

## G P S 衛星を用いての V L B I 電離層補正

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

### 1. はじめに

当所で開発されたGPS衛星利用全電子数測定装置(GTR-2)は視線方向の電離層全電子数(TEC)を $2 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ の精度で4分毎に測定できる装置である[1][2]。現在、利用可能なGPS衛星の数は10ヶであり、観測時間帯にもよるが1地点から3~5衛星が同時に見える。この複数の方向の全電子数データから単周波VLBIの電離層補正が可能となる。

Xバンド(8GHz帯)のみを受信する超小型局を用いての国内VLBI実験において、基線長が数100km以上となる場合には何らかの方法での電離層での遅延補正が必要となる。このために今まで、国内5ヶ所(稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄)の $f_oF_2$ データを用いて日本近辺の $f_oF_2$ 推定し、さらに電離層等価層厚モデルを用いてTECに変換して電離層遅延を補正するという方法を色々と検討してきた[3][4][5][6]。しかしこれらの方法では電離層観測局配置の制約から有効に遅延補正が行える領域が制限を受け、また電離層等価層厚モデルにも依存するため、補正結果は必ずしも満足できるものではなかった[7]。

ところでGTR-2は電離層遅延補正に必要なTECを直接測定し、1局のみの観測からも水平方向にある程度広がった領域でのTEC分布を得ることができる。2地点以上で観測することによりさらに広い範囲でのTEC分布を得ることができ単周波VLBIの電離層補正にとって最適のデータを提供する。

今回、1989年11月25日から12月9日にかけて父島(27.1N, 142.2E)と鹿島(36.0N, 140.7E)においてGTR-2を用いて同時観測を実施する機会を得た。そこでこれらのデータを用いての単周波VLBI電離層補正について検討した。この時、2周波VLBI観測も実施しているためGTR-2の結果とVLBIの結果との比較が可能である。しかしながらVLBIデータはまだ処理が行われていないため、今回はGTR-2データからの水平面内TEC分布の推定—これは単周波VLBIの電離層遅延補正に適用するための手順の中間ステップとして位置づけられる—について報告する。図1に参考として鹿島と父島で1日中、GPS衛星を観測した場合のGPS衛星からの電波が電離層を通過する点の地上投影の軌跡を示す。比較のため図2には鹿島—父島基線で行ったVLBI実験時の、各アンテナに到達する電波星からの電波が電離層を通過する点の地上投影を示す。

### 2. GTR-2を用いての電離層遅延補正

VLBIにおける電離層補正とは電波星からの電波がアンテナに到達するまでに電離層大気によって被る遅延の各局での差を補正することである。電離層大気による遅延は視線方向のTECに比例するため、各局毎に独立に電波星方向のTECを求めることができるならば、遅延補正が可能となる。またTECの差は主に地球電離層で生じるために電波星方向のTECの内、地球電離層について考えれば十分である。

VLBI各局において電波星方向にGPS衛星が位置するならばそのGPS衛星からの電波を受けることによって、簡単に電離層遅延の補正ができるが、一般的に言ってこのような理想的な状態になることはまずありえない。あったとしてもVLBIの1日実験(~150観測)において1観測あるかないかであろう。そこで、GPS衛星の視線方向でのTECをVLBIで観測する電波星方向へのTECに変換しなくてはならない。この方法として以下の2つの方法が考えられる(他にもあるかもしれないが著者の頭にすぐに浮かんだのは2つしかなかった)。

方法a. 各局でのGTR-2で得たTECデータ(時刻tにおける方位角AZ, 仰角ELでの値)をTECのAZ, EL依存性モデルを用いて時刻tにおける電波星

方向のTECに変換する。

方法b. GTR-2で得たTECデータから時刻tにおけるVLBI局周辺5~600kmの範囲での鉛直方向全電子数(VTEC)分布を求め、その分布から電波星からの各VLBI局に到達する電波が電離層を通過する点(緯度、経度)でのVTECを得て、さらにそこでの伝播路長ファクターを考慮して各VLBI局における電波星方向のTECを求める。

aとbではaの方がより簡単で直接的な方法であるが、同時に見えるGPS衛星の数が少ない場合、AZ、EL依存性のモデル化に難点が生じる。異なるAZ、ELは異なった地点(緯度、経度)に対応し、ある1地点からは約1000kmの範囲の電離層を見ていることになるが、こうした範囲にわたって電離層が同じ状態であれば良いのだが、現実的にはまずありえない。

一方、bの方法では水平面内でのVTEC分布の推定に多地点で観測したTECデータを結合して用いることができる。また必ずしもVLBI局でTEC観測をしなくても良いという利点もある。つまりVTECの水平分布を求めた範囲内にVLBI局(正確に言うと電波星からの電波が電離層を通過する点)が入っていればよい。

ということでbの方がより汎用性に富む優れた方法であると考えられる。また電離層の水平面内での分布のモニターにも使用できる。

### 3. VTECの水平分布推定例

図3に鹿島および父島においてGTR-2で取得したデータ例(11月29日)を示すが、電離層の平均高度を300kmとして伝播路長の仰角依存性を補正しVTECに換算している。衛星間のバラツキが見られるがVTECの場所(緯度、経度)による違いが反映されているためである。

図3のデータから11月29日7hUTにおける父島および鹿島近辺でのVTEC分布を調べた結果を図4に示す。この図は方法bに基づいて以下のような手順で作成した。

- (1). 父島および鹿島から各GPS衛星を見たときの7hUTにおける電離層(300km高度を仮定)通過点の地上投影点を求める(×および●で表示)。
  - (2). 図1から7hUTにおける各GPSに対するVTECを読み取り、その値を各電離層通過点でのVTECとする。
  - (3). 各点でのVTECが矛盾しないようにコンターを引く。
- 今回(3)については目で見て強引にコンターを引いたが、現在、(1)における電離層高度の仮定へのフィードバックも含めて計算機で行うためのモデルを開発中である(一例として球面近似[5]を適用して2次元分布を求めた例を図5に示すがまだ良い近似とはなっていない)。

こうしてある時間毎のVTECの水平分布が得られれば任意の時間に任意の場所でのVTECを得ることができる。即ち、VLBIで電波星を観測した場合のその視線方向と電離層交点でのVTECを得ることができ、斜め入射による伝播路長の補正を行うことにより、最終的に電離層補正が可能となる。

### 4. おわりに

単周波VLBIにおける電離層遅延補正という問題を、GPS衛星を利用した電離層全電子数の水平面内の分布推定という問題として考えてきた。

GPS衛星を用いての電離層観測の利点は複数の方向の電離層をほぼ同時に観測できることである。したがって1地点の観測でも比較的広範囲の電離層のモニターが可能となる。観測点を増やすことによりさらに広範囲の電離層モニターが可能となり、単周波VLBIの電離層遅延補正に対してもよりよいデータが提供できることになる。さらに新聞などに見られる天気図のように全電子数分布図を作成することも可能となるではなからうか。

最後に今回の実験に協力していただいた建設省国土地理院測地部および日本通信機(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] 今江 他、「GPS2周波相関方式電離圏遅延測定装置の開発と受信結果」、第399回研究談話会資料、1988、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」、第408回研究談話会資料、1989、4月。
- [4] 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2」、第410回研究談話会資料、1989、6月。
- [5] 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。
- [6] 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4」、第416回研究談話会資料、1989、9月。
- [7] 雨谷 純、近藤哲朗、浜 真一、「単周波数帯VLBIの電離層補正について—その5」、第416回研究談話会資料、1989、9月。

図1. 鹿島、父島におけるGPS衛星の軌跡(1989年11月28日)。GPS衛星からの電波を鹿島、父島で受信した場合に高度300kmの電離層を通過する点の地表面投影として表示している。

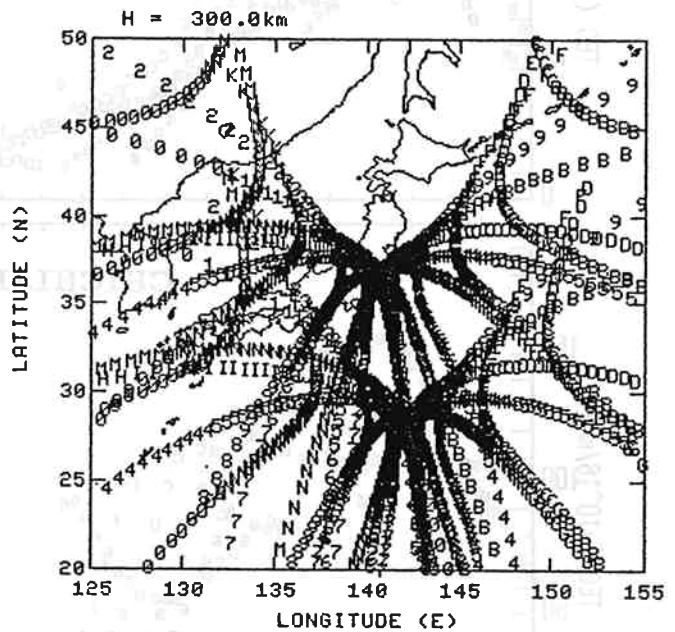
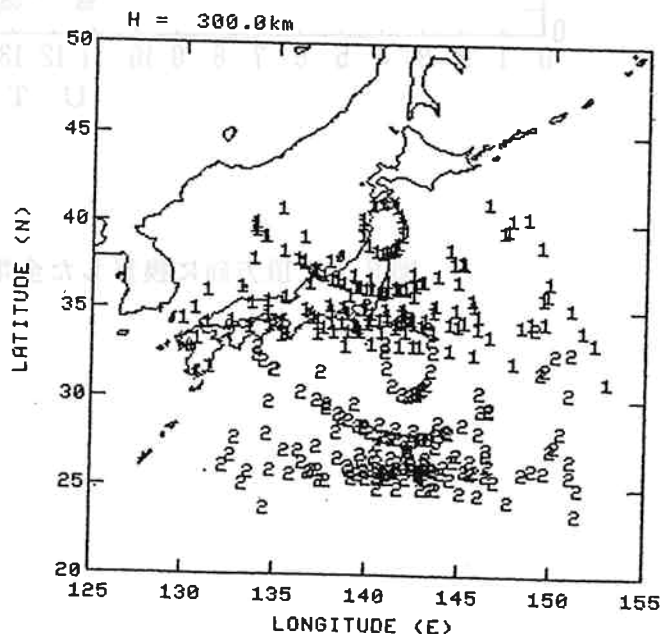
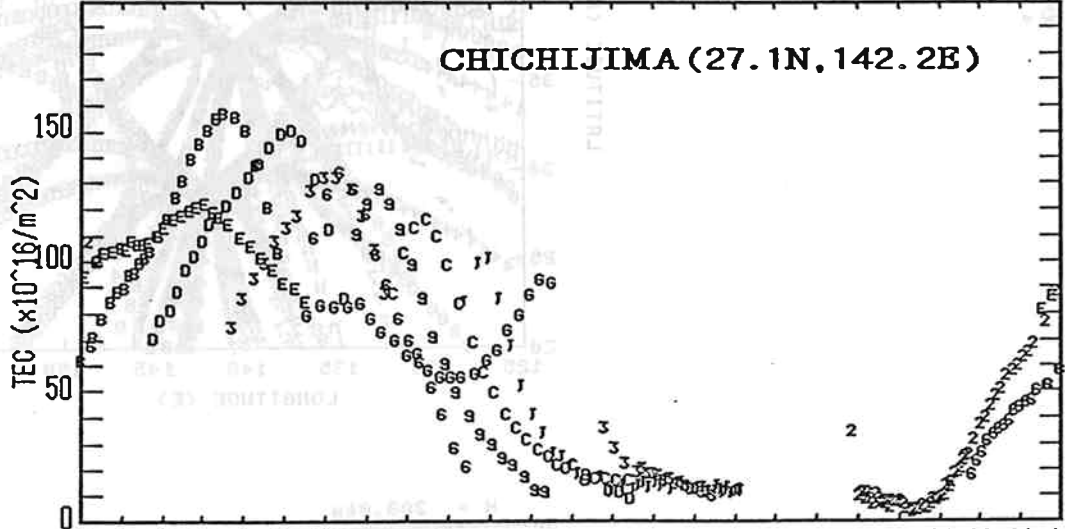
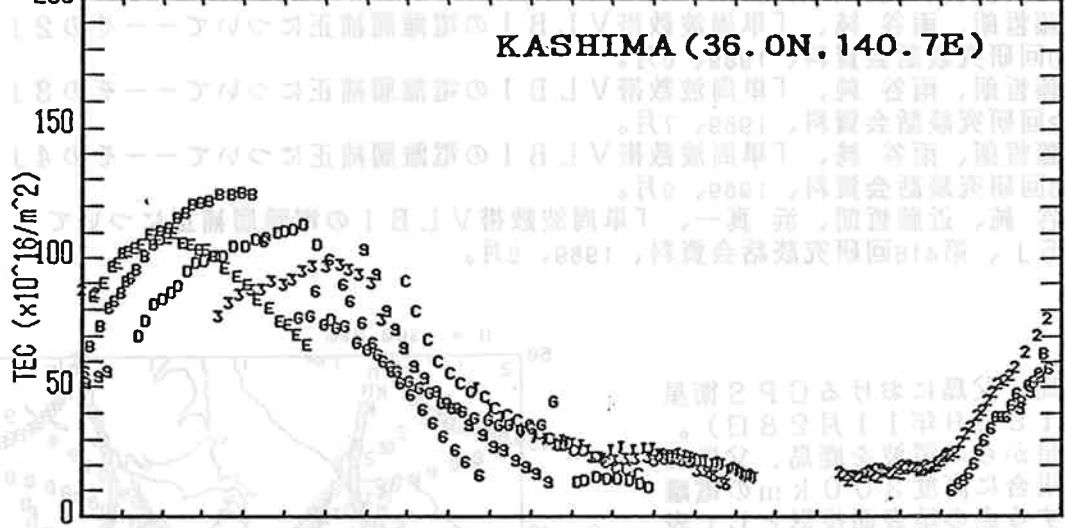


図2. 鹿島-父島基線VLBI実験(1989年11月28日)時の電波星の軌跡。各局で受信する電波星からの電波の電離層通過点の地表面投影として表示。これらの軌跡で示される領域の電離層状態が分からなくては単周波VLBIにおいて電離層補正ができない。



NOV. 29, 1989  
 a SV10 b SV11 c SV12 d SV13 e SV14 f SV15 g SV16 h SV17 i SV18 j SV19



UT

図3. 天頂方向に換算した全電子数観測例。

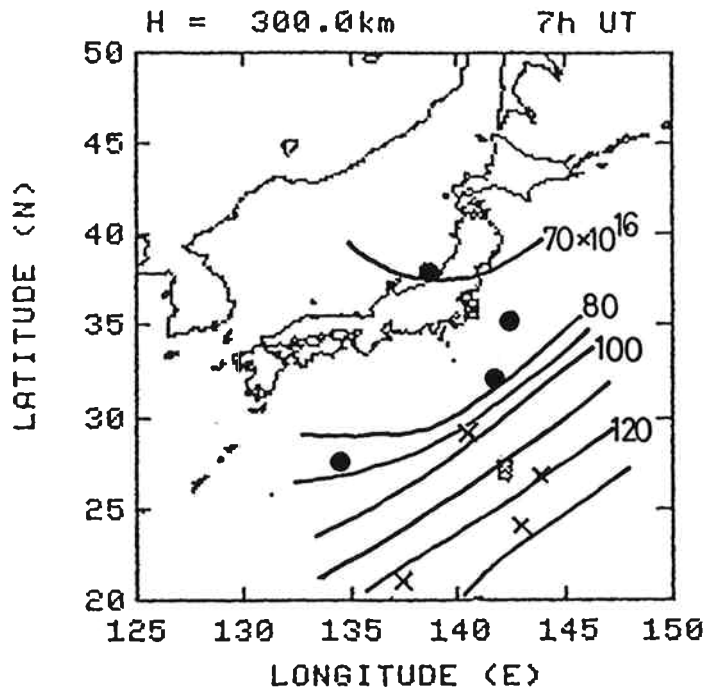


図4. 日本近辺の全電子数分布推定結果(1989年11月29日7時UT)。目で見て強引にコンターを引いた例。●および×は鹿島および父島からGPSを見たときの300km高度の電離層通過点を示す。

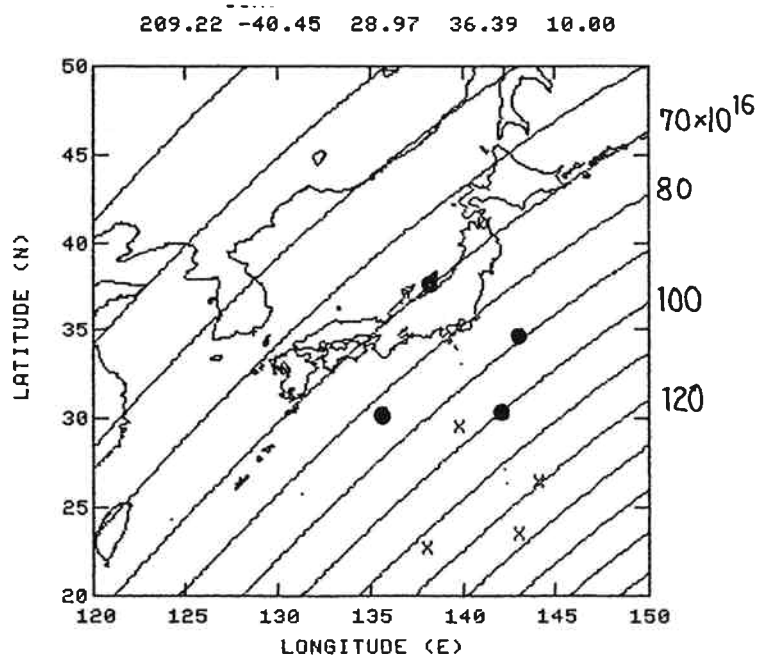


図5. 日本近辺の全電子数分布推定結果(1989年11月29日7時UT)。球面近似を適用した例。