地上観測されたホイスラーモードサイプル 信号透過領域とプラズマポーズの関係

池 田 愼

要約

終了したサイプル実験ではあるが、1975年と1979年に行われたサイプル人工 電波の観測結果の特徴を改めて検討し、報告する。1975年に南極サイプル基地 から人工 VLF 信号を送信する壮大な実験が開始され、電離圏を通過、赤道面付 近で増幅、ダクト伝搬してきたその人工 VLF 信号が、反対半球のカナダで受信 された¹¹。コーラスと呼ばれる自然電波も含めたそれらの電波は、ホイスラー モード波として、プラズマ圏内・外でプラズマポーズ近くを地上まで伝搬する事 が到来方向観測と多点観測から予想されていた。この論文で、これらの予想が確 認された。プラズマポーズの位置は、D.L.CARPENTER and C.G.PARK (1973)²¹ の方法によって推定される。又、プラズマ圏内での高速電子の流れの存在も確認 された³³。この論文で、サイプル信号の透過領域とプラズマポーズの位置の関係 を再検討し、L≈48にある HAARP 送信実験など、今後の電波送信実験の一助 となることを望む。

1. 1975 年のサイプル送信実験

1975 年 7 月中に行われた鶴田ら⁴⁾ (TSURUDA et al., 1977) によるサイプル信 号の観測結果と、プラズマポーズの推定位置との関係を改めて報告する。まず、 プラズマポーズの位置 L_{PP} を検討する。CARPENTER and PARK (1973)²⁾ によ ると、 L_{PP} は、ホイスラー空電の解析により $L_{PP}=5.7-0.47K_{P\max}$ で予測される事 を示した。ただし、 $K_{P\max}$ は 12 時間前から現在までの 3 時間平均の K_P の最大値



図1 1975 年7月24日の観測データのプロット(a)赤道面電子 密度の等値線と到来方向、(b)ホイスラー発生率とホイスラ ーエコーの比、(c)サイプル信号・磁気圏 VLF 放射・ホイス ラーのダイナミック・スペクトルの模式図。L of P.P. はプラ ズマポーズの位置を表す。

K. Tsuruda et al., ISAS RESEARCH NOTE, 42, 1 $(1977)^{10}$ \sharp ϑ $_{\circ}$

である。1975 年 7 月 24 日の 3 時間平均の K_P は、WDC for Geomagnetism, Kyoto の記録により、7 月 23 日 12:00 から 0+, 1, 1, 2-, 3-, 1+, 2, 2-, 1+, 1, 1, 2-であった。したがって、上記の方法により、そのプラズマポーズの位 置は、7 月 24 日、時刻 0:00 UT から 24:00 UT まで、3 時間毎の $K_{P \max}$ =3-, 3-, 3-, 3-, 3-, 2, 2, 2-から決められる。対応するプラズマポーズの位 置 L_{PP} は、結果的に時刻 0:00 UT から 15:00 UT では、 L_{PP} ~4.3、時刻 15: 00 UT から 24:00 UT では、 L_{PP} ~5.1 付近であった事が推定された。サイプル 信号、ホイスラー、コーラス等の自然電波の伝搬通路は、電波の到来方向から決 定された⁴⁾。この実験期間のコーラスとサイプル信号の透過範囲とプラズマポー ズの位置の関係が、図1において示されている。この図は、TSURUDA et al.

(1977)⁴⁾ と池田⁶⁾ によって、以前にも示されている。(a) には、ホイスラー空電 の到来方向(・)、サイプル信号の到来方向(〇)、4.0 kHz 自然 VLF 放射の到来 方向(網掛け矩形)が、電子密度線の図上に、UT に対して示されている。(b) には、ホイスラー空電の発生率(黒丸)とホイスラーエコーの比(白丸)が示さ れている。(c) には、自然 VLF 放射とサイプル信号の周波数スペクトルの範囲 が図式的に示されている。最下部には、UT に対して、記録が行われた時間帯が 網掛け矩形で示されている。地方時(LT)は、UT-5で表されるので、図1は 地方時5時から12時までの、明け方から昼頃までの観測を表している。図1に おいて、L of P.P. はプラズマポーズのL 値を表しており、CARPENTER and PARK(1973)²⁾ による方法によって得られた。図1は、明け方、12:30 UT(午 前7時半)頃、急激にプラズマポーズが4.3 から5.1 まで地球から遠ざかった事 を表しており、それはプラズマ圏の膨張を意味しており、プラズマ密度の増加で 確認される。プラズマ密度は、ホイスラーの分散から推定されている。それに 伴って、地上で観測されるサイプル信号の頻度とホイスラー空電の発生率とエ コー比も増加している。

注目される点は、コーラス等の自然電波の伝搬通路が、プラズマポーズの位置 とほぼ重なっている点である。池田⁶⁾は、太陽光や磁気圏内電場等により、明け 方近くのようにプラズマポーズが緩やかに変化する場合、プラズマポーズの内側 でホイスラーモードの線形増幅率が増大する事を確認しており(図2)、コーラ ス等の自然電波の発生率が高まる事を説明可能にする。ただし池田⁶⁾は、プラズ マポーズの外側においてもホイスラーモードの線形増幅率が増大する可能性も確 認しており、それらの電波が何らかのメカニズムで到来している可能性も否定で きない。又、図1のコーラス・自然電波の受信は、デタッチトプラズマの存在、 電離圏内伝搬の可能性も否定はしていない。

2. 1979 年のサイプル送信実験

1979 年 7 月中に行われた鶴田ら⁴⁾ (TSURUDA et al., 1982) によるサイプル信号の多点観測は、トリガード・エミッションに関して MACHIDA and TSURU-



- 図2 11:30-12:00 UT の仮定された赤道面電子密度分布とホイスラ ーモード線形増幅率。プラズマポーズの位置は、L=4.3 と仮定され た。線形増幅率は、周波数 3.0 KHZ、3.8 KHZ, 4.0 KHZ で計算さ れた。
- 池田 慎、武蔵大学人文学会雑誌、第43巻、第3・4号、裏P126 (2012) より。



Map showing the location of the observation stations near Roberval in Quebec. The data obtained from station C was not used in this analysis.

図3 1979 年7月23日、サイプル送信実験のケベック州ロバーバ ル付近の7観測点 (A-G) 地図。 K. TSURUDA et al., J. Geophys. Res. 87, 742 (1982) より。

DA (1984)⁸⁰、そして透過領域に関して IKEDA et al (1988)³⁰ によって、さらに 詳しく検討された。この期間のサイプル信号の観測結果とプラズマポーズの推定 位置の関係も、1975 年の送信実験と同様に、この論文で報告する。

カナダ、ケベック州の観測点(AからG)の位置は図3において示されており、 観測点 D から G の受信されたサイプル信号のピーク振幅(上)と平均振幅(下) の具体例が、リニアスケールで、図4に示されている⁷⁾。観測点 D の L 値は 4.7、 観測点 G の L 値 は 4.15 で あった。1979 年 7 月 23 日 の 3 時間 平均の K_P は、 WDC for Geomagnetism, Kyoto⁵⁾の記録により、1-,2+,1+,1,1+,1+, 2,2 であった。したがって、上記の方法により、7 月 23 日、時刻 0:00 UT か ら 24:00 UT まで、3 時間毎に、 $K_{P \max}$ =2+,2+,2+,2+,2+,2+,2,2 となる。対応するプラズマポーズの位置 L_{PP} は、時刻 0:00 UT から 15:00 UT では L_{PP} ~4.76、時刻 15:00 UT から 24:00 UT でも、 L_{PP} ~4.76 付近であった 事が推定された。この観測では、サイプル信号、ホイスラーやコーラス等の自然



図4 1979 年7月23日、11:30 UT 頃に、観測点 D, E, F, G で観測されたサイプル信号の線形スケールの振幅、上記実線 は1秒パルスのピーク振幅、下記網掛け領域はその平均振幅 を表わす。

K. TSURUDA et al., J. Geophys. Res. 87, 742 (1982) \sharp \mathfrak{h}_{\circ}

電波の透過領域は、地上6点の多点観測から決定された。この実験期間のサイプ ル信号の透過領域とプラズマポーズの位置の関係は図5³¹に示されている。最北 の観測点DのL値は47であるから、明らかに透過領域はプラズマポーズ(*L_{pp}* ~4.76)の直ぐ内側にある。又、観測時間11:30UTから12:00UTは、地方時 で、午前7時から午前7時半の明け方に対応しているので、明らかにプラズマ圏 が膨らんだ過程にあったと予想される。結果的に、プラズマポーズもシャープで あるより、緩やかに変化している途中の可能性があり、1975年のサイプル送信 実験と同様に、プラズマポーズの内側で、ホイスラーモードの線形増幅率は大き いと予想される。もちろん、空電起源のホイスラーやサイプル人工電波の増幅も 有効になり、北半球まで伝搬する可能性があったと予想される。又、ダクトの有 無も重要な要素ではあるが、INAN and BELL(1977)⁹¹によって示されたプラズ マポーズダクティングが有効に機能する可能性もあると思われる。



 図5 1979年7月23日、サイプル送信実験で明らかにされた3か 所の電波透過領域(楕円形)とプラズマ圏内で移動する高速 電子。P.P はプラズマポーズの位置(L=4.76)を表す。
M. IKEDA et al., J. Geomag. Geoelectr., 40, 227 (1988) より。

さらに図5から、L値4.15の観測点Gのほぼ上空付近での高速電子の流れの 存在が予想され、プラズマ圏内部への高エネルギー電子のインジェクションとプ ラズマ圏内部でのコーラス等の波動の生成の可能性も確認された。

結論と議論

この論文の目的は、地上で観測されるサイプル信号がどのような位置で増幅 し、どのような方法で地上まで伝搬するのかを、*K_P*指数から予想されたプラズ マポーズの位置を基に、検討する事である。一般的に、サイプル信号は、内部磁 気圏に注入された高エネルギー電子によって、最初の段階はホイスラーモード波 の線形不安定により増幅され、その後非線形増幅すると考えられている¹⁰⁾。その 後、それらが地上で観測されるためには、地上までホイスラーモード波を導くダ クトやプラズマポーズダクティング⁹⁾等の何らかのメカニズムが必要になると考 えられている。以前、池田⁶⁾が示したように、線形増幅率は、磁気圏赤道面付近

武蔵大学人文学会雑誌 第46巻第1号

で生成されるホイスラーモード波の分布を、ほとんど正確に記述し、磁気圏の高 エネルギー電子の情報を与えると思われる。この論文において、緩やかに変化す るプラズマポーズの直ぐ内側で生成するホイスラーモード波が、地上で観測され る可能性も示された。今後、プラズマポーズ付近の様々な波動の励起と地上まで の伝搬を、例えばプラズマポーズの真下の HAARP²⁴⁾の電離層加熱による ELF/ VLF 放射実験のような新たな観測と実験²⁵⁾、理論的研究を含めて検討する必要 があるだろう。

謝 辞

この研究は、筆者が武蔵大学特別研究員として、2009 年度にインドとアメリ カアラスカ州アラスカ大学を訪問していた時に着想され、その後、筆者が修士課 程在学中の研究から発展させたものです。アラスカ大学では Sonwalkar 教授か ら多くの激励と御指導を賜り、さらに私が東京大学理学系研究科修士課程に在学 中から御指導頂いた文部科学省宇宙科学研究所鶴田浩一郎名誉教授と、スタン フォード大学 STAR Laboratory の Carpenter 名誉教授の御好意に、心から御礼 を申し上げます。 K_P 指数に関する情報は京都大学による WDC for Geomagnetism から得ることができ、感謝申し上げます。又、留守中お世話になりました人 文学部教職員の皆様他、多くの方々に深く感謝の意を表したいと思います。特 に、武蔵大学特別研究員としてこの機会を与えて、陰に陽に支えて下さった故平 林和幸元学長に心から感謝の意を表したいと存じます。本当に、有難うございま した。

[註]

1) 国立極地研究所編、南極の科学2オーロラと超高層大気、古今書院、1983年

- 2) D. L. CARPENTER and C. G. PARK, Rev. Geophys. and Space Phys. 11, 133 (1973)
- 3) M. IKEDA et al., J. Geomag. Geoelectr., 40, 227 (1988)
- 4) K. TSURUDA et al., ISAS RESEARCH NOTE, 42, 1 (1977)
- 5) WDC for Geomagnetism, Kyoto, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/expdata-j.html
- 6) 池田 愼、武蔵大学人文学会雑誌、第43巻、第3·4号、裏 P126 (2012)

533(56)

- 7) K. TSURUDA et al., J. Geophys. Res. 87, 742 (1982)
- 8) S. MACHIDA and K. TSURUDA, J. Geophys. Res. 89, 1675 (1984)
- 9) U. S. INAN and T. F. BELL, J. Geophys. Res. 82, 2819 (1977)
- 10) D. L. CARPENTER et al., J. Geophys. Res. 102, 14, 355 (1997)
- 11) M. GOLKOWSKI et al., J. Geophys. Res. 113, A10201, doi:101029/2008JA013157 (2008)
- 12) M. J. STARKS, J. Geophys. Res. 107, A11, 1336, doi:10.1029/2001JA009197 (2002)