

## 掃天型リオメーターの開発

山岸久雄<sup>1</sup>・菊池 崇<sup>2</sup>

### Development of Scanning Narrow Beam Riometer

Hisao YAMAGISHI<sup>1</sup> and Takashi KIKUCHI<sup>2</sup>

**Abstract:** A new riometer system of high spatial resolution by means of a scanning narrow beam method is in operation at Syowa Station, Antarctica (69.0°S, 36.6°E,  $L=6.1$ ) since February 1985. Ionospheric absorption of cosmic radio noise over Syowa Station within 120 km in geomagnetic north-south and east-west directions, can be measured with a spatial resolution of 10 km and a temporal resolution of 10 s. The antenna system has four other fixed-direction beams pointing to the zenith and to the magnetic north, south and west with a zenith angle of 30°. Each signal from these fixed beams, constituting a separate riometer, is used for higher time resolution (0.25 s) observation.

This riometer system can discriminate a small-scale absorption region of a few tens of kilometers, which cannot be seen by a conventional broad beam riometer. This riometer system can also detect a drift velocity of pulsative absorption with a short wavelength of  $\sim 100$  km.

Comparing simultaneous observations of this riometer and a scanning photometer at Syowa Station, we found a considerable difference in spatial distribution between auroral absorption region and auroral emission region.

**要旨:** 半値幅 13° のペンシル状アンテナビームを掃天する、新型のリオメーターが開発され、1985 年 2 月南極昭和基地に設置された。このシステムは観測点の上空東西及び南北方向 120 km の範囲内の電離層吸収を空間分解能 10 km, 時間分解能 10 秒で求めることができる。このシステムはまた常時、磁南、北、西の天頂角 30° 方向、及び天頂を向く四本のアンテナビームを備え、これらの方向については時間分解能 0.25 秒の高時間分解能観測を行うことができる。

本観測システムにより、従来の広ビームリオメーターでは検出が難しかった直径数 10 km 以下の局在化された吸収現象や、波長 100 km 程度の小規模の脈動性吸収が伝搬の様子を観測することができた。また、オーロラ光学観測と本システムとの同時観測により光オーロラと電離層吸収の空間分布の差異が明らかにされた。

### 1. 高空間分解能リオメーター観測の歴史

リオメーター (riometer) とは Relative Ionosphere Opacity Meter (相対的電離層不透明度測定器) の略称で、HF 帯の宇宙雑音電波が電離層で吸収される度合いを測定する装置であり、LITTLE and LEINBACH (1959) により開発された。また、この宇宙雑音吸収現象を

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

<sup>2</sup> 通信総合研究所平磯支所。Communications Research Laboratory, Hiraiso Solar-Terrestrial Research Center, Isozaki-cho, Nakaminato 311-12.

CNA (Cosmic Noise Absorption) と略称する。

リオメーター観測は 1960 年代より今日に至るまで、簡便で標準的な電離層観測装置としてオーロラ帯を中心とする高緯度地方で広くネットワーク観測が行われており、地磁気じょう乱現象に伴う高エネルギー粒子降り込みのグローバルな分布を求めるのに役立ってきた。

標準型リオメーターはダブレットダイポールアンテナや三素子八木アンテナ等の指向性の弱いアンテナを用い、観測点上空の半径 100 km 程度の領域中の平均的吸収量を求めている。しかし、この領域中での吸収が空間的に一様でないことは、数 keV から数 10 keV の降下電子により引き起こされるオーロラの形状が、数 10 km 以下の空間スケールの変化をもつことから容易に推測されることである。

そこで、ある程度の指向性を持ったアンテナ（ビーム幅数  $10^\circ$ ）により、複数の視野方向の吸収を観測する方法 (multi-broad-beam riometer) が採られるようになり、実際、視野方向により吸収の時間変化の様相が異なることが明らかとなった (ANSARI, 1964)。吸収の空間分布に関しては、特にオーロラに伴う電離層吸収（オーロラ吸収）の空間分布がオーロラの形態とどのような関係になっているのかという点について大きな興味もたれた。これは両者の原因となる降下粒子のエネルギー帯が、前者は主として数 10 keV 以上なのに対し、後者は数 keV 帯であるため、両者の空間分布には明瞭な差異が現れることが予想されたからである。このため指向性リオメーターと指向性フォトメーターとの同時観測が行われ (ANSARI, 1964; BERKEY, 1968)、オーロラ吸収の方が光オーロラよりも幅広い分布をもつらしいということが推定されたが、リオメーターの空間分解能が乏しいため確定的な結論には至らなかった。

そこでさらに高空間分解能のリオメーターが開発されるようになった。これは複数の、鋭い指向性をもつアンテナビームを用いたリオメーター観測 (multi-narrow-beam riometer) により実現される。その代表例として、NIELSEN (1980) により、ノルウェー、ラムフィヨルドに設置されたシステムがあげられる。このシステムは 51.4 MHz を観測周波数とし、22 段同軸型コリニアアンテナ (BALSLEY and ECKLUND, 1972) を 16 列、50 m 四方にわたり配列させたものであり、これにより半値幅  $8^\circ$  程度のアンテナビームを子午面に沿って 10 本程度形成することができる。これは吸収層高度 (90 km 付近) にて約 15 km の空間分解能に相当する画期的なシステムであった。しかし、このシステムは同軸型コリニアアンテナの性質上、アンテナの配列方向以外にアンテナビームを向けられないという制約をもつ。

このシステムでは複数ビーム間の吸収波形の時間差から、吸収の移動速度を求めることができる。またアンテナビーム内を吸収領域が横切るのに要する時間から吸収領域の幅を求めることができ、オーロラ吸収については幅 20 km 以下という結果を得ている。しかし、このシステムでは全アンテナビームの出力を常時モニターしているわけではないので、吸収量の子午面分布が求められていない。また非移動性の吸収については、その幅を正確に求めるこ

とができない。この点を補うためアンテナビームを子午面内で比較的高速(10 秒)で走査し、吸収量の子午面分布を常時モニターしようとしたのが、われわれの開発した掃天型リオメーター (Scanning Narrow Beam Riometer) である。このシステムは非移動性の吸収領域の大きさを正確に求められるほか、後述するように移動性吸収を検出しやすく、その移動速度を正確に決定できる特徴をもつ (KIKUCHI *et al.*, 1988)。

その後、同軸型コリニアアンテナを用いず、アンテナ素子を完全に二次元に配列し、二次元の Butler matrix (BUTLER and LOWE, 1961) により、アンテナビームを任意の方向に形成できるシステムが南極点基地に設置された (DETRICK and ROSENBERG, 1988)。これは 64 個のアンテナ素子を 8 行 8 列に配置し、天空を  $7 \times 7$  のアンテナビームで観測し、吸収の二次元イメージを求めようとするもの (imaging riometer) である。

このように 1980 年代に入って開発が進んだ高空間分解能リオメーターは、降下粒子空間分布の微細構造を昼夜の別なく、曇天下でも観測できるという特徴をもち、オーロラ光学観測が不可能な条件下での、オーロライメージを提供する観測手段として極めて有用なものである。以下、われわれの開発した掃天型リオメーターの設計、実験経過、観測結果について報告する。

## 2. 掃天リオメーターの開発

### 2.1. システム設計

配列アンテナにおけるアンテナビーム幅  $\theta$  は、観測電波波長  $\lambda$ , 配列素子数  $N$ , 素子間隔  $d$  により、 $\theta = \lambda/Nd$  (radian) として与えられる。アンテナ建設上の技術的、及び敷地の制約から、アンテナの配列長  $Nd$  としては 50 m が現実的な上限値となろう。この条件の下で、CNA 観測の空間分解能を上げようとするれば、 $\lambda$  の小さい、高い周波数を観測対象とすればよいことになる。一方、電波吸収量は周波数が低いほど、大きくなるという性質があるから、吸収感度を上げるためには低い周波数を観測することが望ましくなる。これら相反する周波数依存性のかね合いと、人工電波雑音が少ないことを考慮して観測周波数が定められる。

ラムフィヨルドでは、空間分解能に重点を置き、50 MHz 帯でリオメーター観測が行われているが、掃天リオメーターでは感度に重点を置き、30 MHz を観測周波数とした。この周波数はリオメーター観測では最も広く用いられている周波数であり、標準型リオメーターとの比較を行う上では都合の良い周波数である。

アンテナの形式は Nielsen のものと同様、同軸型コリニアアンテナを並べる方式とする。50 m 四方の敷地の中に納めるため、14 段コリニアアンテナを  $5/8\lambda$  間隔で 8 列配置することにした。これによるアンテナビーム幅は  $13^\circ$  となる。これは吸収層高度に投影すると約 20 km となり、オーロラアークの幅や、パルセーションオーロラのパッチの径を議論するには、やや粗すぎる値である。そこで次のような工夫をした。アンテナビームの隣接間隔は、

Nielsen の用いた Butler matrix 方式では必然的にビーム幅 ( $13^\circ$ ) となるが、われわれのシステムでは専用位相回路により、 $6^\circ$  のビーム間隔とした。これは、隣接アンテナビームの視野が 50% ずつ重複することを意味する。これにより吸収高度における実効的空間分解能を 10 km とすることができた。リオメーターの観測範囲を広くするには、ビームの天頂からの傾きを大きくすればよいが、これには以下に述べる理由により制約がある。それは、配列アンテナでは主たる指向性方向 (main robe) とほぼ直交方向に grating robe と称する、もう一つの指向性が存在することである。Main robe が天頂付近を向いている場合、grating robe は地平線方向を向くため、その宇宙雑音電波受信に対する寄与は無視できるが、main robe が天頂から大きく傾いた場合、grating robe は天頂方向に接近し、どちらの robe で受信しているのか、区別がつかなくなってくる。そこで、われわれの観測では、アンテナビームの傾きは天頂角  $\pm 30^\circ$  の範囲に押さえることにした。従って、子午面内でのアンテナビームの方向は、天頂角北  $30^\circ$  から南  $30^\circ$  ままで  $6^\circ$  刻みにした 11 方向とした。また、南北方向の吸収量分布のみならず、東西方向の分布も求められるよう、南北用配列アンテナと直交する、もう一組の配列アンテナを作り、ビームを天頂角東  $30^\circ$  から西  $30^\circ$  まで  $6^\circ$  刻みで

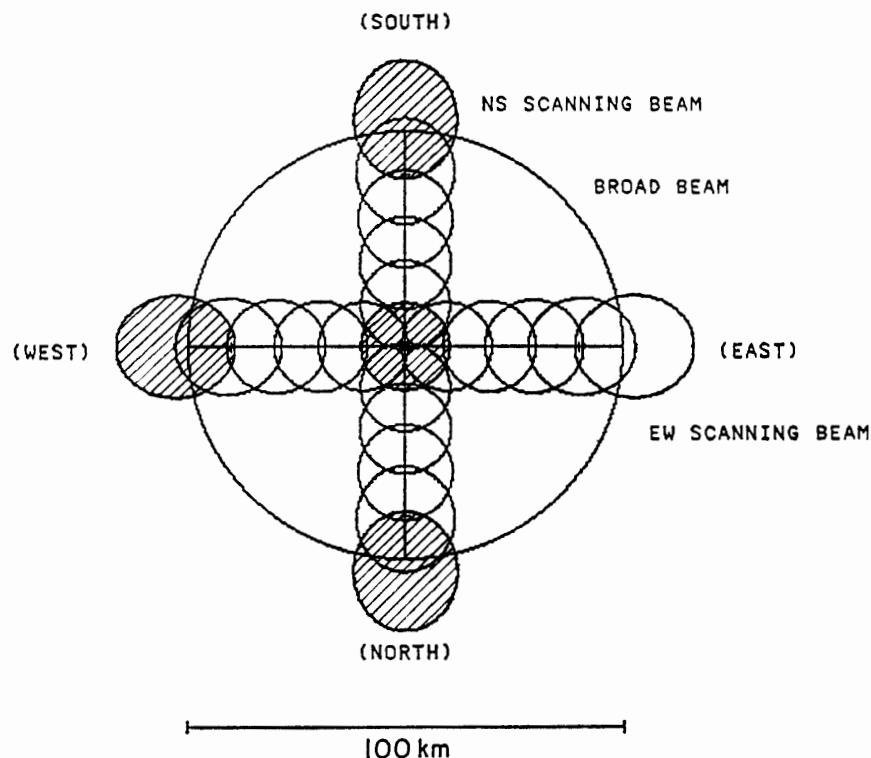


図 1 吸収層高度 (90 km) に投影された掃天型リオメーターアンテナビーム (小円) と通常型広ビームの観測視野 (大円)。図中斜線部は固定方位ビームの視野を示す。

Fig. 1. Cross sections of the riometer antenna beams at the absorption layer at 90 km altitude for two scanning beams (small open circles), four fixed-direction beams (hatched circles), and a broad beam of a conventional riometer (large circle).

向けられるようにした。図1の小円は、このようにして形成されたアンテナビームの吸収層高度(約90 km)への投影を示す。なお、図中の大円は通常型の広ビームリオメーターの観測視野を比較のために示したものである。

このようにして得られる南北11本、東西11本のアンテナビーム出力は、それぞれ11回路のPINダイオードスイッチを経てリオメーターに接続される。通常1秒ごとにビーム方向が切り替えられ、片道10秒、往復20秒で掃天が行われる。ビーム切替速度は、リオメーターのAGC回路の応答周波数(4 Hz)に依存し、0.5秒まで短縮することが可能である。

ビームを掃天した場合、特定ビーム方向についてのデータサンプリング周期は10-20秒となるので、時間変動の速い吸収現象、例えば点滅周期10秒前後のパルセーティングオーロラに伴う吸収については、十分にその変化をとらえることができない。そこで、常に特定方向(天頂、及び天頂角北 $30^\circ$ 、南 $30^\circ$ 、西 $30^\circ$ )を向く4本の固定方位ビーム(図1の斜線部)を併せて形成し、それぞれに専用リオメーターを接続し、高時間分解能吸収観測を行えるようにした。

## 2.2. ミニチュアモデル実験

配列アンテナ設計に際し、アンテナ指向性パターンのサイドローブを極力小さくするため、配列各素子を結合する際、中央の素子と最外部素子との間で3 dBの電力傾斜(外へ行くほど電力が小さくなる)を設けた。これによる効果を確認するため、実寸の1/30のミニチュアモデルを作成し、アンテナ特性の測定を行った。ここでは、また東西アンテナの存在が南北アンテナの指向性パターンに及ぼす影響や、グラウンドプレーンの網目の粗さが、指向性パターンに及ぼす影響も調べられた。

実験は昭和58年10月、安展工業KK、調布工場屋上で行った。簡単のため、コリニアアンテナは7段とした。ミニチュアアンテナを地上高8 mの回転装置にのせ、18 m(約60波長)離れた送信アンテナからの電波を受信して指向特性を測定した。実験の結果、ビーム方向が天頂角 $\pm 30^\circ$ の範囲内にてサイドローブは常にメインローブの15 dB以下に押えられることが確認された。また、グラウンドプレーンの網目としては、 $1/8\lambda$ 程度の細かさが必要なのことがわかった。東西アンテナが南北アンテナの指向性パターンに及ぼす影響は無視できる程度であった。

## 2.3. 国内予備実験

配列アンテナの各素子と位相回路間のインピーダンス整合をとるためには、実物のアンテナを実際の配置通りに並べた上で、整合用スタブの長さを調整する必要がある。そのため、昭和59年3月、茨城県新治郡八郷町柿岡の東京大学理学部地球物理研究施設の敷地を借用しアンテナを仮設し、この調整を行った。

調整終了後、固定方位ビーム出力にリオメーターを接続し、試験観測を行った。中緯度地方である柿岡では、吸収現象は見いだせなかったが、宇宙電波雑音中の特定方向(こと座付

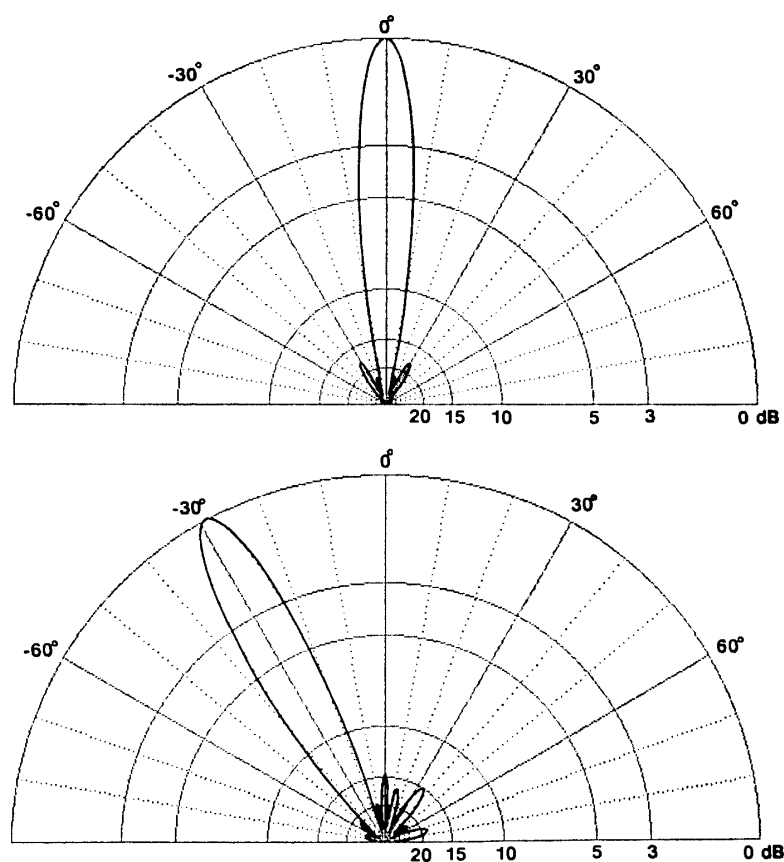


図 2 掃天型リオメーターのアンテナ指向性パターン。上段はビーム方向天頂，下段はビーム方向天頂角  $30^\circ$  の場合を示す。

Fig. 2. Radiation patterns of scanning-beam riometer antenna when the beam is directed to the zenith (upper panel) and to a zenith angle of  $30^\circ$  (lower panel).

近)に強い電波源が見いだされた。星座が1時間に $15^\circ$ のわりで天空を回転することを考慮すると、上記の電波源がアンテナ視野を横切る時間が1時間弱であることや、隣接固定方位ビーム間での受信時刻のずれが3時間程度あることから、アンテナビーム幅や、ビーム方向が設計通り実現されていることが推測された。図2に現地調整で得られた配列各素子のインピーダンスに基づき計算されたアンテナ指向性(ビーム方向天頂及び、天頂角 $30^\circ$ の場合)を示す。昭和59年7月、システムに掃天用位相器が組み込まれ、掃天ビームによる試験観測が行われ、宇宙電波雑音の子午面内分布が日変化する様子が確認された。

アンテナは8月中旬に撤収、梱包され、第26次南極地域観測隊に引き渡された。アンテナの仮設、撤収作業には、宙空系観測隊員が参加し、昭和基地におけるアンテナ建設の手順を習得する上での有効な訓練となった。

### 3. システム建設

昭和基地情報処理棟の東南東300 m、迷子沢の平坦地(50 m 四方)をアンテナ敷地とした。

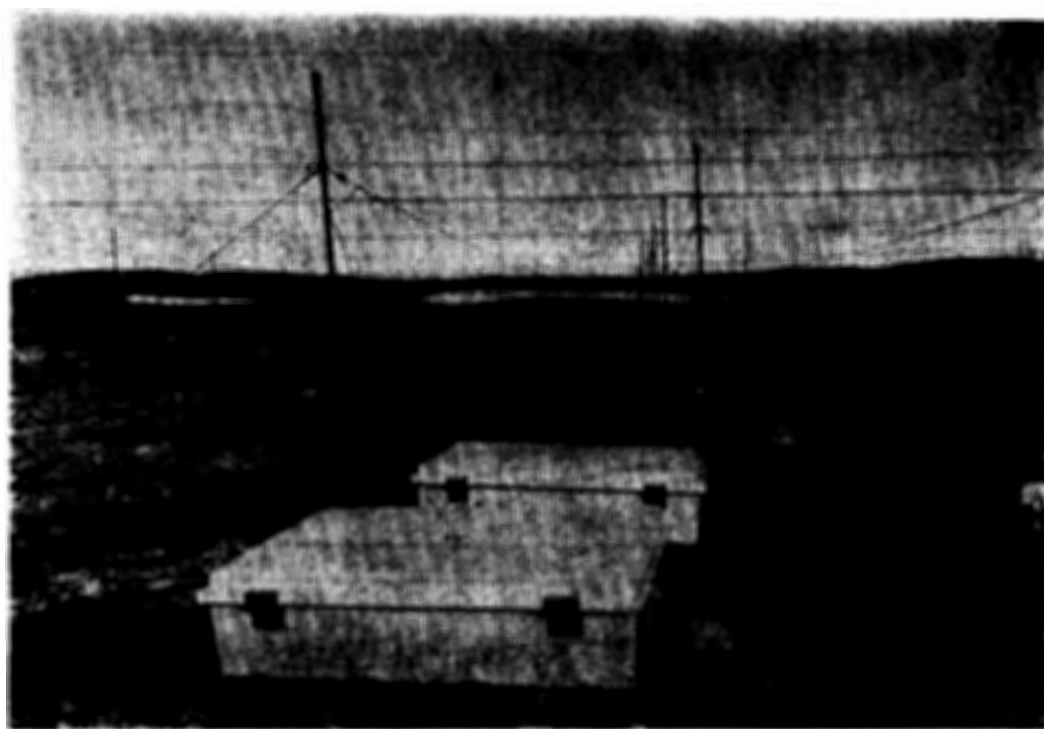


図 3 昭和基地に設置されたアンテナシステム概観

Fig. 3. An external view of the antenna system installed at Syowa Station, Antarctica.

敷地内の最大高低差は 1 m である。露岩が散在しているが、電波波長 (10 m) に比べ十分小さいので影響は無視できる。アンテナ建設は昭和 59 年 1 月 6 日から 1 月 11 日の間、宙空部門、通信部門隊員、「しらせ」乗員の支援を得て行われた。図 3 にその概観を示す。南北コリニアアンテナは地上高 1.75 m に、東西コリニアアンテナは地上高 1.95 m にそれぞれ設置された。敷地内は 1.2 m 間隔に 3 mm $\phi$  の軟銅線が網目状に張られグランドプレーンを構成した。位相回路及びリオメーターはアンテナ地点に設置され、一方記録系及びアンテナビーム切替制御器は 300 m 離れた情報処理棟に設置された。

アンテナビームの掃天は、当初南北方向のみ行われたが、昭和 60 年 1 月、東西方向ビーム掃天回路が付加された。またリオメーターを収納する保温箱も設置された。観測結果 (リオメーター出力) はペンレコーダーで記録されるほか、遅送り FM データレコーダーで記録された。掃天リオメーター観測に関しては当初適当なクイックルック手段が無く、日本へデータを持ち帰った後、大型電子計算機による解析を行ったが、昭和 60 年 2 月からは現地でパーソナルコンピューターによるクイックルックが行われるようになり、観測オペレーション上、極めて有効であった。

#### 4. 観測結果と考察

##### 4.1. サマリープロット

昭和 60 年 3 月以来、本システムは連続的に観測を続けている。毎年 4 月、砕氷船「し

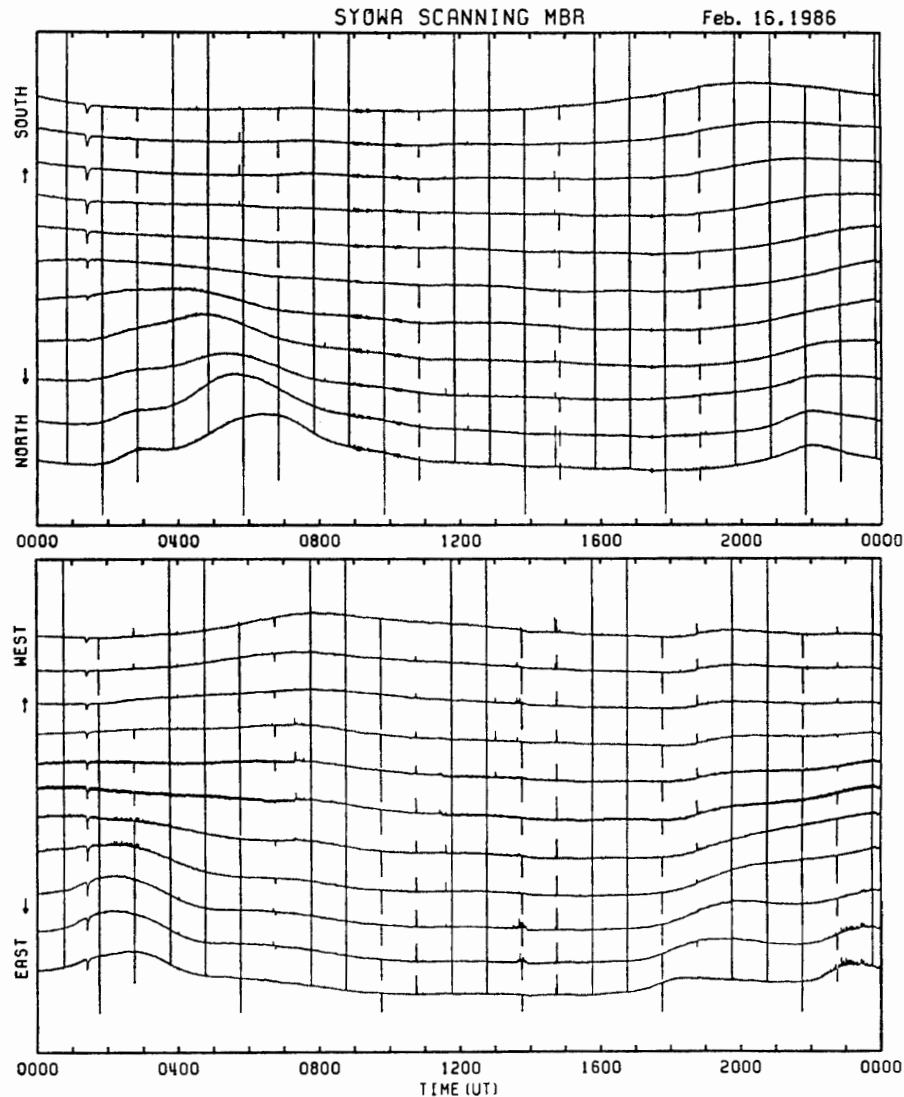


図 4 地磁気活動静穏日における掃天型リオメーターサマリープロット  
 Fig. 4. A summary plot of scanning-beam riometer data for a geomagnetically quiet day.

らせ」により持ち帰られるアナログテープは国立極地研究所情報処理センターで A/D 変換され大型電子計算機による処理が行われる。掃天ビームデータについては、南北 11 本、東西 11 本のアンテナビームの方向ごとの時系列データとして再編集される。

図 4 は地磁気活動静穏日における一日間のサマリープロットであり、上段は東西ビーム下段は南北ビームについてのリオメーター出力である。図中一時間ごとのパルスはリオメーターに内蔵された校正信号である。東向きビームの 0200-0300 UT, 2300 付近, 及び北向きビームの 0400-0800, 2200 付近のゆるやかなピークは、天空の当該方向に 30 MHz の強い宇宙電波源があることを示している。0120, 東及び南のビームに顕著に現れた信号レベルの低下はオーロラによる吸収現象を現している。

図 5 は地磁気活動が活発で顕著な吸収現象が起こった日の一日間のサマリープロットであ



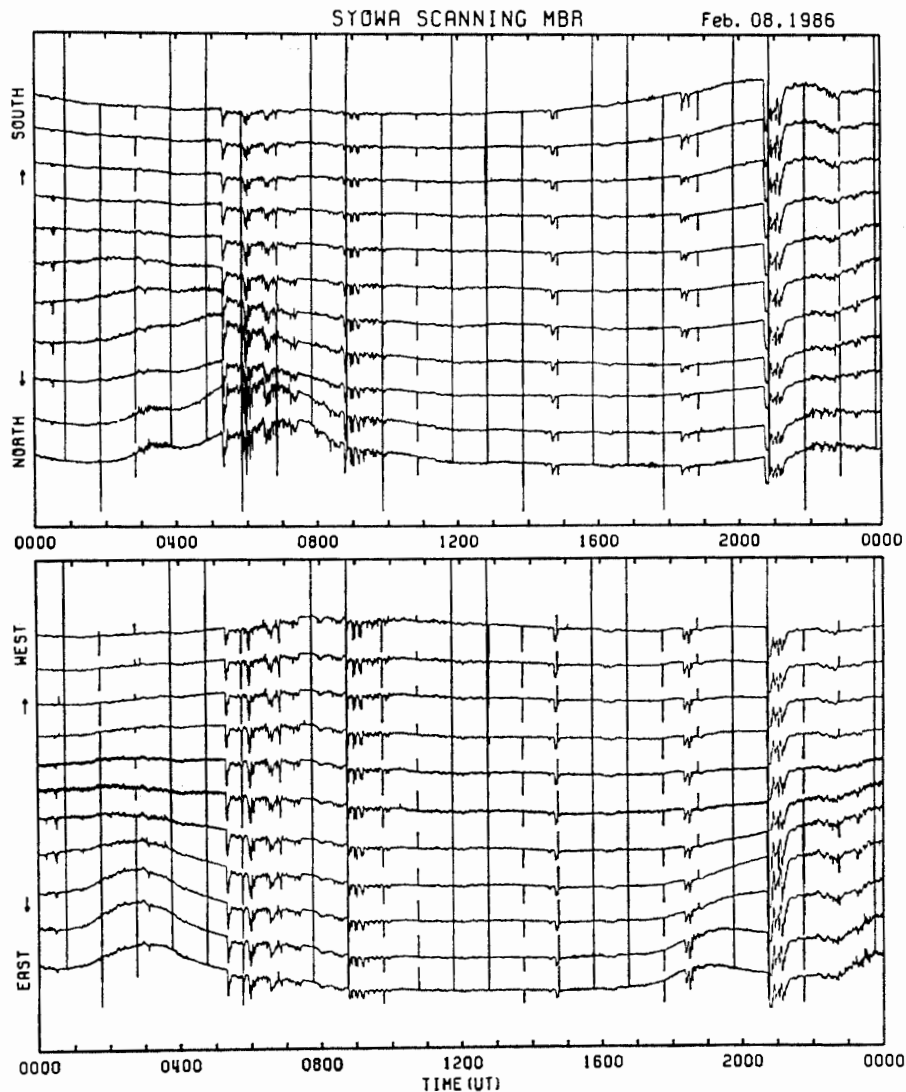


図 5 地磁気じょう乱時の掃天型リオメーターデータサマリープロット  
 Fig. 5. A summary plot of scanning-beam riometer data for a geomagnetically disturbed day.

る。図 4 で示された静穏日の信号レベルを基準として、図 5 に示される信号レベルの相対的变化を求めたものが正味の吸収量となるわけである。図 5 上段、0500–0800 に現われた吸収については、北側ビームの吸収量が多いが、一方 2100 前後の吸収については南側ビームの吸収量が多い。このように、掃天リオメーターの視野内で吸収が一樣でないことは明らかであり、高空間分解能リオメーター観測が必要な理由である。

全観測期間にわたり、このような一日間のサマリープロットが作られるほか、顕著な吸収現象についてはさらに細かいタイムスケールのプロットが作成されている。

#### 4.2. 掃天型リオメーターと広ビームリオメーターとの比較

同一の吸収現象を掃天型リオメーターと、通常の広ビームリオメーターとで観測した場合、どのような差異がみられるであろうか。図 6 はその一例を示したものである。図中、上段

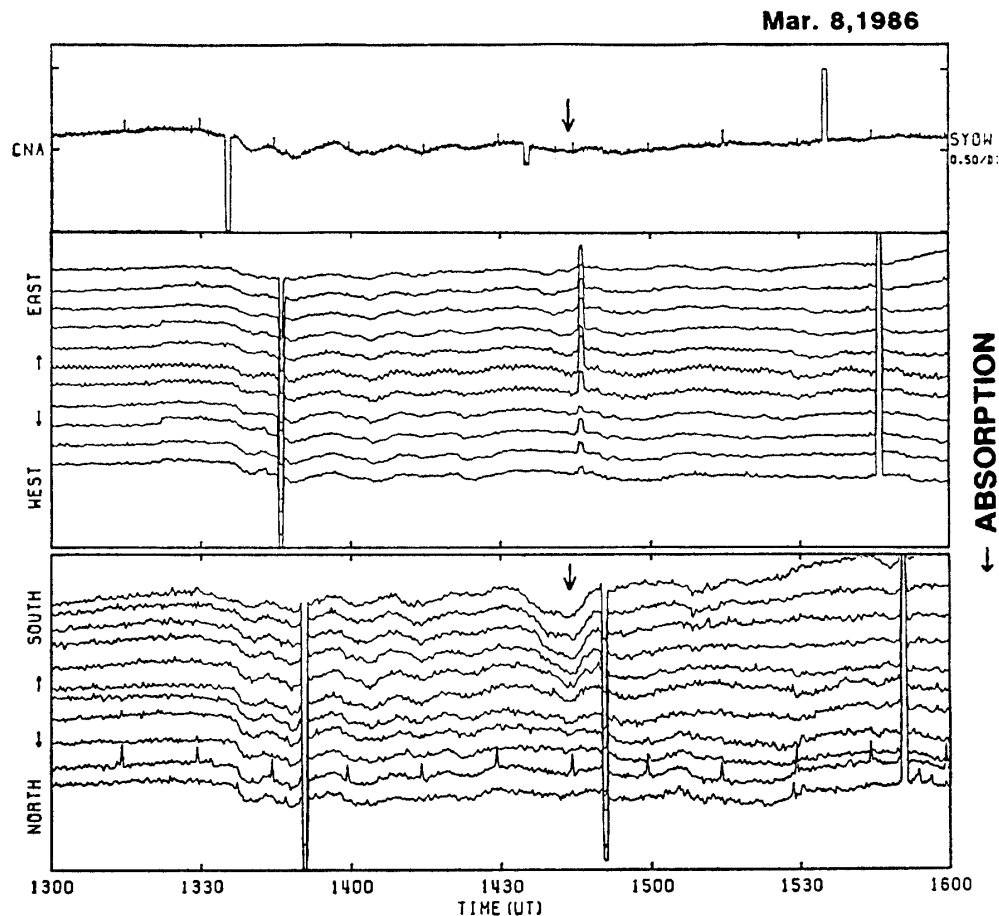


図 6 広ビームリオメーターと掃天型リオメーターの比較観測結果  
 上段：昭和基地広ビームリオメーター．中段：掃天型リオメーター東西ビーム．  
 下段：同南北ビーム観測結果．

Fig. 6. Comparison of the absorption curves of a broad-beam (beamwidth  $60^\circ$ ) riometer (top panel) with the east-west scanning-beam riometer (middle panel) and the north-south scanning-beam riometer (bottom panel). A strongly localized absorption appeared at 1440 UT in the southern beams (marked with an arrow in the bottom panel) has no counterpart in the absorption curve of the broad-beam riometer.

は昭和基地の広ビームリオメーター（視野角  $60^\circ$ ）による観測結果であり，中段は掃天型リオメーターの東西ビーム，下段は南北ビームによる観測結果である．1330 から 1430 の間，東西及び南北の全ビームにわたって周期 10 分程度の脈動的吸収が観測されるが，これは広いビームリオメーターでも顕著に観測されている．一方，1440 頃掃天型リオメーターの南側ビームで顕著な吸収が観測されているが，（下段矢印），広ビームリオメーターではほとんど吸収が認められない（上段矢印）．このことは広ビームリオメーターは全視野にわたって一様に起こる吸収については敏感であるが，視野の一部のみを占める吸収については検出できない場合があることを示しており，直径数 10 km 程度の局在化した吸収現象の観測には高空間分解能リオメーターが必要であることがわかる．

### 4.3. 移動性吸収の観測

掃天型リオメーターのもう一つの特徴は吸収の移動の様相を正確にとらえられることである。従来、通常のリオメーターにより吸収の移動速度を求めるには、互いに数百 km 離れた複数の観測点で吸収現象を観測し、その発生時刻の差から推定する方法がとられているが、数百 km 離れると吸収波形がかなり変化するため、時間差を求めることが難しくなる。吸収波形の変化が著しい場合、各々の観測点で見ているのは同一の吸収現象なのか、全く独立の吸収現象なのか判断しかねる場合すらある。そこで、吸収の移動の状況を正確にとらえるには、吸収波形の変化が十分小さいような近接した観測点を多数並べることが必要となる。掃天型リオメーターでは吸収高度 (90 km) にて視野径 20 km のアンテナビームが 10 km 間隔で 11 本並んでいるため、この条件が十分満たされており、以下の例で示すように、移動の検出が容易である。

昭和基地の地磁気共役点であるアイスランドにはフッサフェル、チョルネス、イーサフィヨルズの三地点に広ビームリオメーターが設置されている。図 7 はこれらのリオメーターの観測視野を吸収高度に投影したものであり (図中、実線円)、また昭和基地掃天型リオメーターと広ビームリオメーターの観測視野を地磁気共役点に投影したもの (図中点線) を併せて示してある。図 8 は図 7 で示された広ビームリオメーターネットワークと、掃天型リオメーターとによる移動性吸収の観測結果の比較例である。図中上段は地磁気方位東西方向に並んだチョルネス (TJOR) 及びフッサフェル (HUSA) の広ビームリオメーターの観測結果であり、中段は昭和基地広ビームリオメーター、下段は掃天型リオメーター東西ビームによる観

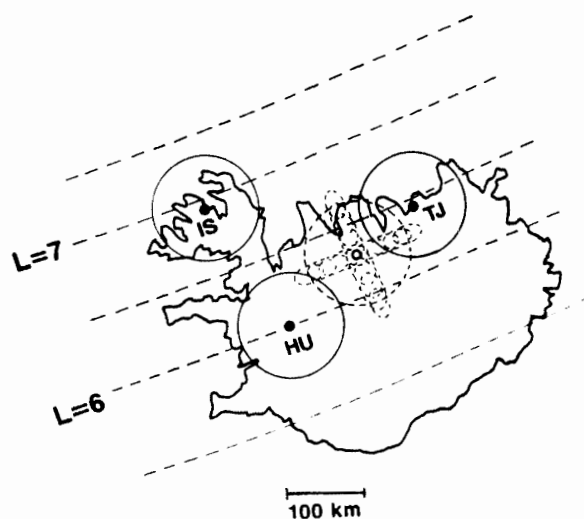


図 7 アイスランドにおける広ビームリオメーターネットワークの観測視野の吸収層高度への投影 (実線円) と、地磁気共役点に投影された昭和基地掃天型リオメーターと広ビームリオメーターの観測視野 (点線小円と点線円)。

Fig. 7. Cross sections of the antenna beams at the absorption layer for three broad-beam riometers installed at Husafell (HU), Tjornes (TJ) and Isafjörður (IS) in Iceland. Broken circles show cross sections of antenna beams for the scanning-beam riometer and a broad-beam riometer at Syowa Station projected onto the geomagnetic conjugate point in Iceland.

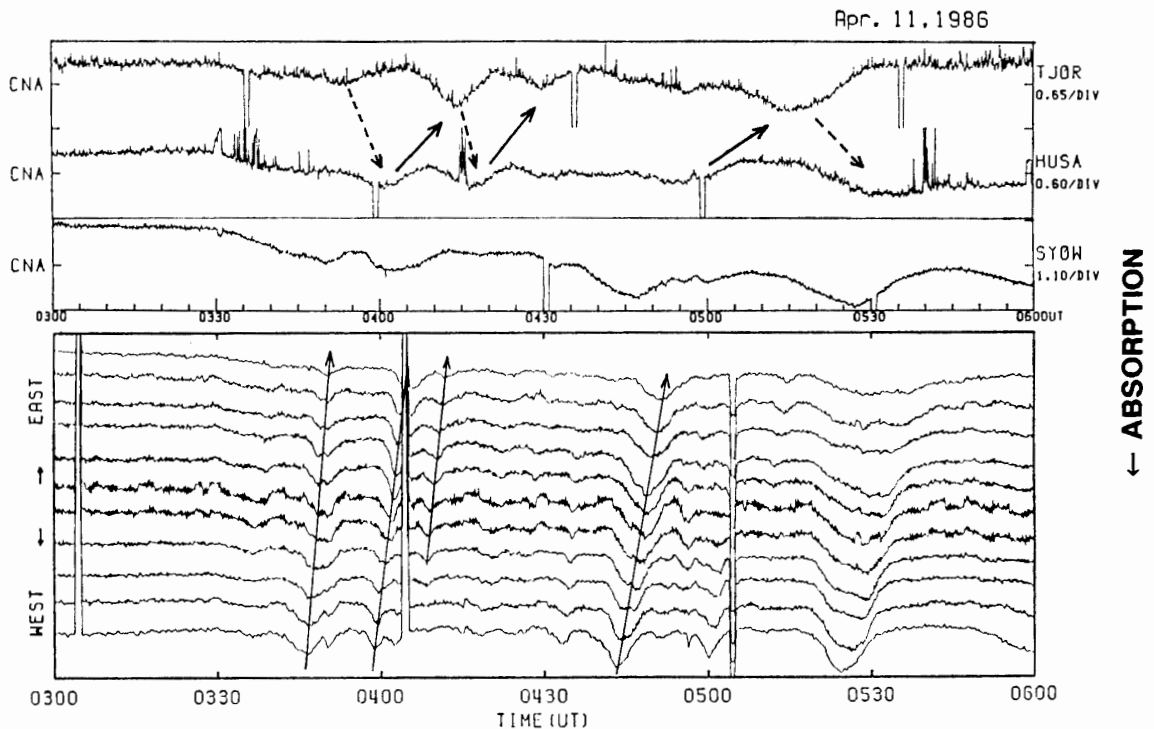


図 8 広ビームリオメーター (上段) と掃天型リオメーター (下段) により観測された移動性吸収の例

Fig. 8. Drifting type absorption events observed by broad-beam riometers at Tjornes and Husafell in Iceland (top panel), and at Syowa Station, Antarctica (middle panel), and by the east-west scanning beam riometer at Syowa Station (bottom panel). For broad-beam riometer observation, it is difficult to determine the propagation direction to be eastward (solid arrows) or westward (broken arrows). However, the absorption curves of the scanning-beam riometer clearly show a trend of propagation toward the east.

測結果をそれぞれ示している。上段、チョルネス及びフッサフェルの広ビームリオメーターには、ともに脈動性吸収が現われているが、その伝搬方向は東向き (実線矢印) なのか、西向き (点線矢印) なのか区別することができない。しかし下段の掃天型リオメーター観測によれば、明確に東向き伝搬であることが示される。広ビームリオメーターと掃天型リオメーターは、はたして同一の吸収現象を観測しているのかという疑問に対しては、それぞれにより観測される移動速度が、4 時付近では 260 と 300 m/秒、5 時付近では 160 と 200 m/秒とほぼ近い値を示していることから、同一現象を観測したものと判断できるのであろう。このように掃天型リオメーターは吸収現象の移動を観測するのに適している。

#### 4.4. オーロラ発光とオーロラ吸収

オーロラ発光とオーロラ吸収はともにオーロラ電子により引き起こされる現象であるが、前者には主として数 keV の降下電子が寄与するのに対し、後者には数 10 keV 以上の電子による寄与が大きい。このため、降下電子のエネルギースペクトルの形態により、両者は異なった現れ方をする。図 9 は 1986 年 5 月 2 日から 3 日にかけての夜、南極昭和基地の掃天フォトメーターによる 557.7 nm オーロラ光強度 (中段) と掃天リオメーターによる吸収量 (下段) の子午面内分布を比較したものである。両者は図上段に示される地磁気のじょう乱に

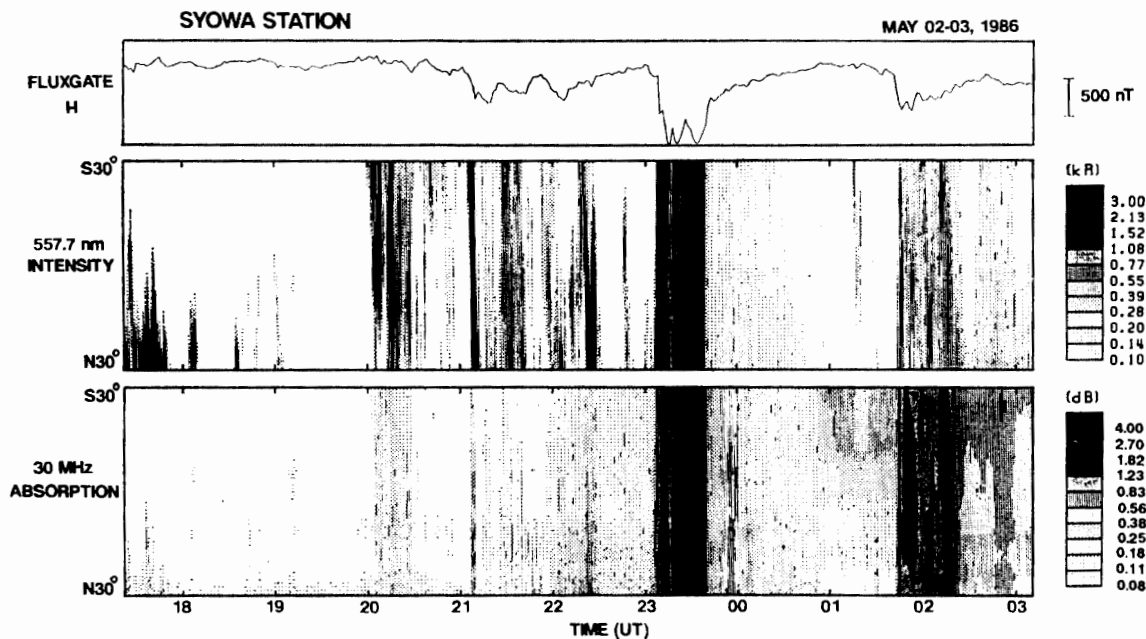


図 9 地磁気じょう乱時における，昭和基地掃天フォトメーターによる 557.7 nm オーロラ光強度 (中段) と掃天型リオメーターによる吸収量 (下段) の子午面内分布，時間変化の比較。上段は地磁気水平成分の変化を示す。

Fig. 9. Comparison of meridian-time displays of 557.7 nm auroral intensity observed by a scanning photometer at Syowa Station (middle panel) with absorption intensity observed by the scanning-beam riometer (bottom panel). Top panel shows a time variation of H-component flux gate magnetometer.

に伴い，互いに良く似た時間変動を示すが，両者の強度比は地方時とともに変化することがわかる。昭和基地の地磁気地方時 (MLT) は世界時 (UT) に等しいことを考慮すると，地磁気地方時の夕方から真夜中にかけてはオーロラ発光強度が吸収に比べ相対的に顕著であるが，朝側では逆に吸収の方が顕著になることがわかる。このことは降下電子のスペクトルが地磁気地方時とともに変化することに対応している。すなわち，夕方側の降下電子スペクトルは数 keV にピークを持ち，明るいカーテン状オーロラを光らせるが，数 keV 以上の高エネルギー成分が少ないため，吸収量は少ない。一方，朝側の降下電子スペクトルは，keV 帯にピークをもたないため，オーロラ発光強度は低い，高エネルギー成分が豊富にあるため，吸収量は大きくなる。

真夜中の降下電子は，数 keV から数 10 keV にわたる幅広いエネルギー成分を含むため，オーロラ発光，オーロラ吸収，ともに顕著であるが，詳細に調べると両者の間には細かい時空間分布の違いが認められる。図 10 は図 9 の 2306 から 2315 UT までの間を拡大し，オーロラ発光強度 (上段) とオーロラ吸収量 (下段) を等高線表示したものである。上段の縦線部はカーテン状のオーロラ (ディスクリットオーロラ) の発生域を示す。大まかな時空間分布については両者は一致しているが，2308 から 2309 にかけて，南の空に出現したカーテン状オーロラについては，対応する吸収が現れていないことがわかる。また 2310 から 2313 に

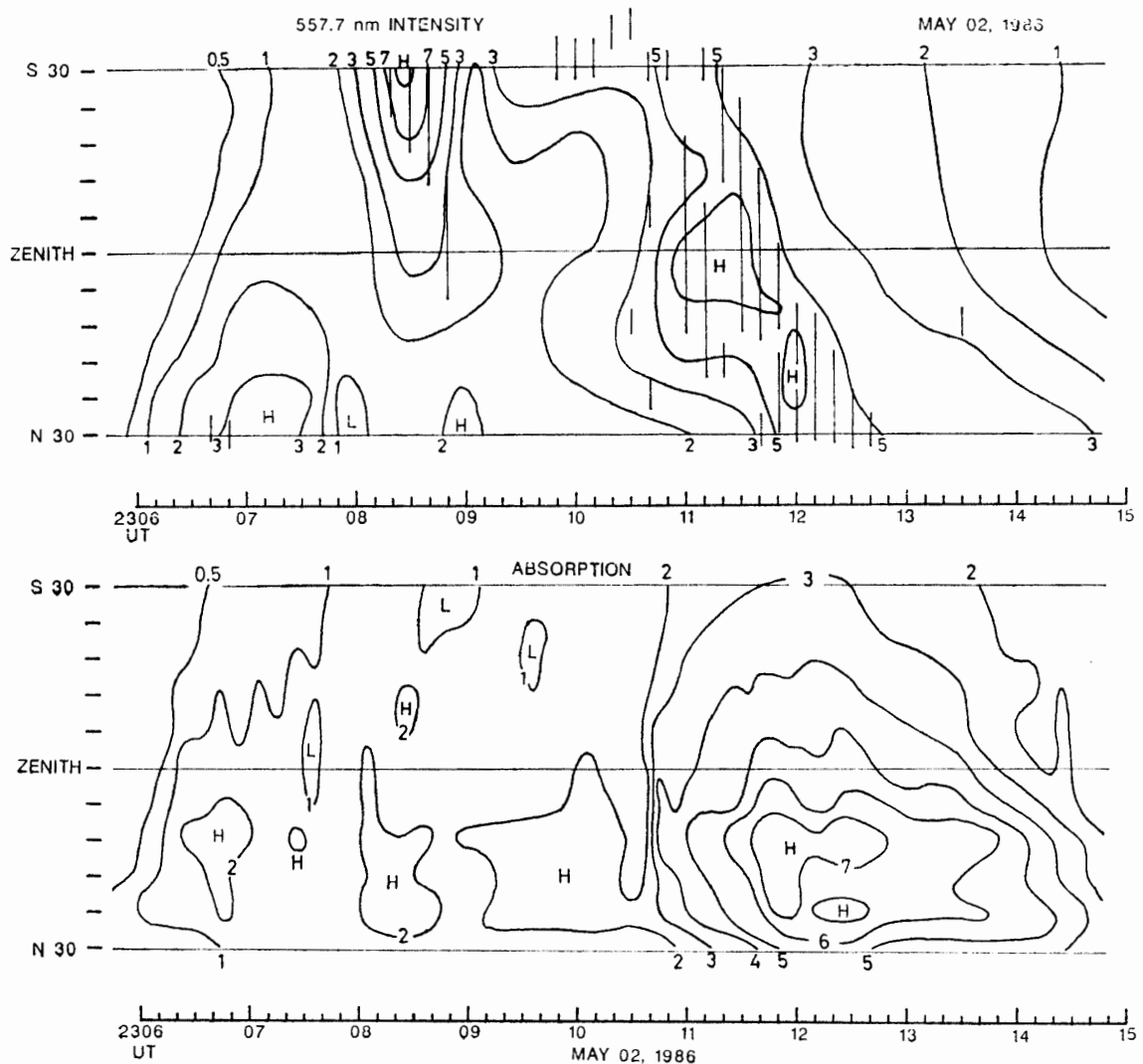


図 10 図 9 の 2306 から 2315 UT の間を拡大し、等高線表示したもの。上段はオーロラ発光強度の、下段はオーロラ吸収量の時間変化を示す。上段の縦線部はカーテン状オーロラの発生域を示す。

Fig. 10. An expanded contour of Fig. 9 for the time interval of 2306-2315 UT. Vertical lines in the upper panel indicate an area of discrete aurora.

かけて北（低緯度方向）へ移動するカーテン状オーロラについては、対応する吸収が存在するものの、吸収量の最大となる位置はオーロラ発光に比べ北（低緯度）にずれている。また 2313 以降オーロラが弱くなったにもかかわらず、吸収は持続していることがわかる。

このように、オーロラとオーロラ吸収の空間分布には細かな差異があることが高空間分解能リオメーター観測により明らかにされた。上記の差異は降下電子のエネルギースペクトルの空間的变化の様相を推定することに役立つものである。

## 5. ま と め

掃天型リオメーターは、観測点の上空、東西及び南北方向 120 km の範囲内の電離層吸収

を空間分解能 10 km, 時間分解能 10 秒で求めることができる. 併設された固定方位ビーム (磁南, 北, 西の天頂角  $30^\circ$  及び天頂) を用いれば, これらの特定方向についてさらに高い時間分解能 (0.25 秒) で吸収観測を行うことができる.

本観測システムにより, 従来の広ビームリオメーターでは検出が難しかった直径数 10 km 以下の局在化された吸収現象, 及び波長 100 km 程度の小規模の脈動性吸収が観測された. また本システムにより, これらの吸収現象の移動速度を正確に測定することができた. オーロラ光学観測と本システムとの同時観測により, オーロラ発光とオーロラ吸収について, その空間分布の差異が明らかになった. この差異により, 降下電子スペクトルが空間的に変化している様相を推定することが可能となる.

本システムは光学観測が不可能な曇天や日照時でも, オーロラの出現状況を把握することができ, オーロラ観測上非常に有効な観測手段と考えられる.

## 謝 辞

本システムの開発にあたり, 暖かいご理解と励ましを賜った国立極地研究所超高層部門平澤威男, 江尻全機教授, データ解析部門佐藤夏雄助教授, また当時国立極地研究所助教授であった福西浩東北大教授に深謝いたします.

本システムのアンテナ支柱の設計, 製作については大瀬正美氏より詳細なご指導を賜った. また, アンテナの国内における仮設にあたっては, 東京大学地球物理研究施設より柿岡の敷地の使用を快諾して頂いた. 本システムの南極昭和基地への設置にあたっては, 第 26 次, 27 次観測隊及び砕氷艦「しらせ」乗員の諸兄の暖かい協力を得た. 特に, 第 26 次観測隊鮎川一朗隊員は国内予備実験, 昭和基地での建設作業の中核となって活躍して頂いた. 取得データの解析処理にあたっては国立極地研究所超高層物理部門受託学生池田修一君 (電気通信大学応用電子工学科芳野研究室) に全面的な協力を頂いた. これらの諸兄のご協力に深く感謝いたします. なお, 本データの解析は国立極地研究所情報処理センターの電子計算機システムを用いて行われた.

## 文 献

- ANSARI, Z. A. (1964): The aurorally associated absorption of cosmic noise at college, Alaska. *J. Geophys. Res.*, **69**, 4493-4513.
- BALSLEY, B. B. and ECKLUND, W. L. (1972): A portable coaxial colinear antenna. *IEEE Trans. Antennas Propaga.*, **20**, 513-516.
- BERKEY, F. T. (1968): Coordinated measurements of auroral absorption and luminosity using the narrow beam technique. *J. Geophys. Res.*, **73**, 319-337.
- BUTLER, J. and LOWE, R. (1961): Beam forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas. *Electron. Des.*, **9**, 170.
- DETRICK, D. L. and ROSENBERG, T. J. (1988): IRIS; An imaging riometer for ionospheric studies. submitted to *Antarct. J. U. S.*
- KIKUCHI, T., YAMAGISHI, H. and SATO, N. (1988): Eastward propagation of Pc 4-5 range CNA pulsations in the morning sector observed with scanning narrow beam riometer at  $L=6.1$ .

- Geophys. Res. Lett., **15**, 168-171.
- LITTLE, C. G. and LEINBACH, H. (1959): The riometer—a device for the continuous measurement of ionospheric absorption. Proc. Inst. Radio Eng. Aust., **47**, 315-320.
- NIELSEN, E. (1980): Dynamics and spatial scale of auroral absorption spikes associated with the substorm expansion phase. J. Geophys. Res., **85**, 2092-2098.

(1988 年 12 月 20 日受付; 1989 年 1 月 11 日改訂稿受理)