

平成14年度特別研究 短波帯FM-CWレーダーを用いた 電離層データ解析法の基礎研究

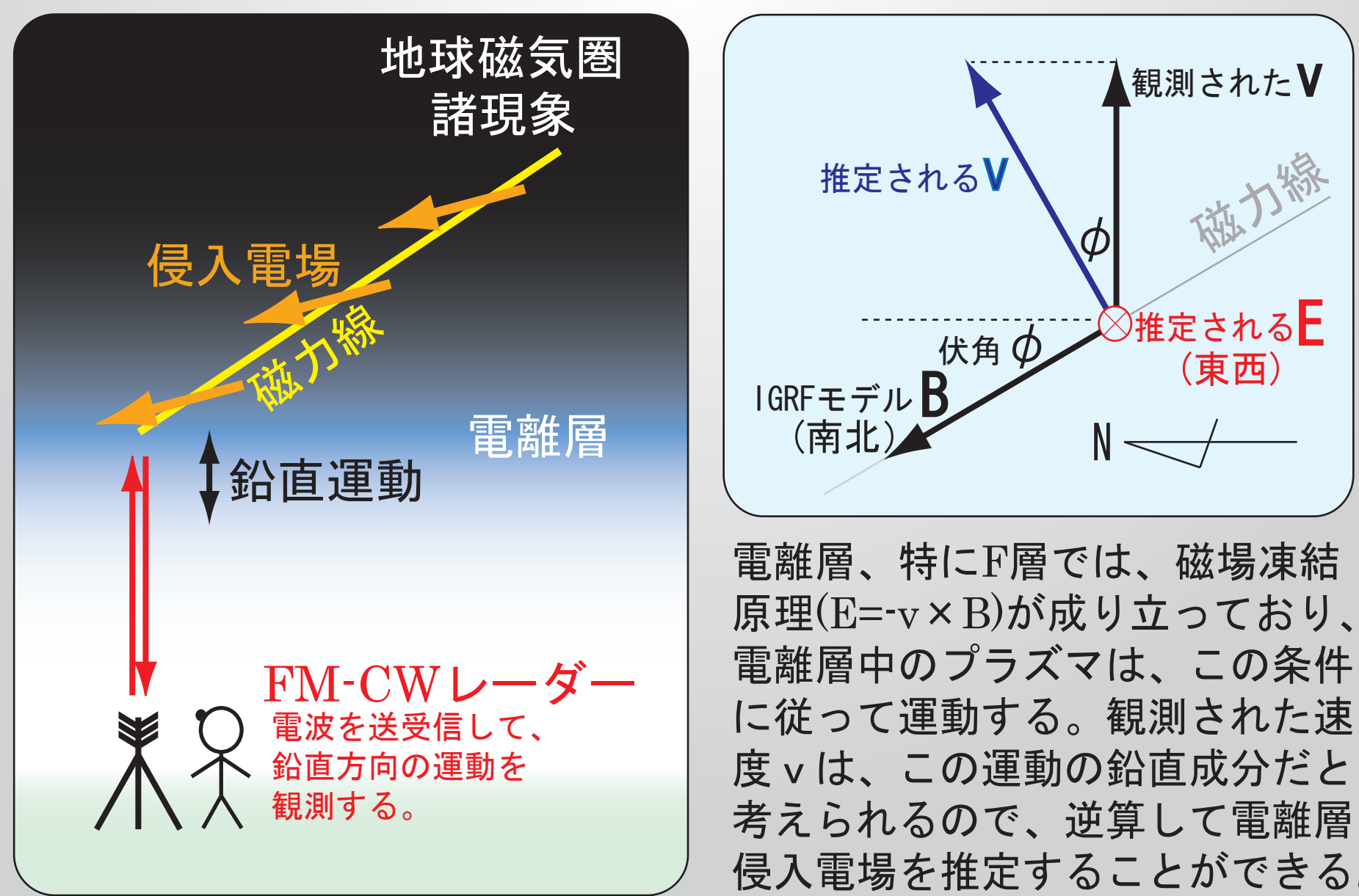
宇宙地球電磁気学研究分野 新原俊樹

Introduction

本研究では、地球を取り巻く電磁気環境の様々な変動について観測的研究を行うため、環太平洋および磁気赤道域を中心として、世界54箇所に地磁気変動観測ネットワークを展開している。地球磁場変動を引き起こす原因の一つとして、宇宙空間から地球電離層への電場侵入が考えられている。その電離層侵入電場を観測的に推定する手段として、FM-CW(Frequency Modulated Continuous Wave)レーダーの開発研究が行われてきた。

本研究は、FM-CWレーダーの基本原理解、電離層電場推定の数学的理論を理解することを目的として、過去になされたFM-CWレーダーの研究論文([Barrick,1973],[石原,2001],[森,2001])のレビューを行ったものである。

今回は、このFM-CWレーダーを用いて“目に見えない電離層をどうやって観測するのか?”について、またこれまでに確立された電離層電場推定法について紹介する。さらに、この電離層電場推定法において議論すべき点(竹生,1982)についても触れていきたいと思います。



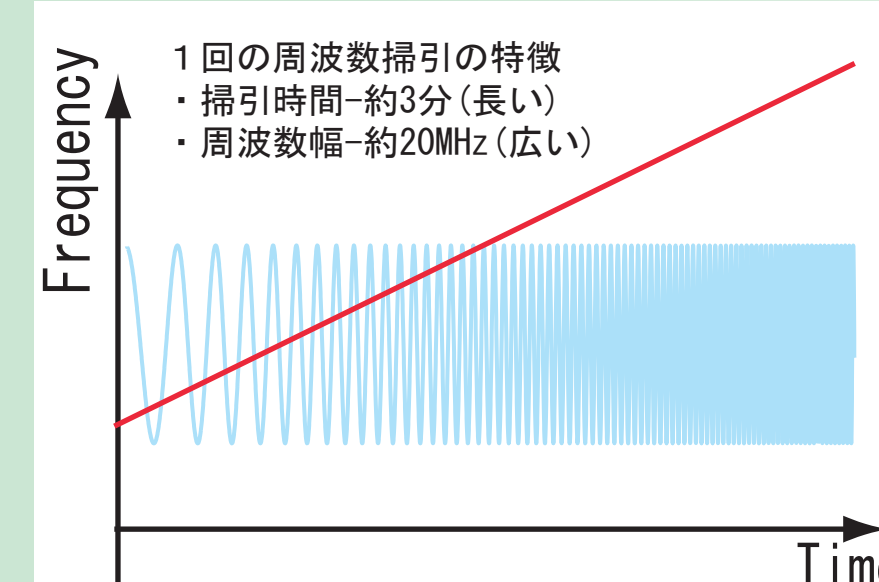
FM-CWレーダーとは?

“Frequency-Modulated Continuous Wave Radar”

FM変調方式で周波数を変化させながら連続的に電波を送信し、電離層から跳ね返ってくる反射エコーを受信して、電離層の高度・移動速度を観測、ひいては電離層電場を推定することができるレーダーである。目的に応じて、2つの観測モードを持っている。

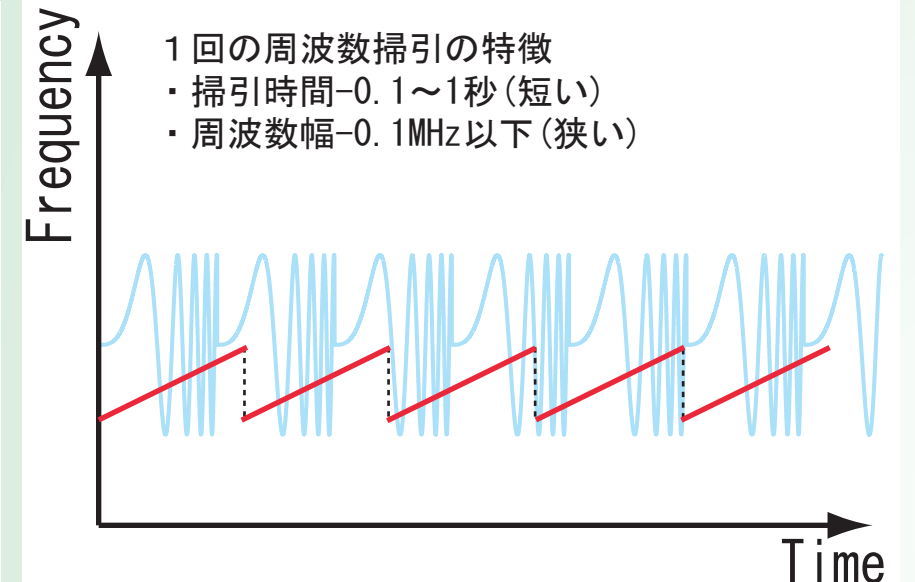
1. イオノゾンデモード

様々な電子密度を持つ電離層の高度分布を得る。(イオノグラム)



2. ドップラーモード

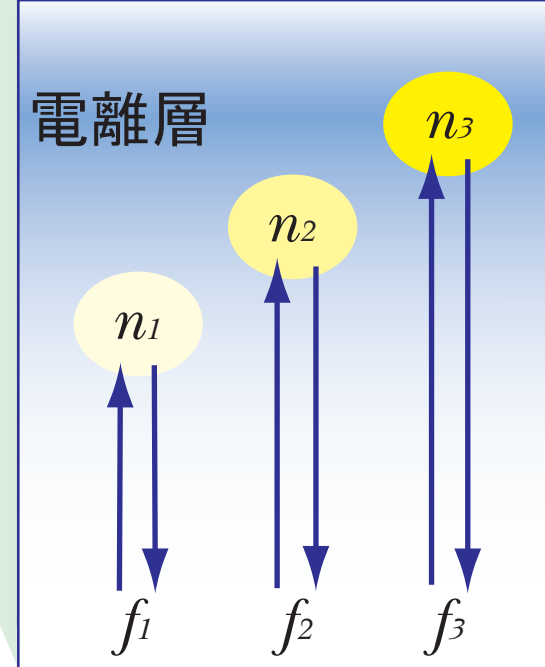
ある一定の電子密度を持つ電離層の高度と、その詳細な時間変化を得る。



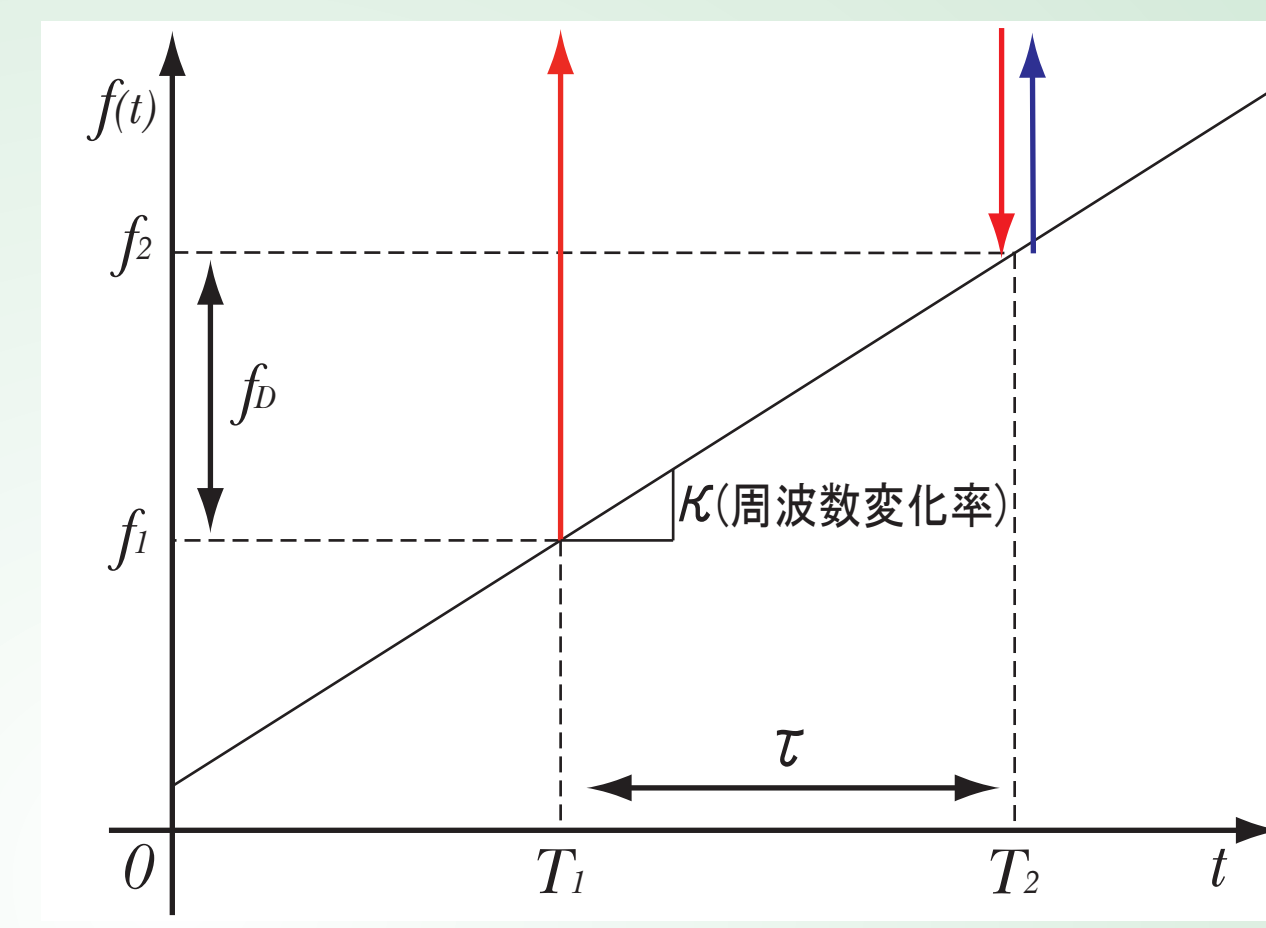
電離層のような“冷たいプラズマ”の中に電波を伝搬させると、その周波数が電子プラズマ周波数と一致するところで反射する性質がある。(アップルトン・ハートレーの式) また、電子プラズマ周波数は電子密度に依存して変化するので、電波の送信周波数と、はね返った場所における電離層の電子密度には以下のような対応関係がある。

$$f = 8.98 \sqrt{n_e} \quad f: \text{送信周波数 [Hz]} \quad n_e: \text{電離層中の電子密度 [m}^{-3}\text{]}$$

- 送信電波の周波数が、反射点の電子密度に対応している。
- 電離層は高度によって電子密度が異なるので、
- 送信周波数の幅が広いほど、電離層の高度分布を観測できる。



FM-CWレーダーにおいて、電離層の高度情報は、送信電波と受信電波との周波数差 f_b から得ている。



ある時刻 T_2 で、周波数 f_2 の電波を送信すると同時に、周波数 f_1 の電波を受信し、その周波数差 $f_b (= f_2 - f_1)$ がわかると、 $f_b = \kappa \tau$ より、周波数 f_1 の電波が電離層往復にかかる時間 τ が求まり、

$$R = \frac{C \tau}{2} \quad (C \text{は光速})$$

より、高度情報Rを得る。

目に見えない電離層が観える!

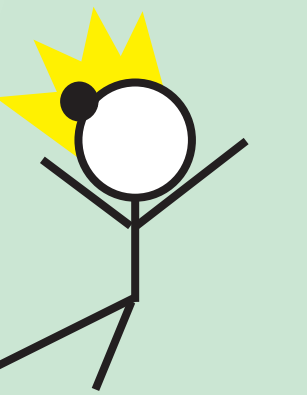
実際は、受信電波の周波数 f_1 を直接観測することはできず、単純に $f_b = f_2 - f_1$ とはできない。実際に得られた1次データは、送信電波と受信電波とを掛け合わせて、LPF(Low Pass Filter)を通したもので、n回目の掃引で得られるエコーは、

$$x_{D_n}(t) = A \cos[\phi_{D_n}(t)] \quad (0 < t < T)$$

に近似できる。このエコー $x_{D_n}(t)$ の位相の中に、

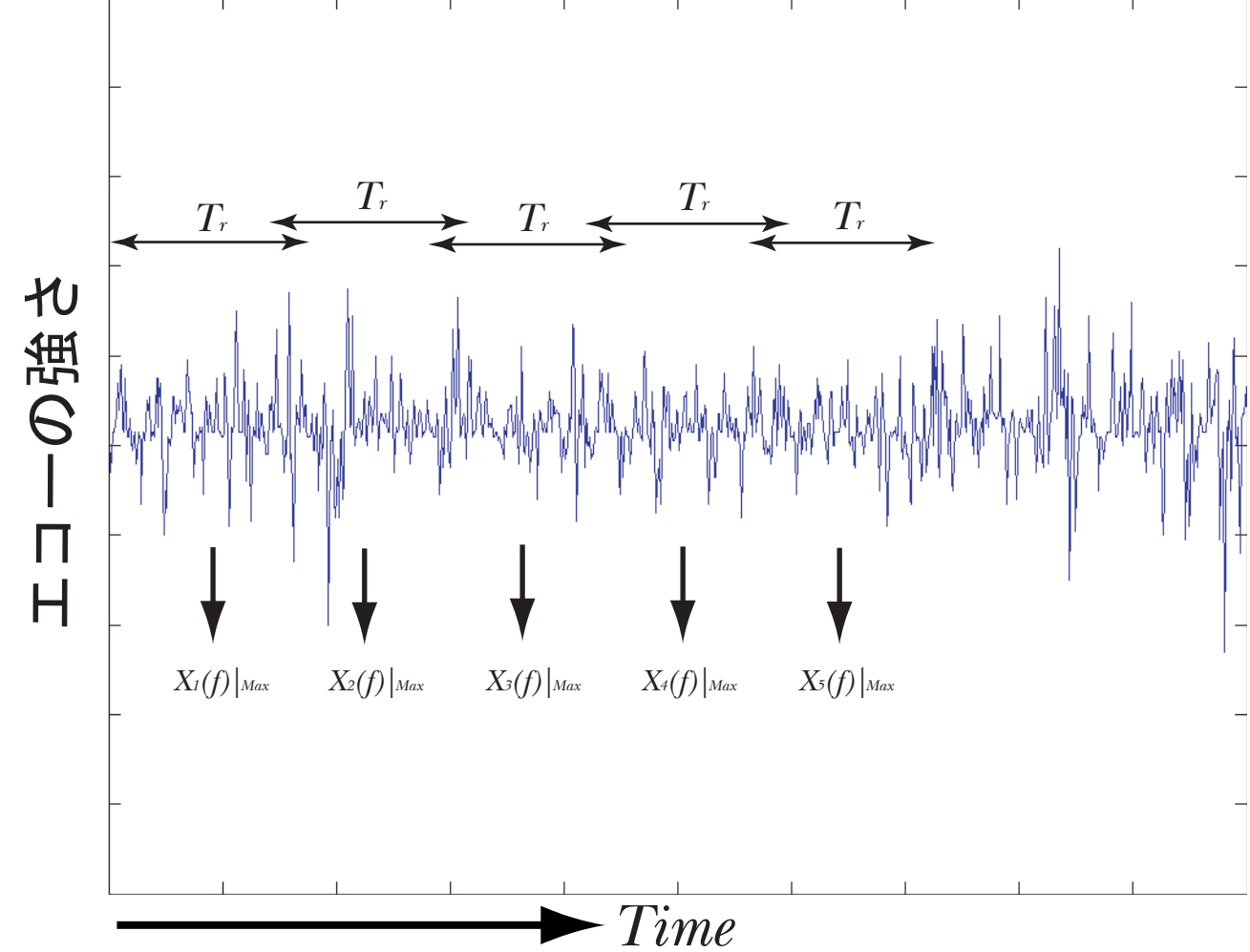
$$f_{D_n} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_{D_n}(t)}{dt} = \frac{2\kappa R}{C}$$

という形で周波数差の情報が含まれている。エコー $x_{D_n}(t)$ をスペクトル解析することで周波数差 f_b を得る。



"DoubleFFT"による電場推定

FFT(1回目)



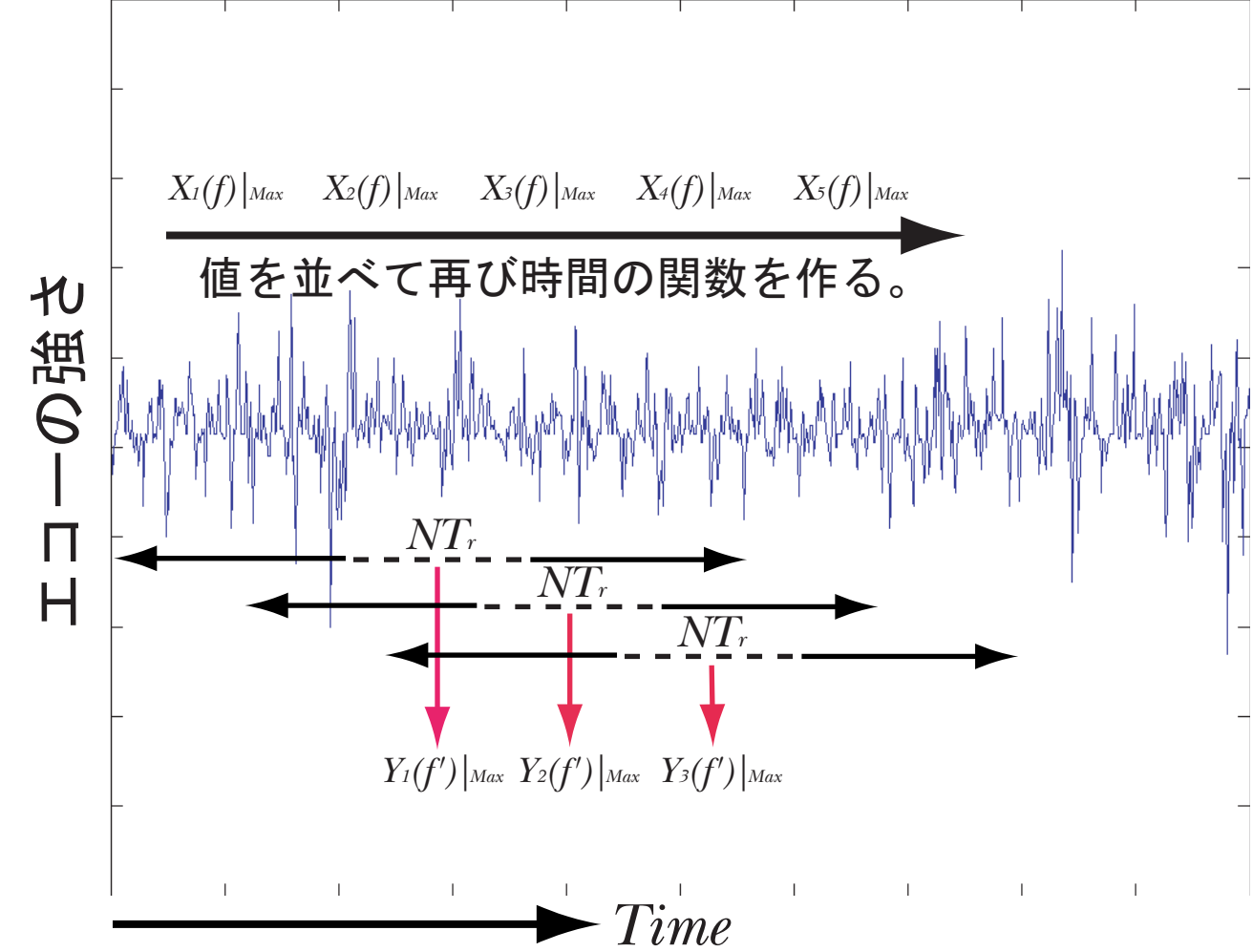
ある一定の時間幅で一次データを区切り、各々についてフーリエ変換する。すると、各Windowに対するスペクトル $X_n(f)$ が得られる。このとき、各Windowの $X_n(f)$ が最大となるときに f に高度情報が含まれている。

n番目の区間におけるエコー $x_{D_n}(t)$ をフーリエ変換すると、そのスペクトル $X_n(f)$ は、

$$X_n(f) = \int_0^{T_r} x_{D_n}(t) e^{-i2\pi f t} dt = A \frac{\sin[\pi(f_{D_n} - f)T_r]}{\pi(f_{D_n} - f)T_r} e^{i2\pi f_0 \frac{2v}{C} n T_r}$$

ここで、 $|X_n(f)|$ が最大をとるときに f が、 $f = f_{D_n}$ という周波数差を示す。

FFT(2回目)



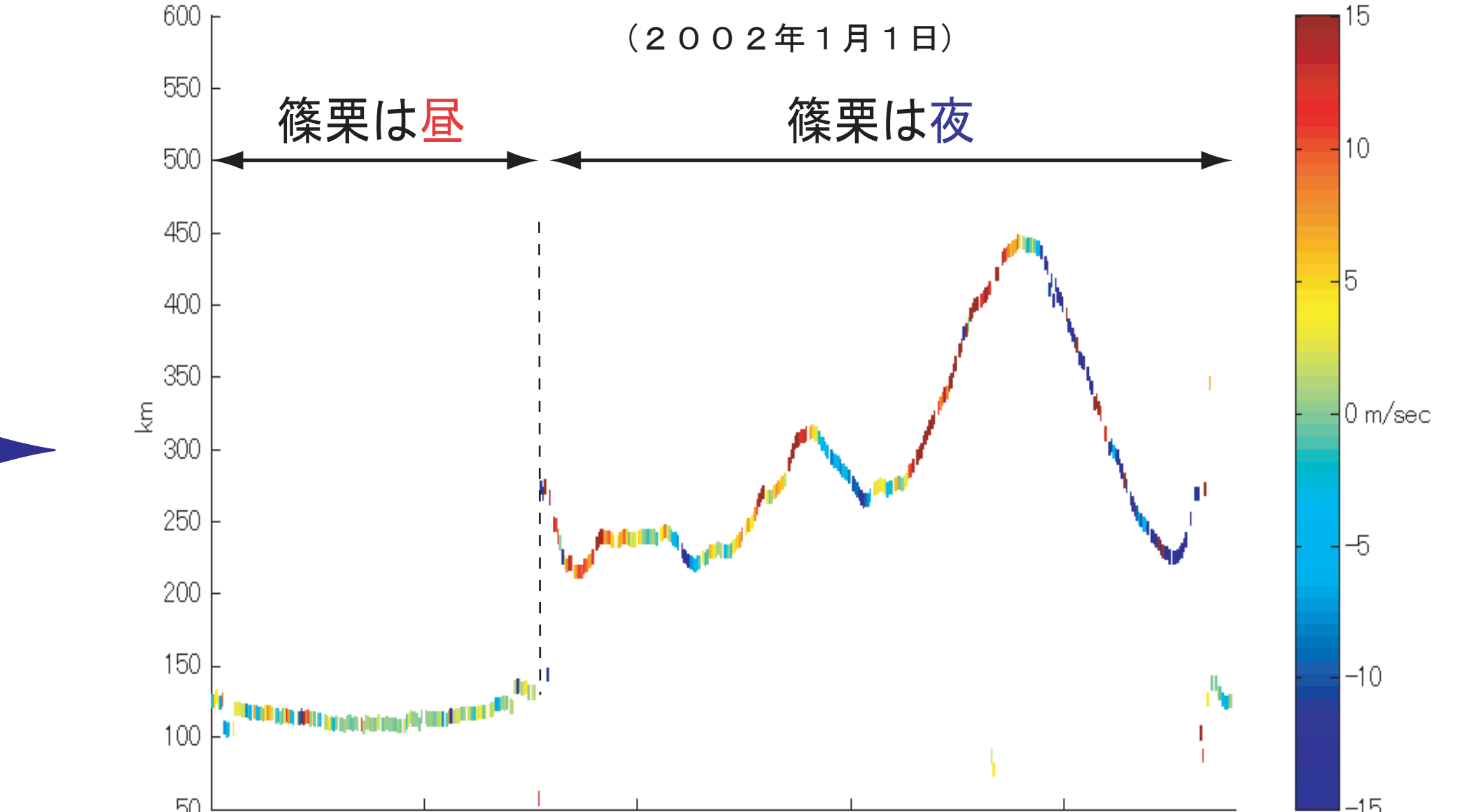
各Windowの $X_n(f)$ を並べてできる新たな時間の関数をさらにフーリエ変換する。すると、各Windowに対するスペクトル $Y_n(f)$ が得られる。このとき各Windowの $Y_n(f)$ が最大となるときに f に速度情報が含まれている。

nは区間の数(回)、 T_r は1区間あたりの時間(s/回)より、 nT_r の次元は(s)になる。そこで、 $nT_r = t_0$ において $X_n(f)$ を時間の関数とし、2回目のフーリエ変換をかけると、

$$Y_n(f) = A \int_0^{nT_r} e^{-i2\pi f_0 \frac{2v}{C} t_0} e^{-i2\pi f t_0} dt_0 = A' \frac{\sin[\pi(f_0 \frac{2v}{C} - f)nT_r]}{\pi(f_0 \frac{2v}{C} - f)nT_r}$$

ここで、 $|Y_n(f)|$ が最大をとるときに f が、 $f = f_0 \frac{2v}{C}$ という関係式を満たし、ここから速度情報を得る。

"DoubleFFT"によってドップラーモードから得た電離層の高度・速度変化の1日プロット



2.5MHzの周波数では、昼間はE層が観測される。夜間は電子密度の低下によってE層が消滅し、より高度のF層が観測される。

今後の展望

今後、FM-CWレーダーを用いた研究テーマとして、

地上磁場観測ネットワークで得られる磁場データとの比較研究の展開。

“電離大気の密度変化”や“中性大気が電離層に及ぼす影響”も視野に入れた電離圏環境の、更なる理解。

FM-CWレーダー多点観測の本格化に備えた、電離層観測の基礎開発研究の更なる推進。

電離層を動かすその他の要因として、

- 電子密度の変化
 - 1-1. 太陽放射による密度変化
- 中性大気波動による変化

これらの要因から、電離層電場による電離層の変化を見極める事が、今後の課題である。

イオノゾンデモードから得た電離層の電子密度ごとの高度分布(イオノグラム)

(2001年10月7日0時)

