

論文の内容の要旨

論文題目 Detailed analysis of auroral substorm evolution observed at ground
and by the AKEBONO satellite UV imager

地上及び「あけぼの」衛星データに基づく
オーロラサブストーム発達過程の詳細解析

氏名 Akira KADOKURA 門倉 昭

1. 本研究の目的：

地球磁気圏内に流入し蓄えられた太陽風のエネルギーが、突然爆発的に解放される現象は磁気圏嵐（サブストーム）と呼ばれ、磁気圏と太陽風の相互作用を理解する上で最も基本的でかつ重要な現象と考えられている。オーロラ嵐（オーロラサブストーム）とは、サブストームの際に磁気圏から電離圏に降込んだ粒子によって、活発なオーロラ活動が引き起こされる現象で、初期の地上観測に始まり最近の人工衛星観測に至る40年以上の研究の歴史を持っている。オーロラサブストームは、サブストーム関連現象のうちで唯一、面的な二次元情報を目で見える形で与え得る現象であり、その発達過程を理解することは、サブストーム全体の発達過程の理解につながるもの、と考えられる。

サブストーム発達過程のうち、エネルギーが蓄えられる段階を成長相、爆発的に解放される段階を拡大相、元の静穏時の状態に戻る段階を回復相、と称するが、各段階で生じるオーロラ活動の詳細については、過去の研究により明らかにされてきている。一方、磁気圏内の現象についても、特に最近の人工衛星観測により様々な点が明らかにされてきている。しかし、そうした磁気圏内の現象とオーロラサブストームの発達との間の、時間的、空間的な関係については、未だに十分な理解が得られているとは言い難い。その原因の一つとして、オーロラの研究において、形態学的な理解に比べて、それらの形態の時間的な発達に関する厳密な理解が、必ずしも充分ではないことが挙げられる。

本研究の目的は、オーロラサブストームの時間的・空間的な発達過程の詳細な解析を行うことにより、現在未解決である、オーロラサブストームと磁気圏内の諸現象との間の対応関係についてのより総合的な理解を目指すこと、にある。

2. 用いたデータ：

1989年における、「あけぼの」衛星搭載の紫外オーロラ撮像装置（ATV-UV）によるオーロラ観測データ、及び、南極の昭和基地、あすか基地におけるオーロラ観測データを用いた。地上のオーロラ観測は、子午面内掃天フォトメータ（MSP）（昭和基地、あすか基地）と全天SIT-TVカメラ（昭和基地）により行われた。1989年4月から10月の間で、ATV-UVにより、オーロラサブストームの発達が拡大相開始初期より観測された例は5例、MSPによりオーロラの極方向拡大が観測された例は88例あり、両者が同時に観測された例は唯一例（1989年6月6日-7日イベント）であった。

3. 1989年6月6日-7日のオーロラサブストームの解析結果：

（1）拡大相における段階的発達

（1.1）グローバルな発達（ATV-UVによる観測）

拡大相開始（オンセット）以後のグローバルなオーロラサブストームの発達は以下のように段階的に進行した。（ ）内は継続時間。

- (a) Stage-1：オーロラバルジの極方向及び、西向きへの急速な拡大（2分）、
- (b) Transition phase：非常に遅い極方向への拡大、急速な東向きへの拡大（2分）
- (c) Stage-2：非常に遅い極方向への拡大、等方的でゆっくりした経度方向への拡大（7分）
- (d) Stage-3：急速な極方向、経度方向への拡大の再開（オンセット約11分後より）

（1.2）ローカルな発達（地上MSPによる観測）

オンセット領域の東側の端の観測点におけるオーロラの極方向への拡大も、以下のように段階的に進行した。（ ）内は継続時間。

- (a) ローカル first stage：急速な極方向拡大（3～4分）
- (b) ローカル second stage：非常に遅い極方向拡大（5～6分）
- (c) ローカル third stage：急速な極方向拡大の再開（約8～9分後より）

ローカル first stage は、グローバルなオーロラバルジが観測点の経度にまで拡大することによって始まり、ローカル third stage は、グローバルな Stage-3 で生じた新たな極方向拡大領域が観測点の経度にまで広がることによって始まった。こうしたローカルな段階的発達は、よりオンセット領域に近い観測点において先行して観測された。

以上より、Stage-3 におけるグローバルなオーロラバルジの発達は、地上観測により示されたローカルな3段階発達が経度方向に次々に伝搬してゆくという形で進行することが示された。

こうした拡大相におけるオーロラサブストームの段階的な発達は、本解析によって初めて明確

に示されたものである。

(2) N P S B L (Near Plasma Sheet Boundary Layer) オーロラ

オンセット数分前より、オーロラ領域の高緯度側境界付近に現れたディスクリートなオーロラ活動で、上述したオーロラサブストームの段階的発達に関連して以下のような発達を示した。

- ・ Stage-1 のバルジの極方向拡大は、このオーロラ活動の緯度付近で急速に遅くなった。
- ・ ローカル first stage の極方向拡大も、このオーロラ活動の緯度付近で急速に遅くなった。
- ・ Transition phase から Stage-2 にかけて、輝度が顕著に増加した。
- ・ ローカル first stage からローカル second stage の間は、その緯度はほとんど変化しなかった。
- ・ ローカル second stage では、このオーロラ活動と低緯度側のオーロラバルジとの間の領域に、活発なディスクリートオーロラが現れた。
- ・ ローカル third stage は、このオーロラ活動の高緯度側の輝度が顕著に増加し、その緯度巾が顕著に広がることによって始まった。

以上より、NPSBL オーロラの発達は、オーロラバルジの段階的発達と密接に関係していることが示された。この事実は本解析の結果初めて示されたものである。

(3) 成長相におけるオーロラ活動と電離層対流の関係

- ・ FEM (Fast Equatorward Moving) アークは、オンセット約 20 分前にオーロラ領域の高緯度側境界付近より現れ、より低緯度側へと高速に移動した。
 - ・ 夜側電離層対流渦の低緯度側太陽向き対流の速度最大位置は、FEM アークの移動に伴って、低緯度側へと急速に拡大した。
 - ・ オーロラブレークアップは、低緯度側に拡大した電離層対流渦の夜側分流領域付近で生じた。
- こうした、成長相からオンセットに至るまでの FEM アークと電離層対流の変化の関係は、本解析の結果初めて示されたものである。

(4) オーロラサブストームの段階的発達に伴ったオーロラ関連現象の発達

- ・ 初期の P i 2 波動のはっきりした波形は Stage-1 のみで観測された。
- ・ サブストーム等価電流系は、オーロラサブストームの段階的発達に対応した発達を示した。特に Stage-3 では顕著な発達が見られた。

初期の P i 2 波動とオーロラバルジの発達との間関係については本解析で初めて指摘されたものである。オーロラバルジとサブストーム等価電流系の発達の、直接的で詳細な比較も、明確に示されたのは本解析が初めてである。

4. あすか基地、昭和基地における極方向拡大の観測－統計解析結果

1989年に、あすか基地、昭和基地においてMSPにより観測された、極方向拡大を示す全88例について、統計解析を行った。まず極方向拡大を、拡大開始時前後における電子オーロラとプロトンオーロラの相対的な位置関係、及び、それぞれの極方向拡大の特徴の違いにより、3つのタイプ（タイプ1, 2, 3）に分けた。それぞれ、夕方側、真夜中付近、朝方側に特徴的に見られるタイプで、6月6日-7日イベントの際に観測された極方向拡大はタイプ2に分類される。全88例の内、それぞれのタイプについて、41, 32, 15例あり、タイプ2の全32例の内、3段階発達を示すものが22例、その内、極方向拡大前にNPSBLオーロラが現れたものが14例あった。つまり、タイプ2について、全例のうちの44%の例が、6月6日-7日イベントの際に観測された特徴を示していることが分かった。これらの例について、極方向拡大開始位置の分布を調べたところ、いずれも、地方時21時~3時、磁気緯度60度~64度の範囲に分布しており、こうした特徴は、極方向拡大が、より真夜中付近のより低緯度側で開始した時に現れやすいことが分かった。このことは、極方向拡大開始時にオーロラオーバルがそうした低緯度側にまで拡大していること、つまりサブストーム成長相が十分に発達していることが、そうした特徴の現れる必要条件であることを示している。

5. まとめと考察：

ある特定イベントの詳細な解析の結果、オーロラサブストームの拡大相における発達には、はっきりした特徴的な段階が存在すること、また、そうした段階的な発達に、オーロラ領域の高緯度側境界付近に現れるオーロラ活動（NPSBLオーロラ）の発達が密接に関係していることが分かった。また、地上観測データを用いた統計解析により、そうした特徴（段階的発達、NPSBLオーロラの出現）は、極方向拡大が真夜中付近のより低緯度側より開始した時に、高い頻度で観測されることが分かった。以上の解析結果より、そうした特徴が観測されるのは、充分発達した成長相、拡大相をもつ典型的なサブストームの場合である、と結論される。オーロラサブストームの発達に特徴的な段階が存在することは、磁気圏側の現象にも対応する特徴的な発達段階があることを意味する。また、オーロラ領域の高緯度側境界付近のオーロラ活動がその段階的発達に密接に関係していることは、磁気圏側のプラズマシート境界付近に生起する現象が、その段階的な発達に密接に関係していることを意味する。オーロラサブストーム拡大相の初期段階（Stage-1）においては、オーロラバルジは、より低緯度側からNPSBLオーロラの緯度まで急速に拡大するが、このことは、磁気圏内のオンセット領域は、プラズマシート境界付近よりもより低緯度側、赤道面においてはより地球近傍に位置し、初期のオンセット擾乱は、その位置からプラズマシート境界付近まで急速に拡大すること、を意味している。本研究の結果示された、このようなオーロラサブストームの時間的・空間的な発達の詳細は、磁気圏側で観測されている、磁気リコネクションや、尾部電流崩壊、といったサブストーム現象の発達とオーロラサブストームの発達との対応を考える上での重要な手がかりを与えるものと言える。