GPS 測位に用いる局所的な電離圏遅延量補正モデルの改良手法*

西本 圭佑[†]・大橋 正治[†]・久保 幸弘[†]・杉本 末雄[†]

Refining the Ionospheric Model for GPS Positioning in Regional Area*

Keisuke NISHIMOTO[†], Masaharu OHASHI[†], Yukihiro KUBO[†] and Sueo SUGIMOTO[†]

In general GPS positioning, ranging errors due to the ionosphere are corrected by so-called Klobuchar's ionospheric model. However, it is well known that the model may correct about only 50[%] RMS ionospheric errors. On the other hand, it is reported that SCHA (Spherical Cap Harmonics Analysis) ionosphere model well works in a regional area such as the sky over Japan. In this paper, therefore, we propose a method to provide more accurate parameters of the regional Klobuchar model based on SCHA ionosphere model.

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) 測位の原理は、電波伝播時間の測定に基づいて得られる衛星・受信機間の距離を観測量として、受信機の座標を推定するものである。実際の測位においては、電離圏（層）遅延、対流圏遅延、マルチパス、衛星軌道誤差等々の影響を受け測位誤差が生じるが、とくに電離圏遅延は GPS 測位における支配的な誤差要因の一つとなっている [1-4]。電離圏遅延は、地球を取り巻く電離圏の影響によって電波の伝播速度が遅くなり、衛星・受信機間の距離を実際よりも長く測定してしまうものである。電離圏遅延に起因する測位誤差は、単独測位とよばれる一般的な測位法において数 [m]~10[m] 程度である [2]。したがって、高精度な測位のためには、電離圏遅延を精度よく補正することが必要であり、現在までにさまざまな方法が考えられている。

電離圏遅延量を補正する最も簡単でかつ効果的な方法は、電離圏遅延量が搬送波周波数の 2 乗に反比例するという性質を利用するものである [4]。GPS 衛星からは、 $L1$ 帯 (1575.42 [MHz])、 $L2$ 帯 (1227.60 [MHz]) の二つの周波数帯で信号が送信されているので、2 周波の受信を行えば、観測量に適切な係数を乗算して線形結合をと

ることにより、ほぼ完全に電離圏遅延量を除去することが可能である [4,5]。この方法は、測量や地球物理学への応用など、とくに測位精度が要求されるアプリケーションで利用されることが多い。

一方、2 周波受信機は高価であるため、カーナビゲーション、携帯電話、ハンディ GPS 受信機などの民生向け用途においては、ほとんどの場合 1 周波 ($L1$ 帯) の受信機が利用される。1 周波受信機では、受信機単体で電離圏遅延量を補正することが難しいため、電離圏遅延量に関する情報を外部から与える必要がある。GPS では、Klobuchar モデル（放送モデル）とよばれる電離圏遅延量補正モデルのパラメータを $L1$ 帯の信号に重畳して送信しており、1 周波受信機のユーザは、Klobuchar モデルパラメータを用いて電離圏遅延の補正が可能である [5]。しかし、Klobuchar モデルは、Bent モデル [6] とよばれる大規模な経験的モデルを受信機側の計算負荷、衛星から放送できるデータ量などを考慮して大幅に近似したものであり、その補正精度は平均的に 50 [%] 程度にとどまることが報告されている [7]。

そのため、Klobuchar モデルよりも高精度な補正を行う方式として、DGPS (Differential GPS) や精密な電離圏遅延モデルなどが GPS の初期段階から考案されてきた。DGPS は、基本的には電離圏遅延量を含む測位誤差補正量を、放送電波のサブキャリア、携帯通信網、インターネット回線や衛星通信などにより配信するもので、多様な形態でサービスが行われている [1,2,8]。精密な電離圏遅延モデルとしては、世界的な GPS 観測ネッ

* 原稿受付 2013 年 7 月 1 日

[†] 立命館大学 大学院 理工学研究科 Graduate School of Engineering, Ritsumeikan University; 1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu City, Shiga 525-8577, JAPAN

Key Words: ionospheric delay, Klobuchar model, SCHA model, regional area, GNSS, GPS.

トワークを用いて生成される GIM (Global Ionosphere Map) が IGS (International GNSS Service) から提供されている [1,9]. また近年では, 地域的な GPS 観測ネットワークを活用して, 局所的に, より高精度なモデル化を行う手法が提案されている [10–13]. たとえば, 文献 [10,12] では, 日本上空の電離圏遅延モデルとして, SCHa (Spherical Cap Harmonic Analysis, 球冠調和解析) モデルが提案され, その有用性が示されている. 文献 [13] は同様の結果を中国国内の場合について示したものである.

しかしながら, DGPS や GIM, SCHa モデルなどを Klobuchar モデルの代替手段として用いる場合, 補正情報や, モデルパラメータを伝達するための通信手段が必要となる. さらに, GIM や SCHa モデルは, GPS 観測データに基づいて後処理で生成されるものであり, リアルタイムでの測位には利用できない. 一方で, Klobuchar モデルは GPS の機能の一部として提供され, ほぼすべての受信機で利用可能であるため, Klobuchar モデルを高精度化できれば, 多くのユーザがそのメリットを享受できるという利点がある. そのため, Klobuchar モデルの改良手法に関する研究が注目されつつあり, 文献 [14] では IGS の GPS 観測網を利用して, Klobuchar モデルパラメータを後処理で改良する手法が提案されている. また, 日本の QZSS (Quasi Zenith Satellite System, 準天頂衛星システム) では, 日本周辺の領域に最適化した Klobuchar モデルパラメータを放送する試みがなされている [15].

このような背景のもと, Klobuchar モデル互換, または互換に近い形で, 日本周辺などの局所的な電離圏遅延量を精度よくモデル化する技術が求められている. このような技術は, QZSS に限らず世界各国で開発されている衛星測位システムの高度化に必要なものとなる [14]. そこで本論文では, 日本上空の電離圏遅延モデルとして提案されている SCHa モデル [10,12] を用いて, Klobuchar モデルを改良する手法を提案する.

提案手法は, 国土地理院の GPS 観測ネットワーク (GEONET, Geographical Earth Observation Network) で観測された GPS データから生成された SCHa モデルを利用し, SCHa モデルにフィッティングするように Klobuchar モデルパラメータを求めることで, 改良を行うものである. 文献 [14] に示されているような, GPS 観測データそのものを用いる改良方法とは異なり, 本手法には, 既存の高精度なモデルが入手できれば実行可能であるという利点がある. また, 改良された Klobuchar モデルを用いて, リアルタイムな測位を行う手法についても, 実験を通して検討する.

以下では, 2. で GPS 観測量と測位方法, および Klobuchar モデルと SCHa モデルについて説明し, 3. で, 本論文で提案する Klobuchar モデルの改良手法を示す. 4. では, 改良された Klobuchar モデルを適用した測

位実験を行いその有用性について検証する.

2. GPS 観測量と電離圏遅延量補正モデル

2.1 GPS 観測量と測位方法

GPS 受信機で得られる観測量には, コード擬似距離および搬送波位相観測量の 2 種類がある. いずれも衛星・受信機間の距離測定値であり, 搬送波周波数ごとに得られる. 受信機を k , 衛星を p で表し, 2 周波の観測を行うとすると, コード擬似距離 $\rho_{CA,k}^p$ ($L1$ 帯), $\rho_{PY,k}^p$ ($L2$ 帯) と搬送波位相観測量 $\Phi_{L1,k}^p$ ($L1$ 帯), $\Phi_{L2,k}^p$ ($L2$ 帯) は以下のモデル式で表される [1,4,16].

$$\rho_{CA,k}^p = r_k^p + c(\delta t_k - \delta t^p) + \delta I_k^p + \delta A_k^p + \delta b_{CA,k} + \delta b_{CA}^p + e_{CA,k}^p \quad (1)$$

$$\rho_{PY,k}^p = r_k^p + c(\delta t_k - \delta t^p) + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_k^p + \delta A_k^p + \delta b_{PY,k} + \delta b_{PY}^p + e_{PY,k}^p \quad (2)$$

$$\Phi_{L1,k}^p = r_k^p + c(\delta t_k - \delta t^p) - \delta I_k^p + \delta A_k^p + \lambda_1 N_{L1,k}^p + \delta b_{L1,k} + \delta b_{L1}^p + \varepsilon_{L1,k}^p \quad (3)$$

$$\Phi_{L2,k}^p = r_k^p + c(\delta t_k - \delta t^p) - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_k^p + \delta A_k^p + \lambda_2 N_{L2,k}^p + \delta b_{L2,k} + \delta b_{L2}^p + \varepsilon_{L2,k}^p \quad (4)$$

ただし, r_k^p は受信機 k と衛星 p 間の幾何学的距離であり, 衛星 p の座標を (x^p, y^p, z^p) , 受信機 k の座標を (x_k, y_k, z_k) とすると,

$$r_k^p = \sqrt{(x^p - x_k)^2 + (y^p - y_k)^2 + (z^p - z_k)^2} \quad (5)$$

である. また, c は光速 (2.99792458×10^8 [m/s]), δt_k , δt^p は受信機 k と衛星 p の時計誤差, δI_k^p , δA_k^p は電離圏遅延量と対流圏遅延量, f_1 , f_2 と λ_1 , λ_2 はそれぞれ $L1$ 帯, $L2$ 帯搬送波の周波数と波長, $\delta b_{xx,k}$, δb_{xx}^p はそれぞれ各観測量における受信機 k と衛星 p のハードウェアバイアス, $N_{L1,k}^p$, $N_{L2,k}^p$ は各搬送波の整数値バイアス, e と ε は観測雑音を表している.

2.1.1 測位方法

一般的な 1 周波受信機では, (1) 式の観測量を複数の衛星 ($p=1,2,\dots,n_s$) から得て, 観測時刻 (エポック) ごとに最小 2 乗法で受信機座標 (x_k, y_k, z_k) と受信機時計誤差 δt_k が推定される. このような測位法は, 単独測位とよばれる [1]. なお, 通常の単独測位では, 衛星座標 (x^p, y^p, z^p) と衛星時計誤差 δt^p は衛星から放送されている航法メッセージ (放送暦) から既知であり, 電離圏遅延量 δI_k^p は Klobuchar モデルにより, 対流圏遅延量 δT_k^p は Hopfield モデルや Saastamoinen モデルとよばれるモデルにより補正される [3,17]. また, ハードウェアバイアス $\delta b_{CA,k}$, δb_{CA}^p は観測雑音に対して十分に小さいため無視される [1,2,17].

以下, 本論文で示されている測位結果は, ここに示した単独測位法の結果であり, 対流圏遅延量の補正には Saastamoinen モデルを適用した. また, 電離圏遅延以

外の誤差要因をなるべく排除し、Klobuchar モデルの改善効果を評価しやすくするため、衛星座標と衛星時計誤差については、通常の放送暦に代えて IGS が提供する精密暦を使用した。IGS の精密暦には、配信までに要する時間の違いにより Ultra-Rapid, Rapid, Final の 3 種類があり、本論文ではその中でも最も精度の高い Final を使用した。通常、放送暦の精度は RMS (Root Mean Square) で衛星座標が 1 [m], 衛星時計誤差が 5 [ns] であるのに対し、精密暦 (Final) は衛星座標が 2.5 [cm], 衛星時計誤差が 75 [ps] と高精度なものである [9,18]。

2.1.2 既存の電離圏遅延量補正モデルの比較

単独測位においては、(1) 式の電離圏遅延量 δI_k^p を補正することが必要であり、1. で述べたような各種の方法が考案されている。ここでは、Klobuchar モデルを改良するための導入として、補正を行わない場合、および既存の電離圏遅延量補正モデル

- (1) GPS の Klobuchar モデル
- (2) QZSS の Klobuchar モデル
- (3) IGS が提供する GIM
- (4) 日本上空の SCHA モデル

を適用した際の測位精度を比較する。なお、IGS が提供する GIM には Final と Rapid の 2 種類があり、本論文では Final を使用した。Final の精度は、距離に換算して約 30[cm]~130[cm] 程度である [9,18]。また、SCHA モデルは GEONET の観測データを用いて生成した日本上空のモデルであり、その生成方法については、後の 2.2.3 で詳しく述べている。

Fig. 1 に示す計 10 局の GEONET 観測局（電子基準点）において、2011 年 7 月 1 日~12 月 31 日の半年間に、30 秒間隔で取得された観測データを用いて単独測位を行った。各電子基準点の受信機およびアンテナは Trimble NETRS および TRM29659.00 であった。Table 1 に適用した電離圏遅延量補正モデルと、測位誤差（3 次元ノ

Fig. 1 GEONET stations for positionig (1: Wakkanai, 2: Ajigasawa, 3: Yamagata Shinjo, 4: Tochigi, 5: Mino, 6: Kushimoto, 7: Goutsu, 8: Shimonoseki, 9: Saikai, 10: Ishigaki)

Table 1 RMS positioning errors applied by existing ionospheric delay corrections

Ionospheric model	RMS 3D position error [m]
None	5.524
Klobuchar	4.187
QZSS	3.835
GIM	1.824
SCHA	1.799

ルム) の RMS 値を示す。電子基準点 j の、第 k 日目、時刻 t_i における 3 次元測位誤差ベクトルを $e_j(k, t_i)$ とすると、Table 1 の RMS 値は以下のように計算される。

$$\sqrt{\frac{1}{LMN} \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \{e_j^T(k, t_i) e_j(k, t_i)\}} \quad (6)$$

ただし、 $N=2880$ は 1 日分のデータ数、 $M=10$ は電子基準点の数、 $L=184$ は 7 月 1 日~12 月 31 日の日数であり、データ欠損等により測位ができなかった時刻は除外して計算している。なお測位誤差は、測位を実施した日の電子基準点の座標（国土地理院が提供する日々の座標値、F3 解）[19] を基準として計算した。

Table 1 から、電離圏遅延量の補正を行うことで測位精度は向上し、GIM, SCHA モデルを用いた後処理型の測位では、大きく精度向上していることがわかる。またこの比較結果から、日本国内の測位には日本上空の SCHA モデルを用いた場合に最も測位精度が高くなっていることが確認できる。そこで本論文では、Klobuchar モデルを改良する際の基準となるモデルとして、SCHA モデルを採用する。

2.2 電離圏遅延量補正モデル

本節では、本論文で取り扱う Klobuchar モデルと SCHA モデル、および SCHA モデルを生成する際に必要となる電離圏遅延量の観測モデルについて説明する。

2.2.1 電離圏遅延量の観測モデル

(1) 式と (2) 式、および (3) 式と (4) 式の差をとると

$$\rho_{PY,k}^p - \rho_{CA,k}^p = \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right) \delta I_k^p + \delta b_k^p + e_k^p \quad (7)$$

$$\Phi_{L2,k}^p - \Phi_{L1,k}^p = - \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right) \delta I_k^p + \delta \beta_k^p + \varepsilon_k^p \quad (8)$$

が得られる。ただし

$$\begin{aligned} \delta b_k^p &\equiv (\delta b_{PY,k} - \delta b_{CA,k}) + (\delta b_{PY}^p - \delta b_{CA}^p) \\ e_k^p &= e_{PY,k}^p - e_{CA,k}^p \\ \delta \beta_k^p &= (\delta b_{L2,k} - \delta b_{L1,k}) + (\delta b_{L2}^p - \delta b_{L1}^p) \\ &\quad + (\lambda_2 N_{L2,k}^p - \lambda_1 N_{L1,k}^p) \\ \varepsilon_k^p &\equiv \varepsilon_{L2,k}^p - \varepsilon_{L1,k}^p \end{aligned}$$

Fig. 2 Single-layer ionospheric model

である。(7)式と(8)式は幾何学フリー線形結合とよばれ、電離圏遅延量を観測する際によく用いられる[2,3]。

一方、電離圏遅延量 δI_k^p は、GPS 信号の伝播経路にある総電子数の関数として表現される。そこで、モデル化を簡単にするため、電離圏遅延の原因となるすべての電子は Fig. 2 に示すような、高度 H_I にある薄膜球殻に集中していると仮定した、Single-layer 電離圏モデルが通常用いられる[1,3]。Fig. 2 において、 ϕ_{IP} と λ_{IP} は受信機 k から衛星 p を見た際の電離圏貫通点 (Ionospheric Pierce Point) の緯度と経度であり、 $\tilde{z}$ は電離圏貫通点から衛星 p を見たときの天頂角である。ここで、電離圏貫通点における垂直総電子数 VTEC (Vertical Total Electron Content) を VTEC (ϕ_{IP}, λ_{IP}) とすると、電離圏遅延量 δI_k^p は以下のように表現される。

$$\delta I_k^p = \frac{40.3 \times 10^{16}}{f_1^2} \frac{1}{\cos \tilde{z}} \text{VTEC}(\phi_{IP}, \lambda_{IP}) \quad [\text{m}] \quad (9)$$

ただし、VTEC の単位は TECU (1[TECU] は 10^{16} electron/ m^2) であり、数値例として、電離圏貫通点における垂直方向 ($\tilde{z}=0$) の遅延量は、1[TECU] あたり 16[cm] となる。受信機の座標が既知であれば、 $\tilde{z}$, ϕ_{IP} , λ_{IP} は計算可能である。したがって、電離圏モデルの構築は、(7)式と(8)式の観測を多数の地点、衛星、時刻について得て、VTEC を電離圏貫通点の座標の関数として表現する問題となっている。

2.2.2 Klobuchar モデル

Klobuchar モデルは、Fig. 2 の Single-layer 電離圏モデルにおいて、電離圏の高度を $H_I = 350$ [km] とし、夜間の電離圏遅延量を一定値、昼間の電離圏遅延量を 14 時 (地方時) を中心とする余弦関数で表現したモデルである[1,7]。Klobuchar モデルでは、この余弦関数の振幅 A と周期 T が電離圏貫通点の地磁気緯度 ϕ_m の 3 次関数で表現され、

$$A = \alpha_0 + \alpha_1 \phi_m + \alpha_2 \phi_m^2 + \alpha_3 \phi_m^3 \quad (10)$$

$$T = \beta_0 + \beta_1 \phi_m + \beta_2 \phi_m^2 + \beta_3 \phi_m^3 \quad (11)$$

である。GPS 衛星からは、これら八つのパラメータ $\alpha_n, \beta_n (n=0, \dots, 3)$ が送信されており、少なくとも 6 日

に 1 回の割合で更新される。受信機側では、以下に示すアルゴリズムで電離圏遅延量が計算される[1,5,7]。ただし、本アルゴリズムで必要となる、受信機の緯度 ϕ_k 、経度 λ_k 、受信機 k から見た衛星の仰角 θ_e 、方位角 θ_a および GPS 時刻 t_g は、電離圏遅延を補正しない単独測位によって十分な精度で求められる。また、とくに指定しない限りは、角度の単位は SC (semicircles) (1 [SC] = π [rad]) である[1,7]。

- (1) 地球中心角 Ψ を求める。

$$\Psi = \frac{0.0137}{\theta_e + 0.11} - 0.022 \quad (12)$$

- (2) 電離圏貫通点の緯度 ϕ_{IP} を求める。

$$\phi_{IP} = \phi_k + \Psi \cos \theta_a \quad (13)$$

ただし、 $\phi_{IP} > 0.416$ のとき $\phi_{IP} = 0.416$, $\phi_{IP} < -0.416$ のとき $\phi_{IP} = -0.416$ とする。

- (3) 電離圏貫通点の経度 λ_{IP} を求める。

$$\lambda_{IP} = \lambda_k + \frac{\Psi \sin \theta_a}{\cos \phi_{IP}} \quad (14)$$

- (4) 電離圏貫通点の地磁気緯度 ϕ_m を求める。

$$\phi_m = \phi_{IP} + 0.064 \cos(\lambda_{IP} - 1.617) \quad (15)$$

- (5) 地方時 t を求める。

$$t = 4.32 \times 10^4 \lambda_{IP} + t_g \quad (16)$$

ただし、 $t > 86400$ のとき $t \leftarrow t - 86400$, $t < 0$ のとき $t \leftarrow t + 86400$ とする。

- (6) 振幅 A と周期 T を求める。

$$A = \sum_{n=0}^q \alpha_n \phi_m^n, \quad T = \sum_{n=0}^q \beta_n \phi_m^n \quad (17)$$

ただし、 $q=3$ であり、 $A < 0$ のとき $A = 0$, $T < 72000$ のとき $T = 72000$ とする。

- (7) 電離圏遅延量 δT_K を求める。

$$\delta T_K = D + A \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \quad [\text{s}] \quad (18)$$

ただし、

$$D = 5 \times 10^{-9} [\text{s}], \quad x = \frac{2\pi(t - C_T)}{T} [\text{rad}] \quad (19)$$

$$C_T = 50400 [\text{s}] \quad (20)$$

であり、 $|x| > 1.57$ のとき $\delta T_K = D$ とする。

なお、 δT_K は電離圏貫通点での垂直方向への遅延量を時間 (秒) を単位として表したものであり、 δI_k^p の補正量 $\delta \hat{I}_k^p$ は

$$\delta \hat{I}_k^p = \frac{c}{\cos \tilde{z}} \delta T_K \quad [\text{m}] \quad (21)$$

で求められる。

Fig. 3 Sketch of typical ionospheric time delay based on Klobuchar model

Fig. 4 Sketch of typical amplitude A and period T of cosine function in Klobuchar model

Fig. 3 に δT_K の典型的な概形を示す. δT_K は, $t = C_T$ (地方時の 14 時) を頂点とする余弦関数で表現され, 余弦関数の半周期を超える範囲, $t < C_T - T/4$ および $t > C_T + T/4$ (すなわち $|x| > \pi/2 \simeq 1.57$) では $\delta T_K = D$ の一定値となる. また, 余弦関数の振幅 A と周期 T は, (17) 式により電離圏貫通点の地磁気緯度 ϕ_m の 3 次関数として求められる. Fig. 4 に A および T の概形を示す. この場合, たとえば T は, およそ $35^\circ \leq \phi_m \leq 70^\circ$ において (17) 式の値が $T < 72000$ となるため, (17) 式の条件より $T = 72000$ となっている.

2.2.3 SCH A モデル

SCH A モデル [10,12] は, Klobuchar モデルと同様に Fig. 2 に示した Single-layer 電離圏モデルを仮定し, (9) 式の VTEC を, 球面の一部に対して調和的となる球冠調和関数を用いてモデル化したものである.

電離圏貫通点の sun-fixed 座標系 [20] での緯度を ϕ_I , 経度を λ_I とすると, SCH A モデルの, 電離圏貫通点における垂直方向への遅延量 δT_S は以下のように表される.

$$\delta T_S = \frac{40.3 \times 10^{16}}{cf_1^2} \sum_{l=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^l \{a_{lm} \cos m \lambda_I$$

Fig. 5 GEONET stations for SCH A model generation

$$+ b_{lm} \sin m \lambda_I \} P_{n(l)}^m (\sin \phi_I) \quad [\text{s}] \quad (22)$$

ただし, $P_{n(l)}^m$ は SCH A モデルにおけるルジャンドル陪関数, a_{lm} と b_{lm} は SCH A モデルのパラメータである. n_{max} は球冠調和関数の最大次数で, m は位数とよばれる [21]. 文献 [10,12] と同様に, 本論文では北緯 35° , 東経 135° を中心とする, 緯度, 経度方向に $\pm \theta$ ($\theta = 50^\circ$) の領域を対象としており, $n(l)$ は l と θ によって定まる定数である [22]. したがって, SCH A モデルにおける電離圏遅延量 δI_k^p は以下のようにモデル化される.

$$\begin{aligned} \delta I_k^p &= \frac{c}{\cos \tilde{z}} \delta T_S \\ &= \frac{40.3 \times 10^{16}}{f_1^2} \frac{1}{\cos \tilde{z}} \sum_{l=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^l \{a_{lm} \cos m \lambda_I \\ &\quad + b_{lm} \sin m \lambda_I \} P_{n(l)}^m (\sin \phi_I) \quad [\text{m}] \quad (23) \end{aligned}$$

モデルパラメータである a_{lm} , b_{lm} は, (7), (8) 式の観測を複数の地点および時刻について得て, 未知のバイアス項 δb_k^p , $\delta \beta_k^p$ とともに最小 2 乗法により求められる. 推定にあたっては, 対象とする領域において電離圏貫通点になるべく均等に配置されるように, 観測局, 観測時間を設定する. 観測時間は, 短すぎるとデータ量が不十分で推定が困難となる場合がある. 一方, 長すぎると電離圏の状態の変化に対して SCH A モデルの時間分解能が低下する. 本論文では, 文献 [10,12,23] と同様の条件で SCH A モデルを生成することとし, $H_I = 350 [\text{km}]$, $n_{max} = 2$ と設定して, 偶数正時 (0 時, 2 時, 4 時, ...) のモデルパラメータを前後 1 時間 (計 2 時間) の観測データを用いて求める. 観測データは, Fig. 5 に示す 41 局の GEONET 観測局において 10 分間隔で取得する. ただし, 観測局の運用状況などによってデータ欠損などが生じることがあるため, 2 時間ごとのデータ取得率が 95% 以上である観測局のデータを用いることとする. この場合, 通常は 30~40 局程度の観測データが使用可能となる.

たとえば、10 時のモデルパラメータは、9 時～11 時 (10 分間隔で 13 回) のデータを用いて推定される。したがって、全 41 局で同じ組合せの 5 機の衛星が観測されたと仮定すると、(7), (8) 式の観測が合計 2665 (41 局 × 13 回 × 5 機) 組得られる。一方、未知量はモデルパラメータ 9 個 ($a_{00}, a_{10}, a_{11}, a_{20}, a_{21}, a_{22}, b_{11}, b_{12}, b_{22}$) と、バイアス項 410 個 ($\delta b_k^p, \delta \beta_k^p; k=1, \dots, 41, p=1, \dots, 5$) となり、最小 2 乗法によりこれらの未知量が推定される。

以上のように、SCHa モデルは 2 時間ごとのモデルとなる。したがって、測位の際に任意の時刻 t での電離圏遅延補正量 $\delta I_k^p(t)$ を求めるには、GIM の利用法 [9] と同様に、 $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ となる時刻 t_i, t_{i+1} (偶数正時) の補正量を用いて、

$$\delta I_k^p(t) = \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} \delta I_k^p(t_i) + \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} \delta I_k^p(t_{i+1}) \quad (24)$$

のように内挿を行う [1,9,10,12]。

3. Klobuchar モデルの改良手法

2.2.2 に示したように、Klobuchar モデルは 1 日分の電離圏遅延量を八つのパラメータで表現するモデルとなっている。そこで本論文では、1 日分の SCHa モデルを用いて、Klobuchar モデルを改良する方法を考える。そのため、以下の 3.1 で改良を行うべきパラメータについて考察した後、3.2 で改良方法について説明する。

3.1 改良を行うパラメータ

Klobuchar モデルのパラメータ $\alpha_n, \beta_n (n=0, \dots, 3)$ は、余弦関数で表現した電離圏遅延量の振幅と周期を定めるものであり、Klobuchar モデルを改良するうえで重要なパラメータである。

つぎに、パラメータ $D=5 \times 10^{-9}$ [s], $C_T=50400$ [s] について考察する。(18) 式および Fig. 3 に示したように、Klobuchar モデルにおいて、 $|x| > 1.57$ となる地方時 t の範囲 (夜間) では、電離圏遅延の大きさは $\delta T_K = D$ に固定されている。また、余弦関数の頂点 (電離圏遅延量が最も大きい時刻) は $C_T=50400$ [s] (地方時の 14 時) に固定されている。

一方、本研究において、Klobuchar モデルと、2.2.3 の方法で作成した SCHa モデルの比較を、1 年間 (2011 年 1 月 1 日～12 月 31 日) にわたって実施した。比較対象としたのは、Fig. 1 に示した電子基準点 (10 局) 上空の、垂直方向の遅延量 δT_K と δT_S である。比較結果の一例として、2011 年 1 月 1 日の沖縄県竹富町上空における δT_K と δT_S の変化を Fig. 6 に示す。Fig. 6 は、偶数正時ごとの SCHa モデル、および同時刻での Klobuchar モデルによる遅延量をプロットしたものである。1 年間の比較の結果、どの地点においても、Klobuchar モデルと SCHa モデルの概形は、Fig. 6 のようによく似た形状になっていた。

しかし、Klobuchar モデルの $\delta T_K = D$ となる時刻

Fig. 6 Ionospheric delays based on Klobuchar model and SCHa model (Jan. 1, 2011; Taketomi-Town, Okinawa, Japan; 23.91°N, 123.79°E)

(Fig. 6 では 0 時～4 時の範囲) において、SCHa モデルによる遅延量 δT_S の平均値は、 $D - 3.3 \times 10^{-9} \leq \delta T_S \leq D + 5.1 \times 10^{-9}$ の範囲で変動していた。距離に換算すると、Klobuchar モデルでは $\delta T_K = D \simeq 1.5$ [m] の遅延量を想定しているのに対し、SCHa モデルでは 0.51～3.03 [m] の範囲で変動していることになり、これは単独測位において無視できない大きさである。また、偶数正時ごとの SCHa モデルにおいて、電離圏遅延量が 1 日のうちで最大となる時刻は、365 日、10 地点の評価の結果、12 時以前であったのが 1856 回、14 時が 1019 回、16 時以降が 775 回であった。したがって、 D および C_T を適切に変動させることで、より正確なモデル化が可能であることがわかる。

以上より、本論文では $\alpha_n, \beta_n (n=0, \dots, 3)$ に加えて D および C_T も変動するパラメータとして扱い、改良を行う対象とする。

3.2 パラメータの改良手法

本論文では、 $\alpha_n, \beta_n, D, C_T$ をパラメータとした Klobuchar モデルと、SCHa モデルから求められる電離圏遅延量の差の 2 乗和を評価関数とし、これを最小とするパラメータを求めることで Klobuchar モデルの改良を行う。

ここで、SCHa モデルが得られる時刻を $t_d (d=0, 1, \dots, N_d)$ と定義する。また、地点 $p (p=0, \dots, N_p)$ を考え、SCHa モデルから得られる時刻 t_d 、地点 p における垂直方向の電離圏遅延量を $\delta T_{S,p}^{t_d}$ とする。同様に、時刻 t_d 、地点 p における Klobuchar モデルの遅延量を $\delta T_{K,p}^{t_d}$ とする。なお、時刻 t_d の間隔、および地点 p は、十分なデータ数が得られるように設定する必要がある。本論文では経験的に以下のように設定した。 t_d は、2.2.3 に示したように偶数正時とした。すなわち、 $t_0=0$ (0 時)、 $t_1=7200$ (2 時)、 $\dots$ 、 $t_{12}=86400$ (24 時) で、 $N_d=12$ である。また、地点 p は北緯 20°～50°、東経 120°～150° の範囲を、緯度、経度方向にそれぞれ 1° 間隔で分割した格子点にとり、 $N_p=960$ とした。この範囲は、日本国内での測位において、仰角が 10° 以上となる衛星の、ほぼ

すべての電離圏貫通点が含まれる範囲となっている。このとき評価関数 J は、(18) 式より

$$\begin{aligned} J(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2, D, C_T) \\ = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \left(\delta T_{S,p}^{t_d} - \delta T_{K,p}^{t_d} \right)^2 \\ = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \left[\delta T_{S,p}^{t_d} - (D + A_p Y_p^{t_d}) \right]^2 \end{aligned} \quad (25)$$

となる。ただし、

$$A_p = \sum_{n=0}^q \alpha_n \phi_{m,p}^n, \quad T_p = \sum_{n=0}^q \beta_n \phi_{m,p}^n, \quad q=3 \quad (26)$$

$$x_p^{t_d} = \frac{2\pi(t_d - C_T)}{T_p} \quad (27)$$

$$Y_p^{t_d} = \begin{cases} 1 - \frac{(x_p^{t_d})^2}{2} + \frac{(x_p^{t_d})^4}{24}, & |x_p^{t_d}| \leq 1.57 \\ 0, & |x_p^{t_d}| > 1.57 \end{cases} \quad (28)$$

である。 $\phi_{m,p}$ は (15) 式で計算される地点 p の地磁気緯度である。(18) 式より、Klobuchar モデルでは、 $|x| > 1.57$ のとき $\delta T_K = D$ となる。したがって、(28) 式のように、 $|x_p^{t_d}| > 1.57$ のとき $Y_p^{t_d} = 0$ と定義して評価関数を表現している。

(25) 式を最小にする $\alpha_n, \beta_n (n=0, \dots, 3)$, D , C_T を求めるため、 J を各変数で偏微分して 0 とおくと、それぞれつぎのようになる。

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha_n} = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \left[\phi_{m,p}^n Y_p^{t_d} \{ \delta T_{S,p}^{t_d} - D - A_p Y_p^{t_d} \} \right] = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta_n} = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \left[A_p \frac{\partial Y_p^{t_d}}{\partial \beta_n} \{ \delta T_{S,p}^{t_d} - D - A_p Y_p^{t_d} \} \right] = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial J}{\partial D} = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \{ \delta T_{S,p}^{t_d} - D - A_p Y_p^{t_d} \} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial J}{\partial C_T} = \sum_{t_d=0}^{N_d} \sum_{p=0}^{N_p} \left[A_p \frac{\partial Y_p^{t_d}}{\partial C_T} \{ \delta T_{S,p}^{t_d} - D - A_p Y_p^{t_d} \} \right] = 0 \quad (32)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y_p^{t_d}}{\partial \beta_n} = \phi_{m,p}^n \left[-\frac{1}{6} \frac{\{2\pi(t_d - C_T)\}^4}{(\sum_{n=0}^q \phi_{m,p}^n \beta_n)^5} \right. \\ \left. + \frac{\{2\pi(t_d - C_T)\}^2}{(\sum_{n=0}^q \phi_{m,p}^n \beta_n)^3} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\frac{\partial Y_p^{t_d}}{\partial C_T} = 2\pi \left[-\frac{1}{6} \frac{\{2\pi(t_d - C_T)\}^3}{(\sum_{n=0}^q \phi_{m,p}^n \beta_n)^4} \right]$$

$$+ \frac{2\pi(t_d - C_T)}{(\sum_{n=0}^q \phi_{m,p}^n \beta_n)^2} \quad (34)$$

である。 $n=0, \dots, 3$ であるから、(29)~(32) 式より合計 10 個の非線形連立方程式が得られる。

一方、(25) 式の評価関数は、(28) 式に示したように $x_p^{t_d}$ に依存する。しかし、(26), (27) 式に示したように、 $x_p^{t_d}$ は、未知パラメータである $\beta_0, \dots, \beta_3, C_T$ を用いて得られる値であるから、すべての未知パラメータを同時に推定することは困難である。

そこで本論文では、未知パラメータを A: $\{\beta_0, \dots, \beta_3, C_T\}$ と、B: $\{\alpha_0, \dots, \alpha_3, D\}$ の二つのグループに分けて推定を行う。推定の手順は以下になる。

- (1) 両グループに対して、GPS 衛星が放送している Klobuchar モデルのパラメータ値および $D = 5 \times 10^{-9}$, $C_T = 50400$ を初期値として設定する。
- (2) グループ B の値を既知として、(30), (32) 式より推定値 $\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_3, \hat{C}_T$ を求め、グループ A の値とする。
- (3) グループ A の値を既知として、(29), (31) 式より推定値 $\hat{\alpha}_0, \dots, \hat{\alpha}_3, \hat{D}$ を求め、グループ B の値とする。
- (4) (2), (3) の操作を交互に反復して行うことで、推定値 $\hat{\alpha}_0, \dots, \hat{\alpha}_3, \hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_3, \hat{D}, \hat{C}_T$ を求める。

なお本論文では、連立方程式の求解には Trust region dogleg 法 [24] を適用し、その実行には MATLAB R2013a, Optimization Toolbox の fsolve 関数を用いた。

以下では、本節に示した方法で得られたパラメータを用いた Klobuchar モデルを、“改良 Klobuchar モデル”とよぶ。

4. 実験結果

4.1 改良 Klobuchar モデルの生成と A および T の次数について

2.2.3 に示した方法により、2011 年 1 月 1 日~12 月 31 日の 365 日間について SCHA モデルを生成した。また、生成された SCHA モデルに基づいて、3.2 に示した方法により 365 日分の改良 Klobuchar モデルを生成した。

ここで、改良 Klobuchar モデルにおける余弦関数の振幅 A および周期 T について考察する。(17) 式のように、 A , T は電離圏貫通点の地磁気緯度 ϕ_m の 3 次関数として表現される。また、 ϕ_m は (15) 式で計算でき、改良 Klobuchar モデルの対象範囲 (北緯 $20^\circ \sim 50^\circ$, 東経 $120^\circ \sim 150^\circ$) では、 $7.2^\circ \leq \phi_m \leq 44.1^\circ$ の値をとる。

一方、この範囲の ϕ_m に対する Klobuchar モデルの A および T は、Fig. 4 に示したように、通常ゆるやかに変化する。また、ここで生成した 365 日分の改良 Klobuchar モデルについて A および T を評価した。その結果、 A , T は Klobuchar モデルと同様に、 $7.2^\circ \sim 44.1^\circ$ の ϕ_m に対して、ゆるやかな変化を示していることが確認できた。1 年間 (2011 年) の典型的な例として、Fig. 7 に 2011 年 3 月 1 日、7 月 1 日、11 月 1 日における改良 Klobuchar

Fig. 7 Amplitude A and period T of cosine function in refined Klobuchar models on Mar. 1, Jul. 1 and Nov. 1, 2011

モデルの A および T を示す。なお、Fig. 7 では 0.1° 間隔の ϕ_m に対して A , T をプロットしており、プロットを区別しやすくするため $\circ$, $\triangle$, $\square$ 印を適当な間隔で付加している。Fig. 7 から、改良 Klobuchar モデルの A および T は、 ϕ_m に対してほぼ直線的または 2 次関数的な変化を示していることがわかる。以上より、本論文において対象とした日本上空の領域では、改良 Klobuchar モデルの A および T を ϕ_m の 2 次関数として扱っても大きな精度劣化は生じないことが期待される。

そこで、(26) 式において $q=2$ 、すなわち A , T を ϕ_m の 2 次関数とみなした改良 Klobuchar モデルを 365 日分生成し、 $q=3$ の場合との比較を行った。その結果、SCHA モデルに対する改良 Klobuchar モデルの 1 年分の残差の RMS は、距離に換算して 1.15[m]、 $q=2$ とした場合は 1.29[m] であり、その差は 14[cm] であった。なお、(25)~(28) 式より A および T は $|x_p^{t_d}| \leq 1.57$ の場合について意味をもつ。したがって上記の RMS 値は、 $|x_p^{t_d}| \leq 1.57$ となる時刻 t_d 、および地点 p ($p=0, \dots, N_p$) について、残差 $\delta T_{S,p}^{t_d} - \delta \hat{T}_{K,p}^{t_d}$ を 1 年間にわたって計算し、その RMS を求めたものである。ただし $\delta \hat{T}_{K,p}^{t_d}$ は、 $q=3$ または $q=2$ の改良 Klobuchar モデルパラメータを用いて計算される、時刻 t_d 、地点 p の電離圏遅延量である。一方、文献 [2] によると、一般的な単独測位を行う環境において、電離圏遅延を除く測距誤差は 1σ 値で約 6.8[m] と見積もられている。したがって、 $q=3$ および $q=2$ の改良 Klobuchar モデルに大きな差はないことがわかる。そのため、以下では $q=2$ とした改良 Klobuchar モデルを用いて測位精度の検証を行うこととする。

以上のように、 $q=2$ とした改良 Klobuchar モデルの生成を行うことができれば、必要なパラメータ数を減じることができ、パラメータの配信を行う際など、実用上

有利な方法となる。ただし、上述の内容は、1 年間 (2011 年) のデータ解析に基づくものであり、一般的に $q=2$ としたモデルが有効であるかどうかについては、さらに検証が必要である。

4.2 測位結果の比較

改良 Klobuchar モデル ($q=2$) を適用して単独測位を行い、測位精度の検証を行った。検証に用いた GPS 観測データは、2.1.2 で用いたものと同一である。すなわち、Fig. 1 に示す計 10 局の GEONET 観測局 (電子基準点) において、2011 年 7 月 1 日~12 月 31 日の半年間に、30 秒間隔で取得された観測データを用いて単独測位を行い、水平、垂直および 3 次元測位誤差の RMS 値で測位精度を評価した。RMS 値の計算は (6) 式と同様であり、水平、垂直方向の RMS 値は (6) 式の測位誤差ベクトル $e_j(k, t_i)$ を水平方向または垂直方向の誤差として計算される。

Table 2 に測位精度の比較を示す。Table 2 では、

- (1) GPS の Klobuchar モデル
- (2) QZSS の Klobuchar モデル
- (3) IGS が提供する GIM
- (4) 日本上空の SCHA モデル
- (5) 改良 Klobuchar モデル ($q=2$)

を適用した場合の測位精度を比較しており、(1)~(4) については、Table 1 の内容に水平、垂直方向の RMS 値を付加し、比較のために再掲したものである。Table 2 より、GIM, SCHA モデルと比較した場合、改良 Klobuchar モデルは、水平方向で約 10~20 [cm]、垂直方向で約 20~30 [cm]、3 次元誤差では約 30 [cm] の精度劣化となった。一方で、GPS の Klobuchar モデルとの比較では、水平方向で約 1 [m]、垂直方向で約 1.8 [m]、3 次元誤差で約 2 [m] の精度向上が見られ、GPS の Klobuchar モデルに対して約 50 [%] の測位精度改善が確認できた。また、QZSS の Klobuchar モデルとの比較では、水平方向で約 1 [m]、垂直方向で約 1.4 [m]、3 次元誤差で約 1.7 [m] の精度向上が見られ、QZSS の Klobuchar モデルに対して約 45~50 [%] の測位精度改善が確認できた。

Table 2 Comparison of RMS positioning errors applied by existing and proposed (Refined Klobuchar) ionospheric delay corrections

Ionospheric model	RMS position error [m]		
	Horiz.	Vert.	3D
Klobuchar	2.134	3.602	4.187
QZSS	2.089	3.216	3.835
GIM	0.822	1.629	1.824
SCHA	0.974	1.512	1.799
Refined Klobuchar	1.047	1.807	2.088

4.3 改良 Klobuchar モデルの実時間利用について

前節の結果より、本論文で提案した改良 Klobuchar モデルは、GPS や QZSS の Klobuchar モデルよりも精度高く電離圏遅延量を補正できることがわかった。しかしながら、改良 Klobuchar モデルは、一組のモデルパラメータで 1 日分の電離圏遅延量を表現するものであり、モデルの生成には 1 日分の SCH A モデルが必要である。そのため、改良 Klobuchar モデルは、利用可能となるまでに少なくとも 1 日を要する後処理型のモデルとなっている。

それに対し、GPS や QZSS の Klobuchar モデルパラメータは衛星から送信され、実時間（リアルタイム）利用が可能な一種の予測モデルとなっている。しかし、パラメータの更新間隔は、GPS の場合で少なくとも 6 日に 1 回 [5]、QZSS の場合で少なくとも 1 日に 1 回 [15] となっており、本論文で用いた SCH A モデル（2 時間ごと）などと比べて有効期間は比較的に長い。したがって、電離圏の状況が短時間で大きく変化するような場合を除けば、改良 Klobuchar モデルも比較的に長い有効期間をもつものと期待される。

そこで本論文では、改良 Klobuchar モデルの簡便な実時間利用方法として

- パラメータは 1 日に 1 回更新する
- 測位を行う時点で利用可能な最新のパラメータを利用する

ことを考える。たとえば、6 月 30 日の SCH A モデルから生成された改良 Klobuchar モデルを用いて、7 月 1 日の測位を行う方法となる。以上の方法に基づいて、4.2 と同様に半年間にわたって測位を行い、水平、垂直および 3 次元測位誤差の RMS 値を求め評価した。Table 3 にその結果を示している。Table 3 より、改良 Klobuchar モデルを実時間利用した場合、後処理型（Table 2）と比べて水平方向で約 6 [cm]、垂直方向で約 17 [cm]、3 次元誤差で約 18 [cm] の精度劣化が見られた。しかし、GPS および QZSS の Klobuchar モデルに対しては改善された測位精度を保っており、実時間利用の場合にも、改良 Klobuchar モデルの有用性が確認できた。

Table 3 RMS positioning errors applied by Refined Klobuchar model generated from previous day's SCH A model

Ionospheric model	RMS position error [m]		
	Horiz.	Vert.	3D
Refined Klobuchar (previous day's)	1.104	1.979	2.266

5. おわりに

本論文では、電離圏遅延量補正モデルとして一般的 Klobuchar モデルを、SCH A モデルを利用して改良する手法を提案するとともに、パラメータ数の削減方法、実時間での利用方法についても実験を通して考察した。実験では、半年間にわたって測位精度を検証し、その結果、GPS や QZSS で放送されている Klobuchar モデルを適用した場合よりも、精度の良い測位が可能であることを示した。

一方、本論文では、日本上空の局所的な範囲における考察を行うとともに、その検証は 2011 年の観測データに基づいて行われた。また、電離圏擾乱などの電離圏異常発生時の影響などについては、本論文では取り扱っていない。したがって、提案手法の適用範囲（地域）や一般性、異常発生時の特性などについてはさらに検証を行う必要があり、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 杉本, 柴崎 (編) : GPS ハンドブック, 朝倉書店 (2010)
- [2] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr. (Eds.): *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. I, II, AIAA (1997)
- [3] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins: *Global Positioning System Theory and Practice*, third, revised edition, Springer-Verlag (1994)
- [4] P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press (2001)
- [5] Global Positioning System Directorate Systems Engineering & Integration Interface Specification, IS-GPS200F (2011)
- [6] S. Llewellyn and R. Bent: Documentation and description of the bent ionospheric model; *Technical Report AFCRL-TR-73-0657*, Air Force Cambridge Res. Lab. (1973)
- [7] J. A. Klobuchar: Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users; *IEEE Trans. on AES*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 325–331 (1987)
- [8] *RTCM Recommended Standard for Differential GNSS*, Version 2.3, RTCM SC-104, Paper 136-2001/SC104-STD (2001)
- [9] J. Kouba: A guide to using International GNSS Service (IGS) products, Natural resources Canada; <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>, 2009 (accessed on Nov. 1, 2013)
- [10] T. Iura, H. Tanaka, Y. Kubo and S. Sugimoto: Ionosphere TEC estimation of the sky over Japan based on spherical cap harmonics; *Proc. 41st ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, pp. 87–94 (2009)
- [11] S. Fujita, H. Yamamoto, T. Iura, Y. Kubo and S. Sugimoto: Modeling ionosphere VTEC over Japan based on GNSS regression models and GEONET; *In-*

ternational Journal of ICIC, Vol. 6, No. 1, pp. 155–169 (2010)

- [12] S. Otsuki, M. Kamimura, M. Ohashi, Y. Kubo and S. Sugimoto: Local models for ionospheric VTEC estimation based on GR models and spherical cap harmonic analysis; *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, Vol. 43, No. 1, pp. 1–7 (2011)
- [13] J. Liu, R. Chen, Z. Wang and H. Zhang: Spherical cap harmonic model for mapping and predicting regional TEC; *GPS Solutions*, Vol. 15, No. 2, pp. 109–119 (2011)
- [14] Y. Yuan, X. Huo, J. Ou, K. Zhang, Y. Chai, D. Wen and R. Grenfell: Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations; *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 44, No. 4, pp. 1498–1510 (2008)
- [15] 宇宙航空研究開発機構: 準天頂衛星システム ユーザインターフェイス仕様書 (IS-QZSS), Ver. 1.5 (2013)
- [16] S. Sugimoto and Y. Kubo: GNSS regressive models and precise point positioning; *Proc. 36th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications*, pp. 159–164 (2004)
- [17] 坂井: GPS のための実用プログラミング, 東京電機大学出版局 (2007)
- [18] IGS web page: IGS Product Table [GPS Broadcast values included for comparison] – updated for 2009, <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, (accessed on Nov. 1, 2013)
- [19] 中川 ほか: GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について; 国土地理院時報, No. 118, pp. 1–8 (2009)
- [20] O. Montenbruck and E. Gill: *Satellite Orbits – Models, Methods and Applications*, Springer-Verlag (2005)
- [21] 伏見, 赤井: 直交関数系, 共立出版 (1987)
- [22] G. V. Haines: Spherical cap harmonic analysis; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. B3, pp. 2583–2591 (1985)
- [23] M. Ohashi, K. Nishimoto, Y. Kubo and S. Sugimoto: Prediction of regional ionospheric models with AR model for GNSS positioning in Japan; *Transactions of ISCIE*, Vol. 26, No. 11, pp. 425–432 (2013)
- [24] M. J. D. Powell: A fortran subroutine for solving systems of nonlinear algebraic equations; *Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations*, P. Rabinowitz (Ed.), Gordon and Breach Science Publishers (1970)

著者略歴

にしもと けいすけ
西本 圭佑

1989年12月5日生。2012年3月立命館大学理工学部電気電子工学科卒業, 同年4月立命館大学大学院理工学研究科電子システム専攻修士課程入学, 2014年3月同修士課程修了。在学中, GPS測位システムで用いる電離圏モデルの研究に従事。現在, スズキ(株)勤務。

おおはし まさひろ (学生会員)
大橋 正治

1987年8月4日生。2010年3月立命館大学理工学部電気電子工学科卒業, 2012年3月立命館大学大学院理工学研究科創造理工学専攻修士課程修了, 2012年4月同大学院博士課程に入学し, 現在に至る。おもに, 衛星測位システムの精度向上のための誤差モデルに関する研究に従事。

くぼ ゆきひろ (正会員)
久保 幸弘

1974年10月13日生。2002年3月立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年4月三菱電機(株)入社, カーナビゲーションシステムのハードウェア設計などを担当し, 2004年4月より立命館大学理工学部電気電子工学科専任講師, 2007年4月同学科准教授となり現在に至る。主として衛星測位システムに関する信号処理およびその応用に関する研究に従事。博士(工学)。IEEE, ION, 電子情報通信学会の会員。

すぎもと すえお (正会員)
杉本 末雄

1974年 Polytechnic Institute of New York (現, Polytechnic Univ.) 電気工学科システム科学専攻博士課程修了。同年大阪大学工学部助手。同工学部内講師を経て, 1988年立命館大学理工学部電気工学科助教授, 1990年同学科(現, 電気電子工学科)教授, 2012年4月より同学科特任教授となり現在に至る。この間, 1980年9月~1981年8月 University of California, Davis校, Visiting Assistant Prof., 1986年7月~8月 Polytechnic Univ. Visiting Lecturer。確率システム理論と応用, 信号・画像処理の研究に従事。電気学会, 日本応用数理学会, 米国 IEEE, ION などの会員。