

4-3 CRL 全天型大気光イメージャのこれまでの成果と今後の研究課題

4-3 Recent results and future plans of atmospheric study using CRL all-sky imagers

久保田実 石井 守 大山伸一郎 村山泰啓

KUBOTA Minoru, ISHII Mamoru, OYAMA Shin-ichiro, and MURAYAMA Yasuhiro

要旨

通信総合研究所とアラスカ大学が共同で進めているアラスカプロジェクトの一環として、我々は2台の全天型大気光イメージャ(CRL-ASI)を開発した。この装置は国内で較正作業やテスト観測を行った後、2000年10月にアラスカに設置され、オーロラや大気光の定常観測を開始した。CRL-ASIは基本的に自動で運用され、インターネットを利用した日本からの遠隔操作も可能である。また、観測サマリデータは準リアルタイムでWeb公開されている。アラスカ観測においては、オーロラと大気重力波の同時観測や、これまで報告がなかったタイプのオーロラの地上光学観測に初めて成功するなどの良好な結果が得られており、このことはCRL-ASIの感度・精度面でのアドバンテージを証明するものである。CRL-ASIの観測データはオーロラが地球の中層大気に与える影響の解明に新たな局面を与えるものとして期待される。

As part of an international cooperative research project between Communications Research Laboratory and Geophysical Institute of University of Alaska, we developed two all-sky imagers (CRL-ASI). We had conducted pilot observations in Japan, and developed some new observation techniques for atmospheric waves. We installed the CRL-ASI at Poker Flat (magnetic lat. 65.6N), Alaska, and started aurora/airglow observations from October 2000. CRL-ASI can be operated automatically, and controlled from CRL, Japan. Real-time summary data are opened to the public with WWW. Using these instruments, we successfully observed some new phenomena: simultaneous appearance of gravity waves and aurora, co-rotating aurora in the evening sector. These results show the advantage of sensitivity and spatial resolution of the CRL-ASI. Observation data by CRL-ASI will contribute to a study on the magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling.

[キーワード]

大気光, オーロラ, イメージ, 中層大気, 大気重力波
Airglow, Aurora, Image, Middle atmosphere, Gravity wave

1 まえがき

中間圏界面付近から熱圏にかけての高度領域(MLT領域)には大気光と呼ばれる微弱な大気発光が存在しており、この大気光を撮像することにより、直接観測の困難なMLT領域の大気を地上から定常的に観測することが可能になる。

極域においては1960年頃からこれまでの長い

間、フィルムやイメージインテンシファイアー¹(II)に付のテレビカメラによるオーロラの観測研究が盛んに行われてきた[1]。また、1980年代になるとIIと干渉フィルタを用いた単色撮像が試みられるようになった[2]。オーロラは磁気圏から振り込んでくる電子や陽子が大気を衝突励起し光らせる現象であり、その発光強度は数10キロレイリー(天の川の数10倍)に達することもあ

る。これらの観測からはオーロラのソース領域である磁気圏の状態や、オーロラを引き起こす磁気圏からの降下粒子のエネルギーを推定することができる[3]。

MLT領域の大気は電子の降り込みがなくても、自らが他の大気分子に衝突して励起され光を発している。オーロラが発生しない中低緯度帯においては、このような非常に微弱な大気光の分光撮像が1980年代からII付きのカメラを用いて行われるようになり、MLT領域を伝播する大気重力波やTIDの観測が可能となった[4][5]。さらに、近年のCCDデバイスの発達に伴い、IIを使わずにCCDのみで撮像する装置が出現した[6]。このタイプの装置はIIを用いたものに比べて時間分解能がやや劣る反面、耐久性、操作性、空間分解能などが格段に優れており、また冷却することにより高感度も得られるため、現在は大気光撮像装置(イメージャ)の主流となっている。

我々は、通信総合研究所とアラスカ大学が共同で進めているアラスカプロジェクト[7]の一環として、中緯度帯の大気光観測で発展してきたこのCCDイメージング技術を用いて2台の高感度全天型大気光イメージャ(CRL-ASI: CRL All-Sky Imager)を開発した。そして国内において様々な試験観測やデータ処理技術の開発を行った後、2000年10月に極域のアラスカに装置を設置し定常観測を開始した。本論文では、まず2でCRL-ASIの概要を記述した後、3で国内試験観測の結果やその過程で開発されたデータ解析手法を紹介し、4でアラスカ観測の概要と初期結果、5で今後の展望を述べる。

¹照度の2次元増幅装置にはイメージオルシコン管、SEM管、SIT管、あるいはMCPを用いたものなど様々なタイプがある。ここでは便宜上それらの総称としてイメージインテンシファイアー(II)という名称を使用する。

2 装置概要

CRL-ASIの開発に当たり、我々は、従来のイメージャに新たに焦点調整機能を付加してデータの高精度化を図った。この新機能により、観

測データ精度の大幅な向上はもちろんのこと、大気光計測の誤差の大きな要因だった星像の除去が格段に容易になるとともに、意外な副産物として、抽出された星像から夜間雲量を測定することができるようになった。さらに、観測の自動化やインターネットを介したイメージャの遠隔操作を行うために独自のソフトウェア・技術開発がなされ、これによりCRL-ASIのアラスカにおける安定した自動運用が可能となった。図1にCRL-ASIのシステム概略図を示す。

ASI本体は対物レンズとしてニコン技術工房製6mmF1.4の魚眼レンズを採用し、180°の全天視野を得ている。これにより、観測点を中心とする半径数100kmの範囲を一度に観測することが

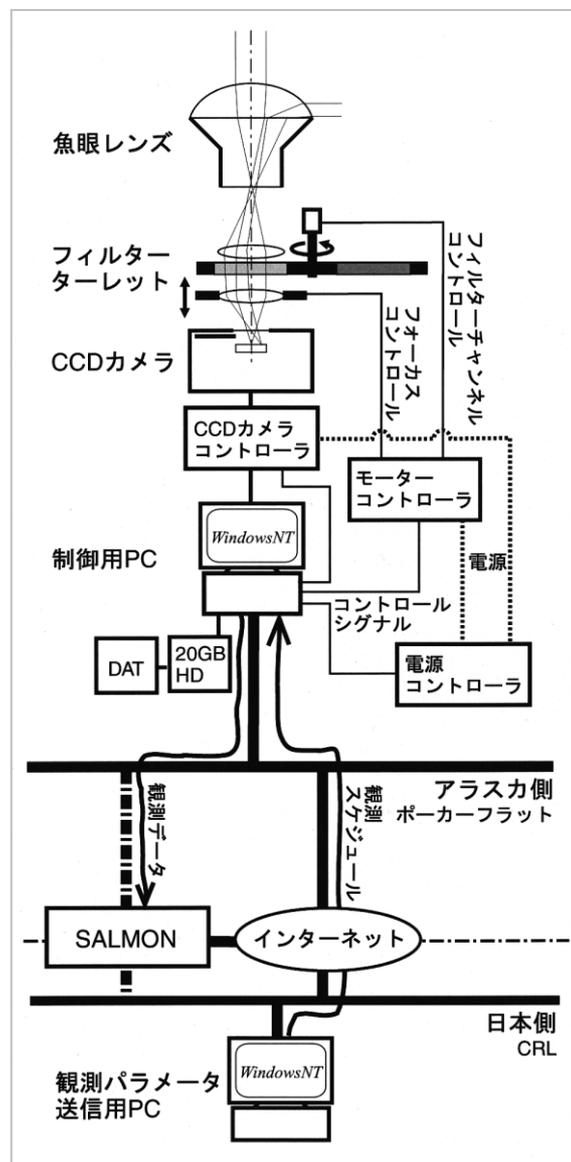


図1 CRL-ASIのシステム概略図

できる。対物レンズを通過した光はテレセントリックレンズによって一たん平行光にされ、干渉フィルターによって分光された後、受光装置内に焦点を結ぶ。この光学系の基本デザインは1996年に国立極地研究所(NIPR)が開発したオーロラ全天イメージャ[8][9]や、その後京都大学で開発された大気光定常観測用イメージャの流れを汲んでいる。干渉フィルターは5チャンネルのフィルターターレット上に装着されており、チャンネルを切り替えることにより5種類の波長での観測が可能となる。また、焦点調整機構付きのテレセントリックレンズを用いることにより高解像度の撮像を実現している。受光装置には、 512×512 pixel、背面照射型CCD素子を用いた冷却CCDカメラを採用し、高感度化及び取扱いの簡便性を図っている。

シャッターの開閉、フィルターの切替え、焦点の調整、画像データの表示、保存といった観測のための操作は、ASI制御用のパーソナルコンピュータ(制御用PC)上で走るプログラムによって操作され、与えられたスケジュールに従ってチャンネルを切り替えながら連続して撮像を行う。この観測順序はあるパラメータファイルに記述され、制御用PCはこのパラメータファイルを解析することにより観測順序を得る。パラメータファイルは制御用PC上で作成することも可能だが、インターネット等を通じて遠隔地から送付することにより、観測スケジュールを遠隔操作することも可能である。

CRL-ASIの感度等の特性はNIPRと共同で詳細に調査された。その結果、例えば代表的なオーロラ輝線である酸素原子557.7-nm発光は3秒以下の露出で十分なS/Nが得られることが分かった。CRL-ASIの特性の詳細や、観測データから大気光絶対強度を導出するための手法は[10]によって報告されている。

3 国内試験

1997年に開発を開始したCRL-ASIは、2000年までの間に試験を兼ねて様々な観測キャンペーンに参加し、データ解析手法を開発するとともに研究成果をあげてきた。

1998年1月～3月、我々はPSMOSキャンペー

ン(中間圏界面国際協同観測システム)に参加し、名古屋大学、京都大学と共同で大気光2地点同時観測を実施し、発光層中の波状構造高度の2次元分布を求めることに初めて成功した。図2は、この観測で得られた大気光イメージと波状構造高度の2次元分布である。この実験によって確立された大気波状構造高度の導出手法[11]は、大気重力波の描像を知るための有効な手段として、その後のMLT領域の研究にも用いられるようになった[12]。

1998年5月には、我々はFRONTキャンペーン(F領域夜間TIDの電波・光学観測)に参加し、東北大学、新潟大学、名古屋大学、京都大学、国土地理院と共同で国内5地点(母子里、蔵王、木曾、信楽、美星)での大気光同時観測を実施した[13][14][15]。その結果、大気光イメージャが中緯度帯の電離層擾乱を視覚的にとらえる道具として有効ことが示された。図3は、この観測で得られた北海道から九州に至る広範囲の酸素原子630-nm大気光強度分布と、国内GPS観測網によって観測された電離層総電子数(TEC)分布との比較である。大気光中には波長数100kmの明瞭な大気波動が見て取れ、それが電離層擾乱を伴っていることが分かる。

2000年1月にはWAVE2000キャンペーン(大気光波状構造キャンペーン2000)に参加し、文部省宇宙科学研究所、東北大学、東京大学、立教大学等と共同で、水平波長数km～100km程度の大気重力波をターゲットとした地上・ロケット同時観測実験を行った。その結果、大気光強度の水平分布と、酸素原子・電子密度・大気光強度の鉛直プロファイルというこれまでに例のないデータセットが得られた[16]。それぞれのデータには大気波動に伴う周期的変動が現れており、これらを用いてMLT領域の大気波動の3次元的な解析が試みられている[17]。

4 アラスカにおける観測の概要と初期結果

4.1 観測概要

国内試験の後、2000年10月に2台のCRL-ASIはアラスカ大学ポーカークラット実験場(米国アラスカ州フェアバンクス市街より約40km北西の

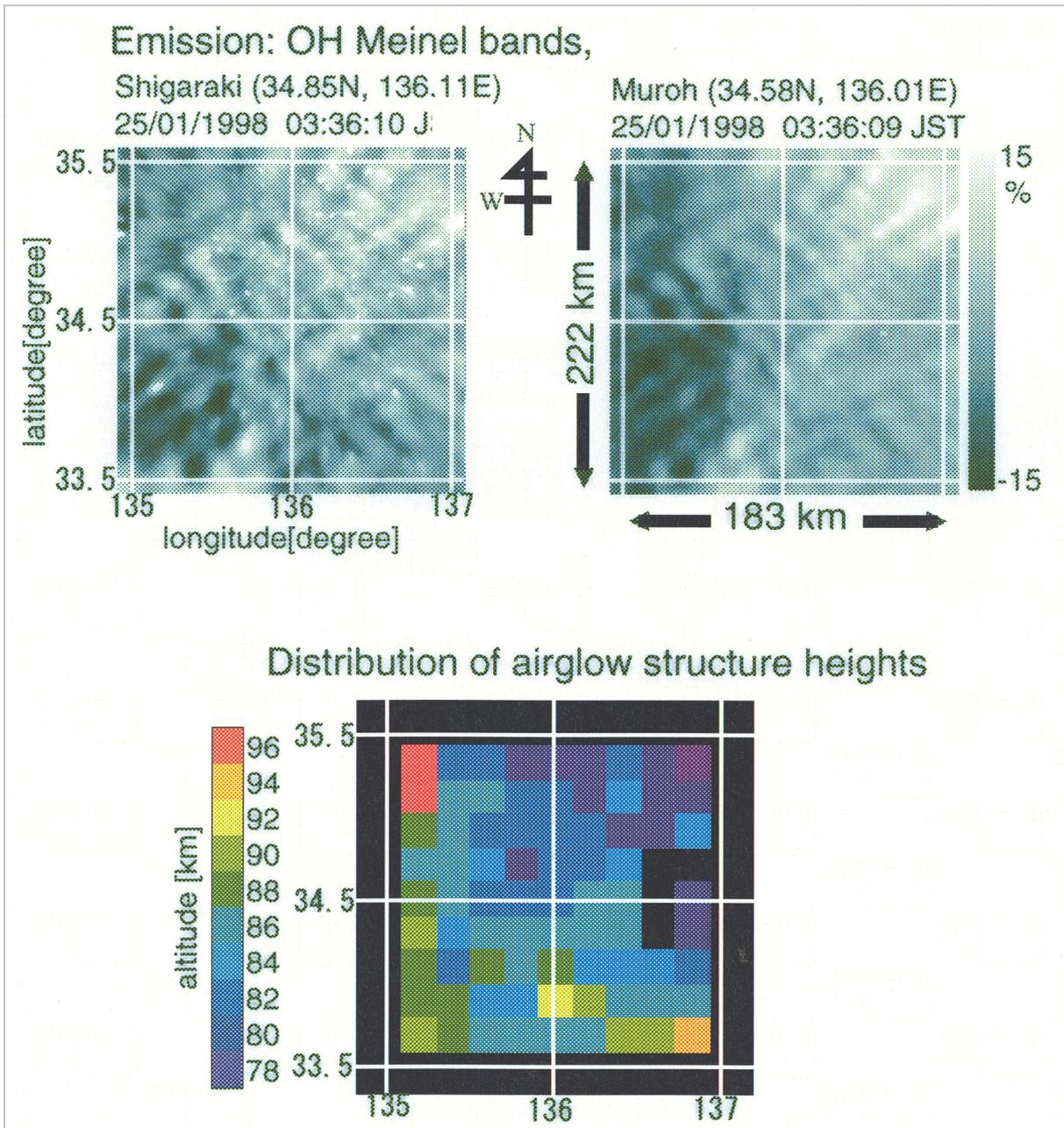


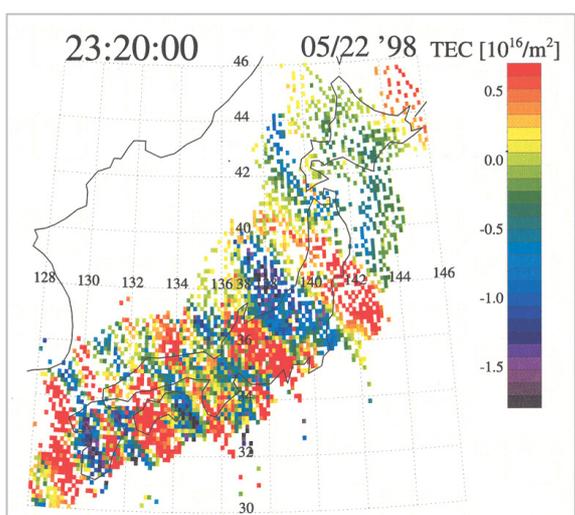
図2 PSMOSキャンペーンの観測結果

(上)2台のASIを用いて信楽と室生で同時に観測されたOH大気光中の大気重力波構造。(下)上記データから得られた大気光波状構造高度の2次元分布。高度が北東から南西にかけて10kmほど変化している様子が見てとれる。

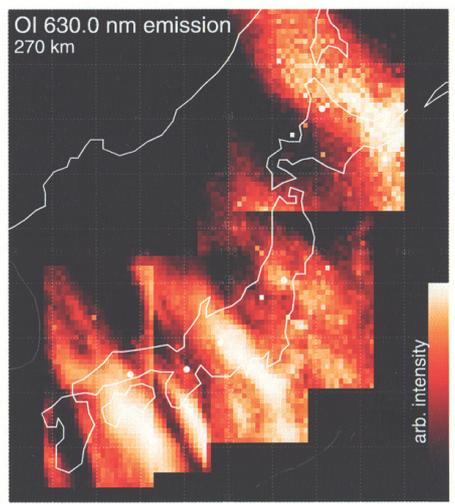
山中)に設置された。制御用PCにはDATによる大容量(20~40MB)データバックアップシステムも整備され、1年に一度の現地メンテナンスと1か月に一度のテープ交換以外はすべて自動若しくはCRLからの遠隔操作でシステムの連続運用がなされている。また観測パラメータ送信用PCは日本側のCRL内に設置されている(図1)。観測地の座標は、地理緯度65.12N、地理経度147.43W、磁気緯度65.60Nである。CRL-ASIの観

測視野及び設置状況を図4に示す。

アラスカにおけるCRL-ASI観測は2000年10月20日から現在までの間、基本的に満月期(満月前後の計10日間)を除いた毎日実施されている。ただし、白夜となる4月末から8月までは観測を休止する。観測データは国際中層大気環境観測実験データ処理装置(SALMON)[18]によって自動的にアラスカから日本のCRLへ転送・処理がなされ、観測時間や観測波長、晴天状況及びサマリ



(a)



(b)

図3 FRONTキャンペーンの観測結果^[14]

(a) 1998年5月22日23:30JSTにおけるTECの2次元分布。(b) ほぼ同時刻の酸素原子630.0-nm大気光の発光強度分布。

データなどが以下のURLで公開されている。
http://salmon-www.crl.go.jp/systemsum/imagers/all_sky_imager_j.htm

4.2 初期結果

4.2.1 大気波動とオーロラの相互作用

図5は2000年11月2日0830UT頃に出現した顕著な大気重力波とオーロラを同時にとらえた観測結果である。

オーロラはまえがきで述べたように磁気圏からのプラズマ粒子降り込みにより励起され発光する現象であり、その形状や動きは磁気圏の磁

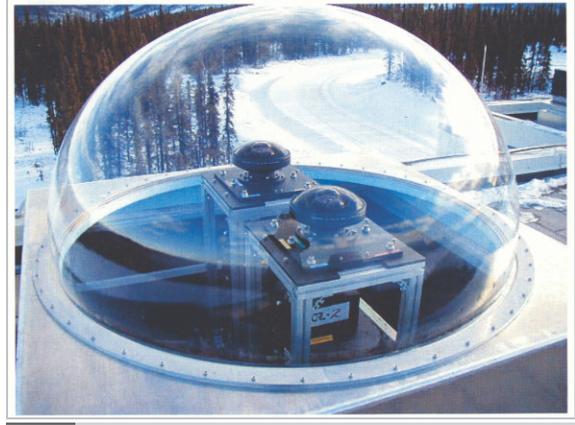
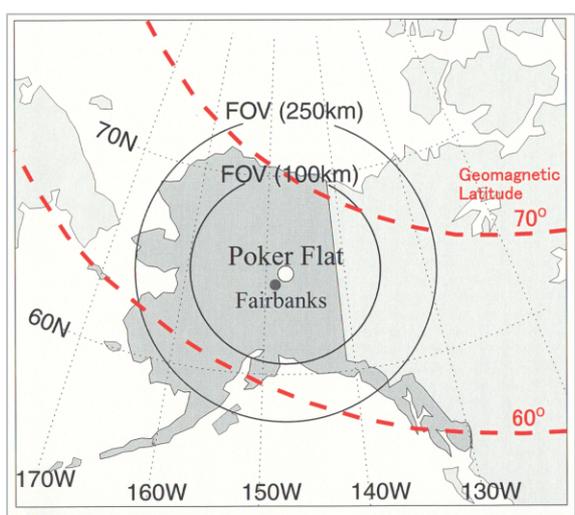


図4 CRL-ASIの観測視野及び設置状況

(上) 観測地ポーカークラットはアラスカのほぼ中央に位置する。図中の赤の破線は磁気緯度60度と70度を示す。二つの円は観測されるオーロラの発光高度を100 km又は200 kmと仮定したときのCRL-ASIのおおよその視野を表す。(下) ポーカークラット実験場内施設のドームに2台並べて設置されたCRL-ASIの写真。

場や電場に支配される。 N_2^+ first negative (427.8-nm) バンドはオーロラ励起により発光することが知られている。それに対し、ナトリウムD線は主に大気分子・原子同士の衝突で励起する、いわゆる大気光であり、その形状や動きはMLT領域を伝播する大気波動から強く影響を受ける。また、酸素原子の557.7-nm発光はオーロラ励起もするし、大気の衝突でも励起する。

図5のナトリウムD線のイメージ中には明るい縞で構成された波状構造が見られる。これがナトリウム大気光中に現れた大気波動である。この大気波動を時間を追って見たところ、北西方向に位相速度約60m/sで伝播していることが分かった。一方、557.7-nm大気光中にはナトリウム

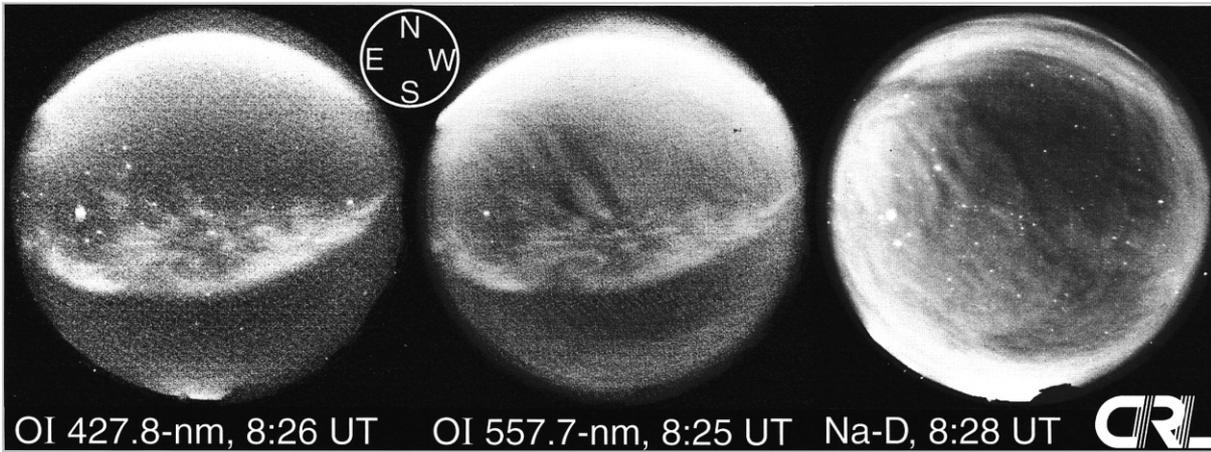


図5 大気重力波とオーロラの同時観測

大気光と形状は同じだが明るさが反転したような、暗い縞で構成された波状構造が見られる。このような、2種類の大気光において形状は同じだが明るさが反転した波状構造が見られる現象は中緯度帯においてはしばしば観測され、フロント構造と呼ばれている[19]。557.7-nm大気光中にはこの波状構造以外にも天頂付近で東西に伸びる発光が見られる。これと同じ形をした発光は N_2^+ first negative発光にも現れており、これがオーロラであることが分かる。このオーロラの形状を注意深く観察すると、大気光波状構造に重なるような周期的形状が現れているように見て取れる。この形状の一致が明確に示されれば、これは中性大気-オーロラ相互作用の新たな一面を示す興味深い結果となり得る。

CRL-ASIの観測によって、ナトリウムD線を

用いればオーロラ帯においても大気光波状構造が頻繁に観測できることが分かった。これらのデータを用いれば、大気波動とオーロラの相互作用についての新しい研究成果が期待できるであろう。

4.2.2 夕方側における共回転するオーロラ

図6には2000年10月27日の03:20~04:00UTにかけて得られた557.7-nmイメージが20分ごとに並べられている。イメージ中のパッチ状オーロラの形状や位置が40分間にわたってほとんど変化していないことが見て取れる。この事実はこのオーロラが地球と共回転していることを示している。図7はこのオーロラを5種類の波長で観測した結果を示している。

このイベントの様々な特徴を過去の様々な観測と比較したところ、「Angerのdetached arcs」

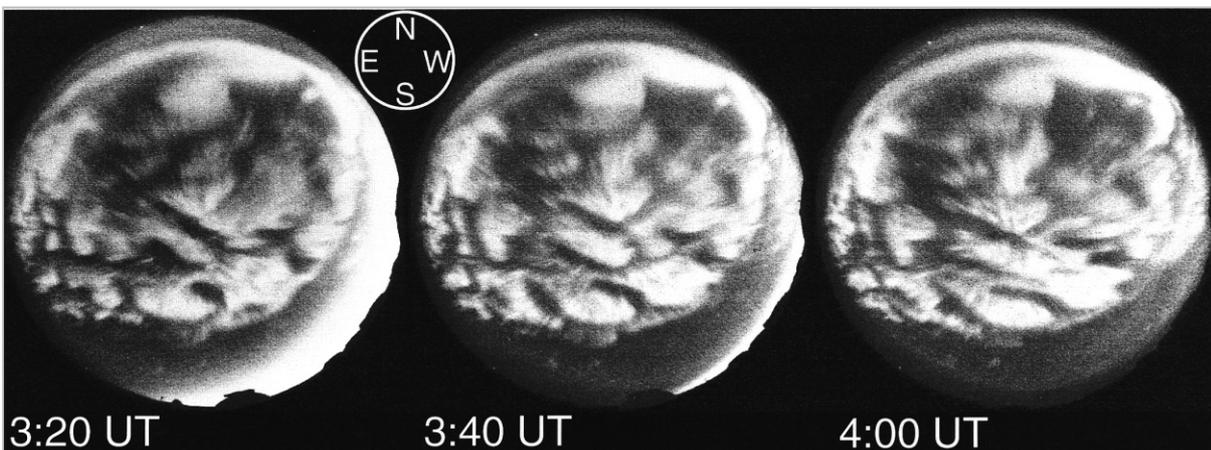


図6 2000年10月27日の夕刻に観測された557.7-nmオーロラの20分ごとのイメージ

それぞれのイメージの積算時間は3秒である。また、オーロラの構造を際立たせるためにヒストグラムイクライゼーション処理を施してある。

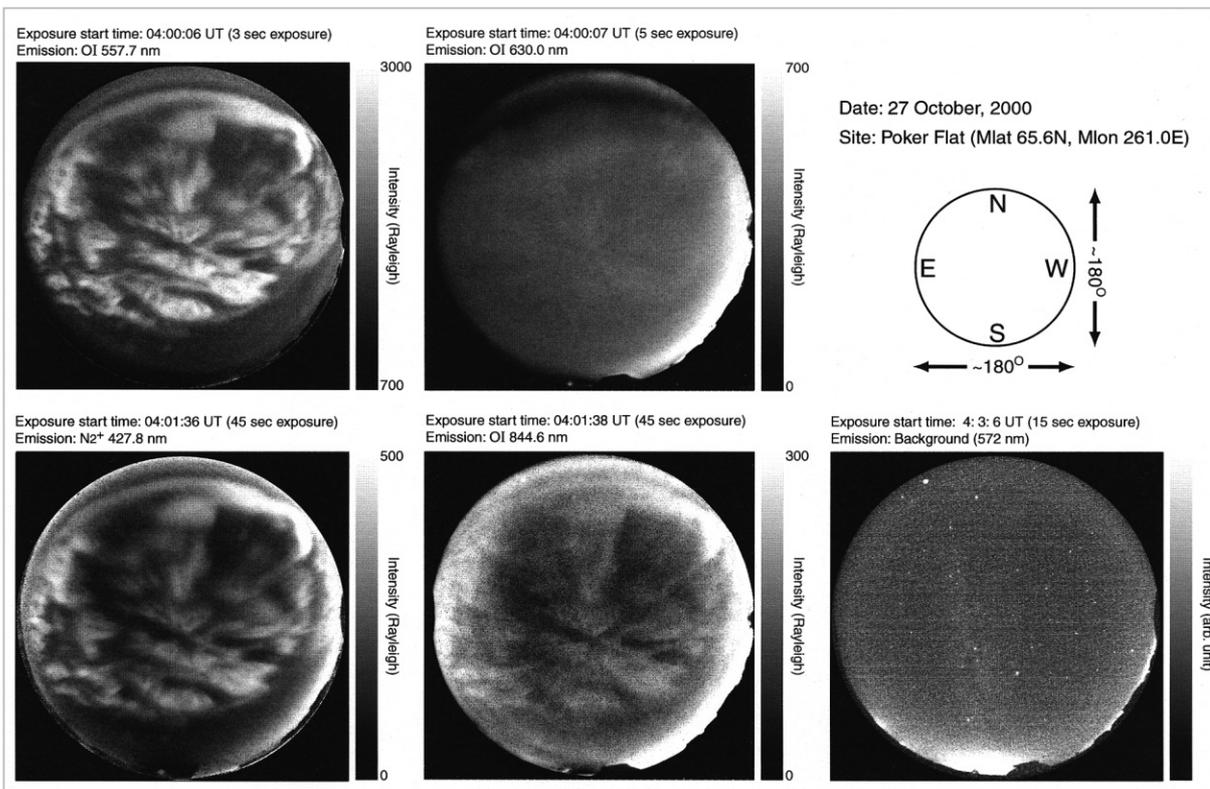


図7 2000年10月27日の04UT頃に観測された5種類の波長におけるイメージ

パッチ状オーロラが557.7-nmと427.8-nmに見られる。844.6-nmにもかすかに同様の構造が見られるが、630.0-nmには同様の構造は見られない。このような波長による違いは降り込み粒子のエネルギーが高い(~20KeV)ことを示す。背景光中には全面にわたって星や天の川が見られ、上記のパッチ状構造が雲による影響ではないことを示している。

と呼ばれる現象に非常に似ていることが分かった。これは1970年代にISIS-2衛星で発見されたオーロラで、アラスカ上空で夕方時にだけ出現するとされている[20][21][22]。CRL-ASIの観測によって判明した、このオーロラの共回転という性質や、長い継続時間はオーロラが磁力線に束縛されるという事実と一見矛盾するよう見え、奇妙である。この点を説明するために、現在このオーロラの発生メカニズムにプラズマ圏外縁部のコールドプラズマが寄与しているという仮説が立てられている。

4.2.3 オーロラ降下電子のエネルギー推定

図7に示されたパッチ状オーロラは波長によって様子がかなり異なっている。このような波長による違いから降り込み電子のエネルギーが推定できる。図8はこのときの427.8-nmと844.6-nmの発光強度比より導出された降り込み電子平均エネルギーの水平分布である。パッチ状オーロラの部分には平均エネルギー20keV程度の降り込みが見られる。発光強度比から平均エネルギー

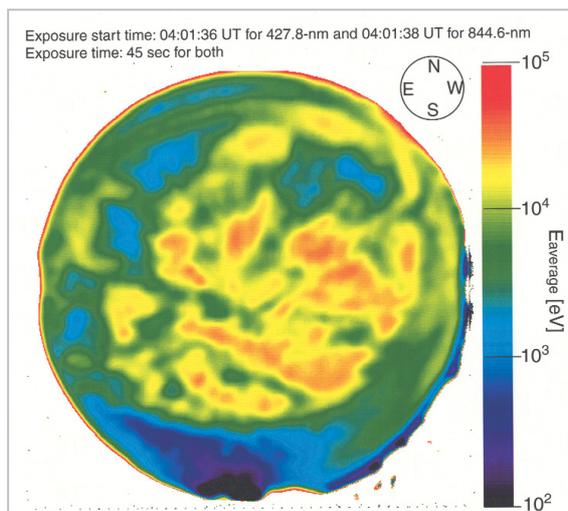


図8 427.8-nmと844.6-nmの発光強度比より導出された降り込み電子平均エネルギーの水平分布

への換算式は[23]の結果を用いた。磁気天頂から外れるに従ってレイ構造を横から見るようになるため、エネルギーを低く見積もってしまう傾向が見られる。このような天頂角に依存する

見かけ上の誤差を補正できれば、CRL-ASIの観測から、オーロラ降下電子のエネルギーの水平分布が得られる。

5 今後の展望

オーロラによる大気の加熱には、ジュール加熱と粒子加熱の2種類がある。前章で述べたようにCRL-ASIの観測データからオーロラ降下電子のエネルギーの水平分布が得られれば、オーロラによるMLT領域の大気の加熱量がジュール加熱と粒子加熱の両面から正確に推定できるようになる。この結果を、ファブリペロー干渉計^[24]によるMLT領域の風速・温度測定結果や、CRL-MFレーダ^[25]やレーザライダー^[26]による中間圏の観測を合わせて解析することにより、アラスカプロジェクトの大きなテーマの一つである「オーロラが地球の中層大気に与える影響」を議論することができる。

また、オーロラとそれ以外の大気光(NaやOH)の両者の観測から、オーロラや大気重力波のより詳しい描像、両者の相互作用に焦点を当てた解析を行い、この方面からオーロラが大気に及ぼす影響の解明を目指すことも可能である。一方、CRL-ASIによって得られる多波長オーロラのデータセットは、オーロラそのものの研究にも貢献することも期待されている。

6 むすび

1997年に開発を開始したCRL-ASIは、その開発過程において様々な国内試験観測を行った。

その結果、幾つかの新しい大気光観測手法を確立するなどの成果をあげることができた。また、2000年10月からアラスカ・ポーカーフラット実験場において開始した多波長のオーロラ・大気光定常観測においても、これまで報告がなかった「Angerのdetached arcs」の地上からの光学観測に初めて成功するなど、良好な結果が得られ始めている。これらの結果はCRL-ASIの感度・精度面でのアドバンテージを証明するものといえる。

CRL-ASIは2000年10月以降アラスカで既に一冬分半にわたるデータを取得した。また今後少なくとも2年以上アラスカにおいて観測を行う予定である。前章で示したような磁気圏-電離圏-MLT中性大気の相互作用に関する研究の新たな局面を開くことが我々の大きな目標であるが、この長期間のデータセットを有効に使えば成果は十分に期待できる。

上記の課題以外にも、非常に多岐にわたる研究分野でCRL-ASIは貢献できると思われる。しっかりとした研究計画を立て、他の研究機関との密接な連携の下に共同で研究を進めていくことにより、得られた観測データから効率的に成果を上げてゆきたい。

謝辞

CRL-ASIの定常観測の成功は、Brian Lawson氏及び他のポーカーフラット実験場スタッフの尽力なくしてはあり得なかった。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1 Akasofu, S.-I., "The development of the auroral substorm", Planet Space Sci., 12, 273-282, 1964.
- 2 Ono, T., T. Hirasawa, and C.-I. Meng, "Weak auroral emissions and particle precipitations in the dusk auroral oval", J. Geophys. Res., 94, 11933-11947, 1989.
- 3 Rees, M. H., and D. Luckey, "Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. model computations", J. Geophys. Res., 79, 5181-5186, 1974.
- 4 Taylor, M. J., M. A. Hapgood, and P. Rothwell, "Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions", Planet Space Sci., 35, 413-427, 1987.
- 5 Kubota, M., S. Okano, and H. Fukunishi, "Relationship of Temporal and Spatial Variations of OI 630-nm Nightglow over Japan with Traveling Ionospheric Disturbances (TIDs)", Earth, Planets and Space, 53, 741-

- 751, 2001.
- 6 Taylor, M. J., M. B. Bishop, and V. Taylor, "All-sky measurements of short period waves imaged in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and near infrared OH and O₂ (0,1) nightglow emissions during the ALOHA-93 campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2833-2836, 1995.
 - 7 Mori, H., Y. Murayama, M. Ishii, M. Kubota, H. Masuko, K. Mizutani, M. Yasui, T. Manabe, S. Ochiai, Y. Irimajiri, K. Igarashi, K. Nozaki, T. Kikuchi, T. Itabe, M. Kunitake, and S. Kainuma, "Radio and optical remote-sensing of the Alaskan sky - Japan-US cooperative study on the global environment -", *J. of the Comm. Res. Lab.*, 46, 235-244, 1999.
 - 8 岡田雅樹, 江尻全機, 岡野章一, 田口真, "南極点全天撮像装置の概要と初期データ解析", *南極資料*, 41, 613-630, 1997.
 - 9 Ejiri, M., S. Okano, M. Okada, M. Taguchi and S. Takeshita, "All sky imager observation of aurora and air-glow at South Pole: System design and the initial test results (extended abstract)", *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, 11, 159-162, 1998.
 - 10 Yamamoto, M.-Y., M. Kubota, S. Takeshita, M. Ishii, Y. Murayama, and M. Ejiri, "Calibration of CRL all-sky imagers using an integrating sphere", *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, submitted.
 - 11 Kubota, M., M. Ishii, K. Shiokawa, M. K. Ejiri, and T. Ogawa, "Height measurements of nightglow structures observed by all-sky imagers", *Adv. Space Res.* 24, 593-596, 1999.
 - 12 Ejiri, M. K., K. Shiokawa, T. Ogawa, T. Nakamura, R. Maekawa, T. Tsuda, and M. Kubota, "Small-scale Gravity Waves Near the Mesopause Observed by Four All-sky Airglow Imagers", *J. Geophys. Res. -D*, 106, 22793-22799, 2001.
 - 13 Kubota, M., K. Shiokawa, M. K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Sakanoi, H. Fukunishi, M. Yamamoto, S. Fukao, A. Saito, and S. Miyazaki, "Tracking of Wave-like Structures in the OI 630-nm Nightglow over Japan Using an All-sky Imagers Network during FRONT Campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 27, 4037-4040, 2000.
 - 14 Saito, A., M. Nishimura, M. Kubota, K. Shiokawa, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Ogawa, Y. Otsuka, M. Ishii, T. Sakanoi, Y. Kiyama, K. Igarashi, and S. Miyazaki, "Traveling ionospheric disturbances detected in the FRONT Campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 689-692, 2001.
 - 15 Shiokawa, K., M. K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Kubota, K. Igarashi, A. Saito, and T. Nakamura, "Multi-point observation of short-period mesospheric gravity waves over Japan during the FRONT Campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 27, 4057-4060, 2000.
 - 16 久保田実, 村山泰啓, 石井守, 山田嘉典, 大西久永, 福西浩, "大気光波状構造キャンペーン2000における大気光波状構造の地上イメージング観測", *宇宙科学研究所報告 特集*, 第42号, 13-21, 2001年3月.
 - 17 Iwagami, N., T. Shibaki, T. Suzuki, Y. Yamada, H. Ohnishi, Y. Takahashi, H. Yamamoto, H. Sekiguchi, K. Mori, Y. Sano, M. Kubota, Y. Murayama, M. Ishii, K. I. Oyama, R. Yoshimura, M. Shimoyama, Y. Koizumi, K. Shiokawa, N. Takegawa and T. Nakamura, "The Wave2000 campaign: Overview and preliminary results", *J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, submitted.
 - 18 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*.
 - 19 Taylor, M. J., D. N. Turnbull, and R. P. Lowe, "Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign", *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2849-2852, 1995.
 - 20 Anger, C. D., M. C. Moshupi, D. D. Wallis, J. S. Murphree, L. H. Brace, and G. G. Shepherd, "Detached auroral arcs in the trough region", *J. Geophys. Res.*, 83, 2683-2689, 1978.
 - 21 Moshupi, M. C., C. D. Anger, J. S. Murphree, D. D. Wallis, J. H. Whitteker, and L. H. Brace, "Characteristics of trough region auroral patches and detached arcs observed by ISIS 2", *J. Geophys. Res.*, 84, 1333-1346, 1979.
 - 22 Wallis, D. D., J. R. Barrows, M. C. Moshupi, C. D. Anger, and J. S. Murphree, "Observations of particles

precipitating into detached arcs and patches equatorward of the auroral oval", J. Geophys. Res., 84, 1347-1360, 1979.

23 Ono, T, "Derivation of energy parameters of precipitating auroral electrons by using the intensity ratios of auroral emissions", J. Geomag. Geoelectr., 45, 455, 1993.

24 石井守ほか, "CDL ファブリペロー干渉計の開発と熱圏観測", 本特集.

25 村山泰啓ほか, "アラスカ・プロジェクト—アラスカにおける北極域大気環境観測の国際共同研究—", 本特集.

26 水谷耕平ほか, "アラスカプロジェクトにおけるライダー観測装置", 本特集.



くぼた たみ
久保田実

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)
大気物理学、光学システム、画像処理



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 博士(理学)
大気物理学



おおやま しいちろう
大山伸一郎

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)
大気物理学、情報工学

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