

SSC に伴う VLF エミッションの特性
—1977年9月21日の SSC に関連して—

林 幹治*・鶴田浩一郎**・国分 征*・小口 高*
渡辺富也***・R. E. HORITA****

Characteristics of VLF Emission during SSC
—A Preliminary Report on SSC Effect
on 21st September 1977—

Kanji HAYASHI*, Koichiro TSURUDA**, Susumu KOKUBUN*, Takasi OGUTI*,
Tomiya WATANABE*** and R. E. HORITA****

Abstract: SSC on 21st September 1977 is found to have given impact to VLF emission source in the magnetosphere and also to a power line system on the ground.

A new feature of SSC effects to VLF emission was obtained on the basis of direction-finding technique for VLF waves, and revealed that the emission zone in the north expands southward during the rising phase of the SSC, adding to the known SSC effects, increases in average frequency, band width and integrated power of VLF emission

Power line harmonic noise, specifically in even harmonics, increased prominently and oscillated correlated with geomagnetic pulsation after the SSC. This phenomenon is explained as the result of wave distortion effect in transformers in a power line system when the electric current originated to the earth current induced at the time of the SSC flowed through a pair of neutral points of the transformers grounded to the earth

要旨. 1977年9月21日に発生した SSC は磁気圏内の VLF エミッションの発生領域に影響を与え、さらに地上の電力送電系へもその影響を及ぼした模様である。

VLF エミッションに対する SSC 効果としてこれまでに知られているような周波数、帯域幅、積分強度等の増大のほか、VLF 波の方探の方法により、SSC の開始時にエミッションの発生領域が北から南へと広がるということが認められた。さらに、SSC に伴う誘導磁力計の変動と対応して、電力線よりの高調波雑音成分、

* 東京大学理学部地球物理研究施設 Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, 11-16, Yayoi 2-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113

** 東京大学宇宙航空研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153

*** Department of Geophysics and Astronomy, University of British Columbia, 2075 Wesbrook, Vancouver 8, B C, Canada V6T 1W5

**** Department of Physics, University of Victoria, Victoria, B C, Canada V8W 2Y2

特に偶数次の強度が顕著に増大、変動した。これは、電力送電系中の変圧器の接地点を通じ SSC に伴う誘導地電流が、変圧器の鉄心に磁氣的バイアス作用を起こしたため生じた波形歪の結果と考えられる。

1. 序

太陽風中の不連続面の通過が、磁気圏の圧縮膨張をもたらし、地球上で数十 nT 内外の磁場変動として観測され、SSC, SI などと呼ばれている。これらの磁場変動は原因がはっきりとしていて形も単純なので、それらの影響をこうむる諸現象を解明する上に有益な情報を提供し得る。顕著な SSC, SI は年間 30 回程度発生するがその影響を受ける現象、たとえば VLF エミッションの発生頻度を 1 日平均 50% とすれば、VLF エミッションに対する顕著な SSC あるいは SI 効果は、月に 1 回程度となり、このような例を捕えるには、かなり密度の高い連続観測が必要となる。

現在までに明らかになっている VLF エミッションへの磁気圏の圧縮膨張の効果は、磁気圏の圧縮に対応する SSC あるいは SI⁺ に伴い、高緯度のコーラス型の VLF エミッションは、1) 平均の周波数の上昇、2) 周波数帯の拡大、3) 周波数について積分された放射強度がしばしば増大する。逆に、磁気圏の膨張に対応する SI⁻ に際しては、1) 平均周波数の減少、2) 周波数帯域の減少、3) 積分強度は激減し多くの場合現象が消滅することが多い。その他付带的に、VLF エミッションでの SSC, SI 効果の開始は、同じ観測点で観測される磁場変動の開始よりも約 30 秒先行すること、さらに 3) について補足しておけば、放射強度の強い、言い換えれば、降下粒子束の大きいと思われるような状況で発生した SSC 効果においては、積分強度の変化が小さいという傾向がある。

以上のような事実は高緯度コーラス型 VLF エミッションが、電子サイクロトロン不安定によって発生すると考えると、極めて都合よく理解できるものである。

2. 観測結果

2.1. 観測の概要

IMS プロジェクトの一環として、我々がカナダのマニトバ州で行った観測期間で、特に 1977 年 9 月 21 日に得られた VLF エミッションへの SSC 効果について述べる。

この例は約 1 週間という短期の観測期間にもかかわらず、幸運にも記録できたものであること、VLF 波の到来方向を議論し得る位相関係のはっきりした垂直電場と水平磁場二成分についての良質の磁気テープ記録としては最初のものであること、現地でスペクトルの実時

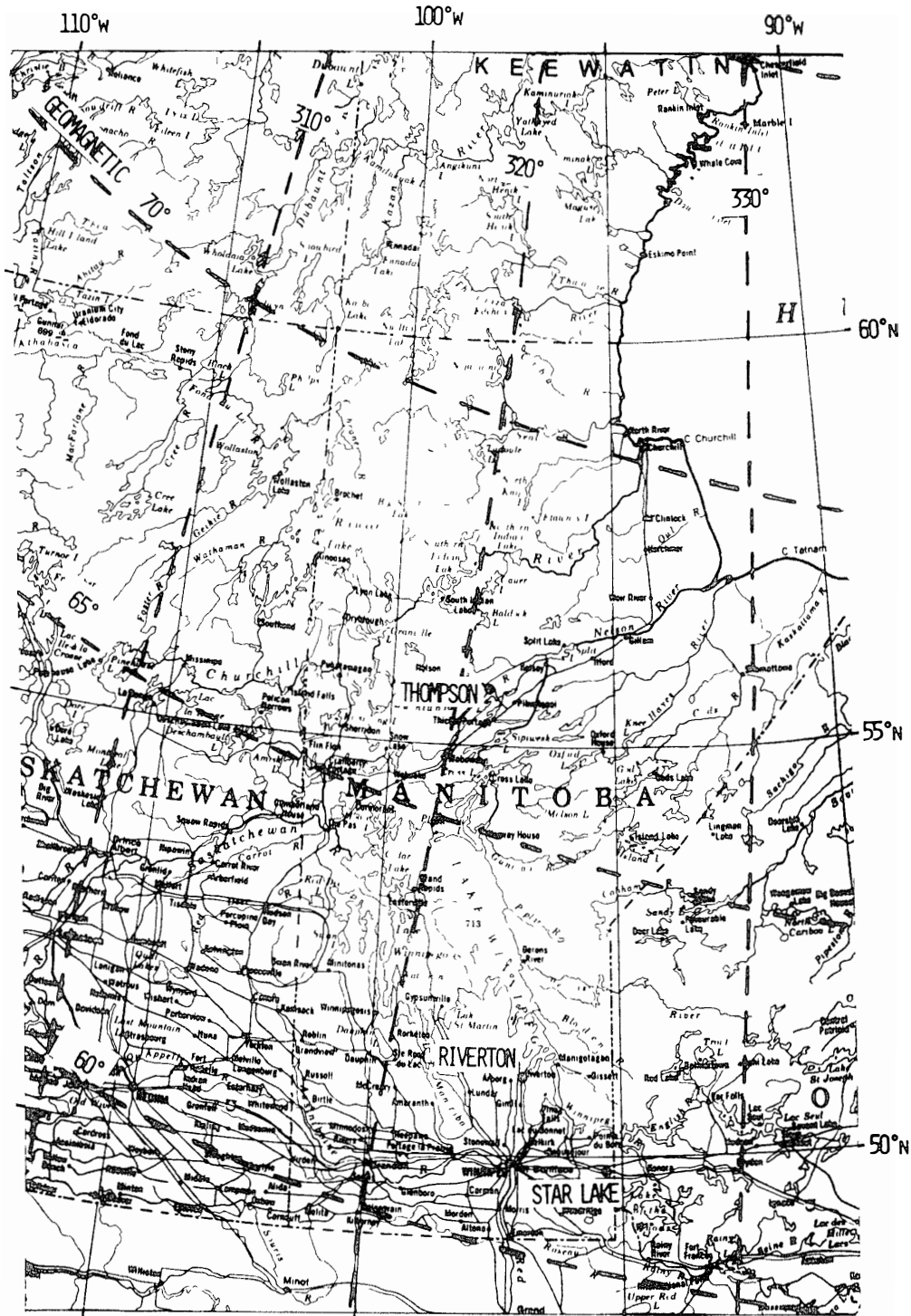


図 1 観測点 (Thompson, Riverton, Star Lake) の位置

Fig 1 Location of observation sites, Thompson, Riverton and Star Lake

間表示を行ったことにより、VLF エミッション中の異常から SSC の発生を知り、地上での磁場変動の開始を約 20 秒先んじ予知した最初の例である点、さらにこの SSC は単に磁気圏という自然環境に影響を与えただけでなく、後に述べられるように、地表の人工的施設である電力送電系という思いがけない個所に、影響を与えていたことを見せてくれた点などで意義深い一例である。

2.2. SSC に伴う VLF エミッションの特性

VLF 波の観測がなされたのは Riverton (51°N , 97°W , 地磁気緯度 62.2° , $L=4.6$) でここを

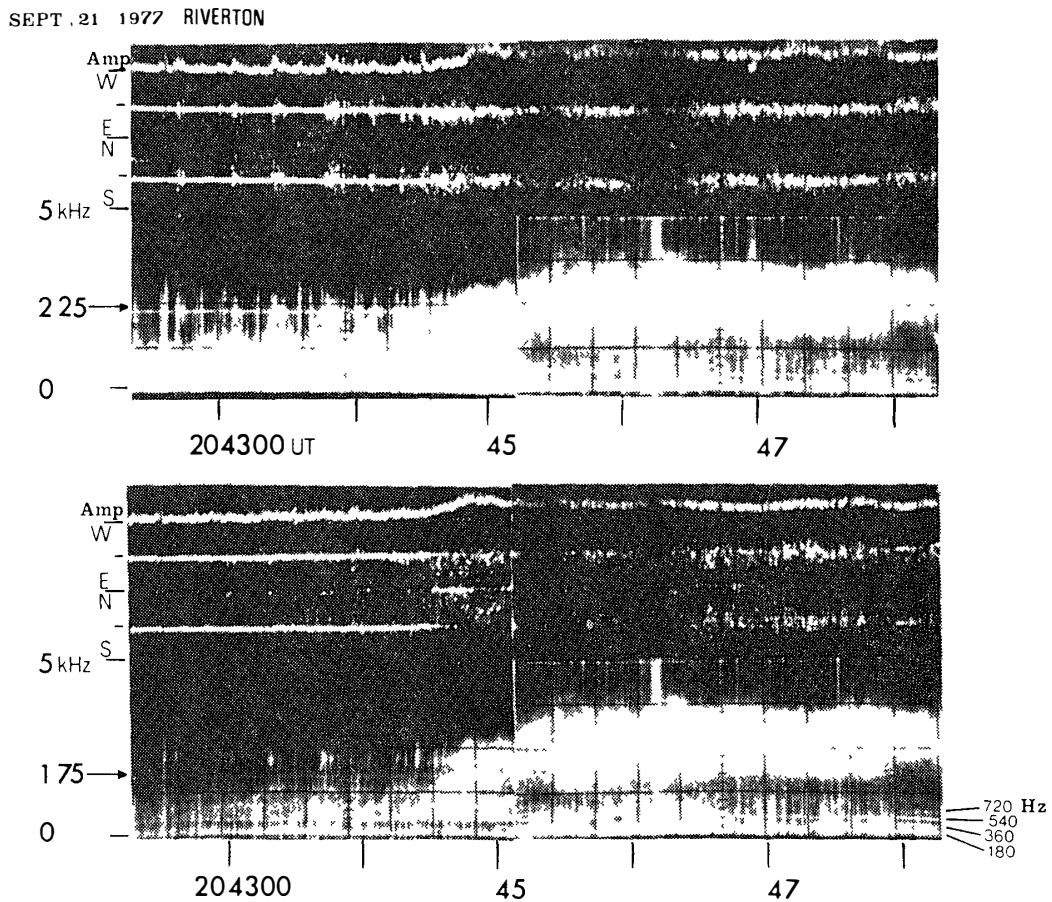


図 2 VLF エミッションに対する SSC 効果 各図の下部より 0~5 kHz のダイナミックスペクトル, 1.75 kHz または 2.25 kHz の周波数での VLF 波の到来方向の方向余弦の南北成分, 東西成分および, 同じ周波数での磁場水平成分の振幅が示されている. SSC 効果は 20 h 44 m 30 s に始まる 20 h 45 m 以後 180~720 Hz 帯で 180 Hz の高調波が顕著である

Fig 2. SSC effects for VLF emission From the bottom to the top in each frame, dynamic spectrum between 0 Hz and 5 kHz, N-S and E-W components of arrival direction of waves represented in directional cosine, and amplitude of horizontal magnetic field for a selected frequency (1.75 kHz in lower panel and 2.25 kHz in upper panel) SSC effects for VLF emission start at 20h44m30s, but harmonic noise from power line is prominent after 20h45m

含め Thompson と Star Lake においては ULF の観測が実施された (図 1).

VLF エミッションの SSC 効果が始まる前, 弱いコーラス型のエミッションが 1 kHz 以下に, 2-2.5 kHz に間欠的にディスクリートエミッションが存在していた (図 2). SSC の影響は 20 時 44 分 30 秒頃より始まり, 1 kHz 以下にあった VLF エミッション帯の周波数は上昇, 拡大し, この例においては積分強度の大幅な増加が見られた (図 3). 図 2 のダイナミックスpekトルの上には 1.75 kHz, 2.25 kHz での波の到来方向の方向余弦の水平成分とそれぞれの周波での振幅が表示されている. 図 4 は Thompson, Riverton, Star Lake での誘導磁

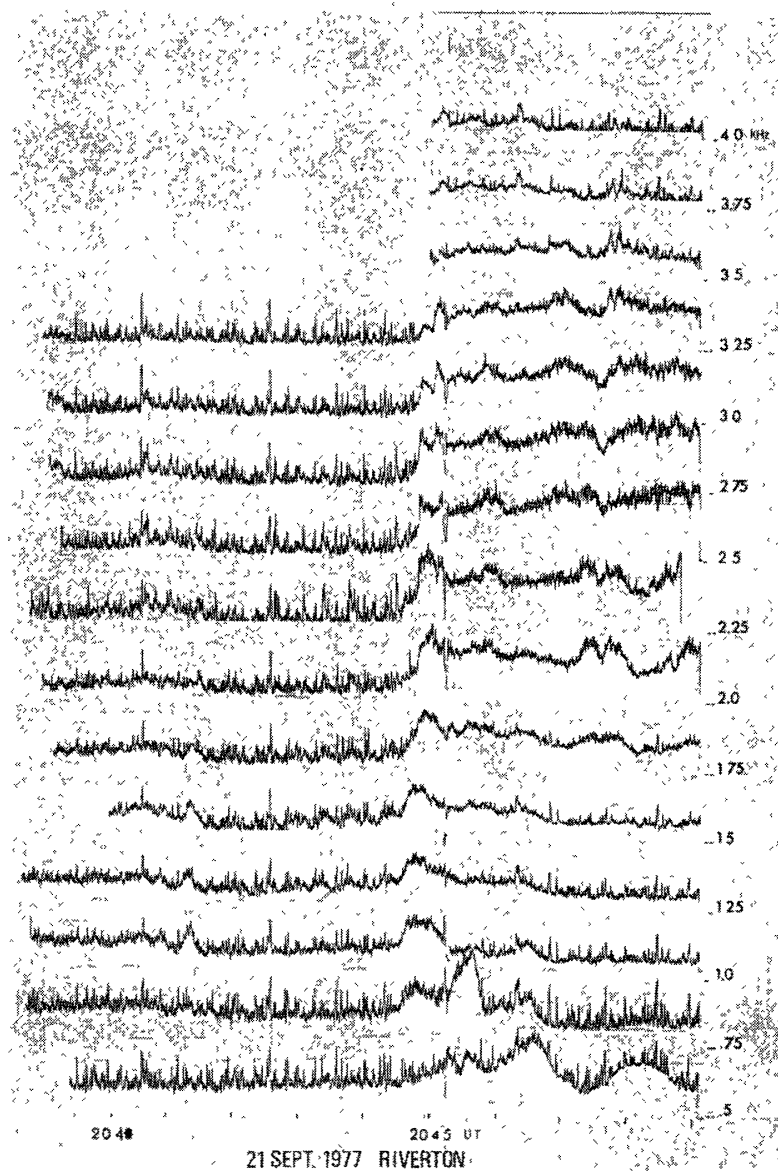


図 3 色々な周波数における SSC 時の VLF 波の振幅変化

Fig 3 Variations of wave amplitude at various frequencies

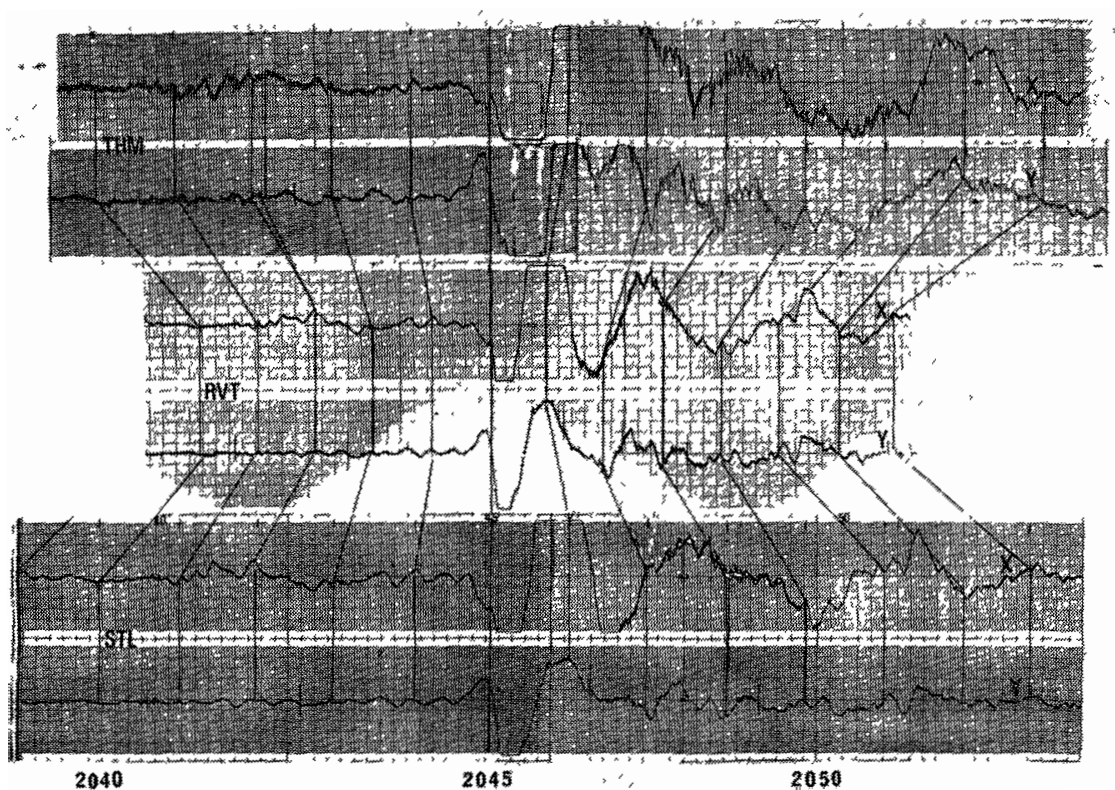


図 4 Thompson, Riverton, Star Lake の誘導磁力計の記録

Fig 4 Horizontal components of induction magnetograms at Thompson, Riverton and Star Lake

力計の水平成分の記録である。磁場変動の始まりは 20 時 45 分であり、VLF エミッション中の SSC 効果の始まりより約 30 秒遅れている。この時間差を $L=4.6$ の磁気圏赤道面から伝わる Alfvén 波と Whistler 波の伝搬速度の違いとすると、平均の Alfvén 速度は約 1500 km/sec という値になるが、以下に述べるように VLF エミッション中の SSC 効果がより高緯度側より始まるものを見ているとするとこの値はもっと大きくなる。

波の到来方向について見ると、1.75 kHz では SSC 効果の開始直後には北方限界付近を示していたものが、15 秒程で天頂近くまで接近し、再び少し北方へ遠ざかる。2.25 kHz では SSC の影響が出始める前より存在したディスクリット・エミッションは、ほぼ天頂方向から伝搬していた。SSC の影響により低い周波数帯より広がってきたものについても、天頂近くよりの伝搬を示している。SSC 効果が始まって 30 秒経過した後には、全周波数帯に渡って波の到来方向は大むね天頂であった。SSC の上昇期に相当する開始 30 秒に、顕著な到来方向の変化が認められるということである。図 5 にこの点を詳しく見ることができる。図 5 では 2.75 kHz での到来方向の変化も示されているが、1.75 kHz にくらべると小さいが南北の動き

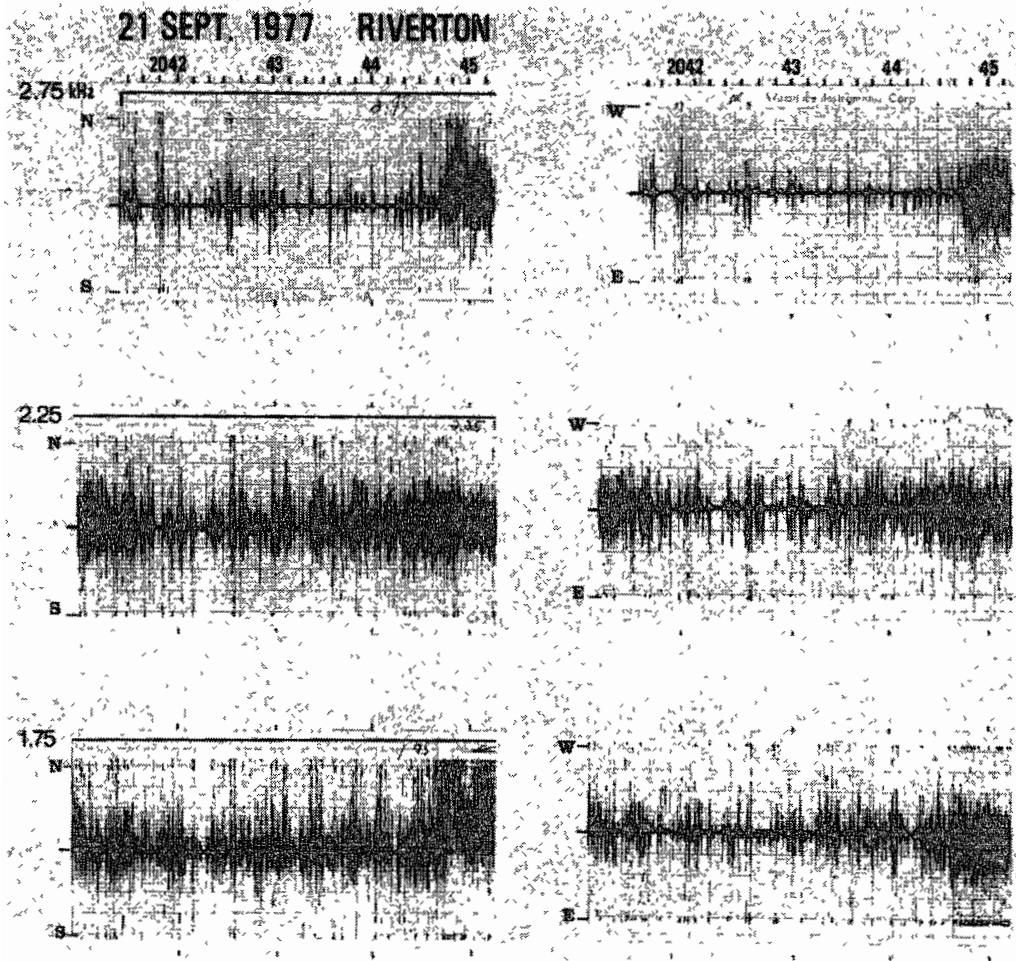


図5 3周波数でのVLF波の到来方向 左側に南北成分の余弦、右側に東西成分の方向余弦の大きさが示されている

Fig. 5 Variations of arrival direction of VLF waves at the three frequencies, 1.75 kHz, 2.25 kHz, 2.75 kHz, where N-S components and E-W components of directional cosine are represented on the left-hand and right-hand sides, respectively

が認められる。2.25 kHzで到来方向の顕著な変化が認められないのは、元々天頂付近に存在していたディスクリート・エミッションの影響と見るのが妥当であろう。

以上の結果をもとに、SSC開始前にはコーラス型エミッションは、観測点のはるか北方の緯度に対応する磁気圏赤道面で、サイクロトロン不安定の状態により発生していて、一方低緯度側では波の発生については、かなり限界安定に近い状態にあったと考えることが可能である。その後、SSCに伴う磁場増加が電子のピッチ角異方性の増大をもたらし、限界安定の状態は高緯度側より次々に破れて、エミッションの発生領域は低緯度側へと広がったと考えられる。

図6は磁場増加による周波数の上昇と上記の状況を模式図化したものである。観測点の緯

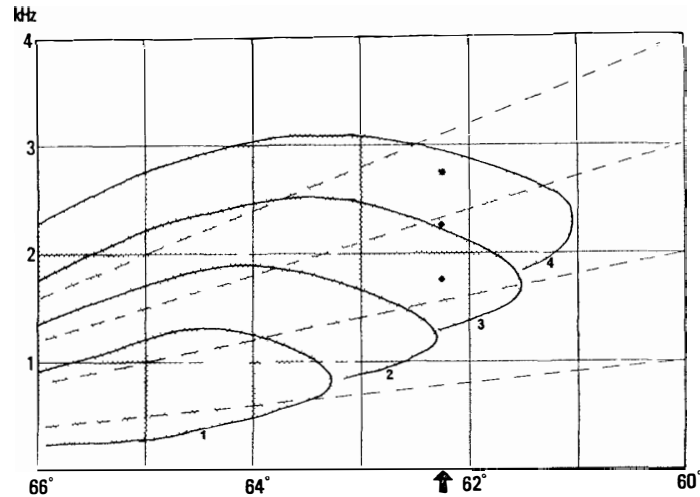


図 6 観測結果に基づいて作られた 9 月 21 日の SSC の際のコーラス型エミッションの周波数の時間的空間的变化の模式図 点を打たれた領域が 1~4 の順で時間的に発達してゆく。

Fig 6. A schematic illustration of progressive changes of VLF emission zone in the frequency-latitude coordinates during the SSC on 21st September 1977.

度は矢印で示されている。破線は各緯度が対応する磁気圏赤道面でのサイクロトロン周波数によって規格化された目盛である。1.75 kHz でエミッションの発生領域の方向を時間の経過に従って追跡してみると、北方から天頂付近への移動、さらに再び北へのもどりという傾向が定性的には説明できる。

2.3. SSC の送電系への影響

図 3 には 500 Hz と 750 Hz 帯に大きな振幅変動が認められるが、これは図 2 を詳しく見ればわかるように、60 Hz の高調波の線スペクトルに起因する。SSC 効果の始まる前には、60 Hz の高調波ノイズは 180 Hz と 540 Hz と奇数次でしかも 180 Hz の奇数倍に卓越していた。磁場変動の開始と同時に、上述の 180 Hz, 540 Hz の強度が著しく増大するとともに、360 Hz, 720 Hz といった 60 Hz, あるいは 180 Hz の偶数倍の成分が出現して、時として奇数倍の成分を凌がしている。図 2 を見れば、これら高調波成分の強度が、1 分内外の準周期的変動をしているのが認められる。Riverton での誘導磁力計の X 成分の記録 (図 4) と比較してみると、磁場変動の負相と対応しているのは、最初の SSC の負のはね返り部分だけで、他は正相の部分との対応である。表 1 は対応する時間帯を書き出したものである。高調波成分が強まる時間の位相が、やや遅れることがあるが良い対応と言えよう。

このような事実は次のように考えるのが妥当と思われる。SSC に伴う電磁場の変動が、電力送電系に非線型的作用をおよぼしていることから、誘導地電流の一部が二つの接地点を通

表 1 電力線よりの高調波強度の大きい時間帯と対応する
誘導磁力計南北成分の振幅の大きい区間

Table 1. Intervals in which intense harmonic noise from power line and corresponding large amplitudes in X-component of induction magnetogram are observed.

Geomagnetic field	20h45m-20h45m30s	20h45m40s-20h46m25s	20h47m15s-20h48m20s
Power line harmonics	20h45m-20h45m30s	20h45m45s-20h46m40s	20h47m20s-20h48m20s the end of the tape

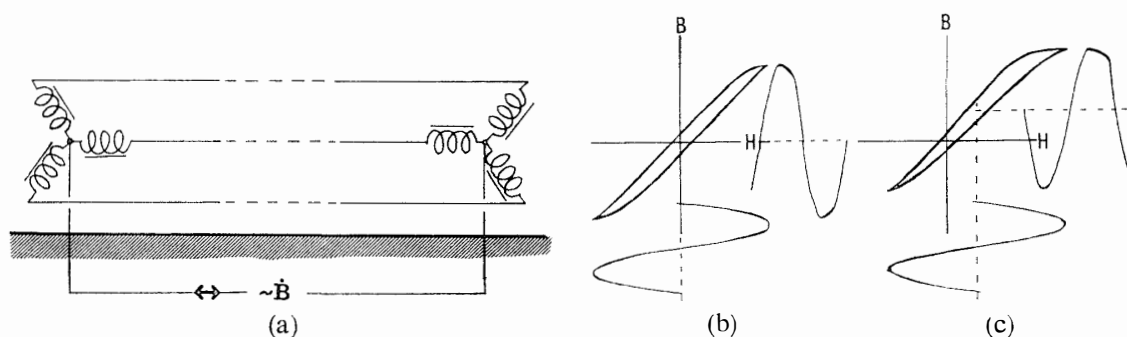


図 7 (a) 三相交流変圧器の接地状況と誘導地電流が接地点を通して変圧器を流れる様子を示す模式図

(b) 磁氣的バイアスの無い場合の変圧器の鉄心の磁化曲線と対称な波形歪

(c) 磁氣的にバイアス作用を受けた場合の磁化曲線と交流の非対称な波形歪

Fig 7 (a) Induced earth current can flow through the power transmission system via two neutral points of transformers grounded to the earth

(b) Magnetic hysteresis curve and distortion of alternating current (no bias magnetization)

(c) The same as case b, but with bias magnetization

して変圧器に流れ込んだとすると直流電流的バイアス効果により波形歪が起こる可能性がある。このモデルに従い三相交流を考えれば、基本高調波として 180 Hz が卓越し、バイアスのかからない正負相対称な歪には、奇数次の高調波が主要となる。しかし、直流的電流バイアスが変圧器に流れると、60 Hz の交流に対し正相と負相とに対応する磁化曲線は非対称となり、結局偶数次の高調波成分を含んだ非対称に歪んだ波形となる (図 7)。

どの程度の電流が、どの送電系に接地点を通して流れたかという情報は、現在までのところ得られていないが、このような高調波成分が強かったのは東西方向の磁束、すなわち南北に走る送電線に関連しているらしいということで、近くの主な送電系が南北に走っている点との矛盾は無い。どの程度の電流が流れ得るかは地下の電気電導度、接地点間距離、磁場変動の大きさなどがかわる複雑な問題であるが、一つの目安として 10 nT の磁場変動が、一

様導体球の地球に一様に加えられた場合の帯状電流の大きさは 10A/km 程度となり, 上記のような状況を作ることには困難は無いと考えられる. これまでにも地磁気嵐が原因となった電力系への障害は, 10年に一度程度の割合で発生しているようである. 変圧器の鉄心が完全に飽和して電流が増大し, Joule 熱の増加が起こり, 変圧器の破壊につながるようなことはまれであろうが, 波形歪の増大程度のできごととはもっと頻繁に起きていても不思議はない. さらにこのような現象に伴う高調波成分の増大が, 電磁波として磁気圏へ放出され, 磁気圏プラズマとの間にエネルギーの授受が行われる可能性もあり, 自然と人間のかかわりはさらに複雑化してゆくようである.

3. 終りに

自然が提供してくれる貴重な active experiment とも考えられる SSC 効果は今後, 1) 例数を蓄積して, 磁気圏の多様な状態に対応する応答の違いを定量的に整理する. 2) 地上観測によって認識される現象の空間的広がり様子を何らかの方法で確かめる. 3) 新しい観測結果が, 不確定なパラメーターの消去, または修正につながるような 1), 2) を加味した適切なモデル作りなどが課題となろう.

文 献

- HAYASHI, K., KOKUBUN, S. and OGUTI, T. (1968): Polar chorus emission and worldwide geomagnetic variation. Rep. Ionos. Space Res. Jpn., **22**, 149-160.
- HAYASHI, K., OGUTI, T., WATANABE, T., TSURUDA, K., KOKUBUN, S. and HORITA, R. E. (1978): Power harmonic radiation enhancement during the sudden commencement of a magnetic storm. Nature, **275**, 627-629.
- 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.

(1978年6月10日受理)