

## 多基線VLBIデータを用いての 全電子数日変化の最小二乗推定

鹿島支所 第三宇宙通信研究室  
近藤 哲朗

### 1. はじめに

VLBIデータから全電子数(Total Electron Content : TEC)の日変化を推定する方法については第400回談話会で既に報告した[1]。その時に用いたデータは一基線データのみであったが、今回、多基線データを扱えるようにプログラムの改良を行った(前回のプログラムには一部不具合もあった)。全電子数の日変化モデルとしては1日周期から4分の1日周期までを含む周期関数と考えて直接にTECを推定した。推定した結果を国分寺でETS-I Iビーコン波のファラデー回転を利用して得たTECと比較した。両者はおおむね一致し、VLBIデータだけからでもTEC日変化の推定が可能であることが分かった。

### 2. 全電子数日変化モデル

Xバンド(8GHz帯)およびSバンド(2GHz帯)の2周波数帯を使うVLBI観測で直接得ることのできる量は各局から電波星までの伝播経路に沿ったTECの差である[1]。地球より遠方での伝播経路はほぼ同一であることを考えると、こうして得られるTECの差は地球近傍、主に地球電離層、のTECの差である。この観測量から各局毎のTECを得る為にTECの日変化のモデルを考え、そのモデルを記述するパラメータを最小二乗法で推定する。

TECの日変化のモデルを考えるにあたって、国分寺でファラデー法で得たTECの1ヶ月分のデータのスペクトル解析を行った(図1)。その結果は、TECの日変化は1日周期、2分の1日周期、3分の1日周期、および4分の1日周期を考えれば、ほぼ記述することができることを示している。そこで、各局毎の天頂方向でのTECとして次のようなモデルを考える。

$$TEC = \alpha \times 10^{15} \quad (\text{electron/m}^2) \quad (1)$$

ここで、

$$\alpha = a_0 + \sum_{k=1}^4 (a_k \cos k\theta + b_k \sin k\theta) \quad (2)$$

$$\text{ただし } \theta = UT(\text{時}) \cdot \pi / 12$$

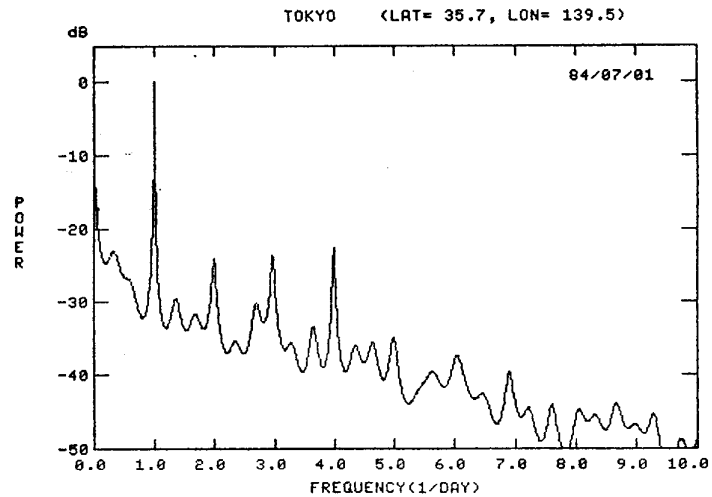


図1. TEC変動のスペクトル。1984年7月1ヶ月分の国分寺TECデータを用いて最大エントロピー法にてスペクトルを求めた。

各局毎の  $a_k$  ( $k=0,1,2,3,4$ ) および  $b_k$  ( $k=1,2,3,4$ ) を最小二乗法で推定する。さらに各局毎の X バンド受信系と S バンド受信系の遅延オフセットも推定する (このオフセットは一基線データからは各局独立に推定することは不可能だが多基線データからは各局独立の推定が可能となる)。

### 3. 最小二乗法による推定

#### 3.1. 観測量 (O)

局 1-2 基線に関して X バンドでの観測遅延  $\tau_{x-12}$ , S バンドでの観測遅延  $\tau_{s-12}$  から次式で求められる X バンドでの電離層遅延補正量を観測量とする。

$$\tau_{o-12} = (\tau_{x-12} - \tau_{s-12}) f_s^2 / (f_s^2 - f_x^2) \quad (3)$$

ここで、 $f_s$  : S バンド観測周波数

$f_x$  : X バンド観測周波数

#### 3.2. 予測値 (C) [観測方程式]

TEC の日変化モデルを用いて、局 1-2 基線に関して以下の手順で計算される量を X バンドでの電離層遅延の補正量  $\tau_{c-12}$  とする。

局 1 に到達する電波が電離層を通過する際に経験する余分な遅延は、

$$\tau_{ion-1} = 40.3 / (c f_x^2) \cdot M(E1) \cdot TEC \quad (4)$$

ただし、 $c$  :  $3 \times 10^8$  m/sec (光速)

$f_x$  : X バンド観測周波数 (Hz)

$M(E1)$  : 電離層の高さを 300km とした場合の TEC の仰角依存性。

$$M(E1) = 1 / \cos \{ \sin^{-1} [R \cos E1 / (R + 300)] \}$$

ここで、 $R$  : 地球半径 (6371km)

$E1$  : 局 1 での電波星の仰角

TEC : 局 1 の天頂方向でのモデル全電子数 (electron/m<sup>2</sup>)

で計算される。局 2 に関しても同様の計算で  $\tau_{ion-2}$  を得る。局 1 および 2 での X バンド受信系と S バンド受信系の遅延オフセットをそれぞれ  $t_{o-1}$ ,  $t_{o-2}$  とすると、 $\tau_{c-12}$  は、

$$\tau_{c-12} = (t_{o-2} - t_{o-1}) + (\tau_{ion-2} - \tau_{ion-1}) \quad (5)$$

で計算される。符号は V L B I 観測の定義に合わせている。

#### 3.3. 偏微分係数

電離層遅延の補正量の予測値  $\tau_c$  のパラメータ  $t_o$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  に関する偏微分係数は以下のように計算される。

$$\begin{aligned} \partial \tau_c / \partial t_o &= \pm 1.0 \\ \partial \tau_c / \partial a_o &= \pm D \\ \partial \tau_c / \partial a_k &= \pm D \cos(k\theta) \\ \partial \tau_c / \partial b_k &= \pm D \sin(k\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $D = 40.3 / (c f_x^2) \cdot M(E1) \times 10^{15}$

ただし、複号は基線の基準局 (局 1) については -、基線の端局 (局 2) については + を取る。

#### 3.4. パラメータの推定

偏微分 (ヤコビアン) 係数行列と観測値より最小二乗法を用いて各パラメータを求める。しかし (6) 式で示した偏微分係数から分かるように、異なる局間でのパラメータの独立性は局毎での仰角の違いにのみ依存する。これは、電波星の仰角の違いにあまり差が見られないような短基線観測からは局毎に独立に推定することが難しくなることを意味している。

最小二乗解を求めるテクニックとして特異値分解法を用いた。各局毎のパラメータ数は最大10である。最大60パラメータ(6局)500観測の解析が行えるプログラムLSQTECをHP1000モデルA900計算機上で作成した。

#### 4. 全電子数日変化推定結果例およびファラデー法で得た結果との比較

日米VLBI実験は1984年からスタートし、現在までに平均月一度のペースで実験が行われている。こうして得られている観測データの内、今回開発したプログラムの試験の為、1984年7月28日、29日および8月4日に行われた実験を集中的に解析している。実験参加局を図2に示す。これらの実験は丁度磁気嵐の始まり(SC)は7月31日---を間に挟んでおり、その意味でも興味深い(図3)。実験当日の磁気擾乱状態は比較的静か( $Kp \leq 3$ )であり、太陽黒点相対数(R)も10から20程度と小さかった(太陽活動極大期における平均的Rは100程度である)(図3)。図4から6に鹿島局のTECを推定した結果と国分寺でファラデー法で得た結果を比較のために、同一の図内に示した。それぞれの図内で破線(細)は1基線データのみから推定したTEC、実線は2基線以上のデータ(最大6基線)を用いて推定したTECを示している。ファラデー法で得たTECは太い破線で示している。図7は7月29日実験を6基線データを用いて推定した後のO vs. Cプロットの一例を示す。

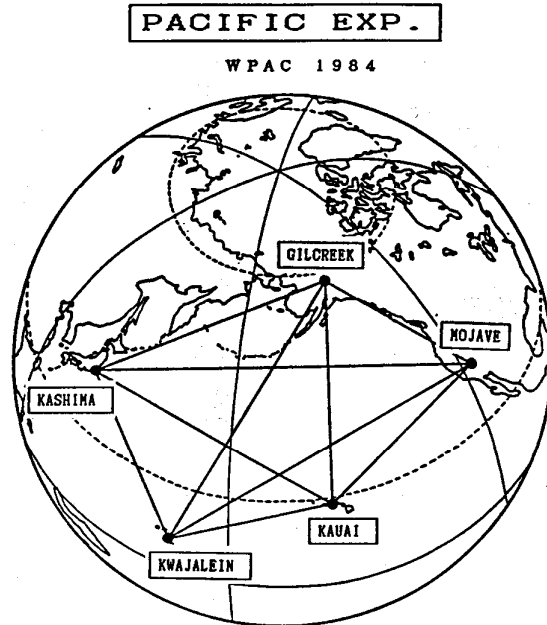


図2. VLBI実験参加局('84)

##### 4.1. 単基線推定結果(細い破線)と多基線推定結果(実線)の比較

1基線データのみからTECを推定すると用いる基線によって結果が大きく異なってしまうが、2基線以上のデータを用いた場合ほぼ同一の推定結果(推定誤差内で一致している---今の場合推定誤差は約 $20 \sim 50 \times 10^{15}$ 程度である)が得られていることが分かる。

##### 4.2. 多基線推定結果(実線)とファラデー法で得たTEC(太い破線)との比較

ファラデー法で得るTECは地球磁場強度と電離層電子密度の兼ね合い

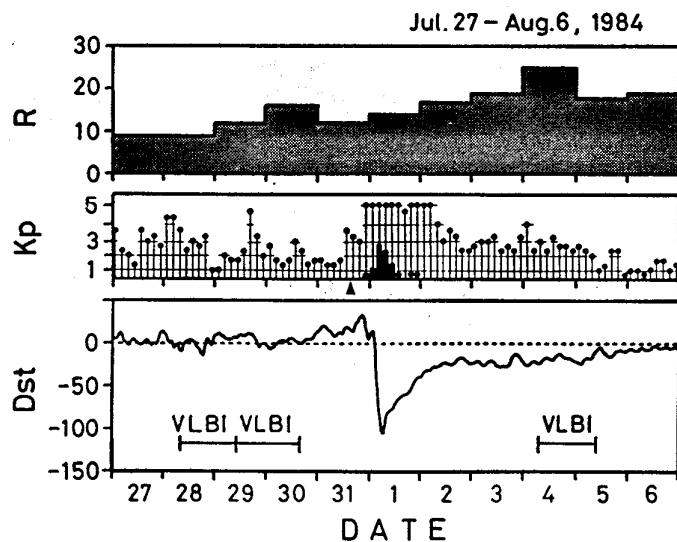


図3. 実験前後の太陽黒点相対数(R)、Kp指数およびDst指数。7月31日に磁気嵐の開始(SC: 図中▲印)が見られる。

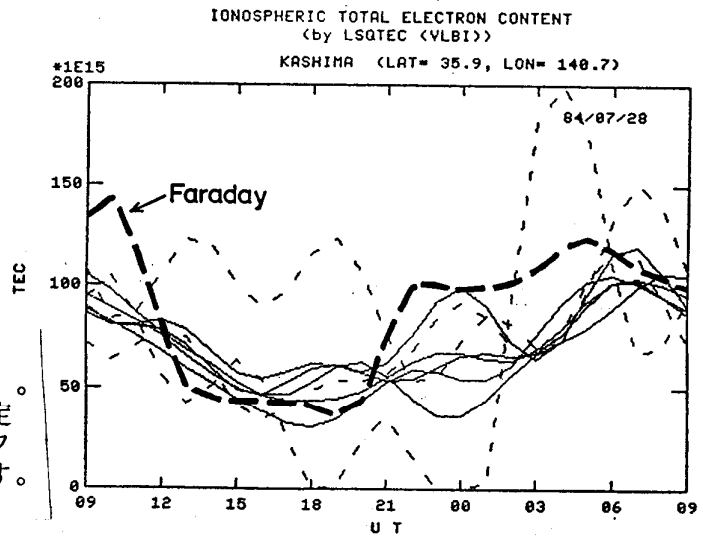


図4. TEC推定結果(7月28日実験)。単基線推定結果を細い破線で、多基線推定結果を実線で示す。比較の為、国分寺でファラデー法で得たTECを太い破線で示す。

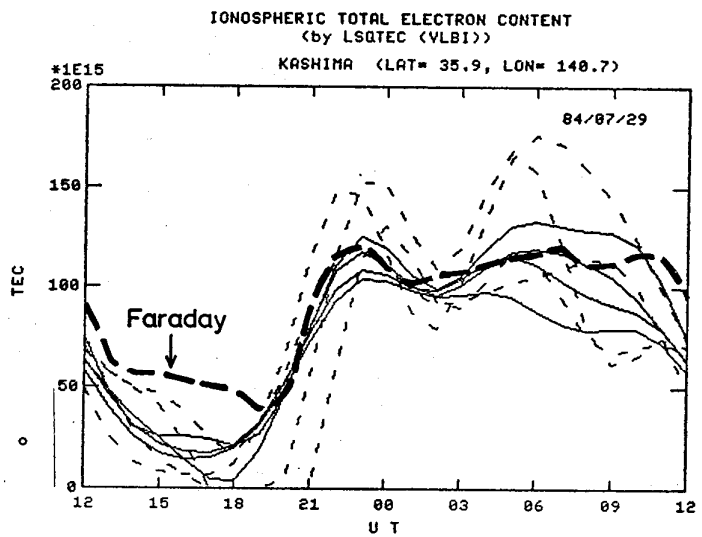


図5. TEC推定結果(7月29日実験)。線種とその意味は図4と同じ。

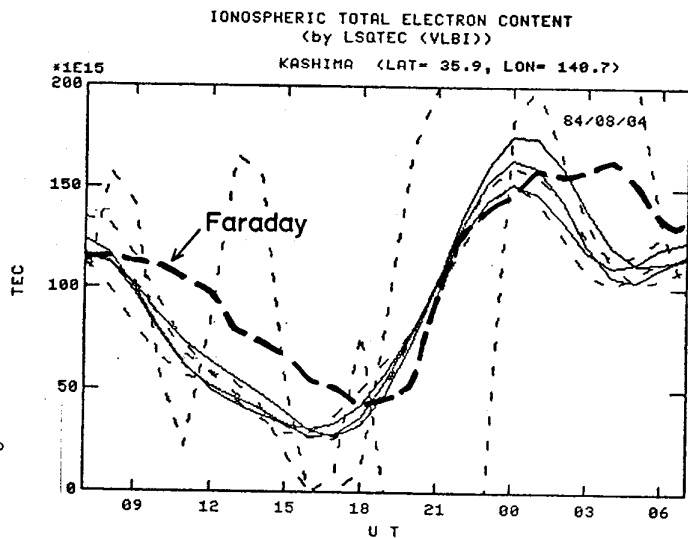


図6. TEC推定結果(8月4日実験)。線種とその意味は図4と同じ。

から高度約2000kmまでの積分値であり、また測定値には伝播路と高度300kmの通過点付近(Sp)の変動が主に反映されている[2]。一方VLBIで得られるTECは磁場強度には依存しないが、やはり最大電子密度付近の情報を中心に反映していると考えられる。図8には国分寺からETS-11を見た場合のSp(+印)および鹿島から電波星を見た場合の伝播路と高度300kmの通過点位置(A, B, ...等)で英字は電波星の種類を表わす)を示す。日米VLBI実験の場合は電波星の相互可視範囲の制限から、鹿島については図8で示されるように少し太平洋側に偏った場所での電離層情報と考えられる。

VLBIデータを用いて今回の手法で推定されるTECはかなり広い範囲(鹿島については緯度方向の拡がり $5^{\circ}$ ×経度方向の拡がり $10^{\circ}$ )の平均値となる(図8)。また、4分の1日周期成分までしか推定していないため6時間より短い変動は平均化されてしまう。したがって、VLBIで得たTECは空間的(水平方向)にも時間的にも平均化された値である。図4から6に示されるように多基線推定結果とファラデー法で得たTECの間に大きな差はない。このことはこの範囲でのグローバルな電離層構造がほぼ同じであることを意味している。

#### 4.3. ケーススタディー (7月29日実験)

多基線推定結果とファラデー法で得たTECはおおむね一致した結果といえるが、詳細を見ると食い違っている。以下に示す時間帯においてVLBI結果の方がファラデー法よりも小さくなっている---7月28日実験: 21時~06時、7月29日実験: 14時から20時、8月4日実験: 10時~18時および2時から5時。この差はどこから生じるのだろうか。図8で示されるようにVLBI法とファラデー法では見ている経度に $10^{\circ}$ 程の違いがあるが、時間軸方向へのシフトと考えると、1時間よりも短い量である。8月4日実験に関しては、時間軸方向へのシフトと考えると、より東を見ているVLBI結果の方が時間的に進んでおり、定性的には良いが、そのシフト量は3時間に達する部分もあり、定量的には問題がある。そこで、VLBI実験データを地磁気擾乱状態との比較という観点から詳細に検討してみた。実験としては7月29日を選んだ。

図9はTEC推定(6基線データを使用)後のO-C残差、Kp指数およびDst指数を示す。15時から21時にかけて小規模の地磁気嵐の発生がみられるが、丁度これに対応して残差のばらつきも大きくなっていく。これはこの時間帯に今回の方法では推定していない6時間より短い変動があったことを物語っている(逆にこの残差のばらつきから磁気嵐の検出ができるかもしれない)。またこの時間帯はVLBI法とファラデー法の結果に食い違いの見られた時間帯でもある。したがって、地磁気嵐に伴う電離層の空間的变化および時間的变化がこの食い違いの一因と考えられる。しかし、VLBI法で得たTECが小さくなることに関しては更に考察が必要である。またO-C残差に観測開始時に正、終了時近くで負の系統誤差が見られるが、これは最大1日周期までしか推定していないためである。TEC日変化モデルに時間に対する1次項を加えることにより、より現実に近いTECの推定が可能と考える。

#### 5. おわりに

以上多基線VLBIデータから電離層全電子数の日変化の推定が可能であることを述べてきた。しかし、さらに良い推定の為にはモデルに時間に対しての1次項を追加する必要のあることが分かった。また、地磁気擾乱データとの比較からVLBIデータだけからでも、磁気嵐の存在を検出できる可能性のあることも分かった。今後、磁気嵐との関係も含めて、VLBIで得たTECとファラデー法で得たTECの食い違いに関してさらに検討を進めたい。

最後に国分寺のTECデータを提供して頂いた情報管理部電波観測管理室室長の皆越氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 近藤 哲朗、浜 真一、「電離層観測装置としてのVLBI」、第400回研究談話会資料、1988、12月。
- [2] 皆越 尚紀、新野 賢爾、西牟田 一三、「ETS-11衛星ビーコンによって求めた電離層全電子数」、電波季、Vol. 31, pp. 107-114、1985。

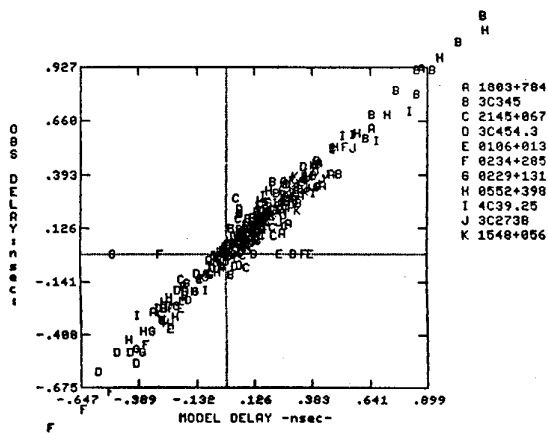


図7. TEC推定後のO vs. Cプロット例 (7月29日実験)。

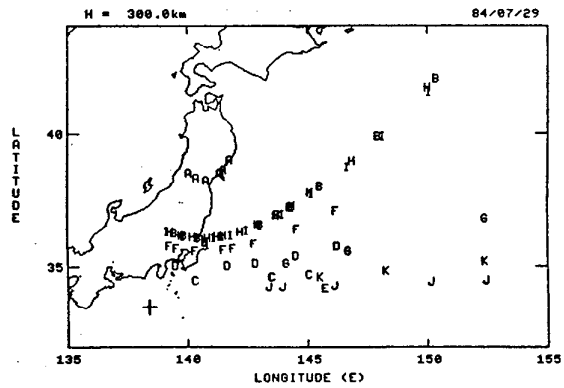


図8. 鹿島から見た電波星方向と電離層 (高度300 km) の交差点の地上投影 (7月29日実験)。A, B, ... は電波星の種別を表わす。図中には国分寺からETS-I Iを見た場合の電離層との交差点も+印で示されている。

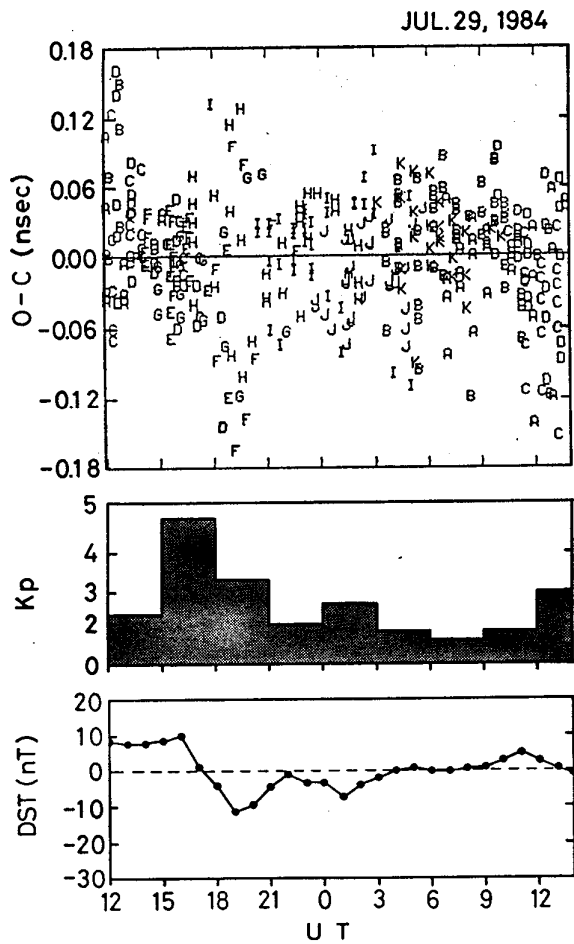


図9. O-C残差および地磁気擾乱指数 (Kp, Dst) (7月29日実験)。16時に小規模磁気嵐の開始がみられ、これに伴ってO-C残差のばらつきが増大が見られる。