

昭和基地—アイスランド地磁気共役点観測

佐藤夏雄*・勝田 豊*・鮎川 勝*・福西 浩*・平沢威男*

Conjugate Point Observations Syowa-Iceland

Natsuo SATO*, Yutaka KATSUTA*, Masaru AYUKAWA*,
Hiroshi FUKUNISHI* and Takeo HIRASAWA*

Abstract: Conjugate observations of ELF-VLF emissions, geomagnetic pulsations and auroras were carried out at Syowa Station in Antarctica and at Husafell in Iceland from July 29, 1977 to September 18, 1977. Husafell is located at a distance of about 60 km from the conjugate point of Syowa. From a preliminary analysis of the ELF and VLF emission data, the following results were obtained: 1) Conjugacy of auroral chorus emissions observed in the early morning is low. The emission intensity is larger at Husafell than at Syowa. 2) Day-time ELF chorus emissions show a good conjugacy. However, it is found that the intensity in the low frequency range is greater at Syowa than at Husafell, and *vice versa* in the high frequency range. 3) QP emissions are observed simultaneously at the conjugate-pair stations. 4) Conjugacy of auroral hiss emissions is generally low during this observation period. The intensity is much higher at Syowa (winter hemisphere) than at Husafell (summer hemisphere).

要旨 1977年7月29日から9月18日まで、南極昭和基地のほぼ地磁気共役点にあたるアイスランドの Husafell において、フランスとの共同観測を行った。地磁気脈動、ELF・VLF エミッション、オーロラ観測等を行ったが、この論文では ELF・VLF エミッションの解析結果を報告する。それによれば、1) 早朝出現するオーロラコーラスの共役性は悪く、北半球側で強い。2) 昼間現れるコーラスの共役性は良いが、受信周波数は南半球では低周波数帯域が強く北半球では高周波数帯域が強い。3) QP エミッションは両半球同時に受信される。4) オーロラヒスの共役性は悪く、南半球（冬半球）側が圧倒的に強い等のことが明らかになった。

1. はじめに

1977年7月29日から9月18日までの52日間、アイスランドの首都レイキャビックから約100 km離れた Husafell において、フランスとの共同観測を行った。Husafell は昭和基地の地磁気共役点から約60 kmの距離にある。表1に Husafell, Reykjavik, 昭和基地, およびみずほ基地の地理・地磁気座標を示した。また、図1にアイスランドの地図上に Husafell, Reykjavik, および昭和基地とみずほ基地の地磁気共役点の位置を示した。今回アイスランド

* 国立極地研究所 National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173

表 1 地磁気共役点観測を実施した位置
Table 1 Position of conjugate-pair station

Stations	Geographic		Geomagnetic	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Syowa Station	-69 03	39 60	-70 03	79 39
Mizuho Station	-70 70	44 33	-72 32	80 62
Reykjavik, Iceland	64 14	-21 88	69 87	72 41
Husafell, Iceland	64 70	-20 90	70 19	74 24

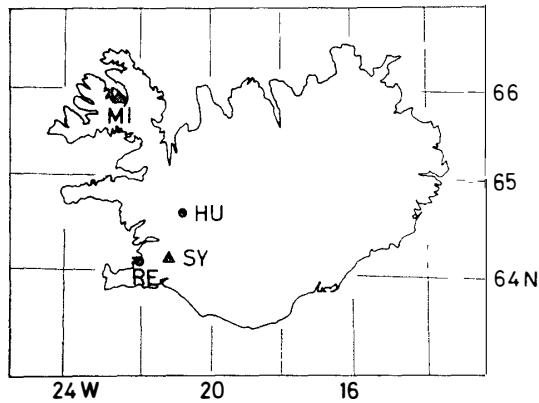


図 1 アイスランドの地図上に、1) 今回の観測点である Husafell, 2) 地磁気ステーションである Reykjavik および、3) 昭和基地と、4) みずほ基地の計算上の地磁気共役点を示す。

Fig. 1 Location of Husafell, Reykjavik and the geomagnetic conjugate point of Syowa and Mizuho Stations.

で観測した項目は、1) 地磁気脈動水平 2 成分、2) VLF 自然電波、3) オーロラ TV カメラ、4) 固定方位フォトメータ (4278 \AA) である。これらの観測項目はすべて昭和基地で連続観測を行っているため、共役点観測の詳しいデータ解析が可能である。この論文では主に ELF・VLF 帯の自然電波の強度比、スペクトル解析結果の速報を示す。

2. ELF コーラスの共役性

図 2 はアイスランド、昭和基地、みずほ基地で受信された地磁気脈動および day-time ELF コーラス放射の 0.75 kHz, 10 kHz 帯強度を示す。放射の突発的な開始、終了が 14 h 14 m, 14 h 24 m, 14 h 44 m, 14 h 51 m, 15 h 03 m, 15 h 09 m UT に起きている。このようなエミッションは、磁気圏内の赤道面付近で電子-サイクロトロン共鳴によって発生している ELF コーラスが、 S_i 的な磁場変動に伴う磁気圏の圧縮や拡大により変調を受けたためであると理解されている (HAYASHI *et al.*, 1968)。

図 2 から、この種のエミッションは、定性的には南北両半球同時に受信されているのが明らかである。しかし、エミッションの発生領域、伝搬特性、および磁場変動 (Alfvén 波) 開始時刻と ELF コーラス (whistler 波) 発生時刻の間の時間差の共役性等の議論を行うためには、さらに詳しい解析を行う必要がある。図 3 は Pc 3 脈動の振幅が大きく、ELF コーラスが、Pc 3 脈動に伴って大きな変調を受けている準周期的エミッション (SATO *et al.*, 1974) の典型的な例である。図から明らかなように、脈動に伴った準周期的エミッション (QP エミッショ

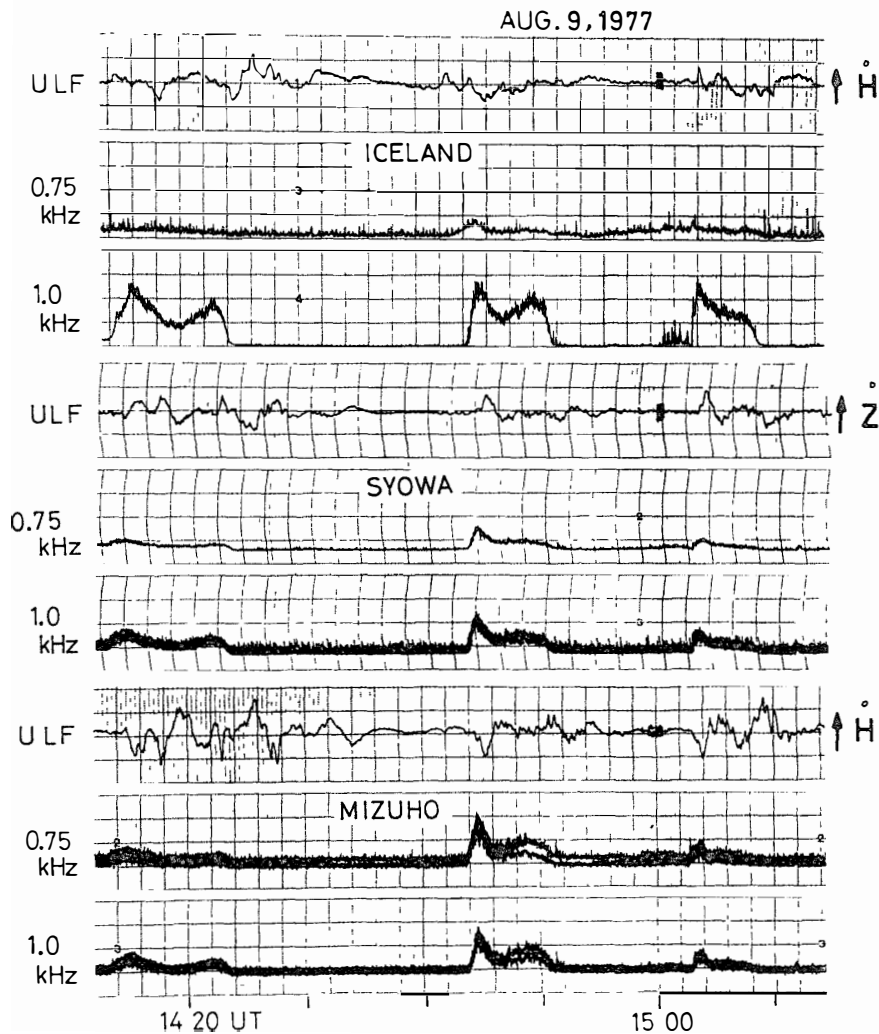


図 2 Husafell, 昭和基地, みずほ基地で同時観測した地磁気脈動と ELF エミッションの強度記録の例

Fig 2 Intensity records of ELF emissions and magnetic pulsations observed at Husafell, Syowa and Mizuho Stations on August 9, 1977

ン) が両半球に出現している。また, 11 h 04 m に S_1 的磁場変動に起因するものと思われるエミッションの突発的な開始も両半球同時に受信されている。August 18 event は, 地磁気脈動, ELF エミッション, およびその QP 的変調の振幅が, 52 日間の観測期間中で特に大きかった日である。そこで, この日の ELF エミッションの周波数-時間 ($f-t$) スペクトルからみた共役性を特に詳しく述べる。

図 4a, b は, 10 h 13 m 20 s-10 h 17 m 00 s, 10 h 51 m 40 s-10 h 55 m 15 s における $f-t$ スペクトル図である。周期が 20 秒から 40 秒のゆっくりした rising tone の QP エミッションが両半球同時に現れている。しかし, エミッションの強い周波数バンドは違っている。図 4a で

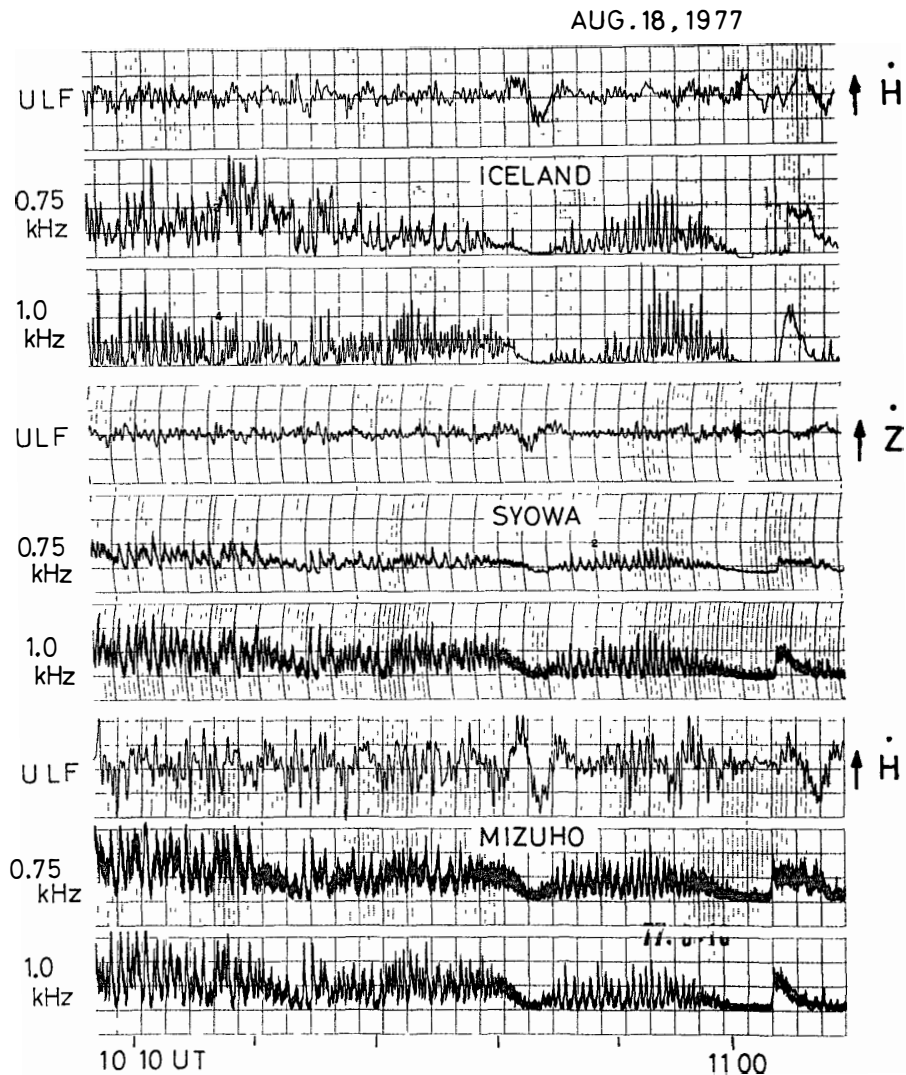


図 3 Pc 3 脈動と相関のある QP エミッションの共役点同時観測の強度記録

Fig. 3. Examples of intensity records of QP emissions associated with Pc 3 magnetic pulsations observed at Husafell, Syowa and Mizuho.

明らかなように、0.7~0.9 kHz の低周波数帯域の強度は昭和基地で強い。また図 4b で特に明らかなように、1.2~1.4 kHz の高周波数帯域はアイスランドの方が強い。図 4a で 10 h 15 m 56 s - 10 h 16 m 06 s には periodic エミッションが QP 的変調を受けている。この現象の時間差、発生周波数を詳しく調べるために、時間軸を 0.2 秒以下の精度で合わせて、拡大したスペクトル図を図 5a に示す。この図から明らかなように、periodic エミッションは両半球で交互に出現している。この結果から、periodic エミッションはホイスラーモード波の波束が磁力線に沿って両半球を往復している現象である (HELLIWELL, 1965) ことが実証される。さらに、CARSON *et al.* (1965) の結果と同じく、この periodic エミッションは往復運動をくり返

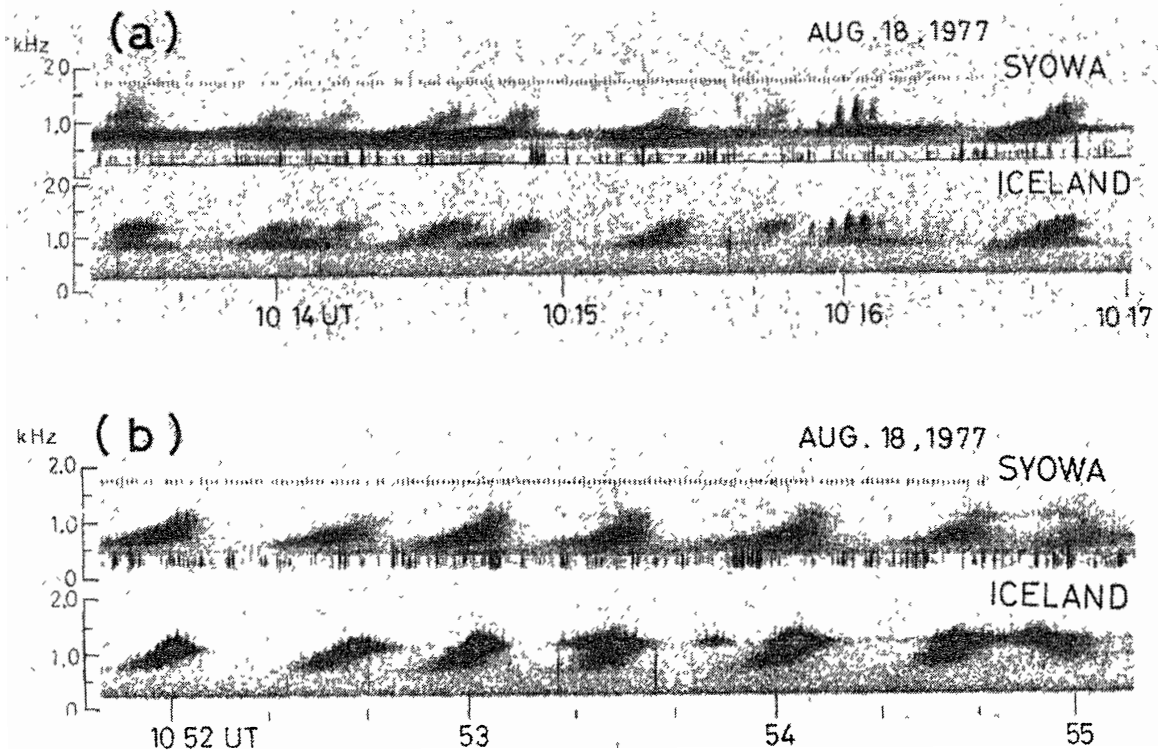


図 4 August 18 event における QP エミッションの $f-t$ スペクトル QP エミッションは両半球同時に現れているが、昭和基地では低周波数帯域が強く、アイスランドでは高周波数帯域が強い

Fig 4 Frequency-time spectra of QP emissions in the two time intervals, 1013 20-1017 00 UT (a) and 1051 50-1055 15 UT (b) in Fig 3 It is found that the emission intensity in the lower frequency range below 1 kHz larger at Syowa than at Husafell, and vice versa in the higher frequency range

しながらエミッションの cutoff 周波数が両半球交互に上昇し、QP 的変調を受けている。図 5b は rising tone をした diffuse エミッションの微細構造を持つ QP エミッションの拡大スペクトルである。この図から、QP エミッションは南北両半球において同時に受信されていることがわかる。したがって、QP 的変調を起こす領域は両半球の磁力線の中間的領域、つまり磁気圏内の赤道面付近であることが推測される。図 6 は S_i 的磁場変動に伴いエミッションが突発的に始まったスペクトル図である。エミッションの急始時刻は南北両半球同時であるが、発生周波数に差異が認められる。1~1.4 kHz の高周波数帯域はアイスランドで強く、0.5~0.8 kHz の低周波数帯域は 11 h 04 m 以後昭和基地で強まるが、アイスランドでは現れていない。この傾向は直前まで現れていた QP エミッション(図 4b) とまったく同じである。したがって、ELF コーラスの発生、伝搬の条件は、 S_i の発生する前後で同じであったと考えられる。また、Pc 3 脈動に伴う QP エミッションの発生メカニズムと S_i 的磁場変動に伴う

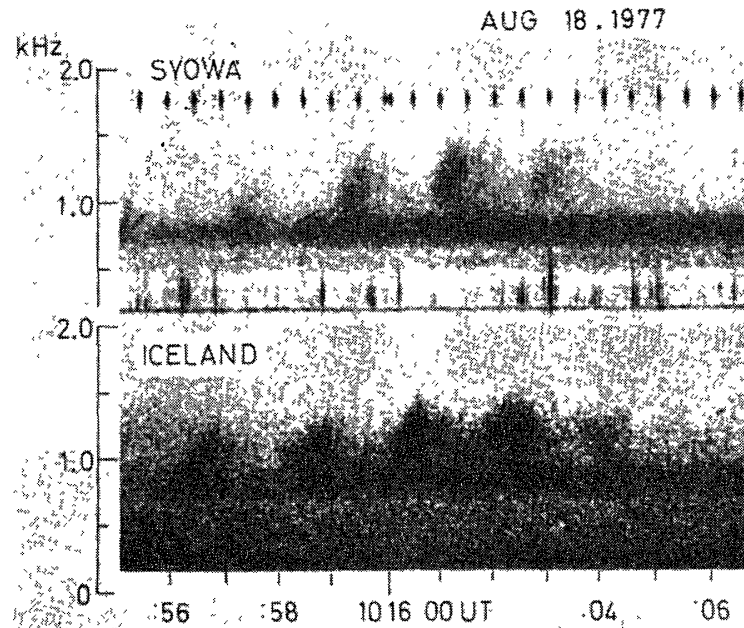


図 5a 共役点で観測された periodic エミッションの $f-t$ スペクトルの拡大図 両半球で受信される位相は約 180 度異なっている

Fig 5a Expanded frequency-time spectra of periodic emissions in the time interval of 1015:55-1016:07 UT in Fig 4a It is found that periodic emissions are alternately observed in both the hemispheres

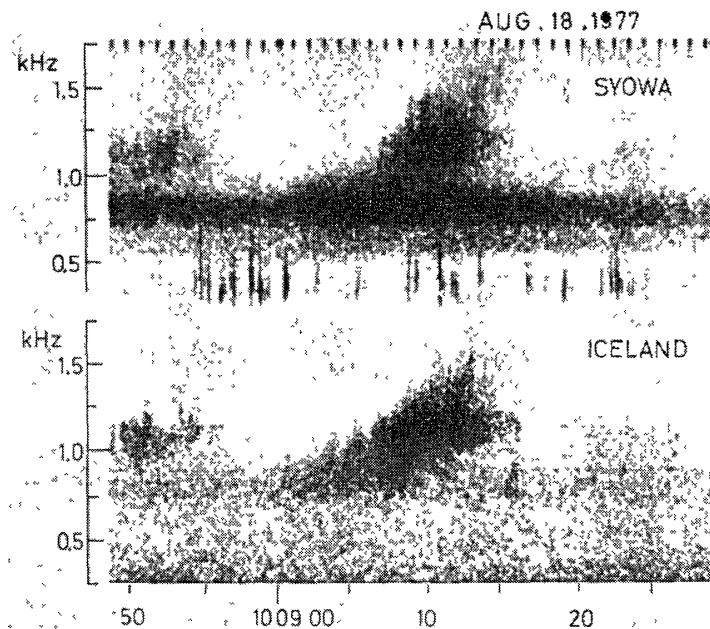


図 5b 共役点で観測された QP エミッションの $f-t$ スペクトルの拡大図. Rising tone の QP エミッションが両半球同時に受信されている.

Fig 5b Expanded frequency-time spectra of QP emissions in the time interval of 1008:48-1009:30 UT in Fig 4b It is found that QP emissions are simultaneously observed in both the hemispheres.

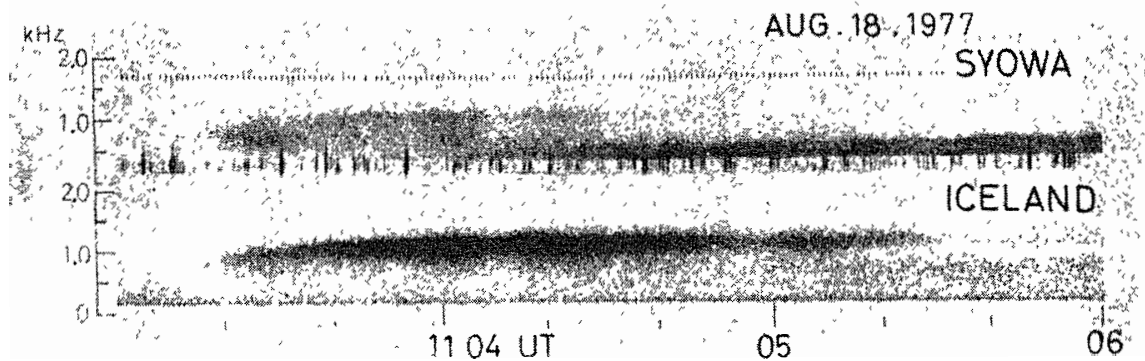


図6 S_i 的磁場変動に伴って ELF エミッション強度が上昇した例。両半球同時にエミッションが始まっているが、エミッションの出現した周波数帯域はアイスランドで高く、昭和基地で低い。

Fig 6 Examples of frequency-time spectra of ELF emissions excited by a positive sudden impulse. ELF emissions began simultaneously at the conjugate-pair stations. However, the intensity in the higher frequency range was higher at Husafell than at Syowa (1103 20-1105 30 UT) and the intensity in the lower frequency range was higher at Syowa than at Husafell (1104 00-1106 00 UT)

エミッションの発生メカニズムと類似であることが想像される。つまり、圧縮性モートの磁場変動に伴って、エミッションの発生メカニズムと類似であることが想像される。つまり、圧縮性モートの磁場変動に伴って、エミッションの強度が変調を受けていると考えられる。

3. オーロラコーラスの共役性

前章で述べてきたことは昼間側で発生したエミッションであった。次に早朝脈動オーロラに伴って出現するオーロラコーラス (HAYASHI and KOKUBUN, 1971) の共役性について調べる。結論的に言えば、朝方のエミッションの共役性は悪い。図7はその典型例である。昭和

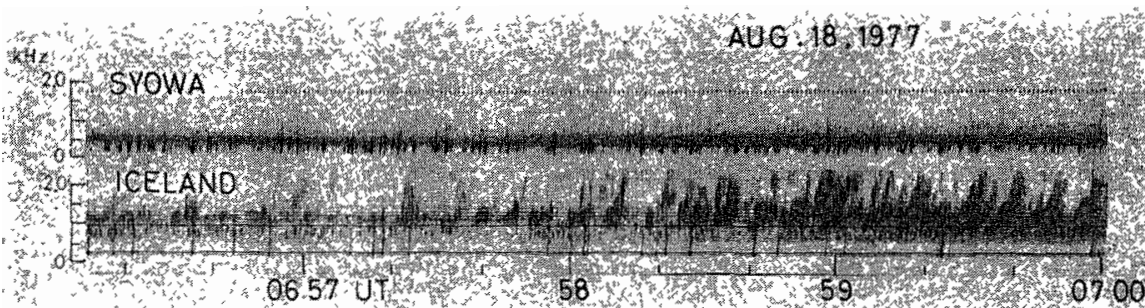


図7 朝方の ELF コーラスの例。共役性は悪く、強度はアイスランドで強く、昭和基地で弱い。

Fig 7. Examples of frequency-time spectra of ELF chorus emissions in the early morning. It is found that the emission intensity is higher at Husafell than at Syowa.

基地では 0.4~0.8 kHz の低周波数帯域に diffuse なバンド状のスペクトル構造を持つ。一方、アイスランドでは低周波数帯域のエミッションは非常に弱く、0.5 kHz から 2.5 kHz まで伸びる rising tone の強い QP 的 discrete エミッションが卓越している。昭和基地のスペクトルを注意深く見ると、rising tone の QP 的エミッションが非常に微弱ながら確認できるが、その周波数は高い方までのびていない。

August 18 event における ELF エミッションの共役性の時間的変化を調べるために 05 h UT から 12 h UT まで各 30 分毎に 2 分間の拡大スペクトルを図 8a, b に示す。05 h から 08 h までアイスランドで高周波数帯域でのエミッションが卓越している。一方、昭和基地では高周波数帯域はほとんどエミッションが認められず、1 kHz 以下の低周波数帯域のみが現れている。08 h 30 m 以降には昭和基地にも 2.5 kHz まで伸びるエミッションが現れ、アイスランド

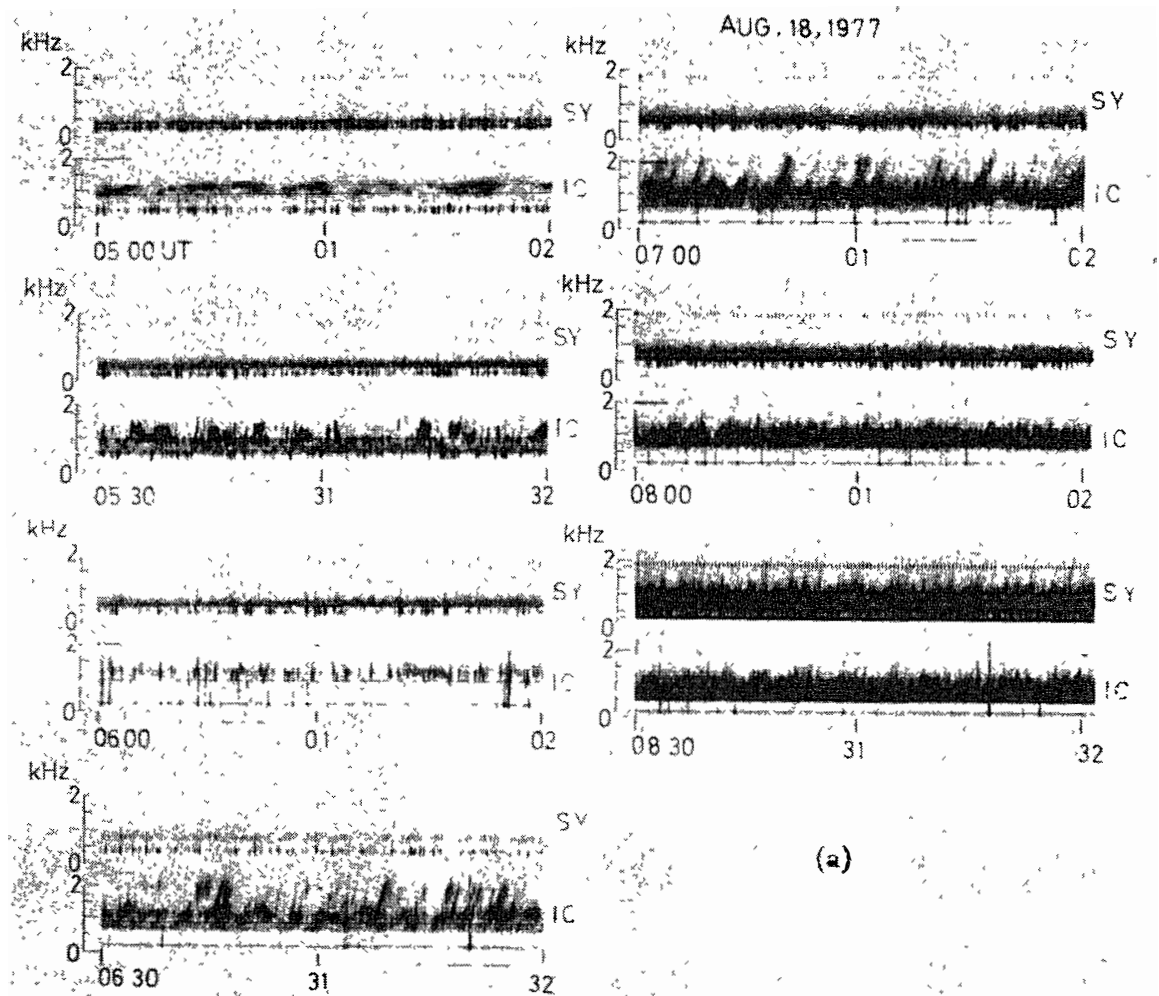


Fig 8a

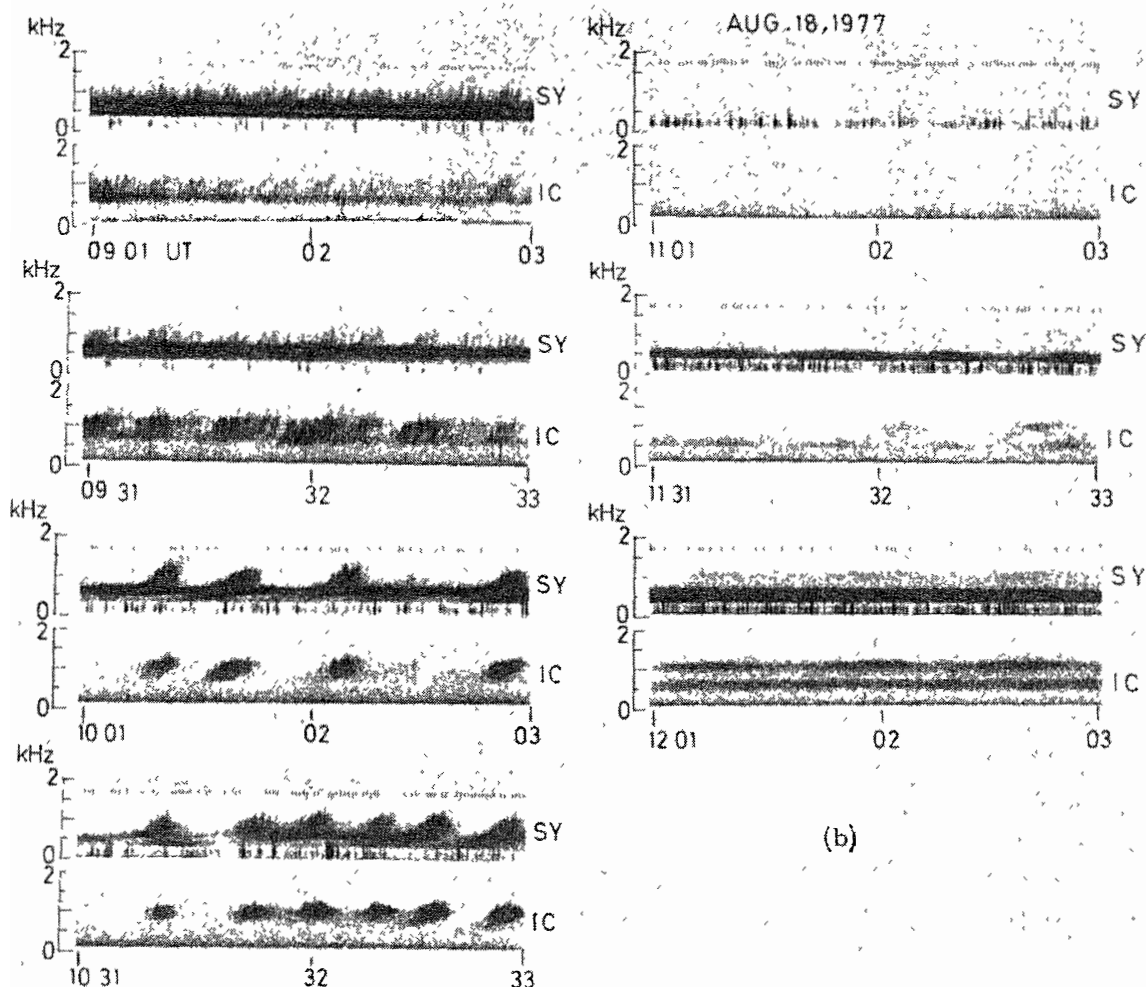


Fig 8b

図 8a, b August 18 event の朝5時から昼12時までの ELF エミッションの30分毎における2分間の拡大スペクトル図 朝方のオーロラコーラスの共役性は悪いが8時以降共役性が良くなる。発生周波数帯域は昭和基地で低く、アイスランドで高い傾向が見られる。

Fig 8a, b Progressive changes of frequency-time spectra of ELF chorus emissions from early morning to noon

と同じスペクトル構造を示す。スペクトルの型はほぼ同じであるが、エミッションの強度比に周波数依存性がある。前述したようにアイスランドでは高周波数帯域が強く、昭和基地では低周波数帯域が強い。図 8b の 12 h 01 m ~ 12 h 03 m のスペクトル構造はその典型例である。0.5 ~ 0.7 kHz 帯域と 1 ~ 1.2 kHz 帯域の分離したバンド状のスペクトル構造を持つが、アイスランドではその強度比がほぼ同程度であるが、昭和基地では低周波数帯域が圧倒的に強い。

4. オーロラヒスの共役性

オーロラヒスは、オーロラの出現、動きと良い相関を持つことが知られている (MAKITA and FUKUNISHI, 1973; OGUTI, 1975). 昭和基地で観測されるオーロラヒスの季節変化は非常

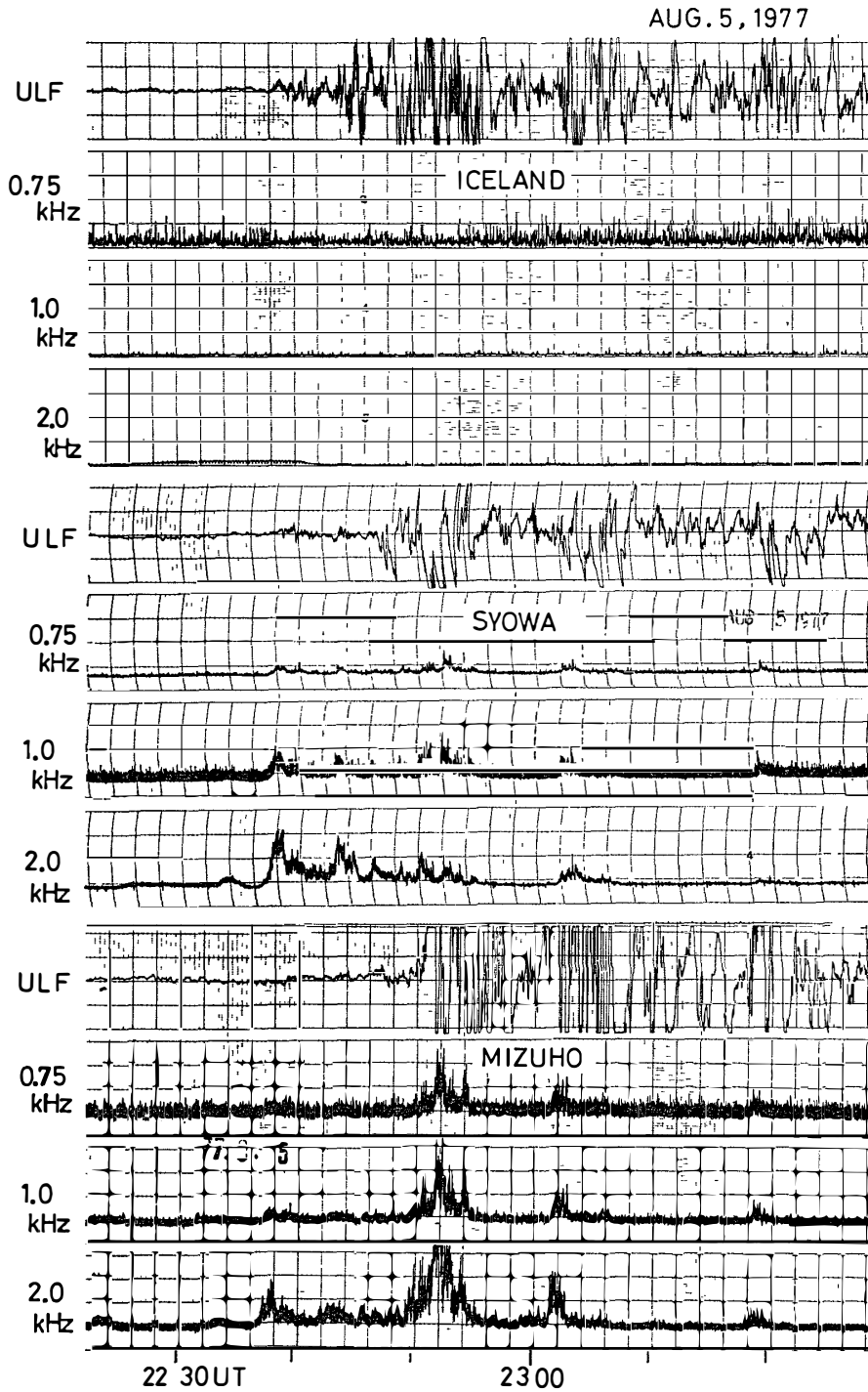


Fig 9a

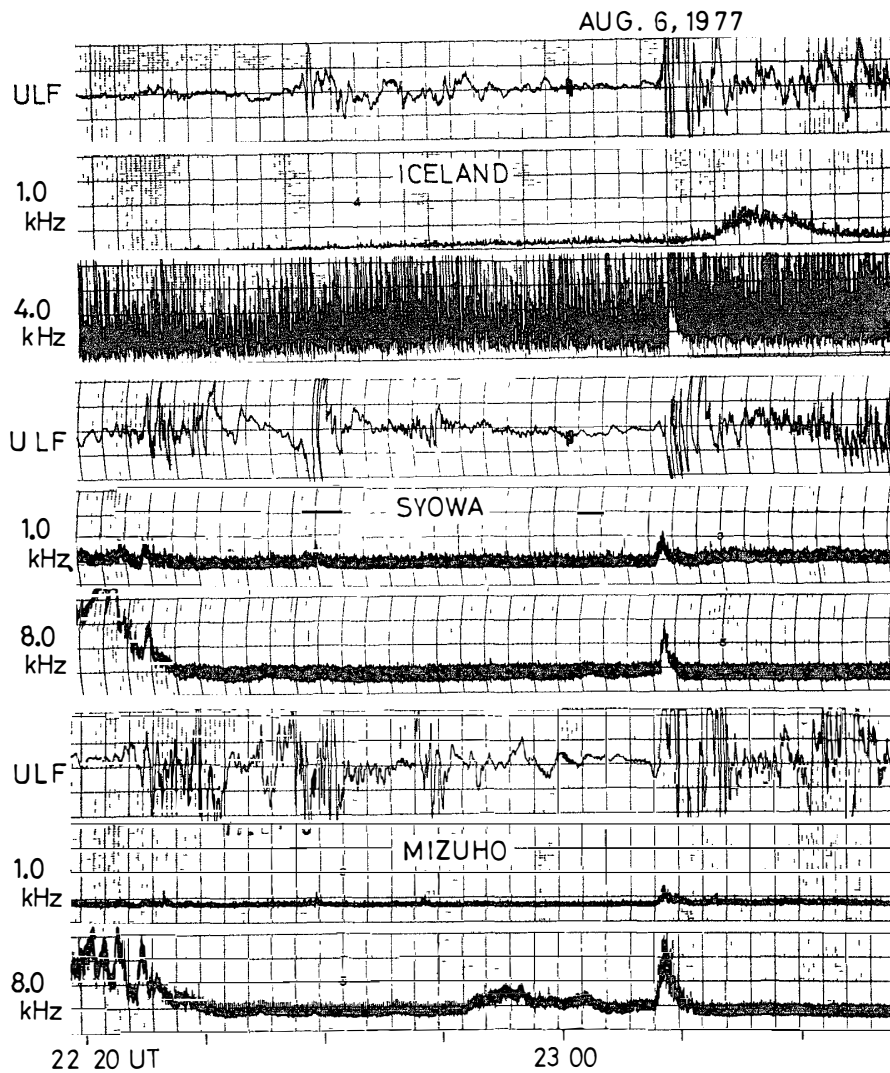


Fig 9b

図 9a, b オーロラヒスの共役点観測の例 共役性は非常に悪く, 南半球 (冬半球) で強く北半球 (夏半球) で弱いか, まったく現れていない

Fig 9a, b Intensity records of auroral hiss emissions and magnetic pulsations observed at Husafell, Syowa and Mizuho Stations It is found that the intensity is much higher at Syowa and Mizuho in the southern hemisphere than at Husafell in the northern hemisphere

にはっきりしている。MAKITA and FUKUNISHI (1973) によれば 4 月-9 月の秋・冬・春には約 70% の発生確率を持つが, 11 月-2 月の夏期には 10% 以下である。この季節変化のメカニズムを探るためにも, 共役点観測を行うことは大変興味深いことである。今回の観測期間は, 昭和基地の位置する南半球側ではオーロラヒスの発生頻度の大きな季節であり, アイスランドの北半球側では発生頻度最小の季節である。図 9a, b は共役性の悪い典型である。アイスランドの Husafell, 昭和基地, みずほ基地における地磁気脈動, 0.75 kHz, 1.0 kHz, 2.0 kHz 帯

のエミッション強度を示す。22 h 30 m–23 h 06 m, 23 h 18 m–23 h 22 m には南半球側で 0.75 kHz, 1.0 kHz, 2.0 kHz に強いオーロラヒスが受信されているが、アイスランドではまったく受信されていない。図 9b も共役性の悪い例である。23 h 06 m 以前は図 9a と同様に南半球側では 8 kHz 帯に強いヒスが受信されているが、アイスランドではまったく受信されない。22 h 08 m のオーロラ breakup 時には南半球で 1.0 kHz の低周波数から 8 kHz の高周波数まで広帯域にエミッションの急始が観測された。しかし、アイスランドでは 4 kHz にエミッションの急始が観測されたが、低周波数成分はまったく観測されていない。しかも、アイスランドではオーロラの breakup の直後 22 h 14 m にはオーロラコーラスが 1 kHz に出現しているが、南半球にはこのコーラスは確認できない。以上の例から明らかなように 8 月の夏期ではオーロラヒス・オーロラコーラスの共役性が非常に悪いことが結論できる。

5. 考 察

今回得られた初期的な解析結果をまとめると、

- 1) 朝方のオーロラコーラスの共役性は悪く、北半球が強い。
- 2) 地磁気地方時 8 時以降の昼間現れる ELF コーラスの共役性は良い。しかし、南半球では低周波数帯域が強く、北半球では高周波数帯域が強い傾向がある。
- 3) QP エミッションは南北両半球同時に受信される。
- 4) S_1 的磁場変動に伴うエミッションの急始は南北両半球同時に現れる。
- 5) Periodic のエミッション受信される位相は両半球で 180 度異なる。
- 6) オーロラヒスの共役性はほとんどなく、南半球 (冬半球) 側が強い。

諸現象の共役性の詳しい議論をするためには、単なる磁力線のトレーシングから求められた共役点という出発点だけでなく、南北両半球で地球物理的な条件の相違を明らかにしなければならない。昭和基地とアイスランドでの条件の違いと、それによって及ぼされる影響を列記すると、

- 1) 日照時間が異なるため、電離層内の電子密度に南北非対称性が生ずる。この影響により諸現象の共役性に日変化、季節変化が現れる。
- 2) 磁場の伏角が異なる (昭和基地は約 65 度, Husafell は約 76 度)。この影響により、同じ磁力線で発生し磁力線に沿ってダクト伝搬してきたエミッションは、ダクト伝搬ができなくなった後、地上までの伝搬経路が異なる。そのため磁力線に沿うオーロラ粒子の共役点とヒス、コーラス等の ELF, VLF 電波の共役点異なる可能性がある。

3) 磁場強度に南北非対称がある(昭和基地で約 45,000 γ , Husafell で約 52,000 γ). この影響により, 昭和基地側では, 粒子のミラー高度がアイスラントより低く, オーロラ粒子が低高度まで侵入しやすい. そのため昭和基地の方がオーロラ光度が強い可能性がある

4) 地球磁場の磁軸が太陽-地球を結ぶ面に対して傾いているため, 磁力線トレンクにより求められる地磁気共役点の位置が日変化や季節変化をする.

上述した影響により, オーロラ粒子, ELF, VLF エミッション, 地磁気変動等の現象に応じて共役性も異なるものと思われる. また, これらの理由以外の複雑な南北非対称性の原因も考察しなければならないかもしれない. 今後詳しい解析を行うことにより, 諸現象の発生, 伝搬に関して詳しい議論かてきるものと思われる

謝 辞

今回アイスラントで共同観測を行ったフランス CNET-CRPE の R GENDRIN 氏および観測に参加した人達には現地での生活, および観測に際し非常にお世話になりました. また, 南極で観測実施にあたりご協力をいただいた第 18 次隊の皆様に厚く謝意を表します

文 献

- CARSON, W B, KOCH, J A, POPE, J H and GALLET, R M (1965) Long-period very low frequency emission pulsations J Geophys Res, **70**, 4293-4303
- HAYASHI, K, KOKUBUN, S and OGUTI, T (1968) Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variations Rep Ionos Space Res Jpn, **22**, 149-160
- HAYASHI, K and KOKUBUN, S (1971) VLF emissions during post breakup phase of polar substorm Rep Ionos Space Res Jpn, **25**, 369-382
- HELLIWELL, R A (1965) Whistlers and Related Ionospheric Phenomena Stanford, California, Stanford University Press, 349 p
- MAKITA, K and FUKUNISHI, H (1973) VLF emissions observed at Syowa Station in 1970-1971, I Relationship between the occurrence of auroral hiss emission and the location of auroral arcs. Nankyoku Shiryo (Antarct Rec), **46**, 1-15
- OGUTI, T (1975) Hiss emitting auroral activity J Atmos Terr Phys, **37**, 761-768
- SATO, N, HAYASHI, K, KOKUBUN, S, OGUTI, T and FUKUNISHI, H (1974) Relationships between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsation J Atmos Terr Phys, **36**, 1515-1526

(1978年6月10日受理)