

# 宇宙地球系物理学研究室

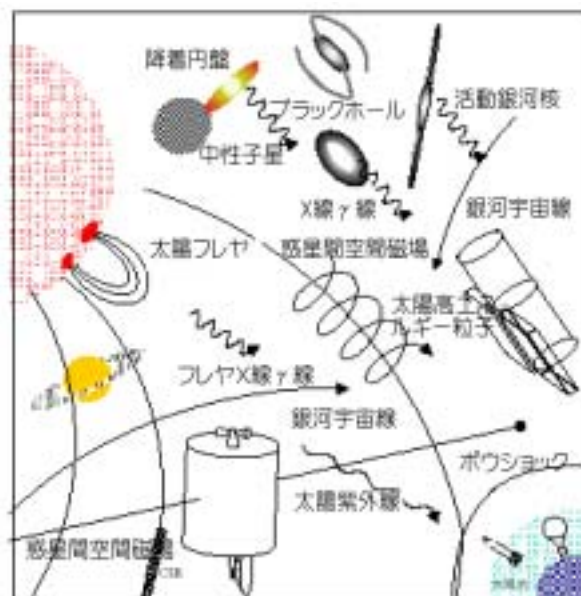
教職員	教授	吉森正人、山本博聖、北本俊二
	助教授	柳町朋樹、平原聖文
	実験技術員	村上浩之、関口宏之、須賀一治
研究員	PD	山本則正
大学院生	前期課程	
	M2	大川洋平、金井淳一、斉藤英昭、高橋尚志、千葉茂人
	M1	佐藤順一、須藤敬輔、星野慎二、渡邊岳史

## 研究室概要

地球は広大な宇宙に浮かび、太陽の周りを巡る宇宙船に例えられる。この地球には、我が銀河系の内外を起源とする電波からガンマ線に及ぶ電磁波や宇宙線と呼ばれるエネルギーの高い粒子が、昼夜を問わず降り注いでいる。そして、太陽からは、電磁波の他に秒速数 100 km にも達する高速のプラズマ流（太陽風）が絶えず吹き付けている。また、時々太陽表面で起こる爆発現象（フレア）により、大量の紫外線やX線、粒子さらには磁気流体衝撃波が地球を襲い、様々な地球物理現象（磁気嵐やオーロラなど）が引き起こされ、人間活動にも影響を及ぼしている。

地球は厚い大気のベールに包まれており、また磁場を持っている為に、宇宙空間からやってくる宇宙線や太陽風さらには太陽面爆発からの強い放射線の大部分が、地球表面にまで侵入できず、我々人類の生命圏が守られている。地球表面には、大気が主役を務め地球環境に大きな関わりを持つ「大気圏」があり、その外側には、地球の大気・磁場と太陽風とが様々な現象を繰り広げる「電離圏」「磁気圏」がある。さらに地球から離れると太陽の勢力圏である「惑星間空間」や「太陽圏」が広がっており、その外には恒星の世界である「星間空間」、さらには無数の銀河が散在する「銀河間空間」が広がる。そこには、太陽に代表されるような普通の星とともに、ブラックホールや中性子星のような特殊な天体等が多種多様な現象を引き起こし、宇宙や銀河の進化に重要な役割を演じている。

宇宙地球系物理学研究室では、ロケットや人工衛星を利用し宇宙空間から、あるいは地上からの様々な観測により、地球上層の大気光、磁気圏プラズマ、太陽面爆発現象、太陽圏粒子・銀河宇宙線、及びブラックホールや中性子星をはじめとする色々な天体の研究を進めており、各研究分野の発展に大きく寄与している。また、これらの観測に利用される装置の開発も同時になされている。本研究室の観測の多くは、宇宙科学研究本部および関連国際協力プロジェクトに参加して行われており、国内外の共同研究として展開されている。



# 高エネルギー太陽物理学

## 太陽活動と地球環境の変動

吉森 正人

2003年10月末から11月初めにかけて太陽面で数十年に一度という超巨大な爆発が発生し、世界中の新聞やテレビ等で大きく報道された。その一例を下記に示すが、アメリカのテキサス州をはじめ日本でもオーロラ現象が観測された。

Kyoto Shimbun 2003.10.29 News

---

### 太陽で爆発現象、30年で最大か 大規模磁気嵐を警告

【ワシントン28日共同＝井田徹治】太陽表面で28日、フレアと呼ばれる大規模な爆発現象が発生、米海洋大気局(NOAA)は地球が激しい磁気嵐に見舞われる可能性があるかと警告した。

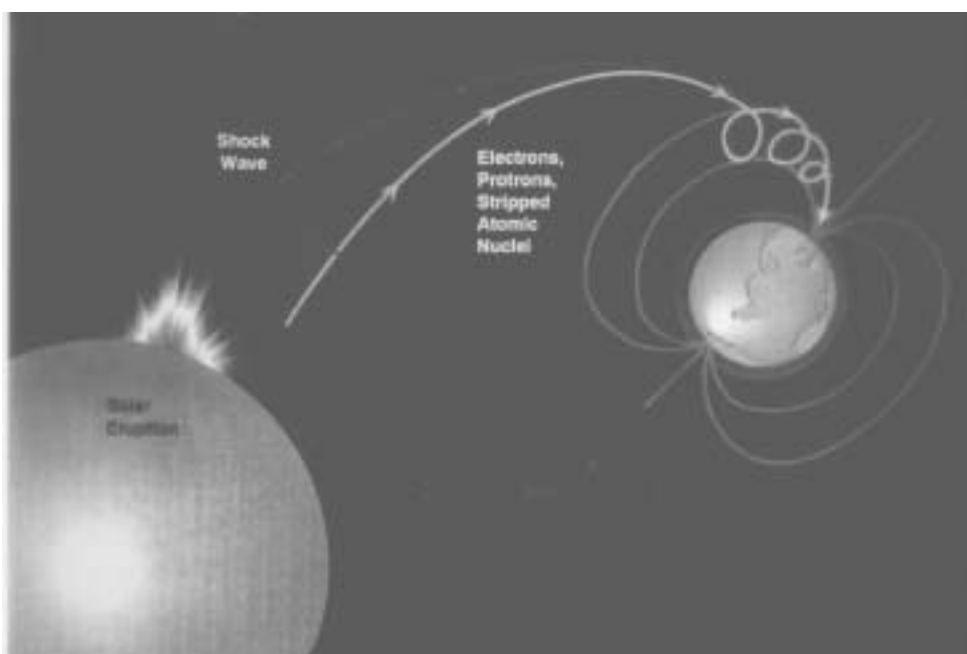
磁気嵐は、フレアで発生した電気を帯びた粒子が地球に到達し電離層を乱す現象。通信や放送の障害、電子機器の誤作動、停電などの原因となるほか、人工衛星が影響を受けることもある。一方、中緯度帯でもオーロラが発生しやすくなる。

太陽表面で観測されるさまざまな活動現象は、黒点磁場に蓄えられたエネルギーがその源泉となっており、ほぼ11年の周期でくりかえし発生することが知られている。特に大規模な活動現象は、フレアと呼ばれており、コロナにおける磁気プラズマの大爆発である。フレアのエネルギーは、1億個の水爆が一度に爆発した際に発生するエネルギーに匹敵するもので、1億5千km離れた地球にも上記の新聞記事に書かれているような様々な影響が出ることがある。

太陽内部ではガスの複雑な対流運動がおこっており、この結果、黒点の磁力線がねじられ、エネルギーが蓄えられる。この蓄積されたエネルギーがある限界値をこえると、丁度、地殻の岩盤(プレート)に蓄えられたひずみのエネルギーが、巨大地震をおこすように、太陽のコロナが大きな爆発をおこす。フレアがおこると、プラズマが数千万度以上の超高温に加熱されたり、数100MeV以上の高エネルギー粒子がつくられる。フレアが発生するメカニズムや粒子の加熱、加速の機構は依然として謎に包まれており、人工衛星「陽光」によるX線やガンマ線の観測データを解析からフレア現象の解明が進められている。

一方、地球環境は基本的には太陽からの光エネルギーと地球大気とのやり取りによって決定されるが、そのメカニズムにはきわめて複雑な物理過程が関係している。最近大きな話題となっている地球温暖化の現象も、長い地球の歴史の中で起こっている自然現象であるのか、あるいは炭酸ガス等の人工的な原因によるものなのか、現在、色々な分野の研究者が協力して解明を進めている。地球環境の変化は、人間を含むすべての生物の生存に関わる大きな問題である。

2002年度より本学の学術フロンティア推進事業の研究テーマとして、太陽活動と関連して地球大気上層で生成する放射性元素 Be-7 の時間変動の観測から、地球大気における成層圏と対流圏にける大気の運動状態を調べている。また同時に地殻中のウランウム等の放射性元素の崩壊核を連続測定し、地球環境を決定している上層大気の動きをモニターし、太陽活動との関連を探っている。



## 論文発表 ( 2 0 0 1 - 2 0 0 3 )

- (1) Energy Content of Accelerated Electrons and Ions in Intense Solar Flares  
M. Yoshimori, H. Hirayama, S. Mori, G.H. Share and R.J. Murphy  
*Adv. Space Res.* 32(12) (2003) 2465.
- (2) Be-7 Nuclei Produced by Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles in the Earth's Atmosphere  
M. Yoshimori, H. Hirayama, S. Mori, K. Sasaki and H. Sakurai  
*Adv. Space Res.* 32(12) (2003) 2691.
- (3) Solar Neutron Event in Association with a Large Solar Flare on 2000 November 24  
K. Watanabe, Y. Muraki, Y. Matsubara, K. Murakami, T. Sako,  
H. Tsuchiya, S. Masuda, M. Yoshimori, N. Ohmori, P. Miranda, N. Martinic,

- R. Ticona, A. Velarde, F. Kakimoto, S. Ogino, Y. Tsunesada, H. Tokuno and Y. Shirasaki  
*Astrophys. J.* 592 (2003) 590.
- (4) Energetics of Nonthermal Electrons and Protons in Intense Solar Flares  
M. Yoshimori, H. Hirayama and S. Mori  
*Proc. 28th International Cosmic Ray Conference 6, (2003) 3191.*
  - (5) Seasonal Variations in Be-7 Radioactivity Measured at Ground Level  
M. Yoshimori, H. Hirayama, S. Mori and K. Sasaki  
*Proc. 28th International Cosmic Ray Conference 7, (2003) 4217.*
  - (6) Production of Be-7 Nuclei in the Earth's Upper Atmosphere from Galactic Cosmic Rays and Solar Energetic Particles  
M. Yoshimori, H. Hirayama and S. Mori  
*Proc. 28th International Cosmic Ray Conference 7, (2003) 4273.*
  - (7) Gamma Rays and Neutrons from a Large Solar Flare on November 6, 1997  
M. Yoshimori, K. Suga, S. Nakayama, H. Takeda, H. Ogawa, R.J. Murphy and G.H. Share  
*Adv. Space Res.* 30 (3), (2002) 629.
  - (8) Characteristics of Yohkoh X-Rays Flares and Charge States of SEP Fe Ions  
M. Yoshimori, K. Suga, S. Nakayama, H. Takeda, H. Ogawa, E. Moebius, M.A. Popecki and D.J. Morris  
*Adv. Space Res.* 30(3), (2002) 623.
  - (9) Impulsive and Extended Acceleration in the 1997 November 6 Flare  
M. Yoshimori, S. Nakayama, H. Takeda, H. Ogawa, R.J. Murphy and G.H. Share  
*Adv. Space Res.* 30(1), (2002) 85.
  - (10) Solar Submillimeter and Gamma-Ray Burst Emission  
P. Kaufmann, J.P. Raulin, A.M. Melo, E. Correia, J.E.R. Costa, C.G. Gimenez de Castro, A.V.R. Silva, M. Yoshimori, H.S. Husdon, W.Q. Gan, D.E. Gary, P.T. Gallagher, H. Levato, A. Marun and M. Rovira  
*Astrophys. J.* 574, (2002) 1059.
  - (11) Intense Gamma-Ray Flare on 6 November, 1997  
M. Yoshimori, H. Ogawa, H. Hirayama, G.H. Share and R.J. Murphy,  
*Multi-Wavelength Observations of Coronal Structures and Dynamics*,  
*ed. P.C. Martens et al. AIP Conference Proceedings, COSPAR Colloquia Series 13,*  
*(2002) 393.*
  - (12) Gamma-Ray Line Observations of the 2000 July 14 Flare and SEP Impact on the Earth  
G.H. Share, R.J. Murphy, A.J. Tylka, R.A. Schwartz, M. Yoshimori, K. Suga, S. Nakayama and H. Takeda  
*Solar Phys.* 204 (2001) 41.
  - (13) Recent Yohkoh Solar Gamma-Ray Observations  
M. Yoshimori, S. Nakayama, H. Takeda, H. Ogawa and S. Masuda  
*Proc. 27th International Cosmic Ray Conference 8 (2001), 3017.*
  - (14) Positron Annihilation Radiation and >10 MeV Gamma Rays From the 1997 November 6 Flare  
M. Yoshimori, S. Nakayama and H. Ogawa  
*Proc. 27th International Cosmic Ray Conference 8, (2001), 3025.*
  - (15) Particle Injection of in the 6 November, 1997 SEP Event: CME, Radio and Gamma-Ray Observations  
E.W. Cliver, A. Falcone, J. Ryan, L.C. Gentile, M.B. Kallenrode, A.G. Ling, M.J. Reiner, O.C. St. Cyr and M. Yoshimori  
*Proc. 27th International Cosmic Ray Conference 8, (2001), 3277.*

## 超高層大気の研究

(山本博聖、関口宏之)

わたしたちは地球に空気があることをあまり認識することなく毎日の生活を送っている。高い山に登ったときに空気が薄い、あるいは天気予報で「冷たい空気が南下してきます」と聞くとときにその存在に気づく。地球大気は窒素分子( $N_2$ )と酸素分子( $O_2$ )を主成分としていて、窒素4酸素1の割合は高度100 kmまでほぼ一定である。これらの主成分と、雨を降らせる水蒸気( $H_2O$ )、温暖化と密接に関連している二酸化炭素( $CO_2$ )や太陽から来る有害な紫外線を防いでいるオゾン( $O_3$ )などを微量成分として地球の大気は構成されている。天気と直接関与している大気は地表から10 kmほどまでで、飛行機が飛行している高度もこのあたりである。さらにずっとはるか上空のスペースシャトルが飛行する高度(ほぼ300 km上空)にもほんのわずかな(地表密度の1千億分の1程度)大気がある。

地球大気の温度は地上から上空に行くに連れて少しずつ下がってゆき、10 km高度(地表と比べて気圧は3分の1、密度は半分)では氷点下50度にも達している。ここから上昇に転じ50 km高度付近(気圧2000分の1、密度1000分の1)で約0度に達したあと、再び高度の上昇とともに下がり、高度約90 kmから100 km領域(気圧100万分の1以下、密度50万分の1以下)では、最も低い温度(氷点下約80度)になる。さらに上空では太陽からの紫外線を吸収する効果で暖められ上昇する。温度構造をもとに、地上から10 km付近までを対流圏(Troposphere)、50 km付近までを成層圏(Stratosphere)、90 km付近までを中間圏(Mesosphere)、その上空を熱圏(Thermosphere)と呼ぶ。

わたしたちの日常生活は対流圏の中に限られているが、わたしたちと地球大気との結びつきについていくつか例を示してみよう。太陽から来る有害な紫外線の大部分を防ぐ役目を果たしているオゾンは成層圏に多く存在していることは、超高層の大気がわたしたちに密接な関連を持っている一つの例である。また、これ以外にも、航空機の飛行高度の10 km付近では、中緯度地域(日本やアメリカ、ヨーロッパ諸国などが位置している領域)においては、年間を通して西風が吹いている。このため日本からアメリカに向かう場合と帰国の場合とでは飛行ルートが同じルートを行き来するのではなく、西風を利用したり避けたり工夫がされている。

高度10 kmから100 km付近を中層大気(Middle Atmosphere)、さらに上層までを含めて超高層大気(Upper Atmosphere)と呼ぶ。成層圏オゾン(Stratospheric Ozone)の役割や、南極領域で発見されたオゾンホール(Ozone Hole)、そして地球温暖化など地球大気はこの数年できわめて身近な存在であることが認識されてきている。

さまざまな手段を用いて地球大気の研究が行われている。地上に観測装置を設置しているいろいろな状況に応じて観測を実施したり、大空を飛行する飛行船や航空機の利用、さらに高度30 km以上に達する気球や、大気をあつという間に通り抜けてしまうロケット、地球を回っている人工衛星やスペースシャトルなどを利用して多種多様な観測が行われている。

わたしたちの研究対象は主として中間圏大気の物理化学過程の解明と地上に到達する太陽紫外線強度の変動である。現在取り組んでいる研究テーマの紹介を以下に述べる。

### (1) メソポーズ領域の大気温度の観測

メソポーズ領域(Mesopause Region)は高度90km付近を指し、大気温度が最も低温の領域にあっている。ただし、最近最低温度領域は100km付近にあるとの研究結果も出され、メソポーズ領域の定義も変わることが考えられる状況にある。この領域においてオゾンと水素原子の反応の結果生まれた水酸基(OH)がかすかな光(OH大気光と呼ぶ)を出している。太陽光はもちろん月明かりでさえもOH大気光よりはるかに明るい。このため月明かりの影響が少ない時期を選んで夜間に観測を行っている。OH大気光は可視域から赤外領域にわたり発光している。わたしたちは近赤外線領域で光るOH(3-1)帯発光を観測対象としている。これまでに夏季に低温冬季に高温を持つ1年変動が観測されていて、地球規模の大きな大気の運動の結果であるとして理解されている。短い時間スケールでも変動し、この原因は対流圏あたりでの小さなスケールの擾乱が上層へ伝播した結果であると解釈されている。

定常の地上観測は池袋キャンパス13号館(東経139.7度、北緯35.7度)ならびにブラジルサンタマリア郊外のサンマルチーニョ観測所(西経53.8度、南緯29.4度)で行っている。ブラジル観測はブラジル宇宙科学研究所(INPE)との協力で進めている。

定常の地上観測にあわせて2004年1月には鹿児島内之浦ロケットセンターにおいて、ロケット搭載機器による大気観測とタイアップした地上観測を実施した。この総合大気観測はWAVE2004と名づけられ、今後その結果の解析が進められる予定である。

### (2) 太陽紫外線強度の地上観測

太陽紫外線はA領域(波長320nmから400nm)、B領域(280nmから320nm)そしてC領域(190nmから280nm)と分類されている。成層圏オゾンによりUV-Cは完全に大気中で吸収され、地表には届かない。一方UV-Aはオゾン吸収はほとんど効かない。地表に到達し、かつ生物への影響が大きいUV-Bがオゾン全量変動と大きくかかわっている。

池袋とサンマルチーニョの両地点でUV-A、UV-Bそして290nmから400nmの分光測定を実施している。大気オゾン変動を意味する太陽紫外線強度の長期変動を知ることが目的としている。また、UV-AとUV-Bの強度比からオゾン全量が求められることを利用してオゾン全量の変動も求めている。

### (3) 大気温度観測装置の開発

従来から用いてきている観測装置にあわせて新たな装置の開発も適宜進めている。2004年1月の鹿児島での観測では新たに開発したTilting Filter Photometerを用いた。近赤外線領域でのこの種の観測装置はわたしたちの装置が初めての試みである。

#### 最近の発表論文

The Wave2000 campaign: Overview and preliminary results

Iwagami,N, T.Shibasaki, T.Suzuki, Y.Yamada, H.Ohnishi, Y.Takahashi, H.Yamamoto,

H.Sekiguchi, K.Mori, Y.Sano, M.Kubota, M.Murayama, M.Ishii, K-I. Oyama, R.Yoshimura, M.Shimomai, Y.Koizumi, K.Shiokawa, N.Takegawa and T.Nakamura  
J.Atmos.Solar-Terr.Phys., **64**, 1095-1104, 2002.

#### OH 回転温度の観測

山本博聖、森一博、佐野好香、関口宏之、牧野忠男  
宇宙科学研究所報告, **42**, 57-62, 2001.

Rocket observation of the near infrared airglow emission in the auroral region,

Yamamoto, H. Y.Matsuo, H.Sekiguchi, T.Makino and H.Takahashi

6<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 1999.

Mesospheric nitric oxide and ozone measurements in polar winter at 69 ° N

Iwagami, N. H.Yamamoto, H.Sekiguchi, T.Watanabe, K.Suzuki and K.Shibasaki

Adv.Space Sci., **24**, 1665-1668, 1999.

#### 最近の学会発表

WAVE 2004 初期結果

岩上直幹、山本博聖他

(第18回大気圏シンポジウム、2004年2月、宇宙科学研究所)

WAVE 2004 (大気光波状構造キャンペーン2004) 地上観測の概要と初期結果

久保田実、山本博聖、関口宏之他

Seasonal variation of the OH rotational temperature at Sao Martinho (29.4S), Brazil,

Yamamoto, H., M.Wada, H.Sekiguchi, H.Takahashi and N.J.Schuch,

3<sup>rd</sup> PSMOS Int. Symp., Brazil, Oct.2003

ブラジルでのメソポーズ温度の観測

山本博聖、和田正彦、関口宏之、H.Takahashi

(第16回大気圏シンポジウム、2002年3月、宇宙科学研究所)

## X線による天体の研究 (北本、山本(PD)、大川、金井、千葉(M2)、佐藤、須藤、渡邊(M1))

宇宙には地上では到底達成できないような、超強重力場、超強磁場、超高放射場あるいは、超高温、超低温、超高密度、超高真空等のいろいろな極限的な環境が存在する。それら極限状態でどのような物理現象が繰り広げられているのか研究する事は、現在宇宙物理学の一つの課題である。この研究室では、中性子星や、ブラックホールといった特殊な天体とその周りで起こっている現象、それから、星等の周りの高温プラズマを研究している。

中性子星は半径が10 km程度であるのに、質量は太陽と同程度である大変小さく重い星である。その中性子星に物質が降り積もると、大きな位置エネルギーが開放され、高温となりX線で明るく輝く。中性子星には1兆ガウスもの磁場を持つものがあり、そこでは物質は磁場により磁極に集中して降り積もる。そのため、特に磁極がX線で明るく輝く。中性子星が自転しており、地球のように自転軸と磁軸がずれていれば、明るくX線で輝く磁極は見え隠れする。そのような中性子星を観測すると、X線強度が自転の周期で変動し「X線パルサー」と呼ばれることになる。磁場の弱い中性子星では、降り積もった物質が爆発的な核融合反応を起こすことがある。それは「X線バースト」と呼ばれる。ブラックホールに物質が落ちてゆくと、やはり位置エネルギーが開放されて、高温になりX線で明るく輝く。しかし、最終的には物質はブラックホールに吸い込まれてしまう。あるいは、一部の物質は宇宙ジェットとして再び星間空間に吹き飛ばされる。このように、中心にブラックホールがある天体と中性子星がある天体を観測すればなんらかの違いがあるはずである。その違いはX線のエネルギースペクトルであり、X線の時間変動であろう。研究室では、そのような考えでいろいろなブラックホール候補星と中性子星であると考えられる天体をX線で観測し、極限環境でどのような物理現象が起こっているのか理解し、ブラックホールの証拠を掴もうといろいろな研究を続けている。

また、我々銀河系の外にある銀河の中には、X線や電波等で特に明るい中心核を持つ活動的な銀河がある。クエーサー、BL Lac天体、セイファート銀河と呼ばれる物がそうである。これらの中心核は活動銀河核(AGN)と呼ばれる。活動銀河核の中心には太陽の百万倍から数億倍の質量をもつ巨大なブラックホールが存在すると考えられている。さらに、これら活動銀河核の多くは宇宙ジェットと呼ばれる現象を示している。宇宙ジェットとは相対論的な速度に加速され、まさにジェット噴射のようにたいへん方向が揃ったまま細く絞られたプラズマの流れである。しかしながら、いかにして相対論的にまでプラズマを加速できるのか、どうして方向が揃った美しいジェットが作られるのか、あるいは、そもそもプラズマは陽子電子なのか陽電子電子なのか、といういろいろな基本的な問題がわかっていない。この宇宙ジェットの問題に観測的にメスをいれる事、そして、活動銀河核に潜むブラックホールの存在の観測的証拠を掴みたいと考えている。

通常の星もX線を放射している。特に大質量の星は比較的強いX線源である。それにもかかわらず、どのような機構でX線が放射されているのか未だに分かっていない。このような問題を解決するために、星からのX線放射の研究も続けている。

X線による天体観測は主に人工衛星により行う。研究室では、人工衛星によ



って取得したデータを解析することにより、天体の研究を進める。また、人工衛星に搭載することを目標として観測装置の開発も行う。最高の研究をするためには、最高の観測装置で観測することが必要である。従って、研究室での具体的な研究は次の二つを平行して行っていく予定である。

#### (1)人工衛星による X 線天体の観測的研究

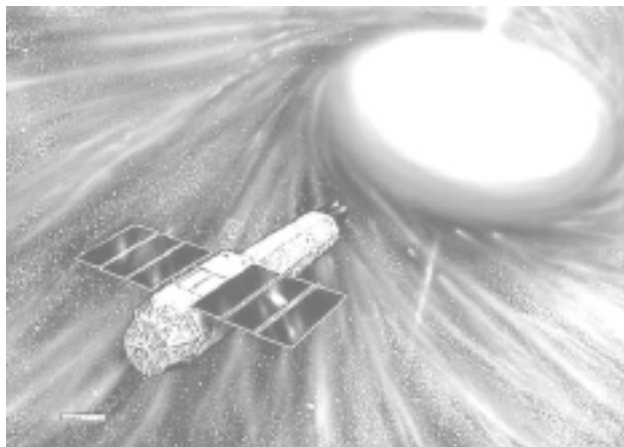
日本はこれまで、「はくちょう」「てんま」「ぎんが」「あすか」と4つのX線観測衛星を打ち上げ、X線による天体の観測的な研究で世界をリードしてきた。研究室でも「あすか」や、米国の衛星「チャンドラ衛星」「RXTE 衛星」のデータの解析を進めている。さらにヨーロッパの「ニュートン衛星」の解析もできるよう研究室の設備の整備を行う予定である。

X線星の長期的な強度変動の研究も進めている。「ぎんが」衛星には全天モニター装置が搭載されており、100個以上のX線天体に対して4年半にわたるモニターデータが蓄積された。さらに米国の「RXTE」衛星の全天モニター装置のデータを組み合わせることにより、全体で10年以上にもわたる長期の強度変動のデータを作ることができる。これら貴重なデータを解析することにより、X線星の爆発現象や、いまだに機構が明らかでない長期の周期現象の研究を進めている。

#### (2)観測装置の開発研究

2005年2月に宇宙科学研究所から打ち上げる予定である「ASTRO-E2」衛星のCCDカメラ(XIS)は、立教大学、大阪大学、京都大学、工学院大学、愛媛大学、MITそして宇宙科学研究所のチームで開発している。現在打ち上げに向けて、CCDカメラの試験、較正実験を進めている。そこでは、チーム間の共同の作業として、宇宙科学研究所を始めとして各研究機関へ出向いて実験を行う。また、較正実験では、高エネルギー研究所のフォトンファクトリー等での実験も含まれる。

研究室では、将来はブラックホールを観測的に「見てみたい」という夢がある。その夢に向かって、観測装置の開発研究を進めている。その一つは、究極のX線望遠鏡の開発研究である。X線は波長が短いので、小さい望遠鏡でも高角度分解能が達成できる。現在のX線望遠鏡の角度分解能はどれも原理的な限界にはほど遠いものである。それは、X線光学系の精度が不足していることが理由である。そこで、X線光学系の精度を追求することにより、格段に優れた角分解能を有するX線望遠鏡を開発する。これを X-ray milli-arc-sec (X-mas) Project と呼んでいる。そのための光学実験と、X線実験を織り交ぜて、試行錯誤を続けていく予定である。そこでは、宇宙科学研究所での、長尺X線ビームラインでの実験も予定している。



2005年打ち上げ予定のX線天文衛星ASTRO-E2  
(宇宙科学研究所提供)

## 2003年度のグループの発表論文

"Soft X-ray transmission of optical blocking filters for the X-ray CCD cameras onboard Astro E-2" *S. Kitamoto et al. 2003, NIMA, 205, 683-687*

"Development of an ultrahigh-precision x-ray telescope with an adaptive optics system" *S. Kitamoto et al. 2003, in Proc. of "Emerging Lithographic Technologies VII", SPIE, V5037, p294, Santa Clara, California, USA*

"X-ray Line Profile of Early Type Stars", *Kitamoto et al. 2003, in Proc. of "X-ray and Radio Emission of Young Stars", p.114*

"Diagnostics of the X-ray Emission Mechanism with Line Profile Observed with Chandra", *Yamamoto et al. 2003, in Proc. of "X-ray and Radio Emission of Young Stars", p122*

"Soft X-ray Transmission of Optical Blocking Filters for the X-Ray CCD Camera onboard Astro E2" *Kitamoto et al. 2003, In Proc of "Optics for EUV, X-Ray and Gamma-Ray Astronomy", SPIE 5168, p376*

"Development of an Ultra-High Precision X-Ray Optics" *Kitamoto et al. 2003, In Proc of "Astronomical Adaptive Optics System and Applications", SPIE 5169, p268*

"RXTE Observation of Centaurus X-3", *T. Kohmura, and S. Kitamoto, 2003, Proceedings of "Pulsars, AXPs, and SGRs observed with BeppoSAX and Other Observatories", 23-25, Sept, 2002, Marsala, 237-240*

放射光を使った原子物理と天体物理との接点～原子イオンの光電離実験～ 2002,放射光,4,19-28,山岡人志,大浦正樹,北本俊二

Energy Spectra and Normalized Power Spectral Densities of X-ray Nova GS2000+25, *K Terada, S. Kitamoto, H. Negoro and S. Iga (2002, PASJ, 54, 609-627)*

A novel method to estimate the thickness of the depletion layer of an X-ray CCD, *H. Awaki, K. Tachibana, Y. Tamai, K. Yamamoto, S. Kitamoto and M. Tsujimoto (2002, NIM A, 495, 232-239)*

Super-orbital Period Variations in the X-ray Pulsar LMC X-4, *B. Paul, S. Kitamoto (2002, JapA, 23, 33-36)*

Long-term X-ray Variability and State Transition of GX 339-4 *A.K.H. Kong, P.A. Charles, E. Kuulkers and S. Kitamoto (2002, MNRAS, 329, 588-596)*

Delayed Iron Lines in Centaurus X-3, *T. Kohmura, S. Kitamoto and K. Torii (2001, ApJ, 562, 943-949)*

Temporal and Spectral Variations of the Superposed Shot as Causes of Power Spectral Densities and Hard X-ray Time Lags of Cygnus X-1, *H. Negoro, S. Kitamoto and S. Mineshige (2001, ApJ, 554, 528-533)*

「あすか」が見た星形成領域と若い星, *北本俊二 (日本物理学会誌. 56. 12. 2001. p905-908)*

A 168-s X-ray Pulsar in the SMC Observed with ASCA, *J. Yokogawa., K. Torii., T. Kohmura., and K. Koyama., 2001, PASJ, 53, 9*

ASCA Identification of SMC X-2 with the 2.37-s Pulsation Discovered with RXTE, *J. Yokogawa., K. Torii., Kohmura, T., and K. Koyama. 2001, PASJ, 53, 227*

## その他の最近3年間の著書等

世界星座早見 2003 三省堂 日本天文学会編(共著)

X線天文学で学ぶ物理の世界 (CD-ROM), 2002. メディア教育開発センター, 北本俊二著

2003年度 国際学会発表 6件

2003年度 国内学会発表 12件

## 宇宙粒子線による太陽系・銀河系の研究（柳町・高橋）

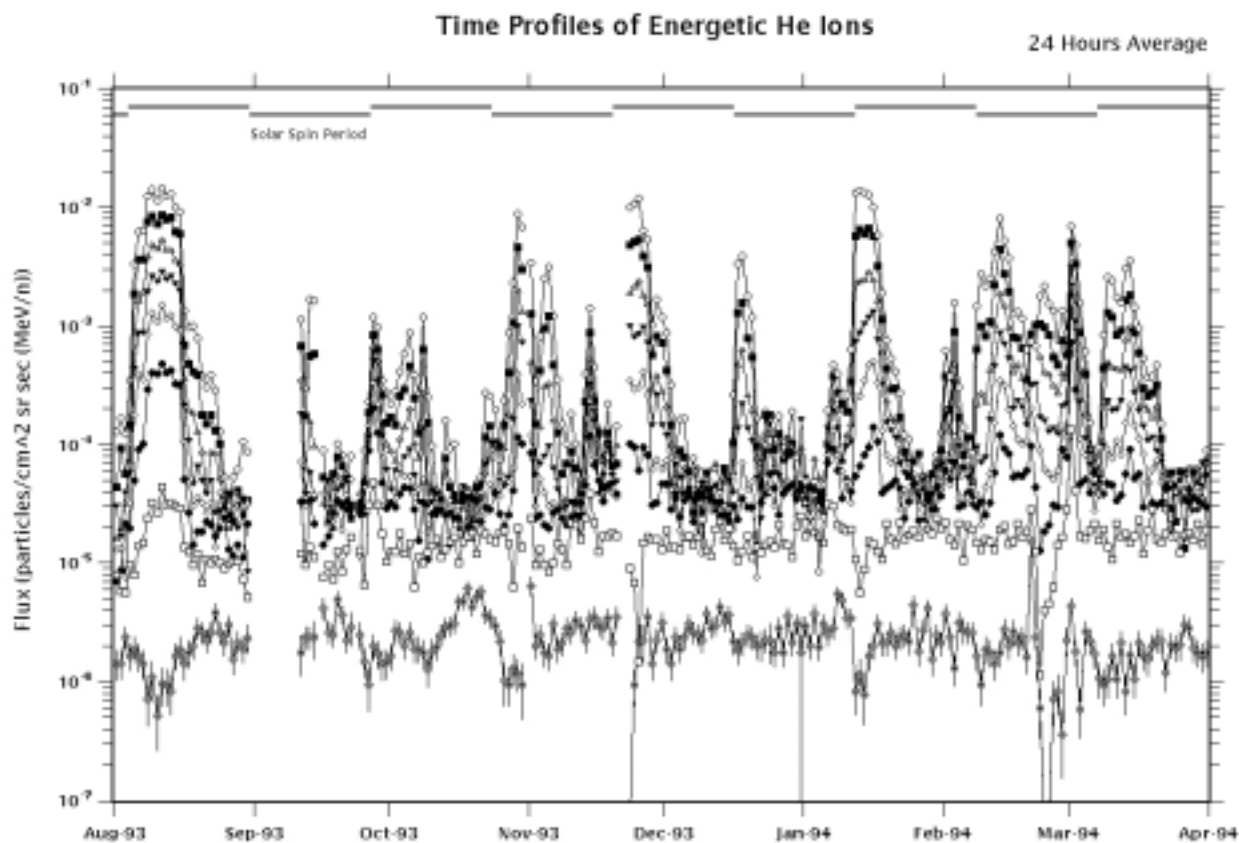
宇宙空間を超高速で飛び回っている原子核　宇宙粒子線の化学組成，同位体およびエネルギー・スペクトルの測定は，その起源，元素合成プロセス，加速過程，伝播機構などを解明する上で非常に大きな鍵を握っている。

現在までに測定された宇宙線の最高エネルギーは， $10^{20}$  エレクトロンボルト(eV)すなわち 10 ジュール(J)を越えている。このように高エネルギーの原子核が私たちに衝突すれば，甚大なダメージを与えないではないはずだが，そのために怪我をしたとか障害が発生した等ということがないのは，地球が幾重ものバリアーに守られているためである。運動する荷電粒子は磁場から力を受けて進路を曲げられるが，地球が存在する太陽圏には，太陽から吹き出す太陽風と呼ばれるプラズマの流れによって太陽表面から引き出された惑星間磁場が存在し，太陽圏の外側から侵入する比較的エネルギーの低い宇宙線は，進路を曲げられ地球が位置する太陽圏の中心付近まで達することができない。それでも地球の近くまで侵入してきた高エネルギーの宇宙線の多くは，地球自身が持つ磁場　地球磁場に妨げられて地表まで降り注いでくることはない。この第 2 のバリアーも突破できるようなよりエネルギーの高い宇宙線から最後に私たちを守ってくれるものは，地球の大気である。水に換算すると 10m もの厚さの大気中に突入した宇宙線は，大気を構成する原子核と衝突して破壊される。もちろん破壊された後の残存物の中には地表まで到達するものもあるが，それらは分厚い大気を通過することができたもの，言い換えれば大気中の物質との相互作用が極めて小さいものであるから，人体にも何の影響も及ぼさずに貫通してしまう。

磁場を伴う 2 つのバリアー領域は，外から侵入してくる粒子を阻止する一方，その内部で運動する粒子に磁場の強さに応じた様々な影響を与えており，それぞれの領域特有の現象を出現している。地球磁場はそこに衝突してくる太陽風プラズマとの相互作用により，明確な境界が形成され地球磁気圏という領域を作り出している。この領域では，そこに取り込まれた太陽風プラズマ粒子やイオン化された地球大気を構成する原子が，磁気圏の磁場との相互作用によって運動エネルギーが  $10^3$  から  $10^5$  eV 程度まで加速される。

また，常に秒速 400～500km 程度の外向きの太陽風が吹いている太陽圏では，ときどき秒速 600～700km に達する高速の太陽風が吹き出して前面の低速太陽風を圧縮し，この圧縮が十分成長する太陽・地球間の 2～4 倍の距離のところ，低・高速太陽風の境界面で衝撃波が形成される。この領域では，やはり磁場との相互作用によってイオン化された原子が  $10^7$  eV 程度のエネルギーまで加速されている。低・高速太陽風が吹き出す太陽表面上の位置は，ある程度の期間固定されている。したがって，粒子加速が生じている衝撃波領域は，太陽の自転とともに約 27 日周期で太陽の周りを回転することになるため，この領域は共回転相互作用領域と呼ばれている。この領域で加速された粒子を地球を周回する人工衛星で観測すると，やはり 27 日周期で高エネルギー粒子の増加が見られることになる。

下図は，1993年8月からの8ヶ月間に渡って GEOTAIL 衛星で観測された He イオンの強度変化を示している(最下段の強度が大きく変化していないデータは酸素イオンである)。図中の上下に分かれた実線は，低・高速太陽風の境界面が地球を通過した 1994年3月7日の10時を基点とした太陽自転周期を表している。多少ずれているところもあるが，線分の切れ目を始点として He イオン強度が増加していることがわかる。



星間空間と呼ばれる太陽圏の外に存在するイオン化されていない中性原子は、惑星間磁場に妨げられることなく太陽圏の奥深くまで入り込み、太陽の紫外線や太陽風プラズマ粒子との衝突によってイオン化され、 $10^8$  eV 程度のエネルギーまで太陽圏内部で加速されて宇宙線異常成分として観測されている。

太陽圏の外側には星間空間と一言で呼ばれる空間が、銀河系の縁まで広がっている。星間空間の大部分は、 $1\text{cm}^3$  あたり水素原子核が 1 個存在する程度の太陽圏よりも希薄な空間であるが、そこは超新星の爆発が起きたり、その名残りである大規模な磁場の擾乱が存在する大変活動的な場でもある。このような領域でイオンは  $10$  の  $10$  数乗 eV のエネルギーまで加速され、およそ 1 千万年に渡って銀河系の大規模な磁場に閉じ込められている。

現在われわれは、1992 年に NASA の協力を得て打ち上げられた、宇宙科学研究所の人工衛星 GEOTAIL による観測データの解析に力を注いでいる。この衛星には他大学との共同研究により開発した 4 種類の検出器が搭載されており、地球磁気圏粒子から銀河宇宙線までの広いエネルギー範囲にわたる宇宙粒子線の観測を行っている。これらの観測データの解析から銀河宇宙線の伝播機構、宇宙線異常成分、太陽高エネルギー粒子の加速・伝播機構、磁気圏プラズマの振る舞い、太陽風や太陽高エネルギー粒子と地球磁場との相互作用等の研究が進行中である。

日本の宇宙科学研究所によって 2000 年に打ち上げられた火星探査衛星には、私たちが開発した検出器が搭載され、磁場が極めて弱い火星における太陽風と火星大気との相互作用を探る研究を期した。しかし、昨年 12 月に衛星を火星周回軌道へ投入することができなかったことは、非常に残念である。また、月周回衛星に宇宙粒子線検出器を搭載し、銀河宇宙線、太陽高エネルギー粒子あるいは太陽圏で加速された粒子の観測や、スペースシャトルを利用した通常の熱核融合反応では

生成されない鉄より重い宇宙線の観測等の計画が進められている。

### 最近の発表論文

1. Observation of galactic cosmic ray particles by the HEP-HI telescope on the geotail satellite  
T.Doke, N.Hasebe, T.Hayashi, K.Itsumi, J.Kikuchi, M.N.Kobayashi, K.Kondoh, H.Shirai, T.Takashima, T.Takehana, Y.Yamada, T.Yanagimachi and J.Yashiro,  
Adv. Spece Res., **23**, 487(1999)
2. The Correlation Between CIR Ion Intensity and Solar Wind Speed at 1 AU  
Kobayashi, M.N., Doke, T., Kikuchi, J., Hayashi, T., Itsumi, K., Takashima, T., Takehana, N., Shirai, H., Yashiro, J., Hasebe, N., Kondoh, K., Yanagimachi, T., Nagatani, M., Harada, A. and Willken, B.  
Adv. Space Res., **26**, 861(2000)
3. Electron and ion spectrometer onboard the Nozomi spacecraft and its initial results in interplanetary space  
Ihara, A., Doke, T., Hasebe, N., Kikuchi, J., Kobayashi, M.N., Maezawa, K., Nagata, K., Sakaguchi, T., Shino, T., Takashima, T., Teruhi, S., Wilken, B. and Yanagimachi, T.,  
Astroparticle Phys., **17**, 263(2002)
4. 1994年3月のCIRイベント  
柳町朋樹  
宇宙放射線, **3**, 115(2002)

### 口頭発表

1. GEOTAIL 衛星による銀河宇宙線の観測  
柳町朋樹  
STE 研究集会「宇宙線で探る太陽圏空間」, 2001年1月, 名古屋大学
2. 1994年3月のCIRイベント  
柳町朋樹  
STE 研究集会「宇宙線で探る太陽圏空間」, 2002年1月, 名古屋大学

# 惑星周辺の宇宙空間プラズマの実験的・解析的研究

## 地球・惑星磁気圏と惑星間空間の飛翔体による直接探査

平原 聖文、 齊藤 英昭(M2)、 星野 慎二(M1)

太陽コロナから加速され流れ出す太陽風は地球にとっては超音速のプラズマ流である。その平均速度は秒速400km程度であり、1~10個/cc程度のプロトン・電子が主成分である。この太陽風が磁気(双極子型の地球固有磁場)の壁で守られた地球超高層大気領域(磁気圏・電離圏)に吹き付けた時、様々な電磁場・プラズマ現象が起こる(図1)。これらの幾つかは、スペースシャトルやスペースステーションの乗組員だけでなく、地上にいる我々でも実際に体験したり、時には驚異・脅威となる場合がある。例えば、北極圏・南極圏ではオーロラ現象(写真1)が見られたり、極地方の電離圏を流れるオーロラ電流により様々な地上設備に誘導電流が発生し、変電設備の故障、大停電や原油・天然ガスのパイプラインの破損・腐食、等が引き起こされる。

地球近傍の宇宙空間で起こっている現象は実に興味深いものであり、また、宇宙の99.9%以上を満たす宇宙プラズマの普遍的な素過程そのものである。例えば、超音速の流体(太陽風)中に障害物(地球磁場)があるのだから、地球を取り囲む様に衝撃波が生成される。衝撃波通過時に太陽風は減速され、流れの方向が地球磁気圏を避ける様になる。この時、減少した運動エネルギーは内部エネルギー(熱エネルギー)へと変換される。この辺りで起こっている現象は、磁化プラズマの天然の実験室として格好の研究対象であるが、まだ地球磁気圏外なので地上からはほとんど探知出来ないし影響もないので、人工衛星等を使った直接観測が主流である。宇宙プラズマ中の衝撃波の物理は、昨今の高エネルギー天文学でも重要視され広い分野で理論的・観測的研究が進んでいるが、プラズマダイナミクスを直接観測出来る地球・惑星近傍での我々の衛星観測計画は、極めて有効な手法といえる。

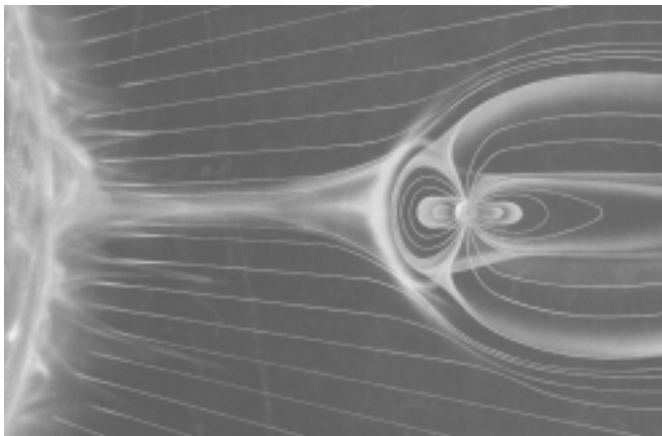


図1: 地球近傍の宇宙空間プラズマの概念図  
太陽(左)から吹き出す太陽風と地球磁気圏(右)



写真1: 幾重にも折り重なったオーロラの例

衝撃波を通過した太陽風の一部は地球磁気圏の外側境界層へと吹き付ける。しかし、太陽風は荷電粒子の集合体であるため地球磁場をたやすくは横切れない。ローレンツ力のため磁力線の周りにくると向きを変えられるからである。従って、磁気圏境界層では、吹き付ける太陽風の圧力(動圧)と地球磁場の磁気圧が「せめぎ合い」、それらがつり合う事で磁気圏の形がほぼ決定される。それら以外にも、太陽風プラズマは太陽面から延びる磁力線を運んでくるし、内部(熱)エネルギーもあるので、それらも境界層を変形させる圧力となる。また、地球磁気圏内にも太陽風ほど密度は高くないものの、より高温(数千万度)の磁気圏プラズマが存在し、地球磁場と共に太陽風からの圧力を支えている。

それでは、磁気圏境界層では太陽風と地球磁気圏との圧力が均衡し太陽風は跳ね返されるだけか、という磁場中での宇宙プラズマの振る舞いはそれほど単純ではない。太陽風が運ぶ惑星間空間磁場と地球固有磁場の関係を見てみよう(図2)。それらは太陽風が境界層にぶつかる前はつながってはいない。しかし、境界面に押し寄せた後(図2の1、1')、そこで太陽風磁場と地球磁場が「せめぎ合い」を続けるよりは、お互いの磁力線がつなぎ換わり、拮抗している領域から一緒になって押し出される方がプラズマや磁力管の輸送には都合がよい(図2の2)。この状況は、お互いの磁場の方向がほぼ反対方向を向いている場合に起こりやすく、「磁力線の再結合(リコネクション)」と呼ばれている。最近では太陽フレアやより遠くの天文現象でも同じ原理が働いていると考えられる様になってきた。

この様に、地球磁気圏境界層で太陽風磁場と地球磁場がいったん再結合されてしまうと、太陽風はその磁力線に沿って地球磁気圏の昼間側から夜側の磁気圏尾部領域へと進入出来る様になる(図2の5)。このプラズマの振る舞いは、小川に置かれた小石周辺の水の流れとよく似ている。その結果、太陽風プラズマは地球夜側の磁気圏へとため込まれる。この領域はプラズマシートと呼ばれ、熱いプラズマの貯蔵庫となっている。

プラズマシート中の高温プラズマはその後様々な過程・領域を経る。一部は地球双極子磁場の磁力線に沿って地球極域に降り込み、華麗なオーロラ発光現象(写真 1)を見せてくれる。他の一部は数 MeV 程度まで加速され、気象・放送・通信などの分野で使われる人工衛星の電子回路に悪影響を及ぼす。またあるものは地球磁気圏内に蓄積し切れないほど大きなエネルギーをもたらすので、磁気圏尾部で磁気圏磁場同士の再結合を起こし(図 2 の 6、6')、熱いプラズマを含んだ磁力線を丸ごと太陽風領域へと放出する事で磁気圏全体のエネルギー収支のバランスを維持する。この際に地上ではオーロラが現れたり、電磁場が乱れるのが観測される。

この様なダイナミックな太陽風・磁気圏プラズマの物理機構を調べるため、我々はプラズマ観測器を始め、高エネルギー粒子観測器、磁場・電場計測器、プラズマ波動観測器を開発し、1989 年に EXOS-D(あけぼの)衛星を、1992 年に日米共同プロジェクトとして Geotail 衛星を打ち上げ、観測を続けている。因みに、地球電離圏から上層の地球大気・磁場の勢力圏を exosphere(外圏)、地球夜側に伸びる細長い磁気圏を geotail(地球の尾)と一般に呼んでいる。この様な大規模な観測計画は、日本だけでなく米国・欧州・ロシア等と国際共同体制で行われており、International Solar-Terrestrial Physics Program(ISTP)による科学探査人工衛星群が打ち上げられ研究されている(図 3)。

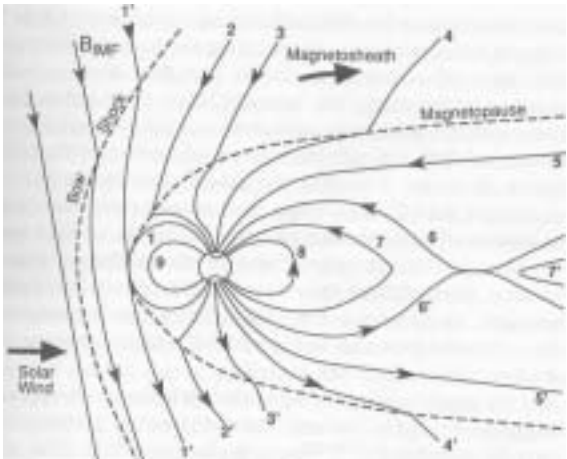


図 2: 磁気圏前面(1)と尾部(6)での磁力線の再結合

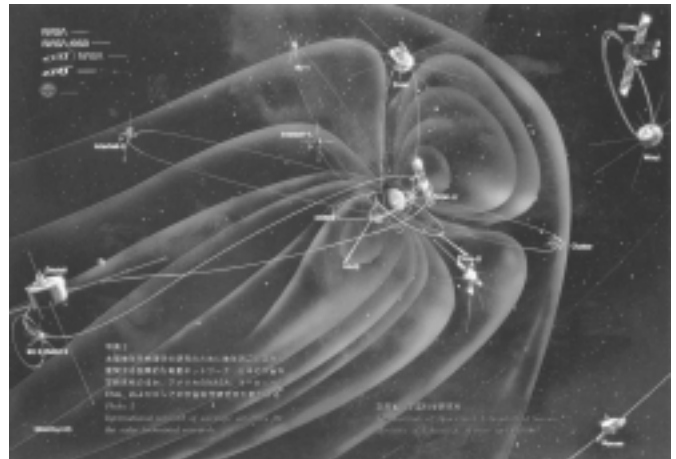


図 3: ISTP の科学探査人工衛星群

次に、地球から見えるプラズマ現象として、極域でのオーロラを考えてみよう。オーロラ発光は、プラズマシートから地球向きに大規模な静電場で加速されて降り込んでくる電子が、高度 100km の電離圏下部に達するまでに地球大気原子・分子と衝突を繰り返し、それらを励起・発光させる事で説明される。ここで、電子が地球方向に静電場で加速されるなら、地球電離圏に豊富に存在する水素・酸素やヘリウムなどの正イオンは同じ電場により反対方向にプラズマシートへと加速され地球の重力圏を脱出している事が予想される。実際、地球大気は太陽光で電離されイオンとなった後、極地方ではオーロラ電子と逆向きに地球から大量に逃げ出している事が、やはり衛星観測で明らかにされつつある。

さて、アラスカやカナダ北部、スカンジナビアで観光客の目を楽しませるオーロラとそれを光らせる電子の微細な空間分布・構造を解明するために、我々の研究グループでは小型の人工衛星計画が進行中である。この衛星は INDEX 衛星と呼ばれ(図 4)、宇宙航空研究開発機構の H-IIA ロケットにより、他の大型衛星と一緒に 2004 年度に打ち上げられる予定である。理学観測機器開発の中心となっているのは、立教大学、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部、国立極地研究所、それに東北大学である。

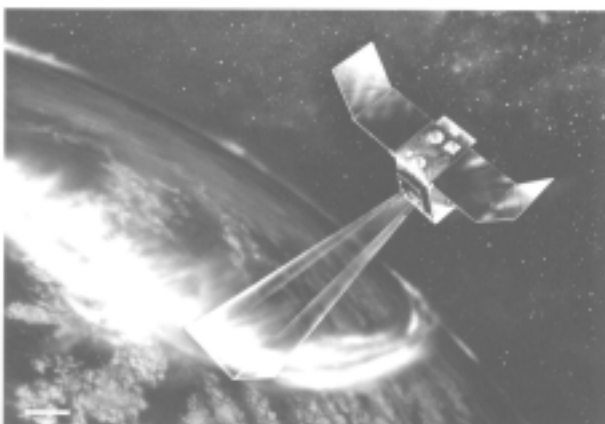


図 4: 軌道上でオーロラ観測中の INDEX 衛星の想像図

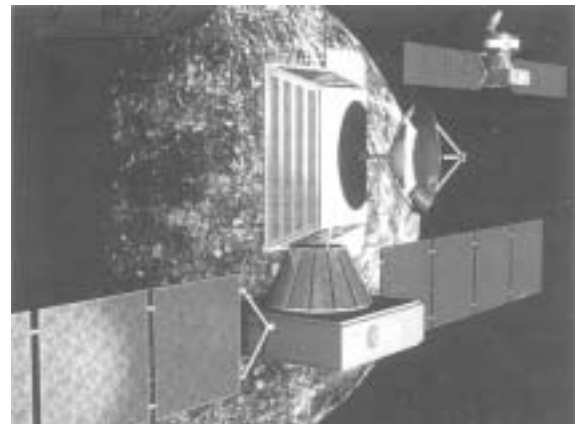


図 5: 日欧共同の水星探査機の想像図

この様な太陽風と惑星との相互作用は、磁場がない、あるいは弱い惑星の場合は一体どうなるのだろうか？ また、固有磁場はあるが濃い大気がない惑星の場合はどうであろうか。これらはそれぞれ金星・火星の場合と

水星の場合に当てはまる疑問である。現在、日本でも宇宙科学研究所が中心となって様々な惑星探査計画が進行中である。日本初の火星探査衛星 Planet-B(のぞみ)衛星は、1998年に鹿児島県内之浦町の宇宙空間観測所から宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の M-V ロケットにより打ち上げられたが、残念ながら火星周回軌道に投入される事が出来なかった。しかし、太陽風と火星上層大気との相互作用を調べる宇宙プラズマ物理学、更には惑星大気進化の視点からも火星探査の継続は重要であり、現在、米国・欧州が精力的に探査計画を実施している。日本も今後の新しい火星探査の可能性を議論する必要があるだろう。その他に、以下の通り、将来の科学探査人工衛星計画も数多く計画され、他惑星や月へと研究対象を広げつつある。

1. ヨーロッパ宇宙機構(ESA)の水星探査計画(BepiColombo 計画: 図 5)への協力として、2011~2012年に打ち上げを目指し日本で計画中の水星磁気圏探査衛星(Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO)
2. 2009年頃打ち上げ予定である日本独自の金星気候探査衛星(Planet-C)
3. 2005~2006年打ち上げ予定の月周回探査衛星 SELENE

我々の研究グループは、これまでの探査衛星計画での観測器開発・データ解析の経験を活かし、水星・金星や月、それに将来は木星などへも探査機を送り込む事を考えており、21世紀の科学研究のフロンティアを開拓しつつある。この様な国際的大規模プロジェクトに代表される我々の研究体制は立教大学、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部(神奈川県相模原市)や国立極地研究所(板橋区)、東京大学、京都大学、東北大学、九州大学、東京工業大学、名古屋大学、早稲田大学などと共同で行われており、その研究内容は、衛星計画の立案・観測機器の開発・データ解析・モデリング・数値シミュレーション等に代表される。特に宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部は、国立大学・私立大学を問わず一般の学部生・院生に広く門戸を開けており、立教大学からも衛星計画に参加出来る。宇宙科学に関連した卒業研究や修士・博士課程での研究に興味があり、「好奇心」と「体力」と「知力」、それに「やる気」を持った人が、衛星搭載用観測器の設計・試作・開発やデータ解析・モデリングに取り組むのを期待している。

## 最近の国際学会・研究会での口頭・ポスター発表

Plasma bulk oscillations with multiple ion components: Geotail observations in the dawnside and duskside regions in the near-Earth magnetosphere, M. Hirahara, K. Seki, Y. Saito, T. Mukai, American Geophysical Union, 2001 Spring Meeting, Boston.

The INDEX mission: A Japanese micro-satellite for exploring small-scale auroral properties, M. Hirahara, T. Sakanoi, K. Asamura, M. Okada, Y. Kasaba, Y. Saito, M. Ejiri, S. Okano, T. Mukai, H. Saito, 2002 34<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Houston.

Oscillating multi-composition signatures of ionospheric-origin cold ions observed in the equatorial magnetosphere near the Geotail perigee, M. Hirahara, K. Seki, Y. Saito, T. Mukai, 2002 COSPAR Colloquium, Sagami-hara.

Periodic Enhancements of Cold Ion Components and the Causal Pc 5 Waves Observed by Geotail in the Near-Earth Magnetosphere, M. Hirahara, K. Seki, Y. Saito, 2003 Chapman Conference, Helsinki.

## 最近の発表論文・寄稿文

極域オーロラ発光現象の微細構造と宇宙プラズマの静電加速機構: オーロラ構造とオーロラ発光粒子のミクロな関係, 平原 聖文, 静電気学会誌(特集解説), 25, 2001.

On atmospheric loss of oxygen ions from Earth through magnetospheric processes, K. Seki, R. C. Elphic, M. Hirahara, T. Terasawa, T. Mukai, Science, 291, 2001.

探査衛星による宇宙・惑星プラズマの直接観測、平原 聖文、ISAS ニュース(研究紹介)、宇宙科学研究所、2001年度11月号。

A new perspective on plasma supply mechanisms to the magnetotail from a statistical comparison of dayside mirroring O<sup>+</sup> at low altitudes with lobe/mantle beams, K. Seki, R. C. Elphic, M. F. Thomsen, J. Bonnell, J. P. McFadden, E. J. Lund, M. Hirahara, T. Terasawa, T. Mukai, J. Geophys. Res., 107(A4), 2002.

Cold ions in the hot plasma sheet of Earth's magnetotail, K. Seki, M. Hirahara, M. Hoshino, T. Terasawa, R. C. Elphic, Y. Saito, T. Mukai, H. Hayakawa, H. Kojima, H. Matsumoto, Nature, 422(6932), 2003.

Periodic emergence of multicomposition cold ions modulated by geomagnetic field line oscillations in the near-Earth magnetosphere, M. Hirahara, K. Seki, Y. Saito, T. Mukai, J. Geophys. Res., in press, 2004.