

# ALMAサイトに設置された電波シーイングモニタに 捉えられた赤道プラズマバブル

石崎秀晴, 阪本成一

(2006年4月28日受理)

## Equatorial Plasma Bubbles Found with the Radio Seeing Monitors at the ALMA Site

Hideharu ISHIZAKI and Seichi SAKAMOTO

### Abstract

We analyzed the phase data taken with the two sets of radio seeing monitors (RSMs) aligned in series in the east-west direction at the ALMA site. Besides expected east-bound flow of water vapor, which has a typical transverse velocity of  $12 \text{ m s}^{-1}$ , we found fast-moving phase-fluctuating components with a transverse velocity reaching  $300 \text{ m s}^{-1}$ . Through analysis of amplitude data from two antennas of one of the RSMs, it was found that the fast-moving phase-fluctuating components also induce amplitude fluctuation, or scintillation. Its occurrence rate jumps up soon after the sunset, and is negligibly small during daytime and during winter (May to September). All these characteristics consistently indicate that the fast-moving components observed with the RSMs are due to the ionospheric phenomena called "plasma bubbles" or "Equatorial Spread F."

### 1. はじめに

ミリ波・サブミリ波帯での地上観測において、受信電波の位相変動をもたらす主要な原因は、対流圏内の水蒸気と乾燥大気の空間・時間変動である。アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) では、水蒸気の短時間かつ小規模スケールの変動を水蒸気ラジオメータ (Water Vapor Radiometer) の観測データで補正し、緩慢で大規模なスケールの乾燥大気による位相変動をファーストスイッチング法により補正する。ファーストスイッチング法とは、各素子アンテナが観測目的天体と、その近傍の較正用天体とを大気による位相変動のタイムスケールより十分に短い時間で切替えながら交互に観測して位相変動を除去する観測方式である。

電波干渉計では基線長と観測波長によって到達できる空間分解能が決まり、これが回折限界を与える。しかし、大気による空間的、時間的な位相変動により観測電波の伝播波面がゆがむために観

測される空間分解能は回折限界にとどかない。達成可能な最高空間分解能を電波シーイングと呼ぶ。この電波シーイングの状況を観測すること、および、大気による位相ゆらぎによる影響を除去すること、すなわち位相補償の効果を確認する観測装置が電波シーイングモニタである。

われわれは、ALMAサイトの位相ゆらぎを観測するために電波シーイングモニタを標高4800mのALMAサイト近傍に設置し1996年ころより観測を継続している。1999年からは電波シーイングモニタを二基、東西基線に沿って直列に設置して水蒸気の移動速度の精密観測を行ってきた。

1999年11月から12月にかけての約一ヶ月間の観測データを詳細に解析した結果、水蒸気は地上付近の主要な風向である西風に乗って、その1.2倍程度の速さで流れていることが分かった<sup>1)</sup>。ところが、あたかも水蒸気の塊がサイト上空を地上風速の30倍もの高速で移動するかのような現象も見つかった<sup>2)</sup>。その現象は、電離圏のF層における擾乱であるプラズマバブル (赤道スプレッドF) に由来するものと解釈できるのでその概要を報告

する。

プラズマバブルが地上における電波天文観測に対して、直接の影響を及ぼしたという報告は見当たらないようであるが、比較的到低周波数で高分解能観測を目指す場合には問題となるかもしれない。

## 2 直列電波シーイングモニタ

ALMAサイトにおける水蒸気変動のようすを理解するために設置された電波シーイングモニタの概要を説明する。基線上に300mの間隔で二台のアンテナを置き、位相差を測定するのが一対の電波シーイングモニタ (Radio Seeing Monitor) であり、国立天文台では二対のRSMをチリ国内に所有している。二対のRSMに対する配置のオプションはいろいろ考えられるが、並列に並べてわずかに異なる対象を観測するものや、直列に接続して共通の対象を観測する方法などがある<sup>3)</sup>。われわれは東西方向の基線上に直列に二対のRSMを配置した(図1)。四つのアンテナは東経335.5°の大西洋上空にある静止衛星 Intelsat 603の11.2GHzビーコン信号を受信すべく、方位角67.7°、仰角35.0°に固定されている。

対流圏において位相変動をもたらすのが、水蒸気の分布する層状の領域であるというモデルを位相スクリーンという。水蒸気はスクリーン上を風によって運ばれ移動すると考えられるから、西風が主要なALMAサイトでは基線を東西方向に沿わせた。これを二基、直列に並べたのはパターンマッチングにより位相スクリーンの移動のようすを

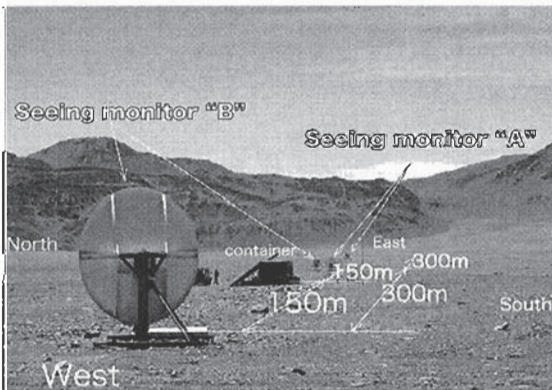


図1 Dual Radio Seeing Monitors

直列電波シーイングモニタ。300m基線上の二台のアンテナが一対のシーイングモニタを構成しており、これが東西方向に直列に二対並べられている。すべてのアンテナは大西洋上空の静止衛星インテルサット603の11.2GHzビーコン信号を受信している。中央の二台のアンテナ、すなわち西側RSMの東のアンテナと東側RSMの西側アンテナが隣接して設置されており、これにより600m基線相当の位相差も計算できることに特徴がある。

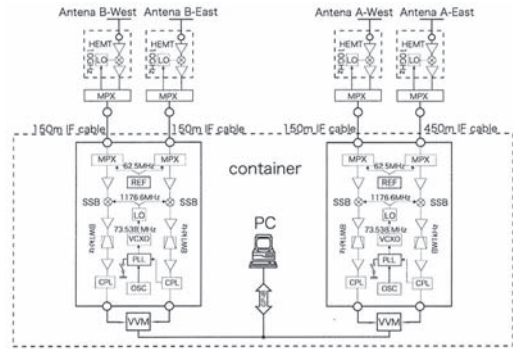


図2 Block diagram of the two pairs of RSM

直列電波シーイングモニタの信号ブロック線図。一対の電波シーイングモニタを構成する二台のアンテナは一台のバックエンド受信機に接続されている。二対のシーイングモニタ、それぞれのバックエンド受信機から出力される位相差などの受信データは一台のパソコンにより同時にサンプリングされ、保存されている。

直接、捉えるためである。

東側のシーイングモニタを“A”，西側を“B”と呼ぶ。それぞれのシーイングモニタのアンテナが受信した4台分のビーコン信号の振幅とRSM二基分の位相差は一台のパソコンで同時に1秒毎にサンプリング(A/D convert)されて保存されることで同期が保たれている(図2)。

## 3. 解析方法

静止衛星から発信された電波は地球大気を通過する際に、電離層におけるプラズマや対流圏での水蒸気によって吸収・散乱され、振幅が減衰したり伝搬遅延<sup>4)</sup>が生じる。遅延は位相の遅れとして観測される。

いま、図3のように対流圏に位相スクリーンがあって、形を変えずに西から東へ向かって一定速度  $v_S$  で移動し、四台のアンテナビームを次々に横切っていくという観測モデルを考える。それぞれのアンテナが受信する衛星からの電波は、位相スクリーンのために振幅や位相が変化しランダムノイズが重畳したようになるだろう。すると、直列の電波シーイングモニタの位相差“A”と“B”には同じようなパターンのランダム変動が生じることが期待される。ただし、この場合は、位相差“A”は“B”に対して一定の時間遅れ  $t_L$  をもって観測されると考えられる。したがって、二対のRSMで遅れ  $t_L$  を観測すれば、位相スクリーンの移動速度は

$$v_S = L_B / t_L \quad (1)$$

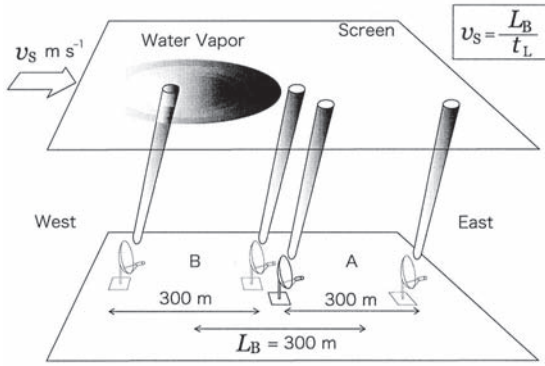


図3 Observational modeling for phase screen

位相スクリーンに対する観測モデル。水蒸気の塊（位相スクリーン）がアンテナのビームを次々と横切っていく。

で測定できる。ただし、二対のRSMの間隔： $L_B=300\text{m}$ である。

二台のアンテナから出力され、パソコンにサンプリングされて保存される位相差の生データは $\pm 180^\circ$ の範囲に分布している。これを連続した曲線となるように接続すると図4のようになる。地球の自転と同じ角速度で赤道上空を公転する衛星がドリフト運動することなどに起因する位相差の大局的な変動が観られる。また位相差"A"と"B"がこのスケールで重なって見えないのは、信号の変動パターンが完全に一致していないことが積算された効果とアンテナの個体差の影響も表れていると思われる。

つぎに、この大局的な位相差変動を除去する。ここではALMA日米欧合同サイト調査チームの標

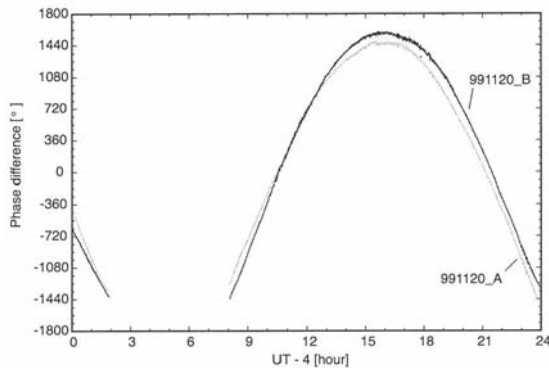


図4 Unwrapped phase difference.

接続された一日分の位相差の観測データの一例（現地時間1999年11月20日）。横軸は1日分の現地時間、縦軸は位相差 $^\circ$ 。衛星のドリフト運動による日周成分などが表れている。現地時間2時から8時までは夜間のバッテリー容量低下による欠測。

準的な解析手法にならない、接続した位相差データを10分間（600点）づつに分けて、二次曲線により近似し、これを差引いた残差データを以後の解析に供することにする（図5）。以下、これを位相データと呼ぶ。もちろん、近似する時間長や関数型などにより、得られる位相データは若干異なるが位相ゆらぎの標準偏差（r.m.s.値）以外は大きな影響を受けない。

解析の時間間隔を10分間としたこと、二対のRSMの間隔を300mとしたことは、それぞれのRSMが同一の位相スクリーンの存在を同時に捉えることにより、観測する位相データの「位相」が時間的、空間的にそろっていて高い相関を保つ、すなわち可干渉（coherent）であることが十分に期待できる時間と距離であると考えられる。したがって、パターンマッチングを実施するにあたって、以下に説明する解析方法は二対のRSMの位相データの可干渉性を利用した解析法である。

さて、式(1)でスクリーン速度 $v_s$ を求めるためには、遅れ $t_L$ を知らなければならない。これを得るためには、「RSM-A」と「RSM-B」の位相データ"A"と"B"の相互相関係数を計算する必要がある。

相互相関関数（cross correlation function） $r_{AB}$ は次の式で定義される。

$$r_{AB}(m) = \frac{1}{N\sigma_A\sigma_B} \sum_{n=0}^{N-1} \phi_{A_n} \phi_{B_{n+m}} \quad (2)$$

ここに、 $\phi_A$ ：位相差"A"、 $\phi_B$ ：位相差"B"、 $N=600$ ：10分間の位相差データの点数、 $n, m$ ：1秒ステップの位相差データ=サンプル値の番号、 $\sigma_A$ ,

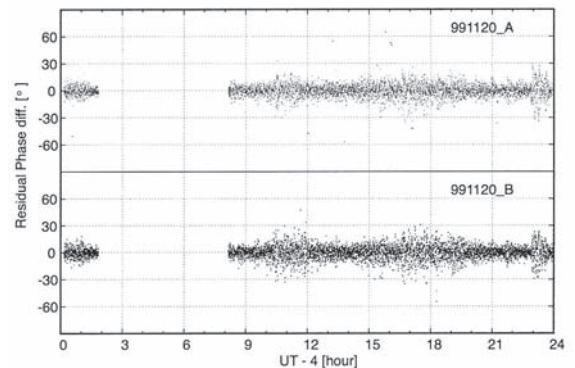


図5 “Phase data” as residuals of second order polynomial fitting among 10 min. bins.

観測データを10分毎に二次曲線近似し、これを差引いた残差として得られた「位相データ」。横軸は1日分の現地時間、縦軸は位相差の残差 $^\circ$ 。



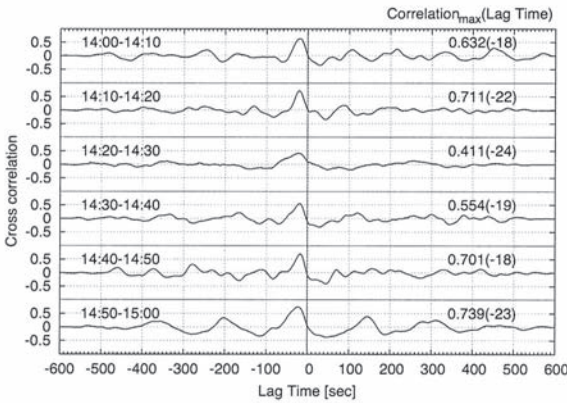


図6 Cross correlation plot for phase data

現地時刻1999年11月15日14時台の観測データに対して得られた位相データ"A"と"B"の相互相関係数。それぞれの右肩には相関係数の最大値とカッコ内に最大値を与えるラグ (Lag Time) 秒を示した。横軸はラグ秒, 縦軸は10分ごとの相関係数を1時間分の6個重ねて表示。

$\sigma_B$ は

$$\sigma_{A,B} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (\phi_{A,B,n} - \overline{\phi_{A,B}})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

で,  $\phi_A, \phi_B$ の標準偏差,  $\overline{\phi_{A,B}} = (1/N) \sum_{n=0}^{N-1} \phi_{A,B,n}$ は $\phi_A, \phi_B$ の平均値である。

計算された相互相関係数のプロットを図6に示す。横軸はラグ (Lag Time) 秒で, 縦軸は10分間づつ6個の1時間分を重ねている。それぞれの曲線はラグ1秒ごとの相関係数を表している。図中に相関係数の最大値とそのときのラグが記入してある。

相関係数が最大値を示すラグを遅れ $t_L$ と決めた。

#### 4. スクリーン速度

式(1)の $v_B$ をスクリーン速度と呼び, これを求めた。図7はスクリーン速度の計算例である。横軸は9時から24時までの時刻。黒線がスクリーン速度, 太灰色線が地上風速で, 共に左縦軸の単位は $ms^{-1}$ である。灰色点線は $t_L$ を示すときの相関係数で, 右縦軸に0~1の範囲に示してある。

スクリーン速度が負の値を示すとき位相差"A"が"B"に対して遅れていることを意味している。したがって, 西側にある"RSM-B"の信号が先行しているということであり, 位相スクリーンが西から東へ移動していることを表している。地上風速は東西成分が記載されており, 負の値を示すとき西寄りの風であることを意味している。

スクリーン速度と地上風速の東西成分は, 方向

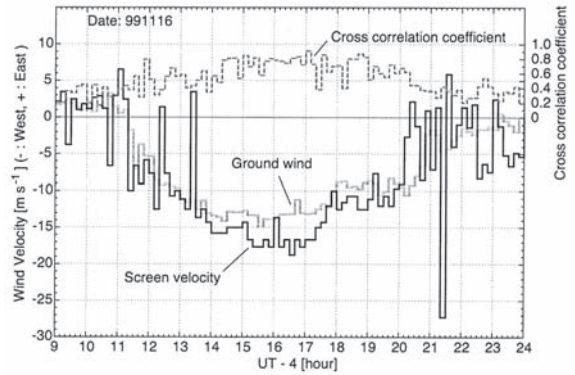


図7 Screen velocity

1日分のスクリーン速度と地上風速, 相互相関係数, 負の風速は西風を表している。横軸は9時から24時までの時刻。黒線がスクリーン速度, 太灰色線が地上風速で, 共に左縦軸の単位は $ms^{-1}$ である。灰色点線は $t_L$ を得たときの相関係数で, 右縦軸に0~1の範囲を示す。

のみならず絶対値もよく一致しておりスクリーン速度 $\approx 1.2 \times$ 地上風速という関係が大部分のデータに対して成り立つ<sup>1)</sup>。

1999年11月11日~12月12日までの約30日間に観測された位相データから得られたスクリーン速度のヒストグラムをプロットした(図8)。ただし, 横軸は $t_L$ 秒である。縦軸が度数。中央値 (median) は $t_L = -25$ 秒であった。したがって, スクリーン速度の中央値は $12ms^{-1}$ である。

ところが, 図8では $t_L = -1$ 秒というところに最頻値 (mode) が現れた。観測総数2936に対して度数128。外に,  $t_L = -2$ 秒が度数40,  $t_L = -3$ 秒が度数1あった。これらは他の結果と較べて異常な結果である。以下で $-3 \leq t_L \leq -1$ 秒という現象

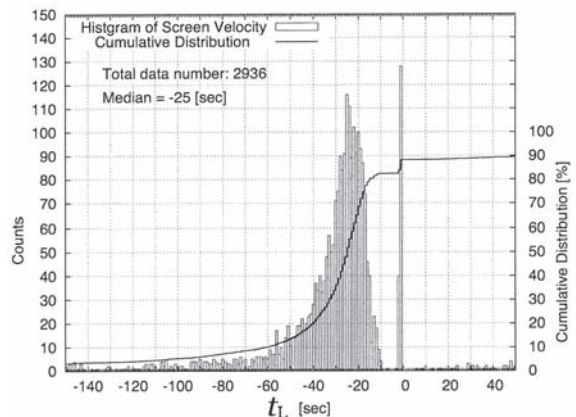


図8 Histogram of lag time

スクリーン速度 (の代わりとして, 遅れ $t_L$ ) に対する頻度分布。横軸は遅れ 秒, 縦軸 (左) は度数, 縦軸 (右) は累積分布%。(1999年11月11日~12月12日)

の意味について検討する場合、共通の原因から出現すると考えられるので、これらを総称して $t_L = -1$ 秒の現象と呼ぶ。

$t_L = -1$ 秒という現象は、ほぼ毎日、日没後から前半夜にかけて、いちど発生すると多くの場合が連続して、ときには断続的に、数時間にわたって観測された。

## 5. 高速現象

遅れ $t_L = -1$ 秒を含む場合の相互相関プロットを図9に示す(現地時刻1999年11月17日23時台)。横軸がラグ(Lag Time)、縦軸は1時間分を重ねた相関係数。23:30~23:50台のプロットはLag time=-1秒が係数の最大値(すなわち、 $t_L = -1$ 秒)の場合で、23:00~23:20台は通常のスクリーン速度であるが、よく観るとLag time=-1秒に、最大ではないが、スパイク状のピークが見える。

図9と同じ時間帯の位相データをプロットしたのが図10である。この図では、灰色線が"RSM-A"黒線が"RSM-B"である。23:30以降、"B"が"A"に対して1秒程度、先行した非常によく似た波形となっていることが確認できる。

$t_L = -1$ 秒という現象の出現は、RSM観測として想定外のことであり、それが現実の自然現象でないならば、その原因として装置起源の問題と観測方式起源の問題が考えられる。

装置起源の問題として、観測装置やその電源に対して外乱が加わった可能性を検討してみる。図

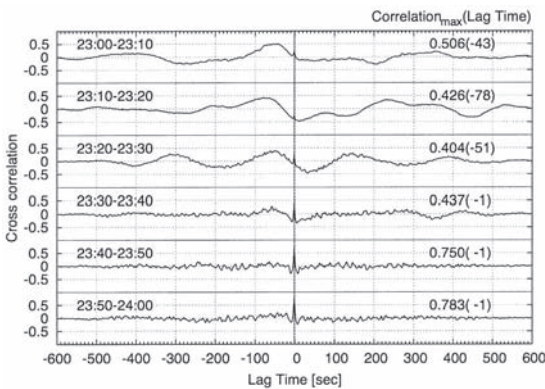


図9 Cross correlation plot during a period with  $t_L = -1$  s events.

遅れ $t_L = -1$ 秒のイベントを含むときの相互相関係数(現地時刻1999年11月17日 23時台)。横軸はラグ秒、縦軸は10分ごとの相関係数を1時間分6個重ねて表示。それぞれの相関曲線の右肩に最大の相関値とそのときのラグ秒をカッコ内に示す。

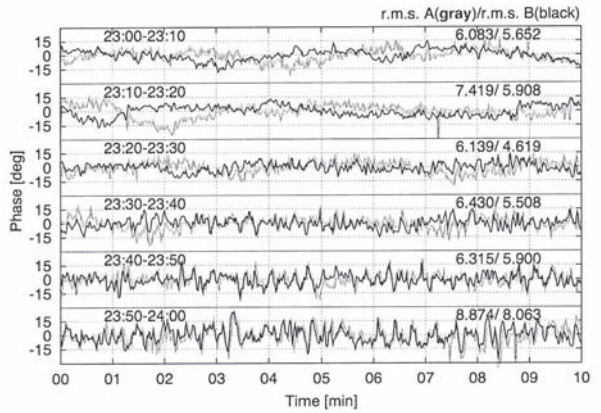


図10 Phase data of the same period to Figure 9.

図9と同じ時間帯の位相データ。横軸は時間分、縦軸は位相差°で1時間分6個重ねて表示。各位相差の右肩にはRSM-A/RSM-Bの標準偏差(r.m.s.)を表示。

2に示すように、二対のRSMはバックエンド受信機まで独立した回路で構成されており、電源(太陽電池+蓄電池)も二系統が独立している。したがって、ほぼ同時期に、ほぼ同じ結果がもたらされるような外乱を想定するのは困難である。また、二台のバックエンド受信機の出力信号は一台のパソコンで同時にサンプリングされており、絶対時刻には誤差がありえるが、相対時刻差は数ミリ秒以下であるため二対のRSMの観測時刻が1秒異なるというような問題は考えられない。さらに、この部分で信号に外乱が乗れば同時刻に、かつ相似な波形となるはずである。

観測方式に起源があるとすれば、地上風がRSMの基線に直交する南北方向成分が卓越しているときに、わずかに東西方向へ逸れて吹けば、逸れ続けているあいだは風向変化の速度に応じて高速の東西風として観測される可能性があるが、一時的な現象であれば相互相関係数を低下させるだけであるし、 $t_L = -1$ 秒という現象と地上風の南北成分の出現時刻の間にも相関が見られなかった。 $t_L = +1$ 秒という成分もなかった。加えて、南北成分が卓越した風向の地上風が吹くこと自体がまれである<sup>5)</sup>。

ゆえに、遅れ $t_L = -1$ 秒の現象とは、スクリーン速度としては $v_S = -300 \text{ ms}^{-1}$ に相当し、何かが西から東へ向かって $300 \text{ ms}^{-1}$ もの高速で、二対のRSM上空を横切ったと解釈するのが自然であろう。

$t_L = -1$ 秒という現象( $-3 \leq t_L \leq -1$ 秒)を高速現象と呼ぶ。



## 6. アップサンプリング

直列電波シーイングモニタは東西方向に $10\text{ms}^{-1}$ 程度で進むスクリーン速度の計測のために設置されたもので、もともと想定していない高速現象には対応しきれない。特に、遅れ $t_L$ が1秒ステップでしか得られないということは大きな難点である。なぜなら、 $t_L=1,2,3,4,5,\dots$ 秒であるとき、スクリーン速度 $v_S=300,150,100,75,60,\dots\text{ms}^{-1}$ となってしまう、速度の分解能が得られないからである。せめて、10Hz程度でサンプリングされたデータであって欲しい。

サンプリングレートを上げて観測し直せばよいが、この時期の観測をやり直すことは不可能である。そこで、いまあるデータに対して補間などの方法により、サンプリングレートを上昇させる方法を検討し、オーディオや画像処理の分野では確立された技術であるアップサンプリング(upsampling)の方法を採用した。

原理や理論の詳細は避けて、具体的な手続きに沿いながら、不要な情報を付加することなしに元データを滑らかに再現できることを説明する。まず、図11(a)に示すような時系列上で離散化されたデータ(縦軸はデータの値)に対してサンプリングレートを $L$ 倍にするために、データ点の間に $L-1$ 個のゼロ点を挿入する(図11(b))。すると、

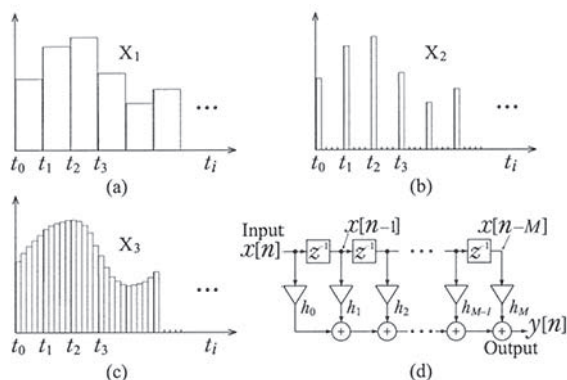


図11 Procedure for upsampling.

アップサンプリングの手続。(a)オリジナルデータ $X_1$ , (b)ゼロ点を挿入したデータ $X_2$ , (c)補間されたデータ $X_3$ , (d)FIRローパスフィルタの信号ブロック線図。図(d)の $z^{-1}$ は現在値 $x[n]$ から1ステップ前のデータを取り出すことであり、全体で $M$ ステップまで遡ったデータに重み $h_m$ を掛けて加算している。重み $h_m$ はFIRローパスフィルタのインパルス応答であり、(b)のバース列が入力されるたびに、パルス面積に等しい強度のインパルス応答が出力される。任意の時点における応答関数はその時点におけるインパルス応答の合算である。この手続は畳込み積分となっている。

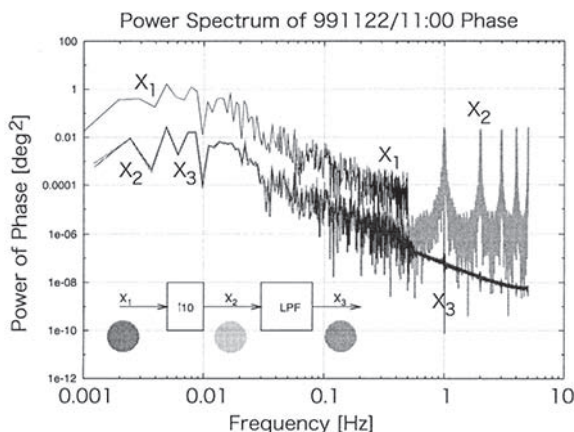


図12 Power spectrum of upsampling test

アップサンプリングのテストにおける、各段階におけるパワースペクトル。 $X_1$ :オリジナルデータ(黒線),  $X_2$ :ゼロ点を挿入したデータ(明るい灰色),  $X_3$ :高域を遮断した結果(暗い灰色)。横軸は周波数Hz, 縦軸は正規化していないパワースペクトル $\text{deg}^2$ 。

ナイキスト周波数(元のサンプリング周波数の $1/2$ )を越えた周波数領域に偽のスペクトル(イメージ)が生じる。

このようすを実際の位相データで確認する。図12に1999年11月22日11:00からの10分間のデータを使用してアップサンプリングの手続の過程におけるスペクトルを表示した。横軸は周波数Hz, 縦軸は正規化してない各データのパワースペクトル $\text{deg}^2$ で、 $X_1$ (黒線)が1Hzサンプリングデータ(図11(a)に相当する)で0.5Hzを越える情報は無い。 $X_2$ (明るい灰色線)が元データの各点間に9個づつのゼロ点を挿入したデータ(図11(b)に相当)で0.5Hz~5Hzの領域にイメージが生じている。

そこで、これをローパスフィルタで遮断する。フィルタリングの手続きをデジタル信号処理のブロック図で表したのが図11(d)である<sup>6)</sup>。

図11(d)のブロック図を差分方程式で表すと、

$$y[n] = \sum_{m=0}^M h_m x[n-m] \quad (3)$$

となる。直感的な表現を用いれば、現在値 $x[n]$ から $M$ まで遡って、それぞれに係数 $h_m$ を掛けて加算することであり、重み $h_m$ 付きの移動平均の $M$ 倍を求めているとみなせる。係数 $h_m$ はFIR(Finite Impulse Response)ローパスフィルタのインパルス応答である。

式(3)の意味を吟味する。しかし、いったん式(3)から離れる。

制御系においては、線型システムのインパルス応答は伝達関数 (transfer function) である。この場合、システムとはFIRローパスフィルタである。このシステムに図11(b)のような断続的なパルス列が入力されることを考える。

時間 $t$ 秒を $n\Delta t$ 秒で表すと、サンプリングレートを10倍にしているのので、 $\Delta t=0.1$ 秒であり、 $n$ は整数である。そして、時刻 $t$ におけるパルスの高さを $x(t)$ とする。パルスの強度は、高さ×幅であるから $x(n\Delta t)\Delta t$ と表される。

いま、時刻が $t_m=m\Delta t$ 秒たってから、システムに一個のパルスが入力されたときのインパルス応答は $x(m\Delta t)\Delta t h((n-m)\Delta t)$ である。ただし、 $h(t)$ は単位インパルス関数で、 $h((n-m)\Delta t)$ は時間遅れ $m\Delta t$ がある場合の単位インパルス関数である。時刻 $n\Delta t$ におけるシステムの入力出力 $y(n\Delta t)$ は時間が $-\infty$ から $+\infty$ において入力された総てのパルスに対するインパルス応答の合計である。よって、

$$y(n\Delta t) = \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{m=-M}^M x(m\Delta t)h((n-m)\Delta t)\Delta t. \quad (4)$$

あつまっているデータは、 $\Delta t$ ごとにサンプリングされた離散化データであり、式(4)までは便宜上 $t=n\Delta t$ としてきたが、ここからは $\Delta t=1$ とおき、カッコを( )から[ ]に置換えて書くと、

$$y[n] = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{m=-M}^M x_m h[n-m] \quad (5)$$

となる。図11(a)~(c)では $t_0$ が $t=0$ であり、 $t < 0$ では入力信号はないものとしている。さらに、信号を処理する時間を有限で打切ると

$$y[n] = \sum_{m=0}^M x_m h[n-m] \quad (6)$$

と書ける<sup>7)</sup>。

ここまでの考察は、図11(d)のブロック線図を入力 $x[n]$ と出力 $y[n]$ 以外は全体がひとつの伝達関数 $h$ の線型システムであるとして $x[n] \rightarrow h \rightarrow y[n]$ のように、入力信号と出力信号の関係を考えてものである。ところが、結果として得られた式(6)は差分方程式で表された畳み込み積分 (convolution integral) である。さらに、式(6)で $x[ ]$ と $h[ ]$ を入れ替えても等価であるから、結局、式(6)は式(3)に一致する。

すなわち、式(3)はデジタル信号処理における畳み込み積分であった。入力の各パルスの値 (高さ) は、最終的に得られる滑らかな曲線の一部としては低い周波数の情報であるから、そのままフィ

ルタを通過する。一方、次々と重ね合わされるインパルスのエンベロープにより、隙間は埋められ、断続的なパルスによって生じた高調波は遮断されるのである。

以上のことから、この手続の結果として図11(b)のようなパルス列がシステムに入力されると図11(c)のように滑らかに補間された連続的なデータ列が得られることが分かった。そして、システムとしてのローパスフィルタが図12のX2のようなイメージを遮断している。

減衰量40dB、次数100次、サンプリング周波数10Hz、遮断周波数0.5Hzの設計条件で文献<sup>6)</sup>の付録「デジタル・フィルタ設計プログラム」のカイザー窓を使う窓関数法により設計されたFIRローパスフィルタに対して、ノイズ信号とみなした乱数を入力して、その出力信号から実験的に求めた周波数応答 (伝達関数) のゲイン線図を図13に示す。横軸は周波数Hz、縦軸はゲインdBである。

これを図12のX2に適用した結果のX3では0.5Hz以上の領域のピークは消滅しており、直線的な勾配でパワーが低下している。なお、ゼロ点を挿入してデータ点数を10倍に水増ししているのので、X2,X3の振幅は1/10、パワーは1/100に低下している。

ここで、さらにアップサンプリングの手続に対する考察を加えておく。図13は周波数空間におけるFIRローパスフィルタの特性を示したもので

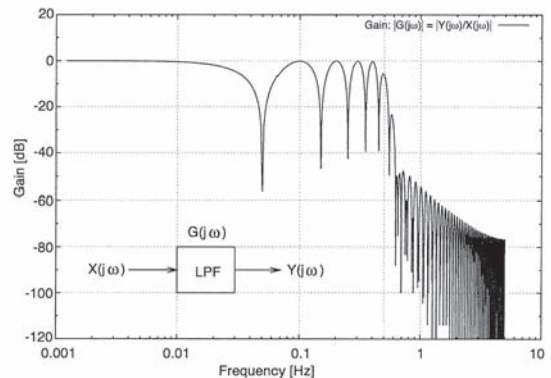


図13 Frequency response function of FIR low pass filter.

FIRローパスフィルタの周波数応答のゲイン特性。減衰量40dB、次数100次、サンプリング周波数10Hz、遮断周波数0.5Hzの設計条件で設計されたFIRローパスフィルタに対して、ノイズ信号とみなした乱数の入力信号 $X(j\omega)$ と、その出力信号 $Y(j\omega)$ から実験的に周波数応答 $G(j\omega)$ を測定し設計性能を確認。横軸は周波数Hz、縦軸はゲインdB。図中のブロック線図は測定モデル。



ある。説明したように図13の伝達関数は実験的に求めた。伝達関数を実験・観測により求めるためには入力信号 $x(t)$ と出力信号 $y(t)$ が可干渉でなければならない。すなわち、同一の信号源を同時に観測する必要がある。観測データのコヒーレンスが低いと、入力信号と出力信号が干渉することができず、伝達関数は得られない。

制御系の場合には、信号源の同一性はシグナルフローに沿って観測していれば問題なく、同時性もサンプリングなどの観測時刻を同期してあればよい。しかし、観測される入出力信号には必ず雑音が含まれる。このため、現実にはコヒーレンス関数は1にとどかない。ところが、図13の観測では完全にソフトウェア上の仮想的な実験であるから雑音が含まれることはなく完全に可干渉である。これは、計算に供した離散化データ列が総ての時点で可干渉であり続けていたということも含んでいる。

自然現象を観測する場合は、可干渉である状態は有限な寿命を持っている。可干渉が保たれる時間をコヒーレンス時間 (coherent time) という。コヒーレンス時間が長いと干渉スペクトル幅は狭く鋭いピークを示し、コヒーレンス時間が短いとスペクトル幅は広がる。コヒーレンス時間 $\tau$ と干渉スペクトル幅 $\Delta\omega$ の間には

$$\tau \Delta\omega \approx 2\pi \quad (7)$$

の関係がある<sup>8)</sup>。

アップサンプリングを計画するに際して入力信号と出力信号、あるいはこの場合、入力信号とシステムの間で可干渉の状態が保たれていなければならない。システムであるFIRローパスフィルタのスペクトル幅 $\Delta\omega$ は、遮断周波数が0.5Hzであるから $\omega_c = 2\pi \times 0.5 \text{ s}^{-1}$ と書くと、 $\Delta\omega = 2\omega_c$ となりコヒーレンス時間 $\tau = 1$ 秒である。断続的な入力パルスはこの時間内に連続して出現しなければならない。元のサンプリング周波数が1Hzであるから、この条件は必ず満たされている。

図14に相互相関関数の計算結果を示す。横軸は遅れ $t_L$ 、縦軸は相関係数で1時間分を重ねて表示してある。灰色の太線が元の1Hzサンプリングデータの計算結果で、黒線で表されたアップサンプリングにより10Hz相当としたデータからの計算結果が上書きされている。ほぼ重なって見える。遅れ $t_L$ もほとんどの場合、四捨五入の範囲の違いである。

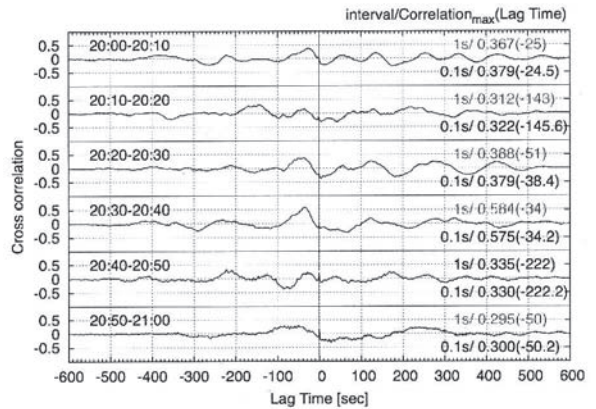


図14 Cross correlation function of upsampling test

アップサンプリングによる相互相関の計算結果の例。太い灰色線はオリジナルデータを示し、黒線はアップサンプリングデータを示す。(現地時刻1999年11月14日 20時台) 横軸はラグ 秒, 縦軸は相関係数で1時間分6個重ねて表示。各相関曲線の右上には元データの、サンプリング間隔/最大の相関係数 (遅れ 秒)を、右下にはアップサンプリング後の、サンプリング間隔/最大の相関係数 (遅れ 秒)を示した。

## 7. 高速現象の特徴

過去に並列電波シーイングモニタを使った観測から、高速現象が振幅変動を伴う現象として報告されている<sup>2)</sup>。そこで今回、位相変動として見出されたものとの対応について確認する。この目的のために位相データの他にも、1997年からの長期にわたる観測が実施されてきたシーイングモニタ"B"単独の二台のアンテナからの信号振幅を二次曲線近似した残差(以降、「振幅データ」)についても相互相関係数を計算した。これについても同様に、アップサンプリングの手続きは総てのデータに対して施されている。

位相データから求めた遅れ $t_L$ と振幅データから求めた遅れ $t_L$ に対するヒストグラムを図15と図16に示す。二対のRSMの間隔から位相データに対するスクリーン速度、振幅データから得られる速度に対応する速度成分が得られる。横軸は遅れ $t_L$ 秒で、縦軸が度数である。両方の図で $t_L = -1.1$ 秒が最頻値となっており、速度に換算すれば $-270 \text{ ms}^{-1}$ という高速成分がみられる。これは、もはやスクリーン速度と呼ぶにはふさわしくない。

振幅データの相互相関から高速成分が検出される際には、振幅データの標準偏差 (r.m.s.) も大きくなるのが確かめられている。したがって、これは著しいシンチレーションがあることを表し、振幅変動を伴う現象と対応していることが分かる。



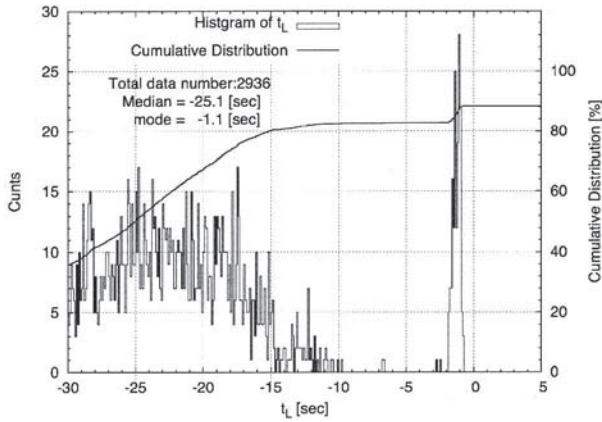


図15 Histogram of  $t_L$  from Phase data

位相データから求めた、遅れ $t_L$ 秒に対するヒストグラム。 $t_L$ に対する度数分布は左縦軸、累積分布は右縦軸%。最頻値は $t_L = -1.1$ 秒であり、速度成分 $= -270\text{ms}^{-1}$ に相当。

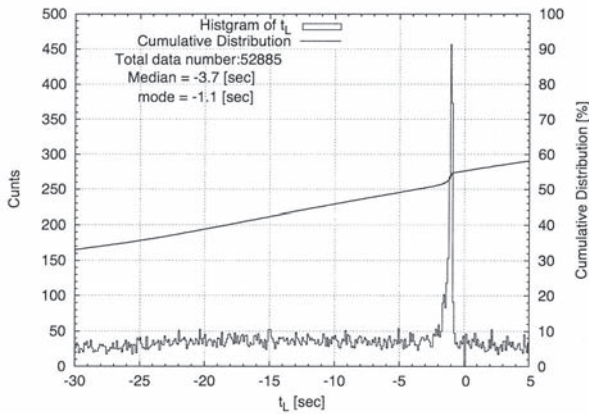


図16 Histogram of  $t_L$  from amplitude data

振幅データから求めた、遅れ $t_L$ 秒に対するヒストグラム。 $t_L$ に対する度数分布は左縦軸、累積分布は右縦軸%。最頻値は $t_L = -1.1$ 秒であり、速度成分 $= -270\text{ms}^{-1}$ に相当。

そこで、断続的であるが5年程度のデータが存在するRSM-Bの振幅データを用いて、より詳しい分析を行った。そのために高速現象の指標として、速度成分の大きさが $50\text{ms}^{-1}$ を越え、かつ、相関係数が0.3以上の場合、その10分間の「発生率」を「1」とし、それ以外の場合を「0」と定義する(図15によれば、 $50\text{ms}^{-1}$ 付近には分布のギャップが明確に存在するので、これをしきい値とした。また、相関係数が低い場合は遅れ $t_L$ が正しく計算されていない可能性があり、速度と相関係数の分布から相関係数0.3をしきい値とすると高速成分と通常速度がもっとも適切に分別できた)。

図17に1日における、高速現象の発生率の時刻依存性、すなわち振幅データから求めた速度成分から計算した発生率の総てを同じ10分間の時刻毎に平均したものの区間30分の移動平均をプロットした。横軸は現地時刻、縦軸は移動平均した発生率%。前半夜の22時ころに発生率のピークがある。現地時刻24時台のスパイク状の谷は欠測が多い時間帯のため不確実である。

高速現象の発生率の季節依存性のプロットを図18に示す。これは、振幅データの速度成分から発生率を求め、それを区間1日に対する移動平均した結果である。横軸は年間の月名で縦軸は発生率%である。図では年度別にプロットしてあるが、観測数や時期にバラツキがあるので、年度の区別は意識せずに眺めると、現地の春から秋にかけて発生率が上昇し冬場に最小となるようである。

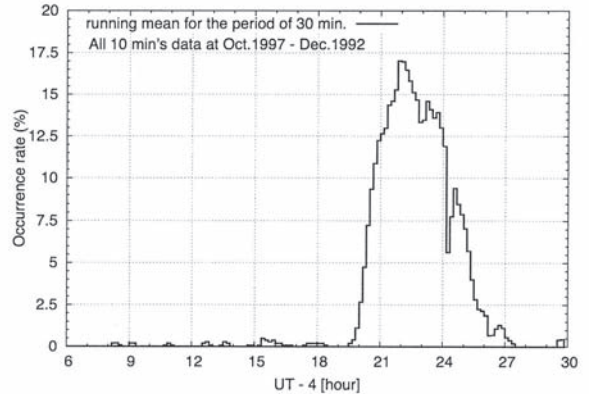


図17 Occurrence rate of 30 min. of fast-moving phenomenon

1日における、高速現象の発生率(区間30分の移動平均)の時刻依存性。

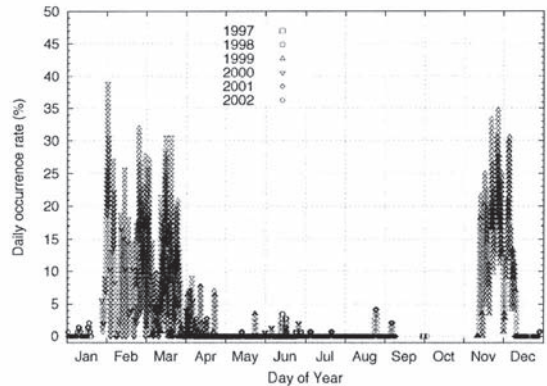


図18 Daily occurrence rate of fast-moving phenomenon

高速現象の発生率(区間1日分の移動平均)の季節依存性

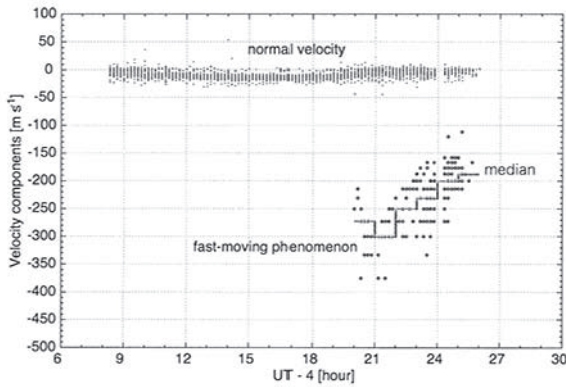


図19 Time variation of the velocity components  
高速成分の速度の時刻依存性.

高速現象, すなわち位相データから求めた速度成分(スクリーン速度)の時刻依存性を図19に示す. 高速現象が発生した場合, 速度のピークを前半夜の21時から22時ごろに迎え, 速度の1時間毎の中央値が $300\text{ms}^{-1}$ となり, 以後, 低下している. 振幅データから求めた速度成分の時刻依存性もほぼ同様の結果である.

本節の最後に付言すれば, 高速現象が10分程度以上のコヒーレンス時間を維持し, 比較的高い相関係数をもって観測されている(図9参照)ということは, これも二対のRSMにおいて可干渉な現象であるということであり, その空間構造は位相スクリーンに対する想定<sup>1)</sup>と似通ったものがあると推察できよう.

## 8. プラズマバブル

前節で述べた特徴は, 電離圏F層における擾乱であるプラズマバブル(plasma bubble)の特性と一致している. これについて以下で詳述する.

プラズマバブルは赤道スプレッドF(Equatorial Spread F)ともいわれてきた現象である. これは磁気赤道付近の低緯度において, 夜間に発生し, 強いシンチレーション(Lバンドの電波に対して20dBを越える例もある信号レベル変動)を引起す<sup>9)</sup>.

現象論的には, 日没時にF層高度付近で電離層大気の電磁気構造が大きく変動(evening enhancement)することが知られており, プラズマ密度の高いF層と, その層の下の高度150km~300kmあたりにある電離圏下端の境界面のゆらぎがレイリー・テイラー不安定性(Rayleigh-Taylor instability)によって発達し, ついには境界面のプラズ

マ密度が低い大気の一部が分離して泡(bubble)状となりF層内に吹き上がり, ときには約1000km上空の電離圏上端にまで達する非線型の現象であると理解されている. 図20にプラズマバブルに限らず, 重力加速度と密度勾配のベクトルが逆向きに作用しながら安定している状態において微小な擾乱が, レイリー・テイラー不安定性により発達するようすの概念図を示す.

観測によれば, バブルのスケールは直径, 数10km~100kmであり, 水平方向へも東向きに数10kmから100km程度ドリフトする. 鉛直方向へのドリフト速度は数 $10\text{ms}^{-1}$ で, 水平東向きのドリフト速度は最大では $300\text{ms}^{-1}$ 以上である<sup>10)</sup>.

プラズマバブルはF層高度における日没直後に活動のピークを迎え, このころに発生数やドリフト速度のピークとなる. これらの一般的な特性は前節に示した図17~19の高速現象の特徴と一致している.

さらに, GPS網により取得されたデータに基づいて同定されたプラズマバブルとの対応についても検討を行った. 図21は二対のRSMの設置されたALMAサイトに近いアレキパ(Arequipa)におけるGPSデータから導出されたTEC(Total Electron Contents)変動とROTI(Rate Of TEC Index)および, 二対のRSM観測により得られた速度成分を示したものである<sup>11)</sup>. TECとは地上観測点の鉛直線に沿って積算された電離圏全電子数であり, GPSの二周波電波を観測することで推定<sup>12)</sup>することができる.

ここではTECを, 二周波(1.5GHz, 1.2GHz)の位相差から算出した30秒値とし, ROTIはTEC

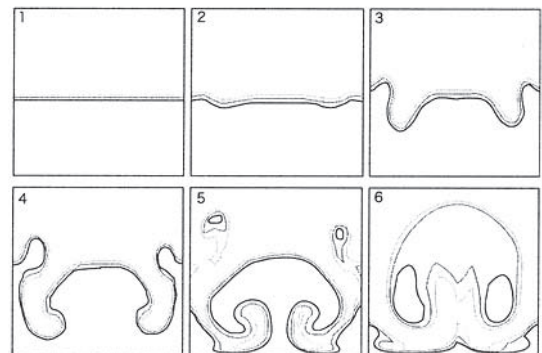


図20 Sequential sketches of schematic drawings for development of perturbation by Rayleigh-Taylor instability

レイリー・テイラー不安定性により(一般の)擾乱が発達するようすの概念図.



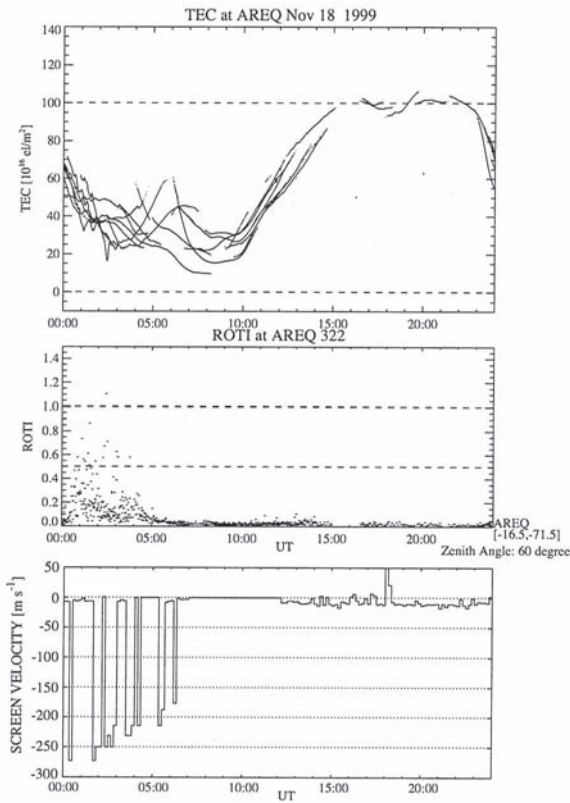


図21 Total Electron Content, Rate of TEC Index and Screen Velocity<sup>11)</sup>

Arequipaにおける全電子数 (TEC) とTECインデックス指数 (ROTI), および, ALMAサイトのスクリーン速度.オリジナル (上2段のTECとROTI) に3段目のグラフを追加.

の時間変化の5分間での標準偏差で, 数十キロメートルスケールの構造に対応している. プラズマバブルの空間スケールと, ROTIが表すスケールが大体同じと考えられるので, ROTIを用いてプラズマバブルを同定した.

図において中段のROTIのグラフで指数の高い部分に点が打たれている時にプラズマバブルが発生していると考えられる. この時期に, あるいは数十分程度の遅れの後, 最下段のALMAサイトでは, スクリーン速度が200数十 $\text{ms}^{-1}$ の高速現象が対応している. 1999年の11月14日から12月12日の期間では, ほとんど総てのプラズマバブルの発生と観測された高速現象が出現するタイミングと期間は, 同定にあいまいな点が含まれるが, 数十分程度のラグを伴って同期していた.

ペルーのアレキバがALMAサイトに対して約400km北北西方にあることと, TECがアレキバの天頂方向を観測し, RSMがALMAサイトの東方

200~300kmの高度150~200km上空を観測したと考えられることから, もし両者が同一の現象を観測したのであれば $300\text{ms}^{-1}$ の伝播速度を仮定すればラグが20~40分程度となる.

さらに図22に, 8年間のプラズマバブルの発生率として, ROTIで同定されたプラズマバブルの発生頻度の季節変化・年ごとの変化を示す. 横軸に1年分の時系列, 縦軸はその日と, その日の前後それぞれ45日づつ, 合計91日でプラズマバブルの発生した日数をパーセントに直してプロットしてある. 一日のプラズマバブルのあり/なしは, その日のROTIに基づいて決めている. 10月と2月から3月に出現のピークを示し, 前に示した図18との間に類似性が認められる. これらのことは, 直列電波シーイングモニタで捉えられた現象が, プラズマバブルに由来する現象であると考えられることを示唆している.

## 9. まとめ

標高4800mのALMAサイト近傍に設置した, 直列電波シーイングモニタの位相データから, 位相擾乱を起こす媒体の移動速度を計算した. 通常は地表付近の風速の1.2倍程度の移動速度で東へ向って進むが, 夜間には $300\text{ms}^{-1}$ という高速で東向きに伝播する現象が多数見つかった.

観測された高速現象は, 赤道域の電離層F領域に発生する擾乱であるプラズマバブル (赤道スプ

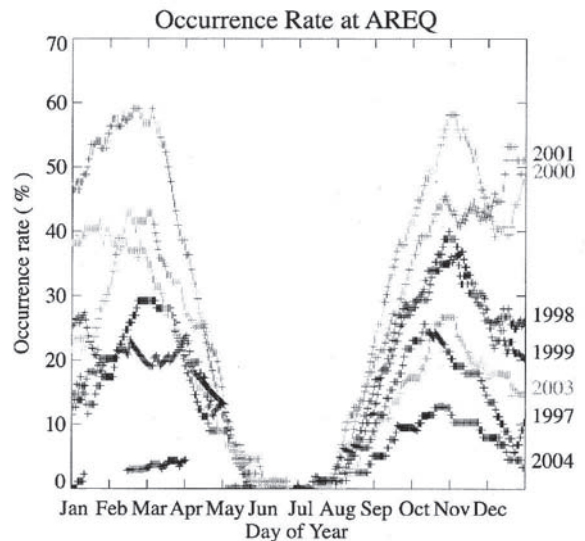


図22 Occurrence rate of plasma bubbles at Arequipa

Arequipaにおける8年間のプラズマバブル発生率<sup>11)</sup>



レッドF) のアレキパ (ペルー) における観測データと比較した結果, 発生状況が, ほぼ同時刻から数十分程度の遅れを伴って対応していた。さらに, 位相変動だけでなく振幅の変動を伴うこと, 発生する時刻や季節, 伝播速度の時間変化などもプラズマバブルの特徴とよく合致する。

今回の解析で使用した電波シーイングモニタは本来,  $300\text{ms}^{-1}$  に及ぶ高速な伝播速度の現象を観測することは意図していない観測装置であるため, 今後, 電波シーイングモニタの間隔をより長くするか, 時間分解能を向上させることにより伝播速度の観測精度の向上を果たすこと, 基線の配置を工夫して移動方向の精密測定も可能とすることなどが望まれる。また, 出現し始めると長時間持続する高速現象は, 単にプラズマバブルのみならず, これに伴う移動性電離圏擾乱 (Traveling Ionospheric Disturbance) を観測していたのかもしれない。よって, プラズマバブルやTIDなどの電離圏の擾乱の観測を絞った観測のために測地用GPS受信機の設置も検討されるべきである。

ALMAサイトは, 地上付近の電波シーイングが大変によく, 電離圏の擾乱が透けて見えてきたようである。これらの同定と対応が急がれる。

## 謝辞

京都大学大学院理学研究科太陽惑星系電磁気学講座の齊藤昭則さんと西岡未知さんには, プラズマバブルに関してレクチャーして戴いた。さらにプラズマバブルの発生日時・発生率に関する解析結果を提供して戴いた。JAXA宇宙科学研究本部の朝木義晴さんには, 高速現象がプラズマバブルへつながる展開の端緒を示された。国立天文台水沢VERA観測所の佐藤克久研究技師には, 観測方法, 解析結果の解釈と電離圏に関することについて有意義な議論を戴いた。ALMAサイト調査チームには標高4800mサイトでの機器の設置・保守・データ回収に協力戴いた。

ここに記して, 深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) H. Ishizaki and S. Sakamoto: Velocity and structure function of phase screen aloft Chajnantor. *ALMA Memo*, No.529 (2005). <http://www.alma.nrao.edu/memos/>
- 2) S. Halles, R. Hills, Y. Robson, J. Richer, G. Delgado, A. Otarola and S. Radford: Investigation of Anomalous Fast Phase Fluctuations in the Site-Test Interferometer Data from Chajnantor, *ALMA memo*, No. 459 (2003). <http://www.alma.nrao.edu/memos/>
- 3) M. A. Holdaway, and S. J. E. Radford: Options for placement of a second site test interferometer on Chajnantor, *ALMA Memo*, No. 196 (1998). <http://www.alma.nrao.edu/memos/>
- 4) 高橋富士信, 近藤哲朗, 高橋幸雄: VLBI 技術, (株) オーム社, 24-26 (1997).
- 5) S. Sakamoto, K. Handa, K. Kohno, N. Nakai, A. Otarola, S. J. E. Radford, B. Bulter, and L. Bronfman: Comparison of Meteorological Data at the Pampa La Bola and Llano de Chajnantor Site, *ALMA Memo*, No. 322 (2000). <http://www.alma.nrao.edu/memos/>
- 6) 三上直樹: はじめて学ぶデジタル・フィルタと高速フーリエ変換, CQ 出版 (株), 74-78(2005).
- 7) B. C. Kuo: *AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS*, SECOND EDITION, PRENTICE-HALL, INC, 39-42 (1967).
- 8) 宮本健郎: 光学入門, (株) 岩波書店, 26-30 (1995).
- 9) 丸山 隆: 4. 電離圏・熱圏, 4-1 電離圏不規則構造, 通信総合研究所季報, 48 No. 3 143-156 (2002). <http://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihoh.htm>
- 10) M. C. Kelley and R. A. Heelis: *The Earth's Ionosphere : Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic Press, Inc., 113-185 (1989).
- 11) 西岡未知: 私信(2005).
- 12) 佐藤克久: 2 周波数測位GPS 受信機生データ解析による電離圏全電子数の推定について. <http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/hisa/gpstec.html>