

## 3-1-2 航空航法における衛星航法の利用と電離圏の影響

### 3-1-2 *Air Navigation with Global Navigation Satellite Systems and the Ionospheric Effects*

坂井丈泰 松永圭左 吉原貴之 齋藤 享

SAKAI Takeyasu, MATSUNAGA Keisuke, YOSHIHARA Takayuki, and SAITO Susumu

#### 要旨

航空航法において利用が進んでいる衛星航法において、電離圏遅延は大きな誤差要因である。航空航法においては精度だけでなく安全性が非常に重要であり、安全性を確保するための補強システムが必要である。補強システムとしては、静止衛星を利用し広域補強を行う SBAS (satellite-based augmentation system)、空港付近を対象に局地的な補強を行う GBAS (ground-based augmentation system) などがあり、一部で実用に供されている。これらにおいて、電離圏遅延量の局所的な勾配が安全性の脅威となる。電離圏勾配の脅威から航空ユーザを保護するための対策が必要であり、そのことが GPS のさらなる高度利用の障害となっている。電離圏勾配を有効かつ確実に検出しタイムリーに発出される電離圏情報が実現されれば、航空航法における GPS のより高度な利用が可能となると期待される。

Global navigation satellite system(GNSS) is now used in air navigation. Ionospheric delay in radio wave propagation is one of the most serious problems in using GNSS. Since not only the accuracy but also the safety is very important in air navigation, augmentation systems are necessary to ensure the safety. SBAS(Satellite-based Augmentation System), which covers a wide area with geostationary satellites, or GBAS(Ground-based Augmentation System) which covers a local area around an airport is among those augmentation systems. They are now partially in operation. Local ionospheric delay gradient is a threat to these systems. Measures to protect users from the threat of the ionospheric gradient prevent the advanced use of GNSS in air navigation. If ionospheric gradients were effectively detected without fail and users were timely notified about it, GNSS would be utilized in a more advanced way in air navigation.

#### [キーワード]

航空航法, 衛星航法, SBAS, GBAS, 電離圏異常

Air navigation, Global navigation satellite system, Satellite-based augmentation system, Ground-based augmentation system, Ionospheric anomaly

## 1 まえがき

近年、航空航法において GPS (Global Positioning System) に代表される衛星航法の利用が進められている。GPS の利用において電離圏遅延は大きな誤差要因であり、その補正が問題である。航空航法においてはその精度だけでなく安全性が非常に重要であり、安全性を確保するために

いくつかの補強システムが考案され、一部で実利用が始まっている。

本報告では、衛星航法を用いる航空航法で重要とされるインテグリティの概念とその確保の方法について解説するとともに、衛星航法の補強システムとそれらにおいて取られている電離圏の影響への対策について紹介する。

## 2 電離圏遅延と衛星航法

GPS は米国が運用する衛星航法システムであり、GPS 衛星(航法衛星)が放送する無線信号を受信機で受信することによりその間の距離を測定し、最低4機のGPS衛星からの信号を用いた計算により受信機の現在位置を求める[1]。GPS衛星などの航法衛星と地上受信機の間には地球大気が存在し、電波伝播に影響を与える。地球大気の一部である電離圏に存在するプラズマは電波の屈折率をわずかに変化させるため、電離圏中では電波の伝播速度が真空中の光速と異なったものになる。衛星測位では電波の伝播時間を用いて距離を推定するため、電波の伝播速度の変化は測位誤差に直結する。プラズマ中の屈折率  $n$  及び群屈折率  $n'$  は以下の式で与えられる。

$$n = 1 - \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (1)$$

$$n' = 1 + \frac{e^2 n_e}{8\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2} \quad (2)$$

ここで、 $e$  は電荷素量、 $n_e$  は電子密度、 $m_e$  は電子質量、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $f$  は周波数である。この時、電波の位相速度  $v$  と群速度  $v'$  は以下の式で与えられる。

$$v = \frac{c}{n} \quad (3)$$

$$v' = \frac{c}{n'} \quad (4)$$

$n < 1$ 、 $n' > 1$  であるので、プラズマ中において電波の位相は進み、情報の伝播は遅れる。伝播時間は伝播速度の逆数を衛星・受信機間で積分したものであるので、電離圏プラズマによる群遅延時間  $\tau$  は

$$\tau = \int_{sat}^{rec} \frac{n'-1}{c} dl \quad (5)$$

で与えられ、これを距離に換算すると

$$d = \frac{40.3}{f^2} \int_{sat}^{rec} n_e dl \quad (6)$$

となる。位相の遅延は距離に換算して

$$\phi = \int_{sat}^{rec} (n-1) dl = -\frac{40.3}{f^2} \int_{sat}^{rec} n_e dl \quad (7)$$

となる。ここで  $\lambda$  は電波の波長である。すなわち、群遅延距離、位相遅延は、それぞれ衛星・受信機間の電子密度を積分した全電子数(total electron content: TEC)に比例し、符号が逆で絶対値が同じ値を取ることがわかる。全電子数、周波数は正の値であるから、位相遅延は常に負であり、プラズマ中では位相が進む。つまり、GPSにおいて測定される搬送波の位相は進み(短くなり)、コード擬似距離は延びる。1平方メートル当たり  $10^{16}$  個の全電子数を1全電子数単位(TECU)という。図1は、周波数に対する全電子数1TECU当たりの群遅延量を示したものであり、GPS L1(1.57542 GHz)、L2(1.22760 GHz)、L5(1.17645 GHz)において1TECU( $10^{16} \text{ m}^{-2}$ )あたり0.16 m、0.27 m、0.29 mである。日本付近の太陽活動極大期の春秋における典型的な全電子数は昼間で70TECU、夜間で15TECUであり、それぞれL1、L2、L5周波数において11 m、19 m、20 m及び2.4 m、4.0 m、4.4 mの遅延量に相当する。

## 3 GPSにおける影響と対策

### 3.1 GPSにおける影響

前節で述べた通り、GPS衛星のコード擬似距離に含まれる電離圏遅延量は電波伝播経路に沿ったTECに比例し、一般に低仰角衛星ほど大きくな

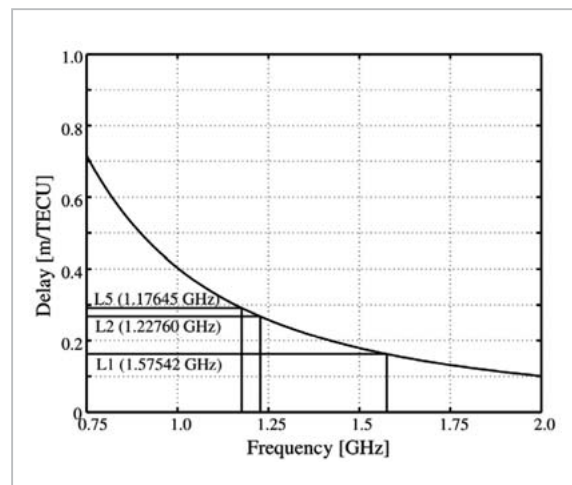


図1 周波数に対する1TECU当たりの群遅延距離

る。個々の GPS 衛星に関してはレンジ誤差として表現されるが、これらは最終的には測位解、すなわち観測点座標及び受信機時計の推定値に誤差として影響を与える。電離圏遅延によるコード擬似距離のレンジ誤差がこれら推定値にどのように影響するかは衛星数や衛星配置(ジオメトリ)によって異なるが、一般に垂直方向の位置決定精度が悪化することが知られている。なお、GPS 衛星の擬似距離に含まれるレンジ誤差を同一とみなして GPS 衛星配置の測位解への影響を評価する指標に DOP (dilution of precision) があるが、電離圏遅延を含めた実際の測位解の劣化を評価する際には電離圏遅延によるレンジ誤差が GPS 衛星毎に異なる効果も考慮する必要がある。

GPS を用いた精密測量では L1 及び L2 の 2 周波の搬送波位相による電離圏遅延の補正を行って測位処理が行われるのが一般的である。しかし、航空航法ではリアルタイム処理と安全性を重視するため、コード擬似距離を主に用いること、ならびに L2 帯は航空バンドとして国際的に保護されていないことなどから直接測位には使用しない。ただし、後述のように、補強システムとして電離圏遅延の補正情報生成のために L1 及び L2 の両信号が利用される事例もある。

### 3.2 航法メッセージによる補正

GPS 衛星から放送される航法メッセージには、GPS 衛星の軌道情報などの他に電離圏遅延補正に関するパラメータも含まれている。コード擬似距離を用いた単独測位の航法メッセージを用いた電離圏遅延補正としては、夜間の電離圏遅延を 5 ns (1.5 m) で一定値とし、昼間の電離圏遅延はこの 5 ns に加えて 14 時(地方時)にピークをもつ余弦関数の上半分を加えて得られる電離圏遅延モデル(Klobucher モデル<sup>[2]</sup>)で日変化を近似している。この余弦関数の振幅、周期のそれぞれを地磁気緯度の 3 次の多項式で表現しており、航法メッセージによってこれら合計 8 個の係数が放送される。なお、電離圏遅延の算出においては、電離圏薄殻モデルを仮定し、GPS 電波の伝播経路とその交点を電離圏貫通点(ionospheric pierce point: IPP)と呼ぶが、前述の電離圏遅延モデルは観測される各 GPS 衛星の IPP での地磁気緯度を用いることに注意が必要である。また、低仰角衛星ほど電離圏

遅延が大きくなる効果も IPP における GPS 衛星電波の入射角を考慮した傾斜係数を乗じることで表現する。

### 3.3 ディファレンシャル補正

一般に、前述のような電離圏遅延モデルを用いた補正は観測値に含まれる電離圏遅延のモデルからの乖離が大きいほど、補正効果が小さくなる。そこで、測位精度向上のために実際の観測データからリアルタイムに補正値を生成し、放送などの方法によりユーザ局にリアルタイムに伝達して測位精度の向上をはかるディファレンシャル補正が用いられる。ディファレンシャル補正は位置が既知である GPS 基準局を使用し、観測値からコード擬似距離に含まれるレンジ誤差を算出し、そこに含まれる GPS 衛星軌道誤差、GPS 衛星時計誤差、電離圏遅延、対流圏遅延などの共通誤差を抽出し、補正情報とすることを基本としている。

ディファレンシャル補正には目的によって狭域及び広域ディファレンシャル補正に分類される。狭域ディファレンシャル補正は基準局周辺での利用に有効な手法であり、電離圏遅延を GPS 衛星軌道誤差、対流圏遅延等の誤差要因と区別せずに共通誤差として補正情報を生成する。狭域ディファレンシャル補正は、補正の手法が比較的単純で高い精度が得られやすい一方、基準局からユーザまでの距離が離れるほど補正情報は劣化する特徴がある。広域ディファレンシャル補正はサービス範囲に基準局網を整備し、これらコード擬似距離に含まれるレンジ誤差をさらに誤差要因ごとに分解して補正情報を生成し、ユーザに伝達する。このため、電離圏遅延に関しては一般に L1 及び L2 を用いた 2 周波での搬送波位相を用いた計測と補正情報のグリッド化などの手法がとられている。

## 4 GPS の航空利用

### 4.1 航空航法とインテグリティ

GPS が航空機の航法に有効であることは当初より認識されていたが、主要な問題はインテグリティの担保にあった。インテグリティとは、航法システムに誤りが無いことを保証し、所要の測位性能が得られないなど航法に使用すべきではない

場合に迅速に警報を与える能力のことである。インテグリティを担保するためには、GPS 衛星から異常な信号が送信された場合にこれをただちに検知し、ユーザに通知する手段が必要である。

GPS の測位精度は、航空機が航空路を航行する場合には十分といえる。ところが、GPS は世界中に監視局を 5 局しか持たないことから、衛星に不具合があった場合、それをただちに検出してユーザに通知することができない。また、航空用の航法手段を提供するのは各国政府(日本では航空局)による業務であることから、米国による航法システムに(インテグリティの確保も含めて)全面的に依存することが難しいとの事情もある。

航法システムを含む民間航空分野の各種国際標準の策定を担う国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization: ICAO)は、衛星航法システムに関する検討を進めるために GNSS(global navigation satellite system)パネルを 1993 年に設置した。当パネルは民間航空航法用に利用可能な性能を持つ衛星航法システムを GNSS と定義し、その国際標準 GNSS SARPs(Standards and Recommended Practices)を 2001 年 11 月に発効させた<sup>[3]</sup>。これによると GNSS は人工衛星の他に機上受信機や地上モニタ施設などをも含めた定義となっており、具体的な姿は GPS あるいは GLONASS(コアシステム)に補強システムを追加した構成とされている。GNSS SARPs では GNSS が満たすべき性能要件も規定されている。

補強システムは次の三種類が定義されている。(i) 静止衛星を利用して大陸規模の広い範囲を対象に補強信号を放送する SBAS(satellite-based augmentation system)、(ii) 空港付近を対象に VHF 波により局地的な補強を行う GBAS(ground-based augmentation system)、(iii) 航空機に搭載された機上装置のみで補強を行う ABAS(aircraft-based augmentation system)。このうち SBAS 及び GBAS は、地上に設置した監視局により GPS 信号を監視することで高いインテグリティを確保し、さらに補正情報を送信することで高いユーザ測位精度が得られるシステムである。SBAS は前述の広域ディファレンシャル補正システム、GBAS は狭域ディファレンシャル補正システムに該当する。

ABAS は、冗長な GPS 信号を利用するなど機

上装置で得られる情報の整合性を検査することによりインテグリティを確保する仕組みであるが、高度方向の位置情報については十分なインテグリティが確保できず、水平方向の航法のみにはしか利用できない。以下では、航法手段の提供者(サービスプロバイダ)側の立場から、SBAS 及び GBAS を対象として解説する。

## 4.2 インテグリティ確保の仕組み

GNSS SARPs におけるインテグリティに関する性能要件は、ユーザ受信機の測位誤差が警報限界(alert limit)以内であるか、あるいは警報限界を超える場合にそれを迅速に通知できる確率として定められている。すなわち、ユーザに通知されることなく測位誤差が警報限界を超えるような事象が生じない確率といえる。具体的な値としては、航空路を飛行する場合には 1 時間あたり  $1-10^{-7}$ 、滑走路への進入・着陸に使用する場合には進入 1 回あたり  $1-2 \cdot 10^{-7}$  とされている。

警報限界については飛行中の空域により要求値が変わり、また補強システムの開発途上では要求値自体が確定されてはいなかった。このため、補強システムとしては(サービスエリア内の)ユーザ測位誤差の信頼限界を危険率  $10^{-7}$  以下で与えることとした。この信頼限界は保護レベル(protection level)と呼ばれ、補強システムはユーザ受信機が保護レベルを計算するための情報を送信する。補強システムは、ユーザ測位誤差が保護レベルを超える確率が  $10^{-7}$  以下であることを保証しなければならない。この仕組みにより、保護レベルが警報限界を下回っていれば、当該空域において GNSS を利用可能であることと判断できるのである(図 2)。何らかの原因によりユーザ測位誤差が警報限界を上回る可能性がある場合には、保護レベルもこれに対応して増大しているから、保護レベルが警報限界よりも大きくなり、異常状態の検出及び通知といった動作ができるのである。

さて、ユーザ受信機は、計算して求めた保護レベルが警報限界より大きければその空域においては GNSS を利用不可とする。したがってより小さな保護レベルを与えるほうが航法システムとしては利用しやすい(アベイラビリティが高い)わけであるが、一方ではインテグリティ要件によりユーザ測位誤差と保護レベルの関係は常に満足しなけ

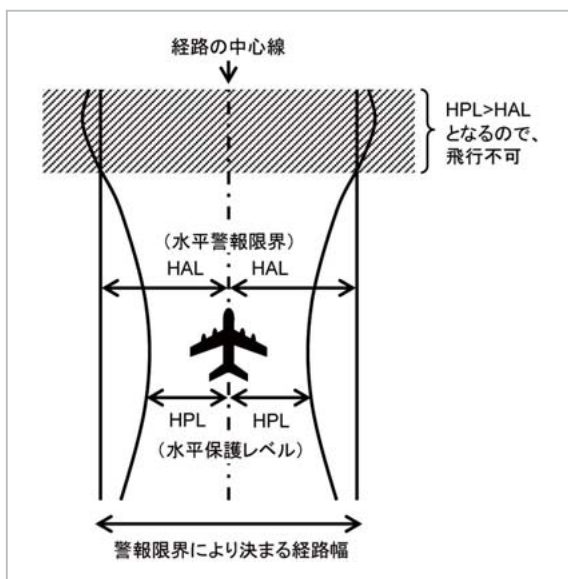


図2 保護レベルと警報限界

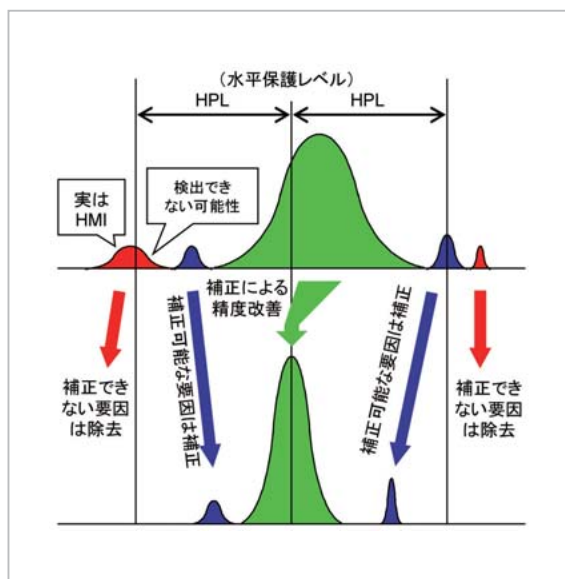


図3 測位誤差の分布のイメージ

(上) 補強のないGNSS、(下) 補強システムの効果

ればならず、これらは相反する要求といえる。

### 4.3 インテグリティに対する脅威

インテグリティの確保にあたっては、ハードウェアの信頼性が一定の水準にあることは必要だが、基本的にはユーザに提供する情報に誤りがないことが求められる。すなわち、ハードウェアの信頼性が不十分でシステムが停止するような場合は、システムの継続性(continuity)には問題があるが、インテグリティ上の問題ではない。誤った情報を提供するくらいなら、システムを停止したほうがインテグリティの観点からは有効といえる。インテグリティ上の問題、すなわち保護レベルを超えるユーザ測位誤差を生じさせる可能性のある誤情報のことを、HMI (hazardous misleading information) という。

前節に述べたユーザ測位誤差と保護レベルの関係は、サービスエリア内のいかなる地点においても常に満たされていなければならない。すなわち、インテグリティ要件については多くのケースのアンサンブル平均で要求値を満たせばよいわけではなく、最悪ケースでも要件が満たされている必要がある。インテグリティについてはたいへん高い水準が要求されており(10<sup>7</sup>時間 = 1141年)、事実上は保護レベルを超えるユーザ測位誤差を生じさせてはならないものといえる。実際に、SBASあるいはGBASの航空用航法システムとしての

認証においては、ユーザ測位誤差が保護レベルを超えることがなく、かつ十分に小さいことを確認する。

インテグリティを確保するためには、測位誤差の要因の一つ一つについてHMIを生じる可能性やその大きさを評価し、必要に応じて対策を講じなければならない。大きな測位誤差となる誤差要因でも、地上監視局での検出が容易であればHMIにはならない。また、検出が難しい誤差要因でも、小さな測位誤差にしかならないのであれば問題ではない。具体的な例では、前者はGPS衛星のクロック誤差や軌道誤差、後者は対流圏伝播遅延などがあたる。

HMIを生じ得ると識別された個別の要因を脅威(threat)といい、その一つ一つについてHMIを生じないように対策を講じる必要がある。これはモニタ(monitor)と呼ばれ、対応する脅威の性質に応じて設計され、SBASやGBASの内部に実装される。モニタが脅威を検出した場合は、保護レベルを増大させるなどしてHMIとなることを防止する。

GNSSの測位誤差の確率分布のイメージは、一般に図3上段のようになっている。このうち中心付近の正規分布を呈する部分(緑色)は種々の要因により生じる測位誤差、またこの正規分布から外れたスパイク状の分布は大きな誤差をもたらす頻度の低い事象を表し、このうち補正可能なものは

青色、補正できないものは赤色で表示してある。SBAS 及び GBAS は、同図下段に示すとおり、補正情報の適用により正規分布の部分をコンパクトにする一方、適切なインテグリティ情報を提供することにより HMI となり得る脅威を確実に排除しユーザを保護するのである。

#### 4.4 電離圏嵐の影響

インテグリティに対する脅威のうち、最大の問題は電離圏伝播遅延による影響である。電離圏嵐の発生頻度は高くないが、無視できる水準ではない。電離圏嵐が発生すると、地上監視局では検出できるとは限らず、大きなユーザ測位誤差として現れる。これは、ユーザ測位誤差が保護レベルを超える HMI 事象を招く可能性がある。

この問題に対する SBAS 及び GBAS の対策は、電離圏嵐を含む脅威となる電離圏擾乱が常に存在しているものと想定してインテグリティ情報を生成するとともに、保護レベルに十分なマージンをもたせ、危険な衛星はユーザに使用させないことである。電離圏の状態としては、過去の電離圏嵐の際の観測データにもとづき、常に最悪ケースを想定する。また、過去に観測された HMI 要因については、それぞれモニタを設けて対処する。

こうした対策を講じているため、保護レベルは大きくなりがちで、アベイラビリティの観点からは改善の余地がある。アベイラビリティを低下させている原因の一つは、現状では監視局の密度が十分ではないことから電離圏嵐ではない通常の状態を識別できず、常に最悪ケースを想定している点にある。宇宙天気の見点から電離圏の状態を知ることができれば、電離圏嵐状態を想定する必要のない通常時の保護レベルを大幅に引き下げ、アベイラビリティを改善できる可能性がある。

### 5 実際の補強システム

#### 5.1 SBAS (MSAS)

##### 5.1.1 SBAS のしくみ

SBAS は、広範囲のユーザに GNSS 補強情報を(静止)衛星から放送するシステムである。SBAS は、地上設備、静止衛星、ユーザ受信機から構成される。

地上の監視局は、通常数 100 km 間隔で複数配

置され、GNSS コアシステムからの 2 周波信号に対応した受信機でデータを収集している。収集データから、衛星毎の軌道/時刻誤差と、電離圏遅延を推定し、インテグリティ情報、SBAS 衛星のレンジングデータ、及び補正情報を生成し、SBAS 衛星にアップリンクする。

SBAS 信号は、GPS-L1 と同一の周波数及び C/A コード変調となっており、擬似ランダム雑音系列 (PRN) 番号は 120 ~ 138 が割り当てられている。このため、SBAS 衛星からの信号も GPS と同様のレンジング信号として利用できる。補強情報は 250 bps で、1 メッセージが 250 ビット (プリアンブル (8)、メッセージタイプ ID (6)、データ領域 (212)、CRC (誤り検出) 符号 (24)) として放送される。

ユーザ受信機では、SBAS 衛星からの補強情報を用いて測位を行うとともにインテグリティ情報を計算する。なお、対流圏誤差はモデルを用いて受信機内で算出される。

##### 5.1.2 SBAS の電離圏補正

現在運用/開発中の SBAS では 1 周波対応の航空ユーザ受信機を対象としており、ユーザは GNSS コア衛星及び SBAS 衛星の擬似距離をもとに測位計算を行う。その方法は、ICAO の国際標準として定められている [3]。

SBAS は広範囲のユーザを対象としており、電離圏遅延量情報は、地理経緯度の  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  の格子点 (ionospheric grid point: IGP) の値として放送される (緯度  $55^{\circ}$  より高緯度では格子点配置は異なる)。電離圏補正に係る SBAS メッセージタイプとしては、

Type 18: 各 IGP のサービス状況フラグ

Type 26: 各 IGP の垂直電離圏遅延量 (@L1)

(0 ~ 63.875 m, 0.125 m 単位)

及び補正後の垂直誤差 (残差) 分散値 (インデクス)

Type 10: 時間劣化係数等

が放送される。

ユーザ受信機では、電離圏を高度 350 km での薄殻と仮定して電離圏遅延量及びその残差分散を計算する。まず、衛星毎に、ユーザが受信する衛星信号の IPP の経緯度を計算する。次に、経緯度平面上での周辺の IGP における垂直遅延量/残差分散値を双一次補間し、IPP での値を求め、それ

**表1 SBAS 電離圏補正メッセージの最大更新時間及び有効時間**

メッセージタイプ	最大更新時間 [秒]	有効時間 [秒]	
		航空路～非精密進入	精密進入
18	300	1,200	1,200
26	300	600	600
10	120	360	240

らの値に衛星仰角に応じた傾斜係数をかけて測距補正值／残差分散値を計算する。さらに、残差分散値には時間劣化係数等も使い、最終的には、衛星配置から測位及び前述 4.2 の保護レベルの計算を行う。

なお、各 SBAS メッセージには、プロバイダ側サービス要件として最大更新時間、及びユーザが使用する際の有効時間が定められており、電離圏補正関連メッセージに関しては、表 1 のようになっている。

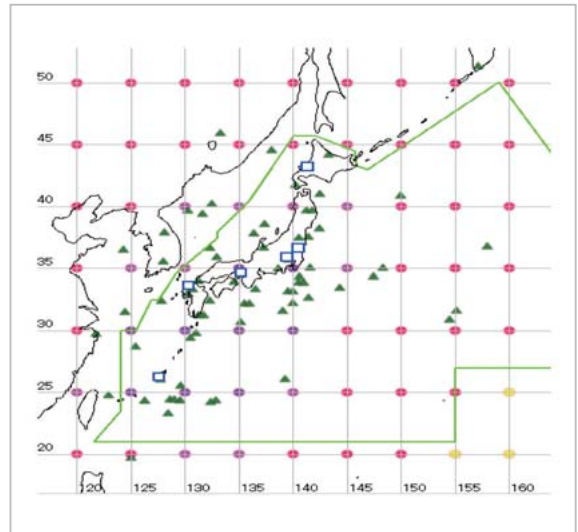
SBAS メッセージの生成手法は SBAS サービスプロバイダに任せられるが、4 において示したインテグリティ要件を満足するようなシステム構築／検証が求められる。

### 5.1.3 SBASの現状

現在(2009年)運用されているSBASとしては、MSAS(日本)[4]、WAAS(米国)、EGNOS(欧州)があり、GAGAN(印)等が開発中である。MSASの地上局配置、及び周辺のIGPとIPP分布の例を図4に示す。

前項で述べたように、SBASは広範囲にサービスを提供するものであるが、電離圏補正情報を経緯度5°のIGPの値として提供することや、メッセージの有効期間が600秒である点から、電離圏活動が活発な磁気低緯度地域において、性能が上がりにくい現状がある。すなわち、電離圏遅延量の空間／時間変化量が大きい、またプラズマバブル等の地上局配置に対して空間的に小さい擾乱などのため、高いインテグリティ要件(1-10<sup>-7</sup>)を担保し、かつ、保護レベルを必要最小限にすることが困難な面がある。

SBASの電離圏補正の性能向上のためには、上記の条件下での有効な電離圏モデルの作成、それ



**図4 MSAS地上局配置、IGP位置、IPP分布例**

□はMSAS地上局(札幌、常陸太田、所沢、神戸、福岡、那覇。常陸太田と神戸は静止衛星へのアップリンク局も兼ねる)。●はIGP(経緯度5°×5°格子点)。▲はある時点の地上局で受信したGPS衛星のIPP(高度350km)。

に基づく地上監視局の配置、また、擾乱現象の検出手法／対処手法など、初期の検出・予測を含めたシステム検討が必要となる。

## 5.2 GBAS

### 5.2.1 GBASのしくみ

GBASは1周波ディファレンシャルGPS測位方式を基礎として、空港近辺(最小覆域要件:約40km程度)における利用を想定した着陸誘導システムである。すなわち、空港内に3~4台からなるGPS基準局(GBAS基準局)を設置してGPS衛星のコード擬似距離に含まれるGPS軌道誤差や電離圏遅延といった共通誤差の補正情報、ならびに航空機側で計算された測位解の信頼性の判定に必要な誤差要因ごとの残留誤差パラメータを生成し、表2のような補強メッセージとしてVHF帯(108~118MHz)で航空機側に放送する(VHF data broadcast: VDB)。航空機側では補正情報を基に測位処理を実施し、測位解の信頼性を判断するため、残留誤差パラメータから保護レベルを計算して規定値内に収まっているかどうかをリアルタイムで評価している。

擬似距離誤差について、GBAS基準局及び航空機の双方に同程度含まれていると考えられる共通誤差としてはGPS衛星軌道誤差、衛星時計誤差、

表2 GBAS による補強メッセージの内容

Message Type	内容
1	ディファレンシャル補正值情報など
2	基準局位置、信頼性に関する情報 (電離圏遅延、対流圏遅延ほか) など
4	最終進入パス情報など
5	衛星アベイラビリティ情報など

電離圏遅延、対流圏遅延などがあり、GBAS ではその大部分が除去される。それ以外の誤差としては受信機時計誤差、受信機ノイズ、マルチパス誤差などがあるが、GBAS 基準局における相互に 100 m 程度以上離れた複数の GPS 受信データを平均化してこれらの誤差の低減をはかり、より精度及び信頼性の高い補強情報の生成を可能としている。

着陸誘導システムによる航空機の精密進入は ICAO により視程、着陸システムの性能などで誘導可能な範囲が規定されており、着陸システム要件は 3 段階 (カテゴリ I ~ III) の進入・着陸フェーズに分類して定められている [3]。例えば、その初期段階をサポートするカテゴリ I の着陸システムにおいては、パイロットが着陸するか否かを判断する高度 (decision height: DH) である約 60 m (200 ft) までの精密誘導を行うこととなっている。

GBAS においてはその測位原理から精度は非常に高く、早くからその性能が検証されてきたが、生成した補正情報が誤っていないという信頼性を保証するインテグリティが主要な課題となってきた。例えば、カテゴリ I では誤った補正情報により危険な状態にならない確率を進入 1 回あたり  $1-2 \times 10^{-7}$  と規定しており、非常に高い信頼性が要求されている。そのため、これまでリスクの抽出、評価とともに必要に応じてその軽減アルゴリズムの開発が実施されてきた。現在、米国においては GBAS によるカテゴリ I のサービス開始に向けた準備が進められているが、将来的には、地上、機上機器の高性能化により高度 0 m まで精密誘導を可能とするカテゴリ III での運用までサポートすることが期待されている。

### 5.2.2 GBAS における電離圏遅延

GBAS における電離圏遅延は GBAS 基準局と

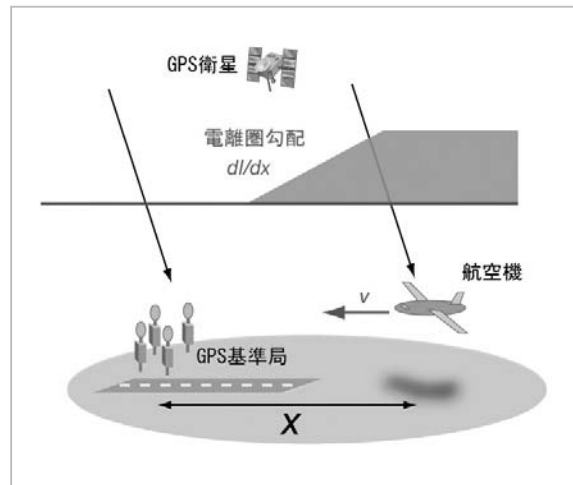


図5 GBASと電離圏遅延の空間勾配

航空機側で受信した擬似距離データにほぼ等しく含まれていることから、そのほとんどを除去可能と考えられてきた。しかしながら、GBAS ではコード擬似距離に含まれるマルチパス誤差低減のため、「キャリア・スムージング」と呼ばれるコード擬似距離の搬送波位相による平滑処理 (時定数: 100 秒) を行っている。その際、コード擬似距離と搬送波位相に含まれる電離圏遅延量は、式 (6)、(7) に示すようにその大きさが同じで極性が異なっており、コード擬似距離に含まれる電離圏遅延量の影響だけでなく、100 秒前までの搬送波位相に含まれる電離圏遅延量が影響する [5]。したがって、図 5 に示すように航空機が GBAS 基準局から数 10 km 離れた地点から最終着陸コースに進入し、着陸するまでの間に電離圏遅延量の空間勾配 (以下、電離圏勾配) があつた場合には、その領域を通過する GPS 衛星についてこの影響を受ける。

電離圏勾配 ( $dI/dx$ ) は通常、水平 1 km あたりの電離圏遅延変化率で表し、単位は mm/km で表記する。この電離圏勾配が与える GBAS による補正後の衛星視線 (スラント) 方向に沿ったレンジ誤差の最大値  $\delta I$  の目安は電離圏勾配に時間変化がなく、GPS 衛星の動きを無視すると式 (8) のように表現される。

$$\delta I \cong \frac{dI}{dx} (x + 2\tau v) \quad (8)$$

ここで GBAS 基準局と航空機の離隔距離を  $x$  としている。右辺第 1 項は電離圏遅延が空間的に変



化していることによる一般的なディファレンシャル GPS と同様のレンジ誤差であるが、第 2 項はキャリア・スムージングによる効果を表している。米国では電離圏勾配の最大値を 425 mm/km、GBAS 基準局から DH までの水平距離を 6 km と設定して GBAS の安全性設計を行っているが、スムージング時定数  $\tau$  を 100 s、航空機速度  $v$  を  $0.070 \text{ km s}^{-1}$  とし式 (8) より DH 上で見積もられるレンジ誤差の最大値はおおよそ 8.5 m と算出される [6]。一般には、受信可能な GPS 衛星個数の減少などの悪条件が重なると最終的な測位解がさらに劣化することが知られている。これらの結果、垂直保護レベルが 10 m 以下であるにもかかわらず、実際の垂直誤差が DH における垂直警報限界 10 m を超える場合が存在し、GBAS のインテグリティに対する脅威とともにリスク軽減手法が必要となることが示された [7]。

### 5.2.3 電離圏リスク評価と軽減

米国においては、SED (storm enhanced density) と呼ばれる磁気嵐に伴って発生する電離圏勾配を電離圏フロントとしてモデル化し、米国内で蓄積された GPS 観測データから電離圏勾配の大きさ、スロープの幅、速度といった 3 つのパラメータを抽出し、その範囲を定めて電離圏脅威モデルを構築している。その結果、電離圏勾配の考慮すべき最大値として米国は高仰角及び低仰角 GPS 衛星でそれぞれ、425 mm/km 及び 375 mm/km を採用した [8]。これらはいずれも 2003 年 11 月 20 日に北アメリカ大陸で観測された SED に伴う電離圏勾配の値が基になっている。

電離圏脅威モデルのうち、GBAS 基準局で電離圏遅延の急激な時間変化として電離圏勾配を検出することが可能な場合が存在する。前述の電離圏遅延の影響がコード擬似距離と搬送波位相で極性が逆でほぼ同じ大きさであることを利用して、コード擬似距離から搬送波位相による擬似距離を差し引いて得られる CCD (code-carrier divergence) の時間変化を用いた検出手法であり、これは CCD モニタと呼ばれる [9]。

しかしながら、電離圏フロントが基準局に到達していないか GBAS 基準局の IPP 速度と同期して GBAS 基準局で異常を検出できず、航空機側のみが電離圏勾配異常の影響を受ける場合も考えられる。このような場合に対処するために、米国

ではジオメトリ・スクリーニングと呼ばれる手法がとられている。これは、常に航空機側に GBAS 基準局では検出できない電離圏勾配異常が存在することを前提として起こりうるレンジ誤差を仮定し、その結果許容されない測位誤差をもたらす可能性のある GPS 衛星の組み合わせを地上側で抽出し、航空機側でそのような GPS 衛星の組み合わせで測位演算を行った場合には、保護レベルが警報限界を超えて使用できないように残留誤差を恣意的に大きくした情報を放送する手法である [8]。

わが国においては、米国のような数 100 mm/km を超える電離圏勾配の観測はこれまで報告されていないが、GBAS の電離圏リスクを考える上で SED に加えて低磁気緯度で顕著に観測されるプラズマバブルを考慮する必要がある。1 つのプラズマバブルで極性の異なる電離圏フロントが 2 つ生じるが、複数のプラズマバブルではさらに多くの電離圏フロントを考慮する必要があり、SED による垂直誤差の影響評価とは異なった視点での検討が必要となっている。また、SED と比較してプラズマバブルの発生頻度が高いという特徴もある。

これらを考慮して電子航法研究所では現在、日本における電離圏脅威モデルの構築と軽減手法の研究・開発を実施しており、CCD モニタによる異常な電離圏遅延の時間変化の検出、ジオメトリ・スクリーニングによる大きな測位誤差をもたらし得る GPS 衛星の組み合わせの排除に加え、滑走路方向の空間的な電離圏勾配異常を検出するため、GBAS 基準局とは別に滑走路端などに GPS 受信局を設置する電離圏フィールドモニタを検討している。最終的にはこれらのモニタ及び軽減手法により GBAS インテグリティに対するリスクが規定値以内に設計されているか検証を行わなければならないが、仮に電離圏フィールドモニタが必要となる場合、GBAS の設置、運用上の制限の増加、コストの増加などの結果を招く。これは、地上基準局で電離圏異常を検出できない場合を排除しきれないことによるものであり、電離圏勾配を有効かつ確実に検出する宇宙 (電離圏) 天気情報が提供されれば、回避することができる可能性がある。

## 6 むすび

近年、航空航法において GPS を用いた衛星航法の利用が進められているが、GPS の利用においては電離圏遅延の補正が大きな問題である。

航空航法においては、その精度だけでなく安全性が非常に重要であり、インテグリティの担保に重きが置かれる。また、航空航法は実利用に供されるものであるため、できる限りいつでも利用できるものでなくてはならない。このように、安全性が保たれる範囲において、これらの2つの相反する要求に応えなければならない。

SBAS 及び GBAS では、それぞれ異なる手法を用いてディファレンシャル補正情報とインテグリ

ティ情報を生成し航空ユーザに伝達することにより、高精度かつ安全な航空機誘導を実現する。これらにおいて、電離圏遅延量の局所的な勾配が安全性の脅威となる誤差を生じる原因として最も対処が難しいものである。電離圏勾配の脅威から航空ユーザを保護するため、SBAS、GBAS においてはそれぞれ国際標準を満たすための安全マージンを確保する、システムの設計や運用上の制限を付加するなどの対策がとられており、そのことが GPS のさらなる高度利用の障害となっている。

電離圏勾配を有効かつ確実に検出しタイムリーに発出される電離圏情報が実現されれば、航空航法における GPS のより高度な利用が可能となると期待される。

### 参考文献

- 1 坂井丈泰, "GPS 技術入門", 東京電機大学出版局, 2003.
- 2 Klobucher, J. A., "Ionospheric Effects on GPS, Global Positioning System: Theory and Applications", vol.1, B. W. Parkinson, J. J. Spilker, P. Axelrad, and P. Enge (Eds.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, 485-515, 1996.
- 3 International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Vol. I, 6th Ed., July 2006, ICAO
- 4 真鍋英記, "運輸多目的衛星用航法補強システム (MSAS) の供用開始", GPS/GNSS シンポジウム, pp.35-39, 2007.
- 5 Christie, J., B. Pervan, P. Enge, J. D. Powell, B. Parkinson, and P.-Y. Ko, "Experimental Observations of Ionospheric and Tropospheric Decorrelation Effect for Differential Satellite Navigation during Precision Approach", proc. of ION GPS-98, 739-747, 1998.
- 6 Pullen, S., Y. Park, and P. Enge, "The Impact and Mitigation of Ionosphere Anomalies on Ground-Based Augmentation of GNSS", the 12th International Ionospheric Effects Symposium, 2008.
- 7 Luo, M., S. Pullen, T. Walter, and P. Enge, "Ionospheric Spatial Gradient Threat for LAAS: Mitigation and Tolerable Threat Space", proc. of ION National Technical Meeting 2004, 490-501, 2004.
- 8 Ramakrishnan, S., J. Lee, S. Pullen, and P. Enge, "Targeted Ephemeris Decorrelation Parameter Inflation for Improved LAAS Availability during Severe Ionosphere Anomalies", proc. of ION National Technical Meeting 2008, 354-366, 2008.
- 9 Ene, A., D. Qiu, M. Luo, S. Pullen, and P. Enge, "A Comprehensive Ionospheric Storm Data Analysis Method to Support LAAS Threat Model Development", proc. of ION National Technical Meeting 2005, 110-130, 2005.



坂井 文泰

独立行政法人電子航法研究所通信・航法・監視領域主幹研究員 博士(工学) 衛星航法



松永 圭左

独立行政法人電子航法研究所通信・航法・監視領域主任研究員 衛星航法



吉原 貴之

独立行政法人電子航法研究所通信・航法・監視領域主任研究員 博士(理学) 衛星航法



齋藤 亨

独立行政法人電子航法研究所通信・航法・監視領域主任研究員 博士(理学) 超高層大気物理学、衛星航法