

アラスカでのイメージングリオメータ観測による銀河雑音吸収：オーロラ降下電子エネルギー推定への利用

Cosmic Noise Absorption Observed with Imaging Riometer in Alaska: Use of CNA to Estimate Energy Spectra of Auroral Precipitating Electrons

田中良昌 石井 守 久保田 実 門前好澄 村山泰啓 森 弘隆
デューク ルマーザイム

TANAKA Yoshimasa, ISHII Mamoru, KUBOTA Minoru, MONZEN Yoshizumi,
MURAYAMA Yasuhiro, MORI Takahiro, and Dirk Lummerzeim

要旨

オーロラ現象に伴って降り込む高エネルギー電子が極域中層大気に与える影響を調べるために、情報通信研究機構とアラスカ大学地球物理研究所の共同研究によってアラスカ州ポーカーフラットに256素子イメージング・リオメータが設置され、高空間分解能の銀河雑音吸収(CNA)データを1995年以降継続的に取得している。このCNAデータをオーロラ降下電子のエネルギー分布推定に利用する方法について検討を行った。本論文では、全天イメージャによって同時観測された2波長のオーロラ単色光にCNAデータを組み合わせて、高エネルギー帯の降下電子フラックスの情報を引き出す手法について述べる。

Since the NICT's 256-element imaging riometer was installed at Poker Flat, Alaska, in 1995 in cooperation with the Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks, it has been recording the high-spatial-resolution cosmic noise absorption (CNA) to study the effect of high-energy electron precipitation on the polar middle atmosphere. We examined how to use the CNA data to estimate the energy distribution of auroral precipitating electrons. In this paper, we describe the method to extract the information of the flux of high-energy precipitating electrons by combining CNA with the optical emissions observed at two wavelengths with the all-sky imager.

[キーワード]

イメージング・リオメータ, 全天イメージャ, 銀河雑音吸収, オーロラ降下電子, エネルギー分布
Imaging riometer, All-sky imager, Cosmic noise absorption, Auroral precipitating electrons,
Energy distribution

1 まえがき

近年、地球温暖化やオゾンホール等の地球規模の環境問題への関心が国際的に非常に高まっているが、これらの問題を本質的に理解するためには、まず基本的な太陽活動と地球環境変動との因果関係の解明が必要不可欠である。特に、極域は太陽風やオーロラのエネルギーが効率的に流入する領域であり、この領域の超高層大気の力学、化学過

程等はこれらの影響を強く受けていると考えられている。例えば、一度のオーロラ現象に伴う等価消費電力は10億kWに及ぶと見積もられており、この際ジュール加熱等を通じて大気が加熱される。しかしながら、オーロラが中性大気に与える影響についての定量的な理解は、これまであまり進んでいない。

オーロラの定常観測は、主に地上からのリモートセンシング観測によって行われる。これまで、

地上からオーロラ降下電子のエネルギーを推定する方法には、2 波長のオーロラ単色光の強度比を使った方法^[1]が主に利用されてきた。これは、降下電子のエネルギーの違いによって、オーロラが効率的に発光する高度及び発光する分子やイオンの種類が異なることを利用している。このオーロラ光を使った手法は、数百 eV～数 keV の範囲の降下電子のエネルギーを推定するのに適している。

さらに高いエネルギー (10 keV 以上) の電子は 100 km 以下の電離圏 D 領域まで浸入し、この領域の大気を電離、加熱する。電離圏 D 領域での電子密度増加は、宇宙から到来する銀河雑音電波の吸収を引き起こすことが知られており、この現象は銀河雑音吸収 (Cosmic Noise Absorption : CNA) と呼ばれている。したがって、CNA を観測することによって、オーロラ現象に伴う高エネルギー電子の降り込みの情報を得ることができる。この CNA を高空間分解能で定常観測するため、情報通信研究機構では世界最大の 256 素子アレイ・アンテナを持つイメージング・リオメータを開発し、1995 年に米国アラスカ州ポーカーフラットに設置した^[2]。図 1 は 256 素子イメージング・リオメータのメインビームのパターンを示している。このイメージング・リオメータの高度 90 km における観測領域は 400 km×400 km、空間分解能は天頂方向で約 7° (11 km) であり、1 秒

ごとに 24 時間連続観測を行っている。

CNA は 10 keV 以上の高エネルギー電子の情報を持っているが、これまで光学観測データと組み合わせたエネルギー分布推定はあまり行われていない。その理由として、リオメータの空間分解能が光学観測に比べて劣っており、小スケールの構造を持つオーロラについては比較が困難であったこと、CNA が起こる高度の大気パラメータの不確定性が大きく定量的な議論が難しいことなどがあげられる。そこで、本論文では、256 素子イメージング・リオメータで観測された高空間分解能の CNA を利用して、オーロラ単色光と組み合わせでエネルギー分布の情報を得る手法を試し、その可能性について議論する。

2 解析方法

この解析では、光と CNA の物理量をそろえることによって両者を比較する。解析は、次の手順で行われる。(1) 入射電子のエネルギー分布がマックスウェル分布であると仮定して、全天イメージャで観測された 2 波長のオーロラ単色光から入射電子の特性エネルギー、全エネルギーフラックスを推定する。(2) 光から得られた入射電子のエネルギー分布を入力として CNA を見積もり、観測された CNA との比較を行う。以下で、解析方法の詳細について説明する。

2.1 オーロラ単色光からの降下電子エネルギー推定

この解析では、 N_2^+ イオンのファーストネガティブバンド (波長 427.8 nm) と O 原子許容線 (波長 844.6 nm) の 2 波長を用いた。この手法にはオーロラ発光強度のモデル計算が必要であり、ここでは次元電子輸送方程式による計算を行った^[3]。入射電子のエネルギー分布はマックスウェル分布、ピッチ角分布は等方分布を仮定し、入射高度は 500 km とした。このとき、単位エネルギー当たり単位立体角当たりの入射電子フラックス $I(E)$ は、以下の式で与えられる。

$$I(E) = \frac{Q_0}{2\pi E_c^3} E \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right) \quad (1)$$

ここで、 E はエネルギー、 E_c は特性エネルギー、

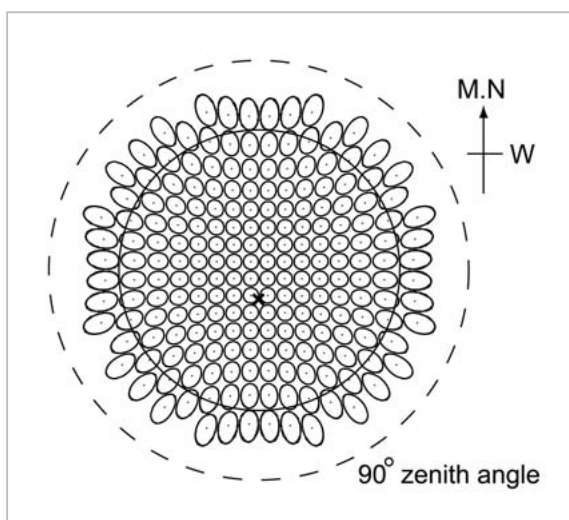


図 1 256 素子イメージング・リオメータの主ビームの -3 dB 等値線 (極座標表示)

外側の円 (破線) は天頂角 90°、内側の円 (実線) は天頂角 60°、中心付近の×は磁気天頂方向を示している。

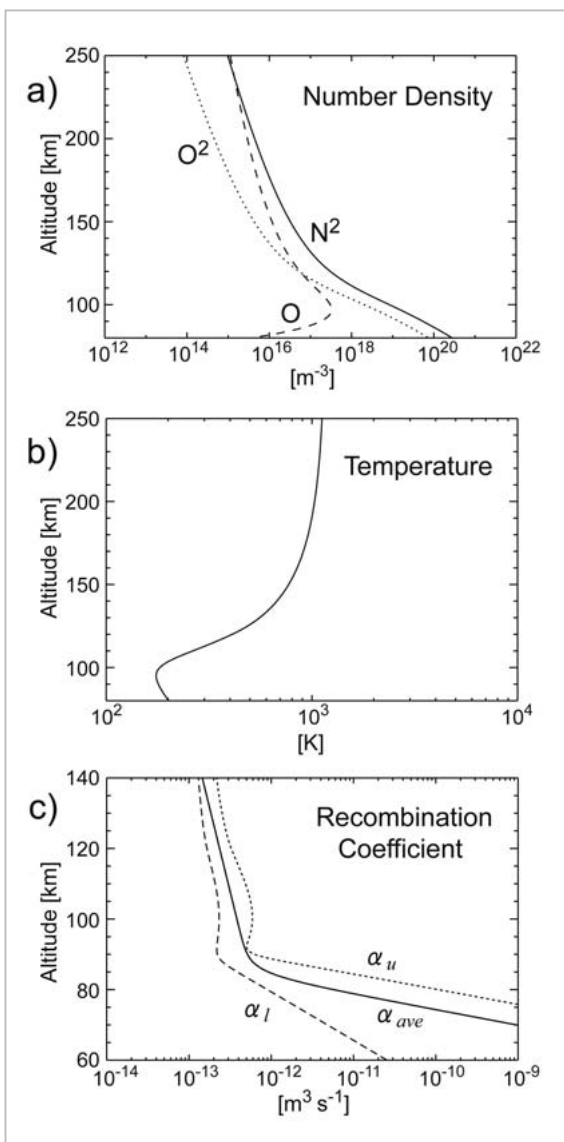


図2 2003年3月6日9 UT の中性大気パラメータ

(a) 主要な分子の数密度 (b) 中性大気温度
 (c) 実効的な再結合係数

Q_0 は全エネルギーフラックスである。中性大気パラメータは MSIS90 モデル [4] によって計算された。MSIS90 モデルは、日時、観測点の座標、ap 指数、F 10.7 指数等の入力が必要とするので、観測に合わせて適切な値を用いた。

この解析に使われた中性大気パラメータの例として、2003年3月6日9 UT の主要な分子の数密度、中性大気温度、実効的な再結合係数の高度分布を図2に示す。図3は、単位エネルギーフラックス (1 mW m^{-2}) の入射電子を仮定して計算された波長 427.8 nm, 844.6 nm の単位体積当た

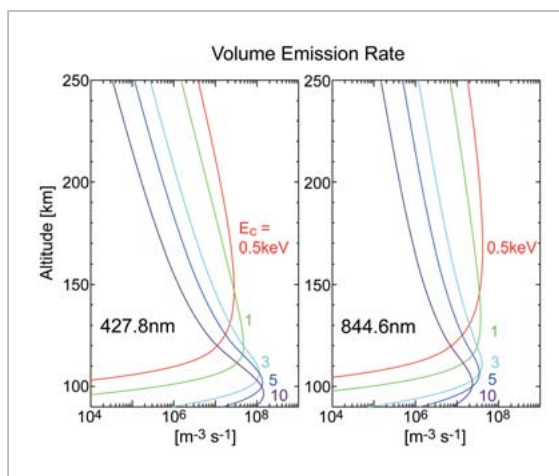


図3 オーロラの単位体積当たりの放射率

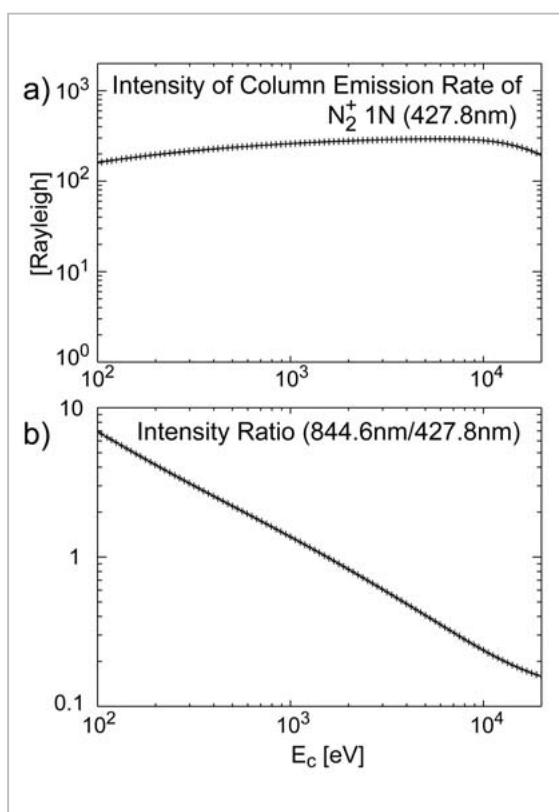


図4 オーロラ強度と特性エネルギーの関係

単位エネルギーフラックス (1 mW m^{-2}) の入射電子によって計算された地上で観測される (a) 427.8 nm の強度、(b) 844.6 nm の 427.8 nm に対する強度比

りの放射率の特性エネルギー依存性を示している。この図から、844.6 nm は 427.8 nm に比べて低いエネルギーの電子によって効率的に発光することが分かる。地上で観測されるオーロラの強度は、この放射率を磁力線方向に積分することに

よって得られる。

図4は、単位エネルギーフラックスの入射電子を仮定したときに地上で観測される(a)427.8 nmの強度、(b)844.6 nmの427.8 nmに対する強度比の特性エネルギー依存性を示す。 $E_c = 100 \text{ eV} \sim 20 \text{ keV}$ の範囲において、427.8 nmの強度は特性エネルギーによらずほぼ一定であり、844.6 nmの427.8 nmに対する強度比は特性エネルギーとともに単調に減少することが確認できる。これらのプロットを適当な関数でフィッティングし、オーロラ強度と特性エネルギーとの間の変換式を作成した。この変換式を使って、観測された844.6 nmと427.8 nmの強度から特性エネルギーと全エネルギーフラックスが決定された。

2.2 CNAの推定

次に、2.1で求めた入射電子フラックスを使ってCNAを計算する。CNAは以下の式で計算される。

$$CNA_M = 4.6 \times 10^{-5} \int \frac{\nu(z)N_e(z)}{\omega^2 + \nu(z)^2} dz. \quad (2)$$

ここで、 CNA_M は、入射電子のエネルギー分布をマクスウェル分布と仮定したときに光学観測から推定されるCNAを意味しており、単位はdBである。 $N_e(z)$ と $\nu(z)$ はそれぞれ高度 z における電子密度と電子-中性粒子衝突周波数、 ω は観測周波数(38.2 MHz)であり、MKS単位系が使われた。図5aに、2003年3月6日9 UTの $\nu(z)$ の高度分布が示される[5]。

電子密度の時間変動が無視できると仮定すると、(2)式の $N_e(z)$ は次式で求められる。

$$N_e(z) = \sqrt{\frac{\varepsilon(z)}{\Delta\varepsilon_{ion}\alpha(z)}} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon(z)$ は電子降り込みによるエネルギー流入率、 $\Delta\varepsilon_{ion}$ は一つのイオン対を生成するときに失われるエネルギー、 $\alpha(z)$ は実効的な再結合係数である。 $\Delta\varepsilon_{ion}$ はすべての分子に関して35 eVと仮定した。

(3)式の $\varepsilon(z)$ は、2.1で求めた入射電子フラックスを入力として、Jackman et al.(1980)の飛程計算の手法に従って行われた[6][7]。電離圏D領域まで侵入するような高エネルギー電子のエネル

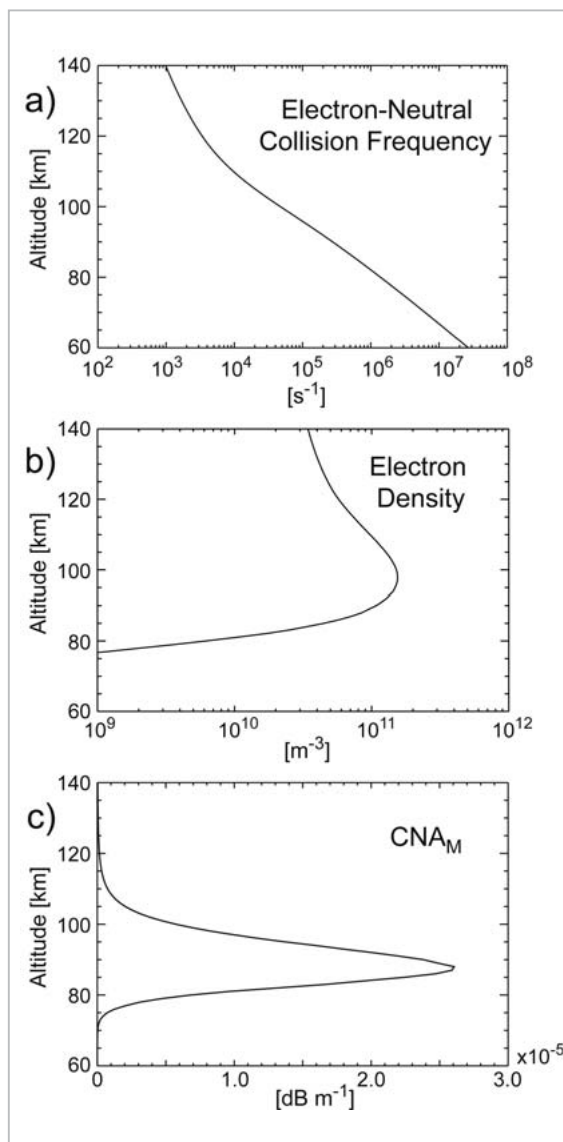


図5 電子-中性粒子衝突周波数と、計算された電子密度、CNAの高度分布

(a)電子-中性粒子衝突周波数 (b) $E_c = 10 \text{ keV}$ 、 $Q_0 = 1 \text{ mW m}^{-2}$ の入射電子によって生じる電子密度、(c)単位高度当りのCNA

ギー散逸と飛程は、Berger and Seltzer (1972) [8]から得られた。2.1で輸送方程式を使ってオーロラ発光強度を計算する際にも同時に電子密度 $N_e(z)$ が計算されるが、この計算はCNAを引き起こすような高エネルギー電子には適用できない。

再結合係数 $\alpha(z)$ には、図2cで示されるような夜側のオーロラ発生時の統計的平均値(α_{ave}) [9]を用いた。再結合係数は、本計算において最も不確定なパラメータであり、季節、地方時、電子密度などによって大きく変動することが知られてい

る。この再結合係数の不確定性による CNA のあいまいさを評価するために、さらに二つの再結合係数 (α_u , α_l) についても計算を行った。ここで、 α_u は NO^+ の再結合係数 ($z > 90 \text{ km}$) [10] を α_{ave} を正の方向に平行移動したもの ($z < 90 \text{ km}$) と高度 90 km で滑らかにつないだものであり、 α_l は O_2^+ の再結合係数 ($z > 90 \text{ km}$) [10] を昼側の再結合係数の平均値 ($z < 90 \text{ km}$) [9] と滑らかにつないだものである。これは、高度 90~150 km における主要なイオンが NO^+ と O_2^+ であり、また、高度 90 km 以下ではクラスターイオンや負イオンの影響で再結合係数にかなりの変動幅があることを考慮している。90 km 以下の α_u と α_l はかなり極端な値であり、この二つの曲線に挟まれる領域は過去の論文で使われた再結合係数の値をほぼカバーしている [11]。

図 5 b, c に、入射電子の特性エネルギーを 10 keV、全エネルギーフラックスを 1 mW m^{-2} と仮定して計算された $N_e(z)$ と単位高さ当たりの CNA_M の高度分布を示す。この図から分かるように、 CNA_M は約 80~110 km の比較的薄い層で起きている。

CNA_M は、実際にイメージングリオメータで観測された $\text{CNA} (\equiv \text{CNA}_{OBS})$ と比較された。ここで、我々は、 CNA_{OBS} と CNA_M の差 ($\text{CNA}_{OBS} - \text{CNA}_M$) を δCNA として定義した。これは、降下電子フラックスの高エネルギー帯がどのぐらいマクスウェル分布からずれているかの指標とみなされる。 CNA_{OBS} と CNA_M の条件を合わせるために、 CNA_{OBS} は全天イメージャの露出時間で平均された。本解析に用いた光学データの露出時間は 45 秒であったので、次章で示される解析結果は 45 秒間の平均的な描像である。また、 CNA_M は図 1 で示されるメインローブの -3 dB 等値線内で平均された。これは、オーロラ光や CNA の強度がこの幅の中で一様であり、メインローブが鋭くサイドローブの影響が小さいことを仮定している。より解析を厳密に行う場合は、サイドローブも含めたアンテナの指向性を考慮する必要がある。

3 2003 年 3 月 6 日 10~14 UT の解析例

ここでは、2003 年 3 月 6 日 10~14 UT の解析例を示す。このときの K_p 指数は 4-~4+ であり、地磁気活動度はやや活発であった。図 6 は、上から磁場南北 (H) 成分、磁気天頂方向のオーロラ強度 (427.8 nm, 844.6 nm)、特性エネルギー (E_c)、全エネルギーフラックス (Q_0)、 CNA_M 、 CNA_{OBS} 、 δCNA を示す。磁気天頂方向の値は、イメージング・リオメータの磁気天頂近傍の二つのビームについての平均値として定義された。 α_u と α_l を使って計算された CNA_M と δCNA も併せて表示している。この図を見ると、磁場の北向き成分の急激な減少とオーロラの急激な増光から、11:35 UT 頃から比較的大きなサブストームの爆発相 (最大約 -1300 nT) が始まっていることが分かる。

δCNA の時間変動についてまず目を引くのが、

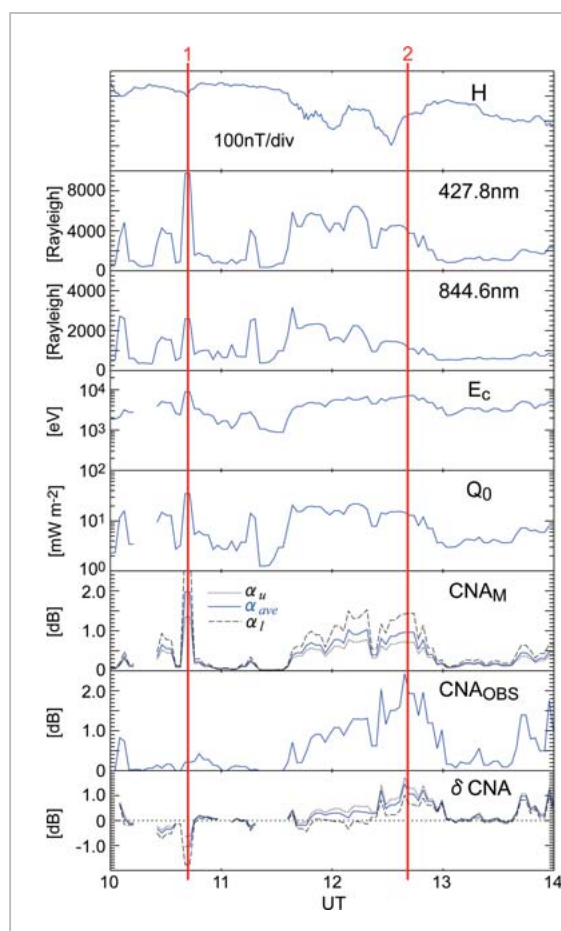


図6 2003年3月6日 10:00-14:00 UT の解析例

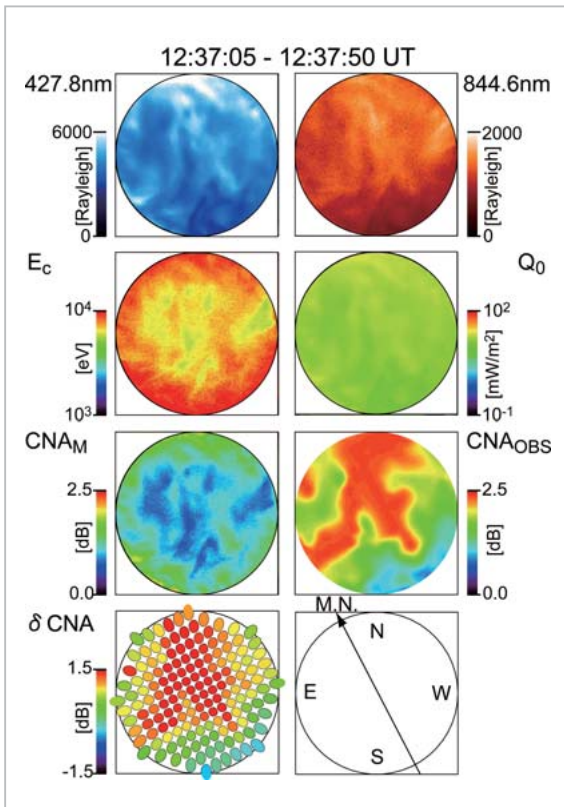


図7 2003年3月6日 12:37:05-12:37:50 UT の解析例(2次元プロット)

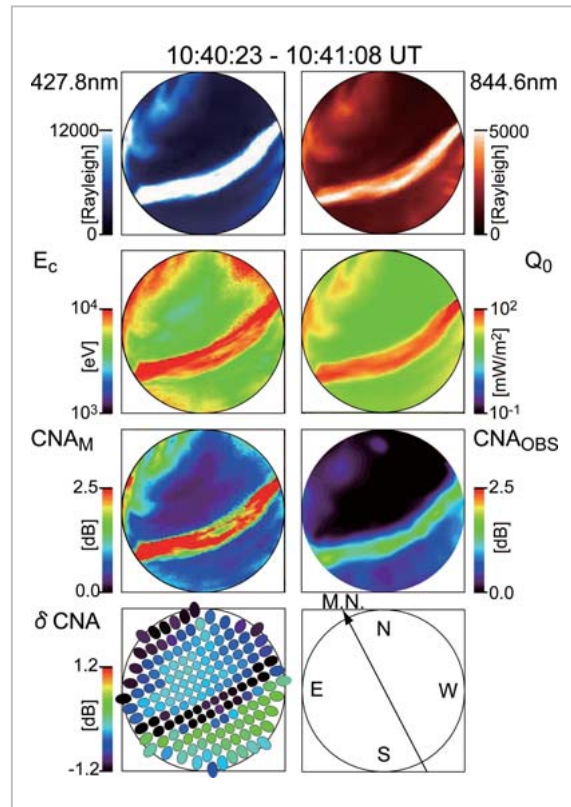


図8 2003年3月6日 10:40:23-10:41:08 UT の解析例(2次元プロット)

12:30~13:00UT のサブストーム回復相である。この時間帯に δCNA はすべての α に関して正の方向に緩やかな増加を示している。これは、サブストーム回復相において、マックスウェル分布から期待されるよりも多くの高エネルギー電子が降り込んできたと解釈できる。一方で、オーロラ光と CNA_M の急激な増加が観測された約 10:40 UT は、 CNA_{OBS} の増加が小さかったため、 δCNA は負の値を示している。

図 7、8 は、それぞれ 12:37:05~12:37:50 UT (図 6 の縦線 2)、10:40:23~10:41:08 UT (図 6 の縦線 1) における 2 次元データを示している。ここで、 CNA_M と δCNA は平均的な再結合係数 α_{ave} を使って計算された。すべてのパネルにおいて視野は天頂角 60° であり、上が地理的な北、左が東になるように表示している。図 7 より、12:37:05~12:37:50 UT には空の広い範囲にわたってディフューズオーロラが広がっており、その大部分で $CNA_M < CNA_{OBS}$ であるため δCNA が正の値(緑~赤)になっていることが確

認できる。

図 8 では、磁気天頂付近に明るいディスクリートアークがあるのが確認できる。アークの中では明らかに $CNA_M > CNA_{OBS}$ 、 $\delta CNA < 0$ であることから、このアークに伴って降り込んでいる電子のエネルギー分布は、マックスウェル分布から期待されるものよりもはるかに小さな高エネルギー電子フラックスを持つことが推測される。

ここで得られたオーロラの種類と δCNA の符号の関係は、過去に人工衛星やロケットで観測されたオーロラと降下電子エネルギー分布の関係から説明可能である。例えば、ディスクリートオーロラに伴って降り込んでくる電子は、一般的に数百 eV~数 keV のエネルギー帯に鋭いピークを持っており、地上から高度数千 km のところで磁力線に沿った方向の加速を受けていると考えられている [12]。このようなエネルギー分布に対してマックスウェル分布を仮定すると、高エネルギー帯の電子フラックスを実際よりも大きく見積もってしまうと考えられる(すなわち、 $\delta CNA < 0$)。

一方、サブストーム回復相でディフューズオーロラを光らせる電子は、磁気圏中のプラズマシート起源の電子がピッチ角散乱を受けて落ちてきていると考えられており、しばしば k 分布で表されるような高エネルギー帯に伸びたエネルギー分布を持つ(すなわち、 $\delta\text{CNA} > 0$) [12]。したがって、この解析で得られた δCNA は、エネルギー分布の形状の推定に、ある程度利用可能であると判断できる。

図7、8の E_c と CNA_M が天頂角の大きい領域(視野の周辺部分)で大きな値を示しているが、これはオーロラが比較的広い高度分布を持っており、波長によって発光高度分布が異なることから生じる見かけ上のものである可能性がある。

4 むすび

本研究では、CNA データをオーロラ降下電子のエネルギー分布推定に利用する方法を試した。オーロラ光から CNA を導出し、イメージング・リオメータ観測による CNA と比較することによって、電子のエネルギー分布の形状についての情報を引き出した。アラスカ・ポーカフラットに設置している 256 素子イメージング・リオメータは、従来のもの比べて鋭いビームを形成でき

ることから、比較的小さな構造を持つオーロラについても光学観測と比較することが可能である。また、大気パラメータの不確実性から生じる CNA のあいまいさを見積もることで、電子のエネルギー分布について定量的な議論をすることも可能であろう。得られた結果が過去のロケット観測や衛星観測と矛盾がないことから、この手法の利用はある程度の有効性が期待できる。

今後の課題として、得られたエネルギー分布が本当に正しいかどうか人工衛星による直接観測によって検証する必要がある。また、高空間分解能の CNA データをもっと有効に活用するためにも、磁気天頂以外の方向についてもより正確なエネルギーを推定する手法、例えばオーロラトモグラフィ法のようにオーロラの高度分布を考慮したエネルギー分布推定法を開発する必要があるだろう。

謝辞

イメージング・リオメータの長期間にわたる定常観測の成功は、アラスカ大学地球物理研究所の Jim Desrochers 及びポーカフラット実験場スタッフの方々のご尽力のおかげである。ここに厚く感謝の意を表す。

参考文献

- 1 M. H. Rees and D. Luckey, "Auroral electron energy derived from radio of spectroscopic emissions 1. model computations", J. Geophys. Res., 79, 5181-5186, 1974.
- 2 Y. Murayama, 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.
- 3 D. Lummerzheim, "Electron transport and optical emissions in the aurora", Ph. D. Thesis, University of Alaska, Fairbanks, 1987.
- 4 A. E. Hedin, "Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere", J. Geophys. Res., 96, 1159-1172, 1991.
- 5 K. M. Aggarwal, N. Nath, and C. S. G. K. Setty, "Collision frequency and transport properties of electrons in the ionosphere", Planet. Space Sci., 27, 753-768, 1979.
- 6 C. H. Jackman, J. E. Frederick, and R. S. Stolarski, "Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere: An intercomparison of source strengths", J. Geophys. Res., 85, 7495-7505, 1980.

- 7 D. Lummerzheim, "Comparison of energy dissipation functions for high energy auroral electron and ion precipitation", Geophysical Institute Report, UAG-R-318, University of Alaska, Fairbanks, 1992
- 8 Berger and Sltzer, "Bremsstrahlung in the atmosphere", J. Atmos. Terr. Phys., 34, 85, 1972.
- 9 J. A. Gledhill, "The effective recombination coefficient of electrons in the ionosphere between 50 and 150 km", Radio Sci., 21, 3, 399-408, 1986.
- 10 M. H. Rees, "Physics and chemistry of the upper atmosphere", Cambridge university press, Cambridge, U. K., pp.279-280, 1989.
- 11 J. M. Penman, J. K. Hargreaves, and C. E. McIlwain, "The relation between 10 to 80 keV electron precipitation observed at geosynchronous orbit and auroral radio absorption observed with riometers", Planet. Space Sci., 27, 445-451, 1979.
- 12 D. W. Swift, "Mechanisms for auroral precipitation: a review", Rev. Geophys. Space Phys., 19, 185-211, 1981.

田中良昌

情報・システム研究機構新領域融合研究センター融合プロジェクト特任研究員 博士(理学)
超高層大気物理学

石井 守

電磁波計測研究センター宇宙環境計測グループ研究マネージャー 博士(理学)
電離圏・熱圏ダイナミクス

久保田 実

情報通信研究機構(総務省情報通信政策局技術開発政策課研究推進室出向中)
電離圏・熱圏ダイナミクス

門前好澄

横浜市立旭中学校理科教諭
電離圏・熱圏ダイナミクス

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

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

Dirk Lummerzheim

アラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所教授 Ph.D.
オーロラ物理学