

## 2-7 衛星航法を用いた航空航法における電離圏変動の影響と宇宙天気情報の利用

### 2-7 *Ionospheric Impact on Air Navigation with Global Navigation Satellite System (GNSS) and Possible Mitigation by Using Space Weather Information*

齋藤 享

SAITO Susumu

航空航法では衛星航法 (Global Navigation Satellite System: GNSS) の利用が進み、今後の航空航法の中心となっていく。航空航法では安全性が非常に重要であり、極めてまれな場合を含めた電離圏の振る舞いの特徴づけが必要となる。航空航法では、これまでの1周波 GNSS から2周波・複数周波数 GNSS に向かって開発が進むが、要求される航法性能によっては電離圏による遅延誤差の影響がなくなるわけではないうえ、既存の1周波 GNSS ユーザーへのサービスも長期にわたって行わなければならない。さらに、電離圏シンチレーションの影響は2周波 GNSS であっても引き続き重要である。宇宙天気情報は、航空航法に要求される極めて高い安全性に伴う高い保守性を緩和するために利用できる可能性がある。対象とする GNSS アプリケーションの技術背景を考慮した上で、宇宙天気情報に信頼性の概念を取り入れていくことが非常に重要である。

Global Navigation Satellite System (GNSS) is now widely used in air navigation, and will be a main enabler of the future air navigation systems. Because very high level of safety is required in air navigation, ionospheric variations must be characterized to cover very rare cases. Although future air navigation will utilize dual-frequency and multi-constellation (DFMC) GNSS, ionospheric delay effects still remain for certain level of required navigation performance. Large number of legacy single-frequency (SF) GNSS users must be supported for a long time. Scintillation effects are common threat to both the DFMC and SF GNSS users. Space weather information may potentially be utilized to relax the conservatism to satisfy extremely high level of requirements for safety. To do so, space weather information should be developed to meet the requirements for each specific GNSS application. More importantly, integrity concept should be taken into account for space weather information.

#### 1 まえがき

国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO) では、より柔軟で交通容量の高い飛行経路を精度・安全性ともに高く実現するため、衛星航法 (Global Navigation Satellite System: GNSS) を用いた航法を今後の航空航法の中心としていくこととしている [1]。航空航法に用いることができる GNSS は、ICAO が定める国際標準 [2] に規定されており、米国の GPS とロシアの GLONASS のそれぞれ L1 周波数帯 (1.57542 GHz) 信号のみである。1周波 (Single-frequency: SF) GNSS による測位には様々な誤差が含まれており、その中でも電離圏に起因する誤差は大きいものである。そのため、電離圏起因の誤差を補正す

るとともに、航空機が危険な状態に陥らないように安全性を担保するための電離圏に関連した補強情報が必要となる。現在、新たに L5 周波数帯 (1.17645 GHz) を加え、使用可能な衛星系に欧州の Galileo、中国の Beidou を加えた2周波・複数衛星系 (Dual-frequency and multi-constellation: DFMC) GNSS の標準化が進められているが、航空機の世代交代には時間がかかるため、既存の1周波ユーザーは今後も長期にわたって存在し続ける。加えて DFMC GNSS においても電離圏の影響は完全になくなるわけではないため、電離圏の情報は航空航法にとって将来にわたって重要であり続ける。本稿では、GNSS を用いた航空航法のために行ってきた電離圏関連の研究についてまとめるとともに、将来の DFMC GNSS における電離圏の影響と必要と

される対策について述べる。さらに、2018年から開始された ICAO 宇宙天気情報サービス [3][4] の航空航法の高度利用の可能性についても議論する。

## 2 衛星測位 (GNSS) と誤差要因

GNSS においては、複数の衛星から放送される信号の伝播時間<sup>でんぱ</sup>を測定し衛星との距離を測定することにより、受信アンテナの位置と受信機の時刻を決定する。すなわち、3次元位置と時刻を決定するため、4個以上の衛星の信号を同時に受信する必要がある。一般的に、信号を受信する衛星数が多く、天球上に均等に分布しているほど測位誤差が小さくなる。

GNSS 衛星からは、それぞれの周波数ごとに擬似ランダムコードで変調された信号が放送されており、GNSS 受信機はそれらを用いて衛星と受信機との距離を測定する。測定された距離には様々な誤差が含まれており、コード変調を用いて測定した擬似距離 (コード擬似距離、 $\rho$ ) 及び搬送波位相の積算を用いて測定した擬似距離 (位相擬似距離、 $\lambda\phi$ ) は以下のように表せる。

$$\begin{aligned}\rho &= r + \delta I + T + c(\delta t_u - \delta t_s) + \epsilon_\rho \\ \lambda\phi &= r - \delta I + T + c(\delta t_u - \delta t_s) + N + \epsilon_\phi\end{aligned}$$

ここで、 $\lambda$ は GNSS 信号の波長、 $c$ は真空中の光速、 $r$ は幾何学的距離、 $\delta I$ は電離圏の屈折率が真空と異なることによる伝播遅延誤差 (電離圏遅延)、 $T$ は対流圏の屈折率が真空と異なることによる伝播遅延誤差 (対流圏遅延)、 $\delta t_u$ 及び $\delta t_s$ はそれぞれ受信機、衛星の時計誤差、 $\epsilon_\rho$ 及び $\epsilon_\phi$ はそれぞれコード擬似距離、位相擬似距離のランダム誤差 (地面や周囲の物体による反射に伴うマルチパス誤差、熱雑音など)、 $N$ は位相の整数値不定性である。ここで、受信機時計誤差 $\delta t_u$ は、幾何学的距離 $r$ に含まれる受信機 (アンテナ) 位置とともに推定される値である。これらのうち、対流圏及び電離圏の遅延が伝播経路に起因するものである。対流圏遅延はモデルによる補正が比較的有効であるが、電離圏遅延は変動が大きく、衛星測位において大きな誤差となり得る。電離圏遅延による誤差は電波の周波数 ( $f$  [Hz]) の2乗に反比例し、衛星と受信機との単位面積当たりの全電子数 ( $TEC$  [ $m^{-2}$ ]) に比例する。

$$\delta I = \frac{40.3}{f^2} TEC [m]$$

GPS L1 周波数においては、

1 TECU (1 TECU ( $10^{16}m^{-2}$ )) あたり 0.16 m となる。

GNSS を用いた測位の最終的な目的は、受信機 (アンテナ) の位置と時刻を求めることである。位置と時刻

は、衛星ごとの測距結果を4つ以上用いて、最小二乗法などにより最適な解として得る。この時、位置と時刻 (4要素縦ベクトル) と測距データ ( $N_{sat}$  (衛星数) 要素縦ベクトル) は、衛星配置によって決まる  $4 \times N_{sat}$  行列 ( $S$  行列と呼ばれる) で結びつけられる。したがって求めた位置と時刻の誤差 (測位誤差) は、衛星ごとの測距誤差を、 $S$  行列を用いて変換したものとなる。すなわち、測位誤差は衛星配置によって異なる。 $S$  行列の要素の値は全体の衛星配置と個々の衛星の位置によって決まり、ある衛星の測距誤差が  $\delta\rho$  である場合、その衛星による誤差の寄与は  $\delta\rho$  に対応する  $S$  行列要素を掛けたものとなる。 $S$  行列は衛星位置の関数となっているので、衛星軌道情報の誤差による衛星位置誤差が  $S$  行列を通して誤差要因として入ってくる。行列の要素の値は通常の衛星配置でも1以下のものから3程度まで存在するので、衛星によっては測距誤差の値よりも測位誤差への寄与分が小さい場合と逆に数倍に増幅されて大きくなる場合があり得る。この効果は、一般的には使用可能な衛星数に大きく依存するので、使用可能な衛星を十分確保することは GNSS 測位において非常に重要である。

電離圏の GNSS 測位への影響は、これまで述べてきたような遅延効果だけではない。電離圏に不規則構造 (GNSS 信号の場合 300 ~ 400 m の空間スケールを持つもの) が存在する場合、フレネル回折により地上に干渉パターンが生成され、受信される信号強度が不規則に変動する。これを電離圏強度シンチレーションと呼び、磁気低緯度のプラズマバブルに伴うものが主である。一方、磁気高緯度地域では、電離圏不規則構造が高速で衛星信号の伝播路を横切ることによる、搬送波位相の不規則な揺らぎが発生する。これを電離圏位相シンチレーションと呼ぶ。いずれの電離圏シンチレーションも受信機の信号追尾を難しくし、測距精度を低下させ、更に強い場合は衛星信号の追尾を途切れさせる。これは、1周波、2周波を問わず影響が発生する。先に述べたように、測位に使用可能な衛星数が減少すると測位精度が劣化するので、電離圏シンチレーションは使用可能衛星数の減少を通して測位精度の劣化の原因となる。

## 3 航空航法における GNSS の安全利用と電離圏

航空航法では、GNSS を用いた航法について国際技術標準が定められており、その中で、上で述べたような精度だけでなく安全性に関わる基準が定められている。航空航法では安全性が特に重要であり、飛行フェーズによって異なるが  $1 \cdot 10^{-7} \sim 1 \cdot 10^{-9}$  (99.99999 ~

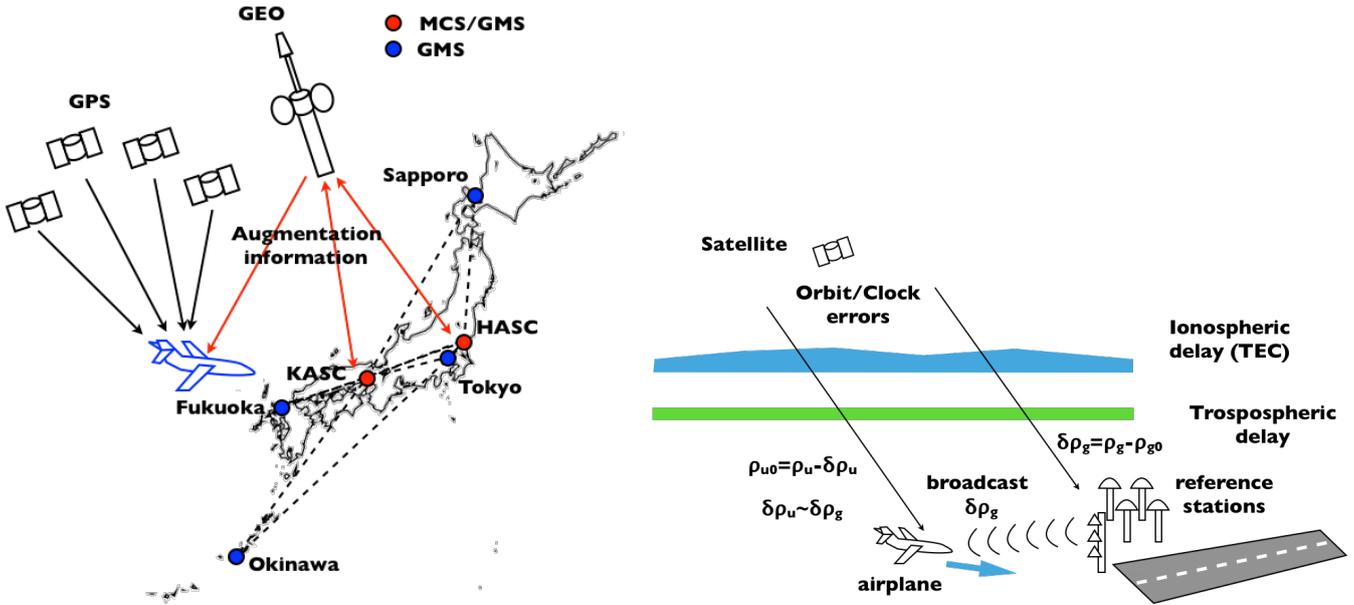


図1 SBAS(左)及びGBAS(右)の模式図

99.9999999%)の安全性が求められる。一方で、精度については、カテゴリーIと呼ばれる高度60mまでの精密進入誘導を実現するものであっても、垂直方向の誤差は95%値で4mまで許される[2]。

放送されるGNSS衛星信号の単独利用では、この極めて高い安全性を実現することができないので、補強システム(Augmentation System)と呼ばれる、安全性を補強するシステムが必要となる。補強システムにはいくつか種類があり、着陸進入誘導を可能とするものには地上型衛星航法補強装置(Ground-Based Augmentation System: GBAS)、衛星型衛星航法補強装置(Satellite-Based Augmentation System: SBAS)がある(図1)。補強システムは、補正によって精度を改善するだけでなく、GNSSユーザーにとって安全上の脅威となり得る誤差(Hazardous Misleading Information: HMI)を生じないように、GNSS信号の監視を行い、補正しきれない誤差要因については除去する機能を持つ(図2)。これをインテグリティモニタという。これらの補強システムにおいても、それぞれ詳細な技術基準が定められている[5]~[8]。

現状利用可能なGBAS及びSBASはいずれも1周波コード擬似距離を用いたディファレンシャル測位の種類であるため、電離圏の空間変動に伴う補正誤差が、測位誤差の最も大きな要因である。ディファレンシャル測位においては、位置が既知の基準GNSS受信局の測定値を用い、電離圏遅延を含む誤差補正值を生成する。しかし、電離圏遅延が空間的に変動する場合、基準局を用いて生成した電離圏遅延推定値は、航空機上の受信機の電離圏遅延とは必ずしも一致せず、その差が補正誤差となり、測位誤差として現れる。

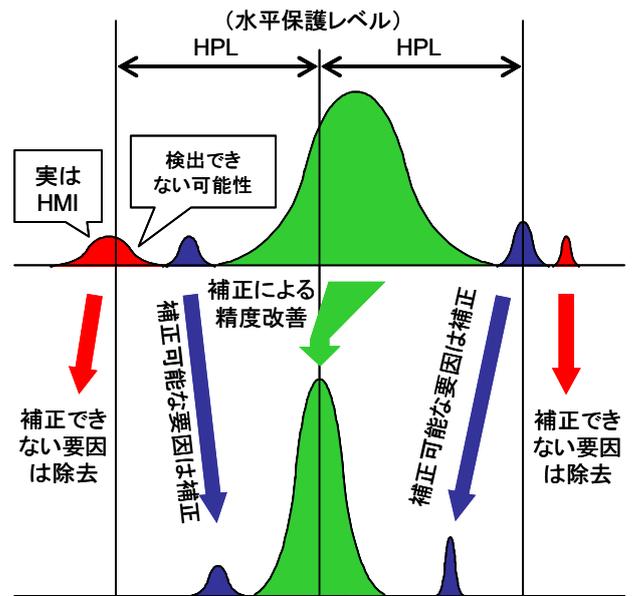


図2 補強システムの動作概念[9]

GBAS、SBAS等の補強システムでは、測位誤差が航空機の安全を脅かすものにならないように、航空機が測位誤差の保守的な限界値(保護レベル、Protection Level: PL)を求められるようになってきている。保護レベルが飛行フェーズによって決まる許容値(警報限界、Alert Limit: AL)を超える場合、その補強システムを用いたGNSSによる運行はできない。1-10<sup>-7</sup>~1-10<sup>-9</sup>の安全性のためには、標準偏差σの正規分布を仮定した場合、5.4~6.1σの幅を取ることが必要となる。保護レベルは、GNSS測距の潜在誤差の測位誤差へのS行列による投影として決まるので、潜在誤差の見積値と、衛星配置によって決まる。そのため、補強システ

## 2 電離圏研究

ムは、誤差要因ごとに図2に示すような補正・除去を行ったのちの潜在誤差を評価しなければならない。そのためには、それぞれの誤差要因の振る舞いの特性をあらかじめモデル化しておく必要がある。これを脅威モデル(Threat Model)という。先に述べた電離圏シンチレーションは、衛星数の減少を通して保護レベルの増大につながり、補強システムが使用可能な時間率(可用性、Availability)を減少させる。

## 4 GBAS における電離圏脅威モデル

本節では、GBAS を例にとり電離圏に関する脅威モデルについて述べる。DFMC 対応 GBAS は国際標準が策定中の状況であり、現在利用可能な GBAS は 1 周波 GPS/GLONASS 信号を用いるもののみである。したがって、電離圏に起因する誤差は地上の基準局の観測値によって補正される必要があり、空間的な変動による補正誤差をあらかじめ見積もっておく必要がある。

電離圏は常に何らかの空間変動を伴っている。電離圏静穏時においては、日本付近では基準局から 1 km 離れるごとに、L1 周波数の遅延にして数 mm であることがわかっている [10]。この値は保護レベル計算において大きな問題になる値ではない。しかしながら、プラズマバブルなどの電離圏じょう乱が発生した場合には、静穏時に比べ桁違いに大きな電離圏遅延の空間変動(電離圏勾配)が発生することが知られている。例えば、日本では 1 km あたり 540 mm の変動が記録されている [11]。電離圏じょう乱時の大きな電離圏勾配を、静穏時と同様に保護レベルで対応する場合、保護レベルが桁違いに大きなものとなってしまう、GBAS の可用性が損なわれる。そこで、GBAS においてはじょう乱時に相当する一定以上の電離圏勾配の影響を受ける衛星を検出し、航空機がそれを用いないように排除するインテグリティモニタ(電離圏モニタ)を備えている。インテグリティモニタを安全かつ可用なものとして設計するにあたっては、電離圏じょう乱に伴う電離圏勾配がどのような振る舞いをするか、あらかじめ調べてモデル化しておく必要がある。空港周辺の限られた範囲を対象とする GBAS においては、無限に長い波面状の電離圏勾配を想定し、それを図4に示すパラメータで特徴付ける。ICAO では、着陸までの誘導を実現するカテゴリー III GBAS (GBAS Approach Service Type D: GAST-D) の技術標準の策定においてその実現可能性を検証するため、欧米の磁気中緯度地域のデータに磁気低緯度地域のデータを一部加えて電離圏脅威モデルを策定した [2]。表1に、GAST-D 検証用電離圏脅威モデルの値を示す。

電離圏勾配の特性は、原因となる電離圏現象によっ

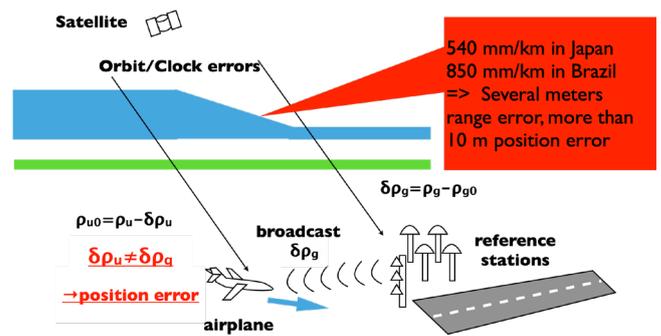


図3 GBAS における電離圏空間変動の影響

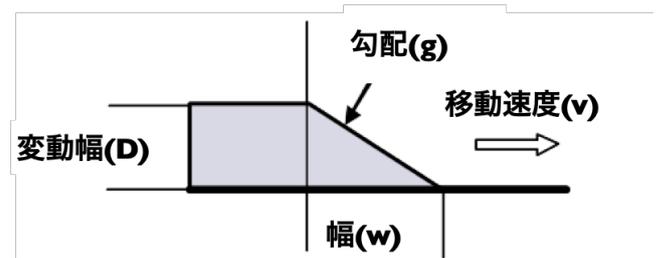


図4 GBAS 電離圏脅威モデルの構造とパラメータ 紙面方向に無限に長い波面状の電離圏勾配の断面を示す。

表1 GAST-D 検証用電離圏脅威モデルパラメータ値 [2]

パラメータ	値の範囲
幅 (w)	25 ~ 200 km
変動幅 (D)	0 ~ 80 m
移動速度 (v)	0 ~ 1500 m/s
勾配 (g)	移動速度による
移動速度	勾配最大値
$v < 750$ m/s	500 mm/km
$750 \leq v < 1200$ m/s	100 mm/km

て異なり、磁気低緯度地域においてはプラズマバブルが主な勾配の要因である。一方で、全世界共通の電離圏脅威モデルを作成すれば、一部の地域では保守的すぎるなどの問題が発生する。そのため、電離圏脅威モデルは、その原因となる電離圏現象の特性が同様と考えられる範囲内で、地域特性を反映することが望ましい。ICAO アジア太平洋地域では、地域内の電離圏勾配データを収集し解析することにより、アジア太平洋地域内の磁気低緯度電離圏に適用可能な電離圏脅威モデルが構築された [12]。

図5は、アジア太平洋地域内で観測された電離圏勾配の大きさ (g) を、それが観測された衛星の仰角の関数として表したものである。全体的に勾配は仰角が高いほど小さく、仰角が低いほど大きい傾向が見て取れる。これらの中で最大の電離圏勾配は、GAST-D 検証用電離圏脅威モデルの上限値である 500 mm/km を超

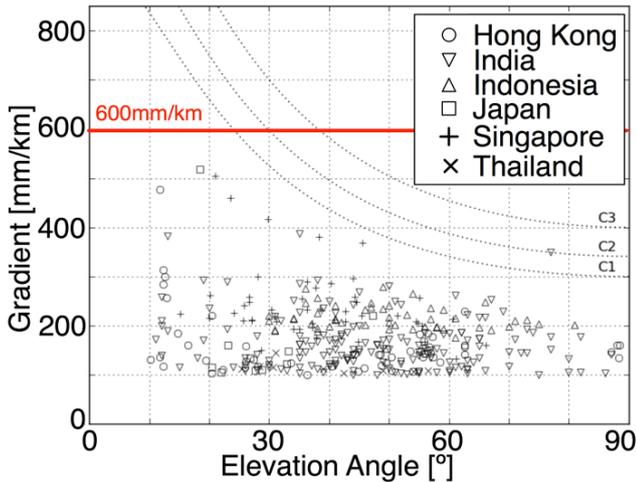


図5 ICAO アジア太平洋地域共通電離圏脅威モデル [12] C1, C2, C3 はそれぞれ垂直遅延量 300、341 及び 400 mm/km に対して、電離圏を高度 350 km に存在する薄い層と仮定した場合の垂直遅延量から斜め遅延量への換算係数を乗じたもの。

えている。図中の点線 (C1, C2, C3) は、それぞれ垂直遅延量 300、341 及び 400 mm/km に対して、電離圏を高度 350 km に存在する薄い層と仮定した場合の垂直遅延量から斜め遅延量への換算係数を乗じたものを示している。プラズマバブルが通常の電離圏に空いた空隙であることを考えると、電離圏勾配が仰角に対して傾斜係数の関数の形をとることは合理的である。

しかしながら、仰角 77 度において 1 点だけ 349 mm/km の電離圏勾配がインド (Hydelabad) において観測されている。極めて高い安全性が要求される航空航法において、最悪ケースを全て保護するという考え方によれば、1 点であっても想定範囲を超えるデータを見逃すことはできない。このデータを一定の余裕を持って保護するためには、傾斜係数の関数とする場合、図 3 中の C3 の曲線のように、中低仰角において観測されたデータに対して極めて大きな電離圏勾配の上限値を与えることになり、保守的すぎると考えられる。一方、観測データ数自体が限られており、また傾斜係数以外に適当な物理的根拠を持つ関数が現状では考えにくいことから、ここでは全ての観測データを保護することができるものとして、仰角によらず 600 mm/km を上限値として採用された。今後、多くの解析データの蓄積により、この上限値の検証を行い、可能であれば脅威空間の合理的な削減を行っていく必要がある。

この ICAO アジア太平洋地域共通 GBAS 電離圏脅威モデルは、地域内において共通して使用可能である一方で、一部の地域では保守的すぎる場合もあり得る。日本は磁気低緯度から中緯度への遷移領域にあり、電離圏勾配の特性も磁気低緯度地域とは異なる部分があると考えられる。また、電離圏脅威モデルについては、勾配 (g) だけではなくその他のパラメータも重要であ

ることから、国土地理院の GEONET を用いた電離圏勾配の特性解析が行われている [13]。これらの成果は、現在東京・羽田空港において試験中の実用 GBAS 装置の安全性設計に活用されている。しかしながら、解析例は限られており保守性が高いことから、更なるデータ解析により電離圏脅威モデルの保守性を合理的に削減していく必要がある。これにより GBAS の性能向上が期待できる。

## 5 次世代 GNSS 航空航法における対策

電離圏遅延は周波数に依存するので、異なる周波数の信号を組み合わせることにより、磁場に依存する高次の項を除いておおむね消去することができる。2 周波を用いる測位では、一般的に電離圏遅延の項を消去した、電離圏フリー線形結合

$$\rho_{IF} = \frac{f_1^2 \rho_1 - f_2^2 \rho_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

が用いられる。ここで、 $f_1$ 、 $f_2$  はそれぞれ 1 番目、2 番目の周波数、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$  は 1 番目、2 番目の周波数に対応する擬似距離測定値である。次世代 DFMC SBAS においては、電離圏フリー線形結合を用いられる [14]。

電離圏フリー線形結合では、電離圏遅延誤差を消去することができる一方で、上式の分母が周波数の 2 乗の差になっていることからわかるように、その他の誤差が増幅されるという欠点を持つ。この雑音増大のため、通常時の保護レベルが増大し、安全性要件が厳しい場合には可用性が損なわれることがある。そのため、カテゴリ III 着陸誘導を行う DFMC GBAS においては、測位は雑音の少ない 1 周波信号のみを用いて行い、電離圏勾配の検出に 2 周波信号を用いることが提案され検討されている [15][16]。この場合、1 周波 GBAS の場合と同様に電離圏脅威モデルが必要となるので、継続した電離圏勾配の観測と解析が必要となる。

衛星信号の追尾を難しくする電離圏シンチレーションの影響は 2 周波信号が利用可能となっても回避することができない。2 周波信号に依存する場合は、いずれか一方の信号が途切れた場合にその衛星が使用不可となるので、より影響が大きいと言える。一方で、次世代 GNSS において複数衛星系が使用可能となることで、使用可能な衛星数が減少する影響は既存の GNSS に比べて抑えることができる。しかしながら、安全かつ可用な航法システムのためには、電離圏シンチレーションの特性、特にその発生頻度、同時に影響を受け得る衛星数などを明らかにしておく必要がある。加えて、電離圏シンチレーションによるインテグリティモニタへの影響も無視することはできない。追尾損失に

至らない程度の電離圏シンチレーションであっても、測距雑音の増加により、各種インテグリティモニタの感度低下につながり得ることが示されている [17]。インテグリティモニタへの電離圏シンチレーションの影響を評価するためには、インテグリティモニタが行っている解析の原理に即した評価指標を用いることが重要である。

### 6 衛星航法における宇宙天気情報利用の意義

静穏時の電離圏空間変動は、GBAS や SBAS によって十分な精度で補正することができる。実際、石垣島で行った GBAS 飛行実験では、電離圏静穏時の垂直精度の 95 % 値は 1.17 m であった [18]。むしろ、電離圏起因の誤差の影響は安全性の面に強く現れる。電離圏変動は他の誤差要因に比べ変動が激しいため、 $1-10^{-7}$  ~  $1-10^{-9}$  の安全性を実現するために、極めて保守的な過程が用いられる。最も保守的な仮定は、常に電離圏異常が存在していると仮定すること、言い換えれば電離圏異常の発生の事前確率を 1 と仮定していることである。これは、外部システムに依存しない単体の補強システムを目指すために生じるものである。補強システム側が GNSS 衛星を用いて監視している「点」以外の電離圏の状態を、定量的な信頼性をもって知ることができないため、保守的に電離圏異常の発生の事前確率を 1 と仮定するのである。ここが宇宙天気情報の活用が期待できる大きなポイントである。電離圏物理研究のために開発されてきた様々な観測手法により、電離圏勾配の有無を観測することができる。例えば、VHF レーダーを用いることによりプラズマバブルの空間構造を知ることができる。VHF レーダーを GBAS のための電離圏監視手法として取り入れるための基礎検討 [19] によれば、これにより GBAS における電離圏起因誤差を低減する可能性が示されている。

安全性が要求される GNSS アプリケーションでは、様々な保守的な仮定がなされていることが多く、宇宙天気情報の利用価値が見いだせる可能性が十分ある。しかし、宇宙天気情報は補強システムにとっての外部システムであるので、宇宙天気情報について定量的な信頼性が必要になることには注意が必要である。言い換えれば、実際に電離圏勾配が存在した場合にこれを見逃してしまう確率を定量化しなければならない。しかし、元々常に電離圏勾配が存在していると仮定している（つまり発生の事前確率が 1.0）ので、宇宙天気情報についての信頼性は保守的なものでよく、例えば 90 % の信頼性（10 回に 1 回は見逃す）としても、補強システムに要求される安全性レベルを 1 桁緩和することができるのでその効果は大きい。このように、対象

とする GNSS アプリケーションの技術背景を理解するとともに、宇宙天気情報に信頼性の概念を取り入れていくことが非常に重要である。

### 7 むすび

本研究では、航空航法における GNSS 利用について、航空航法に特有の安全性の観点から電離圏の影響と宇宙天気情報の利用について述べた。安全性の観点では、電離圏脅威モデルと呼ばれる、それぞれの航法システムに即した電離圏の振る舞いの特徴づけが重要である。航空航法では、GNSS が航法システムの中心となり、さらにこれまでの 1 周波 GNSS から 2 周波・複数周波数 GNSS に向かって開発が進んでいる。2 周波 GNSS においては、電離圏遅延効果を消去できるものの、要求される航法性能によっては電離圏遅延を消去することに伴う雑音が問題となるなど、電離圏遅延の影響がなくなるわけではない。加えて既存の 1 周波 GNSS ユーザーも長期にわたって存在するため、電離圏の遅延効果の特徴づけは引き続き行っていかなければならない。さらに、電離圏シンチレーションの影響は 2 周波 GNSS であっても引き続き重要である。宇宙天気情報は、航空航法に要求される極めて高い安全性に伴う高い保守性を緩和するために利用できる可能性がある。対象とする GNSS アプリケーションの技術背景を考慮した上で、宇宙天気情報に信頼性の概念を取り入れていくことが非常に重要である。

#### 【参考文献】

- 1 International Civil Aviation Organization, "Global Air Navigation Plan (Doc9750)," 6th Edition, 2019.
- 2 International Civil Aviation Organization, "Aeronautical telecommunications," Annex 10 to the Convention on the International Civil Aviation, Amendment 92, 2020.
- 3 International Civil Aviation Organization, "Meteorological service for international air navigation," Annex 3 to the Convention on the International Civil Aviation, 20th Edition, 2020.
- 4 International Civil Aviation Organization, "Manual on space weather information in support of international air navigation (Doc10100)," 6th Edition, 2019.
- 5 RTCA DO-246E Change 1, "GNSS-based precision approach local area augmentation system (LAAS) signal-in-space interface control document (ICD)," 2019a.
- 6 RTCA DO-253D Change 1, "Minimum operational performance standards for GPS local area augmentation system airborne equipment," 2019b.
- 7 RTCA DO-229F, "Minimum operational performance standards for Global Positioning System/Satellite Based Augmentation System airborne equipment," 2020.
- 8 EUROCAE ED-114B, "MOPS For Global Navigation Satellite Ground Based Augmentation System Ground Equipment to support Precision Approach and Landing," 2019.
- 9 坂井丈泰, 松原圭左, 吉原貴之, 齋藤亨, "航空航法における衛星航法の利用と電離圏の影響," 情報通信研究機構季報, vol.55, pp.203-213, 2009.
- 10 吉原貴之, 齋藤亨, 藤井直樹, "日本における GPS 衛星電波の局所的な電離圏遅延勾配の背景場の評価," 日本航海学会論文集, 123 号, 2010.
- 11 Saito, S. and T. Yoshihara, "Evaluation of extreme ionospheric total

- electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System," *Radio Sci.*, vol.52, pp.951–962, 2017. doi:10.1002/2017RS006291
- 12 Saito, S., S. Sunda, J. Lee, S. Pullen, S. Supriadi, T. Yoshihara, M. Terkildsen, and F. Lecat, ICAO APANPIRG Ionospheric Studies Task Force, "Ionospheric delay gradient model for GBAS in the Asia-Pacific region," *GPS Solut.*, vol.21, pp.1937–1947, 2017. DOI 10.1007/s10291-017-0662-1
  - 13 Nakamura, M., S. Saito, and T. Yoshihara, "Characteristics of ionospheric gradients in the transition region from magnetic low to mid-latitudes for GBAS implementation," *Proc. ION 2019 Pacific PNT Meeting*, pp.827–834, 2019.
  - 14 International Civil Aviation Organization, DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation, 2018. <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/DFMC-SBAS.aspx>
  - 15 Pierattelli, S., C. Coveri, C. Rihacek, S. La Barbera, A. Miglietta, J.-J. Koch, G. Vivaldi, I. J. Fanneløp, G. Caligaris, and N. Honorè, SESAR2020 PJ14 final project report, 2019.
  - 16 Felux, M., M. S. Ciriuc, J. Lee, and F. Holzapfel, "ionospheric gradient threat mitigation in future dual frequency GBAS," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol.2017, 4326018, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4326018>
  - 17 Saito, S. and T. Yoshihara, "Impact assessment of ionospheric scintillation associated with plasma bubbles on GAST-D ground integrity monitors," *Proceeding of Institute of Navigation GNSS+ 2018*, pp.2186–2194, 2018.
  - 18 Saito, S., T. Yoshihara, A. Kezuka, S. Saitoh, S. Fukushima, and Y. Otsuka, "GAST-D Flight experiment results with disturbed and quiet ionospheric conditions," *Proc. ION GNSS+ 2015*, pp.1494–1499, 2015.
  - 19 Supriadi S. and S. Saito, "Simulation study of mitigation of plasma bubble effects on GBAS using a VHF radar," *NAVIGATION*, vol.66, pp.845–855, 2019. <https://doi.org/10.1002/navi.330>

齋藤 享 (さいとう すずむ)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所  
電子航法研究所  
航法システム領域  
上席研究員  
博士(理学)  
超高層大気物理学、衛星航法、航空航法