



## 極域電離圏からの大気流出

小川 泰信（電磁気圏環境部門）

### 1. はじめに

地球上の生命に必要な不可欠な大気中の原子や分子は、地球の重力によりそのほとんどが地表付近に留まって循環しています。太陽から吹きつける超音速の太陽風はその大気を剥ぎ取ろうとしますが、地球には固有磁場があるおかげで太陽風は地表付近に直接届きません。大気は地球磁場によって守られているのです。しかし、極域には、地球磁場に沿って大気が地球から流出しやすい場所があることが分かってきました。太陽極端紫外線（EUV）やオーロラ降下粒子等により電離した高度約80 - 数百kmの大気の一部は、極域で加熱や加速を受け、磁気圏や宇宙空間に流出しています。極域からのこうした大気の流出現象について紹介しましょう。

### 2. 極域電離圏イオンの分布と運動

高度約80 km - 1000 kmの電離圏および上部電離圏には、水素イオン（ $H^+$ ）、ヘリウムイオン（ $He^+$ ）、酸素イオン（ $O^+$ ）など様々なイオンが含まれていますが、化学反応や拡散の効果の影響を受け、主成分となっているイオンが高度によって変わります。大まかにいうと、高度約200 - 1000 kmでの主成分イオンは酸素イオン（ $O^+$ ）ですが、高度200 km以下では一酸化窒素イオン（ $NO^+$ ）や酸素分子イオン（ $O_2^+$ ）が主成分になります。また、1000 km以上の高度では水素イオン（ $H^+$ ）に変わります。これらの遷移高度は、太陽活動度や磁気圏電場の変化等によって大きく変化します。極域では酸素イオンが磁気圏に流れることにより、1000 km以上の高度でも酸素イオンが主成分イオンとなる場合もあります。

極域電離圏から磁気圏や宇宙空間にイオンが流

出しても、電離圏内にイオンが無くなってしまいうわけではなく、その場で、もしくは他の電離圏領域から補給されます。たとえば太陽光があたる電離圏領域では、EUVによって中性大気が電離（高度300 km付近では酸素原子（ $O$ ）が電離）することで、イオンは絶えず生成されますし、オーロラが頻繁に発生する緯度帯（オーロラ帯）では、オーロラ降下粒子によって生成されるのです。また、イオンは磁気圏対流電場の影響を受けて電離圏内を磁場に垂直方向に移動し、流出した電離圏領域にも運ばれます。

極域電離圏の磁力線を遠方にたどっていくと、昼側では地球半径の10倍程度、夜側では数十倍以上離れた磁気圏領域に達します。電離圏の圧力は

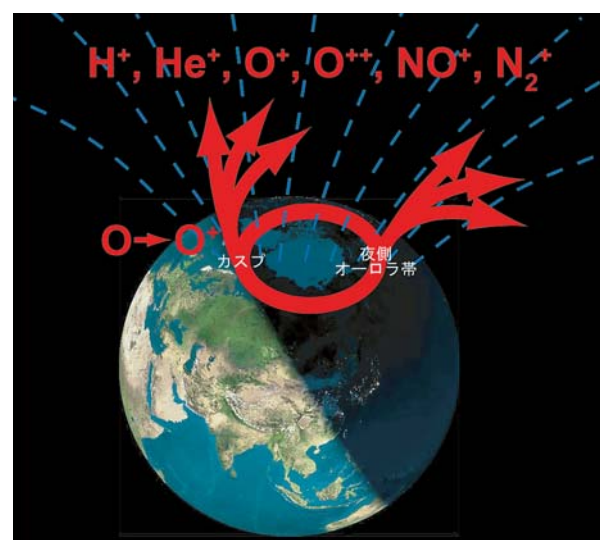


図1 電離圏イオン流出のモデル図。電離圏を構成するほぼすべてのイオン種が極域電離圏から磁気圏に流出する。青い破線は磁力線を表す。

磁気圏遠方の圧力に比べ十分に大きいことから、極域電離圏内の軽いイオン（水素イオンやヘリウムイオン）は両極性拡散（電子とイオンが同じ速度で拡散する現象）により、磁力線に沿って常に流出していると予想されていたのが1960年代でした。このイオン流出の物理機構は「太陽風（solar wind）」の機構と類似することから、「極風（polar wind）」と名付けられています。その後、極風の存在は人工衛星観測により確認されましたが、予想されていた水素イオンやヘリウムイオンだけでなく、他にも流出しているイオンがあることが分かり、今では微量成分を含め電離圏を構成するほぼすべてのイオンが磁気圏に流出していることが知られています。

昼側カスプ（図1参照。磁気緯度70 - 80度の昼側の領域）では、上向きに加速された電離圏イオンが同時に磁気圏対流電場により極冠域を横切って反太陽方向に流されます。エネルギーの低いイオンは重力によって地球へ再び落ちますが、エネルギーの高いイオンは磁気圏尾部へ流されます（このようなイオンの運動は「イオンの噴水（cleft ion fountain）」と呼ばれています）。一方、夜側オーロラ帯（図1参照）で加速された電離圏イオンは、磁気圏尾部や、それより内側の磁気圏リングカレント領域（地球半径の約2 - 7倍離れた磁気赤道面付近の領域）に運ばれると考えられています。磁気嵐発生時、磁気圏リングカレント領域では、電離圏起源のイオンの流出により、イオン組成が変わる程の影響があることが明らかになってきました。

図2は高度840 kmを飛翔する人工衛星によって観測された極域の沿磁力線イオン速度です。昼間側（12時磁気地方時（MLT）付近：図2（a）の左側）の領域でイオンが100 m/s程度の平均速度で上向きに流れている様子が分かります。磁気緯度80度以上の極付近では下向きのイオンの流れが見られます。個々の観測データを表示した右側の図（図2（b））を見ると、赤色のイオン上昇流の発生領域は、オーロラオーバル（図1参照。磁気緯度約65度から80度のドーナツ状の領域）と同じようにリング状に分布している様子が見て取れます。このようにイオン上昇流の頻繁に発生する領域は、オーロラの分布に密接に関係します。夜側（図2（b）の右側）の磁気緯度60 - 70度付近では、イオン上昇流とイオン下降流がともに頻繁に起きています。磁気嵐のような電離圏全体の擾乱が起きているときには、磁気緯度50 - 60度の中緯度電離圏からもイオン上昇流が発生しています。

### 3. 地上レーダーによる極域イオン上昇流の観測

電離圏起源のイオン流出の研究は人工衛星観測

により、プラズマ圏から磁気圏境界層、磁気圏尾部と広範囲にわたって積極的に行われています。観測手段が主に人工衛星である磁気圏と異なり、イオンが流出し始める電離圏では、沿磁力線方向のイオン速度の高度分布を測定できる非干渉散乱レーダーが、この研究を進める上で最適です。我々の研究グループでは、近年観測網が充実した欧州非干渉散乱（EISCAT）レーダー群を用いて、イオン上昇流の発生機構を調べています。カスプ領域や極冠域を観測するレーダーとして、スヴァールバル諸島ロンゲイヤピン郊外（磁気緯度75.2度）に設置されているEISCAT スヴァールバルレーダー（ESR：図3）と、オーロラ帯を観測するレーダーとして、スカンジナビア半島北部のトロムソ郊外（磁気緯度66.1度）に設置されているEISCAT UHFレーダーやVHFレーダーを用いています。これらのレーダーを用いて、イオンの流出開始高度が調べられます。図4にイオン速度の高度分布の一例を示します。高度400 km付近から沿磁力線上向きにイオンが流れ始め、高度が上がるにつれてその上昇速度が増します。これは、主要なイオンである酸素イオンの流れを表します。高度700 kmでは400 m/sまで加速していますが、まだ音速（約1000 m/s）には達していません。EISCATレーダーによるこれまでの観測から、この音速以下の上昇流は常に起きているのではなく、上昇速度やフラックス量（単位時間・単位面積あたりに流れる量）、発生領域を変えながら間歇的に起きていることが明らかになっています。

EISCATレーダーからは、視線方向のイオン速度に加え、プラズマ温度や密度、電離圏電場等の物理量が得られます。それらの物理量を基に、イオン上昇流の発生機構の研究が進んでいます。イオン上昇流を引き起こす加熱・加速のエネルギー源として、(i) 磁気圏対流電場や(ii) オーロラ降下粒子等が挙げられます。(i)については、磁気圏対流電場が増加すると、極域電離圏イオンは中性粒子との衝突頻度が増え、摩擦により加熱されます。それに伴い、上部電離圏では上向きの圧力勾配力が増加してイオンを上向きに加速します。オーロラオーバルより低緯度側の電子密度の低い「トラフ」と呼ばれる領域や、磁気圏対流パターンが急激に変化する昼側カスプ領域付近では、このメカニズムが働いていると考えられています。しかし、電子密度が低いためにフラックス量も小さくなるので、イオンの総流出量にどの程度影響があるのか分かっていません。(ii)については、500電子ボルト（eV）以下のエネルギーの電子の降り込みに伴い、電離圏電子が加熱されます。その加熱された電子が電離圏から磁気圏に流れていくのに合わせ、両極性

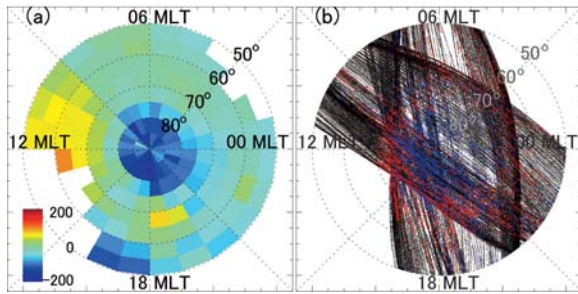


図2 2003年10 - 11月にDMSP衛星により観測された高度840 kmの沿磁力線方向イオン速度。(a): それぞれの磁気緯度・磁気地方時における平均イオン速度。(b): DMSP衛星の各軌道のデータを重ね合わせた結果。200 m/s 以上の上向きイオン速度を赤色で、-200 m/s 以下の下向きイオン速度を青色で表す。イオン上昇流の発生領域がリング状に分布している。

拡散によりイオンは上向きに加速されます。ただ、この効果のみでは、イオンに働く加速度を定量的にうまく説明できません。降り込みに伴う他の加速モデルを考える必要があります。この500 eV以下の電子の降り込みは、昼側カスプ領域やその周辺で頻繁に発生します。また、イオンが流出し始める高度300 km付近で中性大気の電離を引き起こし、電子密度を増加させます。そのため、イオン上昇流のフラックス量は(i)に比べて大きくなり、イオンの総流出量への影響が大きいと考えられます。

我々は、極域電離圏のイオン上昇流の発生機構を具体的に理解し、さらに磁気圏へのイオン供給の影響を見積もるために、(1)複数のEISCATレーダーを組み合わせた、イオン加熱の磁場に対する方向依存性の観測、(2)EISCATレーダーシステムの一部である電離圏加熱装置を用いて人工的にイオン上昇流を発生させ、イオンの働く力のバランスを定量的に調べる実験、(3)過去に蓄えられたEISCATデータを用いたイオン上昇流の長期変動の統計解析、(4)人工衛星とEISCATレーダーを相補的に組み合わせたデータ解析を実施してきました。特に、磁気圏を飛翔する人工衛星観測の結果から、各種のプラズマ波動によるイオンの加速は、イオン流出を引き起こす有力な候補と考え



図3 EISCAT スヴァールバルレーダー (ESR)。右側が口径42 mの沿磁力線固定式アンテナ、左側が口径32 mの可動式アンテナ。

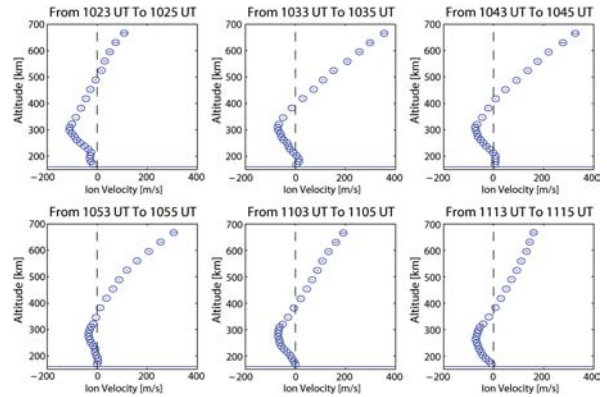


図4 1999年7月8日にESRにより観測された沿磁力線イオン速度の高度分布。プラスが沿磁力線上向きを表す。イオン上昇流の速度が時間とともに変化している様子が見て取れる。

られており、電離圏高度においてもその影響が注目されています。そこで、スヴァールバルにおける国内外のロケット - レーダーキャンペーン観測にも積極的に参加し、各種プラズマ波動とイオン上昇流との関係を調べています。

#### 4. 最後に

これまでの磁気圏衛星観測により、極域電離圏から磁気圏へのイオンの総流出量は、1日あたり数十から数百トン(約 $10^{30}$  -  $10^{31}$ 個)と推測されています。これは、地球電離圏全体のイオンの総量におおよそ相当します。流出した電離圏イオンは磁気圏内の様々な領域に輸送されますが、その輸送経路や消失過程はまだよく分かっていません。さらに、イオンの流出量は電離圏の状態によって大きく変化しますが、どのような物理過程がイオンの総流出量を決める上で重要であるか未だ明らかではありません。また、水素イオンやヘリウムイオン以外の重いイオン種を磁気圏遠方や宇宙空間へ流出させるには、電離圏内での加熱や加速に加え、磁気圏内でのさらなる加速源が必要となります。これまで磁気圏内のイオン加速機構が数多く提案されていますが、どの加速機構がいつどこで支配的なのか、電離圏で発生するイオン上昇流は磁気圏内での加速とどのように関係するか等、明らかにすべき事柄が多く残っています。地上レーダーや飛翔体による極域電離圏観測や、磁気圏の人工衛星観測を今後より充実させると共に、観測結果を再現するグローバル数値シミュレーションモデルを発展させることにより、いくつかの疑問点は解決されると考えられます。将来的には、過去や未来の大気組成に対するイオン流出の影響の見積りが可能となり、惑星大気の変遷についての知見が深まることでしょう。

# My Delightful Working Visit to STEL

Michael Schulz, Visiting Professor  
(from Lockheed Martin Advanced Technology Center, U.S.A.)

I had learned about STEL's visiting-scientist program from John C. Foster (Atmospheric Sciences Group Leader at M.I.T.'s Millstone Hill Observatory) and Steve Petrinec (a member of my group at Lockheed Martin). John Foster had been a visiting professor at STEL about ten years ago. He told me about this at the 1998 COSPAR meeting in Nagoya and recommended the experience highly. Steve Petrinec had been a JSPS postdoctoral researcher at STEL, also about ten years ago. After joining Lockheed Martin in 1997, Steve returned to STEL for four months in 2001 as a visiting associate professor and likewise greatly enjoyed the experience of working here.

After hearing such glowing reports of life at STEL, I naturally hoped for a similar opportunity but worried that my duties as a group leader in Palo Alto would make this impractical. On the contrary, my manager Stephen Fuselier strongly encouraged me in 2002 to accept Professor Kamide's long-standing invitation. It took time to find a mutually convenient window of opportunity, but we eventually agreed upon August through November 2004 (four full months).

Thus, I arrived in Toyokawa on 1 August 2004 after a flight to Narita and a ride on the Tokaido Shinkansen. My official job offer from the president of Nagoya University called for me to work on a "Quantitative Study of the Size of the Polar Cap for Geomagnetic Storms." This was very close to a subject that had been on my agenda for several years, namely a way to simplify and possibly improve upon the representation of ionospheric electric fields in data-based models, using separate analytical expressions for the electric

potential function in the magnetic polar caps and in the region of closed magnetic field lines.

This would be a fairly straightforward analytical construction, except that the magnetic polar caps are not quite centered on opposite poles of the sphere. Instead, they are centered at points near the midnight meridian, a few degrees from the corresponding magnetic poles. I described this difficulty in a talk at the meeting of SGEPPSS (Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences) held 26-29 September 2004 in Matsuyama (Shikoku).

The solution seemed to require construction of an orthogonal coordinate system for the region outside the polar caps, one that could be matched smoothly to the natural coordinates of (for example) circular polar caps. Upon returning to STEL, I quickly realized that this problem called for construction of a mathematical potential function, satisfying a two-dimensional Laplace equation on the sphere and held separately constant (as a Dirichlet condition) at the boundary of each polar cap. The resulting potential function serves to generate orthogonal coordinates. It is not the potential from which any familiar physical field can be derived. With the problem posed this way, the solution was straightforward. My visit to STEL gave me the time to think along these lines.

My visit to STEL also allowed me to interact with various researchers here about their current projects. I have spoken with Professor Ogino and his student Kyung Sun Park about their global MHD simulations of the magnetosphere, and with research associate Yoshizumi Miyoshi about dynamical processes that govern magnetospheric radiation belts. Both of these interactions offer the prospect of future collaborative work.

My visit to STEL also overlapped with the visit of Leif Svalgaard (the prominent solar physicist) and his wife Vera, and later with the visit of Professor Joseph Kan, a prominent auroral physicist from the University of Alaska in Fairbanks. Leif Svalgaard and I have thereby begun a collaboration about effects of Earth's dipole orientation on geomagnetic activity.

My stay in Toyokawa and my trips to symposia in Matsuyama and Nagoya have let me enjoy the interesting culture, diverse cuisine, and beautiful scenery of Japan. I have also been honored to visit some new friends at their homes, thereby gaining further in-sights into Japanese life and culture. In every way, this has been a truly delightful experience.



The author with cast of local Kabuki theater company, September 2004.

# A Fascinating Culture of Science and Humanity

Joseph R. Kan, Visiting Professor  
(from University of Alaska Fairbanks, U.S.A.)

I enjoyed, both scientifically and culturally, my three-month stay in Japan as a visiting professor at STEL of Nagoya University. I feel at home in Japan almost immediately for two reasons. The first reason has to do with the empirical emphasis of space research in Japan. The second is the unique Japanese culture characterized by being a world leader in science/technology and a devoted keeper of traditional values in humanity of kindness and compassion.

My understanding of substorm onset has drastically changed in Japan. For the first time in my research career, I feel comfortable in telling my substorm story, explaining the cause-and-effect sequence of events, from the brightening of the equatorward-most auroral arc to the occurrence of dipolarization and the X-line formation at the substorm onset. Ironically this is happening after I put my substorm research on hold for 10 years to serve as Dean of the UAF (University of Alaska Fairbanks) Graduate School. I resumed my substorm research in July of 2004, three months before coming to Japan.

My story for the cause of substorm onset is new, although several building blocks have been developed in the past by many researchers, including some of my own research. I have presented these results at Nagoya University, Kyoto University, Tohoku University and the National Institute of Information and Communication Technology. Now, I am writing a paper entitled "Cowling Current Instability for Substorm Onset & Storm-Substorm Relationship". The abstract of the paper is attached at the end.

I became deeply interested in humanity about 15 years ago. This has a direct connection to why I was so impressed by the Japanese culture to be summarized in the next paragraph. My search for purpose in life led me to a simple conclusion that keeping a balanced development of intellectual-emotional intelligence by improving self-awareness through meditation is essential to happiness. Creativity is vital to intellectual intelligence. Kindness is the key to emotional intelligence. A summary of what I learned on this topic can be found in my website at <http://www.faculty.uaf.edu/ffjrk/PIL.html>

Japan created a unique culture that renews itself by being at the forefront in the world of science and technology while practicing the traditional humanity values of modesty, kindness and compassion. The unique Japanese culture is a manifestation of a balanced development in science/technology as well as in humanity. This is self-evident in the daily life of people in Japan. This can only be achieved when citizens of Japan have developed a balanced intellectual-emotional intelligence. What I learned in the 15 years has been in practice in Japan for ages. This is why I was so taken by the Japanese culture.



In the garden in Kyoto.

My delightful experience in Japan was made possible by the Visiting Professorship Program and by the kindness of every one of my old and new friends during my stay in Japan.

## Abstract

The equatorward-most auroral arc brightens when the convection reversal layer approaches the poleward edge of the diffuse auroral region where the conductance is nonuniform. In general, auroral arc brightens as upward field-aligned current intensifies due to enhanced non-uniform electric field and/or conductance. Cowling current intensifies by a feedback instability involving enhancements of field-aligned currents, auroral conductance, and the southward polarization electric field in the coupled radial and azimuthal current loops. Closure of the intense unstable Cowling current in the NEPS disrupts the tail current to cause dipolarization and X-line formation simultaneously at the substorm onset. A NENL forms due to intense current disruption in the NEPS. A weak current disruption may form a neutral line in the mid-tail. Dipolarization electric fields are typically a few mV/m, impulsive and localized to the NEPS. Conversely, the large-scale convection electric field is weak in the NEPS ~ a few tenths mV/m and steady. For  $L = 2$  to 4, the convection electric fields of ~ 6 to 9 mV/m have been measured during large superstorms. These intense electric fields could be produced by intense dayside reconnection current from the NEPS due to: (A) strong impulsive substorm injection, (B) steady weak earthward convection, (C) increased  $O^+$  population, and (D) intense earthward convection driven by the NENL. For superstorm with  $D_{st} < -300$  nT, we expect  $O^+$  ions in (C) and NENL in (D) to play a major role in enhancing the ring current intensity to the superstorm level to result in a net loss of ring current ions to the dayside magnetopause. Storm-time ring current can be enhanced by energetic ions entering into the ring.

## チリ・ヨーロッパ南天天文台とアタカマ砂漠を訪ねて - その2 -

村木 綏 (太陽圏環境部門)

### 光干渉計施設の訪問

ラス・カンパナス天文台とラ・シーヤのヨーロッパ南天天文台\*を後にし(STELニュースレター39号参照) パラナルをめざし、さらに北へと向かう(図1)。旅の目的の2つ目、光干渉計の視察をするためだ。ところが、調子よく進んできた旅であるが、ここで最大の困難が待ち受けていた。朝快晴だったラ・セレナの空が、飛行機の出発時間の午前10時ころになると、霧に覆われ始めたのである。本当に飛行機は来るのだろうか、心配が脳裏をかすめる。これはこの町特有の気象状況らしい。砂漠で熱せられた空気が、海上の寒流の表面に触れて霧となり、それが逆流して町に押し寄せてくるのである。ほんのわずかでも町を離れば快晴だという。

案の定、飛行機は来なかった。後で分かったことなのであるが、チリ国内で電波誘導装置がある飛行場は、首都のサンチャゴ、南のコンセプション、北のイキケ空港だけだそう。さて、どうやって移動すればいいのか困った。どうやら、北へ向かう長距離バスがあるらしい。幸いなことに飛行機に乗れなかった集団の中に、ラ・セレナのインターナショナルスクールの校長先生がいた。彼は英語を話したので、随分助かった。北に行くそのバスの停留所まで送ってくれた上、出発するまでそこにいてくれた。親切な人だ。バスの料金は昼食と夜食の Snack 付きで、2300円と安い。13時間もバスに揺られたのにはかなりまいった。道路は舗装されているが、子供は泣くし、後ろではギターを演奏する若者がおり、安眠できるような状態ではなかった。ようやくみんなが静かになったのは、真夜中を過ぎてからだ。飛行場のカウンターで「午後2時のバスに乗れば、アントファガスタには夜中の12時には着きますよ。」と言われたが、着いたのは午前3時だった。一台だけいたタクシーに乗って、予約してあったホテルに行くと、カウンターの人もびっくり。でも、泊めてもらうことはでき、一安心。明朝は7時に起き、8時に先ほどのタクシーの運転手に来てもらって、パラナルに向かうことにする。あまりにも疲れていたためか、4時間ぐっすり熟睡できた。

パラナルへの道は一度舗装されたものがはがれてしまったような感じで、とてもいい状況にあるとは言いがたい。そこをタクシーは時速60 km - 80 km で

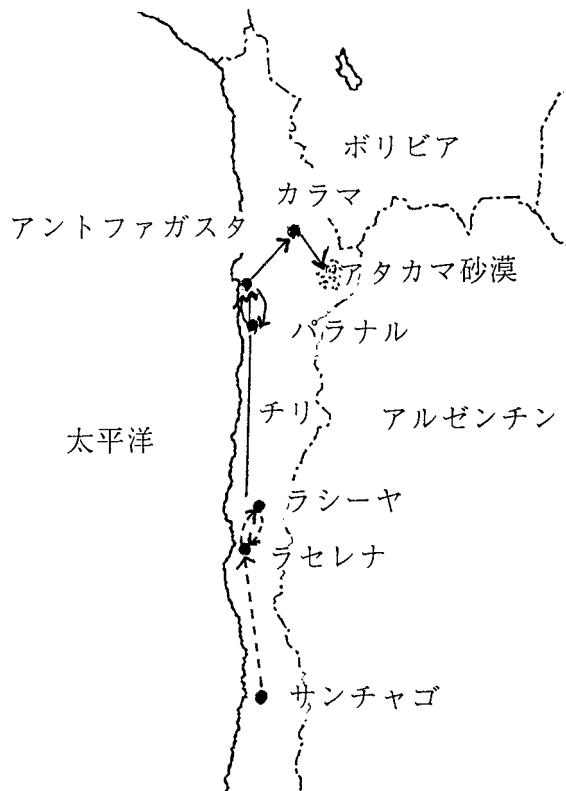


図1 チリ北部の地図。矢印は筆者の軌跡。(点線は、「その1(前号)」での行程)

飛ばす。穴に落ちたら空中分解するのではないかと思うほど揺れた。そういう思いを度々しながらも、予定通り予約してあった朝10時に無事到着。周囲は木一本生えていない完全な砂漠である。よくこんなところに天文台を作ったものだと感心する。受付のお嬢さんは、私が昨夜バスに乗っていたということを知っていた。実は昨日、ヨーロッパ南天天文台の技官の人も、パラナルへ移動するとき、飛行機に乗れずに私と同じ目にあつたようだ。長距離バスの中で私を見かけたと、彼女に話したらいい。受付の建物の内部はバナナの木が植えられており、天国である。少し湿気が高いと思うが、多分外の世界の湿度が10%と非常に低いので、その差のためだろう。ここのレストランもすごく豪華である。この施設を維持するために、毎日2台の給水車がアントファガ

\* ヨーロッパ南天天文台(ESO: European Southern Observatory)は、ヨーロッパ諸国(ドイツ、フランス、イタリア、スウェーデン、オランダ、スイス)が南天観測を目的に作った国際共同研究組織。本部はドイツに置き、チリのラ・シーヤとパラナルに観測所がある。また、アタカマに建設予定のALMA計画にも参加することが決定している。

スタから来るそうである。

英国での天文機器の国際会議に50人の研究者が出かけてしまったので、案内役は光学系の技師のジットンさんになった。彼は私のフランスの友人であるモーリスの息子と友達であるとのことで、世間は狭いものだと思った。山頂に向かうとそこには8.2 m望遠鏡が4台並んでいる。ドームの形も望遠鏡の形もハワイの“すばる”と大変よく似ている。8.2 m鏡は現在まだ干渉計として本格運用はされておらず、テストケースとして実施されている。赤外線領域の波長J(1.25  $\mu\text{m}$ ) H, K(2.2  $\mu\text{m}$ ) N(10  $\mu\text{m}$ )バンドで光の干渉を実現しようとしている。波長の分解能は10 nmである。Nバンドになると装置全体の冷却が必要となる。25回も鏡で反射して光を導くため、せっかく8.2 m鏡を使ってもその光量は約半分となる。口径80 mmの光の束を18 mmに絞って干渉させる。現状はまだ2ミリアーク秒の分解能であるが、同じ視野にガイド星が入っているときには、角度の分解能は100マイクロアーク秒から10マイクロアーク秒という超高分解能が得られることが予想されている。それが実現するのは2008年頃であろう。日本・ニュージーランドの共同プロジェクトMOA(マイクロレンズ現象の探索)の1.8 m望遠鏡とラス・カンパナスにある1.3 m OGLE(Optical Gravitational Lensing Experiment)望遠鏡で見つけた太陽系外惑星を、即この干渉計で観測する。典型的なマイクロ重力レンズの星の像の分離は3ミリアーク秒だから、今まで分離できず重なって増光していた現象が分離できて見えるようになる。これははるか彼方の太陽系外惑星が個々に分離して見える時代がくることを予感させるものであった。観測者はガリレオが自分の望遠鏡で木星の衛星を見た時と同じ興奮を味わうだろう。苦勞してパラナルを訪問して良かったと思った。

最終目的地、アタカマ砂漠にて

いよいよ最後の目的地、アタカマ高地のセロトコ山へ向かう。宇宙線観測装置を設置する候補地であるこの山を視察するため、アントファガスタからポリビア国境に近いカラマへ向けて飛行機に乗る。カラマはチキカマタ銅山で有名な町であるが、さすがにここまで乗る人はわずか数名であった。飛行機の中で、当研究所大気圏環境部門の水野亮さんと合流、ほっとする。カラマまでは30分で到着。名大理学部天体物理学研究室(A研)の水野範和さんのお世話になる。ここから車で1時間、3400 mの峠を越えて、小さな町、サンペドロ・デ・アタカマに到着。ここは標高がすでに2430 mもある。夕飯を食べるために、舗装されていない道を歩いてレストランに向かう。ここでは砂漠の中の町というイメージを残すため舗装はあえてしないらしい。我々が日本でも耳にする歌を歌っているレストランとフォルクローレを演奏しているレストランがある。帰りにお土産物

屋さんを覗いて驚いた。10年前に訪れたポリビアと同じ土産が並んでいたからだ。何故同じか聞いてみると、彼らは同じ民族で、昔はこのあたりはポリビア領だったという返事が返ってきた。

翌朝、早速ジープに乗ってアタカマ砂漠地帯に向かう。アルゼンチンへ通じる国道27号線に登る。国境までチリ側は舗装されている。イキケの港町からパラグアイへ日本車を運ぶトラックもこの道を利用する。町から25 km地点で傾斜が急になる。30 km地帯からわずかに植物が生えている。ニュージーランドの山の上に生えている、い草のようなトサクである。GPSは3800 mを示している。富士山の山頂に近い高度である。4140 mでアルゼンチンとチリを結ぶガスパイプラインを越える。35 km地点で旧道との分岐点にぶつかる。これを右に登っていけば、現在計画が進められているALMA(80台の電波望遠鏡で深宇宙を探索する、日本・北アメリカ・ヨーロッパ共同の国際大型プロジェクト)のサイトに行けるが、旧道は舗装がされておらず、ALMAグループは別の方角から道を作っている。GPSは4250 mを示している。4600 m地点で5 km先、ポリビア国境という標識が出てくる。出発から45 - 55 kmの地点は高度が4800 m弱あり、緩やかな平原が続く。宇宙線の実験に非常に向いた場所であると思う。ちょうど55 kmという標識がある地点で舗装道路から離れて右折する。意外に良い道が続いている。前方には日本の国立天文台の10 mの電波望遠鏡施設(ASTE)と名大理学部A研のNANTEN 2のドームが見える。ここで標高は4830 mである。A研は中性の炭素原子C Iの出す800 GHzのスペクトルを得るために、ここに新しい電波望遠鏡を設置しようとしている。望遠鏡本体は現在太平洋洋を輸送中で、ドームの準備が整った段階であった。水野亮先生はここで電波を使って、大気中のオゾン濃度の変化の長期モニターを試みようとしている。ここでの観測から、太陽活動とオゾン量の変動のユニークなデータが得られることを期待したい。ドームの天井は薄い膜が張られており、望遠鏡に砂塵が入り込まないように工夫されていた。隣の国立天文台のASTEを見学に行った。受信機を見せてくれることになったが、まず血中酸素濃度を測れということで測定してみた。私はサンペドロの町では90であったが、アタカマでは80であった。初心者にしてはなかなか良いという院生諸君の判断で、ドームの階段を上る許可がでた。実はそれまで、あちらこちらで一週間以上、高地に滞在したのですでに高地順応していただけたのだらう。両施設とも自家発電で電気を供給している。我々の実験装置は30ワットで動くように超低消費電力化を図ったので、太陽光発電で十分である。しかし装置が止まったとき、すぐ立ち上げてもらわないといけないので、人が常駐する地帯に置いた方が良いのである。

両水野さんと私は、特に頭痛がするわけではないので、より高い山を目指して観測候補地の調査にでかけることになった。左側にまもなく建設が始まるALMA計画予定地の広大な火星の表面のような大地を見て(図2)、右側に東大理学部天文学教室の吉井グループが6.5 mの望遠鏡を設置したいとい



図2 火星の表面の様なアタカマ砂漠。5400 mから撮影。

うチャナントール山(5639 m)を見て、5020 m帯を走り抜ける。目指すセロトコ山(5604 m)への分岐点はすぐに分かった。ジープが何度も通った後が残っている。さらに5400 m地点まで登る。確かに観測装置は置けそうだし、現に米国のコーネル大学が太陽光発電で小型の3K放射の揺らぎを測る装置を運転していた。しかし、すごくきつい硫黄の臭いがした。これは体と観測装置にとって良い環境とは言えない。また、ブルドーザーで道路を一度整地しないと、装置を運ぶ大型トラックは入れないだろうと思った。4800 m地帯に一度装置を置いて、無人で動く自信ができれば、次に5600 mの山頂に設置するのが

良いのだろう。我々はサンチャゴのカトリカ大学に宇宙線観測の研究提案をしていた。現地で協力してくれる相手が必要だ。彼らは興味を強く示した。セロトコ山は、カトリカ大学の領分(?)である。観測装置の設置は可能だが、観測環境があまり良くないのが問題だ。

今回、チリの様々な天文施設を訪問し、観測環境、地理的条件、現地のサポート体制、長期にわたる維持費の捻出等、改めて遠い外国で、しかも人里はなれた山中に観測機を設置することの困難さを痛感した。それでも大きな夢を与えてくれる貴重な旅であった。

太陽の暖かい光が、澄み渡った青い空を通して地上を照らしています。この青い空のはるか彼方は今、どんな状況なのだろうかと思いをめぐらせることは楽しいものです。近年、世界各地で異常気象による自然災害が多発し、大きな被害が続出しています。地球の温暖化や大気汚染は、地球環境を悪化させ、文明社会に生きる私達人類に警告を発しています。天気予報で「大気の不安定」という言葉を耳にします。大気はもちろん、宇宙空間でも変動が生じていることでしょう。

私は、観測所を訪ねられる方々に、太陽と地球の関係を人間社会の家族関係に例えて説明しています。以前「高性能の観測装置を使って地球のまわりを観測し、得られたデータを調べる事によって大気および宇宙空間の様子を探り、宇宙の天気予報として地球環境に与える影響を報告する研究所です」と説明しましたら、「太陽地球環境研究所は、地球防衛隊の役目をしているのですね」という答えが返ってきたことがあります。

鹿児島観測所では、2ヶ所の観測点でELF/VLF電波観測機器・磁力計・大気光全天カメラなどを用いて、自然電波や標準電波の伝搬変動・地球磁場強度の変

動・夜間大気光波動などのデータを収集しています。全て自動観測ですが、庁舎内でモニタできます。観測維持のためよく観測点へ出かけますが、研究の目的を遂行できるように選んだ場所でも、当地は年間を通して台風や雷など自然の脅威にさらされることが多く、被害や停電の復旧のためハラハラしながら、施設や観測装置の点検・保守に努めています。また、いろいろな種類の動植物が出現するため、鋸や鉋鎌等を必ず持参して周辺の環境整備を行っています。

安定したエネルギーを地球に与え続ける太陽ですが、フレアの発生は異常現象が起こると観測態勢にも熱が入ります。超高層大気・電離圏・磁気圏での擾乱現象がどんな形態で観測されるか注意深く見守ります。太陽と地球の間では、光や太陽風のエネルギーが猛スピードで宇宙空間を通りぬけ、地球をめざして飛んでくる過程で物理・化学反応を起こしていますが、肉眼で確認できないだけに観測することの重要性を強く感じます。太陽系の惑星の中でバリアにより守られている青く輝く星「地球」。この環境を悪化させるようなことは、お互い慎みたいものです。

日高 耕一(鹿児島観測所 技術専門職員)

たらの芽



## 39年間の海外観測を終えるにあたって

西野 正徳（ジオスペース研究センター）

1966年4月、当研究所の前身である名古屋大学空電研究所に赴任しました。そして、その8ヶ月後の12月、南極観測船「ふじ」で南極昭和基地に向けて出発していました。これが私にとって初めての海外観測であり、海外観測をベースにした磁気圏・電離圏研究の始まりでした。南極行きは学生時代からの念願でありましたが、「こんなに早く実現できるなんて」という気持ちでした。出発前の準備期間も少なく、物品購入や、隊員訓練等に時間を費し、十分な勉強もできず、不安一杯の出発でした。現地では超高層電波科学の担当として、ELF/VLF帯電磁放射の観測をしました。高さ20 m、底辺30 mの直交ループアンテナを立てて信号を屋内に導き、高感度の可聴周波数帯のアンプの出力から2チャンネル信号の強度、偏波をペンレコーダや磁気テープに記録します。当時の教科書「宇宙空間の科学」(前田、永田、畑中編)とHarang博士(ノルウェー防衛研究所)の論文のコピーを持って、オーロラを見ながらコーラスやオーロラヒスの自然電波をスピーカで聞き取れた時は、安堵とともに、自然の複雑な仕業(物理現象)に感動しました。この感動が、39年間の「観測による磁気圏・電離圏の研究」を支えてきたことと考えられます。

超高層物理分野における海外観測は、地球規模で展開されるグローバル観測や、特異地域での集中的・多手法な観測に分けられ、これらが有機的につながっていることが重要です。私は後者のスタンスで観測法の開発、データ解析によって研究を進めてきました。展開してきた主な海外観測を以下に簡単に記します。



ネーオルスンに設置されたIRISアンテナ。

1978年の2回目の昭和基地での観測は、IMS(国際磁気圏研究)に呼応した衛星・ロケット-地上の立体同時観測でした。地上観測では、昭和基地から約20 km離れた南極大陸上の2点にテレメータを設置して、3点のオーロラヒス信号の相関解析によるDF(方向探知)を観測しました。越冬隊員の協力が私の学位論文(工学博士)につながりました。

1985 - 1988年には、低緯度のVLF/LF波動現象、特に波動・粒子相互作用解明の研究のため、北海道デッカ局電波(電波航法用の長波帯電波)をオーストラリアの内部砂漠地帯バズビルで受信する地磁気共役電波観測に参加。磁気嵐時の夜間には、磁力線に沿って伝搬する波動の強度が、静穏時に比べ30倍も強くなったり、円偏波に変わる様相を確認できました。

空電研究所が太陽地球環境研究所に改組されて、北極スヴァールバル・ニーオルスンでのイメージングリオメータ(IRIS)の観測を始めました。ポーラカスプ/キャップでのオーロラ粒子降下によって生じる30 MHz銀河電波の電離層吸収現象をイメージで捕らえる観測は、STEP(太陽地球系エネルギー国際共同研究)の一環です。1991年9月、氷河とフィヨルドに囲まれた凍土の上にIRISアンテナを設置。以来2004年8月まで観測を続けることができました。この間、1996 - 1997年には、スヴァールバルと地磁気共役点である南極中国中山基地にIRISを設置するため、中国南極観測隊に参加しました。私にとって3回目の南極観測でした。

IRISを用いたエネルギー粒子降下の観測は、ブラジル南部地域の地磁気異常帯での電離圏擾乱の研究にも生かされるだろうという動機で、拓殖大学と共同で1999年にブラジル・サンタマリアにIRISを設置しました。続いて、チリのプンタアレナスとコンセプションにも設置し、ネットワーク観測に発展させました。今後の観測継続のため、最後の海外観測を本年2 - 3月に予定しています。データ解析は、退職後の楽しみに残しておきたいものです。

39年間の海外観測を振り返ると、国際的・国内的プロジェクトに呼応して、高緯度や、低緯度地域に足を延ばして、「電波」観測を行って来ました。海外観測の実施では、多くの人々から支援されたことに感謝し、また、現地の人々と交流できたことは最も貴重な経験でした。

## STEL ニュースダイジェスト

### 二つの研究集会を名大で同時開催

2004年11月24 - 26日の日程で「第5回宇宙天気 / 気候シンポジウム」が、11月25 - 26日の日程で「中間圏・熱圏・電離圏研究会」が、それぞれ、名古屋大学東山キャンパス内の環境総合館レクチャーホールと豊田講堂第一会議室にて開催されました。当初は別々に計画されていた両研究会ですが、より大きな成果を目指し、上記のような形での同時開催となりました。期間中、合同セッションが企画され、チュートリアルな内容の招待講演が行われました。また、ポスターセッション、懇親会も合同で行われ、広い範囲の研究内容に触れられる有意義な場になりました。参加者数は、両者合わせて120名以上に達しました。

### 「オーロラからのメッセージ」パネル討論会

2004年12月17日、北海道新聞社などとの共催で、パネル討論会「オーロラが教えること」を札幌コンベンションセンターで開催しました。オーロラの魅力を語り合うことはもちろんですが、「オーロラが太陽と地球の微妙なバランスの上に生ずること」の意味について考えようと企画されたものです。このユニークな催しに、400名を超える市民の参加があり、関心の高さをうかがわせました。コーディネーターの前川公美夫北海道新聞社文化部長の巧みな進行のもと、パネリストとして出席した渡邊鉄哉国立天文台教授、津田浩之陸別天体観測所長、渋谷純子朝日カルチャーセンター美術科長、上出洋介当研究所長がそれぞれの経験を通しての意見を述べ、太陽と地球の関係についての討論が行われました。また、飛行機の欠航により出席できなくなった、アーティスト相川七瀬氏からのコメントも紹介されました。「オーロラの動きは何を意味するのか」、「太陽に原因があるのに、なぜオーロラは夜側で強いのか」など、会場からの質問 / コメントも活発でした。

### ニュージーランドで大型光学望遠鏡完成記念式典

2004年12月1日、ニュージーランド南島中央部に位置するテカポで、当研究所の大型光学望遠鏡（口径1.8 m）完成記念式典が、おおよそ160名（日本側20名、ニュージーランド側140名）の出席者のもと盛大に挙行されました。この1.8 m光学望遠鏡は、文部科学省の科学研究費特別推進研究（代表者：村木 綏）により、テカポのMt. John（1030 m）に建てられたものです。この研究目的は、銀河に存在する暗い天体（ダークマター）を見つけることと、銀河中心にある地球型惑星を重力レンズ法で見つけることです。式典では名大平野



完成した望遠鏡と式典出席者ら。

眞一総長の挨拶や、齋藤正樹在ニュージーランド日本国大使の祝辞があり、文部科学省の清水研究振興局長の祝電も披露され、今後の研究に対する期待の大きさがうかがわれました。

## 異動

### 【招聘客員研究員】

- 2005.1.5 - 2005.3.30 客員助教授 Amm, Olaf  
（フィンランド気象研究所 研究員）  
2005.1.11 - 2005.2.8 客員教授 Delcourt, Dominique  
（地球惑星環境研究センター（フランス）  
太陽系プラズマ環境研究部門長）  
2005.2.2 - 2005.5.31 客員教授 Haldoupis, Christos  
（クレタ大学（ギリシア）教授）

### 【事務職員】

- 2005.1.1 死亡  
石濱 三郎（会計掛長）

### 【日本学術振興会特別研究員PD】

- 2005.2.19 辞退  
寺田 直樹（情報通信研究機構へ）

## 編集後記

編集には速報性と正確さを心掛けましたが、「二兎を追う者は一兎をも得ず」にならなかったか心配です。今年度のSTEL Newsletterの出版に関わったすべての皆様に感謝します。（増田智）



監修：小島 正宜

文：水野 亮  
長濱 智生