

## 単周波数帯 V L B I の 電離層補正について — その 3

関東支所 第三宇宙通信研究室  
近藤哲朗、雨谷 純

### 1. はじめに

国内5ヶ所(稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄)のfoF2(またはTEC)データを用いて日本近辺のfoF2(またはTEC)を推定する方法について、前回(408回)[1]、前々回(410回)[2]と報告してきた。これらの報告では単に緯度方向に多項式近似で内外挿することによってかなりの広範囲で、VLBIの電離層補正には十分な精度で、電離層パラメータを求めることができることを示した。今回、球面を用いての経度方向への近似を試みた。つまり、日本近辺のfoF2(またはTEC)データを表すコンターを球面の一部と考え、国内5ヶ所のデータからこの球面を記述するパラメータを最小二乗フィッティングした。この場合の適用領域および問題点について報告する。

結論を先に述べると、今回開発した球面近似でのフィッティングが総合的に見て一番良い近似となっていた。

### 2. 球面近似

図1に球面近似モデルを示す。P地点(緯度 $\lambda$ 、経度 $\phi$ )でのfoF2を原点からP方向に向かう直線が二つの球面と交わる距離の差で表現する。図では線分PP<sub>1</sub>の長さがfoF2を表す。この長さは2つの球の間の距離および2つの球の半径が分かれば簡単な幾何学から次式のように求めることができる。

$$\text{foF2} = A + B^{0.5} - R_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、} \quad A &= x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta + z_1 \cos \gamma \\ B &= A^2 - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) + R_1^2 \end{aligned}$$

ここで $R_0$ は原点Oを中心とする球の半径、 $(x_1, y_1, z_1)$ はもう一つの球の中心O<sub>1</sub>の座標、 $R_1$ はその球の半径、そして $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ は直線OPの方向余弦である。 $(\lambda, \phi)$ と方向余弦の関係は、

$$\cos \alpha = \cos \lambda \cos \phi, \quad \cos \beta = \cos \lambda \sin \phi, \quad \cos \gamma = \sin \lambda$$

で与えられる。未知数の数は $x_1, y_1, z_1, R_1$ および $R_0$ の5ヶである。このパラメータを5地点(沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内)のfoF2データを用いて、最小二乗フィッティングする。データとしては前回、前々回と同じISS-b衛星で得られた汎地球foF2モデル[3]を用いて評価する。しかしながら、パラメータフィッティングに際しては後で述べる理由から $R_0$ はある固定値を用いた。偏微分係数は

$$\begin{aligned} \partial/\partial x_1 &= \cos \alpha + B^{-0.5}(A \cos \alpha - x_1) \\ \partial/\partial y_1 &= \cos \beta + B^{-0.5}(A \cos \beta - y_1) \\ \partial/\partial z_1 &= \cos \gamma + B^{-0.5}(A \cos \gamma - z_1) \\ \partial/\partial R_1 &= B^{-0.5} R_1 \end{aligned}$$

で計算される。これらに示されるように観測方程式(1)はパラメータに関して非線形であるため求めるパラメータがある値に収束するまで線形近似の最小二乗推定のプロセスを繰り返す(イタレーション)。 $R_0$ を固定値としたのはイタレーションで解が収束しなかったためである。安定に収束する解を得るために $R_0$ の値およびパラメータの初期値に特別な工夫が必要であったが、(a)  $R_0$ は10MHzに固定し、(b)  $R_1$ の初期値は20MHzとし、(c) 2つの球の中心間の距離の初期値を $R_0$ と等し

くしてさらに $O_1$ の緯度、経度をそれぞれ $0^\circ$ 、 $135^\circ$ として $(X_1, Y_1, Z_1)$ の初期値を計算し、(d)イタレーションを10回繰り返しても収束しないときは(e) $R_0, R_1$ および球の中心間の距離を10MHzずつ高くしてイタレーションをやり直す、というアルゴリズムによって確実に安定な収束解を得られるようになった。

### 3. 結果

図2に球面近似で求めた日本付近(20N-50N, 120E-150E)でのフィッティング結果をJSTで0hから2時間ごとに22hまで示す。図では実際値との差(絶対値)がXバンドの遅延に換算して0.1nsec以上となる地域を++++および====のシンボルで表示している。参考のため前回の結果(緯度方向に3次式で近似)を図3に示す。図の形式は図2と同じである。これらの両図の比較から今回開発した球面近似の方が近似の適用領域(白く抜けている部分)が経度方向に広がっていることが分かる。さらに適用領域の大きさのローカルタイムの依存性が小さくなっている。

このことをさらに確かめるため、有効領域の面積の比較を行った。図4は経度120E-150Eで緯度20N-50Nの領域および緯度方向にさらに $10^\circ$ 刻みで3つの領域に分けた場合について(1)球面近似(実線)、(2)3次式近似でローカルタイム補正なし(●)、(3)3次式近似でローカルタイム補正あり(○)のそれぞれの場合について近似が有効に働く面積を、すべての領域で近似がうまくいった場合を1としてJSTに対して示している。これらの計算では緯度に対して $\cos \lambda$ の補正を考慮に入れている。表1にはJSTに対して平均を行った結果を示す(この表には4次式近似の場合も示す)。図4や表1からも球面近似が3次式近似などの多項式近似に比べて有効であることがわかる。ただし、20N-30Nの領域ではそれほどの改善は見られない。

### 4. おわりに

国内5地点で得られた電離層データから日本近辺での電離層情報を推定する方法として新たに球面近似法を開発した。この球面近似は前回、前々回と報告してきた多項式近似法よりもローカルタイム依存性が少なく、また経度方向への適用範囲が広いなど全般によい近似を与えることが示された。しかしながら、相変わらず南方での近似はそれほど改善されなかった。今後実際のVLBIデータを用いて球面近似法が有効かどうかのチェックを行いたい。

### 参考文献

- [1] 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。
- [2] 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。
- [3] 松浦 他、「電離圏F2層臨界周波数( $f_oF_2$ )の世界分布」、電波季、Vol.28、pp.315-331、1982。

表 1. 近似有効領域の比較

|              | 20N-30N         | 30N-40N         | 40N-50N         | 20N-50N         |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 4次式近似 LT補正あり | $0.37 \pm 0.17$ | $0.65 \pm 0.26$ | $0.57 \pm 0.23$ | $0.52 \pm 0.20$ |
| 4次式近似 LT補正なし | $0.40 \pm 0.20$ | $0.70 \pm 0.23$ | $0.67 \pm 0.22$ | $0.58 \pm 0.20$ |
| 3次式近似 LT補正あり | $0.52 \pm 0.24$ | $0.65 \pm 0.27$ | $0.68 \pm 0.23$ | $0.61 \pm 0.23$ |
| 3次式近似 LT補正なし | $0.54 \pm 0.23$ | $0.72 \pm 0.23$ | $0.82 \pm 0.19$ | $0.68 \pm 0.19$ |
| 球面近似         | $0.59 \pm 0.20$ | $0.87 \pm 0.11$ | $0.90 \pm 0.14$ | $0.77 \pm 0.13$ |

LT : ローカルタイム

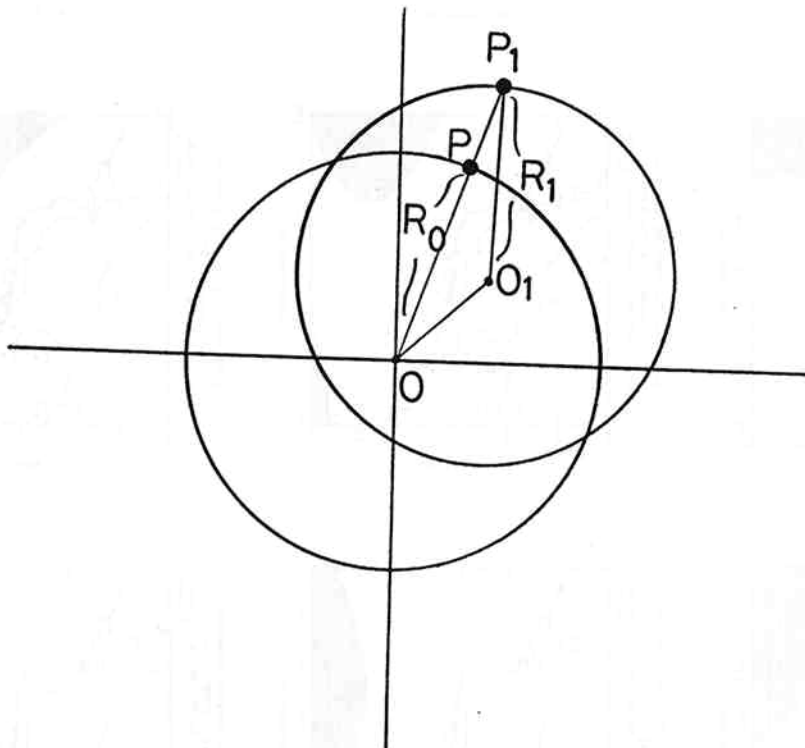


図 1. 球面近似モデル。ある緯度、経度（点 P に相当）での  $f_oF_2$  を線分  $\overline{PP_1}$  の長さで表す。図では簡単のため 2次元表示で示す。

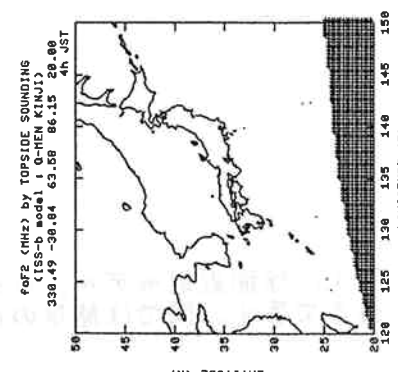
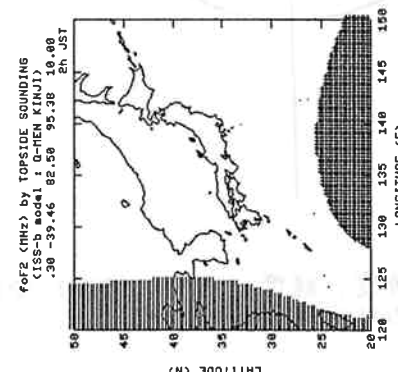
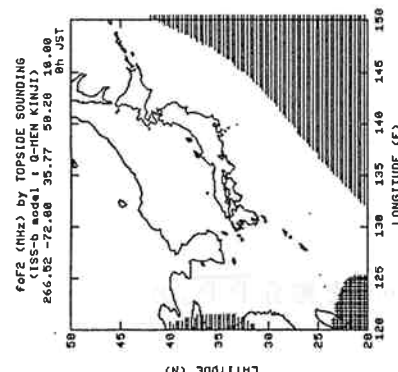
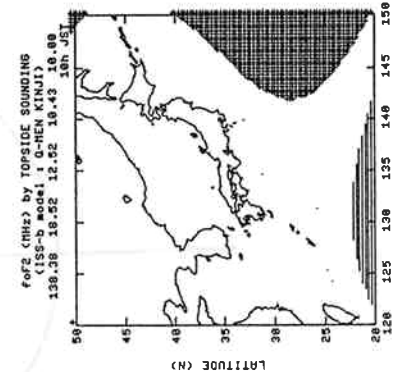
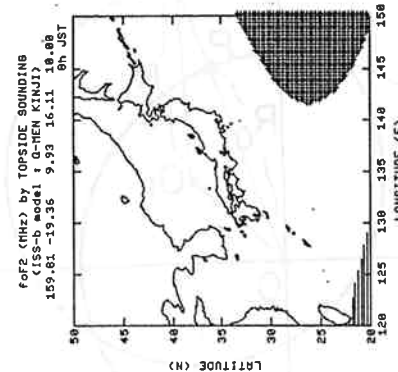
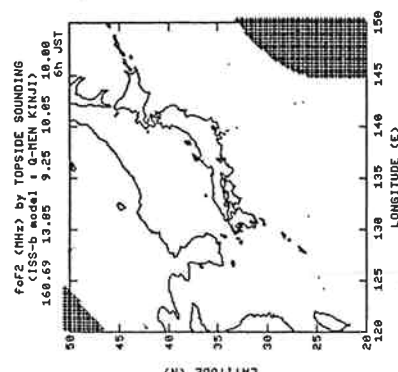
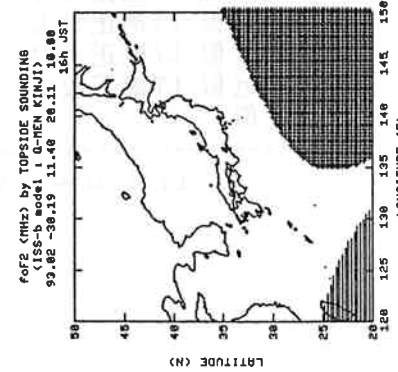
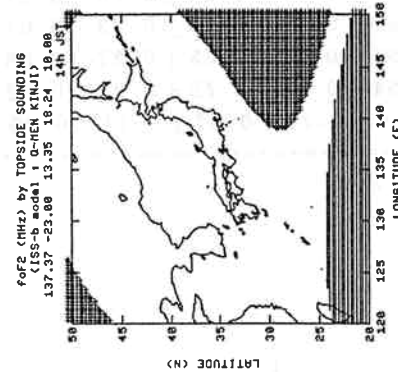
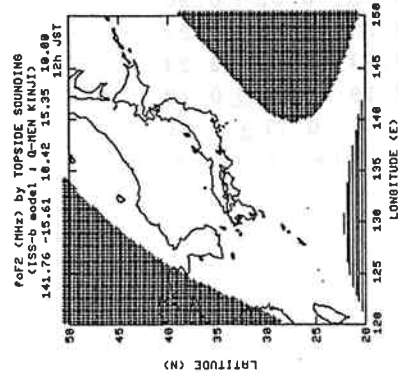
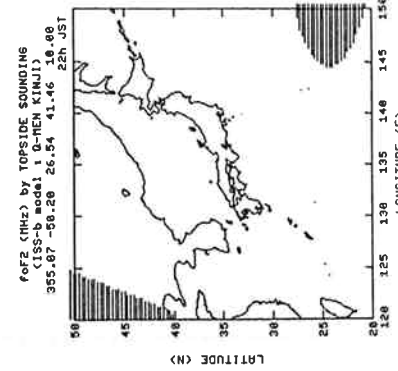
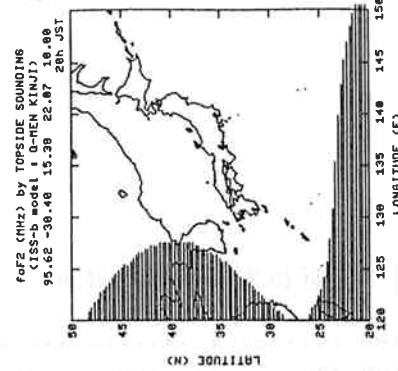
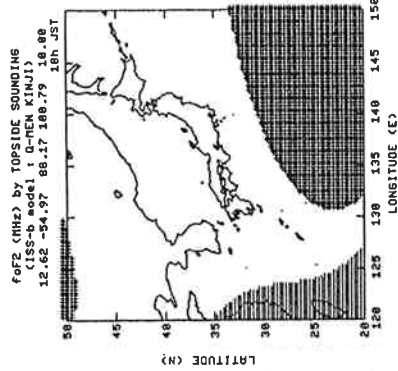


図2. 球面近似法による電離層補正有効適用範囲。国内5地点（沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内）のISS-bモデルfoF2から日本近辺のfoF2を球面近似モデルを用いて推定し、実際のISS-bモデルfoF2との差を8GHzでの遅延の誤差に換算し、0.1 nsecを正に越える部分を++++++、負に越える部分を=====で示す。0時JSTから22時JSTまで2時間毎の図を示す。

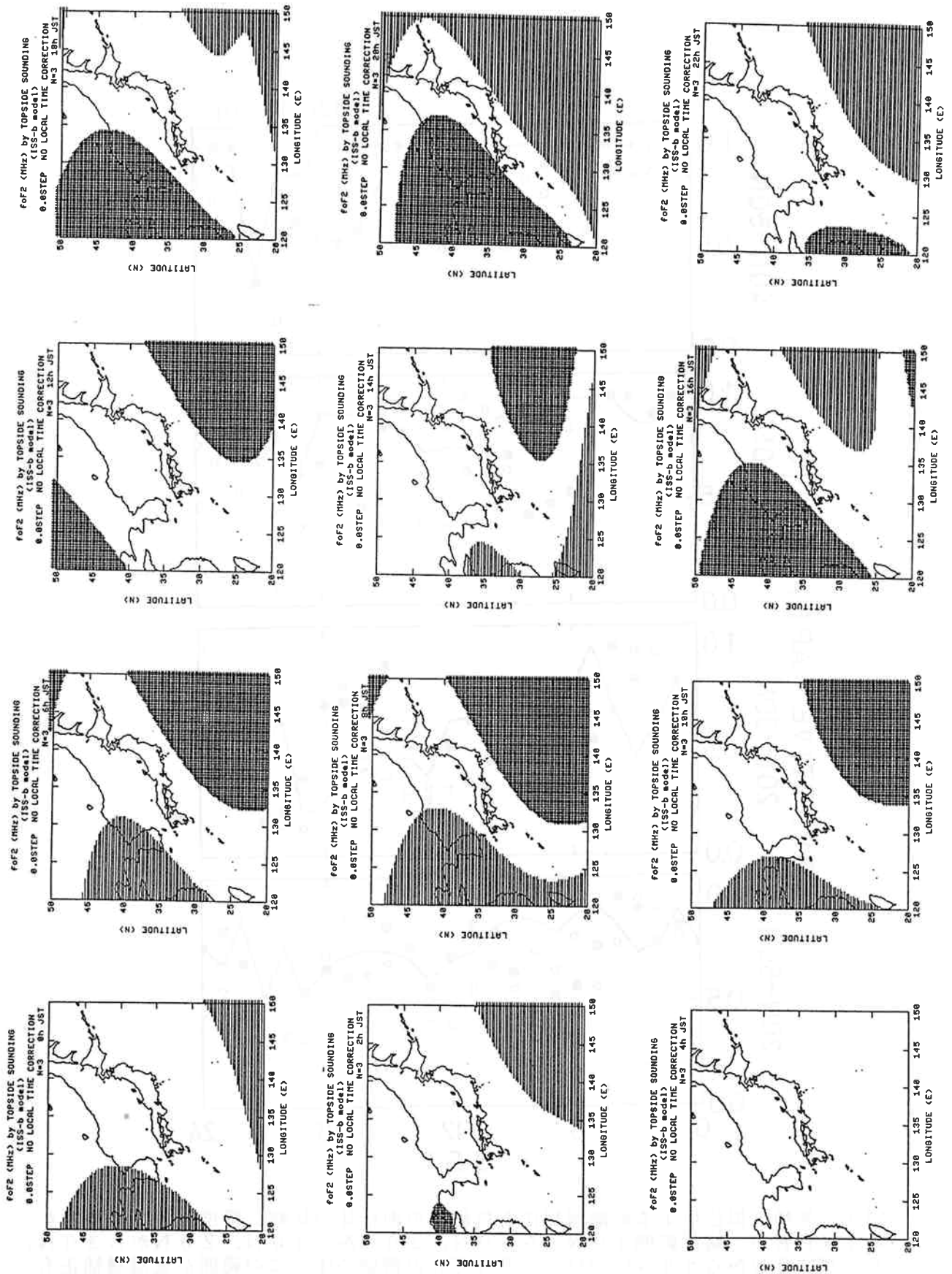


図3. 多項式近似法による電離層補正有効適用範囲。国内5地点（沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内）のISS-bモデルfoF2から日本近辺のfoF2を緯度方向に3次式近似を用いて経度補正なしで推定。図の形式は図2と同じ。

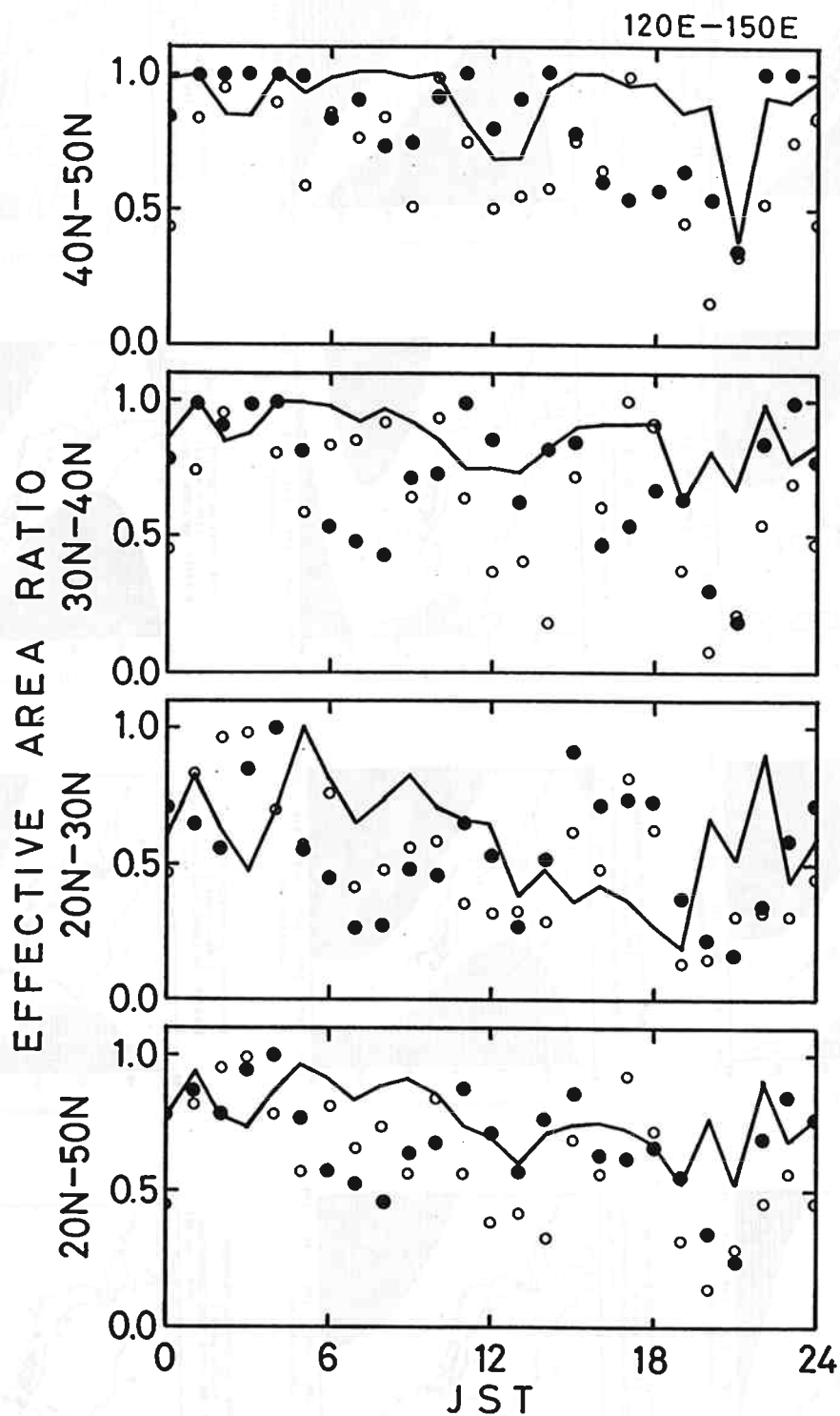


図4. 各種近似法による電離層補正有効範囲の面積比の比較。経度範囲120Eから150Eで、緯度範囲40Nから50N, 30Nから40N, 20Nから30N, および20Nから50Nについて、それぞれの領域のすべての範囲が電離層補正有効適用範囲だった場合を1として横軸にJSTをとり、縦軸に有効範囲を面積比でとって示す。緯度の違いによる面積の違いは補正済みである。実線は球面近似、●は3次式近似でローカルタイム補正なしの場合、○は3次式近似でローカルタイム補正ありの場合を示す。