



5. 電波・測位障害

5. Impact on Radio Communications and Satellite-Based Positioning

斎藤 享, 津川 卓也¹⁾SAITO Susumu and TSUGAWA Takuya¹⁾海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所, ¹⁾ 情報通信研究機構

(原稿受付: 2024年2月20日)

宇宙天気現象のうち、地球の超高層大気の一部である電離圏変動は電波伝播に大きく影響を与える。本章では電波を用いた社会システムである通信・放送と衛星電波を用いた測位に着目する。これらの電離圏変動の影響を解説するとともに、影響が発生しうる現象の規模と発生頻度について紹介する。

Keywords:

radio communication, global navigation satellite system, ionospheric impact

5.1 電離圏

高度約60~1000 kmの超高層大気は、太陽からのX線や極端紫外線の吸収などにより、その一部が電離したプラズマ状態になっており、電離圏と呼ばれる。電離圏は太陽や下層大気の影響を受けて常に変動しており、そのプラズマの濃さや構造に応じて、異なる周波数帯の電波に対して異なる影響を与えることが知られている。そのため、現在の生活に必要な不可欠な社会インフラとなっているGPS等の全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) や通信・放送衛星、また古くから見通し範囲を超える通信手段である航空無線や船舶無線、防災無線等に利用されている短波通信・放送など、電波伝播を利用したシステムは、電離圏の各領域で発生する変動や乱れにより障害が発生することがある。本章では、まず電離圏の構造について簡単に触れたのち、通信・放送・測位への電離圏の影響とその規模について記述する。

図1に示すように、電離圏は高度および組成の違いから高度が低い方からそれぞれD、E、F領域と呼ばれており、高度300~400 km付近のF領域で最も電子密度が高くなっている。電離圏の主電離源は、基本的には太陽からのX線、極端紫外線等であるため、プラズマ密度は太陽天頂角に依存して、日出から増加し、昼間に極大になったのちに夜間にかけて減少するという日周期の変化をしている。また、太陽天頂角が小さくなる低緯度域のプラズマ密度が高くなる傾向があるが、実際には磁気赤道を挟んだ緯度帯 (磁気緯度±15度程度) にプラズマ密度が高い領域である赤道異常と呼ばれる領域が形成される。電離圏電子密度は季節によっても変動するほか、太陽風や磁気圏活動、中性大気の風などの影響も受けて常に変動

Electronic Navigation Research Institute, TOKYO 182-0012, Japan

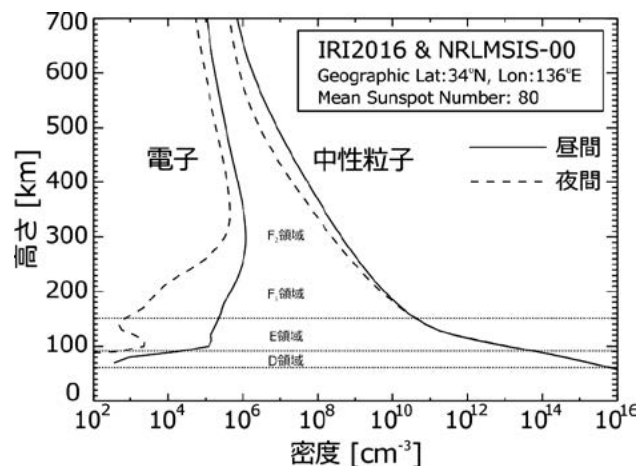


図1 電離圏の密度構造。

している。

5.2 電波通信・放送に対する影響

通信・放送に用いられる電波の送信点から受信点までの伝わり方はその周波数によって異なる。この周波数毎の電波伝播の違いにより、電離圏における宇宙天気現象 (電離圏現象) による影響も異なる。通信・放送に対する電離圏現象とその影響を表1に示す。

5.2.1 短波 (HF) に対する影響

通信衛星や海底ケーブルが発達した現在において、短波通信の役割は限定的であるものの、航空無線や船舶無線、防災無線、国際ラジオ放送など遠距離通信に用いられている。短波 (High Frequency: HF) 通信が影響を受ける可能性がある電離圏の宇宙天気現象として、デリンジャー現象、電離圏負相嵐、極冠吸収、プラズマバブル

corresponding author's e-mail: susaito@mpat.go.jp

表1 通信・放送に対して障害を起こし得る電離圏現象と影響.

分野	影響と被害	障害を起こし得る電離圏現象
通信・放送	短波(HF)に対する障害	デリンジャー現象 電離圏負相嵐 プラズマバブル 極冠吸収
	超短波(VHF)に対する障害	プラズマバブル スポラディックE層
	極超短波(UHF)に対する障害	プラズマバブル

が挙げられる.

デリンジャー現象は、太陽フレアが発生した時に急激にX線強度が増大することで、電離圏D領域の電離が進み電子密度が急増し、短波が吸収される現象である。電波吸収量はD領域の電子密度が高いほど大きく、低い周波数の電波ほど影響が大きくなる。D領域の伝播経路で受ける吸収の総量が電波の送信強度よりも大きくなると、通信途絶（ブラックアウト）が発生する。デリンジャー現象の発生継続時間は、太陽フレアに伴う電磁放射の継続時間に依存し、数10分から数時間程度である。

磁気嵐に伴いプラズマ密度の日周期変化に擾乱が発生することがあり、これを電離圏嵐と呼ぶ。電離圏嵐は、プラズマ密度が大きく増える電離圏正相嵐と、大きく減る電離圏負相嵐に分けられる。正相嵐が発生すると、通常は電離圏を通過する高い周波数帯の短波においても電離圏で反射されるようになり、見通し外の短波通信・放送として利用可能な周波数帯が広がることになるため、障害という点での影響はない。一方、負相嵐が発生すると、通常はF領域で反射される短波帯の電波が、反射されずに電離圏を通過してしまうため、見通し外の短波通信や短波放送の受信が困難になる。負相嵐は磁気嵐を起因としてその発生から数時間～数日継続する。

プラズマバブルは、磁気赤道を中心とした低緯度の電離圏において、日没後局所的に電子密度が低い領域が「泡」のように発生する現象である。プラズマバブルは、磁力

線に沿って南北方向に広がりながら東向きに移動する。太陽活動が活発な時や、磁気嵐が発生した時には大きく成長し、日本のような中緯度域まで発達することもある。プラズマバブルの内部や周辺では、電子密度の空間的な変化が大きく、短波帯～極超短波帯の電波伝播に影響がある。短波帯においては、プラズマバブルの下部構造による電波伝播方向の変化やプラズマバブル構造に沿った異常伝播等が考えられるが、短波通信・放送における障害という点では影響は少ない。

極冠吸収（Polar Cap Absorption: PCA）は、太陽フレアに伴って放出される太陽高エネルギー粒子によって、極冠域の電離圏D領域の電離が急激に進むことで電波の吸収が増大し、短波帯を利用した通信・放送ができなくなる現象である。太陽フレア発生から30分～数時間後に発生し、数日続くこともある。PCAは極冠域において昼夜を問わず発生する。そのため、極航路を飛行する航空機との航空無線による通信などに影響が出るおそれがある。

デリンジャー現象、磁気嵐に伴い発生する電離圏嵐の発生頻度は11年周期の太陽活動に大きく依存する。プラズマバブルの発生頻度も太陽活動が高いほど高い。加えて中・高緯度まで発達するプラズマバブルは磁気嵐の主相に発生することが多い。また、プラズマバブルの発生頻度は、顕著な季節および経度変化があり、日本など東アジア域においては、春と秋に発生頻度が大きくなる[1]。

表2及び表3に、長期観測データの統計解析やシミュレーション等に基づいて導出した短波通信・放送に影響を与える電離圏現象の発生頻度及び規模の関係を示す[2]。

5.2.2 超短波（VHF）に対する影響

超短波（Very High Frequency: VHF）帯の電波は、通常電離圏で反射されないため、見通し内伝播の範囲で用いられる。主にFMラジオ放送や航空航法、防災・消防無線などに利用されている。VHF帯の通信・放送が影響を受ける電離圏現象としては、スポラディックE層（Es層）

表2 短波通信・放送に影響を与える電離圏現象の発生頻度と規模[2].

電離圏現象	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
デリンジャー現象	吸収量（長距離）[dB] ¹⁾	71	83	93	100
	継続時間[h] ²⁾	0.63 - 1.6	1.8 - 3.6	4.0 - 6.8	7.4 - 11.9
プラズマバブル	継続時間 [h]	4 - 5	6		

¹⁾ 長距離短波回線に基づく（実効太陽天頂角0度 6.6 MHzの場合）

²⁾ イオノゾンデ観測に基づく（1 - 30 MHz 'B'および dfmin ≥ 2.5 MHzの場合）

表3 極冠吸収の発生頻度と規模.

電離圏現象	規模を示すパラメータ	日常～ 複数回/年	1回/1年	1回/10年	1回/100年	1回/1000年
極冠吸収	10 MeV以上のプロトンフラックス[pfu] ¹⁾	10 ¹⁻²	10 ³	10 ⁴	4 × 10 ⁵	10 ⁶
	Kp指数 ²⁾	4(7)	7(8)	8(9)	9	9
	磁気緯度（日中）@6.6 MHz 10 dB ³⁾	65° (60°)	57° (55°)	53° (52°)	51°	50°
	磁気緯度（夜間）@6.6 MHz 10 dB ³⁾	65° (60°)	60° (58°)	56° (55°)	53°	53°
	最短継続時間[h] ⁴⁾	22	46	71	83	89

¹⁾ 見積り設定。[3, 4]による。1 pfu = 1/cm²/sec/sr

²⁾ 見積り設定。磁気嵐とは必ずしも一致しない。括弧内の数値はNOAA-Scaleを表す。

³⁾ 極冠吸収が広がる緯度。[4, 5]による。

⁴⁾ SEPイベントで、10 MeV以上の粒子フラックスが>10 pfuとなる継続時間。[2]による。

およびプラズマバブルが挙げられる。

Es層は、高度100 km程度に局所的且つ突発的に発生する電子密度の濃い層であり、日本では夏季に頻発する傾向がある[6]。電離圏への電波伝播の方向が斜めになり入射角が大きくなるに従って、反射可能な周波数が上がり、通常は電離圏で反射されないVHF帯の電波であっても、Es層の密度が高く入射角が極めて大きくなると、Es層によって反射されるようになる。この場合、見出し外の遠くの通信や放送との混信の原因となる。

表4に、イオノゾンの長期観測データに基づいて導出したVHF帯の通信・放送に影響を与えるEs層の発生頻度及び規模の関係を示す[7]。表4から、Es層による影響により、ある1組の送受信局間で、1年に1回程度の頻度で水平距離1000 kmの異常伝播が可能な周波数の上限が100 MHz、2000 kmの異常伝播が可能な周波数の上限が130 MHzであることがわかる。航空機用無線標識VORで使用されるVHF帯(108~118 MHz)の場合、水平距離2000 km及び1000 kmの異常伝播を起こすEs層が、それぞれ1年に1回以上、10年に1回程度の頻度で発生することを意味する。航空機用無線標識VORのEs層での反射による異常伝播の発生確率は、日本においてEs層が頻発する夏季において、25%程度であると報告されている[8]。また、強いEs層の継続時間としては、表4に示すように、Es層に垂直に電波が入射した場合の最大反射周波数が13.3 MHz以上の場合(80 MHzの電波がEs層で反射され水平距離2000 km以上伝播する目安)10年に1度の頻度で5時間程度である。

5.2.3 極超短波(UHF)に対する影響

衛星通信で用いられる極超短波(Ultra High Frequency: UHF)の電波は、通常電離圏を通過するが、プラズマバブル等に伴うプラズマの不規則構造により、信号受信強度の短周期の変動が発生することがある。この現象は「電離圏シンチレーション」あるいは「シンチレーション」と呼ばれており、地上-衛星間の通信品質の劣化や衛星から送信される撮像データの乱れなどにつながる。この現象は古くから知られており、日本においてもInmarsatなどの衛星通信に影響が出ることが知られている[9]。電離圏によるシンチレーションは周波数が高いほど影響が小さく、10 GHz以上の衛星通信システムにおいては、他の対流圏等の影響に比べてほとんど無視できる程度となる。一方、Lバンド(1.5 GHz帯)やSバンド(2 GHz帯)の衛星通信システムにおいては、プラズマバブルに伴うシンチレーションの影響は無視できなくなる。電波伝播

経路がプラズマバブルの構造(磁力線に沿って南北に伸びる)を長く通過するほど影響が大きいため、日本においては静止軌道衛星など南方低仰角の衛星通信に影響が大きくなると考えられる。

5.3 衛星測位に対する影響

測位とは、何らかの手段を用いて位置・速度・時刻を決定することであり、様々な手段がある。しかし、ここでは近年非常に広く利用が進んでいる測位衛星信号を用いた測位(衛星測位)、特に米国のGPSに代表されるGNSSと、それを用いた様々な測位システムについて取り扱う。

5.3.1 衛星測位と誤差要因

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り、良好な測位結果を得ることができる。

GNSS衛星からは主に、UHF帯のうち1.0~1.6 GHzの複数の周波数においてコード変調信号が放送されている。GNSS受信機は、これらの信号を用いて衛星との距離を測定するが、測定された距離には様々な誤差が含まれており、その典型値は表5に示す通りである。これらのうち、電離圏遅延は変動が大きく経験モデルによる補正が比較的効きにくいいため、衛星測位において大きな誤差となりうる。電離圏遅延による誤差(δI)は電波の周波数(f [Hz])の2乗に反比例し、衛星と受信機の間単位面積当たりの全電子数(TEC[m⁻²])に比例し、以下のように表せる。

$$\delta I = 40.3 \cdot \frac{\text{TEC}}{f^2} \quad (1)$$

GPS L1周波数においては、1 TECU (10¹⁶ m⁻²) あたり0.16 mとなる。

受信アンテナの3次元位置と受信機時刻は、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(Nsat(衛星数)要素縦ベクトル)は、衛星配置によって決まる4×Nsat行列(S行列と呼ばれる)で結びつけられる。従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となる[10]。すなわち、測位誤差は衛星配置によって異なり、測距誤差から一概に言えるものではない。

表4 Es層の発生頻度と規模[7].

電離圏宇宙天気現象	規模を示すパラメータ	1回/1年	1回/10年	1回/100年
		Es層	1,000 km伝播可能な周波数の上限[MHz]	100
	2,000 km伝播可能な周波数の上限[MHz]	130	>180 ¹⁾	>180 ¹⁾
	foEs > 13.3 MHzにおける継続時間 ²⁾ [h]	~3	~5	
	foEs > 18 MHzにおける継続時間 ³⁾ [h]	1-2	~3	

1) 不等号はイオノゾンで観測可能な臨界周波数が30 MHzまでであることによる。

2) 80 MHzの電波が水平距離2000 km以上伝播する目安

3) 80 MHzの電波が水平距離1000 km以上伝播する目安

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うる。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。

5.3.2 GNSSを用いた測位方式と電離圏の影響

GNSSを用いた測位には、1つの周波数のみを利用する1周波測位と、2つの周波数を利用する2周波測位がある。2周波測位では、電離圏遅延が周波数に依存することを利用して電離圏遅延誤差を消去することができる一方で、機器が複雑で高価となりやすく、多くのGNSS測位では1周波測位が用いられている。航空航法においては、信号の提供が衛星系の運用国により保証され、かつ性能の国際基準[11]が定められている衛星系の信号のみ使用可能である。これまではGPS及びGLONASSのL1帯の信号のみが使用可能であったが、ごく最近GPS、GLONASS、Galileo、Beidouの4衛星系のL1及びL5帯の信号が使用可能となったが、国際基準航空航法として2周波測位の利用が広まるには相当な時間がかかると考えられている。つまり、1周波測位は電離圏遅延誤差の存在にもかかわらず広く使われているのである。

GNSSを用いた測位は、その手法により大きく単独測位、相対測位、高精度単独測位(Precise Point Positioning: PPP)に分けられ、求める測位精度や信頼性によって方法が選択される。単独測位が1台の受信機によって測位を行う方法であるのに対し、相対測位は複数の受信機で同時に測位を行い、相対的な位置関係を計測することで高精度な測位を実現している。相対測位は、さらに、到来する搬送波の到来時間の差から衛星との距離を求め(擬似距離)位置を決めるコード測位と、電波の位相を利用する位相測位(搬送波測位、キネマティック測位ともいう)に分けられるなど、測位精度を向上させるためにさまざまな工夫がされ、方法も多岐にわたっている。単独測位においても、コードを主に用いる測位と搬送波位相を主に用いる測位があり、PPPなどの搬送波測位においては、様々な補正情報を用いたセンチメートル級の精度も可能である。

1周波単独測位においては、経験モデルを用いた電離圏補正が行われることが多い。GPSの場合は補正モデルパラメータが衛星から放送されており、受信機はこれを用いて電離圏遅延を補正する。しかし、電離圏嵐等によって電離圏電子密度が通常と大きく異なる場合には、補正による誤差が発生する。電離圏正相嵐、負相嵐ともに誤差要因となるが、電離圏電子密度が0以下になり得ない負相嵐よりも正相嵐の方が、一般的に影響が大きいと言える。

1周波相対測位においては、基準となる受信機と測位解を求めたい受信機の間で電離圏遅延に違いがある場合に、電離圏遅延の空間差(電離圏勾配という)が誤差要因となる。相対測位においては、受信機間の電離圏遅延の差

が問題であるので、空間的に急激に変化する電離圏現象が大きな問題となる。電離圏電子密度が空間的に急減するプラズマバブル、磁気嵐に伴って急増するSED(Storm Enhanced Density)あるいはSIPS(Storm-Induced Plasma Stream)と呼ばれるものがその代表である。搬送波位相を用いるキネマティック測位においては、1波長(GPS L1信号の場合0.19 m)程度以下の誤差が問題になる。したがって、中規模伝播性電離圏擾乱(MSTID)のような、1 TECU(GPS L1信号において0.16 m相当)程度の比較的小さな振幅の電離圏擾乱であっても、測位誤差の増大、収束時間の増大など障害となりうる。ただし、電離圏空間変動が小さくとも、全体的に電離圏遅延が極めて大きく増大する場合は、補正可能な値の上限を超えてしまい、補正誤差が生じる場合もありうることに注意が必要である。

PPPにおいては、誤差要因について精密な補正を行い、センチメートル級の測位を実現する。表5からわかるように、電離圏遅延は誤差の大きな割合を占めるので、電離圏補正を難しくする電離圏擾乱は、測位誤差の増大、収束時間の増大などPPPの障害となりうる。

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により、磁場に依存する高次の項を除いて概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

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

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、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ f_1 、 f_2 に対応する擬似距離測定値である。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、2周波測位であっても、キネマティック測位、PPPにおいては、通常時であっても解の収束時間が1周波測位に比べて増大することがある。そのため、2周波高精度測位であっても、電離圏の補正が性能向上の鍵であり、より正しい電離圏情報を提供することが望まれている。

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

表5 GNSS 測距誤差の典型値 (GPS L1 信号 [10]).

誤差要因	誤差
電離圏遅延	垂直換算で数m~数10m 衛星仰角により最大3倍程度の変動.
対流圏遅延	垂直換算、海面高度で2.3~2.6 m 衛星仰角により最大10倍程度の変動.
衛星時計誤差 (放送暦補正後)	約3 m
コード擬似距離ランダム誤差 (受信機雑音, マルチパス)	0.5~1.0 m
位相擬似距離ランダム誤差 (受信機雑音, マルチパス)	0.5 cm ~ 1.0 cm

(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、さら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。

ここまでは主にGNSSを用いた測位の精度に着目して議論してきた。しかしながら、GNSS測位においては、精度だけが重要であるわけではなく、その目的に応じて重要視される指標が異なることに注意が必要である。例えば、固定点の測量であれば、長時間連続してキネマティック測位を行うことでミリメートル級の測位精度が得られるが、ここでは少々の信号の途切れは長時間データを用いて補正することができるので、それほど問題とはならない。しかし高速移動体では位相追尾の途切れの影響が大きいので、同じ方法は利用しにくい。航空航法においては、精度はメートル級でよい代わりにリアルタイム性と非常に高い信頼性が必要とされ、測位解が一定の範囲に含まれることを保証し、保証できない場合には警報を出す必要がある。また、測位解が途切れなく得られることも重要である。このような場合においては、発生頻度が非常に低い異常現象についても、必要とされる信頼性の水準と比較して必要であれば考慮しなければならない。このように、GNSS測位では「精度」が目ざされやすいが、その利用方法に応じた指標を用いて議論する必要がある。

これらをまとめたものが、表6である。上でも述べたように、電離圏の影響があるかどうかはGNSS測位システムごとに必要とされる精度や信頼性、使いやすさなどのレベルに強く依存する。表6は一般論として示したものであり、チェックのない項目についてもシステムに

よっては影響が出る場合もある。また反対に、チェックのある項目についても、システムによっては特に影響が出ない場合もあることに注意が必要である。

5.3.3 航空航法におけるGNSSの利用

航空航法においては近年、地上の無線航法装置を用いた航法から、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GNSSを用いた航法への移行が進められている。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重要であり、99.99999~99.9999999% ($1-1 \times 10^{-7} \sim 1-1 \times 10^{-9}$)の安全性が求められる。一方で、精度については、カテゴリ-Iと呼ばれる高度60 m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4 mまで許される[11]。

GNSS衛星信号をそのまま使っては、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。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うる誤差を生じないように、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。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相対測位の一種であるため、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。

しかし、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。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。 $1-10^{-7} \sim 1-10^{-9}$ の安全性を実現するために、航空航法では保護レベルと呼ばれる極めて保守的な誤差の限界値が用いられる。これは標準偏差 σ の正規分布を仮定した場合、 $5.4 \sim 6.1\sigma$ の幅を取ることに相当する。保護レベルの算出においては、様々な保守的な仮定がなされているが、

表6 電離圏擾乱現象と影響を受けるGNSS測位。✓の有無は一般論として電離圏の影響が出る場合の有無を示すが、特定のシステムにおいては異なる場合があることに注意。

電離圏の効果	電離圏全電子数					電離圏不規則構造	
	電離圏遅延		電離圏遅延空間勾配			強度シンチレーション	位相シンチレーション
電離圏現象	正相嵐	負相嵐	SED/SIPS	プラズマバブル	MSTID	プラズマバブル	オーロラ
1周波	単独	✓	✓	✓		✓	✓
	相対			✓	✓	✓	✓
1周波(精密)	相対(位相)			✓	✓	✓	✓
	単独(PPP)			✓	✓	✓	✓
2周波	単独					✓	✓
	相対					✓	✓
2周波(精密)	相対(位相)			✓	✓	✓	✓
	単独(PPP)			✓	✓	✓	✓

その中でも特筆すべきものが電離圏勾配の存在についての仮定である。GBAS, SBASにおいては、航空機にとって危険となりうる電離圏勾配が常に存在していると仮定している。これは、補強システムがGNSSを用いて監視している電離圏と、航空機が用いる衛星に影響する電離圏の状態が必ずしも同一ではなく、補強システム側で航空機側の電離圏の状態を知る方法を持たないためである。つまり、たとえ極めて低い確率であっても、安全性の要求レベルに対して影響のある確率で電離圏勾配が存在している可能性を排除できないので、保守的に考えて、常に電離圏勾配が存在すると仮定するのである。詳細は省くが、この仮定が保護レベルを増大させ、運用レベルに応じた保護レベルの許容値（先述のカテゴリー I 運航の場合10~35 m）を時に超過させる主な原因となるのである。

これらの極めて保守的な仮定は、安全性を定量的に評価するため、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り、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。ここで問題は、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ことであった。しかし、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。これを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によれば、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[12]。

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不可欠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のである。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。

5.3.4 測位精度劣化を引き起こす電離圏現象の発生頻度

測位精度劣化を引き起こす電離圏現象は測位方法によって異なる。電離圏正層嵐で電離圏遅延（全電子数）増大する場合、経験モデルによる補正誤差が生じるほか、相対測位の補正範囲の上限を超えてしまう恐れがある。表7は、過去に日本で観測された全電子数（分解能は5 TECU）から、その規模と発生頻度を推定したものである。1年に1回程度の電離圏正相嵐では、その最

表7 電離圏 全電子数増大の規模と発生頻度[13].

地域	1回/1年	1回/10年	1回/100年
北海道 ¹⁾	70 TECU 以上	90 TECU 以上	150 TECU 以上
東京	90 TECU 以上 ²⁾	110 TECU 以上 ³⁾	190 TECU 以上 ³⁾
鹿児島 ⁴⁾	110 TECU 以上	130 TECU 以上	230 TECU 以上

¹⁾ 統計解析に基づき東京の0.8倍で計算

²⁾ 22年間の全電子数観測データに基づく

³⁾ 62年間のfoF2観測データに基づく

⁴⁾ 統計解析に基づき東京の1.2倍で計算

大値は70~110 TECU（GPS L1周波数の遅延量として11~17 m、以下同じ）、10年に1回程度の電離圏正相嵐では90~130 TECU（14~21 m）、100年に1回程度の電離圏正相嵐では150~230 TECU（24~37 m）程度と言える。電離圏電子密度は赤道異常帯で最大となるので、赤道異常帯よりの北に位置する日本では、南方ほど最大全電子数が大きい。

搬送波位相を用いた相対測位性能を劣化させる可能性があるMSTIDについては、日本では夏の夜間と冬の昼間に頻繁に発生することが知られている。しかし、測位性能の劣化につながるようなMSTIDの発生頻度の特性は知られておらず、今後の研究が待たれる。

相対測位の誤差要因となる電離圏勾配を伴うとともに、使用可能衛星数の減少という形でGNSS測位一般に影響を与える電離圏シンチレーションを伴うプラズマバブルは、日本付近の経度では春、秋の日没直後から夜半過ぎにかけて頻繁に発生することが知られている。しかし、測位性能の劣化につながるようなプラズマバブルの発生頻度については、観測が限られており[14]、統計的な頻度を得るには至っていない。また、電離圏シンチレーションについても、GNSS測位性能評価のためには、GNSS信号追尾に障害を与えるシンチレーションの発生頻度[15]、同時に影響を受ける衛星数とその確率[16]、電離圏勾配との相関などの詳細な統計解析が待たれる。

参考文献

- [1] W.J. Burke *et al.*, *Ann. Geophys.* **22**, 3089 (2004).
- [2] C. Tao *et al.*, *Earth Planets Space* **72**, 173 (2021).
- [3] V. Kurt *et al.*, *Ann. Geophys.* **22**, 2255 (2004).
- [4] P. Jiggins *et al.*, *J. Space Weather and Space Climate* **8**, 22 (2018).
- [5] H. Sauer and D. Wilkinson, *Space Weather* **6** (2008).
- [6] S. Taguchi and H. Shibata, *J. Radio Res. Lab.* **8**, 355 (1961).
- [7] 宇宙天気災害に向けた科学提言のためのハザードマップ, 科学研究費補助金: 新学術領域研究 太陽地球圏環境予測 (2020).
- [8] J. Sakai *et al.*, *Radio Sci.* **54**, 426 (2019).
- [9] Y. Karasawa *et al.*, *Radio Sci.* **29**, 643 (1985).
- [10] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance* (Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts, 2001).
- [11] International Civil Aviation Organization, *International standards and recommended practices, Annex 10 to the Convention on the International Civil Aviation, 8th edition* (2022).

- [12] S. Supriadi and S. Saito, NAVIGATION **66**, 845 (2019).
- [13] M. Nishioka *et al.*, Earth Planets Space **73**, 52 (2021).
- [14] S. Saito *et al.*, GPS Solutions **21**, 1937 (2017).
- [15] S. Saito and T. Yoshihara, Proc. Institute of Naviga-

- tion GNSS+ 2018, 2186 (2018).
- [16] Y. Beniguel and J.-P. Adam, Effects of Scintillations in GNSS Operation, Chapter 3.5 in the book by J. Lilen-sten: *Space Weather - Research towards Applications in Europe* (Springer, 2007).



さいとう すすむ
斎藤 享

海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・上席研究員。2008年から電離圏擾乱に強い衛星航法システムの開発及び衛星航法性能向上のための宇宙天気情報の活用に関する研究を行っています。



つがわ たくや
津川 卓也

情報通信研究機構・電磁波研究所・宇宙環境研究室長。2007年から情報通信研究機構にて電離圏擾乱の発生機構に関する研究を行い、2021年からは宇宙環境研究室長として宇宙天気現象の社会影響に関する研究を行っています。