

GPS衛星利用全電子数測定結果と VLBIで得られた全電子数の比較

関東支所 第三宇宙通信研究室
近藤哲朗、今江理人、雨谷 純、金子明弘

国土地理院
松坂 茂、飛田幹男

1. はじめに

1989年11月28日および12月6日に鹿島と父島において、当所で開発されたGPS衛星利用全電子数測定装置[1] GTR-2（我々は親しみを込めてゲッター・ツアあるいはゲッター・ツと呼んでいる）と2周波VLBIの同時観測を実施した。2周波VLBIでは2局の電離層全電子数の差が測定できるがその結果とGTR-2の結果を比較した。目的はGTR-2データを用いての電離層全電子数の水平分布推定法の評価と、1周波VLBIの電離層補正にGTR-2が使用できるかどうかを評価するためである[2]。

2. 観測データ

図1にGTR-2で得られたGPS衛星方向の全電子数（STEC: Slant TEC）、図2にはVLBI観測で得た電離層遅延補正量（ $\Delta\tau_{ion}$ ）を示す。

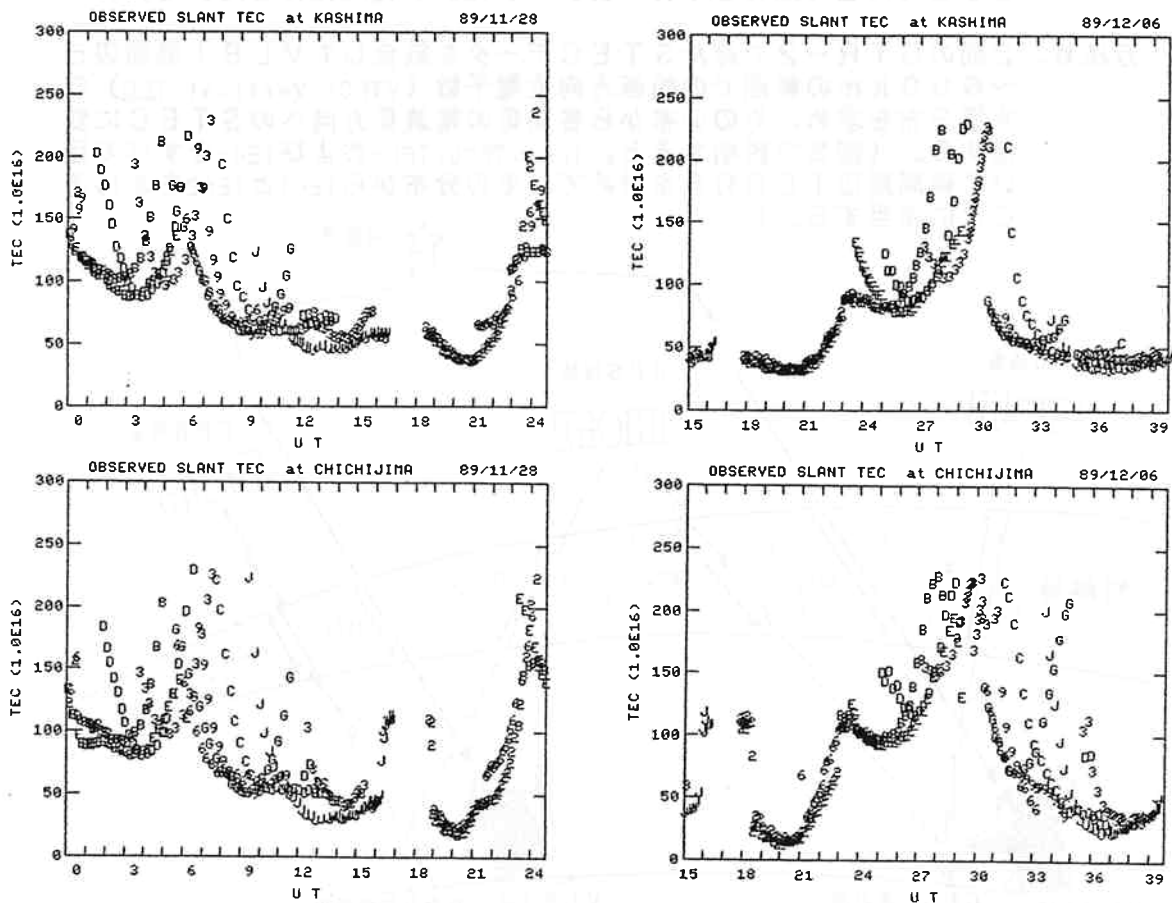


図1. 鹿島および父島においてGTR-2で観測されたGPS衛星方向のTEC。

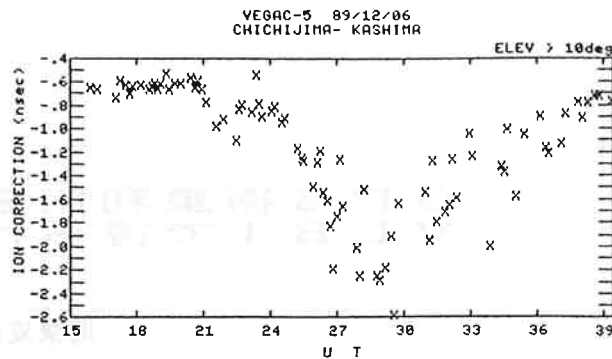
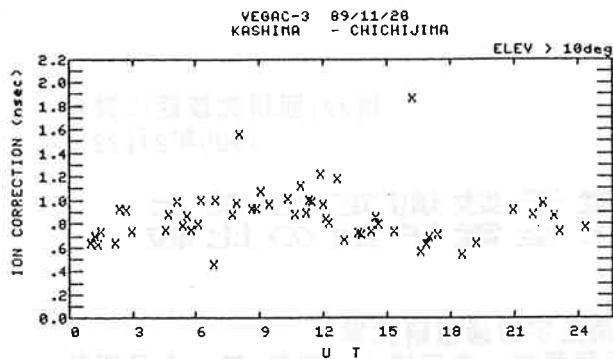


図2. VLBI観測で得た電離層遅延補正量 ($\Delta\tau_{ion}$)。 $\Delta\tau_{ion}$ にオフセットが見られるが、これはXバンド受信器とSバンド受信器の局内遅延差に起因している。

3. GTR-2の結果とVLBIの結果の比較方法

両者の比較において特に考慮に入れなければならない点として次の2点が挙げられる。

- ア. 一般に観測時刻が異なる。
- イ. 一般に視線方向 (GPS衛星と電波星) が異なる。

アに関してはGTR-2データを時間に対して補間して、VLBIの観測時刻でのSTECデータを得た。補間には3次のスプライン補間を用いた。

イに関しては、以下に述べる2種類の補正方法を比較した。

方法a. 各局でのGTR-2で得たSTECデータから各局毎の電波星方向のSTECに変換する。(図3で説明すると左の局のTECの推定には左の局GTR-2データTECaやTECbだけを用い、右の局のTECを推定するのに右の局のGTR-2データTECcやTECdだけを用いる。)

方法b. 2局のGTR-2で得たSTECデータを結合してVLBI局周辺5~600kmの範囲での鉛直方向全電子数 (VTEC: Vertical TEC) の水平分布を求め、その分布から各局毎の電波星方向へのSTECに変換する。(図3で説明すると、TECa,TECb,TECcおよびTECdをすべて用いて両局周辺TEC分布を求めて、その分布からTEC1とTEC2を求めることに相当する。)

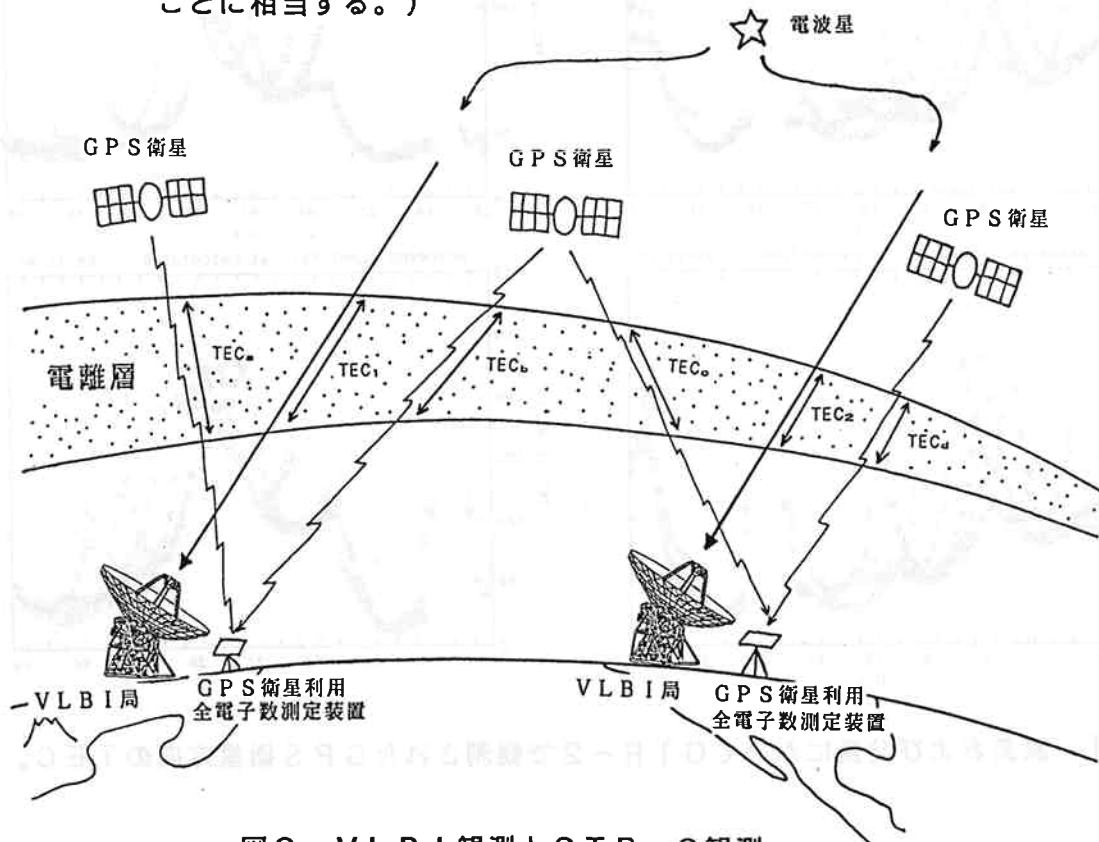


図3. VLBI観測とGTR-2観測

方法 a と b の長所、短所については文献 [2] でも述べたが、汎用性に富むことや電離層の全電子数分布のモニターにも使用できることから方法 b の方が優れていると考えられる。これらの方法において、STEC の仰角依存性モデルが必要となるが、今回は (1) 式を用いた。また電離層平均高度を 300 km としたが、今後の検討すべき課題でもある。

$$VTEC = STEC \times \cos(\sin^{-1}(R_E \cos EI / (R_E + H_1))) \quad (1)$$

ここで EI : 仰角
 R_E : 地球半径
 H_1 : 電離層平均高度

【方法 a の具体的方法】

具体的方法として次の 2 種類を試した。

- a-1. 複数の GPS 方向で得られた STEC を (1) 式で VTEC に変換し、それらの単純平均を取ったものを用いて電波星方向の STEC を求める。(図 3 で説明すると、電波星方向の STEC を得るのに左の局は TEC_a と TEC_b を用いて、右の局は TEC_c と TEC_d を用いてそれぞれの天頂方向の TEC を求め、それを電波星方向の TEC に変換し、 TEC_1 および TEC_2 を得る)
- a-2. 電波星方向からの角距離がある数居値以内でかつ最も電波星に近い GPS 方向の STEC データを用いて (1) 式により電波星方向の STEC を求める。(図 3 では TEC_1 を得るのに TEC_b を用い、 TEC_2 を得るのに TEC_d を用いることに相当する)

【方法 b の具体的方法】

VTEC の水平分布の推定は以下に示す手順で行った。

- (a). 父島および鹿島から 各 GPS 衛星を見たときの時刻 t における電離層 (300 km 高度を仮定) 通過点の地上投影点を求める。
- (b). 各電離層通過点での VTEC を (1) 式により計算する。
- (c). 各電離層通過点での VTEC が矛盾しないように水平分布を求める。

(c) に関して今回は同心円状のコンターとして VTEC 水平分布を推定する球面近似 [5] を用いたが、他のもっと良い方法を模索中である。

方法 a や b で得られた各局毎の電波星方向での STEC を TEC_1 および TEC_2 とすると、VLBI 観測で得られる電離層遅延補正量 $\Delta \tau_{ion}$ に相当する量 $\Delta \tau_{calc}$ は次式で計算される。

$$\Delta \tau_{calc} = 1.34 \times 10^{-7} \times (TEC_2 - TEC_1) / f^2 \quad (\text{sec}) \quad (2)$$

ここで f : Xバンド受信周波数 (Hz)

4. 比較結果

図 4 から 6 に方法 a-1, 方法 a-2 および方法 b での比較結果を示す。父島は観測局が山間にあつたため低仰角での GTR-2 データに不具合が見られたため、GPS 衛星の仰角が 25° 以上の GTR-2 データのみを用いた。

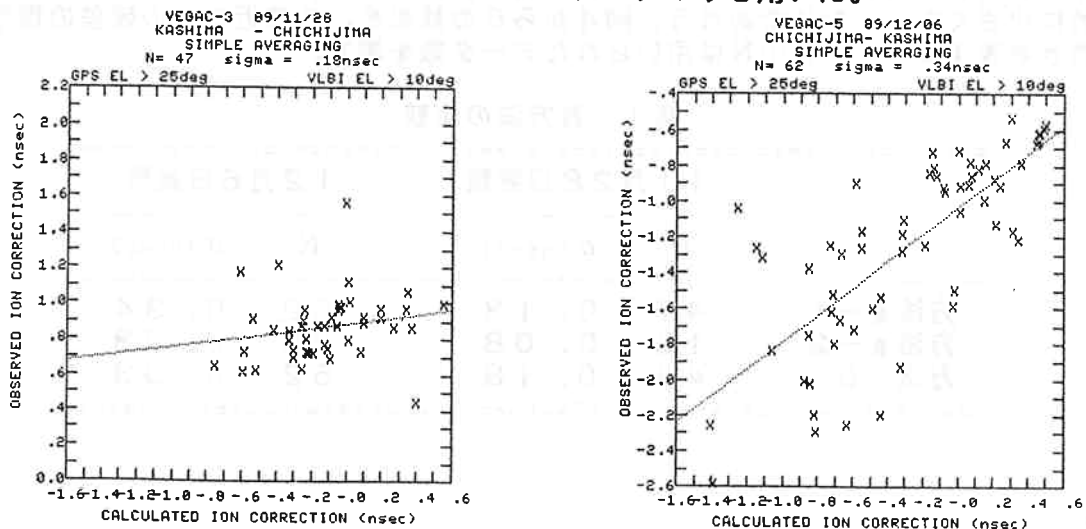


図 4. 方法 a-1 の比較結果。それぞれの図の縦軸は VLBI 観測量 ($\Delta \tau_{ion}$) 横軸は GTR-2 観測結果 ($\Delta \tau_{calc}$) である。点線は両データの回帰直線。

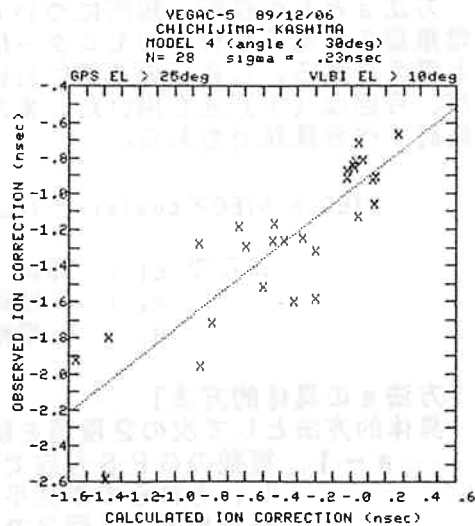
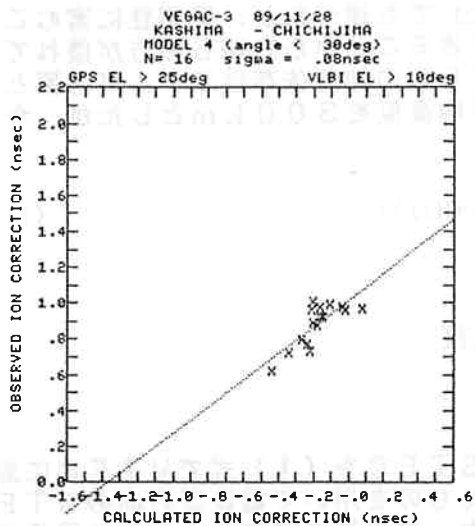


図5. 方法 a-2 の比較結果。

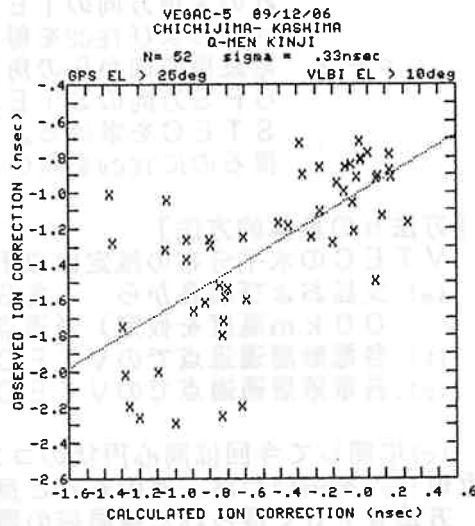
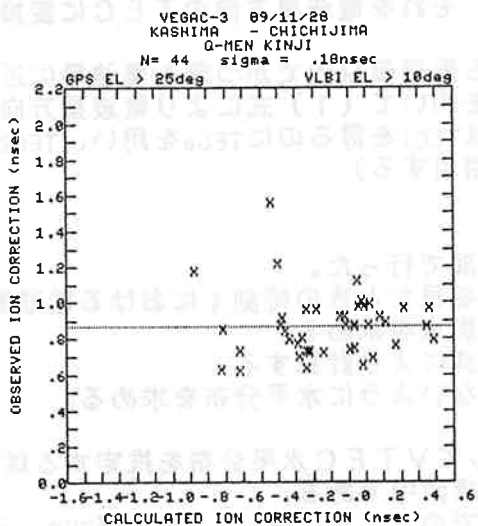


図6. 方法 b の比較結果。

さて $\Delta\tau_{ion}$ と $\Delta\tau_{calc}$ が定数分のオフセットを除いて一致するならば傾き 45° の直線上に乗るはずである。12月6日実験時はどの方法も傾きが 45° に近づいているが11月28日実験時は方法 a-2 以外は大きく 45° から外れており、 $\Delta\tau_{calc}$ の変動の方が大きくなっている。これは方法 a-2 以外がうまく行っていないことのほかに、GTR-2で観測されたSTECにあるオフセットが存在するためと考えられる。そのためVTECへの変換においては仰角に依存したオフセットとなるが、12月6日においてどの方法でも傾きが 45° に近づいているのは、TEC自体がこの日は大きかったため（特に父島の昼間）オフセットの寄与が相対的に小さくなったためであろう。図4から6の結果を、直線近似後の残差の標準偏差 σ を表1に示す。表中Nは用いられたデータ数を表す。

表1. 各方法の比較

	11月28日実験		12月6日実験	
	N	σ (nsec)	N	σ (nsec)
方法 a-1	47	0.18	62	0.34
方法 a-2	16	0.08	28	0.23
方法 b	44	0.18	52	0.33

標準偏差を見るかぎりには方法 a-2 つまり、電波星方向の GPS 衛星データを用いる方法が一番よい。これは当たり前といえば当たりの結果であるが、GTR-2 データの正しさが確かめられたことになる（ただし VLBI 結果を正しいとすればであるが）。しかし 1 周波 VLBI の電離層補正に使おうとした場合、使えるデータ数の少なさが問題となる。方法 b は方法 a-1 つまり単純平均程度の結果しか与えていないようである。

5. おわりに

VLBI 結果と GTR-2 結果を比較した結果、観測方向が一致する場合には両者に良い一致が見られ、GTR-2 データの正しさが確認されたといえる。今回、TEC の水平分布の推定には便宜的に球面近似を用いたが、それほど良い結果とはなっていないようである。水平分布の推定は電離層のダイナミクスを研究するうえでも興味深いテーマでもあり、今後方法 b の改良を進めていきたい。

最後に今回の実験に協力していただいた日本通信機（株）の関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 三木千紘、今江理人、「スペクトル逆拡散を利用した電離層伝播遅延時間測定法」、021202、昭和63年。
- [2] 近藤哲朗、今江理人、雨谷 純、金子明弘「GPS衛星を用いてのVLBI電離層補正」、第419回研究談話会資料、1989、12月。
- [3] 近藤哲朗、雨谷 純、「単周波数帯VLBIの電離層補正について—その3」、第412回研究談話会資料、1989、7月。