

第 43, 44 次南極地域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

椋本 介士 <sup>†</sup>	福田 明 <sup>†</sup>	吉廣 安昭 <sup>†</sup>	中野 啓 <sup>†</sup>
大市 聡 <sup>†</sup>	長澤 正氏 <sup>††</sup>	山岸 久雄 <sup>†††</sup>	佐藤 夏雄 <sup>†††</sup>
門倉 昭 <sup>†††</sup>	Huigen YANG <sup>††††</sup>	Mingwu YAO <sup>†††††</sup>	Sen ZHANG <sup>†††††</sup>
Guojing HE <sup>†††††</sup>	Lijun JIN <sup>†††††</sup>		

Data transmission experiments using meteor burst communication equipment conducted during Japanese 43-rd and 44-th expeditions in Antarctica

Kaiji MUKUMOTO<sup>†</sup>, Akira FUKUDA<sup>†</sup>, Yasuaki YOSHIHIRO<sup>†</sup>, Kei NAKANO<sup>†</sup>, Satoshi OHICHI<sup>†</sup>, Masashi NAGASAWA<sup>††</sup>, Hisao YAMAGISHI<sup>†††</sup>, Natsuo SATO<sup>†††</sup>, Akira KADOKURA<sup>†††</sup>, Huigen YANG<sup>††††</sup>, Mingwu YAO<sup>†††††</sup>, Sen ZHANG<sup>†††††</sup>, Guojing HE<sup>†††††</sup>, and Lijun JIN<sup>†††††</sup>

あらまし 本論文では、筆者らが南極大陸で行った流星バースト通信 (MBC) 実験の内、第 43, 44 次南極観測において行ったデータ伝送実験の概要とその実験結果を報告する。43 次隊では、マスタ局を昭和基地 (日本)、リモート局を中山基地 (中国) に設置し、リモート局で定期的に生成されるデータを、米国 Meteor Communications Co. (MCC) 社製の MBC 装置を用いてマスタ局へ伝送する実験を行った。44 次隊では、リモート局としてドームふじ観測拠点 (日本) を加えて、2 つのリモート局からデータを伝送する実験を行った。実験結果から、この地域では、流星バーストのほかにも、おもに夜間 (地方時) にオーロラに起因すると思われる伝搬現象が頻発し、この現象もデータ伝送に利用可能であることが判明した。また、南極域に低 VHF 帯電波を用いたデータ収集網を構築する際に有用となる様々な実際のデータ (受信率の日変動や季節変動など) が得られた。

キーワード 流星バースト通信, 南極, 低 VHF, 見通し外データ伝送, 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、高緯度地域においては、低 VHF 帯の電波を利用する MBC は、極冠吸収などの影響を受けやすい HF 通信に比べて、特に有利であるといわれている [2]。筆者らは、この MBC を利用して南極域に多点観測網を構築することを提案し、そのための基礎実験を第 43~45 次南極観測において行った [3]~[6]。

流星バースト通信路の発生割合は、地軸の傾き、地球の自転・公転、宇宙塵の密度分布などの影響のため、無線局の位置や伝搬路の方向・距離などに強く依存している。南極域でのこれまでの流星バーストによる電波散乱現象の研究は、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 [7], [8]。

<sup>†</sup> 静岡大学工学部電気・電子工学科, 浜松市  
Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, 432-8561 Japan  
<sup>††</sup> 沼津工業高等専門学校, 沼津市  
Numazu College of Technology, 3600 Ooka, Numazu, Shizuoka 410-8501 Japan  
<sup>†††</sup> 国立極地研究所, 東京都  
National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo, 173-8515 Japan  
<sup>††††</sup> 中国極地研究所, 上海市  
Polar Research Institute of China, 451 Jinqiao Road, Pudong, Shanghai, 200129 China  
<sup>†††††</sup> 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

高緯度地域における見通し外通信を目的とした前方散乱波に関する研究としては、グリーンランド [9] やアラスカ [10] など北極域で行われた実験に限られ、南極域での実験は、筆者らのもの以外に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]。また、中緯度 Es として知られるウインドシアアによる Es が極域でも頻繁に発生しているとする報告もある [12]。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 [13], [14] で、強いマルチパスやドップラーシフトを伴うため、データ通信には適さないと考えられている [11]。なお、オーロラ散乱通信については、1980 年に昭和 みずほ基地間で 21 次隊による通信実験が行われ、十分な受信強度と安定した受信時間率が期待できるとの興味深い報告もあるが、電波の質については示されていない [15]。極域には、さらに、極冠吸収 [16] や F 層伝搬 [17]、風雪ノイズなど特有の電波環境があり、MBC に様々な影響を与えると考えられる。

本論文では、流星バースト以外の見通し外伝搬現象を特に分類しないで、すべて単に非流星伝搬とよぶことにする。筆者らの実験においては、おもに夜間に非流星伝搬現象が頻発した。また、昼間にも、時折、非流星と思われる伝搬現象が観測された。

筆者らの流星バースト通信実験は、第 43 次南極観測隊 (2001.12~2003.3) より開始した。43 次隊においては、トーン信号を用いて通信路の統計的性質を調査する実験 (トーン実験) および米国 MCC (Meteor Communications Co.) 社製の通信装置を用いて MBC のデータ伝送能力を調査する実験 (データ伝送実験) を、中山基地 (中国)–昭和基地 (日本) 間で行った。中山、昭和基地は、約 1430km 離れたほぼ同緯度に位置している。44 次隊 (2002.12~2004.3) では、中山–昭和基地間に加えて、ドームふじ観測拠点 (日本) 昭和基地間のデータ伝送実験を同時に行った。ドームふじ基地は、昭和基地とほぼ同じ経度で南極点方向に約 920km 離れた位置にある。さらに 45 次隊 (2003.12~2005.3) では、MCC システムの代わりに、筆者らの開発したシステム (RANDOM) によるデータ伝送実験を、中

山–昭和基地間で行った。なお、トーン実験は、44,45 次隊においても、中山 昭和基地間で引き続き行われた。

本論文では、43,44 次隊で行った MCC システムによるデータ伝送実験の結果について、以下の構成で報告する。2. では、43,44 次隊の実験に用いた MCC システムについて概説し、3. では、43 次隊におけるデータ伝送実験結果をトーン実験結果と比較して考察し、非流星伝搬現象や極冠吸収のデータ伝送への影響などを示す。4. では、44 次隊が行ったデータ伝送実験結果を 43 次隊の実験結果と対比して、伝送路方向による性能の違いや、季節変動などについて報告する。

なお、南極域における筆者らの MBC 実験全体の概要及びトーン実験結果については、文献 [3]~[5] で示した。45 次隊が行った RANDOM システムによるデータ伝送実験については、別の機会に詳しく報告する。

## 2. MCC システム

43,44 次隊のデータ伝送実験に用いた MCC システムは、様々な網構成に対応可能な汎用の MBC システムである [18], [19]。この MCC システムでは、データロガー等で取得された測定値、GPS からの位置情報、PC からのメッセージやコマンドなどの情報伝送が可能であり、それらの伝送には、それぞれ異なった手順が用いられる。そのため、システム設計者は、網構成や伝送情報などを吟味して、実験装置に適切なパラメータを設定する必要がある。

本データ伝送実験においては、地理的に離れた多数のリモート局で測定され、データロガーに蓄えられた測定値を 1 つのマスタ局に伝送する星型の半 2 重データ収集網を想定したパラメータ設定を行った。ただし、実際の実験においては、昭和基地をマスタ局とし、リモート局は、中山基地 1 局 (43 次隊) あるいは中山基地とドームふじ基地の 2 局 (44 次隊) のみで行った。

MCC システムにおける半 2 重モードでのロガーデータ伝送手順の概略を図 1 に示す。この MCC システムでは、マスタ局は、一定間隔でプローブパケット (PP) を送信する。リモート局は、設定されたスケジュールに従ってデータロガーから測定値を取り込み、それらを送信バッファに保存する。流星バーストが発生し、PP がリモート局に受信されると、そのリモート局は送信バッファ内のデータをデータパケット (DP) として送信する。送信バッファ内にデータ

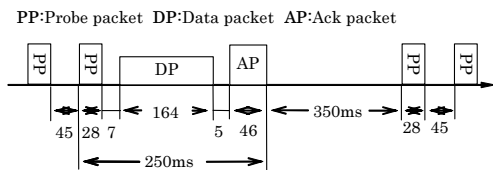


図 1 MCC システムのローガーデータ伝送手順  
Fig. 1 Protocol to send data acquired by a data logger in MCC system.

がないリモート局は、PP を受信しても何も行わない。DP の受信に成功した場合、マスタ局は、確認パケット (AP) を返送する。AP を受信したリモート局は、対応するデータを送信バッファから削除し、まだ送信バッファ内にデータがあれば、それを新たな DP として送信する<sup>(注1)</sup>。

図 1 中の数字は、各パケットの長さおよび送信間隔 (ms 単位) を表している。これらの数値は、研究室において南極での実験と同じパラメータ設定でシステムを動作させ、その通信状況を実測した結果である<sup>(注2)</sup>。当然、DP の長さは、送信情報量により変化する (図は送信情報量が 20byte の場合である)。また、室内実験結果なので、送受信の間隔に電波伝搬遅延は含まれていない。

実験に使用した無線装置は、マスタ局が MCC-525、リモート局が MCC-545A である。両装置の主な仕様を以下に示す。

- 変調方式 *DE - BPSK*
- 復調方式 *PLL* による同期検波
- 伝送速度 *4000bps*
- 送信電力 *Master(MCC - 525)150W,*  
*Remote(MCC - 545A)100W*

### 3. 43 次隊におけるデータ伝送実験

#### 3.1 実験概要

43 次隊におけるデータ伝送実験の構成図を図 2 に示す。マスタ局は昭和基地に、リモート局は中山基地に設置した。アンテナは、両局とも、地上高約 8m の水平偏波 5 素子八木アンテナを使用した。アンテナの

(注1): ここでは、説明の便宜のために、MCC 社のものとは異ったパケットの名称および略号を用いた。

(注2): MCC システムにおける PP 送信間隔の最小値は 35ms であるが、南極実験では電波伝搬遅延等を考慮して 45ms に設定した。

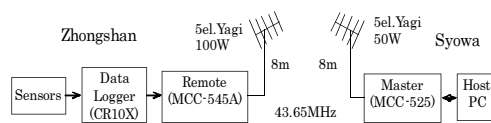


図 2 43 次隊におけるデータ伝送実験の構成図  
Fig. 2 Data transmission experiment during the 43-rd expedition.

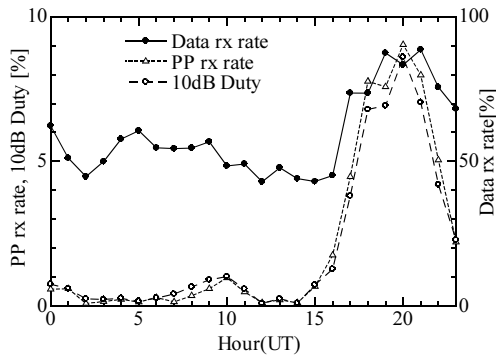


図 3 時間帯平均 (2002/4/1-2002/12/31)  
Fig. 3 Diurnal variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (Apr. 1st-Dec. 31st 2002).

仰角は 0 度、方位角は互いに大円対向となるようにした。昭和基地のアンテナは、観測棟の近隣に適当な設置場所が見つからず、150m ほど離れた場所に設置された。そのため、約 4.5dB のケーブルロスが生じ、アンテナからの有効輻射電力は、50W 程度であった。また、マスタ局は、トーン実験への干渉を避けるために、5 分稼働して 5 分休止するという周期で運用した。

リモート局の MCC-545A は、データローガー (Campbell Scientific 社製の CR10X) から、5 分間隔で 20byte (10 項目) のデータを取得するよう設定した。また、MCC システムでは、フロー制御のためにデータの寿命を設定する必要があり、この実験では、2 時間に設定した。即ち、2 時間以内にマスタ局へ伝送されなかったデータは、伝送失敗となり、リモート局の送信バッファから消去される。

43 次隊のデータ伝送実験は、装置の設置、試験運用の後、2002 年 3 月末から開始され、44 次隊の実験用にマスタ局のアンテナ構成を変更する 2003 年 1 月 6 日まで行われた。この間に、移動リモート局を並行運用した実験 (10/16~10/29)、及びそのための準備実験 (8/29~9/17) が行われた。また、2002 年 12 月 30 日以降にも 44 次隊の実験準備のために随時移動局を並行運用した。

表 1 集計から除外した日

Table 1 The days excluded from the counting.

集計項目	集計から除外した日
データ 受信率	4/18,4/21-22, 6/15-16,8/29-9/17, 10/16-29,12/6-10,12/30-31
PP 受信率	4/21-22,5/15-17,5/28-29,6/15-16, 8/29-9/17,10/16-29,12/23-26,12/30-31
10dB Duty	4/4, 4/21-23, 12/24-25

### 3.2 実験結果

図 3 は、2002 年 4 月 1 日～同年 12 月 31 日の実験結果を、データ受信率、PP 受信率およびトーン実験により得られた 10dB デューティ比 (10dB Duty) について時間帯毎に集計したものである。ここで、データ受信率は、各時間帯にマスタ局に受信されたデータ数を 1 時間当りに生成されるデータ数 (12) で割った値の平均である。なお、AP の伝送失敗により、DP が重複して受信された場合には、最初に受信されたもののみをその時間帯の集計に加えた。PP 受信率は、各時間帯にリモート局に受信された PP の数を送信された PP の数で割った値である。厳密には、PP 送信数は DP の受信回数などにより多少変化するが、ここでは、図 1 より計算した一定値 ( $24658 \cdot 30 \cdot 60 / (0.028 + 0.045)$ ) を 1 時間当りの PP 送信数として用いた。10dB Duty は、中山基地から送信されたトーン信号の昭和基地における受信電力が帯域幅 2400Hz の雑音電力の 10dB 以上となる時間割合を示している<sup>(注3)</sup>。横軸は、世界時 (UT) であり、中山 - 昭和基地間の中点の地方時は、これより約 4 時間進んでいる。なお、それぞれの集計において、移動実験の並行運用期間、電源トラブルなど様々な原因による欠測期間のある日は除外した。集計から除外した日を表 1 に示す。

図 3 において、PP 受信率と 10dB Duty は、非常に似た特性を示し、定量的にもほぼ一致している。トーンの受信は昭和基地、PP の受信は中山基地であるが、両局の雑音環境が等しいとすれば、PP の送信電力はトーンのその約 50/115 倍、伝送速度が 4000bps であることから、トーン実験の 10dB Duty は、PP の受信 SNR が 4.2dB を超える割合に相当すると考えられる。MCC545A が、PSK 変調された PP を同期復調していることを考慮すると、この値は、理論的にもほぼ妥当なものであるといえる。従って、この伝送路は、マルチパスや周波数シフトなどが少ない、良好な

(注3): 文献 [3] - [5] で示されている高さ 4m のアンテナで受信された信号の解析結果から得られた値を用いた。

表 2 2002/4 月～12 月の平均

Table 2 The values averaged over Apr.-Dec. 2002.

	10dB Duty [%]	PP reception rate [%]	Data reception rate [%]
Total	2.15	2.01	59.1
00-16UT	0.36	0.46	51.4
16-24UT	5.73	5.12	74.4

伝搬特性を有していると考えられる。

また、PP 受信率と 10dB Duty が定量的にもほぼ一致していることから、20 時付近に頻発する非流星伝搬も、ほとんどすべてデータ伝送に有効に寄与していることが分かる。データ受信率も、10dB Duty とよく似た特性を示しているが、PP 受信率と違い、比例はしていない。これは、一つには、データの寿命を 2 時間、発生間隔を 5 分と設定したため、伝送路が開いてリモート局に送信データがない場合が発生するからである。また、その他の理由として、1) DP の受信には、250ms 以上の通信路継続時間が必要となること、2) DP が受信されるとマスタ局は数百 ms の間 PP の送信を休止すること、などが挙げられる。

なお、10 時付近にある PP 受信率及び 10dB Duty の小さなピークは、12 月 10～18 日において発生した伝搬現象によるものであるが、この伝搬現象が、流星に起因するものか否かは不明である。

表 2 は、2002/4 月 1 日～12 月 31 日 (表 1 の日を除く) の実験結果を集計したものである。この期間全体の平均データ受信率は約 59.1%、非流星伝搬の頻発する 16 時以後の平均データ受信率は約 74.4%、16 時以前の平均データ受信率は約 51.4%であった。システムの稼働率が 50%、1 つの DP の正味のデータ量が 20byte であるので、スループット (正味のデータの伝送速度) は、それぞれ、全時間平均が 0.63bps、16 時以前の平均が 0.55bps、16 時以後の平均が 0.79bps である。一方、PP の受信率から、4000bps のデータ通信路の開いている時間割合は、1 日平均約 2%、16 時以前の平均は約 0.46%、16 時以後の平均は約 5.12%であったと推定できる。この時間が全て有効に利用できれば、データ伝送速度はそれぞれ 80bps および 18.4bps、204.8bps となる。しかし、MCC システムの場合、20byte のデータの伝送に約 250ms の時間を必要としている。即ち、本来の送信情報の割合は、16%程度である。従って、この計算から見積もられる MCC システムのデータ伝送能力は、それぞれ 12.8bps および 2.9bps、32.8bps となる。もちろん、DP の受

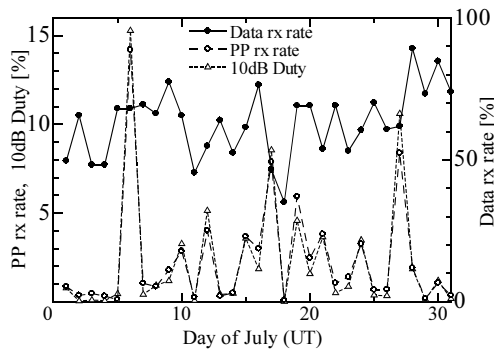


図 4 日平均 (2002 年 7 月)

Fig. 4 Daily variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (Apr.1st-Dec.31st 2002).

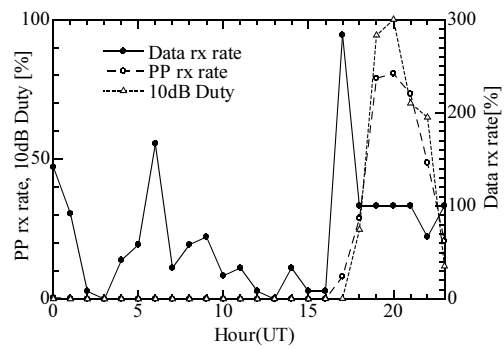


図 5 非流星伝搬の発生した日 (2002/7/6) の時間帯平均

Fig. 5 Hourly variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (July 6th 2002).

信には 250ms 以上の伝送路が連続して開く必要があり、リモートの送信バッファに常にデータがあったとしても、この値が実現されるわけではない。

ところで、16 時以前の PP 受信率が、10dB Duty の約 1.28 倍であるのに対して、16 時以後の場合は約 0.89 倍となっている。これは、一つには、非流星伝搬の伝搬特性が流星伝搬ほどは良好でないことを示していると考えられる<sup>(注4)</sup>。

図 4 は、データ受信率、PP 受信率、10dB Duty について、2002 年 7 月の日平均値を示したものである。この図においても、10dB Duty と PP 受信率は、ほぼ一致している。一方、データ受信率との相関は、両者ともあまり大きくない。これは、前述のように、非流星伝搬発生時に送信データがなくなるからであり、そのためデューティ比の増加がデータ伝送に有効に寄与しないからである。また、後に示す図 5 からわかる様に、この図の PP 受信率や 10dB Duty の変化は、おもに非流星伝搬の発生の有無とその大きさの違いによるものであり、流星バーストの寄与は極めて僅かである。

非流星伝搬が発生した日の典型的な例として、2002 年 7 月 6 日の時間帯毎の 10dB Duty、PP 受信率、データ受信率を図 5 に示した。データの寿命を 2 時間に

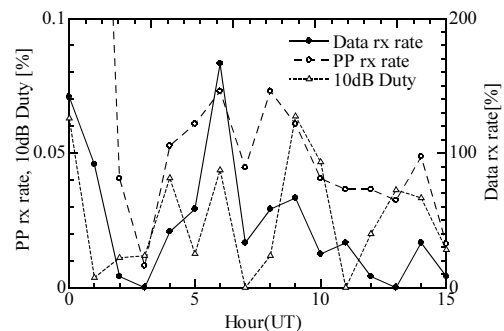


図 6 2002/7/6 00-16UT の時間帯平均

Fig. 6 Hourly variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (00-16UT July 6th 2002).

設定したので、リモート局には最大 24 個のデータが蓄えられる。それらに加えて、その時間帯に新たに生成されるデータが送信されるため、データ受信率の最大値は 300%である。17 時にデータ受信率 283%となっているのは、このためである。未送信のデータが全て捌けてしまうと、送信されるデータは、その時間内に生成されたもののみとなる。18~21 時台のデータ受信率 100%は、その時間内に生成されたデータが直ちに伝送されたことを示している。

2002 年 7 月 6 日 0~15 時台の 10dB Duty 及び PP 受信率は、同日 16~24 時台のそれに比べ極めて僅かであり、図 5 の尺度では、その変化を見ることができない。図 6 は、10dB Duty 及び PP 受信率に関する縦軸の尺度を変えて 0~15 時台の変化を示したものである。この間の 10dB Duty 及び PP 受信率の平均は、それぞれ 0.026%及び 0.085%であったが、93 組のデータ

(注4): MCC システムのマスタ局は、DP の受信に成功すると数 100ms の間 PP の送信を停止するので、PP 送信数一定と仮定して PP 受信率を算出した本解析結果は、DP 受信率の高い 16 時以降の PP 受信率を低く見積もっている。しかし、DP 受信数は、1 時間当たり高々 36 個程度であるので、その影響はほとんどないものと考えられる。16 時以前と以後の伝搬路特性のより正確な比較は、PP 送信数の正確な計測が可能な 45 次隊の RANDOM システムによる実験結果を待つて行う予定である。

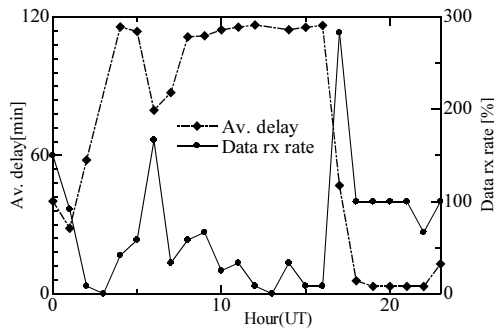


図 7 データ伝送遅れとデータ受信率 (2002/7/6)  
Fig. 7 Hourly averaged data transmission delay and data reception rate (July 6th 2002).

が受信され、データ受信率は 48.4%であった。この伝搬は、おもに流星パーストによるものと考えられる。一般に、流星パーストの継続時間は短く、発生間隔は指数分布に従う(ランダムである)。そのため、図 4 の場合とは違い、観測時間が異なる 10dB Duty と PP 受信率の間には、ほとんど相関がみられない。一方、この時間帯はデータ受信率が低く、リモート局の送信バッファが空にならないので、PP 受信率とデータ受信率に強い相関がみられる。

図 7 は、2002 年 7 月 6 日の時間帯毎の平均伝送遅れ(その時間帯に受信されたデータの受信時刻からそのデータが生成された時刻を引いた値の平均、ただし DP が重複して受信された場合は、最初に受信されたもののみ集計)をデータ受信率とともに示したものである。8~16 時台の平均伝送遅れは約 2 時間であり、リモート局の送信バッファには、常に多数のデータがあったことを示している。一方、データ受信率が 100% の 18~21 時台の平均伝送遅れは 3 分程度であり、この時間帯においては、DP は生成後直ちに伝送されている。なお、マスタ局は、5 分毎に稼働休止を繰り返すので、理論上の平均伝送遅れの最小値は 2.5 分である。

図 8 に、非流星伝搬現象が発生しなかったと思われる日(10dB Duty が全て 1% 以下の日)の例として、2002 年 7 月 29 日の時刻(UT)に対する 10dB Duty、PP 受信率、データ受信率を示した。図 6 の場合と同様、PP 受信率とデータ受信率には比較的強い相関が認められ、両者と 10dB Duty の間にはほとんど相関がみられない。

非流星伝搬現象は、おもに 16~24 時に発生するが、それ以外の時間帯にも比較的短時間の異常なデュー

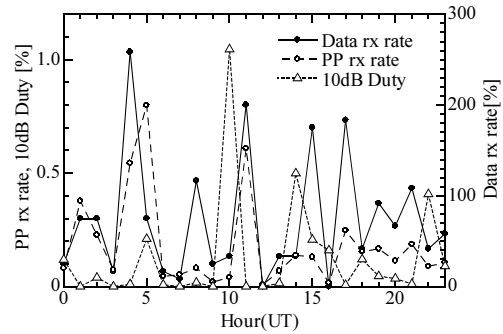


図 8 非流星伝搬が発生しなかった日(2002/7/29)の時間帯平均  
Fig. 8 Hourly variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (July 29th 2002).

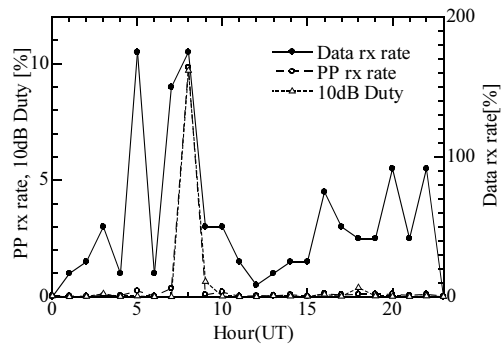


図 9 16UT 以前に突発的なデューティ比の増加がある日(2002/7/14)の時間帯平均  
Fig. 9 Hourly variation of data reception rate, probe packet reception rate and 10dB duty (July 14th 2002).

ティ比の増加が頻繁に観測されている。そうした日の典型例として、2002 年 7 月 14 日の実験結果を図 9 に示す。この図の 8 時台の 10dB Duty 及び PP 受信率の増加は、他の時間帯のそれに比べて突出している。従って、通常の流星パーストによるものとは考えにくい。0~15 時に発生するこのような突発的伝搬現象は、20 時前後に発生する非流星伝搬現象とは違い、継続時間が比較的短く、発生時刻にもバラツキがある。そのため、これが流星活動に起因するものか、或いは、その他の伝搬現象によるものか、現時点では明らかでない。しかし、20 時前後の非流星伝搬現象と同様、データ伝送に利用できることは確かめられた。

図 10 は、表 1 の日を除く 2002/4/1~12/31 について 10 パケット単位で 1 日当りのデータ受信数の発生日数を示したものである。非流星伝搬現象の発生した

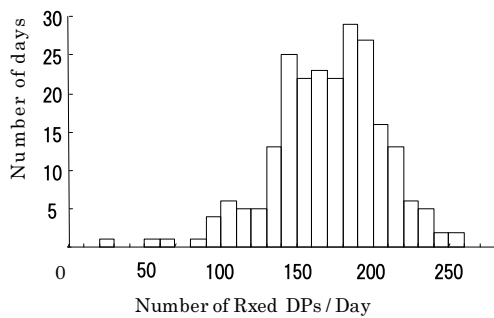


図 10 データ受信数の発生頻度 (2002/4~12/31)  
Fig.10 Histogram of the number of received data packets per day (Apr.1st-Dec.31st 2002).

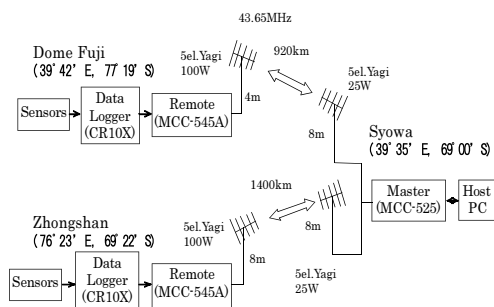


図 11 44 次隊におけるデータ伝送実験の構成図  
Fig. 11 Data transmission experiment during the 44-th expedition.

日としなかった日があるため、台地状のピークになっているが、ほぼ対称な山形の分布を示している。このことから、この実験期間内では、極冠吸収などによる深刻なブラックアウトは発生せず、安定してデータ伝送が行われたことがわかる。実際、1 日当りの受信パケット数が 100 以下であった日は、全集計日数 229 日中、8/22(67), 8/24(58), 8/25(93), 10/30(90), 10/31(82), 11/10(22), 11/11(94) の 3 期間 7 日間であったが、カッコ内の受信パケット数が示すように、完全なブラックアウトとはならなかった。

#### 4. 44 次隊におけるデータ伝送実験

##### 4.1 実験概要

44 次隊におけるデータ伝送実験の構成を図 11 に示す。44 次隊では、ドームふじ観測拠点にもリモート局を設置し、2 リモートからデータを伝送する実験を行った。ドームふじ局の構成は、アンテナ高が 4m である点を除いて、中山局の構成と全く同じである。また、送信データの取得間隔、データ寿命なども中山局

と全く同じ設定とした。

昭和基地では、トーン実験に用いていた高さ 8m のアンテナタワーを転用して、データ実験用のドームふじ基地向き（ほぼ真南向き）5 素子八木アンテナを新設し、このアンテナと中山基地向き（ほぼ東向き）アンテナをスプリットケーブルによりマスタ局に接続した。ドームふじ基地方向のアンテナケーブル長も約 150m であるため、マスタ局の送信電力は 2 基のアンテナに等分され、有効輻射電力は、1 基当たりそれぞれ 25W 程度であった。また、両アンテナの向きがほぼ直角（約 70 度）なため、受信時には、到来信号のほとんどない他方のアンテナからの雑音が合成される。そのため、受信 SNR は、単独運用に比べて 3dB ほど低下している<sup>(注5)</sup>。

44 次隊では、スプリット運用に先立って、ドームふじ基地方向のアンテナのみをマスタ局に接続し、ドームふじリモート局のみを稼働させたデータ伝送実験も行った。主な実験期間を以下に示す。

主な実験期間：

- ①2002/4/1 ~ 2002/12/31 中山 - 昭和
- ②2003/2/27 ~ 2003/3/23 ドーム - 昭和
- ③2003/3/25 ~ 2003/12/31 中山, ドーム - 昭和

ただし、上記実験期間の内、①については、表 1 の期間を、③については、マスタ局の故障によりシステムが停止していた 2003/7/30~2003/8/8 を以下の実験結果の集計から除外した。

##### 4.2 実験結果

各実験期間の時間帯毎のデータ受信率を図 12 に示す。各実験期間とも 15~24 時 (UT) に、非流星伝搬現象によるデータ受信率の増加が見られる。①と②の実験結果を比較すると、ドームふじ-昭和基地間の受信率は、中山-昭和基地間のそれに比べて小さいことが分かる。その原因としては、オーロラ帯との位置関係や伝搬方向、伝搬距離の違いなどが考えられるが、アンテナ高の違いや無線装置の個体差、雑音環境の違い等の人為的要因も排除できない。なお、②の実験のパラツキが大きいのは、実験期間が短かったためであると思われる。

(注5): これらの問題は、本実験に限ったものであり、実用化に際して大きな障害となるものではない。なぜなら、マスタ局は、通常、電力事情のよい場所に設置されるので、送信機出力の増加は容易であり、またリモート局の様に多数設置するものではないので、アンテナ毎に受信機を設置するなどの工夫を行ってもシステム全体のコストをあまり増加させないからである。

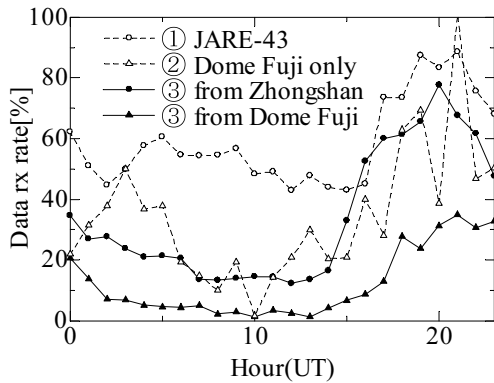


図 12 時間帯によるデータ受信率の変化  
 Fig. 12 Diurnal variations of data reception rate  
 (①:Apr.1st-Dec.31st 2002, ②:Feb.27th-Mar.23rd 2003, ③:Mar.25th-Dec.31st 2003).

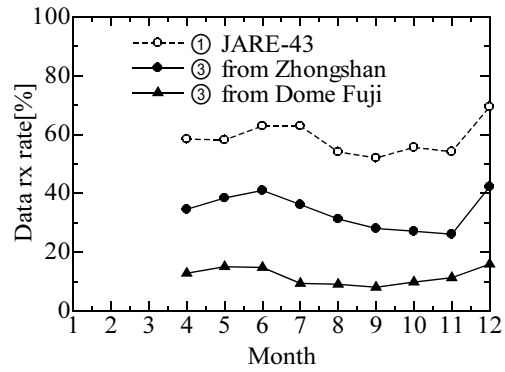


図 13 データ受信率の季節変化  
 Fig. 13 Seasonal variation of data reception rates.

表 3 データ受信率およびスループットの比較  
 Table 3 Data reception rate and throughput.

実験期間	データ受信率 [%]			スループット [bps]		
	total	00-16	16-24	total	00-16	16-24
①	59.1	51.4	74.4	0.63	0.55	0.79
②	34.4	24.2	54.7	0.37	0.26	0.58
③ from Zhongshan	34.0	20.3	61.8	0.36	0.21	0.66
③ from Dome Fuji	12.3	5.8	25.4	0.13	0.06	0.27

③の中山局からの受信率は、①のそれに比べ、0~14 時台では、半分以下になっている。これは、スプリット化によりマスタ局からの有効輻射電力が半減したためである。15~23 時台では、伝搬効率の高い非流星伝搬が支配的なため、送信電力の低下はあまり影響していない。③のドームふじ局からの受信率と中山局からのそれを比較すると、①と②の場合と同様、ドームふじ局からの受信率がかなり低いことがわかる。また、非流星伝搬現象による受信率のピークは、ドームふじ局からの方が中山局からのものより、やや遅れているが、これは、ドームふじ-昭和基地間の中点が、中山-昭和基地間のそれに比べて西側にあるためであると思われる。

表 3 は、各実験期間のデータ受信率およびスループットを非流星伝搬現象が頻発する 16 時以後と以前に分けて平均し、比較したものである。スループットは、本来のデータ(1 パケット当り 20\*8bit)が伝送される速度であり、データ受信率\*20\*8\*288/(30\*60\*24)より求めた。前述のようにデータ受信率は(スループットも)、中山-昭和局間の方が、ドームふじ-昭和局

間より高く、全時間平均では、1 リモート運用時は 1.7 倍、2 リモート運用時は 2.76 倍であった。この伝送路による違いは、特に 16 時以前で顕著であり、1 リモート運用で 2.1 倍、2 リモート運用で 3.5 倍であった。一方、送信電力半減の影響については、受信率およびスループットが、全時間では、中山-昭和局間で 1/1.74、ドームふじ-昭和局間で 1/2.80 になった。送信電力半減の影響も、16 時以前の方が顕著であり、中山-昭和局間で 1/2.5、ドームふじ-昭和局間で 1/4 に減少している。

図 13 は、季節によるデータ受信率の変化を調べるために、月毎にデータ受信率を集計した結果である。中山-昭和基地、ドームふじ-昭和基地間とも、季節によるデータ受信率の変化はあまり大きくなかった。しかし、その変化の傾向は、43 次隊の結果とよく似ていた。図 14,15 は、この季節変動の原因を探るために、16 時以前と非流星伝搬現象が頻発する 16 時以後を分けて、月毎のデータ受信率を求めたものである。16 時以前の集計結果は、44 次隊のデータ受信率が、43 次隊の結果と同様な傾向を示しているのに対して、16 時以後の集計結果には、明白な相関が見られなかった。このことから、データ受信率の季節変化は、流星活動の季節変化に起因すると考えられる。

図 16 は、2003/3/25~12/31 について 1 日当りのデータ受信数の発生日数を送信リモート局毎に示したものである。この図からも、ドームふじ局からのデータ受信数は、中山局からのものに比べてかなり少ないことがわかる。中山局からのデータ受信数の分布は、ほぼ対称で台地状であるのに対して、ドームふじ局からのそれは、非対称であり、最大値は、10 未満の 64



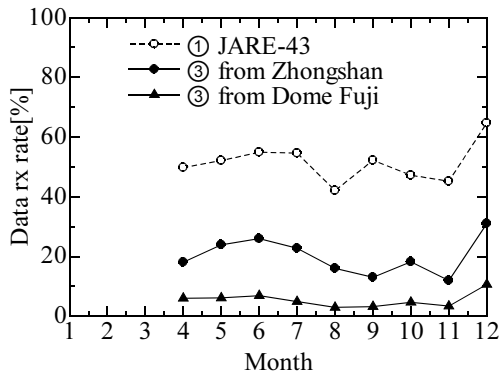


図 14 16 時 (UT) 以前の季節変化  
Fig. 14 Seasonal variation of data reception rates (averaged over 00-16UT).

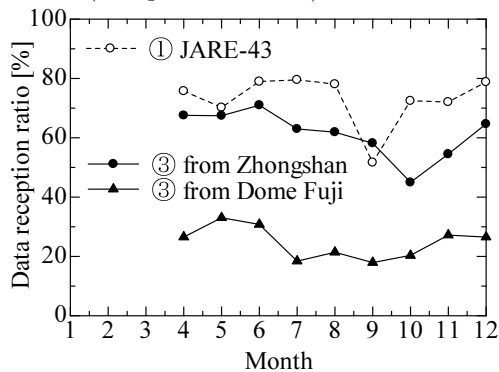


図 15 16 時 (UT) 以後の季節変化  
Fig. 15 Seasonal variation of data reception rates (averaged over 16-24UT).

日であった。さらに、その内全く受信がなかった日は 26 日あったが、これは全集計日数 265 日の約 10% におよぶ。これが極冠吸収などの異常吸収によるものであるのか、あるいは、流星数のランダム変動によるものかは、マスタ局の送信電力が弱く DP 受信数が全体に少なかったために不明である。

### 5. ま と め

本論文では、第 43, 44 次南極地域観測隊が行った MCC システムによるデータ伝送実験結果を示した。

43 次隊の実験から、

- 1) 南極域 (オーロラ帯) においても、MBC を用いた見通し外データ伝送が可能である。
- 2) 16 時 (UT) 以降に頻発する非流星伝搬現象も、データ伝送に利用可能である。
- 3) 0~15 時 (UT) に発生する突発的な伝搬現象もデータ伝送に利用可能である。

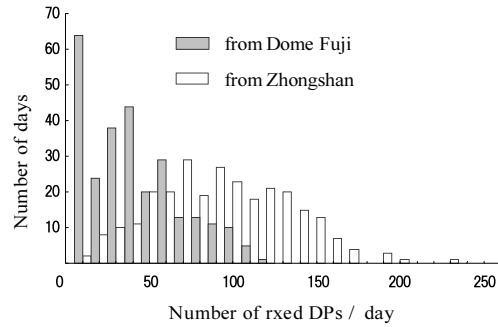


図 16 データ受信数の発生頻度 (2003/3/25~12/31)  
Fig. 16 Histogram of the number of received data packets per day (Mar. 25th-Dec. 31st 2003).

4) 本実験の設定条件下で得られた、中山-昭和基地間における MCC システムのスループットは、0.63bps であった。

5) 深刻なブラックアウトは発生しなかった。などの結果が得られた。

また、44 次隊の実験からは、

- 1) ドームふじ-昭和基地間でも、MBC によるデータ伝送が可能である。
- 2) しかし、そのスループットは 1 リモートでも 0.37bps と中山-昭和基地間に比べてかなり低かった。
- 3) スプリットケーブルによる 2 リモート運用も可能であるが、送信電力や受信 SNR の低下に注意する必要がある。

4) あまり大きくはないが季節変動が存在し、その原因は流星活動の季節変化にあると思われる。

5) ドームふじ-昭和基地間では、データ受信のない日が 10% ほどあった。

などの結果が示された。

本論文では、通信工学的見地から非流星伝搬現象を扱い、その発生原因等については敢えて言及しなかった。しかし、地方時の夜間に頻発することからオーロラに起因し、また PSK 変調によるデータ伝送に利用できることから、ドップラーシフトやマルチパスの少ない伝送モードあると考えられ、おもにオーロラ Es による伝搬であろうと思われる。

これらの実験結果は、極域に MBC システムを構築する際に有用となる貴重なデータといえる。実際、当初、筆者らは非流星伝搬現象がデータ伝送に適さないと考え、流星バーストによる伝搬のみを想定したデータ伝送実験のパラメータ設定を行った。しかし、実験の結果、中山・ドームふじ-昭和基地間で頻発する非

流星伝搬現象は、十分データ伝送に利用可能であることが明らかとなった。南極域でのMBCデータ収集網の設計にあたっては、流星バーストに加えて、この伝搬現象を有効に利用すべきである。不定期に比較的長時間発生するこの伝搬現象を有効に利用するためには、1)連続送信可能なリモート局装置の開発、2)星型網におけるパケットの衝突対策、3)記憶容量やデータ寿命の設定等を含めたフロー制御の問題、などを考慮してシステム設計を行う必要がある。

謝辞 無線局の開設・運用など本実験の遂行に多大なご尽力を頂いた中国および日本南極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] 福田明, 棕本介士, 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, "南極における流星バースト通信実験," 信学技報, SANE2003-94, pp.7-12, Jan. 2004.
- [4] 長澤正氏, 棕本介士, 福田明, 吉廣安昭, 中野啓, 大市聡, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉昭, Huigen Yang, Mingwu Yao, Sen Zhang, Guojing He, Lijun Jin, "トーン信号伝送による南極大陸の流星バースト通信路の観測実験について," 信学技報, SANE2003-96, pp.19-24, Jan. 2004.
- [5] 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.
- [6] 棕本介士, 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, "南極における流星バースト通信を用いたデータ伝送実験について," 信学技報, SANE2003-95, pp13-18, Jan.2004.
- [7] T. Ogawa, K. Igarashi, Y. Kuratani, R. Fujii, and T. Hirasawa, "Some initial results of 50 MHz meteor radar observation at syowa station," Mem.Natl Ins. Polar Res Spec. Issue,36,pp.254-263,1985.
- [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] 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.
- [13] 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.
- [14] R.A. Makarevitch, A.V. Koustov, K. Igarashi, K. Ohtaka, T. Ogawa, N. Nishitani, N. Sato, H. Yamagishi and A.S. Yukimatu, "Comparison of flow angle variations of E-region echo characteristics at VHF and HF," Adv. Polar Upper Atmos. Res.,16, pp.59-83, 2002.
- [15] 野崎 憲明, "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.
- [16] A.K. McDonough, R.I. Desourdis Jr. and J.R. Katan, "Blackout of simultaneous HF skywave and VHF meteor burst communication links," IEEE pp.402-406, 1993.
- [17] 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.
- [18] "Operation and maintenance of the MCC-545A RF modem," Meteor Communications Co.,2000.
- [19] J.Z. Schanker, "Meteor burst communications," pp.149-164, Artech House Inc.,1990.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)



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・工, 電気・電子工学科, 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.



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.



吉廣 安昭 (正員)

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.

門倉 昭

国立極地研究所, 宙空圏研究グループ, 助教授, 第 44 次南極昭和基地越冬隊員.

Huigen YANG

中国極地研究所副所長.



中野 啓 (学生員)

静岡大・工, 電気・電子工学科, 大学院生, 第 44 次南極ドームふじ基地越冬隊員.

Mingwu YAO

西安電子科技大通信工程学院, 大学院生, 中国第 18 次南極越冬隊員.

Sen ZHANG

西安電子科技大通信工程学院, 大学院生, 中国第 19 次南極越冬隊員.



大市 聡 (学生員)

静岡大・工, 電気・電子工学科, 博士課程生, 第 45 次南極昭和基地越冬隊員.

Guojing HE

西安電子科技大通信工程学院, 大学院生, 中国第 20 次南極越冬隊員.



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.

Lijun JIN

西安電子科技大通信工程学院, 教授.



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.

**Abstract** BLOS data transmission experiments using a meteor burst communication equipment were conducted during the Japanese 43-rd and 44-th expeditions in Antarctica. During the 43-rd expedition, a remote station located at Zhongshan station sent data packets to the master station at Syowa station. In the 44-th expedition, we added another remote station at Dome-Fuji station. Non-meteoric propagation phenomena were frequently observed during local night hours in those links. This paper shows the effect of the non-meteoric propagation on data transmission and various statistical properties of meteoric and non-meteoric channels from the viewpoint of communications.

**Key words** meteor burst communication, Antarctica, low VHF, beyond line of sight data transmission, aurora