

11. 次世代衛星航法システムの衛星配置について

衛星技術部

※坂井 丈泰 伊藤 憲 新美 賢治 惟村 和宣

1 はじめに

1999年2月、EU（欧州連合）は欧州独自の衛星航法システムを開発する Galileo 計画を発表した [1]。Galileo はその後 2001 年初頭までに概念設計を終えてシステムの仕様が決定しており、具体的な開発段階に入ることが本年3月に承認された。運用開始は2008年を目指している。Galileo 計画は基本的に民生ベースで進められており、航空分野を含むさまざまな民間用途で必要となる性能を最初から考慮している点が近代的な衛星航法システムといえる。

一方、開発開始から30年近くが経過した米国の GPS (global positioning system) については、近代化計画が進められている [2]。計画の中心は第二・第三民間周波数の追加やブロック III 衛星の開発であり、測位精度あるいはロバストネスの向上が図られる。周知のとおり、近代化計画に先立って一昨年5月には SA (selective availability; 選択的利用性) が解除されたが、昨年10月にはこれを反映するように性能規定が改訂されたところである [3]。

欧州の Galileo 計画では、GPS を代替しうる民生ベース衛星航法システムの必要性が強調されている。これは一国の軍用システムに全世界が依存することの安全保障上の脆弱性が最大の理由である。ICAO (international civil aviation organization; 国際民間航空機関) の GNSS パネル会議 (global navigation satellite system panel; GNSSP) でも同じ理由から民間用国際システムの必要性が認識されており、次世代衛星航法システム導入のための指針が作成されている。また、航空用 GNSS として現在構築されつつあるシステムはいずれもコアシステム (GPS) に飛行フェーズに対応した補強システムを追加する構成であることから中期的システム GNSS-1 とされており、将来的には補強システムなしで所要の性能を実現する GNSS-2 を長期的解決策として構築する必要があるというのが第二の理由である。

以上の背景を踏まえ、当所では次世代衛星航

法システムに関する検討を実施している。次世代衛星航法システムに必要とされる性能要件についてはすでに報告したところであるが [4]、これに基づいて具体的な衛星配置の初期的検討を行った結果について、概要を以下のとおり報告する。

- 次世代衛星航法システムのコンセプト
- 衛星配置の検討
- シミュレーション

2 次世代衛星航法システムのコンセプト

GPS は、陸海空のすべての移動体で使用できる航法システムを目指して開発されてきた。結果としては応用範囲の広いすぐれたシステムが完成し、軍事用途のみならず民生分野でも各方面で積極的に利用が進められていることから、当初の目的は十分に達したといえる。しかしながら GPS の開発開始からすでに30年が経過しており、さまざまな分野で応用されるにつれて欠点や改良の余地のある点が次第に明らかになってきた。たとえば、現在の GPS については次のような改良が考えられる。

- (1) **測位精度の改善** 多くの移動体航法に必要な測位精度が得られるが、応用が広がるにつれて精度不足となる局面が顕在化してきた。現在はディファレンシャル方式や受信機技術で対応されているが、根本的には測距信号自体の性能改善を図る必要がある。
- (2) **耐干渉性の向上** 航空分野など安全性に直接関連する応用では、耐干渉性は信頼性とならんで重大な問題となる。GPS の測距信号は微弱なため、他の無線機器等による干渉のほか意図的な妨害も考慮される。こうした問題について、米運輸省が最近レポートをまとめている [5]。
- (3) **信頼性の確保** 航空分野での応用にあたっては、安全性の観点から特にインテグリティが

重要視される。GPSは単独ではインテグリティが低く、少なくともICAOが要求する水準は満たさない。アプリケーションに応じた信頼性を確保する必要がある。

- (4) **適用範囲の拡大** 無線航法システムに共通の問題であるが、トンネルや地下など測距信号が到達しない場所では使用できない。また、自動車や歩行者の使用にあたっては、都市部の複雑な電波環境に対応する必要がある。
- (5) **通信機能の付加** GPSにもメッセージ送信機能があるが、容量が限定されていることもあり、有効に活用されていないのが現状といえる。航法に関連した情報をユーザに放送することにより、安全かつ効率的な航法を援助することができる。

次世代の衛星航法システムは、既存衛星航法システムに比べて以上の点を含めた改善を図り、無線リンクなどの補強システムを追加することなくさまざまなアプリケーションに対応できるものであることが望ましい。

すなわち、今後開発される民生用衛星航法システムは、既存システムと比べて次のような性質を備えているべきである。

1. 測位精度および信頼性が十分な水準にあり、利用者に使いやすいシステムであること。
2. インテグリティ情報を伝送する機能を持ち、安全性が重視される用途でも利用可能であること。
3. 信号環境の厳しい都市部での利用が十分に考慮されていること。
4. 通信機能を持ち、適切な航法関連情報を提供すること。
5. 高精度な時刻情報の配信が行えること。
6. 既存の衛星航法システムと互換性および相互運用性を有すること。
7. 軍用システムではなく、民生主導で開発されること。さらには国際的な運用体制であることが望ましい。

これらを踏まえて要求要件を決定し、全体システム構成、測距信号形式（信号数や周波数、変調方式、信号フォーマット）などを設計していくこととなる。

3 衛星配置の検討

上に述べた次世代衛星航法システムが備えるべき性質を踏まえ、その構築にあたり適切と思われる衛星配置の概略を検討した。衛星航法システムのスペースセグメントを構成する航法衛星の軌道上での配置は、軌道半径や総衛星数、軌道傾斜角および軌道面数といったパラメータで特徴づけられる。どのような軌道（の組合せ）を採用するかを決定するうえでは、次のような要素を考慮する必要がある。

サービスカバレッジ 衛星航法システムとしてサービスを提供する範囲。一般にはグローバルであるが、地域的なシステムも考えられる。

軌道半径 衛星が送信する信号のカバレッジは、衛星の軌道半径と仰角マスクにより決まる。カバレッジを広くとるには軌道半径が大きいほうが有利だが、大きな送信電力が必要となる。地球自転との同期の有無も軌道半径により決まる。

回線設計 地上で所要の受信電力を確保するために衛星回線の電力設計を行うが、これには衛星の軌道半径が大きな要素となる。航法用信号と通信用信号それぞれに必要となる。

総衛星数/軌道面数 総衛星数は多いほど精度・信頼性の点で有利だが、構築・運用コストが上昇する。軌道面数は少ないほどシステム構築時の打上げ回数を減らすことができ、バックアップ衛星の配置にも有利である。

GDOP ユーザ位置を中心とした衛星の幾何学的配置は、測位精度に直接影響する。測位精度の指標であるGDOPが多くのお時間におわたって良好な値となるように配慮する必要がある。

インテグリティチャンネル インテグリティ情報を伝送する通信路をどのように確保するか。静止衛星を使用するか、周回衛星で測距信号と同時に送信するかといった選択肢がある。

耐故障性 一部の衛星に故障が発生した場合に、残りの衛星で規定の精度および信頼性を確保できるか否か。

人工衛星は、地球重心を中心として楕円軌道を周回する。軌道を決めるパラメータは図1に示すとおりで、衛星の個数のほか、軌道傾斜角（図

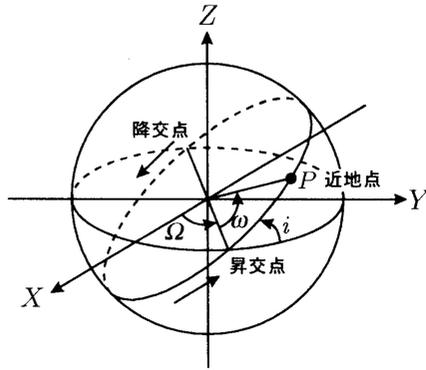


図1. 人工衛星の軌道。

中の i や軌道半径，昇交点赤経（同 Ω ）により概略の衛星配置が定まる．航法・通信用途で利用される人工衛星には，

低軌道衛星（LEO; low earth orbit）高度

2000 km 程度以下の低軌道を周回する衛星．衛星あたりのカバレッジが狭いため衛星航法システムには不向きだが，アップリンクに大電力を必要としないため小型のユーザアンテナで双方向通信が可能となる．

中軌道衛星（MEO; medium earth orbit）

GPS および GLONASS が採用している軌道高度．衛星あたりのカバレッジが十分あり，20～30 個程度の衛星で全世界を対象に十分な数の衛星を可視範囲とできる．

静止衛星（GEO; geostationary orbit）地球

の自転と同期して赤道上空を周回するため，地上からは静止して見える．常に同じ方向に見えることから通信用には好都合である．地上基地局と常に無線リンクがあり，原子時計を搭載しなくても航法信号を生成できる．

傾斜地球同期衛星（IGSO; inclined geosyn-

chronous orbit）地球と同期して周回するが，静止衛星と異なり軌道傾斜角を持つ衛星．地上から静止しては見えないが，昇交点を中心として南北に8の字を描きながら移動するいわゆる8の字衛星（最近は準天頂衛星とも呼ばれる）となる．常に一定方向に見えるわけではない以外は，静止衛星に近い性質を持つ．

などがあり，それぞれの特徴を考慮して必要な軌道を選択することとなる．

静止衛星あるいは IGSO 衛星は常に決まった地域からしか見えないため，特定の地域を対象

として可視衛星を増やすには好都合である．ただし，衛星航法システムの場合は静止衛星だけではユーザに対して良好な衛星配置（GDOP）を与えることができず，また高緯度地方では仰角が低くなることから，軌道傾斜角を持つ衛星がシステム内に不可欠となる．軌道半径については大きいほうがカバレッジを広くとれるが，測距信号に大きな送信電力が必要となり，さらに軌道高度に比例して軌道標定精度が低下する．LEO 衛星では必要なカバレッジを得ることができないため，MEO 衛星から上の軌道高度を採用することとなる．また，軌道半径を決めると周回周期が一意に定まるが，これは地球の自転と一定の整数比で同期して周回する地球同期軌道が望ましい．たとえば GPS あるいは Galileo の軌道周期は $1/2$ 日および $3/5$ 日であり，これらの衛星は1日に2回あるいは3日で5回だけ地球を周回する．他には $2/3$ 日 (32177.5km)， $3/4$ 日 (34806.0km) といった周期の軌道が考えられる．軌道傾斜角が大きいと高緯度地方に対してサービスをしやすいが，MEO 衛星以上の高度ではそれほど影響は大きくない．

4 シミュレーション

衛星配置に関する検討を進めるため，具体的な衛星配置をいくつか想定してシミュレーションを行った．シミュレーションの目的は衛星配置と測位精度の概略の関係を知ることであって，衛星配置を変えながら地球表面上全域の測位精度の分布を計算することとした．計算対象地点は経緯度とも6度毎，衛星と地球の位置関係が1周する1日間（後に述べる組合せ (i) および (iv)）あるいは3日間（同じく組合せ (ii)・(iii)）にわたり6分間隔で計算した．仰角マスクは5度を基本とするが，都市部での利用性を知るため一部については20度も用いた．

本シミュレーションにあたり，衛星-ユーザ間の測距精度については次のように複数の条件を設定した．

（条件 A）GPS（1周波） 現行 GPS について，一周波による単独測位方式を想定して要因別に測距誤差を設定する．天頂方向でのユーザ測距誤差は5 m 以上となる．

表 1. 衛星配置の組合せ例.

記号	主構成	GPS/MEO 衛星			GEO 衛星	IGSO 衛星	
		個数	軌道面数	軌道半径 (周期)	個数	個数	軌道面数
(i)	GPS	24	6	26561.5 (1/2)	0	0	—
(i-G)		24	6	26561.5 (1/2)	6	0	—
(i-30)		30	6	26561.5 (1/2)	0	0	—
(ii)	MEO	24	6	32177.5 (3/5)	0	0	—
(ii-G)		24	6	32177.5 (3/5)	6	0	—
(ii-30)		30	6	32177.5 (3/5)	0	0	—
(iii)	MEO	24	3	32177.5 (3/5)	0	0	—
(iii-G)		24	3	32177.5 (3/5)	6	0	—
(iii-30)		30	3	32177.5 (3/5)	0	0	—
(iv)	IGSO	0	—	—	0	24	6
(iv-G)		0	—	—	6	24	6
(iv-30)		0	—	—	0	30	6

表 2. 測位精度の計算結果 (1- σ , 単位はすべて m).

記号	主構成	条件 A		条件 B		条件 C		条件 D		平均衛星数	条件 D'		平均衛星数
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直		水平	垂直	
(i)	GPS	8.18	12.8	4.29	7.02	2.39	3.89	1.44	2.32	8.10	—	—	—
(i-G)		6.96	10.7	3.64	5.90	2.08	3.33	1.23	1.98	10.5	1.52	3.10	7.06*
(i-30)		8.13	13.8	4.27	7.53	2.33	4.12	1.45	2.52	10.1	3.28	8.72	6.79*
(ii)	MEO					2.42	3.93	1.40	2.26	8.60	2.07	4.27	5.84*
(ii-G)						2.13	3.39	1.21	1.95	11.0	1.46	2.89	7.47*
(ii-30)						2.30	4.02	1.38	2.39	10.7	2.48	6.30	7.30*
(iii)	MEO					2.51	4.06	1.45	2.31	8.60	—	—	—
(iii-G)						2.20	3.52	1.25	1.99	11.0	1.52	3.10	7.47*
(iii-30)						2.21	3.53	1.30	2.06	10.7	1.52	2.84	7.30
(iv)	IGSO					2.75	4.45	1.48	2.42	9.14	2.55	5.01	6.31*
(iv-G)						2.31	3.71	1.24	2.05	11.5	2.03	4.12	7.94*
(iv-30)						2.31	3.69	1.24	2.01	11.4	1.52	2.98	7.89

(条件 B) GPS (2 周波) 現行の L2 波を利用する場合を想定し、一周波方式に比べて電離層遅延補正が良好に行えるものとした。ただし、L2 波での C/A コード送信および送信電力向上は想定していない。

(条件 C) 次世代システム (2 周波) GPS の 2 周波コード測距による精度 (B) をベースとして、衛星軌道評定精度の向上、大気圏遅延補正の改善、受信機技術の進歩を見込んだ。ユーザ測距誤差は 2 m 前後となる。

(条件 D) 次世代システム (2 周波, ディファレンシャル補正あり) さらに、ディファレンシャル補正情報が放送されることを想定した。最終的なユーザ測距誤差は 1 m 前後となる。

以上に加えて、条件 D で仰角マスクを 20 度とした場合を条件 D' とした。

衛星配置の組合せ例を、表 1 に示す。(i) ~ (iii) は、GPS と同等かあるいはより軌道高度の高い MEO 衛星を中心として 24 または 30 個使用し、さらに静止衛星をオプションとして組み合わせている。(iv) は MEO 衛星の代わりに IGSO 衛星によりシステムを構築する例で、やはり静止衛星をオプションとした。MEO 衛星あるいは IGSO 衛星の軌道面は等間隔、軌道面内での衛星の配置も等間隔とした。このため、GPS 衛星を 24 個配置する (i) についても、現実の GPS 衛星の配置とは差異がある。なお、計算にあたり、衛星軌道評定精度は軌道半径が大きくなるにつれて低下するものとした。

計算結果の例を表 2 に示す。この表には、衛星配置の組合せ別に、測距精度条件 A~D' に対応する測位精度の試算結果 (標準偏差) を可視衛星の平均数とともに表示してある。衛星数に付さ

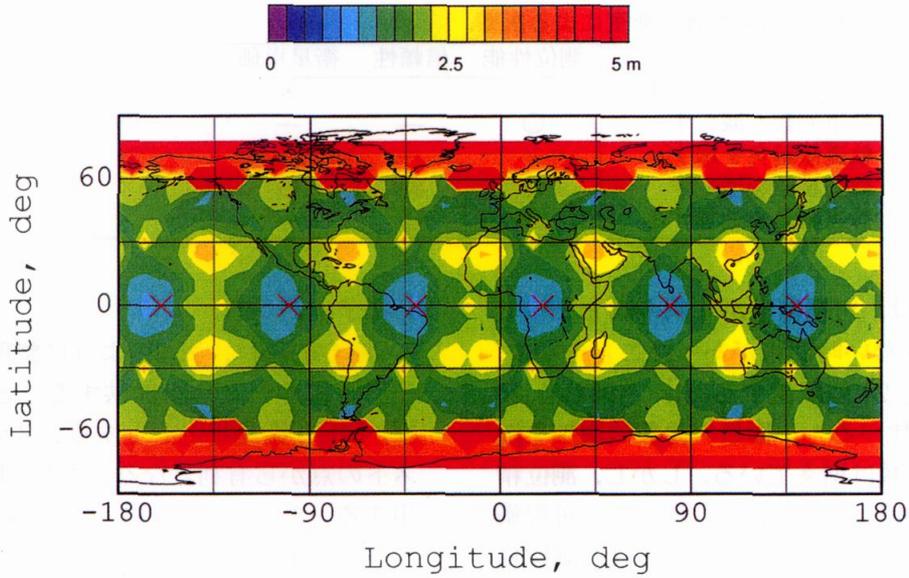


図2. 組合せ (i-G) の測位精度分布例 (24 GPS+6 GEO; 条件 D') . 赤い 'x' 印は静止衛星の位置.

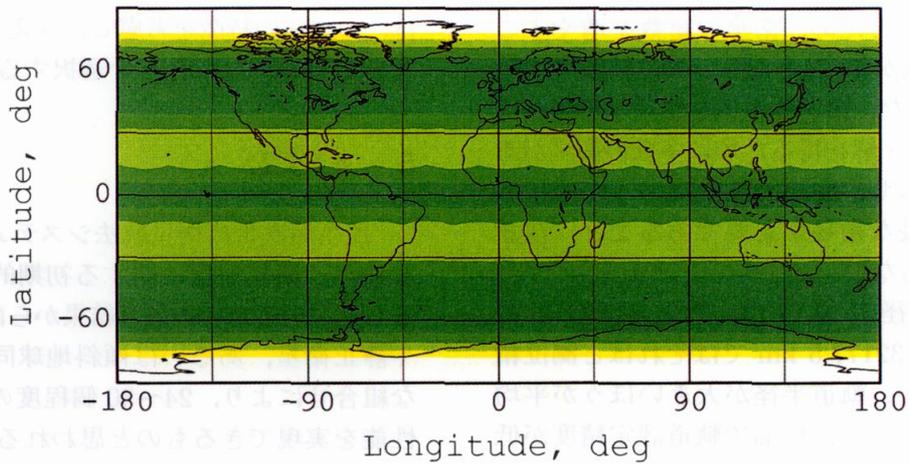


図3. 組合せ (iii-30) の測位精度分布例 (30 MEO; 条件 D') .

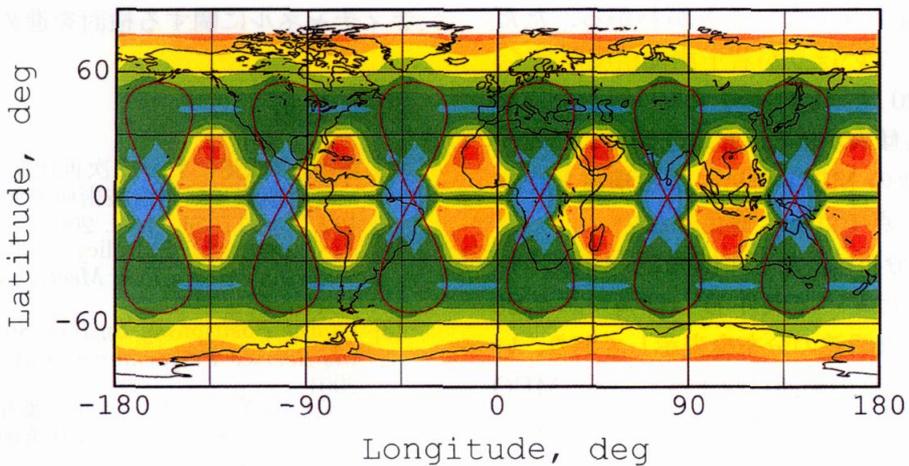


図4. 組合せ (iv-30) の測位精度分布例 (30 IGSO; 条件 D') . 赤い8の字はIGSO衛星の軌道.

表 3. 衛星配置の変更による影響.

変更内容	測位性能	信頼性	衛星単価	打上げコスト
軌道半径を大きくする	—	—	×	×
軌道面数を減らす	○	—	—	◎
軌道傾斜角を増す	—	—	—	×
総衛星数を増やす	◎	◎	○	×
静止衛星を追加する	○	◎	—	×

れている「*」は、可視衛星が4個未満となって測位計算ができない時間帯があったことを示す。

GPS衛星を24個配置する(i)と同じく30個の(i-30)を比べると、衛星の総数の増加を反映して平均衛星数は増えている。しかし、測位精度はそれほど向上していないことから、可視衛星は8個程度で十分であって、それ以上測位精度を改善するには衛星を増やすのではなく測距精度を改善しなければならないことを意味する。ただし、仰角マスクを20度とした条件D'では可視衛星が少ないため、衛星の総数を増やすことで可視衛星数が7~8となり、測位精度の向上がみられる。また、搬送波位相を使用する場合はアンビギュイティ解を得るために多数の衛星があると有利であるし、耐故障性を高めるためにもある程度は冗長な衛星が必要であることに注意しなければならない。

衛星軌道半径については、たとえばGPSの26561.5 kmと32177.5 kmではそれほど測位精度に違いはない。軌道半径が大きいほうが平均衛星数が多くなるが、反面で軌道評定精度が低下することで相殺しているものと思われる。また表2の結果からは、軌道面数は測位精度にそれほど大きく影響を与えないことがわかる。ただし、軌道面が少ないほうが若干測位精度が良く、仰角マスクを20度とした場合でも良好な測位精度を維持できる傾向がある。IGSO衛星によるシステムは、同数のMEO衛星による構成と比べても測位精度の点では特に遜色はない。

測位精度の分布は、たとえば図2~4のようになっている。図はすべて条件D'（仰角マスク20度）における垂直誤差の分布を表示しており、いずれも1~3m程度の範囲に収まっている。MEO衛星のみによる構成では経度方向での測位精度の変化が少ないのに対して、静止衛星あるいはIGSO衛星を使用する場合はこれらの衛星の真下（IGSO衛星では8の字の中心）で測位精度が良

い様子がわかる。

総合的には、表3のように整理できる。グローバルにサービスを提供することが前提であれば、MEO衛星を中心とするシステムが打上げコストの点から有利となる。また、IGSO衛星を使用するとサービスカバレッジを柔軟に設定でき、サービス地域を限定することも可能となる。静止衛星は測位精度の改善にはそれほど寄与しないが、通信チャンネルを確保するには有利と思われる。次世代衛星航法システムの設計にあたっては、これらの特徴を考慮したうえで、要求要件に照らして適切な組合せを選択する必要がある。

5 むすび

民生用次世代衛星航法システムに必要な性質を述べ、衛星配置に関する初期的検討結果を報告した。測位精度の試算結果からは、中軌道衛星や静止衛星、あるいは傾斜地球同期衛星の適切な組合せにより、24~30個程度の衛星で所要の性能を実現できるものと思われる。

今回は測位精度を中心にシミュレーションを行ったが、今後はさらに信頼性およびインテグリティチャンネルに関する検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 坂井, “欧州における次世代衛星航法システム,” 電子情報通信学会技術研究報告, SANE2000-122, pp. 17-24, Dec. 2000.
- [2] J. Canny, “GPS Policy and Planning,” *The 3rd Asia Pacific Rim Meeting of IISC, CGSIC*, Tokyo, Feb. 2001.
- [3] *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, DOD, Oct. 2001.
- [4] 伊藤, 新美, 坂井, “次世代衛星航法システム性能要件,” 第1回電子航法研究所研究発表会, pp. 43-46, June 2001.
- [5] *Vulnerability Assessment of the Transportation Infrastructure Relying on the Global Positioning System*, Final Report, US DOT, Aug. 2001.