

## 「あけぼの」搭載オーロラ撮像装置 (ATV) によるオーロラの 動態観測

金田 榮祐<sup>1)</sup>・山本 達人<sup>1)</sup>・林 幹治<sup>1)</sup>  
藤井 良一<sup>2)</sup>・門倉 昭<sup>2)</sup>・江尻 全機<sup>2)</sup>  
卷田 和男<sup>3)</sup>・佐々木 進<sup>4)</sup>・小口 高<sup>5)</sup>

## Studies of Aurora Dynamics by Aurora Imager (ATV) on the AKEBONO Satellite

By

E. KANEDA, T. YAMAMOTO, K. HAYASHI, R. FUJII, A. KADOKURA, M. EJIRI, K.  
MAKITA, S. SASAKI AND T. OGUTI

**Abstract:** AKEBONO is equipped with an aurora imager for studies of aurora dynamics and global monitoring of magnetospheric activities which should be useful for understanding of local, in-situ observations. It is a two-channel, vacuum ultra-violet (VUV) and visible, snap-shot TV camera with the maximum rating of one shot in every 8 seconds. Initial results of VUV imaging are promising for accomplishments of missions.

### 概 要

オーロラダイナミックスの研究を目的として、オーロラ撮像装置が「あけぼの」に搭載されて居る。この装置はオーロラの様相をグローバルに観測する事から、機上で同時に行われる他の in-situ 観測に対して、磁気圏内に生起して居る擾乱に関する広域的モニタリングとして機能する事も求められて居る。撮像装置は、真空紫外 (VUV) 光と可視光の2チャンネルのセンサーを有する TV カメラであり、最速モードに於いては毎8秒に1枚と言う高時間分解能で画像データの取得に当る。

- 
- <sup>1)</sup> 東京大学理学部地球物理研究施設  
<sup>2)</sup> 国立極地研究所  
<sup>3)</sup> 拓殖大学工学部  
<sup>4)</sup> 宇宙科学研究所  
<sup>5)</sup> 名古屋大学空電研究所

観測は、最初に軌道条件が整った VUV による撮像によって、1989 年 4 月中旬に開始され、以後順調に推移して居る。現在迄に得られた成果から判断すると、この状態が今後共継続するならば、ミッションの達成を期待出来る状況にある。

## 1. 緒言

人工衛星を使用してのオーロラの撮像観測は、ISIS-2 (Anger et al, 1973; Shepherd et al, 1973) 及び DMSP (当時 DAPP) (Rogers et al, 1974) での大いなる成功と共に、そのスタートを切った。その成果が 1970 年代の STP の進展に多大の貢献をした事も歴史的事実である。然し乍ら、この様にして進歩した STP が、これ等の衛星による観測限界を超えた、新たな要求を求め出した事も事実である。これ等の衛星での撮像には、本質的には一次元撮像用スキャナーと軌道運動とを組合せた方式が採用されて居る。この為、画像取得率は一軌道周回当り南北両半球各 1 枚となり、時間分解能の面でオーロラ・ダイナミクス研究上の要求に応じられない。更に、可視光での撮像である為、昼側オーロラの観測は、通常この領域からの強烈なアルベドによって、極めて限定された条件下で始めて可能であった。

STP 研究の為に必要となった、昼側のオーロラを含めたオーロラ・オーバル全体の長時間分解能連続撮像は‘きよっこう’(EXOS-A) によって現実のものとなった。‘きよっこう’に搭載されたオーロラ撮像装置は、TV カメラによるスナップショット方式で 128 秒毎にオーロラ画像を取得する事として、長時間分解能連続撮像の問題をクリアーすると共に、真空紫外領域に存在するオーロラ放射光を対象とする撮像によってアルベドの問題を巧みに交す事に成功した (Kaneda et al, 1977)。‘きよっこう’による真空紫外スナップショット撮像が成功した (Kaneda et al, 1981) 後、この方式は夫々固有の変更を加えた形で、DE-1 (Frank et al, 1981) 及び VIKING (Anger et al, 1987a, 1987b) に於いて採用され成果を挙げて居る。更に、スナップショット方式によらない HILAT (Meng et al, 1984) も真空紫外光による昼側オーロラの観測に成功し、この波長領域での撮像が人工衛星によるオーロラ観測に於いて有効である事が改めて確認された。

オーロラ粒子の加速領域の物理的機構の追求を目的とする‘あけぼの’(EXOS-D) には、総合的観測の一環として、オーロラの総観的観測を行う撮像装置 (ATV) が搭載された。ATV は真空紫外光 (VUV) と可視光 (VIS) 用の 2 チャンネルのセンサーを装備して居る。VUV センサーは、‘きよっこう’の結像系とハレー彗星探査機‘すいせい’搭載の VUV 撮像装置の検出部を夫々ベースに持つ改良型であり、グローバルなオーロラのダイナミクス追求に主として用いられる。一方、VIS センサーは、オーロラの主要輝線である原子酸素緑線 ([OI] 5577Å) 光での撮像を近地点附近の低高度で行い、オーロラの微細構造を主として追求する。ATV の撮像間隔は、最速モードで 8 秒 (衛星のスピン周期) と、従来の衛星による 20 秒の最速記録を大巾に上廻る長時間分解能を有する。

ATV は、打上げ 1 箇月後の高圧印加試験を経た後、1989 年 4 月中旬に軌道条件が観測基準に達した VUV での撮像から稼働を開始し、現在順調に観測を続けて居る。

## 2. 観測装置

ここでは、ATVとその支援装置であるデスパンミラー装置（DMS）の構成概要、スピン型衛星である‘あけぼの’に於ける観測対象の静止化方式、ATVセンサー主要特性、ATV/DMS系による撮像動作、画像様式等に就いて述べる。

姿勢制御に於いてスピンによる安定化方式を採用して居る衛星からの撮像では、視野内の対象を静止させる為は何らかの手段を講じる必要がある。‘あけぼの’に於いては、新たに開発したDMSの支援によって、この静止化を達成した。第1図はATVとDMSの関連部分を示したブロック構成図であり、各アセンブリーを点線によって区分けして示してある。ATVは、機上の中央制御装置DHU（data handling unit）、DMS、電源部PS、ハウスキーピング・モニターHKに、夫々固有のインターフェースを通して、接続して居る。ATVのセンサー・アセンブリー（ATV-S）とDMSのミラー・アセンブリー（DMM）とは、衛星本体中段の外縁部に取付けられ、本体側壁に開けられた窓を通して外部を見る形態となって居り、各センサーの光軸は衛星機軸（スピン軸）と直交する様にセットされて居る。窓を設けられた側壁上端には、4枚の太陽電池パドルの中の1つが取付けられて居り、これが展開するとスピン軸の太陽指向姿勢制御により、窓の部分は太陽光の直接照射から完全に解放されて居る。

ATV/DMS系も他の機器同様に、一連のDC（discrete command）、BC（block

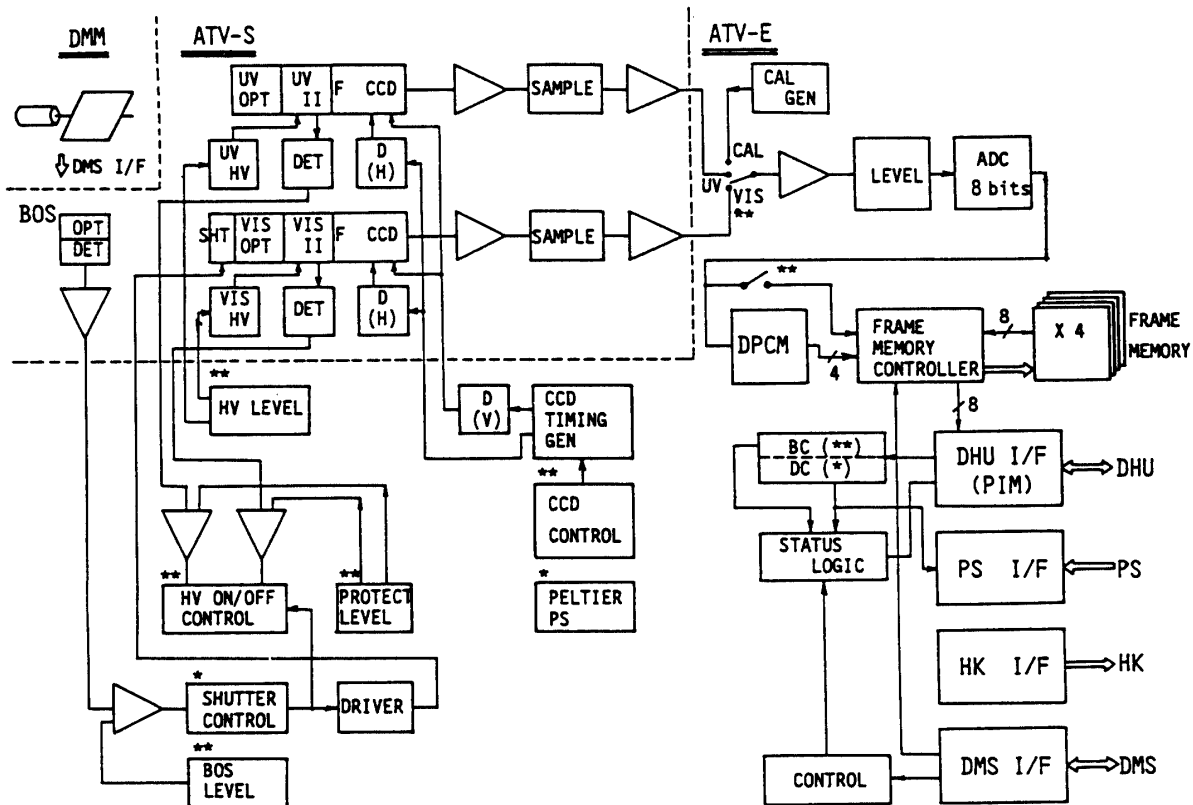


図1 ATV/DMS系機能ブロック図

command) によって制御される。猶、第1図中では、DC、BCによる制御を夫々、‘\*’、‘\*\*’の記号で示してある。これ等のコマンドはDHUを介して送られて来るが、その形態は、直接地上局からの実時間コマンドと、一旦DHUに格納された後、タイマーによって順次実行されるプログラムコマンド(operation program OP)と二通りである。

## 2. 1 静止像取得方式

回転する衛星機上でのスナップショット撮像に於いては、充分な露光時間に基く高品位画像の取得と露光時間中の像のブレ防止とを両立させなければならない。この為、撮像フォトメーター方式(Frank et al, 1981)、或いは、所謂TVカメラを何らかのデスパン機構の支援下で使用する方式が採用されて来た。これ迄の処、デスパン機構としては、デスパン・プラットフォームが汎く使用されて来たが、最近になって新たなデスパン機構の導入が始まりつつある。その一つに、CCDを検出素子として使用して居る撮像装置に於ける移動積分方式(Hirao and Kaneda, 1983; Anger et al, 1987a)がある。これは外部に特別な機構を設ける事なく、CCDに入力される光学像が衛星のスピンのよってブレるのと同期させてCCD内部の電荷像を順次転送させつつ、露光時間中に積分動作を行わせるもので、いわば電子的な内部デスパン方式である。唯、この方式に於いては、結像系によって形成される光学像に就いては、一定の特性を有する事が要求される。反射鏡のみで構成されるVUV結像系では、この基準を充たす為には、視野(FOV)を約20°以下に絞り込む必要がある。一方、観測上では、オーロラオーバル全体をカバーする視野が要求されて居るが、こ為には10,000 kmの遠地点に於いてさえFOV 30°が必要となる。この為、観測上の要求を優先させ、ATVに於いてはDMSによる光学的デスパン方式を採用する事となった。

DMSに於いては、スピン軸に平行な回転軸に沿う形で取付けられた平面鏡を、スピンとは逆方向に半分の角速度で回転させつつ、回転軸に直交する方向から、平面鏡を介して衛星外部の対象を眺めた場合に静止して見えると言う、簡単な原理に基いてシステムが構成されて居る。この場合の積分時間の長さは、平面鏡の幾何学的寸法と、平面鏡に投影されたFOVの大きさ及び回転速度とによって、その最大値が決定される。

## 2. 2 センサー特性

ATV-Sは、基本的には同じ構成要素から成るVUV(UV)とVISの2チャンネルのセンサーを有する。夫々のセンサーは入口側から、結像系(OPT)、イメージインテンシファイアー(II)及びIIの出力窓にファイバープレートを通じて取付けられたCCD(FCCD)の順で構成されて居る。両センサーのFOVは、前記の平面鏡(デスパンミラー)の異なる領域を分け合って占有して居る。過大入力光に対するセンサーの保護機構としては、IIのスクリーン電流検出回路(DET)が設けられて居る。規定値を超える電流が生じた場合、DETはIIに印加されて居る高圧の電源(HV)を遮断して、IIの保護に当る。この他に、過剰入射光に対する耐性の低いVIS-II光電面保護を目的として、BOS(bright object sensor)の制御によって、入力光の高速遮断を行い得るシャッター(SHT)が、VIS-OPTの前に装備されて居る。

UVとVISセンサーの主要特性を第1表にまとめた。表中のEmission passbandの波長

第1表 ATV センサー主要諸元

|                   | UV-sensor                         | VIS-sensor                  |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| optics            | off-axial mirror lens<br>(F: 2.4) | camera lens<br>(F: 2.5)     |
| II photocathode   | KBr                               | S20                         |
| emission passband | 1150-1390 A<br>(1% of peak)       | 5577+180 A (FWHM)<br>-120 A |
| CCD               | 488 (V) × 376 (H) elements        |                             |
| FOV               | 36°×36°                           | 30°×40°                     |

範囲から明らかな様に、VUV 撮像での対象光は  $N_2$  LBH bands と原子酸素輝線であり、 $H\text{Ly-}\alpha$  も含まれる事となる。この波長範囲は、II 光電面物質 KBr の分光波長特性と II 入力側窓材  $MgF_2$  の透過特性によって規定されて居る。一方、VIS 撮像に於ける原子酸素緑線 [OI] 5577A の放射は、SHT と OPT の間に装着されて居る干渉フィルターによって抽出される。このフィルターの透過波長巾は、有限な拡がりを持つ FOV による斜入射の効果を織り込んだ値となって居る。UV 及び VIS の FOV として、第1表に記された値は、4.88 mm (V) × 6.39 mm (H) のサイズを有する CCD 受光部 (Toshiba TCD 205C) によって画像データとして取出される位に対応するものである。表中の値から推察される如く、広角結像系として、軸外しの構成を採用した UV-OPT による像には、固有の歪みが含まれて居る。

### 2.3 撮像動作

ここでは ATV/DMS 系での画像取得の動作を簡単に述べる。ATV/DMS の 'ON' によって、DMM はデスパンミラーを基底位置に展開して、管区開始準備が完了する。'observ start' のコマンドによって、予め選択済の II に対して高圧の印加を行う共に、ATV は 'despun request' の信号を DMS に対して送信する。これによって DMS はデスパンミラー駆動の準備に入る。先づ衛星本体のスピンの毎に DHU より送られる基準パルスの到着を待ってカウントを開始し、これも予めコマンドによって指定された位相位置に達する迄カウントを継続する。カウント終了時に DMS は DMM に対しデスパン開始を指示し、デスパンミラーはデスパン動作に入る。ミラーが定速状態に達し、撮像開始位置を通過すると DMM は DMS を介して ATV に 'shot enable' の信号を送り返す。これによって ATV は、続行して居た暗電流によって CCD 内に堆積する電荷のリセット動作を中止し、動作状態のデスパンミラーによって静止状態と見える観測対象の撮像を開始する。指定された積分時間中に CCD フォトダイオード部に蓄積された画像信号は、積分終了と共に、シフトレジスター部に移される。一方、デスパン動作を継続して居たミラーも制限位置に達して停止後、反転して基底位置に戻り、次のデスパン開始指令待ちの状態に入る。CCD シフトレジスター部に

移された画像信号は、画素単位で順次読み出され、レベル変換・A/D変換を経て、更に指定されて居ればDPCMによるデータ圧縮後、フレームメモリーに格納される。

上記の1サイクルの撮像動作は、1スピン周期（8秒）内で完了する為、8秒間隔の画像データの取得が原理的には可能である。但し、現実にはフレームメモリーから画像データを読み出して地上局へ送信する伝送速度上の制約から、この最速モードが実現されるのは、DPCMを施した188×244画素構成の画像データを、‘画像一粒子モード’と呼ばれる特定のテレメーター・フォーマットに於いて、64 Kbpsの高速モードで伝送する場合に限定される。通常の観測条件では、平均16秒間隔の撮像でATVは運用される。

#### 2.4 画像フォーマット

ATVは、‘ダイナミックモード’又は‘ノーマルモード’の何れかのモード選択下で運用される。前者は高時間分解能、後者は更にDPCM ON/OFFのオプションによって高空間分解能/高階調度の画像データが取得される。ダイナミックモード及びDPCM OFFのノーマルモード下では、水平方向に隣接する2エレメントを1つに重合せる事によって、本来376×244画素構成の画像が、188×244画素構成に縮約されて居る。この他にも画像データは、フレームメモリーに格納される迄の段階で、電子回路部（ATV-E）に於いて幾つかの機上処理を受ける。CCDから読出される各エレメントの持つ、オーロラ輝度に対応するレベルは対数関数曲線に近似させた特性のレベル変換（LEVEL）を先づ受ける。この後に、各エレメントのレベルは8ビットの階調度のA/D変換（ADC 8 bits）を受け、ダイナミックモード及びDPCM ON ノーマルモードでは、33画素毎の基準画素に後続する32画素は4ビットで符号化されたDPCMによるデータ圧縮を受ける。これ等の機上処理の結果、ダイナミックモード下で取得された画像データは、ノーマルモード下のそれと比較した場合、約半分のビット量で構成される事になり、地上局への伝送時間が半減する事から、前節で述べた伝送条件によって、ノーマルモードに対して高時間分解能の観測が可能となる。

実際の画像データ取得に於いては、フレームメモリーによって構築されるデュアルバッファの一方が空になった時点で撮像動作が開始され、それが画像データで充たされる迄、撮像動作は連続する。撮像動作はダイナミックモードで32秒（4スピン）、ノーマルモードで16秒（2スピン）の間、継続する。一方、64 Kbpsの高速モードで1バッファ分の画像データを地上局に伝送する場合、‘画像一粒子モード’で32秒、‘総合観測モード’で64秒を要する。これ等の出入力の時間差の分、撮像動作は停止する事となる。

### 3. 装置運用・観測経緯

前述した如く、ATVは1989年4月中旬よりVUVによる撮像によって稼働状態に入った。‘あけぼの’は、内之浦KSC、南極昭和基地、カナダPrince Albert、スウェーデンESRANGEの4地上局による受信体制に支えられて居るが、この中でKSCが唯一のコマンド送信局として専ら‘あけぼの’の管制に当って居る。これ等の地上局での観測データ受信の為のATV運用を確立する為には、各軌道周回毎の観測条件の正確な算出に基いた、コマンドシーケンスを作成する必要がある。この算出に当っては、32秒間隔で与えられて居る予測軌道全データに就いて、1）オーロラオーバルの可視状態、2）撮像時のスピン周回中

の位相, 3) 地上局可視状態, に加えて, 4) FOV 内に浸入する薄明・日照領域のチェック, 5) 放射線帯粒子による被爆のチェック等の保安チェックも含まれて居る. これ等の結果をプログラムコマンド OP に於けるコマンド列として実行形式にまとめる際には, 最大 128 の制御指令 OG (organized command) 数の制限条件下で, 最小数の OG とする様に努力する必要がある.

ATV 運用結果の最終確認は, 受信したデータの画像処理結果に基づいてなされる事になる. 第 2 図及び第 3 図に示された VUV オーロラ画像は, FOV 中心を画像中央とする等角等距離写像として, データを再形成したものに, 軌道, 姿勢データに基づいて計算した補正地磁気座標系のグリッドを重ねたものである. 何れの処理も最終バージョンではないが, 適合状態は良好であり, オーロラオーバルの捕捉も運用時に意図した状態に略等しい. この様に, 装置運用・機器状態共に良好に推移して現在に至って居る.

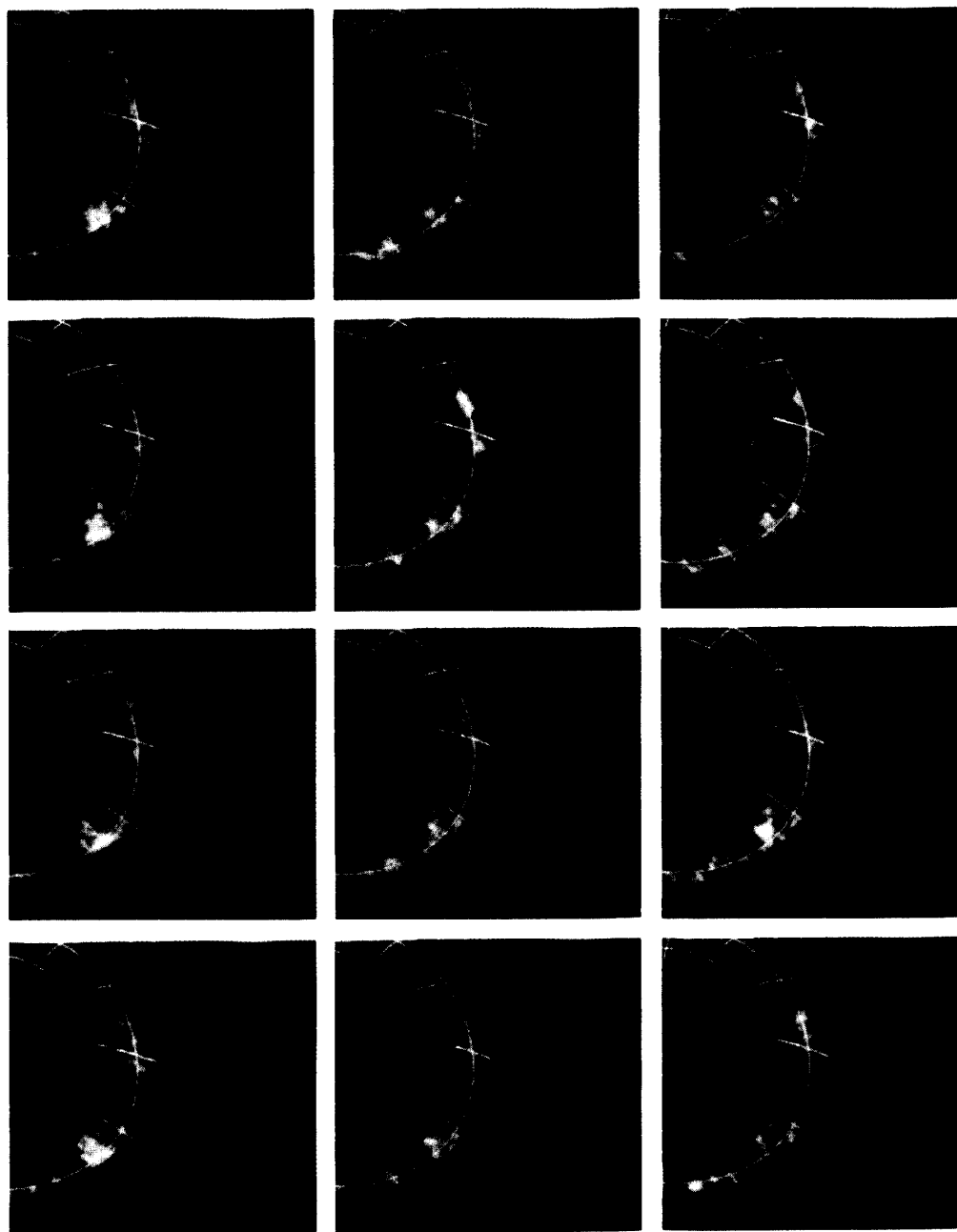
第 2 図及び第 3 図に示された観測データは, 何れも, 1989 年 6 月に南極上空の遠地点附近で取得されたものである. 全画像データに於いて, その上方に向かって昼側領域が存在し, 左側が朝方, 右側が夕方領域に対応して居る. グリッドは,  $80^{\circ}$  から  $40^{\circ}$  迄  $10^{\circ}$  間隔で緯度サークルが計算されて居り, MLT は 2 時間毎のピッチで描かれて居る中で, 0 h-12 h の方向は太目の線としてある. 両図に於ける画像の時系列は, 何れも各段共, 左から右へと向う, 更に右端から次段左端に移る様に並べられて居る. 第 3 図中の各画像に認められる, 上下に走る弯曲した黒いベルトは, 衛星のスピン周期が規定の 8 秒から外れた為に生じたデータギャップによるものである.

#### 4. 結 び

ATV は現在, 観測データ取得の最中にあり, データ解析はその緒に着いた処である. 然し乍ら, 高時間分解能撮像が捉えた, 第 2 図及び第 3 図に見られる, オーロラの連続的变化は, オーロラサブストームの発生・展開に代表される大規模な過渡現象の様相が, 同様に, 把握可能となる事を示唆するものと考え, 今後の観測・解析に期待を寄せて居る. 更に, 遠地点が北半球高緯度地方上空に達する今冬季の観測が順調に推移した後には, オーロラダイナミクス研究上必要とされるデータベースを或は程度構築出来る事を念願するものである.

我々一同は, 'あけぼの' プロジェクトのマネジャーである. 宇宙科学研究所鶴田教授の終始変らない御指導に深い謝意を表すると共に, プロジェクトサイエンティストとしての, 東北大学大塚教授の ATV 計画に対する評価と激励を頂いて居る事に篤く御礼を申し上げる次第です. ATV が順調に稼働し, 観測成果を挙げて居る事に対して, 同装置作成に関してその任に当られた, 主契約社の東芝を始めとし, 浜松ホトニクス, ニコン, 日本電気, 明星電気の各社の関係各位に, 改めて感謝の意を表する次第です. 亦, ATV の観測成果は 'あけぼの' チーム全員による, 絶える事のない衛星運用の賜物である事に深く想いを致して居ります. 最後になりましたが, ATV/'あけぼの' プロジェクトに御支援を頂いて居る関係者の皆様に御礼を申し上げますと同時に, 今後共変らぬ御支援の程をお願い致します.

Highly Activated Midnight Portion of Southern Oval  
 Jun. 09, 1989 UT: 01<sup>h</sup>



46:47  
- 47:11

47:51  
- 48:15

48:55  
- 49:15

図2 高活動状態のストームタイム VUV オーロラ, 1989年6月9日 01:46:47-01:49:11 (UT)  
 (衛星高度: 約10300km)



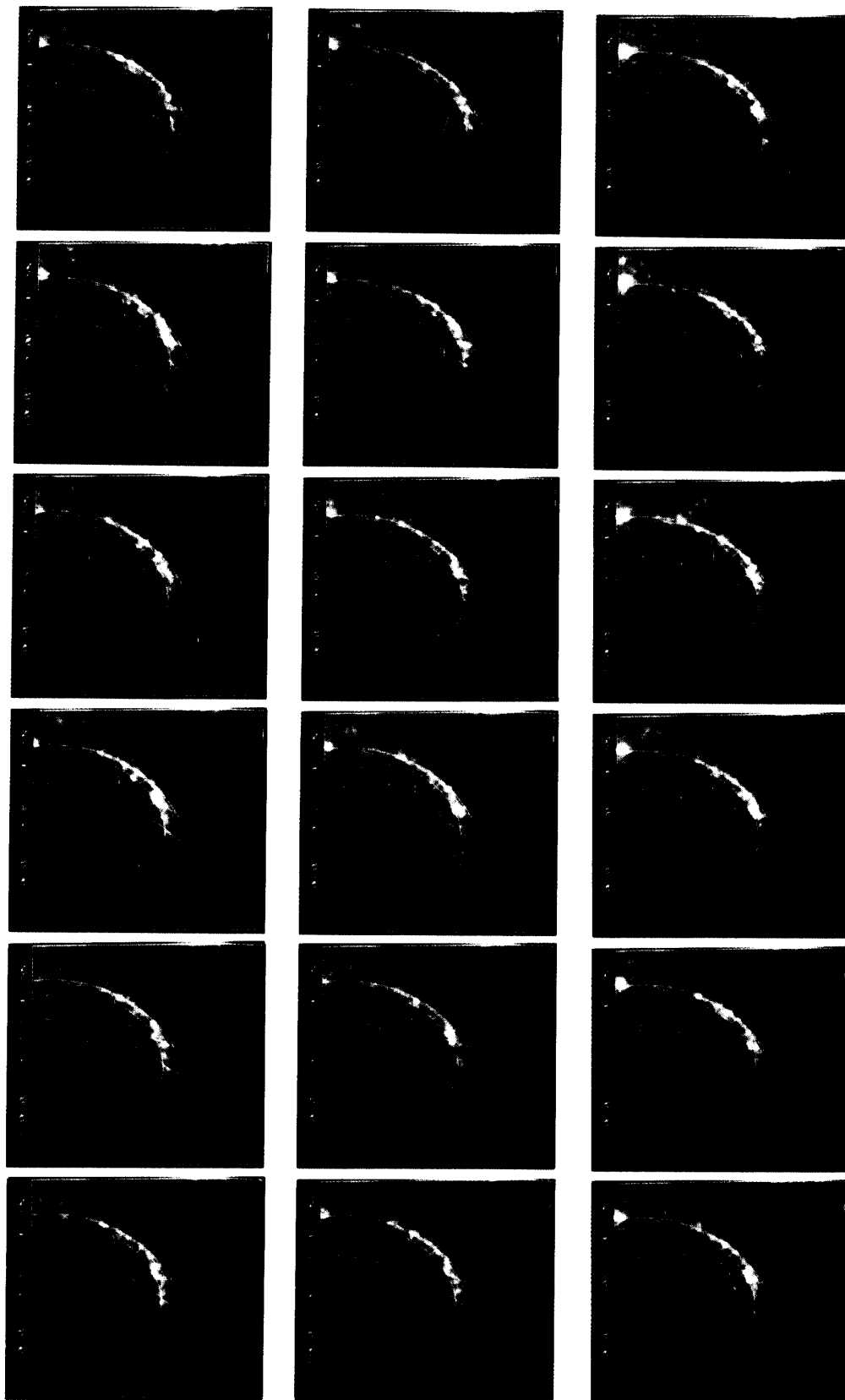


図3 繰り返し発生が観測されるVUVオーロラの大規模変動. 1989年6月2日12:25:29—12:27:44(UT)  
(撮像間隔: 8秒モード, 衛星高度: 約10300km)

## 参考文献

- Anger, C.D., T. Fancott, J. McNally, and H.S. Kerr, ISIS-II scanning auroral photometer, *Appl. Opt.*, **12**, 1753, 1973.
- Anger, C.D., S.K. Babey, A. Lyle Broadfoot, R.G. Brown, L.L. Cogger, R. Gattinger, J.W. Haslett, R.A. King, D.J. McEwen, J.S. Murphree, E.H. Richardson, B.R. Sandel, K. Smith, and A. Vallance Jones, An ultra violet auroral imager for the VIKING spacecraft, *Geophys. Res. Lett.* **14**, 387, 1987a.
- Anger, C.D., J.S. Murphree, A. Vallance Jones, R.A. King, A.L. Broadfoot, L.L. Cogger, F. Cretzberg, R.L. Gattinger, G. Gustafsson, F.R. Harris, J.W. Haslett, E.J. Llewellyn, J.C. McConnell, D.J. McEwen, E.H. Richardson, G. Rostoker, B.R. Sandel, G.G. Shepherd, D. Venkatesan, D.D. Wallis and G. Witt, Scientific results from the VIKING ultraviolet imager: An introduction, *Geophys. Res. Lett.* **14**, 383, 1987b.
- Frank, L.A., J.D. Craven, K.L. Ackerson, M.R. English, R.H. Eather and R.L. Carovillano, Global auroral imaging instrumentation for the Dynamic Explorer mission, *Space Sci. Instrum.* **5**, 369, 1981.
- Frank, L.A., and J.D. Craven, Imaging results from Dynamic Explorer 1, *Rev. Geophys.*, **26**, 249, 1988.
- Hirao, K., and E. Kaneda, Scientific instrumentation of PLANET-A VUV imaging of the hydrogen coma of Halley, *Adv. Space Res.*, **2**, 167, 1983.
- Kaneda, E., M. Takagi, and N. Niwa, Vacuum ultraviolet television camera, *Proc. 12 Intl. Symp. Space Tech. & Sci.*, 233, 1977.
- Kaneda, E., T. Mukai, and K. Hirao, Synoptic features of auroral system and corresponding electron precipitation observed by KYOKKO, "Physics of Auroral Arc Formation" Eds. Akasofu and Kan, *Geophys. Monograph Ser.*, **25**, 24, 1981.
- Meng, C.-I., and R.E. Huffman, Ultraviolet imaging from space of the auroral under full sunlight, *Geophys. Res. Lett.* **11**, 315, 1984.
- Rogers, E.H., D.F. Nelson, and R.C. Savage, Auroral photography from a satellite, *Science*, **183**, 951, 1974.
- Shepherd, G.G., T. Fancott, J. McNally, and H.S. Kerr, ISIS-II atomic oxygen red line photometer, *Appl. Opt.*, **12**, 1767, 1973.