

多波長フォトメーター観測による降下電子エネルギー パラメーターの推定

小野高幸¹・佐竹龍介²・芳野起夫²・平澤威男¹

Energy Parameters of the Incident Auroral Electrons Derived by the Intensity Ratio of Auroral Emissions

Takayuki ONO¹, Ryusuke SATAKE², Takeo YOSHINO²
 and Takeo HIRASAWA¹

Abstract: Average energy and total energy flux of the incident electrons in active auroras are estimated by using the intensity ratio of auroral emissions measured with a multi-channel photometer at Syowa Station, Antarctica, in 1990. To avoid possible ambiguities which are mainly caused by quenching effects on meta-stable species and complex excitation processes, we used intensity ratios of the emissions of allowed transitions such as 844.6 nm (OI), 670.5 nm (N_2^+1PG), and 427.8 nm (N_2^+1NG). Measured intensity ratios were directly compared with a result of model calculation of auroral emissions. The estimated energy parameters in active auroras showed a rapid change of average energy as well as total energy flux of electrons associated with pulsating auroras and intense auroral arcs. Average energy and total energy flux of the auroral electrons determined by the present method were consistent with the result of the previous *in-situ* observations of precipitating electrons. Our data analyses on active arcs in break-up phase showed that usage of the 427.8 nm emission has difficulty due to a scattering effect of the atmosphere. Usage of 670.5 nm emission in place of 427.8 nm made it possible to evaluate the energy parameters of electrons even in the vicinity of intense auroral arcs.

要旨: 1990年第31次南極地域観測隊により昭和基地において観測された多波長フォトメーターデータより、酸素原子許容線844.6 nm光強度の窒素分子イオンによる427.8 nm光強度に対する比を用いて降下電子のエネルギーパラメーター(平均エネルギー並びに全エネルギーフラックス)を求める試みが行われた。データの解析過程において427.8 nm光については大気による散乱を受けやすく、特に発光強度の空間的な変化の激しいオーロラを観測した例などでは、強いオーロラアーク周辺の領域でも散乱光が測定されてしまい、見かけ上周辺の降下電子の平均エネルギーが上がってしまう効果が認められた。このような散乱効果を考慮した上で本論文では比較的オーロラ光強度変化の小さいパルセーティングオーロラについては、844.6 nm光強度の427.8 nm光強度に対する比を、また発光強度変化の激しいオーロラブレイクアップに伴うアークについては、844.6 nm光強度の670.5 nm光強度に対する比を用いた解析手法を提案した。様々なオーロラの事例について解

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² 電気通信大学. University of Electro-Communications, 5-1, Chofugaoka 1-chome, Chofu-shi, Tokyo 182.

析を行い、これらを過去におけるロケットや人工衛星による直接観測による結果と比較した結果、定性的には良い一致が見られた。このため上記3波長のオーロラ輝線の強度比は、降下電子平均エネルギーを推定する際には適した波長であると考えられる。

1. はじめに

極域上空に発生するオーロラの色、光の強度、発光高度などといった種々の特性は、時間・場所・大気組成などといった様々な要因が複雑に関わってくるものであるが、中でも降下粒子のエネルギーはオーロラの形態を特徴づける大きな要因の一つとなっている。極域電離層の近傍に存在すると考えられているオーロラ粒子の沿磁力線加速領域は、この降下粒子エネルギーと密接に関連するものであるが、未だその実体は明確につかめてはいない。人工衛星によりオーロラ粒子・電場・電流などの直接観測がこの領域で行われてはいるものの、衛星軌道に沿う空間分布と観測時間の経過による時間変動との区別はたいへん困難なものである。そこで、時間・空間分解能に優れた地上オーロラ観測から降下粒子のエネルギースペクトルを知ることが非常に有意義なものとなってくるわけである。降下粒子エネルギースペクトルに関するパラメーターをオーロラ光学観測より推定することはこれまでも重要な課題とされ、理論的研究（例えば GATTINGER and VALLANCE JONES, 1972; REES and LUCKEY, 1974; REES and ROBBLE, 1986）や観測研究（例えば REES *et al.*, 1976; McEWEN *et al.*, 1981; VALLANCE JONES *et al.*, 1987; STEELE and McEWEN, 1990）が行われてきた。REES and LUCKEY (1974) は 557.7 nm, 630.0 nm, 427.8 nm 相互の輝線強度比を用いて入射電子平均エネルギーを導出する手法を提唱し、この方法は古典的な手法として様々に引用されている (DAVIDSON and SEARS, 1980; McEWEN *et al.*, 1981 等)。McEWEN *et al.* (1981) は 557.7 nm 光 (酸素原子: 緑色輝線) の 427.8 nm 光 (窒素分子イオン 1 NG バンド: 青色輝帯) に対する強度比より得られた降下電子の特性エネルギーとロケットによる降下電子直接観測とを比較している。また VALLANCE JONES *et al.* (1987) はフォトメーター観測による輝線強度比 ($I(630.0 \text{ nm})/I(427.8 \text{ nm})$) 及び N_2^+ 回転温度観測により得られた降下電子平均エネルギーについて、IS レーダー (Incoherent Scatter Radar) による電離層電子密度の高度分布観測とを比較し、良い一致を得ている。これまでの方法では上記のように、557.7 nm 光または 630.0 nm 光 (酸素原子: 赤色輝線) の 427.8 nm 光に対する強度比より降下電子エネルギーの推定が行われている。しかしながら、557.7, 630.0 nm といったオーロラ輝線は波長が可視域にあり観測は容易ではあるが、禁制線であるために遷移時間が長く (それぞれ 0.94 秒及び 147 秒)、特に大気密度の高い低高度電離層では、励起状態におかれても発光する前にエネルギーを失ってしまう消光効果が無視できないものとなる。さらに、解離再結合はじめ化学反応によるエネルギー変換過程などを含むため励起機構も複雑であり、活発なオーロラ活動に伴うオーロラ電子についての解析は非常に困難なものとなる (ONO and HIRASAWA, 1992)。このような

諸問題を考慮した上で、本論文ではオーロラ光強度観測データの中で特に 844.6 nm 光 (酸素原子輝線) を用い、844.6 nm 光強度の 427.8 nm 光強度に対する強度比より降下電子エネルギーの推定を試みた。この 844.6 nm 光は複雑な励起機構を持つ酸素原子禁制線に比べ、主な生成源が酸素原子と電子との直接衝突であり (HECHT *et al.*, 1985), 励起メカニズムが単純であるという特徴を持ち、近年のオーロラ光学観測において注目され始めた輝線である (STRICKLAND *et al.*, 1989; MEIER *et al.*, 1989)。さらに後に使用することになる 670.5 nm 光 (窒素分子 1 PG バンド) と 844.6 nm 光, 427.8 nm 光はいずれも許容遷移によるオーロラ光であり、遷移時間も $10^{-5} \sim 10^{-8}$ s と消光効果の影響を無視することができる。特に本論文で扱うような活動の活発なオーロラ等に対しては、これらの許容線オーロラ光を用いることでより高精度の降下電子エネルギーパラメーターの推定が可能となるものである。

2. 観測システム

本論文で使用されたデータは 1990 年、昭和基地において多波長フォトメーターを用いて観測されたものである。図 1 に 1990 年の昭和基地におけるオーロラ光学観測システム全体のブロック図を示す。昭和基地においては定常観測である全天カメラのほかに、研究観測として SIT-TV 観測、スキャンニングフォトメーター観測、固定 3 方位フォトメーター、多波長フォトメーター、単色光オーロラ画像観測を行う CCD カメラ、オーロラ輝線のドップラー幅並びにドップラー遷移を観測する FPDIS (Fabry-Perot Doppler Imaging System) カメラを用いたオーロラの総合観測が実施された。

2.1. 多波長フォトメーター

多波長フォトメーターによる観測は、磁気天頂方向にて 427.8, 557.7, 630.0, 646.9, 670.5 及び 844.6 nm におけるオーロラ輝線並びにバンド光について行われた。特に 844.6 nm 光については近接するバンドエミッションによるコンタミネーションを評価するために、波長幅 2.5 nm 及び 5.5 nm の 2 種類の干渉フィルターを用いた測光が、同時に行われた。また、従来のパルセーティングオーロラや強いオーロラアーク中での 630.0 nm (OI) 観測結果の解釈においては、窒素分子輝帯 (10, 7) からの観測への寄与が十分に評価されておらず、このため 630.0 nm 強度の短時間変動の結果の解釈には時として非常な困難を伴っていた。これら不要光入射レベルを定量的に評価するため、 N_2^+ 1 PG システム強度を (5, 2) 及び (8, 5) のブランチにて同時に観測した。各輝帯は分子回転に伴うバンド幅を有する (SCHEMANSKY and VALLANCE JONES, 1968) が、干渉フィルターの透過波長幅は各々 5.1 nm 及び 5.0 nm と必要かつ十分な幅が取られている。図 2 に多波長フォトメーターの光学系配置図を、また表 1 にその測光パラメーターを示す。図 2 に示されるようにこれら 7 チャンネルの波長への分光は、狭視野角 (1°) にて採光されたオーロラ光を 1 本のレンズ系を通して同時に行われるた

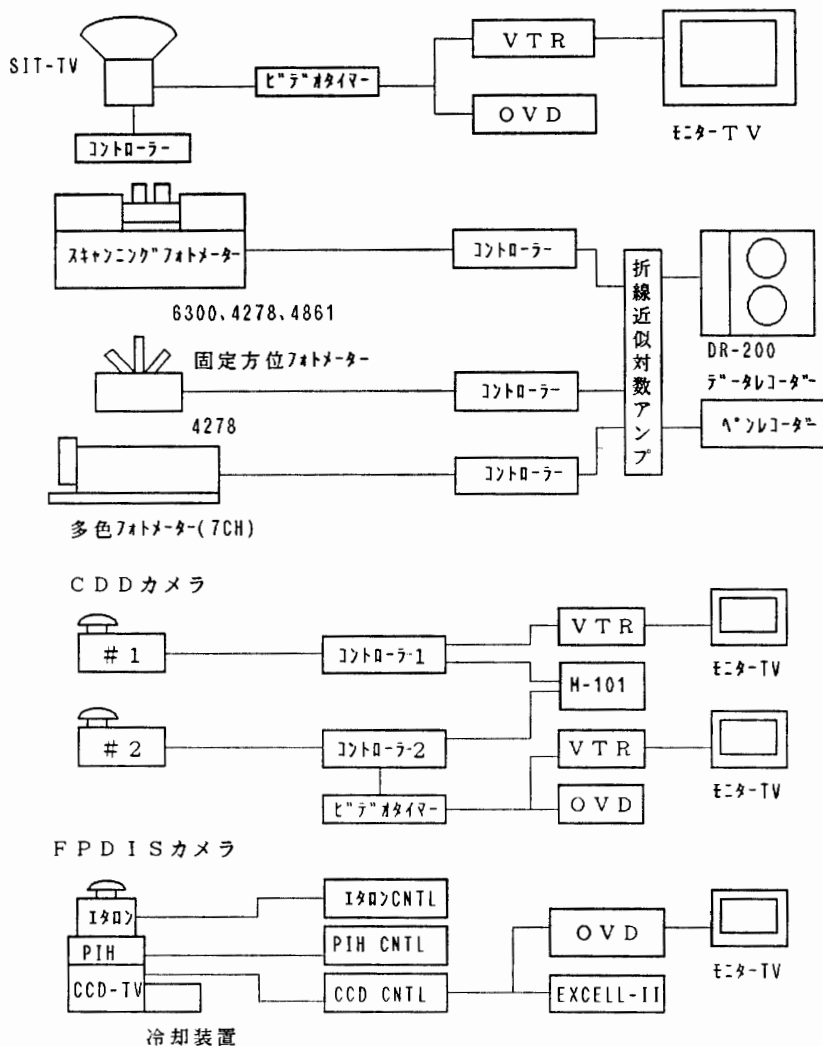


図 1 1990 年昭和基地にて実施されたオーロラ光学観測システム図

Fig. 1. A block diagram of an auroral observation system at Syowa Station in 1990. The system consists of a SIT auroral TV camera, a scanning photometer (three wavelengths of 630.0, 427.8, and 486.1 nm), a fix directional photometer (427.8 nm), a multi-channel photometer (427.8, 557.7, 630.0, 646.9, 670.5 and 844.6 nm), a monochromatic imager by using CCD camera, and a Fabry-Perrot doppler imager.

めに、これまでにない高い時間・空間分解能にて測光することができ、オーロラの激しい運動に対応した発光特性の変化を捕えることができた。多波長フォトメーターの設置にあたっては、磁気天頂に光学系の軸が向くよう測量を行って、昭和基地地磁気の偏角・伏角(-47.5度及び-64.5度)方向にセットされた。光学系を通しての単色光の透過率を上げるため、光分配部にはダイクロイックミラー、並びにビームスプリッターの組み合わせが使用されている。干渉フィルター(スペクトルフィルム社製)の特性は表1に示すとおりであるが、温度による透過波長の変化(実測にて約0.02 nm/deg)を考慮し、-20°Cの温度にて所期の透過特性が得られるように設計された。広範な波長域にて効率の良い光検出を行うため光電子増

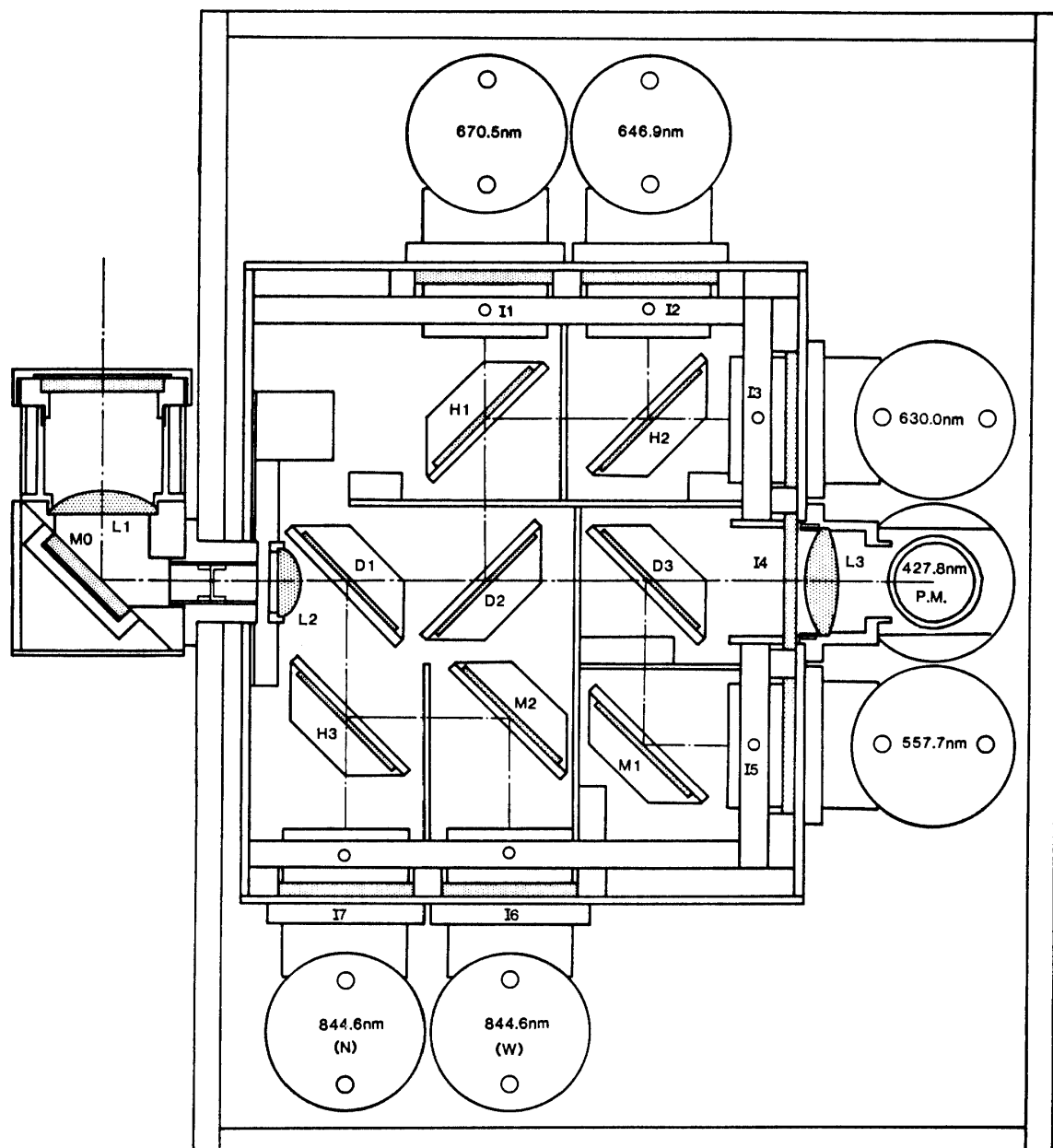


図 2 多波長フォトメーター光学系配置図

Fig. 2. System layout of an optical block of the multi-channel photometer.

倍管は可視域についてはマルチアルカリ光電面を持つもの（浜松フォトニクス社製；R 928）が、赤外域については GaAs の光電面を持つもの（浜松フォトニクス社製；R 636）が使用された。これらの光電子増倍管はサイドオン型であり構造上、一般的に暗電流ノイズが小さいという特徴を持っている。光電子増倍管の高圧（約 650 V～1000 V）は光学部内に納められた 7 台の高電圧発生部により供給される。高電圧レベルを安定化させるため、高電圧発生部には温度コントロールを施し、 -10°C に保たれた。光電子増倍管にて検出された信号は電流・電圧変換を行うプリアンプを経た後、メインアンプにて 0-10 V の信号レベルへと増幅され

る。

フォトメーターの絶対感度較正は新潟大学理学部における標準光源並びに較正機器を用い

表 1 多波長フォトメーター光学部の測光パラメーター
Table 1. Optical parameters of the multi-channel photometer.

CH	Spectral features	Interference filters		Equivalent intensity of calibration lamp
		Wavelength (-20°C)	Band width	
1	N2 1PG (5, 2): 670.5 nm	668.0 nm	5.1 nm	11.7 kR
2	N2 1PG (8, 5): 646.9 nm	644.1 nm	5.0 nm	7.46 kR
3	OI (^1D): 630.0 nm	629.7 nm	2.0 nm	2.42 kR
4	N_2^+ 1NG (0, 1): 427.8 nm	427.8 nm	2.2 nm	37 R
5	OI (^1S): 557.7 nm	557.9 nm	2.5 nm	1.22 kR
6	OI ($3\text{p}^{\circ}\text{P}$): 844.6 nm	844.7 nm	5.5 nm	55.3 kR
7	OI ($3\text{p}^{\circ}\text{P}$): 844.6 nm	844.4 nm	2.5 nm	24.3 kR

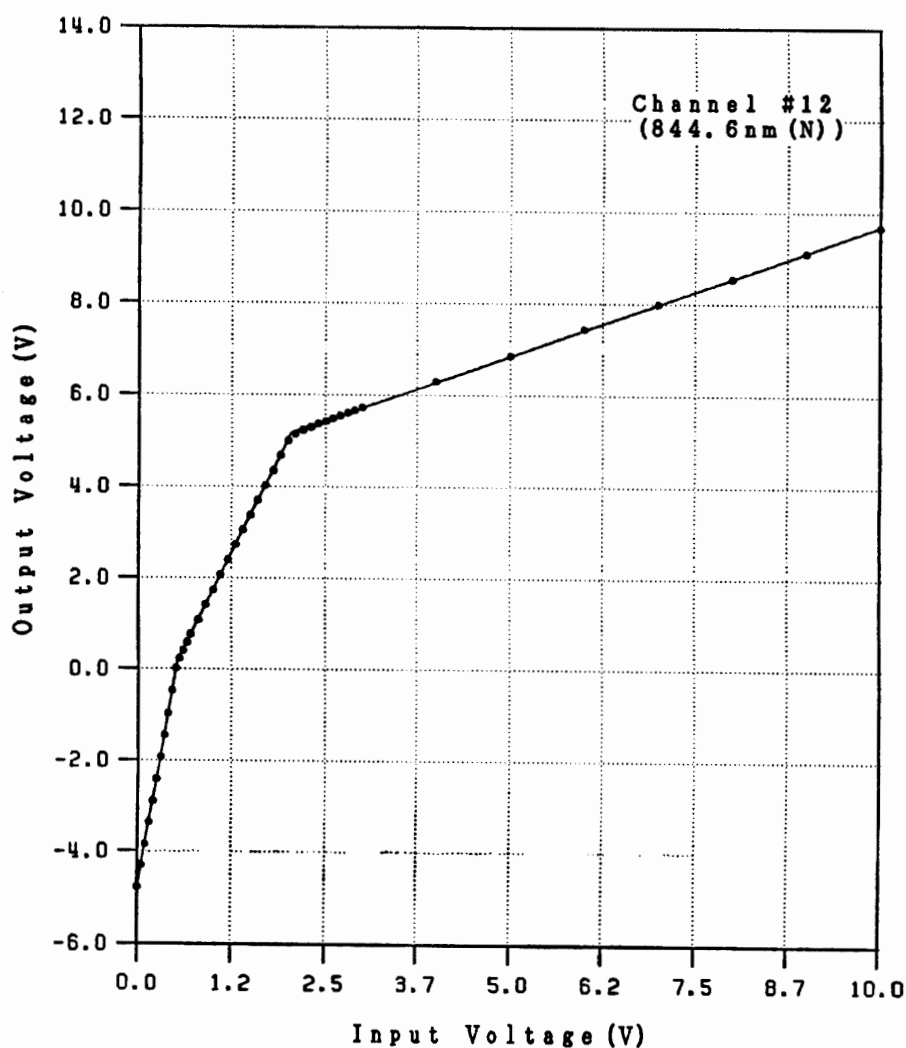
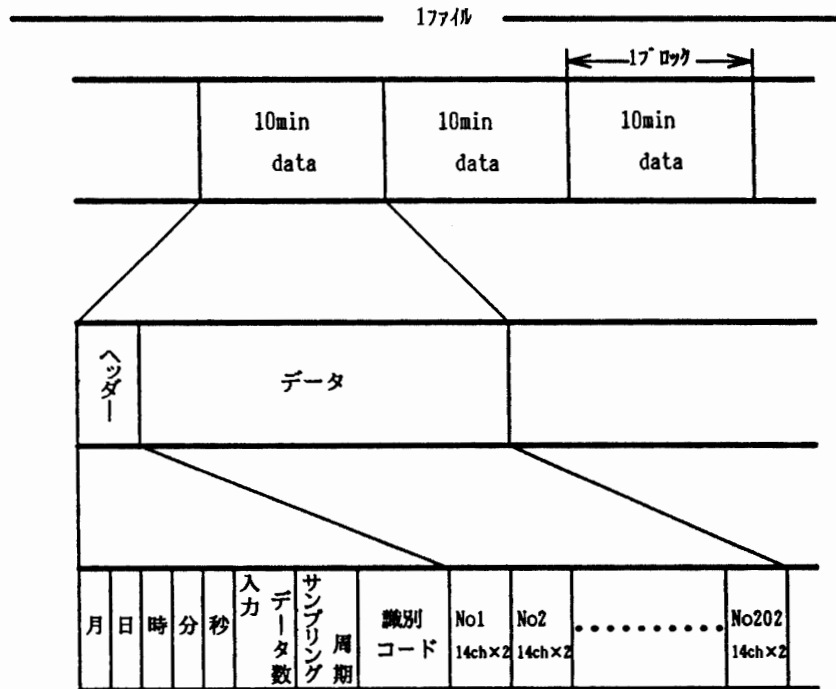


図 3 折線近似ログアンプの入出力特性の例
Fig. 3. An example of the function of logarithmic amplifier.

て実施された。さらに2次標準として豆ランプを用いた携帯型の光源が用意されて標準光源との比較較正值が得られている。2次標準光源を使用した感度較正は昭和基地において適宜実施された。

2.2. データ記録

図1に示したようにフォトメーターで得られたデータはデータレコーダーにて12bit精度のA/D変換を受け記録されるが、オーロラ光強度は数10~数100kR (R: Rayleigh) と 10^4 程度の強度変化を伴う。この強度を精度良く記録するためには12bitのA/D変換ではダイナミックレンジが不足してしまうため、折線近似ログアンプによりデータを圧縮して記録する方式が取られた。図3は第7チャンネル(表1参照)についての折線近似ログアンプの入出力特性を示したものである。圧縮されたデータは12bitデジタルデータとしてデータレコーダー(DR-200)により記録される。サンプリング周期はオーロラ光の速い時間変動の観測を行うため10Hzあるいは20Hzとされた。



ブロック長	5656 Bytes	
レコード長	ヘッダー部	28 Bytes
	データ部	28 Bytes
ワード長	2 Bytes/Word	

図4 光ディスクに編集・記録されるフォトメーターデータのフォーマット
 Fig. 4. Format of the edited photometer data recorded on an optical disk system.

2.3. データ処理

取得された観測データは、解析を能率的に行えるよう図4のフォーマットに編集され、国立極地研究所情報科学センターの電算機 (HITAC M-680D) にて管理される光ディスクに記録されている。また観測の諸パラメーター (観測日時と光ディスクファイル名称との対応、観測波長、絶対強度キャリブレーション結果、折線近似ログアンプ較正結果、光学入力部のシャッターを入れたゼロレベル較正データ) 等は表2のように電算機にてアクセス可能な形式のファイルとして記録されている。

表2 データ解析プログラムで参照するデータベース
 Table 2. File names of data base for the photometer measurements carried out at Syowa Station in 1990. The data base contains calibration data of the photometer, logarithmic amplifiers, and observation log giving the date and the time of observation's start and end.

データセット名	内 容
PHO90. PLTCNT	光強度較正值, ログアンプチャンネル配分 ログアンプ較正值
PHO90. DSLIST	光ディスク・データセット名称に対応する データ件数, 観測開始・終了日時のデータベース
PHO90. ZERO	各チャンネルのゼロレベル (無光状態での観測値) 較正観測データベース

3. オーロラ輝線強度比を用いた降下電子エネルギーの推定

3.1. オーロラ発光モデル

オーロラ輝線強度比より入射電子のエネルギーパラメーターを推定するためには、まずモデル計算にて様々なパラメーターに対応するオーロラ発光強度を求め、これらの強度比と観測値とを比較する方法がとられる。オーロラ発光強度の計算には以下のモデルが使用されている。

- 1) 大気モデル; ここでは MSIS-86 (HEDIN, 1987) が使用された。モデルパラメーターは 1990 年 9 月 23 日 21 時 (UT) におけるものが使用され昭和基地上空の大気モデルを得た。
- 2) 入射電子スペクトル; ここでは平均エネルギー E_0 (eV), エネルギー幅 W (eV), 全エネルギーフラックス Et (erg/cm²/s/sr) を持つガウス型スペクトルを仮定する。このときエネルギー E (eV) における強度 $I(E) \cdot dE$ (el/cm²/s/sr) は

$$I(E) \cdot dE = (A \cdot Et / (\pi^{1/2} \cdot W \cdot E_0)) \cdot \exp(-(E - E_0)^2 / W^2) \cdot dE, \quad (1)$$

$$(A = 6.2415 \times 10^{12} \text{ (eV/erg)})$$

となる。

- 3) 入射電子の大気中におけるエネルギー消失・2次電子生成過程のモデル: ここでは

STAMNES (1981), SOLOMON *et al.* (1988), SHIOKAWA *et al.* (1990) 等により提唱されている Two-Stream 近似法による電子フラックスの算出が行われた。なお、電子の電離衝突並びに励起衝突の断面積については BANKS *et al.* (1974) の近似法が使用され、弾性散乱断面積並びに後方散乱係数はこれまでの結果をまとめた SHIOKAWA *et al.* (1990) による係数が使用された。

モデル計算の結果、得られた各高度における電子フラックスを用いてオーロラ輝線体積放射率を求めることができる。図 5 に降下電子が $E_0=5 \text{ keV}$, $W=0.25 E_0$, $E_t=1.0 \text{ erg/cm}^2/\text{s}/\text{sr}$ のガウス型単一エネルギーで入射した場合における体積放射率の高度分布を示す。図中には窒素分子イオン 1 NG (0, 1) (427.8 nm), 窒素分子 1 PG (5, 2) (670.5 nm), 酸素原子 OI (844.6 nm)

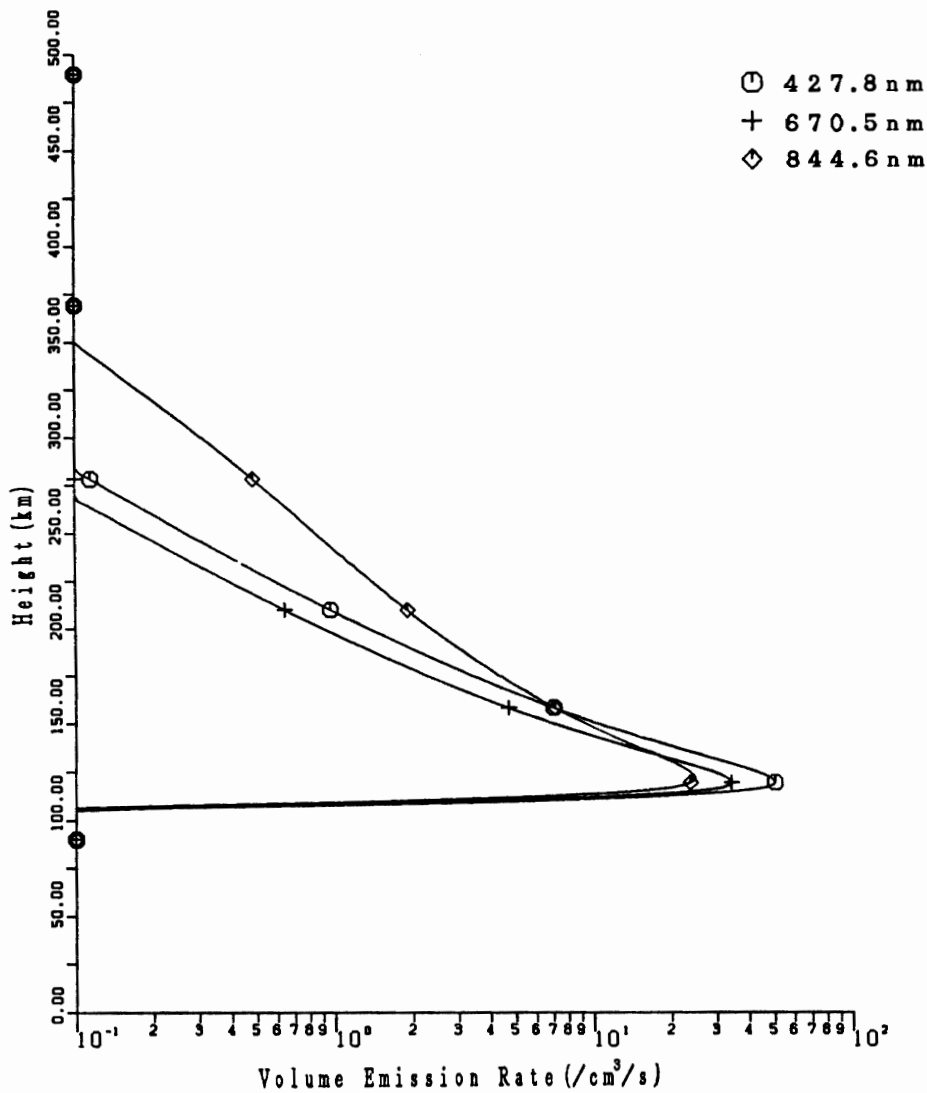


図 5 体積放射率の計算結果例

Fig. 5. An example of the model calculation result of volume emission rate assuming the incident Gaussian electron's flux as $E_0=5 \text{ keV}$ and $E_{tot}=1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$.

nm) の発光の様相が示されている。427.8 nm 発光強度については GERDIKOVA and SHEPHERD (1987) に従い窒素分子イオン生成率の 2.5% とした。窒素分子 1 PG (5, 2) (670.5 nm) については BANKS *et al.* (1974) の励起散乱断面積並びに VALLANCE JONES (1974) による遷移確率並びに準位分配率が使用された。844.6 nm (OI) 励起散乱断面積は STRICKLAND *et al.* (1989) による断面積を BANKS *et al.* (1974) によるパラメーター表現にて近似して使用された。

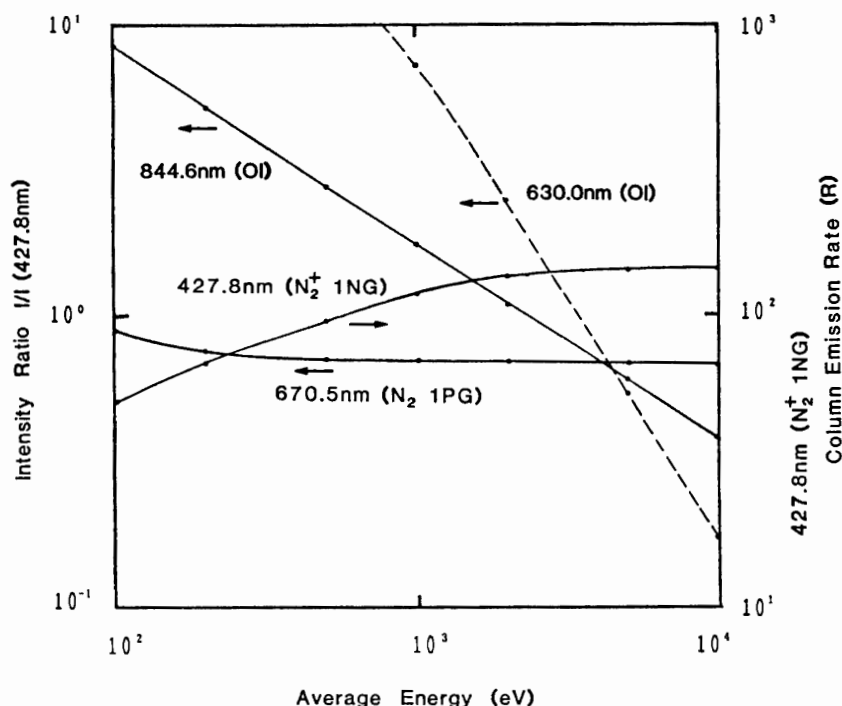


図 6 入射電子平均エネルギーに対する $I(630.0 \text{ nm})/I(427.8 \text{ nm})$, $I(670.5 \text{ nm})/I(427.8 \text{ nm})$, $I(844.6 \text{ nm})/I(427.8 \text{ nm})$ の強度比, 並びに $1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ の入射電子エネルギー (E_{tot}) に対する 427.8 nm 気柱放射率の変化

Fig. 6. Intensity ratios of auroral emissions of $I(630.0 \text{ nm})$, $I(670.5 \text{ nm})$ and $I(844.6 \text{ nm})$ to the $I(427.8 \text{ nm})$ emission according to the average energy of the incident electrons into the polar ionosphere. The column intensity of the 427.8 nm emission is also given for the incident energy of $1 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$.

図 6 はモデル計算の結果得られる 630.0, 670.5 及び 844.6 nm 光強度の 427.8 nm 光強度に対する比, 並びに降下電子平均エネルギーに対する 427.8 nm 光の柱状放射率のダイヤグラムである。なおここでは柱状放射率は図 5 の体積放射率を鉛直方向に積分して示されている。観測は磁気天頂方向について実施されたが電子入射経路長並びに光路長の違いによる誤差はここでは無視している。このダイヤグラムを用いることにより、輝線強度比から降下電子平均エネルギー (E_{av}) が、さらに 427.8 nm 強度より入射電子全エネルギーフラックス (E_{tot}) が導き出される。図 6 に示されるように 844.6 nm 輝線と 427.8 nm 輝帯との強度比

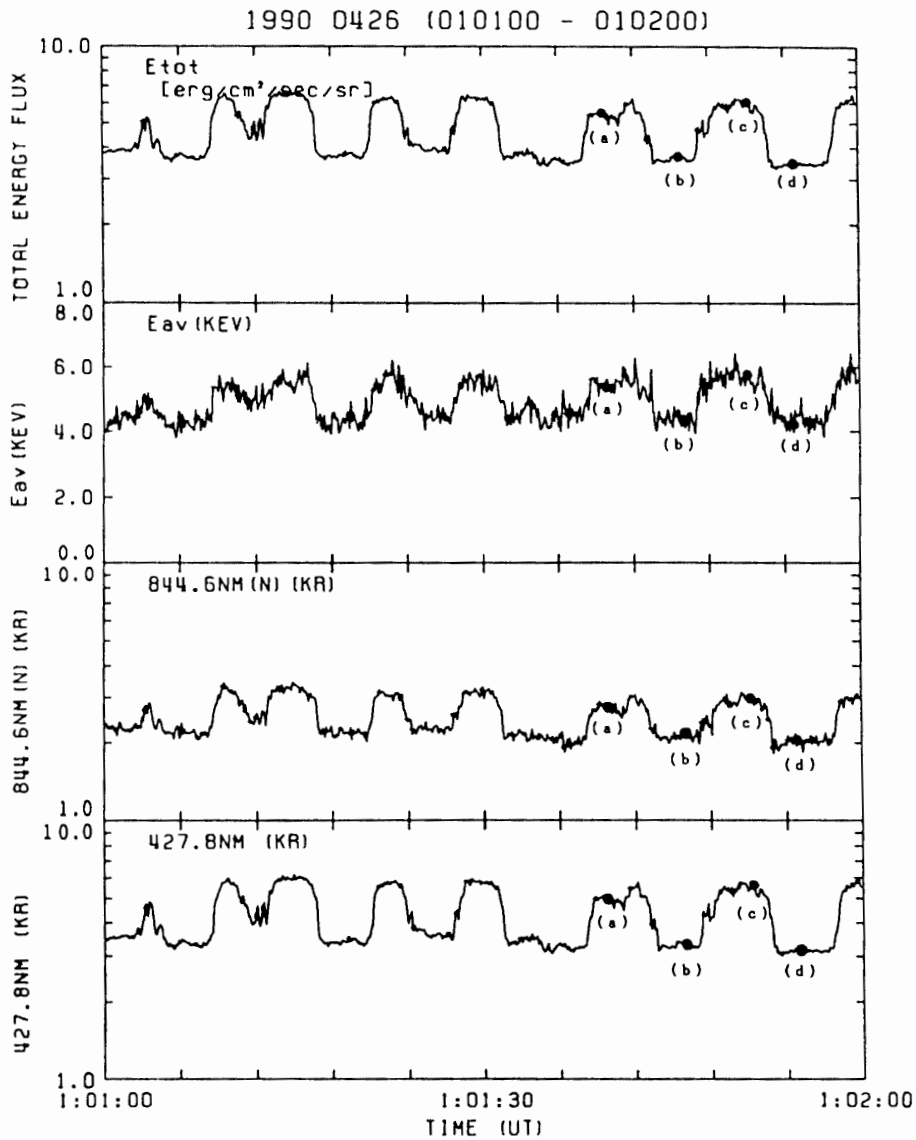
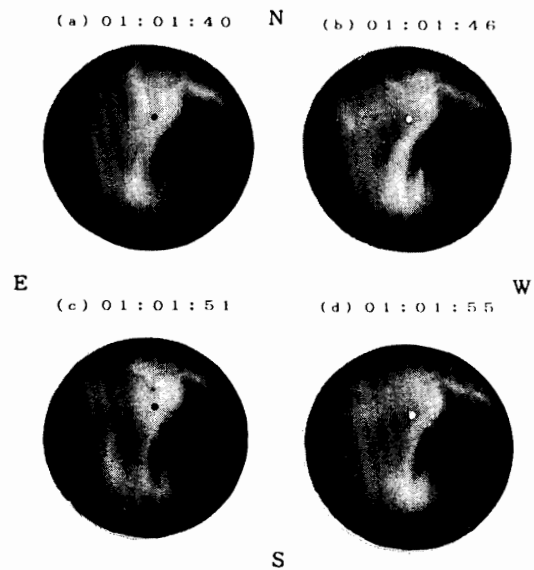


図 7 パルセーティングオーロラにおける $I(427.8 \text{ nm})$ 、及び $I(844.6 \text{ nm})$ 輝線との強度比を用いた入射電子平均エネルギー並びに入射エネルギーの変化。下図に代表的な4時点における全天 TV 画像を示す。

Fig. 7. A temporal change of average energy and total energy flux of the incident electrons determined by using the intensity ratio of $I(844.6 \text{ nm})$ to $I(427.8 \text{ nm})$. TV images given as (a), (b), (c), and (d) give forms of pulsation ON (a and c) and OFF (b and d) stages of auroras, respectively.



は降下電子平均エネルギーにより大きく変化し、観測からこれを精度良く推定することが可能である。強度比の変化の様相は参考として示される 630.0 と 427.8 nm との強度比を用いる方がより大きな変化量として観測されるように見えるが、実際の激しいオーロラ活動において発光時定数の長い 630.0 nm 輝線を使用することは不可能である (ONO and HIRASAWA, 1992)。また図 6 において注意すべきことは、670.5 nm と 427.8 nm の強度比が keV レンジのエネルギーに対してはほとんど変化せず一定であることである。この性質を利用すれば 670.5 nm 輝帯強度を 427.8 nm 輝帯強度測定値の代わりに用いることが可能である。

3.2. パルセーティングオーロラ

図 7 には 4 月 26 日に観測されたパルセーティングオーロラについて 0101 (UT) より 1 分間のフォトメーターデータ並びに同時観測による TV 画像を示す。同図上側のフォトメーターデータには 427.8, 844.6 nm それぞれの発光強度 ($I(4278)$, $I(8446)$) を下 2 段に、次にこれらの強度比 ($I(8446)/I(4278)$) を図 6 に対応させることにより導かれる降下電子平均エネルギー (E_{av}) を 2 段目に、さらに同図から 427.8 nm 発光強度と降下電子平均エネルギーにより最終的に求められた全エネルギーフラックス (E_{tot}) を上段に示したものである。また図 7 の下段は全天 SIT カメラによるパルセーティングオーロラの画像であり、図中の白黒点は昭和基地磁気天頂方向を表示してある。すなわちフォトメーターは図中の丸の部分のオーロラ光強度を観測していることになる。それぞれ図中の (a), (b), (c), (d) 点は上側のフォトメーターデータに表示してある点と対応するものであり、パルセーションの ON/OFF の対応をこの図より捕えることが出来る。この日に観測されたパルセーティングオーロラは極めて活動度が高く、427.8 nm 光強度にて 3~6 kR の幅でパルスの変化をしている様相、またそれに伴って全エネルギーフラックスのみならず、降下電子平均エネルギーも同様の変化をしている様子が分かる。この結果によりパルセーティングオーロラは、降下電子平均エネルギーの周期的な変動をも伴うと言うことが出来る。また同図によるとパルセーション ON/OFF に伴う降下電子平均エネルギーはおおよそ 4.0~6.0 keV の範囲で変動しており、一方全エネルギーフラックスは 3.4~6.4 (erg/cm²/s/sr) の範囲で変動している。これより観測されたパルセーティングオーロラについては、オーロラの点滅に伴い降下電子平均エネルギー及び全エネルギーフラックスが、それぞれ約 1.5 倍、及び 1.9 倍の変化を示していることとなる。よって数フラックスの変化は約 1.4 倍程度であると推測される。すなわちパルセーティングオーロラ中では、パルセーション ON/OFF に伴って降下電子の平均エネルギー及び数フラックスが、ほぼ同じ割合で変化しているようである。これはロケットによる直接観測 (MC-EWEN *et al.*, 1981) の結果と定性的に良く一致するものである。

3.3. ブレークアップオーロラ

次のイベント解析例として、ブレークアップに伴うオーロラアークについて見てみるこ

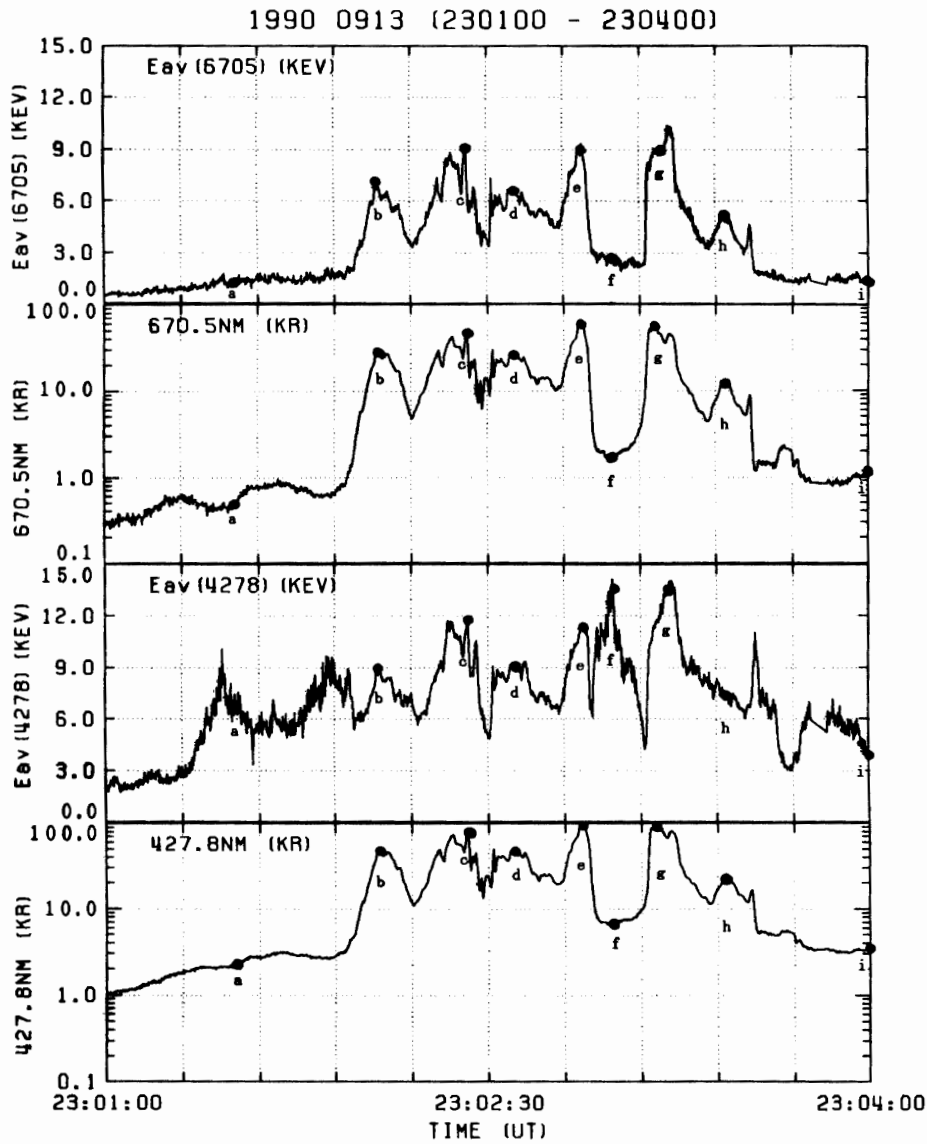


図 8 入射電子平均エネルギー導出に $I(427.8\text{ nm})$ を用いた場合 (下 2 段) と $I(670.5\text{ nm})$ を用いた場合 (上 2 段) との比較. 大気による散乱効果のため強度の強いアークがフォトメーター視野に近づいた (a) 及び (f) 付近では結果に大きな差異を生じている.

Fig. 8. A comparison of the methods determining the average energy of incident electrons of active arcs in break-up phase. The lower two panels are results by using $I(427.8\text{ nm})$. The upper two panels are made from $I(670.5\text{ nm})$. It is noted that a significant difference appears around time points (a) and (f) when a strong auroral arc was close to the FOV of the photometer.

にする. 図 8 は 9 月 13 日 2300 (UT) 頃に見られたブレイクアップでのオーロラ光強度と降下電子平均エネルギーを示したものである. ここでは $I(844.6\text{ nm})/I(427.8\text{ nm})$ 比を用いた結果とともに, $I(844.6\text{ nm})/I(670.5\text{ nm})$ より導き出された結果とを比較して示してある. 図 8 中の a~i 点はそれぞれ図 9 の全天 SIT カメラの画像と対応している. またこの図よ

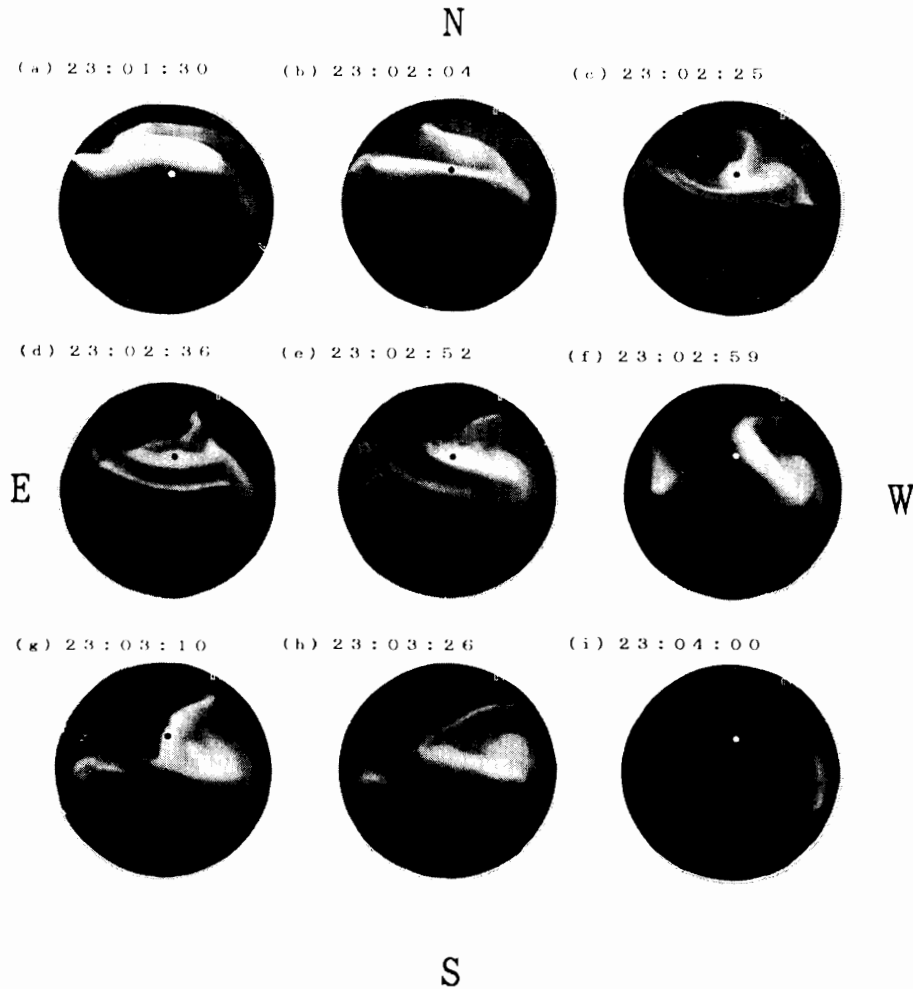


図9 ブレークアップオーロラにおける全天 TV 画像
 Fig. 9. Auroral images observed in break-up phase. TV images indicated as (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h) and (i) correspond with time points indicated in Fig. 8.

り分かるようにオーロラ光の強度が上がっている部分は、ブレークアップにより発生したオーロラークが磁気天頂を通過した時刻に相当する。

図8において、まず下2段の427.8 nm 光強度、及び427.8 nm 光と844.6 nm 光との強度比により導かれた降下電子平均エネルギー ($E_{av}(4278)$) を見てみる。図中 (b), (c), (d), (e), 及び (g) 点においてそれぞれオーロラークに対応して平均エネルギーが上昇していることから、それらのオーロラークが高いエネルギースペクトルを持つ降下電子により励起されたものであることが示される。次に (a), (f), 及び (h) 点を見てみる。(h) 点のように、オーロラークが磁気天頂を通過してゆく過程で降下電子平均エネルギーに変化が見られない例は、この事例に限らず多く見られた。しかし (a) 並びに (f) 点のように、オーロラが光っていないところで平均エネルギーが高くなる様相は、オーロラが存在しない部分でも高いエネルギースペクトルを持つ電子が、超高層大気に入射していると解釈されるわけで、これは不自

然である。そこで同図上2段に示した同じ時間帯での 670.5 nm 光及び 670.5 nm 光と 844.6 nm 光との強度比により導かれた降下電子平均エネルギー (E_{av} (6705)) を見てみる。 E_{av} (4278) と同様 (b), (c), (d), (e), 及び (g) 点での平均エネルギーの対応は一致しているものの, (a), (f), 及び (h) 点においては E_{av} (4278) と E_{av} (6705) とでは違った様相を呈していることが解る。データの性質についての考察の結果, 後者の 670.5 nm 光と 844.6 nm 光との比により導かれた降下電子平均エネルギーの結果の方を採用すべきであると判断される。例えばレーリー散乱の特性を考えた場合, 427.8 nm 光は 670.5 nm 光に比べて波長が短いため

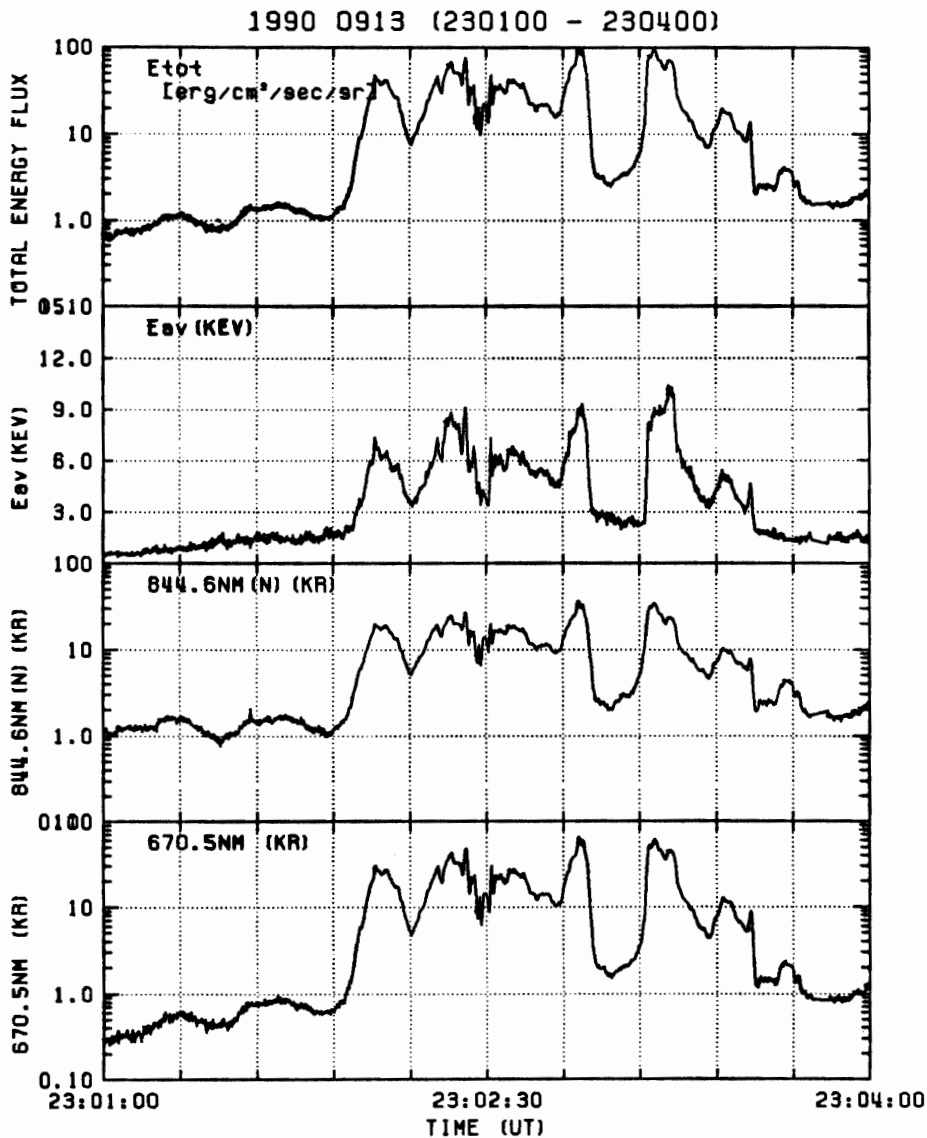


図 10 ブレークアップオーロラにおける I (670.5 nm) 及び I (844.6 nm) 輝線との強度比を用いた入射電子平均エネルギー並びに入射エネルギーの変化
 Fig. 10. A temporal change of average energy and total energy flux of incident electrons determined by using the intensity ratio of I (844.6 nm) to I (670.5 nm).

に大気による散乱を受けやすいと考えられる。特にこれから解析しようとするオーロラブレイクアップに伴うアークのような明るいオーロラが、フォトメーターの視野近くに寄ってくると散乱された光が視野に入ってしまう、見かけ上、降下電子平均エネルギーが上がってしまうような現象が考えられる。よって今後の解析については 670.5 nm 光強度を用いた降下電子平均エネルギー値を用いることとする。ここでは図 6 に示したように 670.5 nm 光が 427.8 nm 光のおよそ 70% の発光強度で近似できるという性質が利用できる。降下電子平均エネルギーを導く際には 670.5 nm 光強度が 427.8 nm 光強度の 0.7 倍であると仮定して等価的な $I(844.6 \text{ nm})/I(427.8 \text{ nm})$ 値が求められている。670.5 nm 光の発光強度は従来の理論計算によると、エネルギーが比較的高い降下電子に対してはほぼ一定の発光強度比を保っているため、オーロラブレイクアップ時の解析にこの手法を応用することは適当であると考えられる。しかしながらこのような手順を踏むことに対して問題点が無いわけでもない。 $E_{av}(4278)$ と $E_{av}(6705)$ を見比べてみると明白なように、 $E_{av}(6705)$ はピーク時においても $E_{av}(4278)$ の 20% 強程度小さな値として得られている。この要因としては先ほど触れたように、まず 427.8 nm 光が実際の強度とは違った強度で観測されてしまうことや、670.5 nm 光が 427.8 nm 光の 70% の強度であると単純に近似したこと、あるいは 670.5 nm 光の発光機構の問題などが挙げられる。これらの問題については今後さらに研究を進めて行く必要がある。図 10 にオーロラブレイクアップに伴い発生した westward traveling surge が磁気天頂を通過した際の 670.5, 844.6 nm 発光強度 (下 2 段)、それらの強度比により導かれた降下電子平均エネルギー (2 段目) 及び全エネルギーフラックス (上段) を示す。オーロラが磁気天頂にくると降下電子平均エネルギーが全体的に増加しているの是一目瞭然であるし、オーロラアークの一本一本に対応した平均エネルギーの増加も認められる。またこのタイプのアーク中での降下電子平均エネルギーがおよそ 10 keV 程度と得られているが、これは DMSP 衛星により降下電子スペクトルを直接観測によって得られた結果 (BYTHROW and POTEMRA, 1987) とおよそ一致している。

4. 結果の検討及びまとめ

多波長フォトメーターにより得られたオーロラ光強度のデータを用いて、磁力線に沿って超高層大気に入射してくる降下電子の平均エネルギーを推定することが行われた。本論文では従来多く使用されてきた禁制線である可視域酸素原子輝線にかわり、赤外域の酸素原子許容線 (OI: 844.6 nm) の性質を利用して、活発なオーロラ活動におけるオーロラ電子エネルギーパラメーターの短時間変動の様相が捕えられた。事例として選ばれたオーロラ活動は、パルセーティングオーロラとオーロラブレイクアップに伴うアークである。これらのイベントについては、オーロラ画像撮像装置によりオーロラの動向・形態を確認しつつ解析が行われた。パルセーティングオーロラの解析にあたっては 844.6 nm 光強度に対する窒素分子イ

オン輝帯 ($N_2^+ 1 NG: 427.8 \text{ nm}$) 光強度に対する比を用いて降下電子平均エネルギーを導出する手法が採られて、オーロラ光強度の変動に伴ってスイッチングする降下電子平均エネルギーの様相が捕えられた。ブレイクアップ時の強いオーロラアークについては、解析を進めてくる過程において、降下電子平均エネルギーを導出する手段として 427.8 nm 光強度のデータを用いることに不都合が生じることが判明した。この場合、 427.8 nm 輝帯の代わりに窒素分子輝帯 ($N_2 1 PG: 670.5 \text{ nm}$) 輝帯強度を使用することで解決が計られた。本論文の総括として、今回試みた 844.6 nm 光を用いた降下電子平均エネルギーの推定方法は、これまでの報告にあるロケット・衛星を用いた直接観測から見いだされたオーロラ電子の性質と定性的に良く一致したことで、降下電子のエネルギースペクトルを導く目的には適したオーロラ輝線であると言える。今後は多波長フォトメーター観測と人工衛星によるオーロラ電子観測との直接比較を行って、この手法を確立したい。また従来の研究においては、青色輝帯 (427.8 nm) を用いて降下電子平均エネルギーの推定が行われており、本論文もこのオーロラ輝帯の強度を基本的には使用したわけであるが、 427.8 nm 輝帯は大気による散乱の効果が重要となる場合が存在する。今後の研究においては理論的検討をさらに深めて、散乱の影響が極めて少ない 670.5 nm 輝帯を使用する方法へと移行すべきであろうとここで改めて指摘しておきたい。

謝 辞

多波長フォトメーター観測は第 31 次南極地域観測隊の観測事業として実施された。観測に当たっては第 31 次越冬隊員の多大な協力が不可欠であった。ここに感謝したい。フォトメーターの絶対感度校正は東北大学岡野氏、新潟大学木山氏の協力を得て新潟大学において行われた。モデル計算並びにデータの解析処理には国立極地研究所情報科学センター大型電算機 (M-680D) が使用された。

文 献

- BANKS, P. M., CHAPPEL, C. R. and NAGY, A. F. (1974): A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: Spectral degradation, backscatter, optical emission, and ionization. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1459-1470.
- BYTHROW, P. F. and POTEMRA, T. A. (1987): Birkeland currents and energetic particles associated with optical auroral signatures of a westward traveling surge. *J. Geophys. Res.*, **92**, 8691-8699.
- DAVIDSON, G. T. and SEARS, R. D. (1980): Pulsating aurorae: Evidence for flux limiting. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 185-188.
- GATTINGER, R. L. and VALLANCE JONES, A. (1972): The intensity ratios of auroral emission features. *Ann. Geophys.*, **28**, 91-97.
- GERDJIKOVA, M. G. and SHEPHERD, G. G. (1987): Evaluation of auroral $5577\text{-}\text{\AA}$ excitation processes using Intercosmos Bulgaria 1300 satellite measurements. *J. Geophys. Res.*, **92**, 3367-3374.
- HECHT, J. H., CHRISTENSEN, A. B. and PRANKE, J. B. (1985): High-resolution auroral observation of the OI (7774) and OI (8446). *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 605-608.

- HEDIN, A. E. (1987): MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.*, **92**, 4649-4662.
- MC EWEN, D. J., DUNCAN, C. N. and MONTALBETTI, R. (1981): Auroral electron energies: Comparisons of *in situ* measurements with spectroscopically inferred energies. *Can. J. Phys.*, **59**, 1116-1123.
- MEIER, R. R., STRICKLAND, D. J., HECHT, J. H. and CHRISTENSEN, A. B. (1989): Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: A study of auroral red line processes. *J. Geophys. Res.*, **94**, 13541-13552.
- ONO, T. and HIRASAWA, T. (1992): An apparent lifetime of auroral 630.0 nm (OI) emissions. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **44**, 91-108.
- REES, M. H. and LUCKEY, D. (1974): Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5181-5186.
- REES, M. H. and ROBBLE, R. G. (1986): Excitation of O(¹D) atoms in aurorae and emissions of 6300 Å line. *Can. J. Phys.*, **64**, 1608-1613.
- REES, M. H., ROMICK, G. J., ANDERSON, H. R. and CASSERLY, R. T., JR. (1976): Calculation of auroral emissions from measured electron precipitation; Comparison with observation. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5091-5096.
- SCHEMANSKY, D. E. and VALLANCE JONES, A. (1968): Type-B red aurora: The O₂⁺ first negative system and the N₂ first positive system. *Planet. Space Sci.*, **16**, 1115-1130.
- SHIOKAWA, K., FUKUNISHI, H., YAMAGISHI, H., MIYAOKA, H., FUJII, R. and TOHYAMA, F. (1990): Rocket observation of the magnetosphere-ionosphere coupling process in quiet and active arcs. *J. Geophys. Res.*, **95**, 10679-10686.
- SOLOMON, S. C., HAYS, P. B. and ABREU, V. J. (1988): The auroral 6300 Å emissions: Observation and modeling. *J. Geophys. Res.*, **93**, 9867-9882.
- STAMNES, K. (1981): On the two-stream approach to electron transport and thermalization. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2405-2410.
- STEELE, D. P. and MC EWEN, D. J. (1990): Electron auroral excitation efficiencies and intensity ratio. *J. Geophys. Res.*, **95**, 10321-10336.
- STRICKLAND, D. J., MEIER, R. R., HECHT, J. H. and CHRISTENSEN, A. B. (1989): Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: Theory and model results. *J. Geophys. Res.*, **94**, 13527-13539.
- VALLANCE JONES, A. (1974): *Aurora*. Dordrecht, D. Reidel, 301p. (Geophysics and Astrophysics Monographs. Vol. 9).
- VALLANCE JONES, A., GATTINGER, R. L., SHIH, P., MERIWETHER, J. W., WICKWAR, V. B. and KELLY, J. (1987): Optical and radar characterization of a short-lived auroral event at high latitude. *J. Geophys. Res.*, **92**, 4575-4589.

(1992年4月1日受付; 1992年5月6日改訂稿受理)