

超高層大気をさぐる

山本 衛*

1. 超高層大気とは何か

地球の大気は高度が増すにしたがって圧力と密度が指数関数的に減少し、最終的には宇宙空間につながっていきます。大気の層はその温度構造によって分類されており、下層から対流圏（地表から高度 15 km 程度まで）、成層圏（その上部から高度 50 km 程度まで）、中間圏（その上部から高度 90 km 程度まで）、熱圏（さらにその上部）と広がっています。「超高層大気」とは、熱圏の別名であり、その特徴は、温度は高いものの極めて希薄であることと、太陽光に含まれる紫外線やX線の作用によって一部が電離状態（イオンと電子の混合状態＝プラズマ）になっていることです。この性質から、電離圏という呼び名もあります。我々は超高層大気を研究しています。ここでは地表からの高度 90–1000 km の範囲を様々な研究する手法について紹介しようと思います。

超高層大気には、まず上述のように、太陽からやってくる非常にエネルギーの高い放射である紫外線・X線をさえぎる役割があります。超高層大気にあつた紫外線・X線のエネルギーは、電離のために消費され、下層には伝わりません。これは非常に効率の良い遮へい作用であり、結果的に地球の

生命を保護する役割を果たしています。オゾン層も紫外線を吸収するのですが、その中心高度は 30 km 程度であり成層圏に位置しています。超高層大気を通り抜けてしまう比較的波長の長いグループの紫外線がオゾン層で吸収されます。つまり超高層大気とオゾン層の組合せによって、太陽光に含まれる有害成分が除去されています¹⁾。

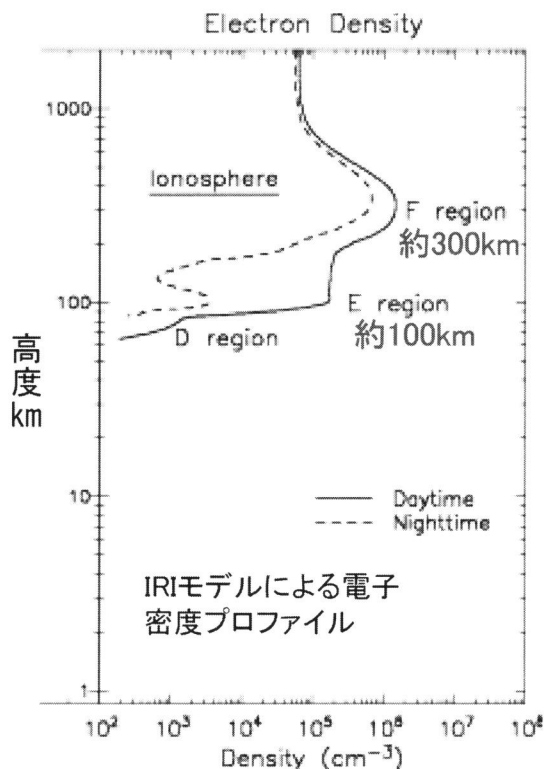


図1：電離圏の電子密度高度分布

太陽光の遮蔽作用の結果として生じる電離圏は我々の生活と深くかかわっています。平均的な電子密度の高さ分布を図1に示しますが、最下層はD層、高度100–150 km付近のE層、高度300 km付近を中心とするF層と名づけられています。我々は電波を使って無線通信をしますが、周波数30 MHz程度までの短波帯の電波はこれらの層で反射してしまいます。短波通信・短波ラジオが遠方との通信を可能であるのは、電波が地表と電離圏の間を反射しながら見通し外まで伝わっていくからです。遠距離通信が短波通信に頼っていたころ、電離圏の電波伝搬に関する性質を知ることが非常に重要であり、電離圏の研究は高い位置づけを得て広く行われました。現在では人工衛星を使

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野。E-mail: yamamoto@rish.kyoto-u.ac.jp



図 2：JTB が売り出している宇宙体験飛行
(弾道飛行)²⁾

った遠距離通信が一般化しており、電離圏の電波反射の性質の重要性は低下しています。しかし電離圏は人工衛星と地表の間の障害物となりますので、その点では重要な研究対象でありつづけています。

2. 環境としての超高層大気

人間の生存環境としての超高層大気について考えてみます。最近では旅行会社が「宇宙旅行」をパッケージ旅行として売り出すようになっているようです。例として、(株)ジェイティービー(JTB)がホームページに掲げている概念図を図 2 に示します²⁾。売り出されている旅行は、簡便なものとして到達高度 100 km 超まで上昇し下降する弾道飛行と、本格的なものとして高度 200-400 km の地球周回軌道への 1 週間程度の旅行です。多くの人工衛星が飛び交い、宇宙飛行士が常時滞在を続けている国際宇宙ステーションも高度 400 km 程度にあります。これらは実はどちらも我々がいう超高層大気の内側です。超高層大気はこれまで人類からは遠く離れた存在でしたが、そろそろ人間の生活環境の一部として考えるべき時代になりつつあることがご理解いただけると思います。また非常に希薄であることから、大気の下層における変動の影響を大きく受けると言われており、例えば地震の波が超高層大気に変動を与えることは

良く知られています。このように超高層大気の研究は、環境問題としての重要性を持つようになってきています。

3. いろいろな観測方法

3.1 レーダー観測

超高層大気の観測方法として、地上に設置したレーダーによる方法があります。レーダーとは、強い電波を送信して標的（この場合は超高層大気）にぶつけ、反射して帰ってくる電波を捉えることによって、標的の性質を知る観測手法です。性質のわかった送信電波と受信電波の性質の差を調べることが観測につながります。身近な例では自動車の速度取締りに使われる小さなレーダーが有名です。また気象レーダーが天気予報の観測に使われていることは良く知られていますが、これは空気中の雨粒の分布と動きを知る（つまり雨粒を標的とする）レーダーです。

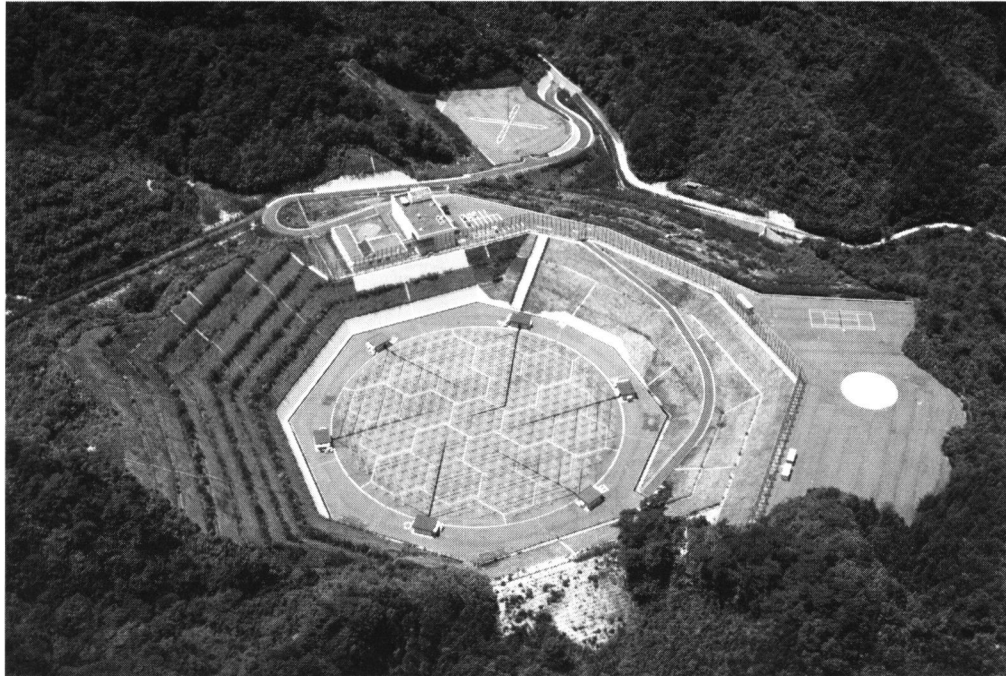


図 3：滋賀県甲賀市信楽町にある MU レーダー全景写真。

我々生存圏研究所では、1984 年に大型の大気観測用レーダーである MU レーダーを滋賀県甲賀市信楽町の信楽 MU 観測所に完成し、現在まで様々な研究を行ってきました³⁾。図 3 に MU レーダーの全景写真を示します。丸く見えるのはアンテナシステムであり、直径 100 m の円形の敷地内に 475 本の八木アンテナ（詳しくは、3 素子のクロス八木アンテナ）が整然と並んでいます。アンテナ面の回りには 6 棟の小屋が並んでいますが、この中には各々のアンテナについて 1 台ずつ対応する半導体の送受信機が収容されています。MU レーダーは多くの送受信機とアンテナから構成されていますが、電子制御によってそれらを一体のものとして運用します。即ち、全体を中心周波数 46.5 MHz、送信時の最大電力は全体で 1 MW に及ぶ巨大なレーダーとして使用します。MU レーダーのアンテナの働きは、同じ大きさの開口をもつパラボラアンテナと同等であり、更に送受信の電波の位相を制御することによって、電波の発射方向を電子的に振ることができます。こういう構成のアンテナは、アクティブ・フェーズド・アレイと呼ばれます。MU レーダーの観測領域は、地表面近くから高度約 1,000 km 程度の地球大気全域に及びますが、超高層大気に関しては、(1) 電離圏の電子 1 個 1 個からの超微弱な散乱電波を捉える「非干渉計散乱エコー」と、(2) 電離圏プラズマの不安定現象に関連して生じる電子密度の不規則構造に伴う「電離圏イレギュラリティエコー」の観測が主となります。また (3) 役目を終えた人工衛星やその破片などからなるいわゆるスペースデブリの観測も実施されています。

生存圏研究所には、MU レーダーに良く似た大型のレーダーがインドネシア共和国西スマトラ州のコタババンにもう一台あります⁴⁾。赤道大気レーダーと呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図 4 に示します。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えています。アンテナと直下の小型送受信モジュールの総数は 560 に達します。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えています。超高層大気に関しては、MU レーダーで説明した (2) のタイプのエコーを観測することができます。赤道大気レーダーの運営は、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との密接な協力の下で進められています。設置場所の特徴を活かして、低緯度・赤道地域に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施しています。

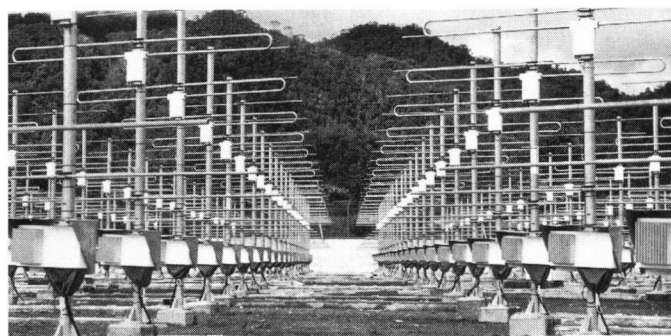
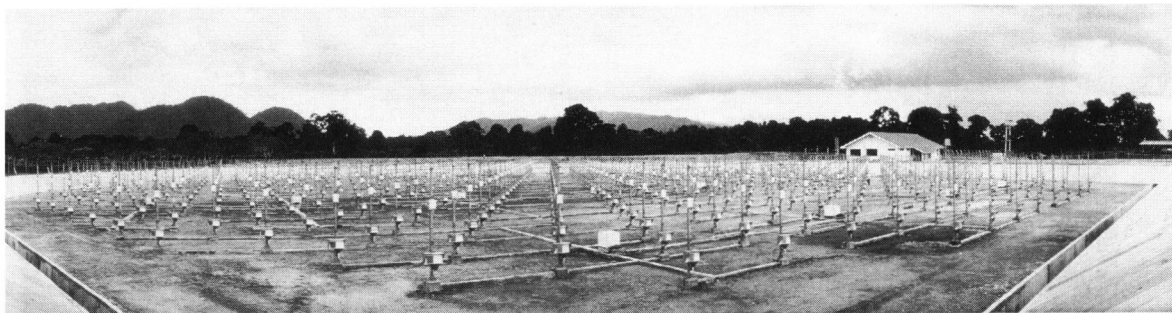


図4：インドネシア共和国西スマトラ州にある赤道大気レーダー全景(上図)と
アンテナ・送受信モジュール写真(下図)

3.2. GPS 受信機網

超高層大気の測定手法として、最近、GPS (Global Positioning System) 衛星を利用した観測が注目を集めています。GPS は地球上どこでも簡便に位置が測定できるシステムで「カーナビ」を支える基盤となっています。図5に概念図を示すように、GPS では衛星から地上まで地球大気を通過して伝搬してくる電波を使って測位をします。電離圏を通過する電波はプラズマの影響によって速度が微妙に変化するため、測定結果には電離圏に含まれる電子の総数(全電子数 (Total Electron Content; TEC) と呼ばれる)に比例する誤差が含まれます。GPS はこれを補正して測定を行います、補正量を

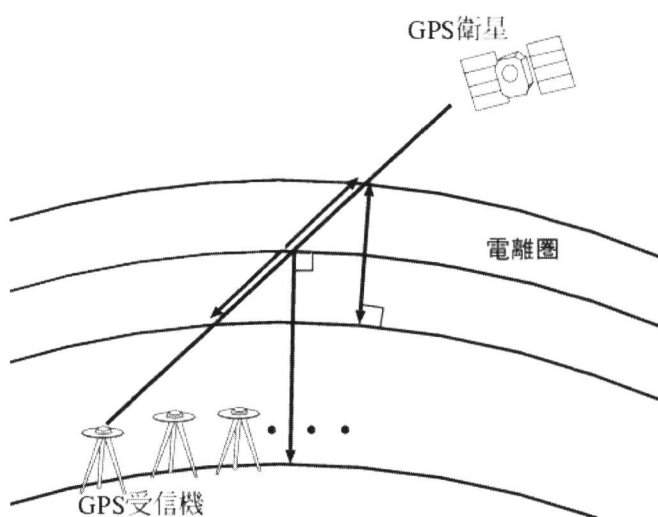


図5：GPS による測位と電離圏の関係

うまく取り出すことによって、電離圏の TEC を求めることができます。更に我が国では、国土地理院によって GEONET (国土地理院 GPS 連続観測システム) と呼ばれる千点を越える GPS 受信機のネットワークが完備しており、30 秒毎の測位データがデータベースに刻々と蓄積されています。

我々は、これを利用して日本上空の電離圏全電子数を算出・蓄積するシステムを作り上げ、運用してきました。図6はその観測例を示しますが、GPS 観測網から得られた日本上空の総電子数変動の水平分布には電離圏内を伝搬する大気波動の様子がはっきりと捕えられています⁵⁾。この例は波面が北西から南東に延び時間

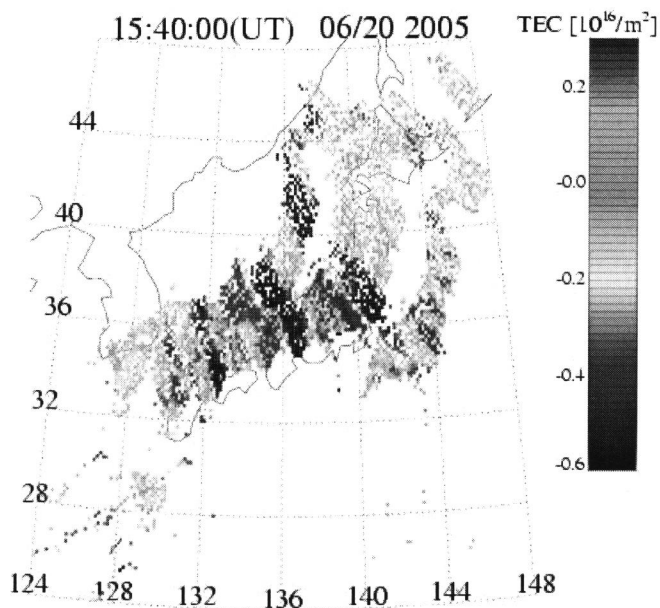


図 6 : GPS 受信機網で観測された日本上空の電離圏に現れた波動⁵⁾



図 7 : 観測ロケットの開発風景

とともに南西に伝搬していく、中規模 TID (Traveling Ionospheric Disturbance) と呼ばれる波の種類ですが、GPS 観測網を用いた研究により、特に夏季の夜間に卓越する現象であることがわかってきています。またこれ以外にも全世界にわたる GPS 観測網が構築されており、更には人工衛星に GPS 受信機を搭載して行う先進的な観測が実現するなど、この分野の観測技術の開発は非常に進んでいます。

3.3. 観測ロケット

超高層大気の詳しい様子を観測するには、観測装置を持ち込んで「その場」の観測をすることが望ましいことは言うまでもありません。おおよそ高度 400 km を越える高度では、人工衛星による観測が盛んに行われています。しかしそれ以下の高度では、大気密度が大きいために衛星が周回軌道に長く留まることができません。そこで、弾道飛行をする観測ロケットによる観測が、現在でも有力な観測手段となっています⁶⁾。図 7 に観測ロケットの開発風景の写真を示しますが、ここに示すロケットの頭部に観測装置を数多く積み、ロケット本体の先端に取り付けて発射するわけです。ロケットの頭部は上空で開いて観測装置が露出し、電離圏の電子密度、電子温度、磁場変動などの量を直接に測定します。また、後述しますが、ロケットから化学物質を撒き散らして発光する軌道を作り出し、地上から写真撮影して風速等を計る観測手法もあります。これらの観測は、日本では JAXA 宇宙科学研究本部が実施しており、鹿児島県にある内之浦宇宙空間観測所から太平洋に向かって 1 年に数回の観測が行われています。

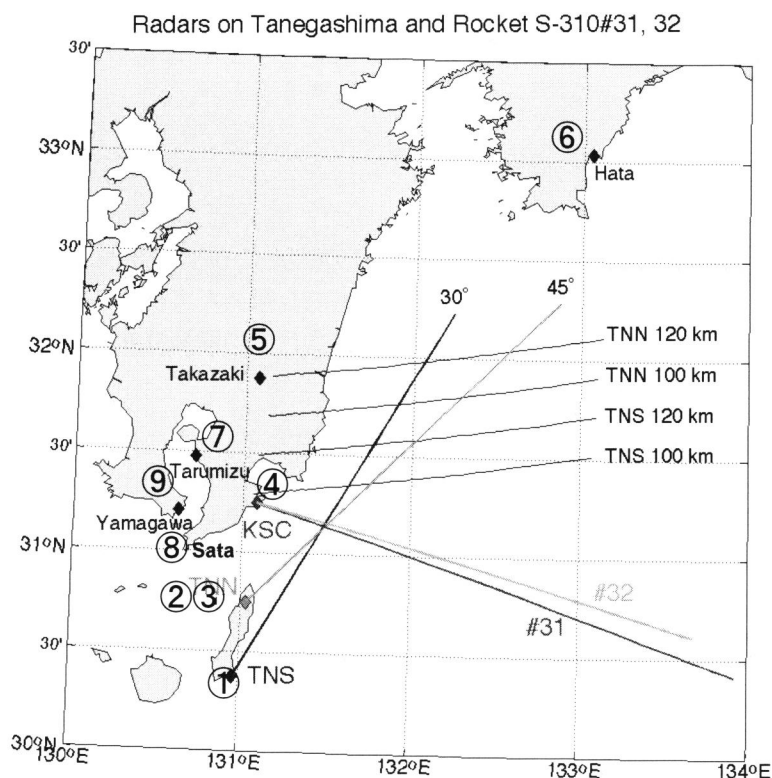


図 8 : SEEK-2 観測の領域

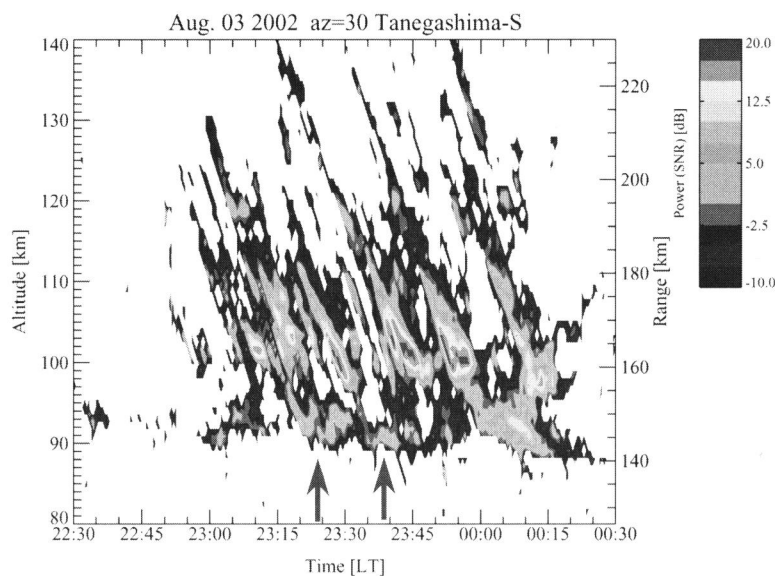


図 9 : 種子島南部(①)のレーダーで観測された電離圏イレギュラリティからのエコー強度の時間・高度分布図。
矢印の時刻にそれぞれ観測ロケットが発射された。

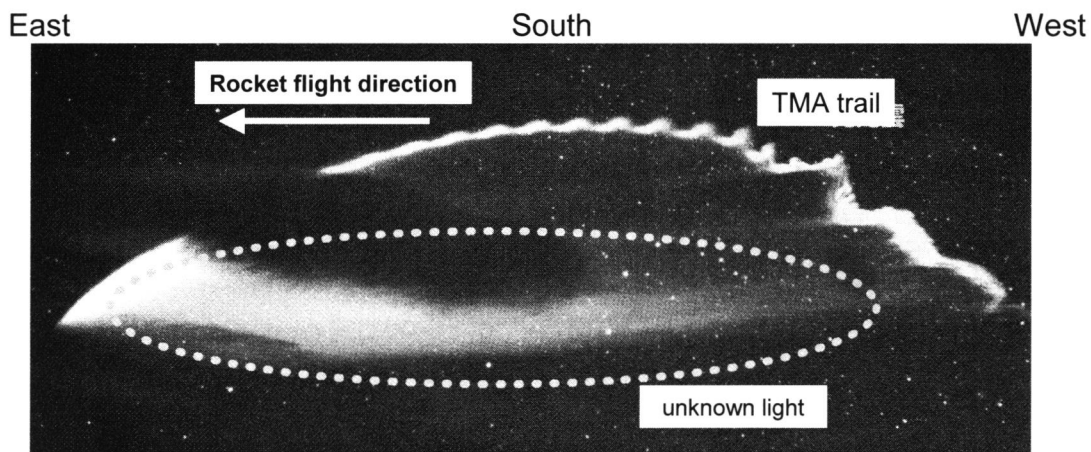
4. 総合的な観測の例

今まで示したような観測装置を利用した総合的な観測の例として、2002 年夏に行われた SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyushu 2) と呼ばれる観測を紹介します。これは高度 90-120 km 付近に現れるスボラディック E 層(以下では Es 層と表記)の周りに発生する電離圏のイレギュラリティの観測でした。MU レーダーでは「準周期エコー」と呼ばれる、特徴的な波動現象を発見してきましたが、その発生原因を突き止めることを目的として実施されたものです⁷⁾。

SEEK-2 の観測領域を図 8 に示します。種子島に設置された 2 機のレーダー(図中の①と②)によって Es 層に伴う電離圏 FAI の準周期構を観測中に、内之浦(④)から 2 機の観測ロケット(S-310-31 と-32 号機)を連続して打上げることを目指しました。観測ロケットからは、Es 層付近の電子密度、温度、電界、磁界を直接測定するとともに、ロケット搭載の 2 周波ビーコン送信機の電波を地上観測点で受信してロケットから地上までの全電子数を観測しました。またロケット搭載の圧力容器から TMA (トリメチルアルミニウム)を噴出して発光雲を生成し、地上のカメラから連続撮影することで中性大気風速を測定する TMA 観測も実施しました。これらのロケット観測と並行して、地上には種子島から幡多(高知県)にかけて計 9 個所の地上

観測点を設置しました。上記のように種子島の南部(①)と北部(②)に小型で持ち運びできるタイプのレーダーを設置し、電話回線で内之浦と結んで観測状況をリアルタイム表示するシステムを構築しました。更にロケットビーコン実験及び TMA 実験のための地上観測点、その他のレーダー装置や GPS 受信機からなる地上観測体制を敷いて実施しました。

図 9 に示すように、2003 年 8 月 3 日の 23 時過ぎから、種子島南部及び北部のレーダーによって強い Es 層に伴う電離圈イレギュラリティの準周期構造が観測されました。このリアルタイムモニター情報をもとに観測ロケット S-310-31 号機と S-310-32 号機が、それぞれ 23 時 24 分と 23 時 39 分に 15 分間隔で連続して打上げられ、それぞれ高度 157 km と 117 km に到達しました。図中の矢印の時刻がロケット発射に対応しています。電子密度・温度、電界、磁界、大気風速など多くの物理パラメータを、地上観測装置との連携によって一挙に観測することに成功し、観測目的であるイレギュラリティの準周期構造を完全に捉えることに成功した例です。この観測から、イレギュラリティに伴う電子密度の変動や電界の振る舞いについて多くの詳しいデータが得られています。図 10 にはこのときロケットから放出された発光雲の写真を示します(アマチュア写真家の田村竜一さんが撮影し雑誌「星ナビ」2003 年 2 月号に発表したもの)。上部に見える波状の変形は、ロケット軌道に沿った発光雲が超高層大気の変動によって変形した様子を示しますが、このような細かい変動が卓越することは我々の事前の予想を越えていました。また下部には薄い発光領域が見られますが、これの生成原因はまだ分かっておりません。このように大規模な観測は、それまでの研究で得られた成果の検証に有効である一方、驚くような成果や道の現象の発見に繋がるもので、非常に重要です。



(Picture from “Hoshinabi” magazine, February, 2003)

図 10 : SEEK-2 観測ロケットから放出された TMA 発光雲の写真
(雑誌「星ナビ」2003 年 2 月号から)

5. おわりに

以上ご紹介してきたように、地上高度 90 km 以上からはじまる超高層大気には面白い現象があり、我々はその観測・研究を様々な手段を用いて実施しています。超高層大気は宇宙空間への入口にも当たっており、そこへのトビラは、そろそろ普通の人々にも開こうとしているようです。地球環境全体の理解のためにも、超高層大気の研究は重要であると考えています。このような研究に興味を持って見守っていただきたいと思います。

参考文献

- 1) 恩藤忠典, 丸橋克英, 宇宙環境科学, オーム社, 302pp., 2000.
- 2) ホームページ「JTB 宇宙旅行」: <http://www.jtb.co.jp/space/>
- 3) 深尾昌一郎, 浜津亨助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491pp., 2005.
- 4) Fukao, S., Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA): A Project Overview, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84A**, 1-18, 2006.
- 5) Saito, A., S. Fukao, and S. Miyazaki, High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan, *Geophys. Res. Let.*, **25**, 3079-3082, 1998.
- 6) ホームページ「宇宙科学研究本部 観測ロケット」
<http://www.isas.ac.jp/j/enterp/rockets/sounding/index.shtml>
- 7) Yamamoto, M., S. Fukao, R. T. Tsunoda, R. Pfaff, and H. Hayakawa, SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyusyu 2) -Project Outline and Significance-, *Ann. Geophys.*, **23**(7), 2295-2305, 2005.