

単周波数帯 V L B I の 電離層補正について — その 2

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

測地を目的とする V L B I (Very Long Baseline Interferometer) では、電離層での遅延を補正するために原則として X バンド (8GHz) および S バンド (2GHz) の 2 周波数帯で準星からの電波を受信し、電離層中での屈折率の分散特性を利用して、電離層遅延の補正を行う。しかしながら超小型 V L B I 局 [1] では国内の短距離基線での観測であるということや、S バンド受信系がまだ整備されていないということから、X バンドのみの観測を行ってきた。

前回の発表 (第 408 回談話会) [2] では、国内 5 地点 (稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄) の f_oF_2 (または T E C) データを用いての電離層遅延補正を考えた。つまり、上記 5 地点のデータから日本近辺の f_oF_2 (または T E C) を推定するのに、単に緯度方向に多項式 (4 次式) 近似で内外挿することによってかなりの広範囲で、V L B I の電離層補正には十分な精度 (天頂方向での X バンドでの遅延に換算して 0.1nsec 以下) 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。しかし、この方法では稚内以北や沖縄以南の外挿領域において非常に誤差が大きくなった。

沖縄以南はいわゆる電離層赤道異常帯に属し、そのため外挿誤差が大きくなるのだろうと考え、「赤道異常を考慮にいたした外挿方式を考え沖縄以南での推定精度の向上を試みる」という目的で今回の報告の準備を始めた。しかしながら、結論を先に述べると、赤道異常が外挿の精度を悪くした主因ではなく、一直線上にない 5 地点のデータを用いての 4 次式近似に原因があった。そこで今回は、一直線上にない 5 地点のデータから、緯度方向に電離層パラメータを近似した場合の適用領域についての検討を行った。その結果、3 次式近似の方が沖縄以南での近似精度がよくなることがわかった。なおここでの計算には前回と同様に I S S - b で得られた f_oF_2 モデル [3] を用い、T E C への換算には A F C R L モデル [4] を用いた。

2. 多項式近似の適用領域 — 緯度方向

図 1 に前回報告した結果の一例を示す。この図は 12 時 J S T における (1) 5 地点 (沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内) の f_oF_2 データを用いて、(2) 経度方向へのズレは無視し、(3) 強引に緯度方向に 4 次式で近似し、(4) 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。図から沖縄以南での近似が悪いことがわかる。

ところで、図 2 a は東経 135° 上の 5 緯度 (26.3N, 31.2N, 35.7N, 39.7N, 45.4N) でそれぞれ、沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内の緯度に等しい) の 12 時 J S T におけるデータを用いて $20^\circ N$ から $50^\circ N$ までの f_oF_2 を 4 次式で近似した場合の近似値 (点線) と実際の値 (実線) を示す。同図 b にはそれらの差 (誤差) を破線で示す。参考のために X バンドでの電離層遅延に換算して 0.1nsec の誤差となる数値を正側および負側について長破線で示したが、 $20^\circ N$ から $50^\circ N$ において誤差は正および負の長破線で挟まれた領域に収まっており、この図から見るかぎり 4 次式近似は十分な精度で外挿に対しても適用できていると言える。

実際には 5 地点は同一経度上にない。そこで、図 1 に示される地図上で沖縄 - 稚内を結ぶ直線上で 5 地点を考えて 4 次式近似でその直線上の内外挿を行ってみた。その結果、図 3 に示されるように十分な精度で近似ができていた。

ではどうして図 1 において沖縄以南で近似が悪くなっているのだろうか? 図 2 において 5 地点の真中地点での f_oF_2 を 0.1MHz (約 1% に相当) 小さくしたデータを用いて 4 次式近似を行うと図 4 に示されるように、外挿領域において大きな誤差を示すようになる。しかしながら同じデータに対して 3 次式近似を適用すると、図 5 に示されるように 4 次式近似よりも良好な外挿値を与えるようになる。このことは 4

次式近似は誤差を含んだ5地点データを用いての緯度方向への近似には不適当なモデルであることを意味している。最小二乗法においてモデルを記述するパラメータ数をやたらに増やしても、必ずしも意味のある答えを得ることができるとは限らない。モデル選択の判定材料の1つとしてAIC(赤池の情報量規準)があるが、AICを用いて判定するとやはりこの場合は4次式よりも3次式の方が“尤もらしい”ということになる。それでは5地点のデータということで安易に4次式近似(パラメータ数=5)を用いたのはよくなかったのだろうか?

3. 多項式近似の適用領域——経度方向も含めて

図6にやはり前回の結果を示す。図の形式は図1と同じであるが時刻は8時JSTである。図1および図6共通に沖縄から東南東方向に白く延びる帯、つまり近似がうまくいつている領域が見られる。実はこの特長は他の大部分の時間帯においても共通に見られる。この意味を考えるため、沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内の5地点を通る曲線を次式のように4次式で近似した。

$$\text{緯度} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4$$

$$\text{経度} = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4$$

5地点に対して緯度の順に $t = -2, -1, 0, 1, 2$ として係数 a および b を最小二乗法で決定し、曲線を定めると図7になる。この曲線のことを測線と呼ぶことにすると、電離層パラメータを4次式で近似したものはこの測線に沿った近似を与えているようである。3次式近似の場合の測線を図8に示すが、この場合は測線が沖縄以南に向かって延びており、このことから3次式近似が沖縄以南でよい結果を与えることが想像される。詳しい数学的意味は分からないが、計算に使用したfoF2モデルの空間変動の緯度、経度に対する次数に関係しているようである。

4. 3次式近似を適用した結果

図9に3次式近似を用いて緯度方向に内外挿した結果の一例(8時JST)を示す。図の形式は図1および6と同じである。沖縄以南で近似が良くなっている様子が分かる。さらに経度の違いを時間に換算して補正すると図10となり、この場合は良好な近似の領域が広がる。しかし、前回の報告でも述べたが、経度の違いを補正しない方が、概して良い近似となる。

5. 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場合、緯度方向に4次式で外挿するのは必ずしも良い方法では無い。その原因として4次式近似がクリティカルすぎることがあげられるが、さらに5地点が地図上で直線上にないということも原因となっている。

今回の報告の結論は、「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場合、(1)緯度方向には3次式近似を用いて内外挿し、(2)経度方向の補正は行わない、という方法で推定を行えば、日本国内で行う単周波帯VLBIの電離層遅延補正に大部分の領域で適用できる」である。

近似の精度をさらに高めるためには経度依存性のモデル化が必要である。

参考文献

- [1] 雨谷 純、徳丸 宗利、高橋 幸雄、黒岩 博司、川口 則幸、「超小型VLBI局の開発」、第363回研究談話会資料、1987、1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」、第408回研究談話会資料、1989、4月。
- [3] 松浦 他、「電離圏F2層臨界周波数(foF2)の世界分布」、電波季、Vol.28、pp.315-331、1982。
- [4] 新野 賢爾、「電離層全電子数」、電波季、Vol.25、pp.369-379、1979。

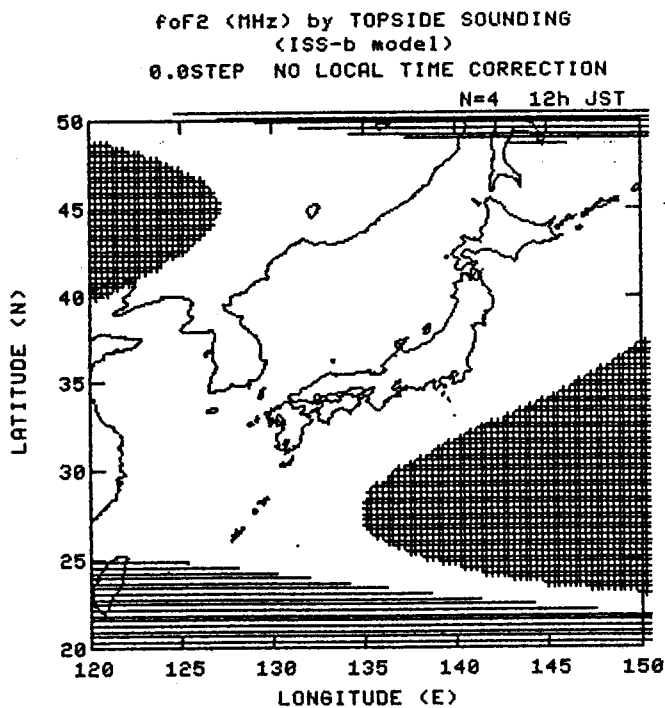


図1. 電離層補正有効適用範囲(前回の結果)。国内5地点(沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内)のISS-bモデルfoF2から日本近辺のfoF2を緯度方向に4次式近似を用いて経度補正なしで推定し、実際のISS-bモデルfoF2との差を8GHzでの遅延の誤差に換算し、0.1nsecを正に越える部分を++++++、負に越える部分を-----で示す。12時JSTを示す。

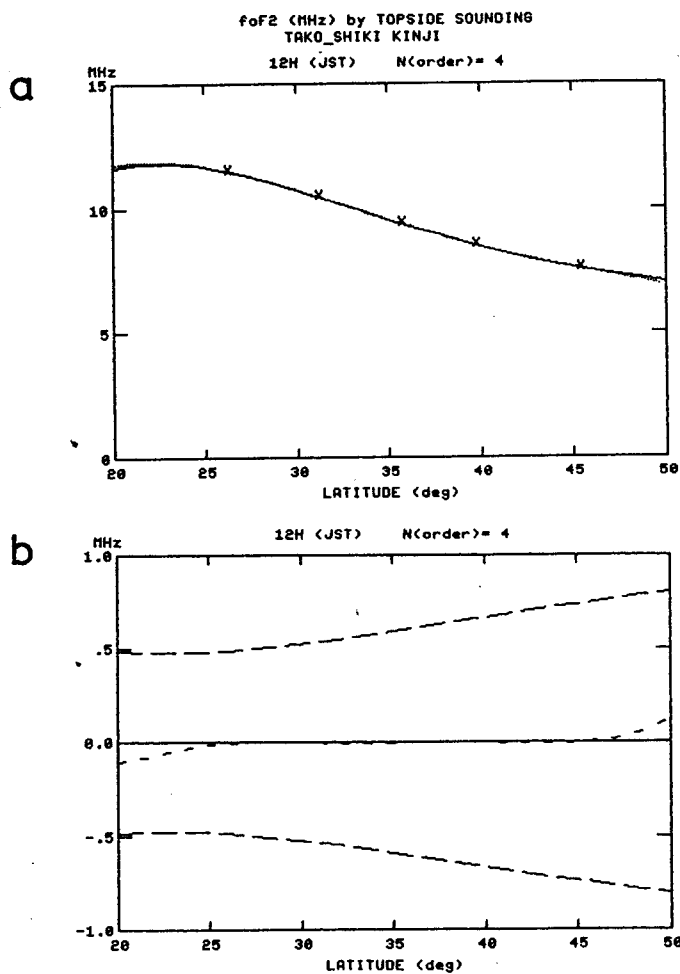


図2. (a). 12時JSTにおいて東経135°上の5地点のデータ(xで表示)を用いて4次式近似で北緯20°から50°までのfoF2を内外挿したときの近似値(点線)と実際値(実線)。(b). 実際値と近似値の差(短い破線)。参考のためXバンドでの電離層遅延の誤差に換算して0.1nsecとなる数居値を長い破線で正側および負側について示す。実際値と近似値の差はこの数居値で挟まれる範囲内に収まっておりこの場合の近似が有効に働いていることを示している。

foF2 (MHz) by TOPSIDE SOUNDING
TAKO_SHIKI KINJI
12H (JST) N(order)= 4

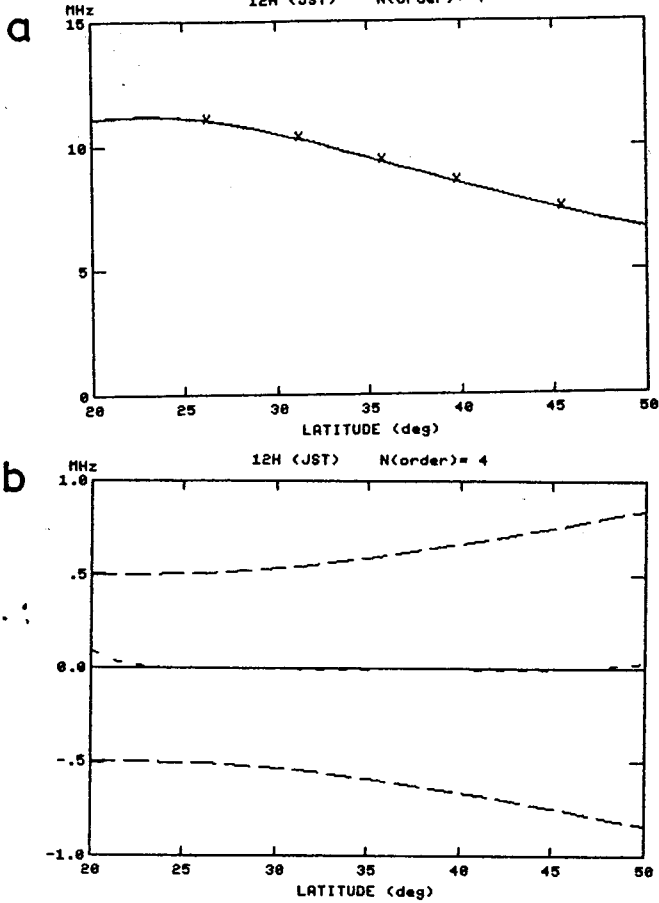


図3. 図1で示される地図上で沖縄と稚内を結ぶ直線上の5地点データを用いた場合の4次式近似の評価。図の形式は図2と同じ。図2と同様にこの場合も近似が有効に働いている。

foF2 (MHz) by TOPSIDE SOUNDING
TAKO_SHIKI KINJI
12H (JST) N(order)= 4

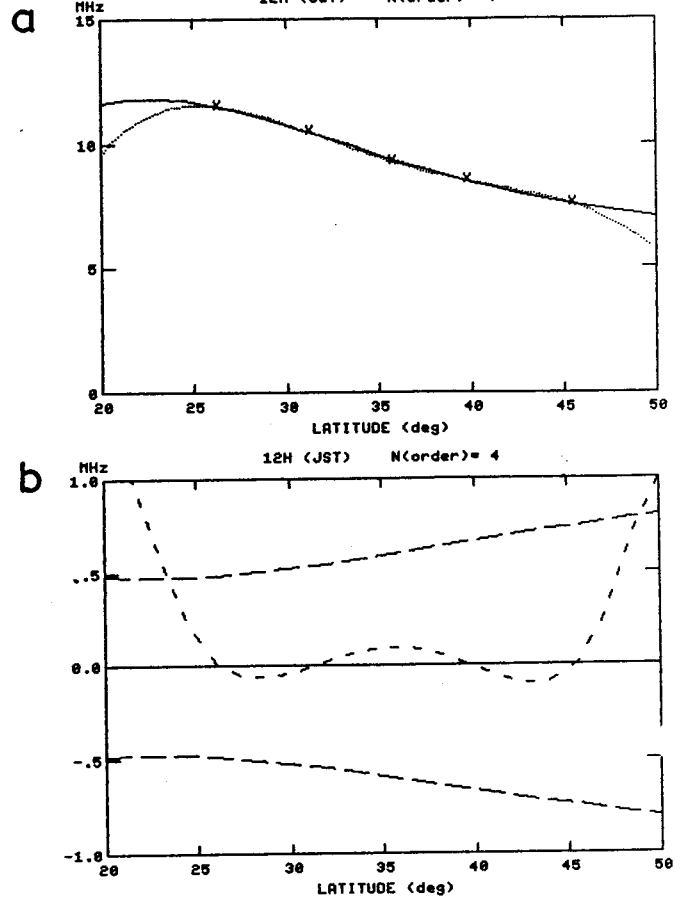


図4. 図2と同じデータであるが国分寺に相当する緯度のデータを0.1MHz (約1%) 小さくした場合の4次式近似の評価。図の形式は図2と同じ。低緯度側と高緯度側において近似が悪くなっている。

foF2 (MHz) by TOPSIDE SOUNDING
TAKO_SHIKI KINJI
12H (JST) N(order)= 3

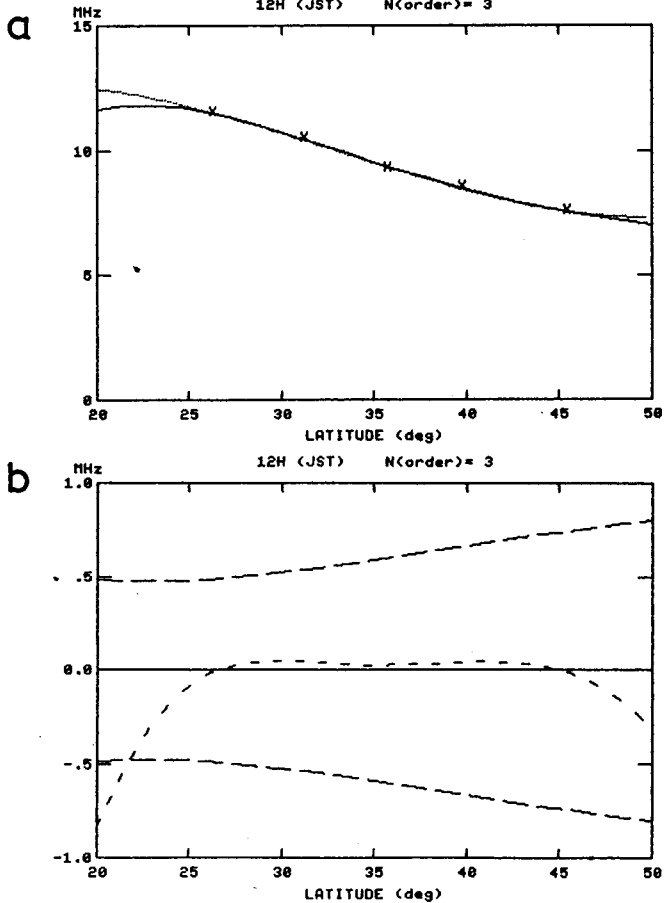


図5. 図4と同じデータに対して3次式近似を適用した場合の評価。図の形式は図2と同じ。図4に比較して低緯度側および高緯度側において近似の改善が見られる。

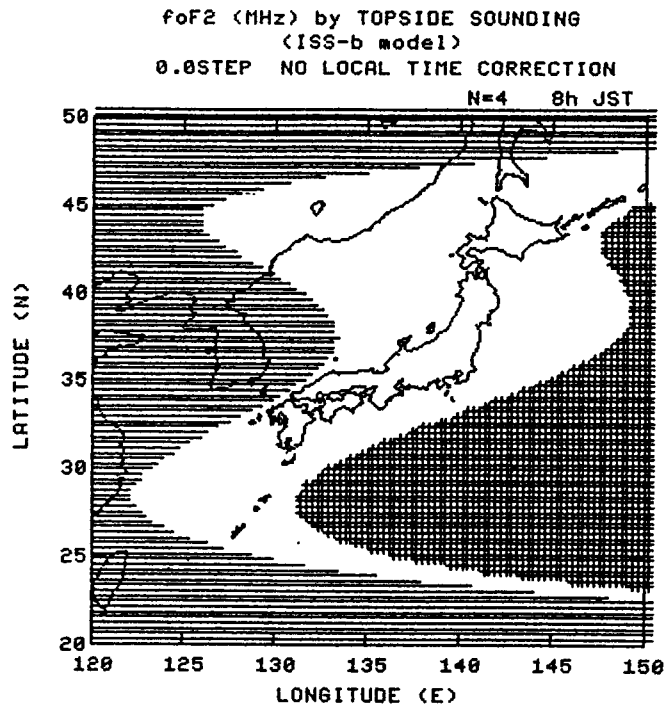


図6. 電離層補正有効適用範囲（前回の結果）。図の形式および推定の条件は図1と同じである。時刻は8時JST。図1および図6共通に沖縄から東南東に带状に近似の良い領域が延びていることが分かる。

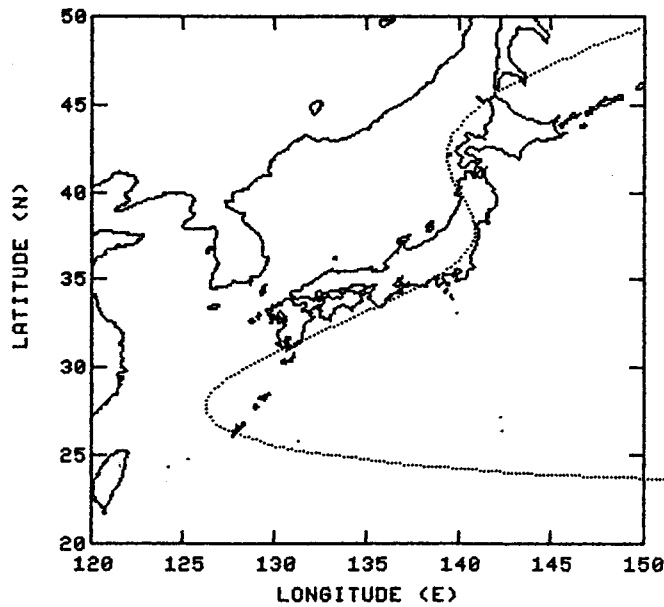


図7. 沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内を通る4次曲線。この曲線を測線と呼ぶと電離層パラメータの緯度に対する4次式近似（図1および図6）の近似の良い領域はこの測線に沿っている。

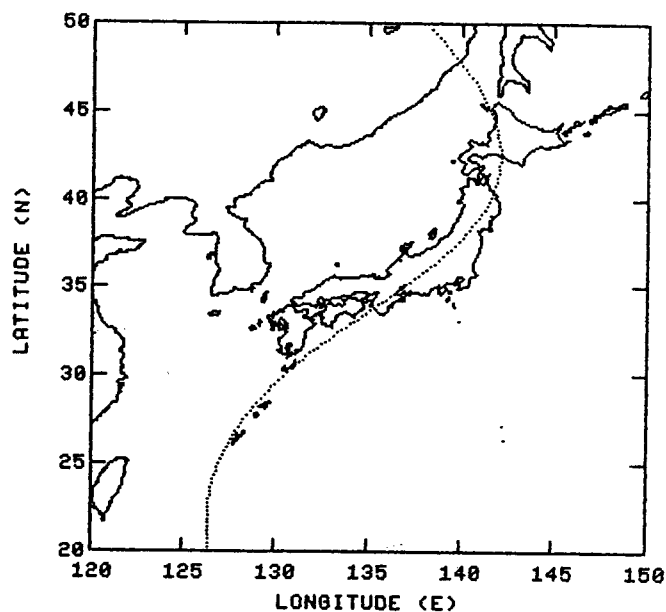


図 8. 沖縄、山川、国分寺、秋田、稚内の近くを通る 3 次曲線。測線が沖縄以南に延びている。

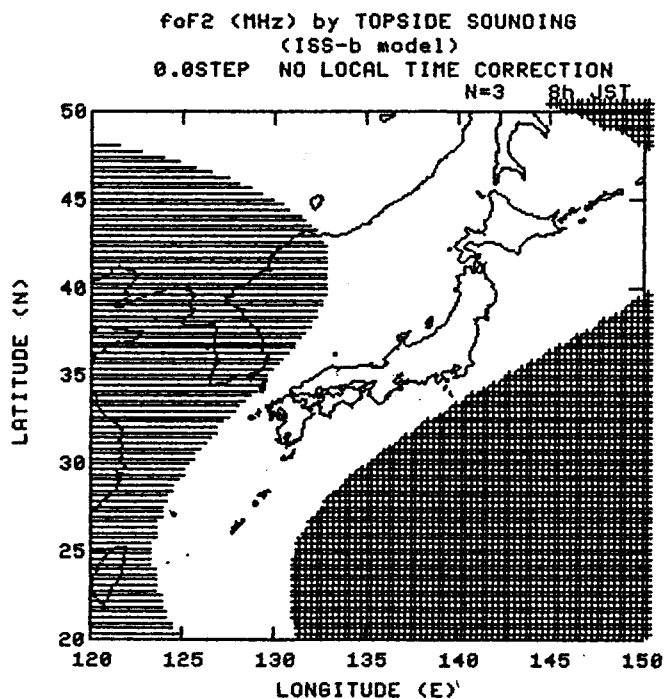


図 9. 3 次式近似を用いた場合の電離層補正有効適用範囲。図 6 と同じ形式および時刻 (8 時 JST) である。図 8 に示される測線に沿って沖縄以南に近似の有効領域が延びている。

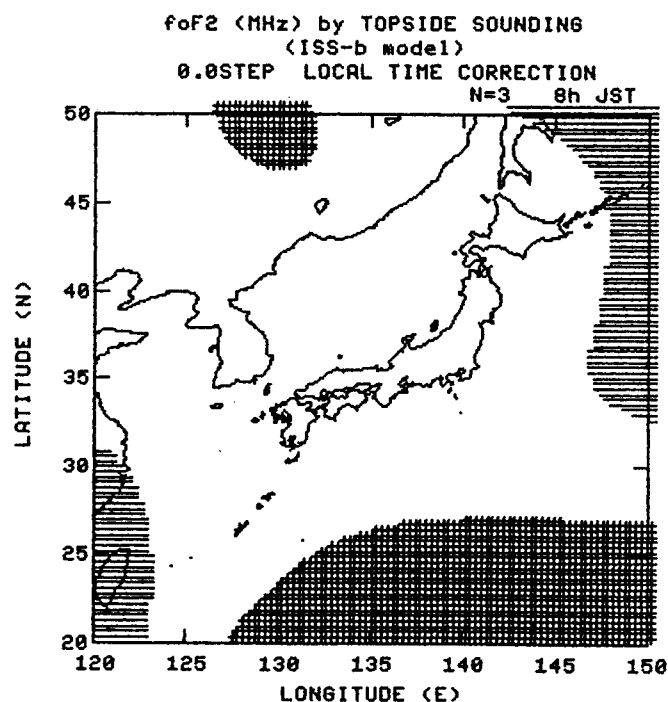


図 10. 図 9 と同じデータであるが、経度方向の違いを時間に換算して補正した場合。この場合たまたま図 9 に比べ有効適用範囲が広がっているが、一般的には経度方向の補正を行わない方が有効適用範囲が広がる。