

3G2 日本付近の電離層による GPS への影響

○坂井丈泰（電子航法研究所）、Todd Walter（Stanford University）

Ionospheric Effects on GPS over Japan

Takeyasu Sakai (Electronic Navigation Research Inst.) and Todd Walter (Stanford University)

Key Words: GPS, satellite navigation, ionospheric delay

Abstract

Ionosphere is the significant error source for GPS single frequency users. We investigated spatial distribution of ionospheric delays using GEONET and IGS networks around Japan. The difference of ionospheric delays reaches 10m at 500km separation for geomagnetic storm day. Such large spatial variation of ionosphere has significant impact on the performance of differential GPS.

1. 目的および背景

高度 100~1000km に分布する電離層は電波伝搬に対する影響が大きく、短波以下の周波数の電波が反射されて遠方まで伝搬することはよく知られている。GPS (global positioning system) をはじめとする衛星航法システムは無線信号のドップラシフトあるいは伝搬時間を利用してユーザ位置を測定するものであるから経路上の電離層による影響を受け、たとえば GPS の場合では最大で 300ns (距離に換算して 100m) 程度の遅延となる。電離層による遅延は無線信号の周波数で決まる性質があることから、通常は複数周波数の無線信号を利用してこれを補正する。

ところで、GPS の民生用測距信号は現在のところ 1575.42MHz の L1 信号のみとされている。多くの民生用受信機はこの L1 信号だけで動作しており、電離層遅延は十分には補正されていない。最近は測位精度向上の手法としてディファレンシャル GPS が一般的になっているが、この場合は基準局上空における遅延量を用いてユーザ位置における電離層遅延を補正するため、基準局-ユーザ局間の距離が長くなると精度が低下する。

電離層は地磁気と相互に関連しあっており、特に低磁気緯度地方の上空では活発に活動することが知られる。日本はこうした地域に位置しており、衛星航法システムに与える影響は小さくないものと思われるが、日本上空における電離層の影響について定量的に調べた例は少ない。

そこで、衛星航法システムに対する電離層による影響を、国土地理院他の GPS 基準点ネットワークを

利用して調査した。この方法は、広範囲にわたる電離層遅延量の分布状況を知ることができる点が有効である。調査の結果、日本付近では磁気緯度の違いにより遅延量に大きな差があること、電離層の活動の程度によっても大きな影響があることを確認した。本研究の目的は電離層活動が衛星航法システムに対する影響を評価することであるが、同様の手法は電離圏環境観測にも有用である。

2. 調査方法

日本上空における電離層の分布を知るためには多数の観測点を全国に配置する必要があるが、このために国土地理院が運用している電子基準点ネットワーク (GEONET) ¹⁾ を利用した。GEONET は測量用の 2 周波型 GPS 受信機を採用しているから、電離層遅延の周波数依存性より遅延量を求めることができる。GEONET は国内にしか基準点を持たないため、さらに IGS (International GPS Service) による観測データを加え、国内基準点で不足する領域を補うこととした。使用した電子基準点 (GEONET 22 地点; IGS 6 地点) の配置を図 1 に示す。図中の破線は磁気緯度を表す。

GPS 受信機 i は同時に 5~8 機程度の GPS 衛星 j からの信号を受信し、距離を測定する。このそれぞれについて信号経路上の電離層遅延量 (L1 周波数換算、単位[m]) を次式により求める：

$$TEC(t, x_i^j(t)) = k [R_i^j(t; L1) - R_i^j(t; L2)]$$

ここで $R_i^j(t; L1)$, $R_i^j(t; L2)$ は、L1 および L2 信号による距離測定値である。 t は時刻、 $x_i^j(t)$ は測距信号

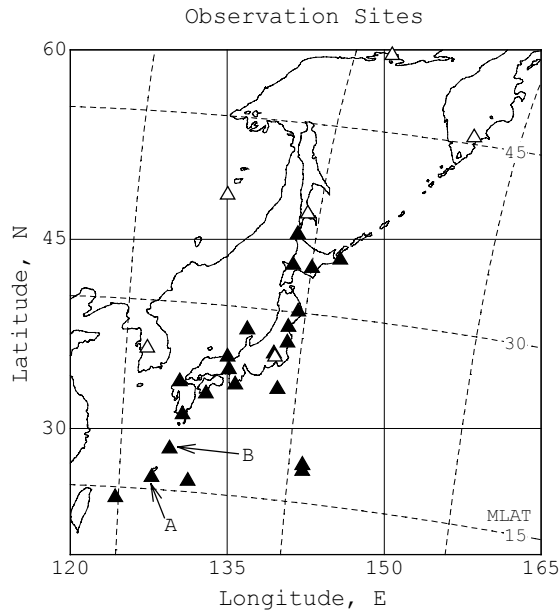


図1 観測点の配置 (▲=GEONET; △=IGS)

が電離層を通過する位置 (IPP; ionospheric pierce point) を意味する。各受信機は 30 秒毎にデータを記録しているから、上式の電離層遅延量 (TEC) 測定値が 30 秒毎に、各時刻で 100~200 以上の地点について得られる (図4を参照)。

2 周波受信機による観測データは、周波数間バイアス誤差を含むことが知られている。これは受信機ハードウェアの構成上の問題であって、各受信機の L1 距離測定値に $\pm 3\sim 5\text{m}$ 程度のバイアス成分として加わることとなる。同様に衛星側にも周波数間バイアスが含まれるが、これは $\pm 1\text{m}$ 以内である。本調査では、衛星側バイアスについては軌道情報に含まれる群遅延パラメータ T_{GD} を使用して補正³⁾、受信機側バイアスについては計算によってバイアス値を求めることとした。

3. 調査例

図2は、本年5月下旬の5日間の K_p 指数速報値である⁴⁾。 K_p 指数は地磁気活動の活発さを表す指標であって、一般に電離層が活発に活動している際には大きな値を示す。5月29日夜 (日本時間) には磁気嵐が発生しており、同夜には北海道で低緯度オーロラを観測したとの報告もある。

5月28~29日の電離層遅延量の時間変化を、図3に示す。測距信号は電離層に斜めに入射するため、TEC 測定値を鉛直方向の遅延量に換算してある (以下の図でも同様)。横軸は5月28日 00:00 からの経過時間で、地方時で表示した。中央の太線は平

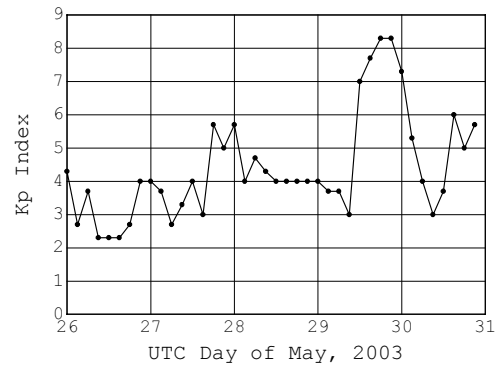


図2 K_p 指数の変化

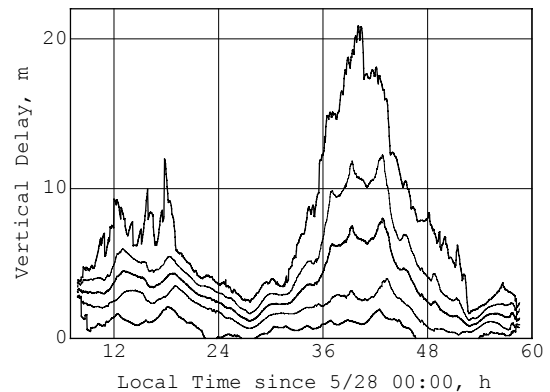


図3 電離層遅延の時間変化

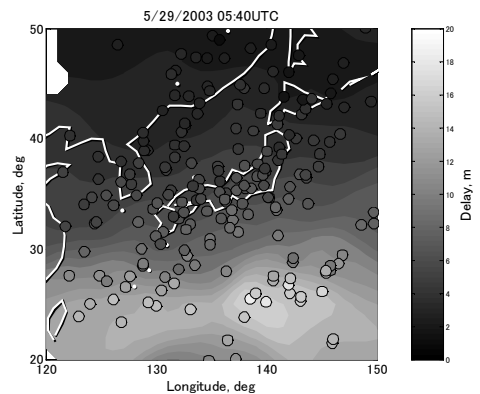


図4 電離層遅延の分布例 (5/29 05:40UTC)

均値、その上下の細線は標準偏差、外側の太線は最大・最小値を表す。

いずれの日も地方時の午後から電離層遅延が大きくなり、夕方に最大値を示し、夜間~明け方にかけて小さくなる様子がわかる。磁気嵐が発生した29日は、特に遅延量大きい。前日28日には磁気嵐はなく、この季節における典型的な変化を示している。

図3で電離層遅延がピークを示している時間帯における電離層遅延の空間的な分布を描くと、図4の

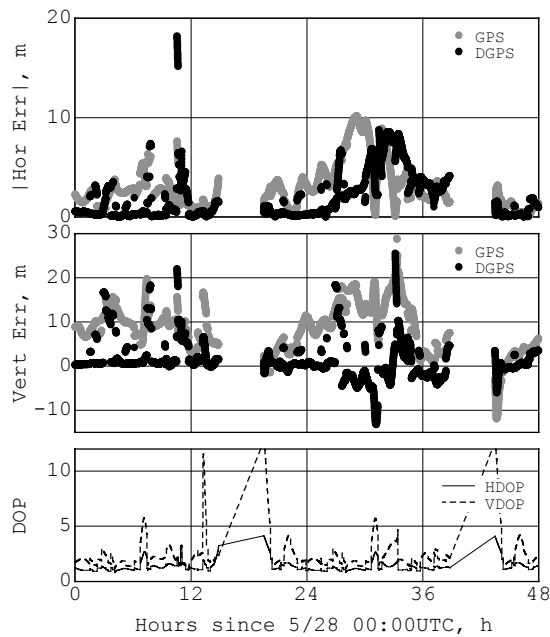


図5 測位誤差の発生例

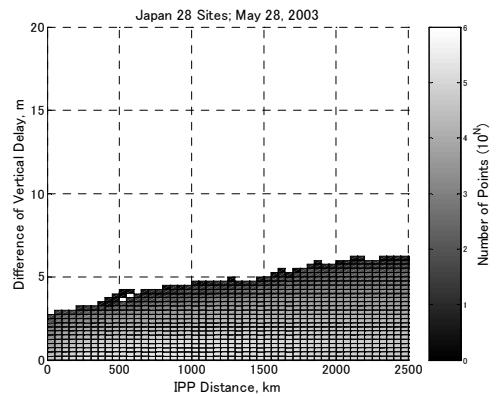
ようになっている。この図は0~20mの電離層遅延を濃淡で表示しており、多数のプロットはIPPにおける遅延量測定値を意味する。背景の濃淡は、適当な補間により作成した。日本の南方海上、磁気緯度15度付近に電離層遅延の大きな領域が生じており、一方で昼間であるにもかかわらず東北地方以北では遅延量はそれほど増加していない。これは、低磁気緯度地方ほど電離層が成長しやすく、電子密度の高い（よって遅延が大きい）領域が生じることによる。また、電離層は太陽光の影響で生成されるため、この後時間の経過とともに電離層遅延の大きな領域は西方に移動していく。

4. GPS/DGPS への影響

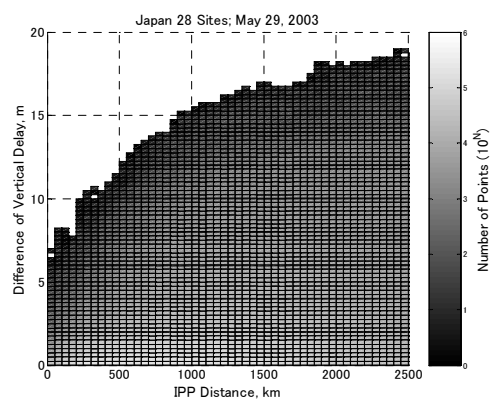
L1信号のみを利用する民生用GPS受信機は電離層遅延補正が十分ではなく、その測位結果は上空の電離層による影響を受ける。このため、上で調べた5月28~29日の電離層を例として、影響の程度を調べることにした。

沖縄本島（那覇市近郊）にある基準点（図1のA地点）の電離層遅延測定値を使用して、電離層による測位誤差を計算した結果が図5である。上段が水平方向、中段は垂直方向の測位誤差、下段には測位精度の目安とされるDOPを表示した。水平方向の誤差は絶対値としたため、常に正の値となる。

図3と比較すると、電離層遅延が大きい時間帯に測位誤差も大きくなる様子がわかる。水平方向には



(a) 5月28日



(b) 5月29日

図6 電離層遅延の空間相関（その1）

10m程度までの誤差しか発生していないが、垂直方向では30mにも及ぶ誤差となる場合がある。

GPSによる測位誤差を低減する代表的手法はディファレンシャルGPS（DGPS）である。DGPSでは、ユーザ局とは別に用意した基準局における測定値から各衛星の測距誤差を計算し、これをユーザに伝送することでユーザ側の測位精度を向上させる。電離層遅延については、基準局上空における遅延量を用いてユーザ位置での補正をすることになる。

図5の灰色のプロットは通常のGPS、黒色のプロットはDGPSによる測位誤差である。DGPSの基準局としては、A地点の北東300kmに位置する奄美大島基準点（図1のB地点）を利用するものとした。

ディファレンシャルGPSによる効果は特に垂直方向に現れている。多くの時間帯ではディファレンシャル補正により誤差が抑制されているが、時に逆に誤差が大きくなる場合もある。測位誤差のRMS値は、水平方向については3.76/3.00m（GPS/DGPS）、垂直方向は9.89/4.52m（同）であった。

一般に、ディファレンシャル GPS の性能は基準局—ユーザ局間の距離に左右される。電離層遅延についてこのことを確かめるため、IPP 間距離と遅延量の相関を描いたのが図 6 である。この図では、各時刻で得られた IPP のすべての組合せについて、2 地点間の距離と遅延量の差を求め、その頻度分布を濃淡で表示してある。距離が離れると相関が小さくなり、遅延量の差が大きくなる様子がわかる。

図 6 (a) は 5 月 28 日、(b) は 29 日について集計した結果で、両日を比較すると明らかに異なる分布となっている。28 日には 1500km 離れた地点でも電離層遅延の差は 5m 以内であるが、29 日は最初から 5m 以上の差があり、500km の距離でも 10m 以上の遅延差を生じる。

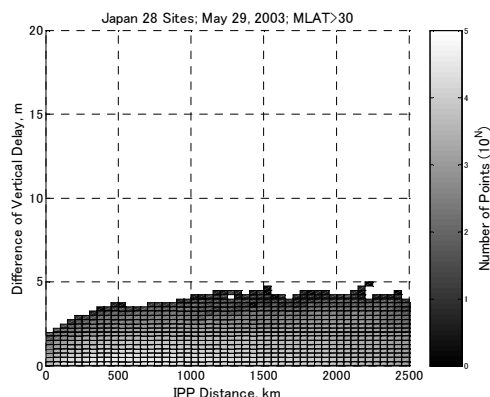
遅延量の差が大きい 29 日について、さらに磁気緯度の違いにより分類すると図 7 が得られる。図 7 (a) は磁気緯度が 30 度より大きい IPP のみ、(b) は同様に 30 度以下の IPP のみについて調べたものであって、大きな遅延差は磁気緯度の低い地域で生じていることがわかる。

図 6 および 7 からは、ディファレンシャル GPS の性能は、基準局—ユーザ局間の距離のほか、電離層活動の程度による影響が大きいことがわかる。ディファレンシャル GPS の他の誤差要因は時間的変化がそれほど大きくないのに対して、電離層遅延は 1 日あるいは数時間の単位で 10m 以上の差を生じることがあり、時間帯による変化の大きさに注意が必要である。

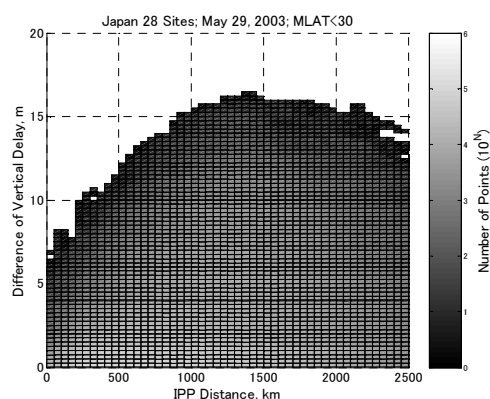
5. おわりに

GPS をはじめとする衛星航法システムは電離層活動の影響を受け、特に低磁気緯度地方に位置する日本ではその影響は小さい。この影響を定量的に調べるため、日本付近における電離層遅延量の分布状況を国土地理院他の GPS 基準点ネットワークを利用して調査した。電離層の空間的分布を知ることができるこうした手法は、電離圏環境観測にも有用である。

調査の結果、日本付近では磁気緯度の違いにより遅延量に大きな差があること、また電離層の活動の程度によっても大きな影響があることを確認した。特にディファレンシャル GPS の利用時においても、500km 程度の距離で 10m 以上の遅延差を生じる場合があり、注意が必要である。



(a) 磁気緯度 > 30 度



(b) 磁気緯度 < 30 度

図 7 電離層遅延の空間相関 (その 2)

参考文献

- [1] 国土地理院：電子基準点とは
(http://mekira.gsi.go.jp/inet_NEW/kijun_1.html)
- [2] A. J. Mannucci, et. al.: A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, Radio Science, 33 (1998), 3, pp. 565-582
- [3] B. Wilson, et. al.: New and Improved - The Broadcast Interfrequency Biases, GPS World, Sept. 1999, pp. 56-66
- [4] 京都大学地磁気世界資料解析センター
(<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>)

Email: sakai@enri.go.jp