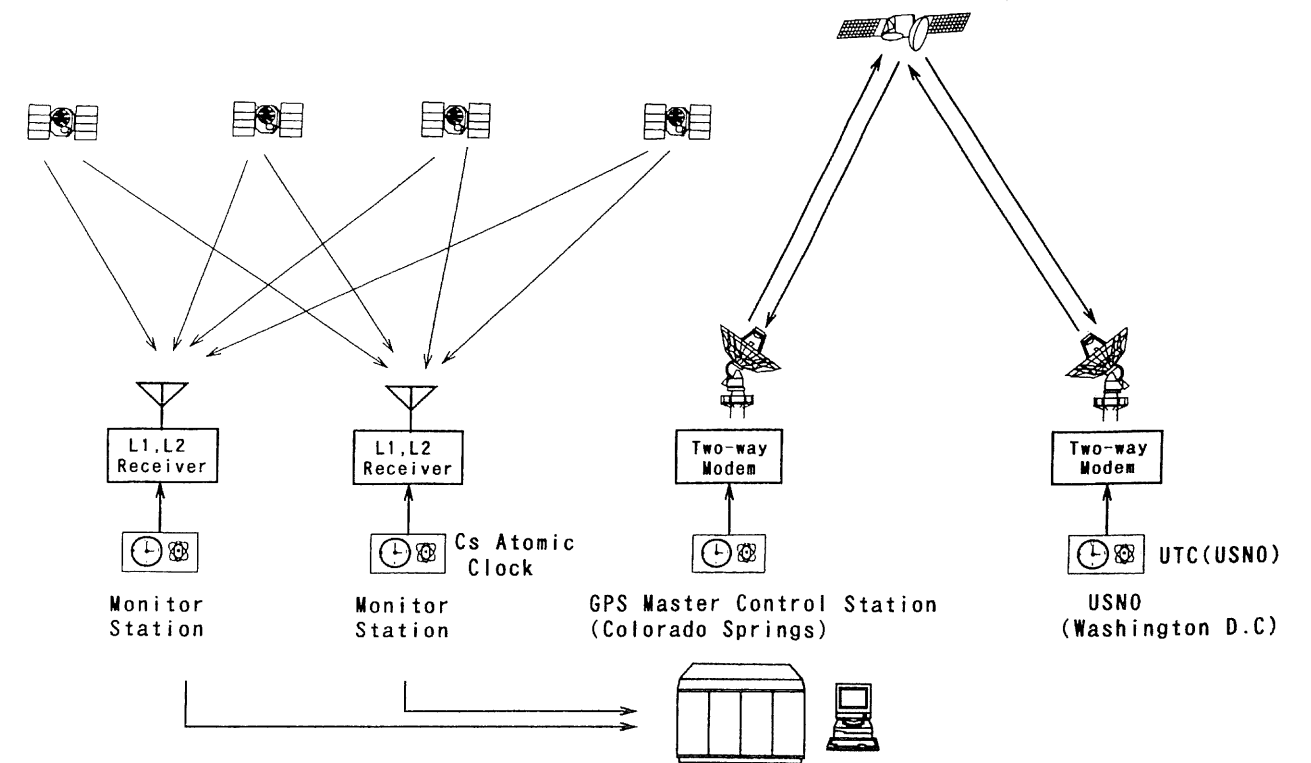
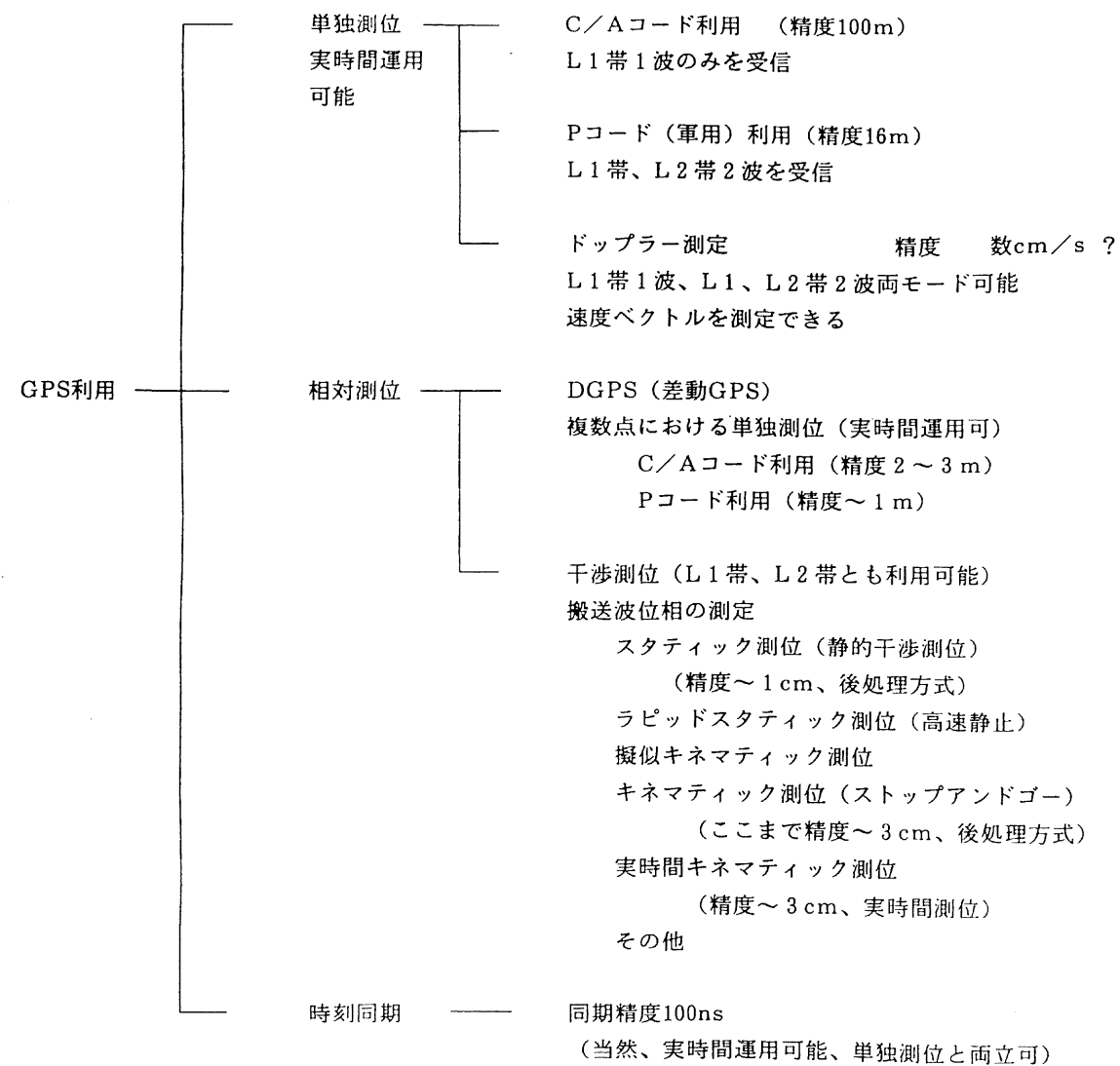
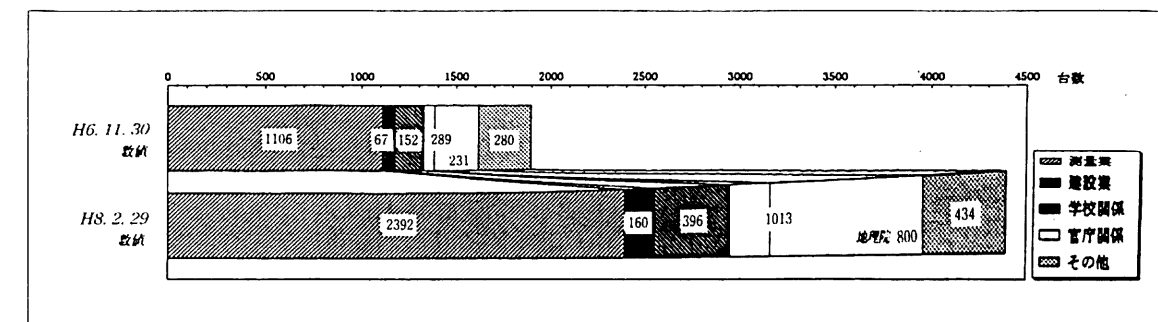


図2-10 GPSによる時刻管理システム



出典：GPS測定の基礎 （社）日本測量協会 著

図3-1 GPS測位の種類



出典：月刊誌「測量」平成8年9月号 （社）日本測量協会

図3-2 業種別普及台数比較

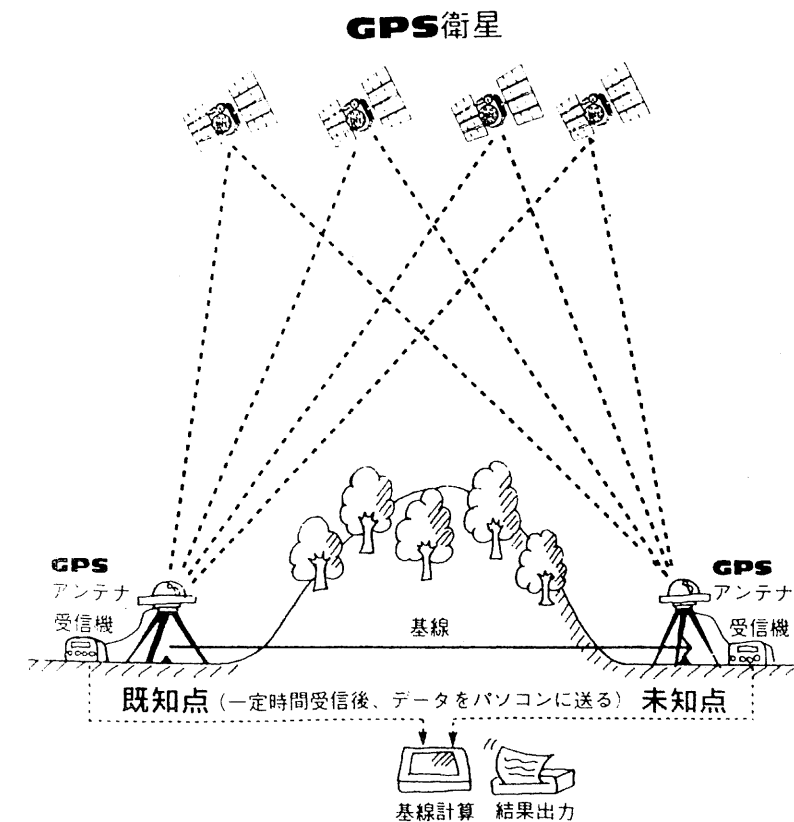
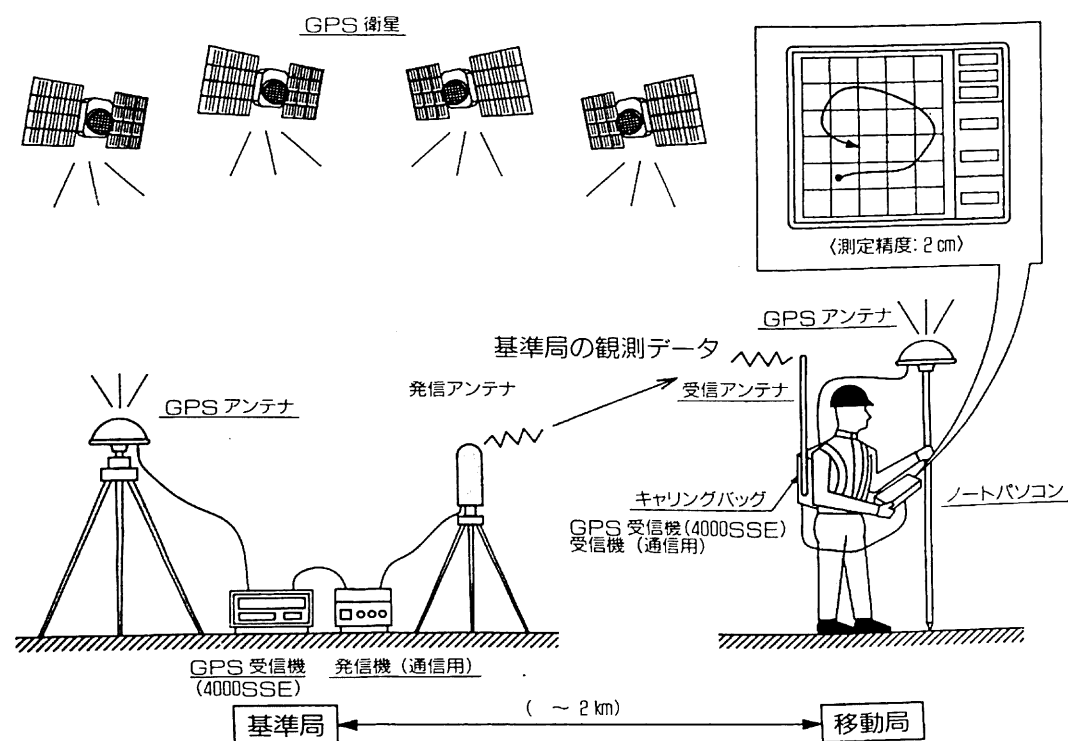


図3-3 GPSによる基準点測量

出典：実務者のためのGPS （社）日本測量協会

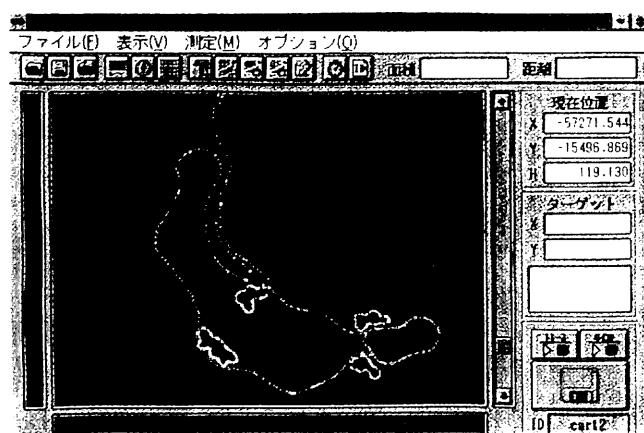


出典: RTK-GPSを用いた誘導型測量システム 三井建設株式会社

図3-4 RTKのシステム構成



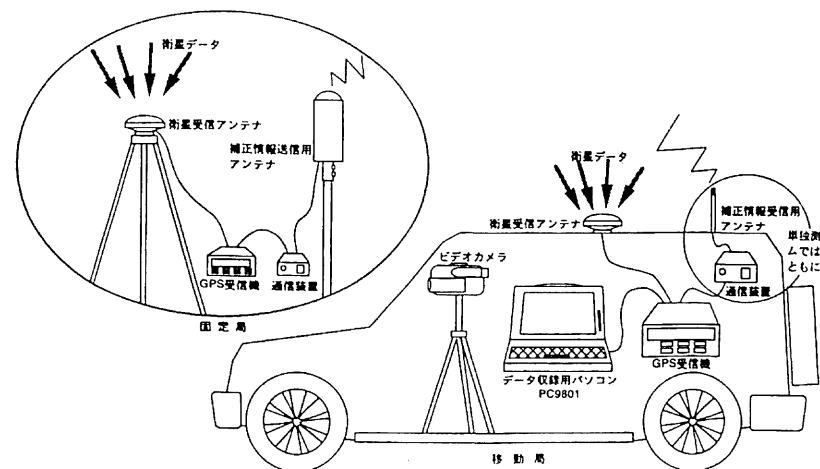
平面形状計測



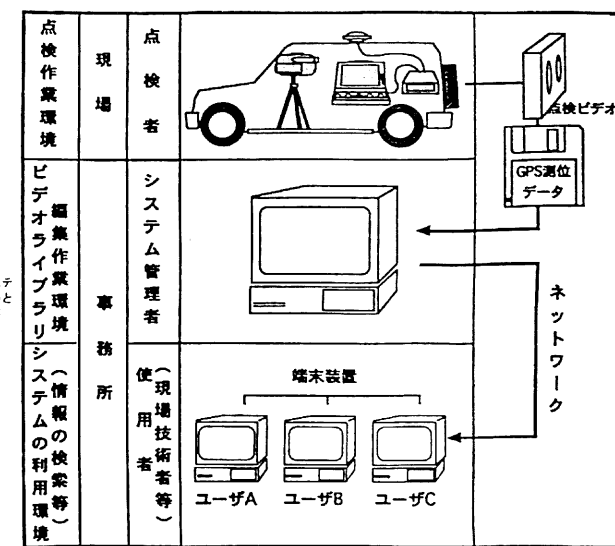
ゴルフ場での計測例

出典: RTK-GPSを用いた誘導型測量システム 三井建設株式会社

図3-5 応用計測例



GPS測位システム構成



GPSを導入したシステムの稼働環境

出典: GPSを導入することによる道路施設点検支援システムの効率化に関する研究 東京理科大学リモートセンシング研究所

図3-6 GPSを利用した道路施設点検支援システム

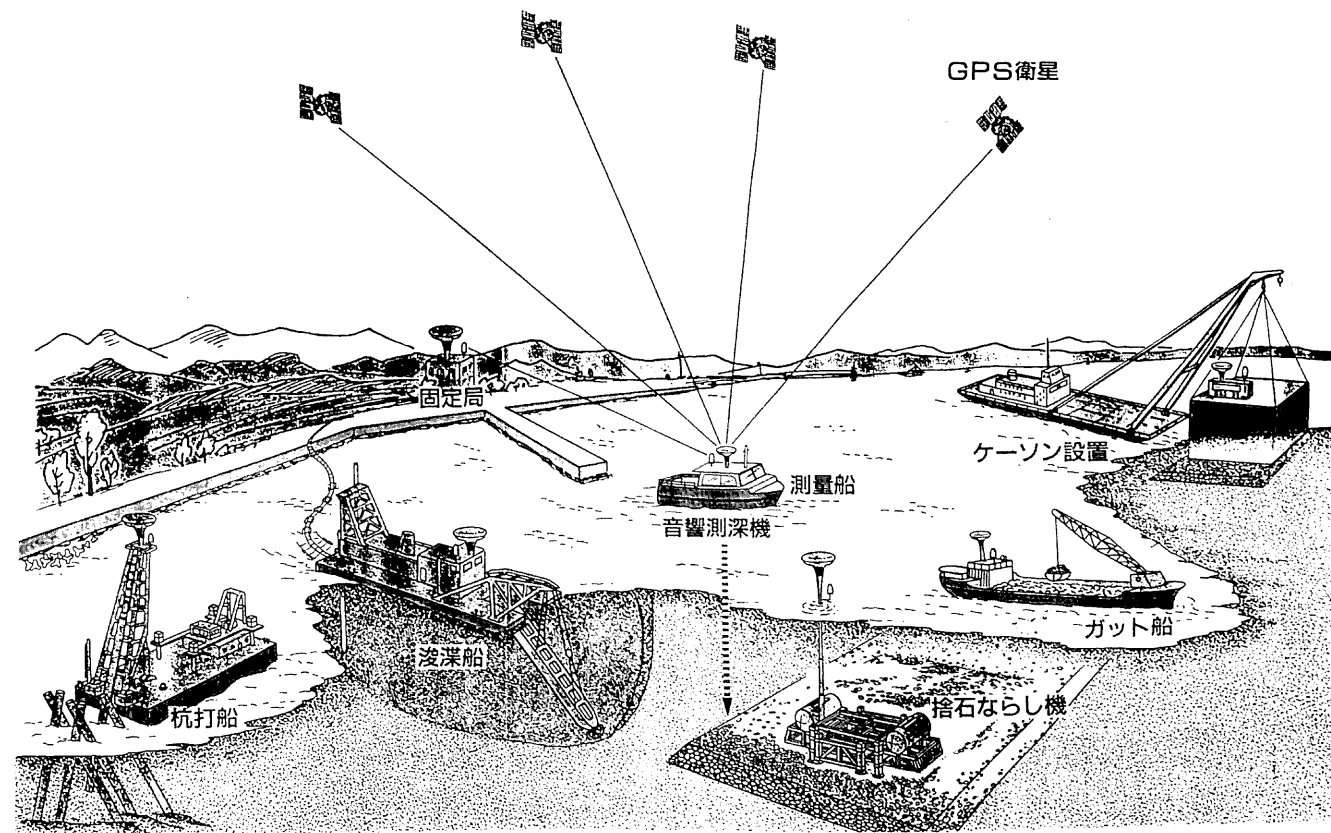
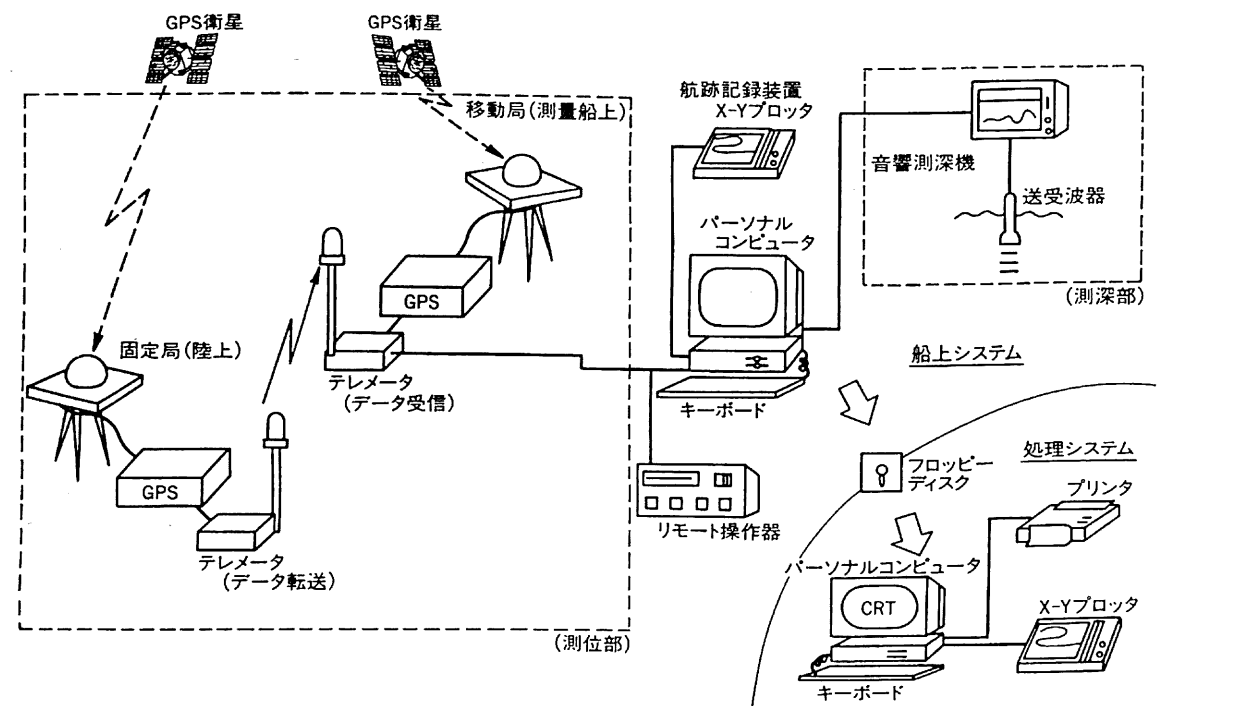


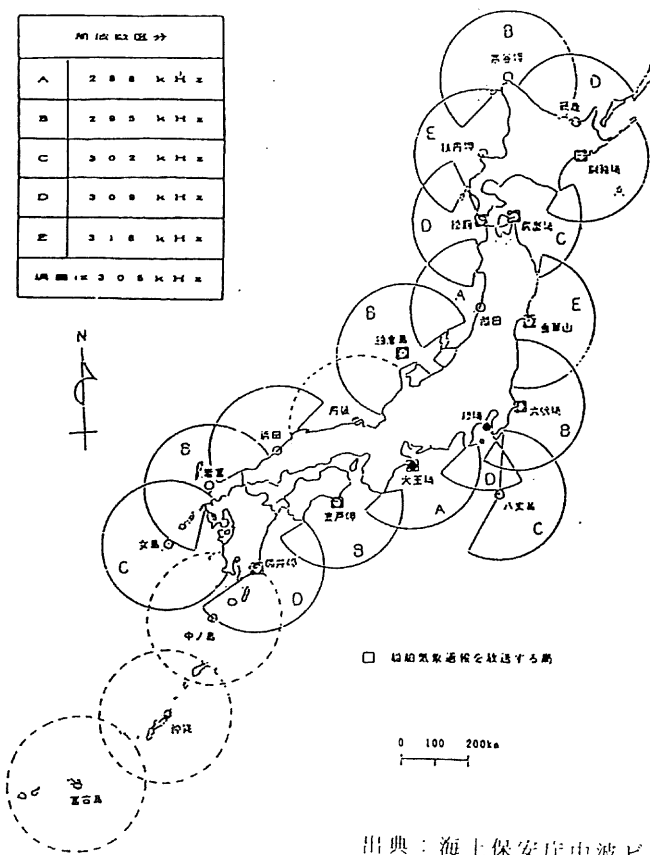
図3-7 海上工事における衛星測位利用

出典: 五洋建設(株) GPS利用による海上測位技術



出典：GPSを利用した自動水深測量システム 五洋建設株式会社

図3-8 GPS測位による自動水深測量システム



出典：海上保安庁中波ビーコンDGPS補正データ放送

図3-9 日本における中波ビーコン局の配置

北海道東方沖地震前後の地殻変動

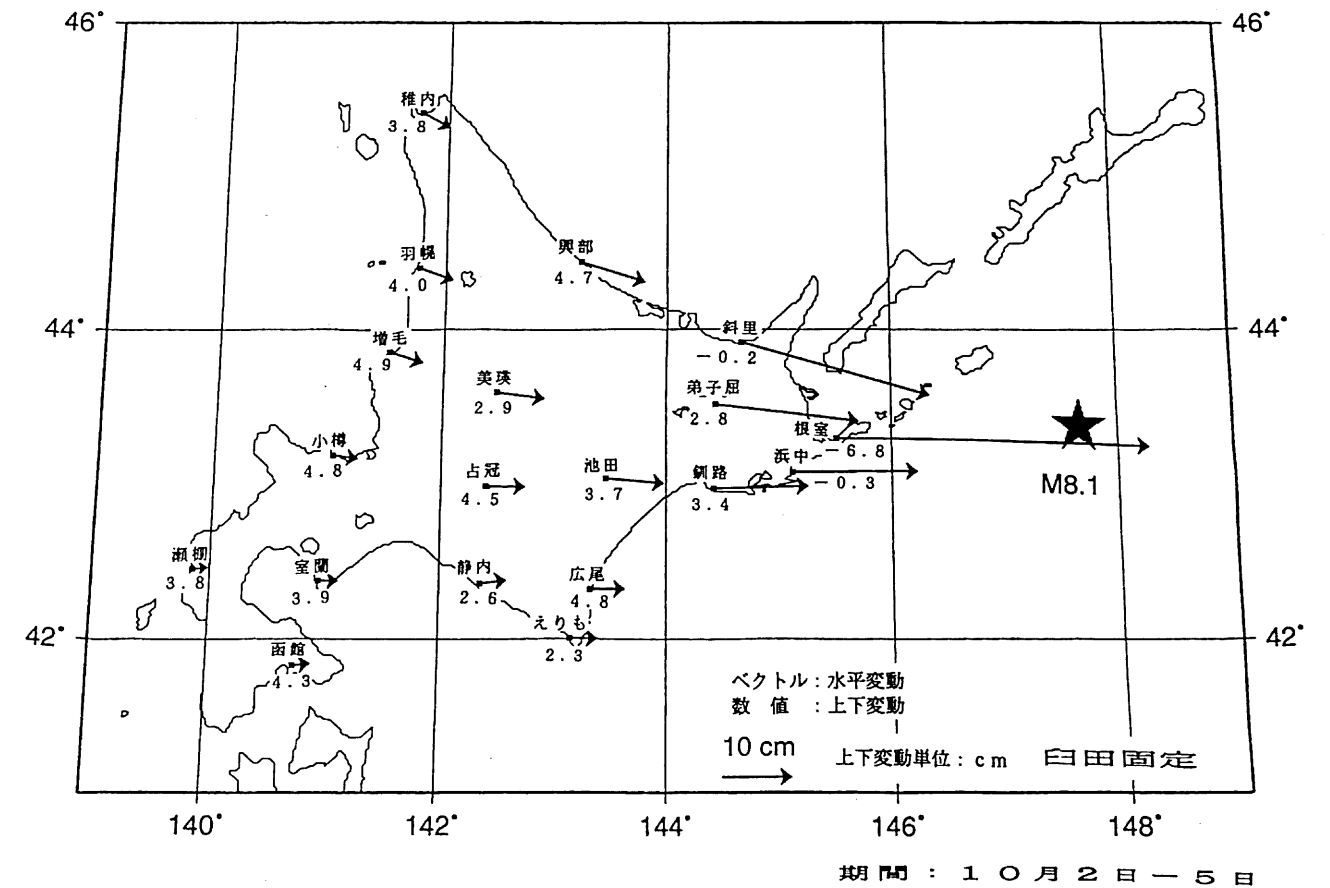


図3-10 地震前後の地殻変動

全国GPS連続観測点の年平均移動速度ベクトル

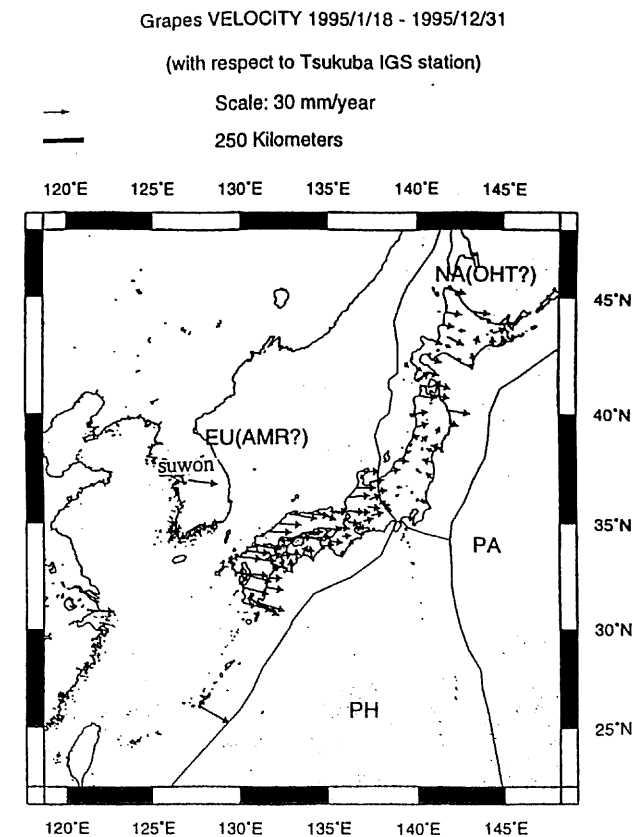


図3-11 プレート理論の見直しの必要性を示唆する証拠

電子基準点が捉えた地殻変動
房総半島の「ゆるゆる地震」

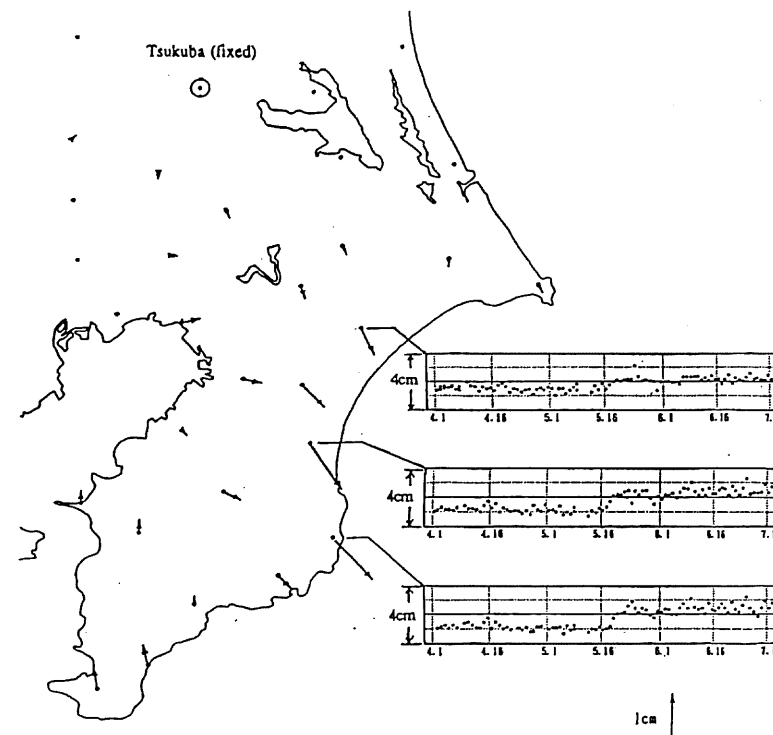


図3-12 房総半島における地震を伴わない地殻変動

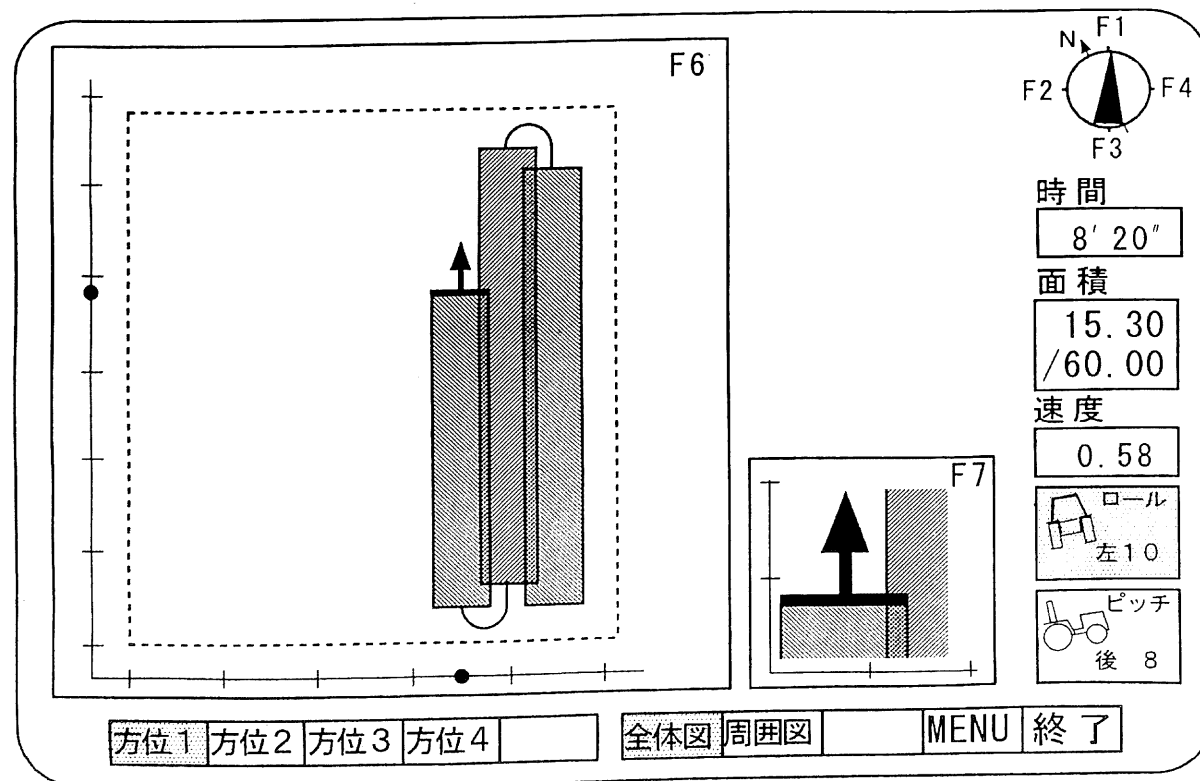


図3-13 農業用運転支援装置の情報表示例

出典: H. Auernhammer, T. Muhr: GPS in basic Rule for Environmental Protection in Agriculture, Automated Agriculture for the 21th century. ASAE. 1991

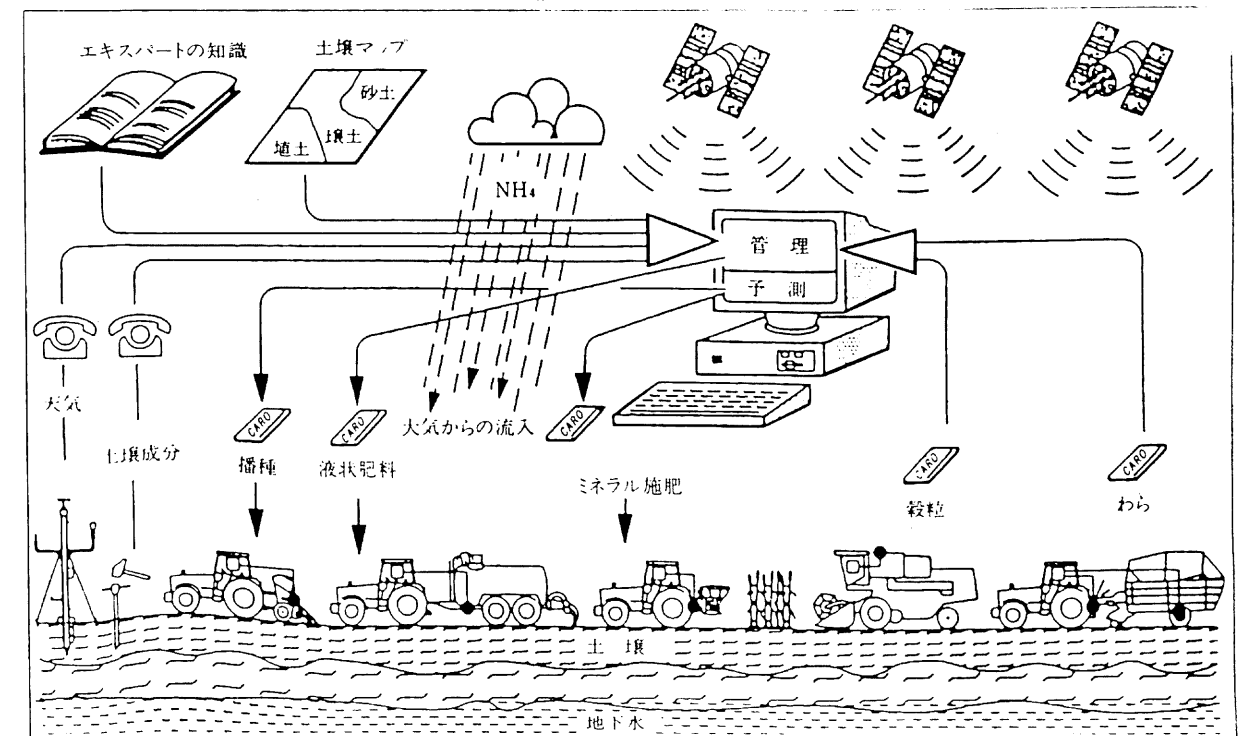
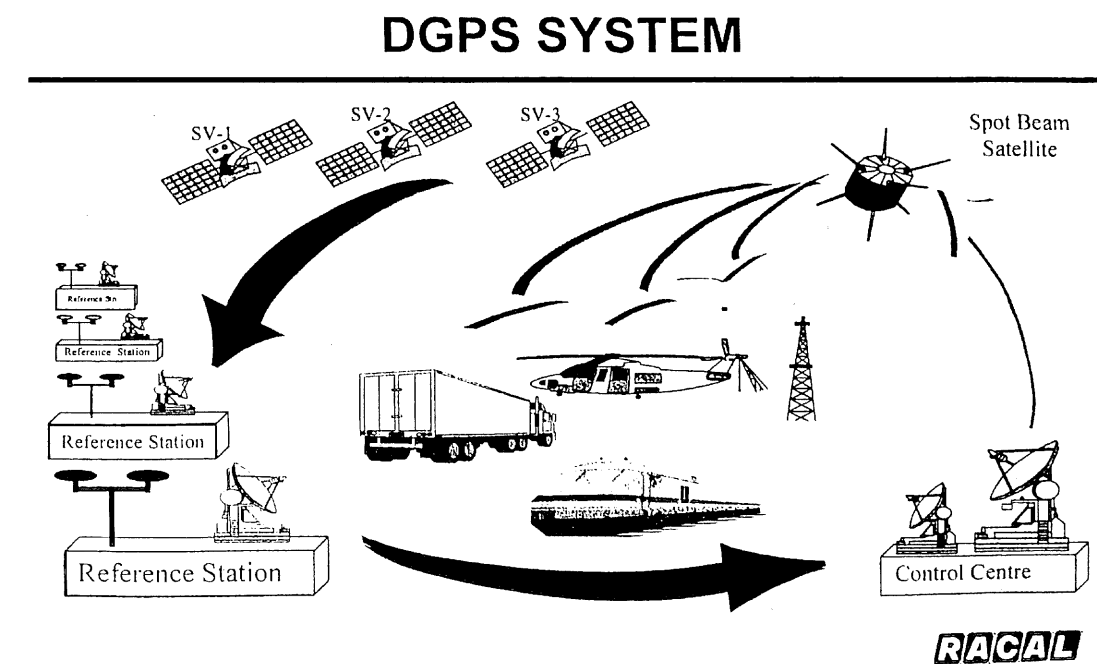


図3-14 PFシステムの概念図



出典: 96.12 CGSIC/IISCフランクフルト会議資料

図3-15 衛星通信を利用したDGPS&RTK精度増強サービス

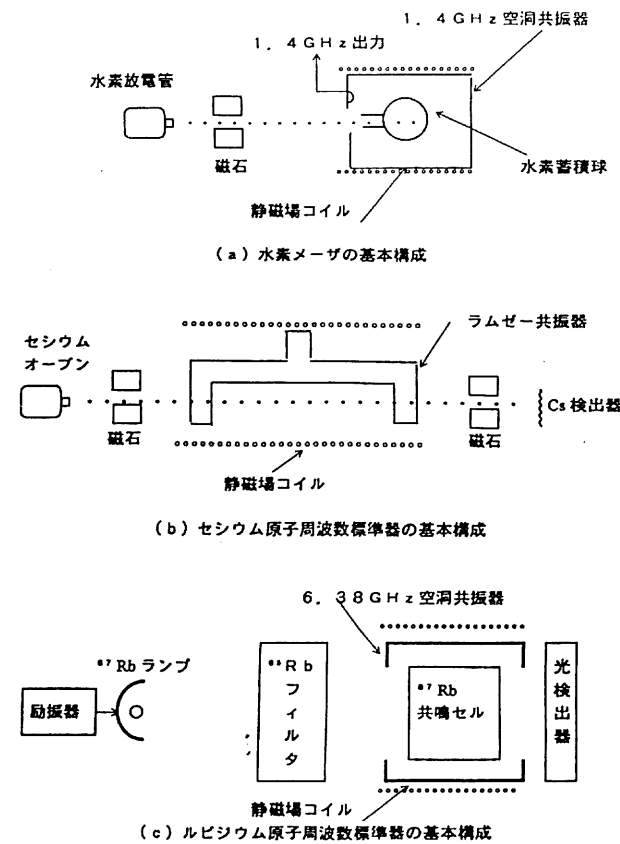


図4-1 ルビジウム、セシウム、水素メーザの原子周波数標準器の基本構成

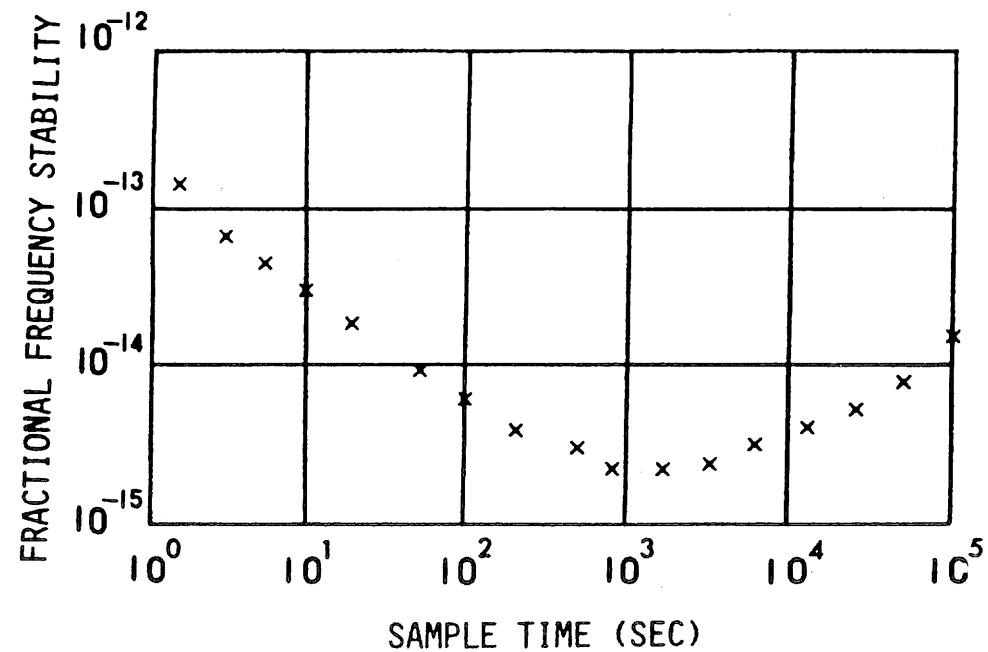


図4-2 K-3VLBIシステム用水素メーザの周波数安定度

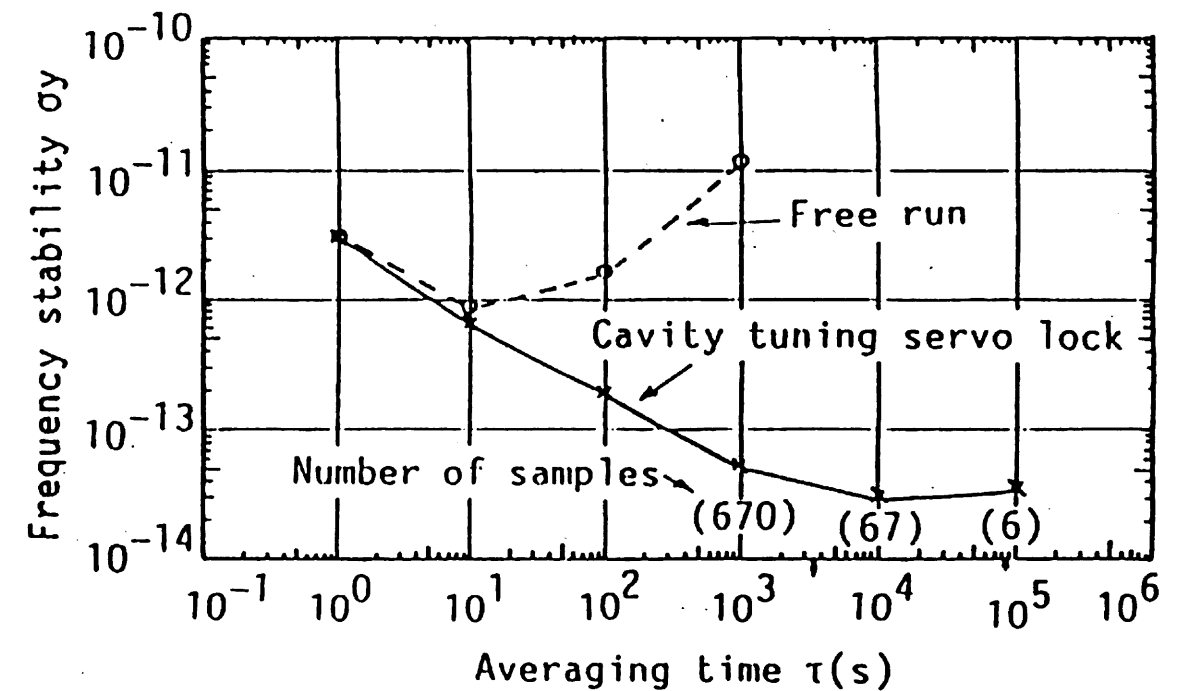


図4-3 ループギャップ共振器を用いた小型水素メーザの周波数安定度

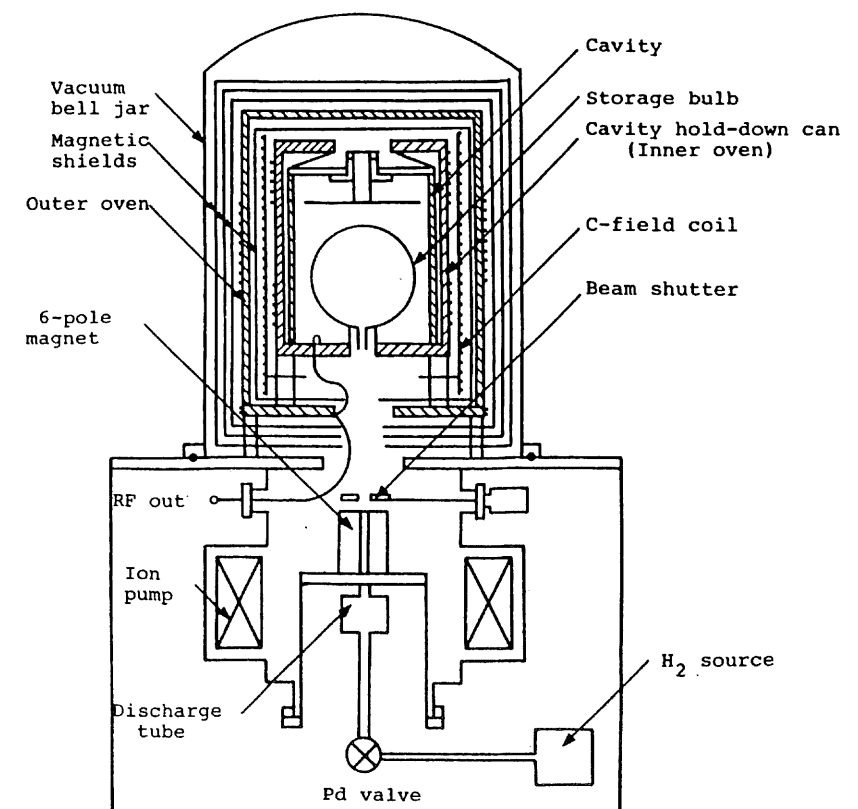


図4-4 水素メーザ量子系の構造図

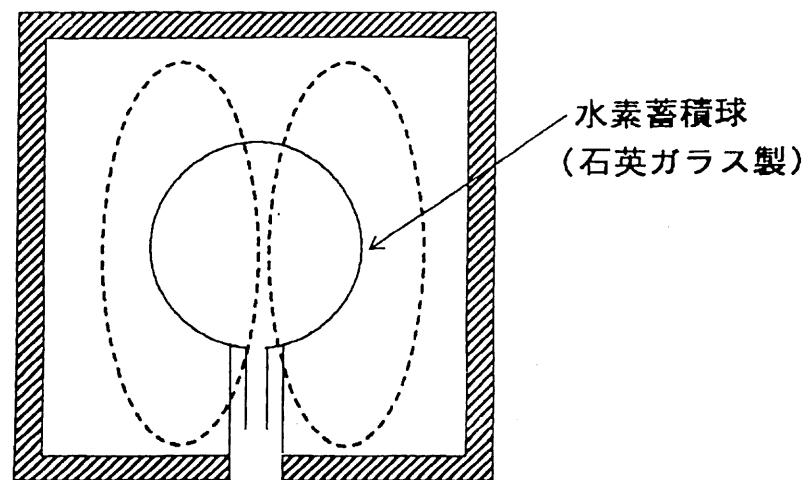


図4-5 TE001円筒共振器

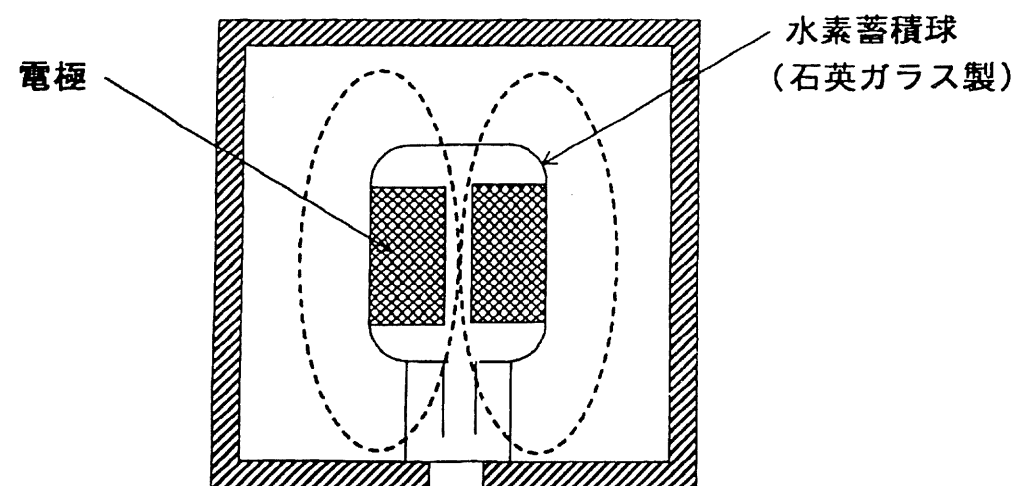


図4-6 ループギャップ型共振器

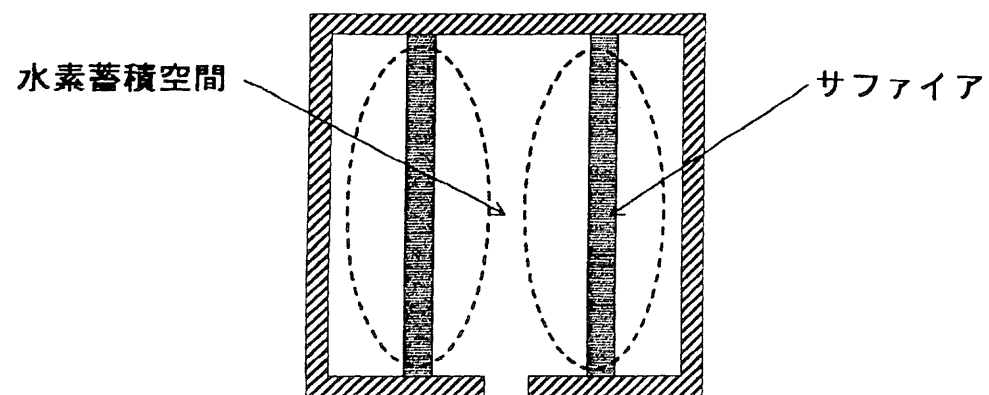


図4-7 サファイア装荷型共振器

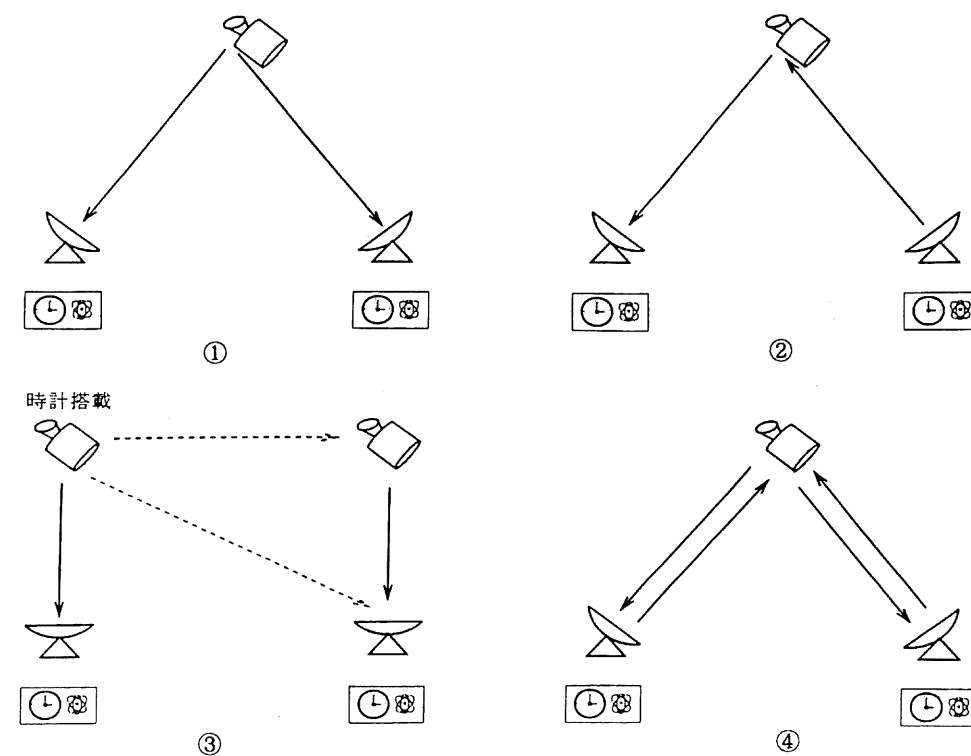
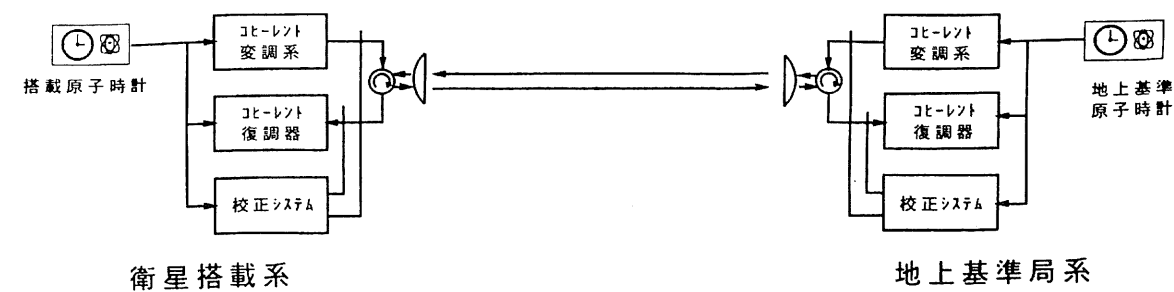


図4-8 衛星利用周波数/時刻比較法



開発想定周波数/時刻比較システムブロック図

図4-9 搬送波位相の利用

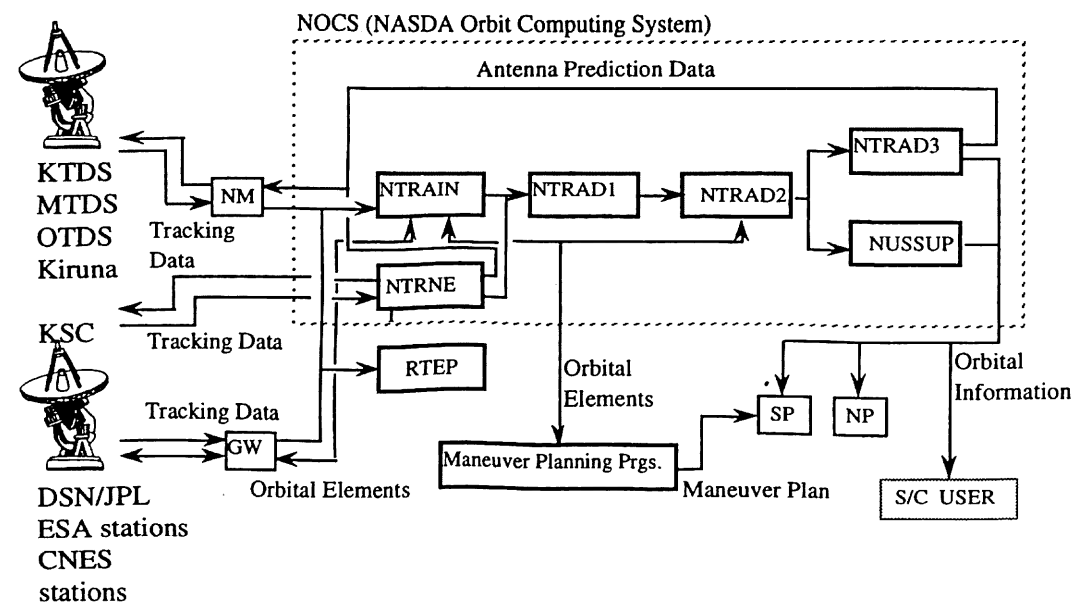


図4-10 NOCSの構成図

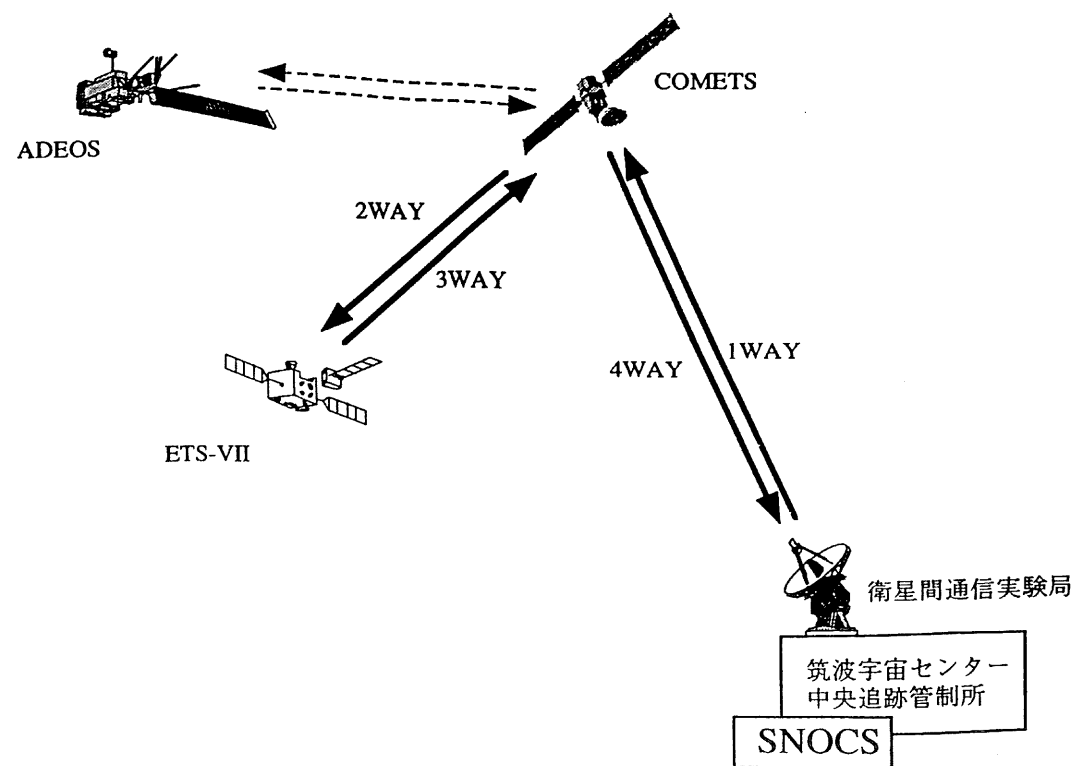


図4-11 SNOCSによる軌道決定の概要図

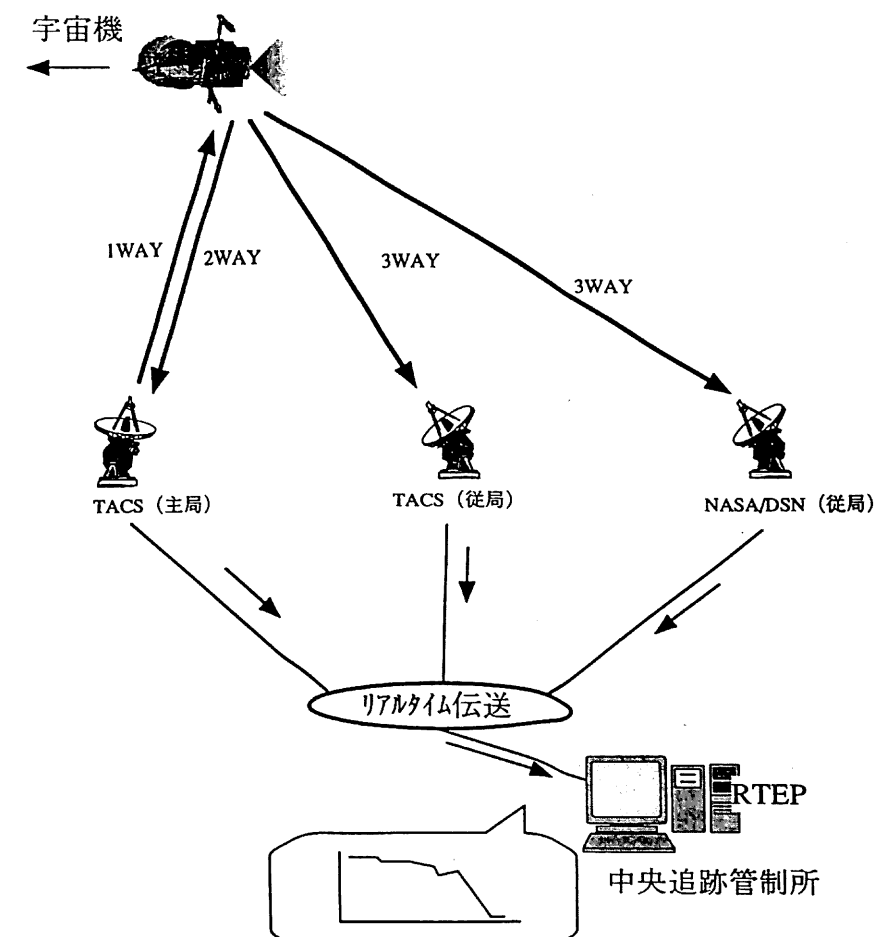


図4-12 RTEPによる軌道決定の概要図

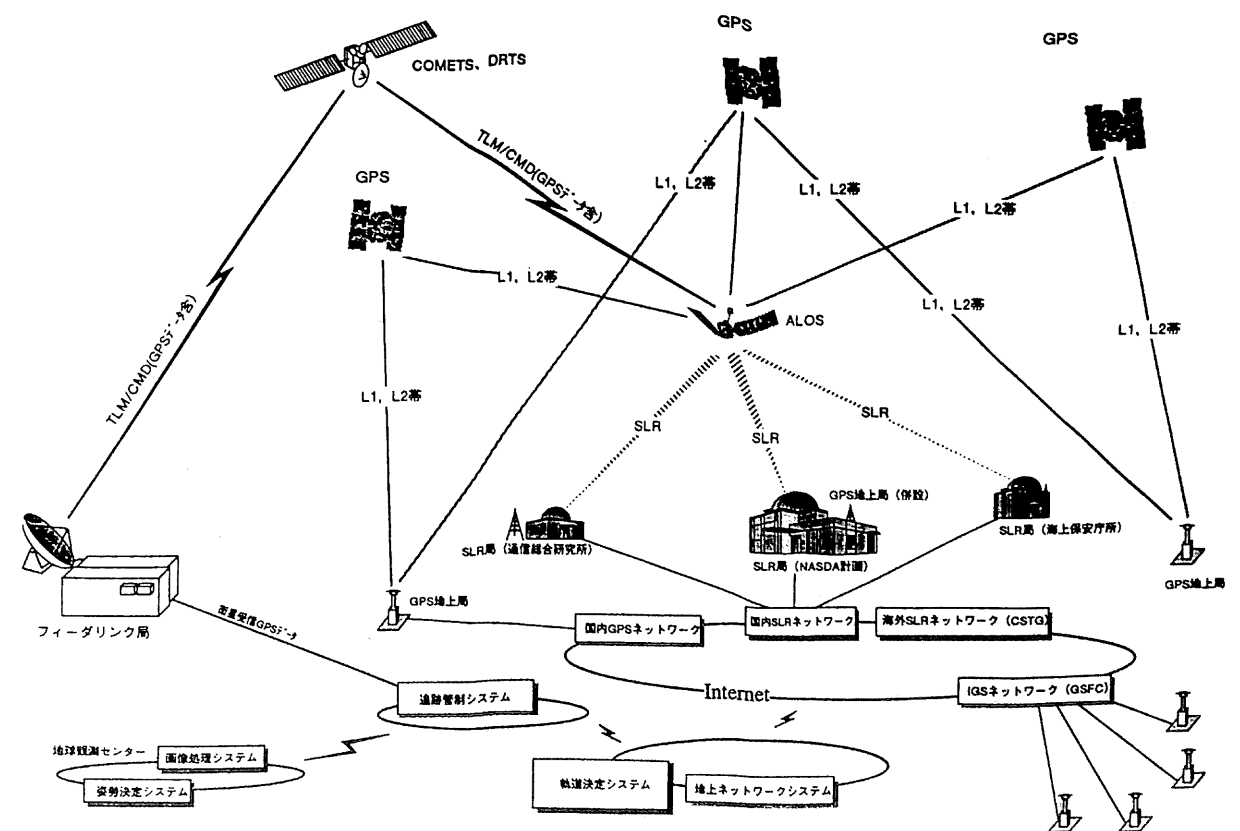


図4-13 HATSの概要図

表3-1 平成8年2月末調査の業種別普及台数

業種別 普及台数	級別	1級	2級	登録外機種	合計
	測量業	1,277	1,115	0	2,392
	建設業	112	34	14	160
	学校関係	236	131	29	396
	官庁関係	832(727)	173(73)	8(0)	1,013(800)
	その他	217	211	6	434
	合計	2,674	1,664	57	4,395

※（ ）は、国土地理院保有台数

表3-2 海上建設において将来利用が見込まれる分野

利用分野	予想要求	その他
1 魚礁設置	±1~3m	
2 湧昇流ブロック据付	±1m	(海底 50~100m)
3 土運搬船管理	±5~10m ±1~3m	運航管理
4 深浅測量	±100cm ±50cm	平面計測 法面計測
5 浚渫工事	±0.5m	
6 地盤改良	±0.1m	
7 堤体観測	±5cm	
8 ケーソン据付	±0.2m	
9 サンドコンパクション	±0.5~1m	(サンドパイルも同じ)
10 杭打ち工事	±0.1m	
11 潮位測定	±0.05m	
12 捨て石均工事	X,Y±0.1m Z±0.05m	
13 タンカー等危険船及び 大型フェリーの接岸	±10cm	接岸速度、位置計測
14 船舶等移動体、浮体の 運動計測	±5cm	姿勢、速度、旋回運動
15 漁業用定置網の場所設定	±10cm	X, Y測量

表3-3 農用車両の無人走行研究例（主に航法に関して）

No.	デバイスと方法	データ	計測誤差と と条件	データの 更新周期	備考
1	地磁気方位センサ＋ 傾斜補正用 傾斜センサ	車両方位	<0.3° 圃場内、傾斜 ・環境補正	<0.1s	鉄道線路際等で 磁気環境の乱れ 問題
2	左右車輪回転数から 方位変化、距離検出	方位変化 累積位置	<1%(距離) 路面状態に より変動大	<1s	長時間利用では 累積誤差の補正 必要
3	TVカメラにより 耕うん境界線認識	相対位置	<10cm,圃場内 傾斜補正, 光学フィルタ	<0.1s	安定的な境界線 検出が課題
4	超音波センサにより 作物列との距離検出	相対距離	<10cm 桑園内	<1s	距離情報の安定的 検出が課題
5	複数の基準点～車両 上標識の角度検出	圃場内絶 対位置	<20cm,100m区 画,走行速度 <1m/s	1s	車両上標識の安 定的認識、追尾 が課題
6	基準点～車両上標識 の距離と角度検出	圃場内絶 対位置	<5cm,100m区 画,走行速度 <1m/s	1s	車両上標識の安 定的追尾が課題

表3-4 農林業への衛星測位システム導入に際しての条件

	必要情報	対象範囲	許容誤差	データ周期	問題点
	*1	km	cm	s	
測地・測量	*2 N,E,H	< 20	< 1-100	<1-300	谷間、樹冠内 受信不良
運転支援装置	N,E	< 0.5*0.5	< 10	<0.5	
遠隔操縦支援装置	N,E,H	< 0.5*0.5	< 20	<0.5	
ラジコンバリ自動操縦	N,E,H	< 0.5*0.5	< 10	<0.5	
自動直進維持装置	N,E	< 0.5*0.5	< 5	<0.5	
車両の無人化	N,E	< 0.5*0.5	< 5	<0.5	
プレッジョンファーム	N,E,H	< 5 * 5	<10-500	<1- 10	
放牧牛個体管理	N,E	< 5 * 5	<500	<10	谷間の受信不良
水平整地作業センサ	H	< 0.5*0.5	< 2	<0.5	
野菜個体管理	N,E	< 0.2*0.2	< 5	< 2	

*1: Nは北向き座標、Eは東向き座標、Hは高度座標を示す

*2: 用途によって許容範囲は大きく異なる

表3-5 1995年における主要農業機械の普及台数等

	普及台数	出荷台数*	出荷価格
乗用トラクタ	2,318 千台	90,623 台	約2,000億円
田植機	1,869	81,729	700
自脱コンバイン	1,203	64,267	1,600

*: 国内のみ、輸入機を含む

出典：'97 農業機械年鑑、（株）新農林社、1997

表3-6 カーナビゲーションの市場予測

年度	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
台数(千台)	28	58	160	344	514	810	1000	1200	1440	1728
前年比(%)	168	209	277	214	149	158	123	120	120	120

矢野経済研究所調べ

表4-1 衛星測位技術として確立する要素技術

要素技術	シナリオ	2	3	4	5	備考
測位システム要素技術	GPS補完技術	×	○	○	○	現在のGPSを補完する技術（レンジング放送、GPS補正メッセージ放送等）
	測位システム技術	△	○	○	○	現在のGPSによらずとも測位実証可能なシステム技術（領域限定システム等）
	複合システム技術	×	×	○	×	測位機能に双方向通信機能を複合するシステム技術
	国際協力開発マネジメント	×	×	×	○	国際協力によりシナリオ3を開発する際のマネジメント（インタフェース調整等）
搭載ミッドレンジ要素技術	搭載原子時計	○	○	○	○	高安定クロック技術（ヒジウム及び水素メーザ等先進技術の開発）
	レンジング放送	△	○	○	○	スペクトラム拡散技術等で地上ユーザに測位放送をする技術
	衛星間相互測距	△	○	○	○	測位衛星どうしで測距する技術
	複合システム要素	×	×	○	×	双方向通信機能要素技術
	レンジングリテリィチェック	△	○	○	○	異常状態をオポードでチェックし、放送に加える技術（自己チェック、衛星間相互チェック）
衛星バス要素技術	衛星間通信	×	○	○	○	相互測距、相互レンジングリテリィチェック等のための測位衛星間通信技術
	高度自律化	×	○	○	○	衛星群の運用の省力化のためのオポード側で実施する自動化技術
	高度外乱制御	×	○	○	○	測距精度達成のための測位衛星軌道に与える擾乱を最小化する制御技術
地上システム要素技術	衛星群追跡管制	×	○	○	○	衛星群の運用の自動化/省力化のための追跡管制技術
	衛星群時刻管理	○	○	○	○	衛星時刻/地上時刻の精密時刻管理技術
	高精度軌道決定	○	○	○	○	リアルタイム及びリアルタイムで測位衛星群の軌道を精密に決定する技術
	複合システム要素	×	×	○	×	複合システム達成のための地上局/装置のシステム/ハードウェア/ソフトウェア技術

○ 開発する △ 部分実証する
 × 開発しない

表 4-2 各原子時計の特徴比較

	水素メーザ	セシウム	ルビジウム
能動／受動	能動	受動	受動
原子源	原子ビーム	原子ビーム	ガスセル
準位選別方式	選別用磁石	選別用磁石又は 光ポンピング	光ポンピング
相互作用方式 (共振器)	TE011 円筒共振器 +水素蓄積球	ラムゼー共振器	TE011 円筒共振器 +ガスセル
遷移検出方法		熱線検出方式又は 光検出方式	光検出
遷移周波数	1. 4 2 G H z	9. 1 9 G H z	6. 3 8 G H z
周波数安定度	$\sim 3 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$	$\sim 5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$	$\sim 3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$
大きさ(c m)	1 6 0 × 6 0 × 7 0	1 5 × 4 0 × 5 0	1 0 × 1 0 × 1 0
重量(k g)	5 0 0 ~ 1 0 0	~ 3 0	1 ~ 2 0
消費電力(W)	2 0 0 ~ 1 0 0	~ 5 0	1 ~ 2 0
その他		高精度, 一次標準器	長期ドリフト大

表 4-3 共振器構造と目標性能

目標性能	フルサイズ共振器	ループギャップ共振器	サファイア共振器
周波数安定度 $\tau = 10^4$ 秒	$< 1 \times 10^{-15}$	$< 1 \times 10^{-14}$	$< 3 \times 10^{-15}$
磁場特性	$2 \times 10^{-14} / G$	$2 \times 10^{-14} / G$	$2 \times 10^{-14} / G$
重量(k g)	< 100	< 50	< 50
大きさ(m m)	$500 \phi \times 900$	$400 \phi \times 500$	$450 \phi \times 600$
消費電力(W)	< 100	< 100	< 100

表 4-4 宇宙技術における周波数/時刻比較誤差要因

項 目	概 要
信号伝送（変復調）方式	主に精度に影響、信号品質（S/N）と使用帯域で ほぼ決定付けられる。 $\sigma \propto (S/N)^{-1/2} / BW$ (BW=使用帯域幅)
伝搬路上の伝搬媒質	電離圏、大気圏伝搬の影響 ・電離圏の影響は伝搬路上の全電子数に比例 し、搬送波周波数の2乗に逆比例 ・大気圏の影響は周波数依存性は少ないが、 推定が困難（特に水蒸気遅延）
送受信装置等の電子回路 （局内遅延変動）	確度に影響。電子回路等の経年変化、周囲環境 （特に、温度）による遅延変動。
衛星、受信点位置誤差	衛星－地上局間の信号伝搬時間

表 4-5 C R L における宇宙技術を用いた周波数/時刻比較技術開発経緯

1975	ATS-1による日米高精度衛星双方向時刻比較実験
1979	NTS-1（GPSの試験衛星）によるUSNOとの時刻比較
1983	CS-Kuバンドによる国内高精度双方向時刻比較実験
1984	広帯域（拡散帯域幅80 MHz）衛星双方向時刻比較装置開発
1985	GPS時刻比較受信機の自主開発
1987	GPS-2周波利用電離層遅延補正用受信装置の開発
1988～1990	インテルサット衛星を利用した日台、日韓衛星双方向実験

表 4-6 軌道測位方式と到達位置決定精度

測位方式	対象ミッション	到達精度（衛星位置精度）			
		低中高度衛星 (LEO)	静止衛星 (GEO)	月ミッション	深宇宙（火星） ミッション
RARR（距離及び距離変化率） ＜Batch 軌道決定＞	地球周回、月／惑星宇宙機の追跡管制	150m	1km	数km	1 μ rad
RARR（距離及び距離変化率） ＜リアルタイム推定＞	HOPE、軌道間輸送機のRVD及び地球帰還制御、長秒時軌道変換	150m	-----	-----	-----
GPS単独測位	宇宙機の自律軌道管理	100m	-----	-----	-----
GPS干渉測位	高分解能センサ搭載地球観測衛星、宇宙測地技術	～25cm	-----	-----	-----
衛星レーザ測距（SLR）	高分解能センサ搭載地球観測衛星、静止衛星、宇宙測地技術	～20cm	数m	-----	-----
VLBI(very long baseline interferometry)	深宇宙ミッション、月面ローバーの位置決定、月重力場の観測	-----	-----	月面上での相対位置精度 10cm	相対位置精度 1km以下

平成8年度後期における宇宙開発に関する調査審議について

平成8年9月25日

宇宙開発委員会決定

宇宙開発を計画的かつ柔軟に進めるため、次により調査審議を行う。

1. 調査審議事項

(1) 国内の関係各機関における地球観測の分野に関する宇宙開発活動の進捗状況及び成果の評価について必要な調査審議

(2) 我が国における衛星測位技術開発のあり方について必要な調査審議

(3) その他、宇宙開発全般に関する重要事項について必要な調査審議

2. 調査審議方法

1. の調査審議は、計画調整部会において行う。なお、平成9年度以降の宇宙開発の計画的推進に反映させるため、平成9年3月末までに終えることを目的に調査審議を行う。

衛星測位技術分科会の設置について

平成8年10月21日
計画調整部会決定

1. 目的

「平成8年度後期における宇宙開発に関する調査審議について」（平成8年9月25日宇宙開発委員会決定）に基づき、我が国における衛星測位技術開発への取り組み方針を検討するため、計画調整部会に「衛星測位技術分科会」（以下、「分科会」という。）を設置する。

2. 構成員

別途、計画調整部会長が定める。

3. 審議事項

- (1) 衛星測位システムの現状と問題点
- (2) 衛星測位に対するニーズ及び将来動向の予測
- (3) 我が国が取り組むべき技術開発課題

4. スケジュール

平成8年11月から分科会を開催し、平成9年3月を目途に審議結果をとりまとめ、計画調整部会に報告する。

計画調整部会 衛星測位技術分科会 構成員

分科会長	水町 守志	芝浦工業大学 工学部 電子工学科 教授
専門委員	※飯田 尚志	郵政省 通信総合研究所 企画部長
〃	※大林 成行	東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授
〃	北原 弘志	宇宙開発事業団 軌道上技術開発システム本部 技術試験衛星グループ主任開発部員
〃	佐田 達典	三井建設（株）技術開発本部 技術研究所 主任研究員
〃	※篠原 武三	運輸省 電子航法研究所 衛星航法部長
〃	西口 浩	衛星測位システム協議会 事務局長
〃	松田 醇	ソニー（株）パーソナル&モバイルコミュニケーションカンパニー 主幹技師
〃	※宮崎久美子	東京工業大学 工学部 経営システム工学科 助教授
〃	村上 亮	建設省 国土地理院 企画部 測量指導課長
〃	※安田 靖彦	早稲田大学 理工学部 教授
〃	行本 修	生物系特定産業技術研究推進機構 農作業ロボット開発チーム 主任研究員

※は、計画調整部会構成員を示す。

衛星測位技術分科会 審議実施状況

第1回

1. 日時 平成8年11月12日(火) 14:00~16:00
2. 場所 宇宙開発事業団 第3会議室 (世界貿易センタービル22階)
3. 議事内容 (1) 計画調整部会衛星測位技術分科会について
(2) 審議事項の具体的な決定、審議の進め方について
(3) 参考: 将来の全世界的衛星測位システムの在り方に関する調査研究会の報告について

第2回

1. 日時 平成8年12月12日(木) 9:30~12:30
2. 場所 宇宙開発事業団 第2、3会議室 (世界貿易センタービル22階)
3. 議事内容 (1) 衛星測位システムの現状と問題点
(2) 我が国の衛星測位関連技術レベル
(3) 陸上交通分野における衛星測位システムの利用状況、問題点、将来動向

第3回

1. 日時 平成9年 1月14日(火) 14:00~17:00
2. 場所 科学技術庁第5会議室 (通産省別館9階)
3. 議事内容 (1) 各分野における衛星測位システムの利用状況、問題点、将来動向
①建設分野 ②地殻変動観測分野
③農林業分野 ④海上分野
⑤航空分野 ⑤宇宙分野
⑥その他の分野 (通信、気象観測、災害救難等)

第4回

1. 日時 平成9年 2月25日(火) 14:00~16:00
2. 場所 科学技術庁第5会議室 (通産省別館9階)
3. 議事内容 (1) 我が国が開発すべき技術開発課題
①想定する衛星測位技術開発のシナリオ群
②衛星搭載用原子時計について
③衛星群時刻管理技術について
④高精度衛星用軌道決定技術について

第5回

1. 日時 平成9年 3月 7日(金) 14:00~16:00
2. 場所 科学技術庁第5会議室 (通産省別館9階)
3. 議事内容 (1) 報告書(案)について