

2003年南極周回気球 (P P B) 実験における電場観測

Edgar A. Bering (ヒューストン大)、Robert H. Holzworth (ワシントン大)、門倉昭、山岸久雄 (極地研)、
山上隆正、並木道義、松坂幸彦、斉藤芳隆 (宇宙研)、 P P B 実験グループ

1. はじめに

2003年1月から2月にかけての南極周回気球 (Polar Patrol Balloon (PPB)) 実験では、2機の地球物理観測装置による観測が行われた。それぞれには、5種類の観測器(電場(EFD)、磁場(MGF)、オーロラX線(AXI)、電離層全電子数(TEC)、電磁波動(EMW))が搭載されていたが、本稿では電場観測の概要と初期結果について紹介する。以後、PPB 実験に使用された電場観測器を PPB-EFD と呼ぶことにする。

2. 電場観測装置の概要

3対の球プローブを用いて、気球高度における電場3成分(水平2成分、垂直1成分)を観測するもので、直径15cmのスチロホーム球の表面にアクアダグ塗布したものをプローブとして用いている。プローブ間距離は、水平成分、垂直成分についてそれぞれ、5.24m、3.0mであり、水平方向はフェノール樹脂製のパイプにより支え、垂直方向には荷姿のナイロンロープに2個の球を縛り付けて固定した。各6個の球からの信号を処理する回路部はメインゴンドラ内に収められ、各球とGNDとの間の電位差(シングルプローブ出力)6種類と3対のプローブ間の電位差(ダブルプローブ出力)3種類、計9種類のアナログ出力が、共通データ処理部に送られて、12ビットのA/D変換される。表1に9種類のデータについての電場の測定範囲と分解能を示す。表中V1Gは、球プローブ1とGNDとの電位差を、V12は球プローブ1と2の間の電位差を示す。プローブ1~4が水平成分、5~6が垂直成分用である。

	V1G	V2G	V3G	V4G	V5G	V6G	V12	V34	V56
Range (V/m)	±5.73	±5.73	±5.73	±5.73	±2.46	±4.84	±0.382	±0.382	±1.67
Resolution (mV/m)	2.80	2.80	2.80	2.80	1.20	2.36	0.19	0.19	0.81

表1. Measured range and resolution of the electric field for the PPB-EFD. V1G to V6G are the 6 outputs of the single probe data, and V12, V34, V56 are outputs of the double probe data.

通常の観測以外に、10分毎に8秒間、各球プローブに所定の電圧を与えることにより、回路部のゲイン、オフセットの較正データを取得すると共に、その所定電圧から周囲の電位まで回復する回復曲線の時定数を測定することにより、 $\tau = \rho / (\sigma + \epsilon_0 \omega)$ (τ は時定数、 ρ は誘電率、 σ は導電率) の関係式より気球高度における大気の導電率を求める、というキャリブレーションモード (CAL モード) も持たせた。プローブ2、4、5、6には8秒間0Vを、プローブ1、3には、最初の4秒間は0V、後の4秒間は±7.5Vで、±の符号は10分毎に切替えるように電圧を与えた。プラス(マイナス)値からの回復には、主として大気中の負(正)イオンが寄与しているため、2つの極性からの回復時定数の違いから大気中のイオンについての情報を得ることが出来る。プローブ1の信号処理については、CALモード時にプローブ電流も測定出来るようになっており、共通データ処理部では、CALモードの4秒後~7秒後の4秒間はプローブ6のシングルプローブ出力をプローブ電流測定出力に切替えて処理するようにした。

サンプリング間隔は1秒で、20秒間のデータをまとめたものが1フレームデータとなり、10分間分のフレームデータをまとめたものがイリジウム電話回線で送信される1データファイルとなる。データ送信は毎正時、毎正時+30分に行われ、それまでメモリーに蓄えられていた複数個の10分単位のデータセットが、イリジウム電話システムにより、国立極地研究所の専用回線に接続されたPCに送られる。送信途中に電話回線が途切れたときは、約3分後に再送信を試みる。このような伝送システムにより、飛翔中観測された全データを欠測なく取得することが出来た。データ伝送システム、電源供給システムの詳細については、藤井他(2003年)を参照されたい。

図1に地球物理観測用PPBの荷姿概略図を示す。電場観測器が搭載されたメインゴンドラは、大気球本体フィルムの帯電の影響から逃れるため巻下げ器により100m下方に巻下げられ、また垂直電場の水平成分への混入を見分けるため、回転モーターにより2rpmの回転を与えられるように計画さ

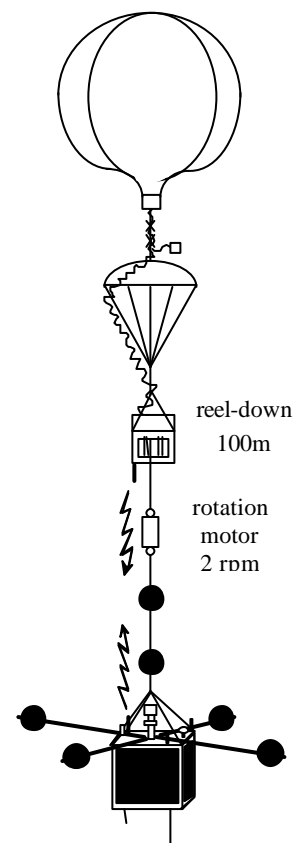


図1. Launching configuration of PPB-08 and 10.

れた。巻下げ動作は気圧スイッチにより 950hPa 高度に達した時、モーター回転動作は 150hPa 高度に達した時に開始するように設定された。荷姿の詳細については、並木他 (2004 年) を参照されたい。出来るだけ広い GND 面を確保するため、メインゴンドラの底面にアクアダグ塗布したアルミ板を取り付け、ゴンドラのアルミフレーム及び 4 側面に取付けられている太陽電池パネルの裏側のアルミハニカムも GND と接続した。ただし側面のアルミフレーム及びアルミハニカム部分にはアクアダグ塗布することを怠ってしまい、このため測定データにスパイク状のノイズが乗る原因になったと考えられる。また、使用した太陽電池パネルは市販のもので、表面に導電コーティングを施すことが出来なかったため、パネルの帯電の影響も少なからずあると考えられる。これらの点は将来の計画に向けての課題といえる。

3. 観測結果と初期解析結果

PPB-EFD を含む 5 種類の観測器を搭載した 2 機の PPB (PPB-08, PPB-10) は、それぞれ、2003 年 1 月 13 日 06:49UT, 12:15UT に、南極昭和基地より放球された。当初、地球物理観測装置を搭載した PPB は連続して計 3 機放球する予定であったが、様々な事情により 2 機のみでの放球となった。放球後 2 機は共に高度約 32 km のレベルフライトに入り、オートレベルコントローラーにより飛翔高度を維持しつつ南極大陸を西回りに約 1/2 周した。その後はバラストが尽き高度維持が出来なくなったこと、上空の風系が変化したことにより、低緯度東向きに飛翔を続け、PPB-08 は 2 月 7 日、PPB-10 は 1 月 31 日に落下した。放球実験、飛翔結果の詳細は、斉藤他 (2003 年)、並木他 (2004 年) を参照されたい。回転モーターの動作については、2 機共に、設定高度の 150hPa 以上になっても正常な回転動作が見られず、結局飛翔全期間を通じて、計画したような一様回転は実現出来なかった。これは、一様回転が非常に重要である観測器 (MGF、EFD) にとっては致命的なことで、将来の計画に向けての原因究明、対処策の検討が望まれる。ゴンドラの動作の詳細については西尾他 (2003 年) を参照されたい。

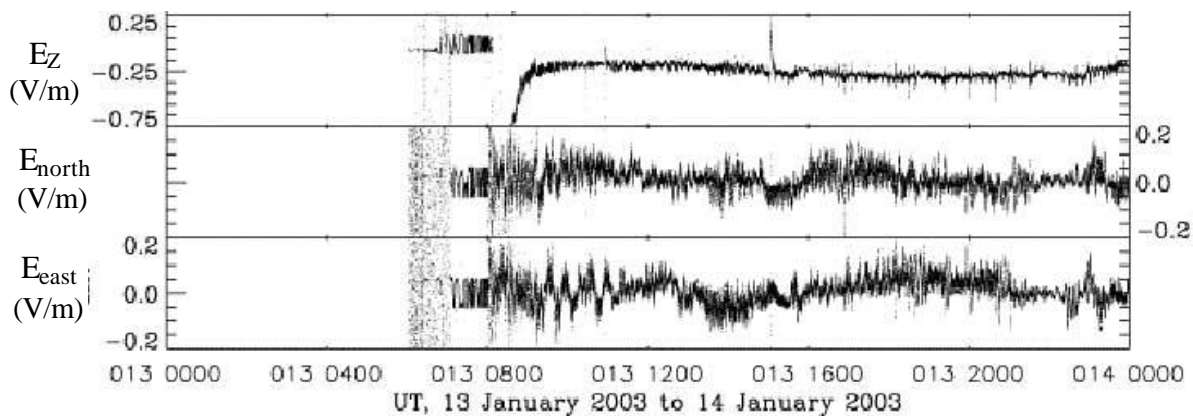


図 2. Electric field observed by the PPB-EFD aboard PPB-08 after launch until 00:00 UT on January 14, 2003.

図 2 に、放球後から 1 月 14 日 00:00UT までの PPB-08 により観測された電場 3 成分 (上段より: 上向き、地磁気北向き、東向き) を示す。上述したように一様な回転は実現出来なかったが、ゴンドラが方位角方向に向きを変えることにより、水平成分への垂直成分の混入分を算出することが出来、MGF の磁場観測データをもとにして水平プローブの方向を求め図にあるような値を求めることが出来ている。垂直電場については、方向 (下向き) 強度とも従来の観測と矛盾しないものが得られているが、水平電場については DC 成分、擾乱成分共に予想される値よりも大き目の値となっており、今後のさらなる解析が必要である。以後本稿では、CAL モードで取得された導電率データと垂直電場データを用いた初期解析結果について紹介する。

図 3 に PPB-08 の全飛翔期間で取得された導電率の高度分布を示す。横軸高度、縦軸導電率で、縦軸は対数スケールになっている。図中 + (赤) (- (黒)) の記号はそれぞれ、正 (負) イオンによる導電率である。両者ともほぼ直線に乗っており、導電率が高度とともに指数関数的に増加する、という従来の結果と矛盾しない。特に 26km 以上の高度では正イオンによる導電率が負イオンによるものよりも大きな値となっている。このことは日射による光電子放出の効果によるものと理解される。負イオンによる導電率について、PPB-08、PPB-10 の結果より求められた高度分布のスケールハイトはそ

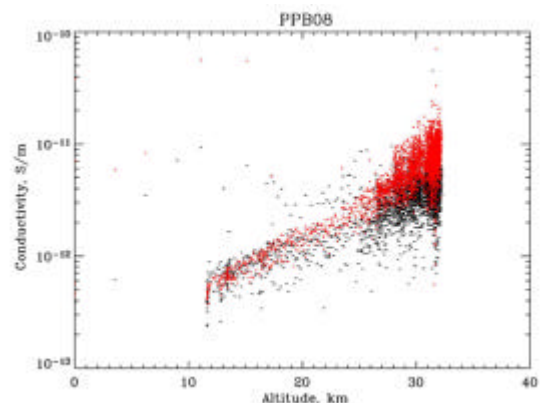


図 3. Altitude distribution of the atmospheric conductivity observed with PPB-08.

れぞれ、10.4 km、10.2 km であり、これらの値も従来の観測結果と矛盾しない。各高度における値の分散は、回復時定数を求める際の誤差以上に大きなものであり、導電率に比較的小さい空間スケールのゆらぎがあることなどが考えられる。

全飛翔期間の負イオン導電率の高度分布のスケールハイトを用いて、その場その場の観測値からある一定高度（32 km）の値を求め、その値の全飛翔期間における変化をプロットしたものを図4に示す。

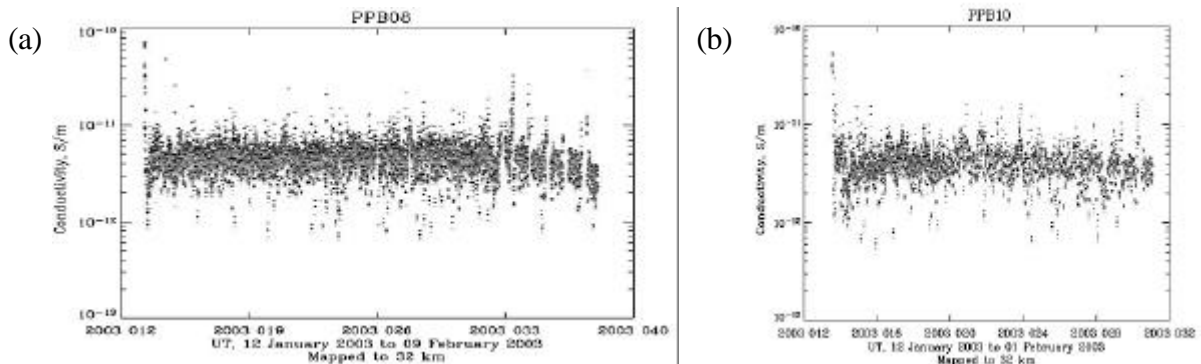


図4. Variation of the conductivity, mapped at 32 km using fitted equation, for PPB-08 (a) and PPB-10 (b) observations.

この図からも、値の分散が導電率の導出の誤差よりも大きいことが分かる。

図5に、この32 kmでの値の地理緯度分布を示す。導電率の値そのものと導電率の分散のどちらも、高緯度になるほど増加していることが分かる。導電率の増加は、過去の観測でも見られ、銀河宇宙線のカットオフリジディティが高緯度ほど小さくなり、宇宙線フラックスが増加し、電離度が増すため、と解釈出来る。分散の増加の原因については不明である。

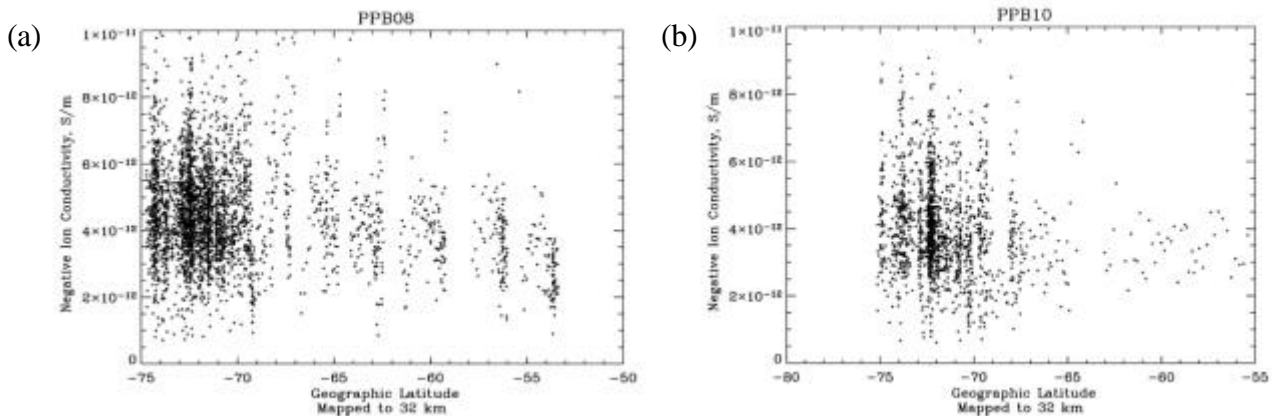


図5. Geographic latitude dependence of the 32 km mapped conductivity observed with PPB-08 (a) and PPB-10 (b).

図6に、地上観測で顕著なULF波動現象が観測されている時間帯にPPB-08の導電率に顕著な増加が見られた1月27日の例を示す。今後はこうしたイベントにも着目して解析を行ってゆく予定である。

導電率と垂直電場より、鉛直方向の電流密度を計算することが出来る。図7に、PPB-08とPPB-10により観測された鉛直電流密度の、1月14日から28日の間の変化をそれぞれ青と赤で、両者の平均値を黒で示す。顕著な日変化が見られることが分かる。この図に、全世界の雷活動の頻度の指標となるTOGA (Time Of Group Arrival: 雷活動に起因するVLF波動パルス)の個数を重ねてプロットしたものを緑で示す。TOGAの個数も同様に顕著な日変化を示し、両者が非常に似通った変化をしていることが分かる。このことは、大気中の鉛直電流密度は全世界の雷活動によって変化する、というグローバルサーキット理論を裏付けるよう

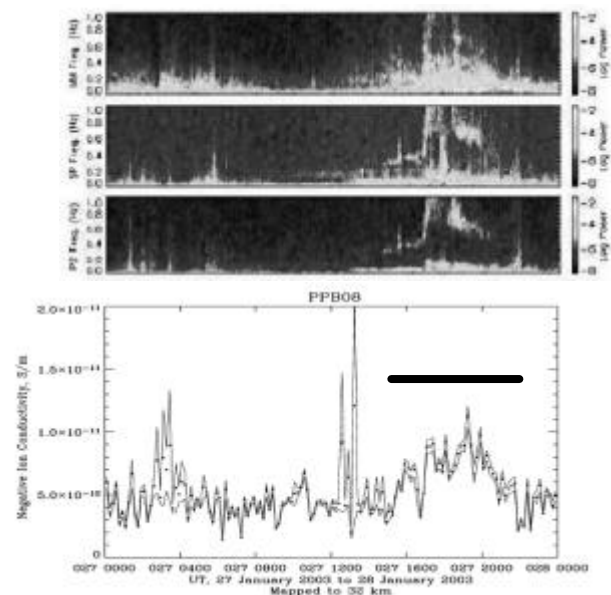


図6. Conductivity enhancement observed with PPB-08, simultaneously with the ground ULF event.

な結果であるが、詳細に 1 対 1 の対応を見ていくと、逆の変化をしている期間 (1 月 23 日など) もあり、こうしたグローバルサーキット理論に合わない期間も興味深い。

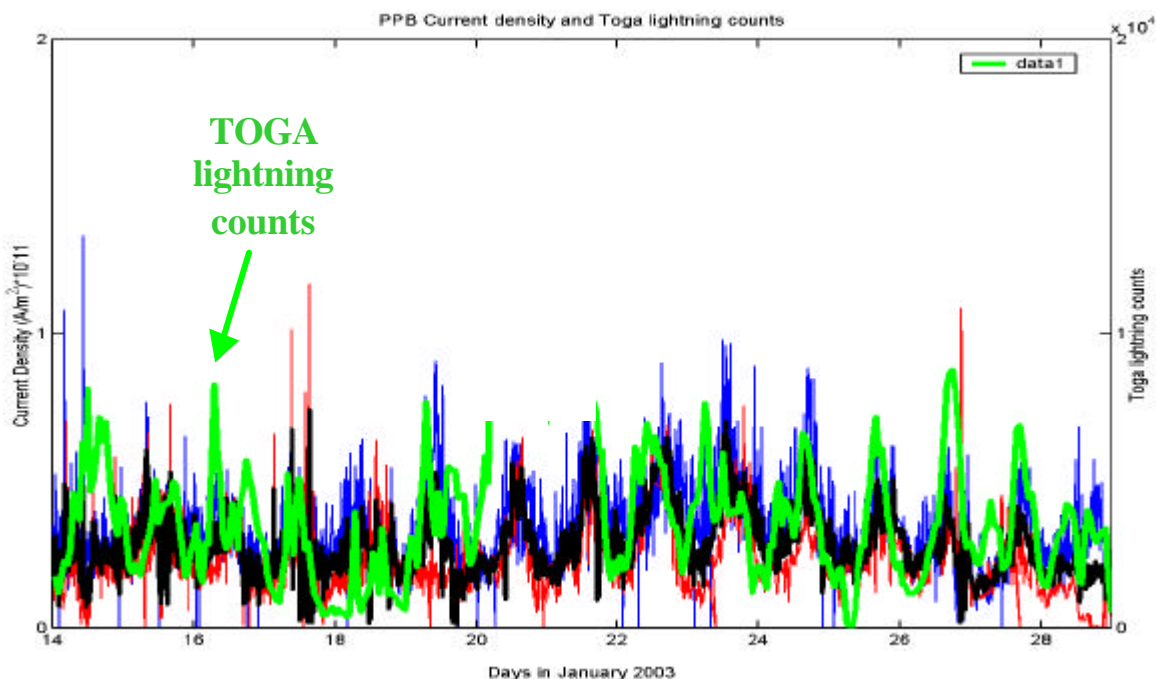


図 7 . Vertical current density observed with PPB-08 (blue), PPB-10 (red), and average of both values (black). Also shown are the TOGA lightning counts (green).

4 . まとめ

PPB-08 と PPB-10 による電場観測の概要と初期結果について紹介した。どちらも回転モーターの不調により一様回転が得られず、水平電場の解析には慎重な配慮が必要となっている。一方垂直電場データや CAL モードでの導電率の算出は正常に行われている。全飛翔期間にわたる観測より求められた導電率の高度変化のスケールハイトは約 10.3 km であった。その場その場の導電率の分散は算出の誤差よりも大きかった。導電率は地理緯度と共に増加し、またその分散も増加した。この大きな分散や分散の緯度による増加の原因は不明である。地上で観測された ULF 波動増加イベント時に導電率が増加している例があった。観測された鉛直電流密度は、全世界の雷活動の個数とよく似た変化を示しており、グローバルサーキット理論を裏付けるような結果が得られたが、両者が一致しない期間もあった。今後は、他の観測器のデータと合わせたさらに詳細な解析を進めてゆく予定である。

謝辞

2003 年 1 月 ~ 2 月の PPB 実験は第 43 次及び第 44 次日本南極地域観測隊により実施された。第 44 次小島隊長はじめ全ての観測隊員に感謝します。

参考文献

- 斉藤芳隆、他、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、55-58、2003.
- 並木道義、他、2003 年南極集会気球実験、宇宙航空研究開発機構研究開発報告「大気球研究報告」1-21、2004.
- 西尾泰穂、他、南極周回気球 (PPB) による高精度磁場観測、平成 15 年度大気球シンポジウム、83-86、2003.
- 藤井森、他、南極周回気球で用いたイリジウム通信システムと電源供給システムの評価と改良、平成 15 年度大気球シンポジウム、59-62、2003.