

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

福田 明<sup>†</sup>      棕本 介士<sup>†</sup>      大市 聡<sup>†</sup>      中野 啓<sup>†</sup>  
吉廣 安昭<sup>†</sup>      長澤 正氏<sup>††</sup>      山岸 久雄<sup>†††</sup>      佐藤 夏雄<sup>†††</sup>  
楊 恵根<sup>††††</sup>      何 国経<sup>†††††</sup>      金 力軍<sup>†††††</sup>

MBC Data Transmission Experiment Conducted During Japanese 45-th Expedition in Antarctica

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

あらまし 本論文では、筆者らが 2001 年末より 2004 年末まで、ほぼ 3 年間にわたって南極大陸で実施した流星バースト通信実験のうち、最終年度（第 45 次南極地域観測隊）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。実験は、昭和基地（マスタ局）- 中山基地（リモート局）間約 1400km で行われ、筆者らが開発した、ソフトウェアモデムによる流星バースト通信システム RANDOM が用いられた。期間を通しての平均スループットは、流星バーストによる伝搬が主である昼間には約 1.7bps、オーロラに関係すると思われる非流星伝搬がしばしば発生する夜間には約 6.8bps であり、全体では約 3.4bps であった。このように、本システムのデータ伝送能力は、それまでの 2 年間のデータ伝送実験に用いた米国 MCC 社製のシステムに比べて非常に高く、この 1 対 1 通信路を通して一日あたり 30 キロバイト以上の観測データを伝送できることがわかった。

キーワード 流星バースト通信, 南極観測, 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、広範囲に散在する多数の地点から小容量の観測データを収集するシステムに特に適しており [1]~[3]、これまでもロッキーマ中の SNOTEL、フィリピンの灯台監視システムな

どが構築され、成功裏に運用されている [4]。低 VHF 帯の電波を用いる MBC は、特に高緯度地域においては、極冠吸収などの影響を受けやすい HF 通信に比べて有利であるといわれている [5], [6]。そこで筆者らは、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（2001 年 12 月より 2004 年 12 月まで）において行った [7]~[14]。

南極での実験は、通信路の定性的・定量的性質を調べるためのトーン実験と、データ伝送能力を実証するためのデータ実験からなり、この両者の結果を総合して考察することによって、高い信頼性のもとに南極域での MBC システムの設計と性能予測を行うことができる。トーン実験は 3 年間を通して、同じシステム・設定（注:最初の年度のみ 2 受信系統、以後は 1 受信系統）で行われた。一方データ伝送実験は、初年度には米国 MCC 社の機器を用いて昭和基地（マスタ局）-

<sup>†</sup> 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  
<sup>††</sup> 沼津工業高等専門学校, 沼津市  
Numazu College of Technology, 3600 Ooka, Numazu-shi,  
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> 西安電子科技大通信工程学院, 西安市  
Xidian University, 2 Taibai Road, Xi'an, 710071 China

中山基地（リモート局）間で行われ、次の年度には、これにさらにドームふじ観測拠点のリモート局を加えて2リモート局構成で行われた。最終年度には、昭和基地（マスタ局）- 中山基地（リモート局）構成に戻され、筆者らが開発したシステム（RANDOM: RAdio Network for Data Over Meteor）を用いて行われた。

本論文では、RANDOM による実験の概要を紹介したのち、実験結果を分析し、パケットの受信数やスループット、およびそれらの日変動、季節変動など、基本的な事項の集計結果について報告する。実験結果のより詳細な考察、MCC 社製の機器による1年目、2年目のデータ伝送実験結果（[8], [10] など）との比較考察、国内における同一機器、同一設定による実験結果との比較などは、後に別の論文で扱う。

## 2. RANDOM の概要

### 2.1 ハードウェア構成

RANDOM は、地理的に離れた多数のリモート局から観測データを一つのマスタ局に半2重方式で収集することを目的とした MBC システムである [7], [10], [11]。図1にリモート局のハードウェア構成を示す。マスタ局も全く同じ無線機を用い、その局構成は、この図からセンサとデータログ（CR10X）を除いたものである。無線機制御用のコンピュータ（Control PC）は必要時のみ接続される。

RANDOM システムに用いられている無線通信装置 IT5000 は、周波数変換、電力増幅、送受信切替などを行う無線部、無線部のパラメータ設定や各種保護機能などを有する制御部、および通信に必要な各種機能をソフトウェアにより実現する DSP 部より構成されている（[7], [10] などの図参照）。この DSP 部では、低 IF 信号の変復調、通信プロトコル制御、周辺装置とのデータ入出力などが行われる。実験で用いた DSP ソフトウェアは SMR2003（Software Modem for RANDOM 2003）と名づけられ、C 言語で記述されており、Host PC 上でコンパイルした後、実験開始時に DSP 上にダウンロードして使用する。

### 2.2 プロトコル

RANDOM では、ソフトウェアモデムの特徴を生かして、種々のプロトコルや変復調方式・符号化方式などを状況に応じて容易に切り替えて使用することができる。これまでも多くの国内実験において、種々の機能を持ったプロトコルや変調方式を用いた実験を行ってきたが、今回の南極における実験では、MBC

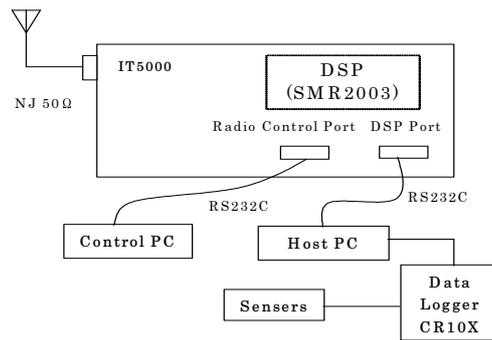


図1 RANDOM リモート局のハードウェア構成  
Fig.1 Configuration of a RANDOM remote station.

Basic 手順と名づけた、基本機能のみに限定したプロトコルを用いた。南極では、1リモート局構成で実験を行ったが、以下に説明するように、この手順は多数のリモート局からのデータ収集を想定したプロトコルである。

マスタ局、リモート局とも、各種パケットの送信時以外は基本的に受信状態にあり、到来信号を待ち受ける（後述の、マスタ局におけるデータパケットの Host PC への転送時を除く）。

図2に示した、この手順によるデータ伝送例に見られるように、マスタ局は、流星バースト通信路の有無を探査するため、一定間隔で Probe Packet（以下 PP と略す）を送信する（各パケットの構造については図3参照）。送信すべきデータを持っているリモート局との間に通信路が発生し、PP が受信されると、その局は送信バッファ内のデータを、Data Packet（DP）として PP の受信直後に送信する。

DP を受信したマスタ局は、パケットに誤りがなければ、それを受信バッファに保存する。DP 保存後も受信バッファに空きがあれば Ack&Probe Packet（APP）が、空気がなければ Ack Packet（AP）が返送される。南極での実験では、受信バッファの容量は4パケットとした<sup>(注1)</sup>。DP のヘッダ部は正しく受信されたが、データ部に誤りが検出された場合は、Nak Packet（NP）が返送される。これらの返送パケットには該当するリモート局の ID が記されている。

リモート局からの DP の返送を検出できないか、または検出には成功してもヘッダ部が正しく受信できな

(注1): 流星バースト通信は低速なので、DSP メモリ容量の制約もあって、今回はこのように設定したが、非流星伝搬の発生時などには、より大きい値とすることの効果があると思われる。

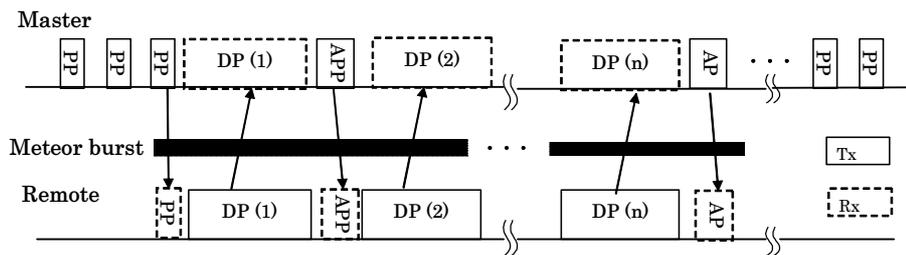


図 2 MBC Basic 手順によるデータ伝送例  
Fig. 2 Data transmission with MBC Basic protocol.

かった場合は、マスタ局は次の PP を送信する。

自局宛の APP または AP を受信したリモート局は、その DP の伝送が完了したことを知り、送信バッファから対応するデータを消去する。APP を受信した場合は、送信バッファに他のデータがあれば直ちにそれを送信し、NP を受信した場合には、前回と同じパケットを直ちに再送する。一方、AP を受信した場合は、DP があっても送信しない。

今回の実験では、NP に対する応答 DP が正しく受信されなかった場合には、マスタ局は再度 NP を送信することはせず、PP の送信を再開するように設定した。NP に対する応答 DP が正しく受信されなかった場合、その通信路はそのリモート局にさらに続けて送信権を与えるほど良質ではない可能性が大きいと考えたからである。

DP 送信後、一定時間以内に APP、AP、NP のいずれも受信されなかった場合、リモート局は DP の伝送に失敗したものと判断し、PP の受信を再開する。

マスタ局は、APP あるいは NP 送信後一定時間（本実験では、受信 送信切り替え時間、往復電波伝搬時間、DP 検出時間に、マージンを考慮して 28msec とした）以内に応答が検出されないか、AP を送信した場合には受信バッファ内の DP を Host PC に転送し、転送完了後に PP の送信を再開する。実験に用いたシステムの場合、このデータの転送に 1 パケットあたり約 1.6 秒を要した<sup>(注2)</sup>。

このようにプローブパケットと Ack パケットの機能を兼ねた APP、NP を用いるのは、直前の DP の伝送に際して良質な通信路（APP の場合）あるいはかなり良質な通信路（NP の場合）が開いていたりリモート局には、他リモート局の干渉および DP の PC へ

の転送に煩わされることなく、すぐ続けて送信権を与え、間欠的な MBC 通信路を効率よく使用するためである。これは、今回のシステムのように、DSP から PC への DP の転送のために長い時間を要するシステムでは、1 リモート局構成の場合でも有効である。

このプロトコルにおいては、PP のみならず APP、NP も通信路の存在を確認する役目を負っているため、以下本論文では、これらを合わせたものを PP\* と示すことにする。また、APP と AP はともに、DP がマスタ局で正しく受信されたことを示すものなので、これらを合わせたものを AP\* と書くことにする。

ここで、上のプロトコルによると、リモート局にとって一組の観測データの伝送が完了するのは、それに対応する DP に対する AP\* が受信されたときであるが、マスタ局にとっては、AP\* の伝送の成否に関係なく、最初にその DP が正しく受信された時点からそのデータを有効なものとして扱えることに注意すべきである。

図 3 に各パケットの構造を示す。プレアンブル (PR) には < 11 > を BPSK 変調したものをを用い、ポストアンブル (PO) は、直前の送信シンボルを 2 回繰り返す。スタート符号部はそれ以降のデータ部に適用する変調方式に関係なく、常に < 10101010 > を BPSK 変調したものをを用いる。このスタート符号は、パケット検出と同時にシンボル同期および搬送波同期の引き込み用にも用いられる。プレアンブルとスタート符号の先頭の 3 ビットを合わせた < 11101 > を Barker 符号部と呼び、パケット検出の際に利用する [15]。

DP のヘッダ部および AP、APP、NP の誤り検出のために 8 ビットの CRC 符号化が行われ、DP のデータ部の誤り検出のために、さらに 16 ビットの CRC 符号化が行われる。また個々の DP の区別のためには、8 を法とするシリアル番号が用いられる。また、DP の

(注2): 流星バースト通信は低速なので、このような簡単な直列動作方式を採用したが、非流星伝搬、多数リモート局の場合などをも考慮して、今後は並列動作方式を採用する計画である。

(a) Probe Packet (PP)

PR(2)	Start(8)	Packet type(4)	Master ID(4)	PO(2)
-------	----------	----------------	--------------	-------

(b) Data Packet (DP)

PR(2)	Start(8)	Packet type(4)	Master ID(4)	Remote ID(8)	Serial No(3)	Data Len(5)	CRC8(8)	Data(8*X)	CRC16(16)	PO(2)
-------	----------	----------------	--------------	--------------	--------------	-------------	---------	-----------	-----------	-------

(c) Ack, Nack, Ack and Probe Packet (AP, NP, APP)

PR(2)	Start(8)	Packet type(4)	Master ID(4)	Remote ID(8)	Serial No(3)	Data Len(5)	CRC8(8)	PO(2)
-------	----------	----------------	--------------	--------------	--------------	-------------	---------	-------

図 3 パケットの構造 (数値はビット数, X はデータのバイト数 (データヘッダを含む))

Fig. 3 Structure of packets (numerals are in bits, X is the number of data bytes including data header).

データ部の長さは可変で、そのバイト数が Data Len として示される。ただし、今回の実験では観測データは 20 バイト固定とした。これに、データヘッダ 5 バイト、CRC 2 バイトを加えて、データ部の長さは 27 バイトである。

### 3. 45 次隊によるデータ伝送実験の概要

データ伝送実験は、マスタ局を昭和基地に、リモート局を中山基地に置いて行われた (各局の位置などについては [7], [8] など参照)。アンテナは両局とも地上高約 8m の水平偏波 5 素子八木アンテナで、仰角は 0 度、方位角は互いに大円対向となるようにした。搬送波周波数は 43.65MHz である。マスタ局、リモート局ともに無線機出力電力は約 100W であるが、それぞれ約 2.3dB, 1.8dB のケーブル損失があったので、アンテナからの有効輻射電力はそれぞれ約 60W, 65W であったと推定される。

トーン実験とデータ伝送実験は、両実験の干渉を避けるために、時間分割的に交互に行われた [7], [8], [11], [14]。すなわち、データ伝送実験は各 10 分周期の後半 5 分間のみ行われた。

リモート局では、データログ (Campbell Scientific 社製 CR10X) から 5 分間隔で 10 項目 20 バイトのデータを取得し、これに 5 バイトのデータヘッダ (データの受け取り時刻、シリアルナンバーなどを含む) を加えて DP を生成する。この DP を、後述の理由により、以下では Real Data Packet (RDP) と呼ぶことにする。前年までの MCC 社のシステムによる実験と異なり、今回の実験においては RDP の寿命は設定せず、そのかわり送信バッファに空きがなくなると新しい RDP をデータログから取得しない設定にした。実験では、送信バッファ容量を 104 パケット (Host PC

に 100, DSP に 4) としたので、一つの RDP が約 9 時間伝送に成功しないと、新しい RDP の消去が起ることになる。

今回の実験においては、システムの最大通信性能の調査のために、2.2 で述べたプロトコルに加えて、送信バッファが空の状態において PP\* を受信すると自動的にダミーデータパケット (DDP) を送信するように設定した。DDP は、ロガーから得た実観測データは含まないが、パケット構造及びパケット長は RDP と全く同じである。DDP はリモート局の送信バッファには入らず、送信バッファに RDP があるときに PP\* を受信したら必ず RDP を送信するので、1 リモート局構成の場合、DDP の存在は、RDP の伝送特性にはほとんど影響しない。DDP の存在が RDP の送信を妨害するのは、マスタ局が DDP を Host PC へ転送中にリモート局で新しい RDP が送信バッファに入り、さらにすぐに通信路が発生した場合など限られた場合のみである。以下本論文では、RDP と DDP をあわせて DP とよぶことにする。

ソフトウェアモデムの特徴を生かして、各種の伝送速度、変調方式、復調方式などにつき、国内で多くの予備実験を行い、その結果を考慮して、今回の実験ではすべてのパケットのすべての部分の変復調には伝送速度 2400bps の同期検波 BPSK を用いた [15]。

表 1 に、今回の実験における各種パケットの伝送時間、各種送受信切り替え時間の設定値などを示しておく。

### 4. 実験結果とその考察

上記の設定による実験は 2004 年 3 月下旬に開始され、同年 12 月上旬まで続けられたが、本論文では、2004 年 4 月 1 日 ~ 同年 11 月 30 日における実験の

表 1 実験に用いたパケット長・送受タイミングおよび伝搬時間

Table 1 Timing parameters in the experiment.

パケット長	
PP	8.3msec
DP	108.3msec
AP*,NP	18.4msec
送受タイミング	
PP 送信間隔	38.3msec
送信 ⇄ 受信切替時間	2.0msec
伝搬遅延 (片道)*	5.0msec

\*伝搬距離 (片道) を 1500km とした場合

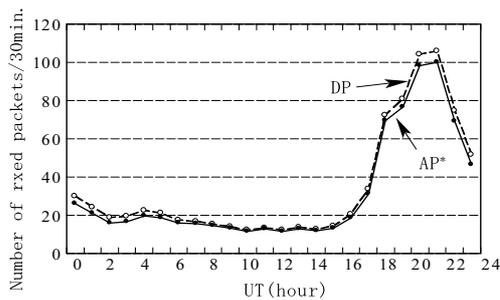


図 4 平均 DP, AP\*受信数/30分

Fig. 4 Average number of received DPs and AP\*s / 30minutes.

結果のみを集計・考察する。ただし、この期間中でも、移動見通し内実験の並行運用、電源トラブルなど様々な原因により、例え一部の時間であっても実験データの欠損や乱れのある日は、集計から除外した。集計から除外した日とその理由を付録に示しておく。

#### 4.1 DP 受信数の日変動

図 4 に、全実験期間にわたって平均した各時間帯別の DP 受信数、AP\*受信数を示す。上述のように、データ伝送実験は 1 時間のうち 30 分間のみ行っているため、図には 30 分間あたりの受信数が示されている (以下同様)。横軸は世界時 (UT) であり、中山 - 昭和基地間の midpoint の地方時はこれより約 4 時間進んでいる。DP 受信数には、AP\*受信失敗のために重複して受信された DP も含む。すなわち、DP 受信数 - AP\*受信数 = DP の重複受信数である。

この図より、16 時台以降急激にパケットの受信数が増大している事がわかる。この時間帯においては 1 時間以上も連続して通信路が開く事があり、明らかに流星伝搬以外の電波伝搬現象 (オーロラ性のスボラディック E 層等) によるものと考えられる [7] ~ [14]。0 時台 ~ 15 時台における 1 時間毎の平均 AP\*受信数は約 15、16 時台 ~ 23 時台におけるそれは約 60 であり、全時

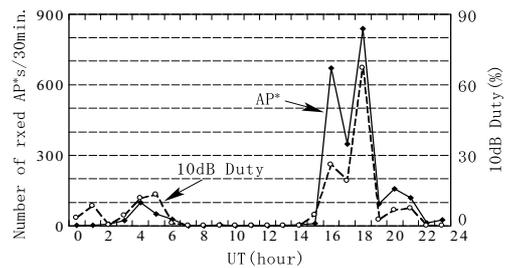


図 5 7 月 25 日における AP\*受信数と 10dB デューティ比  
Fig. 5 Number of received AP\*s/30min and 10dB Duty on July 25-th.

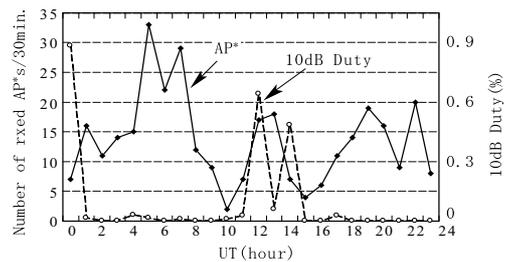


図 6 6 月 27 日における AP\*受信数と 10dB デューティ比  
Fig. 6 Number of received AP\*s/30min and 10dB Duty on June 27-th.

間の平均は約 30 であった。

図 4 は全期間の平均であるが、非流星伝搬が発生した日と発生しなかった日とは様子が大きく異なるので、図 5, 6 に、発生した日、しなかった日の典型的な例として、2004 年 7 月 25 日と 6 月 27 日の時間毎の AP\*受信数、および同時期に行ったトーン実験から得られた 10dB デューティ比を示す。10dB デューティ比とは、中山基地から 115W で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 に換算した受信雑音電力の 10dB 以上となる時間割合である。今回の実験では、トーン実験とデータ実験は、送信機、受信機、アンテナなど、すべて別システムを用いて実施しているため、この比が直接データ実験における受信 SN 比となるわけではない。トーン実験の詳細とその結果については [7], [8], [11], [12] などを参照されたい。

図 5 では、10dB デューティ比と AP\*受信数はよく似た変動を示している。16 時以降、非流星伝搬により AP\*受信数、10dB デューティ比はともに急激に増大し、AP\*受信数は最大で 838 個、10dB デューティ比は最大 67% になった。

一方、図 6 ではすべての時間帯にわたって 10dB

デューティ比は 0.7%以下、30 分あたりの AP\*受信数は 35 個以下であり、ほとんどが流星バーストによる伝搬であると考えられる（図 5, 6 の縦軸の数値の違いに注意されたい）。この図の場合、10dB デューティ比と受信 AP\*数にはほとんど相関は見られない。一般に流星バースト通信路の継続時間は短く、発生間隔は指数分布に従いランダムである。このため、異なった時間に交互に行われるトーン実験とデータ伝送実験の結果にはほとんど相関がみられないのである [8]。一方、図 5 に示したように、長時間継続する非流星伝搬の場合には大きな相関が見られるのである。

4.2 スループットの長期変動

次に、このシステムのデータ伝送能力のより長期的な変動について考察する。ただしここでは、AP\*受信数と 1 対 1 に対応するスループットによって考察を進めることにする。スループットとは、正味のデータの伝送速度であり、一つの DP に含まれるデータ量を X バイトとすると、

$$\text{スループット} = \frac{AP^* \text{ 受信数} \times X \times 8}{\text{システムの稼動時間}} \text{ [bps]} \quad (1)$$

となる。本実験において用いたデータヘッダ 5 バイトもデータの一部とみなす時には X=25、ロガーから得た観測データのみを考えるとときには X=20 である。なお、本論文では特に断らないときは、スループットは X=20 の場合の数値を示してある。

図 7 は、全時間、0 時～16 時、16 時～24 時におけるスループットの月毎の変動である。全期間を平均したスループットは約 2.7bps（データヘッダを加えた場合は 3.4bps）であった。0 時～16 時の流星伝搬が主である時間帯においては月によって大きく変動する事はなく、全期間平均で約 1.4bps（1.7bps）であったが、16 時～24 時の非流星伝搬が頻繁に発生する時間帯においては、月によって大きな変動を示し、全期間平均で約 5.4bps（6.8bps）であった。これからわかるように、月毎のスループットの変動は、主に非流星伝搬現象の出現頻度と継続時間の変動が原因である。

4.3 各パケットの受信率

図 8 に、全期間にわたって平均した PP\*, DP, AP\* の受信率の日変動を示す。ここに受信率とは、各種類のパケットの受信数の送信数に対する割合である。

図より、PP\*の受信率が他に比べて格段に低いことがわかる（図では PP\*のみ別スケールを用いていることに注意されたい）。送信される PP\*の大部分は PP が占めているが、この PP は、通信路の出現を検出す

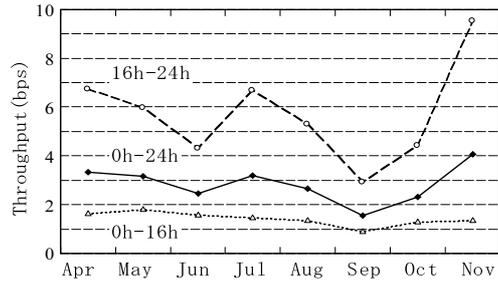


図 7 月ごとのスループットの変動  
Fig. 7 Variation of monthly throughput.

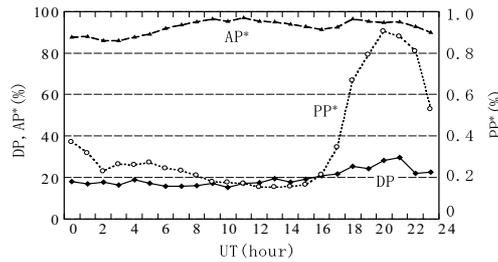


図 8 パケット受信率の日変動  
Fig. 8 Hourly variation of receive rate of packets.

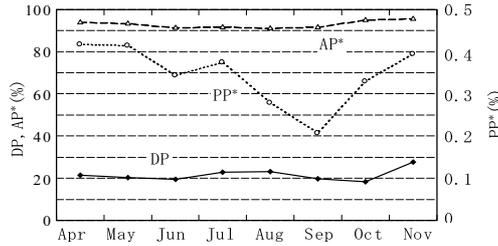


図 9 月ごとのパケット受信率の変動  
Fig. 9 Seasonal variation of receive rate of packets.

るために、直前の PP 送信時に通信路が開いていなかったとき送信されるものだからである。一方、DP と AP\*は、その通信路が開いており、PP\*や DP が受信された直後に送信されるものなので受信率が高いのである。中でも、DP 受信率に比べて AP\*受信率が 80%以上と高いのは、パケット長が短いためである。PP\*受信率のみが図 4 に示す受信数と同様な変動を示すのも上と同様な理由による。

図 9 には、PP\*, DP, AP\*の受信率の月ごとの変動を示した。当然ながら、この場合も、DP, AP\*の受信率はほぼ一定で、PP\*受信率のみが図 7 のスループットと同様な変動を示している。

4.4 日ごとの DP 受信数の分布

図 10 は、全実験期間にわたる一日毎の DP 受信数

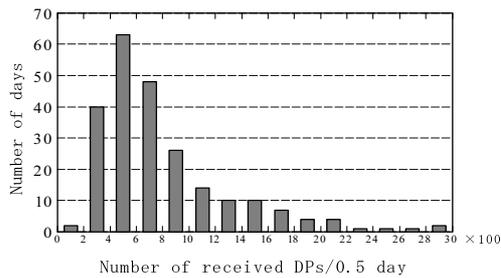


図 10 DP 受信数のヒストグラム  
Fig. 10 Histogram of numbers of received DPs/0.5day.

のヒストグラムである（付録に示した除外日を除く 235 日間の集計）。横軸は各日（稼働時間は 12 時間）の DP 受信数で、数値  $A$  から  $A+2$  の区間は、1 日あたりの DP 受信数が  $A \times 100$  個以上、 $(A+2) \times 100$  個未満を示している。ただし、11 月 26 日 (3350 個) と 11 月 27 日 (5725 個) は、このグラフには含まれていない。

この図より、多くの日には 200 個 ~ 1000 個の DP が受信されていることがわかる（この範囲に 75% 強の日数が含まれている）。全体を平均すると 821 パケット/0.5 日であり、最大・最小はそれぞれ 5725 個（11 月 27 日）、107 個（11 月 11 日）であった。2004 年 11 月は、昭和基地では 8 日から 12 日にかけて非常に高い地磁気擾乱指数 ( $k$  値) が観測されたが、11 日に受信パケット数が最小となったのは、この強い地磁気擾乱による電波の異常吸収現象によるものではないかと思われる [16]。 $k$  値が大きいときにはオーロラが発生しやすく、その結果通信路のデューティ比が大きくなることが多いが、逆に吸収現象によりデューティ比が極めて小さくなることもあるのである。

#### 4.5 実データの受信率

図 11 は、全期間にわたって平均した実データ受信率の日変動である。参考のために、10dB デューティ比と PP\* 受信率も再掲してある。ここで実データ受信率は、各時間帯にマスタ局で受信された RDP 数 (AP\* の受信失敗により、RDP 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) を、1 時間当たりの実データ発生数、すなわち 12 で割った値の平均値である。

実データ受信率は、10dB デューティ比とある程度似た変動を示しているが、比例はしていない。これは、実データの発生間隔を 5 分と設定しているため、伝送路が開いてもリモート局に送信 RDP がいない場合

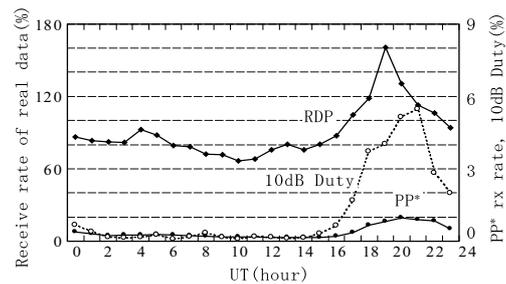


図 11 実データ受信率、PP\* 受信率と 10dB Duty の時間変動

Fig. 11 Daily variation of receive rate of real data, PP\* and 10dB duty.

が発生するからである。また、マスタ局は受信 DP の Host PC への転送中は PP の送信を休止することなども原因である。また 10dB デューティ比が 21 時にピークを持つのにに対し、受信率のピークが 19 時であるのは、かなり多くの日において、0 時 ~ 16 時の間にリモート局で送信できずに滞留した RDP が、16 時以降、通信路の開く割合が増えるにつれて数時間のうちに大量に送信されることが起るからである。すべての滞留 RDP が送信された後には、送信される RDP はその時間内に生成されたもののみとなる。

## 5. むすび

本論文では、筆者らが開発した流星バースト通信システム RANDOM による南極大陸でのデータ伝送実験の概要と、その 2004 年 4 月 1 日 ~ 同年 11 月 30 日間の実験結果の基本的な集計・分析結果について報告した。実験は、昭和基地 (マスタ局) - 中山基地 (リモート局) 間約 1400km で行われ、期間を通しての平均スループットは、流星バーストによる伝搬が主である昼間には約 1.7bps、オーロラに関係すると思われる非流星伝搬がしばしば発生する夜間には約 6.8bps であり、全体では約 3.4bps であった。このように、2004 年単年度の結果であるが、本システムによると、一日あたり 30 キロバイト以上の観測データを伝送できた。

これは 1 リモート局からのデータ収集システムの場合であるが、より多くのリモート局からなるシステムの場合には、流星伝搬時のスループットがかなり大きくなることに注意されたい。1 対 1 流星バースト通信路のデューティ比は低く、また、流星バーストによる伝搬のフットプリントは小さいので、マスタ局が複数のリモート局に向けて同じ周波数で同時に PP を送信

しても、それらからの応答 DP がマスタ局で衝突する確率は小さいからである。今後は、多数のリモート局を持つシステムの特性に関して、理論・実験両面から検討したい。南極での応用を考えた場合、高いデューティ比を示す非流星伝搬現象を、そのことによるパケットの衝突現象を考慮しつつ有効に利用するプロトコルの検討が必要である。

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] D.L. Schilling, "Meteor burst communications - Theory and practice," John Wiley & Sons Inc., New York, 1993.

[2] J.Z. Schanker, "Meteor burst communications," Artech House Inc., 1990.

[3] 福田明, "流星バースト通信," コロナ社, 1997.

[4] D.E. Johnson, "Ten years experience with the SNO-TEL meteor burst data acquisition system," Proc. Meteor Burst Commun. Symp., SII-5-SII-20, The Hague, Netherlands, Nov. 1987.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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, "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.

[9] A. Fukuda, K. Mukumoto, Y. Yoshihiro, M. Nagasawa, H. Yamagishi, N.Sato, H. Yang, M.Yao, and Jin, L., "Experiments on Meteor Burst Communications in the Antarctic," Adv. Polar Upper Atmos. Res., 17, pp.120-136, Sept. 2003.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 福田明, "南極大陸における流星バースト通信実験," 信学技報, WBS2005-43, pp25-30, Oct.2005.

[15] 棕本介士, 大市聡, 福田明, "MBC ソフトウェアモデムのためのパケット検出および CPSK 復調法," 信学ソ大, B-2-20, Sept. 2002.

[16] 中野啓, "南極大陸における MBC データ伝送実験に関する研究," 静岡大学修士論文, March 2006.

[17] 中野啓, 福田明, 棕本介士, 長澤正氏, 吉廣安昭, 大市聡, 山岸久雄, 佐藤夏雄, 門倉昭, "南極における 2 種の MBC システムによるデータ伝送実験結果の比較," 信学ソ大, B-2-33, Sept. 2005.

付 録

表 A-1 集計から除外した日  
Table A-1 Days not included in the counting.

集計項目	集計から除外した日
DP,AP 受信数・RDP 受信数 スループット	10/12,18~20,31,11/21 (LOS 実験) 10/29(システムエラー) 10/22,11/29(中山 PC 停止)
PP 受信数	上記のほかに
7dBduty	4/1 3,5,12,15,27(プログラムエラー*) 5/1 5/7 (RF ゲイン変更のため)

\*マスタ局において 23 時以降のデータ集計が保存されないエラー (送信した PP 数が不明) . 5 月 1 日以降は修正プログラム使用 .

(平成 18 年 x 月 x 日受付, x 月 x 日再受付)



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.



山岸 久雄

国立極地研究所, 宙空圏研究グループ, 教授, 第 45 次南極越冬隊長.



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.



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.



大市 聡

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.



楊 恵根

中国極地研究所副所長.



中野 啓

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.



何 国経

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.



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.



金 力軍

西安電子科技大通信工程学院, 教授.



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.

**Abstract** We conducted a meteor burst data transmission experiment for over 8 months in Antarctica between two stations about 1400 km apart using a system developed by us. The outline and results of the experiment are shown in the paper. Throughput of the system averaged on the whole period was about 3.4 bps. It was about 6.8 bps during the night hours when non-meteoric propagation phenomena of aurora origin frequently occur. Thus it is confirmed that we can transmit data at the rate more than 30 kilo-bytes per day in Antarctic using our system

**Key words** Meteor burst communication, Antarctic survey, Beyond line of sight communication, Aurora