宇宙ユニットセミナー

2008/10/30

中緯度・低緯度の電離圏研究 レーダー観測、衛星・ロケット観測 京都大学生存圈研究所 山本 衛

本日の発表内容

- 研究対象
 - 中緯度から低緯度の電離圏
 - 中緯度E領域の準周期エコー
 - 中緯度F領域の中規模伝搬性電離圏擾乱
 - 低緯度(赤道域)のプラズマバブル
- 観測手段
 - レーダー観測 (MUレーダー、赤道大気レーダ他)
 - 観測ロケット (1996 SEEK-1, 2002 SEEK-2, 2007 WIND)
 - 衛星ビーコン観測(ディジタル受信機開発、トモグラフィ)
- 将来計画

→これらについて、紹介をさせていただきます。





MUレーダー (滋賀県甲賀市信楽町)



1984年に完成した大型大気観測用レーダー 全国・国際共同利用施設

MUレーダーのアンテナ面と送受信モジュール



沿磁力線イレギュラリティ(Field Aligned Irregularities; FAI)

- 電離圏プラズマには密度勾配、電界、中性 風速など様々な要因で発生する不安定現 象がある。
- プラズマ密度の粗密構造が発達して磁力 線に沿って長く延びた構造を形成する。
- レーダービームを地球磁場に直交させることでエコーが得られる。レーダーが観測するのは、半波長スケールの変動成分のみ。



中緯度のFAIIについて、1989年頃には、

F領域のFAI

中緯度FAIのVHFレーダーエコーは、1980年台後半にMUレーダーが初めて を見出した。大気波動を想像させる複雑な構造が発見されていた。(Fukao et al, 1988)

E領域のFAI スポラディックE層(Es層)の強い電子密度勾配に起因するグラディエント・ド リフト不安定によって発生する。中緯度においても、Ecklund et al (1981)を はじめ、先行研究はあった。(それほど目立たなかった)

F領域FAIのMUレーダー観測の例



アレシボISレーダーと小型レーダーによる観測 (Riggin et al., 1986)



Fig. 1. The map at the top displays the CUPRI beam with crosses indicating the positions of range gates. The arc swept out by the radar at the Arecibo Observatory (AO) at a height of 105 km is also portrayed. At the bottom is a blowup of the rectangular area enclosed by a dotted line in the map above. The heavy aspect angle contour describes the locus of points such that a vector drawn back to the location of the portable radar on St. Croix is exactly perpendicular to the magnetic field. The lighter aspect angle contours are in increments of $\pm 0.1^{\circ}$ away from exact perpendicularity. Positions of the CUPRI range gates are also shown.



ISレーダーによる電子密度の変動

E領域FAIの先行研究





Fig. 6. Power spectra (left panel) and transverse horizontal position (right panel) of echoes from sporadic *E* irregularities at a range of 251.3 km. Time increases downward. Each power spectrum has been normalized by its own peak value. Positive transverse positions are perpendicular to the radar line of sight in a northeast direction (see Figure 1). The symbols denote different frequency bands as indicated in the bottom left-hand corner.

MUレーダーによる初期のE領域FAI観測

MUレーダーによるE領域の磁力線直交観測 (June 24-25, 1989)



Yamamoto et al., 1991

MUレーダーによる初期のE領域FAI観測



Yamamoto et al., 1991





準周期エコーに対する初期のモデル



SEEK観測



From Geophysical Research Letters Volume 25, Number 11

PUBLISHED BY AMERICAN GEOPHYSICAL UNION

- 内之浦からロケットを打上げ、種子島設置のFARレーダーと同時 観測を行った。
- 1st launch on August 20, 1996.
 - TMA wind
 - Plasma density
- 2nd launch on August 26, 1996.
 - Electric field
 - Plasma density

SEEK成果:電界



Pfaff et al. [1998]

Figure 3. Comparison between electric fields observed by the EFD-P (thin line) and mean Doppler velocities observed with the FAR (square symbols). Plotted electric field is a component perpendicular both to the FAR beam direction and the geomagnetic field (southeastward positive). Doppler velocity V_d is compared with electric field E assumed that $V_d = E \times B/B^2$ and $B = 5 \times 10^4$ nT. Widths of the Doppler spectra are shown by lateral bars around the symbols.

Yamamoto et al. [1998]

SEEK成果:電子密度と風



残された問題点

- スポラディックE層の「深い変調」モデルに否定的成果であった。
- 非常に強い電界が観測された。
- 風シアも非常に強く、KHI不安定の存在が示唆された。

SEEK-2観測実施前の我々の"view"



25

Ogawa et al. [2002]

観測ロケットS-310-31号機、32号機の連続打上げに成功 (ロケット・レーダー等によるスポラディックE層統合観測SEEK-2)



参加研究機関:宇宙科学研究所、京都大学宙空電波科学研究センター、京都大学大学院理学研究科、東京大学大学院理学研究科、 東北大学大学院理学研究科、名古屋大学太陽地球環境研究所、東海大学、独立行政法人通信総合研究所、米国航空宇宙局(NASA)、 コーネル大学(米)、クレムソン大学(米)、テキサス大学(米)、SRI International (米)、国立中央大学(台湾)

SEEK-2ロケットの打上げ風景 (JAXA宇宙科学研究本部 内之浦宇宙空間観測所)



SEEK-2での準周期エコーの観測(1)



SEEK-2での準周期エコーの観測(2)

Horizontal Distance (km)



Distance (km)

31

山川におけるNICTアイオノゾンデ観測との比較



Tomography of E-region density from Double-Band Beacon (DBB) on the SEEK-2 rocket

2 Receivers, 1082 Samples Per Receiver 0.2 Second Time Samples, 158 meter Horizontal Range Samples Reconstruction Grid: 1 km (H) x 1 km (V) cell size





- Major Es (doublelayered) was found at 103-104 km. Maximum density was 2 x 10⁵ /cc
- At most 9 main/sub peaks were picked up in the 90– 130 km height range.
- Only one peak at 103 km was seen at all measurements, but the density varied by factor of two. Other peaks sometimes disappeared showing large spatial variability of plasma density.

中性大気変動の様子(TMA放出実験の写真から)



(Picture from "Hoshinabi" magazine, February, 2003)

TMA発光雲の写真から、5 kmスケールの変動が明らかとなった。
 (SEEK-2からの最大の予期せぬ成果)→KHIの発生に起因する
 中性大気の上下運動の反映と考えられる。

•弧状の発光雲の下部(90-100km)にunkown lightが現れた。

アレシボにおけるISレーダーとVHFレーダーの同時観測



-67.0

Longitude (deg E)

-66.5

-66.0

-68.0

-67.5

(upper panel) Arecibo IS radar observations of E-region plasma density on June 14— 15, 2002.

(lower panel) Radar imaging result from 30MHz coherent radar at 0:39 on June 15, 2002.

Patched Es stuructures and their height extension were found by ISR.

QPE extended NW-SE that is favorable to azimuthdependent Es instability.

Hysell, et al, 2004.

MUレーダー超多チャンネル受信システム



10

14

10

-30 -20 -10 0

Zonal Distance (km)

100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 Northward Distance (km)

MU radar. Receiver channels corresponding to subarrays or also indicated. (b) Thirty baselines corresponding to antenna subarrays.

S. Saito et al [2002]

MUレーダーによるE領域FAIイメージング



- 従来システムのMUレーダーで はあったが、E領域FAIエコー のイメージング観測を試みた。
- 準周期エコーがブロッブ状(あるいは紐状)の構造からなることが確認された。
- 南西方向への伝搬が確認された。
- エコーの水平広がりが強調される結果となった。

Hysell et al [2002]

準周期エコーとは何か?

- ●「水平構造を持った」スポラディックE層にできるFAI。夏季夜間。
- グラディエント・ドリフト不安定によるType 2エコー。
- 電子密度の不均一+中性風によって分極電界ができる。
- スポラディックE層は複数の層から成る。分極電界は磁力線を 通じて上空へ伝搬している。
- 上空の(サブ)スポラディックE層に現れるFAIは微弱。
- 準周期エコーの源(どれもありうる)

◆大気重力波

Kelvin-Helmholtz Instability (KHI)

Azimuth-dependent E-region instability (ADI)

(北西一南東方向の波面生成機構として提唱されている)

衛星から地上への電波伝搬



- 電離圏ではプラズマ密度に比
 例して電波の屈折率が変動する。
- 衛星から発射された電波は、ス ネルの法則に従い、屈折しなが ら地上に届く。
 - → 2周波数の受信から 電離圏のプラズマ密度が 推定可能。

本研究:電波の位相速度を使う
GPS-TEC: 電波の群速度を使う

GNU Radio Beacon Receiver (GRBR)



図3. USRPの外観

開発したディジタル受信機は、

Linux PC

- USRP (Universal Software Radio Peripheral)
 信号処理ハードウェア
- GNU Radio
 電波受信機用のソフトウェアツー
 ルキット(フリーウェア)

の組合せで構成した。

名称: GNU Radio Beacon Receiver (GRBR)

GRBR装置の外観



図4. QFH(QuadriFilar Helicoidal)アンテナ







図6. GNU Radio搭載 Linux PC

Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbance: MSTID (F領域に現れる顕著な波動)





Airglow (630nm)

GRBRトモグラフィ観測(2008年7月開始)







- Y Measured parameter(TEC)
- A Geometry Matrix
- x Unknown Electron density

Algebraic Reconstruction Technique (ART)



- λ Relaxation parameter
- Y_i TEC measurements
- aⁱ Geometry matrix elements
- X^k Electron density values at iteration # k

ITERATIVE METHODS

Algebraic Reconstruction Technique (ART)

Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique (MART) Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT)

ネットワーク観測のTEC推定例

 潮岬・信楽・福井で観測されたTEC推定値は良い一致を示す。夜間、中規模 TIDが発生しやすい時刻には、下記に示すように、組織化されたTEC値の変動 が現れる。







Initial guess IRI -2007 Vertical cuts from Tomographic image and comparison with initial guess

TEC comparison



- Signatures of MSTIDs in Tomographic images
- The TIDs are less intense at 2030 UT, both in GPS maps and in tomographic images



- The reconstruction using the perturbation component from TECs confirms the enhanced wave-like perturbation in the northern latitudes.
- It also reveals the fieldaligned nature of the disturbances





ビーコン観測網の拡充プラン



日本全国1000点以上のGEONETとの組合せによって、電離圏の常時モニタシステムへ成長できる。

赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR)



EARのアンテナ群



多ビーム観測が可能







プラズマバブル(赤道スプレッドF, ESF)



プラズマバブルの発生過程

プラズマバブルの南北断面

- 電離圏下側で発生した電子密度の局所的な減少領域が、
 短時間で電離圏上側まで広がる現象。
- 主に夜間、日没後に磁気赤道付近の低緯度地域で発生する。
- 磁力線に沿ってチューブ状に南北に広がる。
- 電子密度の不規則構造(イレギュラリティ)を伴う。

日没後のプラズマバブルの多ビーム観測



プラズマバブルの問題点

- 社会からの要請
 - 非常に強いプラズマの密度変動→衛星通信の阻害要因であり、
 GPS測位の精度を悪化させる。
 - 今はGPS航空ナビゲーションからの要請が大きい。
- 問題点
 - 長年の研究から、季節依存性や平均的描像は分かってきた。 しかしながら、発生予測ができない。
 - 予測の前に、日々変動を明らかにしたい。
 - 電離圏プラズマと(電気的)中性大気の相互作用が重要。
 - 磁力線を通じた電界の効果が重要
- 現在の状況
 - 米国がC/NOFS衛星を2008年4月に打ち上げた。今後数年間の間に 研究が進む可能性が高い。
 - EAR完成以後、日本の研究者は東南アジア域に相当な観測網を気 づいてきた。

→これらを有効に活かした研究を実施したい。

日本が主導する東南アジア域の電離圏観測網



東南アジア南北共役レーダー観測 SEARCH (South East Asia Radar experiment in Conjugate Hemisphere)



まとめ

- 研究対象
 - 中緯度から低緯度の電離圏
 - 中緯度E領域の準周期エコー
 - 中緯度F領域の中規模伝搬性電離圏擾乱
 - 低緯度(赤道域)のプラズマバブル
- 観測手段
 - レーダー観測 (MUレーダー、赤道大気レーダ他)
 - 観測ロケット (1996 SEEK-1, 2002 SEEK-2, 2007 WIND)
 - 衛星ビーコン観測(ディジタル受信機開発、トモグラフィ)
- 将来計画
 - 赤道低緯度域でESFの日々変動を研究したい。
 - GPS-TECと衛星ビーコンの組合せで電離圏モニタシステムを作って みたい。
 - ロケット観測も続けたい。2010年夏には次のチャンスがあるらしい。