

## ELF 波動のみずほ—昭和基地同時観測

佐藤夏雄\*・福西 浩\*・巻田和男\*\*

### ELF Emissions Simultaneously Observed at Syowa and Mizuho Stations

Natsuo SATO\*, Hiroshi FUKUNISHI\* and Kazuo MAKITA\*\*

**Abstract:** Simultaneous observations of ELF-VLF emissions, magnetic variations, cosmic noise absorption and auroras have been carried out at Syowa and Mizuho Stations since June 1976. Mizuho Station is located at a distance of ~270 km poleward on the same magnetic meridian as that of Syowa. From the ELF emission data observed at both the stations, the following results were obtained

- 1) Frequency-time spectra of ELF chorus emissions were quite similar at both the stations. However, it is found that the intensity in the lower frequency range (<1.5 kHz) is greater at Mizuho than at Syowa, and *vice versa* in the higher frequency range.
- 2) The period of QP emissions was same at both the stations.

**要旨** 地磁気子午面に沿って約 270 km 離れた昭和基地とみずほ基地において、地磁気、地磁気脈動、オーロラ、ELF・VLF 波動、オーロラ等の同時観測を行った。この論文では、ELF 波動の強度比およびスペクトル構造の相違についての解析結果を報告する。その結果は、1) 周波数-時間スペクトルは非常に似ている。2) 発生周波数の強度比はみずほ基地では低周波数帯域が強く、昭和基地では高周波数帯域が強い。3) QP エミッションの周期は全く同じである。

### 1. はじめに

1976 年 6 月から昭和基地とみずほ基地において、2 点同時観測を実施した。同時観測を行った項目は、地磁気 3 成分、地磁気脈動成分、ELF・VLF 自然電波、リオメータ、オーロラ TV カメラ観測である。なお、みずほ基地は、昭和基地から地磁気子午面に沿い約 270 km 離れた地点に 1970 年 7 月に設置された基地である。昭和基地（地磁気座標、 $-70.03, 79.37$ ）とみずほ基地（地磁気座標、 $-72.32, 80.69$ ）の位置関係を図 1 に示す。

この論文では、ELF・VLF 帯自然電波のなかでも特に 0.3~3 kHz の周波数帯域を持つ ELF

\* 国立極地研究所 National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173  
 \*\* 東京大学理学部地球物理研究施設 Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

コーラスエミッションについて: 1) 周波数-時間 ( $f-t$ ) スペクトル型, 2) その強度比と地磁気脈動との関係, 3) 昭和基地で観測した ELF 帯電波到来方位観測結果と, 2 点間の強度比およびそのスペクトル構造との関係について述べる.

昭和基地で受信される ELF エミッションは, 明け方 (01 h~06 h MLT) 脈動オーロラに伴

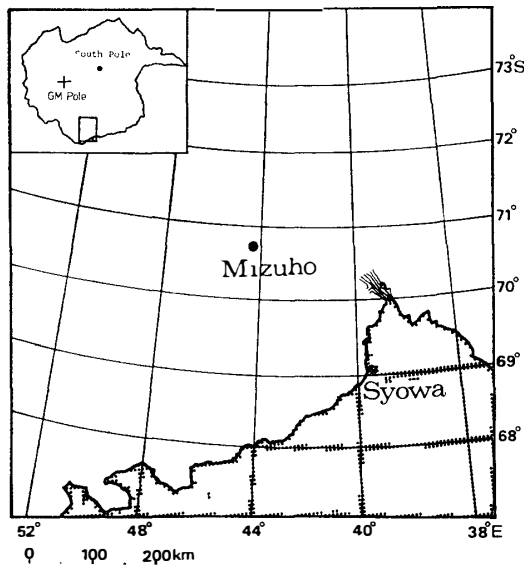


図 1 昭和・みずほ基地の位置関係

Fig 1 Location of Syowa and Mizuho Stations

って出現するオーロラコーラスと, 昼間 (06 h~16 h MLT) に主に出現する polar コーラス (daytime コーラス) とに分類される (HAYASHI and KOKUBUN, 1971; KOKUBUN *et al.*, 1969). 一方, ELF エミッションの衛星による観測も進められており, 電離層高度での観測 (TAYLAR and GURNETT, 1968; THORNE *et al.*, 1977) や, 磁気圏内での観測 (RUSELL *et al.*, 1969; BURTON and HOLZER, 1974) の結果によれば, エミッションの受信時刻・受信場所の分布は定性的には地上観測の結果と一致している.

これらの観測事実から, ELF コーラスエ

ミッションは磁気圏内の赤道面付近で, ピッチ角異方性による電子—サイクロトロン共鳴によって発生していると予測される. また, TSURUTANI and SMITH (1974) によれば, エミッションの発生周波数は, 磁気圏内のその場所での電子ジャイロ周波数の 1/4 にピークを持っている. これらの点から, 地磁気子午面に沿った 2 点で同時観測を行うことは, 波の発生領域や伝搬特性を知る上で重要である. なお, 昭和基地・みずほ基地の観測システムの詳細は, 巻田他 (1977) に記載されている.

## 2. 観 測 結 果

### 2.1. 1976 年 10 月 21 日 event

図 2 は, 1976 年 10 月 21 日 10 時 UT から 16 時 UT までの間に, みずほ基地と昭和基地で同時観測した ELF 帯エミッションの 0.75 kHz・1.0 kHz 強度, および地磁気脈動  $H$  成分の強度記録を示す. 10 h 30 m-11 h 05 m, 11 h 15 m-11 h 45 m, 13 h 45 m-14 h 20 m UT に, ゆっくりしたエミッションの強度変動が 2 点とも同時に起きていることがわかる. また, 地磁

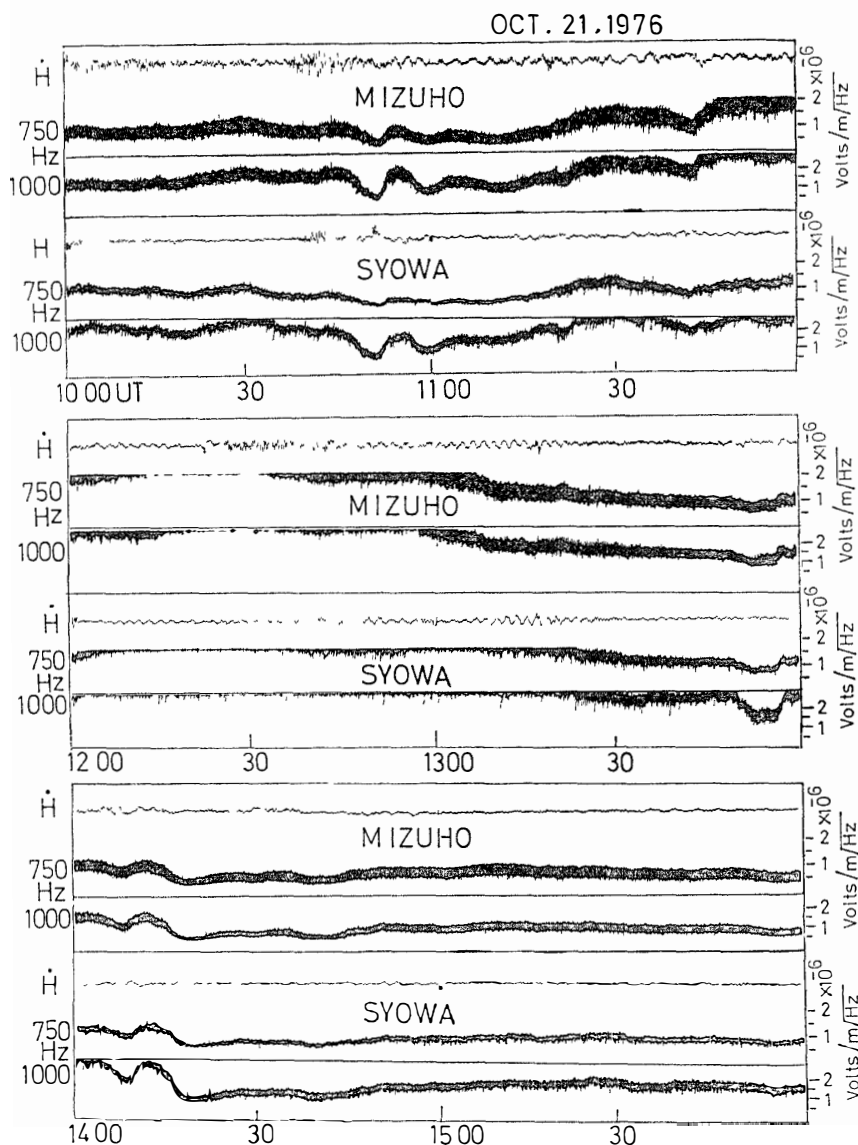


図 2 1976年10月21日10時-16時 UTにおいて、昭和・みずほ基地で同時に受信された ELF エミッションの 0.75 kHz・1.0 kHz 帯と地磁気脈動の強度記録

Fig 2 Intensity records of ELF chorus emissions and the H components of magnetic pulsations observed at Mizuho and Syowa Stations

気脈動の強度変化も定性的には同じ傾向を示している。

図 3 には、図 2 と同時刻における ELF エミッションの  $f-t$  スペクトルが示されている。定性的に言えば、スペクトルの時間変化と高周波数側および低周波数側のカットオフは、両基地とも同じである。なお、昭和基地のスペクトル上に現れている 1.0 kHz 固有バンドは、コンソメータのキャリア信号である。

図 4a, b は、図 3 に記入した時刻 A・B・C におけるスペクトル構造の拡大図を示す。時

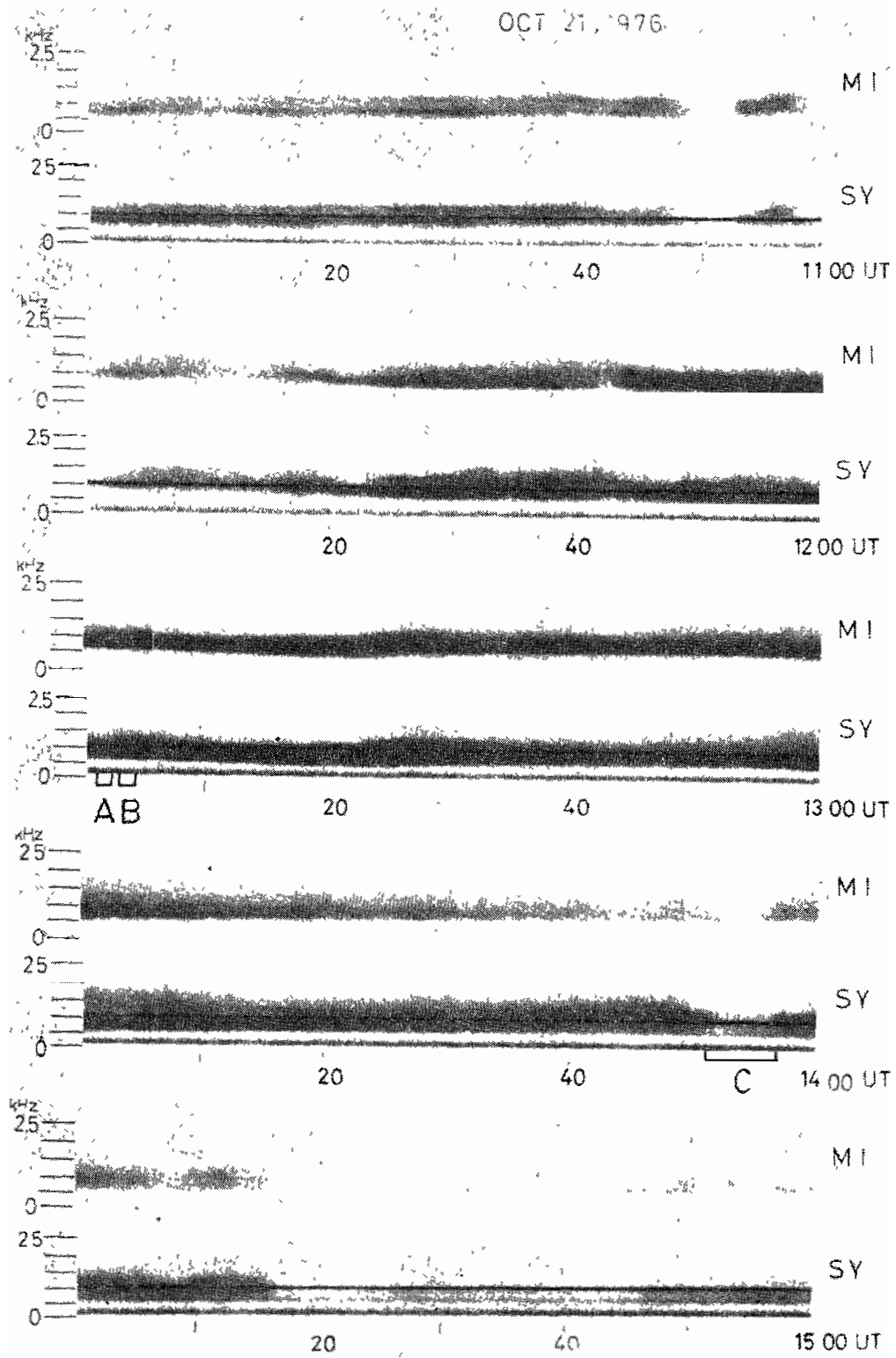


図 3 1976年10月21日10時-16時 UTに、昭和・みすほ基地で同時に受信された ELF エミッションの  $f-t$  スペクトル。

Fig 3 Frequency-time spectra of ELF chorus emissions which are presented in Fig 2

刻 A・B では、0.6~1.2 kHz の diffuse なヒスのスペクトルの中に、強い rising tone の discrete エミッションが含まれている現象がみられる。この図によれば、定性的には discrete エミッションは昭和基地で強く、diffuse エミッションはみすほ基地で強い。また、時刻 C において、ホイスラーモートの波動が磁力線に沿って往復し、規則的な周期（昭和基地では 3~4

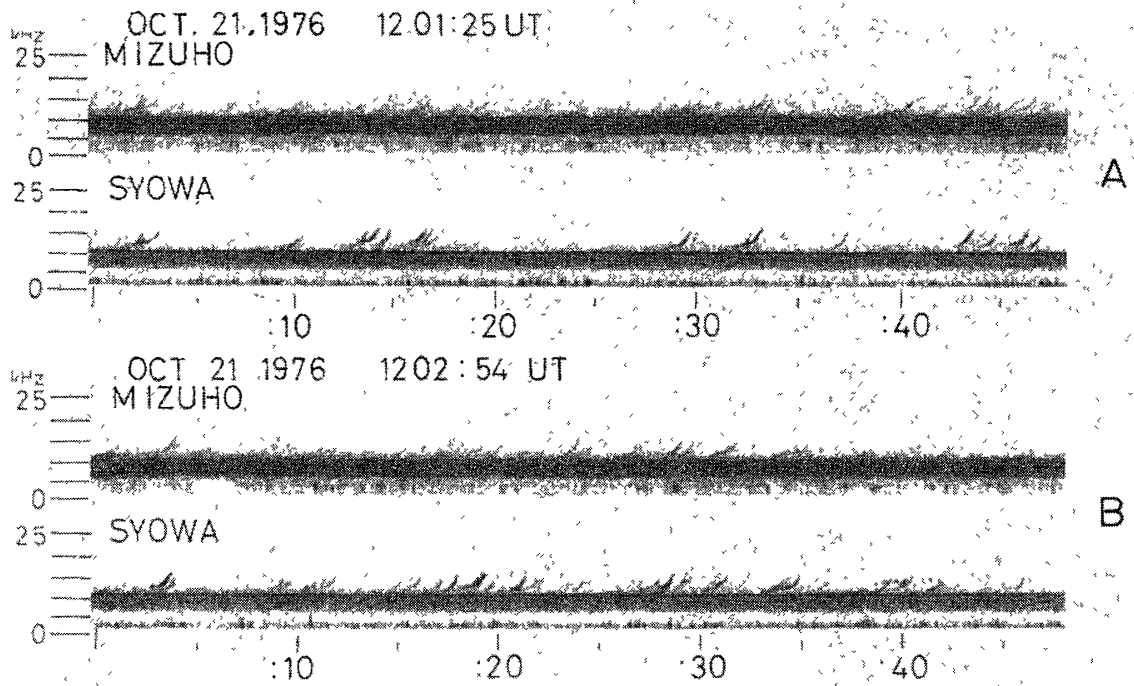


図 4a 図 3 の時刻 A・B において、時間スケールを拡大した  $f-t$  スペクトル図。Discrete エミッションが同時に両地点で観測されているか、昭和基地の方が強度は強い。

Fig 4a Frequency-time spectra of discrete emissions in the time intervals of 1201 25-1202 15 UT and 1202 54-1203 50 UT on October 21, 1976 (cf Fig 3)

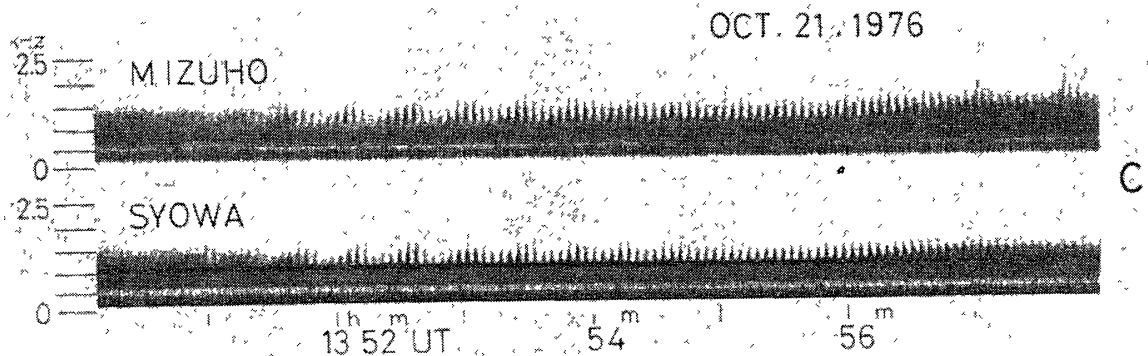


図 4b 図 3 の時刻 C において、時間スケールを拡大した  $f-t$  スペクトル図。ここでは、QP 的変調を受けた periodic エミッションが、両基地同時に受信されている。

Fig 4b Frequency-time spectra of periodic emissions in the time interval of 1350-1358 UT on October 21, 1976 (cf Fig 3)

秒の周期が主に受信される)を持つ periodic エミッションが、13 h 51 m~13 h 58 m UT 間に受信されている。さらに、この periodic エミッションは、周期約 30 秒の準周期的な変調を受けている。なお、両基地で受信した periodic エミッション、およびその準周期的な変調スペクトル等の受信時刻・周波数は同じである。

## 2.2. 2 点間の強度比と到来方向

Daytime ELF エミッションの観測結果および理論的裏付けから、エミッションは磁気圏の赤道面付近で、電子のピッチ角異方性による電子-サイクロトロン共鳴によって発生していることが予測される。TSURUTANI and SMITH (1974, 1977) によれば、エミッションの発生周波数は磁気圏内の局所シャイロ周波数の 1/4 にピークを持つことがわかる。さらに、昭和基地およびみずほ基地を通る磁力線の最小磁場強度は  $135\gamma$ ,  $83\gamma$  であり、最小電子シャイロ周波数は 3.8 kHz, 2.3 kHz であるため、エミッションの発生周波数が赤道面付近では異なるものと予想される。このエミッションがダクト伝搬によって地上付近まで伝わってくるならば、地上で観測したスペクトル上でも 2 点間で周波数の強度比が異なり、みずほ基地では低周波数帯域が強まることが予測される。

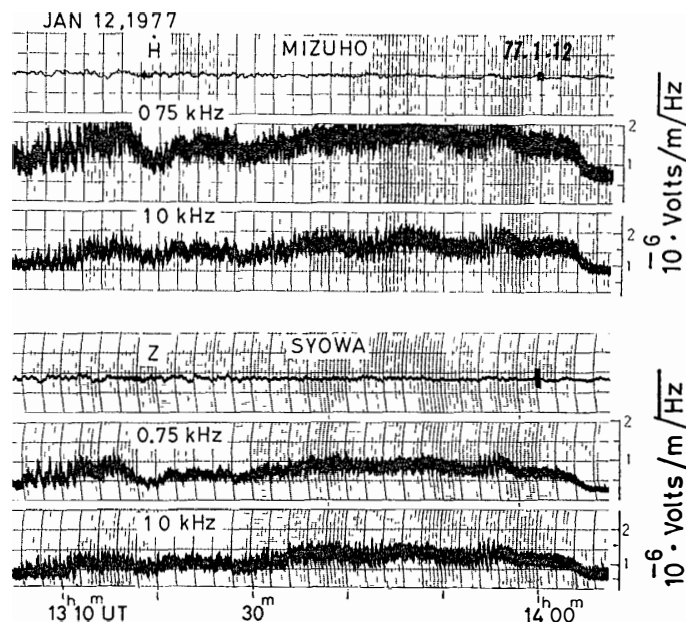


図 5a これは、昭和・みずほ基地で同時に観測された、ELF エミッションの 0.75kHz・1.0kHz 帯強度および地磁気脈動を示す。この図では、みずほ基地で受信されたエミッションの方が、0.75kHz 帯で 2 倍、1.0kHz 帯で 1.5 倍昭和基地より強い。

Fig 5a. Intensity records of ELF chorus emissions and magnetic pulsations observed at Mizuho and Syowa Stations. It is found that the intensity in the lower frequency range is greater at Mizuho than at Syowa.

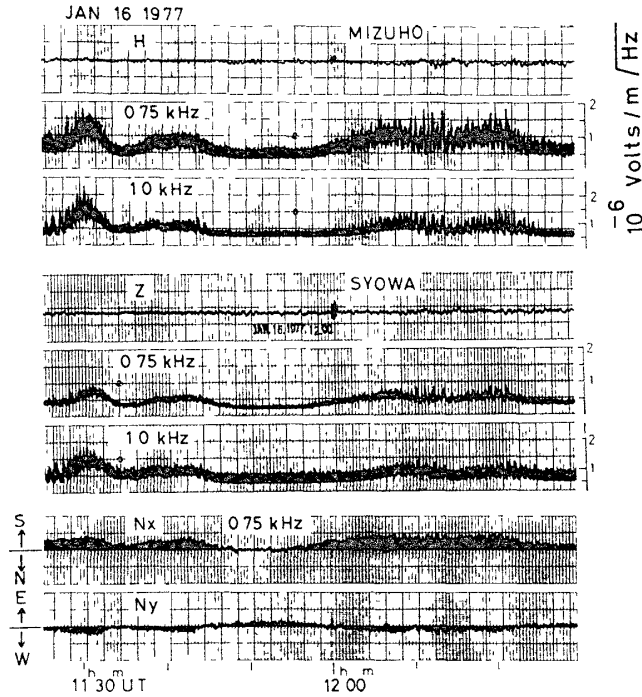


図 5b この図は、みすほ・昭和基地で同時観測した、ELF エミッションの 0.75 kHz・1.0 kHz 帯強度と地磁気脈動および、昭和基地で観測した 0.75 kHz 帯におけるエミッションの到来方向の南北成分・東西成分を示す。ここでは、0.75 kHz 帯強度はみすほ基地の方が約 2 倍大きく、エミッションの到来方向は昭和基地の南側からであることが分かる。

Fig. 5b. Upper two pannels show intensity records of ELF chorus emissions and magnetic pulsations observed at Mizuho and Syowa Stations. Lower pannel shows the arrival directions of 0.75 kHz emissions observed at Syowa Station. Nx and Ny denote north-south and east-west components, respectively. It is found that 0.75 kHz band emissions were incident from southward of Syowa

図 5a は、0.75 kHz・1.0 kHz 帯強度および地磁気脈動の昭和-みすほ基地同時観測の例である。この図から明らかなように、0.75 kHz 帯強度はみすほ基地の方が昭和基地より 2 倍強い。一方、1.0 kHz 帯強度も約 1.5 倍みすほ基地の方が強い。この結果より、高緯度側ほど低周波数帯域が強いことがわかる。この特性は、衛星観測の結果と定性的に一致している。

昭和基地では、1974 年以降 Tsuruda-Hayashi (1975) 方式による FLF・VLF 方探観測を連続的に実施している (Sato and Hayashi, 1976; 巻田他, 1977)。そこで、ELF 方探観測結果と、2 点間で観測されたエミッションの強度比とを比較してみる。図 5b は、みすほ基地と昭和基地での 0.75 kHz・1.0 kHz 帯強度および地磁気脈動と、昭和基地で実施された 0.75 kHz 帯方探観測により得られた南北成分および東西成分の入射角を示す。この図から 0.75 kHz 帯強度は、みすほ基地の方が約 2 倍強いことが明らかになる。この時、昭和基地で観測

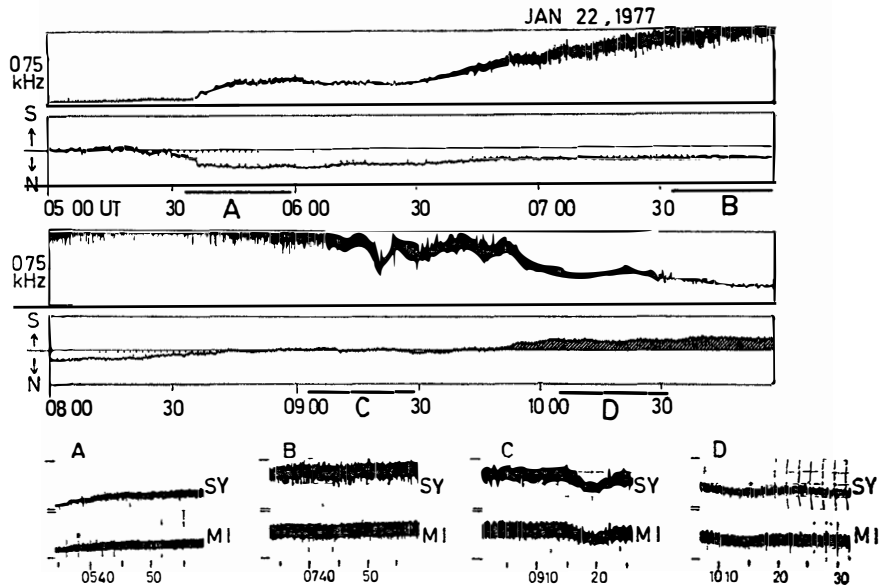


図 6 この図は、昭和基地で受信した 0.75 kHz 帯強度とその到来方向の南北成分、および時刻 A・B・C・D における昭和・みずほ基地での、0.75 kHz 帯強度記録を示している。

Fig. 6. Upper two panels show the 0.75 kHz intensity record and arrival direction (Nx) of 0.75 kHz emissions at Syowa Station. Lower panel shows Syowa and Mizuho Stations intensity records of 0.75 kHz band ELF emissions in the two time intervals A, B, C and D.

した 0.75 kHz 帯の到来方向としては、昭和基地よりかなり南側（高緯度側）から到来していることがわかる。また、みずほ基地は昭和基地より南側に位置しているため、この方探結果は、2 点間の強度比から予測されるエミッションの電離層からの出口の方向と、定性的に一致している。

図 6 は、エミッションが、受信され始める朝方時には北側から到来し、昼時になるにつれて南側へ移動する例である。この例は SATO and HAYASHI (1976) の示した到来方向の日変化特性と同じ傾向を示している。図の上側のパネルには、昭和基地で観測した 0.75 kHz 帯強度とその到来方向の南北成分が、下のパネルには、時刻 A・B・C・D における昭和・みずほ基地での 0.75 kHz 帯強度記録が示されている。エミッションが北側から到来する時刻 A・B では、エミッション強度は、昭和基地の方がみずほ基地より 1.2 倍大きく、到来方向が天頂に近い時刻 C では、両基地ともほぼ同程度の強度である。一方、南側から到来する時刻 D では、みずほ基地の方が 1.3 倍強くなっている。このことより、昭和基地で観測している ELF・VLF 帯自然電波の方探観測結果は、2 点観測の強度比から推測されるエミッションの電離層からの出口方向と、定性的には一致しているといえる。



### 2.3. QP エミッション

図 7a, b は、昭和・みすほ基地で同時に観測された QP エミッションの  $f-t$  スペクトル図である。QP エミッションの周期は約 30 秒であり、rising tone のスペクトル構造はみすほ・昭和基地で同時に受信されている。さらに、QP エミッションの微細構造には、周期約 3 秒の periodic エミッションが含まれており (11 h 17 m–11 h 19 m, 11 h 31 m–11 h 36 m)、この periodic エミッションも両基地で同時に受信されている。図 7 のスペクトル図から、エミッションの発生周波数の強性比を比較すると、0.5–1.0 kHz の低周波数帯域の diffuse エミッションは、みすほ基地の方が強いことが分かる。

図 8 は、November 19 event の 11 h 15 m–11 h 25 m UT 間において、FFT 法によりスペクトル解析をした周波数-振幅図である。この図から明らかなように、0.5–1.0 kHz 低周波数帯域と、1.0–1.5 kHz の高周波数帯域との 2 つのピークが両基地に認められる。しかし、みすほ基地では、低周波数帯が高周波数帯より 10 dB 以上パワーが大きい。一方、昭和基地では低周

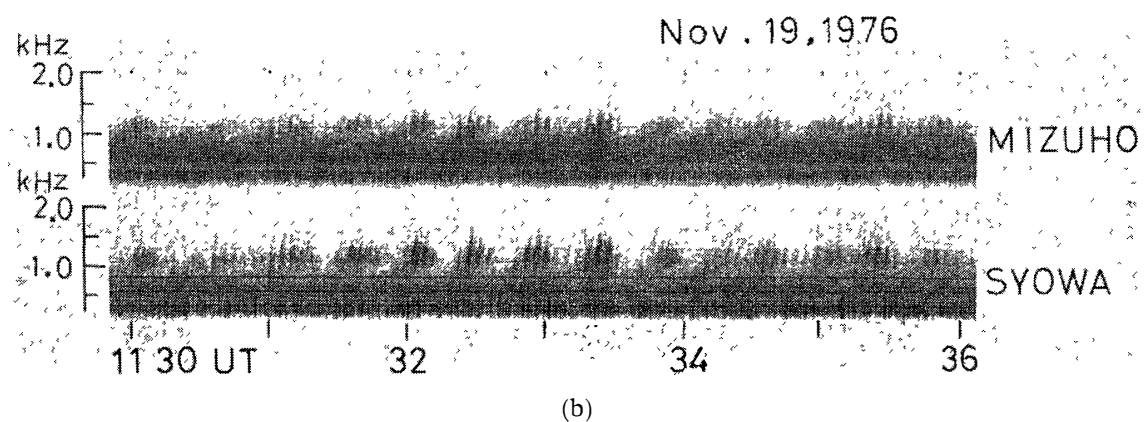
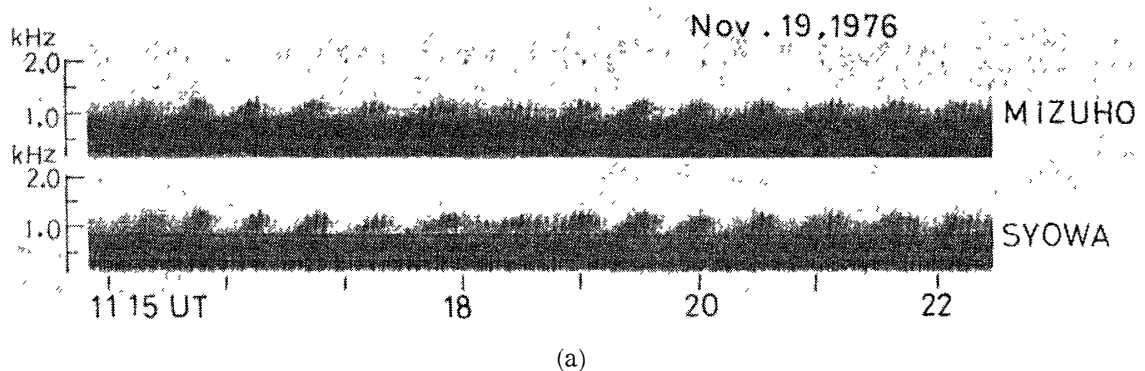


図 7 みすほ・昭和基地で同時に観測された、QP エミッションの  $f-t$  スペクトル図。QP エミッションの周期は、両基地でまったく同様に同時に現れている。

Fig 7 Frequency-time spectra of QP emissions. The periods and the start time of QP emissions were same at both the stations.

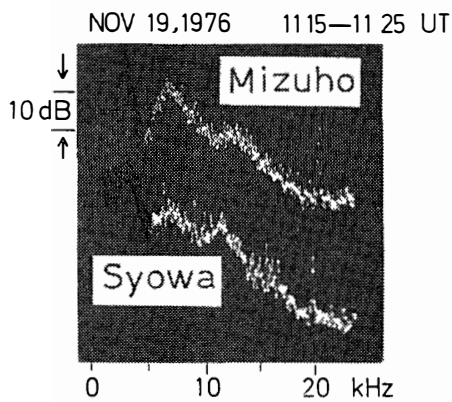


図 8 QPエミッションが発生している11月19日 11 h 15 m-11 h 25 m UTにおける、その振幅-周波数スペクトル図 この図より、みすほ基地の方では低周波数帯域 (0.5-1.0 kHz) が高周波数帯域 (1.0-1.5 kHz) より 10 dB 以上も強く、一方昭和基地ではその差は数 dB 以下であることが分かる

Fig 8 Power spectra of QP emissions in the time interval of 1115-1125 UT on November 19, 1976 (cf Fig 7) It is found that the intensity in the lower frequency range is greater at Mizuho than at Syowa

波数帯のパワーの値は、高周波数帯域より数 dB 強い程度である。この結果からみても、高緯度ほど低周波数帯域が強いことが分かる。

図 9 は、November 19 event の両基地における QP エミッションの  $f-t$  スペクトル図と、地磁気脈動  $H$  成分図である。この図から、QP エミッションのうち、周期約 30 秒の地磁気脈動が両基地で観測されていることが分かる。

### 3. 考 察

地磁気子午面に沿って約 270 km、地磁気緯度で約 2.3 度離れている昭和基地とみすほ基地で、ELF 帯エミッションの同時観測を行い、次のような結果が得られた。

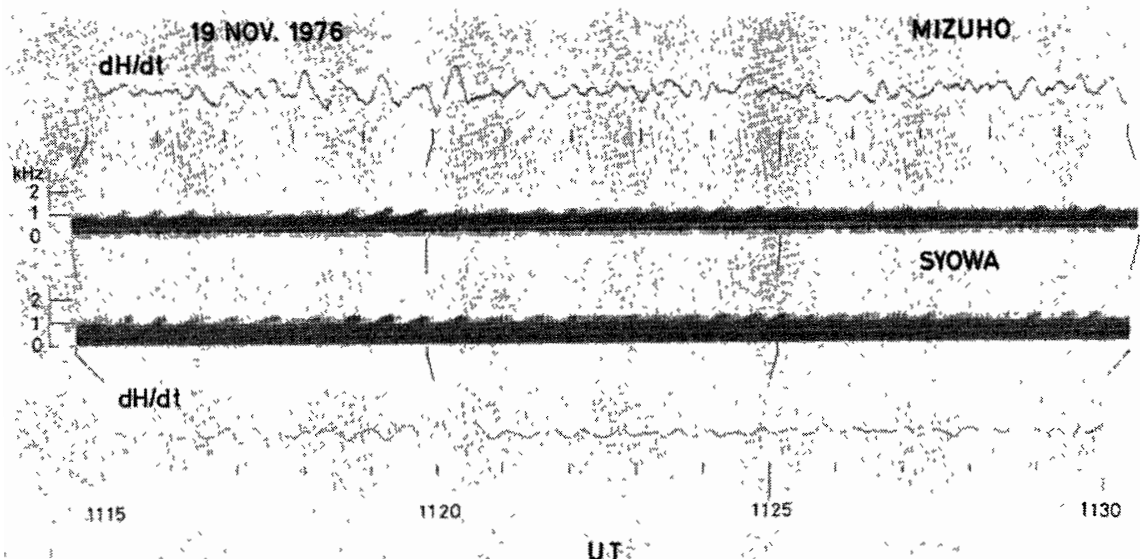


図 9 これは、QP エミッションの  $f-t$  スペクトル図と地磁気脈動  $H$  成分を示す。QP エミッションの周期約 30 秒に対応する地磁気脈動が、両基地において観測されている。

Fig 9. Frequency-time spectra of QP emissions and magnetic pulsations observed at Mizuho and Syowa Stations It is found that QP emissions were associated with magnetic pulsations at both stations

- 1)  $f-t$  スペクトル型は一般に非常によく似ている。
- 2) 発生周波数の強度比は、みすほ基地では低周波数帯域が強い。
- 3) Discrete エミッションにも強度差があり、それは昭和基地の方が強い。
- 4) QP エミッションの周期は両基地とも、まったく同じである。

1) の理由としては、まず ELF エミッションの波長 (150~160 km) に比べて、2 点間の距離が短すぎるものがあげられる。その他、波の発生源の広がりや波の伝搬効果等も考慮する必要がある。2) の理由としては、TSURUTANI and SMITH (1974, 1977) の衛星観測で明らかになったように、エミッションの発生周波数は発生源の地磁気強度に依存し、高緯度側ほど低周波数帯域が強まるという効果によるためと考えられる。3) の特性としては、以下のことがいえる；Discrete エミッションは非常に狭い領域で発生し、タクト伝搬によって地上まで伝わってくるのたか、一方電離層からの出口の広がりも狭いため、270 km の距離でも強度差が認められる。逆に言えば、discrete エミッション以外の ELF エミッションは、発生源にかなりの広がりを持っているものと考えられる。この効果を表しているのが 1)・2)・4) の特性であるといえよう。また、QP エミッションの周期が 2 点でまったく同じであり、かつ低周波数成分ほどみすほ基地で強いことから、rising tone の QP エミッションは、QP 的変調を受ける領域が高緯度側から低緯度側へ 1 周期の間に移動しているために起きるものと、定性的に解釈可能である。

なお、これらの結果をさらに発展させるためには、みすほ基地に ELF・VLF 方探装置を設置したり、みすほ基地よりさらに高緯度側に観測点を設置する必要がある。また、東西方向の観測点網も設置し、地方時依存性も明らかにしていく必要がある。

#### 文 献

- BURTON, R. K. and HOLZER, R. E. (1974) The origin and propagation of chorus in the outer magnetosphere J Geophys Res, **79**, 1014-1023
- HAYASHI, K. and KOKUBUN, S. (1971) VLF emissions during post breakup phase of polar substorm Rep Ionos Space Res Jpn, **25**, 369-382
- KOKUBUN, S., HAYASHI, K. and OGUTI, T. (1969) VLF emission study at Syowa Station, Antarctica, polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation JARE Sci Rep, Ser A, **6**, 34 p
- 巻田和男・仁木国雄・山腰明文 (1977): みすほ観測拠点における超高層観測 日本南極地域観測隊第 17 次隊報告 (1975-77), 162-166
- RUSSELL, C. T., HOLZER, R. E. and SMITH, E. J. (1969) Ogo 3 observations of ELF noise in the magnetosphere, 1. Spatial extent and frequency of occurrence J Geophys Res, **74**, 755-777
- SATO, N. and HAYASHI, K. (1976) Direction finding of ELF emissions in the auroral zone Nankyoku Shiryo (Antarct Rec), **55**, 1-19

- TAYLOR, W. L. and GURNETT, D. A (1968): The morphology of VLF emissions observed with the Injun 3 satellite. *J. Geophys Res.*, **73**, 5615–5626.
- THORNE, R. M , CHURCH, S. R., MALLOY, W J. and TSURUTANI, B T. (1977)· The local time variation of ELF emissions during periods of substorm activity *J Geophys. Res.*, **82**, 1585–1590.
- TSURUDA, K. and HAYASHI, K. (1975) Direction finding technique for elliptically polarized VLF electromagnetic waves and its application to the low-latitude whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 1193–1202.
- TSURUTANI, B. T. and SMITH, E. J. (1974) Postmidnight chorus A substorm phenomena *J. Geophys. Res* , **79**, 118–127.
- TSURUTANI, B. T. and SMITH, E. J. (1977)· Two types of magnetospheric ELF chorus and their substorm dependences. *J. Geophys. Res* , **82**, 5112–5128.

(1978年6月10日受理)