

## 2003年南極周回気球（PPB）実験におけるTEC観測

門倉昭、山岸久雄（極地研）、大塚雄一（名大STE研）、茶塚俊一（（株）測位衛星技術）、山上隆正、並木道義、松坂幸彦、斉藤芳隆（宇宙研）、PPB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、磁場、オーロラX線、電離層全電子数（Total Electron Content (TEC)）、電磁波動）が搭載されていたが、本稿ではTEC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TEC観測器をPPB-TECと呼ぶことにする。

### 2. TEC観測装置の概要

GPS衛星からは同じコード（Pコード）で変調された2種類の異なる周波数の電波（L1（1,575.42 MHz）、L2（1,227.60 MHz））が送出されている。それぞれの電波は、衛星から受信点までの間の電離層を通過する際に、電離層電子密度と電波の周波数に依存した伝搬遅延、位相ずれを受ける。TEC観測は、受信点でのそれらの情報から、伝搬路に沿った積分量としての全電子数を算出する、というものである。

使用した受信機は2周波受信用のもの（Ashtech社「Z-Eurocard」）で、気球観測のために、通常付加されている高度制限（18kmまで）を解除した。テレメータ伝送量の制限により、受信データ取得の時間間隔は1分、受信衛星数は仰角10度以上の衛星最大3個とした。各テレメータフレームは20秒毎に作成されるため、各フレームに1個の衛星の情報を収めることとした。表1に1フレームデータの内容を示す。全データ量は64バイトで、14バイトのヘッダー、48バイトのGPS情報、2バイトのダミーデータからなる。GPS情報は、8バイトの時刻情報、4バイトの衛星情報（衛星番号、仰角、方位角）、36バイトのL1、L2電波Pコード情報からなる。通常のTEC値の計算は、受信されたGPSデータをもとに作成されたRINEX（Receiver Independent Exchange Format）ファイル中の、搬送波位相情報（L1、L2）と、Pコードによる擬似距離情報（P1、P2）を元になされるが、これらとPPB-TECのテレメータデータとの間の関係は以下の通りである。

$L1, L2 = (\text{Full carrier phase})$

$P1, P2 =$

$c \times (\text{Code transmit time}) - (\text{Range smoothing correction})$

図1にPPB-TECの概観図を示す。ノイズ削減回路を付加したものを1つのケースに収めてある。寸法、重量は、それぞれ、210x280x66mm、2.6kgであり、消費電力は、7.2W（12V、0.6A）、共通の処理部との間のインタフェースはRS-232Cである。

### 3. 観測結果と初期解析結果

PPB-TEC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32km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行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、低緯度東向きに飛行を続け、PPB-08は2月7日、PPB-10は1月31日に落下した。放球実験、飛行結果の詳細は、斉藤他（2003年）、並木他（2004年）を参照されたい。

表1. PPB-TEC telemeter data format

Total byte :	64 byte
Header :	14 byte
	header code(2), frame counter(4), subframe counter(2), IDcode(3), PI-ID code(3)
TEC data :	48 byte
	ZDA message (8)
	YY, YY, MM, DD, hh, mm, ss, ss
	MPC message (4)
	9. SV PRN number
	10. Elevation
	11. Azimuth (H)
	12. Azimuth (L)
	L1-Pcode (18)
	13-14. Warning flag
	15. Good/bad flag
	16-22. Full carrier phase (cycles)
	23-27. Code transmit time (ms)
	28-30. Range smoothing correction (m)
	L2-Pcode (18)
	31-32. Warning flag
	33. Good/bad flag
	34-40. Full carrier phase (cycles)
	41-45. Code transmit time (ms)
	46-48. Range smoothing correction (m)
	Dummy (2)
	63-64. FFFF

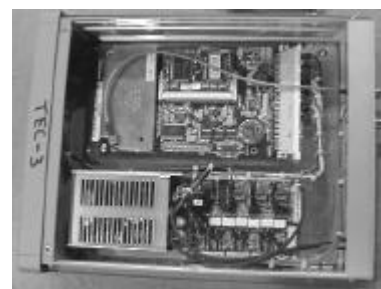


図1. Top view of the PPB-TEC.

飛翔中観測されたデータは各観測器毎に 10 分間分のフレームデータが 1 ファイルとしてまとめられ、5 つの観測器データと HK データを合わせたファイルセットが 1 回に送信されるデータセットとなる。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。送信途中で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。

表 2 . Number of observed data by PPB-TEC

PPB #	Received data	good data	1 satellite	2 satellite	3 satellite
PPB-08	45183	17421 (38.6%)	6035 (53.6%)	4265 (37.9%)	952 (8.5%)
PPB-10	23961	1722 (7.2%)	1423 (91.1%)	118 (7.6%)	21 (1.3%)

表 2 に、取得された PPB-TEC のデータ量を示す。表中の左より 2 番目の列は、取得された全フレーム数を、3 番目の列は、その内 TEC 値が算出出来たフレーム数を示す。既述したように、TEC 値を算出するためには、表 1 中の、L1、L2 電波 P コード情報が全て正常に取得される必要がある。これらの値が正常であるか否かの判断は、フレーム中の 2 種類のフラグ (Warning flag と Good/bad flag) に依って行われる。表 2 中左より 4、5、6 番目の列は、1 分毎の受信で捕捉された衛星数の割合を示す。表 2 より、PPB-10 は PPB-08 に比べ、正常な観測値が得られた割合が非常に少ないこと、またほとんどの場合捕捉衛星数は 1 個のみであることが分かる。PPB-08 の場合も、正常な観測値が得られた割合は 38.6% と低く、また 3 個の衛星を捕捉出来た割合も 8.5% と低かった。こうした低い正常値取得率が何に起因するかは、今後の実験を計画する上でも明らかにすべき課題である。

図 2 (a), (b) に、それぞれ PPB-08, PPB-10 の TEC 値の飛翔期間中における時間変化を示す。縦軸は  $10^{16}(\text{el}/\text{m}^2)$  を単位とした TEC UNIT である。TEC 値は衛星の仰角による補正を施していない値である。図中の赤い点は気球位置の不変磁気緯度の変化を示し右側に目盛りを示す。PPB-08 については、1 月 15, 16, 19 日頃に長い正常値欠測期間が見られる。また 28 日以降はほとんど正常値が得られていない。PPB-10 については、上述したように正常値が極めて少なく、1 月 15, 16 日には長い欠測期間が見られ、また 22 日以降はほとんど正常値が得られていない。PPB-08 については、不変磁気緯度が低い領域で TEC 値がやや高い傾向が見られるが、日変化幅も同程度に大きいためはっきりとは断言出来ない。

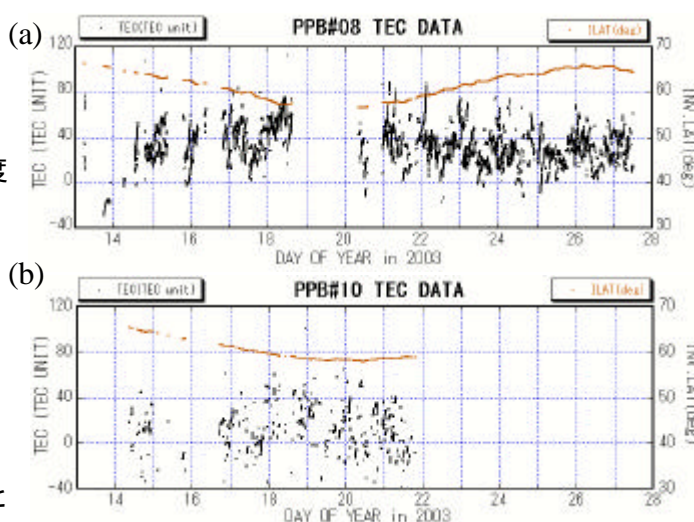


図 2 . TEC values observed by PPB-08 (a) and PPB-10 (b)

図 3 (a), (b) に、それぞれ PPB-08, PPB-10 の TEC 正常値観測時の捕捉 GPS 衛星の仰角、方位角分布を示す。方位角は気球位置における地理北から東回りの角度で示し、仰角は 10 度毎の同心円で示す。GPS 衛星の軌道傾斜角は 55 度であるため、ほとんどの衛星は気球位置よりも低緯度側に位置し、仰角 20 度以上であることが分かる。用いた受信器は、一度捕捉した衛星は連続して捕捉することが出来る。

以後は正常値データ量の多い PPB-08 のデータを主に示す。図 4 は、算出された TEC 値に、高度 100 km ~ 600 km の間の天頂方向距離と気球位置から衛星方向に沿った視線距離との比を掛けた仰角補正 TEC 値 (赤) と、IRI-2001 モデルにより計算された気球位置上空での TEC 値 (黒) (http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/models/iri.html による) 気球高度 (青) を示す。観測値は平均的にはモデル値に近い値を示し、また図 2 にも見られた、1 月 20 日以降徐々に TEC 値が小さくなってゆくという傾向もモデル値と一致しているが、

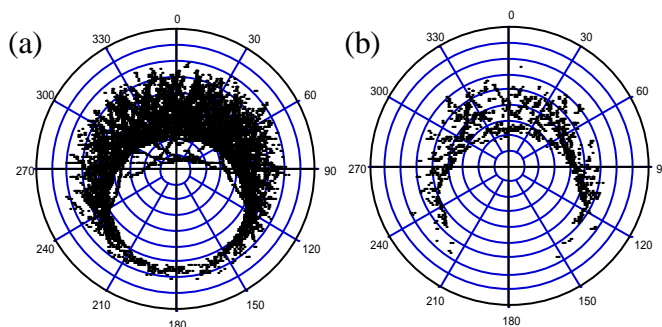


図 3 . Azimuth and elevation of the GPS satellites at the time of the TEC observation by PPB-08 (a) and PPB-10 (b).

観測された日変化幅はモデル値より約 5~7 倍大きい。徐々に TEC 値が小さくなる傾向は、太陽天頂角の季節変化、日照領域と気球位置との相対位置関係の変化によるものと考えられる。日変化幅の違いは、実際の観測は気球位置上空ではなく、様々な方位角方向、仰角方向の値が混在していることが1つ考えられる。この点は、最大電子密度高度を仮定して、視線方向とこの高度の交点の位置の緯度経度における IRI モデル値を計算することにより確認することが出来ると思われる今後行うべき課題である。

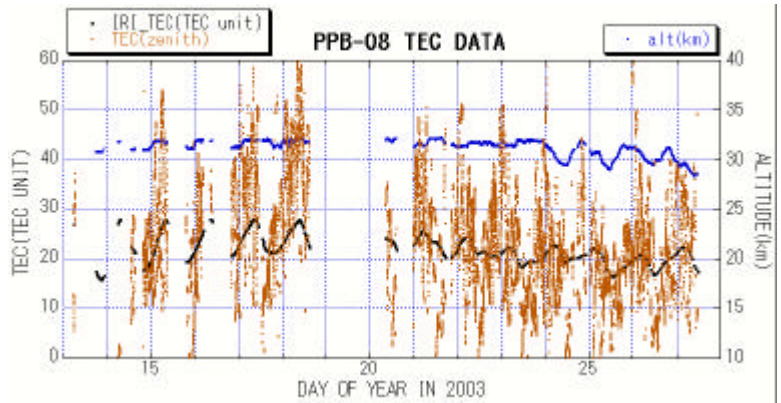


図 4 . Zenith calibrated TEC value observed by PPB-08 (red), TEC value from the IRI-2001 model (black), and the altitude of the balloon (blue).

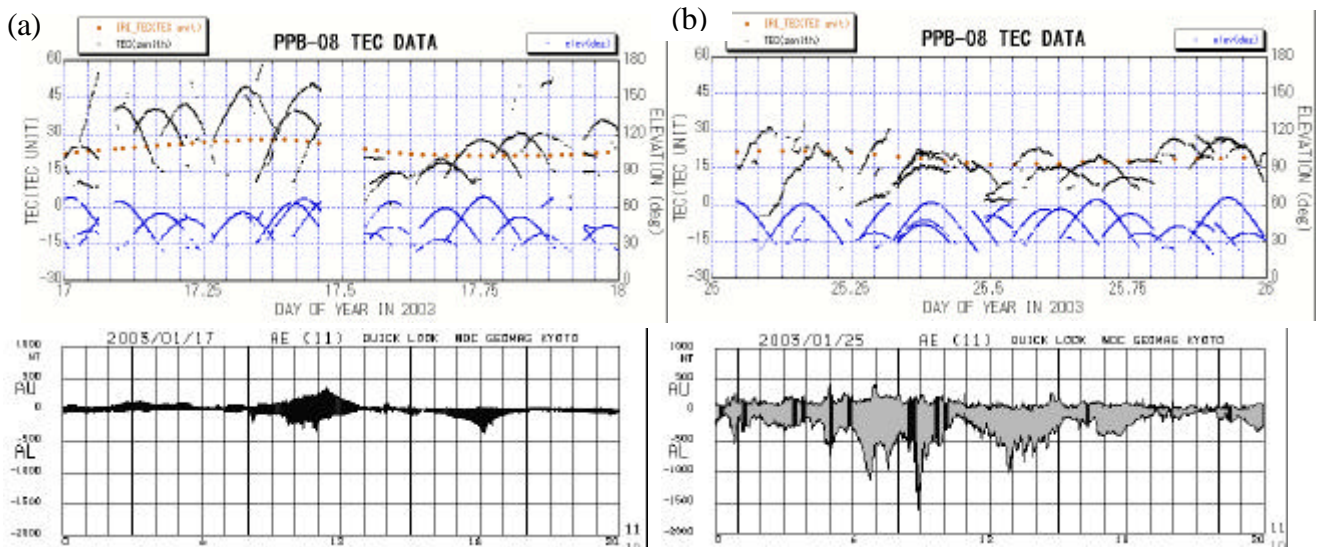


図 5 . (Upper) Zenith calibrated TEC value observed by PPB-08 (black), TEC value from the IRI-2001 model (red), and the elevation of the received GPS satellite (blue); (Lower) Preliminary AU and AL index on Jan. 17 (a) and Jan. 25 (b) in 2003.

図 5 (a)、(b)の上段は、それぞれ 1 月 17 日、25 日一日分の PPB-08 による仰角補正 TEC 観測値 (黒)、GPS 衛星の仰角(青)、気球位置上空での IRI モデル値 (赤)を示す。それぞれの下段には、それぞれの日の地磁気活動度を表す AU、AL インデックス (暫定値) (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/ae1/quick.html> による)を示す。1 月 17 日、25 日はそれぞれ地磁気活動の静穏日、擾乱日にあたる事が分かる。図 5 より、仰角の連続的な変化に対応して TEC 観測値の連続的な変化が見られ、PPB-TEC が 1 度捕捉した衛星を連続的に捕捉していることが分かる。図 5 (a)と(b)を比較すると、地磁気活動静穏日では TEC 観測値の変化が比較的なめらかであるのに対し、擾乱日では、振幅が小さく周期も短い細かい変動が、衛星位置変化にともなう大きな変化に重畳していることが分かり、地磁気活動に伴う電離層電子密度の変動が観測されていることが分かる。今後はこの重畳している擾乱部分に着目し、他の観測器のデータとも合わせて電離圏磁気圏現象の解析を進めてゆく予定である。図 6 (a)、(b)に、図 5 (a)、(b)のデータについて、仰角変化にともなう大きな変化を多項式フィットし、そこからの差分をプロットしたものを示す。やはり擾乱日では変化分の振幅が大きいこと、

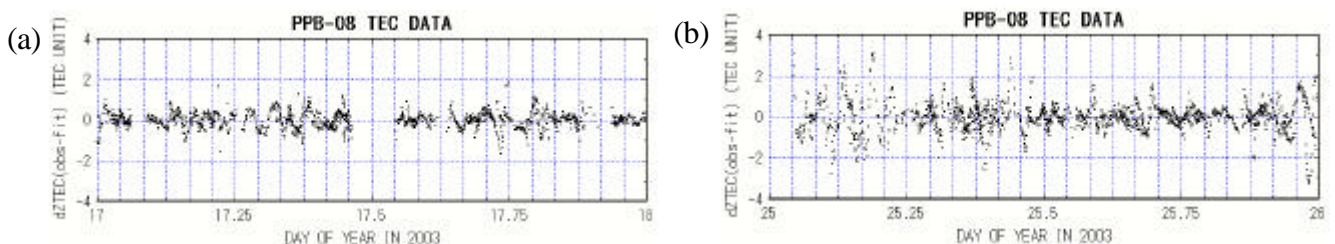


図 6 . Residual between the observed zenith calibrated TEC values and polynomial fitted values on Jan. 17 (a) and Jan. 25 (b) in 2003.

その振幅は最大 4 TEC UNIT 程度であることが分かる。

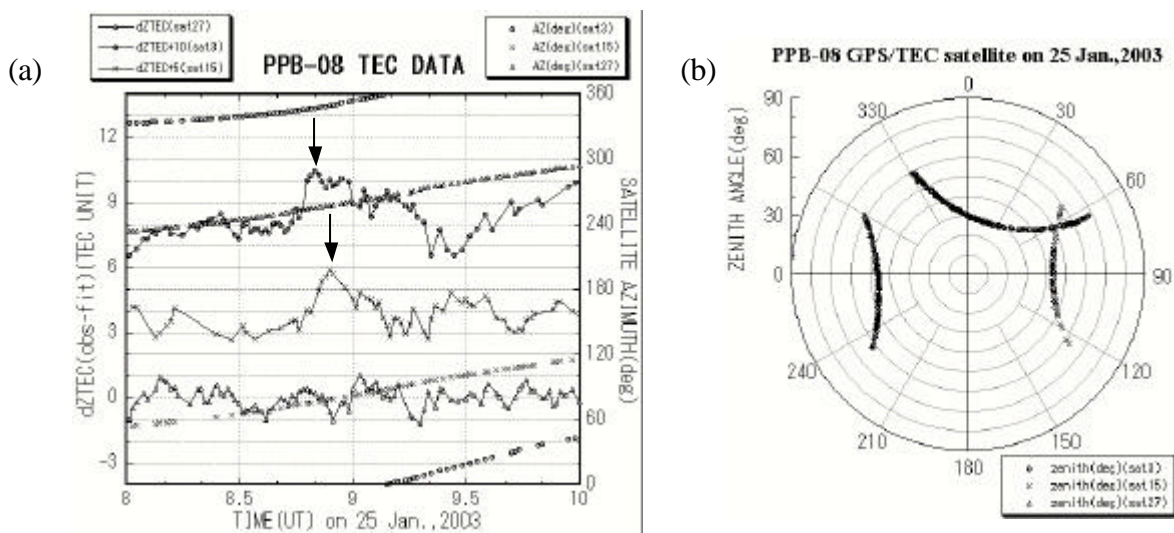


図 7 . (a) Residual TEC values during 08:00 to 10:00 UT on Jan. 25, 2003 observed by PPB-08. Azimuth of the GPS satellite is also shown. (b) Elevation and azimuth tracks of the GPS satellites during that period.

図 7(a)に、1 月 25 日 8 時 UT から 10 時 UT までの、上述した多項式フィット値からの差分を示す。図 5(b)からも分かるように、この時間帯には同時に 3 個の衛星（衛星番号 3、15、27）が捕捉されており、図 7(a)では、見やすいように衛星 3、15 の値にオフセット値を加えている。それぞれの衛星の方位角を図 7(a)に、仰角方位角変化を図 7(b)に示す。図 7(a)中に矢印で示したように、異なる方位角方向の 2 つの衛星で、似通った変動が時間差を持って観測されているが、他の衛星ではその変動ははっきりしない。これらのことから、この変動をもたらした現象は、気球位置から西側には余り影響を及ぼしていないこと、また北から東へと伝播していること、などが推察される。今後はこのように複数の衛星が捕捉されている時間帯に着目して、現象の空間分布や伝播特性などを議論してゆくつもりである。ちなみに図 7 の時間帯は、図 5(b)からも分かるように規模の大きい磁気嵐（サブストーム）が発生した時間帯にあたり、オーロラ X 線観測器（AXI）によっても顕著なオーロラ X 線現象が観測されており（中村他（2003 年）、Nakamura et al. (2004)）、興味深い期間の 1 つである。

#### 4 . まとめ

PPB に TEC 観測器を搭載し、長時間・広範囲にわたる TEC 観測を行った。大気球による TEC 観測としては恐らく世界初の試みであった。同時に 2 周波が受信でき正常に TEC 値が観測できた割合は 8 号機で約 39%、10 号機で約 7%と低く、特に 10 号機の受信状態が悪かった。一度の衛星捕捉数も 3 個（最大数）受信できた割合は、8 号機で約 9%、10 号機で約 1%と極めて低かった。この原因は不明であるが、他の観測機器との干渉など、将来の計画に向けて解明すべき問題点といえる。算出された TEC 値は IRI モデル値と比較して、平均としては同等の値を示しているが、観測値の日変化幅はモデル値よりも約 5 ~ 7 倍大きかった。これは様々な方位角仰角方向の情報が含まれているためと考えられ、今後確かめるべき課題である。ゆるやかな変化からの擾乱分については、サブストームなど電離圏磁気圏現象に伴う電離層電子密度の擾乱を反映していると考えられ、他の観測器のデータとも合わせ今後解析を行ってゆく予定である。

#### 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.
- 中村、他、PPB8、10 号機によるオーロラ X 線イメージ観測、平成 15 年度大気球シンポジウム、79-82、2003. Nakamura, T., et al., Observations of hard X-rays of auroral origin with Polar Patrol Balloons No. 8 and 10, Advances in Polar Upper Atmosphere Research, No. 18, 10-22, 2004.
- 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.
- 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.