

南極周回気球による ELF/VLF 放射の観測

山岸久雄^{1*}・三宅壮聡²・岡田敏美²・知野明裕²・
門倉 昭¹・海老原祐輔¹・佐藤夏雄¹・高野 博³

ELF/VLF emission observation by Polar Patrol Balloons

Hisao Yamagishi^{1*}, Taketoshi Miyake², Toshimi Okada², Akihiro Chino²,
Akira Kadokura¹, Yusuke Ebihara¹, Natsuo Sato¹ and Hiroshi Takano³

(2006年1月12日受付; 2006年4月17日受理)

Abstract: Circum-Antarctic balloons were launched from Syowa Station by the 44th Japanese Antarctic Research Experiment team in January 2003. Two balloons equipped with identical instruments were flown in formation around the Antarctic continent, in an attempt to separate temporal and spatial variations of the auroral phenomena. In this paper, we report instrument design, operation and some initial results of the ELF/VLF wave experiment by PPB No. 8 and 10 balloons.

要旨: 2003年1月, 第44次南極観測隊により昭和基地からオーロラ現象を総合的に観測するための南極周回気球が放球された。同一観測機構成の2機の気球は南極大陸を半周する編隊飛行を行い, オーロラ現象の時間と空間変動を分離した観測を行うことを試みた。ここでは同気球に搭載された ELF/VLF 帯電磁波動観測機の仕様, 実験経過, 初期観測結果について報告する。

1. はじめに

地球磁気圏で発生する様々な電磁現象の多くは, 磁力線に沿って極域電離層に投影される。オーロラ現象はその代表的なものである。このような現象について, 南極大陸を周回する風系に乗った気球により観測しようという試みが1980年代後半から国立極地研究所

¹情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

²富山県立大学. Toyama Prefectural University, 5180, Kurokawa, Kosugi-machi, Imizu-shi, Toyama 939-0398.

³明和システム. Meiwa System Corp., 4-1-10, Kikuna, Kouhoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 222-0011.

*Corresponding author. E-mail: yamagisi@uap.nipr.ac.jp

と宇宙科学研究所（現、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部）により開始され、南極周回気球（Polar Patrol Balloon, 略して PPB）実験と呼ばれている。オーロラ現象は時間的、空間的に激しく変動するため、気球 1 点で観測した場合、時間的変動なのか、空間的変動なのか区別することが難しい。そこで、複数の気球が編隊飛行を行うことにより、時間変動と空間変動を分離した観測を行うことが計画された。2003 年 1 月 13 日、オーロラ現象を観測するための 5 種類の観測機を搭載した 2 機の観測気球（PPB 8 号機と 10 号機）が南極昭和基地から放球され、約 2 週間かけて南極大陸を半周する飛翔を行った。この間、大きな地磁気じょう乱が発生し、顕著な現象が気球により観測された。観測データは気球に搭載されたイリジウム衛星電話端末により直接、日本へデータ通信する方式がとられた。本報告では、PPB 8 号機と 10 号機に搭載された波動観測機（EMW）の仕様、実験経過、初期観測結果について報告する。

2. 波動観測の目的

極域の気球高度で観測される ULF~VLF 帯の電磁波動現象としては、(1) 磁気圏で発生したイオンサイクロトロン波(Pc-1 地磁気脈動)、(2) 中低緯度で発生する雷放電から放射される電磁波、(3) オーロラ現象などに伴い磁気圏で発生したホイッスラーモード波が極域電離層を通過して電磁波となったもの、(4) 地上の VLF 送信局からの電磁波などが考えられる。(1) は通常、磁性体コアにコイルを多数回巻いたサーチコイルで観測されるが、今回の実験では気球を 1 周するループアンテナが巨大なことから、このアンテナでも (1) に対して十分な感度があると見積られる。(2) については、最近、スプライトやエルプスと呼称される雷雲から電離層への上方放電現象が注目されており (Rodger, 1999)、これらに伴う大振幅の電磁波が極域に伝播し、ULF/ELF 帯で観測されることが報告されている (Sato, M *et al.*, 2003)。そこで (1)、(2) を対象に、気球で受信した磁界成分の波形をそのまま伝送することにした。複数の気球で波形を同時受信し、位相、振幅を比較することにより、波動伝播に関する情報が得られることが期待される。(3) については、地上で受信される磁気圏起源電磁波の伝播特性上、電離層—地上間距離 (~100 km) が重要なパラメーターとなっているが、今回の実験では、これと同等な間隔で飛ぶ複数気球により受信強度の同時比較が行われることから、電離層—地上伝播に伴う波動の空間的拡がりについての有益な知見が得られることが期待される。また、極域では ELF/VLF 放射強度が Pc-3-Pc-5 地磁気脈動により変調される現象 (Quasi-Periodic 放射, 略称 QP 放射) が知られており (Sato, N *et al.*, 1974)、磁気赤道面を地球方向へ伝播する圧縮性 MHD 波動による変調機構などが提案されている (Sato and Fukunishi, 1981)。今回、QP 放射が空間的に離れた複数気球で同時受信されれば、その変調位相の比較から、変調機構を検証する情報が得られることが期待される。(4) については、南極域では南極点でスタンフォード大学が運用しているビーコ

ン局 (20.0 kHz), オーストラリア北西岬の NWC 局 (19.8 kHz) などが対象となる。

3. 波動観測機 EMW

3.1. 観測機仕様

EMW のセンサーとして気球本体を縦回りに 1 周するワイヤ 2 本により構成される直交ループが用いられる。直交ループの出力は EMW のプリアンプで同相加算され、ターンスタイルアンテナを構成する。これにより水平面内での放射指向特性が等方的になり、気球が回転しても受信感度に変化が生じ無くなる。気球が満膨張した時、気球を 1 周するループは直径 45 m 程度の巨大な円に近い形になり、観測に十分な感度が得られることになる。受信機的设计にあたり、0.2 Hz から 36 kHz までの幅広い周波数帯域を観測する必要があるので、いくつかの工夫がなされた (三宅ら, 2004)。図 1 に EMW のブロック図を示す。まず、ループアンテナからの信号はプリアンプの昇圧トランス一次側に入力されるが、二次側巻線は二分され、高い周波数帯用 (5 kHz 以上) と低い周波数帯用 (2.4 kHz 以下) とに分けて信号を取り出すことにした。受信機は、予想される現象の時間変動のタイムスケールを考慮し、全体を三つの周波数域に分け、それぞれ異なる受信方式を採用した。すなわち、

(a) 0.2 Hz-4 Hz: WFC (Wave Form Capture)

信号波形を 10 Hz でサンプリングし、そのまま伝送する。

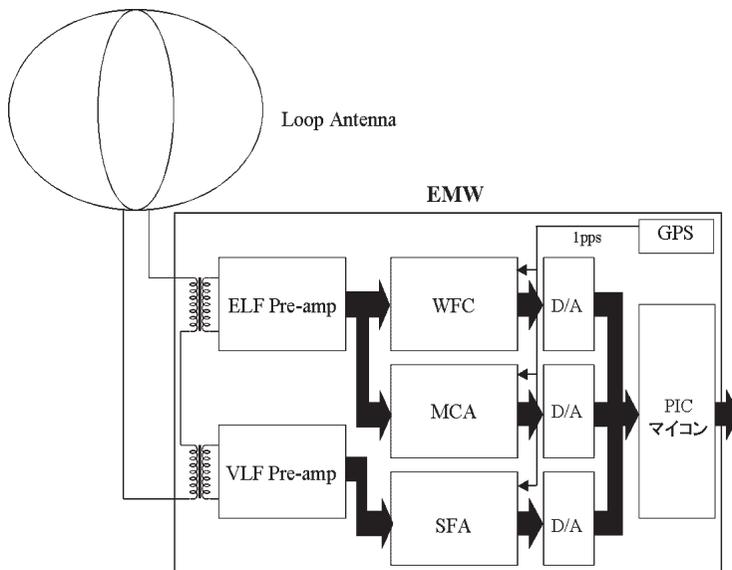


図 1 波動観測機 EMW のブロック図

Fig. 1. Block diagram of the wave observation instrument, EMW.

(b) 300 Hz-2.4 kHz: MCA (Multi Channel Analyzer)

受信信号を四つのチャンネルに分け、各チャンネルごとに時定数 0.5 秒で検波し、その強度を 2 Hz でサンプリングして伝送する。各チャンネルの中心周波数と通過帯域は 300 Hz \pm 25 Hz, 600 Hz \pm 50 Hz, 1.2 kHz \pm 100 Hz, 2.4 kHz \pm 100 Hz である。

(c) 5.0 kHz-36 kHz: SFA (Sweep Frequency Analyzer)

四つの観測周波数 5.0 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 36 kHz を順次、掃引受信する。掃引周期は 2 秒 (各周波数当たり 0.5 Hz のサンプリングに相当)、検波時定数は 0.2 秒、通過帯域はすべて 1 kHz である。

3.2. データ伝送

観測データは気球に搭載したイリジウム衛星電話端末を通じ、日本へ直接送られるが、データ通信速度が実効上 1880 bps 程度であったため(藤井, 2004)、波動観測に割り当てられる伝送量は 160 bps (20 byte/s) となった。上記(a)~(c)のサンプリング速度は、この制約の下に決められたものである。またデータ長も 1 ワードを 8 ビットで表現できるよう、圧縮をかけている。MCA, SFA については受信機のレベル設定に十分な注意を払い、対数圧縮コードにより 4 桁のダイナミックレンジを 8 ビットで表現した。WFC については、観測波形を忠実に再現するためリニアスケールで扱い、10 bit で A/D 変換した後、ビットシフト操作によるデータ圧縮を行い 8 ビットに納めた。

複数気球での観測データを同時比較するために、波動観測機間の時刻付けが正確であることが重要である。観測機本体では 5 種類の観測機データと気球システムのハウスキーピングデータを取りまとめ PCM フレームを組み、GPS 受信機で時刻付けを行うが、この時刻が、どのデータに対応するのか、あいまいさが残る。そこで、波動観測機は独自の GPS 受信機を内蔵し、その 1 pps 信号で同期をとることにより複数波動観測機間で 1 ms 以内の時刻同時性を達成することができた。また観測データに GPS によるリアルタイムクロックデータを添付してデータ伝送することにした。

3.3. 観測機の構成

EMW は気球本体に巻いたループをセンサーとしているため、気球本体の直下に観測機を置くことが好都合である。一方、観測機本体(親ゴンドラ)は電場観測機の要請により気球から 100 m 下方へ巻き下げることになった。これは気球本体に帯電した静電気が電場観測に影響を与えないようにするためである。このため、EMW と親ゴンドラは 100 m の巻き下げロープにより隔てられることになった(図 2 参照)。巻き下げロープは電気信号を通さないため、EMW は独自の電源を持つ子ゴンドラを構成し、観測データを微小電力の無線モデムで親ゴンドラへ伝送することにした。図 3 は EMW の子ゴンドラを示す。写真中央

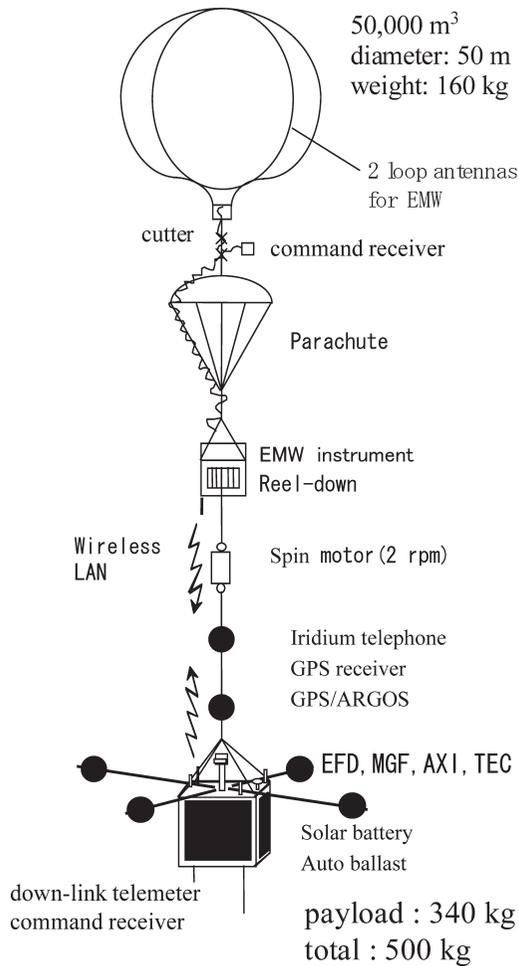


図2 PPB 気球の外観図

Fig. 2. Configuration of the PPB balloon

は巻き下げ器で、右側の発泡スチロール箱には EMW のメインアンテナ、GPS 受信器、無線モデム、電源用電池が収納され、左側の発泡スチロール箱にはプリアンプと電源用電池が収納されている。

無線モデム装置として三協特殊無線の DVM-9601DH (通信速度 9600 bps) を採用した。親ゴンドラは電場観測のためスピンモーターにより毎分 2 回転することになるが、この回転により無線モデムの通信状態が影響を受けないためには、無線モデムアンテナの水平面内指向性を等方的にすることが必要になる。そこでクリエートデザイン社に T 型アンテナを特注し、エレメントが水平面内になるように設置し、親ゴンドラ、子ゴンドラが水平面内で回転しても、受信感度に変化が現れないようにした。スピンモーターから発生する電

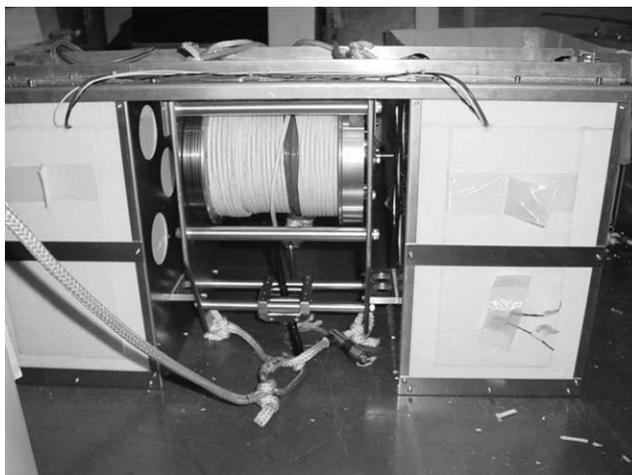


図3 巻き下げ器と波動観測機 EMW から成るゴンドラの外観
 Fig. 3. Configuration of the sub gondola consists of reel down device and the wave instrument EMW

磁雑音は観測上、問題のないレベルであることが三陸気球実験場における予備実験で確認された。

電源用電池として松下電池の BR-C 型リチウム電池を 4 直列した組電池 (12 V, 5 Ah) を 48 並列し、240 Ah の容量とした。EMW 全体の消費電流は当初予測 (500 mA) に比べ約半分の 12 V, 260 mA となったので、1 日あたり 6.24 Ah 使うとして 38 日間の観測が可能である。これは PPB 実験の予定日数 20 日に比べ、十分な余裕がある。

4. 感度校正

気球を 1 周するループアンテナは気球が満膨張した時、直径 45 m の円で近似できるとするとインダクタンスは 1.9 mH となり、またループの導線 (AWG 16) の直流抵抗は実測値で 6.7 オームであった。ループの面積は 1590 m²であることから、このループに発生する起電力 e (Volt) は、観測周波数 f (Hz)、電磁波の磁界強度を B (Tesla) とすると $e = (2\pi \cdot 1590) \cdot fB \doteq 10000 \cdot fB$ で与えられる。この起電力がループアンテナ自身のインピーダンス ($2\pi f \times 0.0019 + 6.7$) とプリアンプの入力インピーダンスで分圧されたものが、受信機の入力電圧になる。

図 4 は SFA の各チャンネルについて、受信機の入力電圧と PCM データ (イリジウム電話で送られる観測値) の関係を示したもので、約 4 桁の信号レベルの変化が 8 ビット (0-255) で表現されることがわかる。各周波数チャンネルにおける最小受信感度を電磁波の磁界強度に換算すると、5.0 kHz は 0.2 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、10 kHz は 0.4 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、20 kHz は 0.08 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、36 kHz は 0.04 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となる。ただし、1 fT = 10^{-15} Tesla である。

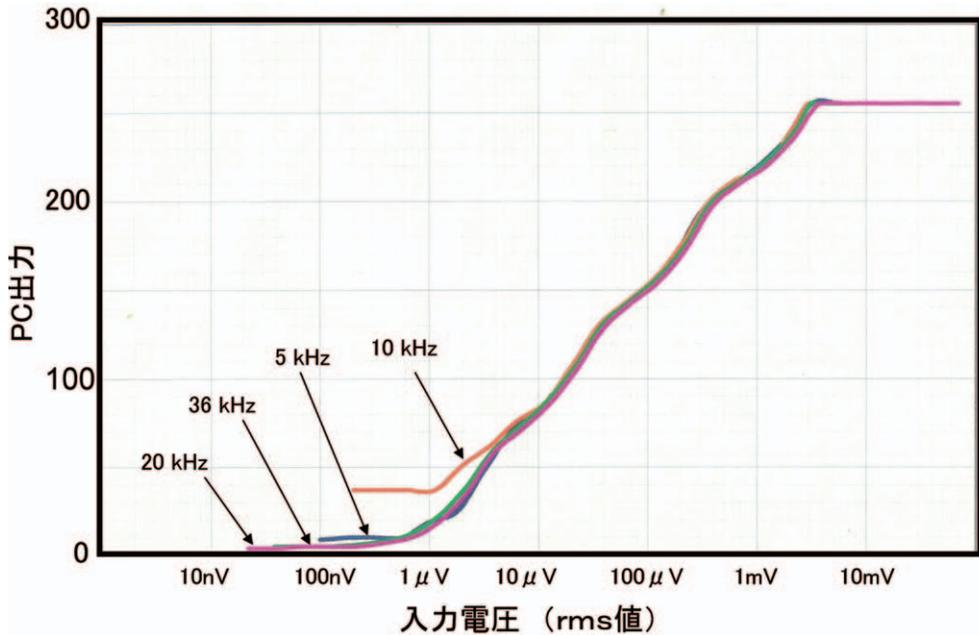


図4 掃引受信器 SFA の入出力レベル特性

Fig. 4. Input-output levels characteristics of the Sweep Frequency Analyzer, SFA.

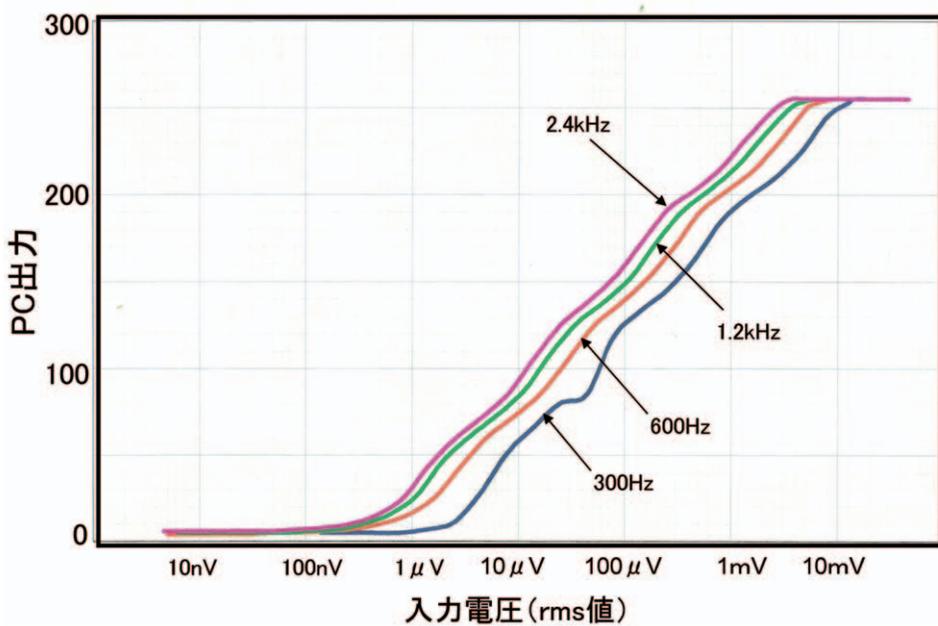


図5 マルチチャンネルアナライザ MCA の入出力レベル特性

Fig. 5. Input-output level characteristics of the multi channel analyzer, MCA.

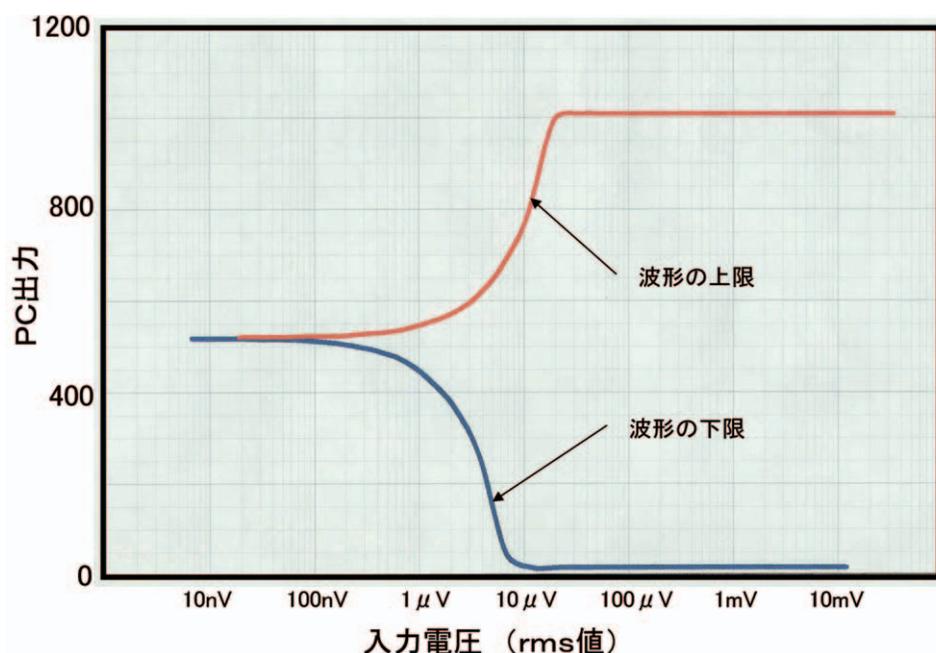


図6 波形観測器 WFC の入出力特性

Fig. 6. Input-output characteristics of the wave form capture, WFC.

同様に図5はMCAの各チャンネルについて、受信機の入力電圧とPCMデータの関係を示したものであり、約4桁の信号レベルの変化が8ビット(0-255)で表現されることがわかる。各周波数チャンネルにおける最小受信感度を電磁波の磁界強度に換算すると300 Hzは $30 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、600 Hzは $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、1.2 kHzは $0.6 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、2.4 kHzは $0.2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。

図6はWFCについての入出力特性を示したものである。WFCでは観測波形を忠実に伝送するためニアスケールで扱う。約2桁の信号レベル変化が520を中心とする10ビット(0-1023)で表現されることになる。この後、ビットシフトによるデータ圧縮をかけ、8ビットに直したデータが日本に送られる。WFCの最小受信感度を電磁波の磁界強度に換算すると $1 \text{ pT} (=10^{-12} \text{ Tesla})$ であった。

5. 実験経過

5.1. 気球飛翔経路

PPB 8号機は1月13日06時49分UT、10号機は同日の12時15分UTに昭和基地から放球された。図7は両気球の飛翔経路を示したものである(並木ら, 2004)。全観測機は正常に動作したが、電場観測のためゴンドラを毎分2回転させる予定のスピナーモーターが早期に停止したのは残念であった。両気球は西向きに飛翔を続け、1月20日に南極半島に達

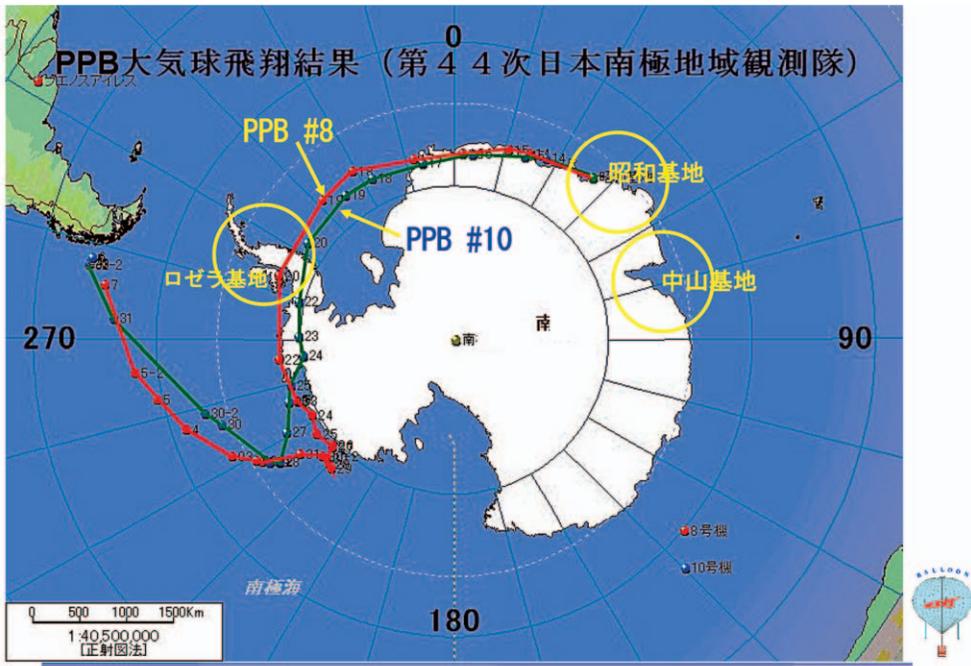


図7 PPB 8, 10号機の飛翔経路 (並木ら, 2004 による)

Fig. 7. Flight traces of the PPB No. 8 and 10 balloons (after Namiki et al., 2004).

した。同半島にある英国のロゼラ基地ではPPB実験班員が待機し、気球に搭載した1.6 GHz帯FMテレメーターにより、放球時からの再生データを受信することができた(富田ら, 2004)。これはイリジウム衛星電話端末からのデータ受信が万一不調になった場合のバックアップであった。1月24日頃、気球に積んだパラストが尽き、気球は夜間にやや高度が下がるようになった(斉藤ら, 2004)。1月28日頃、気球は低高度域にある低緯度に向かう気流に捕捉され南米方面に向かい、10号機は1月31日、8号機は2月7日に、それぞれパタゴニア沖の海上に着水し、観測を終了した。

5.2. 実験期間中の地磁気活動

気球放球後の5日間、地磁気活動は静穏であったが、1月19日より地磁気活動度が上昇し、1月25日は特に活発であった。この間、気球に搭載した観測機は顕著な現象を観測することができた。2月1日13 UTより磁気嵐が開始し、2月3日07 UTまで続いた。しかし、磁気嵐の期間、気球は南極圏から離脱しており、気球高度は夜間に著しく低下するようになっていたため、X線観測機、電場観測機に対しては良好な観測条件が達成されなかった。

6. 観測結果

6.1. SFA

両気球の、主に 20 kHz のチャンネルに 10-20 分程度の準周期的な強度変動 (図 8) が出現した。水平距離に置き換えれば 10-20 km 程度の波長の変動である。VLF 送信局の周囲には、電離層と大地の間で反射する複数の伝播モード相互の干渉により、空間的に信号強度の縞模様が発生していると考えられ (Wait, 1974; Yamagishi *et al.*, 1984), 移動する気球がこのような領域を横切ることにより図 8 のようなレベル変動が受信されると考えられる。この種のレベル変動は 2 機の気球とも、1 月 23 日を除くほとんど全飛翔期間にわたり観測された。

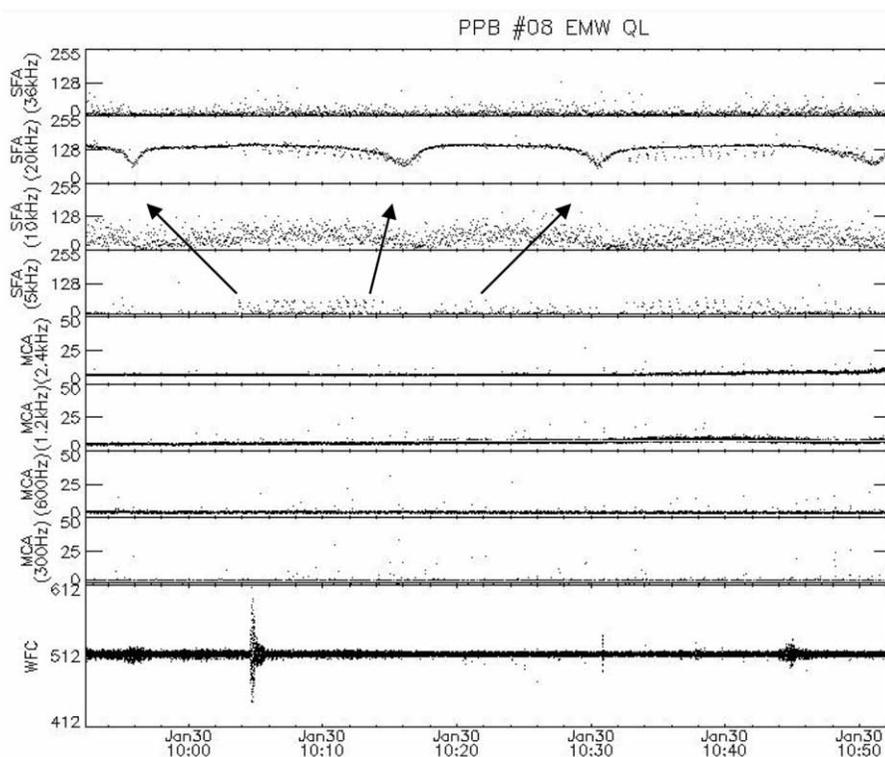


図 8 SFA の観測例

Fig. 8. Example of waveform obtained by SFA.

6.2. MCA

2.4 kHz チャンネルを中心として、PPB 8 号機、10 号機の両方で昼間は ELF ヒスやコーラス、夜間はオーロラヒスなどの電磁放射が受信された (図 9)。2 機の間隔が近い (200 km 以内) 場合、2 機で観測される放射の時間変動は相似的となるため、放射の空間的拡がり

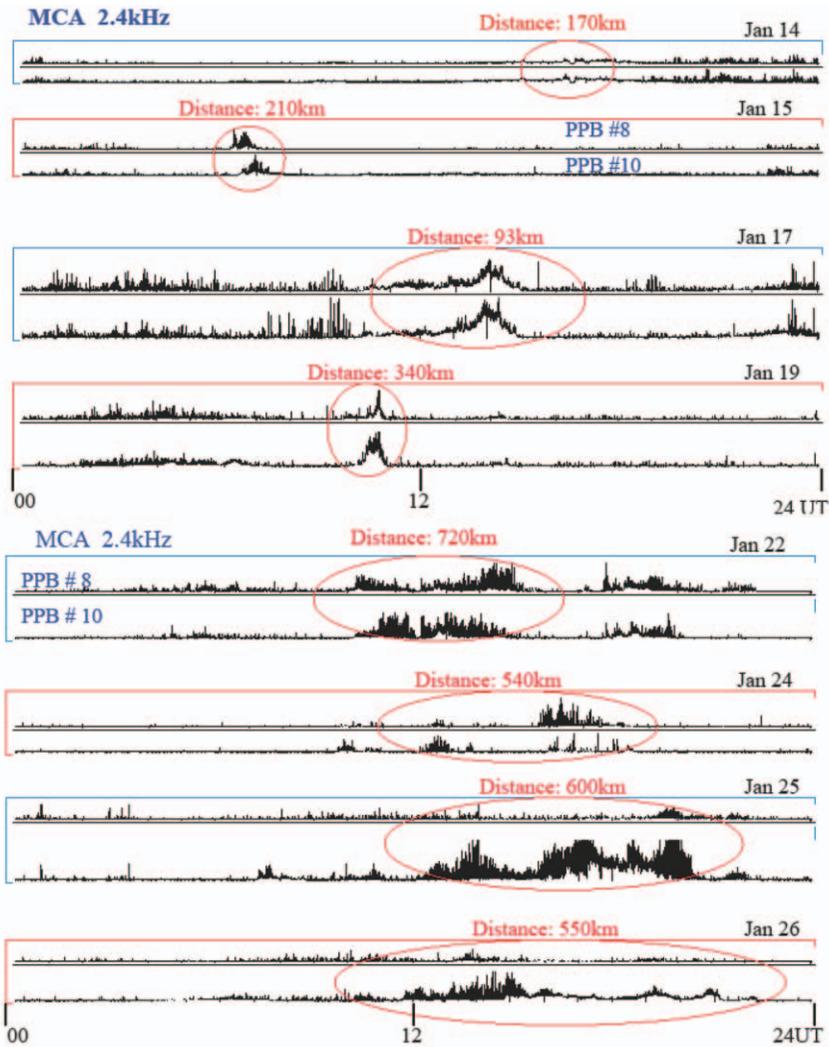


図9 PPB 8号機と10号機のMCAで観測された波動強度の比較
 Fig. 9. Comparison of wave intensities observed by MCA of PPB No. 8 and 10.

少なくとも 200 km 程度あることが推測される。2 機の間隔が 200 km から 700 km へと増大するにつれ、2 機で観測される放射の相似性は薄れてゆくことを図 9 は示している。

6.3. WFC

WFC では数分間継続する現象とバースト的な現象が頻繁に観測された(図 10, 下段)。時間軸を拡大して見ると後者は最大振幅が数 10 pT に達する減衰振動の様相を呈し、大振幅の部分は 3 秒間程度、背景雑音に埋没するまでの継続時間は 30 秒程度であった(図 10,

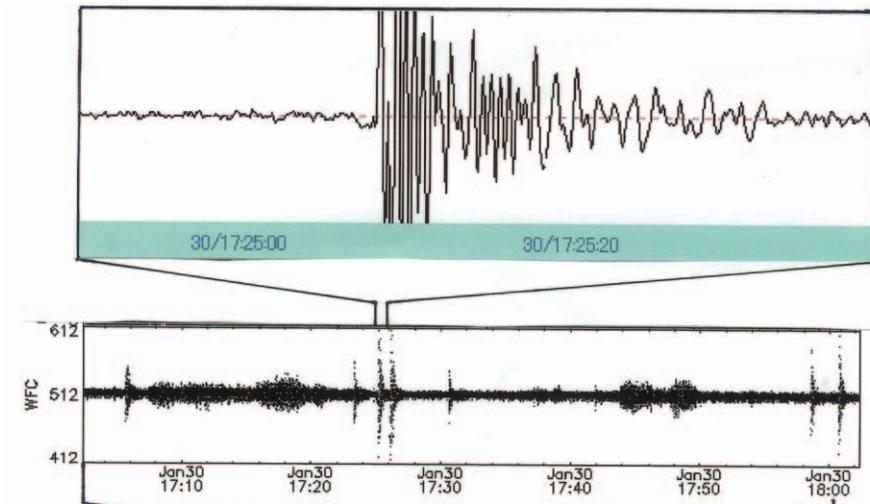


図 10 WFC により観測された波形例
 Fig. 10. An example of the waveform observed by WFC.

上段). どちらの現象とも, 2機の気球間での相関は乏しかった. 昭和基地の ELF 観測と比較してみたが, 1対1対応する現象はまだ見つかっていない.

7. 考 察

7.1. ELF/VLF 放射と制動放射 X 線の関係

極域地上で受信される磁気圏起源の ELF/VLF 自然電波は磁気圏内での波動-粒子相互作用により発生する. その機構は二つあり,

- (1) 磁気赤道面付近で, 磁気圏に捕捉された高エネルギー電子とのサイクロトロン型相互作用により発生する (例: ELF ヒス, コーラス)
- (2) 極域上空数千 km の高度において, オーロラ電子からチェレンコフ放射される (例: オーロラヒス)

である. いずれの場合も, ホイッスラーモード波とともに, エネルギーの高い電子が電離層に降り込み, 制動放射 X 線を放射する. 従って, 気球高度で観測される電磁放射と制動放射 X 線の間には良い相関があることが期待される. 図 11 は PPB 気球に搭載された X 線観測機のデータ (中川道夫大阪産業大学教授他, PPB X 線観測グループによる) と, EMW が観測した 0.6 kHz-2.4 kHz の電磁放射強度を比較したものである. 制動放射 X 線は 8 号機で強く観測されたが, 2.4 kHz 電磁放射は 8 号機ではほとんど観測されなかった. 一方, X 線が全く観測されなかった 10 号機では 8 号機の X 線と相関の良い 2.4 kHz 電磁放射が強く観測されている. このような X 線と電磁放射のくいちがった相関関係は図 12 により説明できる. 電離層に降り込む電子 (図中, 赤線) は制動放射 X 線を放射するだけではな

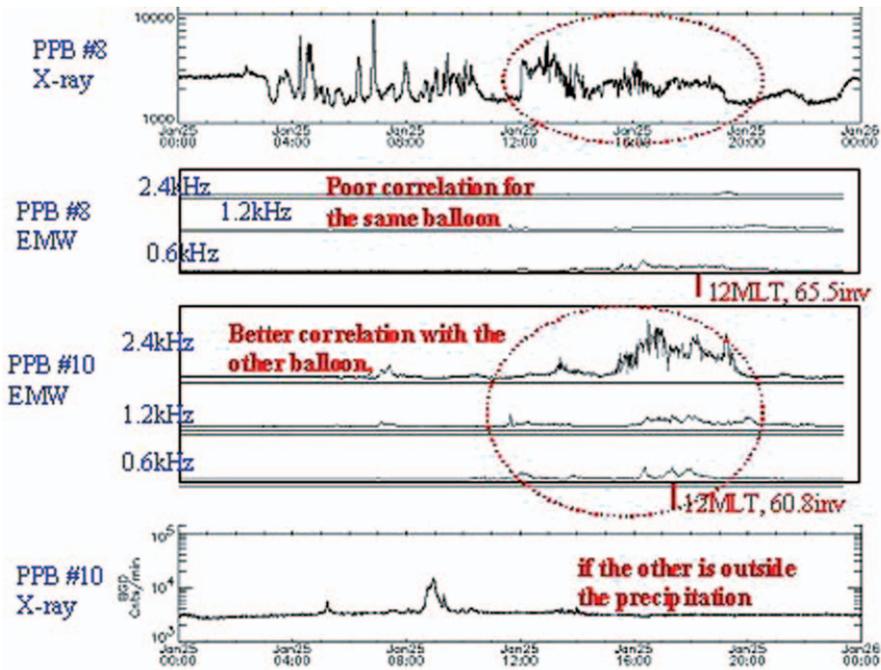


図 11 PPB 8号機と 10号機で観測された X 線と波動強度の比較
 Fig. 11. Comparison of the X-ray and ELF wave intensities observed by PPB No. 8 and 10 balloons.

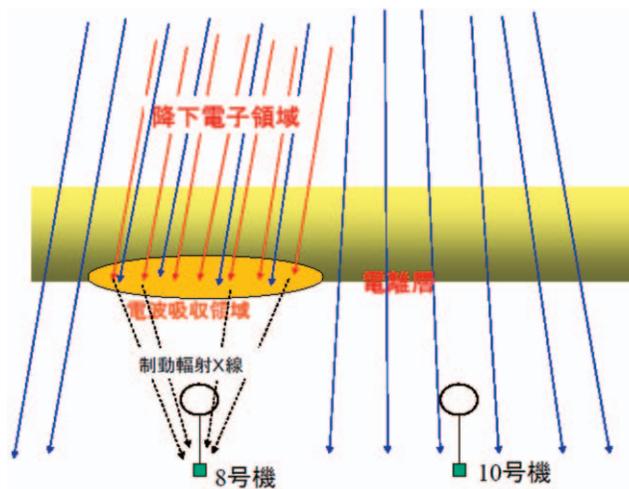


図 12 降下電子による電波吸収域と気球位置についての模式図
 Fig. 12. Schematic illustration of the relationship between radio wave absorption area produced by precipitating electrons and the location of the two balloons.

く、電離層の電離度を上げ、電波吸収領域を形成する。波動粒子相互作用により発生した電磁放射(図中、青線で表示)と X 線は電離層の上方では良い相関を持つが、電波吸収領域の下にある 8 号機には電磁放射が到達しないため相関が失われる。一方、X 線と良い相関を持つ電磁放射は 10 号機のあたりまで広がっているので 8 号機の X 線と 10 号機の電磁波動は良い相関を持つことになる。

7.2. SFA で観測された準周期的強度変動

PPB の飛翔経路に最も近い VLF ビーコンは南極点でスタンフォード大学が運用している 20.0 kHz のビーコンであるが、これは 15 分間に 1 分間しか送信しない。一方、PPB で観測された準周期的強度変動は連続的に受信されているので、南極点ビーコンは除外される。従って SFA の 20 kHz チャンネルが受信したのはオーストラリア北西岬の NWC 局 (19.8 kHz) であった可能性が高い。この信号強度は放球直後、1 月 14 日までは大きかったが、その後次第に強度が低下し、1 月 23 日に最小になった。その後、次第に強度が上昇し、1 月 27 日以後は非常に大きな信号強度となった(図 13 参照)。信号強度が最小となった 1 月 23 日に PPB は西経 90 度に位置し、NWC 局(東経 114 度)とは南極大陸を挟んで、ほぼ正反対の位置にいたことになる。電波の受信強度は伝播路に占める海洋と氷床の割合に支配され、氷床の割合が多い伝播路を経ると信号が弱くなる。信号源が NWC 局であると仮定すると、伝播路が南極大陸を横断することになる 1 月 23 日前後に信号レベルが低下したこと

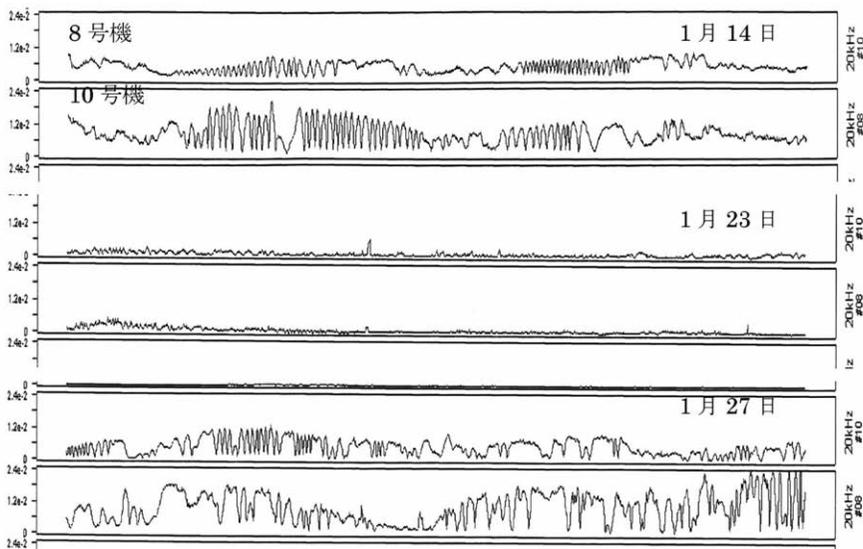


図 13 8 号機と 10 号機の SFA 20 kHz チャンネルが 1 月 14 日、23 日、27 日に受信した 1 日間の信号強度変化

Fig. 13. Daily variations of the wave intensity observed by the 20 kHz channel of SFA on January 14, 23 and 27, 2003.

は説明できる。

7.3. WFCが受信した減衰振動は自然現象か？

過去の南極域の大気球実験の電場観測ではWFCが観測した減衰振動(図10)に非常に良く似た2.3 Hzの電場のゆらぎが観測されている(Bering and Bendbrook, 1995)。図14に、この波形を示す。この振幅は20-50 mV/mであり、電磁波であるとする、これに対応する磁界は70-200 pTである。WFCが観測した減衰振動の振幅は数10 pTであるので、両者は同種の電磁波現象ではないか、と想像される。しかし、これが電磁波ならば波長が非常に長く、8号機と10号機で類似の現象が同時に観測されても良いと思われるが、両者の相関は一見したところ、乏しい。一方、気球本体が振動すれば、気球膜に付着したループアンテナを貫通する地球磁場の磁束が変化し、ループアンテナに何らかの波動的起電力が発生し、これがWFCにより検出された可能性も否定できない。この現象が本当に電磁波動なのか、気球起源なのかを区別するには、二つの気球間、あるいは気球と地上観測点間

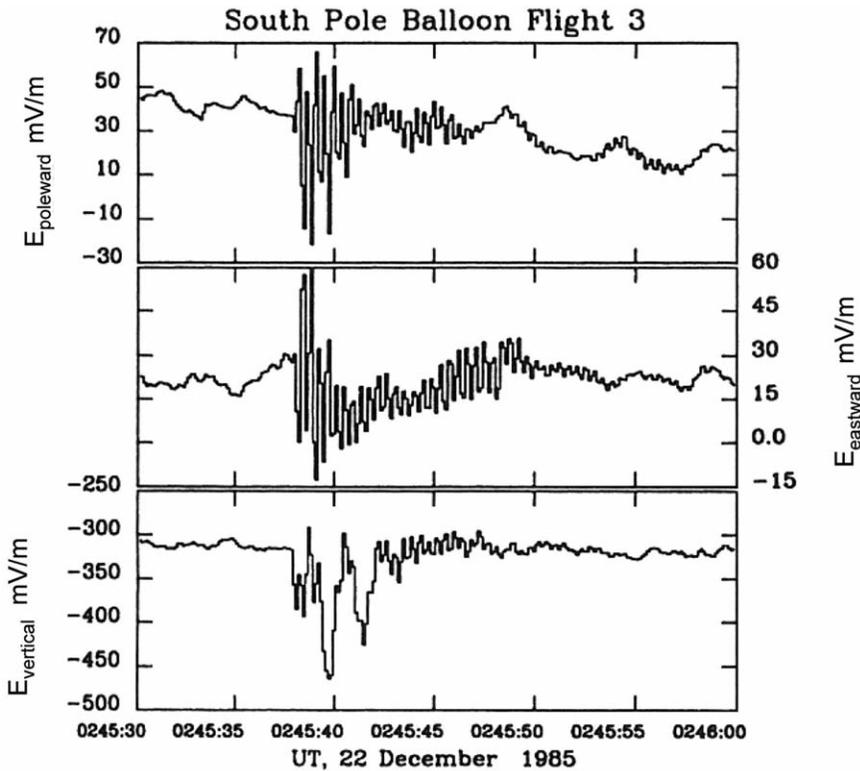


図14 南極での気球実験で観測された2.3 Hzの電場ゆらぎ (Bering and Bendbrook, 1995)
 Fig. 14. 2.3 Hz electric field fluctuation observed by Antarctic balloon observation
 (after Bering and Bendbrook, 1995).

で、ULF/ELF 帯磁界成分のコヒーレンスの有無を詳しく調べる必要があろう。

8. ま と め

南極周回気球 8 号機と 10 号機に搭載された ELF/VLF 帯波動観測機 EMW は気球本体を 1 周する直径約 45 m のループアンテナをセンサーとし、0.2 Hz から 36 kHz までの観測帯域を以下の三つの受信方式で観測した。(1) WFC: 0.2 Hz-4 Hz の波形伝送 (2) MCA: 300 Hz, 600 Hz, 1.2 kHz, 2.4 kHz の検波強度 (3) SFA: 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 36 kHz の掃引受信。地上での感度校正による受信感度は WFC では 1 pT, MCA の 2.4 kHz チャンネルでは $0.2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, SFA の 20 kHz チャンネルでは $0.08 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、極域気球高度で予測される自然電磁波に対し、十分な感度が達成されている。電磁波動を複数気球で同時比較するためには、波動観測機間の時刻を正確に一致させる必要があるが、EMW は内蔵した GPS 受信機の 1 pps でシステムクロックを同期させることにより、複数観測機間で 1 ms 以内の時刻同時性を達成することができた。

気球は約 2 週間で南極大陸を半周する飛翔を行った。地磁気活動は飛翔の前半では静穏であったが、後半は活発になり、様々な波動現象が観測された。SFA ではオーストラリアの NWC 局電波の干渉波形と思われる強度変化をほぼ全飛翔にわたり受信し、気球がオーストラリアから見て南極大陸の向こう側に入ると、その受信レベルが低下した。MCA では気球の間隔が近い (200 km 以内) 場合、両気球で観測される放射の時間変動は相似的となり、放射が空間的に 200 km 程度広がっていることが推測された。WFC では数分間継続する現象と最大振幅が数 10 pT で継続時間が 30 秒程度の減衰振動とがしばしば観測されたが、どちらの現象とも、2 機の気球間での相関は乏しかった。

謝 辞

平成 14 年 6 月、三陸気球実験場において日本周辺の電磁界強度分布を測定する実験に併せ、EMW で使用する無線モデムの通信試験、気球本体を 1 周するループアンテナの感度校正を行う機会を与えていただいたことに対し、宇宙科学研究所に感謝いたします。PPB 搭載観測機の宇宙科学研究所における環境試験で協力を賜った宇宙科学研究所気球工学の皆様、国内における PPB のデータ受信を担当された PPB 実験班の皆様にご感謝いたします。また南極昭和基地での放球にあたり、実作業に従事された第 44 次観測隊の皆様のご尽力に感謝いたします。当実験の実現に至るまでご支援、ご指導を賜った国立極地研究所江尻全機教授、PPB の国内データ受信にあたり、初期の衛星電話受信テストに協力いただいた菊池雅行助手、EMW の WFC データとの比較のため、昭和基地や南極大陸無人観測点 (AGO) での ULF/ELF 観測データを提供いただいた東北大学福西 浩教授、理化学研究所佐藤光輝博士に感謝いたします。

文 献

- Bering, E.A. and Benbrook, J.R. (1995): Intense 2.3-Hz electric field pulsations in the stratosphere at high auroral latitude. *J. Geophys. Res.*, **100**, 7791-7806.
- 藤井 森 (2004): 南極周回気球で用いられた新しい HK システムの評価と改良. 2003 年度芝浦工業大学大学院, 修士論文, 83 p.
- 三宅壯聡・岡田敏美・山岸久雄・知野明裕・石坂圭吾・山上隆正 (2004): 南極周回気球搭載 ELF/VLF 帯波動観測機の開発. *電子情報通信学会論文誌, B*, **J87-B**, 741-745.
- 並木道義・松坂幸彦・斉藤芳隆・鳥海道彦・太田茂雄・山上隆正・鳥居祥二・山岸久雄・江尻全機・佐藤夏雄・海老原裕輔・門倉 昭・片寄祐作 (2004): 2003 年南極周回気球実験. *宇宙航空開発機構研究開発報告 (大気球研究報告)*, 1-21.
- Rodger, C.J. (1999): Red sprites, upward lightning and VLF perturbations. *Rev. Geophys.*, **37**, 317-336.
- 斉藤芳隆・松坂幸彦・並木道義・鳥海道彦・太田茂雄・山上隆正・山岸久雄・江尻全機・佐藤夏雄・海老原裕輔・門倉 昭・片寄祐作・富田裕基・藤井 森・笠原克昌・村上浩之・内山貞幸・紺野祐司 (2004): 南極周回気球のハウスキーピングシステムの評価. *平成 15 年度大気球シンポジウム集録*, 55-58.
- Sato, M., Fukunishi, H., Kikuchi, M., Yamagishi, H. and Lyons, W.A. (2003): Validation of sprite-inducing cloud-to-ground lightning based on ELF observations at Syowa Station in Antarctica. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **65**, 607-614.
- Sato, N. and Fukunishi, H. (1981): Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: classification of quasi-periodic ELF-VLF emissions based on frequency-time spectra. *J. Geophys. Res.*, **86A**, 19-29.
- Sato, N., Hayashi, K., Kokubun, S., Oguti, T. and Fukunishi, H. (1974): Relationships between quasi-periodic VLF emission and geomagnetic pulsation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1515-1516.
- 富田裕基・片寄祐作・柴田慎雄・斉藤芳隆・松坂幸彦・並木道義・鳥海道彦・太田茂雄, 山上隆正・山岸久雄・門倉 昭 (2004): 南極周回気球のロゼラ基地におけるデータ受信. *平成 15 年度大気球シンポジウム集録*, 63-66.
- Wait, J.R. (1974): Theory of the terrestrial propagation of VLF electromagnetic waves. *ELF-VLF Radio Wave Propagation: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute held at Spåtind, Norway, April 17-27, 1974*, ed. by J.A. Holtet. Dordrecht, D. Reidel, 129-147 (NATO Advanced Study Institutes Series; Series C, Vol. 10).
- Yamagishi, H., Ono, T., Fukunishi, H. and Nagano, I. (1984): Balloon measurement of Omega signal wave fields in the vicinity of Omega A Station -B₁₅1N experiment-. Summary Report on International Balloon Campaign in Sweden and Norway, 1980-1982, ed. by H. Fukunishi and H. Miyaoka. Tokyo, Natl. Inst. Polar Res., S39-S48.