

簡単な電波望遠鏡とオーロラ

前田 耕一郎

〈兵庫医科大学 〒663 西宮市武庫川町1-1〉

太陽フレアから放出されたプラズマ雲が地球磁気圏に衝突すると、地磁気嵐が引き起こされ、オーロラのリングが輝きを増して広がるとともに地球規模で電離層に擾乱が生じます。1989年10月19日に発生した大フレアから飛来したプラズマ雲による地磁気嵐にともない、北海道でオーロラが観測されましたが、その際に起こった電離層の擾乱が簡単な電波望遠鏡により三重県柘植町で捉えられました。

1989年10月21日に北海道で、およそ30年ぶりにオーロラが見られました。真っ赤なオーロラで、北の空を半円形に染めたそうです(図1=表紙左)。理科年表(1991年版, p.784)によるとオーロラは20時40分-21時15分と23時10分-23時30分の2度にわたって北海道の各地で観測されています。このオーロラについては新聞などでも報道されたので思い出される方も多いと思います。オーロラは、磁力線に沿って降下して来る電子や陽子が大気中の原子と衝突して発光する現象です。ひだのあるカーテンのようなオーロラの緑色は、酸素原子の波長5577Åの光です。また、赤いオーロラは酸素原子から来る波長6300Åの光です。緑色のオーロラは高度100-150kmあたりと比較的限られた高さで起こりますが、赤いオーロラは150-500kmと広い高度範囲で発生します。北海道で見たオーロラは、もっと北の空で起こった赤いオーロラの上が見えたものと思われる。

宇宙空間から見ると、オーロラは地球の両極にかかる二つのリングのように見えます。もっと正確に言うと地磁気の極を中心として、卵を縁どっ

たような形(オーロラ・オーバルと呼ばれる)をしています。図2(=表紙右)は、人工衛星ダイナミクス・エクスプローラーによって、紫外線で撮影されたオーロラ・オーバルです。このようにリング状にオーロラが現われるのは、太陽コロナから放射状に流れ出すプラズマ流(太陽風)と地球磁場の相互作用によって、粒子の落ちやすい場所が両極にリング状にできるからです。北極の場合、地磁気の極はカナダの北方にあり、地磁気によって定義された緯度(地磁気緯度)で65°-70°あたりにオーロラ・オーバルがあります。北海道の地磁気緯度は35°ですから、オーロラ・オーバルと比べてかなり低い緯度にあります。ふだん、オーロラは最も近いところでも3000km以上北の東シベリア海上空にある(図2=表紙右参照)ので、北海道からは地平線下となって見ることはできません。しかし、太陽活動の活発な時期には、北海道のように地磁気緯度の低い地方でもオーロラが見られることがあります。太陽の黒点領域でフレアと呼ばれる大爆発が起こると、太陽から大量のプラズマが放出されます。このプラズマの雲が1-2日後に地球軌道まで達して、地球の磁気圏に衝突すると地球の磁場が大きく乱されます(地磁気嵐)。このようなとき、オーロラ・オーバルは

Koitiro Maeda: Simple Radio Telescopes and Aurora.

光を増し、幅を広げると共に低緯度の方に向かって爆発的に広がり、その結果、低緯度の地方でもオーロラが見られるのです。1989年、太陽活動の盛んな時期に当たっており、10月21日に北海道で観測されたオーロラは、10月19日に発生した大きな太陽フレアから放出されたプラズマ雲によって引き起こされたことがわかっています。

オーロラが発光する高さは100-500 kmと電離層の高さと一致しています。電離層にオーロラ粒子が落下して来ると、電離状態が変化したり運動が引き起こされると考えられます。私は、以前、天文月報に“簡単な電波望遠鏡”に関する記事(1989年第82巻7号より隔月5回連載)を書きましたが、その中で、銀河背景放射(銀河電波)は電離層により吸収を受けるため宇宙空間での強度より弱まって受かることを述べました。1989年に、私は三重県柘植町で簡単な電波望遠鏡についての資料を得るためのテスト観測を行っていました。北海道でオーロラが観測されたという話を聞いたとき、ふと、柘植町上空の電離層にも何か変化が起こったかも知れないという考えが頭に浮かびました。電離層の状態が急激に大きく変化したとしたら、簡単な電波望遠鏡で受信した銀河電波の強度に変化が現れているはずですが、10月21日前後の記録を調べてみると、さいわい、ダイポール・アンテナによる銀河電波の記録(1989年第82巻9号を参照)と5素子八木アンテナによる乗算型干渉計の記録(1990年第83巻3号を参照)がありました。

図3に、10月21日の柘植町の記録を、比較のために前後の日の記録も含めて示します。まず、図3_aのダイポール・アンテナによる29.98 MHzでの銀河電波の記録を見てみましょう。昼間から夕方にかけて、スパイク状に大きく振れているのは混信電波です。夜間は、混信が少なくなるとともに、下端のレベルが安定して、しかもゆっくりと変化しているのが見られます。下端のレベルが銀河電波の強度に対応しています。銀河電波のレベ

ルの変化を見ると、20日および22日の記録では、9時 UT (UT:世界時) から20時 UTにかけて徐々に減少していますが、21日の記録では12時 UT頃からレベルの上昇が始まり、約6時間にわたって盛り上がったように増加しています(図3_aの矢印のあたり)。また、振れ幅は小さいですが、短時間での変動も認められます。銀河レベルが上昇するという事は、ふだんに比べて電離層による吸収量が減少したことを示しています。銀河電波の吸収量は、視線に沿って分布する電子の積分量と関係します。銀河レベルの上昇は、電離層内の電子密度の高さ分布に大規模な変化が生じたことを示しています。

つぎに、図3_bの49.5 MHzでの乗算型干渉計の記録を見てみましょう。運のよいことに、北海道でオーロラの起こった時刻にカシオペア座Aと白鳥座Aの二つの電波源が上空を通過中であり、これらの電波源の干渉パターンが記録されていました。図3_bを見ると、20日と22日の干渉パターンは、一見してよく対応していることがわかりますが、オーロラの起こった21日の記録は他の2日の記録とずいぶん違います。21日の記録では、干渉パターンの振幅が異常に小さくなり、干渉パターンが消えたようになっている部分が2箇所認められます(図3_bの矢印のあたり)。21日の記録だけを見たとしたら、何か装置の具合でも悪かったのだろうと考えて見過ごしてしまいそうですが、今回はオーロラが起こったことがわかっているので状況が異なります。実は、このように電波星の干渉パターンが消える現象は、電波星のフェイド・アウト(FADEOUT)と呼ばれており、主にオーロラの発生する極域で電離層の異常現象を調べるための観測手段として用いられたことがあります(今も用いられているかも知れません)。

電波星のフェイド・アウトという現象は何を意味しているのでしょうか。二つのアンテナに達する電波の位相差が、電波源の動き(地球の自転による)と共に系統的に変化するために干渉パター

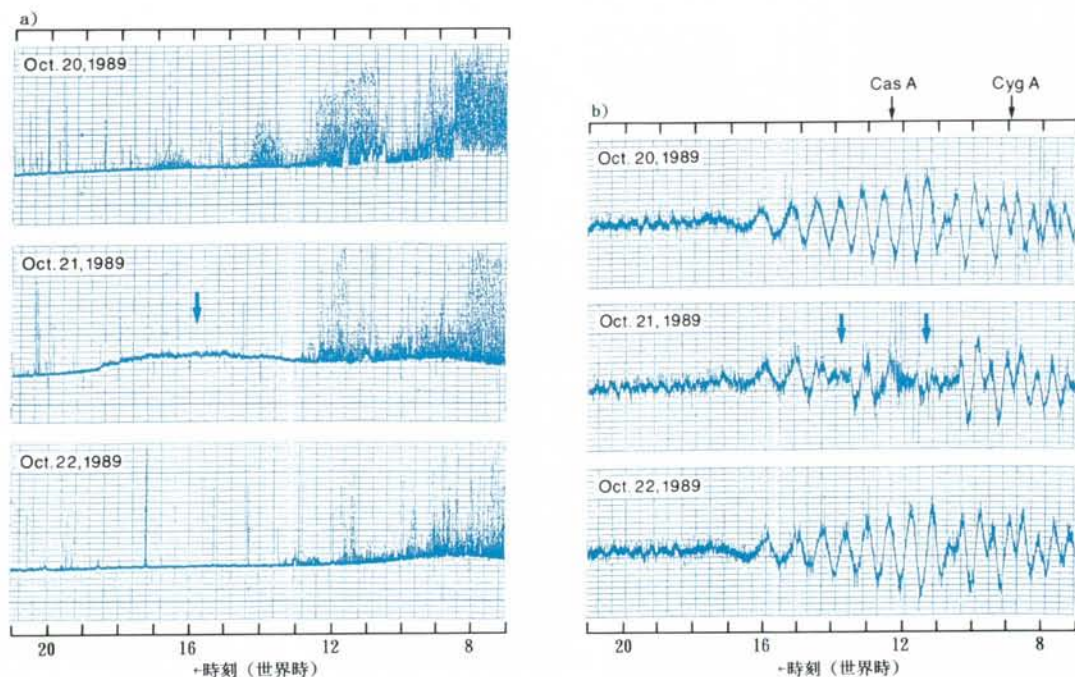


図3 三重県柘植町における簡単な電波望遠鏡での観測。a) ダイポール・アンテナによる銀河電波の記録(29.98 MHz)。10月21日の記録の矢印は銀河レベルの異常な上昇を示す。b) 乗算型干渉計の記録(49.5MHz)。矢印はフェイド・アウトを示す。

ンが観測されます(天文月報1990年第83巻3号参照)。ところで、二つのアンテナに達する電波はいずれも途中、電離層を通過します。電波の屈折率は電子密度に依存するので、電離層がなかったと仮定した場合と比較すると、アンテナに達したときの電波の位相は異なります。図4は、その状況を示すために描いた概念図です。アンテナ間の距離を L 、天頂方向と電波源の方向のなす角を θ 、電波の波長を λ とすると、二つのアンテナに達する電波の位相の差 $\Delta\phi$ (ラジアン)は、

$$\Delta\phi = 2\pi L \sin\theta / \lambda + \Delta\phi \quad (1)$$

と表せます。ここで、右辺の第一項は電波源の動きと共に変化する幾何学的効果を表し、第二項の $\Delta\phi$ は電離層が原因となって二つのアンテナ間に生じる位相差を示します。乗算型干渉計の出力は

$\cos(\Delta\phi)$ に比例します(天文月報1990年第83巻3号参照)。電離層が静かで一様とみなせる場合には、電離層で付加される位相量は二つのアンテナに対して等しいと考えられますから、 $\Delta\phi = 0$ となり、位相差は、(1)式の第一項の幾何学的な効果のみとなります。干渉計のベースラインは東西方向で約70mでした。電離層が普通の状態であれば、このような短いベースラインに対しては、 $\Delta\phi = 0$ はよい近似で成り立ちますから図3b)における10月20, 22日の記録のような干渉パターンが観測されます。しかし、電離層の中で擾乱が起これば、電離層の内部に干渉計のベースラインと同程度のスケールで電子密度の濃淡ができたとしたらどうでしょう。電離層内の乱れが原因で起こる位相差($\Delta\phi$)が無視できなくなり、干渉パターンは乱されます。10月21日のフェイド・アウトは、

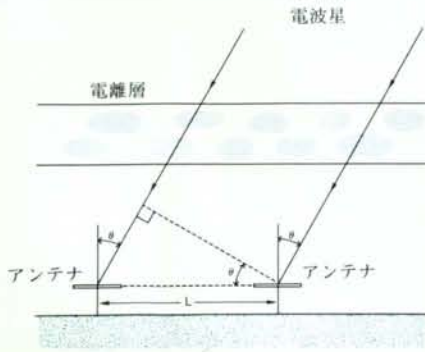


図4 干渉計による観測の概念図

ベースラインと同程度のスケールの電子密度の濃淡が電離層内に生じたことを示しています。 $\Delta\phi$ が時間的に不規則に大きく変化したとすると、干渉計の出力は最大値と最小値の間を大きく振れるはずですが、しかし、図3₆に見られるように、一部を除いて、振れはそれほど大きくはなっていません。これは受信システムの時定数と関係しているように思われます。このときの時定数は約12秒でした。もし、出力電圧が時定数に比べてかなり短い時間スケール（数秒程度）で変化したとすると、

ペンレコーダのペンは実際の電圧の変化よりずっと小さ目に記録してしまいます。つまり、数秒程度の時間スケールで位相を乱す、空間スケールが数10m程度の電子密度の“むら”が電離層内に生じたと考えると干渉計の観測結果が説明できます。

ペンレコーダの記録を見ただけでは、干渉計による記録とダイポールでの記録の時間的対応がわかりにくいので、もう少しわかりやすくするためにひとつの図にまとめてみたのが図5です。図5には、銀河レベルの変化（前後の日も含めて）が相対強度で示されているとともに、電波星のフェイド・アウトの観測された時間および北海道でオーロラが観測された時間が示されています。図5を見ると、電波星のフェイド・アウトは2度にわたって起こっていますが、それぞれがオーロラの出現と対応していることがわかります。それぞれについて見ると柘植町のフェイド・アウトの開始時刻は、北海道でオーロラが見え始めた時刻よりかなり先行しています。また、銀河電波強度の異常な上昇は、電波星のフェイド・アウトの発生と

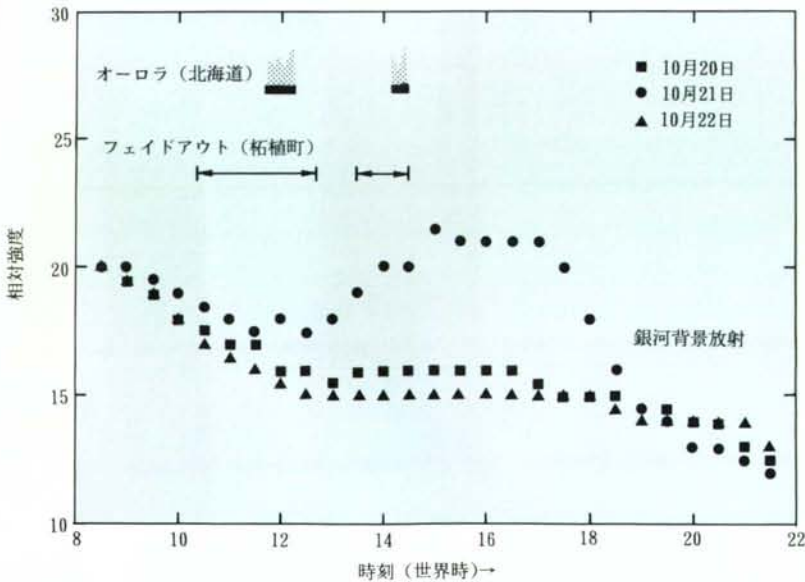


図5 銀河電波の受信強度（柘植町）の変化（10月20、21、22日）と10月21日のオーロラ（北海道）および電波星フェイド・アウト（柘植町）の発生時間の関係。

共に徐々にスタートし、電波星のフェイド・アウトが終わった後も4時間余りにわたって続いていることがわかります。

以上より、北海道でオーロラが見られた頃、北海道から遠く離れた柘植町上空の電離層内に細かい乱れが生じていたこと、また、その乱れと関連して電離層内の電子密度の分布に大きな変化が起こったことが結論できます。では、北海道で見られたオーロラと柘植町上空の電離層に起こった異変とはどのような糸で結ばれているのでしょうか。残念ながら、北海道のような低緯度まで見えるオーロラは極めてまれにしか起こらないので、まだ、そのようなオーロラの全容は解明されていません。したがって、はっきりしたことは言えません。1989年10月21日のイベントについては、現在、名古屋大学の太陽地球環境研究所を中心に総合的な解析が進められています。上で述べた簡単な電波望遠鏡による観測の結果は、このイベントの全体像をつかむ上で、ひとつの資料になると思われます。

私は、簡単な装置による観測が好きです。そのような観測ほど、自然の息遣いが直接的に感じら

れるからです。以前、簡単な電波望遠鏡について書いたのも、多くの方々にそのような観測の体験をしていただきたいと思ったからです。銀河や電波星（カシオペア座Aや白鳥座Aなど）からの電波は、絶えることなく地球に降り注いでいます。我々は、このような電波環境の中で生活しているのです。目には見えない電波が降り注いでいるということを認識し、意識化することだけでも十分意義のあることだと思えます。私たちが、どのような自然環境の中で生活しているかを知るチャンネルをひとつ増やすことができるからです。ここで述べたような、オーロラに関連する電離層の擾乱は、日本ではそう頻繁に観測される現象ではありませんが、簡単な電波望遠鏡による観測でこんな自然の語りかけに出会うことがあることを知っていただきたいと思えます。

謝辞：北海道のオーロラの写真を快く提供していただいた副島俊樹氏にふかく感謝します。また、ダイナミックス・エクスプローラーによる紫外線のオーロラ像を提供していただいたアイオワ大学のL. A. Frank、およびJ. D. Cravenの両博士に心よりお礼を申し上げます。

☆

☆

☆

☆

☆