

高校生のページ

科学衛星による宇宙の電磁環境探査

生存圏研究所 宇宙圏電磁環境探査分野
小嶋 浩嗣、上田 義勝

1. 宇宙プラズマ大気

太陽系宇宙空間は気体で満たされています。この気体は電気を帯びているもので、これを宇宙プラズマと呼びます。プラズマというのは、その気体を構成している成分の原子において、プラスとマイナスがばらばらになった状態のことをいいます。遠目にみると一見、中性気体なのですが、なかみは、プラスの電気をもつ粒子（イオン）とマイナスの電気をもつ粒子（電子）が、ばらばらに動いている状態です。このような状態は宇宙だけではなく、みなさんのスマートフォンの中に使われている半導体というデバイスの中身も実はプラズマ状態になっています。

ところで、宇宙プラズマには、大きく分けて二種類のものがあります。

太陽風プラズマ

惑星大気プラズマ

です。

「太陽風プラズマ」、というのは、文字通り、太陽から吹いてくるプラズマの流れです。太陽の大気が宇宙空間に流れ出しているものです。その流れのスピードたるや、地球付近まできても、まだ、秒速500kmくらいもあります。もっとも、その密度は薄くて、個数で、 1cm^3 あたり、数個ある程度です。太陽から噴出した大気はそれなりの濃さがありますが、太陽系全方位に向かってひろがっていくので、どんどん薄くなっていくわけです。太陽風プラズマの中身のほとんどはプロトン（水素イオン H^+ ）と電子です。このような太陽風プラズマが惑星と惑星の間の宇宙空間を満たしているということになり、そういう意味では、「太陽系は太陽大気の中にあり」、と、いってもいいのかもしれないですね。

一方、「惑星大気プラズマ」というのは、もともと中性大気である惑星の大気上層部が、太陽からの紫外線などのエネルギーによって、イオンと電子に引き裂かれてしまい（これを電離といいます）、ばらばらになってプラズマ状態になったものをいいます。地球にもこれはあって、古くから電離層と呼ばれているものです。高度1000kmくらいまであります。国際宇宙ステーションの高度400km程度なので、この電離層の中を飛んでいることになり、そこはまだ広い意味で地球の大気の内側ということになります。「な～んだ、まだ、地球の大気中なのか」と、思わないで下さい。人類がここまで進出できたその

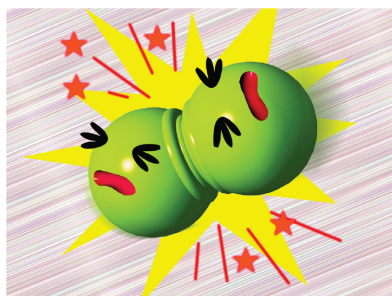


図1：衝突する場合.

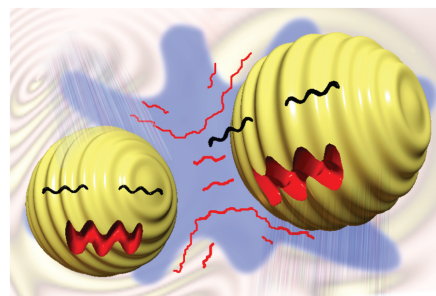


図2：無衝突の場合.

過程には、非常に多くの人々の膨大なエネルギーが投入されているのです。それに電離層も立派な宇宙プラズマです。密度はさすがに濃くて、高度にもよりますが、 1cm^3 あたり、100万個以上あるところもあります。これでも地上の空気の数密度よりはずっと薄いですが。

電離層プラズマは古くから、「通信」に利用されてきました。高度100kmくらいから存在するこの宇宙プラズマの層は、短波帯の電波を反射するため、これと地表との反射を組み合わせ、地球の裏側とも通信することが可能となります。現在もこの手法で通信している放送局もありますが、通信衛星の発達により国際通信は宇宙を経由する衛星通信が主役となりました。京都大学工学部の電気電子工学科と深い関わりがある私達ですが、電気関係の学科で宇宙の研究を行ってきた理由の一つは、宇宙プラズマを通信に利用していたことに端を発しています。

さて、国際宇宙ステーションは、地球の大気中でも、その電離している部分である宇宙プラズマ中を飛翔しています。その中で生活している人は惑星大気プラズマに囲まれて生活しています。一方、感動の帰還を果たした、日本の探査機はやぶさは、太陽風プラズマ中をずっと航行して地球にもどってきたことになります。宇宙はこのように、電離した気体、つまりプラズマによって満たされています。地上で中性大気である空気が引き起こす現象は、宇宙では、希薄なプラズマによる現象に置き換えられます。難しくいうと、これらの現象を記述する方程式系が、中性気体のものから電離気体となるプラズマのものに変わることになるわけです。

2. 無衝突プラズマとプラズマ波動

宇宙空間プラズマは、無衝突状態にあります。これは、どういうことかということ、プラズマを構成しているイオンや電子は、めったに衝突しない、ということです。パチンコ球を想像してもらえるとわかりやすいですが、ひとつのパチンコ球を転がして、停止している別のパチンコ球に衝突させると、エネルギーや運動量を交換して、止まっていた方も動き始めます。宇宙プラズマ中では、プラズマを構成する粒子どうしが、パチンコ球のように衝突してエネルギーや運動量を交換しないのです（図1と2）。どれくらい衝突しないか、というと、太陽風プラズマだと、太陽を出発してから地球に到達するまでに1回衝突するかどうか、という程度です。

では、宇宙プラズマの粒子たちは、エネルギーを得たり、失ったりせずに一定な速度で運動しつづけているのでしょうか。答えはノーです。宇宙プラズマの粒子（イオン、電子）は、衝突でエネルギーを交換するのではなく、「電波」によってエネルギーを交換しています。この電波が、プラズマ波動です。つまり、ある粒子のエネルギーがプラズマ波動に変換され、そのプラズマ波動のエネルギーが別の粒子に伝えられる、という感じです。

この過程は、ちょうどアイドルさんの握手会に似ています。図3にあるように、アイドルさんを電

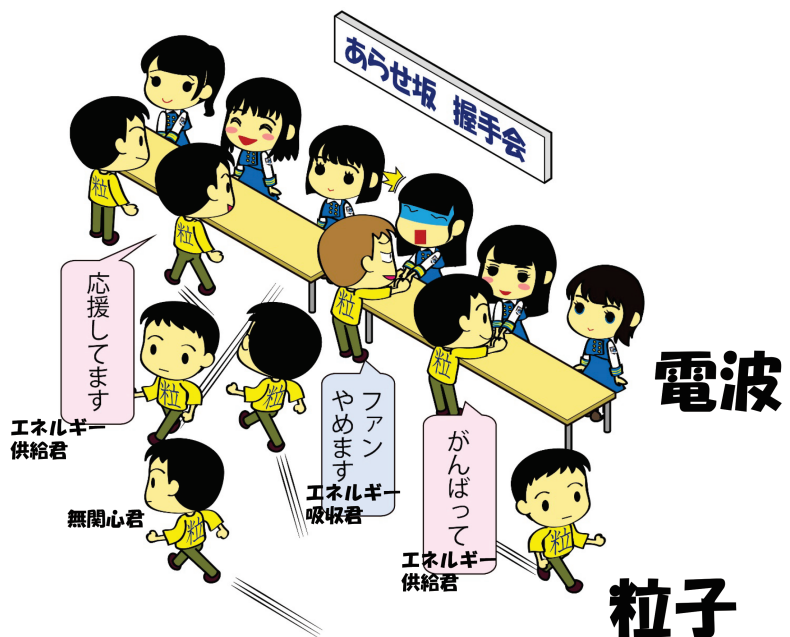


図3：アイドルさんの握手会は電子と電波のエネルギーのやりとりに似ています（イラスト：熨斗千華子さん）。

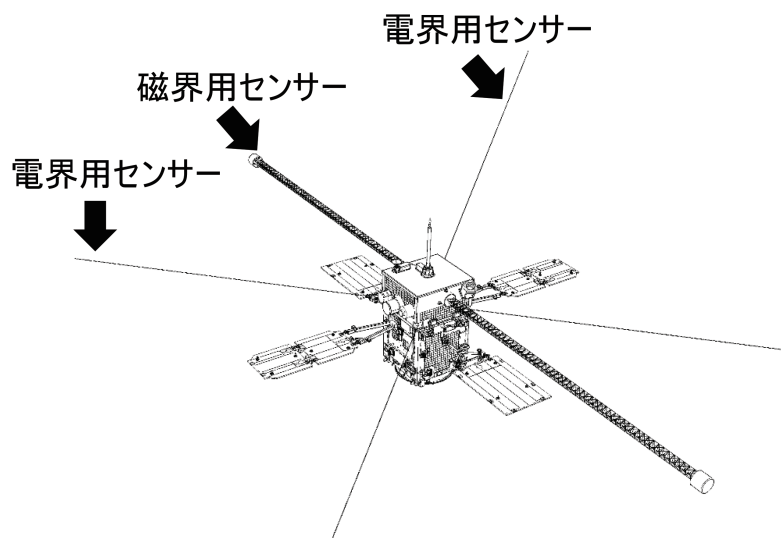


図4：日本の科学衛星「Arase」（2016年12月打ち上げ）。地球の放射線帯を観測しており、その中でプラズマ波動観測は高いエネルギーの電子をつくりだす波動の解析など重要な役割を担っている（©JAXA）。

るのです。この環境のことを私達は、宇宙電磁環境と呼んでいます。

3. プラズマ波動の衛星による観測

粒子からエネルギーをもらい、それを他の粒子にあたえる、つまり、プラズマ波動は宇宙プラズマ中におけるエネルギーの伝搬媒体としての役割をもっています。ですので、このプラズマ波動を観測すると、そこで生起している物理現象について解析を行うことができます。科学衛星に搭載してこのプラズマ波動を観測する装置が、「プラズマ波動観測器」です。実は、京都大学工学部の電気電子工学科は、このプラズマ波動観測の日本における草分けになります。日本の科学衛星打ち上げ開始当時よりプラズマ波動観測器の開発とそのデータ解析を行ってきています。これから述べる Arase 衛星や MIO 衛星のプラズマ波動観測器も、生存圏研究所の実験室で試験をして完成させてきました。

図4は2016年に打ち上げられた我が国の衛星「Arase」です。この衛星は地球放射線帯の成因とそのダイナミックな変動の理解のために、打ち上げられました。この衛星にもプラズマ波動観測器（責任者：笠原禎也 金沢大・教授（京大・電気工学・1991年修士修了））が搭載されています。図4がその外観です。プラズマ波動観測器そのものは、高精度なラジオ受信器のようなものです。一方、プラズマ波動を捉えるセンサーには、大きく二種類あります。一つは、直交した線のように伸びている2組のアンテナです。これは、端から端まで、30mあります。この長いセンサーで、プラズマ波動の電界成分を捉えます。一方、磁界については、5mのマストと呼ばれる腕の先端に取り付けられたサーチコイルで捉えます。これは、衛星から離れた位置にセンサーがあるのは、衛星から放射される電磁ノイズの影響を受けないようにするためです。

ではこの衛星で観測されたプラズマ波動はどんなのでしょうか。図5がその一例です。これはコーラスと呼ばれるプラズマ波動現象です。横軸が時間で、単位は「秒」です。縦軸は、周波数で、単位はヘルツです。表示されているのは、周波数スペクトルの時間変化で、短い時間で周波数が上昇する現象が続いているのがわかると思います。周波数は、1kHz から 1.5kHz くらいなのでこれは人間の可聴周波数帯です。もちろん電波であるプラズマ波動を直接耳で聞くことはできませんが、この電波の波形を音の振動にそのままおしてやると、「ぴゅん、ぴゅん」という音として聞くことができます。なので、コー

波（プラズマ波動）、粒子をファンとすると、ある粒子はアイドルさんを励ましてエネルギーをあたえ、ある粒子は、アイドルさんに悪口を言ってエネルギーを奪っています。また、アイドルさんにはまったく関心をもたないで、走り去るファンもいれば、次々と違うアイドルさんにエネルギーをわたしていくファンもあります。このような過程を、専門用語で、「波動粒子相互作用」といいます。宇宙空間を満たしている電気を帯びたプラズマ大気、そしてそのなかで発生している波動粒子相互作用が、エネルギーを移動させ、また、その環境に大きな影響を与えている

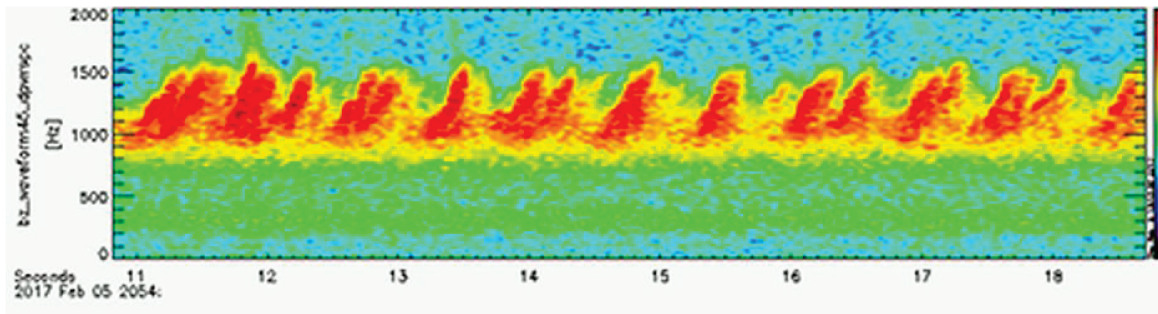


図5：Arase衛星で観測されたコーラス現象のスペクトル。縦軸は周波数（単位はヘルツ）、横軸は時間（単位は秒）（Arase衛星プラズマ波動チーム提供）。

ラスという名前がつけられました。この現象そのものは以前から知られていましたが、実は、このコーラス現象が、地球の放射線帯の高エネルギー電子をつくったり、消滅させたりしていると考えられてきており、Arase衛星に搭載されたプラズマ波動観測器が担っている大きな役割は、この考えを観測によって明らかにすることです。すでに観測は3年を迎えており、プラズマ波動が放射線帯の高エネルギー電子をコントロールしている多くの観測的証拠がみつきつつあります。このコーラス現象ですが、波形でみると、どうみえるかという、別の日のデータですが図6のようになっています。きれいな振幅変調のかかった波動です。まるで人間が変調器をつかってつくった波形のようですが、正真正銘自然現象そのままを図にしたものです。電気電子工学的にみると、振幅変調ですが私たちの研究分野ではこれを空間的な変化と捉えている人たちもいます。

4. 水星へ

宇宙電磁環境の探査は地球周辺だけに限りません。2018年10月20日に、日欧共同水星探査衛星BepiColomboが南米仏領ギアナから打ち上げられました。このミッションはJAXAとESAが初めて共同で取り組んだミッションで、衛星2機から構成されます。水星に到着してから分離してそれぞれの観測を行うのですが、2機のうち1機を日本が開発し、MIOと名付けられました（図7）。このMIOにも日欧共同で開発したプラズマ波動観測器が搭載されています（責任者：笠羽康正 東北大・教授（京大・電気工学・1997年博士修了））。Arase衛星同様、30mの長い電界センサーとサーチコイルでプラズマ波動を捉えます。水星は太陽に一番近い惑星ですから、温度環境が厳しく、衛星の側面には太陽や水星からのエネルギーを取り込まないように鏡が貼られています。私達のプラズマ波動観測器もこのような水星周辺の厳しい環境で動作するように設計されています。太陽系惑星周辺でのプラズマ波動観測はほとんどがアメリカが一番乗りされているのですが、水星だけはプラズマ波動の観測がこれまで行われた

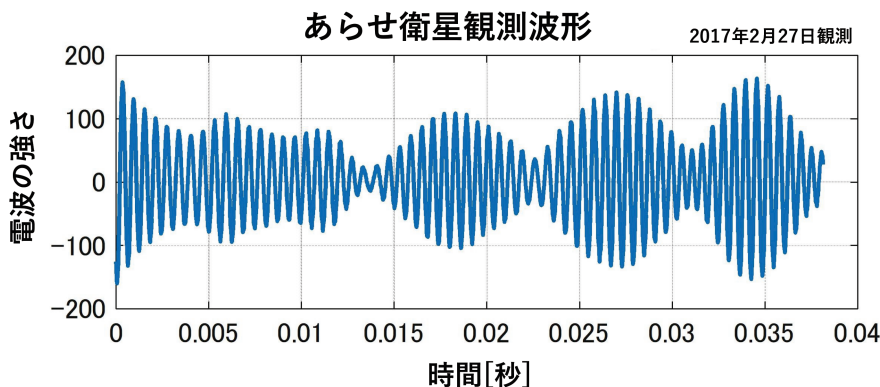


図6：Arase衛星に搭載されたプラズマ波動観測器で観測された放射線帯で発生している電波の波形。



図7：日欧共同水星磁気圏探査衛星 BepiColombo MIO (2018年10月打ち上げ (イラスト：池下章裕氏、提供：JAXA))。

ことはなく、無事に到着して観測できれば史上初の観測データが得られます。しかし、MIOが水星に到着するまで、あと6年かかります(2025年12月到着予定)。つまり、今、高校生の皆さんが、まさに大学生になって、卒業論文や修士論文に取り組む頃になります。その時、世界初のプラズマ波動データを送ってくるMIOは、どんな水星周辺の電磁環境の様子を示してくれるでしょうか。そしてこれから参加してくれる若い人達がどのような成果をあげてくれるか楽しみです。MIOは今も、水星を目指した軌道を飛翔しています。