

単周波数帯VLBIの 電離層補正について

鹿島支所 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VLBI (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する。しかしながら超小型VLBI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。VLBI観測では局毎の視線方向の電離層全電子数(TEC)の差が余分な遅延として観測され測地に影響を及ぼすが、数10kmといった短距離では電離層の状態はほぼ同じと見なせるため、電離層遅延の補正は(少なくとも現在の3cmという測地精度では)不必要であろうと考えられる。しかし、例えば鹿島(東京) - 沖縄では太陽活動静穏時においても天頂方向の電離層全電子数に最大 $1 \times 10^{17} \text{e}^{-}/\text{m}^2$ 程度の差があり[2]、これはXバンドで約0.2nsec(6cm)の遅延時間差に相当するため何らかの方法で電離層遅延の補正を行うことが望ましい。

そこで国内5観測所(稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄)の電離層定常観測で得られているF2層臨界周波数 f_oF2 を用いての電離層補正を行なう場合の緯度および経度方向の適用範囲について検討した。本資料の題名と少し異なった内容となるが、この適用範囲の検討に関して評価方法および結果を(5地点のデータから任意の地点での f_oF2 を求める方法を含めて)報告する。

2. 評価方法

電波星からの電波が電離層の影響をもっとも受けるのは最大電子密度付近の高度を通過するときであり、当然のことながら、あるアンテナから見た場合、仰角および方位角に依存して、電離層通過地点の緯度、経度が異なってくる。電離層補正がうまく行なえるかどうかは、今の場合、国内5ヶ所のデータから電波が通過する地点の電離層パラメータをいかにうまく求めることができるかにかかっている。そこで電離層補正がうまく行くかどうかを客観的に評価するために、ISS-b衛星のトップサイドサウンディング観測から得られた f_oF2 汎地球モデル[3](以下ISS-bモデルと呼ぶ)を用いて以下に述べるような方法で評価した。

稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄での f_oF2 をISS-bモデルで計算し、それらの値からある地点P(緯度 λ 、経度 ϕ)での値を求め(この方法については後で述べる)、この値とP地点でのISS-bモデル値とを比較する。結果は、P地点での天頂電離層遅延(8GHz)に換算して0.1nsec(3cm)の差を目安とし電離層補正がうまく働く範囲を調べた。 f_oF2 からTECの換算にはAFCLRモデル(詳しくは付録および文献[4]を参照されたし)を用いる。

稚内、秋田、国分寺、山川、沖縄(以下基準点と呼ぶ)の f_oF2 データ(1日分)からある時刻TにおけるP地点での f_oF2 を求めるのに次の様な2つの方法を用いた。

方法A: f_oF2 の緯度依存性を5基準点の時刻Tにおけるデータを用いて多項式(4次)で近似しP点の緯度での f_oF2 を求める。経度依存性は考えない。

方法B: 各基準点毎にP点との経度差を時間差(ΔT_n , $n=1, 2, \dots, 5$: P点が基準点nよりも東の場合 $\Delta T_n > 0$)に換算して時刻 $T + \Delta T_n$ での各基準点での f_oF2 をP点の経度での緯度依存性と考え、緯度依存性は方法Aと同じ多項式近似で表し、P点の緯度における f_oF2 を求める。つまり経度依存性を地方時の補正で行なう。

ISS-bモデルとしては、1978年8月~12月(11年周期の太陽活動極大

期直前の期間に相当する)の観測に基づくモデルを用いた。

3. 結果および考察

方法Aと方法Bでは経度補正をやる方法Bの方が良い結果を与えそうに思えるが、意外なことに日本付近では概して方法Aつまり経度補正をやらないほうがよい結果を与える。図1は国分寺と経度だけ±10°の範囲にわたって変えた場所のISS-bモデルfoF2値(以下foF2(ISS-b)と記す)と国分寺のfoF2(ISS-b)から求めたその地点のfoF2との差を遅延に換算して0.1nsecを越える部分を塗りつぶして示す。図1(a)は経度補正をやらない場合で図1(b)は経度補正をやって求めた場合である。経度補正なしの場合の方が広い時刻の範囲でまた経度方向にも広い範囲で0.1nsec以内の誤差におさまっている。図2は稚内の緯度で経度を10°刻みで変えた地点でのfoF2(ISS-b)の日変化を横軸JSTにとってプロットしたものである。図の左上から右下にかけて斜に走る大きなうねりは経度の変化に伴う地方時の変化に対応する変化であるが、丁度稚内近辺の経度±20°ぐらいの範囲では縦方向のうねりが見られる。つまりこの経度範囲では同じ時刻(JST)に一斉にfoF2が大きくなったり小さくなったりすることを意味している。結果として、日本付近では経度補正をやらないほうが概して良い結果を与えることになるがこの現象は日本付近固有のものと言えそうである。

次に緯度方向も含めた適用範囲の評価結果を示すが、その前に実際の電波星観測ではどの範囲の電離層を見ていることになるのかを示しておこう。図3は電離層の高度を300kmとした場合に、稚内、鹿島、沖縄での視線方向と電離層が交差する点の軌跡の地表投影を仰角10°から80°まで10°刻みで示したものである。この範囲と以降(図4)に示される緯度経度の適用範囲の結果から単周波VLBI観測での電離層補正が有効に働くかどうかをある程度検討することができる。図4は5基準点のfoF2(ISS-b)から方法Aで求めた(λ , ϕ)でのfoF2(Cとする)とそこでのfoF2(ISS-b)(Oとする)の差O-Cを遅延時間の誤差に換算して0.1nsecを正に越える部分を++++、負に越える部分を----で示した(JSTの2時間毎に0hから22hまで示している)。これらの図で白く抜けている部分が0.1nsec以内の誤差で電離層補正ができる領域(以下有効領域と呼ぶ)を示していることになるが、明け方と夕方および20h頃この有効領域が狭くなる。これはfoF2に経度方向の勾配が生じているためである。明け方に関しては方法Bの方が有効領域が広がるが、夕方に関しては両方法で大差はなく、20hに関しては方法Bではさらに狭い有効領域となってしまう(図5)。全体的に南程有効領域が狭くなる。図3の観測範囲と比較してみると、稚内-鹿島基線の観測では仰角を20°以上にとればJSTの大部分の時間で有効に電離層補正が可能であるが、沖縄-鹿島基線では沖縄において特に南方向の電波星を観測した場合にはその電離層補正は今回の方法では絶望的である。実際のVLBI観測では天頂より南方向での観測が多くこの点からも国内5ヶ所の電離層データを用いての電離層補正は沖縄には不利といえる。

4. おわりに

単周波数帯VLBIでの電離層補正という問題を、国内5ヶ所で得られた電離層データからどの程度の精度で日本近辺での電離層情報を求めることができるかという問題に焼き直して、ISS-b衛星の観測に基づく汎地球foF2モデルを用いて検討(シミュレーション)した。その結果、経度補正をしなくても緯度方向だけの4次多項式近似を用いての内挿のみで日本近辺での電離層情報が、大部分の時間帯において天頂方向の8GHzでの遅延に換算して0.1nsec以内の差で求められることが明かとなった(---ただし、これはあくまでも電離層が静かな状態での話である)。緯度が南北に離れた場合、言い換えると電離層の緯度依存性を外挿した場合に誤差が大きくなるが、これはやはり経度依存性を考慮しなくてはならないことを意味している。経度依存性をほかの方法で取り込み、特に沖縄以南での近似の精度が高まれば、単周波数帯VLBIの沖縄-鹿島基線の電離層補正に有効となるであろう。今後、地方時依存性以外の経度依存性も考慮にいったモデル化を行ない推定の精度を高めたい。

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] 小林 美佳、皆越 尚紀、西牟田 一三、上敷領 昭五、野尻 英行、「日本付近における電離圏 (TECと等価層厚) の緯度特性」、第385回研究談話会資料、1988、3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.

付録：foF2から伝播遅延時間への換算

1. foF2からTECへの換算：

ここでは下式で表されるAFCRLモデルを用いてTEC [m⁻²]を求める。

$$TEC = 1.24 \times 10^{13} (foF2)^2 [261 + 26 \sin\{(h-9)\pi/12\} + K \sin\{(D-60)\pi/183\}]$$

ここで、foF2：[MHz]

h：地方時

hが6～19のとき K=73

hが5、20のとき K=36

hが21～4のとき K=0

D：年通日

2. TECから伝播遅延(excess delay)：

電離層で被る余分な伝播遅延をΔtとすると

$$\Delta t = 1.34 \times 10^{-7} f^{-2} TEC \quad [\text{sec}]$$

ここで、f：周波数[Hz]

で計算できる。

8GHzで0.1nsec以内の誤差で求めるには上式からΔTECは5×10¹⁰以内の精度で求める必要がある。そのために必要なfoF2の精度をAFCRLモデルの最大値で求めると、下式のようなになる。

$$\Delta foF2 < 5.6/foF2$$

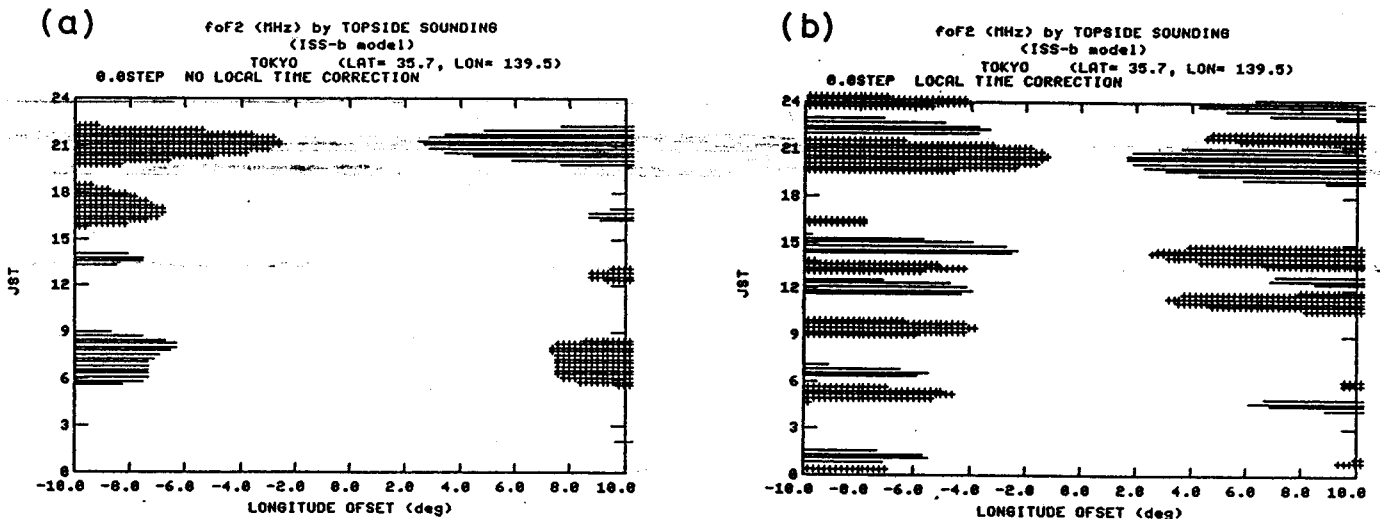


図1. 国分寺でのISS-bモデルfoF2を用いての経度依存性の評価。縦軸はJST、横軸は経度(国分寺を中心として±10°の範囲)を示す。緯度が国分寺と同じで経度だけが異なった地点でのfoF2を国分寺のfoF2から求めるのに(a)経度依存性の考慮なし、(b)経度依存性を地方時の違いとして補正、の2つの場合を示す。誤差が8GHzでの遅延に換算して0.1nsecを正に越える部分を+++++、負に越える部分を-----で示す。

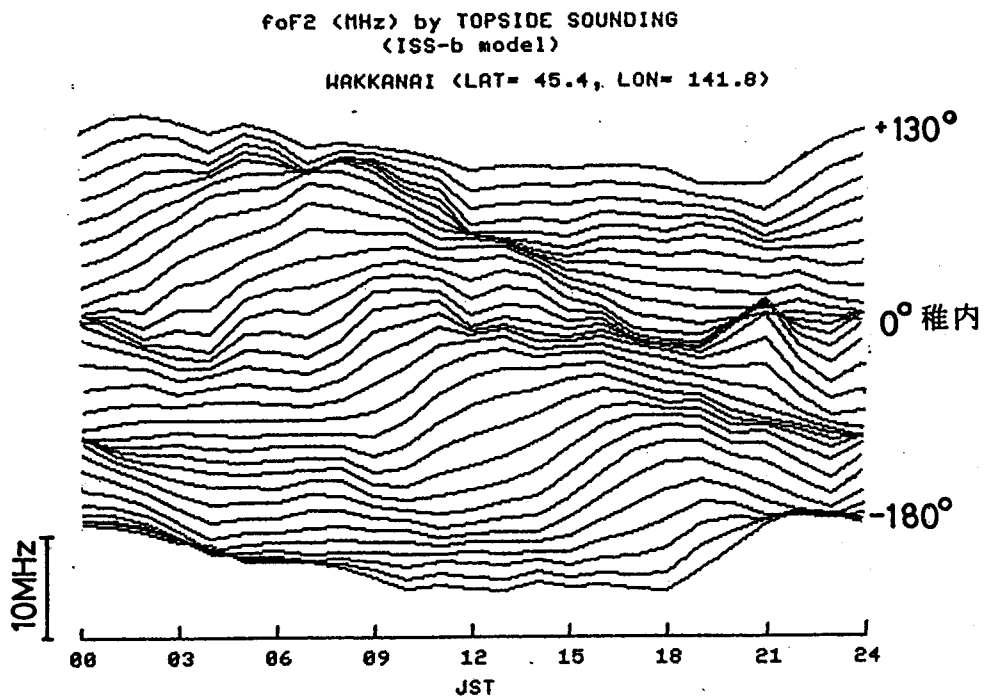


図2. 稚内の緯度でのfoF2経度特性。縦軸はfoF2、横軸はJSTである。稚内と同緯度で経度が -180° 離れた地点から $+130^{\circ}$ 離れた地点まで 10° ごとにISS-bモデルfoF2を計算して示している。

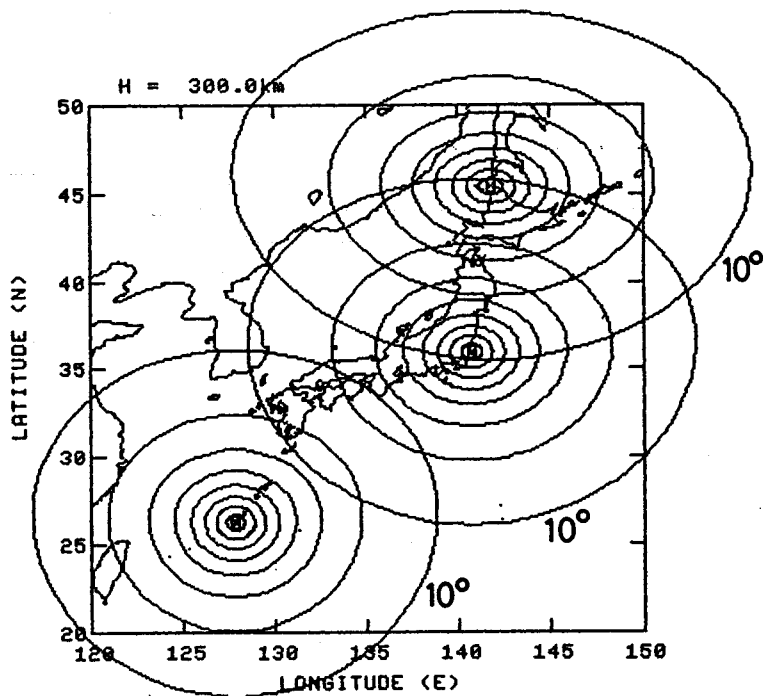


図3. 稚内、鹿島、沖縄における視線方向と電離層通過点の軌跡。それぞれの地点で仰角 10° から 80° まで 10° ごとの軌跡を示す。

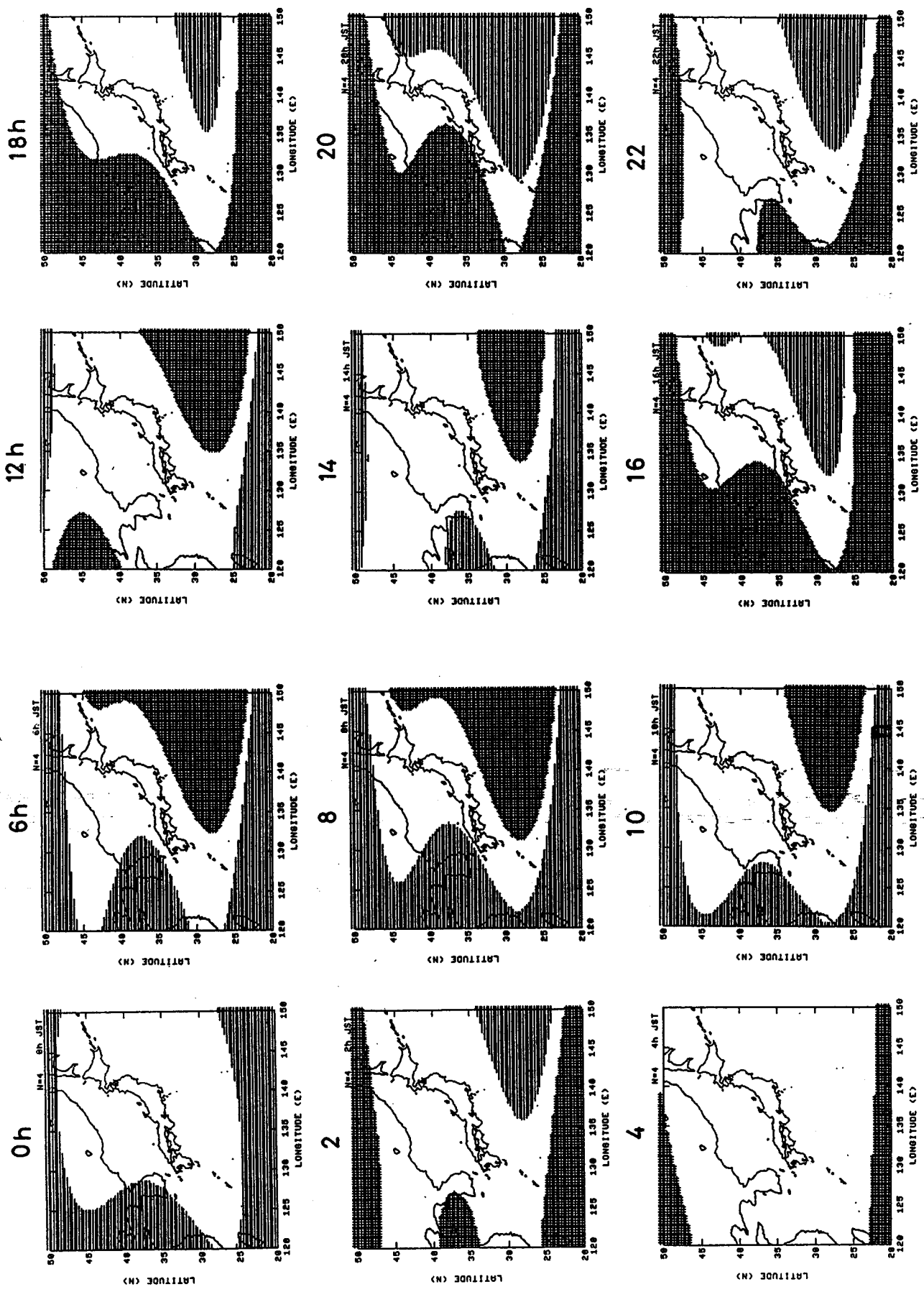


図4. 電離層補正有効適用範囲。国内5ヶ所（稚内、秋田、国分寺、山川、沖繩）のISS-bモデルfoF2を経度補正なしで推定し、実際のISS-bモデルfoF2との差を8GHzとの差を8Chzとの差を換算し、0.1nsec を正に越える部分を+++++、負に越える部分を-----

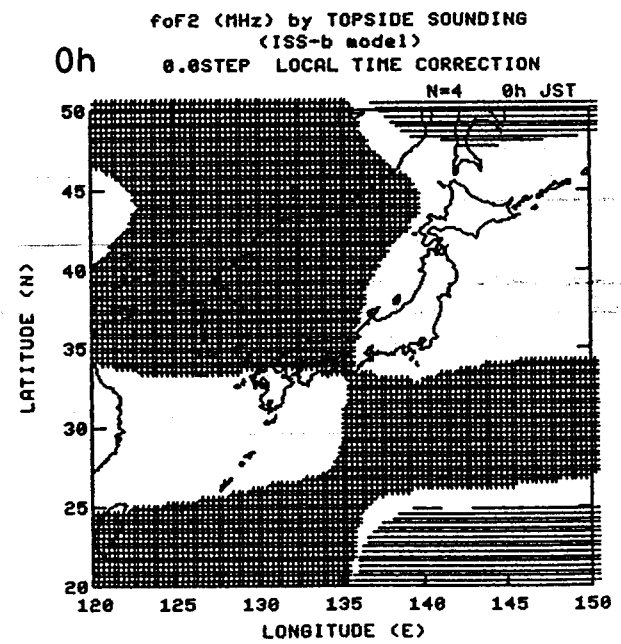
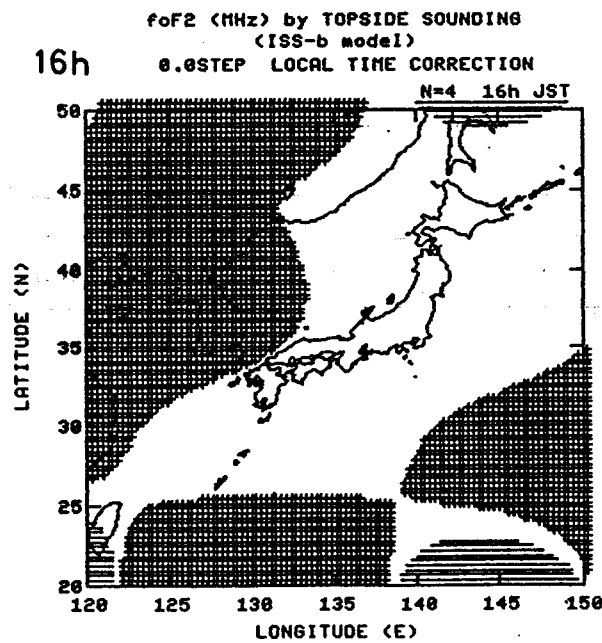
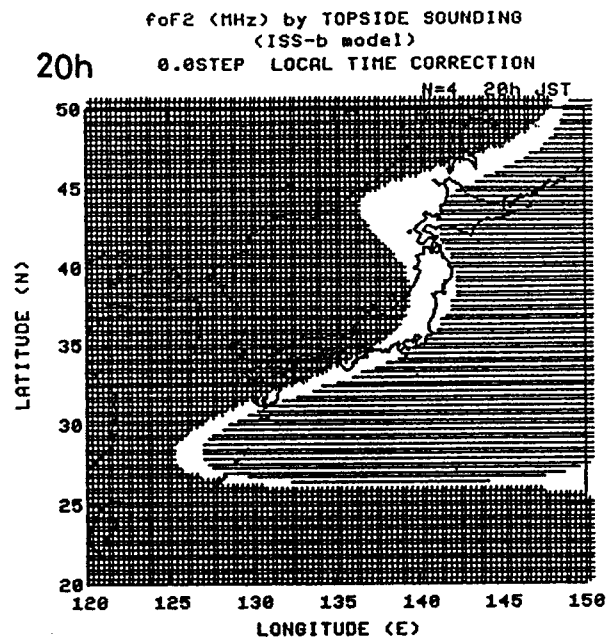
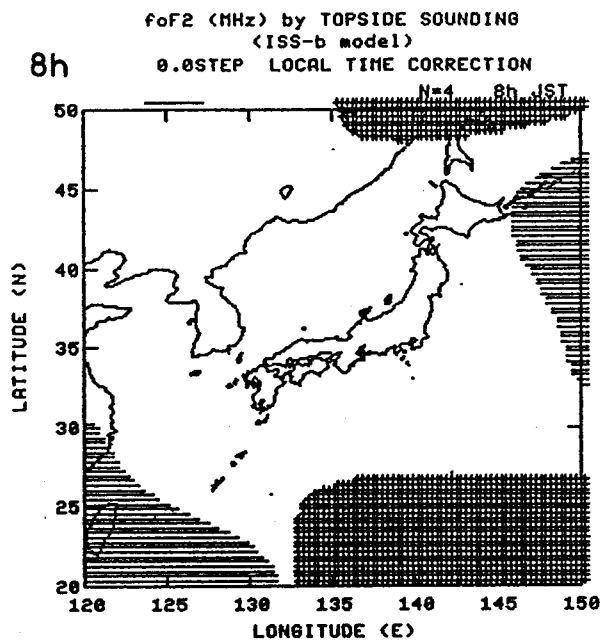


図5. 電離層補正有効適用範囲。経度補正あり（経度依存性を地方時の違いとして補正）。