

4.5 GPS による電離層 TEC 推定の精度評価と パルサー VLBI 観測への応用

関戸 衛^{*1} 近藤 哲朗^{*1} 川合 栄治^{*1}
花土 ゆう子^{*2} 今江 理人^{*2}

4.5 Evaluation of GPS-based Ionospheric TEC Estimation and Application to Pulsar VLBI Observation

By

Mamoru SEKIDO, Tetsuro KONDO, Eiji KAWAI,
Yuko HANADO, and Michito IMAE

GPS-based TEC measurement accuracy was evaluated by comparison with the S/X dual frequency VLBI experiment data. The global ionosphere map (GIM) generated by the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) is one of the most accurate GPS derived ionosphere map available, thus we used this GIM/CODE for the evaluation. Sekido et al., demonstrated that ionospheric group delays computed from the GIM/CODE agree with the ionospheric TEC measured by VLBI with an accuracy of 3–10% of the total TEC included in the VLBI observation. A comparison between the phase-delay rate calculated from the GIM/CODE and a counterpart of the VLBI observation is presented in this paper. The correlation of the ionospheric phase-delay rates between VLBI observation and the GIM/CODE data was not so high, as in the case of the group delay. The main reason for the lower coincidence is that the GIM/CODE data do not contain high-frequency components in both the time and space domains.

Application of ionospheric delay correction to single-band astrometric VLBI data using the GIM/CODE data was performed. Consequently, the consistency of the observable group-delay and phase-delay rate was improved and the estimated pulsar coordinates solutions were stabilized compared to the cases of no ionosphere correction. Proper motion obtained from the ionospheric-delay corrected VLBI data agreed well with other proper motion measurement results.

[キーワード] GPS, 電離層全電子数 (TEC), VLBI, パルサー
GPS, Total electron content (TEC), VLBI, Pulsar

*1 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

*2 標準計測部 時空計測研究室

1. はじめに

VLBI による位置天文観測を行う場合、S/X バンドの受信システムを備えた測地 VLBI 用アンテナで観測する場合を除いて、一般に単周波で観測が行われる。例えばパルサー⁽¹⁾と呼ばれる 天体は高周波で周波数の $-2--3$ 乗に比例して急速に放射強度が小さくなる特性を持っており、VLBI で観測する場合、2GHz 帯以下の周波数が使われる⁽²⁾。このような観測では観測周波数が比較的低いため、電離層による遅延の影響が最も大きな観測誤差要因となっている。そこで、GPS 衛星の信号を使って電離層電子数を測定し、VLBI 観測の補正に利用することを考える。

GPS 衛星は L1 (1575.42MHz), L2 (1227.60MHz) の 2 周波で信号を放送しており、電離層遅延量の周波数分散性を利用して電離層電子数を測定できる。著者らは、GPS の観測データから推定した約 1000km 範囲のローカルな電離層マップ、あるいは CODE のグローバルな電離層モデル (GIM/CODE) と、VLBI 観測から求められた電離層の群遅延量を比較し、GIM/CODE を使った場合には、観測量に含まれる電離層遅延量の 3–10% の精度で VLBI の電離層遅延量を推定できることを示した⁽³⁾。一方、位相遅延量および位相遅延変化率は、VLBI はもちろん、宇宙探査機の精密ナビゲーション⁽⁴⁾ や、惑星探査機からの電波伝搬を使って惑星の電離層を測るような研究にとっても重要な観測量であり、地球の電離層は 探査機からの信号を攪乱する大きな要因の一つである。国際標準電離層 (IRI)⁽⁵⁾ という標準的な電離層モデルも向上しているが、上記の様な精密計測の要求を満たす精度は持っていない。GIM/CODE を使った群遅延量の評価⁽³⁾に続き、本稿では、GIM/CODE を使って位相遅延変化率を計算し、VLBI 観測の結果と比較した。また、GIM/CODE から計算された群遅延量、位相遅延変化率を使って 1995–1998 年に 1.4GHz および、2.2GHz を使って行われたパルサーの VLBI 観測のデータに GIM/CODE の電離層補正を適用した結果について述べる。

2. 電離層プラズマ中の電波伝播

電離気体中の個々の粒子はランダムな運動をしているが、電離層中を電波が通過するときの、電磁波とプラズマとの相互作用を記述するには、荷電粒子集団の平均的な運動を記述するコールドプラズマ理論が使われる⁽⁶⁾。イオンは電子よりも約 1000 倍重いので、マイクロ波と相互作用するのは主に電子であり、電子集団のドリフト速度を v_d 、地磁気の磁束密度を B とし、電子の単位時間あたりの平均散乱確率を ν とすると、集団としての電子の運動方程式は、次のようになる。

$$m \frac{dv_d}{dt} = -e(E + v_d \times B) - mv_d \nu \quad \dots \dots \dots (1)$$

e は素電荷、 m は電子の質量である。電磁波の磁界も電子の運動に対しローレンツ力として働くが、その大きさは磁界と電子の運動が垂直な場合でも $v_d \times \mu_0 H = n |v_d| |E| / c$ 程度であり、電界に比べて $n |v_d| / c$ のファクター小さいので、通常無視される。 n は屈折率、 c は光速である。この運動方程式と、マックスウェルの方程式から、Appleton-Hartree の式

$$n^2 = 1 - \frac{2X}{2(1-jZ) - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{1-X-jZ} \pm \sqrt{\frac{Y^2 \sin^2 \theta}{(1-X-jZ)^2} + 4Y^2 \cos^2 \theta}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

が導かれる。 θ は磁束 B と、電波の進行方向を示す波ベクトル k のなす角であり、 $X = \omega_p^2 / \omega^2$, $Y = \Omega_e / \omega$, $Z = \nu / \omega$, で $\omega_p = \sqrt{N_e^2 / \epsilon_0 m}$ はプラズマ角周波数、 $\Omega_e = eM/m$ はサイクロトロン (ラーマ-) 角周波数、 $\omega = 2\pi f$ は観測角周波数、 N は電子密度、 $j = \sqrt{-1}$ である。観測周波数がプラズマ周波数、サイクロトロン周波数、および、電子の散乱頻度に比べて十分大きい ($X \ll 1$, $Y \ll 1$, $Z \ll 1$) として、式(2)を近似すると、

$$n \approx \sqrt{1 - \frac{X}{1-jZ \mp Y \cos \theta}} \approx 1 - \frac{1}{2} X (1 + jZ \mp Y \cos \theta) \quad \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。正負の符号はそれぞれ右旋偏波、左遷偏波に対応している (電波天文の右旋、左遷の定義と逆であることに注意)。式(3)を見てわかるように、屈折率は周波数に依存して変化し、このようは媒質を分散性媒質と呼ぶ。分散性媒質中の信号の速度 (群速度) v_g は、位相速度 v_p と異なり、 X , Y , Z の 3 次以上の項を無視してそれぞれ

$$v_p = \omega / k = c / n \approx c \left\{ 1 + \frac{X}{2} (1 + jZ \mp Y \cos \theta) \right\} \quad \dots \dots \dots (4-a)$$

$$v_g = d\omega / dk = \frac{c}{n + \omega dn / d\omega} \approx c \left\{ 1 - \frac{X}{2} (1 + X + jZ \mp 2Y \cos \theta) \right\} \quad \dots \dots \dots (4-b)$$

であり、伝播路 l を通る時の、真空中の伝播と比較した遅延時間は X^2 の項を無視して、

$$\Delta \tau_p = -\frac{C_X}{\omega^2} \left\{ (1 + jZ) \int n dl \mp \frac{C_Y}{\omega} \int n B \cos \theta dl \right\} \quad \dots \dots \dots (5-a)$$

$$\Delta \tau_g = \frac{C_X}{\omega^2} \left\{ (1 + jZ) \int n dl \mp \frac{2C_Y}{\omega} \int n B \cos \theta dl \right\} \quad \dots \dots \dots (5-b)$$

と表される。但し、 $C_x = e^2/2m\varepsilon_0c$, $C_y = e/m$ である。電子の衝突頻度は電子密度が最大となる 200-400km の高度で最大 10^3 sec^{-1} 程度なので、観測周波数 1.4-2GHz では、 $Z \leq 10^{-7}$ であり、また地磁気によるサイクロotron 周波数は 1MHz 程度なので、 $Y \leq 10^{-4}$ であり、 Y の項もここでは無視する。TEC 量を 0.01% (0.01TECU) の精度で測定する場合には、地磁気の影響も考慮が必要かもしれない。

その様な高精度を求める際には、電離層での屈折による伝播路の湾曲の効果も考慮する必要があるだろう。Ray tracing による数値シミュレーションの結果では、低仰角で電離層状態が極端な場合には 1.5GHz 帯で数 cm 程度の遅延をもたらす可能性があるといわれている⁽⁷⁾。

3. CODE のグローバル電離層モデル

スイスのベルン大学には国際 GPS 事業 (International GPS Service: IGS) の解析センターの一つである Center for Orbit Determination in Europe (CODE) が設置され、IGS ネットワークの GPS 観測データを使って、定的に GPS 衛星の精密暦を計算して GPS ユーザに提供している。また、同時に同じ IGS の観測データを使って全地球的な電離層電子分布データ (Global Ionosphere Map: GIM) を推定し、そのデータをインターネットで公開している⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。CODE の電離層マップの推定方法の概要は、次のようなものである。

衛星 k と受信機 i の間の幾何学的距離を ρ_i^k をとし、GSP のキャリア位相を観測量とすると、衛星と地上との擬似距離は次のように表される。

$$L_{i,1}^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{i,trop}^k - I_i^k + \lambda_1 B_{i,1}^k + \epsilon_1 \quad \dots(6-a)$$

$$L_{i,2}^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{i,trop}^k - \xi_1 I_i^k + \lambda_2 B_{i,2}^k + \epsilon_2 \quad \dots(6-b)$$

ここで、 λ : 擬似距離を測る周波数の波長。 B_i^k : 初期位相を含む位相の不定性であるが、 λB_i^k は $\lambda(N_i^k + \delta N_i^k) + c(b^k - b_i)$ として整数値バイアス (N_i^k) のほかに、位相ジャンプ (δN_i^k)、受信機 (b_i)、衛星 (b^k) のハードウェアのバイアスを含むため、 B_i^k は一般に整数ではなく実数である。 I_i^k : 電離層による遅延量を L1 の位相で測った距離。 $\Delta\rho_{i,trop}^k$: 大気による遅延量。 Δt_i : 受信機 i のクロックオフセット。 Δt^k : 衛星 k のクロックオフセット。 ϵ : ランダム誤差。 $\xi_1 = \nu_1^2/\nu_2^2$ 、但し ν_1 , ν_2 はそれぞれ L1, L2 の観測周波数である。

以後簡単のためランダム誤差を省略して書くことにする。式(6)を使って L1, L2 間のキャリア位相の差 (Zero Difference) をとると、クロックオフセットと幾何学的関係に依存しない関係式 (Geometry-Free Linear Combination) が得られる。

$$L_3 = L_{i,1}^k - L_{i,2}^k = \xi_2 I_i^k + B_{i,3}^k \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - \nu_1^2/\nu_2^2$ であり、 $B_{i,3}^k = \lambda_1 B_{i,1}^k - \lambda_2 B_{i,2}^k$ である。さらに L_3 の衛星間、受信機間の二重位相差をとり、電離層遅延量を天頂方向の TEC 量 (VTEC) とマッピング関数 $F(el)$ を使って $I = \xi_3 F(el) VTEC$ と表すと、

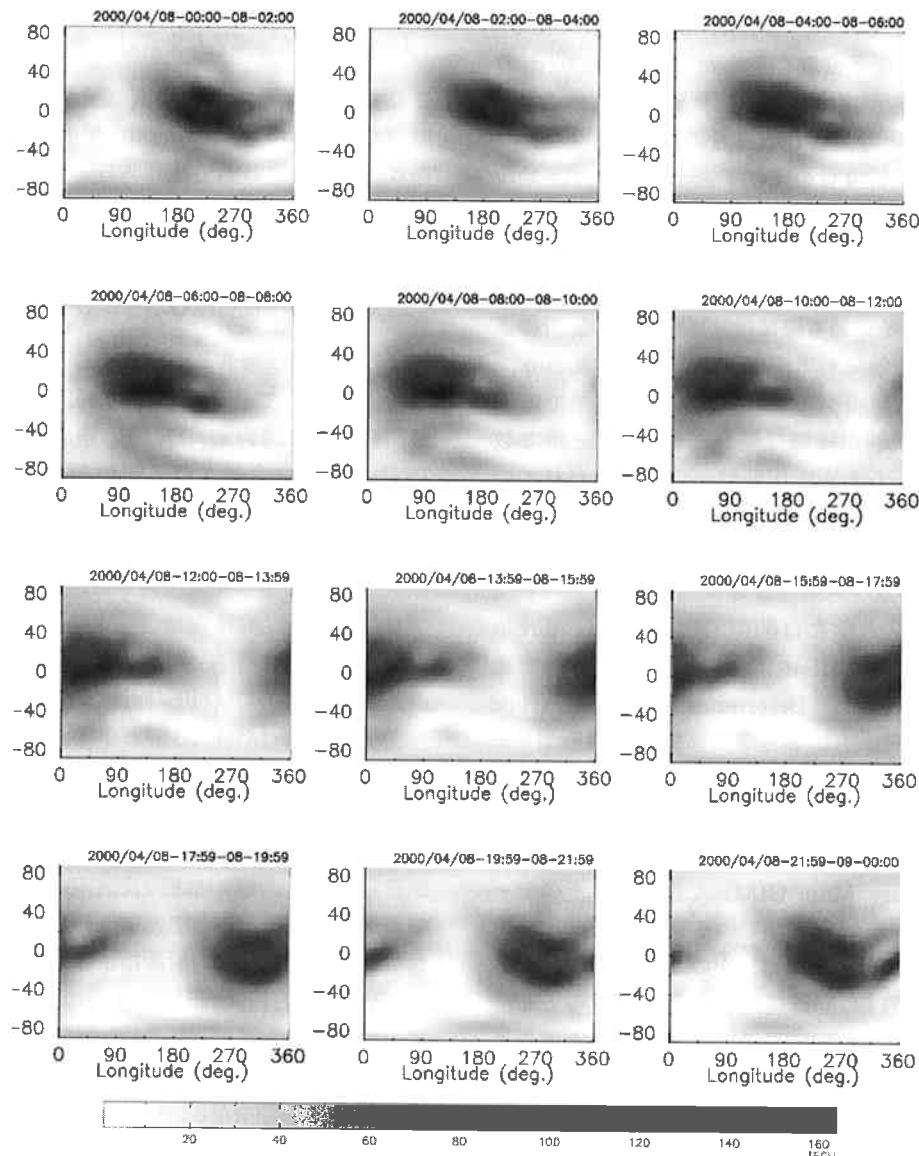
$$\begin{aligned} L_{i,j,3}^{kl} &= (L_{i,3}^k - L_{j,3}^k) - (L_{i,3}^l - L_{j,3}^l) \\ &= \xi_2 \xi_3 (F(el) VTEC)_{ij}^{kl} + B_{i,j,3}^{kl} \dots\dots(8) \end{aligned}$$

となる。ここで $\xi_3 = C_x c = 0.1623$ (m/TECU) の定数、 $F(el)$ は仰角 el の視線方向の TEC と鉛直方向の TEC との比で定義される電離層のマッピング関数、 $B_{i,j,3}^{kl} = \lambda_1 N_{i,j,1}^{kl} - \lambda_2 N_{i,j,2}^{kl}$ である。マッピング関数は電離層高度 $H = 450\text{km}$ (一定) を仮定した単層球殻状のマッピング関数

$$F(El, H) = \frac{1}{\cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{R}{R+H} \cos(El) \right] \right\}} \quad \dots\dots(9)$$

を使っている。二重位相差をとるため、受信機や衛星のハードウェアに起因するバイアスがキャンセルされ位相の不定性が整数になる。更に整数値バイアス $N_{i,j,1}^{kl}$, $N_{i,j,2}^{kl}$ が確定すると、 $B_{i,j,3}^{kl}$ は既知となる。CODE では、世界中の 140 以上の IGS 観測点の GPS データを使って、二重位相差を使った測地解析により位相の不定性を解き、式(8)を観測方程式として、12 次 8 オーダー (149 パラメータ) の球面調和関数で電離層をモデル化し、最小二乗法により電離層のグローバルなマップを推定している⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。

電離層観測に用いられる TECMETER など、P コードの遅延を観測量とする場合は、ハードウェアのコードバイアス⁽³⁾⁽¹¹⁾が問題となるが、CODE の解析では位相遅延を観測量とし、さらに二重位相差を使って解析しているため、同様の問題を生じないという利点がある。CODE は、1995 年から途切れなく、毎日の電離層のマップのデータを IONEX フォーマット⁽⁹⁾、または Bernese ION File フォーマットで公開しており、IONEX ファイルの読みだしサブルーチンや、球面調和関数のサブルーチンも合わせてインターネットで提供されている (<http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html>)。CODE の電離層マップの例として Bernese ION File から生成した 2000 年 4 月 8 日の電離層マップ (GIM) の例を第 1 図に示す。地理座標系で示してあるため、地磁気座標の赤道に沿って変化している電子密度の濃い部分は蛇行しながら推移しているのがわかる。



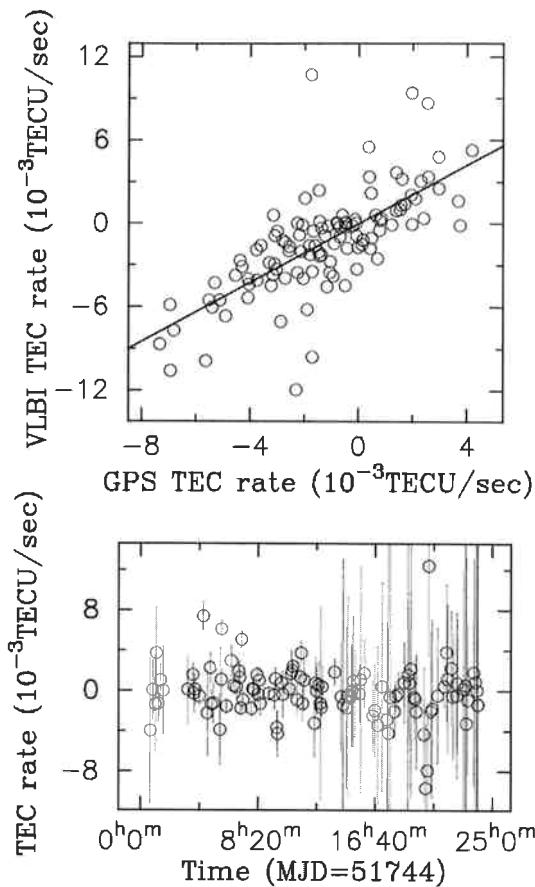
第1図 CODE が推定した 2000 年 4 月 8 日 (UT) の 2 時間毎の世界の電離層電子密度分布。左上から右に 2 時間毎の電離層マップを示している。横軸は地理的経度、縦軸は 地理的緯度である。

4. CODE の GIM と VLBI の位相遅延変化率の比較

GIM/CODE のデータを使って電離層遅延量を比較した結果については、別途検討しているので⁽⁵⁾、ここでは、電離層による位相遅延変化率を GIM/CODE のデータから計算した場合の精度について検討する。GPS から求めた電離層マップから視線方向の TEC の変化率を求めるには、視線方向の仰角変化、電離層の時間変動を考慮して計算する必要がある。ここでは、目的とする時間エポックの前後 20 分で 10 分おきに 5 点とり、仰角とそのときの視線方向の TEC 量を 5 点計算して、数値微分により視線方向の TEC 変化率を求めた。式(5)が示すように、電離層の位相遅延変化率は群遅延の変化率と逆

符号であることに注意する。

こうして GIM/CODE から計算した電離層の位相遅延変化率を、首都圏広域地殻変動観測プロジェクト (KSP)⁽¹²⁾ の 100km 基線の VLBI データおよび、国際 VLBI 事業 (IVS) の大陸間基線の測地 VLBI 観測データ⁽¹³⁾から抽出した VLBI の電離位相層遅延変化率観測値と比較した。第 2 図に例として 2000 年 7 月 18 日の Algonquin-Wettzell 基線における位相遅延変化率の比較データを示す。全ての比較の結果は冗長なので個々には示さないが、短基線のデータでは両者にほとんど相関が見られず、大陸間基線でようやく 0.6—0.8 程度の相関が確認された。VLBI の位相遅延変化率の誤差が 5×10^{-4} TECU/sec あるのに対し、GIM/CODE のデータ



第2図 VLBI でから得られた電離層の位相遅延変化率と GIM/CODE のデータから計算した位相遅延変化率の比較。2000年7月18日のAlgonquin-Wettzell基線の VLBI 観測データは IVS のデータアーカイブより取得した。相関係数 0.7, 2つのデータの差の RMS は 2.6×10^{-3} TECU/sec であった。

から計算した位相遅延変化率との比較結果は、平均的に相関係数約 0.6, RMS 残差 3×10^{-3} TECU/s であった。長基線のデータで相関は確認されたものの、補正に使用できるような精度でないことは明らかである。このように、位相遅延変化率があまり VLBI と GPS の結果が一致していない原因としては、(i)位相遅延変化率は GIM/CODE のマップから計算した TEC の数値微分値から求めているが、GIM/CODE のマップが 2 時間毎のデータであるため、短い時間周期の TEC の時間変動が含まれていないこと、(ii)GIM/CODE の電離層マップは 12 次 8 オーダーの球面調和関数を使用しているため、経度方向約 2500km、緯度方向約 1700km 程度以上の空間スケールの成分しか含まれていないこと、が挙げられる。位相遅延変化率を求める微分演算は、信号処理的には低周波を抑圧し高周波成分を強調するハイパスフィルターであり、高周波成分（短周期の変動）の含まれていない GIM/CODE データが、実際のデータと一致しな

いことが定性的に説明できる。斎藤らは、国土地理院の GPS 観測網 (GEONET)⁽¹⁴⁾ のデータを使って日本上空に空間周波数の高い電子密度波を観測している⁽¹⁵⁾。このような 時間及び空間周波数の高い電離層 TEC の変動成分を含んだ 電離層マップを作らなければ、VLBI の位相遅延変化率の補正や、惑星探査機のレンジレートの補正には使用できないと思われる。逆に GEONET のデータを使えば日本上空のローカルな電離層に関して上記の宇宙計測技術の補正に有効な電離層モデルが構築できる可能性がある。

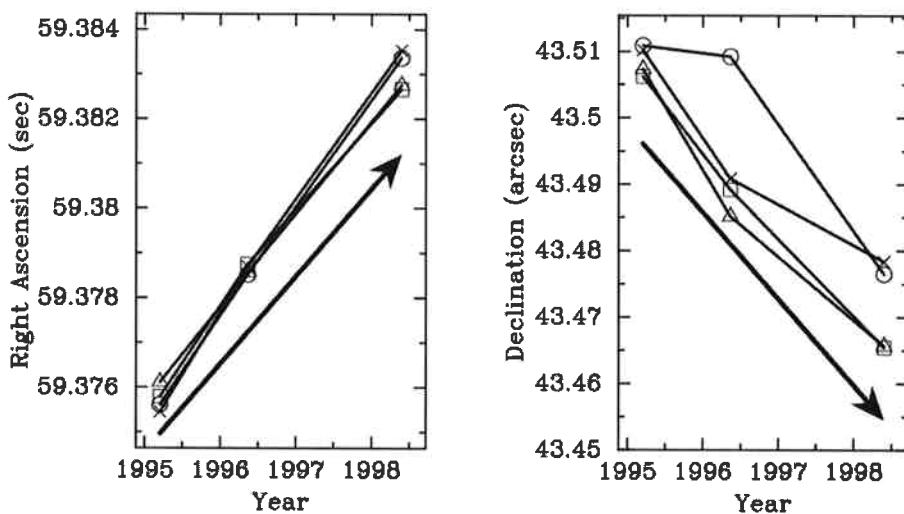
5. 電離層遅延補正のパルサー VLBI 観測データへの適用

郵政省通信総合研究所とロシアのレベデフ物理学研究所は、1995 年よりパルサーの VLBI による観測研究を開始し、1995 年 3 月、1996 年 5 月は 1.4GHz を使って、1998 年 5 月は 2.2GHz を使ってパルサー PSR0329+54 の位置天文 VLBI 観測を行った。パルサーは周波数の 2-3 乗に反比例して急速に放射強度が小さくなる特性を持つため、測地 VLBI 観測のように 2GHz/8GHz 同時観測による電離層の測定ができない。電離層遅延量は周波数の 2 乗に反比例して大きくなるため、1.4GHz, 2GHz の単周波 VLBI 観測では、電離層遅延量が最も大きな誤差要因となる。そこで、GIM/CODE のデータを使って VLBI 観測の電離層遅延量を測定し、VLBI 観測の電離層補正を試みた。GIM/CODE のデータを使うと観測に影響する TEC の 3-10% の誤差精度で VLBI 観測の電離層遅延量を推定できることがわかっており⁽³⁾、90 % 以上の電離層の影響を除去できると期待できる。GIM/CODE による位相遅延変化率の補正があり有効でないことは上で述べたが、補正を行うことは若干誤差を付加する程度で大きな悪影響を与えるものではないと考え、ここでは群遅延、位相遅延変化率両方の観測量について補正を行った。

パルサーの位置の推定には、VLBI の測地・位置天文解析ソフトウェアである CALC8.2/SOLVE5.25 を使い、位置のよくわかっている天体を、クロックなどの VLBI パラメータの校正に用いた。観測量として群遅延量のみを使った場合、群遅延量と位相遅延変化率を使った場合、電離層の補正を行った場合、行わなかった場合、それぞれの場合について推定の結果得られたパルサーの位置を第 1 表に示す。また、このデータを赤経、赤緯それぞれについてプロットした結果を第 3 図に示す。同図に、Harrison et al.⁽¹⁶⁾ がイギリスの MARLIN の干渉計で求めた PSR0329+54 の固有運動も矢印で示している。赤経・赤緯のデータとも電離層補正を行うと、Harrison et al.⁽¹⁶⁾ の固有運動測定結果とよく一致し、観測量に群遅延のみを使った場合、および群遅延と位相

第1表 パルサー PSR0329+54 の ICRF 上の推定位置、GIM/CODE のデータを使った電離層補正を行った場合と行わなかった場合、それぞれについて群遅延 (D) のみを観測量とした場合、群遅延と位相遅延変化率 (D&R) を観測量とした場合で PSR0329+54 の位置を最小二乗法推定した。観測エポックは 1995 年 3 月 14 日、1996 年 5 月 12 日、1998 年 5 月 25 日である。

Epoch	ION Corr.	観測量	赤経	σ_α (sec.)	赤緯	σ_δ (arc sec)
1995.20	×	D	59.376	0.0009	43.511	0.008
	×	D&R	59.375	0.003	43.510	0.02
	○	D	59.376	0.0008	43.506	0.006
	○	D&R	59.376	0.0009	43.507	0.006
1996.36	×	D	59.379	0.002	43.509	0.01
	×	D&R	59.379	0.002	43.491	0.01
	○	D	59.379	0.001	43.489	0.008
	○	D&R	59.379	0.001	43.485	0.008
1998.40	×	D	59.383	0.0005	43.477	0.004
	×	D&R	59.384	0.0006	43.478	0.004
	○	D	59.383	0.0008	43.465	0.006
	○	D&R	59.383	0.0008	43.465	0.005



第3図 PSR0329+54 の ICRF 座標系上の位置と固有運動、日本一ロシア基線の VLBI 観測で 1995.20, 1996.36, 1998.40 のエポックにおいて観測したデータを、電離層補正を行わず群遅延のみを観測量とした解析 (○), 電離層補正を行わず群遅延と位相遅延変化率を観測量とした解析 (×), GIM/CODE を使った電離層補正を行って群遅延のみを観測量とした解析 (□), GIM/CODE を使った電離層補正を行って群遅延と位相遅延変化率を観測量とした解析 (△), それぞれの結果を示している。矢印は Harrison et al. の固有運動測定結果を比較のため示している。電離層遅延の補正を行った方が安定した結果が得られ、Harrison et al. の結果との整合性も良い。

遅延変化率の両方を使った場合の解析が、安定して同じ結果を与えるようになった。電離層遅延は位相遅延と群遅延の符号が逆になるため、電離層の遅延補正を行わない場合には、群遅延と位相遅延変化率の観測量に矛盾があるので対し、電離層補正を行うとその矛盾が解消されて安定した解を与えることを示している。観測を行った 3 つのエポックの観測結果から推定した固有運動の大きさを第2表にまとめた。

6. 結論

6.1 GPS による電離層マップと VLBI 観測との比較について

ベルン大学の CODE が、世界の IGS の GPS 観測網のデータを使って推定したグローバルな電離層マップ (GIM/CODE) のデータから数値微分により位相遅延変化率を計算した。これを VLBI 測定結果と比較した結果、大陸間基線で 0.6—0.8 度程度の相関係数を示すも

第2表 パルサーPSR0329+54の固有運動と1996.0年エポックにおけるICRF上の座標を3つのエポックから最小二乗法推定した結果。座標値の赤経は 3^h32^m の秒の桁を、赤緯は $54^\circ34'$ の秒角の桁を表示している。観測量として群遅延のみを使った場合(D), 群遅延と位相遅延変化率を使った場合(D&R)それぞれについて、GIM/CODEのデータを使って電離層補正を行った場合と補正を行わなかった場合の結果である。比較のため、最下段にHarrison et al.が測定したPSR0329+54の固有運動値を載せた。

Ion Corr.	観測量	$\mu_\alpha(\text{mas/yr})$	$\mu_\delta(\text{mas/yr})$	赤経(sec.)	赤緯(arc sec)
×	D	21.4 ± 6	-8.4 ± 4	59.378 ± 0.0016	43.498 ± 0.009
×	D&R	21.1 ± 3	-11.74 ± 2.6	59.3776 ± 0.0006	43.505 ± 0.005
○	D	18.1 ± 3	-12.7 ± 2.4	59.3777 ± 0.0006	43.495 ± 0.004
○	D&R	18.6 ± 3	-12.6 ± 2.5	59.3776 ± 0.0006	43.595 ± 0.004
Harrison et al		17 ± 1	-13 ± 1	—	—

の、VLBI観測データの補正には不充分であることがわかった。GIM/CODEのデータは時間分解能2時間、空間分解能が経度方向約2500km、緯度方向約1700kmでモデル化しており、位相変化率の計算に寄与が大きい時間的・空間的な短周期成分が含まれていないことが、位相遅延変化率の精度が得られなかつた主な原因と考えられる。GIM/CODEは観測網の制約上、位相遅延変化率の補正には不充分であったが、日本全土に1000点近くのGPS観測点を持つGEONETのデータを使えば、日本上空のローカルな電子分布に関しては極めて、時間的・空間的精度の高いTECMAPが推定できると期待される。これが実用化されれば、日本国内基線の天文を含めたVLBI観測データの補正や、国内の深宇宙探査機追跡局のレンジおよびレンジレートの補正等に有効な手段となる可能性がある。

6.2 GIM/CODEのデータを使ったパルサーVLBI観測データの補正について

GIM/CODEの電離層マップは、電離層の群遅延量の補正に関しては有効であることが知られている⁽³⁾。GIM/CODEのデータを使って、1995年3月、1996年5月、1998年5月に鹿島34mアンテナとロシアの64mアンテナとの間(7000km基線)で行ったパルサーの位置天文VLBI観測データの電離層遅延量を補正し、電離層遅延補正を行わなかつた場合との比較を行つた。その結果、GIM/CODEのデータで補正を行つたほうが、群遅延と位相遅延変化率の観測量の矛盾が解消され安定した解が得られることがわかつた。また補正を行つたほうが過去のパルサーの固有運動データとも整合性のある結果が得られた。以上のように、GPSを使った電離層マップ(GIM/CODE)を使った電離層遅延量の推定が、単周波VLBI観測の補正に有効であることを実証することができた。

謝辞

小金井のTECMETER観測データを提供頂いた通信

総合研究所宇宙科学部の五十嵐善良氏、皆越尚紀氏、衛星コードバイアスのデータを提供頂いたドイツDLRのStefan Schlueter氏、グローバルな電離層の推定データを提供して頂いたイスペルン大学のStefan Schaer氏に感謝する。また、本研究を支援して頂いた、第6研究チームの皆さん、宇宙電波応用研究室の皆さんに感謝する。大陸間基線のVLBIデータはIVSのアーカイブデータを使用した。GPSを使った電離層遅延量の補正に関する研究はCRL奨励基礎の支援を受けて行われた。日本-ロシア基線のパルサーVLBI観測データは、CRLとロシアレベデフ物理学研究所との共同研究に基づいて取得されたものであり、ロシアレベデフ物理学研究所のY. P. Ilyasov氏、V. V. Oreshko氏、A. E. Rodin氏、およびMoscow Power Engineering InstituteのB. A. Poperechenko氏に感謝する。

参考文献

- (1) 柴崎徳明，“中性子星とパルサー”，培風館，1993。
- (2) Sekido M., Imae M., Hanado Y., Ilyasov Y. P., Oreshko V. V., Rodin A. E., Hama S., Nakajima J., Kawai E., Koyama Y., Kondo T., Kurihara N., and Hosokawa M., “Astrometric VLBI Observation of PSR0329+54”, PASJ, 51, pp.595-601, 1999.
- (3) 関戸衛、近藤哲郎、川合栄治、今江理人，“GPSによる電離層遅延の精度評価”，電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会技術研究報告、信学技報, SANE2000-142, pp.61-68, 2001.
- (4) Heki K., Matsumoto K., and Folberghagen R., “Three-dimensional tracking of a lunar satellite with differential very-long-baseline-interferometry”, Advances in Space Research Vol.23, 11 pp.1821-1824, 1999.
- (5) “International Reference Ionosphere-Past, Present, Future”, Adv. Space Res.13 No.3 pp.3-23,

- 1993.
- (6) 前田憲一, 木村磐根, “現代電磁波動論”, オーム社, 1984.
- (7) Brunner, F. K., and Gu M., “An Improved Model for Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS observations”, *Manuscripta Geodetica*, 16, 205-214, 1991.
- (8) Schaer S., Beutler G., and Rothacher M., “MAPPING AND PREDICTING THE IONOSPHERE”, Proc. IGS Analysis Center Workshop 1998, ESA/ESOC Darmstadt in Germany, Frbruary 9-11 1998, pp.307-318, 1998.
- (9) Schaer S., “Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System”, Ph. D. thesis at Bern University, 1999.
- (10) Schaer S., Gurtner W., and Feltens J. “IONEX: The ionosphere Map EXchange Format Version 1”, Proc. of IGS Analysis Center Workshop, ESA/ESOC Darmstadt in Germany, Frbruary 9-11 1998, pp.233-247, 1998.
- (11) Sardón E., Ruis A., and Zarraoa N., “Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations”, *Radio Sci.* 29, pp.577-586, 1994.
- (12) Yoshino T., “Overview of the Key Stone Project”, *Journal of the Communications Research Laboratory*, 46, pp.3-6, 1999.
- (13) IVS Archive data,
<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/service/products.html>, 2000.
- (14) Miyazaki S., Saito T., Sasaki M., Tanaka Y., and Masaharu H., “Expansion of GSI's nationwide GPS array”, *Bull. Geogr. Surv. Inst.* 43, pp.23-34, 1997.
- (15) Saito A., and Fukao S., “High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan”, *Geophys. Res. Lett.*, 25, pp.3079-3082, 1998.
- (16) Harrison P. A., Lyne A. G., and Anderson B., “New determination of the proper motion of 44 pulsars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 261, pp.113-124, 1993.