

# ポーカー・フラットにおけるMFレーダー差分吸収法で推定される電子密度と銀河雑音吸収の比較研究

## *A Comparative Study of the Electron Density Estimated with MF Radar DAE Method and Cosmic Noise Absorption at Poker Flat, Alaska*

川村誠治 森 弘隆 村山泰啓

KAWAMURA Seiji, MORI Hirotaka, and MURAYAMA Yasuhiro

### 要旨

中波帯電波(MF)レーダーは、中層大気上部の水平風速を測定する以外に、差分吸収法により電離圏D領域の電子密度を推定することもできる。中波から短波帯の電波を用いて電子密度を推定するこの手法は、1950年代に提唱され1970年代に確立したが、現在に至るまで十分な検証は行われておらず、改良もほとんど行われていない。本稿では、MFレーダーによる電子密度推定法の検証の一つとして、アラスカ・ポーカーフラットのMFレーダーで推定された電子密度と、同じ観測敷地内に設置されたイメージングリオメータによる銀河電波吸収(CNA)を比較し、その結果を報告する。

The method to estimate electron density from partial reflection of medium or high frequency radio waves from the ionospheric D-region was proposed in 1950s and established in 1970s. This method, which is applied for MF (medium frequency) radar observations, is called Differential Absorption Experiment (DAE), and is now used without significant improvements though many years have passed. In this paper, we compare the electron density from MF radar and Cosmic Noise Absorption (CNA) from imaging riometer, both instruments are installed at Poker Flat, Alaska. The accuracy and validity of electron density estimated with the MF radar are discussed.

### 【キーワード】

MFレーダー, 電子密度, 差分吸収法, 銀河雑音吸収, 電離圏D領域  
MF radar, Electron density, Differential absorption experiment, Cosmic noise absorption, Ionospheric D region

## 1 はじめに

電離圏D領域(高度60~90km程度)は、地球大気の一部が電離している電離圏の中でも最下層に位置しており、大気の温度勾配で定義される中間圏と熱圏の境界と重なる領域でもある。この領域は中間圏・下部熱圏(mesosphere and lower thermosphere: MLT)領域とも呼ばれ、その風速変動やイオン化学反応などに未解明な部分が多いため近年盛んに研究が行われている。

この領域の観測には、古くから観測用ロケット

も用いられているが、直接観測であるという強みがある反面、費用が掛かるため頻繁には打ち上げられず、連続観測は困難である。MF(中波)レーダーは、主にこの領域の風を、比較的 low cost で連続的に観測できる有効な手段として広く用いられている[1]。

MFレーダーは、風以外にこの領域の電子密度を推定することも可能である。中波から短波帯の電波を用いて電離圏D領域の電子密度を推定するこの手法は差分吸収(differential absorption experiment: DAE)法と呼ばれ、1950年代に提唱

された[2]。1970年代までに多くの研究が行われて一定の発展を見た本手法は、当時のハードウェア技術や科学的知見の限界のためその後下火となり、十分な検証が行われることなく現在に至っている。

電離圏 D 領域の電子密度は、この領域のイオン化学過程とも密接にかかわり、太陽活動の地球大気への影響を調べる上でも重要なパラメータの一つである。本研究では、MF レーダーによるより確かな電子密度推定手法を確立することを目標に、米国アラスカ州ポーカー・フラットの MF レーダーで観測された電子密度と、同じ観測敷地内に設置されたイメージングリオメータによる銀河雑音吸収 (cosmic noise absorption : CNA) との比較検証を行う。イメージングリオメータが観測する CNA は、銀河雑音が主に電離圏 D 領域を通過する際に電子によって吸収される度合いを表しており、電離圏 D 領域の電子密度を代表する値と考えることができる[3]。この値との比較により、MF レーダー差分吸収法による電子密度の妥当性について議論する。

## 2 MF レーダーによる電子密度推定法

本節では、MF レーダーによる電子密度推定手法である差分吸収法について説明する。プラズマ中の電波は、その偏波の向きによって O モード (正常波) と X モード (異常波) の二つのモードに分かれて伝搬する。差分吸収法は、モードの違いによって電離圏を伝搬する電波の振幅の減少度合いが異なることを利用して電子密度を推定する。

電波を天頂方向に発射し、ある高度  $h$  で反射してきたものを地上で受信する場合を考える。電界の振幅を  $A$ 、ある高度での反射係数、吸収係数をそれぞれ  $R$ 、 $k$  とし、各モードの違いを添え字で表すことにすると、両モードの電波の振幅比は以下のように表すことができる。

$$\frac{A_x}{A_o} = \frac{R_x}{R_o} \exp\left(-2 \int_0^h (k_x - k_o) dh\right) \quad (1)$$

ただし吸収係数  $k$  は、屈折率を  $n = \alpha - i\beta$  とした場合  $k = \omega\beta/c$  で表される ( $\omega$  は電波の角周波数で、 $c$  は光速)。(1) 式の両辺に対数を取り、高度方向の微分を行うことにより、ある高度  $h$  にお

ける電子密度  $N(h)$  を表す次式が得られる。

$$N(h) = \frac{d \left( \ln \frac{R_x}{R_o} \right) - d \left( \ln \frac{A_x}{A_o} \right)}{2(k_x - k_o)} \quad (2)$$

観測から得られるのは (2) 式右辺の分子第 2 項にある  $A_x/A_o$  であり、その他  $R_x/R_o$  や分母は屈折率の理論計算から求められる[4]。屈折率の計算では、電子と中性大気との衝突周波数が気圧に比例するという仮定を用い、気圧に CIRA-86 モデル[5]を用いている。また地球磁場に IGRF モデル[6]を用いる。(2) 式右辺の分母には電子密度を表す  $N$  が含まれるが、この手法が対象とする高度範囲においては分母の大きさそのものがほぼ一定であることが知られており[2]、この仮定に従って右辺の  $N$  には一定値を用いている。

## 3 観測及びデータ

本研究で用いる測器は、情報通信研究機構がアラスカ大学との共同研究で米国アラスカ州ポーカー・フラット (北緯 65.1 度、西経 147.5 度) に設置・運用している MF レーダー[7] とイメージングリオメータ[3] である。

ポーカー・フラット MF レーダーの主要諸元を表 1 に示す。中心周波数は中波帯の 2.43 MHz であり、長さ  $27 \mu s$  のパルスを用いているため高度分解能は約 4 km である (オーバーサンプリングにより 2 km ごとにデータ取得)。FCA (Full Correlation Analysis) による風観測 2 分と DAE による電子密度観測 1 分を交互に行っているため、得られるデータの時間分解能は 3 分である (2004 年 8 月からは流星風観測モード (2 分) が追

表 1 ポーカー・フラット MF レーダーの主要諸元

Site (Lat., Long.)	Poker Flat, Alaska (65.1 N, 147.5 W)
Frequency	2.43 MHz
Bandwidth	60 kHz
Peak Power	50 kW
Pulse duration	27 $\mu s$
Time resolution	3 min. (5 min. since Aug. '04)
Range resolution	4 km
Sampling interval	2 km
Antenna	4 cross-dipoles (for Tx and Rx)

加されたため、時間分解能は5分となっている)。図1に示すように、1辺170mの正三角形の各頂点と中心の4点にクロス・ダイポールアンテナを四つ設置しており、風観測(FCA)では各受信チャンネル間の相関を取ることで風速を推定している。電子密度観測では、クロス・ダイポールアンテナにより円偏波の向きを切り替えることでOモードとXモードの電波を交互に送信し、振幅比を求める。電子密度観測では各チャンネルの受信信号は合算して使用される。

MFレーダーの観測例として、1998年11月6日のデータを図2に示す。上段からOモード、Xモードの受信強度と推定された電子密度の日変化を示している。横軸は時間を世界標準時(UT)で示しており、9時間引くことでアラスカの地方標準時となる。XモードはOモードに比べて電子密度による吸収を強く受けるため受信強度が弱くなっており、図2の例ではこれらのデータから最大で数百個/cm<sup>3</sup>の電子密度が推定されている。電離圏D領域では、昼間と夜間でイオン化学過程が異なることが分かっている。夜間(この例では2~17 UT程度)と昼間で観測データの高度方

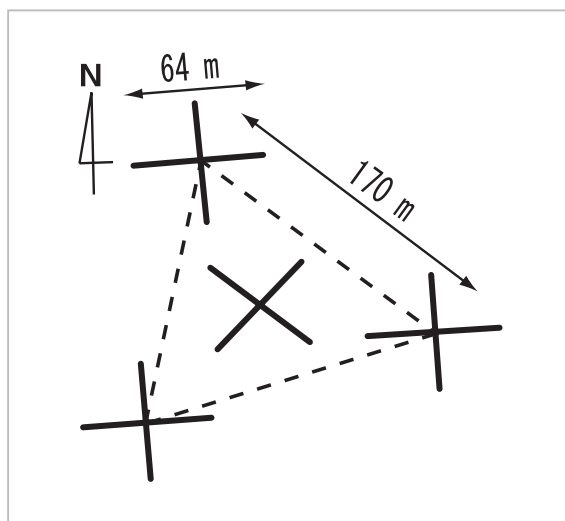


図1 ポーカーク・フラットMFレーダーのアンテナ配置

向の強度分布に違いが見られるのはこのためである。夜間は低高度にほとんど電子密度は観測されないが、昼間は高度60 kmでも電子密度が存在する。図3は、図2に示すデータのうち14 UTにおけるデータの高度プロファイル(1時間値)を一例として示している。右からXモード、Oモード

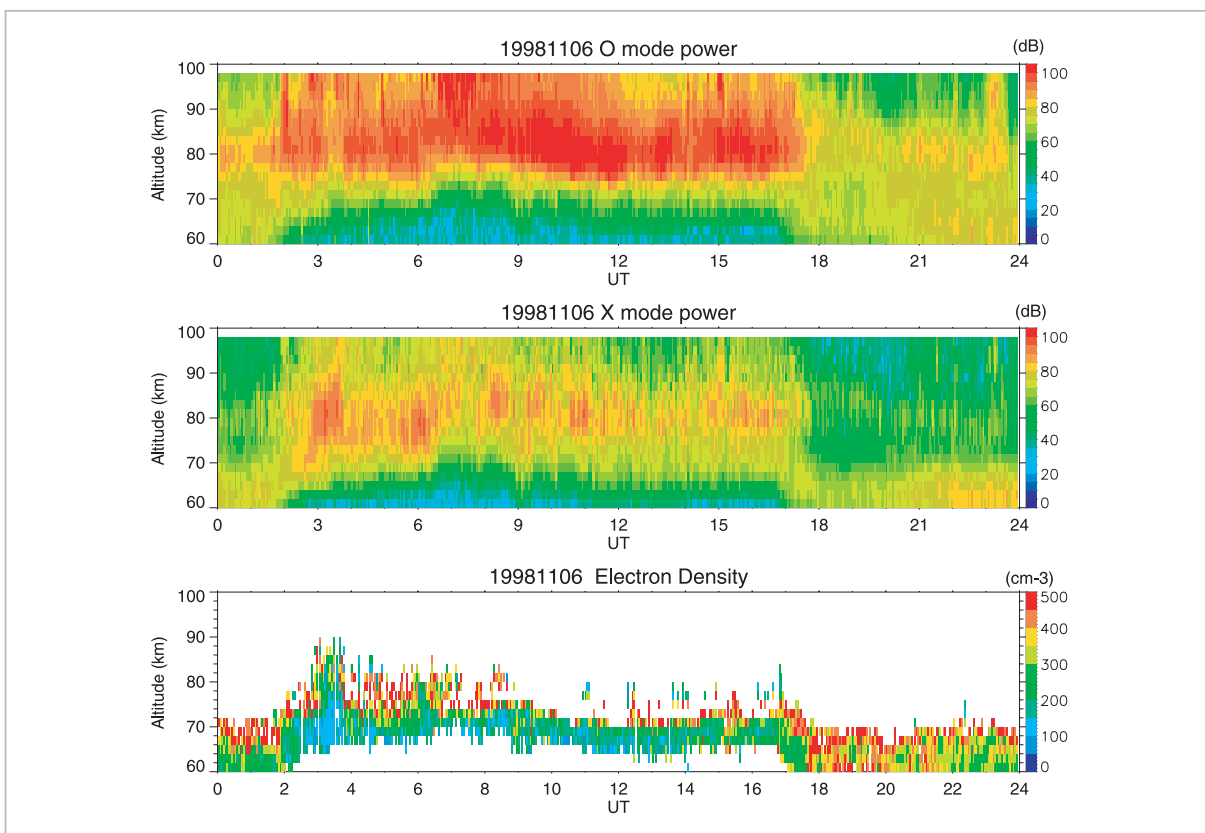


図2 MFレーダーによる電子密度観測結果の一例(1998年11月6日)

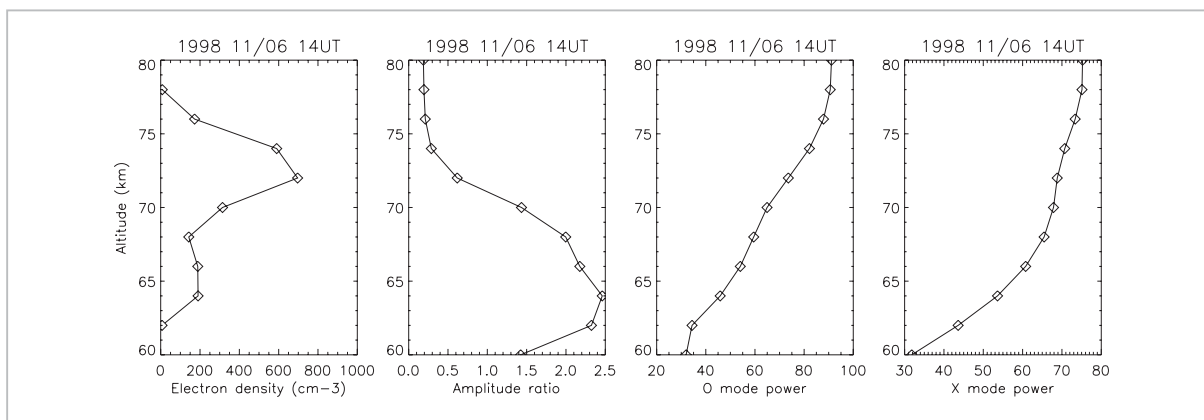


図3 1998年11月6日14 UTにおける観測例(1時間値)

ドの受信強度、各モードの振幅比、推定された電子密度である。

イメージングリオメータは、256本のフェイズトアレイ・クロス・ダイポールアンテナを用いて周波数38.2 MHzの銀河雑音を受信する受動装置である。地磁気じょう乱を伴う宇宙空間(磁気圏)のじょう乱現象などによって宇宙空間から高エネルギー粒子線(電子線など)が地球大気へ降り込んでくると、オーロラの発光やオーロラ爆発(ブレイクアップ)などが起こる。オーロラを光らせる粒子線より更に高エネルギーのものは、より低高度の電離圏D領域の大気を電離させ、D領域付近の電子密度が上昇する(エネルギーが高い粒子ほど深く大気へ侵入するため、電子密度が上昇する高度は粒子の持つエネルギーによって変わる)。銀河雑音はD領域の電子と大気分子との衝突によって吸収されるため、電子密度上昇が起こったときには普段の銀河雑音レベルからの減少という形でCNA(銀河雑音吸収)が観測される。CNAは電離圏D領域の電子密度を代表する値と考えることができる。本研究では天頂方向のみを観測するMFレーダーと比較するため、イメージングリオメータのデータも天頂付近のビームのみを平均した1分値を用いる。

ポーカー・フラットMFレーダーは、1998年10月からFCAとDAEを交互に行う定常観測が行われており、イメージングリオメータは1995年10月に観測を開始している。イメージングリオメータはその後1999年8月から2002年10月までの間欠測していたため、本研究では両測器が同時に運用されていた1998年10月19日から

1999年7月31日までの286日間のデータを用いることとする。

## 4 結果

図4に高度60~80 kmの範囲で24時間平均した電子密度と24時間平均したCNAの季節変化を示す。上段がMFレーダーによる電子密度、中段がイメージングリオメータによるCNAで、エラーバーは平均における標準偏差を表す。下段にはこれらを重ねてプロットし、更にAp指数という地磁気じょう乱の度合いを表す指数(緑線)も併せて示している。それぞれのデータには変動を見やすくするため5日間の移動平均を施している。下段において、三つの量はそれぞれ単位が異なるため、変動の傾向にのみ注目する。まずCNA(青線)とAp指数(緑線)の変動に非常に良い正の相関があることが分かる。CNAは、じょう乱現象に伴って高エネルギー粒子が降り込んできて大気と衝突し、電子密度を上昇させることによって発生する。CNAと地磁気じょう乱指数が良い相関を示すということは、電子密度を含んだ上記因果関係が強く成立していることを示しており、ひいてはCNAがこの高度領域の電子密度を代表する物理量であることを示している。ただしCNAは高度方向に積分された吸収量の指標であり、吸収量を高度方向に分解することはできない。次にCNA(青線)と電子密度(赤線)の変動を比較すると、おおむね両者はよい一致を示していることが分かる。よってMFレーダーによって推定された電子密度の高度方向の積分値は、長期変動におい

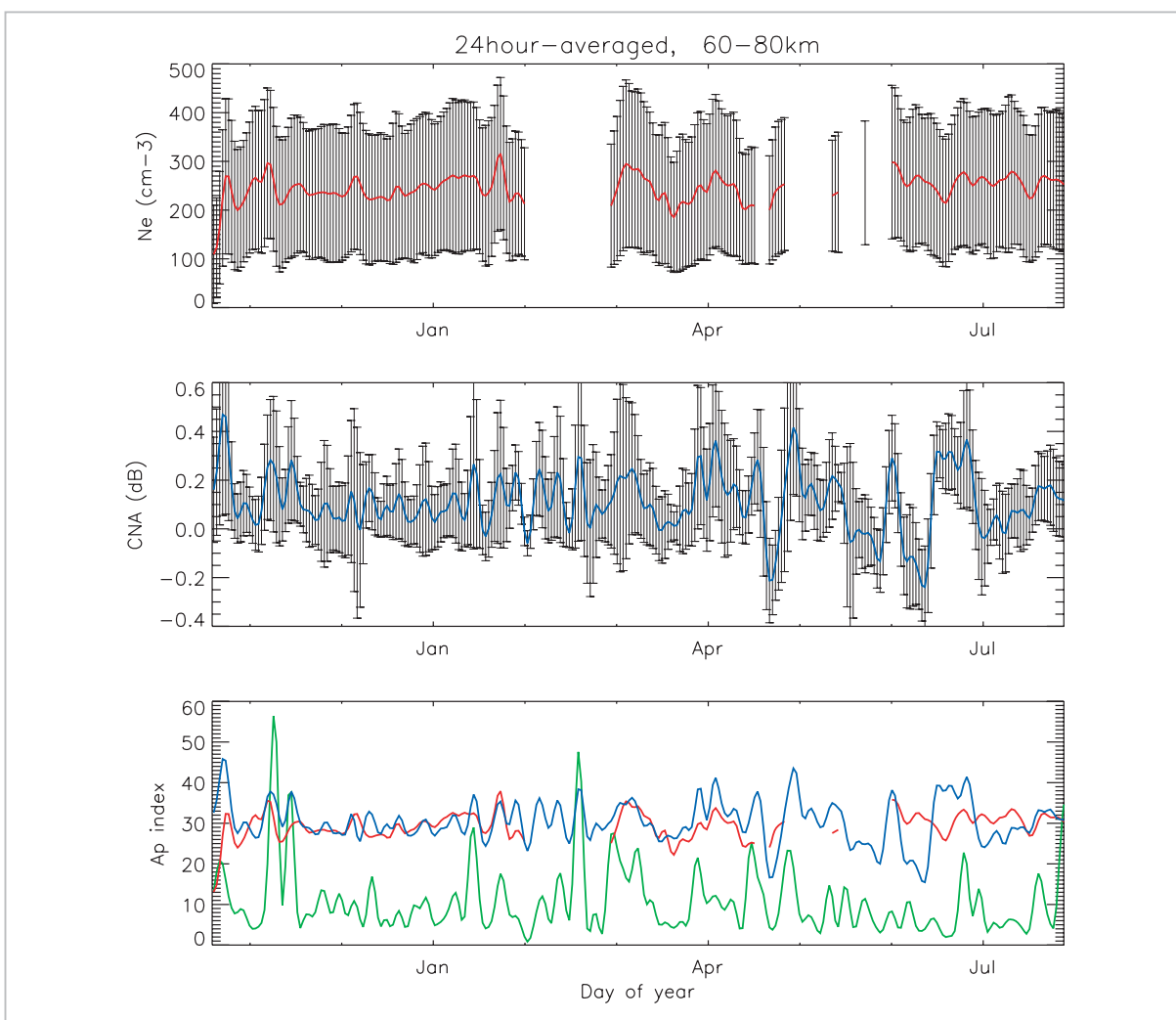


図4 電子密度(赤線)、CNA(青線)、Ap 指数(緑線)の長期変動比較(24時間・高度60~80 km 平均)

て、少なくとも変動成分が実際の電子密度変動を反映したものであると言える。

平均する時間帯や高度範囲を変更しても、電子密度と CNA の変動はおおむね良い正の相関を示すことが多い。図 4 と同じデータで平均の範囲を絞った例を二つ、図 5 と図 6 に示す。共に時間方向の平均は日中のみ(9~15 LT)である。図 5 は電子密度を比較的低高度の 60~64 km の範囲で平均しており、図 6 は比較的高高度の 76~80 km の範囲で平均している。どちらの図でも、平均範囲を絞ったことで標準偏差(上中段のエラーバー)が図 4 よりも小さくなっている。図 5 下段の低高度で平均した電子密度と CNA 及び Ap 指数の比較結果を見る。CNA と Ap 指数は図 4 と同様に良い対応を示している。電子密度と CNA の変動には非常に強い正の相関が見られ、MF レーダー

による電子密度が低高度において実際の電子密度変動を良く代表しているということが出来る。一方図 6 の高高度で平均した電子密度と CNA の比較では様子が異なり、ほぼ全期間を通して電子密度と CNA の変動は逆相関を示している。

最後に電子密度と CNA の日変化の比較例を図 7 に示す。1999 年 3 月 9 日のデータである。上段が電子密度の時間・高度変化であり、中段に高度 60~80 km で平均した電子密度の時間変化を示す。下段は CNA の日変化である。日変化という細かい時間スケールにおいても、電子密度と CNA の変動は良い一致を示している。電子密度は夜間と昼間で観測される高度範囲が違っているが、昼間の低高度における電子密度増加も、夜間の高高度における電子密度増加も、共に CNA には対応する上昇が見られている。

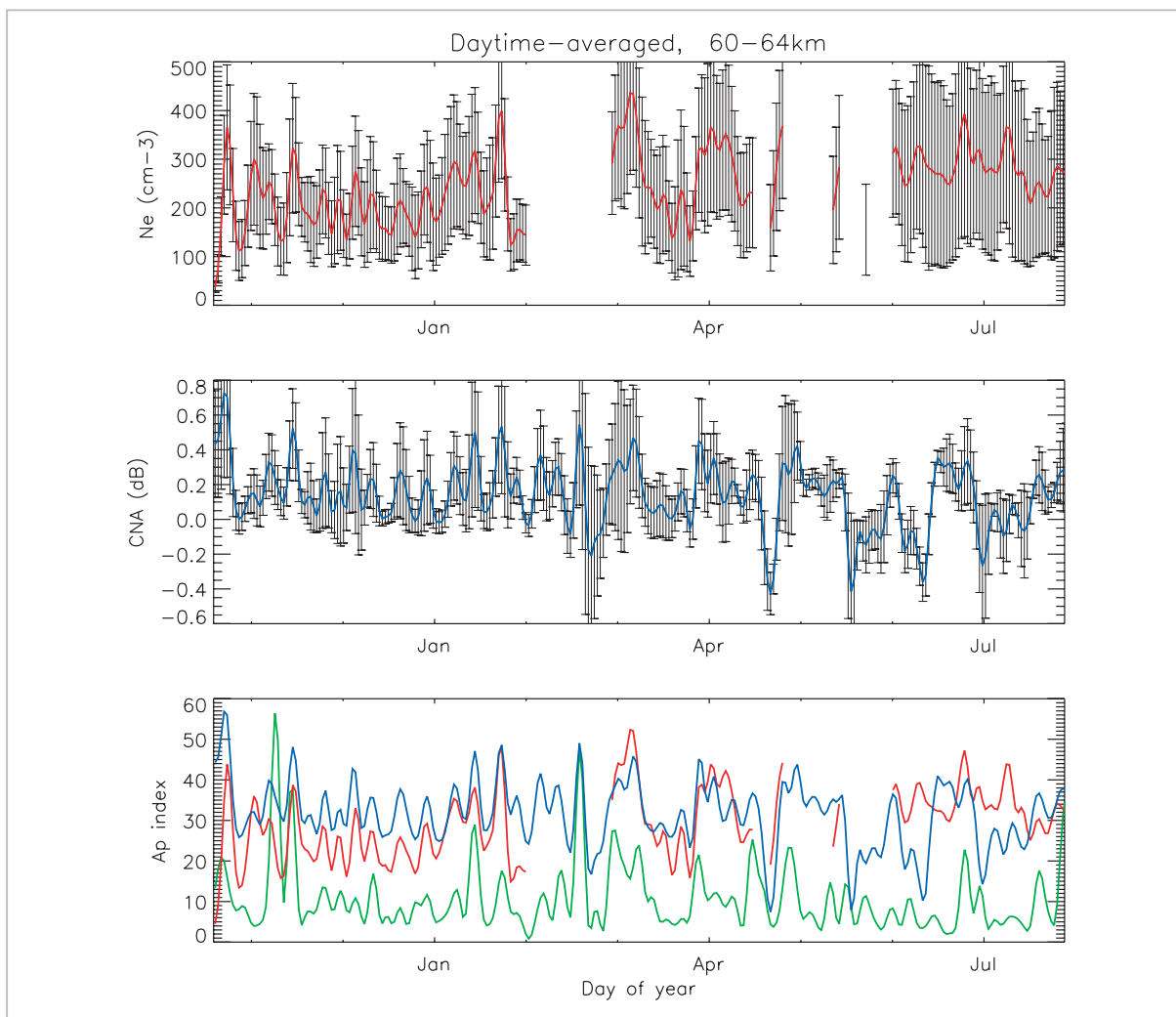


図5 電子密度(赤線)、CNA(青線)、Ap指数(緑線)の長期変動比較(日中・高度60~64 km平均)

## 5 まとめ

中波から短波帯の電波を用いて電離圏D領域の電子密度を推定する差分吸収(DAE)法は、1970年代までに一通りの発展を見たが、その後現在に至るまで十分な検証や改良は行われていない。MFレーダーによる電子密度推定手法として用いられる本手法の検証を目的に、米国アラスカ州ポーカー・フラットのMFレーダーにより推定された電子密度とイメージングリオメータで得られたCNAの比較を行った。長期変動の比較においても日変化の比較においても、両者は比較的良好な一致を示した。特に低高度(60~64 km)で平均した日中の電子密度と日中のCNAの長期変動においては、両者は非常に良い対応を示し、MFレーダーで差分吸収法によって推定される電子密

度が実際の電子密度を反映した値であることが示された。

その一方で高高度(76~80 km)の日中の長期変動では、両者が逆相の変動を示すことが分かった。逆相の変動は物理的に解釈が困難であり、昼間の高高度において差分吸収法による電子密度推定に再検討の余地があることを示唆している。考えられる可能性の一つとして、差分吸収法((2)式の計算)において仮定する条件が成立する高度範囲の限界がある。ポーカー・フラットMFレーダーは比較的広いビーム幅でパルスを発射しており、ビームの広がりによる別高度からのエコーの漏れ込みがある可能性も考えられる。MFレーダーでは層状構造をなす大気からの分反射エコーを仮定しているが、乱流性など他の散乱機構によるエコーが含まれる可能性も考えられる[8]。今後更に

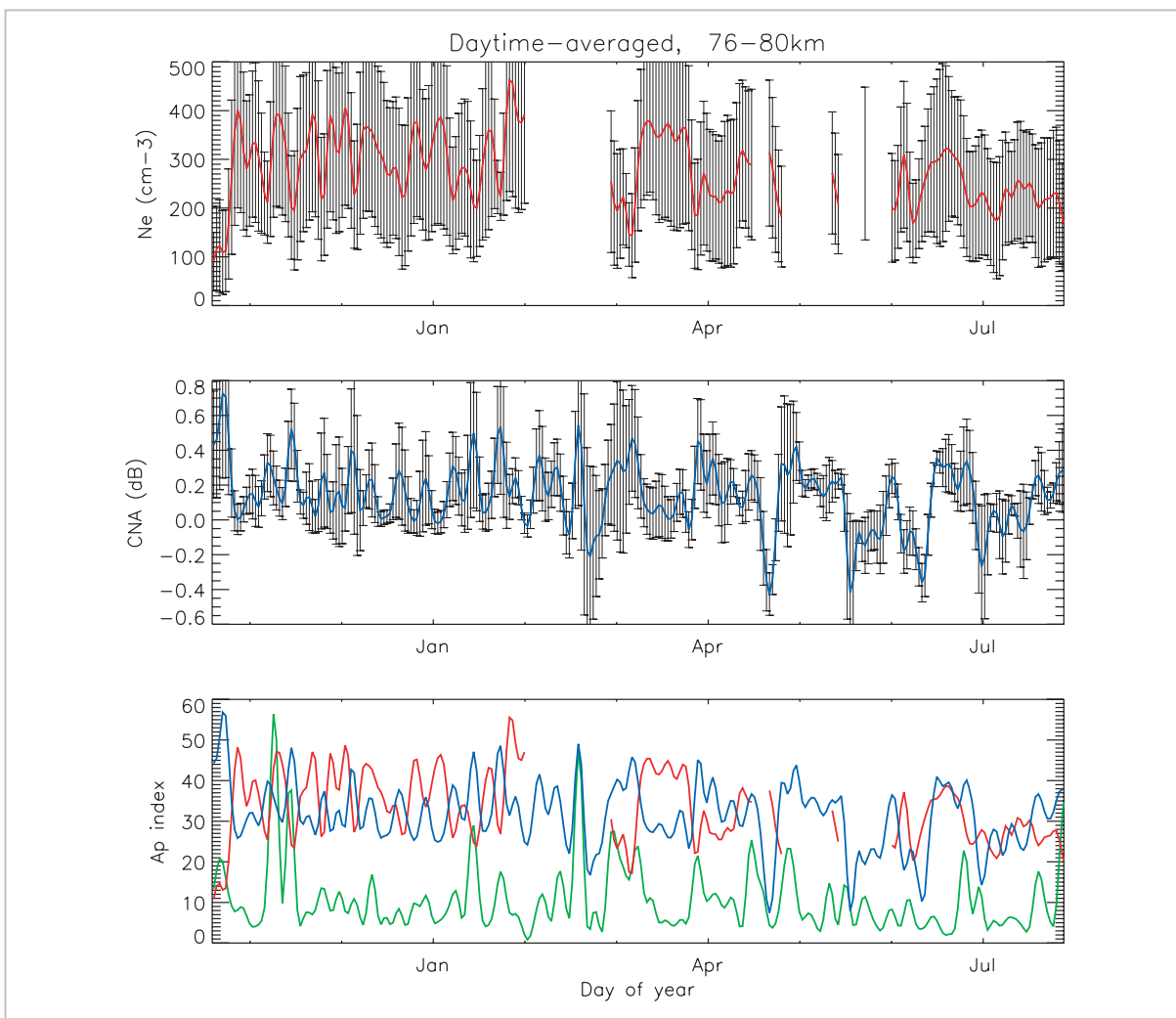


図6 電子密度(赤線)、CNA(青線)、Ap指数(緑線)の長期変動比較(日中・高度76~80km平均)

定量的に検討を進めるためには、Full Wave 計算などによるプラズマ中の電波伝搬のシミュレーションが重要と考えられる。

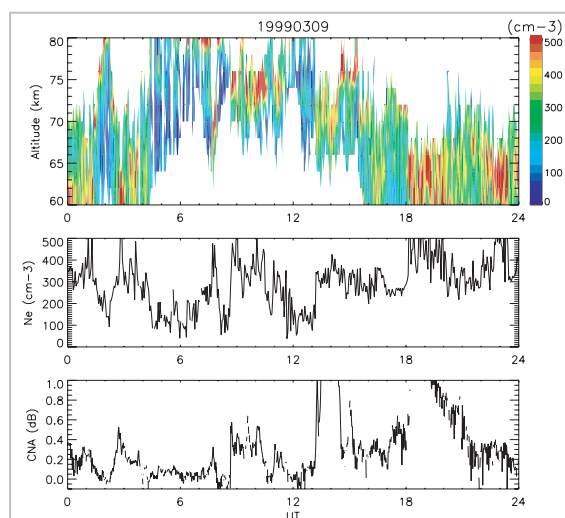
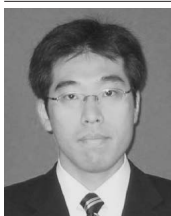


図7 電子密度とCNAの日変化の比較(1999年3月9日)

参考文献

- 1 B. H. Briggs, "The analysis of spaced sensor records by correlation techniques", Handbook for MAP, Vol.13, 166-186, 1984.
- 2 F. F. Gardner and J. L. Pawsey, "Study of the ionospheric D-region using partial reflection", J. Atmos. Terr. Phys., 3, 321-344, 1953.
- 3 Y. Murayama, H. Mori, S. Kainuma, M. Ishii, I. Nishimura, K. Igarashi, H. Yamagishi, and M. Nishino, "Development of a high-resolution imaging riometer for the middle and upper atmosphere observation program at Poker Flat, Alaska", J. Atmos. Sol. Terr. Phys., Vol.59, No.8, 925-937, 1997.
- 4 H. K. Sen and A. A. Wyller, "On the generalization of the Appleton-Hartree magnetoionic formulas", J. Geophys. Res., Vol.65, No.12, 3931-3950, 1960.
- 5 E. L. Fleming, S. Chandra, J. J. Barnett, and M. Corney, "Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geophysical height as a function of latitude", Adv. Space Res., 10, 11-59, 1990.
- 6 C. E. Barton, "International geomagnetic reference field: the seventh generation", J. Geomagnetism and Geoelectricity, 49, 123-148, 1997.
- 7 Y. Murayama, K. Igarashi, D. D. Rice, B. J. Watkins, R. L. Collins, K. Mizutani, Y. Saito, and S. Kainuma, "Medium frequency radars in Japan and Alaska for Upper atmosphere observations", IEICE Trans. Commun., Vol.E83-B, No.9, 2000.
- 8 W. K. Hocking and R. A. Vincent, "Comparative observations of D region HF partial reflection at 2 and 6 MHz", J. Geophys. Res., Vol.87, No.A9, 7615-7624, 1982.



かわむら せいじ  
川村誠治

電磁波計測研究センター環境情報セン  
シング・ネットワークグループ研究員  
博士 (情報学)  
大気物理学、レーダー工学

みず ひろ  
森弘隆

基盤技術研究促進部門基盤技術研究支  
援グループ有期技術員 博士 (理学)  
上層大気物理学



むら やま ひろ  
村山泰啓

総合企画部企画戦略室プランニングマ  
ネージャー (前電磁波計測研究セン  
ター環境情報センシング・ネットワ  
ークグループ研究マネージャー)  
博士 (工学)  
大気リモートセンシング、中層大気力  
学