

第10次南極地域観測隊極光・地磁気部門概報

——主に VLF エミッションを中心として——

林 幹 治*

VLF EMISSION OBSERVED AT SYOWA STATION IN 1969-1970 —A REPORT OF THE SECTIONS OF AURORA AND GEOMAGNETISM OF THE WINTERING PARTY OF THE 10TH JAPANESE ANTARCTIC RESEARCH EXPEDITION—

Kanji HAYASHI*

Abstract

This is a preliminary report of the sections of aurora and geomagnetism of the wintering party of the 10th Japanese Antarctic Research Expedition in 1969-1970. Among various observations carried out in these sections, VLF emission phenomena are described especially. The report deals with detailed dynamic spectra of polar chorus at the

time of ssc's and si's and frequency variations of polar chorus in these events. Close relationship between low latitude magnetic micropulsations, pc-2 and pc-3, and modulated patterns of polar chorus dynamic spectrum is also shown. Early morning VLF emission phenomenon "auroral chorus" is defined in relation to magnetic micropulsations, pulsating aurorae, and negative geomagnetic bay events.

1. は じ め に

近年の人工衛星を主体とする飛しょう体による磁気圏及び地球近傍間の直接測定は、急激な情報蓄積をもたらし、超高層極域じょう乱も magnetospheric substorm という概念の下にかなり見通し良く把握されてきつつある。このような情勢の下に、極光帯での地上観測の役割もその質的变化を余儀なくされている。第10次南極観測における極光・地磁気の研究部門では、太陽—磁気圏座標の中で安定な回帰運動を行なう地上の観測地点の特徴を生かしたきめ細かい連続観測を念頭にして、各種の観測が実施された。ここでは、VLF 自然電波観測の結果を中心に、各種の現象との関連について速報的に述べる。

* 東京大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo.

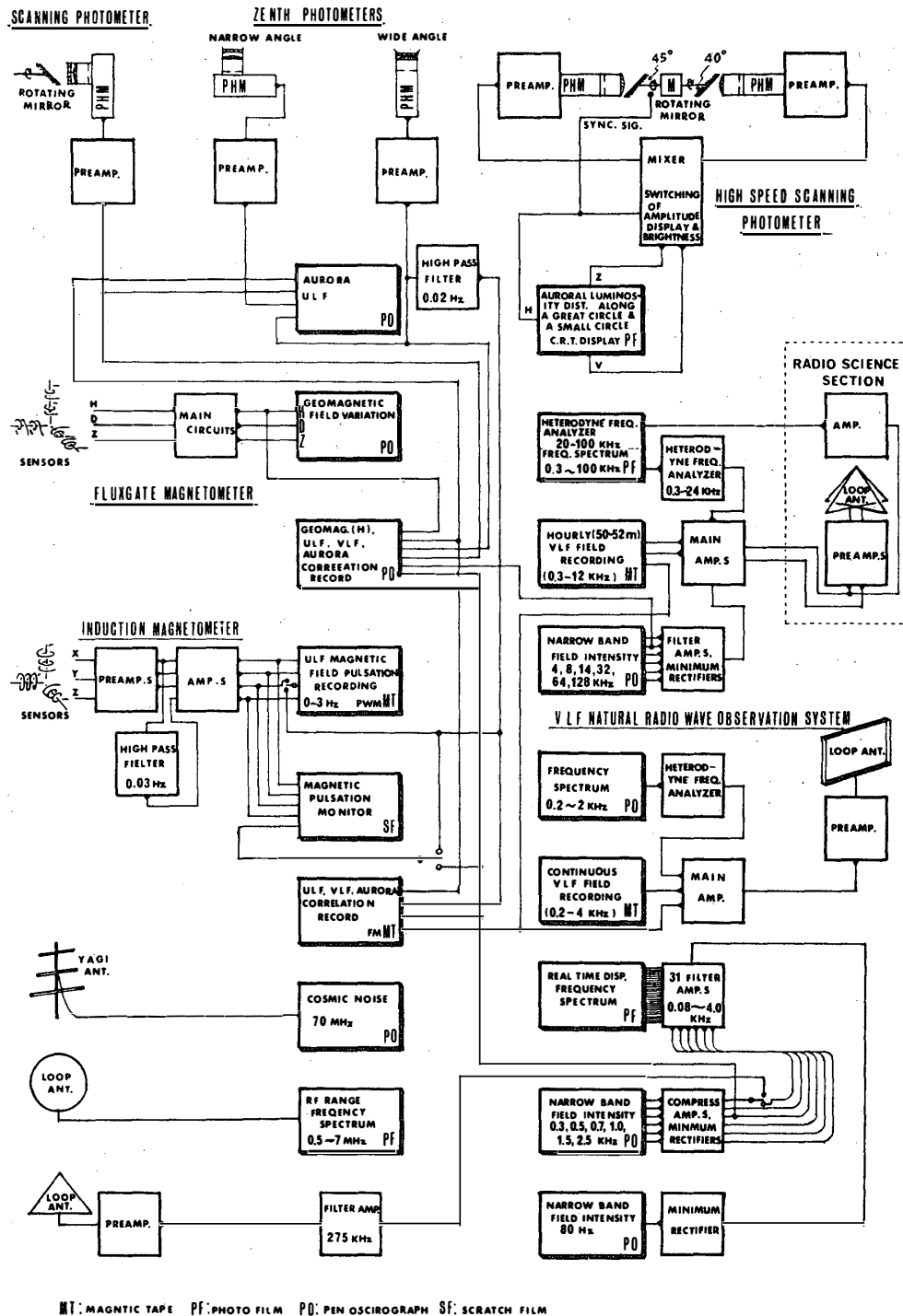


図 1 第10次隊における極光、地磁気部門の観測

2. 観 測 装 置

1969年2月～1970年1月にかけて、昭和基地で実施された極光・地磁気部門の主な観測は次のようなものである（詳細については図1を参照されたい）。

(1) 地磁気脈動——インダクションマグネトメーターによる x , y , z 成分の磁気テープ記録, スクラッチフィルム記録.

(2) VLF 自然電波観測

a. 主にオーロラヒスおよびホイッスラー観測を目的とした定時磁気テープ記録(NS,EW 2成分), 狭帯域周波数帯の電界強度記録 (4, 8, 14, 32, 64, 128kHz).

b. 主にコーラス現象の観測を目的とした連続磁気テープ記録 (地磁氣的 EW 1成分), 狭帯域周波数帯の電界強度 (0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5kHz), 31チャンネルマルチフィルター周波数解析器 (0.08～4kHz).

(3) 極光観測

a. 天頂極光強度 (4278Å).

b. 高速掃天光電受光器 (磁気子午面およびそれに平行な小円面内での掃天).

(4) 多様な観測の概況を把握し, 相互の関連を直視できるように考慮された相関記録にも力が入れられた.

3. 現在までに得られた結果について

ここでは主に VLF エミッション現象の観測結果を中心に述べ, その他の現象についても関連現象として言及する.

3.1. 序論

地磁気部門の VLF (実際には ELF 帯, LF 帯を含んでいる) 観測は第7次隊に始まり, 自然電波現象をより広い周波数帯に渡って調べるという考えの下に, 年々観測系統の整備増強が行なわれた. この間, かなりのデーターの蓄積が行なわれ, 一方で得られたデーターの解析あるいは統計が行なわれ種々の現象が確認された. これらを世界各地での観測報告と比較してみると磁気緯度的に近い Byrd あるいは Godhavn などとの類似性が大きいようである. このような経過を背景に今回の主眼は, 個々の現象について, よりきめ細かい観測を実施し, 地球磁気圏に関する最近の知識を土台にして, 地上で観測される現象に対して, どのような地球物理的意味合いを与えるかということにあった.

昭和基地で観測される VLF エミッションは、大きく分けて 18h~01h UT (昭和基地では地磁氣的な地方時 MLT は UT にほぼ一致する) に発生するオーロラヒスと呼ばれるもの (オーロラ活動の初期に静かなアーク, あるいはバンド状のオーロラに伴い発生することが多く, 周波数的には下は数百Hzから上は 100kHz 以上にも及ぶ) とそれ以外のものとに分けられる. オーロラヒス以外のものでは, コーラスと呼ばれる現象が卓越するが, 中でもポーラーコーラスと名付けられているものが圧倒的に多い. ポーラーコーラスの定義はあまり明確でないが, UNGSTRUP *et al.* (1963) によれば, 周波数は 1.5kHz 以下で, 700Hz 付近にピークを持つヒス音のする連続スペクトルで, 時おり秒程度の上昇調のスペクトル構造を含むというものである (図2 参照) が, そこで行なわれている統計は, このようなスペク

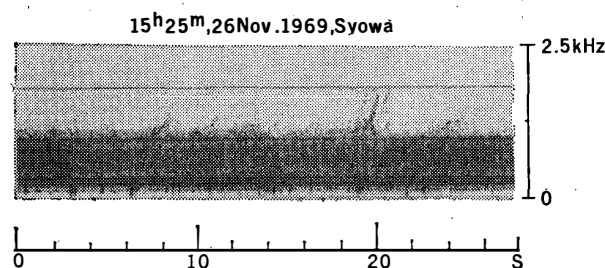


図2 ポーラーコーラスのダイナミックスペクトル

トル構造を厳密に確かめながら行なったものではないようで, 実際にはいろいろなタイプのものが混じり合っていると思われる. 事実, 既に発表されている昭和基地のポーラーコーラスに関する統計 (KOKUBUN *et al.*, 1969), あるいはここで述べられるものも, 750Hz あるいは 700Hz での電界強度変化記録が主に使われていて, スペクトル構造までは検討されていないが, 発生ひん度の日変化は, UNGSTRUP 等のものときわめてよく似ている. いくつかあるコーラストイプのエミッションの中で, 遅送りの電界強度変化記録の上からも, 地磁気脈動, 天頂極光強度記録などを併用すると比較的容易に分離できるのが, オーロラコーラス (KOKUBUN *et al.*, 1969; 国分, 1970) である. オーロラコーラスは, 普通言われているポーラーコーラスとはスペクトル構造からも, 発生時間あるいは継続時間から言っても異なっているようであり, 両者を分けることは意味があると考えられる. 統計されているポーラーコーラスには, 外にも分離できるものがあるようではあるが, まだはっきりしないので, ここでは, これ以上の細分化は行なわない. 以上3種の VLF エミッション現象を, オーロラヒスに日照の影響と思われる季節変化が見られる点を考慮して, 太陽高度の低い 5, 6, 7 月の3ヵ月 (1969年) について統計し, 発生確率の日変化を求めたのが図3である. この統計

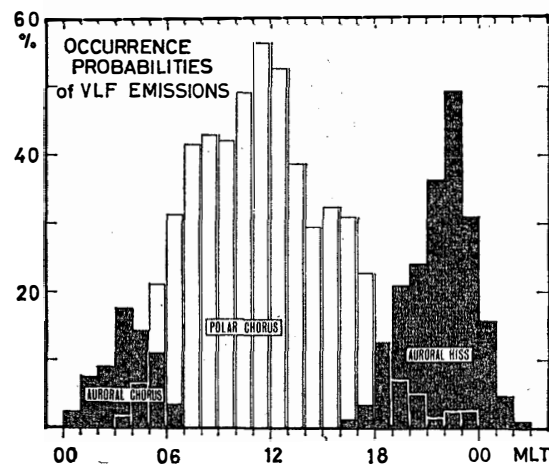


図 3 1969年 5 月～7 月の昭和基地におけるオーロラコーラス，
ポーラーコーラス，オーロラヒスの発生確率

で見るかぎりオーロラコーラス，ポーラーコーラス，オーロラヒスの発生ピークは，それぞれ 3～5 時，10～13 時，21～00 時の時間帯ということになる。オーロラコーラスについては，比較すべき報告例が無いが，オーロラヒス，ポーラーコーラスについては妥当な結果と言える。

以下コーラス現象についてやや詳しく述べる。

3.2. ポーラーコーラスと関連現象について

これまでの昭和基地での観測結果を使い，次のようなことが明らかになっている (HAYASHI *et al.*, 1968; KOKUBUN *et al.*, 1969; HAYASHI *et al.*, 1969)。

- 1) 昼側の現象で，発生ひん度は 10h UT 頃最大となる。
- 2) 地磁気活動度 (K_p) とほぼ正の相関を持ち， K_p が 6 時間程度先行する。
- 3) 太陽風の強まりによる地球磁気圏の急激な圧縮と理解されている ssc により，エミッションの周波数が上昇し，通常放射エネルギーも増大する。また逆に磁気圏の膨張に相当する si- の際には，固定周波数で見ている限り，現象が消滅することが多く，周波数が下がっていることも同時にそれに寄与しているのではないか。
- 4) 昭和基地のインダクションマグネトメーターと VLF エミッション記録とで ssc, si の開始時刻を比較してみると，エミッションの方で少なくとも 30 秒程度早く始まる。
- 5) エミッションが発生しているときに，重要度 2B 程度のソーラーフレアが発生すると，エミッションは吸収を受け，吸収係数が 600Hz 以上では周波数の平方根に比例するようである。

このほか NISHINO and TANAKA (1969) の 750Hz での偏波研究により波のモードがホイッスラー波であることを支持する結果が示されていることも注目すべきである。

上述の 3), 4) によりポーラーコーラスは、地表から数万 km 程度の磁気赤道面に近い場所で発生して、その発生機構として、電子のサイクロトロン不安定性が、妥当であろうという結論が得られている。また 5) は長波長電磁波の電離層透過特性を研究する上で重要である。これらの結論の中で 3), 4), 5) についてはその時の磁気テープ記録が無く、データの精度の点で自明な結論となりにくかった。また si^- の際の周波数降下については、全くの推論の域を出ないものであった。

このような意味から今回の観測では、周波数域：0.2~4kHz, 1成分, 2往復（1ロール当たり12時間）のテープレコーダーによる連続記録に力が入れられた。オーロラコーラスも含め、低い周波数帯の重要性を考慮し、図4のような観測系統が作られた。このシステムで磁

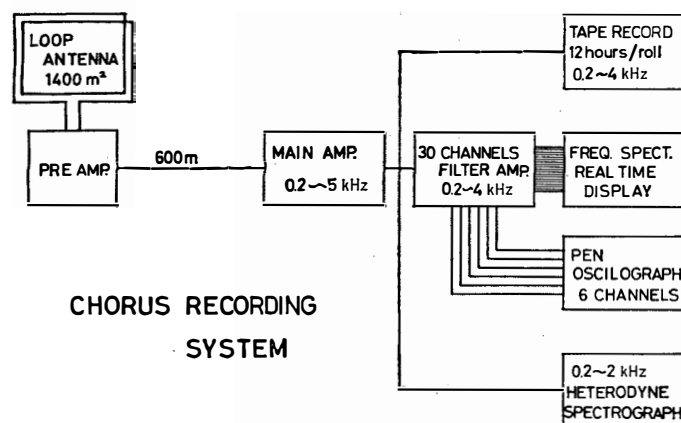


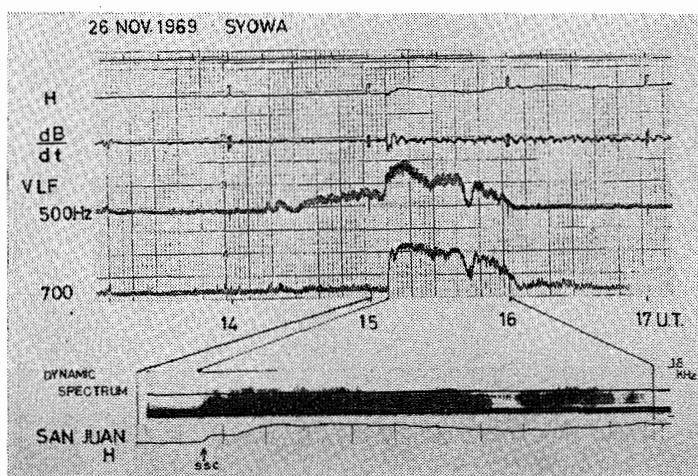
図4 コーラス観測系統

気テープ記録は、年間の約6割をカバーすることができた。表1は、1969年2月5日~1970年2月15日の間に報告されたsscの日時と、そのときのテープの有無、エミッションの有無を示すものであり、ポーラーコーラスと直接関連のあるテープ記録のとれたものは19例であった。次に得られた磁気テープ記録をスペクトル解析したダイナミックスペクトル (dynamic spectrum) の例を示す*。図5aは、1969年11月26日に発生したsscによる影響が、きわめて顕著に現われた例である。昭和基地の磁気子午面に近い San Juan の地磁気水平成分, 昭和基地の地磁気脈動, 地磁気水平成分および VLF エミッションの 500Hz, 700Hz

* 使用した周波数スペクトル解析器は、東京大学理学部地球物理研究施設に設置されている、200チャンネルのマルチフィルター実時間周波数解析器である。

表 1 1969年2月～1970年2月の ssc と VLF 磁気テープ記録

Date UT	Tape	Remarks	Date UT	Tape	Remarks
1969			1969		
Feb. h m			Aug. h m		
10 20 24	○	No emission	15 11 56	—	No emission
26 01 58	—	"	26 04 35	○	"
27 03 07	○	"	26 21 35	○	"
28 04 23	—	"			
Mar.			Sept.		
01 08 46	○	No emission	05 13 33	○	No emission
04 18 21	—	Chorus modulated by ssc	14 15 18	○	Chorus triggered by ssc
05 09 29	○	"	17 11 27	○	Chorus modulated by ssc
16 16 59	○	Chorus triggered by ssc	27 21 25	—	Hiss triggered by ssc
17 00 30	○	No emission	29 04 43	○	Chorus modulated by ssc
19 14 41	○	Chorus modulated by ssc	Oct.		
19 18 13	—	Chorus triggered by ssc	02 09 33	—	No emission
19 19 58	○	"	09 16 39	—	Chorus triggered by ssc
23 10 12	○	Chorus modulated by ssc	10 07 28	○	Chorus modulated by ssc
30 21 19	—	No emission	18 20 29	○	Chorus triggered by ssc
Apr.			24 01 41	○	Chorus modulated by ssc
12 20 46	—	No emission	26 04 01	—	No emission
13 17 12	—	"	Nov.		
27 18 31	—	Chorus modulated by ssc	08 17 30	○	
28 02 52	○	"	08 18 37	—	No emission
May			10 04 50	—	"
02 13 22	—	Chorus triggered by ssc	10 11 46	○	Chorus modulated by ssc
12 17 53	○	Chorus modulated by ssc	22 02 54	—	No emission
14 19 29	○	Hiss triggered by ssc	26 15 07	○	Chorus modulated by ssc
17 20 59	○	"	Dec.		
June			11 12 15	○	Chorus modulated by ssc
08 05 09	○	Chorus modulated by ssc	1970		
14 00 38	○	No emission	Jan.		
16 06 22	—	Chorus modulated by ssc	05 06 05	—	No emission
23 04 09	○	No emission	16 08 18	○	"
30 22 58	○	"	29 18 39	○	Chorus triggered by ssc
July			Feb.		
26 11 53	○	Chorus triggered by ssc	01 19 57	—	No emission
30 07 50	—	No emission			
30 15 48	—	Chorus modulated by ssc			



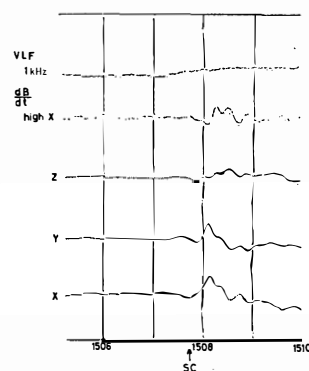
(a)

図 5

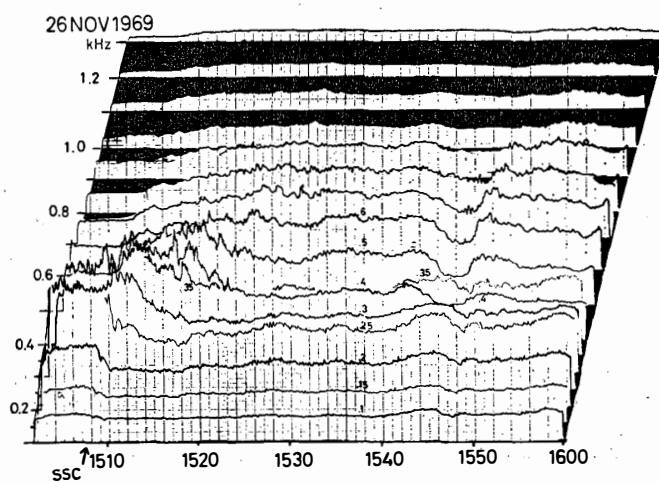
(a) 1969年11月26日, 15h 07 min UT の ssc による影響

(b) (a) と同じ. VLF 1kHz の ssc の開始と地磁気脈動での ssc の開始の時間の差が約20秒ある

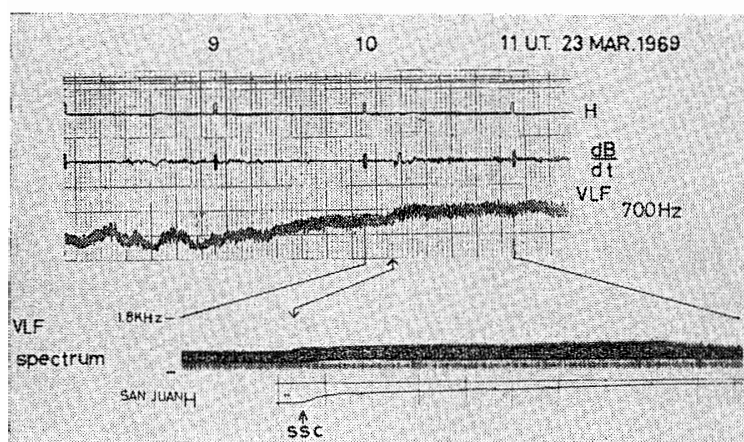
(c) (a) と同じ. 振幅表示によるスペクトル (周波数変化に注目)



(b)



(c)



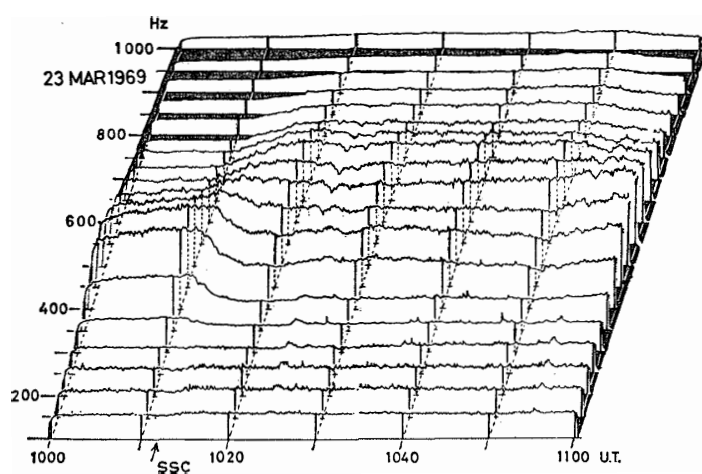
(a)

図 6

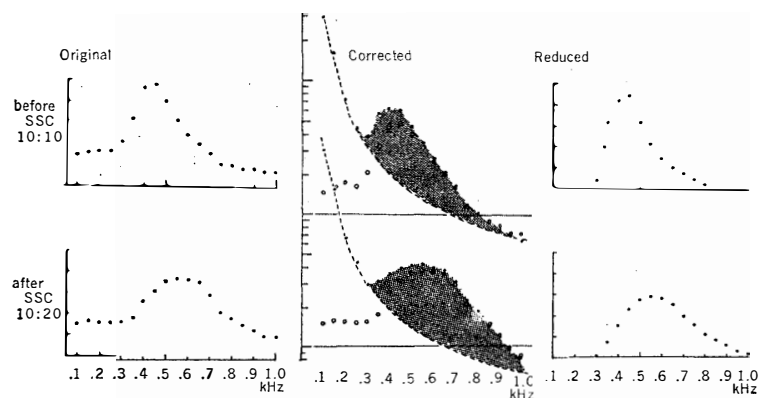
(a) 1969年3月23日, 10h 12 min UT の ssc による影響

(b) (a) に同じ. 見方は図 5 (c) に同じ

(c) (b) より作ったスペクトル断面. ssc の後の周波数上昇, 面積減少に注目



(b)



(c)

での電界強度の相関記録が並べてある．図5bには同じ時に現象をはや送りの記録計に地磁気脈動と 1kHz の電界強度が併記されているが，ssc の影響は，VLF エミッションの方に約20秒程度早く現われていることが見られる．また図5cは，やはり同じ時の現象の振幅表示による精密なスペクトル変化を示すもので，ssc の開始とともに顕著な周波数上昇，後半部で磁場の減少に相当するところでの周波数下降が明りょうに見受けられる．図6a，図6bは1969年3月23日のsscについてのダイナミックスペクトルで，周波数上昇の様子はさらにはっきりしている．しかしながら放射エネルギーは，ssc の後にむしろ減少している（図6c）．これは電離層の吸収特性の周波数特性を考慮する必要があると解釈できる．図7a，図7bは si^- の影響を示すもので， si^- による現象の急激な衰退と，特に図7b中で見られる低い周波数（250, 300Hz）での強度増加，すなわち周波数の減少が明りょうに証明されたと見てよいだろう．図7aについては， si^- の外に 11h 46min にsscが発生しているが，ここではエミッションが消えている．これは例外的な例で，30MHz のリオメーター*によれば，約 2dB 程度の吸収増が見られることを考慮して，次のように説明できそうである．sscにより引き起こされた粒子降下の増大により，電離層吸収係数の増大が起こり，一方エミッションの周波数が吸収係数のより大きい高い周波数に移行したことが相補って，吸収の効果が大きくなったためである．また 10h 30min~55min をよく見ると，周期15秒~40秒

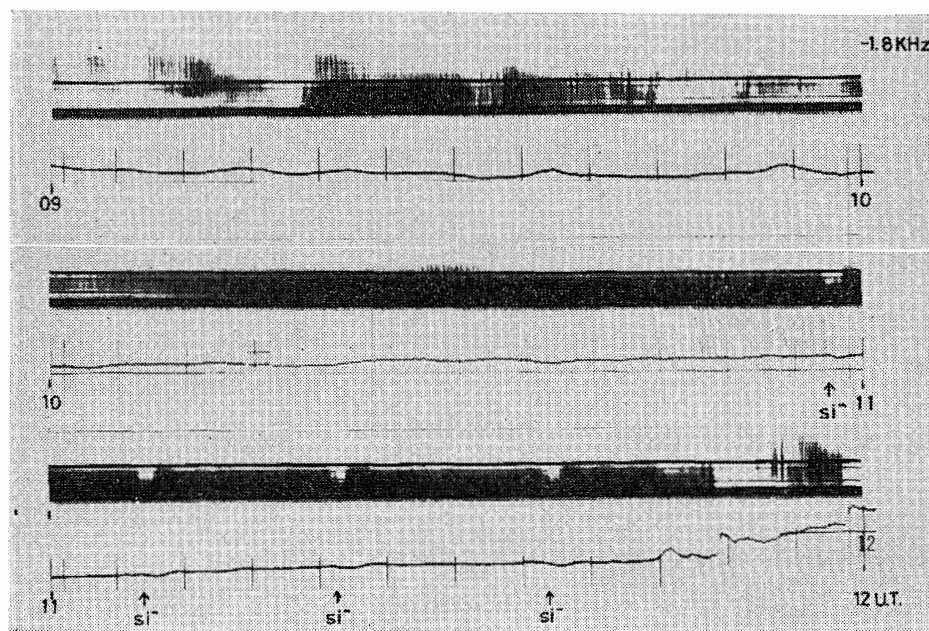


図 7(a) 1969年11月10日 si^- による影響例

* 郵政省電波研究所太田安貞氏のご厚意による。

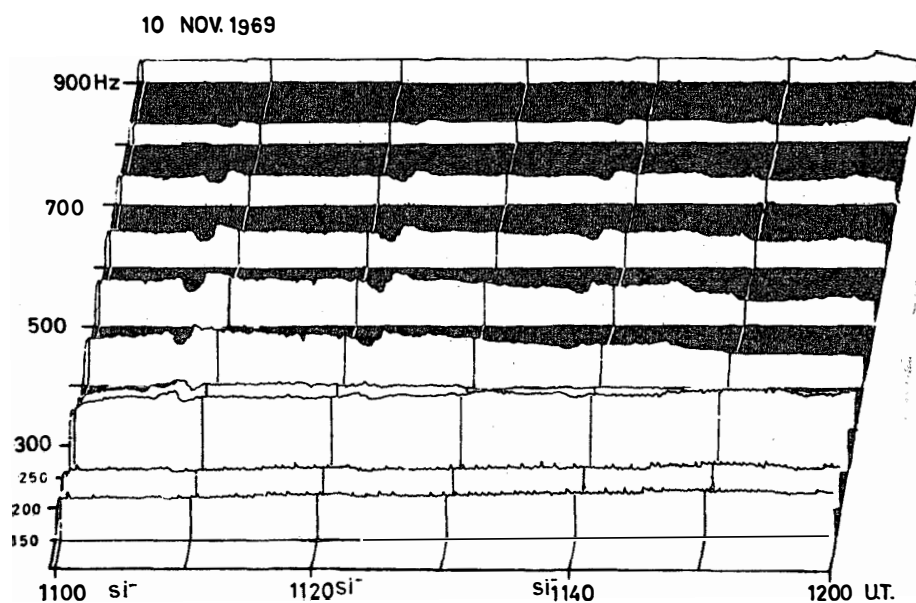


図 7(b) 図 7(a) に同じ. 見方は図 5(c) に同じ. 250, 300Hz の強度増,
10h 30min~55min の pc-2, pc-3 現象に注目

(pc-2, pc-3) ときわめてよく対応するエミッションのモジュレーションが見られる. 地磁気と VLF の観測地点が違っているので, これをもとに二種の現象の伝播速度の差を論じることには問題があるが, 少なくともエミッションのモジュレーションパターンの方が脈動に先行している (昭和基地の脈動のデーターと比較した際にも顕著な時間差が見られる例も見つかっている). これらは, 地磁気脈動の波が, 少なくともエミッションの発生領域をコンプレッショナル (あるいはアイソトロピック) なモードに近い形で通過したことを示すと考えられる. この現象は, この種の地磁気脈動の発生領域, 発生機構を考える上にきわめて興味深い, 解析が十分に進んでいないこともあり, 今回はこれ以上立ち入らない. 図 8 は ssc により,

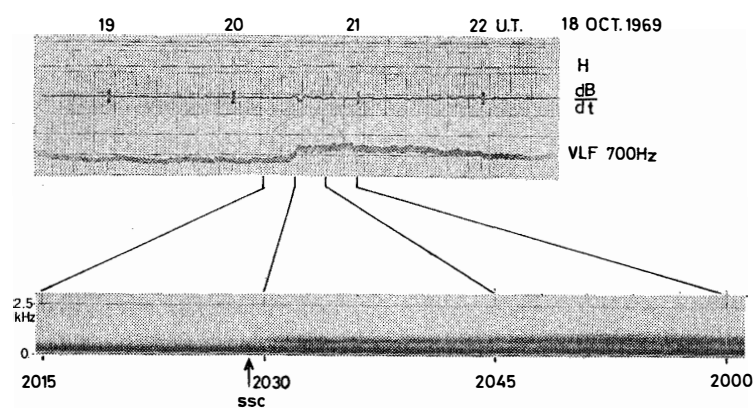


図 8 ssc によりエミッションが引き起こされた例

ポーラーコーラス現象が誘起された例である。この例は、圧縮された磁気圏プラズマが、エミッションを発生し易い状況になることを顕著に示すものであり、エミッションの発生機構として、電子のサイクロトロン不安定性を支持するものである。今回得られた磁気テープ記録の再生解析により、ポーラーコーラスについて、現在までに明らかになった点は、微細なダイナミックスペクトルが初めて得られ、ssc や si に対する応答として、今まで不明確であった点、特に si⁻ の際の周波数減少などが、非常に明確になったこと、pc-2, pc-3 帯の低緯度地磁気脈動と対応の良いエミッションのモジュレーションが見付かったことなどである。

3.3. オーロラコーラス

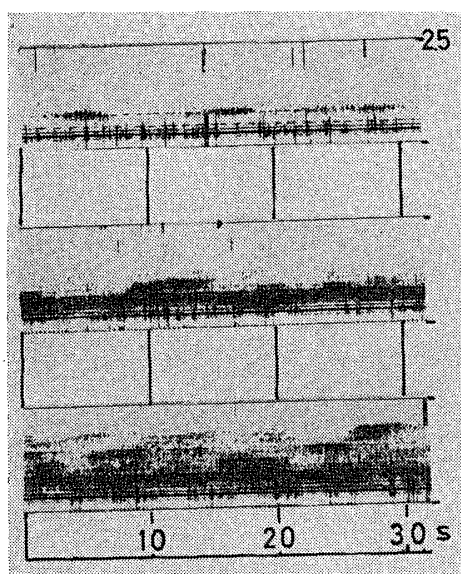
明け方近くになって、オーロラがブレイクアップすると、その後薄もや状のまだら(パッチ)が、時としてまたたきながら東方へ漂ってゆく。このまたたくオーロラ(パルセーティングパッチ)とよく対応する VLF エミッションが観測される。オーロラに伴うコーラストाइプのエミッションについては、BARTON *et al.* (1933) が New Hampshire で空電観測を行っていた際に、フラッシングオーロラと対応のあるエミッションを観測したという報告が最初である。その後 RENARD (1961) が Kerguelen でフレイミングあるいはフラッシングオーロラと、UNGSTRUP (1966) が, Fairbanks でフリッカーリングオーロラと対応するコーラストाइプのエミッションの存在を指摘している。また MOROZUMI (1966) の中で述べられている N3 event も同じような現象であろう。

このようなコーラス現象は、オーロラあるいは polar substor の発生と密接に関連している点、さらにスペクトル構造上の点からも、ポーラーコーラスとは分離して考えた方がよいと考える。オーロラコーラスは、次のような特徴を有する。

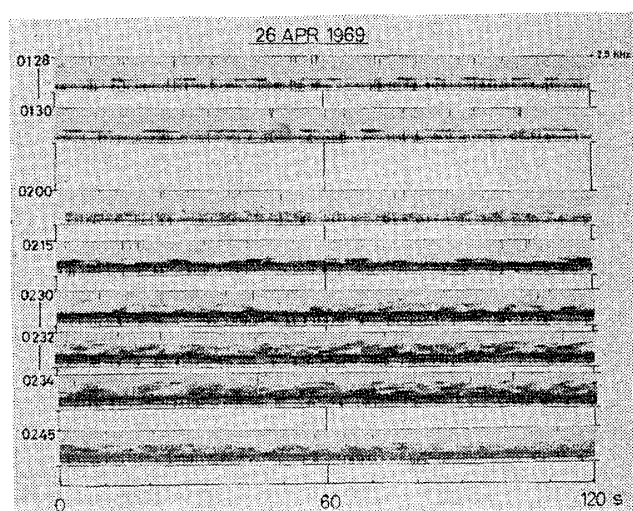
- 1) 明け方に見られるオーロラ(パルセーティングパッチ)に伴い発生する事が多い。
- 2) pi-1 形地磁気脈動と同時に現われる。
- 3) 朝方の地磁気湾形変動(ネガティブベイ)の回復期に多く現われる。
- 4) ダイナミックスペクトルを見ると、三種の重要な時間尺度が見られる。まず細かく見ると、0.3~0.1秒の非常に速い上昇構造(riser)を有し、それが5秒内外の群をなし、さらにそれらの群は、10秒内外の出現周期を有する(図9 a, 図9 b)*。またこれらの riser 群は時間とともにドリフトアップしてゆく(図9 c)。この時間は長くて30分ぐらいである。

UNGSTRUP (1966) によるオーロラコーラスと思われる現象の発生はきわめてまれなものであるとされているが、図2の統計に現われた出現日数は50日で、まれな例とはみなせない

* これらの特徴は UNGSTRUP (1966) の示したスペクトル図中にも見られる。

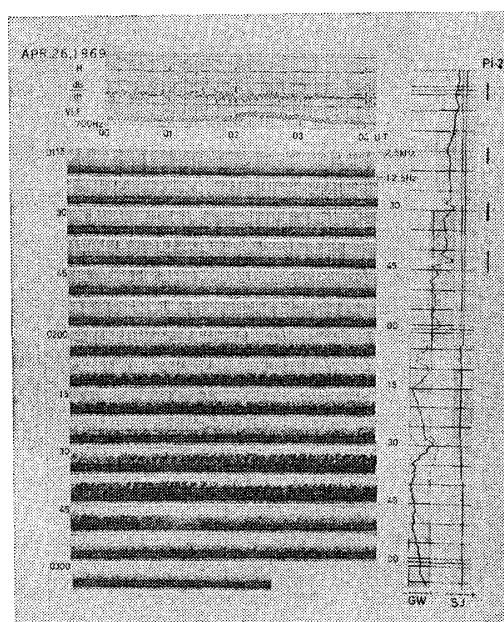


(a)

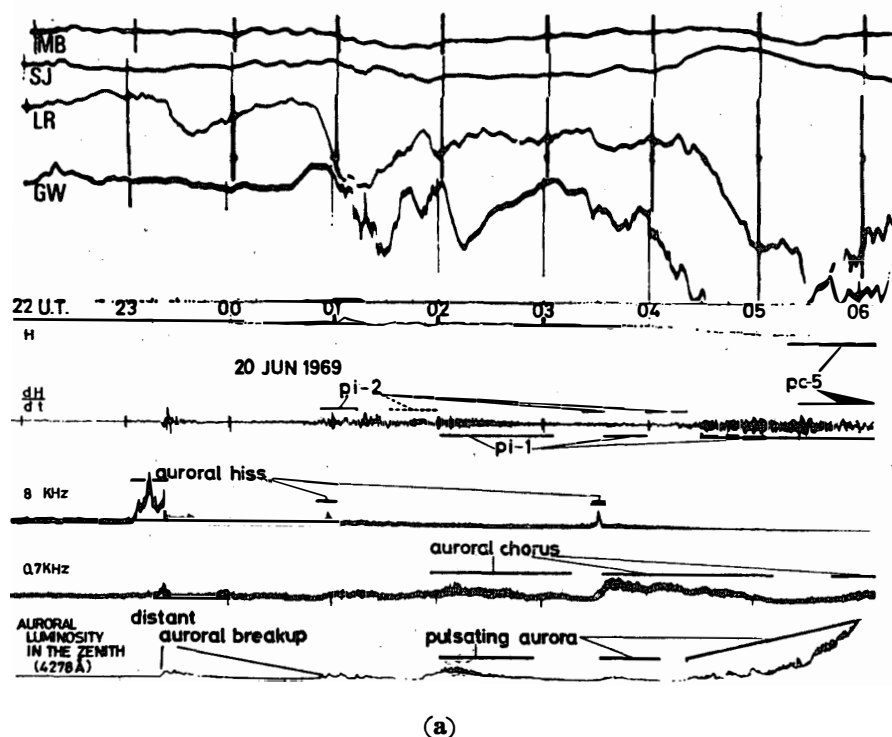


(b)

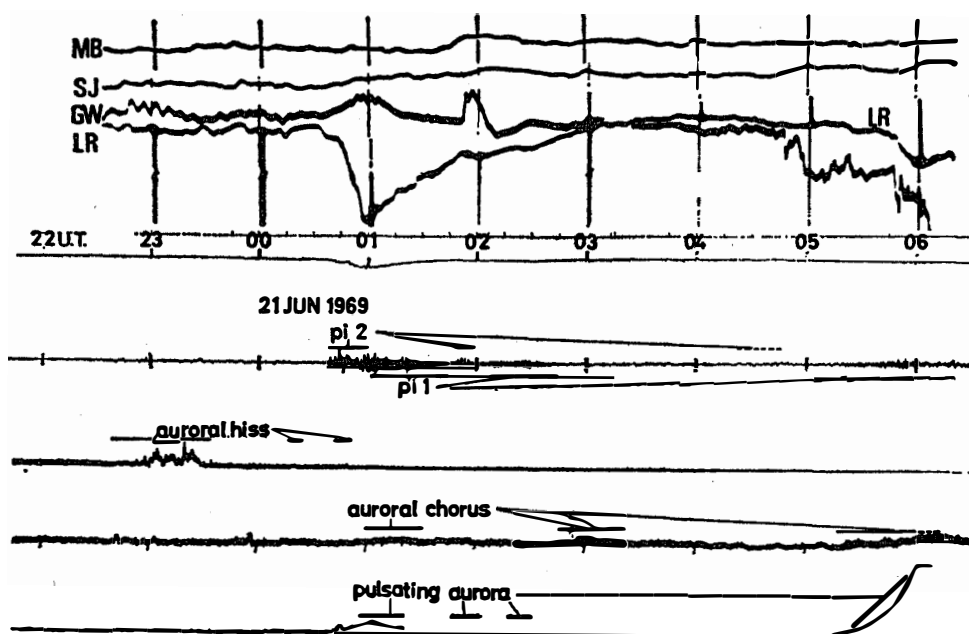
図 9 (a), (b), (c)
オーロラコーラスのダイナミック
スペクトル



(c)



(a)



(b)

図 10(a), (b) 相関記録図 (上から地磁気水平成分, 地磁気脈動, VLF 8kHz, VLF 700Hz, 天頂極光強度) と M'Bour, San Juan, Leirvogur, Great Whale River の地磁気水平成分

ように思える。もちろん緯度の違いによることも考えられるが、オーロラコーラスの強度が弱く（ポーラーコーラスに比べ 1/10 以下）、発生時間が限られていることなどにより、見落とされがちになったのではなかろうか。図 10 a, 図 10 b に昭和基地での相関記録図と北半球ではあるが AEJ の活動度を知るのに必要と思われる観測点（M'Bour, San Juan, Leirvogur, Great Whale River）の地磁気水平成分の記録を並べた。この図には昭和基地付近の夜の現象が典型的に現われていて、この中で上述のオーロラコーラスの特徴 1), 2), 3) が容易に確かめられる。1)~3) の特徴は、モルフォロジー的に言って、オーロラコーラスがサブストームの結果として生じるもので、しかも他の現象がそう思われているように朝方の強い電子束によることを思わせる。図 10 a, 図 10 b も極光帯の昭和基地より、やや時間の遅れた地方で起きたオーロラ活動により発生した高エネルギー電子雲がほぼ磁気緯度に沿ったドリフト運動を行なうとき、ある不明確な過程で昭和基地を通る磁力線上で、エミッションを発生するという説明を可能にする。

4. あ と が き

解析が十分に進んでいない現在、多くを述べられなかったが、オーロラヒスについて言えば、275kHz でも現象が認識されたこと、80Hz の記録で1969年11月26日の ssc の際、常時の 20dB 近いレベル上昇が見られ、ポーラーコーラスの周波数が上昇したことを考慮すると、何か別の現象を考える必要があるのではないかと考えている。またまえがきにも述べたが、地上観測の役割が変質しつつあり、そういう意味でむずかしい状態にある現在、その定常性、定点性、あるいは多点化への可能性という利点をいかに生かすべきかについて、適格な見通しを立てるべく広範な意見の喚起が必要かと思われる。

最後に、観測実施にあたり、あらゆる面でご協力いただきました第10次隊各部門の皆様、ならびに準備段階でご指導いただいた東京大学理学部地球物理学研究施設および地球物理学教室の皆様に感謝致します。

文 献

- BURTON, E. T. and E. M. BORDMAN(1933): Audio-frequency atmospherics. Proc. Inst. Radio Engrs, 21, 1476-1494.
- HAYASHI, K., S. KOKUBUN and T. OGUTI(1968): Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation. Rep. Ionos. Space Res. Japan, 22, 149-160.
- HAYASHI, K., S. KOKUBUN and T. OGUTI(1968): Solar flare effect on VLF chorus. Rep. Ionos. Space Res. Japan, 22, 285-287.

- 国分 征(1970): VLF emission と関連現象. 理研シンポジウム講演集「高緯度地方のエアロノミー」, 19-32.
- KOKUBUN, S., K. HAYASHI and T. OGUTI(1969): VLF emission study at Syowa Station, Antarctica, polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation. JARE, Sci. Rep., Ser. A, No. 6.
- MOROZUMI, H. M.(1965): Enhancement of VLF chorus and ULF at the time of SC. Rep. Ionos. Space Res. Japan, 15, 371-374.
- MOROZUMI, H. M. and R. A. HELLIWELL(1966): A correlation study of diurnal variation of upper atmospheric phenomena in the southern auroral zone. Rep. No. SEL-66-124, Radioscience Lab., Stanford Electric Lab., Stanford Univ., Stanford, Calif.
- NISHINO, M. and Y. TANAKA(1969): Polarization and arriving direction of VLF emissions. JARE, Sci. Rep., Ser. A, No. 7.
- RENARD, C.(1961): Variations diurnes et cycliques de l'intensité des bruits radioélectriques naturels de très basses fréquences. Compt. Rend., 252, 1365-1367.
- UNGSTRUP, E. and L. M. JACKEROTT(1963): Observation of chorus below 1500 cycles par second at Godhavn, Greenland from July 1957 to December 1961. J. Geophys. Res., 68, 2141-2146.
- UNGSTRUP, E.(1966): Association between VLF emissions and flickering aurora. J. Geophys. Res., 71, 2395-2396.

(昭和46年1月5日受理)