

4 電離圏・熱圏

4 Ionosphere and Thermosphere

4-1 GEONET データによる TEC 導出と衛星及び受信機のバイアス決定

4-1 Derivation of TEC and Estimation of Instrumental Biases from GEONET in Japan

馬 冠一 丸山 隆

MA Guanyi and MARUYAMA Takashi

要旨

電離圏の全電子数 (TEC) の導出及び GPS 衛星と 2 周波受信機のバイアス決定を、GPS 地球観測網 (GEONET: GPS earth observation network) を用いて行う方法について述べる。 TEC は小領域において一様であることから、日本上空の電離圏を 32 の区画に分割する。1 区画の大きさは、東西 $2^\circ \times$ 南北 2° である。 TEC が各区画内において一様であり、かつバイアスが 1 日に変化しないと仮定することにより、未知の TEC とバイアスは、1 日ごとの 209 台の受信機の観測データとともに、一連の連立方程式を形成する。そして TEC と衛星及び受信機のバイアスが最小 2 乗法によって決定される。この方法がどの程度有効であるかは、この方法を異なる季節の地磁気静穏な期間に応用し、GPS から得られた TEC と電離圏の臨界周波数 (foF_2) とを比較することによって検証する。GPS 衛星及びほとんどの受信機のバイアスは極めて安定的であることが分かった。また、 TEC と foF_2 の日変化及び季節変化は、非常によく一致する。他方、GEONET のような高密度の受信機網の観測を用いる方法は、他のどの領域においても利用できるとは限らない。そのため本稿では、GEONET によって決定された衛星バイアスを使って単独の受信機のバイアスを推定する、より簡易でより高速な方法についても提案する。この簡易版の方法の精度は、GEONET によって決定された受信機バイアスと比較することによって評価する。単独受信機によるバイアスは、GEONET によるバイアスからのずれは、傾向的に低緯度地域 ($< 30^\circ N$) の受信機のほうが大きい。これは赤道異常の影響によると考えられる。

This paper presents a method to derive the ionospheric total electron content (TEC) and to estimate the biases of GPS satellites and dual frequency receivers using the GPS earth observation network (GEONET) in Japan. Based on the consideration that the TEC is uniform in a small area, the method divides the ionosphere over Japan into 32 meshes. The size of each mesh is 2° by 2° in latitude and longitude, respectively. By assuming that the TEC is identical at any point within a given mesh and the biases do not vary within a day, the method arranges unknown $TECs$ and biases with dual GPS data from about 209 receivers in a day unit into a set of equations. Then the $TECs$ and the biases of satellites and receivers were determined by using the least squares fitting technique. The performance of the method is examined by applying it to geomagnetically quiet days in various seasons, and then comparing the GPS-derived TEC with ionospheric critical frequencies (foF_2). It is found that the biases of GPS satellites and most receivers are very stable. The diurnal and seasonal variation in TEC and foF_2 shows a high degree of conformity. The method using highly dense receiver network like GEONET is not always applicable in other areas. Thus the paper also proposes a simpler and faster method to estimate a single receiver's bias by using the

satellite biases determined from GEONET. The accuracy of the simple method is examined by comparing the receiver biases determined by the two methods. Larger deviation from GEONET derived bias tends to be found in the receivers at lower ($<30^{\circ}\text{N}$) latitudes due to the effects of equatorial anomaly.

[キーワード]

中緯度電離圏, 計器と技術, 電波伝播

Mid-latitude ionosphere, Instruments and techniques, Radio wave propagation

1 まえがき

全電子数 (TEC) は、電離圏の特性研究に使用されるパラメータのなかでも特に重要なものである。電離圏は、全地球測位システム (GPS) 衛星の信号に対して分散媒として作用するため、GPS衛星から地上受信機への電波伝播に群遅延と進相をもたらす。 TEC の値は、2周波GPS観測値の群遅延の差から算出される。ところが、二つのGPS周波数の各信号には計器遅延バイアスが存在する。両者の差(計器バイアス: instrumental bias、又は差分計器バイアス: differential instrumental biasという)は、 TEC の計算の精度に大きく影響する。衛星バイアスと受信機バイアスの両方の作用によって TEC の値が負になる場合さえある。

GPS衛星と受信機のバイアスを決めるのは、仮定条件に左右される部分が大きく、また多大な時間を要する。前提条件として、(1)電子分布は、地上から決まった高度にある薄い球殻内にある、(2) TEC は、太陽と地球を結ぶ線によって固定された基準座標系において時間依存的である、(3)衛星バイアスと受信機バイアスは数時間にわたって一定である、の三つの条件を仮定し、何人かの研究者(LanyiとRoth 1988及びCocoら 1991)は、現地時間の夜に当たる一つの観測点から得たデータを分析し、緯度及び経度の2次関数によって鉛直方向に換算した全電子数(TEC)のモデルを作成した。Wilsonら(1992、1995)はGPS網から得た1日又は12時間ごとのデータセットに薄い球殻の手法を適用し、垂直 TEC を緯度と経度の球面調和関数として表した。Sardónら(1994)は、垂直 TEC を地心基準系の2次多項式としてモデル化した。そのなかで、多項式の

係数はランダムウォークの確率過程によって擬似される。その後、係数(したがって TEC)と計器バイアスがカルマンフィルターを用いて決定される。以上の研究に共通する特徴は、電離圏の振る舞いがそれなりに平準であるとの前提を必要とする点である。最近、Otsukaら(2002)は、1000台を超えるGEONETの受信機から収集したデータを使い、緯度 0.15° ×経度 0.15° という高い空間分解能をもつ TEC の2次元マップを作成した。その際、絶対的な垂直 TEC を得るために計器バイアスが除去されたが、衛星バイアスと受信機バイアスの区別はなされなかった。

本稿では、日本上空の TEC を導出するとともに、GPS衛星及びGEONETを構成する2周波Pコード受信機のバイアスを決定する方法について述べる。我々の方法がOtsukaら(2002)の方法と異なる点は、 TEC の導出に加え、衛星バイアスと受信機バイアスの両方が得られることである。そのアルゴリズムについては**2**で詳説する。**3**では、その方法を2001年の夏、秋及び冬の、地磁気が静かな各3日間に適用した結果について述べる。衛星バイアスの安定性について示したあと、計器バイアスの日々変動について論じる。GPSデータから導出した TEC に関する評価は、イオノゾンの電離圏臨界周波数(f_oF_2)の観測値と比較することによって行う。GEONETを利用する今回の方法の精度を、データとの一致する度合いによって提示する。**4**では、GPSの観測値と既知の衛星バイアスを用いて単独の受信機のバイアスを決定するためのより簡易かつ高速な方法を提案する。この方法の精度を明らかにするため、これを先の9日間に適用し、その結果を**3**の場合と比較する。得られた主な結果は**5**にまとめた。最後に、全体の結論を**6**に記した。

2 アルゴリズム

2.1 GPSの観測をもとにしたTECの算出

GPS衛星は現在28個あり、高度20,200 km、傾斜角 55° の軌道を回っている。これらのGPS衛星は、1.57542 GHz (f_1 という)及び1.2276 GHz (f_2 という)の二つの周波数の搬送波信号を使用する。GPSの観測からは、この2信号に対応して測定される二つの距離(擬似距離: pseudorange)及び二つの位相が得られる。異なる周波数の電波信号は、電離圏の分散性により、衛星から地上受信機までの伝播時間が異なる(これを群遅延という)上、伝播に際して位相が進む。衛星から受信機までの伝搬路に沿った全電子数(TEC_{sl})は、2信号の擬似距離(P_1 と P_2)の差及び位相(L_1 と L_2)の差から計算できる[Blewitt, 1990]。

$$TEC_{slp} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) \quad (1)$$

$$TEC_{sl} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad (2)$$

ここに、 k は電離圏の屈折に関する値であり、 $80.62 [m^3/s^2]$ である。また、 λ_1 と λ_2 はそれぞれ f_1 と f_2 に対応する波長である。位相の測定には 2π 不確定があるため、位相差から計算した TEC_{sl} は相対値であるものの、 TEC_{slp} よりも精度が高い。 TEC_{sl} について位相経路の正確さを確保するため、位相差から求めた TEC_{sl} につき、 TEC_{sl} を TEC_{slp} にフィッティングして B_{rs} 基線を導入する[Mannucciら1998及びHorvathとEssex 2000]。

$$TEC_{sl} = TEC_{slp} + B_{rs} \quad (3)$$

N 個の測定値がある場合、本稿の基線 B_{rs} は、擬似距離から求めた i 番目の TEC_{slp_i} と位相から求めた i 番目の TEC_{sl_i} との差を $i=1$ から $i=N$ について平均した値である。

$$B_{rs} = \frac{\sum_{i=1}^N (TEC_{slp_i} - TEC_{sl_i}) \sin^2 \alpha_i}{\sum_{i=1}^N \sin^2 \alpha_i} \quad (4)$$

ここに、衛星の仰角 α_i の正弦の2乗を重みづけ係数に使用した。仰角が小さいときの擬似距離は、一般にマルチパスの影響を受け、信頼度が下がるためである。そのため、仰角の小さい斜め伝搬路(slant path)は、基線の決定に対する寄与がかなり小さくなる。また、 B_{rs} に関する上記計算を行うに際しては、 L_1 又 L_2 はの位相測定において生じるサイクルスリップ(cycle slip)を検出するためのデータ処理が行われる[Blewitt 1990]。このように、今回の研究では、不確定部分がなく、また擬似距離よりもノイズ及びマルチパス効果の少ない、擬似距離が平準化された搬送波位相を使用している。衛星と受信機の各ペアにつき、この部分のデータ処理を30秒間隔の2周波GPSデータを用いて独立に行う。得られた伝搬路 TEC_{sl} は、位相及び擬似距離に影響を与える要因のうち、両周波数に共通するもの(受信機と衛星間の距離、クロックのオフセット、対流圏遅延など)がすべて取り除かれている。しかし、マルチパス効果や衛星及び受信機の差分計器バイアスなど、周波数に依存する影響が残存する。

伝搬路 TEC_{sl} から垂直TECを導くため、電離圏を地球を取り巻く薄い球殻と見なし、その中心は地球の中心に一致すると仮定する。GPS衛星、受信機及び電離圏の位置関係は図1のようになる。衛星(S)から電離圏を抜けて受信機(R)に至る斜め伝搬路と電離圏との交点を、貫通点(P)と呼ぶことにする。このとき天頂角 χ は次式で表される。

$$\chi = \arcsin\left(\frac{R_e \cos \alpha}{R_e + h}\right) \quad (5)$$

ここに、 α は衛星の仰角、 R_e は地球の平均半径、 h は電離層の高さである。なお、本稿では h を400 kmとする。さらに、衛星と受信機のバイアスをそれぞれ b_s 及び b_r とすると、垂直TECは次式のようにになる。

$$TEC = (TEC_{sl} - b_s - b_r) \cos \chi \quad (6)$$

TEC及び計器バイアスの算出については、高密度GPS受信機網GEONETの説明のあとで触れたい。

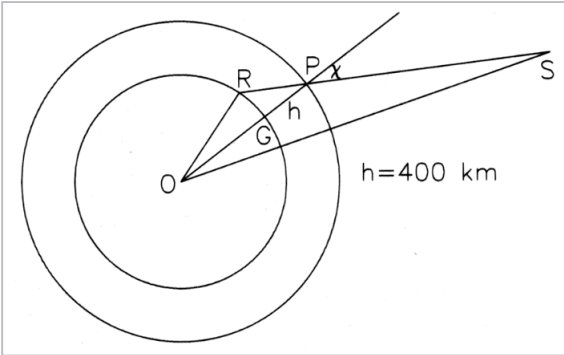


図1 GPS衛星(S)、電離圏及び受信機(R)の位置関係

全電子数は一定であり、電離圏は地上400kmの高度にある薄い球殻と仮定する。図中、Pは視線と電離圏の交点を表し、χは天頂角である。

2.2 日本のGEONETとメッシュ分割

GEONETは国土地理院(GSI)が運営するGPS地球観測網である。日本全土に1000台を超えるGPS受信機が設置され[Miyazakiら、1997]、そのうち209台が両周波数による精密コード疑似距離を提供している。図2に示すように、これらの受信機が全国に十分に密なネットワークを形成している。受信機網がカバーする範囲は、南北に27° N~45° N、東西に127° E~145° Eに及ぶ。

図2には32の区画が波線で描かれており、それぞれの区画においてTECが独立して求められる。一区画の大きさは、東西2°×南北2°である。一つの区画に受信機が20台備わることがある一方、受信機が一台もない区画も幾つかある。こうした区画でもTECを得ることが可能である。なぜなら隣接区画に受信機が存在する上、衛星の位置や数に応じて貫通点が広範囲に広がっているからである。

2.3 TECと計器バイアスの算出

今回の研究では、複雑な数学モデルを使用せず、垂直TECは同一区画内の全点において等しいが、異なる区画では違ってよいとの仮定を用いる。つまり、TECは8分以内であれば一定であると考えられる。8分というのは、区画の東西方向の幅である2°を時間に換算した値である。したがって、同じ区画内に収束する伝搬路について、その伝搬路TEC_{sl}の鉛直成分はすべて同じと考えることができる。これに加え、衛星と受信機の

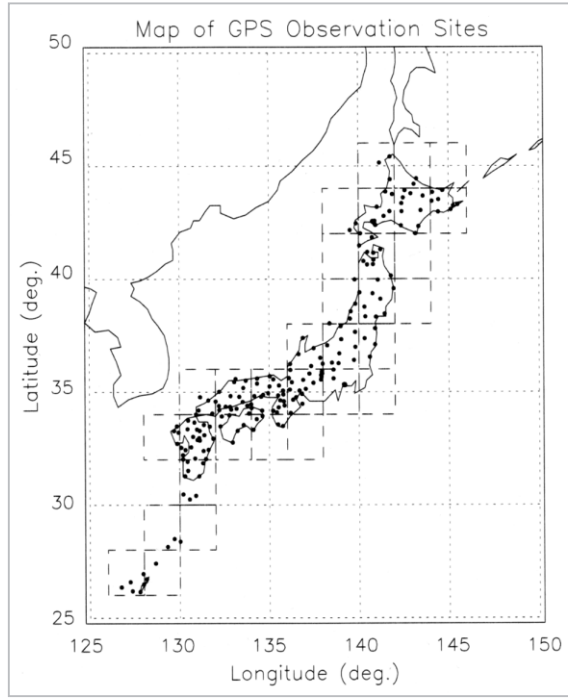


図2 本稿で利用するGEONETの209台の二周波受信機の分布図

32の区画が波線によって示されている。1区画の大きさは、東西2°×南北2°である。

バイアスは日内変化がないと仮定する。

時刻tにおいて衛星jから電離圏を抜けて受信機kに至る区画mの伝搬路を考えた場合、式(6)を参照して以下の式を得る。

$$\sec \chi_{jk} TEC_i + b_{s_j} + b_{r_k} = TEC_{sl_{jk}} \quad (7)$$

ここに、iは時刻tにおける測定の順序を表す。式(7)の未知数は、TEC_i、b_{sj}及びb_{rk}である。28個の衛星及び209台の受信機の観測データの15分時系列を用いれば、32区画におけるある1日のTECと計算バイアスは、次に示す行列形式の連立方程式を解くことによって求めることができる。

$$\begin{bmatrix} TEC_1 \\ \vdots \\ TEC_i \\ \vdots \\ b_{s_1} \\ \vdots \\ b_{s_j} \\ \vdots \\ b_{r_1} \\ \vdots \\ b_{r_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \sec \chi_{jk} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} = TEC_{sl_{jk}} \quad (8)$$

ここに、右辺のベクトルの要素は伝搬路 TEC_{sl} である。このベクトル内に TEC_{sl} は L 個とする。左辺のベクトルは、 TEC_i 、衛星バイアス b_{sj} 及び受信機バイアス b_{rk} の未知数で構成される。未知数の個数はそれぞれ I 、 J 、 K とする。式 (8) の左辺の行列を構成するのは係数であり、具体的には TEC に対する $\sec\chi$ 、 b_s に対する 1 及び b_r に対する 1、そして 0 である。その要素数は $(I + J + K) \times L$ 個である。1日の時間枠を考えたとき、各区分には96個の TEC 値があるため、32区分全体における未知の TEC の個数は 96×32 、すなわち $I = 3072$ となる。また $J = 28$ (衛星数)、 $K = 209$ (受信機数) である。衛星と受信機のそれぞれのバイアスに分けて決定することは不可能であるため、いずれかのバイアス (通常は一つの受信機) を基準にとって 0 とする。そして最小2乗法により、上記連立方程式の解は特異値分解 (SVD) によって得ることができる。SVD を使用すれば、非現実解が避けられる [Pressら、1992]。我々の実用的計算では、方程式の数は約 40,000 になる。GPSデータの読み取りから式 (8) の計算までの全処理を Pentium 4 プロセッサを搭載したパソコンで実施すると、2時間ほどを要する。

3 本方法の応用結果

有効性を示すに当たり、本方法を2001年夏至、秋分、冬至付近の6月15~17日、9月20~22日及び12月21~23日の9日間に応用した。これらの期間最中及びその前は地磁氣的に静かである。上記の手順に従い、1日ごとの計器バイアスと日本上空の TEC を得た。基準受信機には $34.16^\circ N$ 、 $135.22^\circ E$ に置かれたものを選択した。この受信機の周囲には、同一区分内に10台以上の受信機がある。

3.1 計器バイアス

図3は、上記9日間について算出した衛星バイアスを、年間通算日の関数として6か月のタイムスパンで示したものである。縦の波線は日付の飛びを表している。図に示すバイアスは、平均値 (グラフの下に記載) との差分である。具体的には、毎日すべての衛星についてバイアスの平均値を計算し、次に個々の衛星バイアスからそ

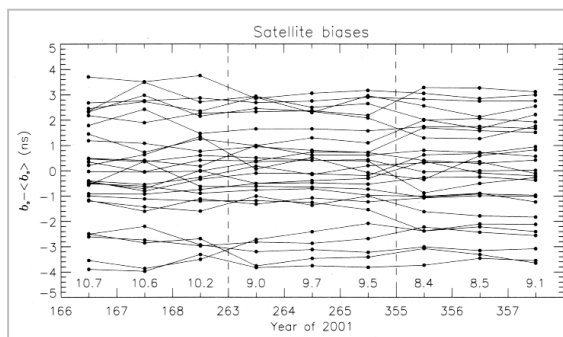


図3 9日間についてGEONETから導出した衛星バイアスを6か月のタイムスパンで示したもの

バイアス値から日平均を差し引いた相対バイアス値で示してある。図の一番下には衛星バイアスの平均が示されている。縦の波線は日付の飛びを表す。

の平均値を差し引いた [Cocoら、1991]。それによって、基準受信機のバイアス変化などの系統的な傾向が衛星データから除去される。衛星バイアスの平均は夏から冬にかけて数 ns ($1ns = 2.853 TECU$ 、 $1 TECU = 2.853 \times 10^{16} e/m^2$) 減少しているが、相対的なバイアスはかなり安定している。異なる季節間の衛星バイアスの差は最大でも 1 ns 程度である。上記9日間における衛星バイアスの標準偏差は $0.076 ns \sim 0.664 ns$ であった。28個の衛星中19個においては $0.5 ns$ 未満である。したがって衛星バイアスの場合、日々変動は極めて小さかった。

算出した受信機バイアスの日々変動も、大半の受信機において小さかった。受信機バイアスの9日平均に対する標準偏差の分布を図4に示

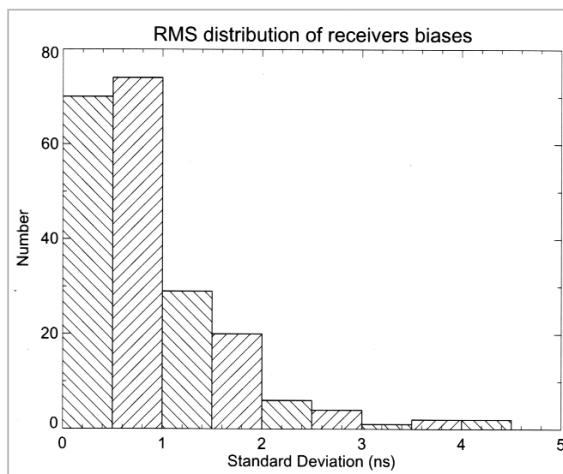


図4 GEONETから導出した受信機バイアスの9日平均からの標準偏差に関する分布。93%が2ns以内である

す。最大値は約4nsであった。バイアスの標準偏差が1ns未満だった受信機の割合は69%である。2ns未満になると、その割合は93%に上る。図5は、9日間の受信機バイアスの標準偏差と、受信機の地理的位置の関係を示す散布図である。これを見ると、受信機バイアスの変動は緯度に依存しないことが明らかである。このことから、電離圏の局所特性は計器バイアスの計算にほとんど影響しないと考えられる。その一方で、バイアスの日々変動が大きい受信機が(中緯度に)幾つか存在する。その理由には、例えば次のようなものが考えられる。(1)受信機回路そのものに存在する不安定性、(2)基準受信機のバイアス変動、(3)マルチパス効果。このうち受信機不安定性が最も妥当な理由である。なぜなら、基準受信機のバイアス変動すれば他のすべての受信機に影響が出るからである。また、マルチパス効果が日によって大きく変動するとは考えにくい。

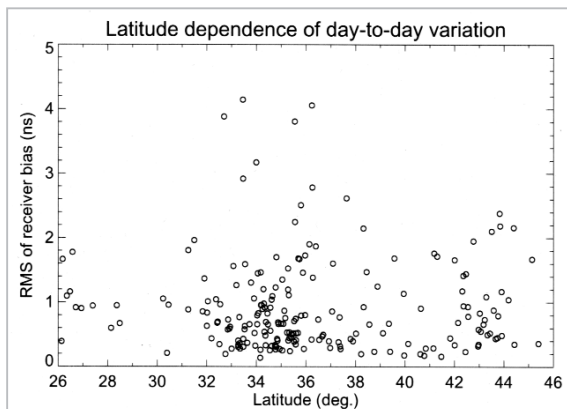


図5 GEONETから導出した受信機バイアスの9日平均からの標準偏差における緯度変動。系統的な傾向はみられない

3.2 GPSから導出したTEC

2で述べた方法を用いれば、計器バイアスと同時に日本上空のTECを計算することができる。2001年の夏から冬の9日間に得た35°N、139°Eの区画における15分間隔のTECを、図6の上段に示す。縦の波線は日付の飛びを表している。日変化のほかに季節変化があることがよく分かる。GPSから得たTECの有効性検証に当たっては、他の観測技術を用いて収集したデータが役に立つ。イオノゾンデによる電離圏の定常観測を、国分寺(35.7°N、139.5°E)において15分ご

とに実施している。GPSから求めたTECの精度を調べるには、定常観測で得られたfoF₂の値(図6の中段)を用いる。いうまでもなく、TECの振る舞いはfoF₂にかなりよく似ている。TECとfoF₂の変動は、大変よく一致する。この特徴は日中に現れる微細構造についても明らかである。こうした性質から、GPSから求めたTECが主としてF₂層の電子によるものであることが分かる。より詳しい比較として、TECをfoF₂の2乗で割った比を図6の下段に示した。日変化と季節変化が明瞭に示されている。日中の比の値は夏と秋ではそれほど違わないが、冬には2倍になっている。これは、プラズマ圏の電子数の寄与のほうが大きいかを示唆している。

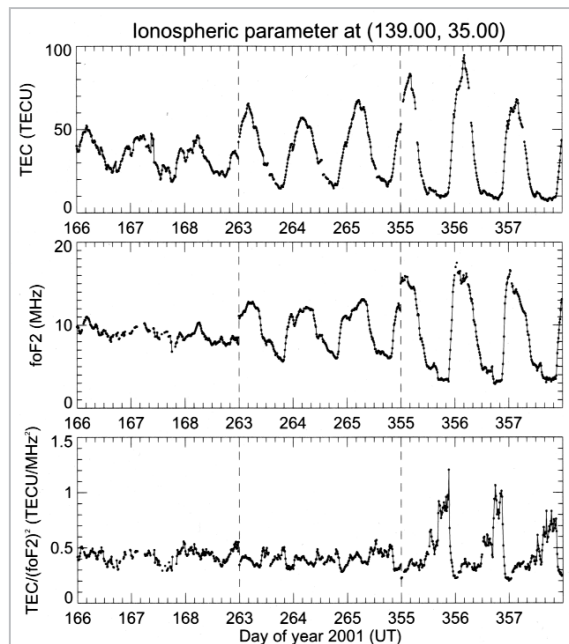


図6 9日間に得られた35°N、139°Eにおける15分間隔のTECを6か月のタイムスパンで示したもの

縦の波線は日付の飛びを表す。このほか、foF₂の15分間隔データ及びTECをfoF₂の2乗で割った比についても表示した。

図7は、2001年の夏、秋、そして冬における日本上空のTECの等高線図である。夏のTEC分布は簡単なパターンを示す。秋の日中のTECは、夏に比べて値が大きい上、緯度の勾配も大きい。冬になるとそれが更に顕著になる。冬の夜間のTECは、他の季節の数値の半分ほどである。

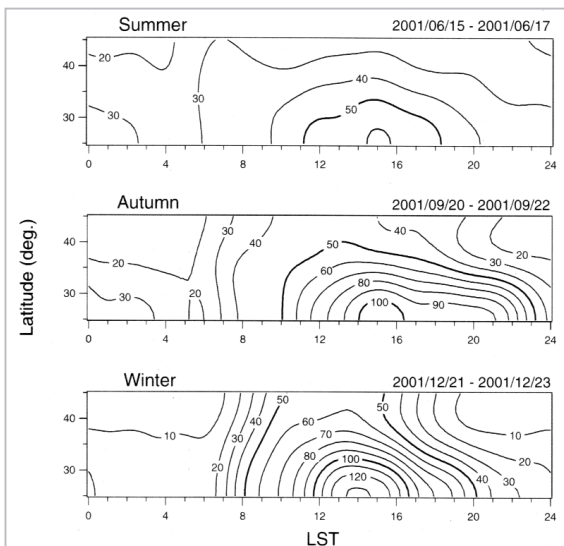


図7 2001年の夏、秋、冬における日本上空の電離圏TECの分布

コンターの単位はTECU、間隔は10TECU。

3.3 本方法の精度評価

算出したパラメーターが実際のデータとどの程度一致するかを知るには、データとフィッティング・パラメーターとの差(残差)に関する標準偏差を使用する [Bevington, 1969]。

$$\chi_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (TEC_{sljk} - \sec \chi_{jk} TEC_i - b_{sj} - b_{rk})^2}{L-4}} \quad (9)$$

ここに、 L は伝搬路 TEC_{sl} のデータ数(2.3を参照)である。9日間の χ_g の値の分析の結果は表1にまとめてある。 χ_g が5TECUを下回った日数は7日ある。2001年6月16日(第167日)は約8TECU、同年9月22日(第265日)は約51TECUであった。 χ_g が極端に大きかった第265日につき、各データ点に対する個々の残差をチェックした。その日に使用した伝搬路 TEC_{sl} のデータ数は47,400件である。また、

表1 2001年の9日間についてGEONETを用いた方法によって得られた残差の標準偏差(χ_g)

DOY	166	167	168	263	264	265	355	356	357
χ_g	3.99	7.94	4.24	3.59	2.81	51.43	3.05	2.76	2.57

上段の数字は2001年の年間通算日。 χ_g の単位はTECU。

$|TEC_{sljk} - \sec \chi_{jk} TEC_i - b_{sj} - b_{rk}| < 1$ を満たすデータは12,991件、

$|TEC_{sljk} - \sec \chi_{jk} TEC_i - b_{sj} - b_{rk}| < 2$ を満たすデータは23,695件、

$|TEC_{sljk} - \sec \chi_{jk} TEC_i - b_{sj} - b_{rk}| < 5$ を満たすデータは40,539件ある。つまり、フィッティングの結果は多くのデータについてよく一致している。また、大きな残差の大半は、 35° より低緯度の区画において生じていることが分かっている。

$|TEC_{sljk} - \sec \chi_{jk} TEC_i - b_{sj} - b_{rk}| > 10$ を満たす1,233件のデータのうち、950件は 35° より低緯度の区画のデータである。おそらく秋分点において赤道異常が発達することで、低緯度電離圏に急な緯度勾配が発生し、それが第265日にフィッティングに大きな標準偏差をもたらしたのだろう。このように、大きな残差を主にもたらしているのは、低緯度区画におけるTEC勾配である。しかし、 χ_g が大きいからといって、計器バイアスのフィッティングの精度が低いとは限らない。図3を見れば分かるように、第265日について算出された衛星バイアスは第264日と大きく変わらない。両日の受信機バイアスを比較した散布図を図8に示した。丸印が 35° 以下の緯度にある受信機を示し、+印が 35° より高い緯度の受信機を示す。両日の受信機バイアスは、緯度に関係なく極めてよく一致している。ただし、中程度の

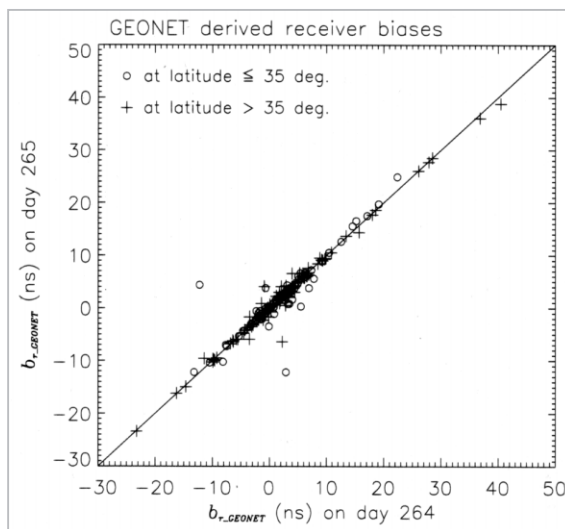


図8 GEONETによる受信機バイアスを第265日と第264日で比較したもの

図中、丸印が 35° 以下の緯度にある受信機を示し、+印が 35° より高い緯度の受信機を示している。丸印と+印は受信機の設置場所に関係なく共に対角線上に載っており、両日の受信機バイアスはよく一致している。

偏差を示す受信機が若干存在する。このように、残差が非常に大きな場合でさえ、本方法で求めた計器バイアスは高い精度を持っている。

4 単独受信機に対するバイアスの算出

前節で述べた方法は、どのような状況にも適用できるわけではない。この技術は、小さな領域に高密度の受信機網を備えて初めて可能になる。また、そのアルゴリズムは多少の計算時間を必要とするため、電離圏をほぼリアルタイムでモニターする用途には向いていない。しかし、GEONETを用いて衛星バイアスが計算されれば、その値は地球上のあらゆる場所に共通的に使用することができる。設置される受信機が1台であっても構わない。本節では、GEONETを用いて計算した衛星バイアスを使って単独受信機のバイアスを算出する簡易かつ高速な方法について述べ、更にその方法の精度について論じる。

4.1 簡易な方法

1台のGPS受信機は常に、一般に五つ以上のGPS衛星から同時に信号を受信している。衛星の仰角はかなりばらつくことがある。貫通点は広く分散することになるが、その範囲は受信機を中心におよそ経度で約23°、緯度で約32°に限られる。仰角の異なる複数の衛星があるとき、そこから受信機への視線は様々であり、観測中の伝搬路 TEC_{sl} には常に空間的なばらつきが生じる。ここで電離圏が水平方向に一様であり、かつ計器バイアスが正しく除去されると仮定すると、鉛直方向に換算した TEC はすべての衛星に対して等しくなるはずである。しかし、実際には電離圏に水平勾配と鉛直構造があり、垂直 TEC のばらつきは計器バイアスが正しく除去されたときに最小になると考えられる。GEONETによって衛星バイアスが適切に計算され、しかもそれが安定であることが示されたので(3を参照)、今度はそれを既知の値として使用し、また、受信機に対して一連のバイアス候補値を吟味して、 TEC 平均値からの偏差を最小とするものを見つけることにより、受信機バイアスが算出される。数学的な記述において、被測定受信機の

バイアス候補値 $b(i)$ に対し、 TEC の平均値からの標準偏差が各観測時刻について計算される。そしてその値から全日にわたる標準偏差の和 $\Sigma\sigma_i$ が求められる。 $\Sigma\sigma_i$ が最小値 $\Sigma\sigma$ を取る際のバイアス値 $b(i_0)$ が、正しい受信機バイアスであると考えられる(以下「フィッティングによる受信機バイアス」とする)。Pentium 4 プロセッサを搭載したパソコンの場合、フィッティングによる受信機バイアスはわずか数分で計算できる。

異なったバイアス候補値に対する TEC のばらつきの検証作業は実際の観測データを用いて行う。比較の便宜上、GEONET から一台の受信機 (35.53° N, 137.89° E) を選択する。2001年6月17日に行った観測結果を図9に示す。波線は、衛星からその受信機に至る経路の伝搬路 TEC_{sl} を示す。実線は、衛星及び受信機のバイアスを除去したあとに鉛直換算した TEC を示す。三つの図

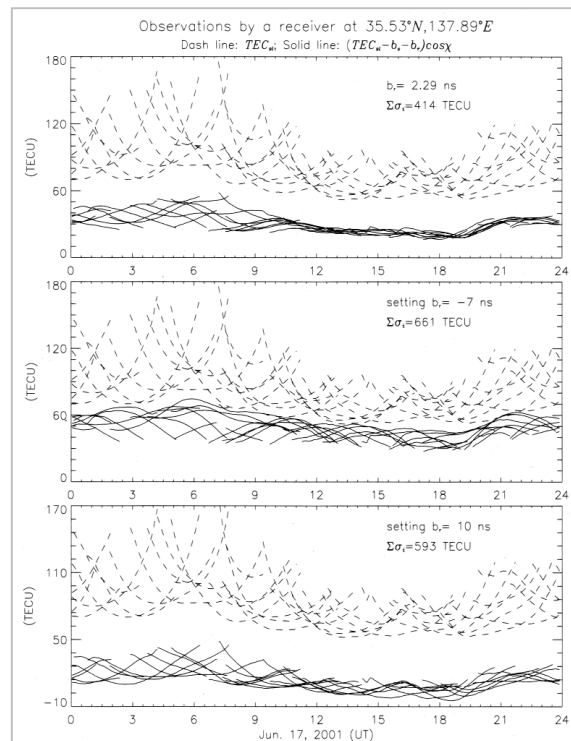


図9 GPS衛星から一台の受信機(35.53° N、137.89° E)に至る経路の伝搬路 TEC_{sl} (波線)

実線は、計器バイアスを除去したあとに TEC_{sl} 鉛直換算した TEC を示す。衛星バイアスはGEONETから得た。上段では、受信機バイアスとしてGEONETから得た値を用いた。下の2段では計算値を用いた。各段には、平均値に対する TEC の標準偏差の一日の合計値 $\Sigma\sigma_i$ を記載した。

において、衛星バイアスは同一で、3で示した方法によって算出した。一方、受信機バイアスには異なる値を使用した。上段では、受信機バイアスにGEONETからの値を用いた。下の2段は、中段についてはGEONETからの値よりかなり小さくなるよう、そして下段についてはGEONETからの値よりかなり大きくなるよう、受信機バイアスを恣意的に選択した。各段の右上には、対応する $\Sigma\sigma_i$ の値を示した。使用する受信機バイアスの値が不適当だと曲線が収束しないことが分かる。

図10は、同じデータセットについて $\Sigma\sigma_i$ の値の変動を $b(i)$ の関数として表したものである。図から受信機バイアスが2.78 nsと求められるが、これはGEONETから求められた2.29 nsという値に近い。両方法の差はわずかに0.49 nsである。

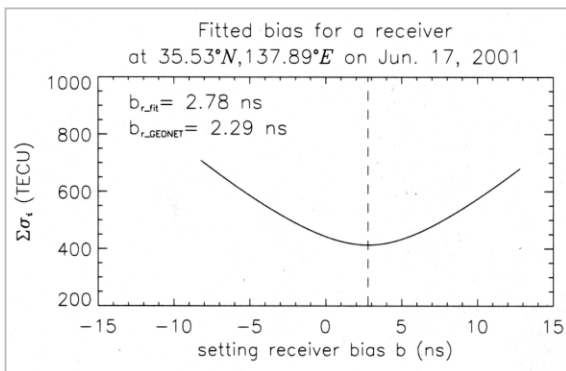


図10 35.53° N、137.89° Eの受信機に対するフィッティングによるバイアス

GEONETから得たバイアス値2.29 nsも記載してある。

4.2 簡易な方法の精度

簡易な方法を209台のGEONET受信機に応用し、両方法によって導出された受信機のバイアスを比較した。2001年6月17日についてGEONETから得たバイアスとフィッティングによるバイアスを、すべての受信機についてプロットしたのが図11の散布図である。GEONETの b_f とフィッティングによるバイアスは、驚くほどよく一致している。図12に、同じデータセットに対するGEONETのバイアスとフィッティングのバイアスの差、 $\Delta b_f (= b_{f,GEONET} - b_{f,fit})$ / 以下「フィッティングによるバイアスの誤差」又は単に「誤差」という)の分布を示す。受信機の大半(93%)において誤差の範囲は ± 2 nsであるこ

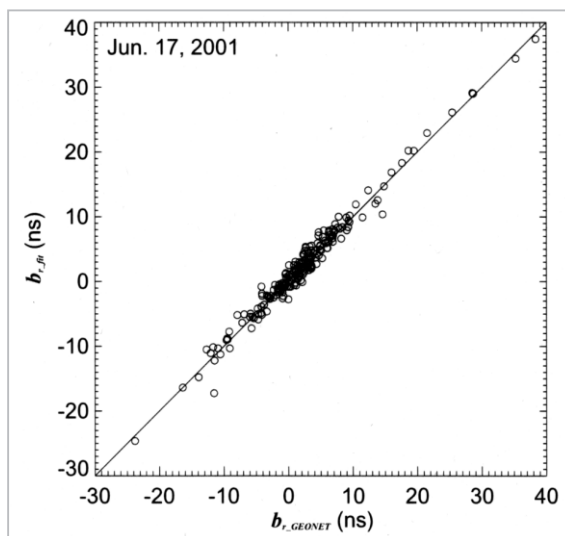


図11 GEONETから得たバイアスとフィッティングによる1台の受信機のバイアスを、2001年6月17日のすべての受信機についてプロットしたもの

比較のため、 $b_{f,GEONET} = b_{f,fit}$ の直線を引いた。

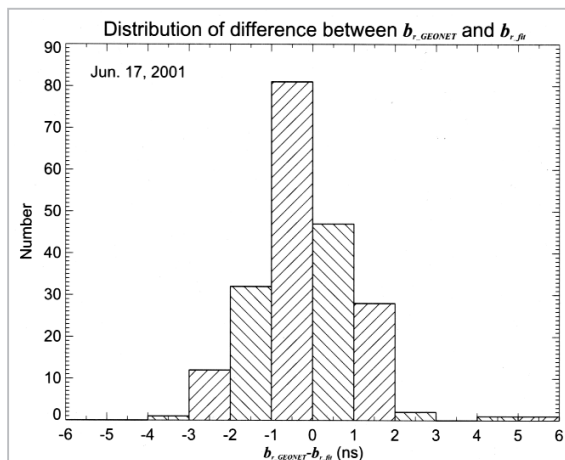


図12 GEONETから得たバイアスとフィッティングによるバイアスの差を、2001年6月17日のすべての受信機について示した度数分布

表2 GEONETから算出した受信機バイアスとフィッティングによる1台の受信機のバイアスとの差が ± 2 ns以内であったケースの割合

DOY	166	167	168	263	264	265	355	356	357
Perc.	79%	91%	93%	90%	95%	69%	93%	94%	98%

上段の数字は2001年の年間通算日。

とが分かる。

分析した9日間において誤差が ± 2 ns以内であった受信機台数の割合を表2にまとめた。2001年9月22日(通算第265日)では、フィッティングに

よるバイアスが受信機の約1/3において大きな誤差を含んでいたことが分かる。これらの受信機は、図13に示すように、特に35°Nより低緯度に置かれていた。なお、図13では、誤差と緯度の関係を他の日についても示してある。これは、3.3で論じた、 χ_g が第265日において大きな値を示した点に一致する。低緯度(<30°N)の受信機において、 b_{r_fit} は全体として b_{r_GEONET} よりも大きい傾向にあり、誤差は緯度が南になるにつれて大きくなる傾向にある。これは、1台の受信機に対して行われるフィッティングによるバイアス

算出が電離圏の条件の影響を受けることを示唆している。誤差源(したがってこの方法を適用する限界)について更に詳細に調査するため、各受信機の平均に対するTECの標準偏差 $\Sigma\sigma$ を、フィッティングによるバイアスを用いて計算した。 $\Sigma\sigma$ の緯度変化を図14に示す。図13と図14を比較することにより、 $\Sigma\sigma$ の値が大きい(収束が悪い)ことが必ずしも大きな誤差を生まないことが分かる。2001年9月22日を例にとると、30°Nより低緯度では $\Sigma\sigma$ が増加するにつれて誤差は逆に小さくなっている。

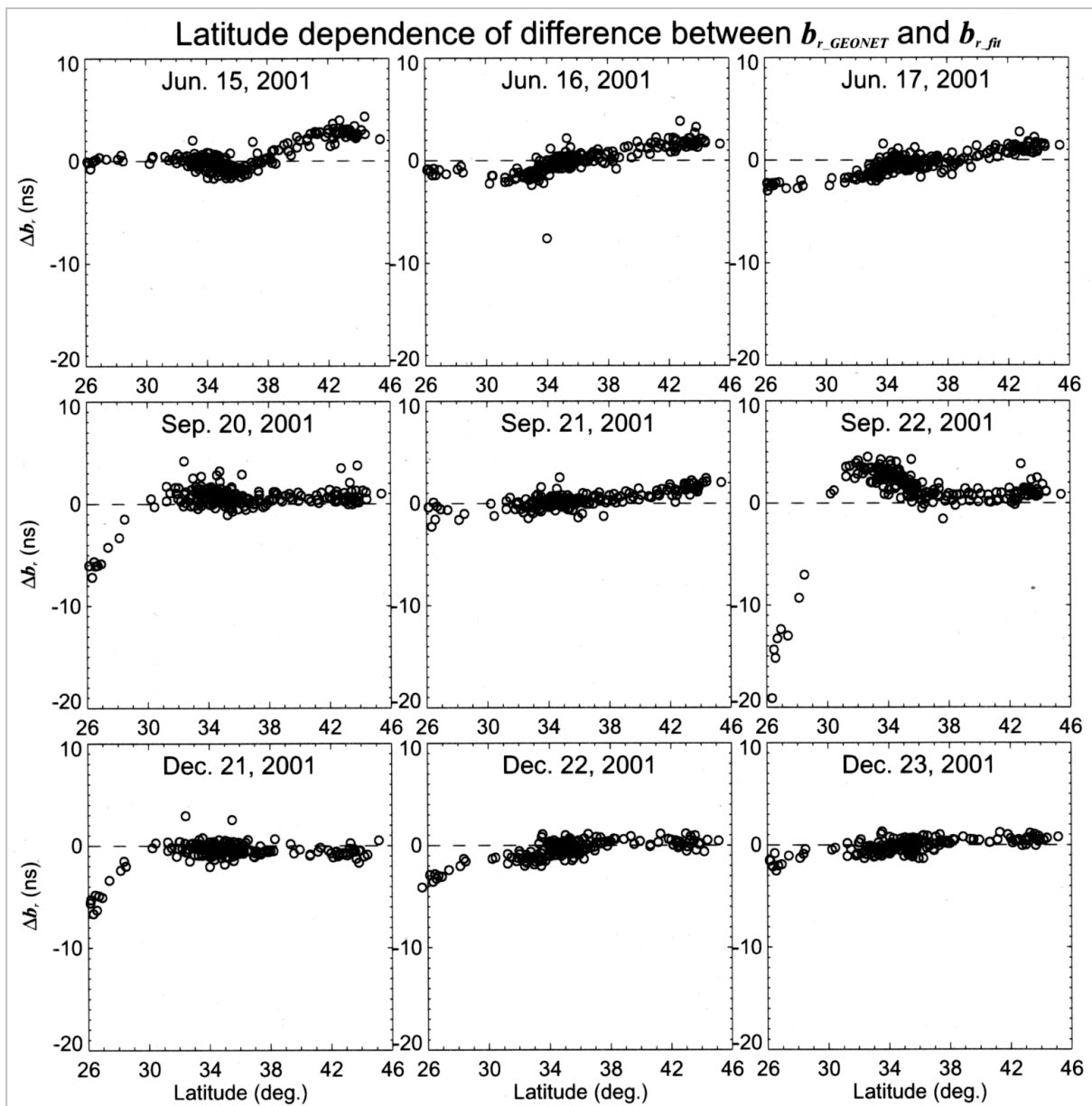


図13 両方法によって求めた9日分のバイアスの差と緯度との関係
比較のため、差がゼロとなるところに波線を引いた。

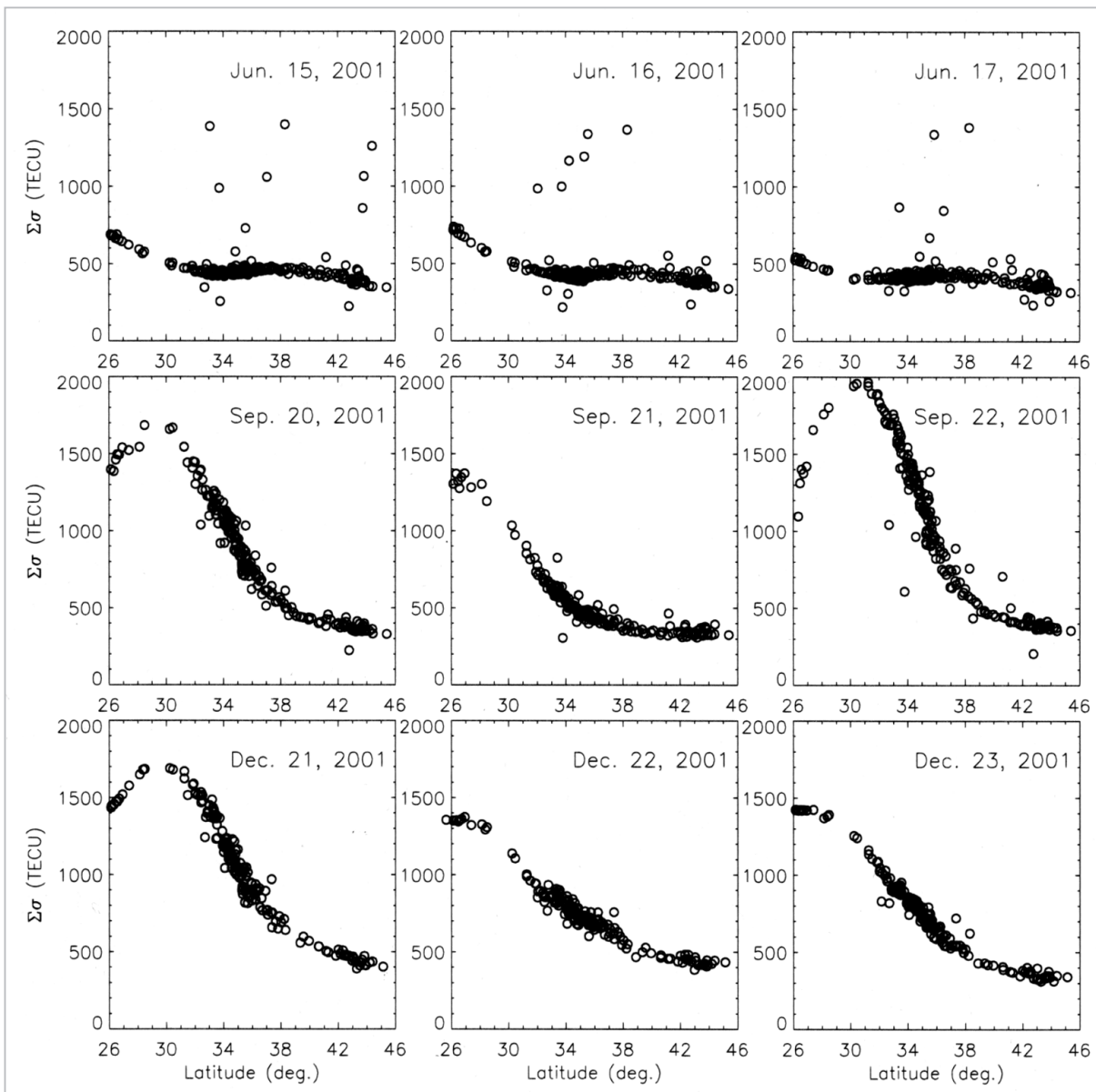


図 14 9日間にわたる $\Sigma\sigma$ の緯度変化

$\Sigma\sigma$ の緯度依存性(したがってバイアス誤差)は、TECの緯度勾配及び赤道異常によって説明できる。このことは図14にはっきり現れている。赤道異常は秋分点において活動が活発になるため、磁気赤道について対称な磁気緯度 15° の近辺において二つの電子密度ピーク(頂という)を持つ。これを日本の経度でいうと地理的緯度の 25°N 付近に相当する。受信機が赤道異常の頂又はその付近に位置する場合、その範囲内の衛星は最高点から離れて分布する傾向にある。そのとき鉛直換算したTECの平均値は、最高点を通るTECよりも小さくなる。そして、その平均値に対するTECの偏差 $\Sigma\sigma$ は、緯度勾配すなわち

分散が大きいときのTECの偏差よりも小さくなる。

5 まとめ

日本に設置されたGEONETの209台の受信機からもたらされる2周波GPSデータを用い、日本上空のTECを導出するとともに、衛星と受信機のバイアスを計算した。このほか、衛星バイアスが既知のときに、単独の受信機のバイアスを求める、より簡易でより高速な方法も提案した。本稿で述べた二つの方法を夏、秋、冬の地磁氣的に静かな日に適用した。

バイアス計算において得られた主な結果は以下のようにまとめられる。

(1) 28個のGPS衛星バイアスに対する平均からの標準偏差は、6か月の時間枠における9日間のデータについて0.076 ns～0.664 nsである。

(2) 受信機バイアスの93%は、9日平均に対する標準偏差が2 nsより小さい。その一方で、これが4 nsに達する受信機も若干存在する。

(3) 1台の受信機に対してフィッティングによるバイアスは、一般にGEONETから得たバイアスの ± 2 ns以内である。秋と冬では、低緯度($<35^\circ$ N)の受信機においてGEONETから得たバイアスとの差が大きい傾向にある。その原因は、おそらく赤道異常の発達によって局所電離圏内に大きな緯度勾配が生じることにある。

GPSから導出したTECについては、 foF_2 との比較によって以下のことが明らかになった。

(1) TECと foF_2 の日変化及び季節変化は、非常によく一致する。

(2) TECを foF_2 の2乗で割った比も、日変化及び季節変化を示す。冬の日中のピーク値は、夏及び秋のその約2倍である。

6 結び

GEONETから得られたデータを分析した結果、本稿で述べた方法が絶対的なTECの導出とGPS衛星及び受信機のバイアスの計算において有効

であり、かつ使用に適切であると結論付けることができる。衛星及び受信機のバイアスは日々変動が小さいため、計器バイアスは計算又は校正を時折行えばよい。これは衛星バイアスについて特にいえることである。

単独受信機のバイアスを求める方法は、中緯度の受信機に比較してより高速かつ十分に正確である。電離圏をほぼリアルタイムでモニターするために必要な条件を満たす可能性もある。この方法はGPS網から離れた受信機にも適用できる。しかし、赤道異常の影響により、フィッティングによるバイアスの精度は低緯度の受信機について低くなる恐れがある。低緯度について計算する前に中緯度の受信機バイアスを算出すれば、この欠点は避けられる。

GPSから得られるTECに主に寄与するのは、F2層にある電子である。TECを foF_2 の2乗で割った比の値をみると、プラズマ圏の電子数は夏や秋よりも冬のほうが高いことが分かる。

謝辞

国土地理院にはGEONETのGPSデータを自由に使わせていただいた。この場をお借りして感謝したい。また、有益な議論ができたことに対し、A. Saito氏、K. Hocke氏及びY. Otsuka氏にもお礼を申し上げたい。

参考文献

- 1 Blewitt, G., "An automatic editing algorithm for GPS data", *Geophys. Res. Lett.*, 17, 199-202, 1990.
- 2 Bevington, P. R., "Data reduction and error analysis for the physical sciences", McGraw-Hill, New York, 1969.
- 3 Coco, D. S., C. Coker, S. R. Dahlke, and J. R. Clynch, "Variability of GPS satellite differential group delay biases", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sys.*, 27, 931-938, 1991.
- 4 Ho, C. M., A. J. Mannucci, L. Sparks, X. Pi, U. J. Lindqwister, B. D. Wilson, B. A. Iijima, and M. J. Reys, "Ionospheric total electron content perturbations monitored by the GPS global network during two northern hemisphere winter storms", *J. Geophys. Res.*, 103, 26409-26420, 1998.
- 5 Hovath, I. and E. A. Essex, "Using observations from the GPS and TOPEX satellites to investigate night-time TEC enhancements at mid-latitudes in the southern hemisphere during a low sunspot number period", *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 371-391, 2000.
- 6 Lanyi, G. E. and T. Roth, "A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and beacon satellites observations", *Radio Sci.*, 23, 483-492, 1988.

- 7 Lunt, N., L. Kersley, and G.J. Bailey, "The influence of the protonosphere on GPS Observations: Model simulations", Radio Sci., 34, No. 3, 725-732, 1999.
- 8 Mannucci, A.J., B.D. Wilson, D.N. Yuan, C.H. Ho, U.J. Lindqwister, and T.F. Runge, "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric electron content measurements", Radio Sci., 33, 565-582, 1998.
- 9 Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka, and Y. Iimura, "Expansion of GSI's nationwide GPS array", Bull. Geogr. Surv. Inst., 43, 23-34, 1997.
- 10 Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan", Earth Planets Space, 111-120, 2001.
- 11 Press, W.H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, "Numerical Recipes in Fortran 77", Cambridge University Press, 670-673, 1992.
- 12 Reiff, P. H., "The use and misuse of statistical analysis", in R. L. Carovillano and J. M. Forbes (Ed.), Solar-Terrestrial Physics, 493-522, 1983.
- 13 Sardón, E., A. Rius, and N. Zarraoa, "Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations", Radio Sci., 29, 577-586, 1994.
- 14 Sardón, E. and N. Zarraoa, "Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?", Radio Sci., 32, 1899-1910, 1997.
- 15 Wilson, B. D., A. J. Mannucci, C. D. Edwards, and T. Roth, "Global ionospheric maps using a global network of GPS receivers, paper presented at the international Beacon Satellite Symposium", MIT, Cambridge, MA, July 6-12, 1992.
- 16 Wilson, B. D., A. J. Mannucci, and C. D. Edwards, "Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers", Radio Sci., 30, 639-648, 1995.



馬 冠一 (MA Guanyi)

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ
専攻研究員 理学博士
宇宙空間物理



丸山 隆

電磁波計測部門電離圏・超高層グループ
リーダー 博士(工学)
超高層大気物理

