

イメージングリオメーターの開発

山岸久雄¹・西野正徳²・佐藤 貢²・加藤泰男²・小島正宜²・
佐藤夏雄¹・菊池 崇³

Development of Imaging Riometers

Hisao YAMAGISHI¹, Masanori NISHINO², Mitsugi SATO²,
Yasuo KATO², Masayoshi KOJIMA², Natsuo SATO¹
and Takashi KIKUCHI³

Abstract: An 8 by 8 beam imaging riometer with a view field of 180 km by 180 km, spatial resolution of 20 km, and time resolution of 1 to 4 s has been developed in Japan. System design is described with some stress on the difference from the first imaging riometer system, IRIS, developed by the University of Maryland. This system has a unique capability of displaying absorption image on the real time basis with the aid of QL software, which is summarized in a separate paper. The performance of the array antenna system is confirmed by simulation calculations using the galactic radio noise map at 30 MHz obtained by CANE (Aust. J. Phys., **31**, 561, 1978). Procedures for absorption image forming are also described. Some of the absorption images obtained by this system are compared with optical auroral images observed at the same location at the same time. It is found that the both images show a good similarity for morning-side auroras. It is, therefore, concluded that the imaging riometer is a very useful tool for monitoring the auroral form when the optical aurora observation is difficult by the sunlit, or weather condition.

要旨: われわれは 8 行 8 列のアレイアンテナから成るイメージングリオメーターを開発した。本論文では、このシステムのデザインについて、先に開発されたメリーランド大学のイメージングリオメーターと比較しつつ述べる。われわれのシステムは、観測点の上空 180 km 四方の領域を空間分解能 20 km, 時間分解能 1~4 秒で観測することができ、またリアルタイムで真の吸収画像を表示できる QL プログラムを備えていることに特徴があるが、この QL プログラムについては別論文にまとめた。本システムのアンテナ指向特性は録河雑音電波の全天マップを利用したシミュレーション計算により、ほぼ設計どおりの特性が得られていることが確認された。

本論文では、受信データから、吸収画像を作り出す手順についても説明し、得られた吸収画像と光学観測によるオーロラ画像の比較例を示した。特に、朝方のオー

- ¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.
- ² 名古屋大学太陽地球環境研究所. Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, 13, Honohara 3-chome, Toyokawa 442.
- ³ 通信総合研究所. Communications Research Laboratory, 2-1, Nukui Kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

ロラについては、両者は良い一致を示すことが明らかになり、イメージングリオメーターは光学観測が困難な状況下でのオーロラ像のモニター装置として極めて有効であることがわかった。

1. はじめに

1970年代末、NIELSEN等(ドイツ、マックスプランク超高層大気研究所)は、古典的な降下粒子の観測手段であったリオメーター(Riometer; Relative Ionospheric Opacity Meterの略)に四つのペンシルビームから成るアレイアンテナを接続し、マルチビームリオメーター観測を開始した。このシステムは、天頂及び北、南、東の天頂角 30° 方向を向く、ビーム幅 13° のペンシルビームにより宇宙電波雑音吸収(Cosmic Noise Absorption; CNA)を数10 kmの空間分解能で測定することができる。彼らは、オーロラに伴う数10 keV帯降下電子領域は、電離層高度で水平距離が数10 km以下に局在化される場合があることを示した(NIELSEN, 1980)。

その後筆者等は1985年に、ビーム幅 13° のペンシルビームを天頂角 30° の範囲内で 6° 刻みに走査する、掃天型リオメーターを開発し、南極昭和基地に設置した(山岸・菊池, 1989)。これによりオーロラに伴うCNAの形態(YAMAGISHI *et al.*, 1989)や、降下粒子脈動のドリフト特性(KIKUCHI *et al.*, 1988)が明らかにされた。この掃天型リオメーターは、吸収層高度(~ 90 km)にて10 kmという優れた空間分解能をもつが、同軸コリニアアンテナ(BALSLEY and ECKLUND, 1972)を用いているため、ビーム方向がアンテナ軸に直交する面内に限定されてしまい、CNAの二次元画像を得ることはできなかった。

ROSENBERG等(米国、メリーランド大学)は、64本のクロスダイポールアンテナを8行8列の正方格子に並べ、その各アンテナ出力をバトラーマトリックス(BUTLER and LOWE, 1961)に導くことにより、二次元的に配列する49本のペンシルビームを作り出すことに成功した。彼らはこの二次元CNA画像観測装置(イメージングリオメーター 略称IRIS)を極冠域の南極点基地に設置し、数10 kmスケールのCNA現象の時間発展の様相を明らかにした(DETRICK and ROSENBERG, 1990)。CNA画像観測の基本技術はこれをもって確立されたといえる。

筆者等はROSENBERG等が続いて、イメージングリオメーターの開発に着手した。われわれは、イメージングリオメーターを南極昭和基地とその地磁気共役点であるアイスランドに設置し、CNA画像の南北半球共役観測を行うことを計画した。システムの設計にあたっては、細かい空間スケールで変化するオーロラ帯でのオーロラ観測に対応するため、IRISに比べ高い空間分解能(~ 20 km)が得られるよう考慮した。また、限られた人数でアンテナ建設を行う必要性から、アンテナ構造をできるだけ簡便なものにすることにした。われわれのイメージングリオメーター1号機は極地研のプロジェクトとして1990年、アイスランドに設

置された。翌 1991 年昭和基地用とスピッツベルゲン用イメージングリオメーターがそれぞれ国立極地研究所（極地研）、名古屋大学太陽地球観境研究所（STE 研）のプロジェクトとして製作された。スピッツベルゲンへの設置は STE 研により 1991 年 9 月に行われ、一方昭和基地への設置は第 33 次越冬隊により 1992 年 1 月に行われた。

本論文では、われわれのイメージングリオメーターのシステムデザイン、構成、準備段階での試験観測、アイスランドにおけるシステム設置の概要、アイスランド観測データに基づくシステム性能の評価、観測結果の検討について述べる。

本システムにおいて、アンテナビーム制御、データ記録及び表示はパーソナルコンピューターによる「QL (Quick Look の略) システム」が行っている。システムの効率的な運用を行う上で、QL システムの役割は本質的である。QL システムの詳細は「イメージングリオメーター吸収画像 QL システムの開発」(佐藤ら, 1992) として別途まとめた。

2. システムデザイン及び構成

2.1. 受信周波数

イメージングリオメーターの受信周波数として IRIS では、38.2 MHz が用いられている。リオメーター観測として最も広く使われている 30 MHz に比べ高い周波数が選ばれた理由は、ここが、電波天文観測用に設けられた人工雑音の少ないバンドであることと、アレイアンテナの大きさを小さくしようとするためである。一方周波数が上昇すると、その 2 乗に反比例して、電離層における吸収量は低下する。

われわれは、従来昭和基地及びアイスランドにおいて 30 MHz でのリオメーター観測を行ってきた。これらの観測と直接的に比較し易いことからイメージングリオメーター観測にも 30 MHz を用いることにした。これによりアレイアンテナの占める面積は比較的大きくなるが昭和基地、アイスランドとも 50 m 四方程度の敷地は確保できるので、問題にはならない。また、30 MHz を用いることにより、吸収感度を大きくとれることも利点の一つである。

2.2. アンテナ構造

アレイアンテナの素子として IRIS で用いられているクロスダイポール（ターンスタイルアンテナ）は、方位角方向に一様な放射特性を持つことから、アレイアンテナを構成した場合の素子間相互カップリングに方向性が現れないこと、またビームパターンが軸対称になる等、データを解析する上で方位角方向の一様性が保証される利点がある。

一方、われわれのように、配列方向に平行にダイポールを並べた場合（図 1）、水平面内の指向性はダイポールアンテナの 8 の字特性の影響で、軸対称にならない。また、図 1 においてダイポールアンテナの末端どうしの間隔は南北方向に短く東西方向に長い。このためアンテナ素子間相互カップリングは東西方向に比べ南北方向が大きくなり、水平面の指向性に

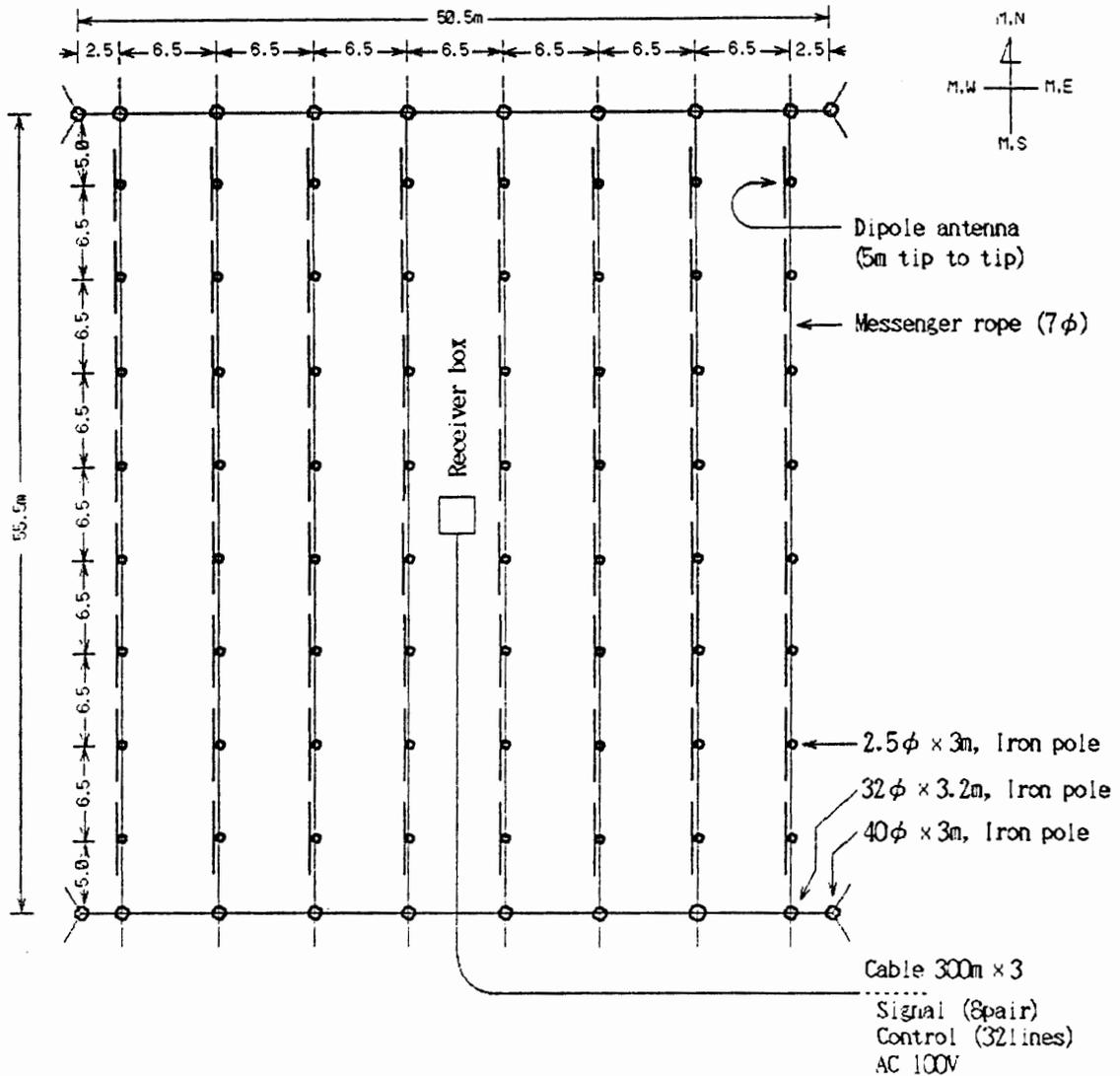


図1 イメージングリオメーターアンテナ配置図
 Fig. 1. A plan of the imaging riometer antenna.

方向性を生じる。いずれにせよ、アンテナビームパターンはビーム中心方向に関し、軸対称にはならない。しかし観測データから CNA 画像を作成するにあたり、あるビームで測定された吸収量はそのビームの中心方向で代表され、ビームパターンの形状そのものは用いられないことを考慮すると、実用上問題ないと考えられる。

一方、図1のようなアンテナ配列にした場合、アンテナ構造及び建設工事を極めて簡単化することができる。すなわち、配列方向にメッセンジャーロープを地上高 $1/4$ 波長程度のところに張り、そこにワイヤーダイポールアンテナを適当な間隔でとりつけるだけで済む(図2)。ワイヤーダイポールアンテナ自身はメッセンジャーロープで支えられるため、アンテナポールは不必要であるが、アンテナの給電点から地上へ下がる給電線をぶらつかせないため、細い支柱が必要になる。結局十分な強度が必要な支柱はメッセンジャーロープを引っ張

る両端の支柱だけとなる。

われわれのシステムの場合、メッセンジャーロープは直径 7 mm のパラフィル線（耐荷重 500 kg）を用い、その両端を支える支柱は肉厚 2 mm 直径 32 mm の溶融亜鉛メッキ鉄パイ

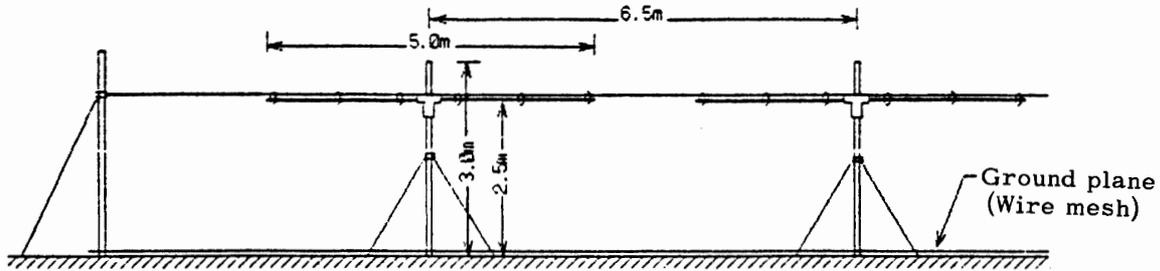


図 2 アレイアンテナを構成するダイポールアンテナの構造
 Fig. 2. Structure of the dipole antenna element of the riometer antenna array.

プとした。またダイポールアンテナの給電線を支える支柱は肉厚 1.5 mm、直径 25 mm の溶融亜鉛メッキ鉄パイプとした。

ワイヤーアンテナは、バラン（平衡、不平衡変換器）としてアマチュア無線用広帯域バラン（サガ電子 BL-40X）を用い、これに、3.2 mm² のテフロン被覆撚り導線をエレメントとしてとりつけた。給電線は 50 Ω 同軸ケーブル 5D-2V を用いた。

2.3. アレイアンテナの素子間隔

アレイアンテナの素子間隔 d は、アンテナの特性を決める重要なパラメーターで、行または列方向の配列数を N とすると、アンテナビームの半値幅は

$$\theta_{HP} = \frac{1}{N(d/\lambda)} \quad (\text{radian}), \tag{1}$$

で与えられる（図 3）。ここに λ は電波の波長である。また、配列に沿った位相勾配（隣接素子間の位相差） $\Delta\Phi$ に対する、ビーム方向の天頂からのずれ角 θ は

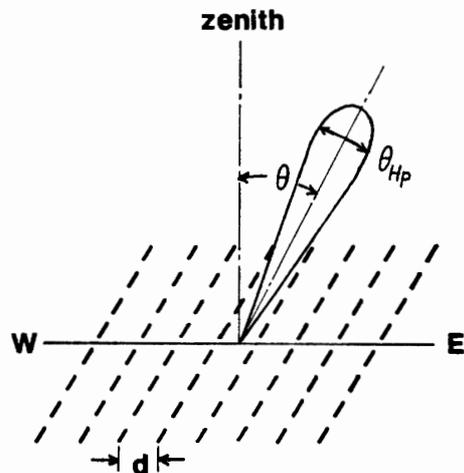


図 3 アレイアンテナのアンテナ配列とビーム方向の関係。 d はアンテナ素子間隔、 θ はビーム中心方向の天頂角、 θ_{HP} はビームの半値幅。

Fig. 3. Schematic illustration of the array antenna and antenna beam direction, where d , θ , θ_{HP} denotes the distance between antenna elements, zenith angle of the antenna beam, and -3 dB beam width, respectively.

$$\frac{\sin \theta}{\Delta \Phi} = \frac{1}{2\pi(d/\lambda)}, \quad (2)$$

で与えられる。

式 (1) より, アンテナ間隔 d を増大させるとビーム幅が狭くなることがわかる。また式 (2) より, d を減少させるとアンテナビームの空間的広がりが大きくなることがわかる。つまり, 観測視野を広げるには d を小さくすればよい。

図 4 に d/λ が 0.5 と 0.65 の場合の 8 行 8 列アレイのビームパターンを示す。図 4 a はアンテナビームの -3 dB の広がりを電離層吸収層高度 90 km に投影したもので, 図 4 b は天頂角で極座標表示したものであり, 図中の点線は仰角 30° を示す。 $d/\lambda=0.65$ の場合, ほとんどのアンテナビームは天頂を中心とする 200 km 四方の範囲に入り, オーロラ全天カメラ等に比べると狭い視野になるが, 空間分解能としては約 20 km が確保できる。これは IRIS システムの空間分解能 (約 30 km) よりも高い。一方, $d/\lambda=0.5$ の場合, 観測視野は 400 km 四方以上に広がるが, 天頂付近のビームに比べ, 視野周辺部のアンテナビームは著しく拡散し, これらのビームにより観測された吸収量に大きな補正が必要となる。また, 天頂付近の空間分解能は 25 km 程度あるが, 視野周辺部では 60 km 程度になる。

オーロラ帯では, 渦構造のオーロラ, 幅の狭いアーク, 点滅型オーロラパッチ等, 細かい空間構造が多く見られるので, $d/\lambda=0.5$ のような低い空間分解では不十分といえる。またもう一つ, $d/\lambda=0.5$ 程度では不都合な点がある。ダイポールアンテナを配列方向に並べるわれわれのアンテナシステムでは, $d/\lambda=0.5$ 以下にすると隣接アンテナの導体が接触してしまうことである。

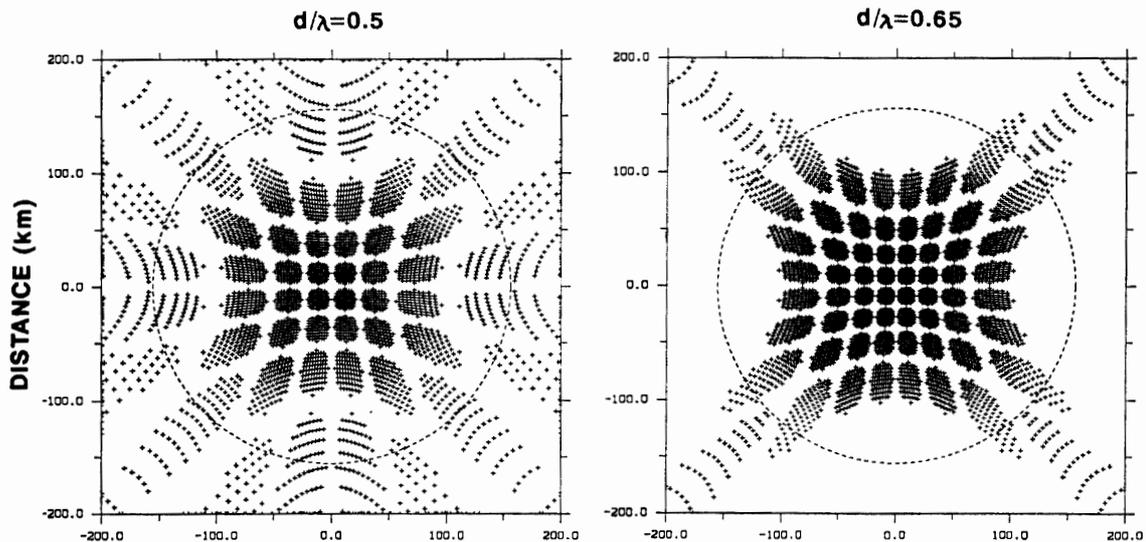


図 4a 8 行 8 列アレイアンテナのビームの電離層吸収層高度 (90 km) への投影。アンテナ間隔 0.5 波長の場合 (左) と 0.65 波長の場合 (右)。
 Fig. 4a. Projection of antenna beams of an 8 by 8 dipole array at the ionospheric absorption layer altitude of 90 km for 0.65 wavelength (right).

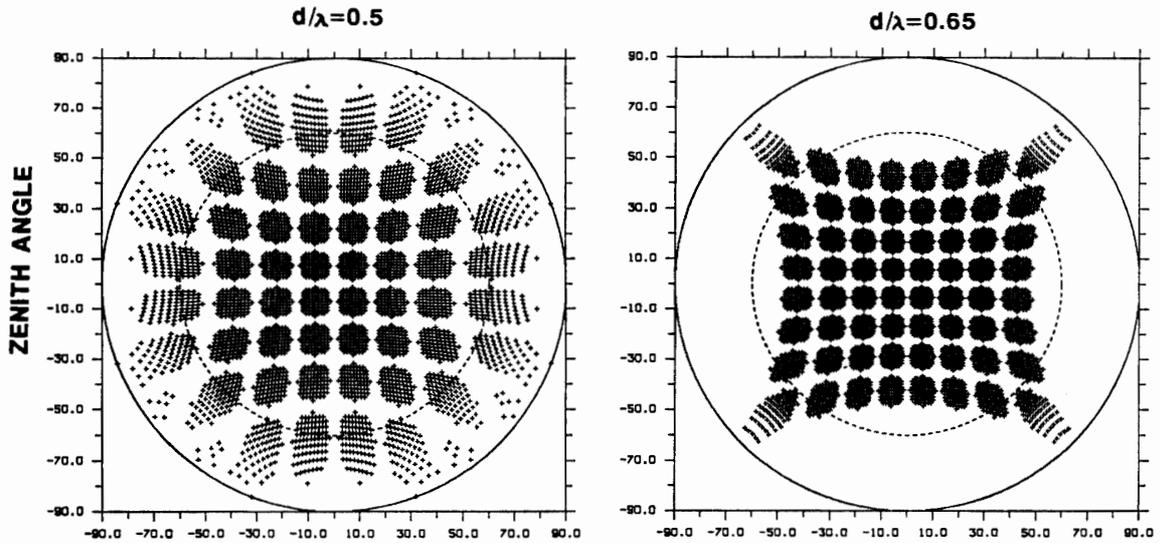


図 4b アンテナのビーム方向を天頂角について極座標表示したもの。アンテナ間隔 0.5 波長の場合 (左) と 0.65 波長の場合 (右)。
 Fig. 4b. Polar plot of antenna beams direction for antenna grid distance of 0.5 wavelength (left) and 0.65 wavelength (right).

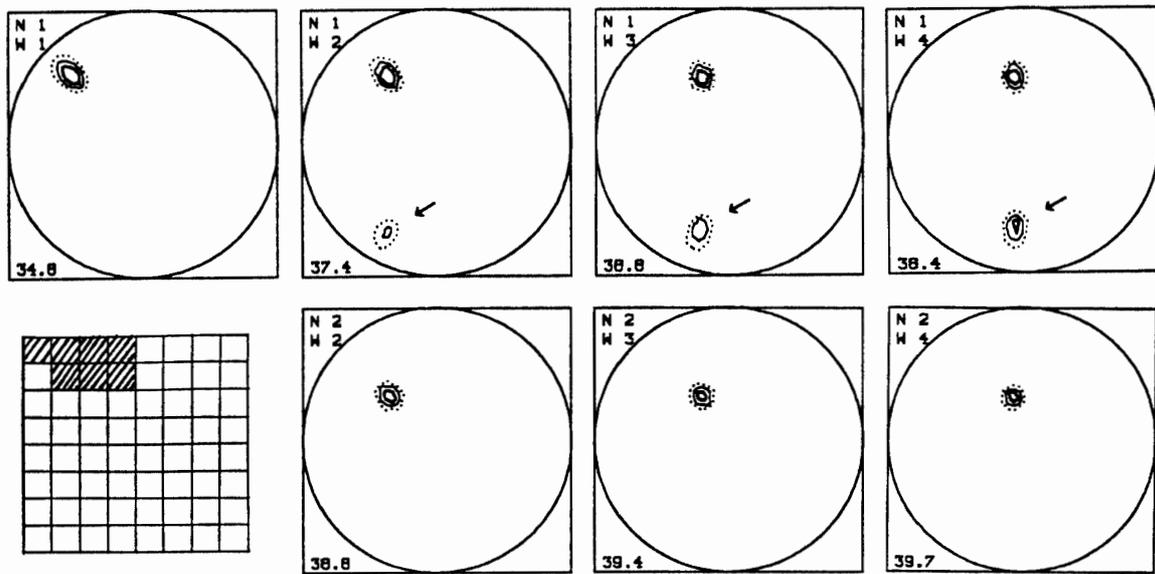


図 5 イメージングリオメーターの視野周辺ビーム 7 本 (左下図で斜線で示されるビーム) について、指向特性を等高線表示したもの ($d/\lambda=0.65$)。等高線の値はメインビームのピーク値から -3 dB (太実線), -6 dB (細実線), -10 dB (点線) である。視野の隅を除く、最外周ビームでは、グレーティングローブ (矢印) が生じていることがわかる。
 Fig. 5. Contour display of the directivity pattern for 7 antenna beams near the edge of the view field, shown as hatched area in the antenna beam diagram in the bottom left corner. Grating robes shown by arrows are found for outermost three beams.

一方、 d/λ を 0.5 より大きくした場合、グレーティングローブの発生が問題になる。図 5 は、 $d/\lambda=0.65$ の場合について、視野周辺ビーム 7 本 (左下図で斜線で示されるビーム) の

指向特性を極座標系で等高線表示したものである。等高線の値はメインビームのピーク値から -3 dB (太実線), -6 dB (細実線), -10 dB (点線) をそれぞれ示したもので、視野周辺のビームでは視野の反対方向にグレーティングローブを生じることがわかる。一方, $d/\lambda=0.5$ の場合, 理論上グレーティングローブを生じない。

結局われわれは、空間分解能に重点を置き、アンテナ素子間隔として $d/\lambda=0.65$ を選択した。この場合、上記のとおり、グレーティングローブの発生は不可避であり、データ解析の際にグレーティングローブの影響を見誤らないよう、注意が必要である。

2.4 位相マトリクス

IRIS システムでは、天頂方向のビームを形成するため、バトラーマトリクス (BUTLER and LOWE, 1961) に変更を加え、8 行 8 列アンテナにより 7 行 7 列のアンテナビームを形成する位相マトリクスを構成した (DETRICK and ROSENBERG, 1990)。われわれは、BUTLER and LOWE (1961) の基本的デザインを踏襲し、8 入力 8 出力バトラーマトリクスを基本ユニットとして基板化した。この基板は Dual Inline Package に納められた 90° ハイブリッド (R & K 社製, PDQ-4-8P) 12 個と、同軸線による遅延線から構成される (図 6)。この基板を 8 並列, 2 直列, 合計 16 枚用いることにより 64 入力 64 出力の位相マトリクスが構成される。出力の各端子は図 3 に示すアンテナビームのそれぞれに対応する。

2.5. 受信器

位相マトリクス出力は 64 端子あり、同時に 64 本のペンシルビームが形成されている。そこでこれらの端子にそれぞれ受信器を接続すれば、最大の時間分解能が得られることになるが、64 台の受信器を作ることは経済的ではない。一方、受信器を 1 台だけ用意し、これらの端子に順次切り替え接続すれば最も経済的ではあるが、システムの時間応答が悪くなる。そこで、われわれは両者の中間をとり 8 台の受信器を用意し、これを南北一列のアンテナビームに接続し、東西 8 列のビームに順次、切り替え接続することにした。切り替えは位相マトリクス本体に組み込まれた 8 系列 8 回路のピンダイオードスイッチにより行い、3 bit の制御信号でコントロールした。

受信器はアイランドシステムでは La Jolla Science 社のリオメーターを用いたが、これは安定度に優れているが、高価であることと、時間応答が遅い (約 4 Hz) ため、昭和基地、スピッツベルゲンシステムでは、加藤の設計によるシングルコンバージョン型二乗検波受信器を制作し、使用した。後者は回路方式が簡単で比較的経済的に作製でき、時間応答を十分速く (数 10 Hz) することができるが、当初の回路方式では温度安定性が十分でなかった。6 章で述べるように、リオメーター観測では静穏時曲線を数十日間の観測データから実験的に求める必要があり、この間、受信器の入出力特性は約 0.1 dB 以内の安定度を保つ必要がある。そこで、われわれは温度補償回路を組み込むことにより、実用上問題無い温度安定性を

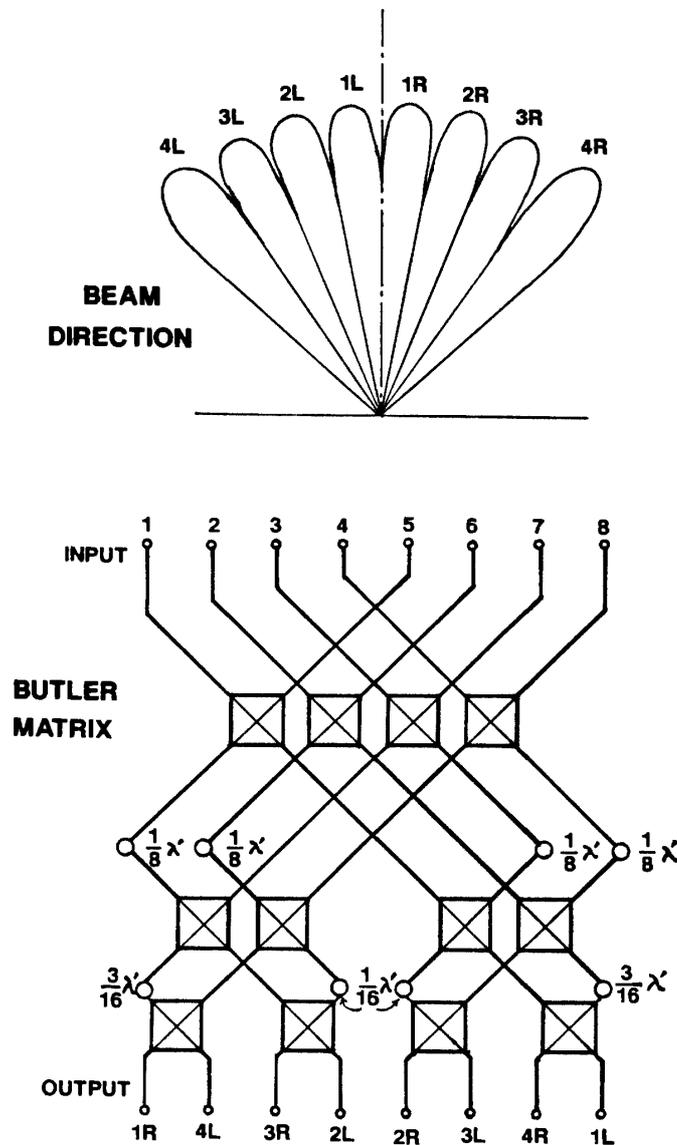


図 6 8入力 8出力 バトラーマトリクスの構成. 遅延線 (図中○印) の長さは同軸線内波長 λ' (自由空間波長に比べ約 67% に短縮される) で示す. 出力ポートの名称は, アンテナビームがアレイ正面方向の右側 (R) または左側 (L) の何番目のビームであるかを示す (ビーム方向の略図参照).
 Fig. 6. Diagram of the 8-input, 8-output Butler matrix. Length of the delay lines marked by open circles is expressed by the wavelength in coaxial cable, λ' . Each name of the output port corresponds to the beam number (see schematic illustration of the beam directions).

得ることができた. 受信帯域はいずれの受信器も $30.0 \text{ MHz} \pm 100 \text{ kHz}$ を用いている.

2.6. 受信系収納保温箱

アレイアンテナを構成するためには位相マトリクスをアンテナ敷地の中央に設置する必要がある. また, 受信器も信号強度の損失を避けるためアンテナ敷地にできるだけ近い位置に設置することが望ましい. そこでわれわれはアンテナ敷地の中央に位相マトリクスと受信器

を収納する保温箱を設置した。この保温箱は内寸が 80 cm×80 cm×80 cm あり、厚さ 10 cm の断熱材（グラスウール）にとり囲まれる。内部には温度コントロール付きヒーター（出力 120, 180, 300 W 切替）があり、観測室から AC 100 V を供給して動作させる。保温箱への信号ケーブルの出入りは防水、保温に留意する必要がある。われわれは、保温箱外側に防水フードを取り付け、その中に端子板を設け、端子板の裏側から中継ケーブルを断熱材を貫通させて保温箱内部へ導き、内部の機器と接続した。この保温箱は、極地域で使用する場合外気温にかかわらず、内部は 10°C 前後に保つことができる。日本国内で夏季に屋外試験を行うときは、ヒーターを切っても保温箱の温度が 30°C 以上に上ってしまうため、小型換気扇により外気を導入し、過度の温度上昇を防いでいる。

3. 豊川におけるアンテナ調整及び試験観測

イメージングリオメーター用アレイアンテナの素子であるダイポールアンテナには、フェライトコアを用いた三巻式オートトランス型バランがとりつけられており、公称 50 Ω 出力となっているが、アレイアンテナを組んだ場合、素子間の相互結合により、給電線から見たアンテナインピーダンスは整合値 (50 Ω) からずれる。また、イメージングリオメーターアンテナでは多数のアンテナビーム方向を作り出すため、各アンテナ素子に一定の位相差で給電が行われる。この場合、素子間相互結合状況はビーム方向により異なり、従って、アンテナインピーダンスの整合値からのずれもビーム方向ごとに異なってくる。そこで、われわれは観測視野の中心を占める天頂方向ビームに対して、最も整合条件が満たされるようにアンテナのインピーダンス調整を行うことにした。天頂方向ビームは全アンテナが同相で給電される場合に相当する。

インピーダンス調整は以下の手順で行う。64 本のアンテナすべてに給電することは、信号源の分配回路が複雑になるので、16 本 (4 行 4 列) の縮小配列で実験を行う。16 本のアンテナ素子を受信周波数 (30.0 MHz) で同相で励振し、中央部のアンテナ給電線について、ネットワークアナライザーを用いて反射波の強さの度合いを示す VSWR (電圧定在波比) を測定する。VSWR が最小となるようこの給電線にスタブ (T 型に分岐した短い同軸線) を取り付ける。スタブの取り付け位置、長さは、スミス線図で VSWR の変化状況を見ながら試行錯誤的に最適値を決める。このようにして求められたスタブの取り付け位置、長さにしたがって、すべての給電線にスタブを取り付ける。

この作業を行うためには、一度屋外でアレイアンテナを実際の設置条件どおりに展開する必要があり、図 1 に示されるような広い敷地が必要になる。われわれは豊川市の名古屋大学 STE 研究所敷地内に、アレイアンテナの全素子を実際どおりに建設し、上記のインピーダンス調整作業を行った。大地上のアンテナの放射特性は、大地の反射率の変化により影響を受ける。これを抑えるには、地上に導電体によるグランドプレーン (金属網等) を張り、反射

率を一定に保つことが必要である。しかし 50 m 四方にわたり、良好な反射率をもつグランドプレーンを張ることは容易ではなく、豊川の実験ではグランドプレーン無しでインピーダンス調整を行った。

インピーダンス調整後、アレイアンテナに位相マトリックス、受信器、QL システムを接続し、システム全体の総合試験を兼ね銀河電波の試験観測を行った。工場地帯である豊川市の電磁環境は必ずしも良好ではなかったが、夜間は、銀河電波源の空間構造を反映した受信信号強度の日変化曲線が得られた。5 章で後述する銀河雑音マップを用いたアンテナ指向性の確認法により、アンテナの指向特性がほぼ設計どおり実現されていることが確認された。

4. アイスランドにおけるアンテナ建設

われわれのイメージングリオメーターは、すでに 3 システムが北極及び南極域に設置されている。本システムを観測現場に設置する際の問題点は、観測点固有のものが多い。例えば、アンテナ敷地の状態（岩盤、湿地、雪面等）、電源の供給、気象条件等である。ここではアイスランドシステムを例にとり、アンテナ建設の実際と運用について概要を述べる。

1990 年 7 月、山岸、西野はアイスランド大学理学部 T. H. サエムンドソン教授の支援の下、フサビーク近郊のチョルネス地区マナバキの牧草地（A. アイギルソン氏所有）にイメージングリオメーターアンテナを建設した。アンテナ敷地は夏季に一部が湿地となる平坦な草地で、海岸から 200 m の地点である。アンテナの敷地は図 1 で示したとおり、50 m×60 m を占め、水平測量の結果この敷地内での土地の高低差は、海側へ向け 1 m 低下していることがわかった。アンテナエレメントは地上高 2.5 m (1/4 波長) に調整した。これによりアンテナエレメントの面は水平より約 1° 傾斜することになり、形成されるアンテナビームも全体に 1°、海側へ傾くことになった。地上にはダイポールエレメントに平行に 65 cm 間隔で直径 1.5 mm の軟銅線を張り、グランドプレーンとした。グランドプレーンのリアクタンスは

$$X_s = 377 \frac{b}{\lambda} \ln \left(\frac{b}{2\pi a} \right), \quad (3)$$

で与えられる。ここに λ は電磁波長、 b は銅線の間隔、 a は銅線の半径であり、上記の値を代入すると $X_s = 121 (\Omega)$ となる。これによる 30 MHz 電磁波の反射率は

$$R = \frac{1}{1 + 2(X_s/377)} = 0.61, \quad (4)$$

となり、61% である。

アンテナ敷地の中央部に 8 台のリオメーターとバトラーマトリックスを収納する保温箱を設置し、リオメーター出力信号及びアンテナビーム切り替え信号はそれぞれ 8 組のツイストペア及び 32 芯のケーブル 300 m により、観測室（アイギルソン氏宅の一室）へ導いた。

アンテナ敷地は牛の放牧地であり、牛がケーブルやアンテナに損傷を与えないよう、アンテナ敷地周囲を地上高 1.5 m の金網（メッシュサイズ 10 cm 程度）で囲った。

観測室では、パーソナルコンピューター 2 台と光磁気ディスク装置からなる QL システムが稼動し、データの連続記録を行うとともに、吸収画像をリアルタイムで表示することができるようになっている。観測データは光磁気ディスクの片面に 100 日余り記録することができるが、データを早期に解析できるようにするため、2 週間ごとに光磁気ディスクを交換し、記録済みディスクを日本に郵送している。現地の運用は、アイスランド大学理学部サエムンドソン教授を通じ、この牧草地の所有者であるアイギルソン氏に委託している。

5. 銀河電波によるビーム指向性の確認

30 MHz 電波は、波長が 10 m と長いため、アンテナの指向性を実験的に確認するにはアンテナから数 100 m 以上離れた場所で信号源を動かし、ビームパターンを測定する必要がある。特にアンテナビームの指向性が上方に向いている場合は、信号源を載せた飛行機等をアンテナ上空に飛ばし、測定する必要がある。これは大がかりな実験になるため、実施は容

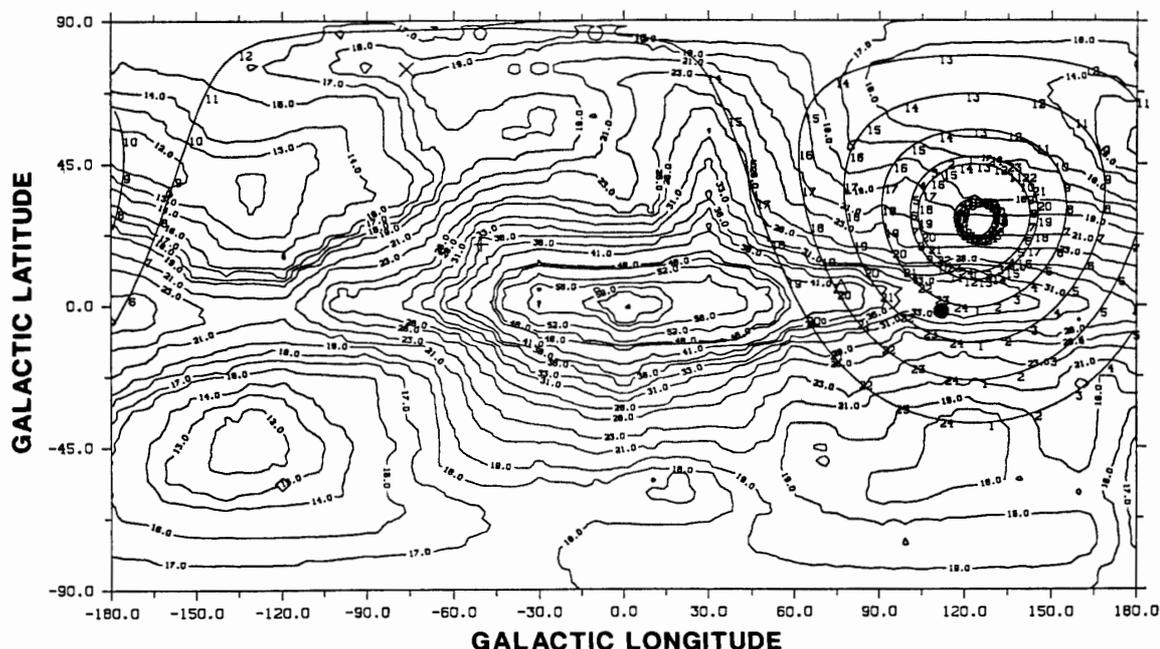


図 7 銀河座標で表示された 30 MHz における銀河雑音電波強度の全天マップ (CANE, 1978 による)。図中の曲線はアイスランド、チョルネスのイメージングリオメーターの子午面に沿う 8 本のアンテナビーム方向が一日の間に描く軌跡であり、曲線に沿う数字はグリニッチ恒星時を示す。

Fig. 7. All-sky map of the galactic radio noise intensity at 30 MHz displayed in the galactic coordinate (after CANE, 1978). Concentric circles in the figure are traces of meridian antenna beam directions of the imaging riometer at Tjornes, Iceland. The numbers along the traces show Greenwich sidereal time.

易ではない(われわれは1991年9月アイスランドで実際に飛行機を飛ばして指向性の実測を行った。結果については別の機会に紹介する)。簡単に行える信頼性の高い方法として、銀河電波の背景雑音分布図を用いる方法がある(DETTRICK and ROSENBERG, 1990)。この方法は、アンテナビーム方向を銀河雑音分布図上に投影し、地球の自転により、投影点が移動する軌跡を求める。この軌跡に沿った銀河電波強度の変化を読み取り、時間の関数としてプロットすると、これは、このアンテナビームにより受信される銀河電波強度の日変化曲線と一致するはずである。銀河雑音分布図は30 MHzにおけるものがCANE (1978)により得られているので、これをデジタル化して用いた。図7は、銀河座標系により直交座標表示した30 MHz帯の銀河雑音分布図である。図中の曲線はアイスランドイメージングリオメーターの、磁気子午面に沿うアンテナビーム(8本)の中心方向を銀河雑音分布図上に投影し、地球自転に

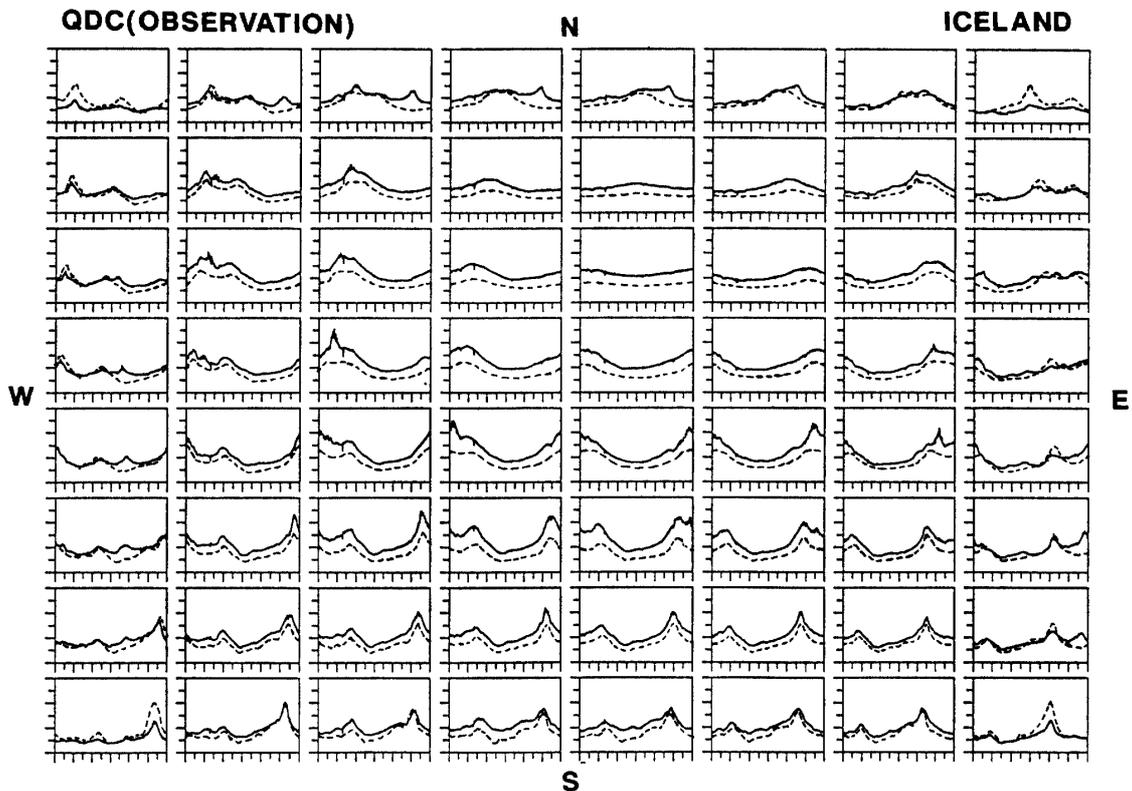


図8 点線: 銀河雑音電波強度全天マップ(図7)から得られた、イメージングリオメーターの各アンテナビーム出力日変化の予測値。実線: アイスランドのイメージングリオメーターにより観測された、各アンテナビーム出力の日変化。横軸はグリニッチ恒星時を示し、たて軸はビーム出力相対強度を示す。

Fig. 8. (Broken line) Daily variation of the galactic noise intensity to be observed by the 64 antenna beams of the imaging riometer in Iceland as predicted from the all-sky map of the galactic noise intensity shown in Fig. 7. (Solid line) Daily variation of the galactic noise intensity observed by the 64 antenna beams of the imaging riometer in Iceland. Abscissa shows Greenwich sidereal time, and ordinate shows relative noise intensity.

より投影点が動く軌跡を示したものである。軌跡に沿った数字は GST (グリニッジ恒星時) を示す。

同心円状に並ぶ 8 本の軌跡のうち、最も外側のものは、磁南方向の仰角 40° のビームに相当し、最も中心部の円は、北極星に最も近い磁北方向、仰角 73° のビームに相当する。同心円の中心は北極星である。このような軌跡を全 64 ビームについて求めることができ、これらの軌跡に沿った銀河電波雑音強度を時間の関数として図 8 の点線で表示する。図中 64 コマのグラフは、64 本のアンテナビームにそれぞれ対応しており、上方のコマは北向きのビームを、下方のコマは南向きのビームを、また右方のコマは東向きのビームをそれぞれ示す。

図中上から三行目、左から 5 列目のビームはほぼ北極星の方向を向いているため、強度の日変化がほとんど見られない。図中、6 から 8 行目のビーム (南寄りビーム) は、図 7 でも明らかなように、一日に 2 回銀河ディスクを横切るため、その日変化は 1 日に 2 回のピークを示す。このように銀河雑音分布図を用い各アンテナが受信する銀河電波強度の予想日変化が得られたが、実際のアイスランド、イメージングリオメーター観測結果を同様の形式で図 8 に実線として表示する。一見して、予測値 (点線) と実測値 (実線) は極めて相似形であることがわかるが、これは、アンテナビームの方向が、設計どおりの方向を向いていることを示している。しかし、両者を詳しく見比べると合わない箇所が見出される。図 9 に特徴的なもの 6 コマ (a)~(f) を抽出して表示する。銀河雑音分布図による予想日変化と実測日変化を上下に並べて比較し、その上部に該当ビーム方向を 8×8 格子上的黒点として示した。(a) 及び (c) は予測値と実測値がよく一致している例である。(b) は南東隅のビームの例であり、予測値と実測値がよく似ているが、実測値のレベルが他のビームに比べ低くなっている。これは視野の隅のビームは計算によれば天頂付近のビームに比べ約 4 dB 利得が低い上、低仰角 (24°) のため、吸収層内の伝播路長が長くなり、吸収をより多く受けるためと考えられる。(d) は天頂西寄りのビームの例であり、予測値と実測値はおおむね一致しているが、観測値の 03 GST 付近に、予測値では見られないバースト状のレベル上昇が起こっている。この時刻のアンテナビーム位置を銀河雑音分布図上に投影すると、全天で最も強い電波星カシオペア A (図 7 の黒丸) に重なるため、このバーストは電波星の電波を受信したものと考えられる。

(e) 及び (f) は視野周辺のビームであり、互いに東西の線に対して対称な位置を占めるビームである。計算上、両者ともグレーティングローブが発生し、その位置はほぼ東西の線に対して対称の方向にできる (厳密には主ビームの仰角は 36° で、グレーティングローブの仰角は 22.5° である) ので、両者は互いにグレーティングローブの関係になっているといえる。そこで (e) を詳しく見ると、観測値の矢印 A のところに、予測値では見られないピークが見られる。一方、ほぼグレーティングローブの方向に相当する (f) では、同時刻に矢印 a で示す大きなピークが存在する。そこで矢印 A のピークはグレーティングローブにより受信

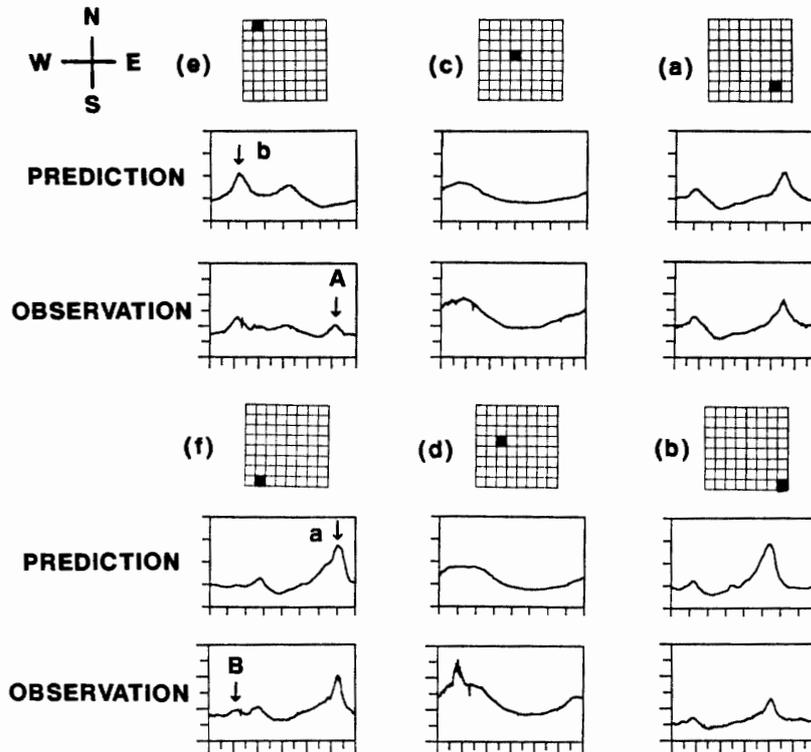


図 9 64本のビームより、視野の中心及び周辺部の6本を選び、銀河雑音マップによる予測値とイメージングリオメーターによる実測値とを比較したもの。アンテナビーム方向は8行8列格子上の黒点として示した。(a),(b)は視野周辺部の,(c)は視野中心部の、それぞれ予測値と実測値がよく一致する例を示す。(d)は実測値に銀河雑音マップでは表現されていない電波星(カシオペア A)の影響が現われている例。(e),(f)は実測値にグレーティングローブの影響が現れている例。

Fig. 9. Comparison of the quiet day curves predicted by the galactic radio noise map and the actual observation. Seven beams are selected out of 64 antenna beams. The antenna beam directions are shown by the black spot in the 8 by 8 grid. Figures (a) to (c) are examples showing good similarity between the prediction and the observation. The effect of the radio star is found in the observational data in figure (d). Effects of the grating lobes are recognized in the observational data in figures (e) and (f) as arrows A and B, which are related to the noise intensity peaks a and b in the opposite beam directions.

された信号と考えられる。同様に (f) の矢印 B は (e) の矢印 b に相当する信号をグレーティングローブが受信したものと考えられる。

6. 吸収の表示方法

6.1. 銀河背景雑音の決定

リオメーター観測では、降下粒子現象により電離圏 D 層 (高度 75~95 km, 付近) での電離度が上昇し、銀河電波の吸収量が増大することを測定するものであり、吸収量を求めるた

めには、静穏時（降下粒子現象が無い時）の銀河背景雑音強度の日変化（Quiet Day Curve, 略して QDC）を知っておく必要がある。QDC の求め方は通常数週間にわたる観測データを恒星時に関して重ね合わせ（1 日あたり約 4 分ずらして重ね合わせ）、その包絡線をとることにより求めている。図 10 はアイスランド、チョルネスのイメージングリオメーターの南から 2 列目、西から 3 列目のビームについて、1990 年 8 月 8 日から 19 日間のデータを重ね合わせたものである。吸収現象が頻発する時間帯（04~11 時）ではデータのばらつきが見られるが、それ以外のデータはよく重なり合っていることがわかる。包絡線を求める方法として KRISHNASWAMY *et al.* (1985) は、ある時刻における観測値のばらつきのヒストグラムを求め、その上側の変曲点を静穏時レベルとすることを提唱している。われわれの QL システムではこの方法を用いているが（佐藤ら, 1992）、ここでは簡便法として、ある時刻における 19 日間の観測値を大きい順に並べ、上から 5 番目付近を静穏時レベルとした例を示す

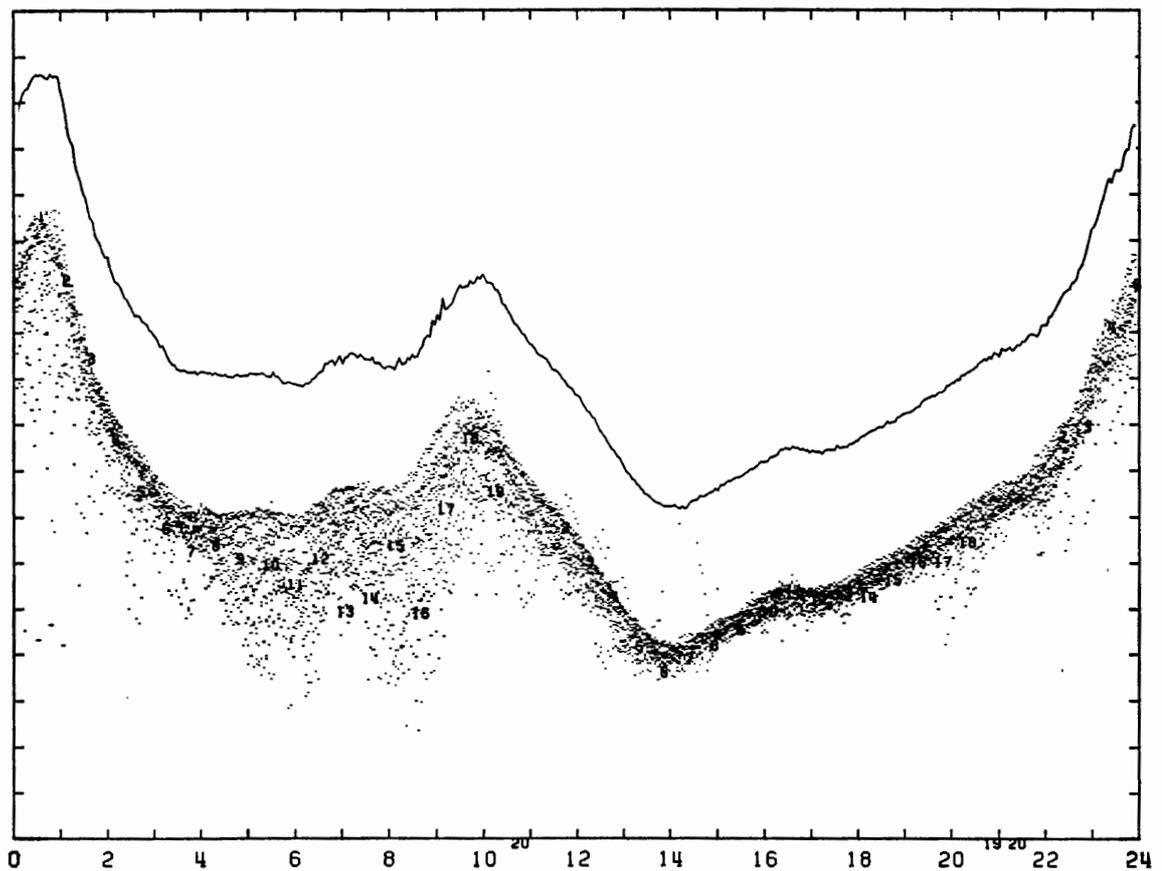


図 10 イメージングリオメーターの特定ビームについて、19 日分のデータを恒星時について重ね合わせたもの。吸収現象が頻発する時間帯（04~11 UT）ではデータのばらつきが見られるが、それ以外のデータはよく重なり合う。上段の曲線はこれらのデータの包絡線として求めた静穏時曲線である。

Fig. 10. Scatter plot of the 19 days of the riometer outputs for a certain beam. The upper curve is the quiet day curve obtained as the envelope of the scatter plot.

(図 10 上部の実線). 上から何番目を採用するかについては, 外来雑音と吸収現象の影響が最も少ない曲線となるように求めるが, 経験的に重ね合わせる日数の $1/3 \sim 1/4$ の程度の値が適当である. このようにして 64 本のアンテナビームについて QDC を求めたものが, 前出の図 8 (点線) である.

6.2. 吸収量の算出

図 11 は 1990 年 8 月 16 日 06-12 時 UT, チョルネスで観測された吸収現象時の, 各アンテナビーム受信出力 (細線) に QDC (太線) を重ね合わせたものである.

ビーム幅 60° 程度の広いアンテナビームによる標準リオメーター観測では, 銀河電波の空間構造 (図 7) が平均化され, 非常にゆるやかな QDC が得られる. そのため, 標準リオメーター観測では吸収現象前後の信号レベルを直線補間することにより, 背景雑音レベルを推定することができた. 一方, イメージングリオメーターでは, アンテナビームの指向性が鋭いため, 銀河電波の空間構造がそのまま反映され, ビーム方向により QDC の形態が著しく異なる. 従って, イメージングリオメーター観測では各アンテナビームごとの QDC を正確

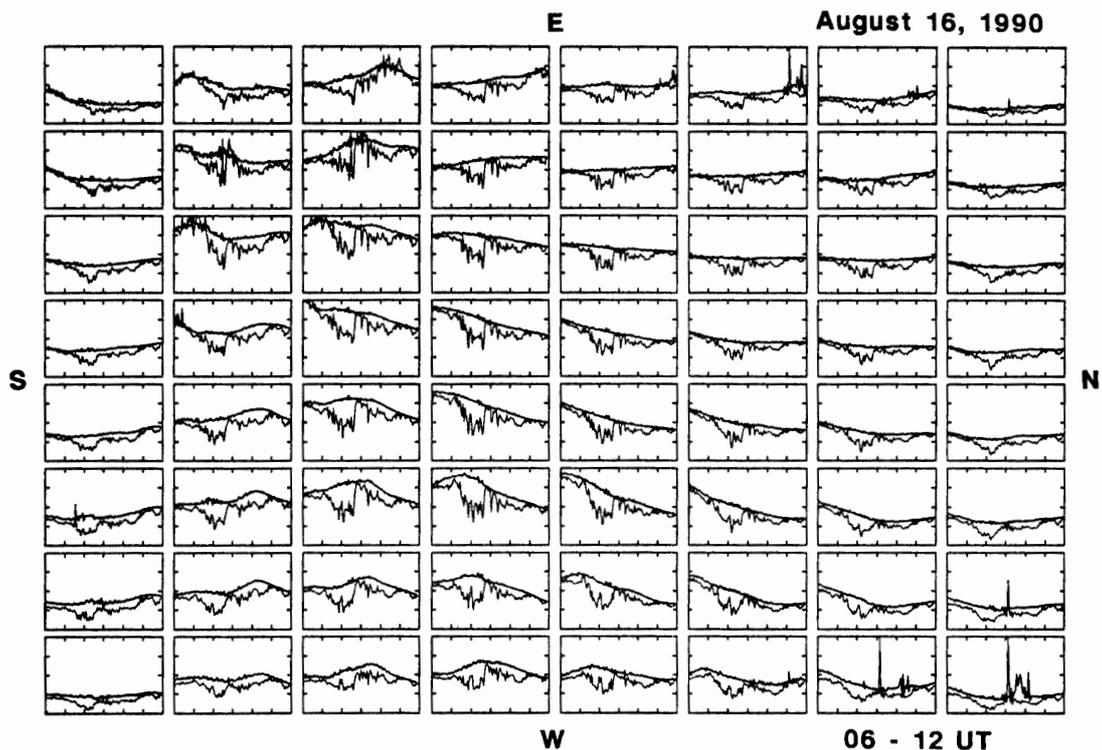


図 11 イメージングリオメーターの 64 本のアンテナビームによりそれぞれ受信された, 吸収現象時の受信出力 (細線) に, それぞれのビームに対する静穏時曲線 (太線) を重ねたもの. 静穏時曲線はアンテナビームごとに大きく異なっている.

Fig. 11. 64 antenna beam outputs of the imaging riometer at the time of an absorption event (thin lines), overlaid with the quiet day curves (thick lines). Note that the quiet day curves are very different for each beam direction.

に求めておかないと、吸収量が決定できないことがわかる。図 12 は、図 11 に示された受信器出力と QDC を用いて、吸収量を dB 値で求め表示したものである。図 11 では、視野の周辺ビーム、特に四隅のビーム出力が低くなっている。これは、視野周辺ビームではアンテナ利得が低くなっていることと、低仰角のため、吸収層中での電波の光路長が長くなり、銀河電波の減衰が大きくなるためである。

このような特性のため、図 11 では見かけ上中心部のビームの吸収量が大きいように感じられるが、図 12 に示される実際の吸収量では、むしろ視野周辺ビームの方が大きくなっていることがわかる。従って、イメージングリオメーター観測では、受信器出力波形で吸収現象を判断すべきではなく、正味の吸収量に変換して判断しなければならない。

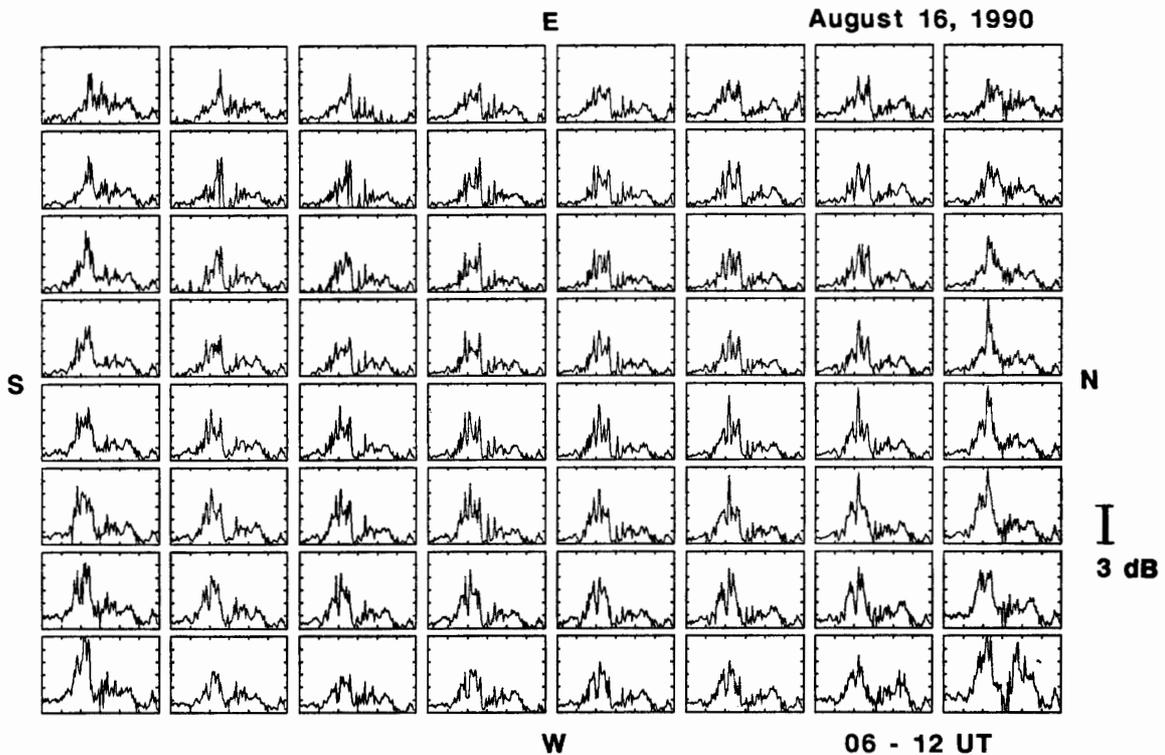


図 12 図 11 の受信出力と静穏時曲線を用いて計算した正味の吸収量。図 11 の見かけの吸収と異なり、視野周辺部のビームで吸収量が大きくなっていることがわかる。

Fig. 12. Plot of the net absorptions calculated from the riometer outputs and the quiet day curves shown in Fig. 10. Note that the absorption intensity is relatively high for outer beams, which is contrary to the apparent absorption in Fig. 10 where central beams show a large deflection of signal intensities.

6.3. 画像表示

前項で述べたように、視野周辺ビームでは、低仰角による吸収層中の光路長の伸びのため、吸収量が大きくなる。また、低仰角ビームではメインローブに比べサイドローブが相対的に

大きくなり、メインローブ方向に吸収があっても、サイドローブから受信される電波の影響で吸収が小さく見積もられる効果がある。前者はアンテナビームの天頂角を ζ とすると、 $\cos \zeta$ に反比例する。後者は、アンテナ指向性パターンを正確に測定しない限り、定量的な評価ができないが、前者を弱める方向に働く。そこで実用上は、PCA (Polar Cap Absorption, 太陽フレアや磁気嵐時の高エネルギープロトンによる極冠域吸収) のような空間的に均一と思われる吸収現象に対し、各アンテナビームによる吸収量が同一になるように、アンテナビームごとの補正係数を決めることになる。現在われわれは暫定時に $1/\cos(0.67\zeta)$ を用いている。このようにして 8×8 個の吸収値がアイスランドシステムの場合 4 秒ごとに、昭和基地及びスピッツベルゲンシステムでは最大 1 秒ごとに得られることになる。これを等高線プログラムを用い、グレイスケール表示をすることにより、時々刻々の吸収画像の変化が得られることになる。図 13 は、図 12 に示された吸収現象について 07-08 UT 間の吸収画像を 1 コマ 32 秒で表示したものである。なお表示は図 4b と同じく、天頂角に関する極座標表示で、上下が磁東、磁西の天頂角 45° 、左右が磁北、磁南の天頂角 45° に対応する。

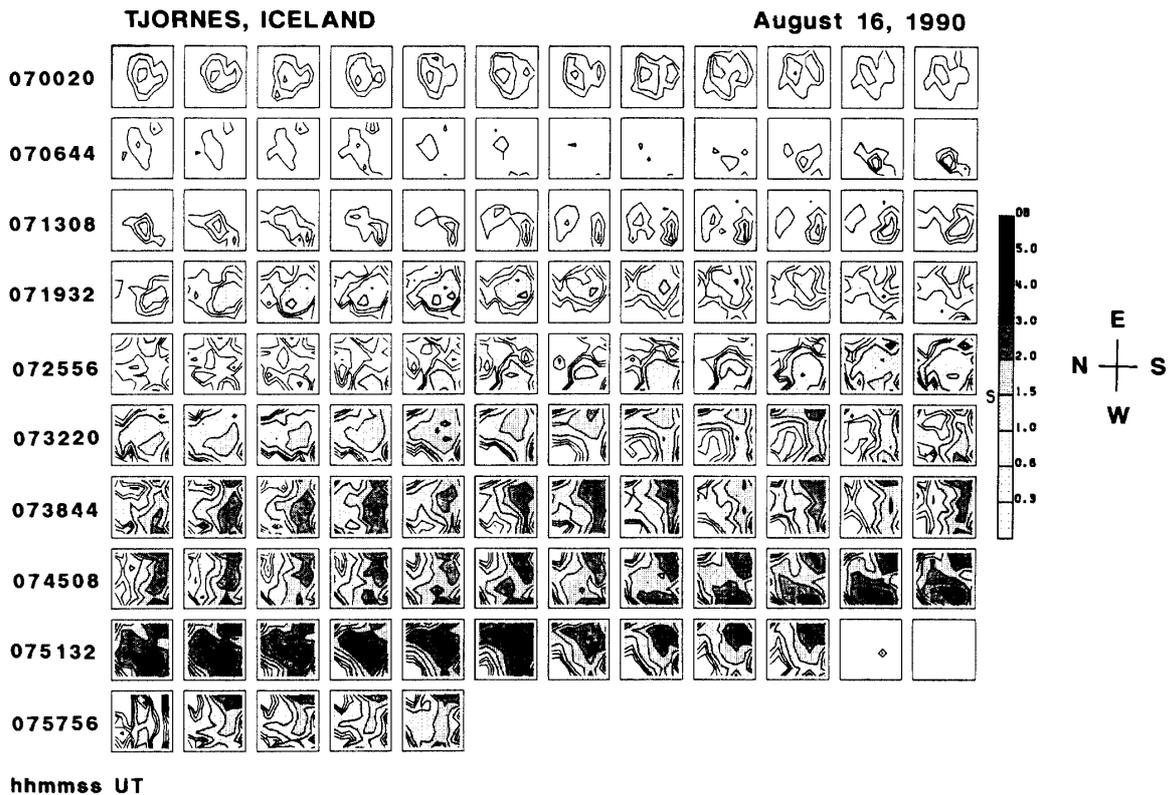


図 13 図 11, 図 12 の吸収現象の 07-08 UT の間を 1 コマ 32 秒で吸収画像表示したもの。1 コマの表示範囲は天頂角 $\pm 45^\circ$ の正方形であり、吸収高度にて 180 km 四方に相当する。

Fig. 13. Time series of the absorption images at 32 s interval for the absorption event of 07-08 UT shown in Figs. 11 and 12. The view field of the image corresponds to the zenith angle of $\pm 45^\circ$, which is a square area of 180 km by 180 km at the absorption layer altitude of 90 km.

図より、吸収領域には細かい空間構造が見られること、1 dB 以下で始まった吸収現象が増減をくり返しつつ最大 4 dB まで強まってゆくこと、西から東への吸収領域の移動が見られること等が認められる。この表示方法は、吸収領域の形態の変化を追跡するには最適であるが、吸収領域の移動を見るには必ずしも適当ではない。後者の目的には、アンテナビームのうち、東西または南北の一系列をとりだし、その吸収の時間変動グラフを一系列に並べて表示すると良い (図 14)。図 14 上段では、0720 UT 以後、吸収領域が西から東へくり返し移動してゆく様子が明瞭に認められる。

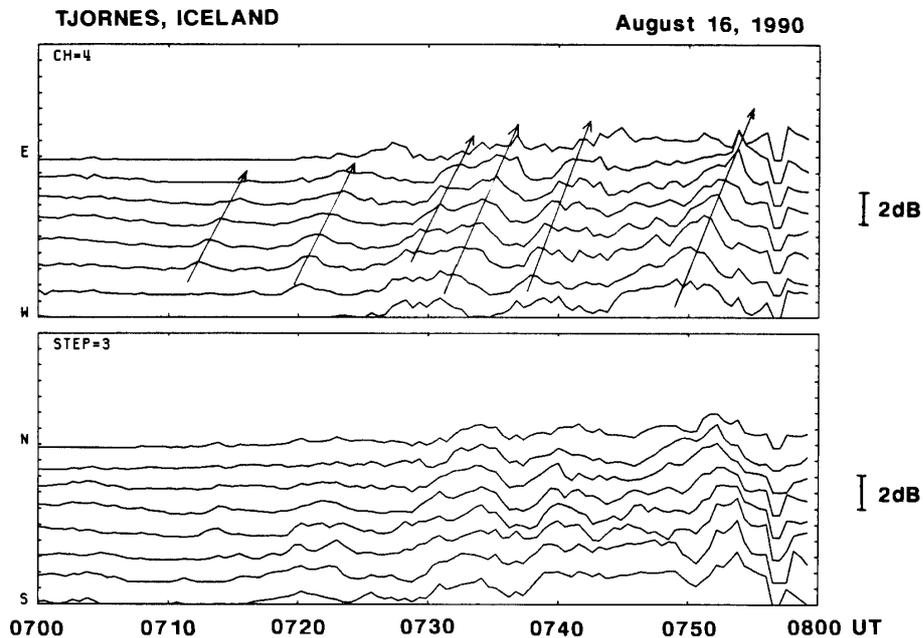


図 14 アンテナビーム一系列についての吸収曲線の重ね表示、上段は東西ビーム列、下段は南北ビーム列について表示したもの。上段の矢印で示されるように、吸収領域が西から東へくり返し、移動してゆく様子が明瞭に認められる。

Fig. 14. Stack plot of the absorption curves for a line of beams in the east-west direction (upper panel) and the north-south direction (lower panel). As marked by arrows in the upper panel, absorption regions are found to drift eastward repetitively.

7. オーロラ像とオーロラ吸収画像の比較

イメージングリオメーターにより観測されたオーロラ吸収画像と光で見たオーロラ像との差異を調べることは以下に述べるように非常に重要な意味もっている。

オーロラの発光は主として数 keV の降下電子により引き起こされる。一方、CNA は数 10 keV 以上の高エネルギー降下粒子により起こされる。そこで、両者によるオーロラ像は必ずしも一致するわけではなく、両者を比較した際、光が優勢な領域は低エネルギー成分が、CNA が優勢な領域は高エネルギー成分が、それぞれ卓越していると考えられる。このよう

に光によるオーロラ像とオーロラ吸収画像を比較することにより、オーロラの各部分における降下電子スペクトルの様相を知ることができる。

また、光オーロラを起こす降下電子は、磁気圏尾部の磁力線再結合過程（一次加速）で生成された高エネルギー成分が、極域上空数千 km~1 万 km の沿磁力線加速域で二次的に加速されたものと考えられるので (e.g. KAN and LEE, 1981), 光オーロラの形態は一次加速と二次加速双方の空間構造に支配されている。一方, CNA を引き起こす数 10 keV 以上の降下電子は、高々数 keV の沿磁力線加速の影響をあまり受けないと考えられるので、オーロラ吸収画像は主として磁気圏尾部の加速の空間構造に支配されていると考えられる。そこで、光オーロラとオーロラ吸収画像の比較により、沿磁力線加速域の空間構造を分離抽出できる可能性がある。

以上、両者の差異について強調したが、両者はともに共通の原因により引き起こされ、基

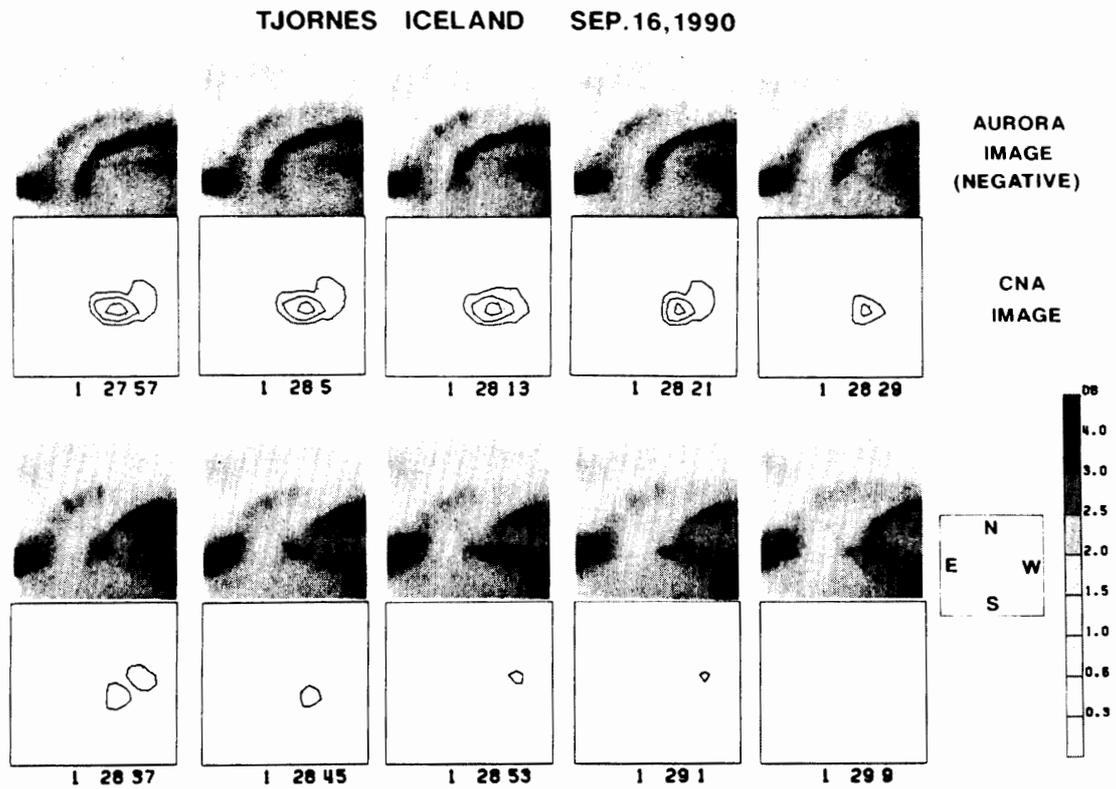


図 15 コロナ型オーロラについて、オーロラ光学観測（上段）とイメージングリオメーターによる吸収画像（下段）の比較を行ったもの。上段では、黒い部分がオーロラ発光域に対応する。吸収領域はコロナ型オーロラのうち、光が強く、渦状の動きを伴う部分に局在化されている。

Fig. 15. Comparison between optical auroral images (upper panels) and the absorption images (lower panels) for a corona-type aurora. A dark color corresponds to bright auroral luminosity. The absorption area is much narrower than the luminous aurora, and it corresponds to the most bright part of aurora showing folding structure.

本的には類似性を持っている。ここで、1990年9月16日、アイスランドのチョルネスで、オーロラ光学観測とイメージングリオメーターの同時観測を行った中から、両者の間に差異が見られる例(図15)と類似性の高い例(図16)とを一つずつ示す。

図15は0127から0130 UTにかけてコロナ型のオーロラが観測された時の光オーロラ(上段白黒写真, 黒い部分が発光領域)と吸収画像(下段等高線グレイスケール表示)を比較したものである。天頂から大きく広がる光オーロラに対し、CNAの強い領域は天頂の西側に局在化されており、これに対応するオーロラは光が最も強く、サージ状の速い動きを伴う部分である。コロナ状オーロラは、発光領域が高々度まで伸びたオーロラを下から見上げた時、コロナ状の形態を示すと言われており(福西ら, 1983)、低エネルギー側に伸びた電子のエネルギースペクトルを持つことが予想される。従って数10 keV以上の高エネルギー成分により起こされるCNA域とコロナ状オーロラの空間域が必ずしも一致しないのは当然と言える。

図16は0219から0238 UTにかけて、ディフューズオーロラの中に、明るい部分が現

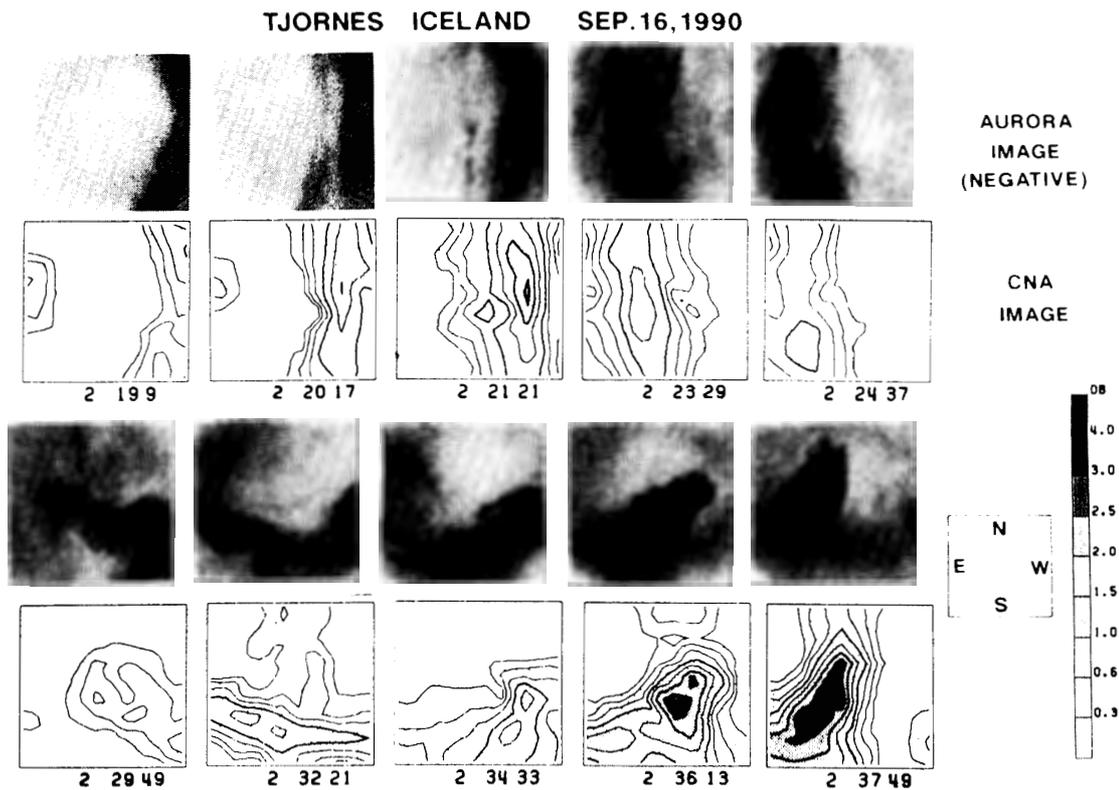


図16 ディフューズオーロラ中に明るい部分が現れたときのオーロラ光学観測と吸収画像の比較例。両者の形態、動きは全く相似しており、このオーロラ中の降下粒子エネルギーが相対的に高いことをうかがわせる。

Fig. 16. Comparison between optical aurora and the absorption images for bright arcs embedded in diffuse aurora. Form and motion of the both images are quite similar, suggesting hard energy spectrum of the precipitating electrons.

われたオーロラの例である。この例では光オーロラとオーロラ吸収画像はその形態、動きが全く相似的である。これは朝方の地方時になり、降下電子スペクトルが捕捉電子主体の高エネルギー成分が卓越したものに变化したためと考えられる。

一般的に、真夜中を中心とする動きの活発なオーロラ、朝方のオーロラでは光オーロラ像とオーロラ吸収像はよく一致し、一方、夕方側の動きの静かなオーロラは、オーロラ吸収を伴わない傾向がある。このような特徴を十分認識すれば、イメージングリオメーター観測はオーロラ光学観測が不可能な条件下（日照下、曇天時）でのオーロラ形態を推定する有効な手段として活用できると考えられる。

8. ま と め

8行8列のアレイアンテナから成るイメージングリオメーターを開発した。本システムのアンテナ構造は軽量のワイヤダイポールが用いられ、建設が容易である。本システムは視野180 km 四方を空間分解能 20 km, 時間分解能 1~4 秒で観測することができ、観測現場にて実時間で CNA 画像を表示できる特徴をもつ。64本のアンテナビーム方向は、銀河雑音分布図を用い、設計どおりの方向を向いていることが確認できた。ただし視野周辺ビームには、グレーティングローブが発生しているため、解析上注意が必要である。

本システムは、アイスランドと、その地磁気共役点である南極昭和基地に設置され、オーロラ現象の南北半球共役性の研究に用いられるほか、スピッツベルゲンにも設置され、極冠域固有の吸収現象が研究されている。

アイスランドでの観測によれば、本システムは、脈動性吸収の形状や移動の様相を明らかにすることができる。また光オーロラとの同時観測では、特定タイプのオーロラ（活発な動きを伴うオーロラ、パルセーティングオーロラ）と本システムによる CNA 画像は極めて相似的事であることがわかった。

謝 辞

本開発研究は国立極地研究所と名古屋大学太陽地球環境研究所 (STE 研)、通信総合研究所の共同研究として進められた。ご理解とご支援を賜った国立極地研究所平澤威男教授、江尻全機教授を始めとする、これらの機関の関係各位に感謝致します。広大な敷地を必要とするアレイアンテナの調整、試験観測に際しては、STE 研豊川本所のグラウンドを長期にわたり借用させていただいた。これら実験環境を整えることにご尽力いただいた STE 研田中義人教授に感謝致します。アンテナのインピーダンス調整については、STE 研石田善郎技官、三沢治昭助手に技術指導をいただいた。またアンテナの建設にあたっては STE 研加藤利郎技官のお世話になった。

開発の当初, 世界初のイメージングリオメーターをすでに開発されていた米国メリーランド大学, T. J. ローゼンバーグ博士は, 筆者からの技術的質問に快く回答下さり, システム開発上, 大変参考にすることができた. ここに謝意を表します.

本研究は文部省特定研究「フーリエ変換型オーロラ吸収画像観測装置の研究開発」経費を使用して行われた.

文 献

- BALSLEY, B. B. and ECKLUND, W. L. (1972): A portable coaxial collinear antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-20**, **4**, 513-516.
- BUTLER, J. and LOWE, R. (1961): Beam-forming matrix simplifies design of electrically scanned antennas. *Electron. Des.*, **12**, 170-173.
- CANE, H. V. (1978): A 30 MHz map of the whole sky. *Aust. J. Phys.*, **31**, 561-565.
- DETRICK, D. L. and ROSENBERG, T. J. (1990): A phased-array radiowave imager for studies of cosmic noise absorption. *Radio Sci.*, **25**, 325-338.
- 福西 浩・国分 征・松浦延夫 (1983): オーロラ現象. 南極の科学 2. オーロラと超高層大気. 国立極地研究所編. 東京, 古今書院, 59-65.
- KAN, J. R. and LEE, L. C. (1981): Formation of auroral arcs and inverted V precipitations: An over-view. *Physics of Auroral Arc Formation*, ed. by S.-I. AKASOFU and J. R. KAN. Washington, D.C., Am. Geophys. Union, 206-217 (Geophysical Monograph, **25**).
- 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.
- KRISHNASWAMY, S., DETRICK, D. L. and ROSENBERG, T. J. (1985): The inflection point method of determining riometer quiet day curves. *Radio Sci.*, **20**, 123-136.
- NIELSEN, E. (1980): Dynamics and spatial scale of auroral absorption spikes associated with the substorm expansion phase. *J. Geophys. Res.*, **85**, 2092-2098.
- 佐藤 貢・山岸久雄・加藤泰男・西野正徳 (1992): イメージングリオメーター吸収画像 QL システムの開発. 南極資料, **36**, 251-267.
- 山岸久雄・菊池 崇 (1989): 掃天型リオメーターの開発. 南極資料, **33**, 17-32.
- YAMAGISHI, H., KIKUCHI, T., IKEDA, S. and YOSHINO, T. (1989): High resolution auroral absorption measurement with scanning-beam riometer at L=6.1. *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **2**, 110-122.

(1992年4月9日受付; 1992年5月27日改訂稿受理)