

## 2. 電離層遅延空間勾配の GBAS への影響

航空システム部 ※吉原 貴之 藤井 直樹  
京都大学理学研究科 齊藤 昭則

### 1. はじめに

航空機利用を目的としたGPS衛星航法のうち、主に空港近辺での高カテゴリ精密進入時に使用するため、国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization; ICAO)はGBAS(Ground-Based Augmentation System)を標準とした。GBASではGPSディファレンシャル測位方式を基礎として地上GPS基準局から受信機ノイズ、電離層、対流圏などの誤差を含んだ擬似距離の補正情報と各誤差要素の残留誤差情報を航空機側に送出し、航空機側ではこれらの補正情報を用いて測位計算を行う。その際、航空機側では各残留誤差から保護レベル(Protection Level: PL)を計算して最終的な測位解の信頼性をリアルタイムで評価している[1][2]。

GBASにおける電離層の影響は地上GPS基準局と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、補正可能と考えられてきた。しかし、電離層遅延の局所的な空間勾配があった場合に、大きな測位誤差をもたらすことが指摘され[3]、GBASのインテグリティに対する脅威になり得ることが報告されている[4]。

本研究では、GBASにおける残留誤差の定量的評価と、インテグリティに脅威を与える電離層の影響を調査することを目的として、空間的に密に配置された国土地理院GPS連続観測システム(以下、GEONET)の電子基準点データから得られた電離層遅延情報を用いて局所的な電離層遅延の空間勾配の算出を試みたので報告する。

### 2. TECデータベース

国土地理院は現在、全国に配置された1,200点以上の2周波GPS受信局からなるGEONETを運用している。この2周波観測データから各観測点の電離層遅延量を推定することが可能であるが、「チャンネル間バイアス問題」と呼ばれる周波数間のバイアス誤差が存在するため、これらの観測データから各観測点での電離層遅延量の絶対値を直接推定することは出来ない。

京都大学理学研究科はGEONETの30秒データを

用いてこのバイアス誤差の補正を行い、各観測点についてGPS衛星視線方向毎の電離層電子密度の総和(TEC)を推定、1999年から現在までのデータについてデータベース化してインターネット上で提供している(TECデータベース)。その際、各観測点で仰角30度以上のGPS衛星に対するバイアス誤差を1日の間で定数として扱い、電離層が高度400km上空に薄殻状の構造をしていると仮定し、バイアス誤差を推定している[5]。本研究ではこのTECデータベースを用いて水平スケールが数10km程度の局所的な電離層遅延の空間勾配を調査することとした。

この解析を行う上で、バイアス誤差推定の精度を考慮する必要がある。図1はTECデータベースの1日分のデータセットを用いて電離層高度での電波伝搬経路(パス)密度を最大値で正規化して示している。上述のバイアス誤差推定時に空間的に隣り合うパスでTECが矛盾しないように推定されているため、パス密度が小さい領域では精度が十分得られていないと考えられる。本研究ではこの正規化したパス密度が20%以下の北緯31度以下のデータは用いないこととした。なお、以降では全ての電離層遅延量についてTECからGPSのL1信号に与える影響を算出し、天頂方向に投影した値を表示している。

### 3. 電離層遅延量の空間勾配の算出

局所的な電離層遅延量の空間勾配(以下、空間勾配)の最も簡単な算出方法は2点間で電離層遅延量の差から単位kmあたりの勾配を計算することである。しかし同時に、受信状態の乱れ等による観測誤差を直接反映してしまうと考えられる。そのため、本研究では空間勾配を周囲の観測点にも系統的に含まれているものとして複数の観測点で直線近似を行う手法を用いることとした[6]。そこで、図1のパス密度の大きい領域に近く、観測点が最も密に配置されている東海地方で図2の様な南北、東西にほぼ直線状の観測点4点ずつを選択した。その上で、仰角60度以上かつ4点で共通に見える個別のGPS衛星毎に南北、東西方向の空間勾配をmm/kmの単位で算出する。その際、直線近似残差が元の遅延量の10%を超える

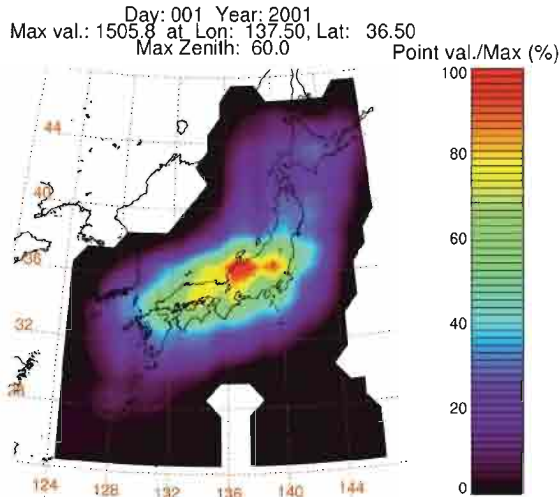


図 1. GEONET における電波伝搬経路の電離層上 (高度 400km の薄殻モデル) の空間密度

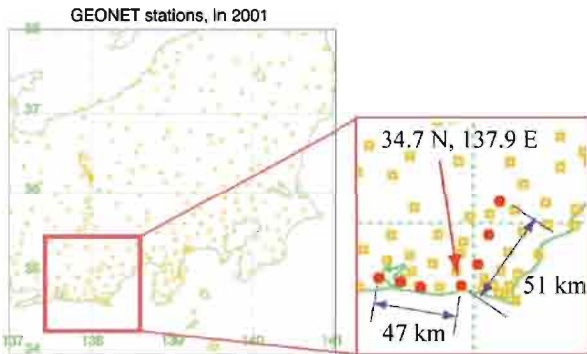


図 2. 東海地方で 50km 程度以下のスケールほぼ南北、東西に並ぶ 4 点を選択した

場合には異常値として解析に用いないこととした[7]。

#### 4. 局所的空間勾配

##### 4.1 季節変化

電離層活動度はほぼ11年周期で変動していることが知られており、2001年に極大期を迎えている。図3は2001年の電離層遅延量の変化を示している。春季と秋季に電離層遅延量が大きく、夏季と冬季に小さいことが分かる。この図から、表1のように季節を定義し、調査した。南北、東西勾配について横軸を勾配値(0.08mm/kmステップ)、縦軸をその発生頻度(%)とした分布図をそれぞれ図4、図5に示す。ここでは、夏季と秋季のみを示しているが、春季は総じて秋季と同様な分布特性を持ち、冬季は夏季と秋季の中間的な分布であった。また、発生頻度分布図にはガウス分布フィッティング結果も同時に示している。両者の比較から、発生頻度分布はガウス分布より、裾の広

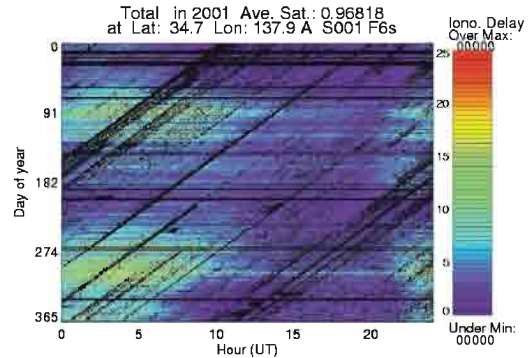


図 3. 南北勾配の算出に用いた 2001 年の電離層遅延量。黒い領域は条件を満たす GPS 衛星が無かった時間帯を示す。

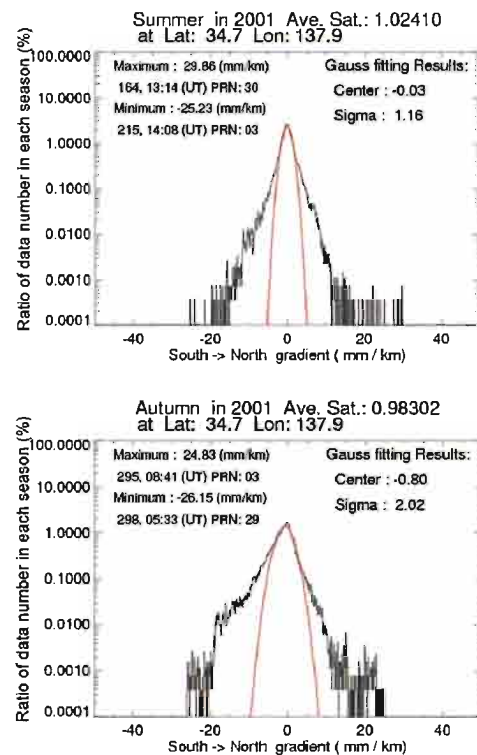


図 4. 2001 年夏季(上)と秋季(下)の南北勾配の発生頻度分布。横軸は勾配の大きさ(mm/km)で、北向きを正として表示し、縦軸は季節内での発生割合(%)を対数表示している。

い、ダブル・デルタ(DD)分布に近いといえる。

南北勾配については夏季において電離層遅延変動が小さく、対称的かつガウス分布からの乖離が小さ

表 1. 季節の定義

	春季	夏季	秋季	冬季
通算日	047-137	138-228	229-319	001-046 320-365

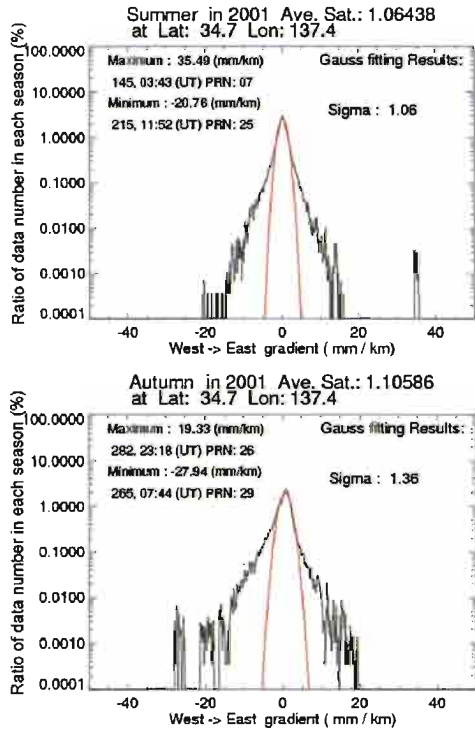


図5. 2001年夏季(上)と秋季(下)の東西勾配の発生頻度分布。ただし、西から東向きを正として表示している。

い。しかし、秋季では分布の中心が負であり、ガウス分布からの乖離が負の方向に大きくなっている。これらの結果は日本上空では赤道異常と呼ばれる電離層電子密度が低緯度側程多い分布となっていることと一致している。なお、年間を通しての空間勾配最大値は夏季の29.86mm/kmであった。東西勾配については理由の特定できないバイアス誤差が認められたため、分布の平均値が0となるように補正してあるが、分布幅は電離層遅延量が大きい秋季により大きく、南北方向よりも対称的な分布となっている。これは東西方向の変動は日変化が主であり、解析手法の妥当性を示していると同時に南北勾配のガウス分布幅との比較から日変化による空間勾配よりも赤道異常の発達による空間勾配の季節変化が大きいことが分かる。年間を通しては春季の43.88mm/kmが最大値であった。ただ、米国で報告されている100mm/km超えるような大きな空間勾配は見つからなかった。

## 4.2 経年変化

図6に2002年及び2003年の電離層遅延量の変化を示すが、前述のように電離層活動度は2001年を極大

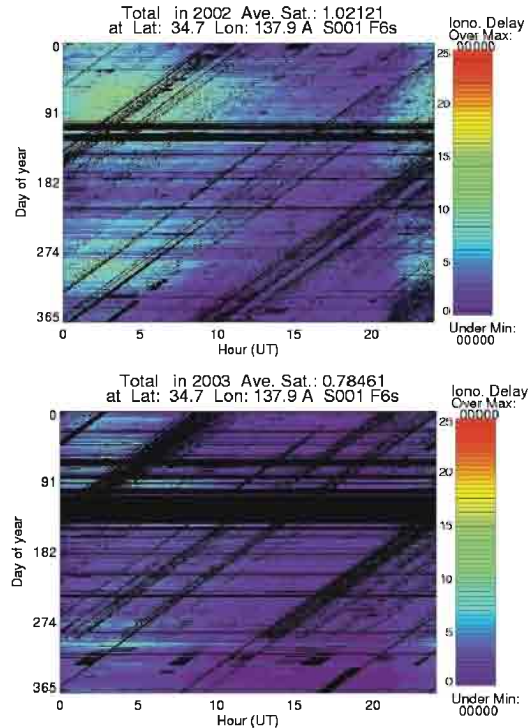


図6. 南北勾配の算出に用いた2002年(上)、2003年(下)の電離層遅延量

としてその後は徐々に弱まっていることが分かる。これに対応する南北勾配を秋季について図7に示す。図4(下)と比較して年が経つにつれてガウス分布幅が減少し、分布の形状がより対称に近くなっていることがわかる。しかしながら、空間勾配の最大値は電離層活動度が弱くなってもあまり変化していないことも同時に示唆された。

## 4.3 緯度依存性

これまででは、上空のパス密度が大きく、観測点が密である東海地方の観測点データを用いた解析結果を示したが、空間勾配の緯度依存性を調査するために、北海道と四国において同様な解析を行った。それぞれについて、南北方向ほぼ直線状に並んだ観測点4点を選択し、算出した2001年秋季における南北勾配の発生頻度分布を図8に示す。なお、観測点群の水平スケールはそれぞれ、84.4kmと51.4kmである。図4(下)を含めてこれらと比較すると、ガウス分布幅は北海道で最も小さく、南北勾配の最大値は四国で最も大きかった。ただし、四国でのガウス分布幅は予想に反して東海地方のものよりも大きくなかった。東海地方に比べ、南方の領域ではパス密度の問題があるが今後、沖縄などより大きな空間勾配が予想される地



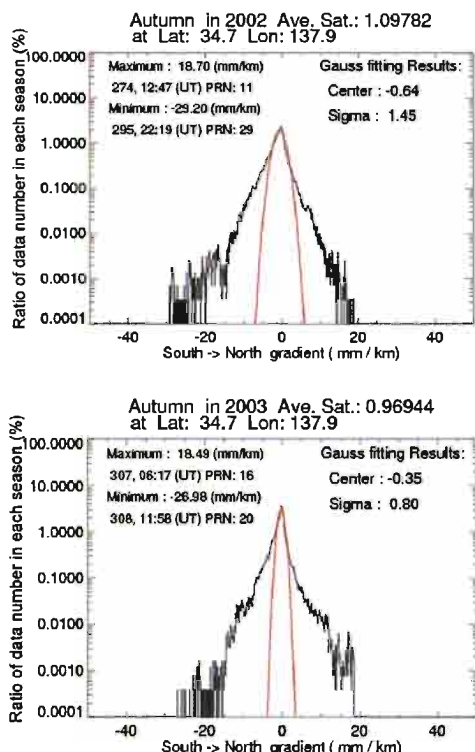


図 7. 2002 年(上)、2003 年(下)秋季における南北勾配の発生頻度分布

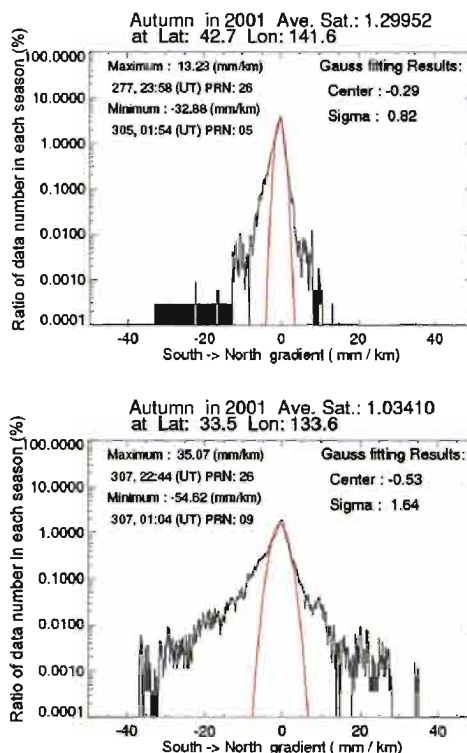


図 8. 2001 年秋季における北海道(上)と四国(下)の南北勾配の発生頻度分布

域についても解析を続けていく必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、電離層がGBASのインテグリティに及ぼす脅威について、定量的に評価を行うことを目的として、空間的に密に配置されたGEONETの電離層遅延情報を用いて局所的な電離層遅延の空間勾配の算出して調査した。観測点が密である東海地方での解析から、南北勾配には日本上空で見られる赤道異常が、東西勾配には日変化が主に影響することが分かり、分布形状はガウス分布ではなく、ダブル・デルタ分布に近いことが明らかとなった。また、電離層活動度との関係を調査した結果、活動度が弱まるにつれて分布幅は小さくなるものの勾配の最大値はあまり変化が見られなかった。さらに、緯度依存性の調査から、さらなる南方における空間勾配の解析の必要性が示唆された。また、総じて米国で報告されているような大きな空間勾配は検出されなかったが、より詳細な空間勾配の最大値を把握するためには1Hzデータを用いるなど本研究で行った雑音低減のための観測点4点での直線近似で空間的な平均を取らない手法へ拡張する必要性が示唆された。

## 謝辞

TECデータベースを使用させて頂くにあたり、データベース構築にご尽力された名古屋大学太陽地球環境研究所大塚雄一助手に感謝致します。また、TECデータベースで使用されている電子基準点データは国土交通省国土地理院により提供されています。

## 参考文献

- [1] RTCA SC-159, RTCA/DO-246, 1998
- [2] ICAO SARPs, ANNEX 10, 2001
- [3] J. Christie et al.:「Analytical and Experimental Observations of Ionospheric and Tropospheric Decorrelation Effect for Differential Satellite Navigation during Precision Approach」, proc. of ION GPS-98, pp 739-747, 1998
- [4] M. Luo et al.:「Ionospheric Spatial Gradient Threat for LAAS: Mitigation and Tolerable Threat Space」, proc. of ION NTM 2005, pp490-501, 2005
- [5] Y. Otsuka et al.:「A New Technique for Mapping of Total Electron Content using GPS Network in Japan」, Earth Planets and Space, 54, pp63-70, 2002
- [6] T. Yoshihara et al.:「A Study of the Ionospheric Effect on GBAS (Ground-Based Augmentation System) using the Nation-Wide GPS Network Data in Japan」, proc. of ION NTM 2004, pp551-560, 2004
- [7] T. Yoshihara et al.:「An Investigation of Local-Scale Spatial Gradient of Ionospheric Delay Using the Nation-Wide GPS Network Data in Japan」, proc. of ION NTM, 2005, pp725-734, 2005