

オーロラのグローバル・ダイナミックスの研究

金田 栄祐*・山本 達人*・他「あけぼの」ATV チーム

Studies on Global Dynamics of Aurora

By

E. KANEDA, T. YAMAMOTO AND 'AKEBONO' ATV-TEAM

Abstract: 'AKEBONO' imager (ATV-UV) has clarified features of auroral substorm expansion onset with its high speed image cycle. It is shown that the expansion phase consists of 2 stages, an 'initial brightening' stage and a 'flaring-up' stage. Concerning to controversial issue of developments of westward travelling surge, observational results of ATV-UV delineate unambiguous facts for solving the question.

概 要

オーロラの Global Dynamics の中で一つの重要テーマである、サブストーム開始時の様相が、64秒間に8秒間隔の4回撮像と云う高時間分解能観測によって、新たに'initial brightening'とそれに続く'flaring-up' stage の2段階構造となって居る事が明らかとなった。亦、westward travelling surge の発達過程に関しても、高時間分解能観測から、'DE-1' と 'VIKING'の結果の間で行われた議論は何れも正鵠を得ていない事が判明した。

“あけぼの”に搭載された紫外オーロラ撮像装置(ATV-UV)による観測は、1989年4月の開始以来、既に1年余り継続して行われ、この間に取得した画像データの総数は約40万に達すると考えられる。この数は、10年以前に“きょっこう”が約20カ月のミッションライフに於て取得した画像データ総数の10倍以上に相当する膨大な量である。このデータセットの中、相当な部分を占める南極昭和基地上空での観測データに就いては、現在データベース化の作業が行われて居り、明春以降に本格的な解析が可能となる見込みである。

今回の報告では、これ迄に行ったオーロラの Global Dynamics に関する研究の中から磁

* 東京大学理学部地球物理研究施設

気圏の物理に直結し、“あけぼの”の他観測分野とも深いかわり合いを有するオーロラ・サブストーム開始時の様相の問題に焦点を絞る事とする。特にこの問題を取り上げた理由の一つには、“あけぼの”に依る高時間分解能の撮像が、この様な急激な過渡現象の解明に大きく貢献して居る事実をアピールする事もふくまれている。

オーロラ・サブストーム開始時の様相に就いては、これ迄に地上及び衛星観測が長年にわたって行われて来たにも拘らず、十分に説明が行われたと言える状況に無いのが実状である。地上観測に於ては、近年TVカメラの導入に依って、時間分解能の面では問題が無くなったが、グローバルに総観的な様相を把握する為には、非常に広域的なネットワーク観測を維持継続させる必要がある。一方、衛星観測では、画像データ取得及び連続データ取得の時間分解能が問題となる。最初にスナップショット撮像を実現させた‘きょこう’搭載のATVに依る128秒間隔の観測が、サブストーム・オンセットの様相を詳細に把握し得なかった(Kaneda et al., 1981) 事実を考慮した場合、この問題に対して有効な観測を期待し得るには、‘あけぼの’搭載のATV-UV(金田他, 1990, Oguti et al., 1990)と、‘VIKING’のUVI(Anger et al., 1987) 止まりで在る。

オーロラ・サブストーム開始時の様相が未だに今日的論議の対象である事を示す事実が在る。即ち、‘VIKING’のミッション終了2年後に、‘DE-1’のオーロラ画像データに基づいたwestward-travelling surgeに関する論文(Craven et al., 1989)が発表された。この論文での論議は、古典的なオーロラ・サブストームの描像(Akasofu, 1964)に対して加えられた修正意見に依るものであった。この論文が反論を加えている対象は‘VIKING’によるオーロラ撮像に関する最初の報告(Rostoker et al., 1987)である。この事実は、この時点迄、オーロラ・サブストーム開始及びそれに続くwestward-travelling surge発生に就いて‘VIKING’の観測成果が本格的には発表されて居ない事を示唆すると考えられる。この様な背景は別として、この議論に於て‘VIKING’側は地上磁場変動の観測に基づいて描像(Wiens and Rostoker, 1975; Tighe and Rostoker, 1981)の支持に回ったのに対して、‘DE-1’側は全点カメラ・ネットワークに依って得られた大量のデータを捨象した前述の描像(Akasofu, 1964)が成立する事を主張した。双方共、少数の典型的観測例に準拠した一方的主張であったが、‘DE-1’側では画像データの時間分解能に、一方‘VIKING’側は、現象の時間的カヴァレッジに夫々問題を抱えた議論であった。

第1および第2図は‘あけぼの’ATV-UVが捉えたオーロラ・サブストームのexpansion onset時の様相である。これ等の観測時に於けるATV-UVの撮像モードは、64秒間に8秒間隔で連続的に4回撮像を行い、これ等の画像データを機上で圧縮(DPCM)に依って64秒で地上の受信局に送信する、標準的なDynamics Modeである。第1及び第2図に於ては画像データの冗長な羅列を避ける目的から、上記の4連続撮像のデータを重ね合わせて単一の画像としたものを時系列表示してある。各図に於て時間は、上段から下段へ、亦、各段に於ては左から右への向きで経過する様に画像が配列されて居る。両図各段の左に示された数字は‘分：秒’で表した撮像時刻であり、上下が夫々最左及び最右画像に対応する。撮像時刻として表示した値は、各画像が4連続撮像の重ね合わせである事に対応させて、4 shot-timeの平均値を採用した。従って、両図中のイメージ・データは、実質64秒間隔で、オーロラの動態を表して居ると考えて良い事になる。イメージ・データに被せてある座標グリッドは

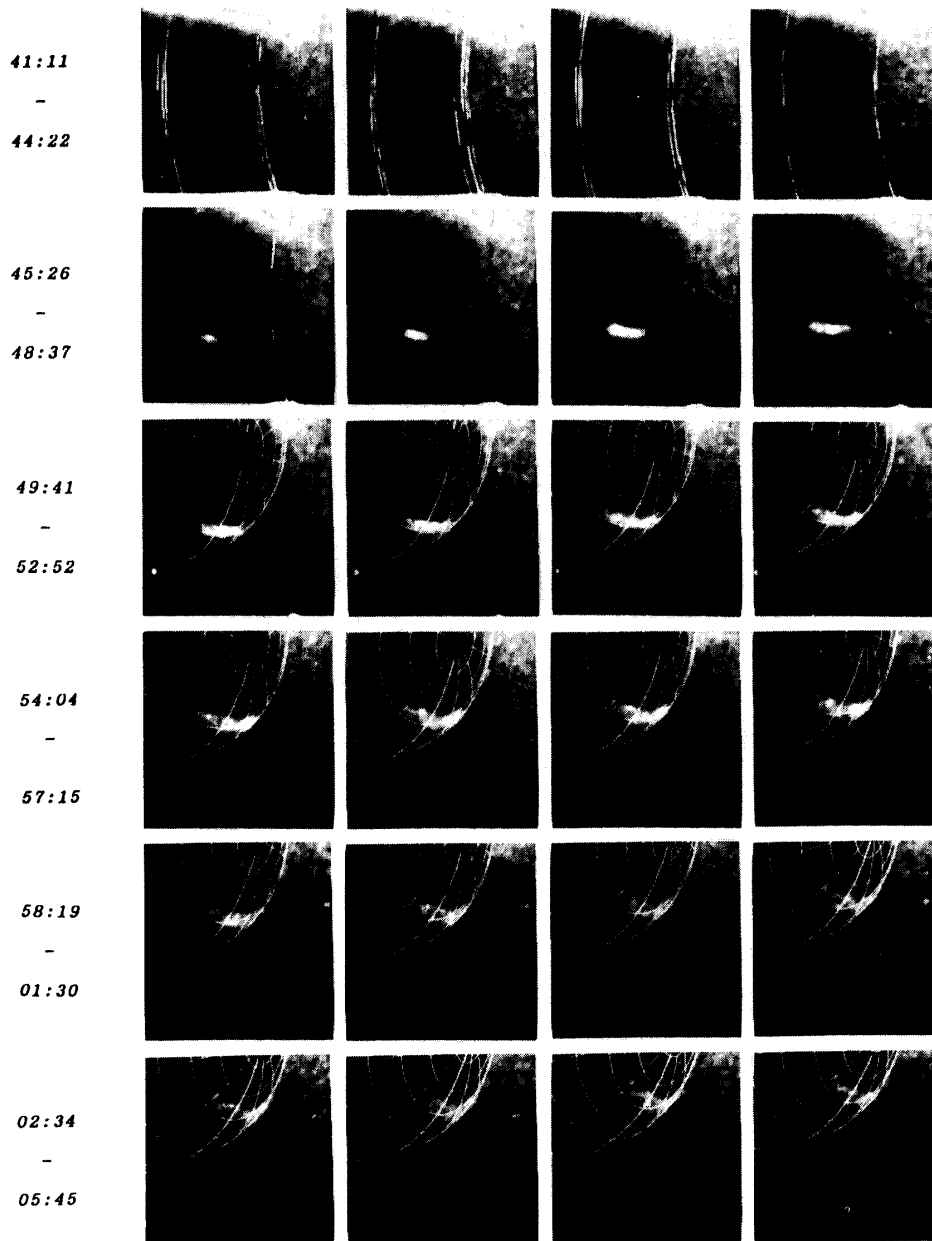


図1. 'あけぼの'ATV-UVによるオーロラ・サブストーム開始時の様相(1990年2月23日 UT06-07時)

Corrected Geomagnetic 座標系に準拠したものであり、緯度サークルは同座標系の 80° から 40° 迄を 10° 間隔で、亦、経度に対応させて、同座標系で定義される地磁気地方時 (MLT) を2時間間隔で描いてある。グリッドの向きを同定させる為に、MLT12時及び24時の経線は太目にしてある。座標グリッドは衛星の軌道・姿勢データに基づいて算出される為、これ等のデータが欠落した時刻に対応するイメージ・データに就いては、内外挿値等を使用する事なく、グリッド計算を省略した。第1図最上段の各イメージ・データ中にも認められる上

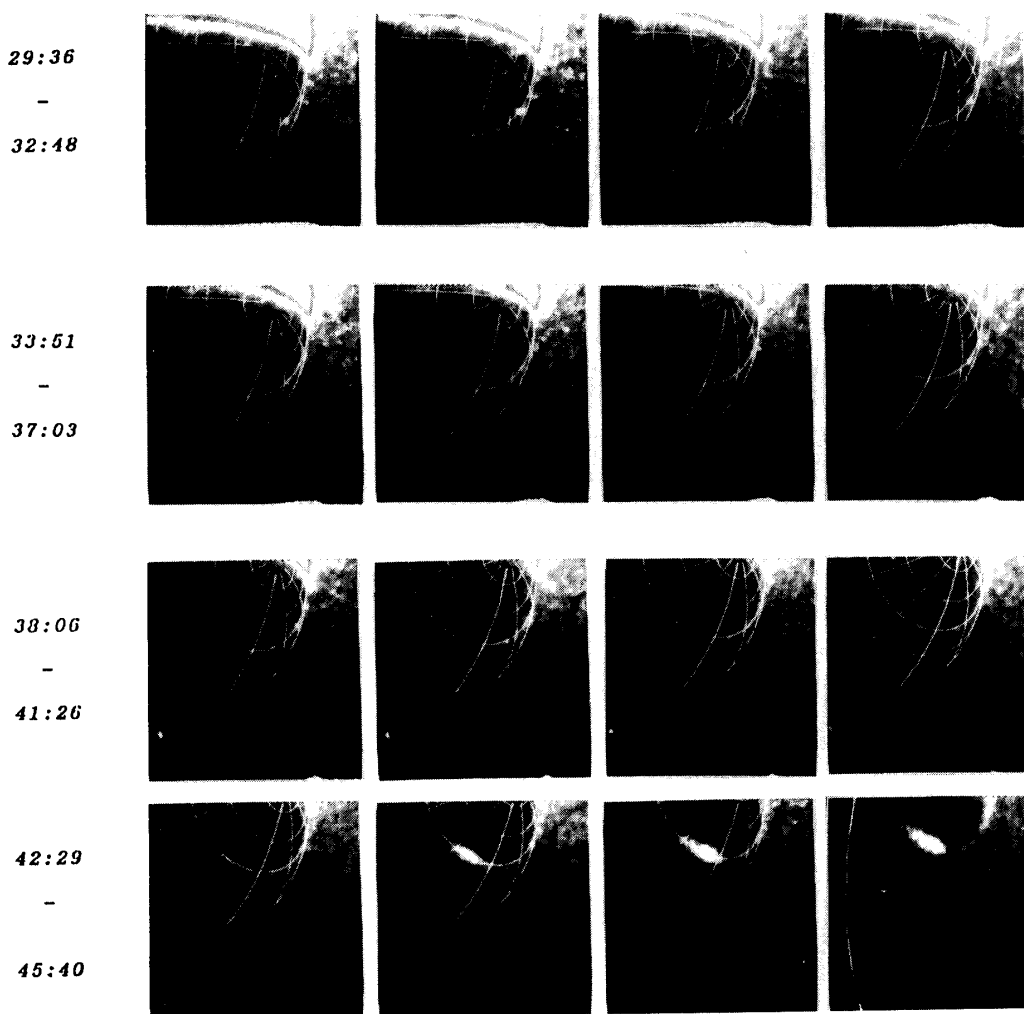


図2. 'あけぼの'ATV-UV によるオーロラ・サブストーム開始時の様相 (1990年2月23日 UT13時)

下に走る不規則な輝度レベルの筋は観測データ受信時に混入したノイズに依るものである。亦、第1段から第2段の各イメージ上部に認められる明るい部分は日照領域である。

第1図の例では、44分22秒 (44:22) のイメージに expansion onset の形跡が微かに認められる。原データのチェックから事実、44分26秒の撮像時に、8秒前には存在しなかった background oval からの輝度レベルの上昇が記録されて居る。この様にして開始した auroral substorm の expansion phase は、オーロラ増光部分の中心位置を変動させることなく、増光領域の輝度レベル上昇と東西方向への伸張とを伴って進行して行く様相が“46:30”のデータ迄認められる。この activity の上昇傾向は“47:34”のイメージ以後加速される事実が、第1図のオーロラ・イメージから見て取れる。onset start のチェックと同様に原データを参照すると、“48:37”の画像以後顕著となる増光領域内の輝度レベルの非一様性が、既に、“47:34”のデータに含まれる47分22秒の撮像データに現れて居る。expansion phase の代表的オーロラ現象である poleward expanding bulge の形成、westward-travelling surge

の発達等が、“48：37”以降の画像中に記録されて居る。この様に expansion phase は、従来から知られて居るオーロラ現象が発達する stage に先行して、最初の2～3分程度の間継続する増光の stage が存在する事実が第1図の例に依って明らかとなった。

expansion phase の2 stage 構成の事実は、1989年11月17日の November Event として知られる磁気嵐の際、同じく ATV-UV が観測した substorm expansion onset の折に発見されたものであり、この2 stage の前段を “initial brightening”, 後段を “flaring-up” と夫々名付けた (Kaneda et al., 1989; Yamamoto et al., 1989). November Event での onset 観測例では、オーロラの expansion が補正地磁気緯度52度の MLT 24時周辺で生起し、これに殆ど同期した形で、MLT で約6時間離れた北海道で低緯度オーロラが目撃されると云う異常な状況であった為、expansion onset の2段階構成が一般的な様相と断定しかねた。しかし、第1図に集録した例は、1990年2月23日 UT 06～07時の間に観測されたものであり、磁気嵐とは無関係である。磁気嵐と関係の無い期間に観測されたオーロラ・サブストーム開始時の様相は、同様な2段階構成の expansion onset である。第2図は、軌道条件とオーロラ・サブストーム開始時との関係から、expansion phase の flaring-up stage 初期迄を集録した例であるが、expansion onset の2段階構成の様相を示して居る。第2図の例も1990年2月23日に観測されたものであり、UT 13時のイベントである。expansion onset は“42：29”の画像中の MLT22～24時のオーロラの initial brightening に依って、この時点以前である事が判断される。前例同様、原データの参照から initial brightening の最初の痕跡は“41：26”のデータに含まれる41分37秒撮像のイメージに認められる。亦、flaring-up は、“44：37”の最初の画像である、44分25秒撮像データから開始して居る。第2図での initial brightening の例は、第1図の場合との比較で見ると、増光領域が東西方向に拡がると云う空間的発達が顕著ではなく、onset の時点で既に flaring up 開始時の東西方向の幅一杯に増光が起って居る事が特徴的である。これ等の例では何れも、flaring up 即ち、poleward expanding bulge 或は westward travelling surge の発生が zonal には MLT で2時間程度の範囲内で起こる事を示している。

Kawasaki and Rostoker (1979) による、westward travelling surge 検出に先行するアーク増光発生の指摘は、その事実がグローバルな観測網に依って捕捉されたものでなかった為、その後の研究の進展に大きな影響を与えなかった。この経緯は、サブストームの様相に関する総括的な検討 (Rostoker et al., 1980) に於いても、単に westward travelling surge の西側の現象と解釈された事からも明かである。しかし乍、‘あけぼの’による expansion onset の2段階構造、即ち bulge の形成、westward travelling surge の発達に至る flaring-up stage に先行する initial brightening stage の存在、をオーヴァルのグローバルな撮像観測に依って確立した事はサブストームの生成機構に関する理論的考案に重要な示唆を与えるものと考えられる。

expansion phase の主相とも云うべき flaring-up stage でのオーロラの様相に就いては、前出の議論をも含めて種々議論が多いが、従来の観測事実を今日の見地から検討を行った場合、新たに追加するべき観測事実の多さに突き当たる。勿論、この報告に於てこの stage の全容を論じ切る事は不可能であるが、前節でも引用した‘VIKING’での観測結果との対比において興味ある事実を述べることにする。

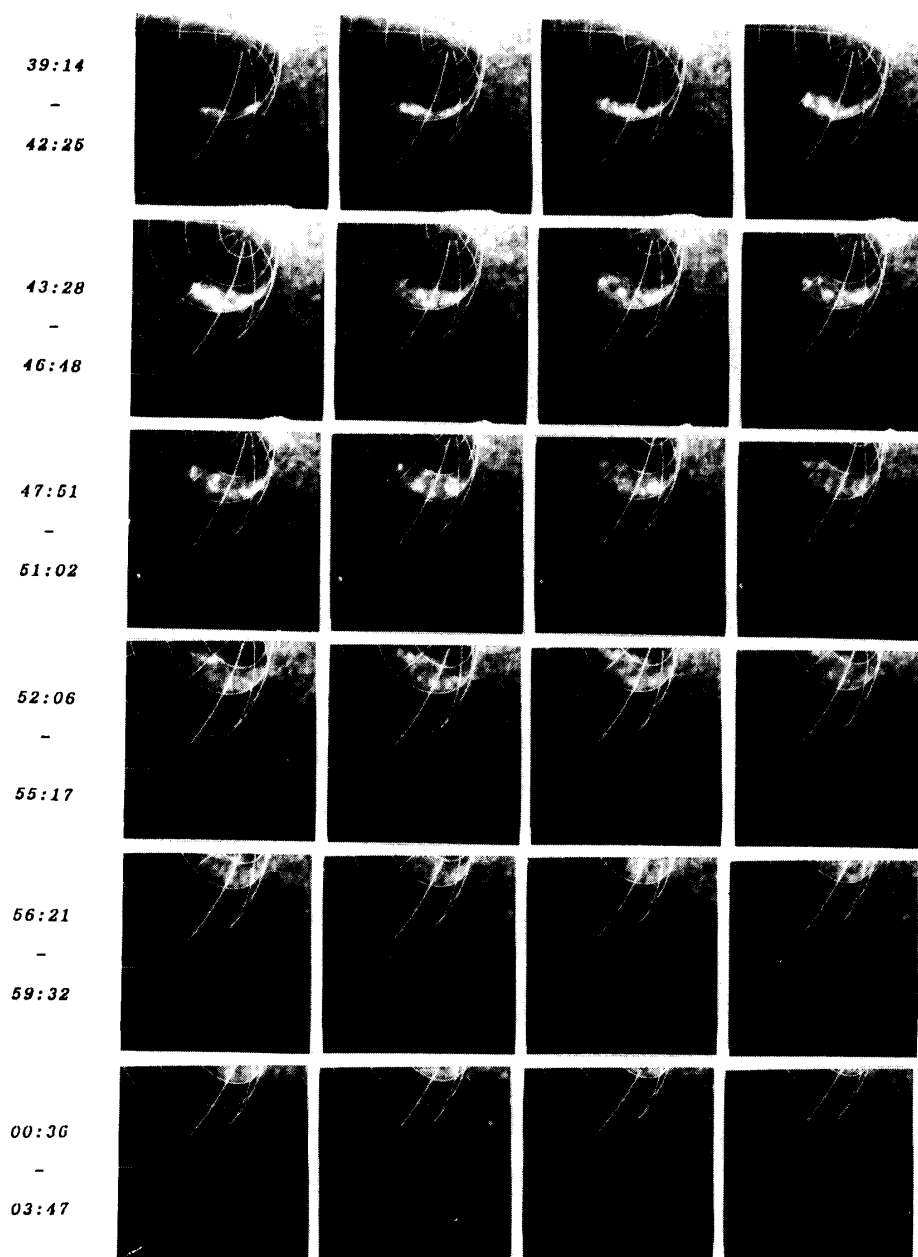


図3. 'あけほの'ATV-UVによる westward travelling surge 発達の様相 (1990年2月23日 UT06-07時)

サブストームに伴うオーロラの発達に就いては一般に以下の如くに (Akasofu, 1964) 考えられている. 即ち, 1) expansion onset より5分 ($T = 5 \text{ min}$) 程度の中にアーク・システム中の最低緯度アークが広く夜半球側全体で増光する. 2) 更に $T = 10 \text{ min}$ 程度迄に真夜中付近に poleward expanding bulge の形成を見, その西端が westward travelling surge として発達して行く. 更に朝方側には bulge 内からオーヴァルの低緯度側に沿って activity が伝播して行く. これと異なり 1) 先づ $T = 5 \text{ min}$ 程度迄の間に, 真夜中側に小さな bulge

が形成され、オーヴァルに沿って activity が、その両側から伝播して行く、2) $T=10\text{min}$ 程度迄に poleward expanding bulge が発達し、westward travelling surge も既に伝播を開始して居る、と云う描像 (Starkov and Fel'dstein, 1971) もある。但し、これ等は何れも多年の研究の成果を捨象し schematic diagram として纏め上げた事を考慮して、或る程度柔軟に理解する必要がある。唯、第1, 2図に示した如く‘あけぼの’での観測からは、bulge の形成、activity の伝播は同時進行の形で展開し、亦 bulge の最初の東西方向の幅は、Starkov and Fel'dstein (1971) の示唆及び‘VIKING’での観測例 (Rostoker et al., 1987) 同様、狭い事が示された。この他、第1図で顕著に示されて居るが、initial brightening stage で既に、真夜中の増光領域以外のオーヴァルの部分にも全体的に或る程度の輝度レベルの上昇が検出されて居り、特に午後側でこの傾向が westward travelling surge の発生以後にも bulge の外の西側で良く見て取れる。expansion onset がオーヴァルに対するグローバルな擾乱である事実は、‘きょっこう’によるオーロラの撮像観測 (Kaneda et al., 1981) に於いても、今回の‘あけぼの’と同様な傾向の存在として報告されて居る。

westward travelling surge 発達の様相を論議する為に、第3図に flaring-up stage 以降のオーヴァルの観測例を示した。同図のフォーマット及び、イメージ・データ中のグリッド等は第1, 2図と同一にしてある。第3図に於ける westward travelling surge は、決して一様な西側への連続的伝播を行っている訳ではない事は明かである。西側への一定の伝播・停滞・輝度増加等の活動上昇、再伝播開始と云うサイクルで順次西側に拡がって行く。この特徴的な発達・伝播の様相は第1図の例に於いても見る事が出来る。この特徴は‘VIKING’による結果 (Rostoker et al., 1987) と異なる。彼等は、bulge 内にはあるが、新たな高活動領域が間欠的に更に西側に発生する事によって westward travelling surge が発達して行くと報告し、地磁気の観測データ解析から得られた同様な傾向 (Wiens and Rostoker, 1975) を支持して居る。‘あけぼの’の結果から見て、Wiens and Rostoker (1975) の結論は、地磁気とオーロラの両現象間に完全なパラリズムが成立しなければ問題は無いが、よしんば成立するとしても、彼等の使用したデータのネットワークが現象を完全には捕捉し得ない粗さである事に起因する公算が大であると考えられる。同様に‘VIKING’の結果も‘あけぼの’が行っている撮像レートよりも低いレートの為に将来したコマ落とし効果に基づくとも考えられるが、詳細な議論を行う為には、相手側の更なる観測例が必要である。この様にオーロラ・サブストームの発達過程を、高時間分解能の撮像データに基づいて精査すると、改めて snap-shot imaging の問題に逢着する。衛星のスピンを利用して imaging photometer 方式 (Frank et al., 1981) で画像形成を行って居る‘DE-1’の観測結果に就いては、速い変動に関する限り、今後も一定の考慮をもって判断する必要がある。

参考文献

- [1] Akasofu, S.-I., The development of the auroral substorm, Planet. Space Sci., 12, 273, 1964
- [2] Anger, C. D., J. S. Murphree, A. Vallance Jones, R.A. King, A. L. Broadfoot, L. L. Cogger, F. Creutzberg, 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, 1987

- [3] Craven, J.D., and L. A. Frank, Latitudinal motions of the aurora during substorms, *J. Geophys. Res.*, 92, 4565, 1987
- [4] Craven, J. D., L. A. Frank, and S.-I. Akasofu, Propagation of a westward travelling surge and the development of persistent auroral features, *J. Geophys. Res.*, 94, 6961, 1989
- [5] 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
- [6] Kaneda, E., T. Mukai, and K. Hirao, Synoptic features of auroral system and corresponding electron precipitation observed by KYOKOO, "Physics of Auroral Arc Formation" Eds. Akasofu and Kan, *Geophys. Monograph. Ser.*, vol.25, 24, 1981
- [7] Kaneda, E., T. Yamamoto, K. Hayashi, M. Ejiri, Kadokura, R. Fujii, S. Sasaki, K. Makita and T. Oguti, Studies on global aurora dynamics observed by vuvimager on AKEBONO, AGU 1989 Fall Meeting SM41B-14, 1989
- [8] 金田栄祐・山本達人・林 幹治・藤井良一・門倉 昭・江尻全機・巻田和男・佐々木進・小口高, 「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, 宇宙科学研究報告特集第25号, 75頁, 文部省宇宙科学研究所, 1990年1月
- [9] Kawasaki, K., and G. Rostoker, Auroral motions and magnetic variations associated with the onset of auroral substorms, *J. Geophys. Res.*, 84, 7113, 1979
- [10] Oguti, T., E. Kaneda, M. Ejiri, S. Sasaki, A. Kadokura, T. Yamamoto, K. Hayashi, R. Fujii and K. Makita, Studies of aurora dynamics by Aurora-TV on the Akebono Exos-D satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 555, 1990
- [11] Rostoker, G., A. Vallance Jones, R. L. Gattinger, C. D. Anger, and J. S. Murphree, The development of the substorm expansive phase: The "EYE" of the substorm, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 399, 1987
- [12] Rostoker, G., S.-I. Aksofu, J. Foster, R. A. Greenwald, Y. Kamide, K. Kawasaki, A. T. Y. Lui, R. L. McPherron, and C. T. Russell, Magnetospheric substorms definition and signatures, *J. Geophys. Res.*, 85, 1663, 1980
- [13] Starkov, G. V., and Ya. I. Fel'dstein, Substorm in auroras, *Geomag. Aeronomy*, 11, 478, 1971 English Ed.
- [14] Tighe, W. G., and G. Rostoker, Characteristics of westward travelling surges during magnetospheric substorms, *J. Geophys.*, 50, 51, 1981
- [15] Weins, R. G., and G. Rostoker, Characteristics of the development of the westward electrojet during the expansive phase of magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, 80, 2109, 1975
- [16] Yamamoto, T., E. Kaneda, K. Hayashi, M. Ejiri, A. Kadokura, R. Fujii, S. Sasaki, K. Makita and T. Oguti, Initial results of auroral dynamics investigation on vuv-imager, AGU 1989 Fall Meeting SM41A-44, 1989