

南極域における低 VHF 帯トーン伝送実験

椋本 介士[†] 福田 明[†] 吉廣 安昭[†] 長澤 正氏^{††}
山岸 久雄^{†††} 佐藤 夏雄^{†††} 楊 恵根^{††††} 金 力軍^{†††††}

A low VHF Tone Transmission Experiment in the Antarctic Region

Kaiji MUKUMOTO[†], Akira FUKUDA[†], Yasuaki YOSHIHIRO[†], Masashi NAGASAWA^{††}, Hisao YAMAGISHI^{†††}, Natsuo SATO^{†††}, Huigen YANG^{††††}, and Lijun JIN^{†††††}

あらまし 筆者らは、流星バースト通信を利用した南極域多点観測網の構築を提案している。本論文では、そのための基礎実験として、中山基地（中国）-昭和基地（日本）間で行われたトーン送受信実験の結果を報告する。この実験は、日本第 43~45 次南極観測隊および中国第 18~20 次南極観測隊の協力により 2002 年 3 月~2004 年 11 月の約 3 年間にわたって行われた。南極域では、流星散乱以外にもオーロラ等に起因する様々な現象により低 VHF 帯電波が見通し外に伝搬される。また、同地域には、電離層擾乱や風雪雑音といった特有の電波環境がある。本論文では、トーン送受信実験の結果を様々な角度から分析し、南極域における低 VHF 帯伝搬路の統計的性質を示す。

キーワード 流星バースト通信, 南極, 低 VHF 伝送路, 見通し外電波伝搬, オーロラ

1. まえがき

流星バースト通信 (MBC) は、地理的に離れた多数の観測地点で生成される小容量で即時性を必要としないデータの見通し外伝送に適している [1]。また、極域では、低 VHF 帯を利用する MBC は、HF 通信に比べて電離層擾乱などの影響を受け難いという特長がある [2]。筆者らは、この MBC を利用した南極域多点観測網の構築を提案し、そのための基礎実験を日本第 43~45 次南極観測隊および中国第 18~20 次南極観測隊の協力により 2002 年 3 月~2004 年 11 月の約 3 年

間にわたって行った [3]~[7]。

これまでに南極域で行われた流星散乱の研究は、おもに中高層の大気風観測等を目的とした後方散乱波に関するものであった [8]。高緯度地域での見通し外通信を目的とした流星散乱の研究は、グリーンランドやアラスカなど北極域で行われた実験 [9], [10] に限られ、南極域では、筆者らのもの以外は報告されていない。

極域においては、流星バーストのほかにも、様々なモードで低 VHF 帯電波が見通し外に伝搬される。おもに地方時の深夜に発生するオーロラ Es は、オーロラジェット電流にともなって発生すると考えられている [11], [12]。また、従来、中緯度型 Es といわれていたウインドシアーによる Es が、極域でも頻繁に発生しているとする報告もある [13]。これら Es 現象による伝搬は、マルチパスやドップラーシフトの少ない良質な伝搬特性を持つといわれている。一方、オーロラ散乱 [14] は、オーロラ発生時に形成される E 層プラズマの不規則構造による散乱現象で、強いマルチパスやドップラーシフトを伴うといわれている。極域には、さらに、極冠吸収、オーロラ帯吸収、F 層伝搬 [15]、風雪による静電雑音 [16], [17] など特有の電波環境があり、MBC に様々な影響を与えられられる。

[†] 静岡大学工学部電気電子工学科, 浜松市
Faculty of Engineering, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku,
Hamamatsu-shi, 432-8561 Japan
^{††} 沼津工業高等専門学校, 沼津市
Numazu College of Technology, 3600 Ooka, Numazu-shi,
410-8501 Japan
^{†††} 国立極地研究所, 東京都
National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome,
Itabashi-ku, Tokyo, 173-8515 Japan
^{††††} 中国極地研究所, 上海市
Polar Research Institute of China, 451 Jinqiao Road,
Pudong, Shanghai, 200129 China
^{†††††} 西安电子科技大学通信工程学院, 西安市
Xidian University, 2 Taibai Road, Xi'an, 710071 China

表 1 無線局の位置
Table 1 Location of the stations.

	地理的位置	地磁気位置 (CGM)
昭和局	69.0 °S, 39.6 °E	66.2 °S, 72.0 °E
中山局	69.4 °S, 76.4 °E	74.6 °S, 96.5 °E

本論文では、流星バースト以外の見通し外伝搬現象を、すべて単に非流星伝搬とよぶ。筆者らの実験においては、おもに地方時の夜間に非流星伝搬現象が頻発した。

南極域において、筆者らが行った実験は、トーン信号を用いて通信路の性質を調査する実験（トーン実験）および実際にデータ伝送を行いMBCシステムの伝送能力を調査する実験（データ伝送実験）に大別される。本論文では、前者の実験結果を、通信工学的観点から報告する。データ伝送実験については、文献[4]～[7]で報告されている。

本論文は、次のように構成されている。2.において実験概要を、3.において受信信号の処理および解析方法を示す。4.では、受信局の置かれた昭和基地周辺の雑音環境を示すとともに、本実験の統計結果への影響を考察する。そして、5.において実験結果を様々な角度から検討し、南極域における低 VHF 帯伝送路の統計的性質を明らかにする。

2. 実験概要

トーン実験は、施設の建設、試験運用などの後、2002年4月より本格運用を開始し、2004年11月末まで継続して実施された。無線局の位置を表1に示す。地理的には、両基地は約1430km離れたほぼ同緯度にある。CGM(corrected geomagnetic)座標系による地磁気位置では、昭和基地は磁気緯度67度付近にあるオーロラ帯のほぼ真下に、中山基地はオーロラ帯のやや内側に位置している。

実験システムの構成を図1に示す。トーン送信局は中山 (Zhongshan) 基地に、受信局は昭和 (Syowa) 基地に設置した。使用したアンテナは、すべて水平偏波5素子八木である。中山基地では、送信機器棟に近接した高さ6mのタワーに、仰角0度、方位角254度（昭和基地方向）で送信アンテナを設置した。昭和基地では、実験開始当初の2002年においては、バックアップを兼ねて、アンテナ高の伝送路特性への影響を調査するため、高さ4mおよび8mのタワーに仰角0度、方位角109度（中山基地方向）で設置した2基の

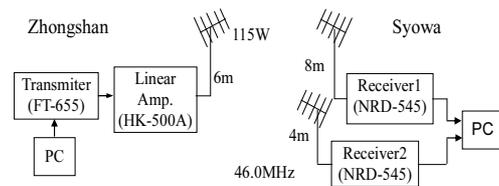


図 1 トーン実験システムの構成図
Fig.1 Equipment for the tone experiment.

アンテナを用いて2系統受信を行った。2003年1月以降は、8m高のアンテナをデータ伝送実験に転用し、トーン実験には4m高アンテナのみを用いた。なお、8m高および4m高アンテナのアンテナケーブルには、それぞれ長さ175mおよび150mの10D2E（減衰率31dB/km）が用いられた。また、アンテナ付近での安定した電源の確保が望めなかったため、前置増幅器は使用しなかった。

アンテナ高の違いは、主に垂直指向性に影響すると考えられるが、個々の受信電力波形に多少の違いが見られたものの、本論文で考察する統計結果には、ほとんど差異が認められなかった。そのため、以下の議論は、ほぼ3年間にわたって継続して行われた4m高アンテナによる受信結果のみを用いて行う。また、図および統計結果も、すべて4m高アンテナによるものである。

中山基地では、PC(Personal Computer)により生成した1250Hz正弦波を市販無線機（Yaesu FT-655、ただし周波数安定度を改良）により搬送波周波数46.0MHzでSSB変調し、線形増幅器（インターテック社製HK-500A、最大出力300W）により電力増幅して送信した。送信電力は、中山基地内の他の観測機器への干渉を避けるために、115W（アンテナ給電点での測定値）に制限して運用した。昭和基地では、市販受信機（JRC NRD-545、ただし受信周波数等を変更）を使用してSSB復調し、復調結果をPCに取り込んで信号処理および解析を行った。信号の処理および解析方法は後に示す。

実験は、図2に示す10分周期で行われた。中山局は、10分周期の3分間のみトーン信号を送信し、昭和局では、時間ずれを考慮して、前後10秒間を加えた3分20秒間の受信機出力をPCに取り込んだ（Record1）。両局のPC時刻はそれぞれGPSにより自動調整され、十分な正確さが保たれた。昭和局では、その実験周期の雑音状況を記録するため、Record1の直後

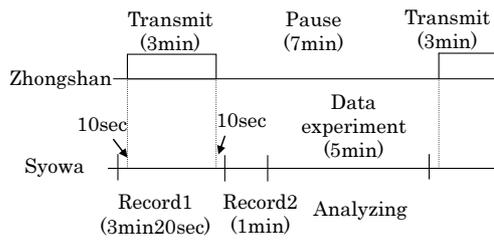


図 2 トーン実験における送受信タイミング

Fig. 2 Transmit and receive timing in the tone experiment.

の 1 分間についても受信機出力を PC に取り込んだ (Record 2) . 取り込まれた受信信号の処理および解析は、各周期の残りの 5 分 40 秒間に行われた。また、この間の 5 分間には、搬送波周波数 43.65MHz で、もう一つの MBC 実験 (データ伝送実験) が行われた。

3. 受信信号の処理および解析方法

Record1 および Record2 は、分解能 16bit、サンプリング周波数 8kHz で PC に取り込まれたデジタル信号である。このデジタル信号は、PC 内で、次のように処理および解析された。

- 1) Record1, Record2 の信号を通過帯域 1150-1350Hz (等価雑音帯域幅は 176Hz) の帯域通過フィルタ (BPF) に通す。
- 2) 両 BPF 出力について 8ms 毎の RMS (Root Mean Square) 値を求め、ハードディスクに保存する。Record1 から求めた RMS 値を受信 RMS 値、その 2 乗を受信電力とよぶ。同様に、Record2 から求めた RMS 値を雑音 RMS 値、その 2 乗を雑音電力とよぶ。
- 3) Record2 の 1 分間の 2 乗平均値を求める。これをその周期の平均雑音電力とよび、その平方根を平均雑音 RMS 値とよぶ。
- 4) 8ms 区間毎の受信電力からその周期の平均雑音電力を減じる (これを信号電力とよぶ)。受信電力は雑音電力と信号電力の和である点に注意されたい。
- 5) 8ms 区間毎に、信号電力と予め定めた固定基準値の 3dB, 4dB, ..., 10dB 値 (判定スレッショールド) を比較し、各スレッショールドに対する受信信号の有無を仮判定する。固定基準値には、実験開始前に測定した静穏時の平均雑音電力を帯域幅 2.4kHz に換算した値 (900000 [a.u.]) を用いた。2.4kHz に換算した理由は、45 次隊時に行う、筆者らが開発したシステムによるデータ伝送実験の伝送速度として 2.4kbps を予定し

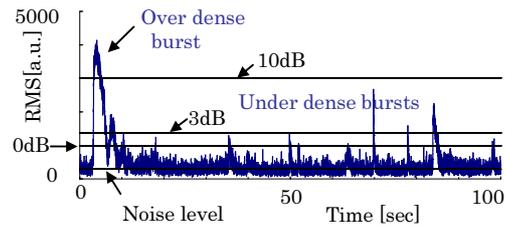


図 3 受信 RMS 波形の例

Fig. 3 Examples of received RMS waveform.

ていたからである。

- 6) ある区間の仮判定結果が受信信号有りであっても、その区間の前後の判定結果が受信信号無しであった場合、その区間は受信信号無しと判定する (孤立点除去)。
- 7) さらに、ある区間の判定結果が受信信号無しであっても、その区間の前後の判定結果が受信信号有りであった場合、その区間は受信信号有りと判定する (フィルイン)。
- 8) この判定結果が 4 区間以上連続して受信信号有りであった場合、最初に受信信号有りと判定された区間から伝送路が発生したとし、逆に 4 区間以上連続して受信信号無しであった場合、最初に受信信号無しと判定された区間で伝送路が消滅したとする。
- 9) 各判定スレッショールドについて、伝送路の発生時刻、継続時間を記録する。これは、伝送路の統計的性質を調査するためである。
- 10) 3dB スレッショールドに対する伝送路発生期間について、期間の前後 100ms を含めて受信信号波形をハードディスクに保存する。これは、ドップラシフトやマルチパスフェージングの有無など、伝送路の質を調査するためである。

図 3 は、2) の処理を行って求められた受信 RMS 波形の例である。図の縦軸は、AD 変換値より算出した RMS 値 (任意単位) である。図の左端の大きな波形はオーバードenseバースト (比較的大きな流星による電子密度の高い流星バースト) からの、また、それに続く急激に立ち上り指数的に減衰するいくつかの波形は、アンダーdenseバースト (比較的小さな流星による電子密度の低い流星バースト) からの反射波であると考えられる。なお、図中の Noise Level は、前述の 3) で求めたこの実験周期の平均雑音 RMS 値を、 x dB ($x = 0, 3, 10$) とラベル付けされた線は、{(この実験周期の平均雑音電力) + $10^{x/10}$ × (基準電力)} の平方

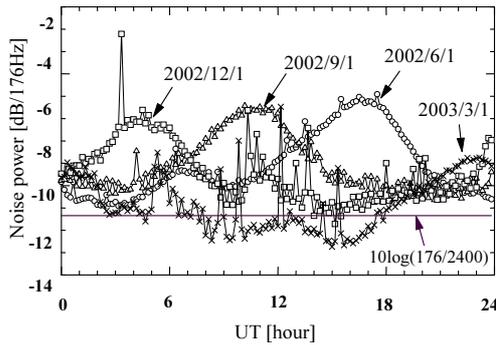


図 4 季節毎の雑音電力の日変動
Fig. 4 Seasonal daily variation of noise power.

根を示す．ここで、基準電力の値は、前述の 5) で示したように 2.4kHz に換算した静穏時の平均雑音電力 900000[a.u.] である^(注1)．

4. 昭和局の雑音環境

ここでは、受信局周辺の雑音環境を示すとともに、それらが上記の方法による解析結果に与える影響などを考察する．

図 4 は (帯域幅 176Hz に対する) 1 分間平均雑音電力の日変化を季節毎に示したものである．人工雑音の少ない南極域では、無線機内部雑音と銀河雑音が VHF 帯の基本的な雑音源である．各日に 1 回ずつ発生する緩やかなピークは、アンテナ方向が銀河系の中心に最も近づいたことを示し、その時刻は、3ヶ月で 6 時間ずつ早くなっている．図の -11.35dB に引いた直線は、基準雑音電力の 2.4kHz への換算前の値を表す．この値は、実験開始前の 2002 年 3 月における静穏時の平均雑音電力に基づいて設定したものであるが、2003 年 3 月の静穏時においてもほぼ同程度であったことがわかる．3 月は銀河雑音の影響が比較的小さな月であるため、設定した基準値は年間の平均雑音電力よりやや低い値であった．

図 4 には、また、時折突発的な雑音電力の増加が見られる．こうした突発雑音は、実験期間を通して不定期に観測された．しかし、この図の場合と同様、ほとんどの突発雑音の BPF 通過後の電力は基準値 (0dB) よりも十分に小さく、解析結果への影響は僅かであると考えられる．なお、それら突発雑音の多くは、電力

(注1): 参照信号による測定結果から、この基準値は、アンテナ給電点における受信電力が、 -124dBm 程度 (4m 高アンテナの場合) に相当すると考えられる．

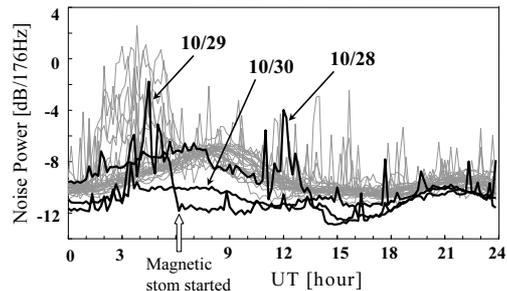


図 5 磁気嵐時の雑音電力
Fig. 5 Variation of noise power during geomagnetic storm.

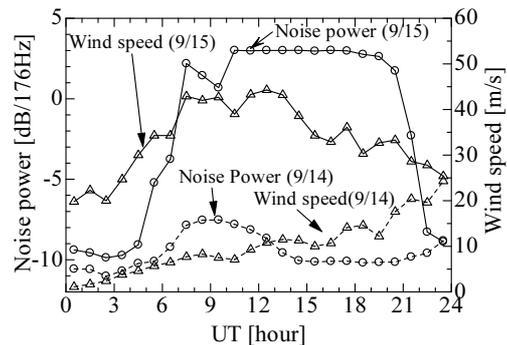


図 6 A 級ブリザード時の雑音電力
Fig. 6 Variation of noise power during a blizzard

波形の特徴などから、遠方の人工雑音が何らかの自然現象によって伝搬されてきたものであると思われる．

図 5 は、地磁気擾乱時 (2003/10/28-30) の雑音電力の日変動を示したものである．図には、比較のため、2003/10/1-27 の雑音電力の日変動も灰色で示した．情報通信研究機構 web サイト [18] によると、28 日 9:51(UT) に非常に強い太陽フレアが発生し、29 日 6 時 (UT) 頃から 30 日 16 時 (UT) 頃まで磁気嵐が観測された．極冠吸収はフレア直後に、オーロラ帯吸収は磁気嵐時に発生するといわれているが、筆者らの実験においては、磁気嵐の期間にのみ銀河雑音の減少が見られた．また、この銀河雑音吸収期間中には、流星伝搬によると思われる受信電力波形は観測されず、29、30 日の 20 時 (UT) 前後に非流星伝搬によると思われる波形のみが観測された．なお、この図の 29 日およびそれ以前の 3-6 時 (UT) において雑音の増加が見られるが、これは受信アンテナが 4:30(UT) 頃に太陽方向を向くために、太陽電波バースト (フレア時に発生) が受信されるからであると思われる．

図 6 は、2002 年 9 月 15 日に発生した非常に強いブ

表 2 集計から除外した日
Table 2 Days not included in the counting.

測定年	昭和局の受信停止等	中山局の送信停止
2002	4/4	4/21-23, 12/21, 12/23-25
2003	1/20, 22, 25, 2/3, 19, 7/19	2/23-28, 3/1-11
2004	2/7, 8, 21-29, 3/1-13, 24-26, 5/1-7	

実験期間 2002/4/1~2004/11/30 (集計日数 910 日)

リザード時の時間平均雑音電力とその時の風速 (気象庁 web サイト [19] による) を示したものである。図には、参考のため、前日の時間平均雑音電力と風速も破線で示した。風速が 30m/s を超えた 15 日 5 時台から風雪による静電雑音 [16], [17] と思われる雑音電力の増加が見られ、7~21 時台は飽和状態となった^(注2)。なお、この期間の受信 RMS 波形には、流星伝搬によると思われる波形は見られなかったが、この日の 19:50(UT) 頃に発生した非流星伝搬によると思われる強い受信信号は、雑音を抑圧して観測された。

5. 実験結果

本論文では、1 つの実験周期において、3. の解析によって受信信号があると判定された時間の和とトーン送信時間 (3 分間) の比をその実験周期のデューティ比とよび、判定スレッシュホールド x dB に対するデューティ比を x dB Duty と書くことにする。また、各実験周期の x dB Duty を、1 時間毎に平均したものを時間平均 x dB Duty、1 日毎に平均したものを日平均 x dB Duty などとよぶことにする。 x dB Duty は、受信信号電力の大きさが基準電力の x dB 以上となる時間割合を示すものであり、静穏時においては、2.4kbps の通信路の SNR が x dB 以上となる時間割合に対応する。そのため、通信工学的見地から最も重要なパラメータの一つである。そのため、本論文では、このデューティ比の統計結果に着目して議論を進める。

なお、以下の各種集計においては、他実験のための休止や電源トラブルなど様々な原因により、僅かでも欠測時間帯がある日は除外した^(注3)。集計から除外した日を表 2 に示す。

(注2): 実験に用いた受信機の帯域幅は約 2.4kHz であり、入力信号電力が基準電力の 14.5dB 程度で飽和状態となる。従って、広帯域の雑音は、帯域幅 176Hz 当りの電力が基準電力の 3dB 程度で飽和状態となる。

(注3): 2004 年 6 月 2-27 日においては、非流星伝搬時の波形観測のために受信機入力端に減衰器を挿入して測定したが、レベル補正して集計に加えた。

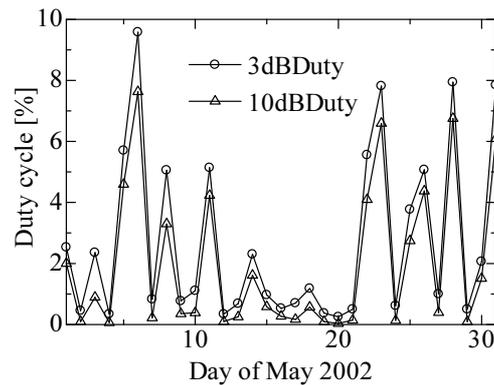


図 7 日平均デューティ比 (2002 年 5 月)
Fig. 7 Daily averaged duty cycle (May of 2002).

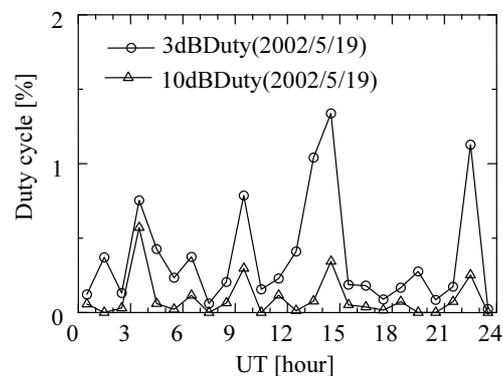


図 8 時間平均デューティ比の例 (非流星伝搬がない日)
Fig. 8 Hourly averaged duty cycle (meteor bursts only).

5.1 デューティ比の時間変動

図 7 は、典型例として、2002 年 5 月の日平均 3dB-Duty および 10dB Duty の変動を示したものである。図中のデューティ比が比較的大きな日は、後で示す 16-24 時 (UT) に頻発する非流星伝搬現象があった日である。なお、昭和-中山基地間の中点の地方時および磁気地方時は、それぞれ世界時より約 4 時間および約 1 時間進んでいる (LT UT+4h, MLT UT+1h)。一方、デューティ比が比較的小さな日 (例えば、1%に満たない日) は、非流星伝搬現象が発生しなかった日と考えられ、受信 RMS 波形の特徴などから、そうした日の信号伝搬は主に流星散乱によるものであったと考えられる。

図 8, 9 に、それぞれ、非流星伝搬がなかったと思われる日 (2002/5/19)、あったと思われる日 (2002/5/6) の時間平均 3dB Duty および 10dB Duty の典型例を

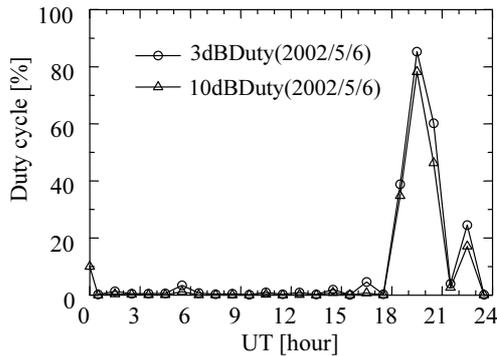


図 9 時間平均デューティ比の例 (非流星伝搬がある日)
Fig. 9 Hourly averaged duty cycle (with non-meteor propagation)

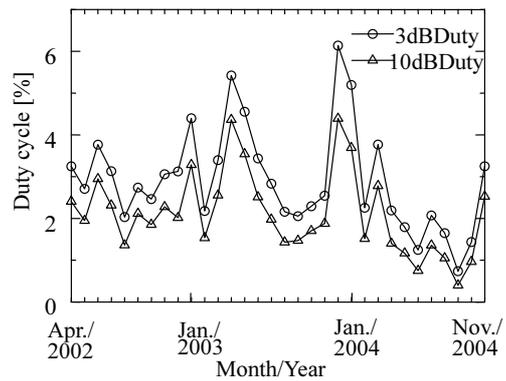


図 11 月平均デューティ比
Fig. 11 Monthly averaged duty cycle.

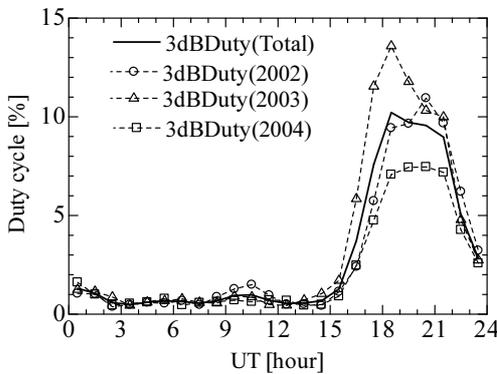


図 10 時間帯毎の年平均 3dBBDuty
Fig. 10 Hourly 3dBBDuty averaged over each year

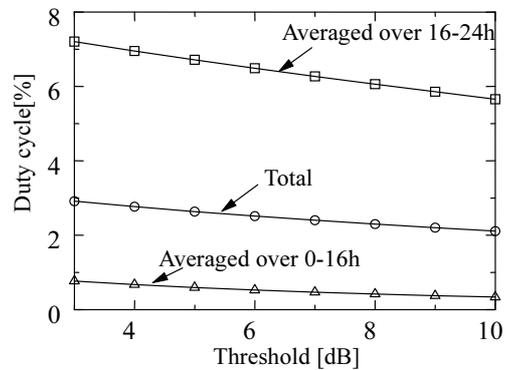


図 12 判定スレッシュホールド対デューティ比
Fig. 12 Duty cycle v.s. detection threshold.

示す。流星伝搬は、全実験期間を通して全時間帯にわたって散発的に観測された^(注4)。流星伝搬は、一般に継続時間が短く反射強度が様々であるため、図 8 では、3dBBDuty, 10dBBDuty とともに小さな値となり、また両者の比は大きな値となった。一方、非流星伝搬は、主に地方時の深夜に不定期に発生した。強い反射が比較的長時間継続するため、図 9 で示したように、発生時の 3dBBDuty, 10dBBDuty は、ともに大きな値となるが、両者の比は小さかった。

図 10 は、年平均 3dBBDuty を時間帯毎に示したものである。いずれの年も非流星伝搬の発生が多い 16 時 (UT) 以後と以前で大きく異なった値を示した。また、太陽の黒点活動が活発だった 2002 年, 2003 年に比べ、黒点数が減少した 2004 年は、年平均 3dBBDuty の最大値も、やや減少した。なお、非流星伝搬の発生確率

(注4)：流星伝搬の日変動・季節変動の詳細は、別論文で考察する予定である。

が最大となる時刻は、均時差 (視太陽時との時差) などに起因すると思われる僅かな季節変動があるものの、3 年間を通してほとんど 20 時 (UT) 前後であった。

図 11 は、月平均の 3dBBDuty および 10dBBDuty である。デューティ比は毎月かなり大きく変動し、最小値が 2004/9 の 0.78%(3dBBDuty), 0.4%(10dBBDuty) であるのに対し、最大値は 2003/12 の 6.14%(3dBBDuty), 4.39%(10dBBDuty) であった。月平均のデューティ比の大小は、主に非流星伝搬の発生量に依存しているが、各年の変化に季節依存性等を表わす明確な共通の傾向は見られなかった。

5.2 デューティ比の統計結果

図 12 は、全実験期間を平均したデューティ比を判定スレッシュホールド毎に示したものである。全実験期間の全時間帯にわたって集計したデューティ比は、3dBBDuty が約 2.9%, 10dBBDuty が約 2.1% であり、判定スレッシュホールドに対して傾き $-0.114\%/dB$ で、ほ

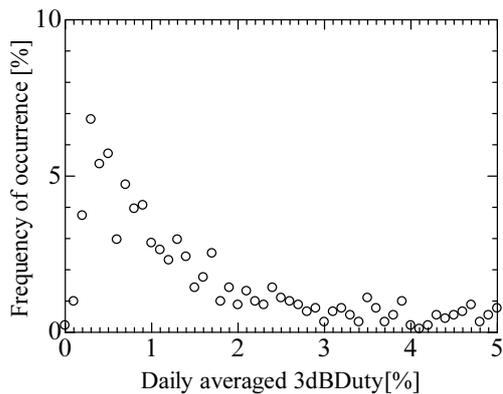


図 13 日平均 3dB Duty の発生頻度 (0.1%単位で集計)
Fig. 13 Frequency of daily averaged 3dB Duty (0.1% resolution).

ば直線的に減少した。16 時 (UT) 以前と以後に分けて集計した結果は、非流星伝搬現象の発生が少ない 16 時以前のデューティ比が 1%に満たないのに対し (例えば 3dB Duty でも、0.77%程度であった)、16 時以後のデューティ比は比較的大きな値を示した (例えば 3dB Duty が約 7.2%であった)。いずれの場合も、デューティ比は判定スレッシュホールドに対してほぼ直線的に変化し、その傾きは、16 時以前が $-0.061\%/dB$ 、16 時以後が $-0.22\%/dB$ であった。

図 13 は、全実験期間について、0.1%単位で日平均 3dB Duty の発生頻度 (横軸 $x\%$ に対して $\{x \text{ 日平均 } 3dB \text{ Duty} < (x+0.1) \text{ であった日数}\} / \{\text{全集計日数}\}$) を示したものである。日平均 3dB Duty の発生頻度は、0.3-0.4%の範囲が最も多く、全集計日の約 7%であった。それ以上の日平均 3dB Duty の発生頻度は指数的に減少し、1%以下の日は全体の約 40%、1~3%の日が約 30%、そして 3%以上が約 30%であった。なお、日平均 3dB Duty の平均値は、結局すべての実験期間の平均であるから、図 12 で示した様に約 2.9%である。また、日平均 3dB Duty の最小値は 2003/11/3 の 0.001%であり、最大値は 2004/11/27 の 21.4%であった。2003/11/3 の低デューティ比の原因は、銀河雑音の減少や文献 [18] の情報などからオーロラ帯吸収であると思われる。

図 14 は、全実験期間について、1%単位で 3dB Duty により実験周期を分類し、その発生頻度 (横軸 $x\%$ に対して $\{x \text{ 3dB Duty} < (x+1) \text{ であった実験周期数}\} / \{\text{全実験周期数}\}$) を示したものである。実験周期の発生頻度は、3dB Duty が小さな実験周期と大き

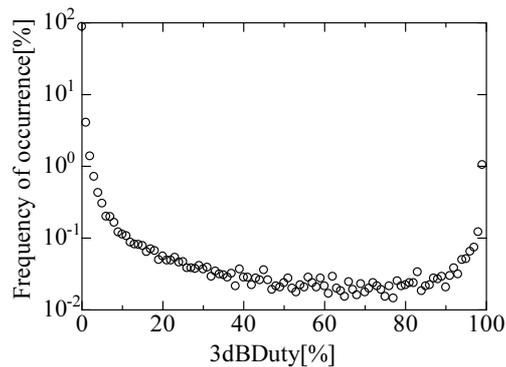


図 14 3dB Duty の発生頻度 (1%単位で集計)
Fig. 14 Frequency of 3dB Duty occurrence (1% resolution).

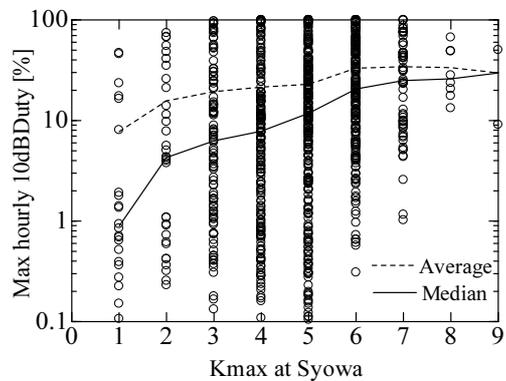


図 15 昭和基地 Kmax と最大時間平均 10dB Duty
Fig. 15 Maximum hourly 10dB Duty V.S. Kmax at Syowa.

な実験周期に二極化している。3dB Duty が小さな実験周期においては流星伝搬が、大きな実験周期においては非流星伝搬が、おもにデューティ比に寄与していると考えられる。そこで、3dB Duty が 30%未満の期間を流星期間、70%以上の期間を非流星期間とよぶとすると、それぞれの発生割合は、流星期間が約 97%、非流星期間が約 2%であった。

図 15 は、全実験期間の各日について、昭和基地における地磁気擾乱指数^(注5)(K 値)[20]の最大値 (Kmax) と、その日の時間平均 10dB Duty の最大値の関係をプロットした散布図であり、実線は中央値を、破線は平均値を結んだものである。一般に、流星伝搬による時間平均 10dB Duty は小さいので、大きな時間平均 10dB Duty は、ほとんどの場合、非流星伝搬の寄

(注5): K 値は、0 から 9 の 10 段階で地磁気擾乱の程度を表す指数であり、0 時 (UT) から 3 時間毎に 1 日に 8 回算出される。

与によるものであると考えられる。図より、 K_{max} が大きな日ほど、大きな時間平均 10dB Duty の発生割合が増すことがわかる。しかし、 K_{max} が 3 以下の静穏日に大きな時間平均 10dB Duty が発生することも、逆に K_{max} が 6 以上の擾乱日であっても時間平均 10dB Duty の最大値が 1% にすら満たないこともあった。これは、強いオーロラジェット電流（地磁気擾乱の原因）が発生しても、それによる E_s 等が 2 点間の通信に適した位置に発生するとは限らないからであると思われる。また、 K_{max} が高い時には、非流星伝搬の発生と同時にオーロラ帯吸収の発生確率が高くなることも一因と考えられる。

6. むすび

本論文では、中山-昭和基地間でほぼ 3 年間にわたって行われたトーン実験結果をもとに、南極域における低 VHF 帯伝送路の統計的性質を示した。昭和基地周辺の雑音環境は、4. で示したような風雪雑音、太陽雑音、突発的人工雑音などが時折観測されたものの概ね良好であり、受信トーン信号の解析結果への影響は僅かであることが示された。また、雑音電力の観測から、オーロラ帯吸収の発生とその影響が示された。流星バーストによる伝搬は、デューティ比は小さいが、1 年を通して全時間帯にわたって常に観測された。一方、非流星伝搬は、主に地方時の深夜に観測され、高いデューティ比を示したが、その発生は不定期であった。また、非流星伝搬は、太陽活動に関係すると考えられ、月平均デューティ比を大きく変動させた。全実験期間を平均したデューティ比は、3dB Duty が約 2.9%、10dB Duty が約 2.1% であり、判定スレッショルドの増加に対してほぼ直線的に減少した。日平均 3dB Duty は、0.3~0.4% の日が最も多く全集計日数の約 7% であり、それより大きな、日平均 3dB Duty の発生日は指数的に減少した。実験周期ごとの 3dB Duty の発生頻度は、流星期間と非流星期間があるために 2 極化し、全実験期間の約 97% は流星期間であった。また、非流星伝搬の発生確率は、地磁気擾乱指数の増加とともに増加する傾向にあることが示された。

本論文では、伝搬路の質に関する考察は行わなかったが、データ伝送実験結果や受信信号波形の周波数解析などから、流星・非流星伝搬ともにマルチパスやドップラーシフトが少ないデータ通信に適した伝搬特性を有することが明らかとなりつつある。非流星伝搬現象に関しては、おもに通信工学的観点からその統計的性

質を示すにとどめ、現象の特定を行わなかったが、地磁気擾乱指数と相関があること、オーロラサブストームが頻発する地方時の深夜に多く発生すること、ドップラーシフト等が少ないことなどから、おもにオーロラ E_s による伝搬現象である可能性が高いと思われる。これらの考察の詳細は別の機会に報告する予定である。謝辞 無線局の開局・運用など、本実験の遂行に多大なご協力をいただいた、中国および日本南極地域観測隊の隊員諸氏に深く感謝する。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤 (C)(2)14550353 により行われた。

文 献

- [1] 福田明, “流星バースト通信,” コロナ社, 1997.
- [2] J.A. Weitzen and W.T. Ralston “Meteor Scatter: An Overview,” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.36, No.12, pp.1813-1819, Dec. 1988.
- [3] A. Fukuda, K. Mukumoto, Y. Yoshihiro, K. Nakano, S. Ohichi, M. Nagasawa, H. Yamagishi, N. Sato, A. Kadokura, H. Yang, M. Yao, S. Zhang, G. He and L. Jin, “Meteor burst communications in the Antarctica: Description of experiments and first results,” IEICE Trans. Commun., Vol.E-87-B, No.9, pp.2767-2776, Sep. 2004.
- [4] 椋本介士, 福田明, 吉廣安昭, 中野啓, 大市聡, 長澤正氏, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉昭, Huigen Yang, Mingwu Yao, Sen Zhang, Guojing He, Lijun Jin, “第 43,44 次南極観測隊における流星バースト通信設備を用いたデータ伝送実験,” 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1875-1885, Sept.2005.
- [5] K. Mukumoto, A. Fukuda, M. Nagasawa, Y. Yoshihiro, K. Nakano, S. Ohichi, H. Yamagishi, N. Sato, A. Kadokura, H. Yang, M. Yao, S. Zhang, G. He, and Jin, L., “VHF data transmission experiments using MBC equipment conducted during the period from JARE-43 to JARE-45,” Adv. Polar Upper Atmos. Res., 19, pp.89-105, Sept. 2005.
- [6] K. Mukumoto and A. Fukuda, “Development of software modem for the MBC experiment in Antarctica,” Inter-Academia 2006, pp.395-406, Sept. 2006.
- [7] 福田明, 椋本介士, 大市聡, 中野啓, 吉廣安昭, 長澤正氏, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 楊惠根, 何国経, 金力軍, “第 45 次南極地域観測隊における流星バースト通信によるデータ伝送実験,” 信学論 (B), 印刷中.
- [8] M. Tsutsumi, T. Aso and M. Ejiri, “Initial results of Syowa MF rader observations in Antarctica,” Adv. Polar Upper Atmos. Res, 15, pp.103-116, 2001.
- [9] J.A. Weitzen, P.S. Cannon, J.C. Ostergard and J.E. Rasmussen, “High-latitude seasonal variation of meteoric and nonmeteoric oblique propagation at frequency of 45Mhz,” Radio Sci., Vol.28, No.2, pp.213-222, Mar-Apr 1993.
- [10] J.A. Weitzen, M.J. Sowa, R.A. Scofidio and J. Quinn, “Characterizing the Multipath and Doppler Spreads

- of the High-Latitude Meteor Burst Communication Channel,” IEEE Trans. on comm. COM-35, No.10, pp.1050-1058, Oct. 1987.
- [11] 福西 浩, 国分 征, 松浦 延夫, “南極の科学 2 オーロラと超高層大気,” 国立極地研究所編, 古今書院, pp.255-256, 1983.
- [12] 大瀬 正美, “電離層観測における Auroral Es と Blackout について,” 南極資料, 15, pp.1253-1259, 1962.
- [13] P.S. Cannon, J.A. Weitzen, J. Ostergaard and J.E. Rasmussen, “Relative impact of meteor scatter and other long-distance high-latitude propagation mode on VHF communication systems,” Radio Sci., Vol.31, No.5, pp.1129-1140, Sep.-Oct. 1996.
- [14] A.V. Koustov, K. Igarashi, D. Andre, K. Ohta, N. Sato, H. Yamagishi and A. Yukimatu “Observations of 50- and 12-MHz auroral coherent echoes at the Antarctic Syowa station,” J.of GeoPhysical Res. Vol.106, No.A7, pp.12875-12887, July 1, 2001.
- [15] L.A. Maynard, “Meteor burst communication in the Arctic,” in Ionospheric Radio Communications: Proc. NATO Institute on Ionospheric Radio Communications in the Arctic, Finse, Apr.13-19, 1967. New York: Plenum, pp.165-173, 1968.
- [16] 野崎憲朗, “南極昭和基地・みずほ基地間の VHF 通信,” 南極資料, 78, pp.25-36, 1983.
- [17] Y. Takeo, http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/emcs/summer00/oh_no.htm
- [18] 情報通信研究機構, <http://hirweb.nict.go.jp/index-j.html>
- [19] 気象庁, <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- [20] 国立極地研究所, <http://polaris.nipr.ac.jp/aurora/>
(平成 18 年 x 月 x 日受付, x 月 x 日再受付)



棕本 介士 (正員)

静岡大・工, 電気電子工学科, 技術職員.
流星バースト通信装置の開発, 運用などに従事.



福田 明 (正員)

静岡大・創造科学技術大学院, 教授. 流星バースト通信, GPS 応用などの無線通信システムの開発, 通信理論の研究などに従事.



吉廣 安昭

静岡大・工, 電気電子工学科, 大学院生,
第 43 次南極昭和基地越冬隊員.



長澤 正氏 (正員)

沼津高専, 電子制御工学科, 教授, 中国第 18 次南極観測隊に同行し, 中山基地に MBC 局を設置, 運用した.



山岸 久雄

国立極地研究所, 宙空圏研究グループ,
教授, 第 45 次南極越冬隊隊長.



佐藤 夏雄

国立極地研究所, 宙空圏研究グループ,
教授, 情報科学センター長.



楊 恵根

中国極地研究所副所長.



金 力軍

西安電子科技大通信工程学院, 教授.

Abstract The authors proposed to use a meteor burst communication network for Antarctic survey and conducted two kinds of experiments (Tone and Data transmission experiments) in the Antarctic region from April 2002 to November 2004. This paper reports results of Tone transmission experiment in which a VHF tone signal was transmitted from Zhongshan Station (China) to Syowa Station (Japan) for channel sounding. Statistical properties of meteoric and nonmeteoric oblique propagation, including effect of geomagnetic activity on the duty cycle are studied. Influence of inherent radio environments in Antarctica such as auroral absorption is also examined.

Key words meteor burst communications, Antarctica, low VHF channel, beyond line of sight propagation, aurora