

## 4 電離圏・熱圏

### 4 *Ionosphere and Thermosphere*

#### 4-1 電離圏不規則構造

##### 4-1 *Ionospheric Irregularities*

丸山 隆

MARUYAMA Takashi

##### 要旨

電離圏不規則構造は衛星電波のシンチレーション障害の原因となる。特に、磁気赤道付近の低緯度で夜間に発生するプラズマバブルは、Lバンドの電波に対しても20dB以上の受信信号レベル変動を引き起こすことがある。このようなプラズマバブルの発生を予測するためには、その発生機構を解明する必要がある。また、前駆的に発生する現象がとらえられれば、予測に大いに役立つ。シンチレーション障害発生の予測を目指して、解決しなければならない課題について述べるとともに新たな観測的アプローチにも触れる。

Ionospheric irregularities cause scintillations of trans-ionospheric radio waves from satellites. Most severe cases are the scintillations due to plasma babbles at low latitudes near the magnetic equator, which results in fluctuations of L-band radio signals by 20 dB or more. For the prediction of onsets of plasma bubbles, investigation of a physical mechanism is indispensable. Also precursory phenomena of bubble onsets will be valid for the prediction. This article describes outstanding problems for the prediction of severe ionospheric scintillations and an ongoing observational approach in CRL.

##### [キーワード]

シンチレーション, スプレッドF, プラズマバブル  
Scintillation, Spread F, Plasma bubble

#### 1 はじめに

GPS衛星などで用いられている数GHz以下の周波数の電波にとって、磁気赤道を挟んだ低緯度地域に発生する電離圏不規則構造(赤道スプレッドF)は少なからず伝搬障害の原因となる。電子密度分布の空間的不規則性は、電波の位相を乱し、隣接した異なった位相の電波の干渉(フレネル回折)によって受信点では電界強度の不規則な変動を引き起こす。これがいわゆる電離圏シンチレーションと呼ばれる現象である。特に、赤道スプレッドFによるシンチレーションは強

度が強く、いったん発生するとL帯でも20dBを超える例もある(例えばKil et al.(2000)、図1)。強いシンチレーションは衛星信号のロックオフにより情報の欠落や位相追尾切断(phase slip)を引き起こすため、赤道スプレッドF発生機構の研究は衛星電波障害の発生を予測するために重要な課題である。同時に、プラズマ不安定、ダイナモ作用、熱圏-電離圏結合といった電離圏研究の基礎科学的な要素を幅広く含んだ課題でもある。本稿では、シンチレーション発生の予測にとって不可欠な基礎科学的側面を中心に赤道プラズマ不安定について述べる。

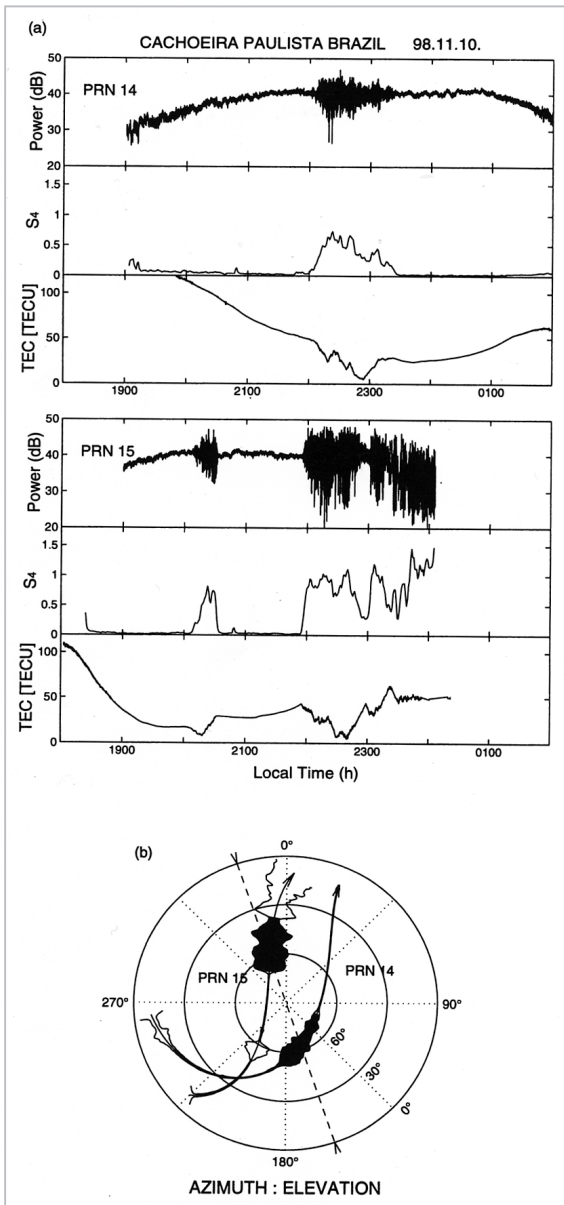


図1 GPS衛星電波のシンチレーションと全電子数の変化 (Kil et al.)

## 2 これまでの知見

### 2.1 スプレッドF

スプレッドFの形態学的な研究はIGYの時代までさかのぼるが、当時得られたデータのほとんどはイオノゾンデによるもので、当然、陸地の上に限られ、地球上の観測点の分布は極めて偏在したものであった。データの不足とスプレッドFを引き起こす基本的な機構が未解決であるということがあいまって、当時としては赤道域と中高緯度を明確には意識していなかった。

しかし、それぞれの観測点で固有の季節変動特性のあることは知られていて、Shimazakiあるいはその他の研究者はスプレッドF発生の変動から各観測点を夏型と冬型に二分し、スプレッドF赤道 (spread F equator) を引いた (図2)。すなわち、spread F equatorの南では6月に、北では12月に発生頻度が高くなる。データの多くは中緯度に集中しており、中緯度での振る舞いがそのまま赤道地域にまで拡張されるとみなされていた。Spread F equatorの考え方は、暗に磁気赤道と地理赤道のずれがスプレッドF発生機構に大きく関与していることを示唆しているが、赤道地域において、磁気赤道のずれはスプレッドFの発生に重要な意味を持たないと分かるまで多くの年月を費やした。

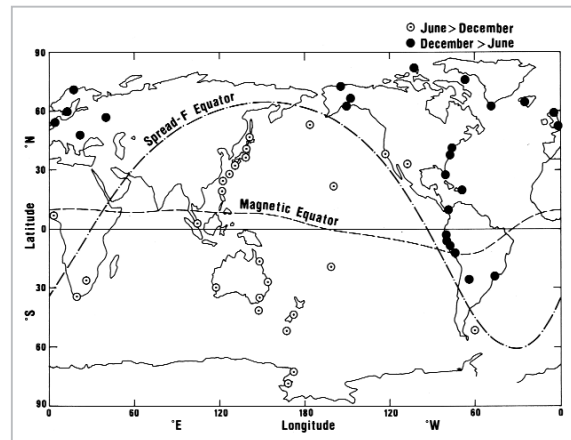


図2 スプレッドF赤道 (Shimazakiより再構成)

スプレッドFの語源はイオノグラムの上でF層からの反射トレースが広がる (spread) 現象として使われたことにあり、通常の反射トレースから読み取るF層臨界周波数 (foF2) の読取精度劣化を示す説明記号としての意味合いが強い。トレースの広がりや原因はサウンディング電波の鏡面反射によるエコーの得られる条件が複数点で成立することであり、研究者はこれを電離圏構造の空間的不規則性の指標として解析してきた。しかし、foF2の数値に付けられたF記号には明確な基準がなく、読取者の主観の入り込む予知があった。したがって、異なる観測所では異なる基準が用いられ、そのことが、不規則構造発生グローバルな比較解析を困難にした。

上に述べた spread F equator のアイデアは苦肉の策であったと想像される。

### 2.1.1 シンチレーション

スプレッドFは電離圏不規則構造によるもので、同じ不規則性による電波現象として衛星電波のシンチレーションがある。すなわち、foF2をはるかに超えるVHF帯あるいはマイクロ波帯の電波は電離圏中で電子密度に応じた位相の進みを受ける。不規則性により位相の乱れが生じると地上に達した電波は干渉(Fresnel diffraction)により強度変動を呈する(図3)。シンチレーションによる信号強度の変動はスプレッドFに比べれば客観的かつ統計的な扱いが容易である。また、シンチレーション観測装置は比較的簡便であるから、観測に使える衛星数の増加とあいまって、データ量も増加し統計解析の信頼性が上昇した。

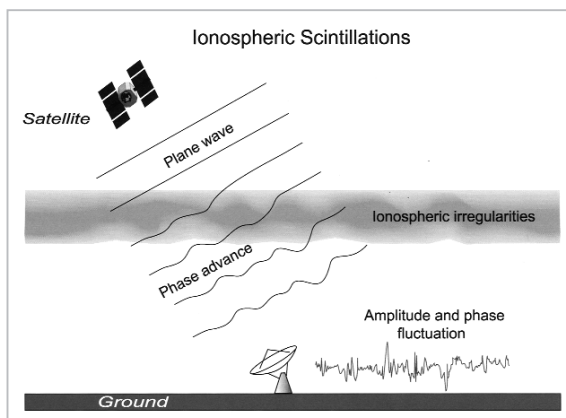


図3 電離圏シンチレーション

### 2.1.2 トップサイド・サウンディング

電離圏研究における衛星の活用は、不規則構造の研究においても数多くの成果を残している。イオノゾンデを搭載した Alouette, ISIS の一連の衛星によりスプレッドFがボトムサイドだけの現象ではなく、F層ピークより上方でも存在し、赤道と極域での発生頻度が高く、中緯度では極小を取ることが明瞭に示された。トップサイドスプレッドFの観測は新たな疑問を投げかけることになる。不規則構造の形成機構の有力な候補の一つとして、Rayleigh-Taylor不安定が並んでいたが、この機構では重力の方向と電子密度勾配が反平行になる必要があり、電離圏下端での不安定性しか説明できない。しかし、図4にみ

られるように、地上観測と衛星観測で得られたスプレッドF発生頻度の緯度変化や地方時変化などの形態的な特徴はほとんど同じものである(Calvert and Schmid, 1964)。同時にスプレッドFは赤道と他の緯度では明らかに発生形態が異なり、緯度で不安定性の機構が異なることが示唆された。以下、本稿では赤道スプレッドFに限定して述べることにする。

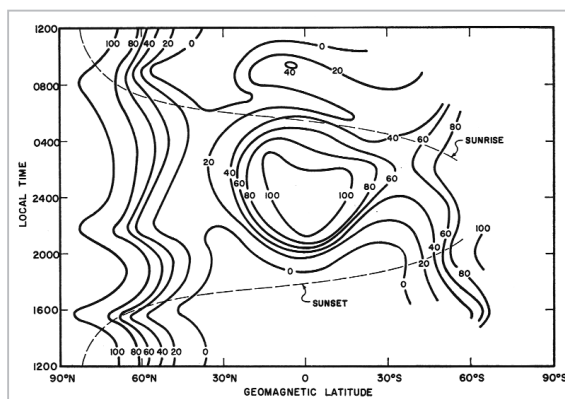


図4a Alouette衛星によるトップサイドスプレッドF

(Calvert and Schmid)

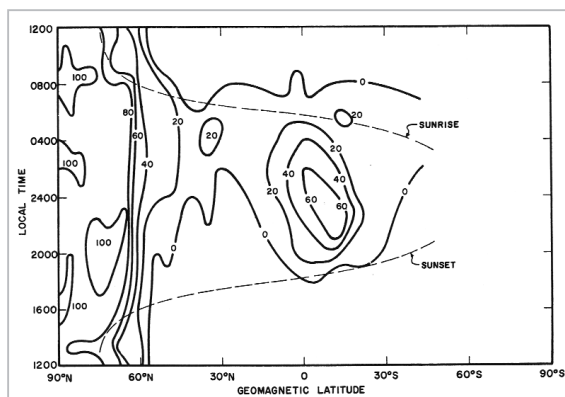


図4b 地上観測によるスプレッドF

(Calvert and Schmid)

### 2.1.3 レーダー観測

衛星と並んで、電離圏研究の強力な手段に非干渉性散乱レーダー(ISレーダー)がある。ISレーダーでは電離圏の個々の電子からの散乱信号を観測するが、この信号は極めて微弱であるから大型の施設を必要とする。しかし、磁気赤道に位置するPeruのJicamarcaでは鉛直方向を向いたレーダービームが磁力線と直交するため、IS観測中にスプレッドFが発生すると、不規則性

からの干渉性散乱により IS レベルより 40 dB 以上も強い信号が入り観測の障害となる。この干渉性エコーの散乱源は先の衛星によるスプレッド F と同様に F 層ピークの上下でほぼ同時に発生する。Haerendel (1973) はこのことを Rayleigh-Taylor 不安定で説明するため、電子密度勾配として局所的な鉛直方向の値ではなく、磁力線に沿って積分した磁気フラックス中の全電子数について L-shell 方向の勾配を考えた。上空に行くにつれて積分する磁力管の長さが長くなることによって、積分電子数の値は F 層ピークよりはるかに上方で最大値をとる。そのため、局所的なパラメータについてみれば安定な F 層ピークより上方でも、積分電子数でみれば重力に対して不安定であることを示した。Haerendel の考え方はその後、赤道スプレッド F 発生頻度の季節-経度特性の説明モデル (Maruyama, 1984) に発展したが、この問題の本質的な解決は Woodman and LaHoz (1976) の仕事でなされた。

## 2.2 プラズマバブル

赤道電離圏不安定の原因として幾つもの機構が検討された中で、Rayleigh-Taylor 不安定がスプレッド F 発生の多くの特徴を説明できるものとして有力視されるようになってきたが、唯一、F 層ピークの上下で同時に発生することが謎であった。Woodman and LaHoz (1976) は Jicamarca での電離圏 IS 観測の障害となるスプレッド F による強い信号を、ダイナミックレンジを広げて、

距離-時間-強度 (RTI) の二次元ダイアグラムに処理した。時間及び強度分可能の向上によって現れたのは電離圏下端に発生した不規則構造が数分の間に上昇、F 層ピーク高度を通過して 1000km の高さに達するダイナミックな過程である (図 5)。レーダーで直接観測されているのは、磁力線に沿った不規則構造 (FAI) からブラッグ散乱によって返ってくる信号であり、磁力線と直角方向の送信周波数の 1/2、すなわち 3メートルの構造成分に対応している。通常、このような不規則構造は電離圏中で直接的に形成されることはなく、より規模の大きな電子密度急勾配が存在するとき二次的な (スケールの大きな電子密度勾配を作る不安定性を一次的とすれば) プラズマ不安定によって作られる。Woodman and LaHoz はダイナミックなエコーマップから Rayleigh-Taylor 不安定性の非線型的な発達を考え、電離圏の低密度部分が下部から上昇する過程で周囲との密度差が十分に発達すると低密度領域は泡となって背景の密度勾配 (上部電離圏では下向き) いかんによらず上昇を続けると考えた (図 6)。いわゆるプラズマバブルである。

彼らの研究に引き続き、レーダー観測では強い不規則構造だけが見えていたプラズマバブルは、図 7 に示すように、実際に数 10km 程度の規模で電子密度が 2 桁以上急激に減少する領域として衛星により直接観測された (McClure et al., 1977)。さらに、コンピュータシミュレーションによるバブルの非線型的な発達、光学観測によ

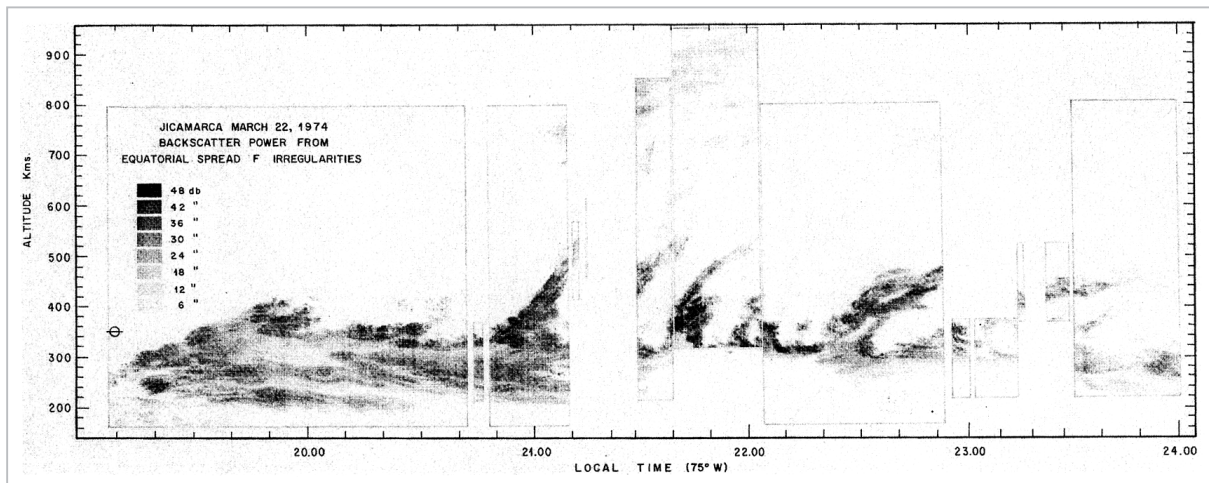


図 5 Jicamarca レーダーによるスプレッド F (Woodman and LaHoz)

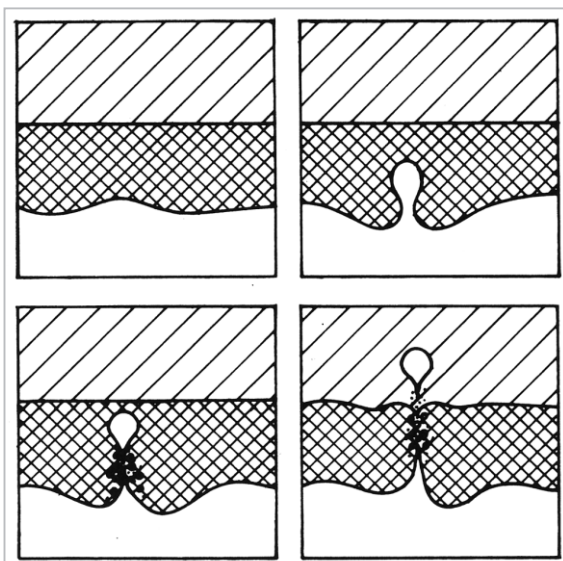


図6 プラズマバブルの概念 (Woodman and LaHoz)

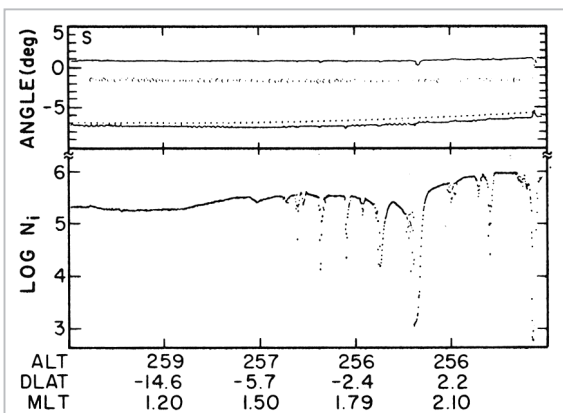


図7 衛星直接観測によるプラズマバブル (McClure et al.)

る大規模な低電子密度領域の観測などが相次ぎ、研究は急加速された。

### 2.3 Rayleigh-Taylor 不安定

第8図に磁気赤道での電離圏下端におけるプラズマ不安定を模式的に示す。磁気赤道では磁力線は水平で北向き、また、F層のプラズマは拡散によって磁力線方向に均一であると近似できるから、赤道を含む鉛直東西面の2次元近似が有効である。図では、電子とイオンに働く重力の差によって発生する東向き電流が示されている。いま、電離圏下端に何らかの原因によりわずかな密度の揺らぎ、したがって等電子密度面のうねりが発生したとする。先の電流はイオンが運

ぶためイオンと電子とでは等密度面にずれが生じて局部的にプラスあるいはマイナスの電荷がたまり、局所電場が発生する。この局所電場は低密度領域で東向き、高密度域で西向きであるから、局所電場によるE×Bドリフトは低密度部分で上向き、高密度部分で下向きとなり密度揺らぎは増幅されることになる。すなわちプラズマ不安定性である。詳しい導出過程は省略するが、線型近似が成り立つ範囲で、不安定性の成長率(γ)は次のようになる。

$$\gamma = -\frac{g}{\nu_{in}} \frac{1}{n_{i0}} \frac{\partial n_{i0}}{\partial y} \quad (1)$$

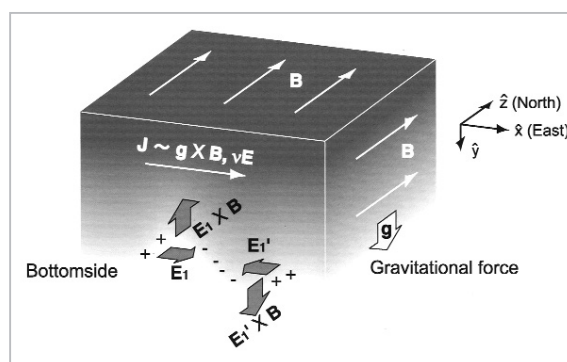


図8 Rayleigh-Taylor 不安定

ここで、gは重力加速度、 $\nu_{in}$ はイオンと中性大気粒子との衝突周波数、 $n_{i0}$ は背景の電子密度、y軸は鉛直上向きを正にとっている。この式は、重力と電子密度勾配とが反平行(右辺のマイナス符号)、すなわち電離圏下端で成長率が正になり、その大きさは密度勾配に比例することを表している。F層ピークより上では密度勾配が逆であるから、揺らぎは成長せず安定となる。F層下端の密度勾配は日没後に電離反応がなくなると最下部での電子とイオンの再結合によって急速に急峻になる。そのため、プラズマバブルは本質的に夜間の現象である。次に重力による効果をみると、分母にイオン-中性大気粒子の衝突周波数がくる。これは中性大気の鉛直分布によって決まり、上方ほど小さく、したがって電離圏は層が高いときほど不安定になることが分かる。

ここまでは、重力による電流を考えたが、他の原因による電流であっても不安定性の発達はまったく同様である。ダイナモ作用による東向き電場のペダーセン電流あるいは下向の中性大気

風で中性大気粒子とイオンの衝突による効果も数式的にはほぼ同じ取扱いになる。ペダーセン電流を含めた場合の不安定性成長率は以下のようになる。

$$\gamma = - \left( \frac{E_0}{B} + \frac{g}{v_{in}} \right) \frac{1}{n_{i0}} \frac{\partial n_{i0}}{\partial y} \quad (2)$$

新しく加わったペダーセン電流による項は、電場が東向きときに不安定性成長率が正になる。同時に、この電場は  $E \times B$  ドリフトにより層を上方に押し上げる。すなわち、東向き電場はペダーセン電流項とともに層を上昇させることによって重力項を増大させ、相乗的に電離圏不安定に寄与する。この効果が最も大きくなるのは、日没直後に東向き電場が強まる (evening enhancement) 時間帯である。

## 2.4 Evening enhancement

赤道電離圏の  $E \times B$  ドリフトによる運動は、おおむね、日中は上向き、夜間は下向きである。この電場は E 領域の中性大気風によるダイナモ作用で作られる。夕方、ドリフト方向が逆転する直前に上向きドリフト速度が 1, 2 時間の間増加することがある。これを、赤道電離圏電場の evening enhancement あるいは prereversal enhancement と呼ぶ。Evening enhancement の本質は F 層を吹く中性大気風によるダイナモ作用と日没による E 層電気伝導度の急激な変化による効果であることが分かっている。第 9 図は F 層ダイナモを簡略化して説明したものである。夕方付近の赤道 F 層高度での中性大気風 (熱圏風) は東向きである。東向きの中性粒子の運動は衝突によりイオンだけを上方にドリフトさせるが、電荷分離で発生した電場は電気伝導度の高い磁力線を介して E 層まで投影される。しかし、F 層ダイナモは内部抵抗の大きい定電流源であるから、日没前はペダーセン伝導度の高い E 層によって容易に短絡される。夜間は E 層電子密度の低下によって伝導度が低下し、F 層において下向きの電場が発生し、この電場によるプラズマの  $E \times B$  ドリフトは熱圏風と同じ方向となる。この昼と夜の二つの状態の境目のところで、F 層ダイナモ効果による電場が E 層内における東西方向の電気伝導度分布の不均一性が原因となって、

電荷分離を生じさせる。その結果現れる電場は逆に F 層に投影され、境界の西側で東向き、東側で西向き、すなわち電場ドリフトの反転の直前に東向き電場が強まる。

実際の電離圏では、イオン密度、衝突周波数ともに高度変化し、磁力線に沿って投影される E 層の状態は緯度とともに変化する。その結果、単純な上下ドリフトの変化のほかに東西ドリフトの変化が加わり鉛直赤道面内で渦運動をしていることが最近の研究で分かりつつある。後に述べるが、この渦構造がプラズマバブル発生に重要な役割を担っている可能性が指摘されている (Maruyama et al., 2002)。

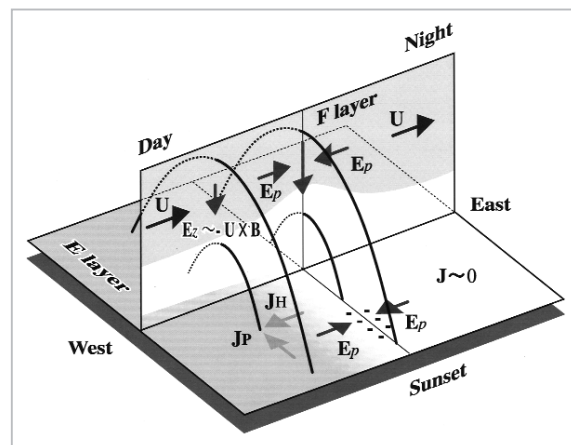


図9 F層ダイナモによる赤道電離圏電場の evening enhancement

### 2.4.1 観測

Evening enhancement は幾つかの方法で観測することができるが、最も信頼性の高いデータは IS レーダー観測によるものである。これは個々の電子からの散乱信号のドップラー速度を観測するものであり、電子密度が一定の値以上あれば、ドリフト速度の高度プロファイルを得ることができる。しかし、赤道上の IS レーダーは Jicamarca が唯一であり、しかも Peru は磁気赤道が大きく南にずれた場所であるから、必ずしも一般的ではなく、他の経度でも同じような振る舞いをするとは限らない。

低軌道の周回衛星にイオンドリフトメーターなどのセンサーを搭載した直接測定では全経度を観測できる利点はあるものの、軌道面の回転の特性から、地方時変化と季節変化を分離する

ことが難しい。より簡便な方法としては、イオノゾンデによるF層高度変化から推定するものがある。しかし、F層高度は電離圏の運動のほかに電離生成と消滅の化学反応によって決まるので、その効果を差し引く必要がある。さらに、直接の観測量である見かけ高度( $h'F$ )には下層部分の電子密度分布によって伝搬遅延効果が含まれる。したがって、一般的には電場ドリフトを抽出することは難しいが、日没直後に電離圏の下端が急速に消滅し、かつF層が一定の高度以上にある場合に限り化学反応効果と遅延は無視できるので、 $h'F$ の時間微分が $E \times B$ ドリフトを反映していると考えて差し支えない。

多様な観測結果を総合して明らかになったことは、evening enhancementが極めて大きく変動することである。すなわち、太陽活動度と強い相関があり、活動度極大期には強まり、数10m/sになるのに対して、極小期にはほとんど消滅する。また、経度毎に異なった季節変動を示す。その変動は強さだけでなく、ピークの地方時も変化する。Jicamarcaの例を図10に示すと、太陽活動度極大期の春分及び秋分時に最もピークのドリフト速度が大きく、ついで12月に大きなenhancementとなるが、7月には弱まる(Fejer et

al, 1979)。

### 3 残された課題

前章において、衛星電波に強いシンチレーションを引き起こす赤道スプレッドFがRayleigh-Taylor不安定の非線型的な発達で形成されるプラズマバブルであることを述べた。しかし、他の宇宙天気の課題同様、基本的な物理機構が分かっただけで、プラズマバブルの発生を事前に予測することは不可能である。以下では発生予測を可能にするには、何が未解決な課題であるか論ずる。予測の手法としては様々なレベルが考えられようが、最も初歩的な段階として、統計的な振る舞い(morphology)を可能な限りのパラメータについて明らかにすることは、プラズマバブルの発生確率を与えるのみでなく、発生をコントロールしている諸現象を探る上でも有意義である。

#### 3.1 季節-経度特性

点在する地上観測点のデータから、赤道スプレッドFあるいはプラズマバブルが季節変動を示すことはIGYの時代から大略は分かっていた(図2)。これがグローバルな視点で明瞭に示されたのは衛星観測による。特に、季節と経度とが系統的に発生をコントロールしていることを示したのはISS-b衛星によるトップサイドサウンディングが最初である(Maruyama and Matsuura, 1984)。それまで、観測点の偏在から、赤道スプレッドFの経度特性をコントロールしているのは磁気赤道と地理赤道の南北へのずれであるとの見方があった。しかし、衛星観測の結果、磁気赤道が地理赤道を横切る経度付近で東側と西側の赤道スプレッドFの発生季節特性にはまったく違いのないことが分かった。皮肉なことに、二つの赤道の交叉地点は大西洋と太平洋の中央部分にあり、周辺に観測拠点が欠けていたため長年単純な形態が分からずにいたのである。

図11に一点鎖線で示すように、磁気赤道は南米で最も南にずれ、大西洋の真上で地理赤道を横切り、アフリカ大陸では北へずれる。別の見方をすれば、磁気偏角が二つの赤道の交叉地点で最も大きくなり、大西洋上では約20度西に傾

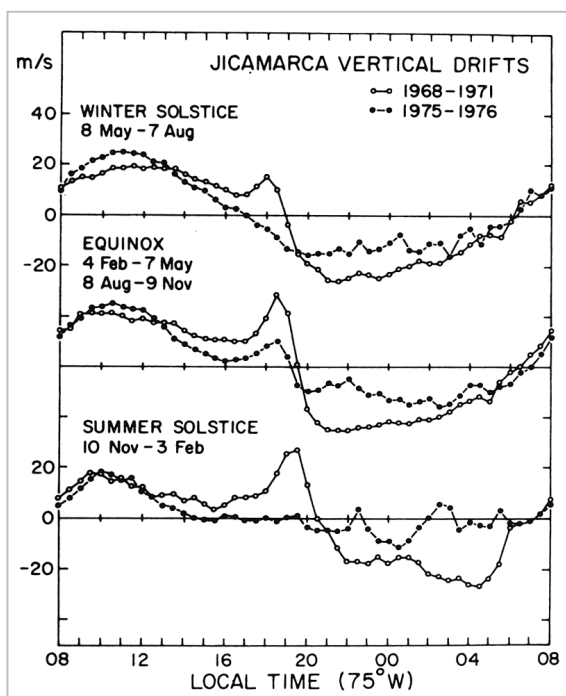


図10 磁気赤道における電離圏鉛直ドリフト

(Fejer et al.)

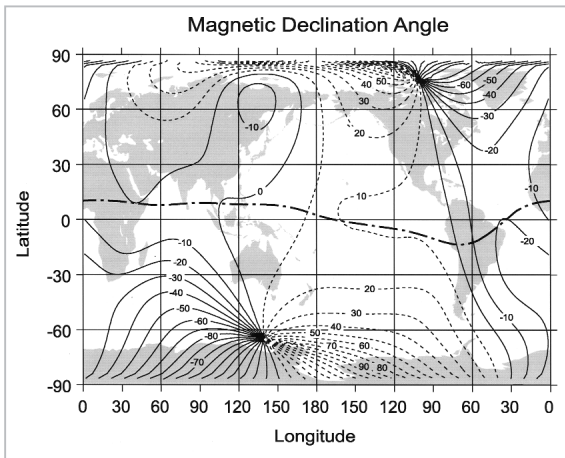


図 11 IGRF モデルによる磁気偏角

く。この経度では赤道スプレッドFあるいはプラズマバブルは北半球の冬(12月)に極大となり、夏(6月)に極小となる(図12)。これと対照的なのが太平洋の上で、経度が西から東へ移るにつれて磁気赤道は北から南へ地理赤道を横切る。そこでは磁気偏角が最大で約15度東へ傾く。プラズマバブルの発生も対応して北半球の夏(6月)に極大、冬(12月)に極小となる。これに対して、インド洋付近からアジアにかけては磁気赤道は地理赤道にはほぼ平行して10度北を走っている。そのため磁気偏角は小さく、磁気子午面は南北を向いている。対応するプラズマバブルの発生

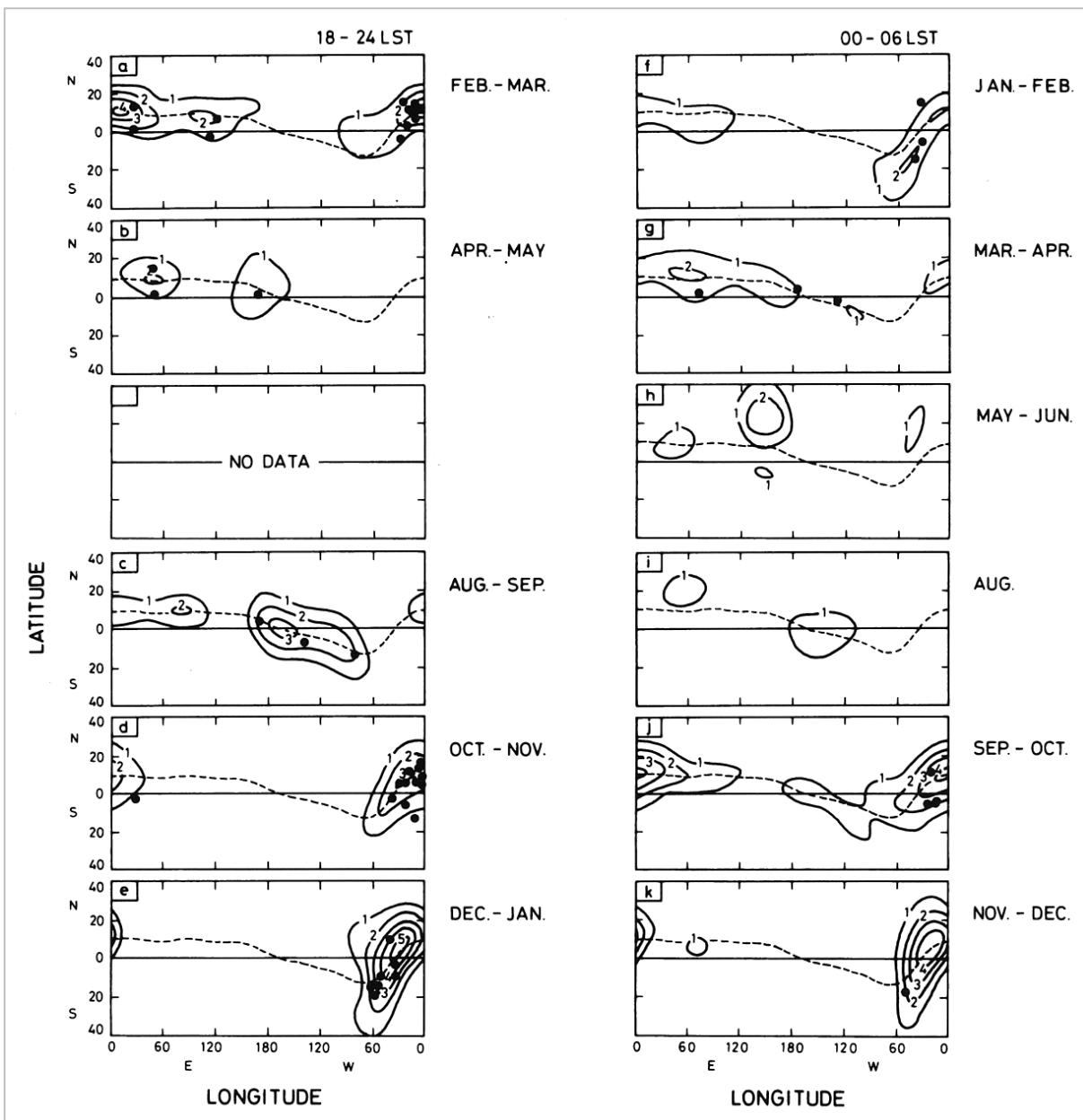


図 12 衛星観測によるトップサイドスプレッドFの季節-経度変動 (Maruyama)



は、春分と秋分を中心に年に2回の極大を示す。

しばしば宇宙空間はプラズマの実験室に例えられる。実験パラメータが制御できる実験室に対して宇宙空間はパラメータの制御ができないのであるが、季節あるいは経度によって大気パラメータが系統的に変化することを利用すれば、様々なパラメータ条件の下での電離圏不安定の有無を調べることができる。したがって、季節-経度特性は単に統計的にシンチレーション発生確率を与えるだけでなく、電離圏不安定を制御している機構を探る上で重要な意味がある。上に述べたように経度によって季節特性が変化するのが磁気偏角の違いによるものとすれば、季節によって変動するパラメータとして、熱圏風のパターン変化が考えられる。日没直後のF層高度の熱圏風はほぼ東向きで、これに夏半球から冬半球に向かう季節成分が加わる。春分及び秋分には季節成分が消えると考えれば、磁気偏角が小さい経度で風のベクトルと磁気子午面とが直交する。言い換えれば、磁気子午面にプラズマを磁力線に沿って動かす風成分がなくなる。Maruyama (1988) の計算では、熱圏風が磁気子午面に強い南北成分を持つ場合、風下の半球で電離圏高度が低下し、ペダーセン導電率が上昇する。Rayleigh-Taylor不安定はF層下部に発生する分極電場が重要な役割を果たすので、この電場が磁力線を介して赤道から離れた低高度のF層あるいはE層で短絡されると不安定性が抑えられる。不安定性成長率の計算結果は数値的にもプラズマバブル発生の変化を十分に説明できる。実際に、ISS-bのトップサイドイオノグラムから求めた衛星高度の電子密度分布は、プラズマバブルの発生が少ない季節及び経度で強い南北非対称を示し、赤道横断風の不安定性抑制効果を裏付けている。

Mendillo et al. (1992) は統計的な季節-経度変動を説明するために導入された赤道横断熱圏風の不安定性抑制効果が、次に述べる日々変動の説明にも適用できると考えた。この考え方に基づき、大気夜光強度の緯度変化を解析し赤道横断風の有無とシンチレーションの観測を結び付けることができた。ところが、別の観測では両者の間にはほとんど関連がないとされ、赤道横断風のプラズマバブル発生抑制の有無はまだ結

論に達していない。統計的ではなく、個々のイベントごとに熱圏大気風と不規則構造発生との対応を調べる必要がある。Abdu et al. (2001, private communication) はブラジルで磁気共役点に各種の観測機を設置し、熱圏とプラズマの双方の観測を進めている。

### 3.2 日々変動

プラズマバブルの発生は、統計的に活動度が高い経度、季節条件であっても、日々変動が大きいのが特徴である。理論から示されたバブル発生的重要条件であるプラズマ鉛直ドリフトのevening enhancementも同様に大きな日々変動を示す。それでは、バブル発生の変動がevening enhancementの変動に帰結できるとすれば、日々のプラズマ鉛直ドリフト速度と赤道スプレッドFの間に良い相関が見られるはずである。しかし、Abdu et al. (1983) によれば図13に示したように二つの間の相関は緩く、バブル発生の際限値は存在しないと見るのが正しい。すなわち、evening enhancementの日々変動以外にバブルの発生をコントロールしている機構が存在する。この問題を解決することが、すなわち赤道スプレッドFの発生予知の大きな鍵を握っている。既に述べたように、赤道横断風の不安定性抑制効果は日々変動要因の重要な候補である。

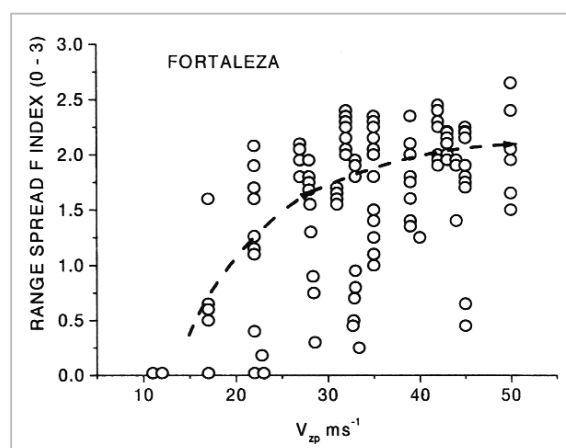


図13 赤道スプレッドFの発生と鉛直ドリフト速度

(Abdu)

次の日々変動要因の候補は以下に述べるバブル発生タイミングの中にあると考えられる。

## 4 バブル発生のタイミング

Rayleigh-Taylor 不安定の理論から説明の付け難い問題の一つにバブル発生の詳細なタイミングがある。理論では、電離圏が不安定になるのは、強い東向き電場、高い電離層高度の条件が満たされたときである。電場と層高度とは無関係ではないので、電離層高度の変化からみると、層が上昇して最高高度に達する直前(電場が東向きで、層高度が高い)が最も不安定である。電場の向きの逆転によって  $E \times B$  ドリフト不安定の項は不安定性を抑制する働きとなる。しかし、観測では層高度が逆転した後に新しいプラズマバブルが発生する例が、少なからずある。

Kelley et al. (1981) は Jicamarca のレーダー観測で得られたバブル発生の詳細なタイミングを解析した。彼らは東向きに進む大気重力波の位相速度がプラズマの東向きドリフト速度と一致すると空間共鳴を起こし、層高度の変動が極めて大きくなることを示した。さらに、東西方向の強い電子密度勾配のもとに中性大気粒子とイオンの衝突による不安定項を考慮した場合、層高度が下降する際に不安定性成長率が大きくなることを示した。観測点の上空で層高度が下降に転じるとき、東進波動では西側の層高度が低く東が高い状態となり、同一高度では西向きの電子密度勾配ができる。日没後の熱圏大気風は東向きで、衝突による力は電子密度勾配と反平行であるから、重力による不安定性と全く同じ状況となる。すなわち、日々変動要因の候補として、大気重力波による seeding が挙げられる。

Kelley et al. の解析した例では層高度の変動が通常の evening enhancement と異なり、2 サイクル以上にわたって上下していることと、近接した Huancayo の電離層データに位相のずれた同様な層の上下運動が観測されていることから波動現象であることは疑いが無い(図14)。しかし、波動と明確に同定できない、通常の evening enhancement の場合であっても、層高度の下降中にバブルが発生する。Evening enhancement は1-2時間の時間構造であるから、現象が地方時に固定して西に移動すると仮定し空間スケールを考えると、1500-3000 km となり、大気重力波の場合のような急峻な東西方向の電子密度勾

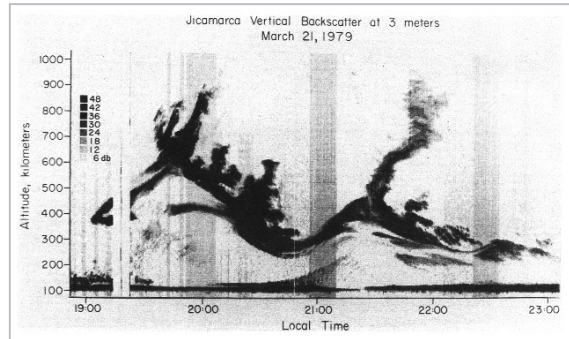


図14 空間共鳴による赤道電離圏高度の変調 (Kelley et al.)

配は期待できない。Maruyama et al. (2002) は赤道スプレッド F が発生したときに同一子午面内にある緯度のわずかに離れた2地点で層高度の振る舞いが異なるケースを見いだした。これら2地点でのプラズマ上下動を磁力線に沿って磁気赤道に投影すると、ある高度を境に鉛直ドリフトの方向が逆転すると結論した。F層高度のプラズマは磁力線直角方向に非圧縮性であるから、東西方向のプラズマドリフトを同時に考慮する必要がある。そこでドリフトの地方時変化とある瞬間の経度変化(空間構造)とが等価であるとして、図15に示すようなドリフトの渦構造を仮定した。東西ドリフトのシアアが時間と共に降下するならば、シアアの下部では遅い時間(LT)の低高度、すなわち低電子密度領域がシアアに沿って西向きに、シアアの上部では全く逆に高電子密度領域が東向きにドリフトする。その結果、鉛直方向の電子密度勾配が急峻となり不安定性成長率は大きくなる。シアア上部の高密度領域

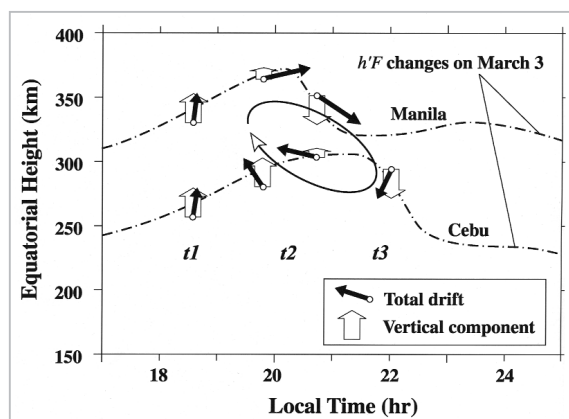


図15 イオノゾンデ観測から推定されるプラズマの渦運動

(Maruyama et al.)

を観測すれば、層高度の下降中にバブルが発生することになる。

Evening enhancementに伴う plasma vortex と Rayleigh-Taylor 不安定の関係は、仮説の段階であり、今後の観測研究によって確認する必要があるが vortex そのものは近年注目されている電離圏現象で、Jicamarca での新しい観測によって詳細な構造が分かりつつある (Kudeki and Bhattacharyya, 1999)。また、理論研究によっても vortex を再現するまで至っている (Haerendel et al., 1992)。しかし、vortex が本質的に evening enhancement の詳細な構造の一部であるか、常に存在するのかなど未解決な課題である。最後の日々変動要因候補は evening enhancement に伴う vortex である。

#### 4.1 解決すべき課題のまとめ

赤道スプレッド F あるいはプラズマバブルの発生は統計的には季節-経度特性、地方時特性、電離層高度との相関は分かったが、大きな特徴である日々変動の機構を解明することが、シンチレーション発生予測の鍵である。これまでの研究で残された課題をまとめると、

- 赤道横断熱圏風の Rayleigh-Taylor 不安定抑制効果
- 東進大気重力波とプラズマの空間共鳴による東西電子密度勾配
- Plasma vortex による鉛直電子密度勾配

これらに加えて、Rayleigh-Taylor 不安定の大前提である電離層高度の上昇、すなわち evening enhancement の変化予測を可能にすることが重要である。

上に述べた課題を解決するには、多くの現象を集めて統計的に解析する手法はほとんど無力で、個々の事象ごとに同時に様々な物理量を観測しなければならない。次の節では通信総合研究所で現在計画されている観測計画を紹介する。

## 5 観測計画

### 5.1 赤道横断風効果

地上から熱圏大気風を測定するには一般に光学的手法によるが、気候条件にも左右され必ずしも容易ではない。さらに、考えている緯度範

囲が磁気赤道を挟んで  $\pm 10$  度に及ぶため、複数の観測点が必要となる。熱圏大気風は電子密度高度プロファイルの変動を通じて間接的に不安定性抑制に効いてくるのであるから、必ずしも風を直接測定する必要はなく、赤道横断風によって生じる磁気赤道を挟んだ南北非対称性を観測する方法が考えられる。我々の計画では、同じ磁気子午面に位置する磁気共役点にイオノゾンデを設置し、電離圏高度変動を観測する。同時に GPS 衛星電波を受信し、全電子数 (TEC) を観測する。赤道横断風では風上の電離圏は磁力線に沿って上昇、風下では下降するため、日没後に下部電離圏が再結合によって希薄になった後はイオノグラムから直接読み取れる  $h'F$  の比較によって風を推定することができる。同様に TEC にも南北非対称性が顕れるが、南北間のプラズマ移送及び再結合の効果によって、風と TEC 南北非対称との関係は赤道からの距離にも依存し単純ではない。これにはモデル計算等を併用して赤道横断風効果を推定する。磁気共役点と同時に磁気赤道上でのイオノゾンデ観測からは鉛直ドリフトを推定することができ、磁気共役点でのデータ解釈の支援となる。また、磁気赤道では風の効果によって TEC の南北勾配が作られると考えられる。イオノゾンデ観測では、スプレッド F トレースから不安定性発達の有無が確認できる。さらに、GPS 衛星を用いたシンチレーション観測を行う。

磁気共役点観測を計画する場合、地球上の全経度をみても実施可能な地点は非常に限られる。南米のブラジルでは磁気赤道の北側はほとんどアマゾンのジャングルで観測に大きな困難が伴う。同様にペルーでは海岸線に沿って磁気赤道の南側に観測点を選ぶと、北側はアンデスの山中になる。インドでは磁気赤道より南は大洋、またアフリカでは砂漠地帯であるから、いずれも磁気共役点の両方に観測拠点を展開することは不可能である。これに対して、東南アジアでは幾つかのチェーンが可能である。我々が着目したのは、東経 100 度の子午面である。磁気赤道はタイの Phuket 島北部を通過しており、南にはインドネシアのスマトラ島、北にはタイ北部に幾つかの都市がある。スマトラ島の Koto Tabang には京都大学の赤道大気観測施設があ

り、この周辺にイオノゾンデを設置する。ここと磁気共役点に近いのが、タイ北部のLampangで、Chiang Mai大学と共同してイオノゾンデを設置する。磁気赤道に近いChumphonにはモンクット工科大学ラカバン(KMITL)のキャンパスがあり、KMITLと共同してイオノゾンデの設置が進んでいる。観測ネットワークの全体像を図16、17に示す。

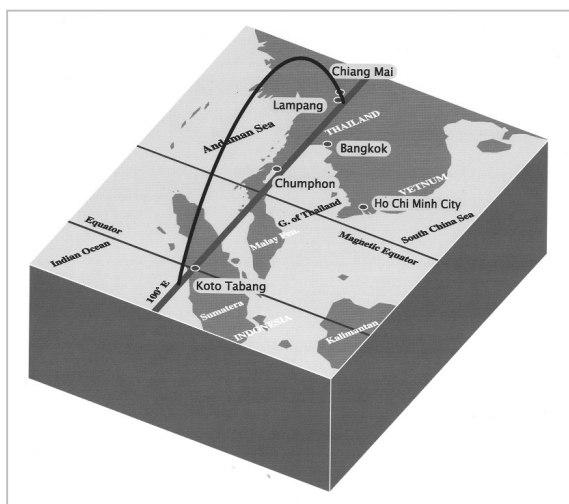


図 16 東南アジアにおける南北共役点観測計画(1)

## 5.2 重力波との空間共鳴

F層ダイナモによる evening enhancement は地球に固定された観測点ではプラズマドリフト速度の時間変化として観測されるが、しばしば、経度方向の空間構造と等価であると仮定される。すなわち日没線 (sunset terminator) の移動とともにプラズマドリフトパターンも移動すると考えられている。この仮定がどれほど正しいのか観測的に確認する必要がある。東進する重力波との空間共鳴が起こると、位相速度は sunset terminator とは反対であるから、二つの効果による層高度の変動は経度によって大きく異なると予想される。先の東経100度のイオノゾンデネットワークを生かして、Chumphon と同緯度のベトナム、Ho Chi Minn での観測が有効である。さらに、フィリピンのセブ島には既に電離層観測機を設置し、サンカルロス大学と共同で観測が開始されている。Ho Chi Minn には電離層観測施設が存在するので、これを支援する形で東西ネットワークを構成し、terminator とともに西進する

構造と波動で東進する構造を分離できると期待している。

赤道上の大規模波動はかつて南西アフリカ Tsumeb とドイツ Lindau の間で HF 帯の赤道横断電波伝搬波の方向探査観測が行われ、この方法が赤道上での電離圏擾乱をリモートセンシングするのに有効であることが示された (Röttger, 1973)。このような実験では複数のアンテナを用いて電波の位相関係から到来角を求めるのが一般的で、そのためには無変調の信号が必要である。国外に赤道横断伝搬観測用の専用送信機を設置するのは、必ずしも容易ではないが、一般向けの短波海外放送の電波が利用できれば比較的容易に目的を果たすことができる。我々は、総務省の協力を得て、千葉県東金市に設置されている電波監視施設にて、オーストラリア Melbourne から送信されている Radio Australia の方向探査実験を行った。この施設は MUSIC アルゴリズムを用いており、すべての変調方式に対応できる。観測結果を図18に示す。

点は1秒ごとの到来電波の伝搬方位を示したもので、日没付近で伝搬方向が大円コースから推定される本来の方向より西に偏り、やがて東側へ移動するのが分かる。続いて新たなモードの伝搬経路が西側に始まり時間と共に東へ移動している。これとは別に、徐々に本来の伝搬方向へ戻るモードもみられる。赤道上の電離圏波動と結び付けるにはレートレーシングなどの手法を併用して解析を進める必要があるが、既存の電波を用いて赤道電離圏の遠隔探査が可能であることが示された。その後、研究観測用に同様な施設を大洗テストフィールドに設置して常時観測体制が整いつつある。Melbourne - 大洗の伝搬路が磁気赤道を横切る地点にミクロネシア連邦共和国のヤップ島があり、ポータブルイオノゾンデを設置し、赤道横断伝搬観測との同時観測を計画している。

## 5.3 Plasma vortex

電離圏高度の変動とスプレッドFを結び付けるきっかけとなったのは、フィリピンのセブ島とその北側にあるマニラの2地点の観測結果であるが、両者は緯度で5度、それぞれの地点を含む磁気子午面は東西方向に315 km 離れている。

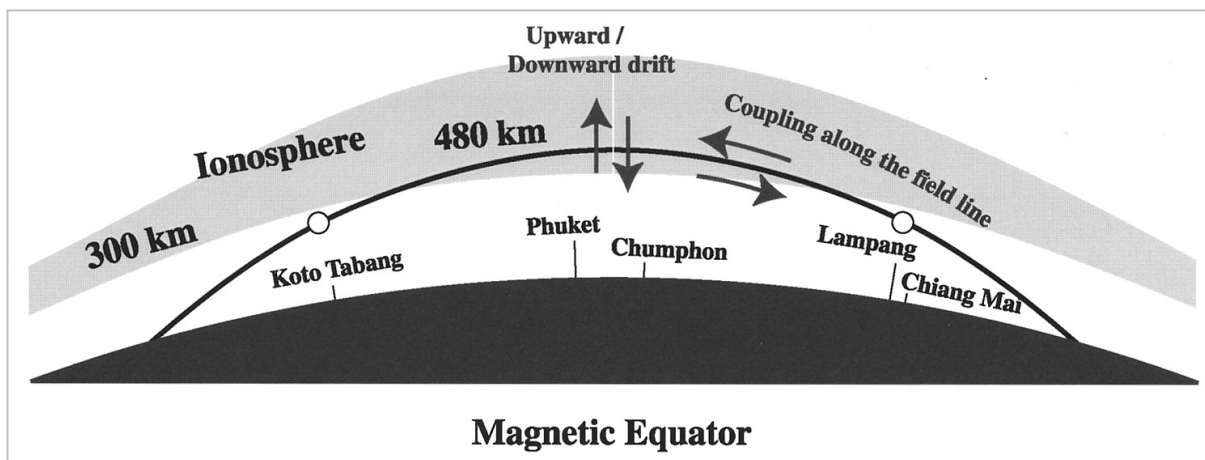


図 17 東南アジアにおける南北共役点観測計画(2)

そのため、2地点の電離圏高度の違いが、緯度の違いによるものか、東西方向の波動によるものか完全には分離できなかった。しかし、この問題はタイの観測ネットワークでは解消されるはずである。プラズマバブルとの関連を離れて vortex そのものの振る舞いにも新しい知見を与えると期待している。

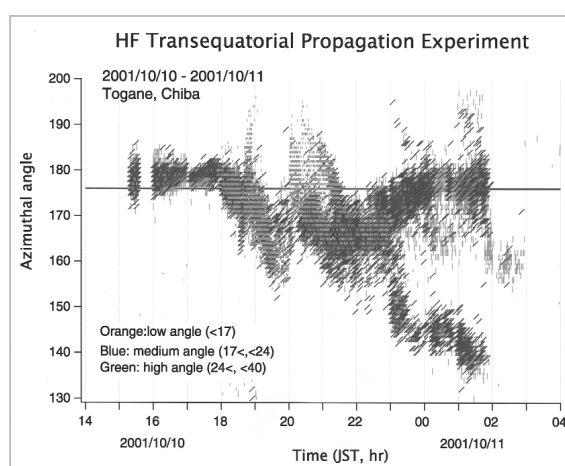


図 18 赤道越え電波の方向変動

参考文献

- 1 Abdu, M.A., R.T. Medeiros, J.A. Bittencourt, and I.S. Batista, "Vertical ionization drift velocities and range spread F in the evening equatorial ionosphere", J. Geophys. Res., Vol.88, pp.399-401, 1983.
- 2 Calvert, W. and C.W. Schmid, "Spread-F observations by the Alouette topside sounder satellite", J. Geophys. Res., Vol.69, pp.1839-1852, 1964.
- 3 Farley, D.T., E. Bonelli, B.G. Fejer, and M.F. Larsen, "The prereversal enhancement of the zonal electric field", J. Geophys. Res., Vol.91, pp.13,723-13,728, 1986.
- 4 Fejer, B.G., D.T. Farley, R.F. Woodman, and C. Calderon, "Dependence of equatorial F region vertical drift on season and solar cycle", J. Geophys. Res., Vol.84, pp.5792-5796, 1979.
- 5 Haerendel, G., "Theory of equatorial spread F", report, Max-Planck Inst. für Phys. Astrophys., Federal Republic of Germany, 1973.
- 6 Haerendel, G., J.V. Eccles, and S. Çakir, "Theory for modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow", J. Geophys. Res., Vol.97, pp.1209-1223, 1992.
- 7 Kelley, M.C., M.F. Larsen, C. LaHoz, and J.P. McClure, "Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study", J. Geophys. Res., Vol.86, pp.9087-9100, 1981.
- 8 Kil, H., P.M. Kintner, E.R. de Paula, and I.J. Kantor, "Global positioning system measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil", J. Geophys. Res., Vol.105, pp.5317-5327,

2000.

- 9 Kudeki, E. and S. Bhattacharyya, "Postsunset vortex in equatorial F-region plasma drifts and implications for bottomside spread-F", J. Geophys. Res., Vol.104, pp.28163-28170, 1999.
- 10 Maruyama, T., "A diagnostic model for equatorial spread F. 1. Model description and application to electric field and neutral wind effects", J. Geophys. Res., Vol.93, pp.14611-14622, 1988.
- 11 Maruyama, T. and N. Matuura, "Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles", J. Geophys. Res., Vol.89, pp.10903-10912, 1984.
- 12 Maruyama, T., K. Nozaki, M. Yamamoto, and S. Fukao, "Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol.64, pp.1557-1563, 2002.
- 13 McClure, J.P., W.B. Hanson, and J.H. Hoffman, "Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere", J. Geophys. Res., Vol.82, pp.2650-2656, 1977.
- 14 Mendillo, M., J. Baumgardner, P.I. Xiaoqing, and P.J. Sultan, "Onset conditions for equatorial spread F", J. Geophys. Res., Vol.97, pp.13865-13876, 1992.
- 15 Röttger, J., "Wavelike structure of large scale equatorial spread F irregularities", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.35, pp.1195-1206, 1973.
- 16 Scannapieco, A.J. and S.L. Ossakow, "Nonlinear equatorial spread F", Geophys. Res. Lett., Vol.3, pp.451-454, 1976.
- 17 Tsunoda, R.T., R.C. Livingston, and C.L. Rino, "Evidence of a velocity shear in bulk plasma motion associated with post-sunset rise of the equatorial F-layer", Geophys. Res. Lett., Vol.8, pp.807-810, 1981.
- 18 Woodman, R.F. and C. La Hoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities", J. Geophys. Res., Vol.81, pp.5447-5466, 1976.



まるやま たかし  
丸山 隆

電磁波計測部門電離圏・超高層グループリーダー 博士(工学)  
超高層大気物理