

リオメーターで観測された 30 MHz 混信の性質

行 松 彰*

Characteristics of 30-MHz Interference Noises Observed by Riometers

Akira YUKIMATU*

Abstract: In 1989, when the sun was highly active, interference noises were often observed by 30-MHz riometers at Asuka and Syowa Stations in Antarctica. The noises showed a systematic diurnal and seasonal variation. The noises were global phenomena because they were also seen in other riometer data at high and middle latitudes in the northern hemisphere. These noises were investigated in connection with ionospheric foF_2 data, geomagnetic Kp indices and sunspot numbers. The results are summarized as follows;

1) Interference noises consist mainly of ground radio waves reflected by the ionosphere.

2) The interference noise occurrence shows a good correlation with foF_2 .

3) The noise intensity shows a tendency of decreasing on weekends, and this feature suggests that the noises are mainly of artificial origins.

It is concluded, therefore, that the occurrence feature of the interference noises reflects the condition of the ionosphere, and can be used as an indicator of the global electromagnetic wave environment in HF range.

要旨: 1989年、南極あすか観測拠点で 30 MHz リオメーターの観測を行った。太陽活動が最大級であったこの年、混信が非常に多く出現した。この混信は規則的な日変化や季節変化を示し、670 km 東方の昭和基地でも同様の特性の混信が受信された。

この混信は、さらに北半球極域でのリオメーター及び日本での電波観測にも同様に現れており、地球規模で発生している現象であると考えられる。この混信の出現特性を、電離層 foF_2 のデータ、地磁気活動指数 Kp 、また太陽黒点数と比較を行った結果、次のことがわかった。

1) リオメーターの混信は主として、電離層で反射された遠方からの電磁波である。

2) 混信の出現特性は、伝搬経路の電離層（特に、 F_2 層）の状態を反映しており、 foF_2 とよい相関を示す。

3) 混信の出現頻度が週末に減少するという出現特性が得られたので、雑音源は、自然雑音ではなく、人工雑音が主であると推定できる。

以上により、混信は単なる不要雑音ではなく、伝搬経路の電離層や雑音源の情報を含んでおり、また地球の電磁波（特に人工雑音）環境を知る手掛かりともなり得ることがわかった。

* 京都大学理学部。Faculty of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606.

1. はじめに

1989年、第30次南極地域観測隊に参加し、昭和基地から約670 km離れたあすか観測拠点(71°31'34"S, 24°08'17"E)にて超高層観測を行った。観測項目は、フラックスゲート磁力計、ULF インダクション磁力計、30 MHz リオメーター、固定方位フォトメーター、トラッキングフォトメーター、全天カメラ、全天 SIT TV カメラ、及び目視やスチールカメラによるオーロラ観測であった。

あすか観測拠点でのリオメーター観測では、雑音が頻発した。その出現特性は、ブリザードとの相関が非常に高い ULF 磁力計の雑音とは異なり、原因不明の雑音が多く、CNA (cosmic noise absorption) の観測に困難をもたらした。この雑音について、昭和基地のリオメーター観測データと比較した時その雑音の出現特性が極めてよく似ており、また地磁気活動度、太陽活動度と比較したところ、その出現の仕方は大変系統的であることもわかってきた。

GERSON (1964) は、極域での電波雑音源を分類して、(1) 観測点近傍の人工雑音、(2) ブリザード等の静電ノイズ、(3) 遠方の空電等の自然雑音等を挙げて、(2)、(3) についてはその季節依存性等を調べている。また、降雪時に、空中線の受ける電波雑音について研究がなされている(高橋・水戸部, 1960)。また誘電体としての氷雪の性質を考慮した、南極大陸氷冠雪上の電波伝搬特性の研究がなされている(YOSHINO, 1961)。また、昭和基地における空電到来方位と頻度について、近くのアフリカからの頻度が高いことや、極地性低気圧との関連が研究されている(KAMADA and TOKUDA, 1971)。さらに東京-昭和間の JJY 波(10 MHz) の伝搬特性について、太陽活動の最低期に日変化や季節変化等より F 層反射を仮定して MUF (maximum usable frequency) の計算と比較した研究がある(杉内ら, 1979)。VLF から HF 帯にかけての自然雑音について時間変化とともに緯度効果、周波数特性が調べられている(村永, 1974)。以上は地上観測に基づくものであるが、ISS-b 衛星から見た HF 標準波帯の地上電波雑音については、衛星高度では都市雑音は微弱で標準電波と空電のみとされ、 foF_2 との関連や地理的分布についても調べられている(西端ら, 1988)。

本研究で扱う 30 MHz 帯電波雑音について過去の研究論文はほとんどなく、また本研究では ISS-b 衛星観測とは異なる雑音源が見出されたので、ここにあすか観測拠点における 30 MHz 帯雑音電波の出現特性についてまとめることにした。

CNA の観測にはつきもののこの雑音の理解は CNA のデータ解析に当然必要なものであるし、それ以上に極域及びサブオーロラ帯の電離層モニターになり得る点と地球全体の電磁波(特に人工雑音)環境を考える手掛かりともなり得るであろう点でも、意味があるものと思われる。

2. 観測システム

あすか観測拠点に La Jolla Science 社製 30 MHz リオメーターを設置し CNA の観測を行った。バンド幅は (30 MHz \pm) 100 kHz, 積分の時定数は 0.25 秒であり, ダイポール型アンテナで天頂角 30° 以内の, すなわち電離層 D 領域にて上空半径 50 km 円内の吸収が観測される。

受信アンテナはブリザード時の静電ノイズを避けるため, あすか観測拠点観測棟から約 150 m 離れた超高層観測エリア内の雪面下に埋設された。一方, リオメーターはそこから約 20 m 離れた雪面下に, 保温箱に納められて埋設された。なお, アンテナと受信機は当初雪面直下に設置されたが, その後積雪のため約半年後には雪面下約 70 cm の深さに埋まっていた。リオメーターの電源として DC12V を観測棟から供給した。

記録は TEAC 製 KW-1000 (DR200+MT800GP) デジタルデータレコーダーにより, 磁力計, 固定方位フォトメーターの出力とともに 6250BPI 1200 フィート磁気テープに 1 秒または 2 秒サンプリングで記録したほか, バックアップとして TEAC 製 R-950L 長時間データレコーダーによりアナログ磁気テープ記録し, また三栄測器製 8 チャンネルレクタグラフにてチャート紙に記録した (ただし 7 月 14 日 21 時以降はアナログ磁気テープ記録をやめた)。

リオメーター観測を行うにあたり, アンテナ長の調整と接地点 (アース) のとり方について特に注意を払った。当初リオメーターから期待した出力値が得られなかった。これはアンテナ周囲の雪の誘電率により, アンテナと受信機間のインピーダンス整合がとれなくなったためと考えられ, アンテナ長の調節を行う必要があった。アンテナ長は理論計算値で最良となったわけではなく, 数十通りの試行錯誤の末, 良好な出力が得られるに至った。

大陸氷床上にあるあすか観測拠点では良好な接地点がとれないため, リオメーター出力が極めて不安定であったので, 観測棟内のすべての機器のアース端子を共通に取ったところ, リオメーター出力信号は格段に安定し, CNA もはっきりとらえられるようになった。しかし周辺の機器からの電磁干渉を受け易く, 大陸氷床上の基地の宿命として, 接地点のとり方について更なる改善への努力が必要と思われる。

3. 混信源の分類

第 30 次観測隊のあすか観測拠点及び昭和基地におけるリオメーター観測には頻繁に混信が見られた (図 1)。すなわち, リオメーター出力が銀河雑音レベルよりも高くなる場合がしばしば見られた。これは大別すれば次の 3 種に分類できるものと考えられる。

- 1) 観測点近傍から直接波としてアンテナに到来する地上雑音。
- 2) 電離層で反射され到達する遠方からの地上雑音。

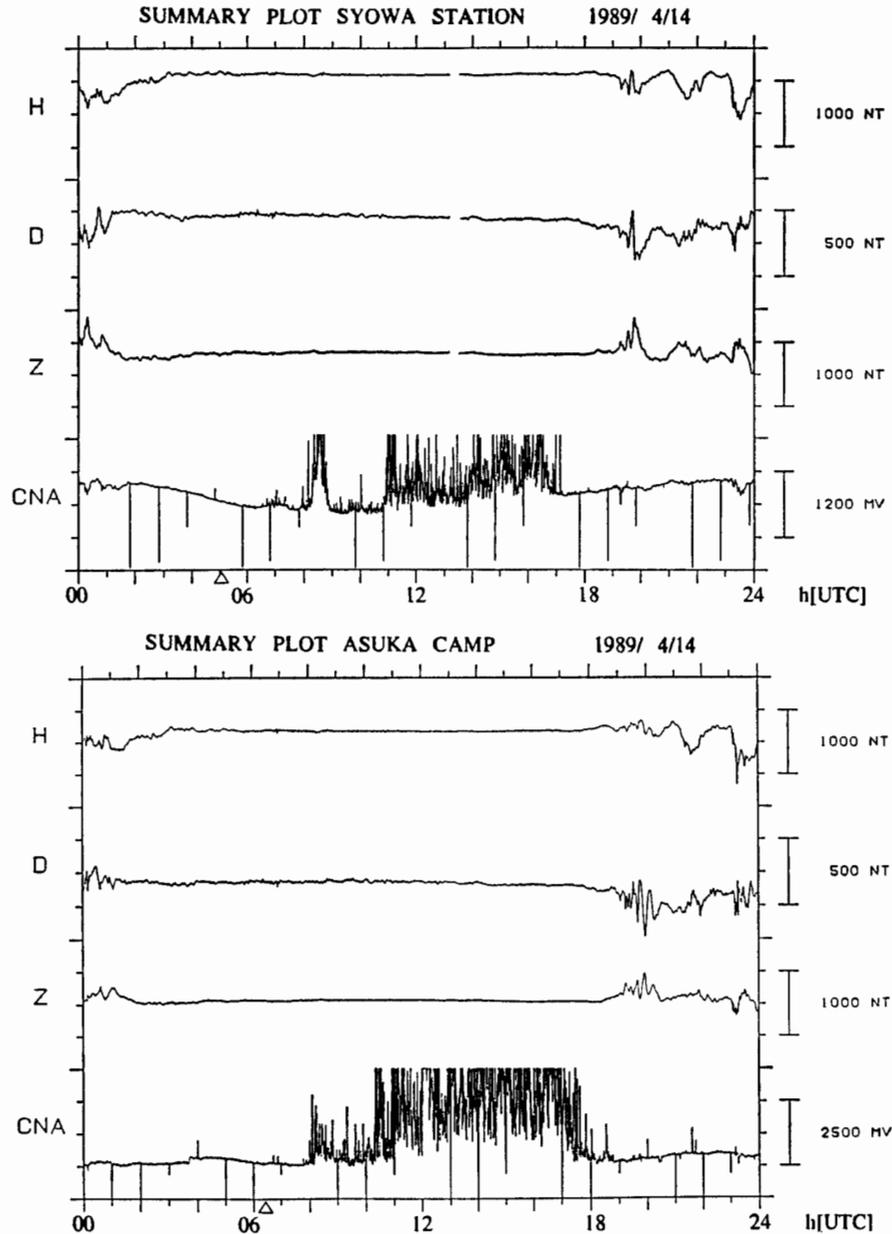


図 1 1989 年 4 月 14 日昭和基地, あすか観測拠点のリオメーターで観測された混信と磁場記録 (Δは日の出時刻)

Fig. 1. Interference noises observed by riometers and geomagnetic data at Syowa and Asuka Stations on April 14, 1989 (Δ: sunrise).

- 3) 太陽フレア現象等に伴う太陽電波バーストや木星電波等, 銀河背景雑音以外の地球外電磁放射.

以下, これらの相違と存在の有無について考える.

まず 1) に関しては雑音源として人工雑音と自然雑音が考えられ, 人工雑音は確かに存在する. 最も明瞭なものは気象ゾンデ観測時にコントローラから発生するものである. ほかに雑音源となりうるものは基地内の通信設備からの直接波であるが, あすか通信局の業務日誌

と比較したところ、夏季には頻繁に通信をしているにもかかわらず、それによるものと考え得るのは、通信業務の前に通信機器の電源を投入する際に出る衝撃性雑音のみであって、リオメーターに見られる混信雑音と通信（交信）時間との対応は無いといえるので、通信が雑音源であるという可能性はないといえる。拠点内のほかの人工雑音源（例えば発電機や冷凍庫、車両、観測器等）からの混信の可能性についても同様のことがいえる。すなわち、後述するようにリオメーターの混信雑音は（散発的な衝撃性雑音を除けば）、夏季に出現頻度が激減するという明瞭な季節依存性を示す。一方拠点内の人工雑音強度は季節によらずほぼ一定、もしくは夏季に多少大きいことから、拠点内の人工雑音は少なくとも混信の主要部ではありえない。

直接波のうち、もう一方の自然雑音として、空電やブリザード（または地吹雪）による静電ノイズが挙げられる。前者に関しては、南極大陸では積乱雲が発達しないため雷も起こらないと言われているし、実際越冬中雷は一度も観測されなかったので考慮しなくてよい。ただし、後に引用する特に日本での観測データには夏の夕方から夜半にかけて頻繁に雷放電による雑音が見れるが、これはほかのノイズとは波形が異なり、すぐに判別できるものである。

後者については、これまでに降雪時電波雑音として調べられている（高橋・水戸部，1960）が、その発生機構はかなり複雑な問題である（村永，1974）。その一つは、帯電した雪粒子が空中線に付着してそこに直流電流を流すというもので、これを狭い意味での“静電ノイズ”と称す。それ以外に、空中線近傍を通過する雪粒による電場の移動や近くの雪粒間やアンテナ先端との間の放電による誘導等で空中線に電流が流れる“沈積雑音”と呼ばれるものもある。これらは多くの周波数成分を含み、しかも風速や雪の状態によってその現れ方が異なる複雑な現象である。さらにこのブリザードを引き起こす極地性低気圧中心部分には、また電磁的雑音の発生源も考えられるといわれている。アンテナへの荷電粒子の付着による“静電ノイズ”は、アンテナを雪面下へ埋設したことで免れることができるが、“沈積雑音”の影響を受ける可能性が残されている。例えば、同様にして雪面下にセンサーを埋設している ULF 磁力計は、ブリザードになるとひどいノイズを受ける。これはやはり誘導電流によるものと考えざるを得ない。また第 30 次夏隊気水圏部門の遠藤辰雄氏が、VHF 帯アンテナを雪面近くと地上高 7 m にそれぞれ設置して、電磁雑音強度を測定したところ、ブリザード時の電磁ノイズは大変激しく、降雪を伴った吹雪が始まり、風が強まると雑音が増し、VHF 受信機のアンプが破損した。またこのような時に外出して人同士が触れ合うと、感電することがあったし、また夜間にはアルミ箔を巻いたポールや全天カメラ用ドームの金属部で放電発光していることが何度も見られた。このような状況にもかかわらず、リオメーターには全く混信は入ってこなかった。ブリザードとの相関はないのである。結局ブリザード時は雪粒子の届くところに静電ノイズが見られ、雪粒子の届かないところには“沈積雑音”によるものが作用する。このようなことからブリザードによる静電ノイズはリオメーターの混

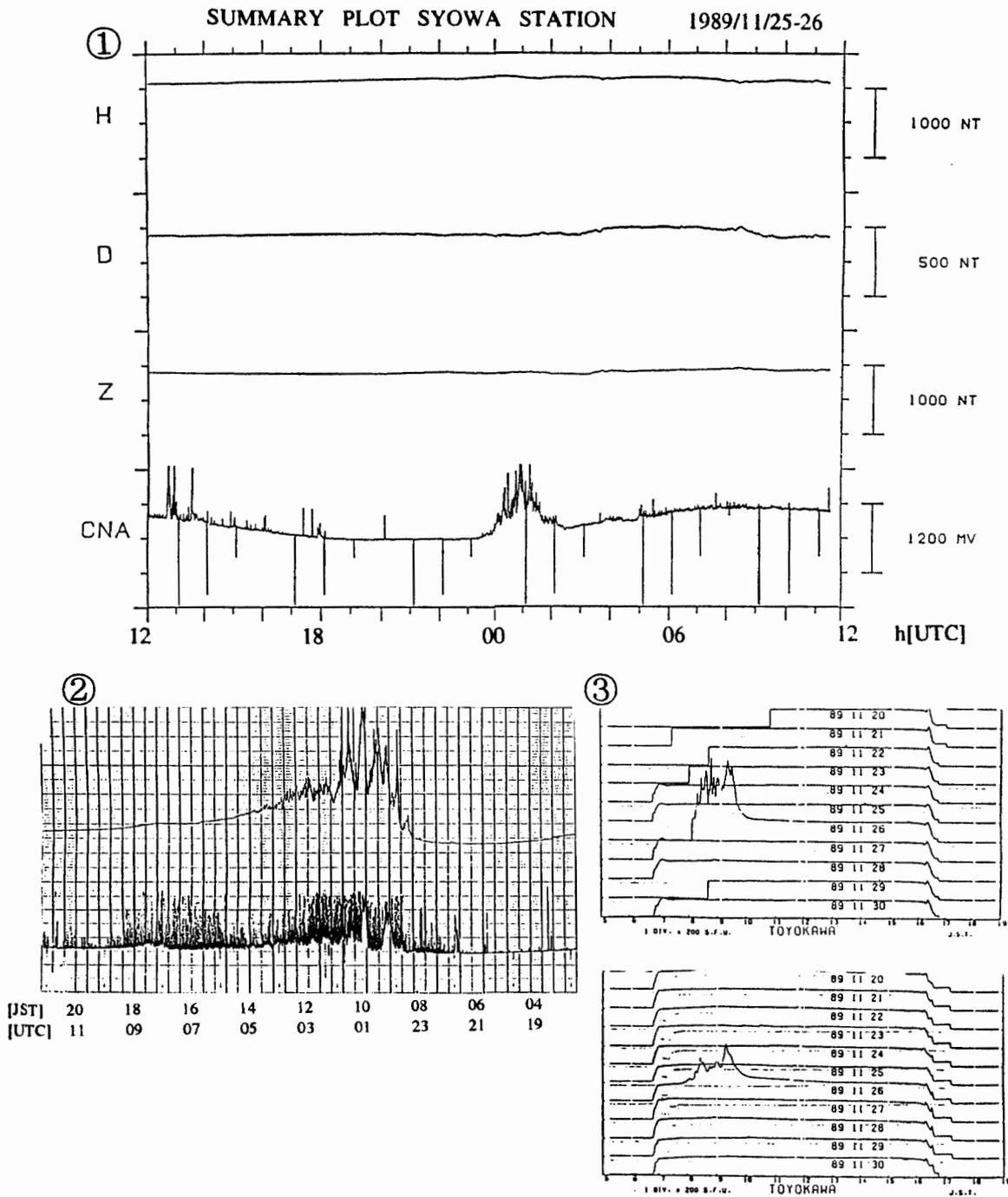


図 2 太陽バースト電波の観測例 (1989. 11. 25-26)

- ① 昭和基地での 30 MHz リオメーターとフラックスゲート磁力計
- ② 柘植での電波観測 (上: 49.5 MHz, 下: 29.98 MHz)
- ③ 豊川での太陽電波観測 (上: 2 GHz, 下: 3.75 GHz)
(Monthly Report of Solar Radio Emission より)

Fig. 2. Solar burst observed on November 25-26, 1989.

- ① 30 MHz riometer and fluxgate magnetometer at Syowa Station.
- ② Radio waves observation at Tsuge (upper: 49.5 MHz, lower: 29.98 MHz).
- ③ Solar radio waves observation at Toyokawa (upper: 2 GHz, lower: 3.75 GHz).

信の原因の中から除外して考えることができる。

以上により、1) に関しては、近傍から直接波として混入する混信源としては、それとはっきりわかる人工雑音以外では、観測された混信をほとんど担っていないという結論になった。ただし、ほかの観測点のデータに関しては近傍の人工ノイズが多いものや、近雷の直接波の混入もあるので注意を要する。

次に 3) に関しては、その影響をデータ中に明瞭に認めることができる。これは太陽観測データと比較することにより同定することができる。その一例を図 2 に示しておく。しかし太陽電波バーストにより異常電離した電離層によって 2) にあたる電磁波が混入することは当然有り得るが、これもまた同じ関連現象と見ることもできよう。

最後に 2) であるが、これについては、伝搬経路さえ存在すれば遠方のあらゆる地上雑音が受信されている可能性がある。(ただしその周波数とアンテナの指向性からして、サイドローブで受けていることになる。)

以上の考察からあすか観測拠点における混信について、“はっきりそれと識別できる雑音と、ほかのデータからそれと判断できる太陽バースト電波(これによる異常電離した電離層による異常伝搬を含む)と、(あるとすれば、)散発的かつ衝撃性の近來雑音を除けば、混信は 2) の電離層以下の地球上の何処かで放射された電磁波が電離層(またはそれと地表や海上、氷上)を介して届いたもの、と見なすことができる”と言えよう。また、ほかの観測地点でも基本的には同じと言えるだろうが、近傍の直接波混入が多かったり近雷が入ってくる可能性も勿論ある。次節以下では、電離層伝搬としての混信を調べる。

4. 使用データ

リオメーターの混信が遠方からの電離層伝搬によって運ばれてきたものだとすると、この

表 1 使用するデータ
Table 1. Data used in this analysis.

観測地点	地理緯度	種類	年
あすか観測拠点 (Japan)	70°31'34"S, 24°08'17"E	30 MHz riometer	1989
昭和基地 (Japan)	69°00'22"S, 39°35'24"E	"	1981~1990
Tjörnes (Iceland)	66.2°N, 17.2°W	"	1989
College (Alaska) (CMO)	64.88°N, 148.05°W	"	"
Fort Yukon (Alaska) (FYU)	66.57°N, 145.28°W	"	"
Arctic village (Alaska) (AVI)	68.13°N, 145.57°W	"	"
三重県柘植町 (Japan)	34.7°N, 136.3°E	30 MHz 電界強度 (一部 49.5 MHz)	"
国分寺 (Japan)	35°42.4'N 139°29.3'E	電離層データ	"
Kerguelen (France)	49.4°S, 70.3°E	"	"

現象が伝搬経路、特に反射点（または透過領域や散乱領域）の電離層の状態を反映し、また電波源にも依存するであろうと推察できるので、南極のみならずほかの地点のデータを整理してその特徴を、抽出してみる。使用するデータは表 1 のとおりである。

5. あすか観測拠点、昭和基地の 1989 年のデータ解析

5.1. 出現時間について

1) 日変化

1 年分をまとめたものを後に示すが、まず図 1 に 1989 年 4 月 14 日の例を示す。この例に見られるようにこの混信現象は昼間に起こるものである。あすか観測拠点と昭和基地で一日の混信の大まかなパターンはよく似ているが、出現開始時刻が昭和基地が約 1 時間先行している。昭和基地はあすか観測拠点より地理経度にして 15° 、時間にして 1 時間分東にあるので、この傾向はこの現象が地方時に依存するものであることを予想せしめる。両地点の緯度の違いから、この日の日の出時刻は昭和基地が 0502UTC、あすか観測拠点が 0624UTC で約 1 時間半の違いがあり、混信開始時刻のずれはむしろ日の出時刻のずれとよく合うように見える。すなわち太陽天頂角依存性である。しかし日没時刻の両地点のこの日のずれは約 40 分であり混信消滅時刻のずれは決めにくいがやはり 1 時間以上はあり、また混信の開始が日の出より遅れているのに消滅も日没後でありそれぞれの差は後者の方が大きい。これより単純な天頂角依存によるとはいえないことがわかる。これは電離層の太陽輻射に対する反応にかかる時間のずれを思わせる。また日によって出現の仕方が異なるのでそう簡単ではない。しかし全体を通して言えることは、この現象が基本的に昼間起こるものであり、しかも午前午後の非対称性があり、出現時間は対称な場合よりも午後側にずれる、ということである。

2) 季節変化

季節変化は（少なくとも 1989 年に限って言えば、）はっきりとした特徴を有している。それは、前節に述べた散発的な衝撃性雑音（これは直接波混入の可能性が大）を除けば、混信は夏季にはほとんど発生しなかったということである。これは 6) で再びふれる。また、同一日の北半球と南半球とのデータによって、冬側で混信が観測されているのに対して、夏側は混信が皆無であるという違いをはっきり見ることもできる。

3) 地磁気じょう乱との関係

図 3 に地磁気じょう乱との関係を示す。4 月 25 日まで毎日出現していた混信が、26 日の地磁気じょう乱と共に突然姿を消し、5 日間この状態が続き、 Kp が 1^+ にまで下がった 5 月 1 日になって再び出現した。このように混信は地磁気じょう乱があると数日間消失することがわかる。 Kp がある値を越えると混信が消失するというわけではなく、 Kp の値そのもの

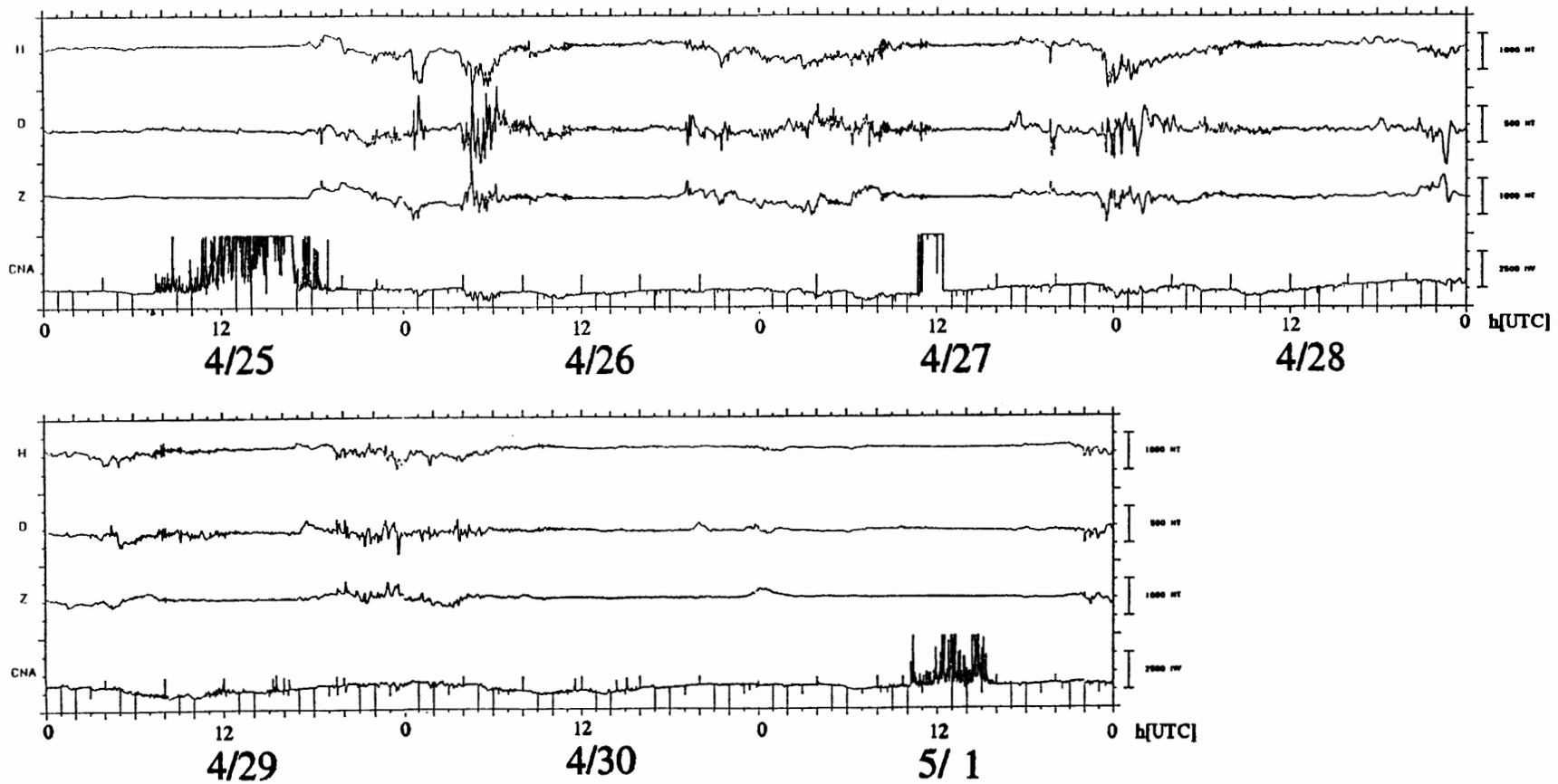


図 3 地磁気じょう乱と混信 (1989. 4. 25-5.1, あすか観測拠点) (4.27 1200UTC 前後のノイズはゾンデ観測によるもの)
 Fig. 3. Magnetic disturbance and interference (April 25-May 1, 1989 at Asuka Station), (Noise around 12hUTC on April 27 was caused by observation of radiosonde).

よりも、1日の Kp 値が比較的大きなじょう乱日からしばらく混信が消失するというのが的確なようである。また、極めて大きな ($Kp \approx 9$) じょう乱時には混信が全くなくなるのではなく、比較的短い時間スケールで、地磁気の変動とともに混信または何らかの放射の受信強度が変動するという、大変変則的な様相を呈するため別扱いにすべきであるものと思われるが、ここではこれ以上触れない (3月13, 14日等)。

4) SC (sudden commencement) との関係

図4の5月23日のようにSCの直後混信が消失することがあった。また、SCにより

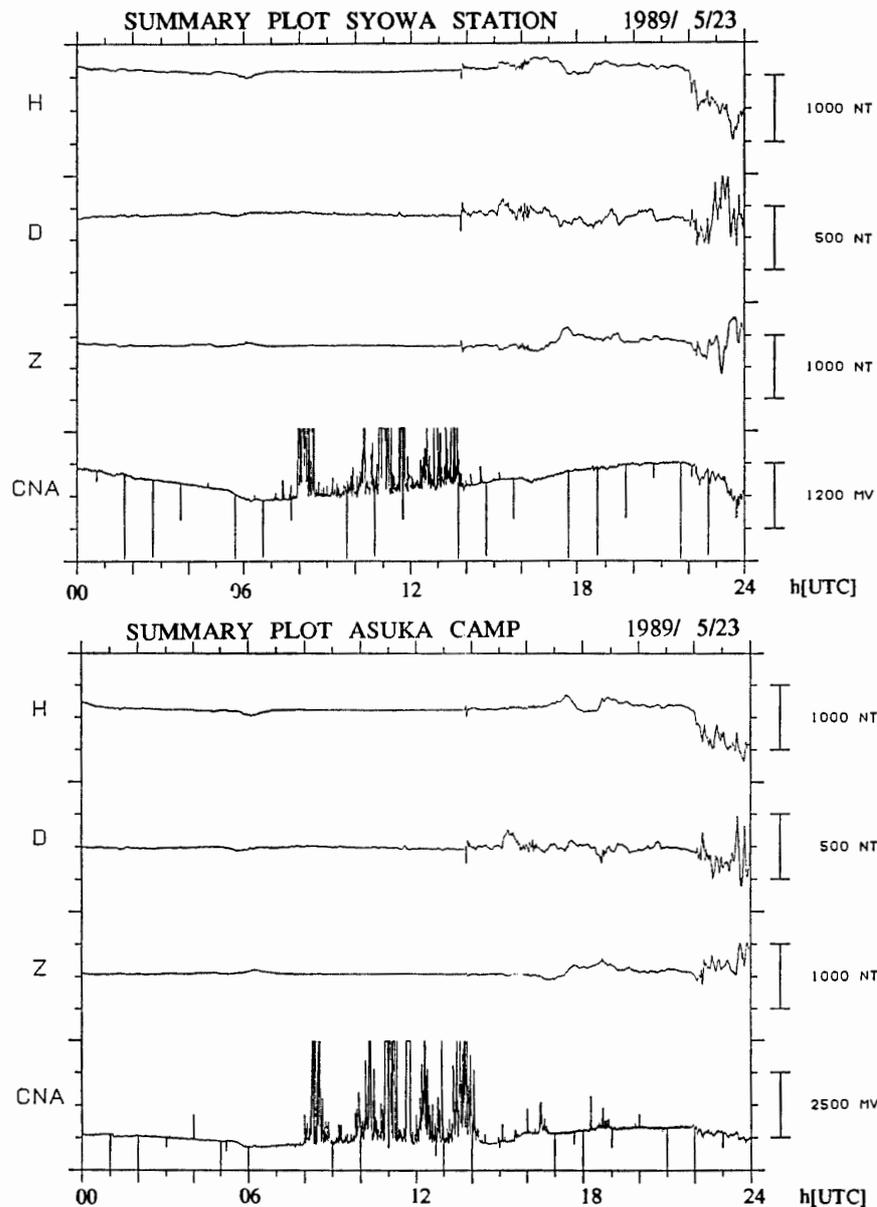


図4 SCと混信(1989.5.23, 昭和基地, あすか観測拠点)
 Fig. 4. Sudden commencement and interference (May 23, 1989 at Syowa and Asuka Stations).

特に何も変化を生じないか、放射あるいは混信が入ったものがあり (1/11), またはっきりと粒子の降り込みを示唆する吸収が起こり, その間混信が途絶え, その後再び混信が再現するか何らかの放射を受信している例もあった (3/8). (3月8日は昭和基地では混信がすでにおさまっていた時間であって放射らしきものはないことから, あすか観測拠点の吸収後の信号は混信であろうと思われるが, はっきりとはわからない.)

5) PCA like な吸収との関連

1989 年は太陽活動が極めて活発で, 8 月中旬 (13 日) 最大規模の X 線フレア, 及び大規模なプロトン現象が, また 9 月 29 日には大規模 X 線フレアと IV 型電波バースト, さらにプロトン現象も起こった. 同様の活動は, 10 月 19 日にもあった. 9 月, 10 月のものは電波バースト時にあすか観測拠点及び昭和基地は昼間だったので, 今問題となるのはそのあとに数日間続いた PCA like な吸収時の混信である. これは, この吸収が続いていた期間, 途絶えていたのである (このことは 6) でもふれる). これは広範囲に渡る D 領域の異常電離による吸収によるためであろう. この吸収の回復と共に混信が再び活発になる.

6) 1 年間の変化のまとめ

最後に, 各月ごとにリオメーターの出力をすべて重ね描きして, 12 カ月 (1 年分) をまとめた図を示す (図 5).

図には太線で昼夜の境界も書き込まれている (その他は等太陽高度線を表す). 散発的な衝撃性雑音も含むので見にくく, 夏季異常が実際ほど顕著に見えないが, 上述の 1) や 2),

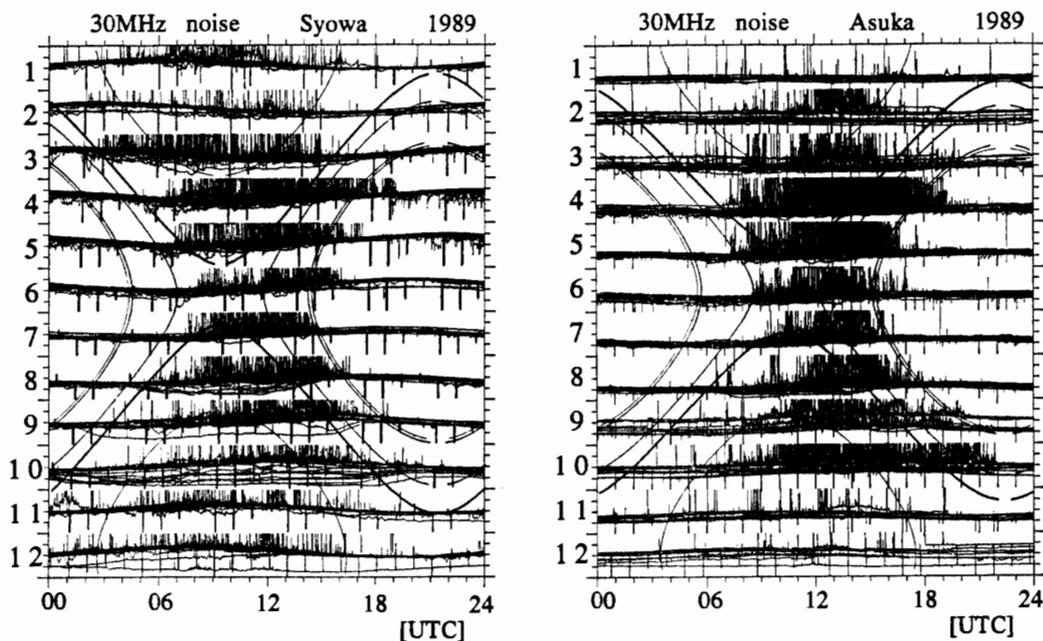


図 5 30 MHz 混信の月変化 (昭和基地, あすか観測拠点, 1989)
 Fig. 5. Monthly variations of interference signals at Syowa and Asuka Stations in 1989.

それに 8, 9, 10 月には銀河雑音レベルより下に日中出続けている 5) の PCA like な吸収 (5) で示した様に混信は現れていない) もよく見えている。また、銀河雑音自体が 1 年周期でその位相をずらしてゆく特性が、昭和基地のデータでははっきり確認することができる。一方、あすか観測拠点のデータは受信系に確実な接地点がとれず、ベースラインが不安定であるために、この特性を確認することは困難である。

5.2. 電離層データとの比較

5.1 章の結果を見ると、混信の出現が電離層の状態に強く依存していることが予想される。すなわち、電離層電子密度の消長に対応して、反射や吸収、透過の条件が変わってゆくことが、混信の出現を左右しているのではないかと予想できる。観測周波数が 30 MHz であって、仰角の小さな方向から電磁波が入射したと考えても、各電離層の高度と電子密度の最大値から簡単な計算によってわかるように、反射し得るのは F 層か E_s 層ということになる。

まず、日変化は、これが F 層反射であることを支持するものである。特に、午後側にずれ込む出方は、Chapman 層でない F 層の電子密度 (あるいは foF_2) の日変化と類似している。 E_s 層にはこのような性質はない。

さらに、季節変化、特に夏季の消失は、 F 層の夏季異常を思わせる。実際、図 6 は、 F 層を高度 300 km の球面電離層と仮定した場合の、昭和基地に到達する 30 MHz 波の最終反射域の近傍にある Kerguelen での、1989 年の毎正時の foF_2 の各月の中央値を月ごとに 1 年

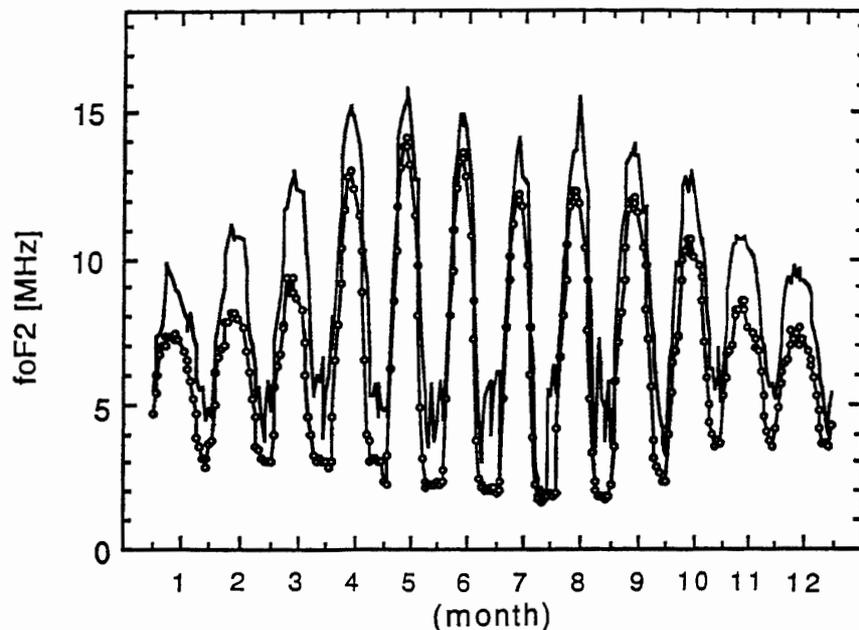


図 6 Kerguelen における 1989 年各月の毎正時の foF_2 の中央値及び最大値の変化

Fig. 6. Median and maximum values variations of hourly foF_2 in each month at Kerguelen in 1989.

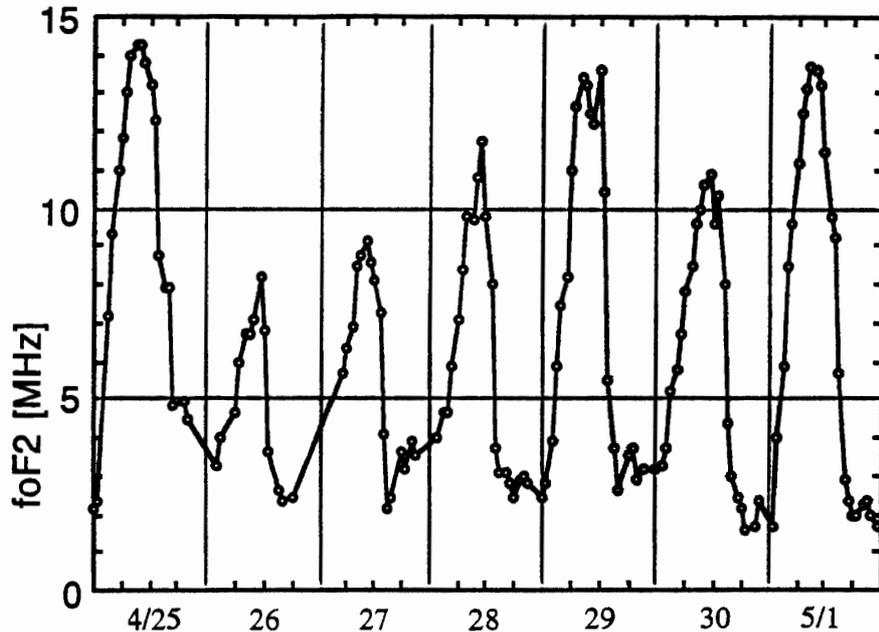


図 7 Kerguelen (4/25-5/1) におけるじょう乱時の foF_2 の変化
 Fig. 7. foF_2 variation during geomagnetic disturbance at Kerguelen (April 25-May 1).

分表示したものであるが、夏季に foF_2 がやはり低く、30 MHz 波を反射しない程度であったことを確認することができる。

また、磁気じょう乱時の Kerguelen における foF_2 は、図 7 に示すように、じょう乱が起こった 4 月 26 日に急激にピーク値が下がっていることがわかる。そして 5 月 1 日までかけて徐々にその値が平常値に回復していったとみることができるが、詳しく見ると図 7 のとおり、4 月 29 日に 1 度回復している。これと対応するように、混信も 29 日に少し出現している。極域におけるじょう乱時の電離層の変化は空間的にも時間的にも小規模で変動することと、また、D 層による吸収も同時に考慮すべきことから、この対応が意味あるものかどうかははっきりしないが、少なくともじょう乱時に混信と foF_2 がともに減少するのは確かであるといえる。

残る 4) と 5) は、主に降下粒子による D 層の電子密度の増加による吸収が、混信を減少または消失させているものと考えられる。

6. 北半球極域における 1989 年のデータ解析

Iceland の Tjörnes と Alaskan chain の CMO, FYU, AVI での 1989 年のリオメーターデータを昭和基地、あすか観測拠点の 5 章の結果との比較のために、図 5 と同様の形式で図 8 に示す。

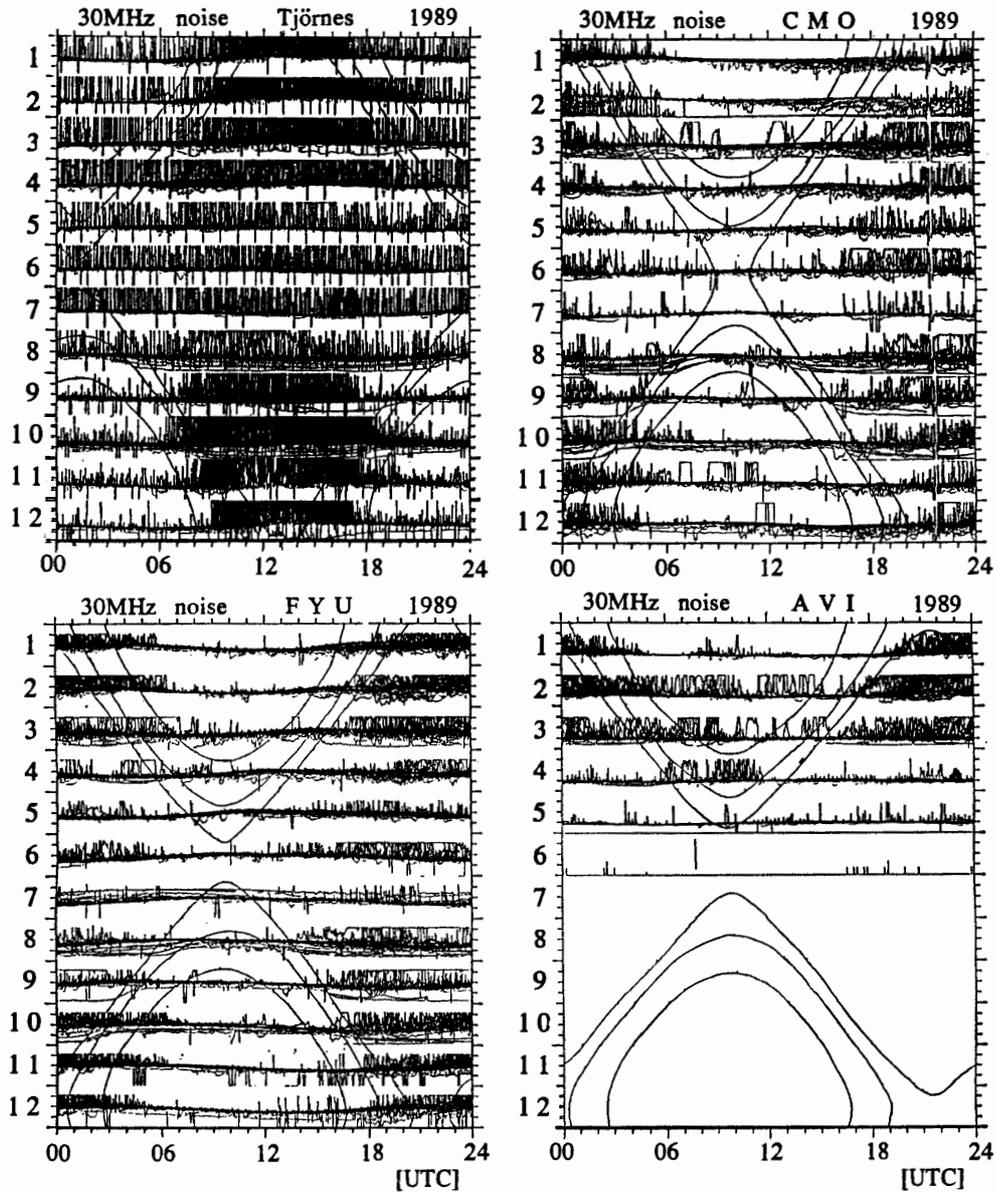


図 8 北半球極域における混信
 Fig. 8. Interference in the polar region in the northern hemisphere.

1) Tjörnes

一見してわかるとおり、散発的な衝撃性雑音が多く、一年を通して昼夜の別なく混入しており、近傍の直接波の影響を推定させるが、今はこれを省いて考える。すると 5 章で述べた日変化や季節変化についてはその傾向は同じであると見てよさそうである。

ただ相違点を見いだすとすれば、それは混信の出現開始時刻であろう。あすか観測拠点、昭和基地の日の出時刻に対する混信出現開始時刻よりも、Tjörnes におけるその方が早い時間帯にあるように見える。これは今の所反射点近傍の電離層データがないので何とも言い難いが、リオメーターの混信が電波伝搬経路と雑音源の時空間分布とにより決定されるとす

れば、両半球の 2 地点での混信の出現開始時刻の差異は両者の混信の発生源の位置関係によるものと推察できる。

2) Alaskan chain

この 3 点のデータは 1 分値であることと、近傍からの直接波による混信が多い点で良質なデータとは言い難いが比較のために挙げる。直接波による混信を無視すれば日変化では概ねあすか観測拠点、昭和基地と傾向が一致するが、季節変化に関しては、CMO, FYU とも 6 月にも混信があり、これが直接波かどうかを見極めねばならないが、今のところ不明確である。

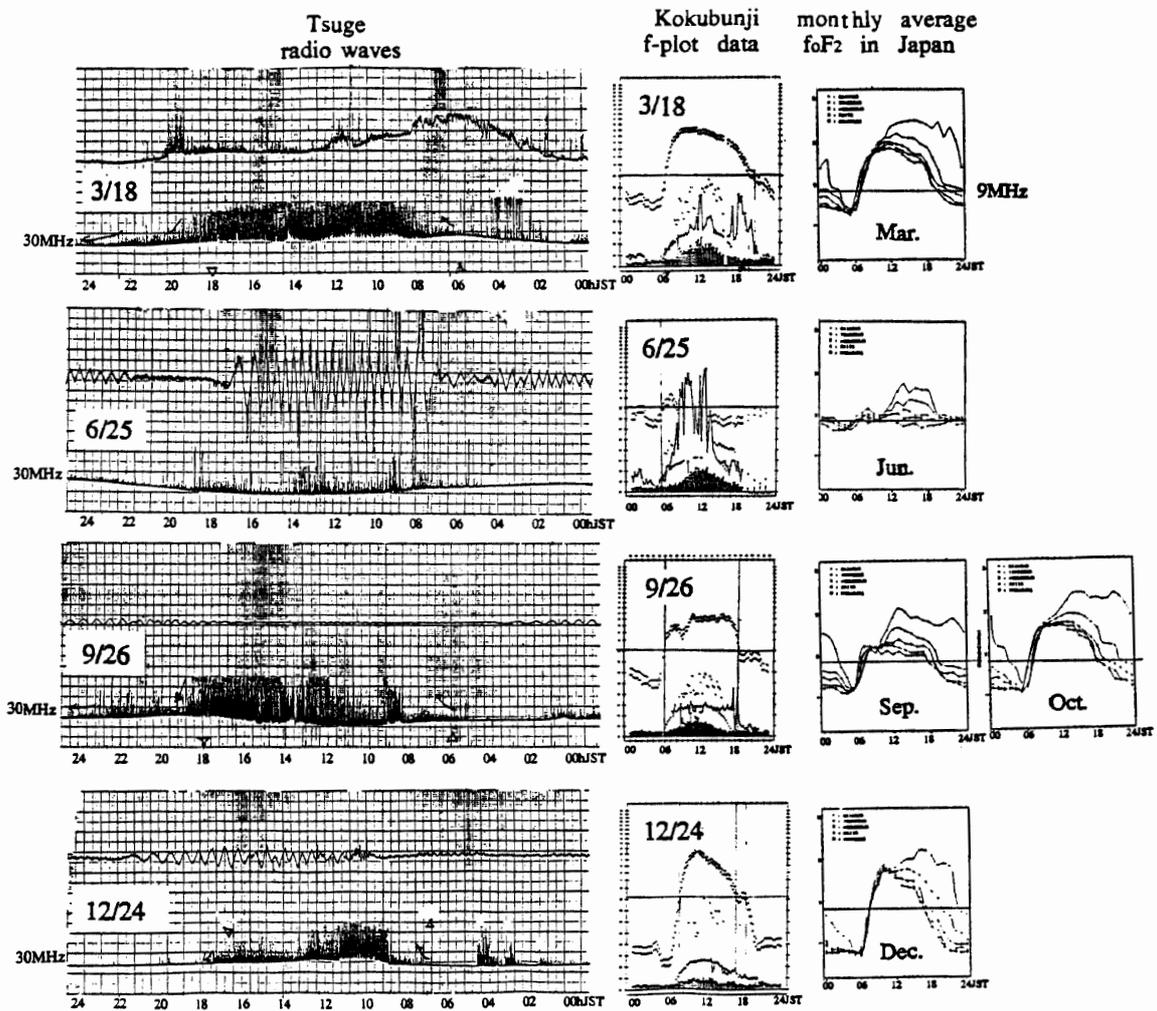


図 9 柘植での混信（兵庫医科大学物理，前田耕一郎氏による）と国分寺での電離層観測による f -プロット（通信総合研による）

Fig. 9. Interference at Tsuge in Japan (observed by K. MAEDA, Department of Physics, Hyogo College of Medicine) and f -plot at Kokubunji (by CRL).

7. 中緯度における 1989 年のデータ解析

中緯度の例として日本での観測を挙げる。30 MHz を受信しているのはリオメーターではなくいわゆる普通の電界強度計であり、三重県柘植市で観測されたものである。他方、電離層データとして国分寺におけるデータを用いる。なお、柘植のデータはすでに図 2 でも取り上げている。

まずは日変化と季節変化をみしてみる。図 9 は春分、夏至、秋分、冬至またはその近傍の日を選んで混信の記録と同日の国分寺の電離層 f -プロットを並べて比較したものである。まずすぐわかるのはその季節変化である。6 月のデータだけ、レベルがほかより下がっている。これは極域の夏季異常とよく対応するが、極域では混信がほとんど無いに等しいのに対し、ここではレベルが低くなるのみで零にはならない (大体 1 年を通して混信のない日はないといってもよい)。そしてそれは、 f -プロットからも見て取れるように、 foF_2 の昼間の値が夏季のみ低い、いわゆる F 層の夏季異常とよく対応している。数値的に見ても夏季は (反射、透過の境界近傍の) 約 9 MHz かそれをやや下回る程度しか foF_2 がない。また、日変化については極域の場合と同じ性質をもっていることもわかる。すなわち、日の出頃から foF_2 の増大とともに混信も出現し始め、日没後暫くしてから (数時間後のことが多い)、 foF_2 が約 9 MHz を割る頃に混信も急激に衰える。 foF_2 と混信のよい対応について、もう一例挙げておく。それは図 10 で、6 月 10 日の夕方から 11 日の午前にかけての両者の対応は非常に良い。6 月 10 日 2100JST 前後の foF_2 の低下と混信の消滅や、6 月 11 日 0300JST 頃も同様である。なお、図 9 中、3 月 18 日 0200-0430JST 頃の雑音は近雷によるものである。

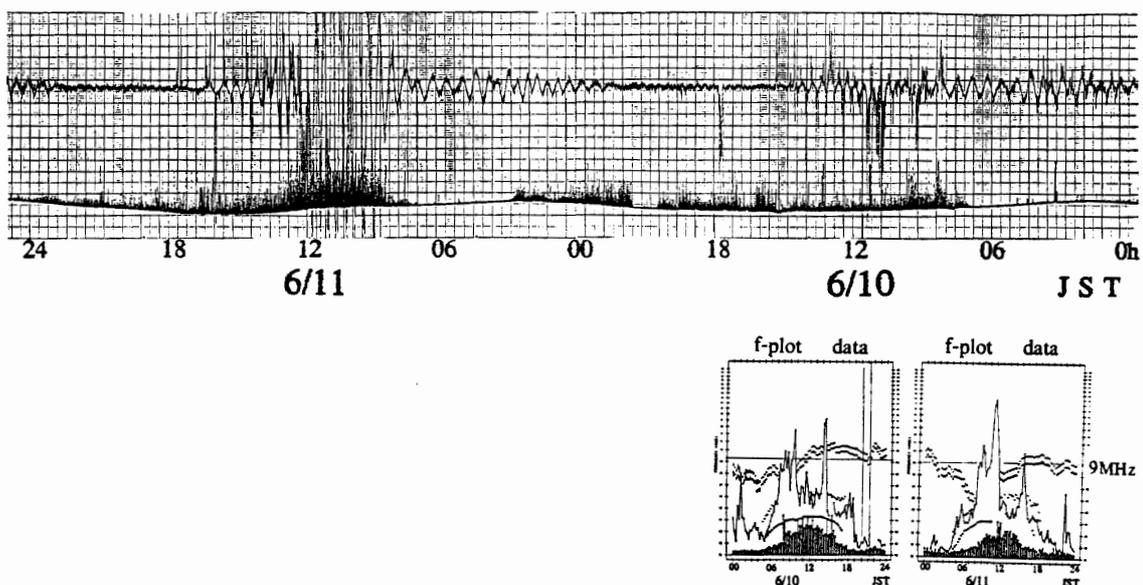


図 10 混信と foF_2 の対応関係 (柘植と国分寺)

Fig. 10. Relationship between interference at Tsuge and foF_2 at Kokubunji.

次に、データは挙げないが、そのほかの性質をあたってみる。地磁気じょう乱との関係を見ると、5.1 章 3) で挙げたじょう乱の期間、柘植では混信はほかの日と変わることなく出続けており、国分寺の foF_2 もまた、両日に大きな差異は認め難い。これは、SC や PCA like な吸収についても言えることである。じょう乱の影響は少なくとも混信で見るレベルでは極域 (サブオーロラ帯も含む) に限られて現れるということであろう。

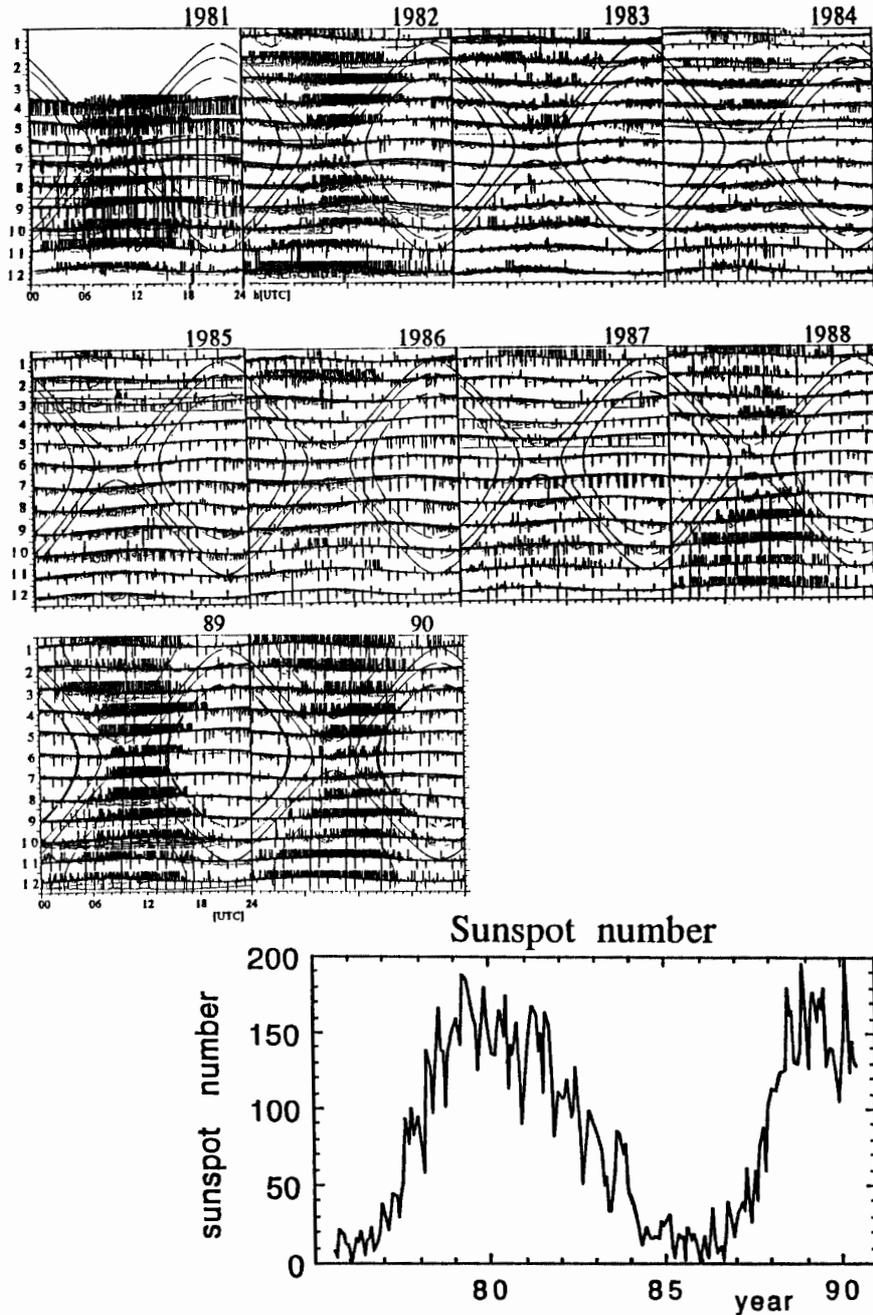


図 11 昭和基地における混信の経年変化と太陽点数の変化
 Fig. 11. Annual variation of interference signals at Syowa and sunspot number.

8. 昭和基地における経年変化

これまではすべて、太陽活動が極めて活発であった 1989 年のデータに基づいて見てきたが、ここでは 10 年間の経年変化を見る。これは昭和基地でのリオメーターのデジタル記録が残されているもののすべてである。10 年間の一連の混信の変化 (図 11) を見ると、1981, 1982 年と 1988 年の後半から 1990 年にかけてがよく出現しているが、1983~1987 年の期間はその頻度が激減しているのがわかる。わずかに出現しているのは 1984 年 3, 4 月と 1983 年 5 月 (と 10 月), 1986 年の 2 月位である。

この事実は当然太陽活動度との関連を想起させるが、実際に図 11 に示すが如く、太陽黒点数の変化と同様の変化をしている。なお、混信の少ない期間中であっても混信が増加している 1984 年 3, 4 月と 1983 年 5 月は、黒点数が多い月にあたり、また 1983 年 10 月は黒点数変化の小規模の極大になっている。さらに、1986 年 2 月には比較的大きな太陽バーストが起こっている。

太陽黒点数は太陽活動度を表すよい指標のひとつであって、これが太陽の 10.7 cm の放射フラックス ($F_{10.7}$) と大変良い相関にあることもよく知られていることである。そして太陽放射の増減に応じて地球電離圏の電離生成率も消長し、すなわち foF_2 も変化することは容易に想像できるし、またその強い相関は昭和基地の foF_2 データを用いて裏付けられている (IGARASHI *et al.*, 1991)。その中で、 foF_2 そのものというよりも、 foF_2 のピーク値の変化が 10.7 cm 放射とよい相関にあることを示しているが、これが正に、混信が出現するか否かを決めていると言える。

9. 曜日依存性

これまでの解析で混信出現の大筋が見えたので、最後にこれまでのデータの中でも最も混信がよく出ていてデータが良質のあすか観測拠点及び昭和基地 1989 年のデータに戻ってもう一度眺め直す。

ここでは見方を変えて、1989 年の Kp -diagram に混信出現の様子を重ね書きしてみる (図 12)。

混信が皆無である日の分布は大概、5 章で調べたようになっていることが確かめられる。すなわち、1, 2, 12 月は夏季のため、また 8, 9, 10 月には大きな太陽活動があったため、さらにそのほかは地磁気じょう乱によるものである。ただし 3 月中旬の大磁気嵐の時は特異であって、混信も変則的である。

ところが、そのほかの日はすべて混信が昼間に活発に出ているというわけではないのである。夏季異常にも当たらず、大きな太陽活動もなく、しかも Kp 値も十分小さい値であるにもかかわらず、混信の極めて少ない日 (特異日) が存在した。

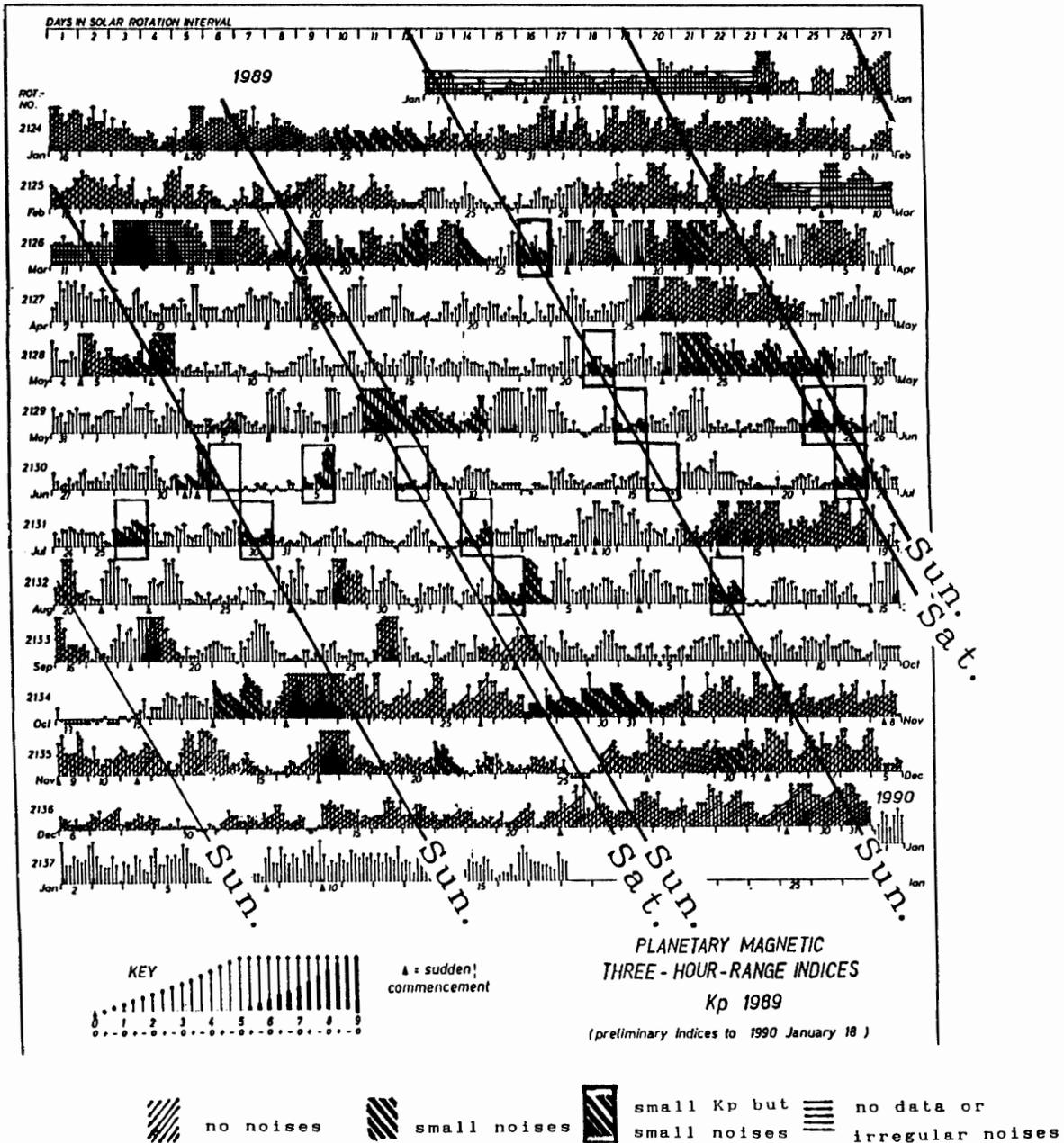


図 12 あすか観測拠点における 1989 年の Kp 指数と混信
 Fig. 12. Kp diagram and interference at Asuka Station in 1989.

例えば 7 月 2 日や 5 日は 1 日に起きた SC と地磁気の小さなじょう乱による影響があるかもしれない。しかし例えば 5 月 21 日や 7 月 16 日等は何故混信が少ないのか、電離層のデータが不十分で何とも言えないが、先に引用した Kerguelen の foF_2 は 5 月 20 日と 21 日、21 日と 22 日の間に特に大きな違いは見当たらないのである。

このような日を Kp-diagram 上に求めると、上述の 7 月 5 日と 7 月 26 日を除くと残りの 13 例はダイアグラム上である直線群上に乗っている。それは日曜日の直線と土曜日の直

線なのである。前者が 10 例，後者が 3 例である。

もちろん日曜日でも混信の出ている日はある。しかしながら，混信の発生条件が電波伝搬経路と雑音源の時空間分布とにより決定されると考えると，特異日は伝搬に関してはその障害となるものが見当たらず，しかもそれらが地球電磁気的自然現象とは全く何の関わりもない土曜，日曜に集中するのである。

10. 考 察

まず，ブリザードと混信に相関がなかったが（この研究には好都合であったが），その理由は不明のままであるので，今後もっと深く追究される必要がある。

次に，電離層伝搬としての解析であるが，ここでは伝搬や吸収を考える際に，すべて球面電離層近似を用いて考えた。そして伝搬については反射のみ，しかも F_2 層による反射のみを考えている。30 MHz 帯なので，臨界周波数からみて D 層や E 層での反射は考えられないが， E_s 層については考慮する必要がある。伝搬形態については反射のみならず，散乱によるものや，電離層の構造からくる幾何光学的でない伝搬も考えられよう。ここでは反射以外のものは power の点で十分反射に比べて小さいという前提の下に，散乱については考慮していない。また， E_s 層についてもその出現が大変変則的であるため（統計的に見た出現頻度の規則性は混信のそれと一致もしない）， F 層反射のみで理解できる枠内で議論している。しかし，吸収に関しては E_s 層も十分にその役割を担っているはずである。したがって，本論文では第一近似として定性的な議論をまず試みたわけで，細かく見れば E_s の影響を考えずに説明の難しい所もあるが，混信の全体像をあるいは最も特徴的な部分をとらえる鍵となるのは，基本的に F 層反射であることは十分示せたものと思われる。

しかし，どうしても首尾一貫した説明が出来ないものがあって，それが逆に曜日依存性を示していたのである。統計的に見ればこれは有意と思われるが，もっと深めてその到来方向やその雑音源の出力の評価などが可能になれば，推論の域を脱することができるであろう。

また，混信の到来方向がはっきりすることができれば，逆に今度はこれを用いて，伝搬経路（反射点）の電離層のモニターをしていたということになり，リオメーターを用いて通信回線による伝搬実験と同様のことが行えることになる。また，磁気嵐時のサブオーロラ帯の電離層の情報を与えるものともいえる。

なお，HF 帯（数 MHz 帯）の伝搬に関しては，昼よりも夜間の方が伝搬しやすいとされるが，これは夜でも HF 波が電離層で反射できてしかも夜の方が吸収による減衰が少ないためと考えられる。一方，30 MHz 帯に関しては，夜間には電離層を透過するため遠方まで伝わらないが，昼間には減衰は小さくないとはいえ伝搬が可能であるために，混信は昼間に多く発生するということになる。その減衰も今後評価してゆく必要がある。

また， F 層と混信との多くの関係が明らかになったが，これを電離層モデルや ISS-b 衛星

等による foF_2 の世界分布図や、極域における電離層の挙動についての研究とあわせて、さらに定量的な研究が必要になるであろう。

さらに、曜日依存性は、リオメーターの混信の雑音源が自然電波ではなく、人工雑音の方が主要部を占めることを示している。しかもこのことは、(曜日依存性のない) 放送局のようなものではなく、(総体として週末に低下する) 大都市等での社会活動や人間活動の中から出てくるいわゆる電波雑音が積もり積もってリオメーターに混信を与えているのではないかと推論させる。その源のある場所なり地域なりが同定できれば、そこにおける人工電波をモニターしていることになって、人間活動領域あるいは地球規模でみた電波環境についてのよいデータを与えるものとなるのではないかと期待できる。

11. 結 論

30 MHz リオメーターに入る混信は、直接波の混入と太陽バーストの受信を除けば、遠方から電離層を介して到達した電磁波であると考えることができ、その出現の仕方は次の如き性質をもっている。

- 1) LT 依存性があり、基本的に foF_2 の高い昼間に出現し、 foF_2 の消長に対応して午前午後で非対称となる。
- 2) F 層の夏季異常に対応して、夏季に、極域ではほとんど現われず、中緯度では強度が減少する。
- 3) 地磁気じょう乱の数日間、サブオーロラ帯での foF_2 の低下や D 層での吸収に伴い、極域で消失する。
- 4) SC の直後、 D 層への粒子降下に伴い、極域で消失することがある。
- 5) PCA like な吸収時に、太陽からの X 線または高エネルギー粒子による主に D 層の異常電離によって、極域で消失する。(太陽活動度が低い年には逆にこの時出現する。)
- 6) 太陽黒点数と電離層電子密度の関係によって、太陽活動度に顕著に依存した経年変化を示す。
- 7) 日曜日や土曜日には出現頻度が減少する。

これらは F 層による伝搬特性と雑音源の時空間分布特性との重ね合わせとして、理解することができる。

謝 辞

あすか観測拠点でのリオメーター観測に関し、適切な指導をして頂いた山岸久雄氏(国立極地研究所)に感謝の意を表します。また、柘植での電波観測データに関し、これを快く見せて下さり、貴重な助言をして下さった前田耕一郎氏(兵庫医科大学物理)に心より謝意を

表します。また、昭和基地の電離層データや通信業務日誌等に関し、通信総合研究所の山本伸一氏 (30 次電離層)、前野英生氏、小川忠彦氏、五十嵐喜良氏、また電波監理局の塩田氏、国立極地研究所観測協力室の方々、日本アマチュア無線連盟より助言、助力を賜ったのでここに謝意を表します。さらに、1981-1990 年のリオメーターのデータは国立極地研究所のオーロラデータセンターから入手した。また、このデータ解析に対し、K. DAVIS 氏に、議論する時間を割いて頂き、貴重な助言を賜ったことに対して深く謝意を表します。さらに、この研究をまとめるにあたり、ご指導下さった荒木徹先生 (京都大学) と、京都大学理学部地磁気世界資料解析センターの方々に、またこの論文の執筆でお世話になった佐藤夏雄氏 (国立極地研究所) に、深く感謝致します。

最後に、南極での観測及び越冬について、杉浦正久先生 (東海大学) には暖かき支援を送って頂き、またその準備と越冬では江尻全機越冬隊長 (国立極地研究所)、昭和基地越冬宙空系門倉昭氏 (国立極地研究所) をはじめとする第 30 次観測隊のすべての隊員の方々と国立極地研究所及びその周辺の方々、また多くの友人より強力なサポートを頂いた。ここに記して深謝致します。

文 献

- GERSON, N. C. (1964): Polar radio noise. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 531-533.
- IGARASHI, K., KATAOKA, H., KATO, H. and MAENO, H. (1991): Solar variability effects on the ionospheric parameters from Feb., 1969 To Mar., 1987 obtained by ionosonde at Syowa Station, Antarctica. The 14th Symposium on Coordinated Observations of the Ionosphere and the Magnetosphere in the Polar Regions, Programme and Abstracts. Tokyo, Natl Inst. Polpr Res., 28.
- KAMADA, T. and TOKUDA, S. (1971): Arrival direction and occurrence frequency of atmospherics at Syowa Station in Antarctica. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **41**, 24-33.
- 村永孝次 (1974): 極地方の自然雑音について. 電波研季報, **20**, 281-298.
- 西端美樹・丸橋克英・加藤仲夏 (1988): ISS-b 衛星で観測された短波標準電波帯の地上電波雑音. 電波研季報, **34**, 221-229.
- 杉内英敏・山崎一郎・城 功・小宮紀旦 (1979): 東京-昭和基地回線における JJY 10 MHz 波の伝搬特性. 南極資料, **65**, 119-134.
- 高橋 達・水戸部 温 (1960): 降雪時電波雑音について. 電波研季報, **6**, 239-247.
- YOSHINO, T. (1961): Radio wave propagation on the ice cap. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **11**, 228-233.

(1992 年 3 月 26 日受付; 1992 年 5 月 27 日改訂稿受理)