

4-2 アラスカ大学との共同開発によるイメージング・リオメータデータベース

4-2 *Imaging Riometer Database Developed in Cooperation with the University of Alaska*

森 弘隆 村山泰啓 石井 守 山本真行 ハンス C. ニールセン
MORI Hirotaka, MURAYAMA Yasuhiro, ISHII Mamoru, YAMAMOTO Masa-yuki and
Hans C. Stenbaek-Nielsen

要旨

極域における高エネルギー降下電子が中層大気に及ぼす影響の研究を目的として、アラスカ大学地球物理研究所との共同開発により、通信総合研究所がアラスカのポーカーフラットに設置した256素子イメージング・リオメータによる銀河電波雑音吸収(CNA)の観測データとアラスカ大学地球物理研究所の全天カメラによるオーロラの光学的観測データを基にCNAとオーロラ光の同時観測データを同じ視野と空間分解能で比較できるように編集した「CNA—オーロラ光比較データベース」を作成している。このデータベースはアラスカ観測データ自動処理・表示システム「SALMON」を通してWWWにより外部の研究者にもカラーコントラスト表示の形で簡便に利用することができる。

To study the effects of the high-energy electron precipitations to the polar middle-atmosphere, “The CNA-auroral luminosity comparison database” is compiled in cooperation with the Geophysical Institute of the University of Alaska from the cosmic noise absorption (CNA) data obtained by the CRL’s 256-element imaging riometer at Pokar Flat, Alaska and the auroral image data observed at the same place by the all-sky camera of the University of Alaska. The outside researchers can use this database with the convenient color contour plots by WWW through the Alaska data network system “SALMON”.

【キーワード】

256素子イメージング・リオメータ, 高エネルギー電子, オーロラ光, 銀河電波雑音吸収, 極域中層大気

256-element imaging riometer, High-energy electrons, Auroral luminosity, Cosmic noise absorption, Polar middle-atmosphere

1 はじめに

通信総合研究所はアラスカ大学地球物理研究所との共同研究の一環として、国立極地研究所及び名古屋大学太陽地球環境研究所と共同で256素子イメージング・リオメータを開発し、アラスカ大学付属ポーカーフラット実験場(地理座標65.1°N、147.5°W:地磁気座標65.4°N、100.2°W)に設置して1995年10月から観測を開始した。この観測は1999年8月に落雷事故により中断した

が、この間の3年10か月にわたり連続観測に成功した。現在、この観測データから得られる銀河電波雑音吸収(Cosmic Noise Absorption, 略してCNA)の空間分布とオーロラとの形態学的比較解析を行うことを目的として、アラスカ大学の全天カメラによるオーロライメージの観測データと同じ時間・空間分解能で比較できる「CNA—オーロラ光比較データベース」を作成している。

近年、地球温暖化やオゾン層破壊などの地球

環境悪化の原因解明と効果的な対策が国際的な問題となっているが、それにはまず基本となる太陽活動と地球環境変動との因果関係の十分な理解が必要である。極域では、太陽活動に伴い高エネルギーの電子や陽子などが大気中に降りこみ、大気を加熱したり風を発生させるなど中性大気領域に直接的な影響を及ぼすため、極域は太陽活動に伴う地球環境変動の研究の重要な観測地域となっている。図1は極域における同じエネルギーフラックスの降下電子のエネルギーと電離生成率の高度分布の関係を模式的に示したものである。図中の数字は降下電子のエネルギー (keV) を示している。数keV以下のエネルギーの電子は約100km以上の高度に到達し、大気を電離したりオーロラを発光させたりしてエネルギーを放出する[1]。さらに高エネルギーの数10keV帯の電子は高度100km以下の中層大気上部にまで達してこの領域の大気を電離・加熱し、さらに下層の大気へも様々な効果をもたらして地球環境に少なからぬ影響を与えていると推定される。このエネルギー帯の電子による100km以下の高度領域の電子密度増加は上空から到来する銀河電波雑音の吸収(CNA)を生じるので、このCNAを観測すれば数10keV帯の高エネルギー電子の降りこみの様子を知ることができる[2]。通信総合研究所の256素子イメージング・リオメータはこのCNAの水平面内の空間分布をこれまでにない高い空間分解能で観測することを目的に開発したものである。

以上に述べたように、オーロラ光は主に数keV以下のエネルギーの降下電子により、また

CNAは数10keV帯のエネルギーの降下電子により発生する現象なので、この両観測データを比較することによって広いエネルギー範囲にわたる降下電子のエネルギーや降りこみ領域の時間・空間変化及び降下電子と大気との相互作用に関する様々な情報が得られると期待される。これまでのオーロラの光学観測から高エネルギー電子の降りこみ領域は様々なスケールの空間的構造を伴っていることが知られているが、ボーカーフラットに設置した256素子イメージング・リオメータによるCNAの観測データを用いることにより、天頂方向の水平面内で約11km(高度90km)というかつてない高い空間分解能でのCNAとオーロラ光イメージとの比較が可能になった。そこで、今回CNAとオーロラ光との形態学的な比較研究の基礎資料として、これまでに取得したCNAの観測データとアラスカ大学が同じ期間にボーカーフラットで全天カメラにより観測したオーロラの光学的観測データを基に、同じ時間・空間分解能のCNAとオーロラ光のイメージデータに再構成した「CNA—オーロラ光比較データベース」を作成している。この比較データベースは大容量の数値データであるため通信総合研究所のファイアウォール内のデータファイルに収容されるが、現在開発中のアラスカ観測データ自動処理・表示システム「SALMON」[3]を通して外部の研究者にもWWWにより視覚的な表示形式で簡便に利用できるよう併せて開発を進めている。

2では比較データベースの基となるCNA観測に用いられた256素子イメージング・リオメータ及びオーロラ光観測に用いられた全天カメラの概要を記述し、3では比較データベースの内容と作成手順及び「SALMON」による表示形式について述べる。

2 観測機器

2.1 256素子イメージング・リオメータ

一般にリオメータは銀河電波雑音の中層大気上部の電子密度による吸収(CNA)を測定する装置[4]で、極域におけるオーロラ降下粒子等による電子密度増加現象のモニターとして古くから用いられている。従来は単一の受信アンテナを

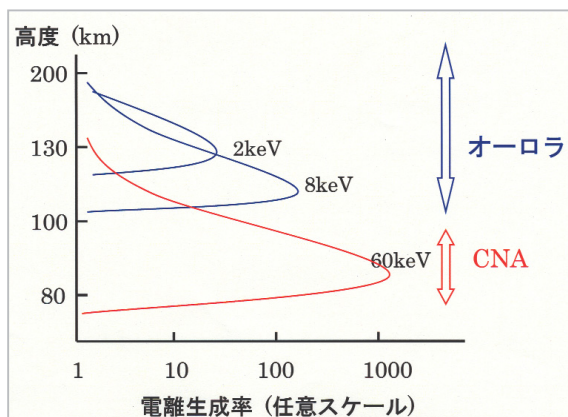


図1 極域の降下電子のエネルギーと電離生成率の高度分布

用いた広い視野の観測を行っていたが、1980年代の後半にRosenberg等により64素子アレイアンテナとバトラーマトリックス[5]を組み合わせたCNAの2次元分布観測装置(Imaging Riometer for Ionospheric Study、略してIRIS)が開発された[6]。通信総合研究所はこのIRISの方式を基本として空間分解能を更に2倍向上させ、受信システムの電子回路を見直すなどの新しい技術開発を行って256素子イメージング・リオメータを世界に先駆けて開発した。

このシステムは銀河電波雑音を受信する256素子アレイアンテナ、受信波の位相合成を行うバトラーマトリックス、16台の受信機及びシステム制御・データ取得用コンピュータシステムから構成されている。銀河電波雑音の観測周波数としては、電波が通過する電離圏プラズマの臨界周波数よりも十分高くかつ人工雑音の少ない帯域の周波数として天文観測用の保護周波数帯域37.75-38.25MHz内の38.2MHzを用いている。

256素子アレイアンテナは、256本の半波長クロスダイポールアンテナを地磁気座標の東西及び南北に平行に16×16の正方形に配列している。グレーティングローブの影響を防ぐためにアンテナ間隔を半波長(3.92m)にとり、全体としてのアンテナの敷地面積は61.6×61.6m²となっている。

これらの256本のアンテナからの銀河電波強度の出力信号は利得約10dBの前置増幅器を通してバトラーマトリックスの256個の入力端子に入力する。バトラーマトリックスはハイブリッド結合器と移相器の組合せによって各アンテナからの入力信号を実時間的に位相合成し、256方向のビーム幅6°のペンシルビームパターンからの受信信号として出力する。隣同士のビームの角度間隔は約7°である。実際には4隅の合計48ビーム分はビームを形成しないため、観測に用いられるビームは天頂角約70°以内の208ビームである。図2はそれらのビーム方向の天頂角及び方位角のプロットである。図中の*印は磁気天頂方向を示す。これらのビームの高度90kmでの水平面内の視野範囲は約400km四方で、天頂付近でのビーム間隔は約11kmである。

バトラーマトリックスからの16×16個の出力信号のうち南北方向の1列の16ビームの信号が

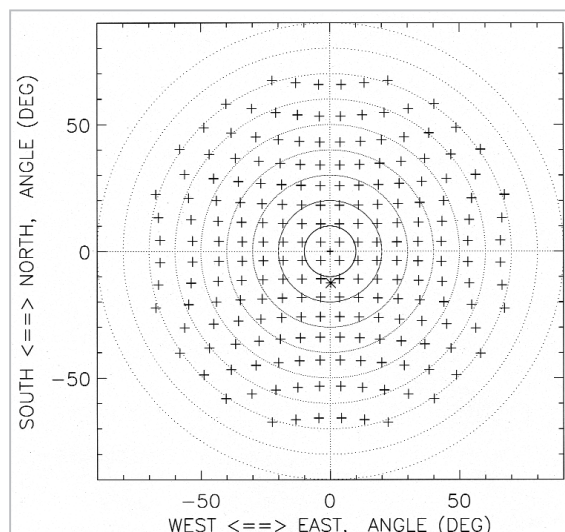


図2 256素子イメージング・リオメータのビーム方向の極座標分布

16台の受信機に入力し、振幅検波されてコンピュータへ送られ、A/D変換されて12ビットのデジタルデータとして記録される。この南北方向のビーム列はコンピュータからバトラーマトリックスに供給されるビーム列切替え信号によって東から西へ順次切り替わる。この切替え信号は1/16、1/8、1/4、1/2sの4種類が選択可能で、最も速い1/16sの場合毎秒1画面の割合で銀河電波強度の2次元分布データが得られる。通常、この最速モードで観測を行っている。

受信機は自動利得制御機能(AGC)を内蔵しており、定期的にコンピュータからの指令により「観測モード」から8段階の雑音温度信号を入力する「校正モード」及び一定の雑音温度信号を入力して受信機の増幅度を調整する「AGCモード」に切り替わる。また、受信機の時定数は10、20、40、80ms、受信周波数帯域は10、30、100、200kHzの中からコンピュータにより設定できる。

これらの観測データはネットワークを用いて通信総合研究所で実時間的にモニターすることにより、システムの動作状態の監視及び観測している現象の現況把握が可能である。

観測データからCNA(dB単位)を求めるには、まず1か月程度の一定期間の観測データを用いてこの期間のビームごとの受信電波強度の静穏時日変化曲線(Quiet Day Curve、略してQDC)を求め、この期間の電波強度の観測値とこのQDCとの比のデシベル値、すなわち10log(電波強度

/QDC)を計算する。

以上がシステムの概要であるが、より詳細は文献[7]に記述されている。

2.2 全天カメラ

アラスカ大学地球物理研究所のオーロラ観測用全天カメラは視野180°の魚眼レンズと高感度の撮像管SIT (Silicon-intensifier Target) カメラで構成されている。このSITカメラはフィルターなしで、オーロラ光の代表的な発光である酸素原子の緑色の輝線(557.7nm)付近で感度が最大となるパンクロマティック (panchromatic) な感度特性を持っている。また、その入出力特性には測定ダイナミックレンジを広げるためのガンマ補正がなされている。ただし、輝度の絶対値較正は行っていない。

観測はポーカーフラットにおいて毎年9月から5月までの期間実施され、観測データはビデオテープに記録されるとともに、1分ごとの観測データが341×243ピクセルのフレームに8ビットのJPEGデジタルデータファイルとして記録される。アラスカ大学では今回のCNAとの比較データベースの作成のために各観測期間ごとに複数の星を用いて「各ピクセルの天頂角・方位角表」を作成した。この表を用いて観測されるオーロライメージの正確な極座標を決定することができる。

3 CNAと全天オーロラ光との比較データベース

3.1 比較データベースの内容

この比較データベースは太陽活動に伴い極域に降りこむ高エネルギー電子の時間・空間変化や極域大気環境への影響をCNAとオーロラ光との2次元的なイメージデータを比較解析して調べることを目的としている。

極域大気環境は時間・空間的に極めて変化に富んだ変動をするので、このような環境を理解するには、個々の現象の解析と合わせてまとめた期間の統計的な解析も重要である。オーロラの光学観測の場合には気象条件などにも影響されるため、有効な観測データ数を確保するためにも長期間の観測データが必要となる。この

ため、今回作成している「CNA－オーロラ光比較データベース」は、アラスカのポーカーフラットにおいて256素子イメージング・リオメータが連続観測を行っていた期間のうち、同じ場所での全天カメラによるオーロラ観測データが存在する1996年1月から1999年5月までの全期間を対象としている。

アラスカ大学のオーロラ全天観測データはデジタルJPEGファイルをネットワークを通して通信総合研究所のコンピュータのデータファイルに取り込み、通信総合研究所内に蓄積されているイメージング・リオメータデータと合わせて3.2に述べる処理を行って比較データベースを作成する。

得られた比較データベースは通信総合研究所内のファイアウォール内に数値データファイルとして構築されるため、外部の研究者が直接利用することはできないが、アラスカ観測データ自動処理・表示システム「SALMON」を通してWWWにより3.3に述べる2種類の視覚的な表示形式で簡便に利用することができる。

3.2 比較データベースの作成手順

2で述べたように、比較データベースの基本となるCNA観測の時間間隔は1秒、空間分解能はビーム間隔の約7°で、オーロラ観測のデジタルデータファイルの時間間隔は1分、空間分解能はピクセル間隔で1°以下である。比較データベースはこのように時間・空間分解能の異なる両観測データの中から同じ時刻の観測データを選び出し、これらのデータを再構成して同じ視野と空間分解能のCNAとオーロラの2次元イメージのデータセットを作成することが目的である。したがって、比較データベースの時間間隔はオーロラの観測時刻に対応する1分ごととし、比較するCNAデータはイメージング・リオメータの毎秒観測データの中からこの観測時刻に1秒以内に一致するデータを選び出してCNAを計算する。また、視野と空間分解能については図2に示されるイメージング・リオメータのビームの空間分布を基準とし、比較するオーロラデータに関しては、まずSITカメラのガンマ補正を取り除いてカメラのスペクトル応答関数を通した実際のオーロラ輝度に比例した輝度に戻した後、

341x243ピクセルのデジタルデータを「各ピクセルの天頂角・方位角表」を参照してイメージング・リオメータの208ビーム方向のオーロラ輝度分布に再構成したオーロライメージを作成する。

このようにして作成された「毎分CNAファイル」と「オーロラ光の再構成イメージファイル」により、時間分解能1分（オーロラの観測時刻に一致）、空間分解能約7°（イメージング・リオメータのビーム間隔に一致）で天頂から視野約70°（イメージング・リオメータの視野に一致）のCNAとオーロラ光イメージの比較データベースが構成される。

3.3 「SALMON」用比較データベース表示形式

「CNA－オーロラ光比較データベース」の数値データは「SALMON」のWWWページに以下の2種類のカラーコントワプロットの表示形式で出力される。

(1) 時間トレンド表示

この表示は天頂付近を通る東西及び南北の各1列の16ビーム方向のCNAと、再構成オーロラ光

強度（相対強度）のUT1-18時の時間変化をカラーコントワ表示でプロットしたものである。図3はその1例を示す。図中の四つのパネルは、上から順にオーロラ光の東西分布、CNAの東西分布、オーロラ光の南北分布及びCNAの南北分布のプロットを示す。現象の時間変化が緩やかな場合には、オーロラ光の強度の平方根とCNAが比例的に変化することが理論的に予想されるので、オーロラ光に関しては強度の平方根を表示している[8]。CNAに関しては、オーロラの観測されている時間帯には比較データベースの「毎分CNAファイル」のデータを用い、それ以外の時間帯はこれに連続する1分ごとの観測データから計算したCNAを用いてプロットしている。この表示は利用者がキー入力した観測日のオーロラ光とCNAの東西及び南北方向の強度変化を17時間にわたる時間スケールのカラーコントワプロットで視覚的に容易に比較できるので、現象の検索やその空間的広がり及び時間変化等の概要を把握するのに有効である。

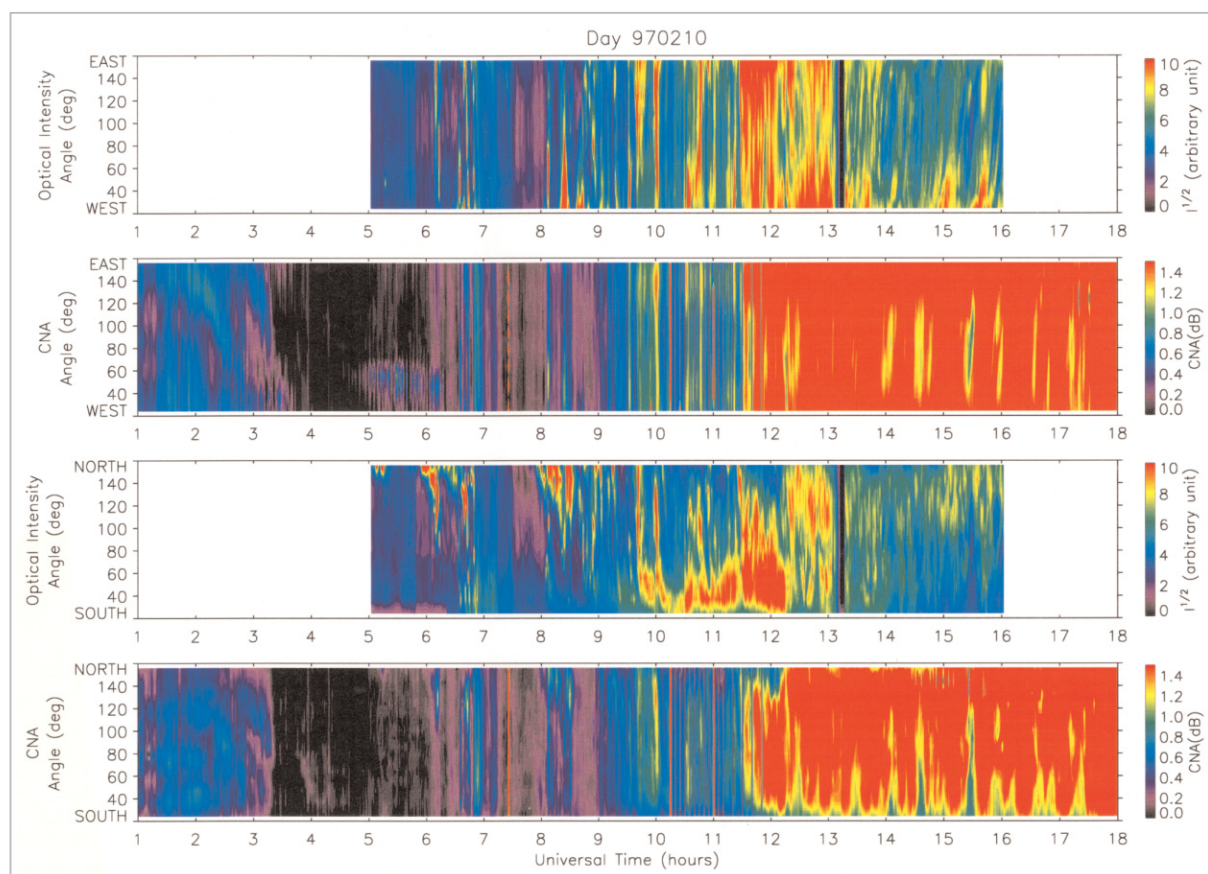


図3 比較データベースの「SALMON」による時間トレンド表示の例

(2) 2次元イメージ表示

この表示は全天オーロラのJPEGイメージ、このイメージから再構成したオーロライメージ及び同時刻のCNAイメージをカラーコントラストで示したものである。図4はその1例で、これらの図が左列、中列、右列の順に並んでいる。時間は上から下に進む。JPEGイメージは天頂から約90°の範囲の極座標表示になっている。他の2種類のデータはいずれも天頂から70°の範囲の

極座標表示になっている。再構成オーロライメージはやはり相対光強度の平方根を表示している。この表示の利用者は、表示したい観測日(年月日)、開始UT時刻(時分)、終了UT時刻(時分)及びデータ間隔(単位:分)をキー入力すると、比較データファイルの中から該当するデータが表示される。この表示では、CNAとオーロラ光の2次元の輝度分布を現在最高の空間分解能で視覚的に容易に比較することができる。

4 まとめ

アラスカ大学地球物理研究所との共同開発により、通信総合研究所がボーカフラットに設置した256素子イメージング・リオメータによるCNAの観測データと、アラスカ大学の全天カメラによるオーロラ光観測データを用いた「CNA-オーロラ光比較データベース」を作成している。その目的は、CNAとオーロラ光との形態学的な比較解析を通して、太陽活動に伴い極域に降りこむ高エネルギー電子が地球の大気環境に及ぼす効果の研究を行うことである。この比較データベースは1996年1月から1999年5月までの観測データを対象としており、比較するデータの時間間隔は1分、視野は天頂から約70°の範囲、極座標表示での空間分解能は約7°である。作成された比較データベースは現在開発中のアラスカ観測データ自動処理・表示システム「SALMON」を通して、外部の研究者にもWWWによりカラープロットによる視覚的な表示形式で簡便に利用することができる。

この比較データベースはフィルター無し(panchromatic)オーロラ光イメージを用いているので、降下電子のエネルギースペクトルの詳しい解析には適さないが、解析したいオーロラ現象等の効率的な検索、活動期間中の高エネルギー電子の降りこみ領域やエネルギーの硬さの時間・空間的变化の推定及び他の観測との簡便な比較など様々な利用が考えられる。

256素子イメージング・リオメータは1999年夏の観測中断を機にコンピュータシステムを旧システム(DOS)から新システム(WINDOWS)へアップグレードするなどの改善を図り、観測を再開する準備を進めているところである。

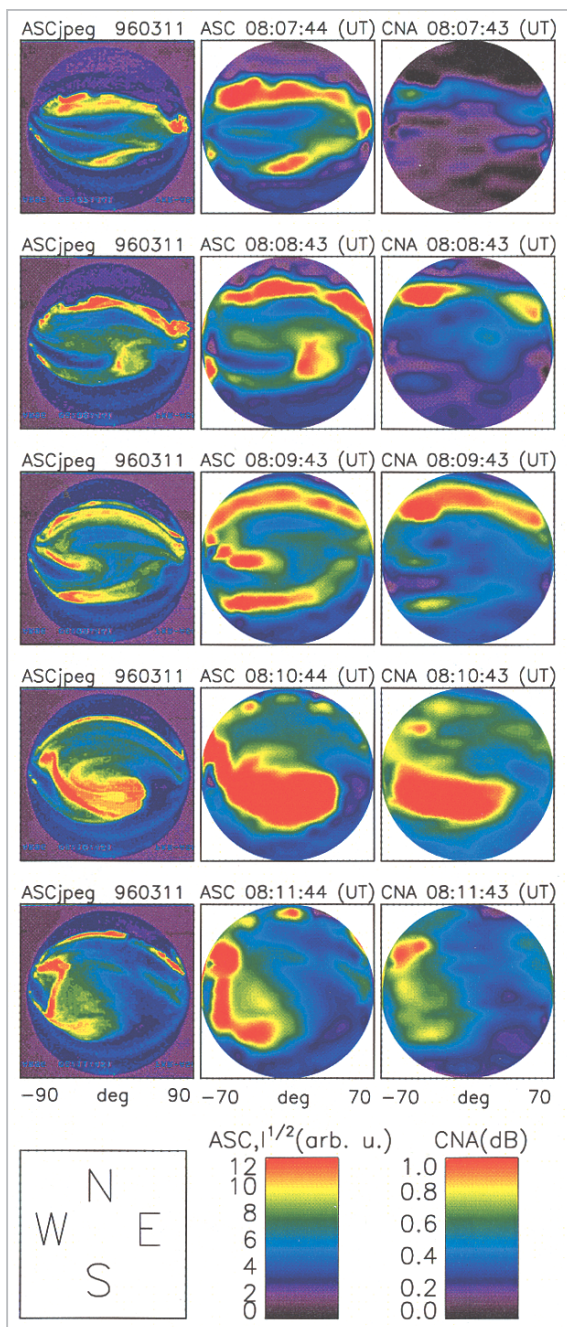


図4 比較データベースの「SALMON」による2次元イメージ表示の例

謝辞

256素子イメージング・リオメータがアラスカの厳しい気象環境の中で長期間にわたり連続観測を実現できたのは、システムの維持・管理を

お願いしたアラスカ大学地球物理研究所のDonald Rice氏(現在ユタ大学)及びボーカーフラット実験場の職員の方々のご努力に負うところが多い。これらの方々に深く謝意を表する。

参考文献

- 1 Rees, M. H., D. Lummerzheim, R. G. Roble, J. D. Winningham, J. D. Craven, and L. A. Frank, Auroral energy deposition rate, characteristic electron energy, and ionospheric parameters derived from dynamics explorer 1 images, J. Geophys. Res., 93, 12,841-12,860, 1988.
- 2 Collis, P. N., J. K. Hargreaves, and A. Korth, Auroral radio absorption as an indicator of magnetospheric electrons and of conditions in the disturbed auroral D-region, J. Atmos. Terr. Phys., 46, 21-38, 1984.
- 3 大山伸一郎, 村山泰啓, 石井守, 久保田実, "SALMONシステムの開発と環境計測データ伝送実験", 本特集.
- 4 Little, C. G., and H. Leinbach, The riometer-a device for the continuous measurement of ionospheric absorption, Proc. IRE, 47, 315-320, 1959.
- 5 Butler, J., and R. Lowe, Beam-forming matrix simplifies design of electrically scanned antennas, Electron Des., 12, 170-173, 1961.
- 6 Detrick, D. L. and T. J. Rosenberg, A phased-array radiowave imager for studies of cosmic noise absorption, Radio Sci., 25, 325-338, 1990.
- 7 Murayama, Y., H. Mori, S. Kainuma, M. Ishii, I. Nishimuta, 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. Terr. Phys., 59, 925-937, 1997.
- 8 Holt, O. and A. Omholt, Auroral luminosity and absorption of cosmic radio noise, J. Atmos. Terr. Phys., 24, 467-474, 1962.

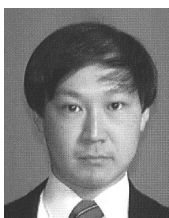


もり ひろゆき
森 弘隆

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ主任研究員 博士(理学)
超高層大気物理学

むら やま やすひろ
村山泰啓

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループリーダー 博士(工学)
中層大気環境の観測的研究



いし い まもる
石井 守

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ主任研究員 理学博士
大気物理学



やま もと まさゆき
山本真行

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ専攻研究員 博士(理学)
超高層大気物理学



Hans C. Stenbaek-Nielsen, Ph. D.
アラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所教授
オーロラ物理学